

# AUTOMAATIOPÄIVÄT AUTOMATION DAYS 2023

28.-29.3.2023 CROWNE PLAZA HELSINKI

Automaatio ja koneoppiminen  
vihreän siirtymän mahdollistajina

# Automaatiopäivät 2023 Automation Days 2023

28.-29.3.2023, Crowne Plaza, Helsinki

## Extended Abstracts

© 2023 Suomen Automaatioseura ry (SAS) – Finnish Society of Automation (FSA)

Asemapäällikönkatu 12 B, 00520 Helsinki, Finland  
[www.automaatioseura.fi](http://www.automaatioseura.fi), [office@automaatioseura.fi](mailto:office@automaatioseura.fi), 050 4006624

ISBN 13 978-952-5183-62-7



**SUOMEN AUTOMAATIOSEURA RY**  
FINNISH SOCIETY OF AUTOMATION

## Preface

This volume contains the papers presented at AP/AD 2023: Automaatiopäivät - Automation Days 2023 held on March 28-29, 2023 in Helsinki. Each submission was reviewed by at least 2, and on the average 2.1, program committee members. Taken together, the papers give a broad overview of recent developments of automation technology in manufacturing, mobile machinery, process industries and the energy industry. The conference has examined this scope from three important perspectives: research, industrial practice and education.

May 23, 2023  
Helsinki

Seppo Sierla  
David Hästbacka

## Table of Contents

Identification of paper machine process models using MLBS excitation signal .....	1
<i>Lauri Arasalo, Veli-Pekka Pyrhönen and Matti Vilkkö</i>	
Test Applications for OPC UA PubSub Communication .....	3
<i>Jouni Aro</i>	
Fiber Fabrication based on Pulling Velocity and Hardening Force Control .....	5
<i>Houari Bettahar and Quan Zhou</i>	
Mechanistic AI: physics-driven machine learning .....	7
<i>Alexander Bor and Alexey Zakharov</i>	
Etälaboraatiot automaation oppimisen keskiössä .....	8
<i>Jaakko Etto and Heikki Isometsä</i>	
Automaation elinkaari osana oppimista .....	11
<i>Jaakko Etto, Heikki Isometsä and Jukka Hietamäki</i>	
Asumisen microgrid - nanogrid testiympäristöt .....	14
<i>Jaakko Etto, Jussi Suopajärvi, Jouko Juustovaara and Jukka Leinonen</i>	
Älykkään sähköverkon käytön optimointi ja digitaalinen mallinnus .....	17
<i>Kurki Heikki, Ville Valima and Tero Hietanen</i>	
A Low Voltage Flexo Actuator – preliminary design, test and kinematic models .....	19
<i>Tapio Heikkilä, Terho Kololuoma, Markku Suomalainen and Minna Kehusmaa</i>	
Predicting the electricity consumption of Finland .....	20
<i>Eppu Heilimo, Janne Alatalo and Mika Rantonen</i>	
Modelling for Multi-objective Optimization in a District Heating Network .....	22
<i>Petri Hietaharju, Esko Juuso, Jari Ruuska and Mika Ruusunen</i>	
Subsurface drainage and irrigation automation for cultivated land groundwater management .....	24
<i>Enso Ikonen, Janne Torvela, Minna Törmälä, Jyrki Savela, Mika Pylvänäinen, Joni Vasara and Toni Liedes</i>	
Laserkeilauksesta ja fotogrammetriasta pistepilveksi .....	26
<i>Ari Isokangas, Outi Ruusunen and Mika Ruusunen</i>	
Työkoneiden datankeruun käytännön ongelmia .....	28
<i>Antti Jaatinen</i>	
Communication Approach and Framework for Distributed Path Planning Optimization of Industrial Vehicles .....	31
<i>Petri Kannisto, Teijo Juntunen, Robert Heikkilä, Matti Vilkkö and David Hästbacka</i>	
Primary frequency control with an air handling unit .....	33
<i>Niko Karhula, Seppo Sierla, Heikki Ihasalo, Jaakko Ketomäki, Matti Huotari and Valeriy Vyatkin</i>	

Tekoälykoulutus Suomessa – kokemuksia Datasta tekoälyyn koulutusohjelmasta Kajaanin ammattikorkeakoulussa.....	36
<i>Tommi Kauppinen, Taneli Rantaharju and Pekka Huttunen</i>	
Visualisation, Representation and Interoperation of Digital Twins with Open-Source Software Frameworks.....	38
<i>Markus Kelanti, Henri Bomström, Sarthak Acharya, Oskar Wintercorn, Jan Van Deventer and Tero Päivärinta</i>	
Development of learning environment for agricultural automation.....	40
<i>Antti Lajunen, Animesh Kumar, Niila-Sakari Keijälä, Julius Pietarinen and Klaus Kivekäs</i>	
Broadband Methods for Battery Management Systems: Online Impedance Analysis .....	42
<i>Leevi Lignell, Minh Tran and Tomi Roinila</i>	
Vety osana tulevaisuuden energiajärjestelmää.....	44
<i>Yrjö Majanne, Arttu Virtanen and Matti Vilkkö</i>	
Autonomous mobile machines in mines and 5G enabled safety principles.....	46
<i>Timo Malm, Daniel Pakkala and Eetu Heikkilä</i>	
Towards Low Emission Combustion Control in Marine Applications .....	48
<i>Amin Modabberian, Xiaguo Storm, Aneesh Vasudev, Kai Zenger and Maciej Mikulski</i>	
Matching automation technology education with the green transition needs.....	50
<i>Merja Mäkelä and Seppo Immonen</i>	
Monitoring of process control performance for a more sustainable production .....	52
<i>Teemu Pätsi, Markku Ohenoja, Harri Kukkasniemi, Tero Vuolio, Petri Österberg, Seppo Merikoski, Henry Joutsijoki and Mika Ruusunen</i>	
Prosessiautomaation innovaatioalusta .....	54
<i>Outi Rask, Jari Seppälä, Susanna Aromaa, Antti Tammela and Antti Vääänen</i>	
Direct Force Control of a Robot in Contact with an Uneven Surface .....	56
<i>Antonio Rosales and Tapio Heikkilä</i>	
Digital Twin of Food Supply Chain .....	58
<i>Tuomo Sipola, Tero Kokkonen, Markku Puura, Kalle-Eemeli Riuttanen, Kari Pitkänieni, Elina Juutilainen and Teemu Kontio</i>	
Effects of Ramp Rate Limit on Sizing of Energy Storage System for PV-Wind Power System.....	60
<i>Micke Talvi, Tomi Roinila and Kari Lappalainen</i>	
Lämmön- ja sähköntuotannon optimoinnin ja kulutusjouoston koulutusympäristö.....	63
<i>Manne Tervaskanto and Tero Hietanen</i>	
Towards automated tram systems – risk analysis case studies.....	65
<i>Risto Tiisanen, Eetu Heikkilä, Tero Välisalo and Timo Malm</i>	
Simulating Moisture Content and Flow of Sawdust in a Storage Silo with Cellular Automata.....	67
<i>Tero Vuolio, Markku Ohenoja, Petri Österberg and Mika Ruusunen</i>	

Maantieteellisesti hajautettuja DCS-ympäristöjä .....	69
<i>Antti Välimäki, Outi Rask, Jari Seppälä, Tero Hietanen, Ari Kuisma and Timo Heikkinen</i>	
Parameter optimization for low-rank matrix recovery in hyperspectral imaging.....	72
<i>Monika Wolfmayr</i>	
Tiny machine learning for fault detection.....	74
<i>Mikhail Zolotukhin, Riku Immonen, Pyry Kotilainen and Timo Hämäläinen</i>	

Lauri Arasalo\*, Veli-Pekka Pyrhönen, and Matti Vilkkö

# Identification of paper machine process models using MLBS excitation signal

**Keywords:** MLBS, Identification, Simulation, Estimation, Process Modelling

\*Corresponding Author: Lauri Arasalo: Tampere University (Master's Student), E-mail: lauri.arasalo@valmet.com

Veli-Pekka Pyrhönen: Tampere University, E-mail: veli-pekka.pyrhonen@tuni.fi

Matti Vilkkö: Tampere University, E-mail: matti.vilkkö@tuni.fi

## 1 Introduction

Paper machines are complex applications of process industry which are typically controlled by model predictive controllers (MPC). The MPC predicts the output of the process by using process models that describe the interactions between the control variable and the desired manipulated variable. Typically, these models are identified by making step changes to the system, which are commonly known as bump tests. Sometimes these tests fail to give a response good enough for the identification due to disturbances or other interactions between the process variables. So, there is a need for an alternative way of identifying the models.

This paper studies a method of using a Maximum Length Binary Sequence (MLBS) in the identification of low-order transfer function models such as FOTD (First-Order Time Delay) and SOTD (Second-Order Time Delay). MLBS is a deterministic periodic broadband excitation signal which can be used to estimate the frequency response of the studied system. The estimated frequency response specifically called empirical transfer function estimate (ETF) can then be used in a curve fitting problem. Low-order transfer function model's frequency response is fitted to the ETF by minimizing error function between the two. In the context of process industry, the amplitude of the signal is important factor when running the tests and the fine part of using MLBS signal is its relatively small amplitude, which in theory would not disturb the process significantly during the identification.

## 2 Aims of the study

This study's aim is to find out if MLBS excitation signal is applicable in the context of paper machines and process industry. The second goal is finding general principles needed in the generation of proper MLBS excitation signal. The paper also studies how well MLBS signal handles different disturbances and how their effect could be compensated with data handling techniques.

## 3 Materials and methods

MLBS is an excitation signal which has power on a frequency band, which can be designed by a set of parameters. Because MLBS is a deterministic excitation signal, the tests conducted with it are replicable. Figure 1 shows MLBS excitation signal in time and frequency domain.

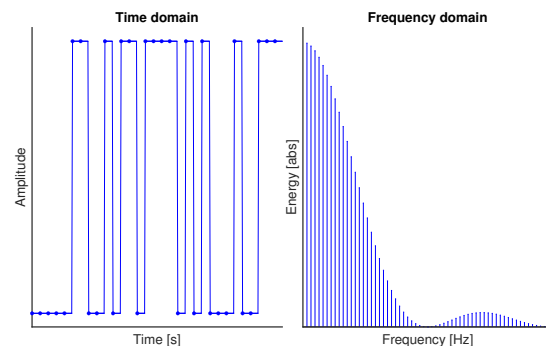


Fig. 1. MLBS excitation signal in time and frequency domain

The signal is generated by a logic circuit called the shift register and the signal can be generated online or offline. Even though the name suggests that the signal is binary, it can also change between any other two values. It is common to choose the signal levels so that the signal has close to zero mean value.

The transfer function models of FOTD and SOTD are given by equations 1 and 2

$$G_{\text{FOTD}} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-ds}, \quad (1)$$

$$G_{\text{SOTD}} = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-ds}, \quad (2)$$

where  $K \neq 0$  is the DC gain,  $\tau > 0$  is the time constant and  $d > 0$  is the time delay. Both models have poles at the negative real axis and the models' step responses are monotonic.

The aims of this study are pursued through by identifying the low-order transfer function models from simulated process data. A simulator capable of simulating linear low-order systems with disturbances has been implemented in MathWorks' Simulink. To estimate the systems frequency response, MLBS excitation signal is generated and used to perturb the desired system. The collected data is used for the calculation of ETFE and then the low-order transfer function model parameters are calculated by minimizing a fit error between the model and ETFE. The minimization is performed by using Levenberg–Marquardt algorithm.

First the excitation signal's generation principles are studied. The effect of generation frequency's location to the identification is determined by using a set of MLBS excitation signals, which are located before and after the system's corner frequency. To improve the parameter fitting on higher frequencies an additional gain compensation algorithm is introduced.

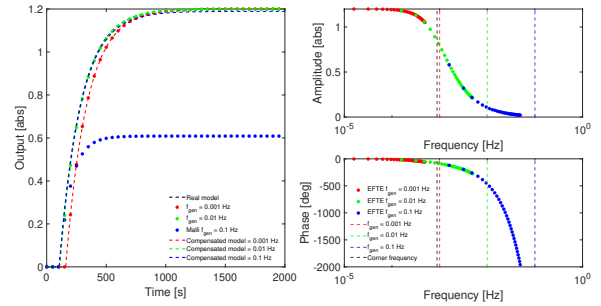
The number of shift register bits affect the frequency domain properties of the excitation signal. The second test studies the effect of the shift register bit number and the location of the generated signal with simple placement rules. The tests are conducted with and without the gain compensation algorithm.

The final part of the paper studies the effect of different disturbances in the identification. The disturbances are made so that they resemble disturbances encountered in real processes. The simulated disturbances

are zero-mean white noise, external step signal and external multi-sine.

## 4 Results

The parameter fitting task was successful for studied linear models and simple rules for MLBS signal generation were found. Figure 1 shows an example how the generation frequency affects the FOTD model identification and the precise results can be seen from table 1. The results showed that data handling is a crucial



**Fig. 2.** The effect of generation frequency  $f_{gen}$  to the results.

part of identification and its importance becomes more obvious when disturbances are perturbing the system. From the results it was clear that the system's corner frequency and the MLBS excitation signal's effective frequency band played a significant role in the parameter fitting task. By prioritizing lower frequencies gain parameter was identified with better accuracy. The delay parameter was identified better, when MLBS excitation signal was on the higher frequencies of the studied band.

**Table 1.** Models of figure 2.

Compensation factor	$f_{gen}$ [Hz]	$t$ [s]	$K$	$\tau$ [s]	$d$ [s]	IAE
Not in use	$1.000 \cdot 10^{-3}$	377900	1.200	178.495	159.649	1.769
Not in use	$10.000 \cdot 10^{-3}$	37790	1.200	180.320	109.951	0.411
Not in use	0.100	3779	0.609	96.844	106.935	434.656
In use	$1.000 \cdot 10^{-3}$	377900	1.200	178.495	159.649	1.769
In use	$10.000 \cdot 10^{-3}$	37790	1.200	180.320	109.951	0.411
In use	0.100	3779	1.189	179.113	105.523	7.953
Exact model	–	–	1.200	180.000	105.000	–

Jouni Aro

# Test Applications for OPC UA PubSub Communication

**Abstract:** OPC Unified Architecture (OPC UA, IEC 62541) has become a leading communication framework in industrial automation. OPC UA defines a secure client/server communication model, including information modelling language that enable standardized connectivity between applications in process monitoring, production control, manufacturing execution, etc. OPC UA PubSub defines an alternative publisher/subscriber model that enables real-time data delivery for process control, secure connectivity to cloud applications over unreliable networks, and massively connected industrial applications.

Prosys OPC UA Browser and Simulation Server are applications that enable testing and verifying OPC UA connections in industrial applications. They have now been extended with PubSub capabilities to help researchers, developers and end-users take benefit of the new OPC UA PubSub technology easier and faster.

**Keywords:** OPC UA, UDP, MQTT, UADP, JSON, publisher, subscriber, security, information modeling

**\*Corresponding Author: Jouni Aro:** Prosys OPC Ltd, E-mail: jouni.aro@prosysopc.com

## 1 Background

OPC Unified Architecture (OPC UA) [1] enables standard communication of industrial applications in different use cases. In addition to standardizing secure transport level communication [2,3], OPC UA also defines information modelling capabilities [4] that enables interoperation on the semantic level.

Traditionally OPC UA is based on a client/server communication model, which is very suitable to process monitoring and production control. OPC UA PubSub communication model [5] defines an alternative publisher/subscriber model, which makes OPC UA also suitable for real-time process control and big data collection in cloud systems as well as highly scalable communication networks [6] by enabling applications to exchange data without a continuous point-to-point connection with each other.

Prosys OPC UA Browser and Prosys OPC UA Simulation Server are applications that can be used for testing and verifying OPC UA functionality within other OPC UA applications [7]. They include OPC UA Client and Server functionality, respectively, including all OPC UA security features.

Prosys OPC UA Simulation can also be used to test and verify OPC UA Information Models and act as a mock up server when the real OPC UA Servers are not available [8,9].

## 2 Aim

In order to develop reliable OPC UA applications, the companies manufacturing OPC UA capable devices and machines, as well as end-users using integrating them in actual production processes, need tools that help them to verify the communication and diagnose communication issues.

The paper describes how OPC UA PubSub functionality has been added to Prosys OPC UA Browser and Prosys OPC UA Simulation Server. This makes them useful tools for developers and integrators that utilize the opportunity provided by the publisher/subscriber communication model.

## 3 Methods

OPC UA PubSub aims to solve problems related to deterministic data transfer, unreliable networks and scalability. The PubSub model is actually implemented using two different transport protocols: 1) UDP, which is used in local networks, enabling even real-time communication when run on networks with deterministic TSN capability and 2) MQTT Broker-based communication, which enables data delivery to cloud applications without strict timing requirements and also the large-scale message bus based communication within production networks.

In addition to the PubSub transport protocols, OPC UA also defines standard message formats: 1) binary UADP messages for optimized performance and 2) JSON messages for optimized interoperability with non-OPC



UA capable subscribers.

Compared to plain MQTT and other MQTT based protocols, the standard message formats defined by OPC UA enable higher level integration between systems from different vendors than is possible with custom message formats that are normally used.

Prosys OPC UA Simulation Server has been extended with OPC UA Publisher functionality, including both UDP and MQTT communication as well as UADP and JSON message formats. It includes an easy to use user interface that enables both communication and dataset configuration. This enables testing and verification of OPC UA Subscriber applications without any actual OPC UA capable devices.

Prosys OPC UA Browser, on the other hand, has been extended with OPC UA Subscriber functionality. It can display data published by any OPC UA Publisher. In addition, it can log contents of all MQTT messages, even when they are not following the OPC UA message format. This can help in testing and verifying all publisher communication in any UDP network or MQTT broker.

The functionality included in both applications was implemented with Prosys OPC UA SDK for Java. The SDK can be used to add similar OPC UA PubSub functionality to any Java application.

The SDK implements the OPC UA configuration model, which consists of Connection configuration and Dataset configuration.

The PubSub Connection defines the target of the messages that the Publisher is sending. The target can be UDP broadcast or an MQTT broker. The messages can be binary UADP messages or alternatively JSON messages with MQTT.

The Dataset configuration defines a standard mapping of OPC UA Variables and Events to message payload.

The functionality of the applications can be easily demonstrated with each other [10] and likewise, they are useful tools with all other OPC UA applications.

## 4 Bibliography

- [1] OPC 10000-1 (2022). OPC Unified Architecture Specification Part 1: Overview and Concepts v.1.05.02. OPC Foundation.
- [2] OPC 10000-4 (2021). OPC Unified Architecture Specification Part 4: Services v.1.05.00. OPC Foundation.
- [3] OPC 10000-6 (2022). OPC Unified Architecture

Specification Part 6: Mappings v.1.05.02. OPC Foundation.

- [4] OPC 10000-5 (2022). OPC Unified Architecture Specification Part 5: Information Model v.1.05.02. OPC Foundation.
- [5] OPC 10000-14 (2022). OPC Unified Architecture Specification Part 14: PubSub v.1.05.02. OPC Foundation.
- [6] Hästbacka, D., Kannisto, P. & Vilkkö, M. (2018). Information Models and Information Exchange in Plant-wide Monitoring and Control of Industrial Processes. In Proceedings of the 10th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, volume 3, pages 216-222
- [7] Boström B. (2014). JavaFX based OPC UA Simulation Server. M.Sc. thesis, Aalto University, Espoo
- [8] Saikko L. (2018). Simulating OPC UA Information Models. M.Sc. thesis, Aalto University, Espoo
- [9] Aro J. Johansson M. (2019). Simulation Platform for Industrie 4.0 Components with OPC UA. Automaatiopäivät XXIII
- [10] Aro J. (2022). Connecting OPC UA Simulation Server and OPC UA Browser to an OPC UA PubSub Network. <https://www.prosysopc.com/blog/pubsub-applications/>

Houari Bettahar, Quan Zhou

# Fiber fabrication based on pulling velocity and hardening force control

**Abstract:** In this study we propose robotic fiber fabrication method based on pulling velocity control and hardening force control to improve the strength of the fabricated fibers.

**Keywords:** Fiber fabrication, force and velocity control.

**Corresponding author:** Houari Bettahar

The authors are with the Department of Electrical Engineering and Automation, School of Electrical Engineering, Aalto University, 02150 Espoo, Finland. Email address: [houari.bettahar@aalto.fi](mailto:houari.bettahar@aalto.fi), corresponding author: [quan.zhou@aalto.fi](mailto:quan.zhou@aalto.fi).

## 1 Introduction

Fiber-shaped materials are highly desirable in making various functional three-dimensional (3D) objects. For example, hydrogel microfiber structures have been used to recapitulate biological tissues' architecture and functionality at the microscale [1]. fibers have also been used in actuators and sensors with at macro- and microrobotics[2]–[5], as well as flexible microfiber strain sensor with a beads-on-a-string structure [6]. A variety of techniques have been used for fiber fabrication, e.g., wet-spinning [7], dry-spinning [8]. So far, their strength can reach only about one-fifth of that of natural fibers such as spider silk fiber [9]. One of the reasons is that the fabrication process is either manual or based on open-loop regulation. As continuation of our previous work [10][11], in this study, we propose robotic fiber fabrication method based on pulling velocity control and hardening force control to improve the strength of the fabricated fibers. Dextran material is used as the specimen in the experiments.

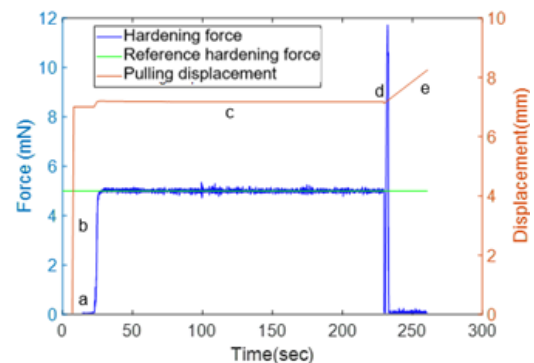
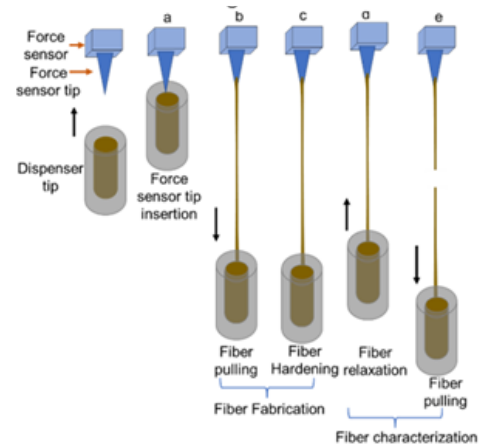
## 2 Materials and Methods

The experimental setup shown in Figure 1 is designed to implement the fiber threading and characterization experiments for different materials.

- 1- Manual positioner
- 2- Force sensor
- 3- Force sensor tip
- 4- Motorized positioner
- 5- Dispenser tip
- 6- Dispenser
- 7- Pusher tip
- 8- Motorized pusher



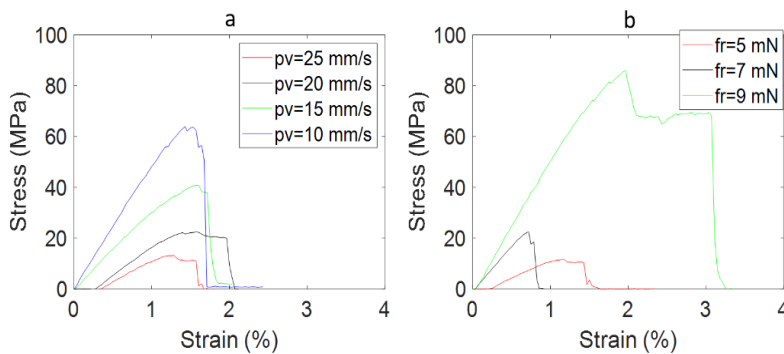
**Figure 1:** The experimental setup for robotic fiber fabrication. The force sensor is fixed on a frame, and the Dextran dispenser is mounted on a motorized precision stage.



**Figure 2:** The fiber threading experimental protocol. a) inserting the force sensor tip in the dispenser tube until it contacts the Dextran material; b) the dispenser moves away from the force sensor pulling the Dextran into a fiber until certain criteria are satisfied, e.g., in displacement or force; c) the system stalls for a certain amount of time to allow the fiber to harden under hardening force control, in this example the pulling velocity is  $25 \text{ mm/s}$  and the controlled hardening force is  $5 \text{ mN}$ ; d) the fiber is relaxed until e) the fiber is pulled further until it breaks.

The setup consists of a dispenser (Nordson EFD, model Performus V) held on a motorized precision positioner (Physik Instrumente, model M404.4PD) to dispense and pull the silk. A needle is held on a force sensor (LCM Systems, model LCM UF1), which is fixed, to sense the pulling force after contacting the silk. The motorized precision positioner is controlled via a controller (Physik Instrumente, model C-884.4CD) using Matlab/Simulink. The measurement of the force sensor is acquired using a data acquisition (DAQ) board (National Instrument, model PCIe-6363). The dispenser is controlled also via the DAQ board. The whole setup is constructed on a vibration isolation table.

The fiber threading experimental protocol is shown in Figure 2 consisting of the fabrication and



**Figure 1:** The obtained breaking force with respect to the strain from characterization of the fibers fabricated with four different pulling velocities of 10, 15, 20, and 25 mm/s. b) The obtained breaking force with respect to the strain from characterization of the fibers fabricated with three different hardening forces of 5, 7, and 9 mN.

characterization phases. In the fabrication phase, a sessile droplet is firstly dispensed on the top of the tip of the dispenser needle, a); then the tip with the droplet approaches and contacts the tip of the force sensor, b); after that, the dispenser moves away from the force sensor pulling the droplet into a fiber, c); the system then stalls for a certain period to allow the fiber to harden under hardening force control, e). In the characterization phase, the fiber is pulled further until the fiber breaks while the pulling force is recorded. From the characterization by tensile testing, stress-strain curve can be obtained. All the experiments have been done under constant environmental conditions: temperature and relative humidity of 24 °C and a 63% respectively. All the experiments have been done under constant environmental conditions: temperature and relative humidity of 24 °C and a 63% respectively.

### 3 Results

To study the influence of the pulling velocity of the fabricated fibers, we applied four different pulling velocities 10, 15, 20, and 25 mm/s. We can notice that the strength has a negative correlation with respect to the pulling velocity. The influence of the hardening force on the strength is also studied, we applied three different hardening forces for 5, 7, and 9 mN. We can notice that the strength is directly proportional to the hardening force.

### 4 Conclusions

Artificial fibers are widely used in a variety fields, such as, soft robotic, electronics, and textile technology. In order to improve the strength of the artificial fiber, a new robotic fiber fabrication method was proposed. The proposed method is based on controlling the pulling velocity and the hardening force. The correlation between the pulling velocity and strength was studied. The correlation between hardening force and the strength was studied as well.

### 5 Acknowledgement

We thank Teemu Väisalmi and Prof. Markus Linder for providing the Dextran for the experiments.

### 6 Bibliography

[1] H. Onoe *et al.*, "Metre-long cell-laden microfibres exhibit

tissue morphologies and functions," *Nature Materials* 2013 12:6, vol. 12, no. 6, pp. 584–590, Mar. 2013, doi: 10.1038/nmat3606.

[2] H. Bettahar, C. Clévy, F. Behague, N. Courjal, and P. Lutz, "Novel Strategy for High Precision Automated Robotic Positioning based on Fabry-Perot Interferometry Principle," *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, vol. 2018-August, pp. 1441–1447, Dec. 2018, doi: 10.1109/COASE.2018.8560700.

[3] H. Bettahar, C. Clevy, N. Courjal, and P. Lutz, "Force-Position Photo-Robotic Approach for the High-Accurate Micro-Assembly of Photonic Devices," *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 5, no. 4, pp. 6396–6402, Oct. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3014634.

[4] H. Bettahar, O. Lehmann, C. Clevy, N. Courjal, and P. Lutz, "6-DoF Full Robotic Calibration Based on 1-D Interferometric Measurements for Microscale and Nanoscale Applications," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 348–359, Jan. 2022, doi: 10.1109/TASE.2020.3031856.

[5] H. Bettahar, "High accurate 3-D photo-robotic nanopositioning for hybrid integrated optics," Jul. 2019, Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02363255>

[6] C.-C. Kim, H.-H. Lee, K. H. Oh, and J.-Y. Sun, "Highly stretchable, transparent ionic touch panel," *Science* (1979), vol. 353, no. 6300, pp. 682–687, Aug. 2016, doi: 10.1126/science.aaf8810.

[7] W. Eom *et al.*, "Large-scale wet-spinning of highly electroconductive MXene fibers," *Nature Communications* 2020 11:1, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, Jun. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16671-1.

[8] Z. Yang *et al.*, "On the cross-section of shaped fibers in the dry spinning process: Physical explanation by the geometric potential theory," *Results Phys*, vol. 14, p. 102347, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102347.

[9] M. Andersson *et al.*, "Biomimetic spinning of artificial spider silk from a chimeric minispidroin," *Nature Chemical Biology* 2017 13:3, vol. 13, no. 3, pp. 262–264, Jan. 2017, doi: 10.1038/nchembio.2269.

[10] H. Bettahar, P. A. D. Harischandra, and Q. Zhou, "Robotic Threading from a Gel-like Substance Based on Impedance Control with Force Tracking," *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 1, pp. 33–40, Jan. 2022, doi: 10.1109/LRA.2021.3116697.

[11] H. Bettahar, T. Väisalmi, M. Linder, and Q. Zhou, "Robotic Fiber Fabrication based on Solidification Force Control," *Proceedings of MARSS 2022 - 5th International Conference on Manipulation, Automation, and Robotics at Small Scales*, 2022, doi: 10.1109/MARSS55884.2022.9870490.

# Mechanistic AI: physics-driven machine learning

Bor, Alexander  
alexander.bor@scientia.tech

Zakharov, Alexey  
alexey.zakharov@scientia.tech

November 4, 2022

Traditional machine learning models are only able to describe phenomena captured in the training data of relatively high quality. Moreover, such models fall short when applied to a real process containing unmeasured disturbances, noise and unreliable sensing devices. In this work, we demonstrate a novel approach, Mechanistic AI, which provides robust models which not only generate accurate predictions, but also provide insights into the system beyond the information contained in the training data. Mechanistic AI is physics driven, where the skeleton of the model is based on first-principles: mass and energy conservation while data provides calibration for accurate predictions. Mechanistic AI does not require a detailed first-principle model but only a general level formulation of mass and energy conservation. This allows to predict measurable variables and estimate unmeasurable ones. Furthermore, the aforementioned skeleton regularizes any noise and inconsistencies present in the data, thus even low-quality data can be readily utilized by Mechanistic AI. Further, due to physics based frame, Mechanistic AI models can be easily generalized with only limited or no tailoring. In addition, Mechanistic AI model is constrained to produce valid results even on out-of-distribution data due to the inclusion of physics. In contrast to the Mechanistic AI, traditional supervised machine learning models are usually non-transferable to other units, have unknown validity limits, are difficult to interpret as well as cannot provide insight beyond information contained in training data. Summarizing, Mechanistic AI has unique features unattainable by traditional supervised ML models and can be applied in process control which requires robust models as well as in predictive and prescriptive maintenance which require deep insight into the system. In this work, we demonstrate the easiness of model formulation for Mechanistic AI and explore the implications of combining data and physics in a novel way to produce reliable prediction and estimation results.

Based on the obtained results, Mechanistic AI demonstrated the ability to not only predict process variables but also to estimate unmeasurable physical quantities. In terms of data efficiency and development time, our physics driven technique required significantly less data and development time compared to neural networks based approach which demanded 50 times more data and tedious architecture selection procedure to reach similar accuracy. In addition, our method was even able to reconcile inconsistencies in training data, a result unattainable by any other approach. Applications of Mechanistic AI can provide estimates and predictions of many common phenomena in the process industry: heat transfer and fouling estimation, valve stiction assessment, estimation of reaction rate and intermediate concentrations and many others. Mechanistic AI models can be readily deployed using Scientia data platform as a central part of any control or analytics solution.

Jaakko Etto\*, Heikki Isometsä

# Etälaboraatiot automaation oppimisen keskiössä

**Asiasanat:** automaatiojärjestelmä, automaatio, etäopiskelu, koulutus

\***Jaakko Etto:** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [jaakko.etto@lapinamk.fi](mailto:jaakko.etto@lapinamk.fi)

**Heikki Isometsä:** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [heikki.isometsa@lapinamk.fi](mailto:heikki.isometsa@lapinamk.fi)

## 1 Johdanto

Kemissä Lapin ammattikorkeakoulun sähkö- ja automaatiotekniikan insinööriopiskelijat on jo pitkään ollut käytössä tehdä erilaisia automaation laboratoriotöitä etäopiskeluna. Etälaboraatioiden tavoitteena on ollut ohjelmitavien logiikoiden ohjelmoinnin ja moottorikäyttöjen logiikkaohjauksen opiskelu sekä opetusprosessien ohjauksen opiskelu PLC ja DCS automaatiotratkaisuilla. Tavoitteena on ollut tehdä ohjattavan prosessin tai sähkökäytön automaatiosovellus etänä kotona ja sitten testata toteutusta vesiprosessin ja sähkökäyttöjen ohjauksessa.

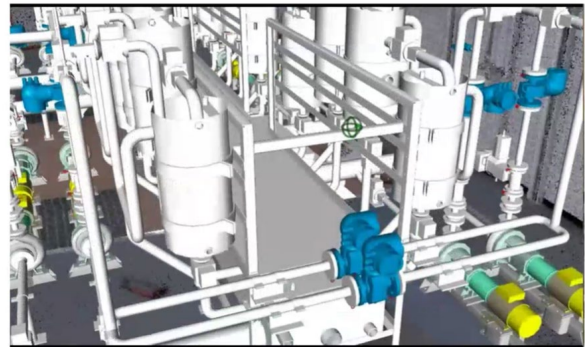
Parin viimeisen vuoden aikana on toteutettu uusien vesiprosessin, kappalevaralinjojen, PLC ja DCS järjestelmien hankinta sekä sähkökäyttöjen ja aikaisempien opetuslaitteiden modernisointia. Digitaalisten toimintaympäristöjen ja digitaalisen kaksosen toteuttamiseksi on hankittu uudet virtuaali- ja simulointiympäristöt. Tavoitteena on ollut luoda etäopiskelun oppimisympäristöt, joissa opiskelijat voivat etänä ohjelmoida automaatiojärjestelmiä, HMI paneeleja ja valvomoita sekä ohjata opetusprosesseja. Etäopiskeluna tapahtunut oppiminen ja osaaminen osoitetaan todellisissa oppimisympäristöissä Lapin ammattikorkeakoulun Kemin kampuksen prosessiautomaation, ohjelmitavien logiikoiden ja kappalevaratuotannon laboratoriotiloissa.

## 2 Uusien etälaboratorioiden toteutus

Automaatiotekniikan koulutuksen tarpeisiin on päivitetty yli 10 vuotta vanha Metso DNA ja hankittu uusi Valmet DNA automaatiojärjestelmä laajoine sovelluksineen. Ohjelmitavien logiikkojen opetuksessa keskitytään Siemens S7 logiikka-perheeseen HMI paneeleineen ja valvomoineen.

Kenttäväylien osalta uudet hankinnat ovat tuoneet koulutuksen keskiöön aikaisemman profibus väylän rinnalle profinet väylän. Toki etäopetuksessa piirissä ovat myös aiemmat kenttäväylät, HART ja perinteinen I/O. Uusien etäoppimisen oppimisympäristöjen toteuttaminen vaatii automaatiojärjestelmien lisäksi monipuoliset ohjelmistoratkaisut palvelimiseen sekä kameroilla toteutetun etäseurannan eri prosessien laitteistoihin. Kuvassa 1 (artikkelin lopussa) on esitetty kahden automaatiojärjestelmän toteutuksen tietoteknisiä ratkaisuja ja toteutuksia uusissa oppimisympäristöissä. Kehittämistyön rahoitus on perustunut koulutuksen perusrahoitukseen, ammattikorkeakoulun strategiarahoitukseen ja 360 Low Carbon Investment hankkeeseen.

Oppimisympäristöjen prosessit ovat osin kokonaan uusia, osin modernisoituja ja osin aiemmissa opetuksen kehittämishankkeissa toteutettuja. Aikaisemman vesiprosessin, jossa kerrallaan pystyi ajamaan 3-4 eri prosessia, korvaaminen uudella on nyt hyvässä vauhdissa. Toteutuksessa on 12 erillistä ja yhdisteltävää muunneltavaa työpistettä eli vesiprosessia (kuvat 2), joissa on samankaltainen prosessiratkaisu eri valmistajien prosessilaitteilla, komponenteilla ja kenttäinstrumentoinnilla. Automaatiojärjestelminä vesiprosessissa ovat Siemens ja Valmet.



Kuva 2a. Monisoluiainen muuttuva opetusprosessi

Aluksi toteutetaan valmiiksi osa työpisteistä ja tulevina vuosina lisää kenttälaitteiden ja automaation asennuksia saatujen kokemusten perusteella huomioiden erilaisten ja uusien teknisten ratkaisujen valinta prosessiin, kenttäinstrumentointiin ja prosessien automaatioon. Näin saadaan tulevaisuudessa myös mahdollisuus ajallisesti porrastettuihin prosessien työpisteiden automaation

toteutusten modernisointiin, eikä ympäristöä jouduta jatkossa päivittämään kerralla kokonaisuudessaan.



Kuva 2b. Opetusprosessin sähköistys ja automatisointi on aloitettu

Etäopiskelun toteuttamisessa huomioidaan myös kunnossapito ja kalibrointi sekä HART toteutukset. Kenttäinstrumentoinnin opetuksessa tapahtuu harppaus ja oppimisen mahdollisuudet laajenevat uusien prosessien kenttäinstrumentoinnin avulla, joissa hyödynnetään myös langatonta Bluetooth ja WLAN tekniikkaa ja pian toteutuvat myös 5G-mahdollisuudet.

### 3 Oppimisen toteutus

Opiskelijoille on luotu Moodleen oppimisympäristöt, joissa oppiminen on vaiheistettu tavoitteiden saavuttamiseksi ja oppimisen seuraamisen helpottamiseksi. Moodlen oppimisympäristöt sisältävät prosessikuvaukset ja laboratorioiden oppimisympäristön dokumentaation sekä automaation eri järjestelmien ja ohjelmistojen opastuksen ohjeineen, dokumentteineen, videoineen ja testitehtävineen. Opiskelijan oppimisen etenemistä etälaboraatioissa seurataan moodlen avulla ja tietenkin kontaktiviikoilla opiskelijan osaaminen käytännössä laitteiston luona laboratoriotiloissa tulee arvioitavaksi. Monimuoto-opiskelijoilla on kontaktiopetusta laboratoriotiloissa 6-10 päivää lukukaudessa sisältäen myös muut kuin automaatio-opetuksen laboraatiot. Oppimisympäristöt on toteutettu siten, että opiskelijat voivat turvallisesti työskennellä ilman opettajan jatkuvaa seuranta. Opiskeluiden vaiheessa, jossa taitoa ja tietoa on kertynyt tarpeeksi voi esim. monimuoto-opiskelija olla etäyhteydessä prosessiin kyberturvallisesti niin ohjelmistoon kuin näköyhteydellä kameroiden välityksellä.

Automaatiotekniikan koulutuksessa on laajan vuoden 2017 opetussuunnitelma uudistuksen jälkeen päivitetty automaation opetusta automaation tietotekniikan osaamisen suuntaan. Automaatiotekniikan opetuksen

iso uudistus lähti liikkeelle ulkoisesta auditoinnista 2019. Kolmen automaatiotekniikan opettajan yhteistyönä on opetussuunnitelma 2021 suunniteltu, jalkautettu ja viety yhä enemmän kattamaan automaation opetus kenttätasolta ylempiin järjestelmiin. Sähkö- ja automaatio koulutuksen usean laboratoriotilan oppimisympäristöjen lisäksi käytössä on FESTOn laaja teollisuus 4.0 tuotantoympäristö konetekniikan koulutuksen älypajassa. Ympäristö sisältää Siemens logiikkojen, HMI paneelien ja väylien lisäksi automaation ylempät tasot ja digitaalisen kaksosen. Näin FESTOn (kuva 3) järjestelmä antaa mahdollisuuden automaation eri tasojen oppimiseen ja ymmärtämiseen, mutta muutosten tekoa on rajattu kokoonpanolinjalla.

### 4 Etäopetuksen tavoitteita ja tuloksia

Etäopiskelun ympäristön toteutus vaatii hyvän ohjeistuksen ja opastuksen ja ympäristöjen turvallisen toteutuksen. Ympäristöä käytetään sekä kontakti opetuksessa koululla että etäopiskelussa samoilla tavoilla. Opettaja pystyy myös etänä ohjaamaan opiskelijaa etäopiskelutilanteissa kohdattavissa ongelmissa.

Mitä opiskellaan etänä laboratorioympäristöissä ja mitä tavoitteita etäopiskelu tukee:

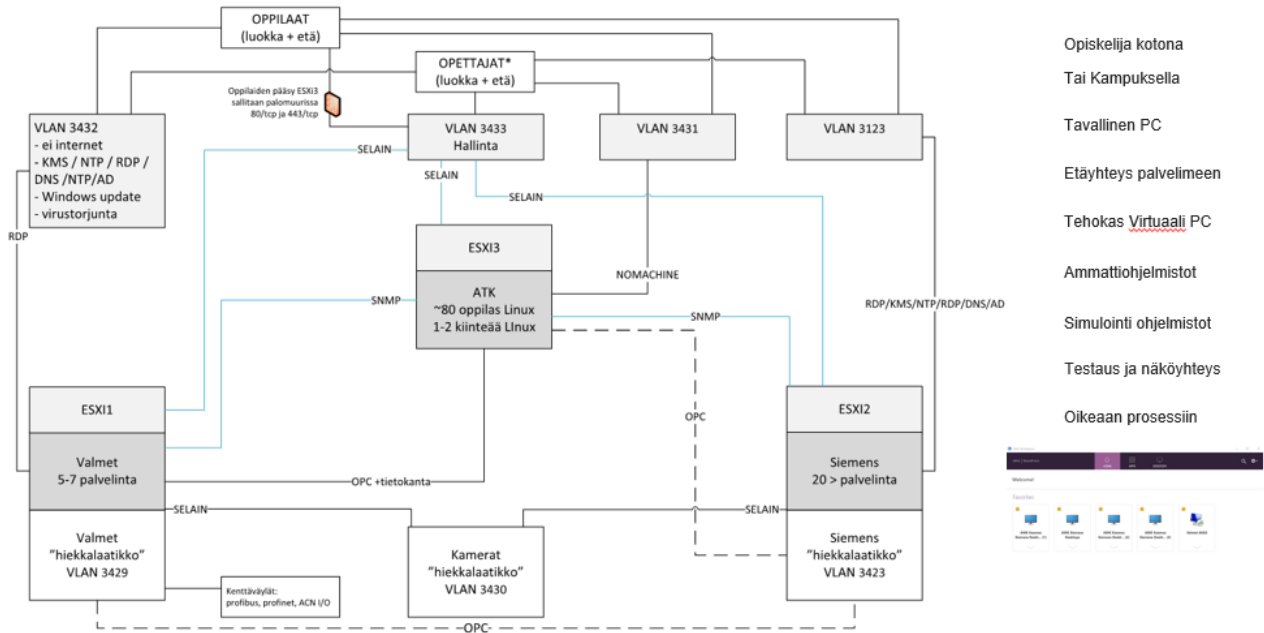
- turvallinen työskentely, myös kyberturvallisuus
- tutustuminen teollisuuden automaatiojärjestelmiin
- suunnittelu ja toteutus
- etäyhteydet, etäohjelmointi ja -simulointi
- prosessin ohjaus paikan päällä ja etänä
- prosessivalvomo, HMI-paneelit ja etäseuranta
- virtualisoinnin harjoittelu etänä
- prosessin automaattinen säätö ja simulointi
- kalibrointi
- mittausten laatu
- tiedonkeruu prosessin rajapinnasta, pilvipalvelut ja tiedon analysointi
- testaus ja vertailuympäristöt
- energian kulutuksen mittausta ja vertailu
- digitaaliset kenttäväylät (esim. profinet)
- langattomat tekniikat prosessiautomaatioissa (WLAN, Bluetooth, WirelessHART, 5G)
- yritys yhteistyöympäristöt.

Tavoitteena lähitulevaisuudessa on oppimisen mahdollisuuksien parantaminen:

- työpisteiden käyttöönotto etenee opiskelijatyönä työpiste kerrallaan
- digitaalinen kaksonen
- tutustuminen laboratorioon etänä (3D matterport-malli)
- laboratorioiden vapaampi käyttö (laboratorioissa, etäkäyttö, kamerat, ...)
- tekniikan elinkaari

- vuorovaikutus yritysten ja yhteistyökumppaneiden kanssa
- tekniikan kehityksessä pysyminen ja uuden opiskelu
- Etälaboraatiototeutuksiksi taajuusmuuttajakäyttöjä,

- perinteisiä I/O moottorilähtöjä ja älykkäitä moottorikäyttöjä (UMC, Simocode, profibus ja profinet)
- oppimisympäristöjen ennakoiva toteuttaminen.



Kuva 1. Toteutuksen tietotekniset järjestelmät.



Kuva 3. FESTO Didactic toimittama laaja Industry 4.0 tuotantolinja Lapin Ammattikorkeakoululla älypajassa Kemissä

Jaakko Etto\*, Heikki Isometsä, Jukka Hietamäki

# Automaation elinkaari osana oppimista

**Asiasanat:** automaatiojärjestelmä, automaatio, elinkaari, oppiminen

**\*Jaakko Etto:** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [jaakko.etto@lapinamk.fi](mailto:jaakko.etto@lapinamk.fi)

**Heikki Isometsä:** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [heikki.isometsa@lapinamk.fi](mailto:heikki.isometsa@lapinamk.fi)

**Jukka Hietamäki:** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [jukka.hietamaki@lapinamk.fi](mailto:jukka.hietamaki@lapinamk.fi)

## 1 Johdanto

Teollisuuden tuotantoprosessien ja automaation elinkaaret poikkeavat toisistaan erityisesti teknisten järjestelmien ikääntymisen suhteen. Toisaalta tuotantoprosesseja nykyisin muutetaan ja kehitetään valmistettavan tuotteen ominaisuuksien muuttuessa yhä lyhyemmillä aikaväleillä. Näistä ja muista syistä aiheutuu eri laajuisia automaatiojärjestelmän, kenttäinstrumentoinnin ja kenttäväylien päivitys- ja modernisointitarpeita. Sama ilmiö näkyy myös ammattikorkeakoulujen oppimisympäristöissä. Automaation eri laajuisten modernisointien oppiminen on opiskelijoille erittäin tärkeää, koska käytännön työelämässä pienten ja suurten modernisointien suunnittelu ja toteutus on toistuva työtehtävä. Täten opiskelijoille on tarjottava mahdollisuudet modernisointien suunnitteluun ja toteuttamiseen oppimisympäristöissä. Valmistajien taholta eri laitteiden ja järjestelmien elinkaari tuodaan nykyisin selkeästi esille ja annetaan näin teollisuudelle ja oppilaitoksille aikaa modernisointien suunnitteluun ja toteuttamiseen.

## 2 Kokemuksia oppimisympäristöjen modernisoinnista

Modernisoinnin toteuttaminen vaatii eri vaihtoehtojen vertailua teknisesti ja taloudellisesti huomioiden myös oppilaitoksessa ja teollisuudessa käytössä olevat automaatiojärjestelmät ennakoitujen tulevaisuuden osaamistarpeita. Ammattikorkeakoulujen oppimisympäristöjen modernisoinnit on tehty usein rahoituksen puutteessa liian myöhään. Toisaalta

yksittäinen pieni tai laaja prosessi on 30 vuoden aikana saatettu päivittää tai modernisoida lukuisia kertoja ja voi olla edelleen käytössä tai on jo poistettu opetuskäytöstä. Kemissä lapin ammattikorkeakoulun sähkö- ja automaatiokoulutuksen laboratoriotilojen oppimisympäristöissä on tehty automaatiototeutusten päivityksiä ja täysiä modernisointeja paljon pääosin opiskelijoiden harjoitustehtävinä, projektitöinä ja opinnäytetöinä. Modernisointi on tehty erillisinä suunnittelu- ja toteutusprojekteina ja toisaalta usein kokonaisuuksina sisältäen suunnittelun, hankinnan, toteutuksen, käyttöönoton ja dokumentoinnin.

Näiden projektien toteutus vaatii opettajalta tiukkaa valvontaa ja tarkkaa ohjeistusta työvaiheista ja tekemisen järjestyksestä. Muuten kokemuksen mukaan voi käydä niin, että opiskelijaryhmä vastoin ohjeistusta purkaa ensitöikseen vanhan toteutuksen ja alkaa sitten tekemään laitesijoitteluja, asennuksia, johdotuksia ilman etukäteen tehtävää suunnittelua ja dokumentaatiota sekä toteutusratkaisun valintaa ja hyväksyntää. Taustalla on usein palava into käytännön tekemiseen ja se, että pieniä muutoksia on aiemmin tehty ilman tarkkaa modernisoinnin vaiheistusta. Täten opiskelijoille ja myös ohjaajille on luotava selkeä modernisoinnin eli projektin toteuttamisen työvaiheistus ja yhteisten pelisääntöjen sopiminen esim. ensin suunnittelu, tarkastus, hankinta ja toteutus. Pienenkin automaatiototeutuksen päivitys tai modernisaatio vaatii suunnittelun, vaihtoehtojen ominaisuuksien ja teknistaloudellisen vertailun sekä tilaajan tai tilaajana toimivan opettajan hyväksynnän ennen purkutöiden aloittamista ja hankintojen toteuttamista. Opiskelijaprojekteissa myös usein dokumentaatio, toimintakuvaukset sekä työskentely- ja huolto-ohjeet ja kuvaukset ovat jääneet puutteellisiksi.

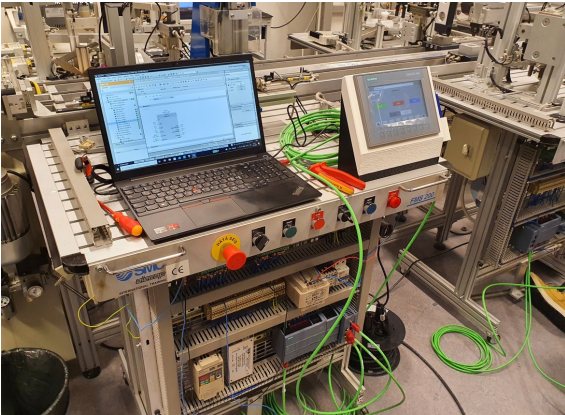
## 3 Modernisoinnin toteutus

Nyt viimeisten vuosien aikana ovat olleet toteutuksessa laajimmat automaatiotekniikan oppimisympäristöjen modernisoinnit ammattikorkeakoulun historiassa. Modernisointien kohteina ovat olleet vesiprosessi laboratoriotiloihin ja tässä artikkelissa käsiteltävä SMC yhtiön yli 20 vuotta sitten toimittama kokoonpanolinja. Kyseinen opetuslaitteisto sisältää 6 osaprosessia, joita ohjattiin Omron logiikalla ja painonapeilla. Asemien välinen yhteinen palettien kuljetuslinjan ohjaus oli toteutettu omalla logiikalla ja

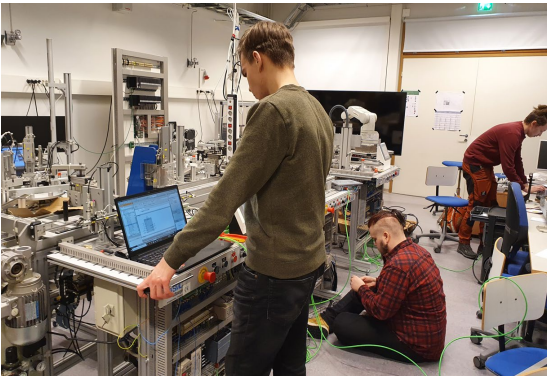




HMI kosketusnäyttöpaneelin rinnalle. Omron logiikka korvattiin Siemens S7-1200 logiikoilla ja kuljetinjärjestelmä toteutetaan S7-1500 logiikalla ja profinet kommunikoinnilla.



Kuva 3. Järjestelmän ohjelmointi ja testaus menossa



Kuva 4. Hallittua tohinaa projektitilassa.

Pneumatiikan simuloinnissa käytettiin FluidSim ohjelmaa ja OPC rajapintaa. TIA portaalia ja Advanced S7PLC SIM oli käytössä Logiikkojen ja HMI paneelien ohjelmoinneissa ja simuloinneissa. Kuvassa 5 on nähtävissä modernisointiprojektin tilanne keväällä 2023, kun suurimman työpanoksen antaneet opiskelijat ovat tekemässä opinnäytetöitään ja monimuotoryhmät jatkavat projektia. Tulevana lukuvuotena uusi päiväryhmä pääsee toteuttamaan laajempia modernisointiprojekteja.

Monet opiskelijat antoivat positiivista palautetta modernisointityöstä, koska pääsivät näkemään projektin kokonaisuuden alusta loppuun saakka. Tällaisessa työskentelytavassa opiskelijat oppivat toisiltaan ja myös eri ryhmien välillä kommunikoidaan valitusta ratkaisuista ja ongelmatilanteista. Osalla opiskelijoista oli haasteita työskentelyssä, kun projekteissa tarvittiin merkittävästi myös aikaisempien opintojakojen osaamista. Tämä sinänsä on projektitöiden tarkoituskin. Monet opiskelijat viihtyivät projektitilassa lukujärjestyksessä varattuja aikoja pidempään.

Opettajien näkemyksinä tuli esille, että päiväryhmillä on paremmat mahdollisuudet toteuttaa laajoja modernisointiprojekteja. Ajankäyttö osoittautui haasteelliseksi monimuotoryhmillä, koska heidän on mahdollista olla projektitilassa vain lähijaksojen aikana. Modernisoinnin toteuttaminen vaati opettajilta ennakointia laitehankinnoissa, koska nykytilanteessa laitteiden toimitusajat ovat todella pitkiä. Samoin haasteita aiheuttaa ajankäytön resurssointi sekä laitteiden ja komponenttien rahoitus. Ympäristön modernisointi projektitöinä jatkuu edelleen ja myös tulevana lukuvuonna.



Kuva 5. Modernisoinnin tämän hetkinen tilanne

Jaakko Etto\*, Jussi Suopajarvi, Jouko Juustovaara, Jukka Leinonen

# Asumisen microgrid – nanogrid testiympäristöt

**Asiasanat:** microgrid, automaatio, testaus

\***Jaakko Etto:** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [jaakko.etto@lapinamk.fi](mailto:jaakko.etto@lapinamk.fi)

**Jussi Suopajarvi** Lapin Ammattikorkeakoulu, E-mail: [jussi.suopajarvi@lapinamk.fi](mailto:jussi.suopajarvi@lapinamk.fi)

**Jouko Juustovaara** opiskelija LUT yliopisto, E-mail: [jouko.juustovaara@student.lut.fi](mailto:jouko.juustovaara@student.lut.fi)

**Jukka Leinonen** Lapin Ammattikorkeakoulu, projektipäällikkö, E-mail: [jukka.leinonen@lapinamk.fi](mailto:jukka.leinonen@lapinamk.fi)

## 1. Johdanto

Lapin ammattikorkeakoulu on mukana EUn rahoittamassa ENERGY ECS hankkeessa [1], jossa yhtenä pilotoitavana tutkimuskohteena on microgrid. Projektin pilottikohteessa microgrid on toteutettu sisältäen liitynnän sähköjakeluverkkoon, microgrid kontrolleri, sähkövarasto, ajoneuvojen yksi- ja kaksisuuntaisia latauspisteitä, uusiutuvan energian tuotantoa, varavoimageneraattori, joustavaa sähkökulutusta useammassa rakennuksessa sekä energianhallintajärjestelmä tarvittavien mittausten, tiedonsiirron ja automaation kera.

Projektin pilotoitikohteen lisäksi toteutetaan Lapin ammattikorkeakoulun kiinteistösähköistyksen ja energiatekniikan laboratoriotiloihin pienemmät ja helpommin muunneltavat microgrid – nanogrid ympäristöt. Näitä toteutuksia voidaan käyttää microgrid verkon ominaisuuksien ja automaation testaamiseen huomattavasti vapaammin kuin itse pilottikohdetta. Teholuokka näissä toteutettavissa testiympäristöissä tulee olemaan huomattavasti pienempi ja niistä voidaan käyttää nanogrid nimitystä.

Asuntokohteen microgrid voidaan toteuttaa monella eri kytkentäratkaisulla ja laitekoonpanolla. Lisäksi eri kytkentäratkaisulla mahdollisine saareke/backup toimintaratkaisuneen on selvästi toisistaan poikkeavia ominaisuuksia. Tavoitteena laboratorioympäristöjen toteutuksilla on tutkia ja havainnoida näiden ratkaisujen sähkötekniisiä ominaisuuksia, kuten verkkokytkentää, sähkön laatua, sähköenergian varastointia, sähköenergian tuotantoa uusiutuvilla

energioilla, kuormien ohjausta ja toimintaa eri käyttötilanteissa. Microgrid vaatii toimiakseen erilaisia kytkentälaitteita, AC/DC ja DC/AC suuntaajia ohjauksineen, mittauksia, automaatiota ja näiden välisen kommunikaation sekä lisäksi käyttöliittymän ja yhteyden internetiin.

## 2. Testilaitteiston suunnittelu

Ammattikorkeakoulun laboratoriotiloihin sijoitettavien testausympäristöjen suunnittelu on vaativaa eri vaihtoehtojen teknisten ominaisuuksien vertailua, toimitusaikojen tarkastelua ja eri valmistajien laitteiden keskinäisen kommunikoinnin mahdollisuuksien tarkastelua. Haastetta lisää se, että kokonaisuudella tulisi olla tekoälyyn liittyviä ominaisuuksia ainakin jossain määrin kokonaisuuden laajuudesta ja toimintaominaisuuksista riippuen. Laittevalmistajilla on tarjolla erilaisia laitteita ja laitekoonpanoja, muttei täysin valmista ja Suomen oloissa toimivaa kokonaisuutta. Vaihtoehtoisissa voi puuttua muun muassa eri tariffien huomiointi, vaihtoehtot huomioiva energianhallintajärjestelmä, sähköntuotannon ohjaus, kulutuksen ohjaus, eri ajoneuvojen akuston lautauksen ja purun hallinta, katkoton saarekekäyttömahdollisuus ja ennakoiva automaatiikka sekä selkeä käyttöliittymä etäkäyttömahdollisuuksineen.

Näin ollen tavoitteena on rakentaa ominaisuuksiltaan laajempi muunneltava laitteisto, jonka kuormana olisi tyypillisiä pientalon kuormia. Vaihtoehtoisena tavoitteena oli toteuttaa yksivaiheinen nanogrid katkottomalla saarekekäytöllä. Nanogrid laitteistoilla testataan ratkaisujen sähkötekniisiä ominaisuuksia, energiatehokkuutta, sähköenergian varastointia, sähköntuotantoa, sähköntuotantoa ja myyntiä, kulutuksen hallintaa ja ohjausta, saarekekäyttöä sekä eri laitteiden ja kokonaisuuden automaatio- ja ohjausratkaisuja.

Tyypillisesti laitteisto voisi sisältää:

-Sähkötekniinen järjestelmä:

- aurinkopaneelit
- invertteri
- akuston invertteri (mallista riippuen voi sisältyä edelliseen)
- akusto (mitoitettu energiavarasto)
- sähkökeskukset ja kytkentälaitteet
- sähkömittarit (verkonhaltija ja laitteiston)

- kuormat
- ajoneuvojen latauslaitteet
- mahdollinen varavoimakone.

Automaatio- ja ohjausjärjestelmä:

- eri laitteiden I/O rajapinnat tai välylät
- mittauskomponentit
- kommunikointi
- datan tallennus ja käsittely
- ohjauslaitteisto
- (koti)automaatiototeutus
- HMI
- internet yhteys.

Ensimmäisessä vaiheessa testilaitteiston kokoonpanoa suunniteltiin selvittämällä kaupallista tarjontaa, laiteominaisuuksia ja toimitusaikoja. Näiden pohjalta valittiin toteutettava sähköinen liikeyntä ja kytkentätapa, mitoitetiin laitteen tyyppillisen pientalon mukaan ja aloitettiin laitteiden hankintojen kilpailutus.

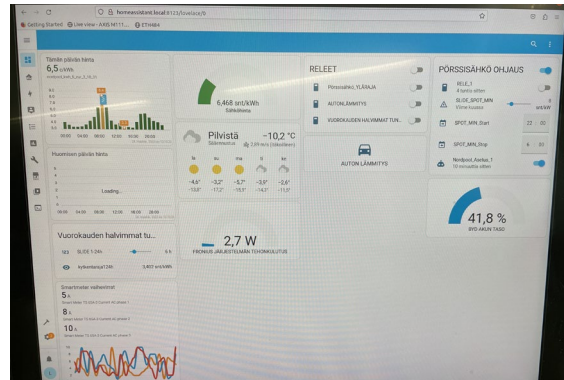
### 3. Testilaitteiston toteutus



Kuva 1 Nanogrid laitteiston testausta

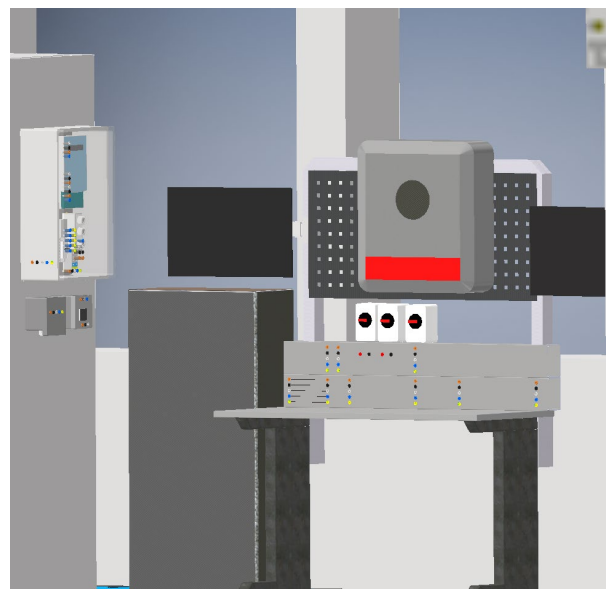
Ensimmäisten hankintojen jälkeen toteutettiin asennus siirrettävään telineeseen, jotta päästään paikallisesti ja etänä tutkimaan ja testaamaan kokoonpanon toimintaa, automaatiota ja invertterin ominaisuuksia. Testiasennuksessa oli asennettuna Fronius invertteri, OhmPilot, smart meter, energiavarasto, tasajännitelähde, pc, Raspberry Pi, homeassistant, VPN internetyhteys sekä laitteiden keskinäiset sähköiset kytkennät ja kommunikointiyhteydet. Kuvassa 1 on

testiasennus, jolla selvitettiin kokoonpanon toiminta ja tarvittavaa ohjelmointia sekä laitteiden välistä kommunikointia. Kuvassa 2 testauksen toimintatilan näkymä.



Kuva 2 Järjestelmän toimintatilan näkymä.

Toimivuus varmentui ja tämän jälkeen kilpailutettiin kaksisuuntainen DC tehollähde, pientalon mittarikeskus ja pääkeskus, kuormien 1- ja 3-vaiheiset kytkentäreleet ja energiamittarit (Shelly), verkkokytkimet ja ajoneuvon latauspiste. Kuvassa 3 on esitetty työpiste, johon sijoitetaan mm. invertteri, DC-tehollähde, näytöt ja kytkentäpisteet DC ja AC järjestelmän kytkennöille ja erillisille mittareille ja mittausanalysaattoreille. Kuvassa vasemmalla on akusto ja seinälle sijoitettu liikeyntä verkkoon ja mittarikeskus. Oikealle puolelle tulee pääkeskus, josta ryhmälähdöt eri laboratorioissa sijaitseville kuormille, kuten lämpöpumpuille, sähkölämmitykselle, käyttövesivaraajalle, jääkaapille, valaistukselle, liedelle, auton latauspisteelle ja kodin elektroniikalle.



Kuva 3 Nanogrid testausympäristö (havainnekuva)

## 4. Testilaitteiston tavoitteet

Ensimmäinen tavoite tutustua microgrid laitteistoihin ja niiden ominaisuuksiin on toteutunut laitteiston suunnittelun, selvittelyn, hankintojen ja ensimmäisen testivaiheen aikana. Nanogrid testauslaitteisto saadaan asennetuksi keskuksineen ja kuormineen kevään 2023 aikana. Testaukset päästään aloittamaan kesäkaudella ja niitä jatketaan talvikaudella projektin loppuun saakka. Microgrid verkkoa, siihen liitettviä laitteita ja niiden sähköisiä ja tietoteknisiä liityntöjä on esitetty kuvassa 4 [2],[3]. Tavoite on testiympäristössä tutkia eri vaihtoehtojen toimivuutta, toimintaominaisuuksia ja esiintyviä ilmiöitä. Tutkimukset tekevät kaksi diplomityön tekijää.

Sähkötekniisiä testauksia ja mittauksia, jota laitteistolla tullaan tekemään ja tallentamaan ovat mm.:

- sähkön osto- ja myyntihinnat
- sähkön tuotanto eri ajanjaksoilla
- sähkön osto eri ajanjaksoilla
- sähkön kulutus
- sähkönkäytön ohjauksen vaikutus
- akuston lataus ja purku eri ajanjaksoilla
- Akkuun varastoidun sähköenergian käyttöajankohdat ja kohteet
- invertterin häviöt
- sähköisen suojauksen toiminta eri kytkentätilanteissa
- sähkönlaatusuureet (jännitteen vaihtelu, kytkentäilmiöt, yliaallot, ...)

Mittauksia tehdään invertterillä ja erillisillä teho- ja energiamittareilla. Osa mittauksista tehdään erillisillä mittaus- ja analysointilaitteilla kuten sähkön laadun tiedonkeruulaite, sähkönlaatuanalysointilaitte ja 8 kanavainen tehoanalysointilaitte. Tulokset perustuvat näihin mittauksiin, mittaustietokantoihin ja niiden analysointiin.

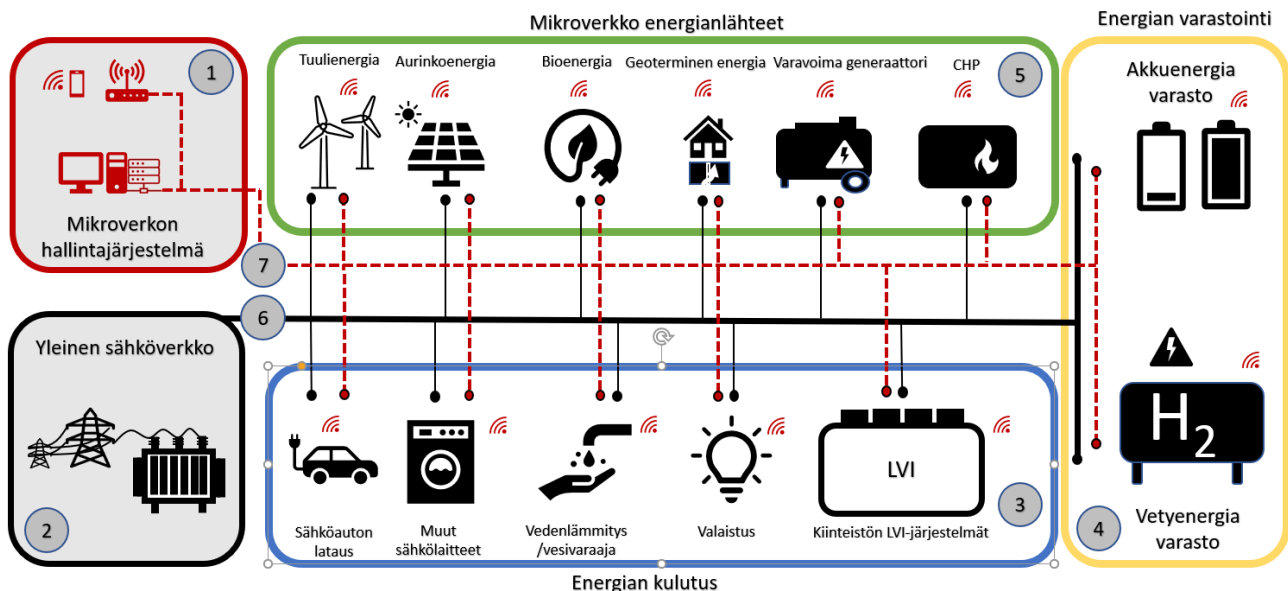
Esimerkkejä automaation, ohjauksen, kommunikoinnin ja tiedonkeruun tutkimisen kohteita ovat:

- tutkia eri tiedonsiirto ja laitekommunikaation vaihtoehtoja pientalo kohteissa
- energian tuotannon, käytön, varastoinnin ja taloudellisen ohjauksen hallintamenetelmät
- microgrid verkon ohjaus- ja hallinta eri käyttötilanteissa
- älykkään microgrid verkon testausympäristön rakentamisen vaihtoehtojen selvitys ja testiympäristön rakentaminen
- rakennetun testausympäristön automaation ja ohjauksen toiminnan testaus ja arviointi.

[1] Energy ECS projekti kotisivut <https://energyecs.eu/>

[2] IEEE Std 2030.7-2017. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. ISBN 978-1-5044-4608-2.

[3] Kukkola M. 2022. Mikroverkon suojaus - Yleiset periaatteet ja toteutus opetusympäristössä, Diplomityö, LUT yliopisto.



Kuva 4 Microgrid järjestelmän toiminnalliset osat, esimerkkejä laitteista sekä sähkötekniiset ja automaation liitynnät [2], [3]

Heikki Kurki (Oamk), Ville Valima (OY) ja Tero Hietanen (Oamk)

# Älykkään sähköverkon käytön optimointi ja digitaalinen mallinnus

**Abstrakti:** OAMK:n hybridilaboratorion älykäs sähköverkko on paikallinen mikroverkko. Se palvelee oppimis- ja tutkimusalueena, jossa voidaan opiskella, tutkia ja pilotoida pienehköjen hajautettujen energiaressurssien käyttöön liittyviä ratkaisuja. Meneillään olevan MicroGrid-hankkeen puitteissa ollaan toteuttamassa mikroverkon hallintasovellusta, jonka avulla optimoidaan verkon resurssien käyttöä. Simulink-virtuaalimallina toteutettua verkon digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää fyysisen sähköverkon suunnittelu- ja kehitystyön tukena sekä erilaisten käyttötilanteiden simuloinnissa.

**Asiasanat:** mikroverkko, digitaalinen kaksonen

**Heikki Kurki:** E-mail: [Heikki.Kurki@oamk.fi](mailto:Heikki.Kurki@oamk.fi)

**Second Author: Ville Valima:** [Ville.Valima@oulu.fi](mailto:Ville.Valima@oulu.fi)

## 1 Johdanto

**Mikroverkko**-nimitystä (engl. microgrid) käytetään sähköverkosta, johon on liitetty hajautettuja sähköenergian tuotanto- ja varastointiyksiköitä, kulutusjouktoon osallistuvia kuormituksia ja rajallinen määrä asiakkaita. Sen sähköntuotantolaitteistojen kokonaisteho on tyypillisesti alle 100 kVA. Standardissa SFS 6008-2 käytetään vastaavasta järjestelmästä nimitystä **Tuottaja-kuluttajan sähköasennus** eli **PEI-asennus** (Prosumer's Electrical Installation). Standardin mukaan PEI-asennus on pienjännitesähköasennus, joka voi toimia yleiseen jakeluverkkoon kytkettynä tai itsenäisenä saarekeverkkona paikallisten teholähteiden tai sähkövarastojen avulla. Sen energiavirtoja valvotaan ja ohjataan energianhallintajärjestelmän avulla. (1, s. 7)

Kiinnostus mikroverkkoja ja energiayhteisötoimintaa kohtaan on kasvussa. Meneillään oleva energiamurros ilmenee muun muassa siten, että pienimuotoinen hajautettu energiantuotanto lisääntyy. Tavoitteena on myös vähentää hiilidioksidipäästöjä ja parantaa energiatehokkuutta. Tähän pyritään tuottamalla energiaa paikallisesti hyödyntäen päästöttömiä tai hiilineutraaleja energialähteitä. Viime aikoina on korostunut erityisesti energiaomavaraisuuden ja huoltovarmuuden merkitys sekä pyrkimys suojautua sähkön hintavaihteluilta.

## 2 Hybridilaboratorion mikroverkko

Hybridilaboratorion mikroverkko on liitetty yleiseen sähkönjakeluverkkoon 20/0,4 kV muuntajan ja

kampusverkon kautta. Mikäli syöttö sieltä estyy, mikroverkko siirtyy saareketilaan. Sähköä voidaan saarekekäytössä tuottaa UPS-G-laitteistolla, joka on 50 kW dieselgeneraattorin ja superkondensaattoriyksikön muodostama kokonaisuus. Sähkökatkostelessa superkondensaattorit syöttävät mikroverkkoon tarvittavan tehon, kunnes dieselgeneraattori on käynnistynyt ja tahdistunut.

Mikroverkkoon liitetyn aurinkoenergiajärjestelmän huipputeho on 35 kW<sub>p</sub> ja sen tuotanto painottuu luonnollisesti kesäkuukausiin. Akkuenergiavaraston kapasiteetti on 50 kWh ja sen suurin antoteho on 40 kVA. Suurimmat yksittäiset kuormitukset ovat sähköautojen latausasemat (2 x 22 kW), sähkökattila (36 kW) ja lämminvesivaraaja (18 kW). Niiden avulla toteutetaan tarvittaessa kulutusjouktoa, jolla kulutuksen huipputeho rajoitetaan enintään 50 kW:iin.

Laboratorion mikroverkkoa voidaan nimittää myös älysähköverkoksi, jolle on ominaista kattava tiedonkeruu ja suuri mittausrikkyyden jakokeskusten johtolähtöjen jännite-, virta-, teho- ja energiatiedot mitataan ja tallennetaan SQL-tietokantaan. Tiedon analysointityökaluna ja visualisointiympäristönä toimii Schneider Electricin energianhallintaan ja -valvontaan soveltuva selainpohjainen PME (Power Monitoring Expert) -tehonhallintajärjestelmä.

## 3 Mikroverkon hallintaohjelmisto

Parhailaan on meneillään SICAM-ympäristössä toimivan mikroverkon hallintajärjestelmän hankinta. Sen avulla pystytään hyödyntämään verkon energiaressursseja optimaalisesti eri käyttötilanteissa. Hallintajärjestelmä koordinoi ja optimoi kunkin mikroverkkoon energiaressurssin käyttöä yksilöllisesti ottaen huomioon verkkotoiminnalle määritellyt tavoitteet, joiksi on valittu energiansäästön maksimointi, CO<sub>2</sub>-päästöjen minimoointi sekä kustannussäästöjen maksimointi. (2, s. 20)

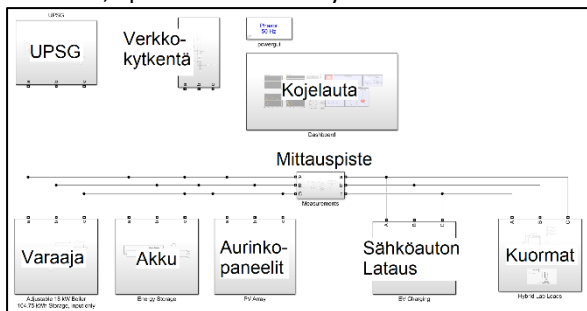
Energianhallintasovellus ohjaa järjestelmää hyödyntämään aurinkosähköllä tuotetun energian täysimääräisesti käyttäen akustoa energiaravastona. Näin pienennetään CO<sub>2</sub>-päästöjä. Silloin kun oma energiantuotanto on suurempi kuin kulutus, ylijäämä siirtyy yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Joustavat kuormitukset ja akusto ovat keskeisiä välineitä myös silloin, kun halutaan kustannussäästöjä eli pienentää sähkölaskua. Spot-hinnan ollessa korkea on järkevää käyttää omalla aurinkosähkölaitteistolla tuotettua tai

edullisella spot-hinnalla hankittua, akustoon varastoitua sähköä. Näitä tavoitteita edistetään myös kulutusjoustoos osallistuvien kuormitusten avulla.

Optimoinnissa otetaan huomioon muuttuvina parametreinä mm. sähkön spothinta, polttoaineen hinta, reaaliaikainen säätieto, seuraavan päivän sääennuste ja laboratorion kuormitusennuste. Hallintaohjelmisto tuottaa edellisenä päivänä ennusteiden perusteella järjestelmän tuotanto- ja kulutussuunnitelman ja muodostaa ajo-ohjelman seuraavalle päivälle. Kunkin päivän aikana järjestelmä ohjaa energiaresursseja reaaliaikaisesti ja tekee tarvittavat korjaukset ajo-ohjelmaan optimoiden resurssien käyttöä asetettujen tavoitteiden perusteella. Se päivittää kunkin resurssilaitteiston asetusravot siten, että mikroverkon tehotasapaino säilyy kuormitusten satunnaisvaihtelusta huolimatta.

#### 4 Mikroverkon digitaalinen kaksonen

Sähköverkosta on tehty digitaalinen kaksonen hankeyhteistyössä Oulun yliopiston kanssa. Mallinnuksessa käytetty ohjelmistoversio on Matlab 2022a. Keskeisin mallinnukseen käytetty Matlab-työkalupaketti on loogisten blokkidiagrammien suunnitteluohjelma Simulink ja sen lisäosa Simscape Electrical; Specialized Power Systems.



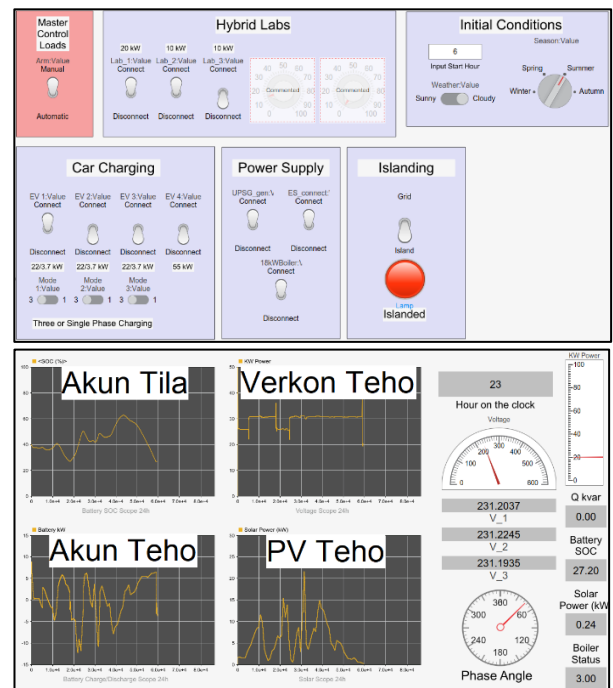
Kuva 1. Laboratorion mikroverkon Simulink-malli

Digitaalisesta kaksosesta on kaksi eri mallia; jatkuva (Continuous-) malli, joka kuvaa yksityiskohtaisemmin verkon vaihtovirtakomponenttien toimintaa, mutta on laskennallisesti raskas, sekä yksinkertaistempi osoitin- (phasor-) malli, joka käyttää laskennassa kompleksisia virta- ja jänniteosoittimia ennalta määritellyllä taajuudella. Jatkuva malli sopii paremmin alle sekunnin kestävien ilmiöiden kuten laitteiden käynnistymisen ja sammumisen aiheuttamiin taajuus- ja jännitepoikkeamien kuvaamiseen. Phasor-malli sopii puolestaan päiviä tai viikkoa kestävien tapahtumien kuten energiavaraston tilan tai aurinkopaneelien tuotannon kuvaamiseen.

Mikroverkon phasor-mallissa (kuva 1) pääasiallisina energian tuottajina ovat PID-ohjattu 50 kW generaattori ja aurinkosähköjärjestelmä. Aurinkopaneelien tuotanto on mallinnettu toteutuneen tuotantodatan pohjalta. Käyttäjä voi simuloinnissa määrittää vuodenajan ja sään, joiden perusteella mallin sisäinen logiikka valitsee päivittäisen

tuotantoprofiilin. Mallissa oleva akusto ja generaattori tasoittavat jännitteen vaihtelua verkossa. Tilanteissa, joissa jännite on alle nimellisarvon, akusto syöttää energiaa ja generaattori nostaa tehoa. Vastaavasti jos jännite on yli normaalin, akku varastoi energiaa verkosta ja generaattori vähentää tehoa. Ylimääräinen energia voidaan myös johtaa lämminvesivaraajaan, joka käyttäytyy mallin näkökulmasta kuin yksisuuntainen akku.

Mallissa olevia laboratorion muuta kuormitusta sekä ja sähköauton latauskuormia vastaavat staattiset kolmivaihekuormitukset, jotka voidaan kytkeä verkkoon tai irrottaa siitä mallin ohjauspaneelista löytyvillä vipukytkimillä (kuva 2).



Kuva 2. Simulointimallin "Kojelautaikkunat". Ylempänä alkuarvojen ja kuormitusten asettelupaneeli ja alempana seurattavien suureiden havainnollistus.

#### 5 Yhteenvedo

Hybridilaboratorion älykäs sähköverkko ja sen digitaalinen kaksonen ovat jo kehitysvaiheessaan osoittautuneet havainnolliseksi ja monipuoliseksi oppimis- ja kehitysympäristöksi, joka palvelee sekä opetusta että alan tki-toimintaa. Siinä voidaan tutkia ja havainnollistaa mikroverkon toimintaa eri käyttötilanteissa ja pilotoida erilaisia toimintamalleja.

#### Lähteet

1. SFS 6008-2:2020. Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-2: Toiminnallisuus. Tuottaja-kuluttajan pienjännitesähköasennukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2020.
2. SFS 6008-1:2020. Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-1: Toiminnallisuus. Energiatehokkuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2020.

# A Low Voltage Flexo Actuator – preliminary design, test and kinematic models

Tapio Heikkilä <sup>1</sup>, Terho Kololuoma <sup>2</sup>, Markku Suomalainen<sup>1</sup>, Samuli Soutukorva <sup>1</sup> and Minna Kehusmaa <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

<sup>2</sup> The Warming Surfaces Company

\* Correspondence: tapio.heikkilal@vtt.fi

## Abstract:

Light weight, low-voltage activated flexible technologies will enable novel, safe and extremely low cost mechanical actuators. These are suitable for a variety of applications which imply recyclable grippers, part holders, conveyors e.g. for hygienic food handling applications and other active IoT devices. Novel findings with ionic liquid based actuators enable low operating voltages revolutionizing hence the development of even paper based flexible robot structures.. We report our first prototype of a low voltage flexo actuator, suitable for utilization of printing technologies for the use of the fabrication of the electroactive material stack. Key results are composed of the choice of the additives to tune the actuator fluid and material properties, and kinematic modelling of the actuator for a device of a chain of actuators.

**Keywords:** flexo actuator; low voltage; kinematics



Eppu Heilimo, Janne Alatalo\*, and Mika Rantonen

# Predicting the electricity consumption of Finland

**Abstract:** This paper evaluates the performance and computational requirements of seven different machine learning (ML) algorithms to predict the electricity consumption of Finland. The forecasted period is 24 hours in to the future using 24 hours of historical data as an input. The tested ML algorithms were linear regression, random forest (RF), gradient decent regression, support vector regression, multilayer perceptron, convolutional neural network (CNN), and WaveNet. A dataset was constructed by combining three data sources containing historical data about the electricity usage, weather, and industry turnover. The CNN model achieved the best results with both RF and WaveNet in the second place with comparable performance to each other.

**Keywords:** electricity consumption prediction, machine learning, benchmark

---

**Eppu Heilimo:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: eppu.heilimo@jamk.fi

**\*Corresponding Author: Janne Alatalo:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: janne.alatalo@jamk.fi

**Mika Rantonen:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: mika.rantonen@jamk.fi

## 1 Introduction

Knowing the country's next day electricity consumption in advance would be advantageous. To keep the power infrastructure running a balance needs to be kept between the electricity production and consumption. If the electricity consumption is known in advance, the production can be planned ahead of time with optimal resources. Electricity consumption prediction is not a new concept. Prior art can be found, such as [3], where the authors tested different machine learning (ML) algorithms to predict the power consumption of a university campus. In this study we test different ML algorithms to predict the electricity usage of Finland for the next 24 hours.

## 2 Materials and Methods

The dataset was generated by combining three open access dataset sources. The electricity consumption of Fin-

land was obtained from the open access download portal hosted by the Finnish national grid operator Fingrid [1]. The data is recorded with one hour interval and includes the total electricity consumption in Finland in MW h/h. This data was enriched with weather data from Helsinki-Vantaa Airport weather station. Weather changes the heating and cooling requirements of buildings; therefore, it is an important variable to convey for the models. The data was obtained from an open access portal hosted by the Finnish Meteorological Institute [2]. The third data source was the monthly turnover of the Finnish industry. The industry accounts 45% of total electricity usage in Finland [7]. The industry income was used to convey information about the state of Finnish industry. The assumption was that the industry uses less electricity during economic depression and that way the models can use this data to improve the predictions. The data for the industry turnover was obtained from Statistics Finland open access portal [6].

Finally, the dataset was supplemented with the information about holidays, time of the week, and the time of the year. Time of the week and year were encoded to vectors using sin/cos encoding method splitting the features to two distinct vector components for each [4].

The dataset consists of a set of input/target samples. The objective was to predict the electricity consumption for the next 24 hours, thus the targets were vectors with the length of 24. The length of the input was likewise set to 24 hours, producing input matrices with a size of  $24 \times 19$  where the final features were:

- Electricity consumption
- Air temperature
- Air temperature for the next day
- Wind speed
- Wind speed for the next day
- Direct solar radiation
- Snow depth
- Snow depth for the next day
- Industry turnover
- Time of the year (sin/cos encoded)
- Time of the year for the next day (sin/cos encoded)
- Time of the week (sin/cos encoded)
- Time of the week for the next day (sin/cos encoded)
- Days until the next holiday
- Days until the next holiday for the next day

For the models that do not support multidimensional input, the input matrix was squashed to a vector with a

length of 456. For the CNN model, the input matrix was constructed without separating the next day’s features (air temperature, wind speed, snow depth, day of the week, days until the next holiday) to a separate feature. Instead, the input was constructed for 48 hours making the input matrix to be  $48 \times 11$ . The features that did not have known forecasts for the next day (electricity consumption, industry turnover and direct solar radiation) were set to zero for the hours from 25 to 48.

The generated dataset spanned the period from the 1st of January 2013 to the 10th of December 2019. The data from the year of 2019 was reserved for testing and all other data was added to the training dataset. The samples were generated using rolling window method where the first 24 hours were used as the input and the following 24 hours were used as the target. The next sample was generated by shifting the window one hour over and this was repeated until reaching the end of the dataset. The final dataset consisted of 43,800 and 8,760 samples in train and test datasets respectively.

The tested ML models were: linear regression (LR), random forest (RF), gradient descent regression (GRR), support vector regression (SVR), multilayer perceptron (MLP), convolutional neural network (CNN), and WaveNet [5]. These are all well known ML models except for the WaveNet that was added to the benchmark for the reason that we had previous experience with the model. The neural network models were implemented using TensorFlow deep learning framework, and for the other models an existing implementation was used from the scikit-learn ML library.

The models were trained with the train dataset and the test dataset was used to compute the mean absolute error (MAE) and maximum 97th percentile error (ME) metrics. These metrics were used to compare the model performance. Additionally, the training and inference times were measured to compare the computational requirements of the models.

## 3 Results

Table 1 presents the results from the benchmark. The MAEs are all more than 200 MW h/h which is a large error. The CNN model achieves the highest performance with the lowest scores in MAE and ME metrics. The second best performing models are WaveNet and RF with similar scores in both metrics. The LR, GRR, SVR, and MLP models have poor performance in both metrics when comparing to the three best performing models.

Computationally the neural network models are more demanding than the more traditional ML models. Even though the neural networks can efficiently utilize GPUs, the training and inference times are longer when comparing to RF model that runs on CPU and has comparable performance.

**Table 1.** Benchmark results. The unit for the errors is MW h/h. MAE is Mean Absolute Error and ME is Maximum Error

Model	MAE	ME	Train time	Inference time
CNN	283	991	5 min (GPU)	0.5 ms (GPU)
WaveNet	337	1346	30 min (GPU)	85 ms (GPU)
RF	343	1317	52 sec	0.35 ms
MLP	489	1764	1 min (GPU)	0.5 ms (GPU)
LR	533	1762	1 sec	0.04 ms
GRR	546	1852	10 sec	4 ms
SVR	611	2022	90 sec	3 ms

This research was funded by the Regional Council of Central Finland/Council of Tampere Region and European Regional Development Fund as part of the *Data for Utilisation – Leveraging digitalisation through modern artificial intelligence solutions and cybersecurity* and *coADDVA - ADDing Value by Computing in Manufacturing* projects of Jamk University of Applied Sciences.

## References

- [1] Fingrid. Electricity consumption in Finland. URL: <https://data.fingrid.fi/en/dataset/electricity-consumption-in-finland>.
- [2] Finnish Meteorological Institute. Download observations. URL: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/download-observations>.
- [3] I. Hajjaji, H. E. Alami, M. R. El-Fenni, and H. Dahmouni. Evaluation of artificial intelligence algorithms for predicting power consumption in university campus micro-grid. In *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pages 2121–2126, 2021. doi:10.1109/IWCMC51323.2021.9498891.
- [4] T. Mahajan, G. Singh, and G. Bruns. An Experimental Assessment of Treatments for Cyclical Data. In *CSCSU 2021*. 2021. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.12680/th83m446n>.
- [5] A. v. d. Oord, S. Dieleman, H. Zen, K. Simonyan, O. Vinyals, A. Graves, N. Kalchbrenner, A. Senior, and K. Kavukcuoglu. Wavenet: A generative model for raw audio, 2016. doi:10.48550/ARXIV.1609.03499.
- [6] Statistics Finland. 112c – index of turnover in industry monthly. URL: [https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/en/StatFin/StatFin\\_\\_tlv/statfin\\_tlv\\_pxt\\_112c.px/](https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/en/StatFin/StatFin__tlv/statfin_tlv_pxt_112c.px/).
- [7] Statistics Finland. Energy in Finland. Technical report, 2022. URL: <https://www.doria.fi/handle/10024/185778>.

Petri Hietaharju, Esko Juuso, Jari Ruuska\* and Mika Ruusunen

# Modelling for Multi-objective Optimization in a District Heating Network

**Abstract:** Aim of the research is to develop tools and solutions for the multi-objective optimization of energy systems to be adapted in the prevailing conditions. One aim is to provide scalable integration procedures for solar thermal and exhaust air heat pump systems. Another aim is to develop online data quality monitoring. Third aim was to predict the future states of the heat pump with the measured data. Main research task was to develop multi-objective optimization. The research was done in co-operation with several companies and different research institutes. Research reported in this article is done in University of Oulu.

**Keywords:** optimization, district heating, multi-objective

**\*Corresponding Author: Jari Ruuska** Control Engineering Research Group, Environmental and Chemical Engineering Research Unit, University of Oulu, Finland, E-mail: jari.ruuska@oulu.fi

**Other Authors:** Same Affiliation

## 1 Introduction and background

Increasingly complex energy systems require new tools to perform it efficiently. In addition to increasing complexity, the uncertainty in the energy production and consumption increases due to increasing amount of intermittent renewable energy generation and more involvement in the demand side. The increasing amounts of data available from energy systems can help to improve the performance of energy systems, but the collection, transmission and processing of the data is challenging.

Multi-objective optimization is becoming important in balancing environmental impacts together with the economic costs and operation of the energy system. Furthermore, many of the published articles on multi-objective optimization in energy systems are related to the optimization of the design of the energy systems and not on the operational optimization.

Optimization solutions need to be modular and use advanced predictions on energy production and consumption. These predictions will utilize advanced weather forecasts that include uncertainty. Integration of heat and electricity is expected to reveal new synergies in the energy system. With this approach better management of energy systems can be achieved increasing the overall energy efficiency of the systems.

There are high flexibility potentials through storages and demand responses when integrating with the district heating. Interfaces are needed with the system level optimization to exchange information on situations, capacities and allocation.

## 2 Aim

Aim of the research is to develop tools and solutions for the multi-objective optimization of energy systems to be adapted in the prevailing conditions. Use of advanced weather forecasts aims to improve predictions on the state of energy devices and enable the inclusion of the uncertainty in the optimization. The integration of heat and electricity including production, distribution and demand aims to more efficient energy systems.

Modular optimization solution facilitates the applicability of the approach to different systems. Furthermore, the project provides environment for new business models. The solutions introduce new business opportunities in the energy production as well as in the case studies.

## 3 Research, case studies

The energy systems are undergoing a transformation from a centralized fossil-fuel oriented supply chain into a decentralized energy system with renewable energy. Decentralization of the energy system is causing an increase in complexity, which is why proper energy device integration is important to ensure good performance in the whole system. Research aims at providing scalable integration procedures for solar

thermal and exhaust air heat pump systems. Synergy between district heating networks and the power system is also considered in exhaust air heat pump integration. [1]

Data quality monitoring is an important aspect in real-time data-based operation and of growing interest. Studying the different methods and approaches in real-time data quality monitoring, in the context of the energy systems, can yield some highly beneficial improvements in the ever-growing demand for material efficiency and energy savings. Quality flags, based on appropriate quality dimensions, can improve the decision making of systems in real time. The goal of this study is to find out, how this can be applied, utilizing the varied and large volumes of energy industry data. [2]

One aspect was to predict the future states of the heat pump with the measured data. The aim was to find answers to question that what kind of data-based methods can be used to effectively predict the operation of heat pumps and how changes in the state of these systems can be detected. [3]

Optimization simulator was developed to study multi-objective optimization in district heating systems. The optimization considers economic and environmental objectives and includes production-side as well as demand-side. Different production and storage technologies can be considered including combined heat and power (CHP) plants, heat-only boilers (HOB), heat pumps, solar panels, solar thermal collectors and heat and electricity storage. Demand-side includes the flexibility of the buildings in form of thermal storage capacity and own production like heat pumps, solar panels and solar thermal collectors.

CHP and HOB plants are modelled considering the thermal and electrical efficiencies and ramp rates. Heat pumps can be air-source, ground-source or water-source heat pumps. Their coefficient of performance (COP) is based on the temperature difference between the sink and source temperatures. Efficiencies are used to calculate the solar energy production. The efficiency of the solar thermal collectors is based on the temperature difference between the mean collector temperature and outdoor temperature and the solar irradiance. For storage systems, heat losses and discharge and charge efficiencies are considered.

Dynamic heat demand model is used to predict the heat demand for the buildings [4]. Considering the heat losses and time delay related to the district heating network, the heat supply is predicted based on the predicted heat demand [5]. Dynamic indoor temperature model is used to calculate the flexibility

potential of the buildings utilizing their heat storage capacity [6]. Based on the predicted heat demand, heat supply, the flexibility potential of the buildings and their own production, the energy production and the utilization of storage is optimized considering both the economic and environmental aspects. The objectives can relate to both the production-side and demand-side. The optimization problem is formulated as a set of linear equality and inequality constraints and solved using mixed-integer linear programming (MILP). Novelty comes from multi-objective approach and the inclusion of demand-side flexibility in form of heat storage capacity of buildings and their own energy production.

## Acknowledgements

This research has received funding from Business Finland Co-Innovation project Highly Optimized Energy Systems – HOPE.

## References

- [1] Pörhö H, Intergration procedures of energy devices. Master's thesis, University of Oulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202108058827>
- [2] Välikangas H, Real-time data quality monitoring and improvement in energy networks. Master's thesis, University of Oulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202109249050>
- [3] Pyhtilä E, Data-based modelling for predicting efficiency of heat pumps (in Finnish). Master's thesis, University of Oulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202109239046>
- [4] Hietaharju P, Ruusunen M, Leiviskä K. Enabling Demand Side Management: Heat Demand Forecasting at City Level. *Materials* 2019;12:202. <https://doi.org/10.3390/ma12020202>.
- [5] Hietaharju P, Ruusunen M, Ruuska J. Demand-based short-term heat supply prediction model for district heating. Unpublished manuscript.
- [6] Hietaharju P, Ruusunen M, Leiviskä K. A Dynamic Model for Indoor Temperature Prediction in Buildings. *Energies* 2018;11:1477. <https://doi.org/10.3390/en11061477>.

Enso Ikonen\*, Janne Torvela, Minna Törmälä, Jyrki Savela, Mika Pylvänäinen, Joni Vasara and Toni Liedes

# Subsurface drainage and irrigation automation for cultivated land groundwater management

**Abstract:** Automation of cultivated land groundwater management using subsurface drainage is considered. The necessary elements including actuating valves or gates, energy management, ICT infrastructure and model-based monitoring and control are discussed.

**Keywords:** water resources, agriculture, model predictive control

\*Corresponding Author: Enso Ikonen, Intelligent Machines and Systems (IMS), University of Oulu, E-mail: [enso.ikonen@oulu.fi](mailto:enso.ikonen@oulu.fi)

Janne Torvela: IMS, E-mail: [janne.torvela@oulu.fi](mailto:janne.torvela@oulu.fi)

Minna Törmälä: IMS, E-mail: [minna.2.tormala@oulu.fi](mailto:minna.2.tormala@oulu.fi)

Jyrki Savela: IMS, E-mail: [jyrki.savela@oamk.fi](mailto:jyrki.savela@oamk.fi)

Mika Pylvänäinen: IMS, [mika.pyvlanainen@oulu.fi](mailto:mika.pyvlanainen@oulu.fi)

Joni Vasara: IMS, E-mail: [joni.vasara@oulu.fi](mailto:joni.vasara@oulu.fi)

Toni Liedes: IMS, E-mail: [toni.liedes@oulu.fi](mailto:toni.liedes@oulu.fi)

## 1 Background

The need for joint improvements in mitigation of greenhouse gas emissions, water loading, carbon sequestration, and efficient use of water resources, act as novel driving forces for refining cultivation practices. The height of the water table is a necessary parameter for ensuring crop growth and enabling carrying capacity for farming operations (Hägglom et al., 2019), but also efficient for regulating greenhouse gas emissions from cultivated peatlands (Evans, 2021). Controlled management of water resources leads to efficient and timely use of water, enabling agriculture to adjust to changing weather and climate conditions. At the same time, the increase in size of farms and responsibilities on farmers has led to an overload of operational activities. As a consequence, there is a need for a holistic, adaptive, and anticipating monitoring and control of farming drainage and irrigation operations, and maintenance of water resources.

More than 60 % of cultivated peatland in Finland is equipped with subsurface drainage. Controlled subsurface drainage provides a potential means for automation assisted control of both drainage and irrigation for the management of time-varying

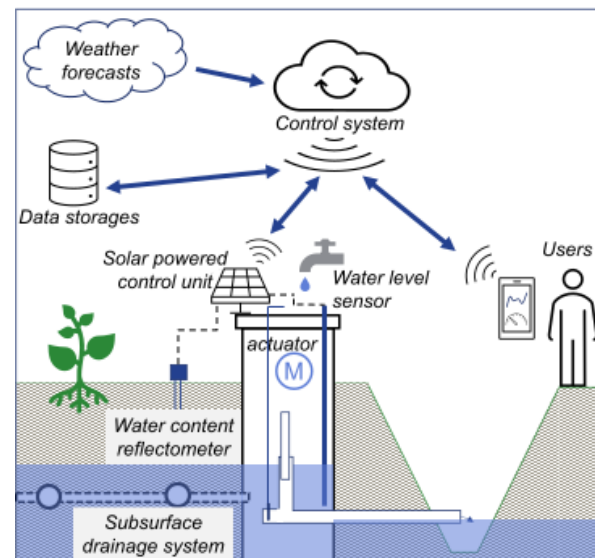


Fig 1. Remote-controlled subsurface drainage system.

groundwater table height, according to the requirements set by the users.

## 2 Aims and methods

Monitoring and control of ground water table requires the development of suitable actuators, power supplies, data transmission, anticipating modeling capabilities, optimization facilities, and a user interface supporting the decision making of the farmer. The outline of the developed infrastructure is illustrated in Fig. 1.

A complete re-design of the control gate valve at the subsurface drainage well aims at improved robustness and minimal energy consumption. A prototype of a motorized valve unit shown in Fig. 2. attaches into an existing gate valve inside a manually controlled well. The design includes battery backed solar powered electricity supply and smart energy management, a suite of sensors for monitoring the ground water level and soil moisture conditions in and around the gated drainage well, and a cellular 3G radio device for communicating with information systems online. Means of interfacing with automated irrigation systems have been reserved, but not implemented at this stage.

The necessary two-way communications infrastructure from the devices to a de-centralized (cloud) or centralized local data storage/computing system has been implemented using common standard internet protocols. Each individual device comes with a backup interface over cellular short messaging services (SMS) for direct control access. A simplified user interface is provided and accessible through a computer or a smart device capable of displaying a web page.

A predictive ground water model together with weather forecasts provides anticipation of water table heights for the near future. A simplified dynamic 1-D model for the subsurface drained field water balance has been derived. The model has then been used in a nonlinear model predictive control (MPC) setup to adjust the ground water height under various constraints set by the system. From control point of view, a meaningful prediction window extends over a period of few weeks. The horizon is limited, due to uncertainties in weather forecasts, limited prediction abilities of system models, and MPC computational load with long horizons. For more details on the MPC design, see Ikonen *et al.* (2023).

### 3 Results

The control well hardware has been tested at various field sites around Kannus, Nivala, and Ruukki during the fall and summer of 2021 and 2022. The main challenges were in optimizing energy use and maintaining reliable communications. Some issues were found regarding the quality of components, especially the cellular radio modules which were found to be somewhat unreliable and inefficient. The tests, however, proved the concept feasible and means of improving reliability and energy use were identified and partially implemented for on-going tests through 2023. The results indicate that further hardware and software revision will make autonomous all-year-round operation possible regardless of the lack of sunlight during December and January.



Fig 2. Prototype of controlled well installed to test area.

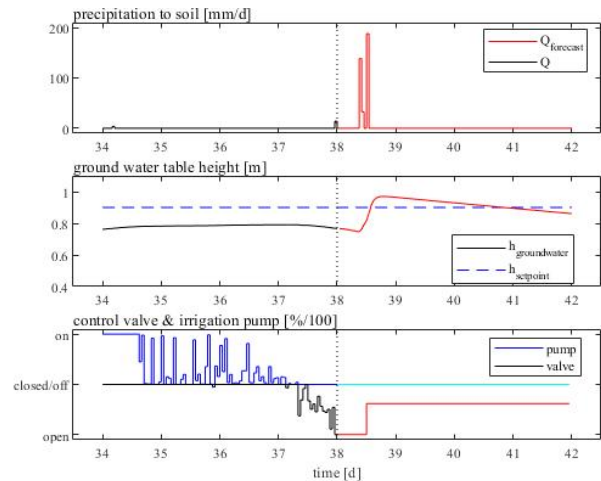


Fig 3. On-line snapshot of MPC in action at day 38. Past irrigation has changed to drainage, due to forecasted rain in the prediction horizon.

The MPC has been tested in simulations. Figure 3 illustrates the concept of MPC, with a 4-day prediction horizon. Ongoing work looks at more efficient MPC implementations, refining the system based on data from field measurements and getting experiences from both the performance and UI/UX from tests at the experiment site.

### 4 Bibliography

Evans, C.D., Peacock, M., and Baird, A.J. (2021) Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 593.

Hägglom, O., H. Salo, M. Turunen, J. Nurminen, L. Alakukku, M. Myllys and H. Koivusalo (2019) Impacts of supplementary drainage on the water balance of a poorly drained agricultural field. *Agricultural Water Management* 223.

Ikonen, E., T. Liedes and J. Vasara (2023) Model predictive controlled subsurface drainage and irrigation for peatland groundwater management. *22<sup>nd</sup> IFAC World Congress*, 9-16 July 2023, Yokohama, Japan.

The work was conducted in three projects from the Catch the Carbon (*Hiilestä kiinni*) research and innovation programme funded by the Ministry of Agriculture and Forestry of Finland: Vesihiisi (*Turvepeltojen hiilipäästöt kuriin innovatiivisella vesienhallinnalla*, 2021–2023), PeltoSäätö (*Peltomaan älykkään vesienhallinnan pilotit*, 2021–2023) and ESKE (*Etähallittavan säätösalaajakaivon kehittäminen ja pilotointi*, 2021–2022) in cooperation with Luke (Natural Resources Institute Finland) and Kpedu (Federation of Education in Central Ostrobothnia).

Ari Isokangas\*, Outi Ruusunen ja Mika Ruusunen

# Laserkeilauksesta ja fotogrammetriasta pistepilveksi

**Tiivistelmä:** Paperin tavoitteena on esitellä 3D-mallinnusmenetelmistä laserskannauksen avulla saatu pistepilvi sekä fotogrammetria, jossa hyödynnetään valokuvia tai videota kohteiden kolmiulotteiseen mittaukseen.

Teollisuudessa vanhankin prosessilaitteen uudistaminen on käytännössä tarkoittanut ensin piirustusten tekoa, joiden mukaisesti laite valmistetaan. Piirustusten teko on työlästä ja suunnitteluvaiheeseen liittyy aina virheen riski. 3D-skannauksilla vanha prosessilaitte voidaan muuttaa nopeasti mittatarkkaan digitaaliseen muotoon, jonka jälkeen tarvittavat muutokset voidaan tehdä. Myös nykyiset prosessilaitteet voidaan skannata digitaaliseen muotoon, muokata tietokoneella ja tarvittaessa myös 3D-tulostaa.

Tässä artikkelissa esitellään ensin Lidar -skannausten avulla muodostettu pistepilvi, joka yhdistettynä 360 asteen panoraamakuviin saadaan aikaan varsin realistisentuntuinen 3D-ympäristö. Fotogrammetriassa kuva tai videomateriaalista saadaan kolmiulotteinen malli ilman erityislaitteita, mutta mittaustarkkuus ei ole niin hyvä kuin laserskannauksessa.

Saatujen pistepilvien avulla voidaan suorittaa tehdassuunnittelua ja uusien prosessilaitteiden sijoittelua. Toisella mantereella oleva alihankkija voi ottaa tarvittavat mitat 3D-mallista ilman paikanpäällä käyntiä. Virtuaalitodellisuus (VR) mahdollistaa virtuaalilasien avulla pistepilven sisällä liikkumisen lähes kuin aidossa ympäristössä. Virtuaalitodellisuuden suurin hyöty lienee kuitenkin operaattorikoulutus, jolloin tehdasympäristöön voidaan tutustua virtuaalimaailmassa. Opetus on sekä turvallisempaa että helpompaa ilman koneiden melua.

**AVAINSANAT** digitalisaatio, pistepilvi, 3D-mallinnus

\* **Yhteyshenkilö:** Ari Isokangas, Tutkijatohtori, Oulun yliopisto, E-mail: [ari.isokangas@oulu.fi](mailto:ari.isokangas@oulu.fi)

## 1 Johdanto

3D-skannauksella monimutkaisenkin esine voidaan muuntaa digitaaliseen kolmiulotteiseen muotoon. 3D-skannauksessa kappale voidaan mitata noin

kymmenesosassa käsin mittaamiseen käytetystä ajasta ja vastaavasti tarkkuus on jopa sata kertaa parempi (Ruonaniemi, 2019). 3D-skannaus perustuu yleensä laserkeilaukseen, jossa mittakeilain lähettää säteitä tiheänä rasterina. Lasersäteen kohdatessa esteen keilain mittaa etäisyyden ja säteen intensiteetin muutoksen, jolloin kimmoamispisteen koordinaatit voidaan laskea. Kohde voidaan myös keilata useammasta suunnasta katvealueiden välttämiseksi. Tuloksena on pistepilvi, josta saadaan hahmotettua kohteen kolmiulotteinen pinta. Yhdessä pistepilvessä voi olla jopa miljardeja pisteitä. (Wikipedia laserkeilaus, 2019)

Laserkeilaimeen voidaan liittää kamera, jolloin pistepilven todelliset värit pystytään muodostamaan pistepilvien ja kameran tallentamien kuvien avulla. Laserkeilauksen avulla lähes mikä tahansa kohde voidaan tallentaa digitaalisesti 3D-malliksi (Torikka, 2017). Laserkeilausta on hyödynnetty esimerkiksi teollisuuslaitosten korjaussuunnittelussa, maaston korkeuskartoituksissa, metsien kartoituksessa, arkeologiassa sekä tielinjojen, tunneleiden ja siltojen mittauksissa (Wikipedia laserkeilaus, 2019). Autonomisten alusten yleistyessä esimerkiksi satamien on valmistauduttava tuottamaan riittävästi tietoa väyläalueesta. Esimerkiksi Vuosaarella on testattu lidaria (laserkeilaus) tuottamaan reaaliaikaista 3D-karttatietoa (Martiala, 2018).

Laserkeilaimien asetuksista voidaan myös yleensä vaikuttaa tarkkuuteen. Suurempi tarkkuus kuitenkin kasvattaa mittausaikaa ja tiedoston kokoa. Lisäksi on huomioitava, että ikkuna- ja peilipinnoista ei yleensä saada luotettavia mittauksia. Tämän vuoksi kiiltävät pinnat voidaan peittää esimerkiksi teipillä mittausten ajaksi.

## 2 Tulokset

Oulun yliopiston minipilot koehallissa suoritettiin laserkeilaus 24 eri pisteessä, jotka yhdistettiin yhdeksi pistepilveksi. Laserskannauksen yhteydessä otettiin myös 360 asteen panoramakuvat, joiden väritietoa on käytetty pistepilven graafisessa esitysmuodossa. Koehalli on täynnä prosessilaitteita ja täydellinen pistepilvi vaatisi valtavan määrän skannauksia, koska kustakin skannauskohdasta jää katvealueita. Tehdyillä skannauksella saatiin kuitenkin taltioitua keskeiset

osiot varsin hyvin ja lopulliseen pistepilveen jätettiin noin 100 miljoonaa pistettä. Pistepilvi on nähtävissä [täältä](#) ja on riittävän kevyt katsottavaksi esimerkiksi matkapuhelimella. Pistepilven prosessilaitteista tehdyt dimensiomittaukset vastasivat todellisia prosessilaitteita erinomaisesti. Virhe oli maksimissaan 1 cm, joka oli myös pistepilven mittaustyökalun resoluutio.

Laserskannauksen avulla voidaan mallintaa myös yksittäisiä prosessilaitteita, mutta tässä paperissa on esitelty toinenkin vaihtoehto. [Fotogrammetrin 3D-malli](#) luotiin prosessilaitteesta, joka ei toiminut suunnitellulla tavalla. Mallinnuksen jälkeen vanhaan versioon tehtiin tarvittavat muutokset CAD -ohjelmistolla ja uusi prosessilaitte 3D-tulostettiin. Prosessilaitte mallinnettiin Unlimited 3D scanner -Android ohjelmistolla matkapuhelimen avulla. Prosessilaitteen alla on tarkoituksella sanomalehti, jotta käsivaralta kuvattu materiaali voidaan kohdentaa mahdollisimman hyvin. Ohjelmiston avulla on mahdollista käyttää joko kohteesta kuvattua video- tai kuvamateriaalia. Prosessilaitteen tapauksessa käytettiin 40 kuvaa, jotka otettiin kohteen ympäriltä. Ohjelmisto lataa lähdemateriaalin pilveen ja tekee automaattisesti kuvien yhdistämisen valmiiksi 3D-pintamalliksi. Kyseisen mallin tapauksessa lopullinen malli oli valmis 10 minuutissa. Jotkut fotogrammetriaa hyödyntävät ohjelmistot eivät tee pintamallia vaan pistepilven, kuten pienessä [oppilastyössä](#). Tässä tapauksessa oli perusteltua käyttää suoraan pintamallin tekevää ohjelmistoa, koska prosessilaitteen uusi versio 3D-tulostettiin.

Pistepilviä voidaan hyödyntää myös operaattorikoulutuksessa. Teollinen ympäristö sisältää vaaranpaikkoja ja kouluttajaa on usein vaikea kuulla koneiden melun takia. Virtuaaliympäristössä nämä eivät ole ongelma ja koulutusta on mahdollista käydä lähes paikka- ja aikariippumattomasti. Virtuaalimaailmassa voidaan tarkastella kolmiulotteisia objekteja kaikista mahdollisista suunnista. Lisäksi on mahdollista suunnitella johdotuksia sekä tarvittaessa harjoitella laitteiden purkua ja kokoamista. Isommassa pistepilvessä voidaan tehdä myös tilasuunnittelua.

### 3 Yhteenveto

Paperissa esitellään 3D-mallinnusmenetelmistä laserskannauksen avulla saatava pistepilvi sekä fotogrammetria, jossa hyödynnetään valokuvia tai videota kohteiden kolmiulotteiseen mittaukseen. Ensin esitellään Oulun yliopiston minipilot hallin pistepilvi, joka on tehty 24 erillisestä Lidar -skannauksista yhdistettynä 360 asteen panoraamakuviin. Prosessilaitte on tehty fotogrammetrisesti 40 kännykällä otetusta kuvasta, jotka ohjelmisto on automaattisesti

muuttanut 3D-muotoon.

3D-mallinnuksella voidaan saavuttaa huikeita hyötyjä. 3D-skannauksessa kappale voidaan mitata noin kymmenesosassa käsin mittaamiseen käytetystä ajasta ja vastaavasti tarkkuus on jopa sata kertaa parempi. (Ruonaniemi, 2019) Teollisuudessa vanhankin prosessilaitteen uudistaminen on käytännössä tarkoittanut ensin piirustusten tekoa, joiden mukaisesti laite valmistetaan. Piirustusten teko on työlästä ja suunnitteluvaiheeseen liittyy aina virheen riski. 3D-skannauksilla vanha prosessilaitte voidaan muuttaa nopeasti mittatarkkaan digitaaliseen muotoon, jonka jälkeen tarvittavat muutokset voidaan tehdä. Myös nykyiset prosessilaitteet voidaan skannata digitaaliseen muotoon, muokata tietokoneella ja tarvittaessa myös 3D-tulostaa.

Saatujen pistepilvien avulla voidaan suorittaa tehdassuunnittelua ja uusien prosessilaitteiden sijoittelua. Toisella mantereella oleva alihankkija voi ottaa tarvittavat mitat 3D-mallista ilman paikanpäällä käyntiä. Virtuaalitodellisuus (VR) mahdollistaa virtuaalilasien avulla pistepilven tai 3D-mallin sisällä liikkumisen lähes kuin aidossa ympäristössä. Virtuaalitodellisuuden suurin hyöty lienee kuitenkin operaattorikoulutus, jolloin tehdasympäristöön voidaan tutustua turvallisesti virtuaalimaailmassa. Myös opetus on helpompaa ilman koneiden melua.

### 4 Lähdeluettelo

1. Ruonaniemi, A., 2019. Kolmiulotteinen tulostus on mullistamassa Suomen teollisuutta: "Suurin osa tuotteistamme löytyy ihmisten suista" saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10621007>
2. Wikipedia, Laserkeilaus. saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Laserkeilaus>
3. Torikka, R. 2017. 3D-laserskannaus mullistaa maisema- ja rakennussuunnittelun. saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9602953>
4. Martiala, K. ,2018. Vuosaari mukana autonomisen liikenteen kehityksessä. Saatavilla: <https://www.portofhelsinki.fi/verkkolehti/vuosaari-mukana-autonomisen-liikenteen-kehityksessa>



Antti Jaatinen

# Työkoneiden datankeruun käytännön ongelmia

**Tiivistelmä:** Työkoneista anturein mitattua dataa hyödyntävät koneoppimis- ja analytiikkasovellukset kohtaavat usein vaikeuksia datan laadun takia. Tässä esitelmässä kerron kokemuksista tästä ongelmasta tiedonkeruun näkökulmasta ja esitän joitain ehdotuksia tilanteen parantamiseksi.

Esitelmä perustuu henkilökohtaisiin kokemuksiin aiheesta Metso Outotecin automaatio- ja digitalisaatiotyössä. Esitän myös joitain parannusehdotuksia suunnittelijoille.

**Avainsanat:** datan laatu, asioiden internet, reunalaskenta, etävalvonta

**Antti Jaatinen:** Valmet Automation, email: antti.jaatinen@valmet.com

## 1 Johdanto

Tietojärjestelmästä saatu tapahtumadata on kovin erilaista verrattuna ”todellisesta maailmasta” mittaamalla saatuun dataan nähden. Jälkimmäinen voi olla monella tapaa värjättyä tai virheellistä. Ilmiö on tunnettu mittaus- ja säätötekniikan alalla jo vuosikausia, mutta ei välttämättä ole kaikille datankeruun ja analytiikan parissa toimiville tuttua. Lisäksi massatuotetussa koneautomaatiossa joudutaan tekemään kompromisseja verrattuna teollisiin automaatiojärjestelmiin, saati sitten puhtaisiin mittausjärjestelmiin. Mittausjärjestelmän rakentaminen ja ylläpito ovat aina haastavia tehtäviä, ja työkoneiden ympäristössä se saattaa jopa olla mahdotonta anturien altistuessa vaikeille ympäristöolosuhteille.

Metso Outotecin digitalisaatiotyössä tuotiin Metrics-alustaan useita uusia laitetyppejä. Näille tarvittiin uusia konnektiviteettiratkaisuja. Tässä työssä samat haasteet tulivat eteen uudestaan ja uudestaan, joten sisäisiä dokumentteja konnektiviteetin vaatimuksista. Suurimmat huolenaiheet olivat tietoturva ja datan laatu.

Data-alkemian harjoittajilla saattaa olla ylioptimistisia odotuksia datan laadun (lähinnä tarkkuuden ja

tiheyden) suhteen. Tällaiset asiat korjaantuvat helpoiten ekskursiolla lähelle dataa tuottavaa laitetta, sillä todellisuus datan alkuperästä hämärtyy helposti pelkkiä numeroita tai käyriä katsoessa.

## 2 Datan keruun ongelmalähteitä työkoneissa

Anturista aloittaessa, sen ominaisuudet harvoin välittyvät ns. pilveen asti. Anturin luotettava toiminta-alue, herkkyys ja tarkkuus ovat kyllä jossain tiedossa, mutta niiden vaikutusta dataan tuskin mietitään. Eikä ole harvinaista, että anturin tyyppi vaihtuu (halvempaan) sarjatuotannon aikana ilman, että muutoksesta tiedotetaan myös datan käyttäjille.

Anturin ominaisuuksien lisäksi mittausjärjestelmän (tässä tapauksessa yleensä koneautomaation) käyttöönotossa on virheen mahdollisuuksia. Näitä ovat anturin kalibrointi ja skaalaus. Miten varmistetaan niiden oikeellisuus? Tallentuvatko näiden parametrien muutokset niin, että ennen ja jälkeen uudelleenkalibrointia saadut mittaustulokset ovat vertailukelpoisia?

Automaatiojärjestelmien kaapeissa olevat luurangot paljastuvat armottomasti, kun ne kytketään tiedonkeruujärjestelmään. Näitä ovat esimerkiksi mittausalueen ylä- ja alarajojen käyttö erikoistarkoituksiin, kuten vaikkapa mittausalueen alarajan käyttäminen vikasignaalinä. Tällöin ei tietenkään voida tietää, onko joku arvo todella nolla vai onko anturiin tullut vika.

Datatyypit osataan ottaa huomioon varsin hyvin, mutta datan kvantisoitumista ei niinkään paljon. Tämä siis tarkoittaa sitä, kuinka isoa mittausarvon muutosta yhden bitin muutos tarkoittaa. Anturin liian iso toiminta-alue verrattuna mitattavaan alueeseen voi aiheuttaa saman ongelman, ja yhdistetty vaikutus on tuhoisa.

Väylät eivät yleensä ottaen vääristä dataa, mutta voivat aiheuttaa toisenlaisia ongelmia, jotka aiheutuvat liian tiheän datankeruun tavoittelusta. Ensiksi ei ole varmaa, että luettavan väylän tila on atominen, eli että kaikki luetut datapisteet kuvaavat samaa ajanhetkeä.

Järjestelmä päivittää niitä usein syklisesti ja vastaavasti tiedonkeruu kerää niitä toisella syklillä. Toisekseen, jos väylä perustuu kyselyihin, ne kuormittavat koneautomaatiota ja voivat hidastaa sen toimintaa ja pahentaa ensiksi mainittua ongelmaa.

### 3 Edge-laskennalle aiheutuvia vaatimuksia

Käytän tässä nimitystä ”edge-laite” koneautomaatioon kytketystä tiedonkeruu- ja käsittelylaitteesta. Vastaavasta laitteesta käytetään usein nimitystä ”gateway”, mutta koska termillä on tarkka merkitys tietoliikennetekniikassa, haluan käyttää eri termiä. Tiedonkeruujärjestelmä on samoin liian suppea termi tällaiselle laitteelle. Edge-laite pystyy kompensoimaan edellä mainittuja ongelmia. Automaation ja edgen kuuluisi olla työpari.

Käytännössä automaatiojärjestelmän päivitykset ovat vaikea asia, jota ei välttämättä voi tehdä etänä, kun taas edge-laite on nykyaikaisempi, jatkuvasti verkkoon yhteydessä oleva laite. Tämä johtaa siihen, että edgeen kehitetään erilaisia virityksiä kompensoimaan koneautomaation ominaisuuksia. Näin menetellessä aiheutuu kuitenkin painetta edgen versioiden ja varianttien hallinnalle. Muistetaanko koneautomaatiota päivittäessä vaihtaa edgenkin konfiguraatio? Tämä ei todennäköisesti ratkaise ongelmaa, vaan siirtää sen edgen konfiguraatioiden versionhallintaan, koska tarvittava edgen softaversio tulee riippuvaiseksi automaation versiosta.

Tietoliikenne ja datan tallennus ei ole ilmaista, joten edge-laitteissa tavallisesti on hystereesiä datan lähetyspuolella, eli datapistettä ei lähetetä, ellei se ole muuttunut yli tietyn rajan. Kustannukset yhden tavun lähettämiseksi eivät ole suuret, mutta kumulatiivinen kustannus datan ja koneiden määrän kasvaessa alkaa jo vaikuttaa. Datan säilyttäminen verkossa ei myöskään ole ilmaista, ja siirto edullisemmasta pitkäaikaisäilöstä laskentaa varten työmuistiin on lisäkustannus.

Tietoturva on syytä muistaa, että koneautomaatiota ei luultavasti ole suunniteltu kytkettäväksi verkkoon. Tietoturva on luultavasti heikolla tasolla. Kannattaa teettää auditointi ja olla tietoinen ongelmista. On myös hyvä ymmärtää, että automaatiojärjestelmä, edge-laite ja tiedonsiirtoratkaisu käyttävät kaikki samaa TCP/IP protokollaa, ja hyökkäys etäyhteyden kautta on mahdollinen, vaikkakin epätodennäköinen.

### 4 Ratkaisuja

Ratkaisuja näihin ongelmiin toki löytyy. Idealistisesti ajatellen koneautomaation pitäisi tukea nykyaikaista

tiedonkeruuta ja olla tietoturvallisesti kytkettävissä edge-laitteen kautta verkkoon. Käytännössä tämä kasvattaa projektien laajuutta liian paljon, mutta projektit tulisi jakaa uusien ja vanhojen järjestelmien osalta niin, että näiden kehitystä voidaan vetää erikseen. Tiedonkeruun ja automaation tulee toimia yhteen, ja projekteissa on varauduttava luurankojen paljastumiseen, eikä ongelmia saa piilotella. Tämä on yrityksen toimintakulttuurin mittari.

Edge-laitteen vaatimuslista on jo pitkä, mutta sen tulisi kyetä parantamaan koneautomaatiosta tulevaa dataa ja suorittamaan laskentaa sille. Missään tapauksessa tuotantojärjestelmästä ns. raakaa dataa ei tulisi lähettää pilveen sellaisenaan.

Edge-laitteen tulee kyetä puskuroimaan ja käsittelemään dataa. Datan siivous ja prosessointi tulisi tehdä niin lähellä laitetta kuin mahdollista, ”jalostusasteen” kasvaessa pilveä kohti mentäessä.

Edge-laitteen tietoturva ei ole tässä esitelmässä juurikaan sivuttu, mutta aihe on laaja, ja kannattaa tarkkaan miettiä omia kykyjä pitää laitekanta päivitettyinä ja turvallisena.

#### 4.1 Ratkaisuja automaatiojärjestelmän suunnasta

Mittaustekniikan perusteiden kertaus. Anturien oikea valinta, skaalaus ja kalibrointi.

Tietojen käsittely insinööriyksiköissä, ei koskaan jännitteinä, virtoina tms.

Virhetilanteet on voitava viestittää muuta kanavaa pitkin kuin mittausarvot.

Automaation rajapintojen määrittelyt on otettava osaksi muutostenhallintaprosesseja ja tuoterakenteita. Ne on vakioitava niin hyvin kuin mahdollista.

Oleta, että ”konnektiviteetti” todella tarkoittaa automaation liittämistä verkkoon ja altistamista sen vaaroille.

#### 4.2 Ratkaisuja datan suunnasta

Jokainen pilveen lähetettävä datapiste olisi oltava perusteltavissa.

Pohdi, mitä ilmiöitä haluat mitata, ja perusta tiedonkeruun tiheys ilmiön nopeuteen.

Lähetä vain muuttunut data, ja suunnittele järjestelmäsi niin, että tästä ei aiheudu laskennoille

ongelmia.

Älä yritä kompensoida automaation ongelmia edgen konfiguroinneilla. Ongelma siirtyy versioiden ja riippuvuuksien hallintaan, kun automaatio aikanaan korjataan.

Datan siivous, käsittely, vikatilanteiden tunnistus ja muu valmistelu Edgessä on silti suositeltavaa.

### 4.3 Ratkaisuja organisaation suunnasta

Konnektiviteettiprojektit eli laitteen liittäminen osaksi jotain palvelua eivät ole yksinkertaisia projekteja. Ne vaativat usean eri organisaation osallistumista kokonaisen ratkaisun saavuttamiseksi. Jokaisella osallistuvalla ryhmällä saattaa olla motiivi osaa optimoida omaa tekemistään, joten jonkun on katsottava, että kokonaisuus toimii. Hänelle on annettava myös resurssit ja valta tähän.

Koneautomaation kohdistuu jo nyt suuria vaatimuksia ja ne ovat monimutkaisia reaaliaikaisia ja turvallisuuteen liittyviä järjestelmiä. Niiden laitteisto on myös rajoittuneempaa ympäristön takia.

Järjestelmien liittäminen toisiinsa paljastaa haasteet armottomasti. Tähän ei pidä suhtautua liian vakavasti eikä aloittaa syyttelyä. Organisaation kypsyyden merkki on tällaisesta haasteesta selviäminen.

Liitettävyyden on kiertoluokkaa helpompi tehdä uusiin laitteisiin kuin jälkiasentaa (retrofit). Vältä jälkiasennuksia, jos mahdollista, tai erota ne erillisiksi projekteiksi.

Älä kuuntele "data scientisteja" liikaa. Mikään työkonesta saatavan datan laatu ei luultavasti ole tarpeeksi hyvää. Yritä löytää kompromissiratkaisu esimerkiksi keräämällä enemmän dataa tutkimuskäyttöön vain muutamasta koneesta eikä kaikista. Onnistuneet algoritmit viedään laajempaan käyttöön ja toteutetaan Edge-laskennassa.

Petri Kannisto\*, Teijo Juntunen, Robert Heikkilä, Matti Vilkkö, and David Hästbacka

# Communication Approach and Framework for Distributed Path Planning Optimization of Industrial Vehicles

**Keywords:** Service-oriented Architecture (SOA), Edge Computing, Machine Fleets, Mobile Work Machines, Data-driven Systems

**\*Corresponding Author: Petri Kannisto:** Computing Sciences, Tampere University, E-mail: petri.kannisto@tuni.fi

**Teijo Juntunen:** Automation Technology and Mechanical Engineering, Tampere University, E-mail: teijo.juntunen@tuni.fi

**Robert Heikkilä:** Automation Technology and Mechanical Engineering, Tampere University, E-mail: robert.heikkila@tuni.fi

**Matti Vilkkö:** Automation Technology and Mechanical Engineering, Tampere University, E-mail: matti.vilkkö@tuni.fi

**David Hästbacka:** Computing Sciences, Tampere University, E-mail: david.hastbacka@tuni.fi

## 1 Background

The current efforts for green energy and decarbonization span all industries, including mobile machinery. Carbon neutrality is a goal in European Union and should be reached by 2050 [1]. Mobile machinery must participate in this with electrification, supporting renewable energy sources (RES) and adapting to fluctuation in energy production. Fluctuation is a characteristic in RESs that lack a mechanism to control the amount of production [2]. This must be considered in machinery regarding the scheduling of operation and recharging.

Practically, green transition requires fleets where the machines make autonomous decisions considering the conditions. The machines should autonomously decide when to take another task and when to recharge, considering their battery state, the availability of charging facilities, and the price of electricity. This functionality could be designed in a centralized fashion, but such a decision logic would lead to a complex monolith, which would cause a single point of failure as well as a bottleneck in an arbitrarily large fleet. In contrast, the selected approach applies edge computing, enabling more of local intelligence in the machines and a better resilience (see Fig. 1). Although the decision making is distributed, soft coordination is still possible, for example, with a pricing mechanism.

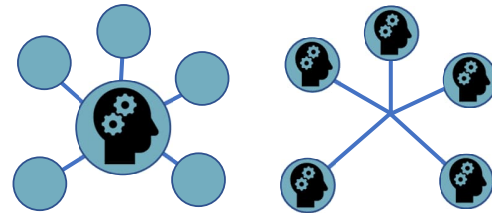


Fig. 1. Fleet-wide path planning can be either centralized or distributed.

## 2 Aims

This article aims to design a communication approach for exchanging data in the distributed optimization and control of industrial vehicles. The design will be conceptual and abstract, which enables re-use in multiple contexts as well as extensibility with either case-specific architecture-level requirements. Nevertheless, the study delivers evidence from a concrete demonstration.

The study takes the use case from container handling in ports. This introduces requirements regarding scheduling and routing to enable a high utilization ratio and throughput. Additionally, the machines operate in a limited space with plenty of other machines nearby.

## 3 Materials and Methods

As the research method, this study applies *design science research* [3]. This method aims to produce novel system and software designs to help in real-world problems. The method starts with a study of the requirements. Based on these, a solution is designed. Finally, the design is evaluated with the help of a prototype implementation. Unlike many research methods, design science replies to the question "what is effective" rather than "what is true" [4].

On a high level, the requirements cover information exchange in distributed optimization and control. This must consider latency requirements, scalability, cyber and information security (including integrity, confidentiality, and privacy), and platform independence. Al-

though the system is distributed over an arbitrarily wide communication network and therefore cannot strictly guarantee response times, the latency should still enable timely decisions in the machines with the resolution of approximately one or at most a few seconds. The system must scale for an arbitrarily large fleet that does not necessarily operate in a single physical sub-network. A large fleet size means that the amount of data is presumably too high for any communication protocol or platform that relies on multicast without message routing capabilities. Despite the security requirements, it must still be possible to add new machines easily while still recognizing machine identities. Additionally, as the system is data intensive, data autonomy should be considered [5]. Finally, platform-independent communication is necessary as the machines can represent various system vendors and generations.

The aforementioned requirements must be fulfilled in the design of the communication framework. Concretely, the framework specifies a common information model to enable interoperability with the machines. Furthermore, the communication occurs via a message broker, enabling the various machines to listen to events in the fleet and the supporting infrastructure. Fig. 2 illustrates the features of the framework: low latency, scalability, security, and a service-oriented application programming interface (API) for communication. The concrete solution is built around a data streaming platform, such as Apache Pulsar [6].

The suggested approach differs from conventional middleware or Enterprise Service Bus (ESB). In ESBs, some of the business logic tends to reside within the middleware itself, which is no longer fully distributed and is therefore ill scalable, difficult to maintain, and

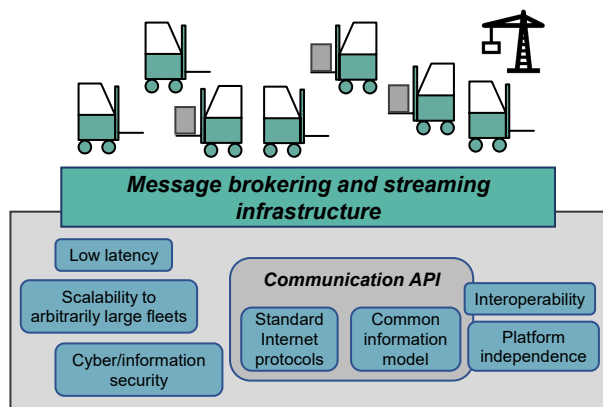


Fig. 2. Distributed path planning requires multiple features from the communication infrastructure and its application programming interface (API).

tied to a particular platform [7]. Instead, when the logic occurs in the connected machines, the designers must keep the design truly distributed. This approach has already proven successful in distributed production facilities [8]. However, the referred study has looser timing requirements compared to vehicle control and routing.

Finally, the developed solution is applied and evaluated in a use case example for container handling in ports. The use case is simulated to provide concrete evidence about the feasibility of the communication approach. The simulation aims to, first, model the environment where the fleet operates and, second, include algorithms capable of decision making in the machines. The simulation will apply multi-agent pathfinding (MAPF [9]) in a distributed fashion.

## References

- [1] Energy and the Green Deal. European Commission. 2022. URL [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_en) [Visited 28 Sep 2022].
- [2] Dreidy M, Mokhlis H, Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renew Sust Energ Rev.* 2017;69:144–155.
- [3] Hevner AR. A three cycle view of design science research. *Scand J Inf Syst.* 2007;19(2):87–92.
- [4] Hevner AR, March ST, Park J, Ram S. Design science in information systems research. *MIS Q.* 2004;28(1):75–105.
- [5] Kannisto P, Hästbacka D. Data Autonomy in Message Brokers in Edge and Cloud for Mobile Machinery: Requirements and Technology Survey. In: *27th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE. 2022; pp. 1–4. URL <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921693>
- [6] Apache Pulsar. 2023. URL <https://pulsar.apache.org/> [Visited 23 Mar 2023].
- [7] Boyd A, Noller D, Peters P, Salkeld D, Thomasma T, Gifford C, Pike S, Smith A. SOA in manufacturing guidebook. MESA International/IBM/Cappgemini. 2008. URL [https://public.dhe.ibm.com/software/plm/pdf/MESA\\_SOAINManufacturingGuidebook.pdf](https://public.dhe.ibm.com/software/plm/pdf/MESA_SOAINManufacturingGuidebook.pdf) [Visited 23 Mar 2023].
- [8] Kannisto P, Hästbacka D, Gutiérrez T, Suominen O, Vilkkö M, Craamer P. Plant-wide interoperability and decoupled, data-driven process control with message bus communication. *J Ind Inf Integr.* 2022;26:100253. URL <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100253>
- [9] Stern R, Sturtevant N, Felner A, Koenig S, Ma H, Walker T, Li J, Atzmon D, Cohen L, Kumar T, et al. Multi-agent pathfinding: Definitions, variants, and benchmarks. In: *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, vol. 10. 2019; pp. 151–158.

Niko Karhula\*, Seppo Sierla, Heikki Ihasalo, Jaakko Ketomäki, Matti Huotari, and Valeriy Vyatkin

# Primary frequency control with an air handling unit

**Abstract:** The green energy transition threatens stability of the power grid due to associated reduction in grid synchronous inertia. Primary frequency control (PFC) can compensate for the challenge; however, sufficient procurement of primary frequency capacity could depend on more extensive employment of demand-side loads for PFC. Ventilation fans in particular present a promising class of such loads because of ubiquity of variable-frequency drives and relatively large time constants of space heating, cooling and ventilation dynamics. Thus, this research proposes a method for PFC by an air handling unit: the open-loop control is shown to have favourable dynamic characteristics, and its impact on ventilation efficiency is shown to be tolerable. This study suggests that the largely unused primary frequency capacity of ventilation fans could be exploited to provide fast-reacting and dynamically performant and stable primary frequency response.

**Keywords:** primary frequency control, frequency containment reserve, air handling unit, variable-frequency drive

---

\*Corresponding Author: Niko Karhula: Aalto University, E-mail: niko.karhula@aalto.fi

## 1 Introduction

Increasing penetration of inverter-connected variable renewable energy sources and decrease in fossil-fuel powered turbine-generated electricity production threaten the performance and stability of the power grid as a result of reduction in grid synchronous inertia and increase in stochasticity of energy production. Generators and loads—asynchronous included—can compensate for the reduced inertia by providing primary frequency response (PFR). Resources providing PFR adjust their energy production or consumption in proportion to grid frequency deviation from nominal frequency. Traditionally the response has been provided by generators; however, aforementioned trends in power systems challenge the response capacity of generators, and hence demand-side PFR is becoming increasingly attractive. Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) loads consti-

tute a significant proportion of global energy demand [1] which make them potentially valuable resources for provision of PFR.

Variable-frequency drive (VFD) controlled induction motors constitute a promising class of primary frequency control (PFC) capable HVAC loads: VFDs enable precise and fast control of motor speed and consequently of instantaneous active power. Ventilation fans in particular present a promising case study because they account for significant part of the energy consumption of an air handling unit (AHU), which in turn is a major energy consumer in a commercial HVAC installation. Robustness of modern induction motors suggest that continuous fan speed adjustment is unlikely to markedly impact lifetime of the equipment; however, the impact on ventilation efficiency and indoor air quality ought to be considered. Implementing PFC should also be economically viable—something challenging in retrofit scenarios.

Rules and regulations concerning PFC vary considerably between different synchronous areas, and thus any investigation pertaining to PFC must be either generic or focused on a particular synchronous area. The Nordic synchronous area presents an interesting case study because new technical requirements [2], to be provisionally enforced in 2023, are considerably more stringent and involved than the currently enforced requirements. Specifically, new frequency domain dynamic requirements are introduced as an addition to the current stationary and time domain dynamic requirements, among other modifications and additions.

This research proposes a method for PFC with an air handling unit. In particular, open-loop fan speed control is implemented and validated in accordance with the new technical requirements. Exemplary intervals of historical grid frequency data, made available by Fin-grid, are utilized in assessing the impact of the proposed PFC implementation on ventilation efficiency. The focus of this research is on dynamic characteristics and economic viability of the PFC.

## 2 Related Work

Several studies have investigated PFC with an AHU; however, to the best of the authors’ knowledge, no research validates the control against the aforementioned new requirements.

Rominger et al. pre-qualify an aggregate of AHUs for PFR provision in Germany [3]. Each VFD is controlled in closed loop by a PID controller for instantaneous active power, and the response is validated against time domain dynamic requirements, which are assessed by a step test sequence (synthetic frequency steps are injected to the controller reference). Dynamic performance or stability of the control is not investigated.

Beil et al. investigate secondary frequency control (SFC) using the ventilation fans in the AHUs of a variable air volume (VAV) system [4]. They identify three strategies for frequency regulation: direct fan speed, static pressure setpoint and thermostat setpoint control. Control of thermostat setpoint suffers from substantial delay and inaccuracy, and hence, not applicable for PFC. Static pressure setpoint control is considerably faster due to small time constants of the involved gas dynamics; however, it still introduces additional latency and inaccuracy compared to direct fan speed control. Thus, direct fan speed control appears most promising for fast and accurate control necessitated by the new Nordic requirements.

Lin et al. study SFC using ventilation fans of a single commercial air handling unit [5], [6]. The closed-loop control is shown to pass the technical requirements of the independent system operator of Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection (PJM). They also consider dynamic response in frequency domain but the control is not directly applicable to PFC—where stricter dynamic requirements are enforced—since relatively restrictive band-pass filtering is adapted.

## 3 Methods

The research is conducted on a laboratory installed AHU located at Myllypuro Metropolia campus in Helsinki, Finland. The unit consists of supply, return and recirculation air ducts with associated dampers. The supply and return ducts contain air filters and VFD controlled three-phase squirrel cage induction motors (rated at 1.5 kW) which are attached to centrifugal fans. The supply duct also has heating (district heating) and

cooling coils. Figure 1 depicts the air handling unit. The AHU is interfaced with a commercial building automation system (BAS) which provides a Modbus TCP interface for remote control of the VFDs. In addition, an energy meter is installed on-premises for measuring the energy supplied to the drives. PFC is implemented on an Internet of Things (IoT) gateway based on a Raspberry Pi compute module.

The VFDs (VLT HVAC Drive FC 102 by Danfoss) implement an open loop motor control mode with a configurable ramp rate limiter. PFC is implemented by altering motor speed setpoint via the BAS based on real-time grid frequency measurement. Motor speed setpoint control avoids direct interfacing with the VFDs—a factor favourable for economic viability.

Relation between fan speed and fan power is approximated by the affinity (fan) laws. Specifically, fan power is approximately proportional to the third power of fan speed; however, variable frequency drives introduce losses, and thus a more accurate relation between fan speed and incoming power is obtained by a general cubic function. The method of least-squares is applied for parametrizing the cubic function which is then inverted so that the controller can compute desired fan speed based on grid frequency measurement. A recursive implementation is additionally proposed for scenarios where parameters of the cubic function are considerably time-varying (for example VAV systems).

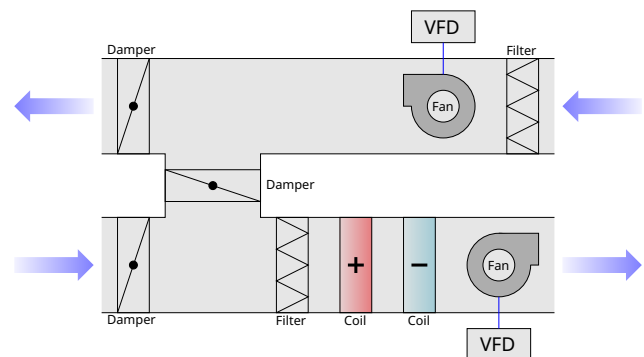


Fig. 1. Depiction of the air handling unit located at Myllypuro Metropolia campus. Blue arrows indicate direction of air flow.

## References

- [1] Ahmad M, Mourshed M, Yuce B, Rezgui Y. Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review. *Building Simulation*. 2016;9(4):359–398.
- [2] ENTSO-E. Technical Requirements for Frequency Containment Reserve Provision in the Nordic Synchronous. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/fcr-technical-requirements-2022-06-27.pdf>. 2022. Accessed 15 May 2023.
- [3] Rominger J, Kern F, Schmeck H. Provision of frequency containment reserve with an aggregate of air handling units. *Computer Science - Research and Development*. 2018; 33(1):215–221.
- [4] Beil I, Hiskens I, Backhaus S. Frequency Regulation From Commercial Building HVAC Demand Response. *Proceedings of the IEEE*. 2016;104(4):745–757.
- [5] Lin Y, Barooah P, Meyn S, Middelkoop T. Experimental Evaluation of Frequency Regulation From Commercial Building HVAC Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015; 6(2):776–783.
- [6] Lin Y, Barooah P, Meyn S, Middelkoop T. Demand side frequency regulation from commercial building HVAC systems: An experimental study. In: *American Control Conference (ACC)*. 2015; pp. 3019–3024.



Tommi Kauppinen\*, Taneli Rantaharju and Pekka Huttunen

# Tekoälykoulutus Suomessa – kokemuksia Datasta tekoälyyn koulutusohjelmasta Kajaanin ammattikorkeakoulussa

**Tiivistelmä:** Tekoälykoulutus neljän vuoden insinööriopintoina on harvinaisuus suomalaisissa ammattikorkeakouluissa. Kajaanin ammattikorkeakoulussa (KAMK) on järjestetty tällaista koulutusta vuodesta 2019 lähtien, ja tämä artikkeli esittelee koulutuksen opettajien näkemyksiä siitä, mitkä asiat ovat keskeisiä koulutuksen onnistumisen kannalta. Toisaalta esitetään myös mahdollisia ongelmakohtia, jotka voivat estää koulutuksen onnistumisen. Nyt kun ensimmäiset opiskelijat ovat KAMKissa valmistumassa, on hyvä summata yhteen keskeisiä hyvän tekoälykoulutuksen elementtejä insinööriopinnoissa.

**Avainsanat:** tekoälykoulutus, tekoäly, pedagogiikka, oppiminen

**\*Vastaava kirjoittaja: D. Sc. (Tech.) Tommi Kauppinen,** Kajaanin ammattikorkeakoulu (KAMK), sähköposti: tommi.kauppinen@kamk.fi

**Taneli Rantaharju:** Kajaanin ammattikorkeakoulu (KAMK), sähköposti: taneli.rantaharju@kamk.fi

**Pekka Huttunen:** Kajaanin ammattikorkeakoulu (KAMK), sähköposti: pekka.huttunen@kamk.fi

## 1 Johdanto

Kajaanin ammattikorkeakoulu (KAMK) on järjestänyt nelivuotista Datasta tekoälyyn -insinööriopintototeutusta vuodesta 2019 lähtien. Syksyllä 2022 käynnistettiin ensimmäinen monimuotototeutus, joka mahdollistaa opiskelun myös täysin etänä. Opetuksessa hyödynnetään Euroopan mittakaavassa ainutlaatuista KAMKin konesalioppimisympäristöä, johon sisältyy mm. KAMKin oma supertietokone. Koulutuksen päätavoitteena on kouluttaa datainsinöörejä yritystoiminnan tarpeisiin. Tavoite ei siis niinkään ole uusien tekoälyalgoritmien kehitysosaaminen vaan datan käsittely ja hyödyntäminen sekä olemassa olevien tekoälymenetelmien soveltaminen. Tekoäly- ja dataosaaminen on yhä tärkeämmässä roolissa viiheessä siirtymässä ja automaatiassa, jolloin

koulutuksen merkitys tällä alalla on keskeinen.

Tekoäly- ja dataosaamiseen keskittyvä koulutus Suomessa on varsin vähäistä ammattikorkeakoulutasolla. Niinpä tässä esityksessä pyritään esittelemään kokemuksia tekoälykoulutuksesta Kajaanissa ja pyritään esittämään kokemusten perusteella joitain pääkohtia suomalaisen tekoälykoulutuksen kehittämiseksi. Tähän tavoitteeseen pyritään esittämällä opettajien kokemuksia koulutuksen ajalta.

Datasta tekoälyyn -koulutus on aloitettu joka syksy päivätoteutuksena Kajaanissa vuosina 2019–2022. Opintonsa aloittaneiden ryhmien koko on vaihdellut välillä 24–30 opiskelijaa. Vuoden 2022 syksyllä aloitettiin päivätoteutuksen lisäksi monimuotokoulutus Espoon Keilaniemessä, johon valittiin 55 opiskelijaa. Näillä näkymin ensimmäiset datainsinöörit valmistuvat joulukuussa 2022, noin puoli vuotta etuajassa. Kirjoittajien tiedossa ei ole, että vastaavaa neljän vuoden koulutusta olisi tarjolla muissa suomalaisissa ammattikorkeakouluissa.

Suomessa on paljon yrityksiä, jotka ovat vasta aloittamassa tekoälyn hyödyntämistä osana liiketoimintaansa. Eräs tähän vaikuttava syy voi olla datan rajattu saatavuus esimerkiksi nykyisten asiakassopimusten estäessä datan keräyksen. Mutta myös koulutetun henkilöstön saatavuus on rajoittanut tekoälyn käyttöönottoa useissa yrityksissä. Koulutusta käynnistettäessä on erityisesti havaittu puutteita tekoälyä soveltavassa osaamisessa ja tekoälyosaajien määrässä. Osaavan henkilöstön avulla yrityksissä voitaisiin hyödyntää paremmin jo olemassa olevia työkaluja ja menetelmiä niin data esikäsittelyissä kuin tekoälyratkaisuiden kehittämisessäkin.

## 2 Tarkastelumenetelmä

Tämän esityksen menetelmän on selvittää opettajien henkilökohtaisten kokemusten kautta, mitkä pedagogiset valinnat ovat helpottaneet tekoälyn opettamista ammattikorkeakoulutasolla Kajaanissa, erityisesti koskien Datasta tekoälyyn -koulutusta

Kajaanin ammattikorkeakoulussa. Lisäksi on saman menetelmän puitteissa tarkoitus esittää, mitkä ovat ammattikorkeakoulutasoisen opetuksen pullonkaulat tekoälyn ja siihen liittyvän datankäsittelyn oppimiseksi.

### 3 Havainnot

Käytännönläheisen koulutuksen keskeisiä sisältöalueita ovat ohjelmointi, data-alan matematiikka, datan hallinta, ICT-ympäristöt, data-analyysi, koneoppimisen ja tekoälyn soveltaminen sekä tekoälyn hyödyntäminen liiketoiminnassa ja digitaalisissa palveluissa. Koulutuksen erityispiirteitä ovat projektimuotoisen oppimisen korostuminen, perus- ja ammattiaineiden integroiminen projektiopintoihin, yrityslähtöiset kehittämistehtävät, joustavuutta tuovat verkko-opinnot sekä opiskelun mahdollistaminen myös kesäaikana.

Datasta tekoälyyn -koulutuksessa on havaittu erityisesti matemaattisen osaamisen vaikutus tekoälyalgoritmien ymmärtämiseen. Haastava merkintä ja välttämätön yksityiskohtien ymmärtäminen vaativat molemmat matematiikan perusteiden hyvää hallintaa. Jotta matemaattista osaamista pääsee käyttämään hyödyksi, on myös välttämätöntä hallita hyvin ohjelmointikieliä. Vasta ohjelmoinnin laaja-alaisen ymmärtämisen pohjalta opiskelijat pääsevät soveltamaan matemaattista ja muuta osaamistaan tekoälykontekstissa.

Teoria- ja ammattiopintojen tiivis kytkeminen käytäntöön parantaa opiskelijoiden motivaatiota, intoa ja oppimistuloksia. Teoriaa ja käytäntöä sujuvasti yhdistelevien moduulien toteuttaminen vaatii runsaasti suunnittelua, toimivaa vuoropuhelua opettajien kesken ja tiimimäistä ajattelua. Datasta tekoälyyn -koulutuksessa on käytetty onnistuneesti mallia, jossa sama opettajatiimi on ollut mukana toiminnassa koulutuksen suunnitteluvaiheesta asti. Koulutuksen käynnistyttyä tiimi on kokoontunut säännöllisesti käsittelemään kokemuksia ja palautteita opetuksesta, sisällöistä ja toteutustavoista sekä ideoimaan kehittämistoimia. Alan nopea muutostahti edellyttää opetuksen ja sisältöjen jatkuvaa päivittämistä.

Joustavat opintopolut tuovat opiskelijoille vapauksia mutta vaativat runsaasti koordinoitua ja ohjausta. Datasta tekoälyyn -koulutuksessa joustavuutta ja yksilöllisyyttä lisätään tarjoamalla kesäopintoja (projektit ja perinteiset opintojaksot), hyödyntämällä aiemmin hankitun osaamisen tunnistamista ja opinnollistamista sekä sisällyttämällä tutkintoon muiden korkeakoulujen verkko-opintoja. Datasta tekoälyyn -insinööriopintojen viivästymistä ja keskeytymistä voitaisiin pyrkiä ehkäisemään lääkkeillä,

joita on esitetty Insinööriliiton vuonna 2021 julkaisemassa selvityksessä [1]. Realistinen käsitys insinööriopinnoista, varhainen puuttuminen ongelmiin, tiivis yhteydenpito etenkin opintojen loppuvaiheessa sekä matemaattisen osaamisen vahvistaminen oli selvityksessä nostettu keskeisiksi johtopäätelmiksi.

Datasta tekoälyyn -koulutuksessa tutustutaan useisiin tekoälyn kehityksessä ja soveltamisessa käytettyihin työkaluihin, kuten esimerkiksi Pytorch [2] ja Tensorflow [3]. Koulutuksessa myös opetellaan erilaisia menetelmiä, datan tyyppimuunnoksista GPU-prosessorien käyttöön tekoälyn koulutuksessa. Myös erilaiset oppimis- ja ohjelmointiympäristöt, kuten Visual Studio Code ja Azure, ovat tärkeitä oppimisen apuvälineitä ja työelämää varten haltuun otettavia ohjelmistokokonaisuuksia.

Kajaanin ammattikorkeakoulun Datasta tekoälyyn -koulutuksessa tehdään myös paljon projektiopintoja koulutuksen aikana. Näillä projektiopintokursseilla pyritään soveltamaan teoriakursseilla opittuja asioita ja tutustumaan työelämän käytäntöihin, kuten esimerkiksi versionhallinnan ja SCRUM-menetelmän käyttöön. Lähtökohtaisesti kaikki projektikurssit tehdään yhteistyössä yritysten kanssa. Tällöin opiskelijat pyrkivät kurssin kuluessa ratkaisemaan yrityksiltä saatuja tehtävänantoja kasvattaen samalla yritysten tekoälyosaamista.

### 4 Yhteenveto

Datasta tekoälyyn -koulutuksen suosio on ollut huomattavaa, vaikkei Kajaanin ammattikorkeakoulua muutoin yleensä ole nostettu keskeiseksi toimijaksi Suomen koulutuskentällä. Niinpä on oleellista esittää tässä muutamia päähuomioita Kajaanin kokemusten perusteella.

Tärkeimmiksi onnistumisen edellytyksiksi nousevat matemaattisiin aineisiin panostaminen, erilaisten työelämään valmentavien ohjelmistojen ja työkalujen käyttö, ja läheinen yhteistyö yritysten kanssa. Opetuksen pullonkaloiksi on havaittu yritysten ymmärrys tekoälyn suomista mahdollisuuksista, matemaattisten aineiden opetus sekä tiivis yhteydenpito opiskelijoihin, erityisesti opintojen alku- ja loppuvaiheessa.

### 5 Lähteet

- [1] <https://www.ilry.fi/ajankohtaista/miksi-opinnot-viivastyvat-ja-keskeytyvat/> (13.4.2023)
- [2] <https://pytorch.org/> (13.4.2023)
- [3] <https://www.tensorflow.org/> (13.4.2023)

Markus Kelanti\*, Henri Bomström, Sarthak Acharya, Oskar Wintercorn, Jan van Deventer, and Tero Päivärinta

# Visualisation, Representation and Interoperation of Digital Twins with Open-Source Software Frameworks

**Abstract:** Digital twins (DTs) refer to digital information constructs of physical assets and feature automatic two-way exchange of information between the digital and physical counterparts. Typically, DTs allow communication from the physical systems they represent, and are often used as interfaces to obtain information such as sensor data. Sending information back to the physical system digitally is possible; however, changing system behaviour, besides settings or optimization, requires more than merely updating parameter related information. To facilitate propagating changes made in digital systems back to physical systems, we approach the problem in this paper with an example framework and implementation – using a miniature toy factory and open-source software (OSS) frameworks. In the long term, our ongoing research is aimed to empower workers with remote interaction while performing expert maintenance tasks in industrial settings. Furthermore, adopting OSS frameworks enables new solution providers to enter contested markets more easily in the future.

**Keywords:** Digital twin, interoperability, virtual reality

---

\*Corresponding Author: Markus Kelanti, Henri Bomström, Sarthak Acharya, Tero Päivärinta: University of Oulu, Finland, E-mail: [firstname.lastname@oulu.fi](mailto:firstname.lastname@oulu.fi)  
Oskar Wintercorn, Jan van Deventer: Luleå University of Technology, Sweden, E-mail: [firstname.lastname@ltu.se](mailto:firstname.lastname@ltu.se)

## 1 Background

Digital Twins (DTs) [1] refer to digital constructs of physical assets, such as products or processes, connected with an automatic two-way flow of information between the digital and the physical [2]. DTs are one of the driving forces behind Smart Manufacturing and Industry 4.0 paradigms [3], providing enhanced prediction and analysis capabilities for cyber-physical systems. However, it is not clear how DTs can be utilised to support experts in field maintenance tasks [4].

The OXILATE project (1) focuses on the complementary integration of expert knowledge in professional settings to empower workers. Remote work is quickly becoming more common, and industrial maintenance workers require relevant system information from customers to resolve technical support tasks. This almost always requires information regarding customer systems and related maintenance activities, such as maintenance reports, manuals, and implementation specifications. Information must be presented for maintenance workers in a meaningful way (such as system simulations), requiring solutions to be implemented with regard to customer systems. Often the latter is causing the most issues as maintenance workers might not have access to the real system for implementing changes, and therefore must instruct local workers to carry out the necessary changes.

This issue presents a research opportunity for describing real systems in simulations, and on how changes in simulated environments can be propagated to physical systems directly. Moreover, the emerging DT ecosystems [5] enable new solution providers to enter the market more easily in the future. This suggests an increasing need for open-source software (OSS) frameworks to integrate dynamically interoperable DTs from different vendors, and their visualisations for the needs at hand. To this end, we describe a solution based on OSS frameworks.

## 2 Aims

This paper reports on an ongoing research process for enabling changes in real systems with interoperable parts. Our research focuses on propagating changes automatically between two systems: the digital and physical counterparts of a miniature toy factory. Our objective is to provide a simulation capable of mimicking the behaviour and actions of a real system with accuracy,

---

1 <https://itea4.org/project/oxilate.html>

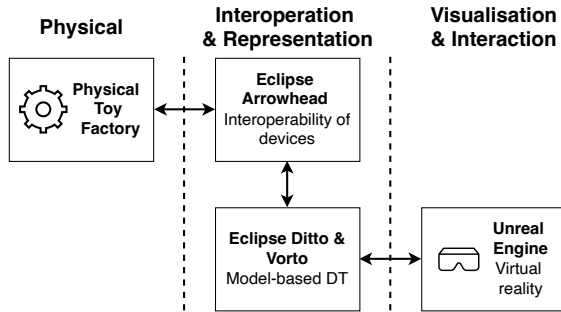


Fig. 1. An example implementation of a Toy Factory digital twin using OSS frameworks.

while also allowing changes to be made in the simulation – which are then propagated back to the real system.

### 3 Materials, Methods, and Results

As a piece of constructive research, the main result of this paper is a design of an architectural framework (Fig. 1) where physical systems are digitally represented as DTs and can be used in visualisation and simulation software to view and modify the toy factory. The framework describes how communication between simulated and real systems, consisting of more than one device with their respective DTs, can be established. A key research goal with the framework is to study what kind of methodology is needed to enable change propagation between the simulation and the real system.

The results include a demonstration of using the framework (Fig. 1) in connection to a miniature factory (modeled with NX CAD (2) and implemented by Luleå University of Technology) which includes separate devices and subsystems: Eclipse Arrowhead Framework (3) to enable device-to-device interconnect ability, Eclipse Ditto (4) and Vorto (5) to represent the DT layer – connected with the MQTT-protocol (6), and Unreal Engine (7) to simulate the system (Fig. 2) with Valve Index VR glasses (8).

- 2 <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- 3 <https://arrowhead.eu/eclipse-arrowhead-2/>
- 4 <https://www.eclipse.org/ditto/>
- 5 <https://www.eclipse.org/vorto/>
- 6 <https://mqtt.org/>
- 7 <https://www.unrealengine.com/>
- 8 <https://www.valvesoftware.com/en/index>

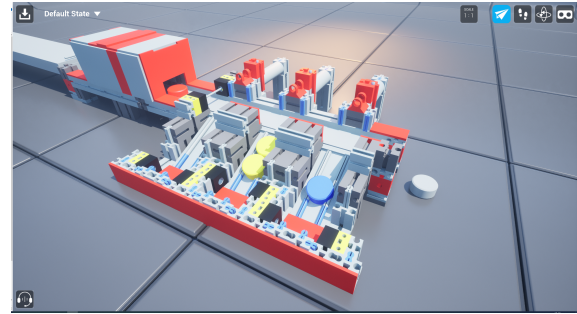


Fig. 2. A modelled sorting line conveyor belt from a toy factory made interactable with virtual reality.

### 4 Conclusions

The purpose of the current study is to determine how changes can be propagated between the digital and physical counterparts of DTs using OSS frameworks. The implementation and demonstration described in this paper elaborate the state-of-the-art by using some of platforms from the vendor neutral open-source Eclipse Foundation – including the Arrowhead framework, and the Vorto and Ditto platforms – and the open-source Unreal Engine. As a natural progression of this work we plan to design and implement the communication protocol back from virtual reality interaction to the physical toy factory, including the necessary instructions for the toy factory. These results may be of use for enabling new solution providers to enter various markets more easily in the future with OSS solutions.

### References

- [1] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*. 2014;1:1–7.
- [2] Kritzinger W, Karner M, Traar G, Henjes J, Sihh W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*. 2018;51(11):1016–1022.
- [3] Qi Q, Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*. 2018;6:3585–3593.
- [4] Bomström H, Annanperä E, Kelanti M, Xu Y, Mäkelä SM, Immonen M, Siirtola P, Teern A, Liukkunen K, Päivärinta T. Digital Twins About Humans—Design Objectives From Three Projects. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2022;22(5).
- [5] Liyanage R, Tripathi N, Päivärinta T, Xu Y. Digital Twin Ecosystems: Potential Stakeholders and Their Requirements. In: *Lecture Notes in Business Information Processing*. Cham: Springer International Publishing. 2022; pp. 19–34.

Antti Lajunen\*, Animesh Kumar, Niila-Sakari Keijälä, Julius Pietarinen, Klaus Kivekäs

# Development of learning environment for agricultural automation

**Abstract:** Increasing use of automation and automated systems in agriculture requires dedicated methods in the university education. This extended abstract describes the development and implementation of a practical learning environment, DigiFarm, dedicated for teaching agricultural automation. The environment consists of three different elements called automated processes, robot operation, and digital farming. An educational robot arm with a conveyor belt is used for demonstrating automated processes. A mini robot called ROSbot serves as the platform for developing and executing basic robot tasks such as path tracking and object detection. Digital farming processes are simulated by a mini greenhouse which includes measurement and control systems for controlling the plant growing conditions. The main objective of the DigiFarm environment is to strengthen and deepen the knowledge of automation technology and digitalization of master students at the system level of agricultural processes.

**Keywords:** learning environment, automation, digitalization, agricultural robots, digital farming

\*Corresponding Author: Antti Lajunen: Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki, E-mail: antti.lajunen@helsinki.fi

Other Authors: Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki, E-mail: animesh.kumar@helsinki.fi, niila-sakari.keijala@helsinki.fi, julius.pietarinen@helsinki.fi, klaus.kivekas@helsinki.fi

## 1 Background and Aims

Automation in agricultural vehicles and processes is expected to increase significantly over the next decades. The size of farms has been steadily increasing which has increased the use of automation technology for better control of processes and higher productivity [1]. The efficiency and sustainability of agricultural production are based to a certain extent on the digital technologies implemented in the agricultural processes [2]. It is essential in the education of agricultural technology to ensure that future experts have sufficient

knowledge and skills, especially about automation and related digital technologies [3]. In order to obtain similar benefits from automation technology in agriculture than in other industrial sectors, automation technologies must be thoroughly taken into account in the education with relevant practical teaching methods.

The DigiFarm learning environments was developed in the project DigiTally (Improving digital skills in Mechanical Engineering, [www.digitally.fi](http://www.digitally.fi)) which started in September 2021, and it is funded by the REACT-EU (Recovery Assistance for Cohesion and the Territories of Europe). There are four educational institutes as project partners: Metropolia (coordinator), Aalto University, University of Helsinki, and Omnia. Each of the participants have their own focus areas depending on their educational focuses and there are several topics that are shared and jointly developed by the project partners. One of these themes is automatization and robotization.

## 2 Materials and Methods

In the project context, the focus of the University of Helsinki was deeply in the automation of agricultural processes. Therefore, DigiFarm environment is focusing on the basic skills that are required to understand and develop automation systems and advanced topics such as control automation and object detection for deeper understanding of automation methods.

The basic skills include the basics of ROS (Robot Operating System) and python programming. ROS is widely used open source middleware in robotic solutions and it does not require any expensive hardware or software for implementation. There exist two versions of ROS named ROS and ROS2. The original ROS runs only in Linux distributions whereas ROS2 is compatible also with Windows and iOS. The challenge for ROS is that there are several versions of ROS and there are certain compatibility requirements between ROS and operating system versions. Another challenge is the need for understanding ROS processes such as building a ROS package that relates to typical programming procedures.

The advanced topics include three specific practical learning platforms: 1) automated processes, 2) robot operation, and 3) digital farming. As measurement technologies have important role in agricultural processes, all these three platforms include different types of sensors and data logging systems. The automated processes are demonstrated with an educational robot arm Niryo One (Figure 1) which corresponds to a typical robot arm used in industry with six degrees of freedom. In this context, the main focus is to integrate sensors, detect object based on their properties, operate the arm based on the measurements, and synchronized operations with a conveyor belt.



Figure 1. Educational robot arm Niryo One.

In the teaching of robot operations, a mini robot ROSbot (Figure 2) is used. The robot is specifically built for educational purposes and has integrated sensors for environment mapping (stereo camera, lidar and distance sensors). The robot includes a control and data logging board, and computing board (Asus TinkerBoard). The robot runs with ROS and has preinstalled package of ROS with necessary libraries. The robot will provide a platform for the development of autonomous operation by using different sensor data. It is possible to perform an accurate and precise SLAM (simultaneous localization and mapping), one of the simplest solutions is to use a laser scanner and an odometry system.



Figure 2. ROSbot mini robot.

Digital farming methods are demonstrated with a mini greenhouse (Figure 3) that includes controllable under irrigation system, sensors for measurement of soil and air properties and conditions, and control system for adjusting temperature, moisture, and lighting conditions. The first version of the measurement and control system was built up on Raspberry Pi with Grove Base Hat in which most of the sensors are attached. In this context, students will learn how to develop real-time data processing system that is used for controlling the growing conditions.

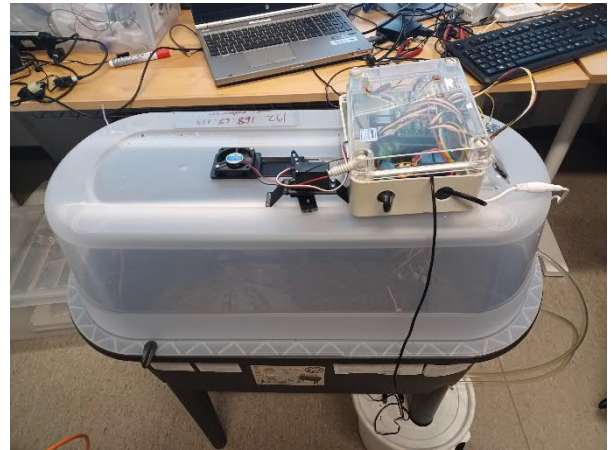


Figure 3. Mini greenhouse.

In the educational context, the three different learning platforms are used first for the demonstration of agricultural automation and digitalization. Then, dedicated project works are carried out by student groups. In all of these projects, specific automation systems are developed, documented, and also demonstrated.

The first experiences of a master student class were considered very positive, and students were able to work independently when developing their projects. It was recognized that well defined automation system and clear instructions were essential for deeper learning in each learning platform. The teaching of ROS can be challenging if the students does not have any prior programming experience.

### 3 Bibliography

- [1] A. Bechar and C. Vigneault, 2016. Agricultural robots for field operations: Concepts and components, *Biosystems Engineering*, vol. 149, no. 1, pp. 94-111.
- [2] B. Basso, J. Antle, 2020. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems, *Nature Sustainability* vol. 3, pp. 254–256.
- [3] M.H.M. Saad, N.M. Hamdan, M.R. Sarker, 2021. State of the Art of Urban Smart Vertical Farming Automation System: Advanced Topologies, Issues and Recommendations, *Electronics*, 10, 1422.

## **Broadband Methods for Battery Management Systems: Online Impedance Analysis**

*Leevi Lignell, Minh Tran, Tomi Roinila*

*Tampere University*

KEYWORDS: battery management system, broadband excitations, state of charge, state of health

### **Abstract**

Lithium-ion batteries have become popular in many industrial and consumer devices. The batteries are often equipped with a battery management system (BMS) to ensure optimal operation and safe use. A key function of the BMS is to monitor the state of the battery's charge and capacity decay. These parameters are not directly measurable and the BMS uses models and tools to evaluate the state of the battery. Recently, the impedance of the battery has been shown to be linked to the state parameters. The impedance is conventionally measured by an electrochemical impedance spectroscopy (EIS) but the method requires a long measurement time (several tens of minutes) which effectively prevents using the method in online use. This paper presents broadband techniques with which the battery impedance can be accurately measured in a fraction of time compared to the EIS.

### **Introduction**

Li-ion batteries can be efficiently characterized by the battery state of charge (SOC) and state of health (SOH), the measures of which are often applied by the battery BMS. The SOC indicates the remaining charge of the battery, while the SOH indicates the battery health conditions. The SOC and SOH cannot be directly measured but they can be estimated from other measurable variables such as the battery voltage, temperature and current. SOC and SOH are key parameters that a BMS must evaluate to ensure efficient and safe usage of the battery [1].

Recent studies have shown that the battery internal impedance varies with respect to the SOC and SOH [1]. The impedance is conventionally measured using a method based on electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The method uses single-frequency sinewaves as injections and typically provides accurate impedance estimation, but the method is very slow; measuring an impedance can take up to 30 minutes which effectively prevents most practical applications. Alternatively, the impedance can be measured using broadband methods to decrease the measurement time to only a few seconds [2]. In the methods, the battery is charged and recharged according to the broadband injection, and Fourier techniques are applied to obtain the impedance.

### **Theory**

In this work the battery impedance is measured by applying a broadband perturbation such as the pseudo-random binary sequence (PRBS) [3] and the discrete-interval binary sequence (DIBS) [2]. Both signals have energy at several frequencies making it possible to measure the impedance in a wide frequency band during one measurement cycle. As the signals are binary they are relatively easy to implement in practice using only low-cost components. The PRBS contains certain amount of spectral energy at each harmonic frequency but the DIBS is a computer-optimized sequence in which the spectral energy is maximized at certain user-defined frequencies at the cost of the energy at the other frequencies (without increasing the signal time-domain amplitude). Therefore, the DIBS is particularly useful when high signal-to-noise ratio is required due to, for example, strong external noise.

## Experiments

Figure 1 shows the measurement setup to obtain the battery impedance. It consists of a NiDAQ USB-6363 - measurement card, Kepco BOP 50-20MG bi-directional power supply and PC to control the devices and to perform analysis of the measurement results. The measured circuit was composed of an INR18650-lithium-ion cell, a shunt resistor for current measurement and the bi-directional power supply to inject the excitations. The measurement was conducted at an SOC of 80 %.

The impedance was measured both by the PRBS and DIBS. Both signals were 511-bit long and generated

at 3 kHz. The lowest measured frequency was therefore 5.9 Hz. For the DIBS 20 harmonic frequencies were selected and their spectral energy maximized. Both signals had the same time-domain amplitude (20 mA). Instructions of the PRBS and DIBS design can be found in [3-4]. The impedance was also measured by the conventional EIS to provide a reference. The measurement results are shown in Figure 2.

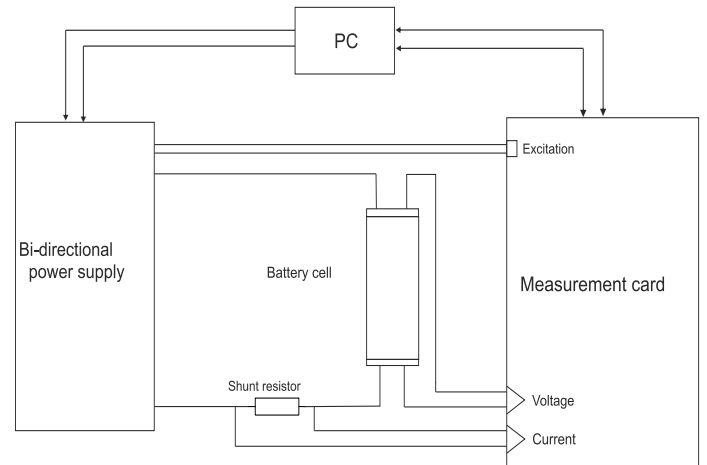


Figure 1: Schematic of the measurement setup

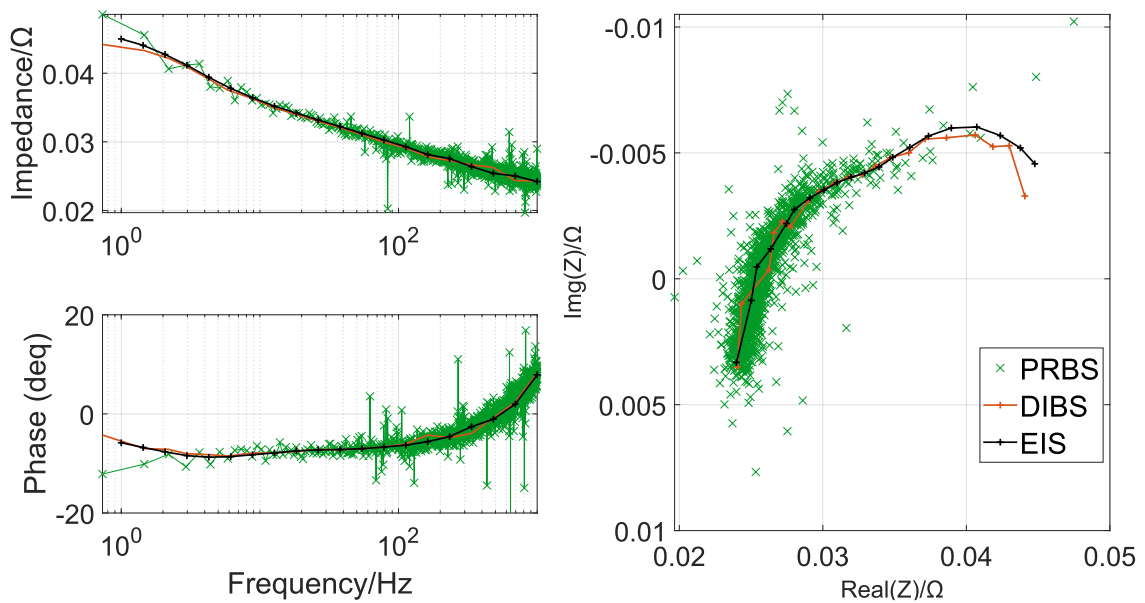


Figure 2: Measured impedance as Bode plot (left) and Nyquist curve (right).

Figure 2 shows the measured impedance as a Bode plot and a Nyquist curve. As the figure shows, the curve obtained by the PRBS is somewhat scattered due to low SNR. The DIBS, however, follows the reference highly accurately in a wide frequency band.

## References

- [1] J. Sihvo, D.-I. Stroe, T. Messo and T. Roinila, Fast Approach for Battery Impedance Identification Using Pseudo-Random Sequence Signals, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, issue 3, pp. 2548 – 2557, 2020.
- [2] M. Tran, T. Roinila and J. Markkula, Realtime Internal Impedance Measurement of Lithium-Ion Battery Using Discrete-Interval-Binary-Sequence Injection, in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 5 pages, 2022.
- [3] J. Peng, J. Meng, X. Du, L. Cai and D. -I. Stroe, "A Fast Impedance Measurement Method for Lithium-ion Battery Using Power Spectrum Property," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022.



# Laajennettu tiivistelmä: Vety osana tulevaisuuden energiajärjestelmää

Keywords: vety, energiajärjestelmä, sektori-integraatio

\*Corresponding Author: Yrjö Majanne: Tampereen Yliopisto, E-mail: yrjo.majanne@tuni.fi

Second Author: Arttu Virtanen, Tampereen yliopisto, [arttu.virtanen@tuni.fi](mailto:arttu.virtanen@tuni.fi)

Third Author: Matti Vilkkö, Tampereen yliopisto, [matti.vilkkö@tuni.fi](mailto:matti.vilkkö@tuni.fi)

## 1 Johdanto

Vihreässä siirtymässä fossiiliset energialähteet korvataan uusiutuvilla energialähteillä. Käytännössä tämä tarkoittaa myös suurelta osin siirtymää säädettävästä energiantuotannosta säariippuvaan energiantuotantoon. Erityisesti sähköenergian suhteen tämä aiheuttaa systeemiteknisii haasteita, koska sähköenergiajärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa joka hetki.

Sähköenergian suuren mittakaavan varastointi ei ole ainakaan lähitulevaisuudessa mahdollista, joten vaihtele- van tuotannon aiheuttama ongelma sähköenergiajärjestelmän tasapainottamisessa on ratkaistava joustavalla kulutuksella. Tällä hetkellä vihreään vedyntuotantoon perustuva vetytalous nähdään potentiaalisimpana keinona mahdollistaa siirtymä fossiilienergiavapaaseen yhteiskuntaan. Periaatteena on tasata säariippuvan sähköntuotannon vaikutuksia sähköenergiajärjestelmän toimintaan joustavalla sähköön perustuvalla vedyn tuotannolla.

Yksinkertaisen toimintaperiaatteen käytäntöönpano ei ole kuitenkaan helppo ja suoraviivainen asia. Jotta energiajärjestelmä voitaisiin tasapainottaa vedyn avulla, se edellyttää, että sekä vedyn tuotanto että vedyn jatkojalostusprosessit ovat käytöltään joustavia, ja tuotantoketjun välituotteita voidaan siirtää ja varastoida edullisesti. Toinen merkittävä seikka on mittakaava, paljonko sähköä ja elektrolyysikapasiteettia tarvitaan korvaamaan nykyisin käytössä olevat fossiiliset polttoaineet. Muutama esimerkki valaisee mittakaavaa; suunnitteilla oleva Raahan terästehtaan tuotannon muuttaminen hiilivapaaksi vaatii vuositasolla n. 10 TWh sähköä. Tämä on yli 10% Suomen tämän hetkisestä sähköenergian kulutuksesta. Suomessa käytettävien fossiilisten liikennepolttoaineiden korvaaminen ns. Power2X sähköpolttoaineilla vaatisi n. 150 TWh sähköä.

Tämä on lähes kaksi kertaa Suomen nykyinen sähkökulutus. Vihreän siirtymän toteuttaminen vedyn avulla on siis mittaluokaltaan valtava hanke, joka edellyttää koko energiainfrastruktuurin uudistamista.

Tässä esityksessä esitellään tutkimustuloksia Business Finlandin rahoittamasta HYGCEL hankkeesta, Hydrogen and carbon value chains in green electrification. Nelivuotisessa hankkeessa on mukana Tampereen yliopisto, LUT yliopisto ja Itä-Suomen yliopisto. Esityksessä kerrotaan mallinustehtävästä, jossa tutkitaan vetytalouden vaikutuksia Suomen energiainfrastruktuuriin, miten uusiutuva energian tuotanto, vedyn tuotanto, vedyn jatkojalostusprosessit ja erilaiset varastot tulisi sijoittaa niin että järjestelmä olisi toimiva ja toteutettavissa minimikustannuksin.

## 2 Vetytalouden komponentit

Vihreä vety on hiilivapaalla uusiutuvalla sähköllä elektrolyysiprosessissa vettä hajottamalla tuotettua vetyä. Vety on hankalasti siirrettävissä ja varastoitavissa olevaa ainetta, koska olemassa olevat siirtotiet ja varastot eivät materiaaliteknisistä syistä johtuen sovellu sellaisenaan vedylle. Tästä johtuen suurin osa tuotetusta vedystä tullaan prosessoimaan edelleen metaaniksi, metanoliksi, ammoniakiksi sekä muiksi kemian teollisuuden hiilivetyperusteisiksi raaka-aineiksi. Hiilivetyjen tuotannossa vedyn lisäksi tarvitaan myös hiilidioksidia, jonka saatavuus on yksi merkittävä tekijä tuotantoyksiköiden sijoitusta mietittäessä.

Vedyn tuotantoon on käytettävissä erilaisia elektrolyysereitä, jotka eroavat toisistaan hyötysuhteen, tuotettavan vedyn puhtauden, toimintalämpötilan, toiminta-alueen leveyden ja toimintapisteen muutosnopeuden suhteen. Myös investointikustannuksiltaan erityyppiset elektrolyysilaitteistot poikkeavat toistaan huomattavasti mm. niissä käytettävien katalyyttien hinnoista johtuen. Elektrolyysereiden toimintalämpötilat vaikuttavat siihen, miten prosessissa syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää kytkemällä niitä osaksi lämmitys- ja lämmitysjärjestelmiä. Yleisesti ottaen elektrolyysit ovat toiminnaltaan joustavia, niillä on laaja toiminta-alue ja suuri kuormanmuutosnopeus.

Vedyn jatkojalostuksessa hiilivedyksi käytetään Fisher-Tropsch ja Sabatier prosesseja, ja ammoniakin valmistuksessa Haber – Bosch prosessia. Nämä prosessit toimivat korkeissa lämpötiloissa ja paineissa, ja ne eivät ole toiminnaltaan kovinkaan joustavia, vaan niitä pyritään ajamaan vakiotoimintapisteesä.

Vedyn suora käyttö teollisuusprosessien raaka-aineena ja lämmönlähteenä ei ole kovin joustavaa, koska teollisuuden prosessit toimivat tyypillisesti vakiotoimintapisteesä vaatien tasaiset materiaali- ja energiavirtaukset.

Esimerkiksi rautamalmin vetyelkistystä osana teräksen valmistusprosessia ei voi heilutella tuuliolosuhteista riippuen.

Koska järjestelmä pitää sisällään sekä joustavia että joustamattomia komponentteja, tarvitaan varastoja tasaamaan vaihtelevan tuotannon ja tasaisen kulutuksen välisiä eroja. Yksi keskeinen tutkimuskysymys hankkeessa onkin, kuinka paljon ja millaisia varastoja tarvitaan, jotta systeemi voi toimia.

### 3 Vetysysteemin mallintaminen osana energijärjestelmää

HYGCEL projektissa mallinnetaan Suomen energijärjestelmän toimintaa tilanteessa, missä järjestelmä sisältää runsaasti tuulivoiman tuotantoa, vedyn tuotantoa ja vedyn jatkojalostusta sähköpolttoaineiksi ja kemian teollisuuden raaka-aineiksi. Mallia käytetään optimaalisen kuormanjaon, eli dispatch-ongelman ratkaisemiseen. Mallin avulla etsitään vastauksia kysymyksiin:

- Kuinka paljon elektrolyysikapasiteettia tarvitaan tuottamaan haluttu määrä vetyä
- Kuinka paljon jatkojalostuskapasiteettia tarvitaan tuottamaan haluttu lopputuotemäärä
- Millaisia sähkön, vedyn, hiilidioksidin ja lopputuotteiden siirtokapasiteetteja tarvitaan eri tuotantoyksiköiden sijoitusvaihtoehdoilla
- Paljonko tarvitaan varastokapasiteettia tasaamaan vaihtelevan tuotannon ja tasaisen kulutuksen välinen ristiriita
- Mitä tuotetta varastoidaan ja mihin varastot sijoitetaan
- Miten elektrolyysissä ja jatkojalostusprosesseissa syntyvä hukkalämpö saadaan hyödynnettyä
- Millaiseksi muodostuu vedyn ja siitä jalostettujen tuotteiden hinta erilaisilla infraratkaisuilla

Vetysysteemin ja muun energijärjestelmän toimintaa mallinnetaan VTT:n kehittämällä Backbone mallinnusohjelmalla. Backbone muodostaa syöttötiedostot GAMS ohjelmistolle, jota käytetään optimointiongelman ratkaisuun. Mallissa Suomi on jaettu yhdeksään maantieteelliseen alueeseen, jotka kytkeytyvät toisiinsa sähkönsiirtoverkon ja erilaisten vedyn, hiilidioksidin ja sähköpolttoaineiden siirtoyhteyksillä. Malliin on sisällytetty eri alueiden tuulivoiman tuotantopotentiaalit, hiilidioksidin saatavuus ja potentiaalinen vetyä käytävä teollisuus. Mallin avulla tutkitaan erilaisia skenaarioita, millainen infrastruktuuri tarvittaisiin, jos vetytalous kehitty ns. omalla painollaan, Business as Usual, jos pyritään kansalliseen energiaomavaraisuuteen, tai jos hyödynnetään Suomen kaikki uusiutuvan energian tuotantopotentiaali ja tähdätään suuren mittaluokan

energian viejäksi.

## 4 Yhteenveto

Esityksessä esitellään projektissa kehitetty simulointimalli ja hahmotellaan skenaarioita, miten erisuuriset vetytalous hyödyntämishankkeet vaikuttaisivat Suomen energiainfraan. Simulointimallin avulla tutkitaan eri vaihtoehtojen toimivuutta, niiden aiheuttamia investointeja ja eri ratkaisuiden kustannuksia. Projektilla tuotetaan tietoa erilaista kehitysvaihtoehdoista, joilla mahdollistetaan vihreä siirtymä ja irtaantuminen fossiilitaloudesta.

Timo Malm\*, Daniel Pakkala and Eetu Heikkilä

# Autonomous mobile machines in mines and 5G enabled safety principles

**Abstract:** There is a strong need to have autonomous or semi-autonomous mobile machines in mines. They enable increased productivity and improved safety, as workers do not need to be continuously present in the most dangerous areas of the mine. Several strategies are needed to minimize risks related to collisions. Fences or virtual fences can provide a good safety level, but they are laborious to configure in a continuously changing environment. Tracking of all persons and vehicles, combined with on-board sensors for object detection, could be able to provide dynamic safety without compromising productivity. However, capability in all environmental conditions is not yet adequate. Traffic rules are good additional means to improve safety, but not sufficient for autonomous systems. Almost always, good communication is required between machines, operators and infrastructure. Lost integrity or availability of communication can have impacts on safety and production. 5G introduces new possibilities to build reliable and quick networks.

**Keywords:** Functional safety, mining operations, autonomous mobile machines

**\*Corresponding Author: Timo Malm** VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: timo.malm@vtt.fi

Daniel Pakkala, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: Daniel.pakkala@vtt.fi

Eetu Heikkilä: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: eetu.heikkila@vtt.fi

## 1 Introduction

This paper focuses on new safety principles enabled by 5G, pointing out risks, mitigation strategies, functional safety principles and communication safety principles. A comprehensive study will be available in VTT Technology publication “Autonomous mobile machines in mines using 5G enabled operational safety principles” [1]. This paper introduces selected ideas of safety functions, which can be applied with autonomous mobile machines in mines. The focus is on cases where 5G communication is applied.

The focus of this article is on collision avoidance. Autonomous mobile machines are typically large, and all collisions cause considerable damages. If a person is involved with the collision the severity is considered fatal in the risk assessment. Also a collision of two driverless vehicles can have hazardous consequences in mines.

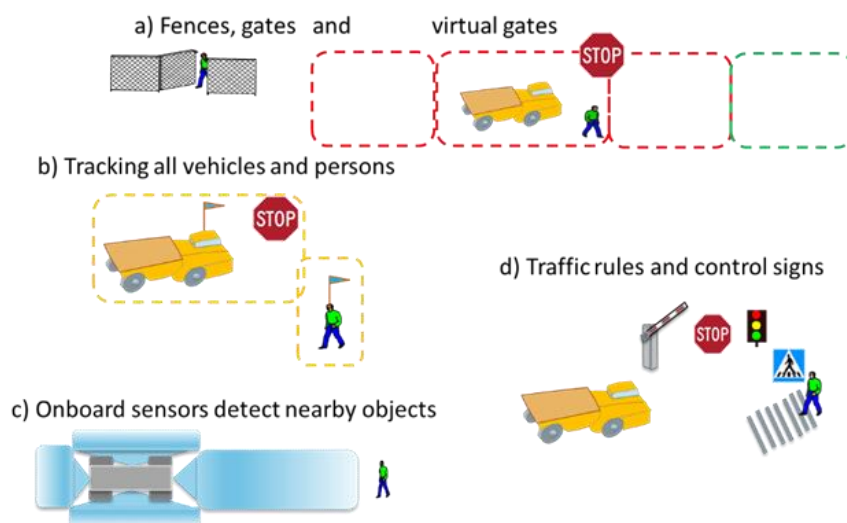


Figure 1 Strategies to mitigate autonomous mobile machines collisions.

One aspect related to communication is that safety means are concentrated on safety layer, which is above actual communication protocols [2]. In many cases, messages need to be sent via several stations using wireless or wired communication. The logical communication between safety layers of two nodes is considered black channel, which may have different safety capabilities, which can be difficult to evaluate in a dynamic environment.

The strategies to mitigate risks are here divided into 4 groups presented in Figure 1: a) fences, gates and virtual gates/fences, b) tracking of persons and vehicles, c) on-board sensors to get an overview of objects in the vicinity, d) traffic rules. To make a safe mobile machinery system in mines often several mitigating strategies are needed. Communication between machines, operators, fleet control and infrastructure, is necessary in all of the strategies. Sensors onboard the mobile machine (case c) at the figure) could operate for a while without communication, but there must be means to stop all machines and for emergency stop communication is required. [1]

## 2 Methods

The research was done in NGMining project and the ideas of safety strategies have emerged in discussions, presentations and workshops in the project. There have been several case studies in the project related to communication (mainly 5G).

## 3 Results and conclusions

The safety and availability of communication are important factors in mines, especially in future digitalized mining, where physical mining process are increasingly automated and executed by teleoperated or fully autonomous mining machines. In highly digitalized and automated mining operations the availability of communication had key role in ensuring continuity of production at the mining site. Safety issues are often related to integrity of messages and there are requirements for integrity, for example, safety integrity level 2 (SIL). Availability requirements can be related to safety, but typically loss of communication leads to a safe state i.e., stopping. The time to endure communication delays needs to be defined in risk assessment. For example, in bridge cranes the acceptable time delay is typically 500 ms and similar value can be applied in mobile machines too.

Although availability issues do not usually cause safety issues, a long-lasting communication loss can cause huge financial losses due to lost production.

The communication systems in mines are changing continuously as new tunnels are built. Therefore, some parts of the communication can be difficult to be defined as white channel according to IEC 61508-2. Safety measures can be done also in sender and receiver in their safety layer. This means that the communication is made in black channel, which includes 5G. Since 5G is inside the black channel, its properties are not considered in safety assessment of the communication channel. However, reliable communication affects the share of messages that the safety layer accepts and furthermore it has an effect on dependability in general.

A relatively new category of risks in mine communication are related to cybersecurity. The mines are usually deep underground and therefore general cybersecurity threats/attacks are rare. However, it is wise to consider vulnerabilities of communication and control systems to avoid cybersecurity issues.

Strategies and principles to mitigate collision risks need to be chosen. Most of the strategies require safety functions, which are related to control systems and communication. Safety functions are related to functional safety, including safety integrity levels (SIL) and performance levels (PL). Furthermore, control systems are related also to cybersecurity and dependability in general.

This research has been conducted as a part of the Next Generation Mining (NGMining) project. We gratefully acknowledge the funding of Business Finland and the contributions of participating companies.

## 4 Bibliography

- [1] Malm T., Pakkala D., Heikkilä E. 2023 . W Autonomous mobile machines in mines using 5G enabled operational safety principles. VTT Technology 412. 65 p. <https://cris.vtt.fi/en/publications/autonomous-mobile-machines-in-mines-using-5g-enabled-operational->
- [2] IEC 61784-3:2010 Digital data communication for measurement and control – Part 3: Profiles for functional safe communication in industrial networks. (obsolete) 59 p.

Amin Modabberian\*, Xiaguo Storm, Aneesh Vasudev, Kai Zenger, and Maciej Mikulski

# Towards Low Emission Combustion Control in Marine Applications

**Keywords:** RCCI - modelling, MPC control

**\*Corresponding Author: Amin Modabberian:** Aalto University, Department of Electrical Engineering and Automation, E-mail: amin.modabberian@aalto.fi

**Xiaguo Storm:** University of Vaasa, School of Technology and Innovations, Energy Technology, E-mail: xiaguo.storm@uwasa.fi

**Aneesh Vasudev:** University of Vaasa, School of Technology and Innovations, Energy Technology, E-mail: aneesh.vasudev@uwasa.fi

**Kai Zenger:** Aalto University, Department of Electrical Engineering and Automation, E-mail: kai.zenger@aalto.fi

**Maciej Mikulski:** University of Vaasa, School of Technology and Innovations, Energy Technology, E-mail: maciej.mikulski@uwasa.fi

## 1 Extended abstract

Energy - its sufficiency and production with low emission technologies - are the current and upcoming global key challenges. In the automotive and off-road sector the transition into fully electric low-emission technology is on-going. However, e.g. in marine applications (passenger and cargo ships) the energy density of electric engines is not enough to drive the ships, and there is no change foreseen for it in the near future. The traditional diesel engines function well, but they use fossil fuel and produce an intolerable amount of emissions (soot, particulate matter, nitrogen dioxide ( $NO_2$ ) and carbon dioxide ( $CO_2$ )). Carbon dioxide is a greenhouse gas, and its reduction in the atmosphere is currently the main environmental challenge.

The solution to the aforementioned problem is the development of engines, which use new environmentally friendly combustion technologies. These are different from the traditional combustion engines in that they operate in much lower temperatures, leading to a radical reduction of emissions. Some of these new combustion technologies are: Partially premixed combustion (PPC), homogeneous charge compression ignition (HCCI) and reactivity controlled compression ignition (RCCI). These processes are quite promising. However, their modeling and control is a complex task compared to the traditional engines. This is due to the fact that the new combustion processes use dual-fuel injections, which leads to complex physico-chemical reactions taking place inside the cylinders.

RCCI technology has been an area of interest among research communities for the next generation of combustion en-

gines [1] due to its ability of reaching ultra low levels of soot and  $NO_x$ , and having a high thermal efficiency [2, 3]. However, certain issues challenge the adaptation of RCCI in terms of model-based control design (MBCD). These include complex thermo-kinetic reactions, high pressure rise rate at high load operating conditions, low combustion efficiency at low load operating conditions, increasing system complexity and highly nonlinear system dynamics and extensive calibration space. [4, 5]

This work presents a physics-based time-varying RCCI combustion model capable of real-time simulations and can predict the start of combustion (SOC), heat-release, and cylinder pressure of an RCCI marine engine. The model is further extended and improved with a semi-predictive combustion phasing model and a physics-based emission model. The modelling in this work is part of the simplification of a more accurate physics-based model called the University of Vaasa Advanced Thermo-kinetic Multizone Model (UVATZ), developed by Vasudev et al. [6]. Eventually, this model is controlled with model-predictive control (MPC) cycle-wise.

The combustion model simulates the RCCI process based on the values of fuel blend ratio (BR), excess air ratio ( $\lambda$ ), temperature and pressure at IVC, and equivalence ratios of low and high reactivity fuels (LRF, HRF). Subsequently, it obtains essential combustion parameters, such as cylinder pressure and temperature, maximum pressure rise rate, indicated mean effective pressure (IMEP) and combustion phasing. Additionally, it calculates the emission of  $NO_x$ ,  $CO_x$  and PM based on the values of aforementioned combustion parameters.

The MPC is chosen due to its ability of solving the optimization problem utilizing a moving horizon window [7] corresponding to a engine cycle in this application. In this work, MPC is used to control the aforementioned parameters to maintain cylinder pressure and temperature, and IMEP at levels optimal over a cycle to achieve low-temperature combustion characteristics, and eventually low emission levels.

The developed system will later be tested on a 4-cylinder test engine at VEBIC laboratory in Vaasa, which operates on RCCI and conventional diesel combustion modes.

## References

- [1] Mikulski M, Ramesh S, Bekdemir C. Reactivity Controlled Compression Ignition for clean and efficient ship propulsion. *Energy*. 2019;182:1173–1192.
- [2] Benajes J, Pastor JV, García A, Monsalve-Serrano J. The potential of RCCI concept to meet EURO VI NO<sub>x</sub> limitation and ultra-low soot emissions in a heavy-duty engine over the whole engine map. *Fuel*. 2015;159:952–961.
- [3] Splitter D, Hanson R, Kokjohn S, Reitz RD. Reactivity controlled compression ignition (RCCI) heavy-duty engine operation at mid-and high-loads with conventional and alternative fuels. In: *SAE World Congress & Exhibition*. SAE International. 2011; .
- [4] Vasudev A, Cafari A, Axelsson M, Mikulski M, Hyvonen J. Towards Next Generation Control-Oriented Thermo-Kinetic Model for Reactivity Controlled Compression Ignition Marine Engines. In: *SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition*. SAE International. 2022; .
- [5] Reitz RD, Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015;46:12–71.
- [6] Vasudev A, Mikulski M, Balakrishnan PR, Storm X, Hunicz J. Thermo-kinetic multi-zone modelling of low temperature combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022;91:100998.
- [7] Wang L. *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media. 2009.

Teemu Pätsi<sup>\*1</sup>, Markku Ohenoja<sup>1</sup>, Harri Kukkasniemi<sup>2</sup>, Tero Vuolio<sup>1</sup>, Petri Österberg<sup>1</sup>, Seppo Merikoski<sup>2</sup>, Henry Joutsijoki<sup>2</sup>, Mika Ruusunen<sup>1</sup>

# Monitoring of process control performance for a more sustainable production

**Abstract:** Well-performing control loops have an integral role in efficient and sustainable industrial production. Control performance monitoring (CPM) tools are necessary to establish further process optimization and preventive maintenance. Data-driven, model-free approaches are studied in this research by comparing the performance of eight CPM methods in an industrially relevant process simulation. A novel Overall Equipment Efficiency based index, called OCE (Overall Controller Efficiency) is proposed.

**Keywords:** Performance, Control loop, Monitoring, Overall Controller Efficiency, Single-input single-output

**\*Corresponding Author: Teemu Pätsi:** <sup>1</sup>Environmental and Chemical Engineering Research Unit, Control Engineering group, University of Oulu, Finland, E-mail: [teemu.patsi@oulu.fi](mailto:teemu.patsi@oulu.fi), [forename.surname@oulu.fi](mailto:forename.surname@oulu.fi)

<sup>2</sup>Insta Advance Oy, Tampere, Finland, [forename.surname@insta.fi](mailto:forename.surname@insta.fi)

## 1 Background & Aims

In industrial applications processes are controlled for the purposes of increasing production efficiency and reducing wasted resources. Well-performing control loops have an integral role in these tasks. Poorly performing control loops may be caused by normal process deterioration over time or by disturbances and failures in sensors, controllers, actuators, and the process itself. Thus, the effectiveness of each control loop should be monitored to create a solid foundation for further process optimization and preventive maintenance.

In this work, data-driven model-free approaches are prioritized for the purpose of obtaining easily adaptable methodologies. Thus, the methods can be utilized in an industrial plant, where modelling of countless amounts of sub-processes would require immense effort. Some

commercial products are founded on similar aims. Noninvasiveness, utilization of existing sensors, minimal process knowledge and simple algorithms are demanded from control performance monitoring (CPM) tools<sup>1</sup>.

This work evaluates the applicability of several model-free CPM methods on a simulated process data. The simulator represents a sub-process in a supercritical fluid extraction system. Several simulation scenarios are created to deteriorate the system behavior from the nominal control performance and thus illustrate the performance of the CPM methods.

## 2 Material & Methods

The CPM tools applied comprise several well-known integral time measures (ISE, IAE, ITAE, amplitude index AI) and indices familiar from Machine Learning community (Kullback-Leibler divergence (KL), Euclidean distance (ED), and histogram intersection (HI)). The study also presents a novel OCE (overall controller efficiency) index for CPM by adopting the framework of the Overall Equipment Efficiency (OEE)<sup>2</sup> to this new context. The proposed OCE utilizes the productivity (performance, OCE<sub>p</sub>) and efficiency (quality or yield, OCE<sub>q</sub>) metrics.

According to the literature<sup>3,4</sup>, the common challenges in control loop performance are related *e.g.* to valve stiction, equipment malfunction, external disturbances, measurement quantization and poor controller tuning. Thus, these faults are simulated in this study. For the equipment malfunction, a valve change rate limit was introduced as a fault.

The studied supercritical fluid extraction process utilizes properties of a supercritical fluid to extract product from a raw material. Previously identified simulator<sup>5</sup> for the process was utilized and one control loops, namely the CO<sub>2</sub> flow from the simulator, was isolated for this work.

<sup>1</sup> <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8848037&fileId=8859439>

<sup>2</sup> <https://www.oee.com/>

<sup>3</sup> <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.396>

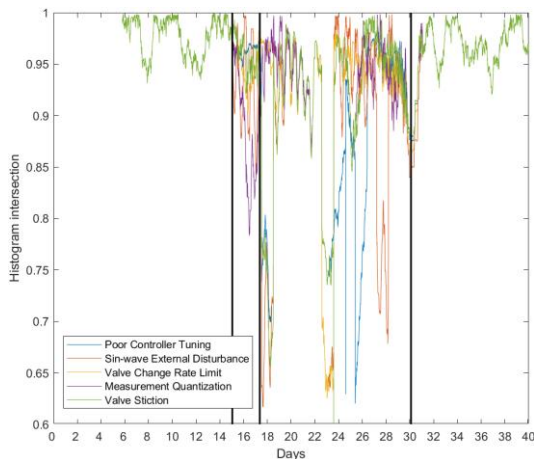
<sup>4</sup> <https://doi.org/10.1016/j.procont.2015.11.002>

<sup>5</sup> <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202010153029>

A rich data set was simulated by changing the setpoint with an interval of 20 minutes and random value from a uniform distribution between 0 and 0.8. Individual faults were introduced to the simulation after normal operation of 15 days. Approximately after two more days, the effects of multiple simultaneous faults were simulated. From the simulation, a data set comprising of 40 days of process operation was obtained.

### 3 Results & Discussion

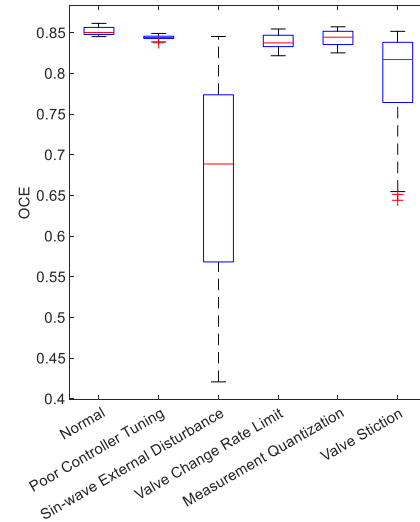
In Figure 1, the time series of one of the CPM indices is shown for five different simulations. In this case, the inclusion of individual faults (days 15–17) decreases the metric for all fault scenarios, with quantization and external disturbance having the most decrease. After other disturbances are introduced (days 17–30) to the process, all metrics decrease significantly as expected. At the latter part of simulation, the faults are removed, and the index value returns to the range of normal operation.



**Figure 1.** Histogram intersection between reference data and a sliding window of 1 day. Individual faults enabled between the first two vertical lines. Faults disabled after the last vertical line.

The performance of the proposed indices was compared by evaluating the index values before the first control loop fault (days 11–13) and after the fault (days 15–17). For this, box plots were drawn for normal operation (before the fault) and after individual faults. In Figure 2, the total OCE index shows statistically significant different behavior for four of the fault scenarios in comparison to the normal operation data. Only the quantization fault cannot be separated by OCE.

In Table 1, the performance of all demonstrated CPM indices are presented. It can be concluded that all the implemented faults in this case can be identified with at least one of the demonstrated methods. KL, ED, HI, and OCEp could identify all the fault scenarios, while other methods missed the presence of quantization.



**Figure 2.** Boxplot of OCE index in the presence of single fault.

**Table 1.** Qualitative performance of CPM indices. The fault situations marked with X showed statistically significant difference in the monitored index between normal and faulty operation.

CPM index	Cont. tuning	Ext. dist.	Rate limit	Quant.	Valve stiction
ISE	X	X	X	–	–
ITAE	–	–	–	–	–
AI	X	–	–	–	–
KL	X	X	X	X	X
ED	X	X	X	X	X
HI	X	X	X	X	X
OCEp	X	X	X	X	X
OCEq	–	X	–	–	X
OCE	X	X	X	–	X

It should be noted that the implemented KL, ED, HI and OCE methods require reference data from normal process behavior. The first 5.8 days (50000 data points) for KL, ED and HI, and the first 10 days for OCE were used for this purpose. Determining “normal” data from a process may prove difficult depending on the application. Additionally, the selected size of the sliding window for the metrics affects the resolution of the results. With a larger window size, the observation of a fault may be delayed as a lower proportion of the window is from faulty data. Determining alarm limits is dependent on the process as tolerances can vary.

The future work will consider the implementation of the well-known CPM indices as additional performance measures in the OCE calculation, and the robustness of CPM methods in different fault scenarios with varying characteristics. Further research should also extend the tools to multiple-input multiple-output control and diagnostics.

**Acknowledgements:** University of Oulu and Insta Advance Oy were funded by Business Finland via project ‘Operational eXcellence by Integrating Learned information into AcTionable Expertise (OXILATE)’, under the ITEA3 Programme.



Outi Rask\*

# Prosessiautomaation innovaatioalusta

**Tiivistelmä:** Pirkanmaalle kehitetään prosessiautomaation innovaatioalustaa yhteistyössä Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK), Tampereen yliopiston (TAU) ja VTT:n kanssa. Hankkeessa rakennettava innovaatioalusta rakentuu kolmeen toimipisteeseen ja tarjoaa monipuolisen, nykyaikaisen testausympäristön prosessiautomaation erilaisiin ja eriasteisiin kehitys- ja testaustarpeisiin. Tässä artikkelissa keskitytään erityisesti TAMKille rakentuvaan laitekokonaisuuteen.

**Avainsanat:** innovaatioalusta, automaatio

\***Outi Rask:** Tampereen ammattikorkeakoulu, outi.rask@tuni.fi

## 1 Johdanto

Tampereen ammattikorkeakoulu (TAMK) on yhdessä Tampereen yliopiston (TAU) ja VTT:n Tampereen toimipisteen kanssa kehittämässä ensimmäistä erityisesti prosessiautomaation parissa toimiville Pirkanmaan alueen pk-yrityksille suunnattua innovaatioalustaa. Jokainen organisaatio rakentaa oman innovaatioalustan omiin tiloihinsa siten, että alustat ovat vuorovaikutuksessa keskenään.

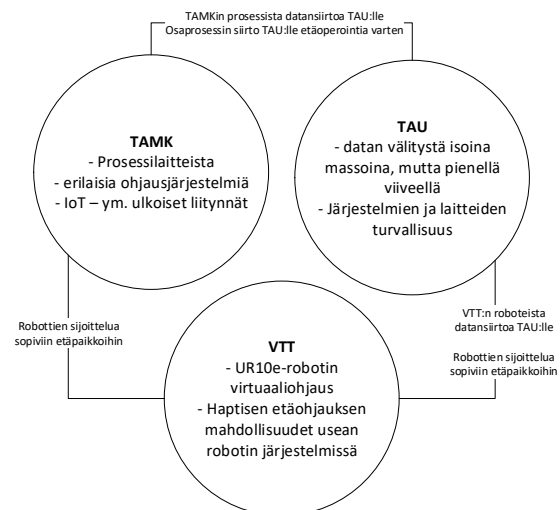
Innovaatioalusta koostuu prosessiautomaatiota hyvin monipuolisesti palvelevista osakokonaisuuksista (kuva 1). TAMKin ympäristöön rakennetaan monipuolinen mittausta, säätöä ja erilaisia ohjaussovelluksia tukeva testialusta. Ympäristöstä on avoimet rajapinnat mm. tiedonsiirtoa varten.

Tampereen yliopiston osuus keskittyy isojen tietomassojen turvalliseen ja nopeaan siirtämiseen. Tässä hyödynnetään TAMKin Kaupin kampuksen ja Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen välille rakennettua DS CyberLabs valokuituverkkoa (Rask et. al. 2021).

VTT:n ympäristö puolestaan keskittyy pienikokoisten teollisuusrobottien haptiseen etäohjaukseen (González et.al. 2021). Tällaisia robotteja voidaan prosessiteollisuudessa sijoittaa esimerkiksi paikkoihin, joissa ihmisten on vaarallista tai haastavaa toimia. Hankkeessa keskitytään pääasiassa yhden robotin haptiseen ohjaukseen,

mutta tavoite on laajentaa PRODI-hankkeen tulosten perusteella tutkimusta useamman robotin samanaikaiseen ohjaukseen.

Haptinen ohjaus poikkeaa perinteisemmästä etäohjauksesta siinä, että se tuo etäohjaukseen mukaan tuntoaistin. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, jos robottikäsi reagoi tartuntatilanteessa tarvittaessa tartunnan lujuteen helpottamalla tai vastustamalla tartuntaa. Ominaisuutta käytetään mm. monissa peliohjaimissa, joissa esimerkiksi autopeliä ajettaessa ohjauspyöräohjain alkaa täristä eri tavoin ajettavan pinnan mukaisesti.



Kuva 1. PRODI:n innovaatioalustan toiminta-ajatus.

## 2 TAMKin prosessiympäristö

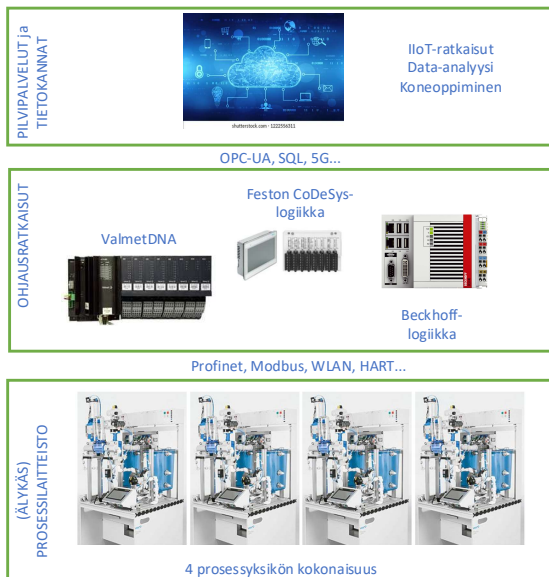
Tämä artikkeli koskee pääasiassa TAMKin ympäristöä. Kirjoitushetkellä ympäristö on vasta kehitteillä ja ensimmäiset demot kohdeyrityksille järjestetään kevään 2023 aikana. Tämä paperi keskittyy esittelemään TAMKin ympäristön konseptin sekä sen rakennusperiaatteita. Ympäristön periaatekuva on esitetty kuvassa 2.

Ympäristön keskiössä on Festo Didacticsin valmistama prosessituotantolinjasto, joka koostuu neljästä osaprosessista: suodatus, sekoitus, reaktori ja pullotus. Osat toimivat yksittäin mutta myös yhdessä kokonaisuutena tuotantolinjana.

Jokainen osaprosessin toiminnallisuus keskittyy

johonkin prosessien mittauksen ja säädön kannalta keskeiseen suureeseen: virtaukseen, lämpötilaan, paineeseen tai pinnankorkeuteen. Jokaista pystyy tarkkailemaan sekä mittaus- että säätöteknisestä näkökulmasta.

Jokaisella osaprosessilla on oma ohjaimensa. Avoimen rajapinnan ansiosta jokaiseen näistä voidaan liittää erilaisia ohjelmitavia logiikoita eri valmistajilta tai vaikka hajautetun automaatiojärjestelmän prosessiaseman. Hankkeessa on tarkoitus demonstroida ympäristöä liittämällä laitteistoon mm. Siemensin, Beckhoffin ja Feston ohjelmitavia logiikoita sekä ValmetDNA-järjestelmä (DCS-järjestelmä). On mahdollista demonstroida DCS-järjestelmän muodostusta erillisen SCADA-ohjelmiston



Kuva 2. TAMKin ympäristön periaatekuva.

### 3 Lähteet

Rask, Outi, Jari Seppälä, and Mikko Salmenperä. "Projektioppiminen automaatiosuunnittelussa." Automaatiopäivät24: Automaatio, kestävä kehitys ja tulevaisuus 13-14 April 2021 (2021).

González, C., Solanes, J. E., Munoz, A., Gracia, L., Girbés-Juan, V., & Tornero, J. (2021). Advanced teleoperation and control system for industrial robots based on augmented virtuality and haptic feedback. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 283-298.

Antonio Rosales\* and Tapio Heikkilä

# Direct Force Control of a Robot in Contact with an Uneven Surface

**Abstract:** Our case of study is a robot in contact with an uneven planar surface. The robot's contact task consist of exerting a desired force on normal direction to the surface while a desired trajectory is tracked along the surface. For accomplish the task, we use a PID-type admittance controller. The uneven characteristic of the surface is modeled via ramp and sinusoidal disturbances, which are added to the position on normal direction to the surface. We analyze the capabilities of the force control to reject disturbances, and we propose a method for tuning the force controller that ensures an acceptable force error when disturbances emerge in the system. Then, analyzing the relative stability of the force control system, we provide a sub-optimal method to tune the control gains, and to estimate the maximum velocity of the end effector. Furthermore, a method to select the stiffness in the force control system is given. The analysis and methods are verified by simulations

**Keywords:** Robotics, Force Control, Stability

\*Corresponding Author: Antonio Rosales, Tapio Heikkilä: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Oulu, Finland, E-mail: antonio.rosales@vtt.fi, tapio.heikkila@vtt.fi

## 1 Introduction

Force control is essential when robots are in contact with the environment since the interacting force has to be bounded or regulated on a desired value. Direct force control techniques are capable to achieve the regulation of the force avoiding damage on the environment and in the robot itself [4]. However, these control techniques may not work properly when extra dynamics such as sensor dynamics, filters and delays, emerge in the system [2].

In order to have a force control system that includes dynamics commonly omitted in the design of the controller but unavoidable in practical applications, our research group presented a more accurate force control system in [1]. This model includes the dynamics of filters and delays, and its respective values.

In this note, we design a direct force control for the control system mentioned above. The direct force con-

trol is based on a PID-type admittance control. Firstly, the PID control is tuned, and we compare the performance between P, PD and PID. Then, we model the uneven characteristic of the surface via ramp and sinusoidal disturbance. Considering disturbances, and acceptable limits in the regulation error, we propose a method to tune the direct force control that achieves a sub-optimal performance. Furthermore, we study the variation in the stiffness, and a method to find the stiffness that satisfy the acceptable force errors is presented.

## 2 Force Control System

Fig. 1 presents the block diagram of the force control system to be studied in this paper. The elements of the control system are:  $G_c(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s}$  is the controller,  $G_T(s) = e^{-T_s}$  represents the delay due sensor communication,  $G_{LP}(s) = \frac{1}{\tau_{LPS} s + 1}$  is a low-pass filter used to suppress noisy in measurements,  $\tau$  is a time constant characterizing the time-response of the robot,  $v$  is the control signal, and  $e = f_d - f$  is the force error.

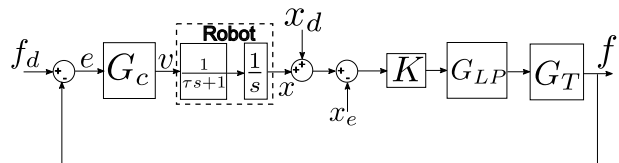


Fig. 1. Block diagram of force control system

For analyze the force, we are using the elastic model,

$$f = K(x - x_e) \quad (1)$$

where  $K > 0$  is the stiffness of the surface,  $x$  is the end-effector  $x$ -coordinate, and  $x_e$  is the position/location of the planar surface. Fig. 2 presents a single-degree-of-freedom model [3], widely use for analysis of the interaction force. The goal is to find a control input  $v$  that ensures a desired force  $f_d$  is exerted on the environment.

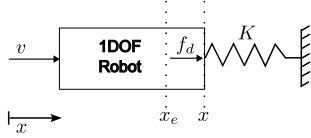


Fig. 2. 1-DOF system in contact with elastic environment

### 3 Control Design

Firstly, using the *pidTuner* of Matlab, we tuned the controller P, PD and PID to have same settling time  $t_s \approx 0.8$  seconds and overshoot of 15%. We test a step input of 50 [N] at 30 seconds. Fig. 3 shows the time response, one can see that the settling-time and overshoot are similar but the PD controller is faster than P and PID.

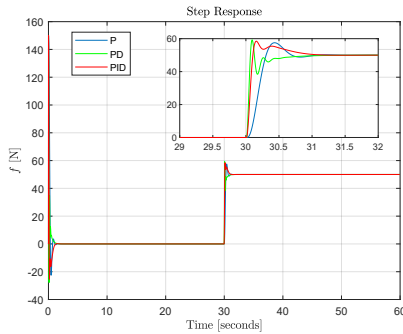


Fig. 3. Simulation results:force  $f$  with P, PD, and PID

Since the PD controller provide a faster response, the robustness of  $G_c(s)$  ( $K_i = 0$ ) when a ramp disturbance  $X_d(s) = \frac{M}{s^2}$  appears is tested. The magnitude of the ramp  $M$  is related with the velocity of the end-effector. The steady state error  $e_{ss} = \frac{M}{K_p}$  is computed, and the curves in Fig. 4 are obtained. The curves are a tuning tool, whenever the magnitude  $M$  is known, the control gain that provides the indicated (in the vertical axis) force error can be selected. The curves can be limited by the gain margin and the maximum admissible error. Then, we can fine the control gain that minimize the force error, and the maximum magnitude  $M$  that preserve the desired performance. For example, assuming a acceptable error of 3.5 [N] and a maxim gain of 0.002, the maximum  $M$  is  $2M$ , see Fig. 4.

Fig. 5 presents, the simulation when the PID controller is used, and the stiffness is varying. one can observe that the bigger the stiffness  $K$ , the more oscillations. The smaller  $K$ , the slower response. Then, we

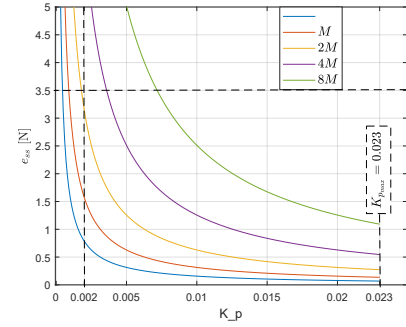


Fig. 4. Sub-optimal tuning of  $K_p$  in terms of  $e_{ss}$  and ramp value  $M$

can find the stiffness value that improves performance in terms of damping and overshoot

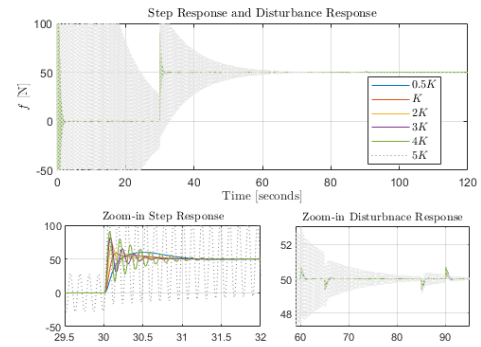


Fig. 5. Step input of 50 [N], PID is fixed and stiffness  $K$  varies

### References

- [1] Jari M. Ahola, Jukka Koskinen, Tuomas Seppälä, and Tapio Heikkilä. Development of Impedance Control for Human/Robot Interactive Handling of Heavy Parts and Loads. In *2015 ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, 08 2015.
- [2] Ribin Balachandran, Mikael Jorda, Jordi Artigas, Jee-Hwan Ryu, and Oussama Khatib. Passivity-based stability in explicit force control of robots. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 386–393, 2017.
- [3] Arvid QL Keemink, Herman van der Kooij, and Arno HA Stienen. Admittance control for physical human–robot interaction. *The International Journal of Robotics Research*, 37(11):1421–1444, 2018.
- [4] Markku Suomalainen, Yiannis Karayiannidis, and Ville Kyrki. A survey of robot manipulation in contact. *Robotics and Autonomous Systems*, 156:104224, 2022.

Tuomo Sipola\*, Tero Kokkonen, Markku Puura, Kalle-Eemeli Riuttanen, Kari Pitkaniemi, Elina Juutilainen, and Teemu Kontio

# Digital Twin of Food Supply Chain

**Abstract:** Food supply chain is one of the most critical parts of a modern society. Consequently, cybersecurity of the supply chain is a major concern as new threats emerge. Cyber ranges can be used to prepare for such cybersecurity threats by creating realistic scenarios mirroring real-world setups. The aim of this study is to describe a digital twin of the food supply chain built for a cyber range. This descriptive case study explains the general capabilities of the digital twin and its use in the cyber range environment. Creation of a digital twin enables the use of cyber ranges to train organisations related to the food supply chain.

**Keywords:** cybersecurity, digital twin, critical systems, food supply chain

**\*Corresponding Author: Tuomo Sipola:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: tuomo.sipola@jamk.fi

**Tero Kokkonen:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: tero.kokkonen@jamk.fi

**Markku Puura:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: markku.puura@jamk.fi

**Kalle-Eemeli Riuttanen:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: kalle-eemeli.riuttanen@jamk.fi

**Kari Pitkaniemi:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: kari.pitkaniemi@jamk.fi

**Elina Juutilainen:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: elina.juutilainen@jamk.fi

**Teemu Kontio:** Jamk University of Applied Sciences, E-mail: teemu.kontio@jamk.fi

## 1 Background and Aims

In the modern digitalised food supply chain, cyber security has an extremely important role. Food supply chain consists of food production, processing, distribution and retail. Such systems include traditional and modern internet of things (IoT) devices. An effective solution to enhance the knowledge and skills of staff members against cyber threats is the cyber security exercise where the learning audience train their skills with a realistic scenario and technical infrastructure mimicking required systems and networks [7]. Such technical infrastructure is called cyber range and/or cyber arena.

Karjalainen and Kokkonen introduce requirements for cyber arena environments [6]: (i) Realism, (ii) Isolated and controlled environment, (iii) Internet simula-

tion, (iv) User and network traffic generation, (v) Attack execution and simulation, (vi) Organisations' infrastructures, (vii) Collaboration and (viii) Planning, executing, monitoring and analysing.

According to Gartner Glossary of information technology [2] "A *digital twin* is a *digital representation of a real-world entity or system*." It states that a digital twin is implemented as a software object or model mirroring the real-world object. Cyber arena can be realised as a digital twin, which satisfies the requirements set by cyber security exercises. Themes related to digital twins such as physical and virtual processes, and virtual environments [5] are relevant in the cyber arena.

This study aims to describe the implementation of Food Production Cyber Arena, which meets the eight high-level requirements mentioned above. Studies such as Alim et al. [1] have implemented digital twins with physical testbeds to mirror farmland canal systems. However, in the present case study a complete digital twin of the food supply chain is described. This digital representation facilitates the creation of a simulated supply chain for a cyber exercise aimed at organisations working in the domain of food production and processing. For example, food production companies could exercise their response to cyber attacks targeted at critical points in their processes. A cyber exercise in the food supply domain could include participants from a food processing factory. Staff members from departments such as management, communications and operations participate. The scenario includes a cyber attack to the factory, to which the participants should react. The resolution of the problem will provide resilience information to the departments.

## 2 Building the Digital Twin

Institute of Information Technology at Jamk University of Applied Sciences hosts a cyber security, artificial intelligence and data-analytics focused research, development and training center called JYVSECTEC (Jyväskylä Security Technology). Since 2011 JYVSECTEC has implemented and maintained cyber arena known as RGCE (Realistic Global Cyber Environmet) [4]. RGCE has been implemented piece by piece during various research and development projects.

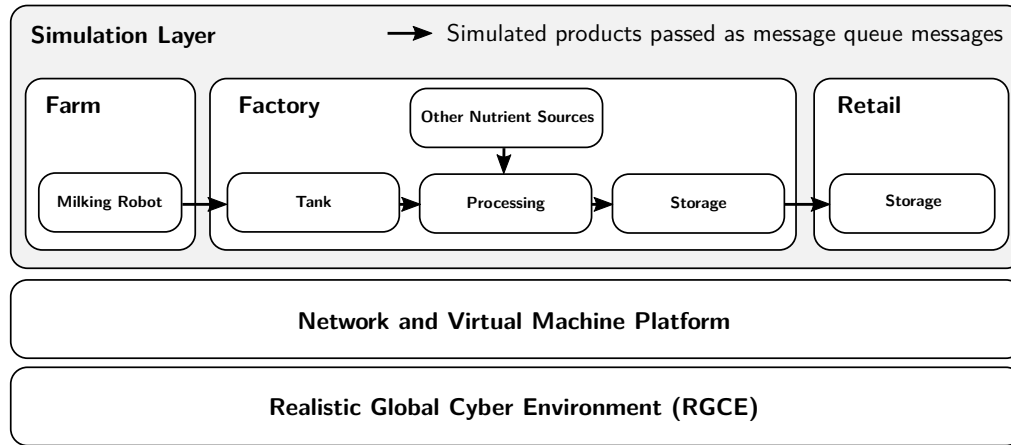


Fig. 1. Food supply chain simulation building blocks.

In the ongoing project *Food Chain Cyber Resilience*, critical food production infrastructure is mimicked as a digital twin for cyber security exercises for food production organisations [3].

Fig. 1 illustrates the setup of the food supply chain simulation. The simulation was mainly implemented using Node.js runtime environment. The various services run on virtual machines in containers on the Virtual Machine Platform. The services communicate via the (virtual) network. Messages are passed using REST APIs or mock-ups of protocols such as Modbus. Such messages are usually formatted as JSON.

The supply chain itself is modeled as (i) machines representing the various machines and storages in the supply chain and (ii) messages that are passed from one machine to another. Machines can represent, e.g., milking robots, food processing machines and packaging machines. The products passed from machine to machine are simulated using the Bull queue system for Redis. These messages contain the relevant domain information, e.g., a message could contain the amount of milk in litres, and metadata, such as the measurement unit.

### 3 Conclusion

The use of digital twins of domain systems as part of cyber exercises improves the immersiveness by simulating the real supply chains. This way the participants can exercise in a realistic environment, which mirrors the systems and processes in their ordinary work. Implementing the digital twin requires modular design with appropriate messaging simulating the real-world counterparts. Further research includes the full validation of the system as part of a real cyber exercise.

### Acknowledgment

Funded by the Regional Council of Central Finland/Council of Tampere Region with fund of Leverage from the EU, European Regional Development Fund (ERDF), Recovery Assistance for Cohesion and the Territories of Europe (REACT-EU). Implemented as part of the *Food Chain Cyber Resilience* project.

### References

- [1] M. E. Alim, S. R. Wright, and T. H. Morris. A laboratory-scale canal scada system testbed for cybersecurity research. In *2021 Third IEEE International Conference on Trust, Privacy and Security in Intelligent Systems and Applications (TPS-ISA)*, pages 348–354, 2021. doi:10.1109/TPSISA52974.2021.00038.
- [2] Gartner, Inc. Gartner Glossary, 2022. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>.
- [3] JAMK University of Applied Sciences, Institute of Information technology / JYVSECTEC. Food chain cyber resilience, 2022. URL: <https://jyvsectec.fi/2021/09/food-chain-cyber-resilience/>.
- [4] JAMK University of Applied Sciences, Institute of Information technology / JYVSECTEC. Realistic global cyber environment (RGCE), 2022. URL: <https://www.jyvsectec.fi/rgce>.
- [5] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks. Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29:36–52, 2020. doi:10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [6] M. Karjalainen and T. Kokkonen. Comprehensive cyber arena; the next generation cyber range. In *2020 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)*, pages 11–16, 2020. doi:10.1109/EuroSPW51379.2020.00011.
- [7] T. Kokkonen, J. Päijänen, and T. Sipola. Multi-national cyber security exercise, case Flagship 2. In *14th International Conference on Education Technology and Computers (ICETC 2022)*, page 7, 2022. doi:10.1145/3572549.3572596.

Micke Talvi\*, Tomi Roinila, Kari Lappalainen

# Effects of Ramp Rate Limit on Sizing of Energy Storage System for PV-Wind Power System

**Abstract:** The power produced by variable renewable energy power plants (VREPP) can fluctuate heavily and cause issues in the power grid. To prevent the power quality issues in the grid, some countries have set a ramp-rate limit (RR) that the generated output power of power plants may not exceed. The power fluctuations of VREPPs are often mitigated by an energy storage system (ESS) and a power smoothing method. This paper presents how the RR limit value affects the size of an ESS needed for a photovoltaic (PV)-wind power system. Also, the size of the power plant is considered, and how it affects the size of the ESS. The generated power of the PV-wind power system was simulated using measured irradiance, temperature and wind speed. An RR-based control algorithm was used to operate the virtual ESS. It was found that the increase in the RR limit greatly decreases the size of the ESS. The size of the power plant also significantly affects the size of the ESS.

**Keywords:** photovoltaic power, wind power, power ramp rate, energy storage, power smoothing

\***Micke Talvi: Corresponding Author:** Tampere University, E-mail: micke.talvi@tuni.fi

**Tomi Roinila:** Tampere University, E-mail: tomi.roinila@tuni.fi

**Kari Lappalainen:** Tampere University, E-mail: kari.lappalainen@tuni.fi

## 1 Background and Aims

As the amount of grid-connected variable renewable energy power plants (VREPP) increases, the stability of the grid is endangered as the output power fluctuations of these power plants are likely to cause issues with the power quality. Some countries have set limitations in their grid codes to prevent issues caused by highly fluctuating power. For example, Puerto Rico has set a ramp rate (RR) limit of 10 %/min of the rated power of the power plant [1]. The RR limit is the power ramp level below which the power fluctuations of power plants should not cause issues in the grid. The applied RR limits vary by country, and the RR limit of a country can change in the future.

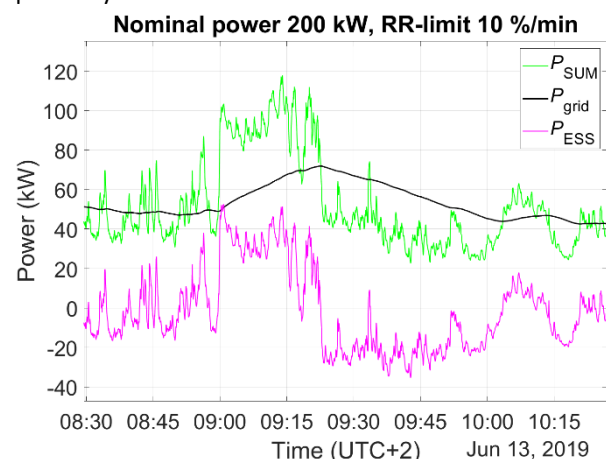
The power output fluctuations of VREPPs are often mitigated by an energy storage system (ESS) and

a power smoothing method. The smoothed power acts as the reference power for the ESS. One power smoothing method type is an RR-based control algorithm. An RR-based control algorithm was used in [2, 3] to mitigate the power fluctuations of a photovoltaic (PV) power system. In both studies, it was found that the RR limit value affects the size of an ESS required for the PV power system. There are not that many studies that have investigated sizing of an ESS for a PV-wind power system.

This paper will study the effects of different RR limits on the size of an ESS coupled with a PV-wind power system. Also, it will be covered how the size of the power plant affects the size of an ESS when different RR limits are used.

## 2 Materials and Methods

Simulations for the generated power of the PV-wind power system were carried out with the irradiance, temperature and wind speed measurements from Tampere University Solar PV Power Station Research Plant [4]. All measurements were done for a period of 5 months with a sampling frequency of 10 Hz. The PV and wind power (WP) was simulated with MATLAB. A virtual ESS was used to mitigate the power fluctuations of the simulated sum power of the PV-wind power system.



**Figure 1:** ESS mitigating the fluctuating sum power of the PV-wind power system.

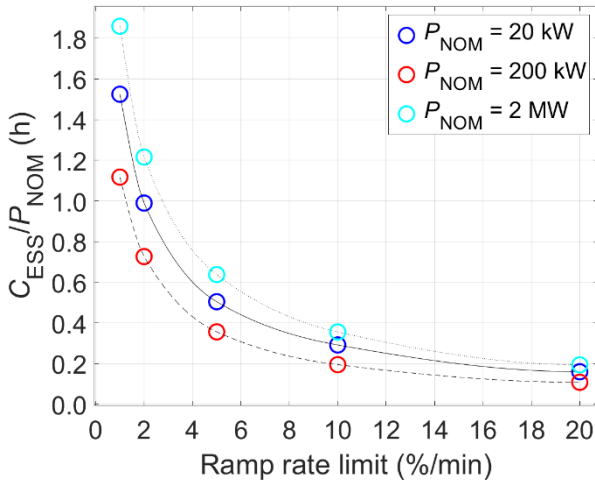
The control algorithm used for the ESS was an RR-based algorithm that also takes into account that at every moment the ESS has enough energy for a sudden shutdown of the power plant. In other words, the

output power of the power plant follows the RR limit also during a possible shutdown. Fig. 1 shows how the ESS operates to mitigate the fluctuating sum power  $P_{\text{SUM}}$  of the PV-wind power system. The grid input power of the PV-wind power system  $P_{\text{grid}}$  does not exceed the RR limit of 10 %/min, as the ESS is either charged or discharged with the power  $P_{\text{ESS}}$  of the ESS.

The simulations were done for 3 different power plant sizes whose total nominal powers  $P_{\text{NOM}}$  were 20 kW, 200 kW and 2 MW. With all the power plant sizes, 50% of the  $P_{\text{NOM}}$  consisted of PV power and 50% of WP. The nominal power of the PV system was scaled using different numbers of PV modules. The nominal power of a single PV module was 190 W. The nominal power of the WP system was scaled using 3 different wind turbine (WT) models whose nominal powers were 10 kW, 100 kW and 1 MW. The hub heights of the WT models were 16.5 m, 19.4 m and 70.5 m, respectively. The measured wind speeds at the height of 16.13 m were extrapolated to the hub heights of the WT models. The applied RR limit values were 1, 2, 5, 10 and 20 %/min with respect to  $P_{\text{NOM}}$ .

### 3 Results and Conclusions

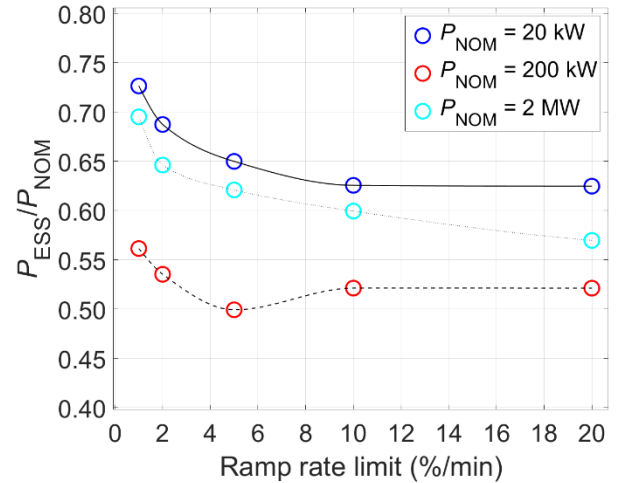
The main results of this study are the relative energy capacity  $\frac{C_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  (Fig. 2) and the relative power  $\frac{P_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  (Fig. 3) required for the ESS to smooth the power fed to the grid to comply with the applied RR limit all the time. The highest value for the  $C_{\text{ESS}}$  is mainly determined by the highest value of the  $P_{\text{grid}}$  as the ESS needs to have enough energy for a possible shut down at the  $P_{\text{grid}}$ .



**Figure 2:** Relation between the ramp rate limit and the required energy capacity of the ESS with different power plant sizes.

In Fig. 2, it can be seen clearly that as the value of the RR limit increases, the value of the  $\frac{C_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  decreases for all the power plants. As the hub height of the 1 MW WT is roughly 50 meters higher than the hub heights of the 10 kW and 100 kW WTs, the incoming wind speed is higher, and the wind has greatly higher power density

at the hub height of the 1 MW WT. This means that there is relatively more power available to be extracted for the 1 MW WT, and thus, the  $P_{\text{grid}}$  is also relatively higher for the 2 MW power plant. Therefore the  $\frac{C_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  values are higher for the 2 MW power plant. With the relatively higher generated WP, the power fluctuations of the 2 MW power plant are relatively greater compared to the 200 kW power plant. This explains the higher  $\frac{P_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  values for the 2 MW power plant compared to the 200 kW in Fig. 3.



**Figure 3:** Relation between the RR limit and the power requirement of the ESS with different power plant sizes.

In Fig. 3, it can be seen that as the value of the RR limit increases, the value of the  $\frac{P_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  decreases for all the power plants. The highest value for the  $P_{\text{ESS}}$  is determined by the fastest power fluctuation.

As the hub height difference between the 10 kW and the 100 kW WTs is small, the difference between the relative maximum value of  $P_{\text{grid}}$  is small also. As the size of the PV power plant increases, the output power fluctuations decrease [5]. As the PV power fluctuations decrease, the requirements for the ESS decrease also. In Fig. 2, the  $\frac{C_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  values of the 200 kW power plant are lower than the values of the 20 kW power plant because the power smoothing effect of the larger PV power plant has a greater impact on the  $\frac{C_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  values than the increased WP production of the slightly higher WT. This effect also explains why the  $\frac{P_{\text{ESS}}}{P_{\text{NOM}}}$  values of the 200 kW power plant are lower than the values of the 20 kW power plant in Fig. 3.

Table 1 shows the highest and median daily requirements for the ESS of the 200 kW PV-wind power system for several RR limits. From the energy shares cycled through the ESS, it can be clearly seen that the ESS operates a lot more during a highly fluctuating day than on an average day. The required size of the ESS is clearly smaller for an average day also.



**Table 1.** Requirements for the ESS of the 200 kW PV-wind power system for RR limits of 1, 10 and 20 %/min.

RR limit (%/min)	Highest daily value			Median daily value		
	1	10	20	1	10	20
Capacity (kWh)	223	38.9	21.5	107	23.4	13.3
Charging power (kW)	112	104	104	62.7	49.6	49.7
Discharging power (kW)	57.8	75.5	79.7	34.5	43.4	44.5
Energy cycled (%)	35.2	20.2	18.4	25.2	12.0	10.0

The results show that the RR limit greatly affects the size required for the ESS of the PV-wind power system. The size of the power plant has also a notable effect on the size of the ESS.

## 4 Bibliography

- [1] V. Gevorgian and S. Booth, Review of PREPA Technical Requirements for Interconnecting Wind and Solar Generation, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, 2013.
- [2] J. Schnabel and S. Valkealahti, Energy Storage Requirements for PV Power Ramp Rate Control in Northern Europe, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2016, pp. 1–11, 2016.
- [3] K. Lappalainen and S. Valkealahti, Sizing of energy storage systems for ramp rate control of photovoltaic strings, *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 1366–1375, 2022.
- [4] D. Torres Lobera, A. Mäki, J. Huusari, K. Lappalainen, T. Suntio and S. Valkealahti, Operation of TUT Solar PV Power Station Research Plant under Partial Shading Caused by Snow and Buildings, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2013, article ID 837310, 2013.
- [5] J. Marcos, L. Marroyo, E. Lorenzo, D. Alvira and E. Izco, Power output fluctuations in large scale PV plants: one year observations with one second resolution and a derived analytic model, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, pp. 218–227, 2011.

Manne Tervaskanto ja Tero Hietanen

# Lämmön- ja sähköntuotannon optimoinnin ja kulutusjouston koulutusympäristö

**Abstrakti:** OAMK:n uudessa hybridilaboratoriossa voidaan tutkia eri lämmön- ja sähköntuotantomenetelmiä sekä niiden optimointia kulutustilanteissa. Automaation tehtävänä ohjata järjestelmiä hallitusti. Opetustarkoitusta varten järjestelmät voidaan mallintaa ja testata automaatiota myös virtuaalisesti.

**Asiasanat:** hybriditekniikka, virtuaalinen käyttöönotto

**Manne Tervaskanto: Tero Hietanen:** E-mail: Manne.Tervaskanto@oamk.fi

**Second Author:** Tero.Hietanen@oamk.fi

## 1 Johdanto

Oulun ammattikorkeakoulu muutti vuonna 2020 samalle Linnanmaan kampukselle Oulun yliopiston kanssa. Samassa yhteydessä tekniikan opetuksen laboratorioita yhdistettiin suuremmiksi kokonaisuuksiksi. Näistä suurimman yhtenäisen tilan muodostaa 1100 m<sup>2</sup> hybridilaboratorio, joka koostuu automaatio-, energia-, kone-, sähkö- ja talotekniikan koulutus- ja kehitysympäristöstä.

Automaatiotekniikan erillisissä laboratoriotiloissa on pilotointiympäristöt prosessi-, tuotanto- ja informaatiotekniikan koulutukseen. Sähkötekniikan laboratorioissa ympäristöt keskittyvät sähkön käyttöön, jakeluun ja tuotantoon sekä näitä yhdistävään älykkääseen sähköverkkoon. Energiatekniikan ympäristöissä korostuvat erilaiset lämmöntuotantomenetelmät sekä lämmönvarastointi ja -jakelu. Talotekniikan oppimisympäristöt muodostavat skaalautuvan LVISA-kokonaisuuden sisältäen lämmön- ja vedenkäytön, ilmastoinnin sekä kylmätekniikan prosesseja. Konetekniikan osalta laboratoriossa on teknologiaa virtualisointiin, käynnissäpitoon sekä robotiikkaan liittyen.

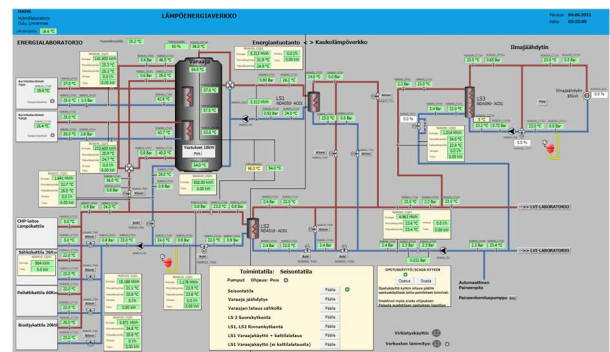
Laboratorion ympäristöt ovat pääosin liitetty yhteiseen laboratorioverkkoon. Automaatioverkko muodostaa hallinnollisen kokonaisuuden sisältäen paikallissohjauksen, tiedonsiirron, etäoperointimahdollisuudet, tietokannat sekä valvonta- ja ylätasen optimointityökalut.

## 2 Hybridilaboratorion kehitystyö

Hybridilaboratorion resurssien kehittämisessä on ollut useita hankkeita, joista pääosa on tehty yhteistyössä Oulun seudun ammattiopiston (OSAO) ja Oulun yliopiston (OY) kanssa. Hankkeiden rahoitus on tullut merkittävilta osin EU:lta sekä alueen teollisuudelta. Näiden lisäksi hankkeita ovat merkittävästi tukenet automaatiotesäätö sekä Oulun teollisuuden ammattikoulutussäätö. Tässä tekstissä tarkastellaan Energy as a Service (EaaS)-, lahjoitusraha-, MicroGrid- ja Nopsa-hankkeita.

EaaS-hankkeessa rakennettiin ja otettiin käyttöön merkittävä osa teknisistä järjestelmistä, kuten aurinkokeräimet ja aurinkosähköpaneelit, energiavaraaja, kaukolämpöverkko, akusto, varavoiyakone, sähköasema ja kesukset sekä lämmönjako kiinteistön LVI-järjestelmään.

Monipuolisen anturoinnin avulla saadaan tarkkaa aika- ja paikkakohtaista tietoa mm. laboratorion energiankulutuksesta. Kuvassa 1 esitettynä laboratorion lämmöntuotanto ja kulutus -operointinäkyvä Fidelixin -automaatiojärjestelmässä. Sähköverkon monitorointiin on hankittu Schneiderin PME-järjestelmä.



Kuva 1. Lämpöverkon käyttöliittymä Fidelixin automaatiojärjestelmässä.

Suora yritystukea hyödynnettiin lahjoitusraha-hankkeessa, jossa keskityttiin pääosin automaatio- ja informaatiotekniikan hankintoihin. Lämpöverkon tiedonkeräys ja hallinta liitettiin Fidelixin Webvision-

järjestelmään. Sähköverkon automaatiojärjestelmäksi valittiin ABB:n MicroSCADA X. Koko laboratorion toiminnan visualisointi ja monitorointi toteutettiin Valmetin Info ja HTML-pohjaisella UI-käyttöliittymällä. Energiankulutusta voi visualisoida myös SQL-kannan päälle rakennetulla Grafana -ohjelmistolla.

Sähkötekniikan ympäristöjen kehitystyötä jatkettiin meneillään olevassa MicroGrid-hankkeessa. Hankkeen lähtökohdaksi oli luoda ympäristö, jossa teollisuuden ja infrastruktuurin saarekverkoja ja kulutusjoustoja sähkömarkkinoilla voidaan pilotoida. Hankkeessa automaation kannalta keskeisin investointi on Siemensin Mikroverkkojen hallintaohjelmisto SICAM, joka otetaan käyttöön vuoden 2022 lopussa. Optimoivana ja ennustavana "Microgrid" säätimenä käytetään Siemensin tarjoamaa SICAM ympäristöä. Ohjelmiston avulla voidaan optimoida sähköverkon kustannuksia, energian tuotantoa ja käyttöä.

### 3 Automaatio-opetuksen kehitys

Hybridilaboratorion kehityshankkeiden tuloksia hyödynnetään monella tavalla automaation opetuksessa sisällöissä. Fyysisten järjestelmien virtuaaliset mallit mahdollistavat teknologian opetuksen ja testauksen laajemmalle opiskelijaryhmälle samanaikaisesti.

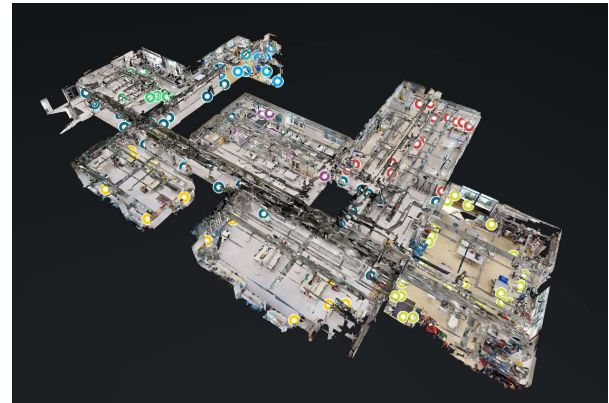
Ero todellisen fyysisen käyttöönoton ja virtuaalisen käyttöönoton välillä on se, että todellisessa käyttöönottoprosessissa automaatio-sovellusta testataan todellisella järjestelmällä tai yksittäisellä koneella, fyysisellä logiikalla ja muilla tarvittavilla laitteilla, joita ovat mm. anturit ja toimilaitteet. Virtuaalinen käyttöönotto käyttää puolestaan järjestelmän komponenttien virtuaalisia kopioita. Tämä voidaan toteuttaa useilla eri konfigurointitavoilla.

Koneen tai prosessin dynaaminen virtuaalinen käyttöönotto yhdistää kolme osaa: digitaalisen mallin (Digital twin), liikettä ohjaavan ja anturin vasteeseen reagoivan ohjainkoodin sekä kehitysympäristön, joka mahdollistaa näiden kahden ajamisen yhdessä. Jotta virtuaalimallit olisivat käytettäviä teollisuusprojekteissa, tulee mallien olla riittävän tarkkoja eikä mallien käyttö saa vaatia erityisen laajaa erityisosaamista.

Eräänä esimerkkinä virtuaaliympäristössä tapahtuvasta testauksesta voidaan mainita OAMK hybridilaboratoriosta ja konepajasta tehty Matterportin ohjelmistolla tehty virtuaalimalli (kuva 2). Mallissa käyttäjän on mahdollista navigoida sisätiloissa virtuaalisesti sekä tarkastella mallia "ulkoapäin" nukkekotimaisen mallin avulla. Mallin teko onnistuu kohtalaisen helposti 3D-kameran avulla. Mallista saa

tuotua ulos pistepilvimallin, johon voi liittää koneista ja laitteistoista valmiita CAD-pohjaisia kuvia.

Delfoi Robotics Oy:n virtuaalinen hitsausrobotti liikeohjauksineen on yhdistetty Visual Components Oy:n tarjoamaan virtuaaliympäristöön. Robotin fyysinen vastine sijaitsee konepajassa vastaten pistepilvimallia. Yhdistämällä Visual Componentsin malli Matterportin malliin saadaan aikaan toimiva virtuaalinen opetusympäristö, jossa robottia voidaan ohjata mm. VR-lasien avulla virtuaalisesti vastaten oikeaa fyysistä ympäristöä.



Kuva 2. Hybridilaboratorion 3D-virtuaalimalli.

Ohjelmoitavien logiikoiden eli PLC:n virtuaalinen käyttöönotto on myös mahdollista Visual Componentsin avulla. Esimerkiksi Siemens TIA Portalin tai Beckhoffin logiikat voidaan yhdistää virtuaaliseen prosessiin ja testata ohjelmakonfiguraatiota ennen sen fyysistä käyttöönottoa oikeassa prosessissa. Tämä on myös Nopsa projektin eräs osa-alue. Opetukseen tämä tuo myös mielenkiintoisen lisän, koska oikean prosessin testaaminen yhtäaikaan laajalla opiskelijaryhmällä on hankalaa.

Lämpö- ja sähköverkosta on toteutettu digitaaliset kaksoset Matlab/Simulink -ympäristössä. Dynaamisia prosessimalleja sisältävien digitaalisten kaksosten luominen on tehty yhteistyössä Oulun yliopiston kanssa. Ympäristöt tarjoavat myös erinomaisen lisän prosessien virtuaaliseen testaukseen ja fysikaalisten ilmiöiden opetukseen.

### 4 Yhteenveto

Oulun amk:n hybridilaboratoriossa on toteutettu uudenlainen opetus- ja kehitysympäristö lämmön- ja sähköntuotantoon sekä kulutukseen ja varastointiin. Automaatiotekniikan koulutuksen ja tutkimuksen kannalta laboratoriokokonaisuus tarjoaa erinomaiset lähtökohdat eri tuotantotekniikoiden yhdistämiseen älykkäillä, optimoivilla ja virtualisoiduilla järjestelmillä.

Risto Tiusanen\*, Eetu Heikkilä, Tero Välisalo, Timo Malm

# Towards automated tram systems – risk analysis case studies

Abstract:

Development towards higher grade of automation (GoA) levels has been a global trend in trains and metros, but so far not in trams due to their complex and highly dynamic operating environment. However, currently rail operators are also showing increasing interest on higher automation levels in tram systems to increase their efficiency and safety. Higher GoA levels in a tram system introduces changes in operating principles, new roles for personnel, and new types of safety risks in daily operations. New approaches and tools are needed to identify new safety and reliability risks arising from autonomous operation and to evaluate intelligent (preventive) safety solutions. In this paper, we present two studies where risk analysis methods were applied in the conceptual level to identify new autonomy related safety risks in tram operations. The research results can be applied widely in automation development in railway systems.

Keywords: tram, autonomy, safety, risk analysis

\*Corresponding Author: Risto Tiusanen: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: risto.tiusanen@vtt.fi

Eetu Heikkilä: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: eetu.heikkila@vtt.fi

Tero Välisalo: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: tero.valisalo@vtt.fi

Timo Malm: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., E-mail: timo.malm@vtt.fi

## 1 Introduction

Development towards higher grade of automation (GoA) has been a global trend in trains and metros. Trams operating in street level among other traffic are operated by human drivers, but railway operators are also showing increasing interest on higher automation levels in tram systems to increase their efficiency and safety (Connolly, 2018). There will be several intermediate stages in the roadmap towards

automated tram operations, such as automatic driving between stops, automatic start and stop, and automatic door operations at a stop. Making depot automation commercially viable could be a first stage of introducing autonomous driving, including the legal and economic conditions that must be fulfilled for the approval and operation of an autonomously driving tram (Flaherty, 2021).

Higher automation levels in a tram system introduces new types of safety risks in daily operations in street level among other traffic. It is therefore essential to identify and assess the new safety risks and uncertainties in the early concept design phase, so that they can be eliminated, mitigated, or reduced to an acceptable level in the tram system design. According to the International Association of Public Transport (UITP) (UITP, 2018) and the international standard IEC 62290-1 (2014) there are four Grades of Automation (GoA) for railway systems: GoA1 – GoA4, which are illustrated in Table 1. In the Table 1 ATP = Automatic Train Protection, ATO = Automatic Train Operation and UTO = Unattended Train Operation.

Table 1 Grades of automation in railway systems according to UITP (2018)

Grade of Automation	Type of train operation	Setting train in motion	Stopping train	Door closure	Operation in event of disruption
GoA1	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver
GoA2	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver
GoA3	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant
GoA4	UTO	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

In this paper, we present two studies where risk analysis methods were applied in the conceptual level to identify new autonomy related safety risks in tram operations. In the first study, the subject was an automatic transfer of trams at a depot area, and in the second study the subject was the use of an automated door system in an autonomous tram.

## 2 Methods

In the first study the aim was to identify hazards and foreseeable problems related to the automatic transfer of trams in the depot area and in the halls, to assess the risks and define ways to manage the automation related safety risks. The starting point of the analysis was defining the principles of moving trams in the depot area and defining the work tasks in the tram storage hall and maintenance hall as well as other operations and traffic outside the depot area. The risk analysis was carried out by a group of experts on tram operations applying the Operating Hazard Analysis (Vincoli, 2006) approach.

In the second study the aim was to identify and analyse the effects of increasing level of tram autonomy (from GoA1 to GoA4) on the use of automated tram door and its functionalities. At the beginning of the work, the stages of the tram's daily operation were defined from the departure to the line to the return to the depot, as well as the use of the tram's doors at stops and in special situations. The analysis was conducted with two different methods first by utilising Preliminary Hazard Analysis (PHA) approach (Vincoli, 2006) and secondly by using System Theoretic Process Analysis (STPA) approach (Leveson & Thomas, 2018; Heikkilä et al, 2022).

## 3 Results and conclusions

In cities trams share the same infrastructure with other traffic which makes higher autonomy much more difficult than metros and city trains that have an independent network. Many of the new autonomy related safety risks in trams arise from the complexity of sharing the same street infrastructure with cars, cyclists and pedestrians, and unexpected behaviour of the tram passengers. The results of the analyses in this study show that the main safety functions of the tram door systems utilized now in GoA1 level operation are already capable for GoA4 operation e.g., safety edges and door locking control functions. Although changes are required in the operational principles and technical implementation of the tram control systems to enable the transition from GoA1 level to GoA4. Situational awareness information from the door area needs to be improved, because they are no more observed by the tram driver. Handling of abnormal situations and emergencies needs to be carefully considered e.g., ability to remotely handle safe evacuation in case of fire or traffic accident.

In depot area the operating principles are quite the same when transferring trams or train or subway cars on the tracks. The main hazards related to automatic

driving in the halls and in the depot are collision with a person, a person falling or being crushed, collision with another tram, vehicle, work machine, hall door or an obstacle on the tracks. The results including multiple causes of hazards, as well as the safety requirements defined based on them and proposed measures to eliminate or reduce the safety risks form a good basis for more detailed risk analyses of automatic driving the trams in a depot. Increasing the level of autonomy of tram systems places new demands on the functions of the different subsystems of the tram and on the management of failures and problems in different operating situations. The new risks of unmanned driving were identified, and new information was obtained on which things to be prepared for.

## Acknowledgement

Our studies have been conducted in the SmartRail project (<https://smartrailecosystem.com/>) funded by Business Finland, participating companies and VTT.

## 4 Bibliography

Kate Connolly, K. 2018. Germany launches world's first autonomous tram in Potsdam. The Guardian, World. <https://www.theguardian.com/world/2018/sep/23/potsdam-inside-the-worlds-first-autonomous-tram>

Flaherty, N. 2021. *Fully automated depot has self-driving trams*. Technology News, August 27, 2021. <https://www.eenewseurope.com/en/fully-automated-depot-has-self-driving-trams/>

UITP (2018). World Report on Metro Automation. UITP Statistic Brief. Available: [https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation\\_final\\_web03.pdf](https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf)

IEC 62290-1:2014 Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts.

Vincoli, J. W. (2006). Basic Guide to System Safety. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Leveson, N. & Thomas, J. 2018. STPA Handbook.

Heikkilä, E., Malm, T., Välsälo, T., Tiusanen, R., Hämäläinen, M. & Järvinen, M. (2022) *Systemic safety analysis of a tram door system considering increasing level of automation*. Poster in the Transport Research Arena (TRA) Conference in Lisbon 14.-17.11. 2022.

Tero Vuolio<sup>1</sup>, Markku Ohenoja<sup>1</sup>, Petri Österberg<sup>1</sup> & Mika Ruusunen<sup>1</sup>

# Simulating Moisture Content and Flow of Sawdust in a Storage Silo with Cellular Automata

**Abstract:** In the field of modelling, it is commonplace to model only the expected value of the target variable. However, the uncertainty, or the variance related to this output variable is rarely discussed. This study provides a suggestion to estimate the expected value and uncertainty of the silo output moisture of a granular material in a storage system using a Cellular Automata model. In addition, a Fourier function –based trend analysis is carried out to estimate the storage delay. The study also discusses the implementation and computational details of the model.

**Keywords:** Granular Material, Moisture Migration, Dynamic Model, Storage Behavior

\*Corresponding Author: Tero Vuolio: <sup>1</sup>Environmental and Chemical Engineering Research Unit, Control Engineering group, University of Oulu, Finland, E-mail: [tero.vuolio@oulu.fi](mailto:tero.vuolio@oulu.fi), [forename.surname@oulu.fi](mailto:forename.surname@oulu.fi)

## 1 Background & Aims

Biomass is expected to have a significant role in sustainable fuel production and replacing fossil energy sources. Sawdust is an important raw material for biorefineries and energy production (Chaula et al. 2014; Casau et al. 2022). The moisture content of the sawdust has a relatively large effect on the energy efficiency (Chaula et al. 2014) and moreover on the environmental impact of the process. An accurate estimate of the moisture content and its reliability is of great importance to achieve a good controllability of these processes and always ensure energy-efficient production. The moisture content can be measured directly from the sawdust (Stasiak et al. 2014). However, for example in large storage systems these physical measurements often demand extensive design and maintenance efforts, and thus might appear impractical and unsuitable for on-line use. One approach to overcome the problem with localized measurements is to use wireless sensors providing the moisture content distribution information of a granular material in continuous manner (Jian et al. 2009). A soft sensor-based monitoring of the moisture content seems attractive, as it would allow to evaluate the transient inner state of the storage system at least qualitatively and to quantitatively estimate the storage system output. For this aim, a Cellular Automata (CA) based simulation model that could be applied to estimate simultaneously propagation of moisture content and granular material movement inside the silo with respect to time is proposed.

## 2 Material & Methods

CA is a modelling technique, in which usually complex real-world systems of which models demand extensive mathematical descriptions are simplified to a defined ruleset. In the model, each of the cells presents a modelling entity that has a set of properties and neighbor cells. A characteristic property of a CA model is its rule based stochastic interaction of a cell with its neighbors, resulting as a semi-random behavior. Typically, the granular material flow is described as individual particles, which obviously in the case of tons of sawdust requires a description extensively dense computational grid. In practical applications, such grid is usually not applicable in real-time simulations. In this study, the storage silo is simulated as a  $h \times w$  sized grid, in which each of the cell presents a sawdust mass unit, of which properties are mass ( $m$ ) and moisture content ( $\gamma$ ). Overall, each of the sawdust cells is treated as a unit volume or as a mass unit. In this way, the computational grid size can be significantly reduced that results as a reduced time complexity. However, because of this, the accuracy of the computations is compromised. In the end, the application area of the model sets the limits for the grid parameters.

### 2.1. Input data generation

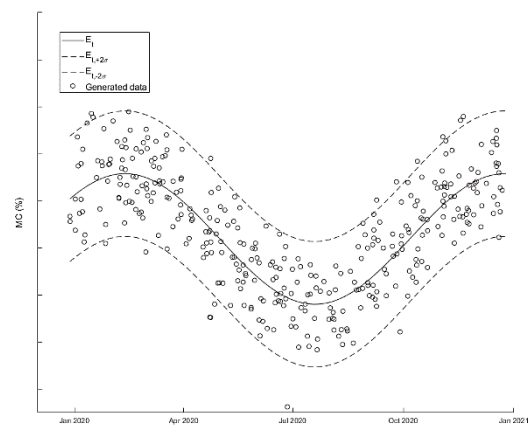


Figure 1. Generated batch data for moisture content.

The simulation study is carried out as a Monte Carlo approach. In the simulation, the monthly variation of the moisture of the delivered sawdust batches is estimated to follow a time-variant normal distribution, in which the expected value of the distribution is estimated using a Fourier function of a form

$$E_t(\theta, a, t) = \theta_0 + \theta_1 \cos(a\pi t) + \theta_2 \sin(a\pi t). \quad (1)$$

The standard deviation of the distribution is kept constant in this simulation, as it is assumed that of the variance in the input moisture is mainly composed of the analysis and sampling error. An exemplified generated data set for a one year–long simulation presenting the sawdust batches with mass  $m$  and moisture  $y$  is provided in Figure 1.

## 2.2. Condensed Rule Sets for Storage Behavior

As a general CA system, the silo behavior is defined based on four rule sets, which include the following categories

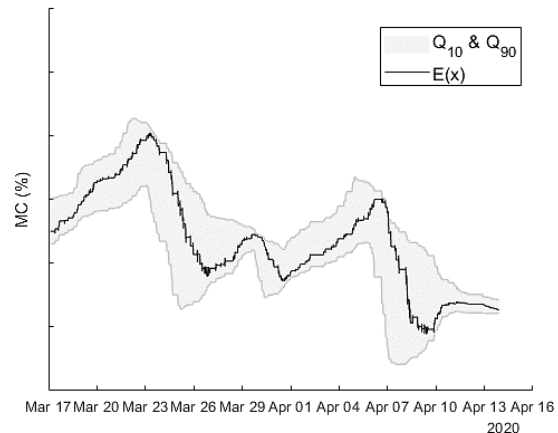
1. Overall mass–balance of the silo
2. Behavior of the screw feeder at the bottom of the silo
3. Particle or mass movement between cells
4. Moisture migration between the cells

The more specific set of rules define the overall behavior. The overall mass balance of the silo is here considered as a simple mass in mass out system, in which the  $m_{in}$  is defined as the arriving sawdust batches from the delivery site and the  $m_{out}$  reflects the behavior of the screw feeder located on the bottom of the silo. The defined input mass flow,  $m_{in}$  is a pulse–like flow simulating the filling of the silo, whereas  $m_{out}$  is the output flow. To define the output flow, the impact area and use of the screw feeder needs to be considered. In this study, the geometry is simplified as a rectangle with a size of  $h_s \times l_s$ . In other words, the screw feeder impact area is of size  $A$  and constitutes of  $N_{out}$  individual cells. The output moisture is a randomly weighted average of the moisture in each cell corresponding to the screw feeder cells. The uncertainty of the output moisture can be treated in different ways, but in this work the moisture range is given as the 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentiles of the moisture contents in the lower section of the silo.

The particles in the silo are allowed to transfer from one cell to another because of the gravity (vertical component) and because of the particle collision interactions (horizontal component). Both phenomena are defined to occur with a certain probability and in a pre–defined neighborhood. In the work of previous authors, each discrete particle has a flow velocity that is affected by gravity and interactions of neighboring particles. As pointed out in previous sections, this demands a dense computational grid, so in this work the potential of the particles to transfer from one cell to another is approximated by using an average *mass loss* in the cell. This means that the mass is allowed to transfer from one cell to another, if there is a porous space available. The moisture is allowed to migrate from one cell to another because of mass–transfer potential, namely concentration difference. The mass–transfer approach has been previously verified to correspond well to CFD simulations. (Chopard & Droz 1991) The selection of the interacting cell is carried out using roulette-wheel selection in all cases.

## 3 Results & Discussion

First, the modeling approach was successfully validated for the wheat storage data presented in (Jian et al. 2009). Then, the moisture content of the simulated data was estimated. The output moisture with corresponding uncertainty limits is presented in Figure 2. The uncertainty range is taken here as the 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> quantiles in a silo subsample. Furthermore, using a model–based estimation approach, the storage delay, ergo the delay between the loading and the unloading of the material, can be by formulating a maximum likelihood estimation problem with respect to storage delay ( $\tau$ ).



**Figure 2.** The simulated silo output moisture in a month–long simulation with corresponding confidence interval given here as  $Q_{10}$  and  $Q_{90}$  of the moisture distribution of a subsample in a pre–defined silo section.

## 4 References

- Casau, M., Dias, M. F., Matias, J. C., & Nunes, L. J. (2022). Residual Biomass: A Comprehensive Review on the Importance, Uses and Potential in a Circular Bioeconomy Approach. *Resources*, 11(4), 35.
- Chaula, Z., Said, M., John, G., Manyele, S., & Mhilu, C. (2014). Modelling the suitability of pine sawdust for energy production via biomass steam explosion. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014.
- Chopard, B., & Droz, M. (1991). Cellular automata model for the diffusion equation. *Journal of Statistical Physics*, 64(3), 859-892.
- Jian, F., Jayas, D. S., & White, N. D. (2009). Temperature fluctuations and moisture migration in wheat stored for 15 months in a metal silo in Canada. *Journal of Stored Products Research*, 45(2), 82-90.
- Stasiak, M., Molenda, M., Bańda, M., & Gondek, E. (2015). Mechanical properties of sawdust and woodchips. *Fuel*, 159, 900-908.

Antti Välimäki\*, Outi Rask, Jari Seppälä, Tero Hietanen, Timo Heikkinen ja Ari Kuisma

# Maantieteellisesti hajautettuja DCS-ympäristöjä

**Tiivistelmä:** Valmet DNA-automaatioympäristöä käytetään hajautetusti uusien opiskelijoiden koulutukseen. Tässä paperissa kuvataan ympäristöjen kehittymistä erityisesti TAMKin kannalta, mutta tuodaan esiin myös mahdollisuuksia lisätä koulutusyhteistyötä eri oppilaitosten kanssa.

**Avainsanat:** Valmet DNA, OPC UA, automaatio, PLC, DCS

**\*Antti Välimäki:** Tampereen ammattikorkeakoulu, antti.valimaki@tuni.fi

**Outi Rask:** Tampereen ammattikorkeakoulu, outi.rask@tuni.fi

**Jari Seppälä:** Tampereen yliopisto, jari.seppala@tuni.fi

**Tero Hietanen:** Oulun ammattikorkeakoulu [tero.hietanen@oamk.fi](mailto:tero.hietanen@oamk.fi)

**Timo Heikkinen:** Oulun ammattikorkeakoulu [timo.heikkinen@oamk.fi](mailto:timo.heikkinen@oamk.fi)

**Ari Kuisma:** Jyväskylän ammattikorkeakoulu, ari.kuisma@jamk.fi

## 1 Johdanto

Tampereen ammattikorkeakoulu (TAMK) on kehittänyt koulutusyhteistyötä Valmet Automationin (Valmet) ja Tampereen yliopiston (TAU) kanssa viime vuosina. Samaan aikaan TAMKin Valmet DNA-ympäristöä on päivitetty uudempaan versioon ja tehostettu ympäristön käyttömahdollisuuksia. Tulevaisuudessa yhteistyötä on tarkoitus laajentaa esimerkiksi Jyväskylän tai Oulun ammattikorkeakoulujen kanssa tutkimalla esimerkiksi Valmet DNA-järjestelmien sisältämiä integrointitekniikoita tai tekoälyn hyödyntämistä prosessidatan käsittelyssä ja visualisoinnissa.

## 2 TAMKin Valmet DNA-ympäristöt

TAMKin metsoDNA-järjestelmiä päivitettiin ValmetDNA-ympäristöiksi 2021 siten, että luotiin erillinen ympäristö sekä laboratorio-opetukseen että luokkahuoneopetukseen. Laboratorioympäristössä

ohjataan pientä vesiprosessia, jossa opiskelija pääsee tutustumaan fyysisiin kenttälaitteisiin ja prosesseihin. Tällaisella fyysisellä ympäristöllä opiskelija näkee ja kuulee miten DNA-järjestelmän käyttö vaikuttaa vesiprosessin toimintaan. Luokkahuoneopetusympäristö onnistui muuten hyvin, mutta IT:llä oli haasteita mahdollistaa opiskelijoiden pääsy tähän ympäristöön kotoa. Onneksi tähän asiaan saatiin korjaus syksyn 2022 aikana.

Koska TAMKin ValmetDNA-ympäristöihin opiskelijat pääsivät kirjautumaan sisään vain TAMKin tiloissa, niin oli hyvin tärkeää, että pystyimme jatkamaan yhteistyötä Valmetin kanssa. Tässä yhteistyössä pystyimme korona-aikana toteuttamaan sekä opiskelijoiden etäkäyttömahdollisuuden että tekemään yrityslähtöistä yhteistyötä Valmetin kanssa. Tällainen Valmetin kanssa tehty yhteistyö on nähty erittäin tärkeäksi sekä TAMKin että Valmetin ja Valmetin asiakkaiden kannalta. Tästä yhteistyöstä on julkaistu erillinen artikkeli Automaatiöväylä-lehdessä [1].

Myös OAMK:ssa ja JAMK:ssa on otettu käyttöön ValmetDNA-järjestelmien etäkäyttömahdollisuus, joista JAMKin osalta lisätietoja löytyy artikkelista [3].

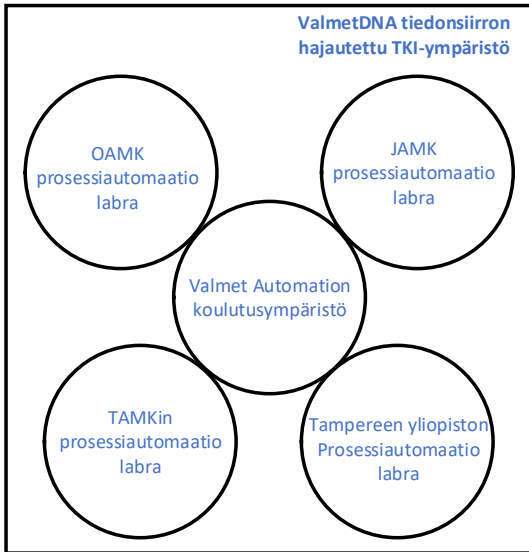
## 3 Tulevaisuuden yhteistyömahdollisuudet

Yhteistyö Valmetin kanssa jatkuu keväällä 2023, mutta yhteistyötä olisi hyvä lisätä kuten artikkelissa [2] on hahmoteltu. Myös yhteistyötä esimerkiksi Jyväskylän ja Oulun ammattikorkeakoulujen kanssa olisi hyvä käynnistää, kun tutkitaan esimerkiksi Valmet DNA:n integrointimahdollisuuksia ja tekoälyn hyödyntämismahdollisuuksia automaatiojärjestelmien osalta.

Tulevaisuudessa saamme hyvän tutkimusyhteistyökokonaisuuden rakennettua maantieteellisesti hajautettujen automaatiojärjestelmien datankeruuseen ja etäkäyttöihin liittyen edellä mainittujen kumppaneiden kanssa (kuva 1). Näiden lisäksi halutaan kehittää yhteistyötä myös eri PLC-toimittajien kanssa, koska OPC UA antaa hyvät



mahdollisuudet integroida erilaisia ympäristöjä toisiinsa. Tällaisessa ympäristössä, jossa on esimerkiksi OPC UA:n avulla integroitu useampia erilaisia järjestelmiä kommunikoimaan keskenään eri puolilla Suomea sijaitseviin järjestelmiin saadaan tutkittua monenlaisia asioita liittyen mm. tiedonsiirtoon, datan analysointiin (esimerkiksi tekoälyn avulla) ja tietoturvaan liittyen.



Kuva 1. Maantieteellisesti hajautettujen DCS-ympäristöjen TKI-ympäristö.

## 4 OPC UA:n tutkimuskohteena

TAMK:n Valmet DNA-järjestelmään on hankittu OPC UA Server, joka mahdollistaa Valmet DNA datan lukemisen esim. UaExpert-työkalulla, joka on yksi esimerkki OPC UA Client-ratkaisuista. Tavoitteena on tutkia myös muita OPC UA Client:jä sekä integrointia Siemens PLC-ohjelmistoon.

Myös Oulun AMK:lla on tavoitteena tutkia miten OPC UA:ta voitaisiin integroida ja soveltaa erilaisiin PLC-ratkaisuihin, joista varsinkin PK-yritykset ovat kiinnostuneita.

OPC UA on mielenkiintoinen tekniikka, koska siinä on ratkaistu esim. tietoturvaan ja internetin yli liikkuvan datan ongelmia.

OPC UA olisi myös tärkeä tutkimuskohde EU-tasolla, koska se mahdollistaa hyvinkin erilaisten ympäristöjen integroinnin toistensa kanssa, jolloin asiakkaat voivat monipuolisemmin integroida olemassa olevia järjestelmiä toisiinsa.

## 5 Kenttäväylät tutkimuskohteena

PROFINET-kenttäväylän käyttö on laajentunut teollisuudessa esim. taajuusmuuttajien ohjauksessa ja esim. JAMK:ssa on otettu käyttöön PROFINETiin liittyviä laboratorio-harjoituksia, jolloin opiskelijoille tulee kyseinen kenttäväylä-ratkaisu tutummaksi. Myös TAMK:ssa on PROFINETia on koulutettu jo useampia vuosia, mutta tavoitteena on uusia laboratorio-harjoituksia päivittämällä Valmet DNA ACN, joka tukee PROFINET-liityntää. Tämä mahdollistaa myös PROFINETin tutkimisen esim. taajuusmuuttajien kanssa ja Siemensin PLC-ohjelmistojen kanssa.

Teollisuudessa käytetään kuitenkin vielä paljon perinteistä IO:ta esim. pumppujen ja venttiilien ohjaamiseen, jolloin näidenkin opettamien eri oppilaitosten demo-ympäristöissä on tärkeä asia.

Kaiken kaikkiaan eri kenttäväylä-tekniikoita on paljon, mutta esim. Endress Hauserin (EH) julkaisema Ethernet-APL on mielenkiintoinen tutkimuskohde, koska EH:n mukaan sillä voidaan tulevaisuudessa ratkaista nykyisten kenttäväylien ongelmia entistä sujuvammin prosessiteollisuudessa. Ethernet-APL sisältää myös tuen OPC UA:lle, joka tekee siitä vieläkin kiinnostavamman tekniikan.

## 6 Tietoturva tutkimuskohteena

Tietoturvan merkitys on lisääntynyt huomattavasti verrattuna tilanteeseen esim. kymmenen vuotta sitten, johtuen erilaisista ja laajoista tietoturva-hyökkäyksistä.

Näihin liittyen eri oppilaitoksissa on kouluttaa tietoturvaa entistä laajemmin automaatioympäristöissä sisältäen aiheet esim. automaatioteknisten ympäristöjen tietoverkkojen erityispiirteet, verkon ja laitteiden tietoturva, tietoturva-tietämyksen lisääminen yritysten työntekijöiden ja toimittajien henkilöstölle.

Myös tekoälyä on tarkoitus tutkia läpikäymään tietoturvaan liittyvää dataa, koska reagointiaika erilaisiin hyökkäyksiin on lyhentynyt verrattuna aiempiin vuosiin.

## 7 Informaatiojärjestelmät tutkimuskohteena

Valmet DNA:ssa on ollut jo parikymmentä vuotta Info-järjestelmä, joka on nykyään nimeltään TEA. Esim. JAMK:ssa TEA-järjestelmään kerätään heidän prosessien kaikkia datat, jolloin opiskelijat voivat harjoitella historiadatan perusteella saamaan selville,

mitä prosessissa on tapahtunut tiettyinä ajankohtana. Tämän alueen tutkimusta on tarkoitus laajentaa siten, että sovelletaan esim. koneoppimista ja muita data-analytiikan keinoja, kun tutkitaan prosessista saatavaa dataa.

## 8 YHTEISTYÖMAHDOLLISUUDET ERI AUTOMAATIOTOIMITTAJIEN KANSSA

Eri oppilaitoksilla on tavoitteena kehittää yhteistyötä eri yritysten kanssa, jolloin opiskelijat olisivat entistä valmiimpia siirtymään työelämään eri yrityksiin. Tähän tarpeeseen liittyen on esim. entistä laajemmin mietitty lopputöiden tekoa yrityksissä osana laajempia asiakasprojekteja. Myös uusien tekniikoiden testaamisessa ja pilotoinnissa oppilaitokset tarjoavaisivat ympäristöt, joissa yritykset voisivat vapaammin testata asioita verrattuna oikeisiin ja kriittisiin asiakasympäristöihin. Näihin yhteistyömahdollisuuksiin liittyen oppilaitosten on tarkoitus syventää keskusteluja eri yritysten kanssa.

## 9 Lähteet

[1] "Projektityö tutuksi virtuaalisella opinpolulla" Automaatiöväylä 03/2021

[2] Rask, Outi, Jari Seppälä, and Mikko Salmenperä. "Projektioppiminen automaatiosuunnittelussa." Automaatiopäivät24: Automaatio, kestävä kehitys ja tulevaisuus 13-14 April 2021.

[3] Kuisma, Ari. "Automaatiojärjestelmän modernisointi ja etättestaus." Automaatiopäivät24.

Monika Wolfmayr\*

# Parameter optimization for low-rank matrix recovery in hyperspectral imaging

**Abstract:** An approach to parameter optimization for the low-rank matrix recovery method (LRMR) in hyperspectral imaging is discussed. We formulate an optimization problem with respect to the parameters of LRMR. The performance for different parameter settings is compared in terms of computational times and memory. The results are evaluated by computing the peak signal-to-noise ratio as quantitative measure. The optimization method is tested on standard and openly available hyperspectral data sets including Indian Pines.

**Keywords:** noise reduction, optimization, low-rank modeling, hyperspectral imaging, signal-to-noise ratio improvement

---

\*Corresponding Author: **Monika Wolfmayr:** Jamk University of Applied Sciences, Finland, and University of Jyväskylä, Finland, E-mail: monika.wolfmayr@jamk.fi

## 1 Background

In hyperspectral imaging (HSI), spectral signatures of objects are recorded for each image pixel. HSI precision and reliability are essential for many applications including digitalization and robotization. This work is part of *coADDVA - ADDing Value by Computing in Manufacturing* project funded by the Regional Council of Central Finland/Council of Tampere Region and European Regional Development Fund. It supports the project's goals to improve the efficiency of robotics by developing optimal control methods leading to flexible imaging and automation in image processing.

HSI combines spatial and spectral information in a hyperspectral data cube. Its application in Earth and space exploration is important. Naturally, the amount of generated data is huge, and an efficient and reliable approach to noise reduction takes advantage of the internal dependencies between the wavebands. The LRMR is a low-rank modeling approach [1] and has been discussed among other advanced image processing methods in more detail in [3] and [4]. We use here the LRMR together with the GoDec algorithm as presented in [2] in the inner iteration steps of the approach. Parameter optimization in advanced image processing can provide

important indirect information for control and real-time decision-making.

## 2 Methods

The first LRMR model was proposed in [5]. Given the real matrix  $D$  of size  $m \times n$  containing the observed data and assuming corruption by the sparse error matrix  $S$  and a random Gaussian noise modelled by the matrix  $N$ , the goal is to recover the low-rank matrix  $L$  with  $D = L + S + N$ , all real number matrices of the same size. The minimization problem

$$\min_{L,S} \|D - L - S\|_F^2 \text{ s.t. } \text{rank}(L) \leq r, \text{card}(S) \leq p$$

is solved with  $r$  denoting the upper bound for the rank of  $L$  and  $p$  for the cardinality of  $S$  which is related to the estimation of noise corruption. Redundancies between the wavebands yield the low-rank property. LRMR modelling is then applied together with the GoDec algorithm [2] in order to solve the subproblems.

The main focus of this work is the detailed investigation of the LRMR method with respect to its main variable parameters including rank  $r$  and blocksize of the subcubes  $b$ , estimation parameter for the percentage of noise corruption  $p$  and stepsize  $s$  in the iteration. We apply nonlinear optimization in order to determine the best parameter values for the method with respect to the peak signal-to-noise ratio (PSNR). The PSNR is computed by

$$PSNR = 10 * \log_{10} \frac{\max(c)^2 * M * N * W}{\|c - \tilde{c}\|^2},$$

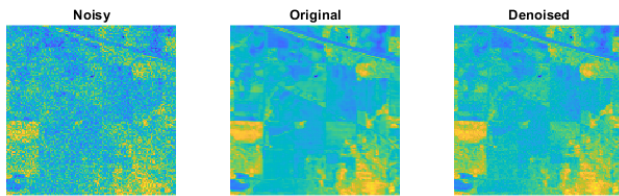
where  $c$  and  $\tilde{c}$  denote the original and denoised data cube, respectively. The sizes of the spatial and spectral dimensions are denoted by  $M, N$  and  $W$ .

In addition, LRMR is analyzed in terms of computational efficiency and memory with regard to different parameter choices. The performance of LRMR and differences in the implementation between Matlab and Python are investigated.

### 3 Results

It is shown that different parameter values and their combination have an effect on the PSNR and computational times of the LRMR method. The optimization algorithms depend on the starting value and reach local minima. The resulting parameter choices are studied in terms of computational times in addition to their performance with respect to PSNR.

Applying nonlinear optimization with respect to the noise estimation parameter  $p$ , a real number, has resulted in an improvement in PSNR. The integer parameters have been analyzed on series of test sets. The optimized values are chosen according to their best PSNR performance. We have tested the method on openly available data sets. Figure 1 shows the performance of the method for a noise-corrupted waveband of the Indian Pines data set [6]. In Figure 2, the negative PSNR



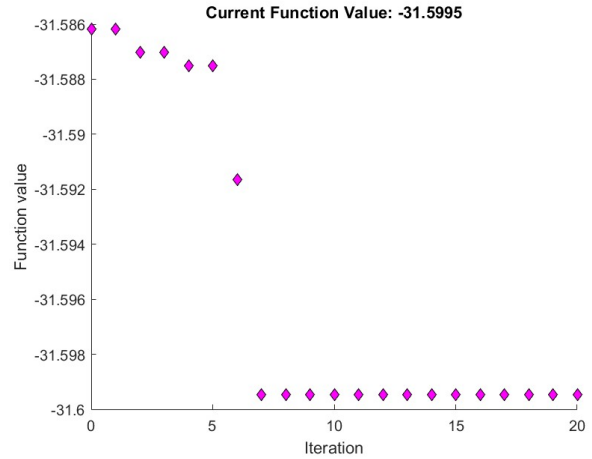
**Fig. 1.** The noise removal performance of LRMR on a noise-corrupted waveband for the Indian Pines data set. The image is restored efficiently.

values of the iteration steps of the nonlinear minimization method *fminsearch* in Matlab are presented computed with respect to  $p$ . The results in Figure 2 show a convergence towards a local minimum. The value yields an improvement in PSNR. Figure 3 shows the PSNR for different rank  $r$  and stepsize  $s$  values, whereas other parameter values  $b$  and  $p$  are set constant.

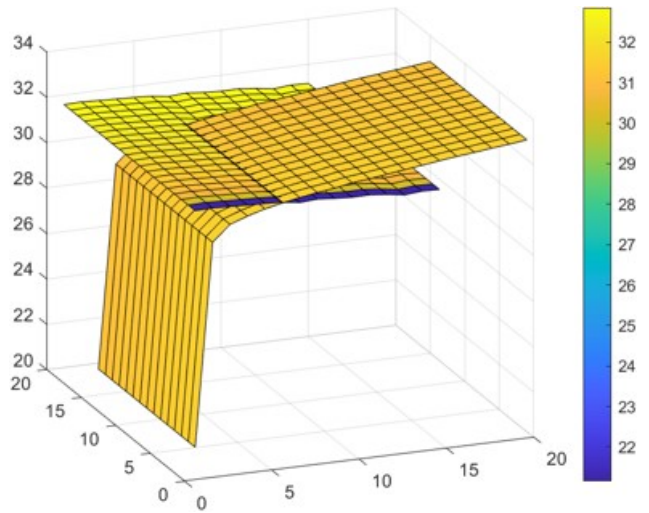
This research was funded by the Regional Council of Central Finland/Council of Tampere Region and European Regional Development Fund as part of the *coAD-DVA - ADDing VAlue by Computing in Manufacturing* projects of Jamk University of Applied Sciences.

### References

[1] Zhang, H., He, W., Zhang, L., Shen, H., and Yuan, Q., "Hyperspectral image restoration using low-rank matrix recovery," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 52(8), 4729-4743 (2013).



**Fig. 2.** The function values of the iteration steps of the nonlinear optimization method with respect to  $p$ .



**Fig. 3.** PSNR surface plots for different  $r$  and  $s$  intersect.

[2] Zhou, T., and Tao, D., "Godec: Randomized low-rank & sparse matrix decomposition in noisy case," *Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning, ICML (2011)*.

[3] Ghamisi, P., Yokoya, N., Li, J., Liao, W., Liu, S., Plaza, J., Rasti, B., and Plaza, A., "Advances in hyperspectral image and signal processing: A comprehensive overview of the state of the art," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 5(4), 37-78 (2017).

[4] Rasti, B., Scheunders, P., Ghamisi, P., Licciardi, G., and Chanussot, J., "Noise reduction in hyperspectral imagery: Overview and application," *Remote Sensing* 10(3), 482 (2018).

[5] Wright, J., Ganesh, A., Rao, S., Peng, Y., and Ma, Y., "Robust principal component analysis: Exact recovery of corrupted low-rank matrices via convex optimization," in *Proc. NIPS*, 2009, pp. 2080-2088.

[6] Indian Pines data set, Purdue University Research Repository (doi: 10.4231/R7RX991C).

Mikhail Zolotukhin\*, Riku Immonen, Pyy Kotilainen, and Timo Hämäläinen

# Tiny machine learning for fault detection

**Abstract:** Never before has machine learning been characterized by such innovative waves of technology. At the same time, the rise of low-budget single-board microcontrollers allows service providers to meet privacy, low latency and energy efficiency requirements by deploying artificial intelligence on the edge. In our research, we implement, train and deploy various supervised and unsupervised machine learning models on tiny boards for several real-life data analysis applications.

**Keywords:** TinyML, deep learning, anomaly detection

---

\*Corresponding Author: **Mikhail Zolotukhin:** University of Jyväskylä, E-mail: mizolotu@jyu.fi

**Riku Immonen:** University of Jyväskylä, E-mail: rijuimmo@jyu.fi

**Pyy Kotilainen:** University of Jyväskylä, E-mail: pyjopeko@jyu.fi

**Timo Hämäläinen:** University of Jyväskylä, E-mail: timoh@jyu.fi

## 1 Introduction

Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) are revolutionising almost every industry with a seemingly endless list of applications ranging from object recognition in autonomous vehicles to helping doctors detect and diagnose diseases. At the same time, the recent progress in development of low-budget sensors and single-board computers has made it possible to deploy tiny machine learning models not only for inference but also for training [1]. Furthermore, according to IoT Analytics, by the end of 2022, the market for the internet-of-things (IoT) is expected to grow by 18% up to 14.4 billion active connections. Thus, increasing computing and connectivity capabilities of smart devices allow for their usage on the edge in order to decrease latency and increase availability of ML-driven services and applications.

In our research, we focus on implementing state-of-the-art machine learning models on tiny IoT devices which can be then deployed on the edge. In particular, in this study, we concentrate on two following use cases: wind speed estimation and anomalous vibration detection. The rest of the document is organised as follows. The use case scenarios studied are overviewed in Section 2. Section 3 highlights the algorithms and devices used. Numerical evaluation results are presented in Section 4. Section 5 concludes the study and outlines future work.

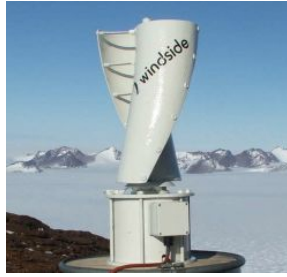
## 2 Aims

As mentioned in the introduction, we focus on tiny ML for wind speed estimation and anomalous vibration detection. In the former case, the estimations are carried out using electric current time-series observed during the recent time interval on a wind turbine similar to the one shown in Fig. 1a. The rationale behind this task is that wind speed estimations obtained can be monitored by the turbine operators in real time for more efficient power extraction and detection of anomalous patterns which may be indicative of a fault.

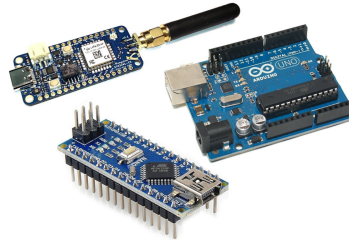
In the second use case, we study the problem of outlier detection in the data recorded by an accelerometer. The task is to train a model of normal behavior which can then be used to classify anomalous vibrations that significantly deviate from the norms described by the model. In distinction from the previous case, the training is expected to be carried out on the device itself which can be useful in many real-life scenarios when no training data is available in advance. The test environments for this use case are shown in Fig. 1d and 1e.

## 3 Methods and materials

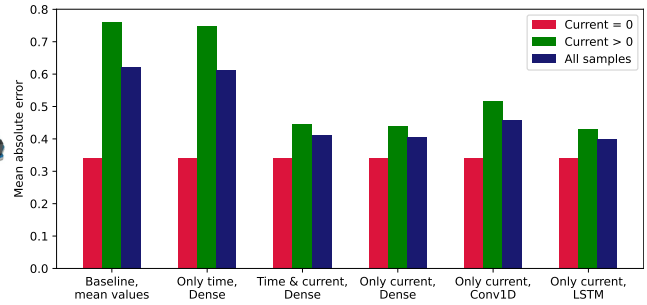
Speaking of the algorithms employed in our research, we mostly rely on supervised and unsupervised deep learning for wind speed estimation and anomalous vibration detection respectively. Deep learning models use the first layers to find compact low-dimensional representations of high-dimensional data whereas later layers are responsible for achievement of the task given. The most widely used deep learning architectures for time series data include convolutional and recurrent neural networks. Other methods used that are worth mentioning include one-class classification with deep support vector description (DeepSVDD) [2] and stream clustering techniques [3]. The aforementioned AI/ML models are implemented to run on various tiny single-board computers (see Fig. 1b). The application prototypes are first tested using Arduino Nano and then the code is ported to LoRa E5 which under ultra-low power consumption constraints is able to achieve a transmission range of up to 10 km using LoRaWAN protocol.



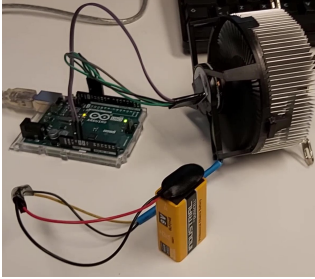
(a) Wind turbine example.



(b) Boards used in the study.



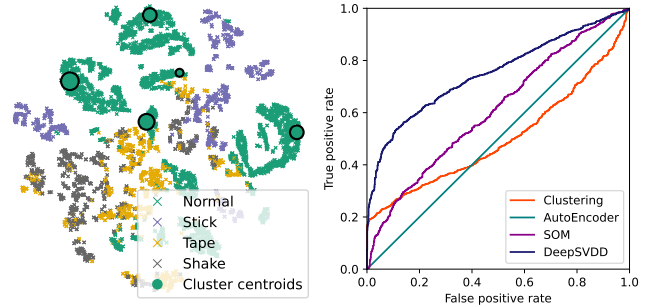
(c) Comparison of deep learning models for wind speed estimation.



(d) Fan environment.



(e) Bearing environment.



(f) Fan data clustering results.

(g) Bearing model ROCs.

**Fig. 1.** Materials used in the research and some of the results obtained. Wind turbine similar to the one used in the study is shown in Fig. (a). Fig. (b) shows the single-board computers on which ML models have been deployed: Lora E5, Arduino Nano and Arduino Uno. Comparison of several tiny deep learning models tested in the wind speed estimation use case can be seen in Fig. (c). Fan and bearing environments for the anomalous vibration detection use case are shown respectively in Fig. (d) and (e). An example of stream clustering algorithm, namely ScalableKmeans++ with 9 clusters, applied to the data generated in the fan environment can be seen in Fig. (f). Fig. (g) shows ROC curves for several deep learning models tested for anomaly detection in the bearing environment.

## 4 Results

In the wind speed estimation use case, we first train and evaluate several deep neural network models using fully-connected (Dense), convolutional (Conv1D) and recurrent long short-term memory (LSTM) layers (see Fig. 1c). Using timestamps as additional input features has not provided any accuracy gains. The model with the lowest absolute error, which is just under 0.4 m/s, can then be deployed on the edge.

In the fan environment, anomalous vibrations are generated by shaking the table on which the fan is located, attaching a piece of tape on one of the fan blades, or poking a stick into the blades. The resulting anomalies can be distinguished from the normal samples with the help of a stream clustering algorithm, e.g. CluStream and ScalableKmeans++: the samples that are far from the clusters obtained for the normal data are classified as outliers (see Fig. 1f). This approach allows us to reach 77% accuracy with no false alarms.

Unfortunately, the clustering approach fails to accurately distinguish between samples generated using normal and faulty bearings. For this reason, the fol-

lowing neural network based models are implemented and tested: autoencoder, self-organising map (SOM) and DeepSVDD. The latter outperforms analogies in terms of true and false positive rates according to the preliminary results which can be found in Fig. 1g.

## 5 Future work

We are planning to improve accuracy of the methods tested as well as develop novel algorithms which can run on microcontrollers for real-time data analysis.

## References

- [1] Ren H, Anicic D, Runkler TA. Tinyol: Tinyml with online-learning on microcontrollers. In: *IJCNN*. IEEE. 2021; pp. 1–8.
- [2] Ruff L, Vandermeulen R, Goernitz N, Deecke L, Siddiqui SA, Binder A, Müller E, Kloft M. Deep one-class classification. In: *ICML*. PMLR. 2018; pp. 4393–4402.
- [3] Silva JA, Faria ER, Barros RC, Hruschka ER, Carvalho ACd, Gama J. Data stream clustering: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2013;46(1):1–31.

## Author Index

Acharya, Sarthak	38
Alatalo, Janne	20
Arasalo, Lauri	1
Aro, Jouni	3
Aromaa, Susanna	54
Bettahar, Houari	5
Bomström, Henri	38
Bor, Alexander	7
Deventer, Jan Van	38
Etto, Jaakko	8, 11, 14
Heikki, Kurki	17
Heikkilä, Eetu	46, 65
Heikkilä, Robert	31
Heikkilä, Tapio	19, 56
Heikkinen, Timo	69
Heilimo, Eppu	20
Hietaharju, Petri	22
Hietämäki, Jukka	11
Hietanen, Tero	17, 63, 69
Huotari, Matti	33
Huttunen, Pekka	36
Hämäläinen, Timo	74
Hästbacka, David	31
Ihasalo, Heikki	33
Ikonen, Enso	24
Immonen, Riku	74
Immonen, Seppo	50
Isokangas, Ari	26
Isometsä, Heikki	8, 11
Jaatinen, Antti	28
Joutsijoki, Henry	52
Juntunen, Teijo	31
Juuso, Esko	22
Juustovaara, Jouko	14
Juutilainen, Elina	58
Kannisto, Petri	31
Karhula, Niko	33

Kauppinen, Tommi	36
Kehusmaa, Minna	19
Keijälä, Niila-Sakari	40
Kelanti, Markus	38
Ketomäki, Jaakko	33
Kivekäs, Klaus	40
Kokkonen, Tero	58
Koluluoma, Terho	19
Kontio, Teemu	58
Kotilainen, Pyry	74
Kuisma, Ari	69
Kukkasniemi, Harri	52
Kumar, Animesh	40
Lajunen, Antti	40
Lappalainen, Kari	60
Leinonen, Jukka	14
Liedes, Toni	24
Lignell, Leevi	42
Majanne, Yrjö	44
Malm, Timo	46, 65
Merikoski, Seppo	52
Mikulski, Maciej	48
Modabberian, Amin	48
Mäkelä, Merja	50
Ohenoja, Markku	52, 67
Pakkala, Daniel	46
Pietarinen, Julius	40
Pitkäniemi, Kari	58
Puura, Markku	58
Pylvänäinen, Mika	24
Pyrhönen, Veli-Pekka	1
Päivärinta, Tero	38
Pätsi, Teemu	52
Rantaharju, Taneli	36
Rantonen, Mika	20
Rask, Outi	54, 69
Riuttanen, Kalle-Eemeli	58
Roinila, Tomi	42, 60
Rosales, Antonio	56
Ruuska, Jari	22
Ruusunen, Mika	22, 26, 52, 67
Ruusunen, Outi	26



Savela, Jyrki	24
Seppälä, Jari	54, 69
Sierla, Seppo	33
Sipola, Tuomo	58
Storm, Xiaguo	48
Suomalainen, Markku	19
Suopajärvi, Jussi	14
Talvi, Micke	60
Tammela, Antti	54
Tervaskanto, Manne	63
Tiusanen, Risto	65
Torvela, Janne	24
Tran, Minh	42
Törmälä, Minna	24
Valima, Ville	17
Vasara, Joni	24
Vasudev, Aneesh	48
Vilkko, Matti	1, 31, 44
Virtanen, Arttu	44
Vuolio, Tero	52, 67
Vyatkin, Valeriy	33
Välimäki, Antti	69
Välisalo, Tero	65
Väätänen, Antti	54
Wintercorn, Oskar	38
Wolfmayr, Monika	72
Zakharov, Alexey	7
Zenger, Kai	48
Zhou, Quan	5
Zolotukhin, Mikhail	74
Österberg, Petri	52, 67

## Keyword Index

3D-mallinnus	26
agricultural robots	40
agriculture	24
air handling unit	33
anomaly detection	74
automaatio	8, 11, 14, 54, 69
automaatiojärjestelmä	8, 11
automation	40
automation education	50
autonomous mobile machines	46
autonomy	65
Batteries	42
benchmark	20
Control	52
Control Theory	56
critical systems	58
cybersecurity	58
Data efficiency	7
data quality	28
Data-driven Systems	31
DCS	69
deep learning	74
digitaalinen kaksonen	17
digital farming	40
digital twin	38, 58
digitalisaatio	26
digitalization	40
district heating	22
Dynamic Model	67
Edge Computing	31
edge computing	28
Electric Vehicles	31
electricity consumption prediction	20
elinkaari	11
energiajärjestelmä	44
energy storage	60
energy technology	50
Estimation	1
etäopiskelu	8

Fiber Fabrication	5
fleet monitoring	28
flexo actuator	19
food supply chain	58
Force control	5
Force Control	56
Functional safety	46
grade of automation	65
Granular Material	67
green transition	50
HVAC	33
hybriditeknikka	63
hyperspectral imaging	72
Identification	1, 42
information modeling	3
innovaatioalusta	54
internet of things	28
interoperability	38
JSON	3
kinematics	19
koulutus	8, 54
kultusjousto	63
learning environment	40
low-rank modeling	72
Machine Fleets	31
Machine Learning	52
machine learning	20
microgrid	14
mikroverkko	17
mining operation	46
MLBS	1
Mobile Work Machines	31
model predictive control	24
Model-based control design	48
Moisture Migration	67
Monitoring	52
MPC control	48
MQTT	3
multi-objective	22

nanogrid	14
noise reduction	72
online learning	50
OPC UA	3, 69
oppiminen	11, 36
optimization	22, 72
Overall Controller Efficiency	52
pedagogiikka	36
Performance	52
Physics driven machine learning	7
pistepilvi	26
PLC	69
power fluctuations	60
primary frequency control	33
Process modeling	7
Process Modelling	1
process technology	50
publisher	3
pv power	60
ramp rate limit	60
RCCI modelling	48
realtime measurement	42
renewable energy	60
risk analysis	65
robot	19
Robotics	56
saareke	17
safety	65
security	3
sektori-integraatio	44
Service-oriented Architecture (SOA)	31
signal-to-noise ratio improvement	72
Simulation	1
simulation	3
Storage Behavior	67
subscriber	3
tekoäly	36
tekoälykoulutus	36
testaus	14
tinyML	74
tram	65
UADP	3

UDP	3
Unmeasured phenomena estimation	7
Valmet DNA	69
Velocity control	5
vetytalous	44
virtuaalinen käyttöönotto	63
virtual reality	38
water resources	24
wind power	60