

Paperikuitujen automaattinen käsittely mikrorobotiikkajärjestelmällä

Juha Hirvonen, Mathias von Essen, Pasi Kallio

Tampereen teknillinen yliopisto, Systeemitekniikan laitos, PL 692, 33101 Tampere
Puh 050 300 8154, juha.hirvonen@tut.fi, mathias.vonessen@tut.fi, pasi.kallio@tut.fi, <http://www.tut.fi/ase>

AVAINSANAT paperikuitu, manipulaatio, mikrorobotiikka, komponenttipohjainen ohjelmointi, konenäkö

TIIVISTELMÄ

Tämä paperi käsittelee mikrorobotiikan, konenäön ja komponenttipohjaisen ohjelmoinnin käyttöä yksittäisten paperikuitujen automaattisessa käsittelyssä. Käsittelyllä tarkoitetaan tarttumista kuituihin ja kuitusidoksiin mikrotarraimilla, ja niiden liikuttelua erilaisia mekaanisia kokeita varten. Mekaanisia kokeita käytetään selvittämään mm. kuitujen taipuisuutta ja sidosten lujuutta. Mikrorobotiikkajärjestelmän etuna perinteisiin menetelmiin verrattuna on mahdollisuus automaatioon. Siten kokeita saadaan huomattavasti nopeutettua ja toistojen määrää lisättyä. Tämä paperi osoittaa, että kehitetty järjestelmä pystyy tarttumaan yksittäisiin paperikuituihin yli 80 % toistettavuudella sekä yksittäisiin kuitusidoksiin 67 % toistettavuudella. Yksittäiseen tarttumiseen vaadittava aika vaihtelee 10 sekunnista muutamaa kymmeneen sekuntiin.

1 JOHDANTO

Yksittäisten paperikuitujen ja niiden muodostamien sidosten mekaanisten ominaisuuksien mittaaminen tuottaa arvokasta tietoa paperiteollisuudelle. Mahdollisia mitattavia suureita ovat esimerkiksi kuidun taipuisuus sekä kuitusidoksen lujuus tietyssä suunnassa. Tuloksia hyödyntämällä on mahdollista tutkia, millaisella käsittelyllä paperin laatua ja kestävyyttä voidaan parantaa. Perinteisesti tämäntyyppisten suureiden mittaukseen on käytetty massaotoksen keskiarvoa ja koearkkeja /11/. Yksittäisten kuitujen ja sidosten käytön etu verrattuna näihin menetelmiin on saatujen mittaustulosten tarkkuus: perinteiset menetelmät tuottavat keskiarvoja eli suureen jakauma jää piiloon. Paperin repeäminen johtuu kuitenkin ennen kaikkea heikkojen sidosten määrästä – ei paperin muodostavien sidosten keskimääräisestä lujuudesta. Koearkilla suoritetuissa vetokokeissa ei lisäksi pystytä mittaamaan pelkästään kuitusidosten vastetta vedolle, vaan mukana on aina tietoa myös kuitusegmenttien vasteesta /6/. Myöskään koearkin sidosten suuntaa ei voida tarkasti tietää, ja näin ollen on mahdotonta tutkia sidoksen lujuutta erisuuntaisille voimille.

Kuitutason mittausten huono puoli on niiden vaatima aika, josta suurin osa kuluu kuitujen käsittelyyn ja kiinnittämiseen testilaitteistoon esimerkiksi liiman avulla /1, 5, 10/. Mittaukset vaativat suorittajaltaan kokemusta, sorminäppäryyttä ja kärsivällisyyttä. Tampereen teknillisen yliopiston mikrosysteemitekniikan tutkimusryhmä on ratkaissut tämän ongelman kehittämällä mikrorobotiikkaan perustuvan testipenkin. Testipenkki koostuu kolmen vapausasteen mikromanipulaattoreihin kiinnitetyistä mikrotarraimista, joihin on mahdollista integroida voima-anturi, xy-pöydästä ja jakopöydästä koostuvasta kolmen vapausasteen näytepöydästä sekä kahdesta kamerasta, joihin on kiinnitetty motorisoidut putkimikroskoopit. Järjestelmää on käytetty onnistuneesti muun muassa yksittäisen kuidun taipuisuuden /8/ sekä kuitusidoksen sidoksen suuntaisen /7/ ja z-suuntaisen /4/ lujuuden mittauksessa. Järjestelmän viimeaikainen kehitystyö on kohdistunut sen automatisointiin.

Automaatiossa käytetään hyödyksi konenäköä. Näytepöydälle asetetuista kuiduista ja sidoksista rakennetaan 3D-malli kameroiden eri kuvakulmasta ottaman kuvaparin avulla, 3D-mallista lasketaan sopivat tarttumapisteet tiettyjen parametrien perusteella ja tarraimet liikutetaan laskettuihin pisteisiin ja suljetaan. Näin kuituun tai kuitusidokseen voidaan tarttua automaattisesti ja ajaa tämän jälkeen haluttu mittaussekvenssi.

Tässä paperissa käsitellään lyhyesti tarvittavat konenäköpohjaiset algoritmit sekä automaation vaatima ohjelmisto. Lisäksi käymme läpi muutaman esimerkin kuitujen ja kuitusidosten tarraamisesta. Kappaleessa 2 esitellään mikrorobotiikkaan perustuva testipenkki sekä kuitunäytteet. Kappale 3 esittelee konenäköpohjaiset algoritmit, joiden avulla kuidut tunnistetaan ja niistä rakennetaan 3D-malli, josta etsitään sopivat tarttumapisteet tiettyjä ehtoja käyttämällä. Kappale 4 esittelee automaatioon tarvittavan ohjelmiston. Kappale 5 käy läpi kokeet ja tulokset. Kappale 6 on yhteenveto.

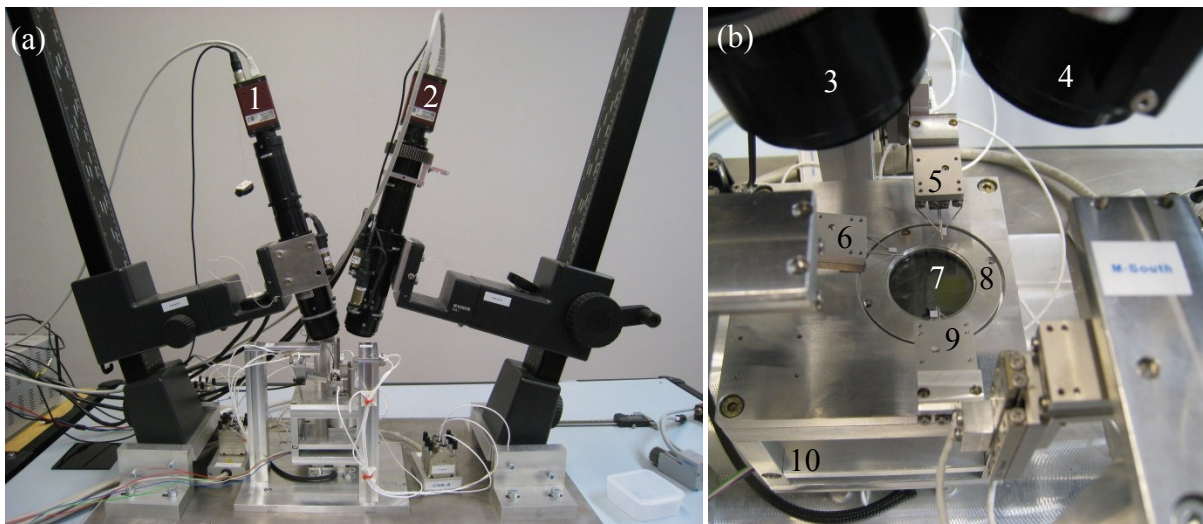
2 LAITTEISTO JA NÄYTTEET

Mikrorobotiikkaan perustuva testipenkki voidaan karkeasti jakaa kolmeen osaan. Ensimmäinen osa on kuvantaminen, ja siihen kuuluu kaksi konenäkökameraa ja niihin liitetyt motorisoidut putkimikroskoopit. Kamerat ovat harmaasävykameroita, niiden resoluutio on 2452 x 2056 ja maksimiresoluutiolla näytteenottotaajuus on yhdeksän kuvaa sekunnissa. Kamerat ovat kytketty tietokoneeseen lähiverkon kautta. Putkimikroskooppien suurennosta voidaan säätää 0,58-kertaisesta 7-kertaiseen, ja kuvattavan alueen lävistäjä vaihtelee vastaavasti 18,97 mm ja 1,57 mm:n välillä. Putkimikroskoopeissa on myös säädettävät lineaaripolarisaattorit.

Järjestelmän toinen osa ovat kolmen vapausasteen mikrotarraimet. Kukin niistä koostuu kolmesta lineaaritoimilaitteesta, jotka on liitetty toisiinsa siten, että ne muodostavat ortogonaalisen kannan, sekä itse tarraimista. Lineaaritoimilaitteet ovat pietsotoimisia, ja niiden liikealue on 17 mm. Toimilaitteiden resoluutio on 1 nm, ja niissä on sisäänrakennetut paikka-anturit. Mikrotarraimet ovat niin ikään pietsotoimisia. Niiden leukojen maksimiaukeama on 1 mm, ja leuat ovat vaihdettavissa. Leukoihin on liimattu pistematriisit (75 μm pisteen halkaisija; 3 x 6, 5 x 4 ja 4 x 5 pistettä 250 μm :n välistyksellä) helpottamaan leukojen löytämistä kameroiden kuvista. Kolme mikrotarrainta on kiinnitetty järjestelmään siten, että niiden koordinaattiakselit ovat samansuuntaisia lukuun ottamatta pientä kokoonpanovirhettä.

Järjestelmän kolmas osa on näytepöytä. Se koostuu xy-tasosta, jakopöydästä ja räätälöidystä sisäänrakennetusta valaisujärjestelmästä. Xy-pöydän ja jakopöydän resoluutiot ovat 1 nm ja 400 μm , ja niissä molemmissa on sisäänrakennetut paikka-anturit. Valaisujärjestelmä koostuu led-elementeistä, diffuuserista ja polarisaattorista. Näytepöydän näytetaso on lasia, ja valaisujärjestelmä on lasin alla toimien polarisoituna taustavalona. 90° kulma valaisujärjestelmän ja putkimikroskooppien polarisaattoreiden välillä tuottaa korkeakontrastisia kuvia, joissa luonnostaan polarisoivat paperikuidut näkyvät vaaleina viivoina tummaa taustaa vasten. Valaisujärjestelmä on suunniteltu siten, että sen polarisaattori pysyy paikallaan jakopöytä käännettäessä. Valaisujärjestelmä esitellään tarkemmin erillisessä julkaisussa [3]. Kuva 1 esittelee testipenkin.

Tämän paperin esittelemissä kokeissa käytetyt kuitunäytteet olivat havupuusta valmistettua valkaisuamatonta sellua. Pieni määrä sellua liuotettiin veteen, jolloin yksittäiset kuidut ovat nähtävissä. Yksittäisiä kuituja saadaan kaatamalla pieni määrä saatu liuosta Teflon-levylle, antamalla veden haihtua ja keräämällä pinsetillä kuidut levyllä. Yksittäisiä kuitusidoksia sidoslujustesteihin saadaan kaatamalla liuosta Teflon-levylle, laittamalla päälle toinen Teflon levy sekä 42 N paino ja asettamalla saatu kerrosrakenne tunniksi uuniin 70°C:een. Ristikkäiset kuidut muodostavat tällöin sidoksia risteämäkohtiin. Prosessi on täysin sattumanvarainen ja niinpä sekä saatujen sidosten määrä että niiden orientaatio ovat sattumanvaraisia. Onnistuneet sidokset etsitään levyllä ja kerätään talteen pinseteillä.



Kuva 1. Mikrorobotiikkaan perustuva testipenkki (a) ja lähikuva sen toimilaitteista (b). Kamerat (1, 2), motorisoidut putkimikroskoopit (3, 4), kolmen vapausasteen mikrotarraimet (5, 6, 9), näytetaso (7), jakopöytä (8) ja xy-pöytä (10). Pistematriisit näkyvät mikrotarraimien päällä valkoisina suorakulmioina.

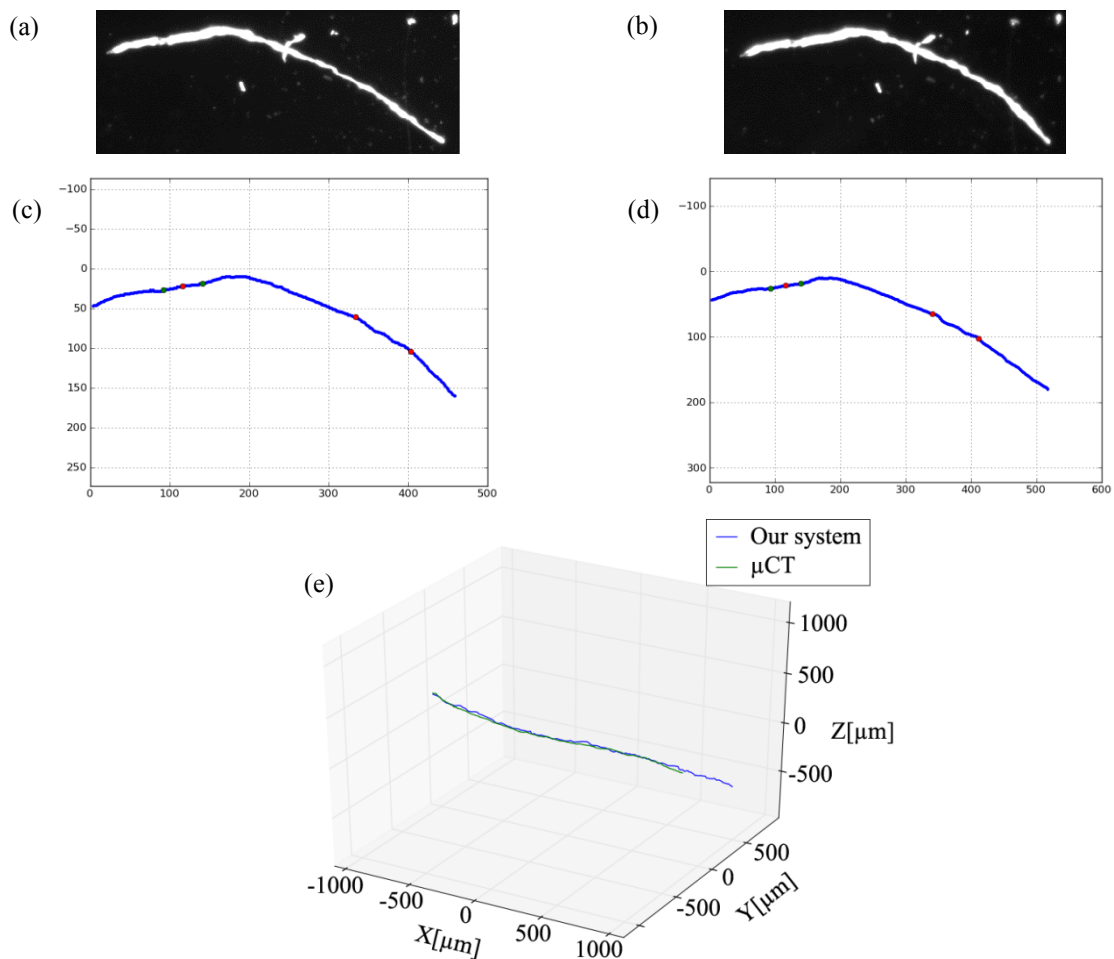
3 KONENÄKÖÖN PERUSTUVAT ALGORITMIT

Automatisointia varten kehitettyjä konenäköön perustuvia algoritmeja on neljä:

- i. Kameroiden kalibrointi toimilaitteen avulla
- ii. Kuidun tai sidoksen tunnistaminen kuvaparista
- iii. Kuvaparin välisten vastinpisteiden etsiminen ja 3D-mallin laskeminen
- iv. Sopivien tarttumapisteiden etsintä saadusta 3D-mallista

Algoritmilla i saatujen kameramatriisien avulla kuvaparin välisten vastinpisteiden avulla on mahdollista rakentaa 3D-malli, joka on samassa koordinaattijärjestelmässä toimilaitteen (mikrotarrain) kanssa. Kalibroinnissa toimilaitetta liikutetaan kameran kuva-alueella, ja kameramatriisi muodostetaan linkittämällä toimilaitteen paikka-anturin antamat 3D-pisteet ja niitä vastaavat toimilaitteen kiintopisteen sijainnit kuvakoordinaatistossa (2D). Tarrainten leukoihin kiinnitettyjen pistematriisien (Kuva 1b) vasemman yläkulman pistettä käytetään kiintopisteenä. Kun kamerat kalibroidaan kunkin tarraimen avulla, halutut tarttumispisteet voidaan siirtää kunkin tarraimen koordinaatistoon.

Jotta kohteesta voidaan rakentaa 3D-malli, kohde pitää ensin löytää automaattisesti kuvaparin molemmista kuvista. Tämä tehdään algoritmilla ii. Kuvaamisessa hyödynnetään polarisoitua valoa, ja tämän takia muodostetussa kuvassa on korkea kontrasti: kuidut ja sidokset näkyvät hyvin vaaleina tummaa taustaa vasten. Kuidut voidaan siis erottaa taustasta yksinkertaisesti kynnystämällä kuva binäärisiksi. Saadussa kuvassa valkoiset objektit ovat kuituja ja musta esittää taustaa. Mahdolliset roskat ja kohina, jotka myös näkyvät valkoisina, voidaan poistaa kuvasta poistamalla objektit, jotka eivät täytä tiettyjä geometrisiä ehtoja kuten ole kyllin pitkiä. Koska kameroiden välinen kulma on kohtalaisen pieni (30°), voidaan kuvaparin vastinobjektit parittaa translaation ja lähimmän naapurin menetelmän avulla.

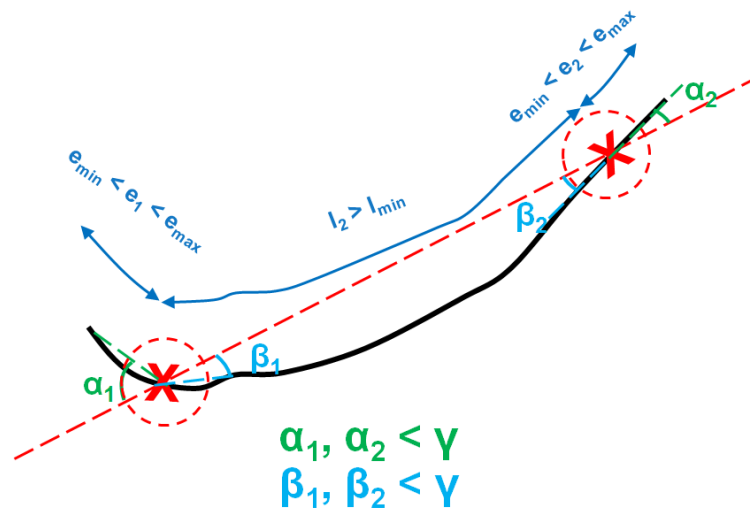


Kuva 2. Kuidun 3D-mallin laskemisen vaiheet. Alkuperäinen harmaasävykuva (a: kamera 1, b: kamera 2), keskiviiva-approksimaatiot ja löydetyt vastinpisteet (c, d) ja valmis 3D-malli verrattuna röntgenmikrotomografialaitteen tulokseen (e).

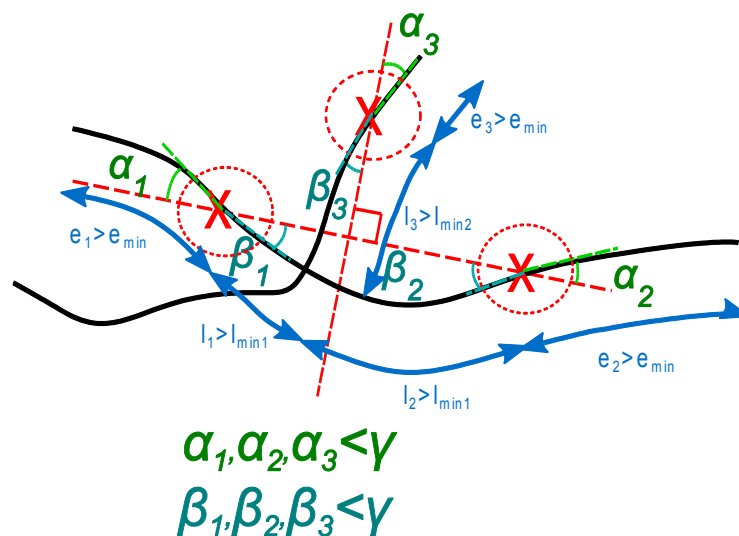
Algoritmilla iii lasketaan kuituobjektin 3D-malli käyttämällä hyväksi sen keskiviiva-approksimaatiota ja kameramatriiseja. Keskiviiva-approksimaatiosta voidaan arvioida vastinpisteet käyttämällä hyväksi keskiviivan kaarevuuden muutoksia. Kuva 2 esittää 3D-mallin laskemisen vaiheet.

Algoritmin tuottaman 3D-mallin tarkkuutta selvitettiin käyttämällä verrokkina röntgenmikrotomografialaitetta. Neljä kuitunäytettä valettiin PDMS-silikoniin, ja PDMS kovetettiin uunissa. PDMS:stä leikattiin arviolta 2 mm x 2 mm x 1 mm kokoiset palat, jotka sisälsivät kuidut. Näin kuidut saatiin pysymään samassa asennossa mikrorobotiikkaan perustuvassa testipenkissä sekä röntgenmikrotomografialaitteessa. Kustakin näytteestä otettiin testipenkillä 16 kuvaparia eri asennoissa. Kuidun kolmiulotteisen keskiviiva-arvion ero röntgenmikrotomografialaitteen tuloksiin oli keskimäärin 24 μm /2/.

Valmiista 3D-mallista etsitään sopivia tarttumispisteitä käyttämällä algoritmia iv. Yksittäisen kuidun tapauksessa sopiva tarttumapiste on riittävän etäällä kuidun päästä ja tarpeeksi suoralla osuudella kuitua. Lisäksi tarttumapisteiden välisen kuidun osuuden täytyy olla riittävän pitkä tulevien kokeiden kannalta. Tarttumapisteiden lähellä ei myöskään saa olla esteitä. Kuitusidoksen tapauksessa tarttumapisteiden tulee myös olla mahdollisimman lähellä sidoskohtaa, mutta tarpeeksi kaukana toisistaan, ettei kolmas mikrotarrain osu kahteen muuhun tarratessa. Kun sopivat tarttumapisteet on löydetty, kuitu käännetään jakopöydällä orientaatioon, joka mahdollistaa tarraamisen. Kuva 3 esittää tarttumapiste-ehdot yksittäiselle kuidulle ja Kuva 4 kuitusidokselle.



Kuva 3. Tarttumapiste-ehdot yksittäisen kuidun tapauksessa.



Kuva 4. Tarttumapiste-ehdot kuitusidoksen tapauksessa.

4 OHJELMISTO JA AUTOMAATIO

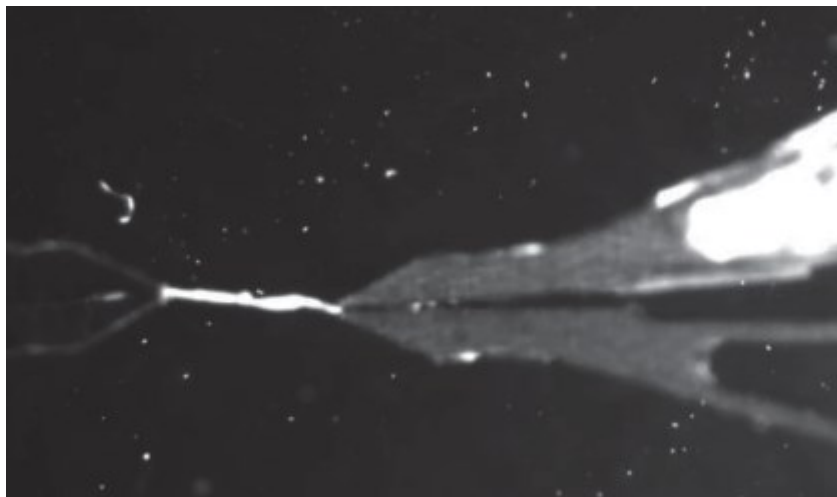
Kehitettyä mikrorobottijärjestelmää ohjataan komponenttipohjaisella ohjelmistolla. Komponenttipohjainen lähestymistapa valittiin, koska sen avulla ohjelmistolle saadaan modulaarinen rakenne, jonka eri osia voidaan helposti uudelleen käyttää eri sovelluksissa. Ohjelmiston alustana toimii Rock-niminen robotiikan tarpeisiin kehitetty sovelluskehys. Ohjelmiston komponentit on jaettu kahteen eri kategoriaan: matalan tason laiterajapintakomponentteihin sekä korkeamman tason komponentteihin. Jäljempänä mainitut toteuttavat muun muassa yllä mainittuja konenäköalgoritmeja, käyttöliittymän osia sekä järjestelmällä suoritettavia automaatiosekvenssejä. Järjestelmän komponenttipohjainen ohjelmistoarkkitehtuuri esitellään tarkemmin erillisessä julkaisussa /12/.

Kehitetty järjestelmä mahdollistaa yksittäisten paperikuitujen ja saman kokoluokan muiden kuitujen automatisoidun ja teleoperoidun manipuloinnin. Teleoperoidussa tilassa käyttäjä voi peliohjaimen avulla ohjata mikromanipulaattoreita, sekä konenäköjärjestelmän motorisoituja putkimikroskooppeja. Automaatiotilassa järjestelmä tarjoaa käyttöliittymän, josta käyttäjä valitsee tarkasteltavan kuidun. Tämän jälkeen järjestelmä mittaa kuidun kolmiulotteisen profiilin, kuidun piteuden sekä kohdat joista kuituun voidaan tarrata mikromanipulaattorien tarraimilla. Kun sopivat tarrauspisteet on löydetty, siirretään mikrotarraimet mitattuihin pisteisiin ja kuitu nostetaan ylös substraatilta.

5 KOKEET JA TULOKSET

Kuidun automaattista tarraamisen toistettavuutta tutkittiin nostamalla neljäkymmentä eri kuitua substraatilta. Yksittäisen kuidun nosto kesti keskimäärin 51,5 sekuntia, onnistumisprosentin ollessa 82,5 %. Sekä onnistumisprosentti että yksittäiseen tarraamiseen käytetty aika olivat huomattavasti parempia kuin teleoperoitu referenssimittaus, jossa vastaava koe toistettiin 15 kertaa. Teleoperoidussa tilassa yksittäisen kuidun nostaminen kesti keskimäärin 131 sekuntia ja onnistumisprosentti oli 80 %. Myöhemmin käyttöliittymää kehitettiin siten, että yksittäiseen tarraamiseen käytetty aika tippui noin 10 sekuntiin. Toistoja tehtiin 20 ja onnistumisprosentti oli 85 %. Kuva 5 esittää onnistuneen tarraamisen.

Kuitusidoksen tarraamisen ja sen rikkomisen toistettavuutta tutkittiin tarttumalla kolmeen kuitusidokseen ja vetämällä toinen kuitu irti sidoksesta. Yksittäisen kokeen kesto oli n. 15 sekuntia ja onnistumisprosentti oli 67 % ja. Kuitusidosten tapauksessa useita lisäkokeita vaaditaan vielä luotettavaa toistettavuuden selvittämistä varten.



Kuva 5. Onnistunut tarttuminen yksittäiseen kuituun kahdella tarraimella.

6 YHTEENVETO

Tämä paperi esitteli yksittäisten paperikuitujen ja kuitusidosten automaattisen käsittelyn mahdollistavan testilaitteiston, konenäköalgoritmit ja ohjelmiston periaatteet. Kokeiden määrää täytyy selvästi kasvattaa, jotta optimaaliset parametrit tarttumapisteiden hakuun saadaan tarkemmin selville ja toistettavuus voidaan luotettavimmin määrittää. Siitä huolimatta tähän asti saadut alustavat tulokset ovat lupaavia. Tutkimusta jatketaan tekemällä useampia tarttumatestejä, että edellä mainituista asioista päästään paremmin selville. Lisäksi tarraimiin tullaan integroimaan voima-anturit, jolloin kuitusidoksen lujuus voidaan mitata samalla, kun se rikotaan vetämällä. Alustava voima-anturikonsepti esitellään erillisessä julkaisussa /9/.

7 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Fischer W. J., Hirn U., Bauer W. ja Schennach R.: Testing of individual fiber-fiber joints under biaxial load and simultaneous analysis of deformation. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 27(2012)2, 237-244.
2. Hirvonen J., Mylly M. ja Kallio P.: Method for 3D Fiber Reconstruction on a Microrobotic Platform. *IEEE Transactions on Robotics*, (2015) (*lähetetty*).
3. Hirvonen J., Hanninen A. ja Kallio P.: Design and implementation of an illumination system for microrobotic paper fiber studies. *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 5854-5859.
4. Latifi S. K., Saketi P. ja Kallio P.: Experimental Evaluation of Z - Directional Fibre - Fibre Bond Strength using Microrobotics. 4th international conference on manipulation, manufacturing and measurements on the nanoscale (3M - NANO), Taipei, Taiwan, 2014.
5. Magnusson M. S. ja Östlund S.: Inter-Fibre Bond Strength and Combined Normal and Shear Loading. *Progress in Paper Physics Seminar, Graz, Austria*, 2011, pp. 205-207.
6. Retulainen E., Niskanen K. ja Nilén N.: Fibers and bonds. *Paper Physics Ed. Kaarlo Niskanen. Fapet Oy, Helsinki, Finland*, 1998, 55-87.
7. Saketi P. ja Kallio P.: Measuring bond strengths of individual paper fibers using microrobotics. *Progress in Paper Physics Seminar, Graz, Austria*, 2011, pp. 199-202.
8. Saketi P., Treimanis A., Fardim P., Ronkanen P. ja Kallio P.: Microrobotic platform for manipulation and flexibility measurement of individual paper fibers. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, 2010, pp. 5762-5767.
9. Saketi P., Latifi S. K., Hirvonen J., Rajala S., Vehkaoja A., Salpavaara T., Leikkala J. ja Kallio P.: PVDF microforce sensor for the measurement of Z-directional strength in paper fiber bonds. *Sensors and Actuators A: Physical*, 222(2015)0, 194-203.
10. R. A. Stratton ja N. L. Colson, "Dependence of fiber/fiber bonding on some papermaking variables," *Institute of Paper Science and Technology, Atlanta, GA, USA, Tech. Rep. IPST Technical Paper Series*, 1990.
11. TAPPI Quality and Standards Department, "Physical testing of pulp handsheets," *The Technological Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), GA, USA, Tech. Rep. T-220*, 2001.
12. von Essen M., Hirvonen J., Kuikka S. ja Kallio P.: Robotic software frameworks and software component models in the development of automated handling of individual natural fibers. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 9(2014)1-2, 29-45.