



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Viite:

Hirvonen, J. (2021). Muotojen vertailu konenäöllä ja käyttö kappaleen tarkastuksessa. Teoksessa S. Päälyysaho, P. Junell, M. Salminen-Tuomaala, S. Uusimäki, & S. Saarikoski (toim.), *Seinäjoen ammattikorkeakoulu osaamisen, kilpailukyvyn ja hyvinvoinnin kasvattajana* (s. 136–147). (Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja A. Tutkimuksia 36). Seinäjoen ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021121460385>



MUOTOJEN VERTAILU KONENÄÖLLÄ JA KÄYTTÖ KAPPALEEN TARKASTUKSESSA

Juha Hirvonen, TkT, yliopettaja
SeAMK Tekniikka

1 JOHDANTOA

Tyypillinen konenäöllä ratkaistava ongelma on selvittää, vastaako kuvattu kappale sen mallia riittävällä tarkkuudella. Valmistavassa teollisuudessa kohde voi olla vaikkapa CNC-koneen metallilevystä leikkaama muoto, jota verrataan kappaleen CAD-malliin. Vertailua varten kappaleen ääriviivat täytyy ensin pystyä erottelemaan kuvasta, sitten ne täytyy kohdistaa mallin ääriviivojen kanssa ja lopuksi pitää vielä selvittää, paljonko ääriviivat poikkeavat toisistaan. Kuvattava kappale saattaa olla missä tahansa orientaatioissa kameraan nähden, joten ääriviivojen kohdistaminen ei ole aivan yksinkertaista.

Laserskannereissa, monissa älykamaroissa ja kaupallisissa konenäköohjelmistoissa toiminnallisuus kahden muodon vertailuun on monesti sisäänrakennettuna. Esimerkiksi käyvät SeAMKin robotiikan laboratorion laserskanneri ja yhteistyörobottiin liitettävä kamera. LMI Technologiesin laserskannerilla voidaan yhdellä skannauksella luoda kappaleen kaksiulotteinen ääriviivamalli ja myöhemmin käyttää tätä mallia hyväksi vastaavien kappaleiden tarkistuksessa (LMI Technologies 2015). Vastavuus mallin kanssa voi olla itsessään hyväksymiskriteeri tai sitä voidaan käyttää esivaiheena tunnistamaan kappaleen orientaatio sisempien alueiden mittojen tarkastusta varten. Yhteistyöroboteissa

käytössä olevalle Robotiqin rannekameralle voidaan puolestaan syöttää kappaleen CAD-malli dxf-tiedostona ja tunnistaa tämän avulla kyseinen kappale kameran näkökentästä poimintaa varten (Robotiq, [viitattu 16.8.2021]).

Kaupallisten sovellusten ongelma on se, ettei käyttäjä pääse toteutusta katsomaan ja arvioimaan tai irrottamaan muuhun tarkoitukseen. Toiminnallisuutta voidaan siis käyttää vain kyseisen laitteen kanssa. Tämä artikkeli esittelee, mihin muotojen vertailu kameran kuvan ja CAD-mallin välillä perustuu ja miten se on toteutettavissa avoimen lähdekoodin menetelmäkirjastoilla. Esitelty toteutus tullaan julkaisemaan SeAMKin versionhallinnan kautta kenen tahansa käytettäväksi.

Artikkelin toisessa kappaleessa esitellään erilaisia menetelmiä, joita voidaan hyödyntää muotojen kohdistuksessa ja vertailussa. Kolmannessa kappaleessa esitellään valmis kehitetty ohjelma. Yhteenveto tehdään neljännessä kappaleessa.

2 ERILAISIA MENETELMIÄ

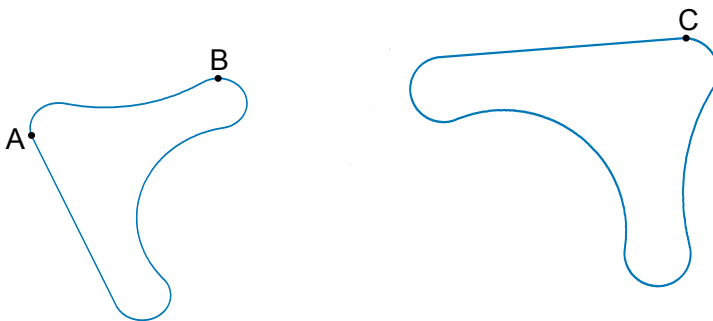
2.1 Geometrinen muunnosten perusteet

Usein muoto esitetään sen x - y -ääriväpisteiden joukkona. Jos muotoa halutaan muuntaa geometrisesti jotenkin, esim. kiertää, skaalata tai siirtää sitä sivusuunnassa, käytännössä ääriväpisteet kerrotaan kyseisen muunnoksen (tässä tapauksessa: rotaatio, skaalaus tai translaatio) muunnosmatriisilla. Muunnokset voidaan luokitella niiden vapausasteiden määrän mukaan joko similariteettimuunnoksiksi (kiertymä ja siirtymä sallittuja), affiinimuunnoksiksi (kiertymä, siirtymä, skaala ja vinouma sallittuja) tai projektiivisiksi muunnoksiksi (perspektiivin muuntuminen sallittua) (Hartley & Zisserman 2003, 37–44). Jos tiedetään, että pistejoukko B on saatu pistejoukosta A muunnoksen T avulla,

ja pistejoukkojen pisteet ovat toisiaan vastaavassa järjestyksessä, käänteismuunnos $B \rightarrow A$ on yksinkertaista ratkaista ja tehdään yhdellä komennolla matematiikkakirjastoissa kuten Matlab tai OpenCV. Yleensä ongelmana on, että

1. pistejoukoissa on eri määrä pisteitä
2. pisteiden järjestys ei ole toisiaan vastaava.

Kuvio 1 esittelee tämän ongelman. Eri skaalan takia kuvion vasemman- ja oikeanpuoleisessa muodossa on eri määrä ääri-viivapisteitä. Kuvioissa pisteet A ja C vastaavat toisiaan. Jos ääri-viivapisteet on saatu digitaalisesta kuvasta, yleensä (ohjelmasta tai konenäkökirjastosta riippuen) ensimmäinen piste on muodon lähimpänä yläreunaa olevista pisteistä vasemmanpuoleinen ja siitä edetään vastapäivään. Vasemmanpuoleisen muodon ensimmäinen piste olisi siis B ja oikeanpuoleisen C. Vaikka kuvioista 1 nähdään, että tarvittavassa muunnosmatriisissa täytyy olla kiertymä, siirtymä ja skaala (tarvitaan affiniimuunnos), ei muunnosmatriisia pysty pistejoukkojen avulla laskemaan, sillä pistejoukkojen pisteet eivät ole toisiaan vastaavassa järjestyksessä. Pelkästään kokeilemalla erilaisia vastinpistevaihtoehtoja muunnosmatriisia ei saa ratkaistua käyttökelpoisen tarkastus-sovelluksen vaatimassa aikarajassa.

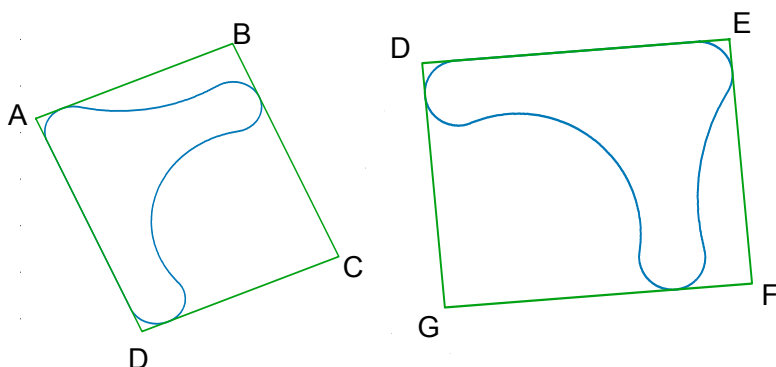


Kuvio 1. Kaksi toisiaan vastaavaa muotoa eri orientaatioissa ja skaalassa.

2.2 Rajaavat suorakulmiot

Yksi tapa yksinkertaistaa muotoa on laskea sille pienin rajaava suorakulmio. Tämä tarkoittaa pinta-alaltaan pienintä mahdollista suorakulmiota, jonka sisään muoto mahtuu. Menetelmälle on valmiit komennot muun muassa Matlabissa ja OpenCV:ssä. Kuvio 2 esittelee pienimmät mahdolliset suorakulmiot kuvion 1 muotojen ympärille piirrettynä.

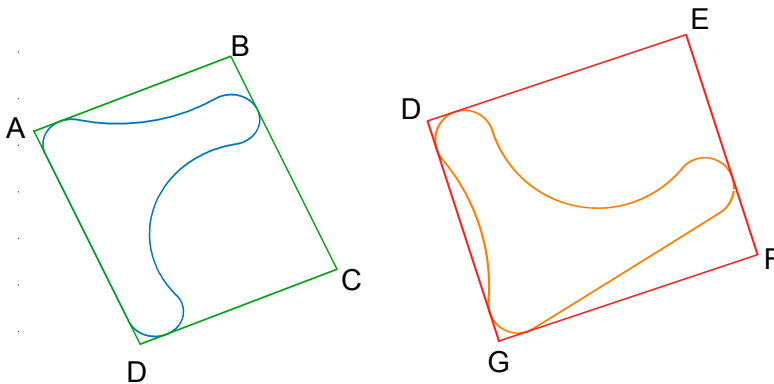
Nyt tarvittava muunnos voidaan laskea suorakulmioiden kulmapisteiden avulla. Koska kulmapisteitä on vain neljä, vastinpisteiden löytämiseen tarvitaan neljä kokeilua (kahdeksan, jos muodolle sallitaan ns. peilikuvat). Kuvion 2 tapauksessa pitää laskea muunnosmatriisit $ABCD \rightarrow DEFG$, $ABCD \rightarrow EFGD$, $ABCD \rightarrow FGDE$ ja $ABCD \rightarrow GDEF$. Kun näitä neljää muunnosmatriisia kokeillaan vuoron perään rajaavan suorakulmion kulmapisteiden sijaan varsinaisen muodon ääriviivapisteisiin, voidaan muunnoksen hyvyys mitata vertailemalla muunnettua muotoa ja verrokkimuotoa toisiinsa. Toimiva tapa on esimerkiksi etsiä verrokkimuodon jokaiselle pisteelle niitä lähin piste muunnetusta muodosta lähimmän naapurin menetelmällä, joka on laskennallisesti tehokas toteutus tähän (Altman 1992), ja laskea sitten yhteen näiden pisteiden väliset etäisyydet. Muunnos, jolla saavutetaan pienin mahdollinen etäisyyksien summa, valitaan lopulliseksi muunnokseksi.



Kuvio 2. Pienimmät rajaavat suorakulmiot piirrettynä vihreällä ja kulmapisteet nimettyinä.

Pienimmän rajaavan suorakulmion hyödyntäminen suoraan muunnoksen laskemisessa toimii hyvin, kun molemmat muodot ovat ideaalisia. Tällaisia tilanteita ovat esim. CAD-kuvien vertailu toisiinsa (Ylihärsilä & Hirvonen 2021). Jos muodon ääriviiva on saatu valokuvan pohjalta, kuvan epäideaalisuudet voivat tuottaa ongelmia. Etenkin, jos kappaleissa on pyöreitä muotoja. Esimerkiksi pienet erot valotuksessa voivat vaikuttaa ääriviivan sijaintiin parilla pikselillä, ja tämä voi muuttaa suurestikin pienintä rajaavaa suorakulmiota. Kuviossa 3 on tästä esimerkki.

Jos kuvion 3 suorakulmioita käyttää muunnoksen etsimiseen, lopputulos tulee epäonnistumaan. Toisiinsa kohdistettujen suorakulmioiden avulla ei onnistuta kohdistamaan muotoja keskenään.



Kuvio 3. Vasemmanpuoleinen muoto on saatu CAD-mallista, oikeanpuoleinen valokuvasta. Pieni vaihtelu ääriviivan sijainnissa muuttaa pienintä rajaavaa suorakulmiota olennaisesti.

2.3 ICP-menetelmä

Yleinen menetelmä pistejoukkojen ja 3D-pistepilvien kohdistamiseen on iteratiivinen lähin piste -menetelmä (iterative closest point, ICP). Se toimii todella hyvin, jos käytössä on hyvä alkuarvaus pistejoukkojen välisestä muunnoksesta. Alkuarvauksen tulisi siis suurin piirtein kohdistaa pistejoukot toisiinsa, ICP-menetelmä

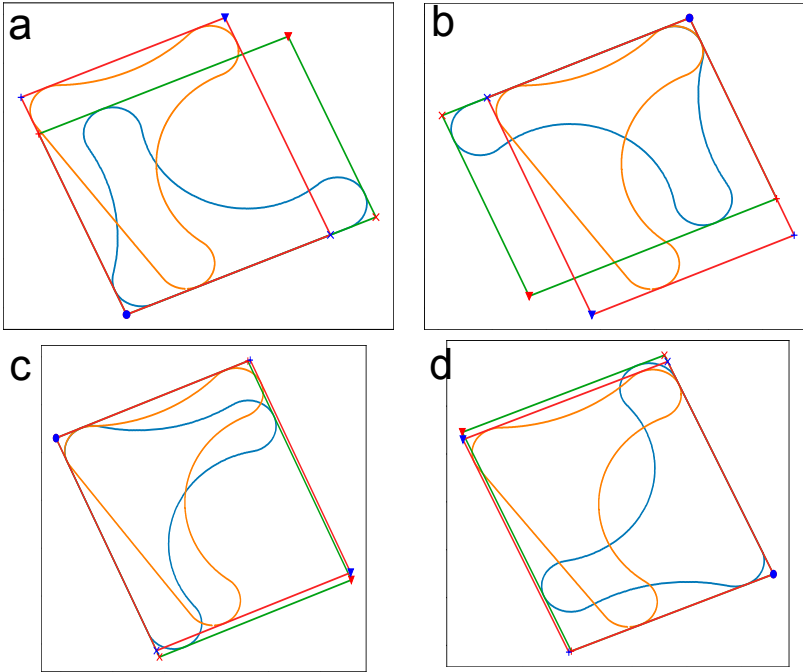
huolehtii sitten tarkasta kohdistamisesta. ICP-menetelmä koostuu seuraavista askeleista (Besl & McKay 1992):

1. Etsi jokaiselle pistejoukon A pisteelle lähin piste pistejoukosta B esimerkiksi lähimmän naapurin menetelmällä. Kutsutaan saatua pistejoukkoa C:ksi.
2. Laske affiini muunnos $C \rightarrow A$ ja muunnoksen keskimääräinen neliövirhe e (pisteiden etäisyyksien avulla).
3. Käytä saatua muunnosta pistejoukkoon B.
4. Jos edellisen kierroksen ja tämän kierroksen neliövirheiden e erotus on alle ennalta määritellyn kynnyksarvon, lopeta. Muussa tapauksessa palaa askeleeseen 1.

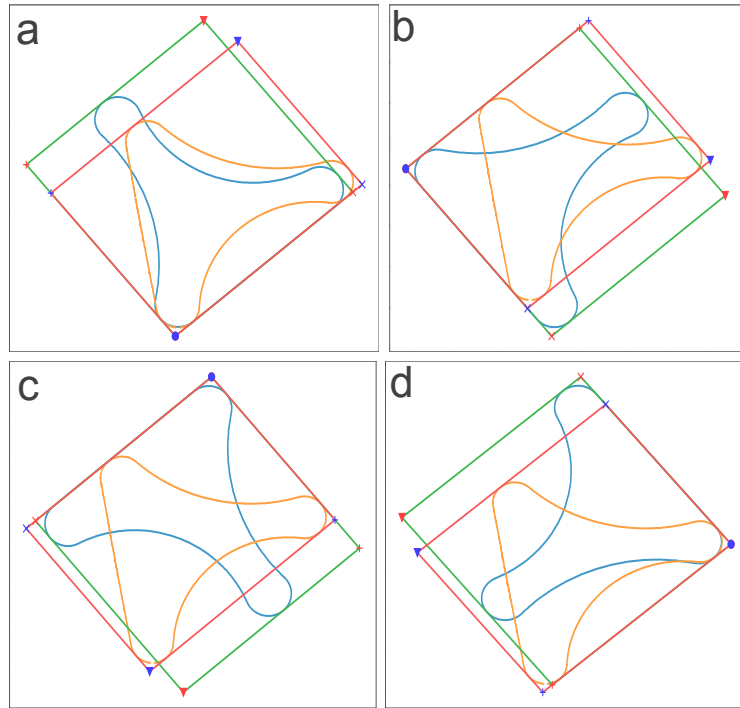
ICP-menetelmä siis parantaa muunnosta kierros kierrokselta, kunnes ennalta määritelly tarkkuusvaatimus saavutetaan (jos se on mahdollista). Menetelmän heikkous on hyvän alkuarvauksen tarve, sillä muuten menetelmä voi pysähtyä käyttäjän kannalta ennenaikaisesti tilanteeseen, jossa oikean suuntainen askel kasvattaa hetkellisesti muunnoksen tuottamaa neliövirhettä. Hyvä kysymys onkin, miten tuottaa ICP-menetelmälle automaattisesti hyvä alkuarvaus.

2.4 Rajaavien suorakulmioiden käyttö ICP-menetelmän alkuarvauksena

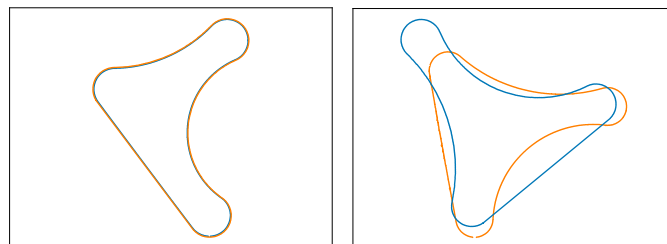
Kuvion 3 perusteella rajaavien suorakulmioiden avulla laskettu muunnos vaikuttaisi kohdistavan muodot riittävän hyvin toistensa kanssa, jotta sitä voitaisiin käyttää alkuarvauksena ICP-menetelmälle. Tällöin siis etsitään paras suorakulmioiden kulmapisteiden avulla tuotettu muunnos, kuten kappaleessa 2.2 esitettiin, ja käytetään tätä ICP-menetelmän kanssa. Tämä strategia on kuitenkin epävarma kuten kuvat 4, 5 ja 6 näyttävät.



Kuvio 4. Esimerkki tilanteesta, jossa rajaavien suorakulmioiden avulla tehtyä kohdistamista voidaan käyttää alkuarvauksena ICP-menetelmälle. Tapauksessa c oranssin ja sinisen muodon lähimpien pisteiden välisten etäisyyksien summa on minimi, ja se päättyy alkuarvaukseksi ICP-menetelmälle.



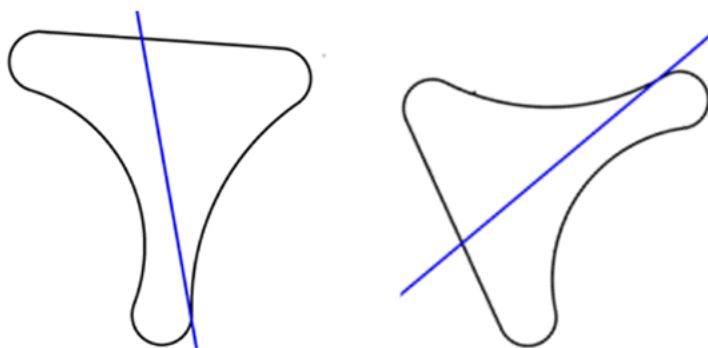
Kuvio 5. Esimerkki tilanteesta, jossa rajaavien suorakulmioiden avulla tehtyä kohdistamista ei voida käyttää alkuarvauksena ICP-menetelmälle. Tapaus b olisi toimiva alkuarvaus, mutta tapauksessa a oranssin ja sinisen muodon lähimpien pisteiden välisten etäisyyksien summa on pienin. Tapaus a siis päättyy alkuarvaukseksi ja kohdistus epäonnistuu.



Kuvio 6. ICP-menetelmän tulokset kuvioden 4 ja 5 esittämällä alkuarvauksilla.

2.5 Pääkomponenttianalyysin käyttäminen alkuarvauksena ICP-menetelmälle

Pääkomponenttianalyysi (principal component analysis, PCA) pyrkii löytämään moniulotteisesta datasta sen keskeisimmät komponentit ja näin helpottamaan datan tulkitsemista (Jolliffe & Cadima 2016). Kaksiulotteisen pistejoukon tapauksessa PCA löytää joukon suuntautuneisuuden: ikään kuin pistejoukon oman x- ja/tai y-akselin. Kuvio 7 esittelee PCA:n löytämän ensimmäisen pääkomponenttiakselin eri orientaatioissa olevalle muodolle. Kuviossa näkyvät kahden muodon ääriiviivat on saatu samasta kohteesta eri valaistuksella otetuista valokuvista, ja ääriviivoissa on pieniä eroja. Pääkomponenttiakseli ei ole siis täysin samassa kohdassa, ja muotojen tarkka kohdistaminen ei sen avulla onnistu, mutta sitä voi hyvin käyttää ICP-menetelmän alkuarvauksena.



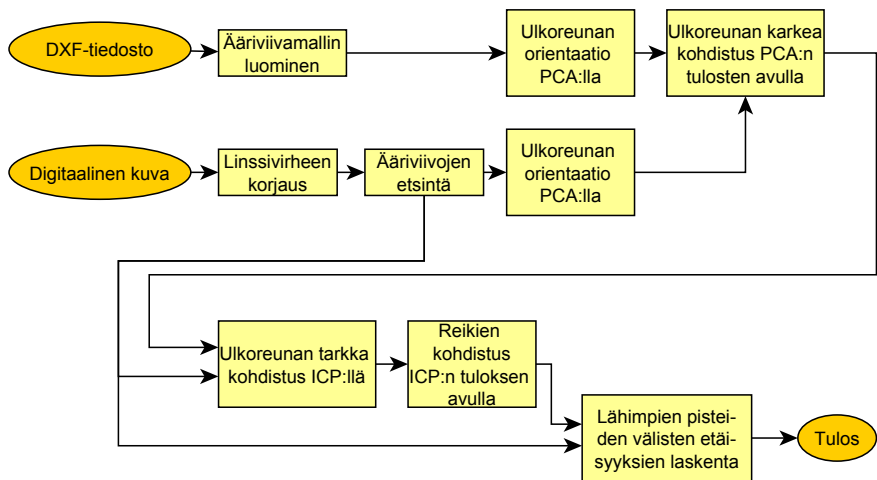
Kuvio 7. Kaksi toisiaan vastaavaa muotoa mustalla ja niiden ääriiviivapisteiden ensimmäiset pääkomponenttiakselit sinisellä.

3 VALMIS VERTAILUOHJELMA

Edellisen kappaleen menetelmiä käyttävä muotojen vertailuohjelma kirjoitettiin Python-ohjelmointikielellä käyttämällä hyväksi

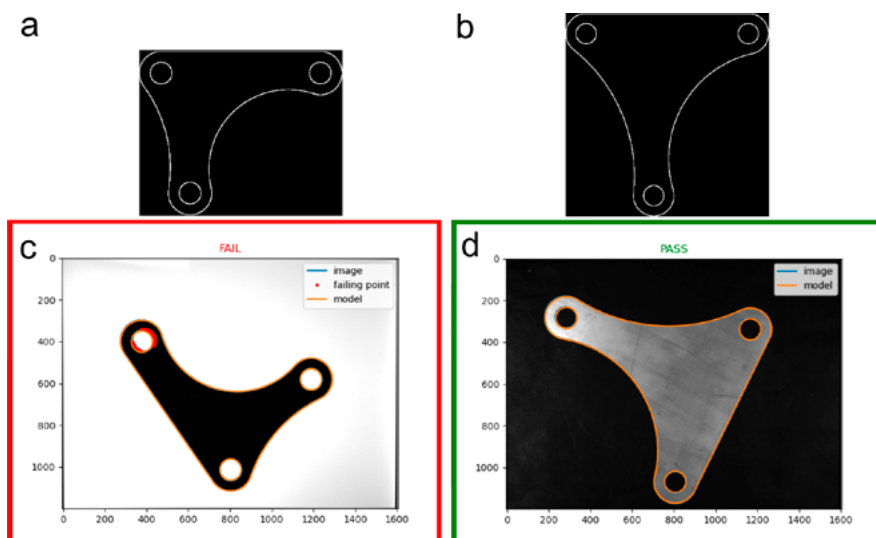
avoimen lähdekoodin OpenCV-konenäkökirjastoa, Numpy-laskentakirjastoa ja sklearn-koneoppimiskirjastoa. Muotojen kohdistuksen vertailu suoritetaan laskemalla muotojen vastinpisteiden etäisyydet lähimmän naapurin menetelmällä ja vertaamalla niitä ennalta määriteltyihin kriteereihin.

Ohjelman käyttötarkoitus on verrata valmista ohutlevystä leikatua kappaletta sen CAD-mallin geometriaan ja näin varmistaa, että kyseessä on kriteerit täyttävä kappale. Geometria luetaan dxf-tiedostosta, joita pystytään tuottamaan millä tahansa CAD-ohjelmalla. Dxf-tiedoston lukemisessa hyödynnetään kolmannen osapuolen tarjoamaa avoimen lähdekoodin Ezdxf-kirjastoa (Moitzi, [viitattu 24.8.2021]). Kuvio 8 esittelee ohjelman toiminnan.



Kuvio 8. Lopullisen ohjelman toiminta esiteltynä vaihe vaiheelta.

Ohjelmasta tehtiin kaksi versiota: graafisen käyttöliittymän sisältävä versio pöytäkoneella tehtävään analyysiin joka hyödyntää joko valmiiksi otettuja kuvia tai koneeseen liitettyä kameraa, sekä REST-rajapintaa hyödyntävä komentopohjainen versio Raspberry Pi:lle. Raspberry Pi voidaan kytkeä osaksi tuotantoa. Kuvio 9 esittelee graafisen käyttöliittymän kautta saatavia tuloksia.



Kuvio 9. Esimerkki toiminnasta. Mallit (a ja b) ja niiden avulla tehdyt tarkistukset (c ja d). Kuvassa c vasemman yläkulman reikä on sivussa ja näkyy korostettuna punaisella. Tämän takia kuvan c kappale on hylätty. Kuva c on otettu taustavalolla ja kuva d hajavalolla.

4 LOPUKSI

Tämä artikkeli on katsaus konenäköpohjaisen muotojen vertailun maailmaan, jota voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi valmiin tuotteen ja sen CAD-mallin vertailussa tai kahden eri tuotteen keskinäisessä vertailussa. Tarkoitus ei ole ollut ainoastaan esitellä kehitettyä toimivaa menetelmää, vaan näyttää myös mahdollisesti mieleen tulevia intuitiivisia ratkaisumalleja ja perustella, miksi ne eivät toimi. Kuten lähteistä nähdään, suurin osa tarvittavista matemaattisista menetelmistä itsessään on kohtalaisen vanhoja. Suurin haaste onkin löytää oikeat menetelmät sekä toimivat ja yhteensopivat avoimen lähdekoodin toteutukset niistä.

Artikkelin esittelemää tarkastusmenetelmää hyödyntävä konenäkö tarkastuspiste tullaan syksyn aikana integroimaan SeAMKin kone- ja tuotantotekniikan laboratorion FMS-soluun demonstraati-

tioita ja online-käyttöä varten. Graafista käyttöliittymää käyttävä versio taas on käytössä SeAMKin robotiikan laboratorioissa.

Tämä artikkeli on valmistettu osana Enterprise Digital Twin Platform -hanketta, ja artikkelin kirjoittaja kiittää hankkeen ja tämän artikkelin rahoittamisesta Etelä-Pohjanmaan liittoa (EAKR).

LÄHTEET

Altman, N. S. 1992. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American statistician* 46 (3), 175–185. doi: 10.1080/00031305.1992.10475879

Besl, P. J. & McKay, N. D. 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 14 (2), 239–256. doi: 10.1109/34.121791

Hartley, R. & Zisserman, A. 2003. *Multiple view geometry in computer vision*. New York: Cambridge University Press.

Jolliffe I. T. & Cadima J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the Royal Society A*, 374 (20150202). doi: 10.1098/rsta.2015.0202

LMI Technologies. 2015. Part matching. Gocator 2300 & 2880 series user manual. [Verkkosivu]. [Viitattu 16.8.2021]. Saatavana: https://d3ejaiy6gq5z4s.cloudfront.net/manuals/gocator/gocator-4.2/G2/Default.htm#WebInterface/Models/PartMatching.htm%3FTocPath%3DGocator%20Web%20Interface%7CModels%20and%20Part%20Matching%7CPart%20Matching%7C_____0

Moitzi, M. Ei päiväystä. Ezdxf. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.8.2021]. Saatavana: <https://ezdxf.mozman.at/>

Robotiq. Ei päiväystä. Lesson 15: Import CAD model. [Verkkosivu]. [Viitattu 16.8.2021]. Saatavana: <https://elearning.robotiq.com/course/view.php?id=5§ion=15> Vaatii rekisteröitymisen.

Ylihärsilä, M. & Hirvonen, J. 2021. Grid shape descriptor using path integrals for measuring sheet metal parts similarity. *International CAD Conference 2021*. doi: 10.14733/cadconfP.2021.272-276