

Maisa Virtanen

# MUODONMUUTOSTEN MÄÄRITTÄMINEN DIGITAALISELLA KUVAKORRELAATIOLLA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta (ENS)

Kandidaatintyö

Joulukuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Maisa Virtanen: Muodonmuutosten määrittäminen digitaalisella kuvakorrelaatiolla  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikan TkK-tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2020

---

Digitaalinen kuvakorrelaatio (engl. Digital Image Correlation, DIC) on optinen menetelmä, jolla voidaan määrittää kappaleen muodonmuutoksia. Tämän työn tavoitteena on selventää menetelmän toimintaperiaatetta ja ominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien pohjalta pyritään muodostamaan kuva siitä, millaisiin kohteisiin menetelmä soveltuu ja toisaalta sen rajoitteista.

DIC-menetelmässä mittalaitteena hyödynnetään yhtä tai useampaa kameraa. Kuormitettavasta kappaleesta kuvataan videota, jonka perättäisiä kuvia verrataan toisiinsa. Kuvista erotellaan pienempiä alijoukkoja, joita verrataan aina samassa kohdassa kuvaa sijaitsevaan alijoukkoon. Esimerkiksi kuvien oikeita yläkulmia verrataan siis keskenään.. Tämän vertailun pohjalta saadaan selville alijoukkojen siirtymät, jotka puolestaan kuvastavat kappaleen pinnan muodonmuutosta. Useiden pienten alijoukkojen erillinen tarkastelu mahdollistaa erilaisten paikallisten muodonmuutoksen havainnoinnin toisistaan erillisinä. Tästä on hyötyä silloin kun koko pinta ei muuta muotoaan samalla tavalla, esimerkiksi kun tutkittavaan kappaleeseen muodostuu kurouma.

Toinen DIC-menetelmän merkittävä etu on se, ettei tutkittavan kappaleen pintaan tarvitse kiinnittää antureita. Tämä vähentää pintaan kohdistuvia ylimääräisiä kuormituksia, mikä on erityisen tärkeää silloin, kun tutkittava näyte on hyvin herkkä. DIC-menetelmää onkin hyödynnetty monia erilaisia biomateriaaleja tutkiessa, sillä ne eivät välttämättä kestä mittalaitteen kiinnittämistä kappaleen pintaan. Myös syklisen kuormituksen kokeissa on etua kontaktittomuudesta, sillä näytteeseen kiinnitettävät anturit saattavat väsyä itsekkin, mikä aiheuttaa virhettä. Toisaalta pitkissä kokeissa DIC:ssä nousee ongelmaksi kameran ylikuumentuminen.

Kamerasysteemi on verrattain monimutkainen verrattuna esimerkiksi venymäliuskaan, ja mittaukseen liittyy monia erilaisia epävarmuustekijöitä. Menetelmällä on vaatimuksia näytteen pinnan kuvioinnin suhteen. Sopimaton kuvio moninkertaistaa mittaukseen liittyvän epävarmuuden. Kappaleen täytyy olla hyvin valaistu ja pysyä tarkennettuna. Pienikin kameran liike tai värinä aiheuttaa virhettä mittaukseen. DIC-menetelmä ei ole kovin tarkka hyvin pienillä venymillä, mutta tarkkuus kasvaa venymän kasvaessa. Tarkkoihin mittatuloksiin vaadittavat hyvälaatuiset konenäkökamerat ovat lisäksi kalliita.

DIC on hyvä valinta kun tarvitaan tietoa muodonmuutoksista eri puolilla kappaletta, sekä silloin kun anturin kiinnittäminen näytteeseen on vaikeaa. Menetelmässä itsessään ei ole rajoitteita sen soveltamiselle myös tavallisissa aineenkoetuskokeissa, mutta mittausprosessin haastavuus on toistaiseksi pitänyt käytön lähinnä erityissovelluskohteissa.

Avainsanat: DIC, digitaalinen kuvakorrelaatio, venymä, muodonmuutos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Maisa Virtanen: Digital image correlation in deformation measurements  
Bachelor's Thesis  
Tampere University  
Degree Programme in Material Science and Engineering, BSc (Tech)  
December 2020

---

Digital image correlation (DIC) is an optical method that can be used in determining the deformation of a sample. The goal of this thesis is to explain the basic principles and properties of this method. Based on the determined properties, the suitability, as well as the limitations of the method are explored.

In DIC one or multiple cameras are used to gather video data of the loaded sample. Consecutive images of this video are then compared with one another. [1] The comparison is performed by selecting smaller subsets from the images and comparing the subset in one part of the image with the one in the same position at a different point in time. For example the upper right corner of an image is always compared with the upper right corner of the other images. [2][1][3] This comparison yields the displacement of each subset, from which the deformations of the sample can be calculated. Observing multiple subsets allows the examination of different parts of the sample separately, which is a major advantage in cases featuring localized deformations.

In a DIC measurement, no instruments need to be attached to the sample, which is a major advantage over the more traditional instruments. Contactless measuring avoids any extra stresses that might otherwise be applied to the surface. This is especially important when examining sensitive materials, such as many biomaterials that can easily be damaged by measuring instruments. Contactless measuring is also useful in cyclically loaded experiments, as traditional sensors are exposed to the same stresses and may suffer from fatigue. This can be a source of error. Longer experiments do sometimes introduce error in DIC as well, as the cameras are prone to overheating.

The DIC camera system is relatively complex when compared with more traditional sensors such as strain gauges. This complexity introduces many factors that can negatively affect the reliability of the measurement. Applying a suitable pattern on the surface of the sample is strict requirement for a successful measurement. A poor pattern can multiply the unreliability of the results. The sample must be well lit and stay in focus for the entire duration of the experiment. Even the smallest movement or vibration of the camera may cause error. Even if all requirements are met, DIC is not very accurate if the measured deformations are very small. The accuracy gets better as the deformations grow. Good quality machine vision cameras are needed for reliable measurements, but they tend to be very costly.

In conclusion, DIC is a good choice when the deformations are uneven or localised, and when the samples are sensitive. The properties of the method do not make it a poor fit for more routine materials testing either, but the complexity of the measuring process has discouraged its usage in these area.

Keywords: DIC, digital image correlation, strain, deformation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää työn ohjauksesta Jari Kokkosta, jonka vinkit auttoivat monen suuren ongelmakohdan yli. Kiitokset myös Joni Seppälälle LaTeX-avusta sekä Oula Siljamolle vertaispaineesta. Ilman teitä prosessi olisi todennäköisesti yhä vaiheessa.

Tampere, 6. joulukuuta 2020

Maisa Virtanen

# SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto . . . . .	1
2	Toimintaperiaate ja laskenta . . . . .	2
2.1	Laskenta . . . . .	3
2.2	Valmiit laskentaohjelmistot . . . . .	5
3	Laitteisto, virhelähteet ja kalibrointi . . . . .	8
3.1	Linssit . . . . .	8
3.2	Kamerat . . . . .	9
3.3	Kalibrointi . . . . .	11
3.4	Koevalmistelut . . . . .	12
4	Käyttökohteet ja vertailu muihin menetelmiin . . . . .	16
4.1	Vertailu muihin menetelmiin . . . . .	16
4.2	Soveltuvuus . . . . .	19
5	Yhteenveto . . . . .	21
	Lähteet . . . . .	23

# 1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoitus on tarjota yleiskatsaus digitaaliseen kuvakorrelaatioon (Digital Image Correlation, DIC) ja sen käyttöön muodonmuutosten määrittämisessä. Menetelmä perustuu tutkittavan näytteen videointiin. Videon eri ajanhetkillä otettuja kuvia verrataan toisiinsa, ja kuvan eri osien liikkeet lasketaan. Tämä tarjoaa kattavan käsityksen kappaleen pinnan muodonmuutoksista. [2]

Digitaalinen kuvakorrelaatio on verrattain uusi menetelmä, vaikka sen hyödyntämisestä muodonmuutosten määrittämisessä puhuttiin jo 1970-luvulla. Tällöin menetelmä oli kuitenkin hyvin työläs, sillä sen vaatima laskenta on melko raskasta ja siksi kannattavaa tehdä tietokoneella. Digitaalisten kameroiden tarkkuus ei kuitenkaan ollut vielä 1970-luvulla riittävä menetelmän tarpeisiin, ja siksi tarkastelu oli tehtävä filmikameralla, filmi kehitettävä ja sitten digitoitava ennen kuin varsinainen laskenta voitiin aloittaa. Menetelmä ei alkanutkaan yleistyä kuin vasta digitaalisten kameroiden tarkkuuden noustua riittävälle tasolle. [2, s. 3]. Kameratekniikassa tapahtuu edelleen kehitystä, joka mahdollistaa entistä tarkempia tai nopeampia DIC-mittauksia [4][5]. Menetelmä ei ainakaan vielä ole korvaamassa perinteisiä menetelmiä rutiinimittauksissa, mutta se on kasvattanut suosiotaan tietyissä erityissovelluksissa, kuten biomateriaalien sekä laajojen, epätasaisten muodonmuutoskenttien tutkimisessä [2].

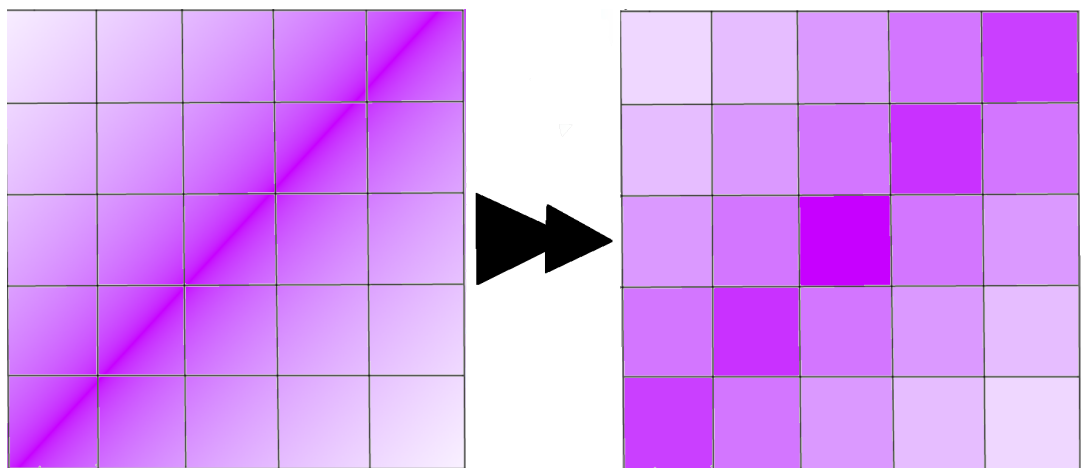
Tämän työn tavoitteena on esitellä DIC-menetelmän toimintaperiaatetta ja siihen käytettävää laitteistoa (luku 2) sekä mittauksen virhelähteitä (luku 3). Menetelmään tutustumisen jälkeen sitä verrataan käytetyimpiin muodonmuutossensoreihin, eli venymäliuskoihin ja ekstensometreihin (luku 4). Näillä tiedoilla pyritään muodostamaan perusteltu kuva siitä, millaisiin tarkoituksiin menetelmä soveltuu ja miksi.

DIC-menetelmä soveltuu muidenkin asioiden kuin pinnan muodonmuutoksen tutkimiseen. Samalla laskentaperiaatteella voidaan tarkastella esimerkiksi särön etenemistä tai koneen osien liikettä [6][7]. Tässä työssä keskitytään kuitenkin käyttökohteiden osalta pelkästään muodonmuutosten tarkasteluun.

## 2 TOIMINTAPERIAATE JA LASKENTA

DIC-mittauksessa seurataan kappaleen pinnan muodonmuutosta. Pinnasta otetaan ennen kuormitustilannetta referenssikuva, jossa jokainen pinnan piste on alkuperäisessä sijainnissaan. Kuvattua kappaletta voidaan alkaa kuormittaa, jolloin sen muoto muuttuu. Pinnan kuviot liikkuvat suhteessa toisiinsa ja alkuperäiseen sijaintiinsa. Vertailemalla eri ajanhetkillä otettuja kuvia saadaan tietoa tapahtuneista muodonmuutoksista. [1]

Kuviin tallentuu dataa valon intensiteetistä kappaleen eri pisteissä. Kappaleen pinnasta heijastuvat valonsäteet taittuvat kameran linssin lävitse sensoripinnalle tavallisten optiikan lakien mukaan [2, s. 14]. Kamera tallentaa ne digitaaliseen muotoon pikseleiksi, joiden väriarvot ovat diskreettejä, eli saman pikselin alueella on vain yksi kokonaislukuarvo. Tavallisessa RGB-kuvassa pikseleiden punaisen, vihreän ja sinisen valon intensiteetit saavat kokonaislukuarvoja väliltä (0, 255), eli esimerkiksi vihreän valon intensiteetti 235.4 pyöristyisi arvoon 235. Lisäksi jos kappaleen pinnasta alunperin heijastui useita intensiteettejä saman pikselin alueella, niistä tallennetaan keskiarvo kuvan 2.1 esittämällä tavalla. [1] Kuvan koko, resoluutio ja suurennos määräävät millainen alue kappaleen pinnasta kuvautuu kullekin pikselille [1][8].



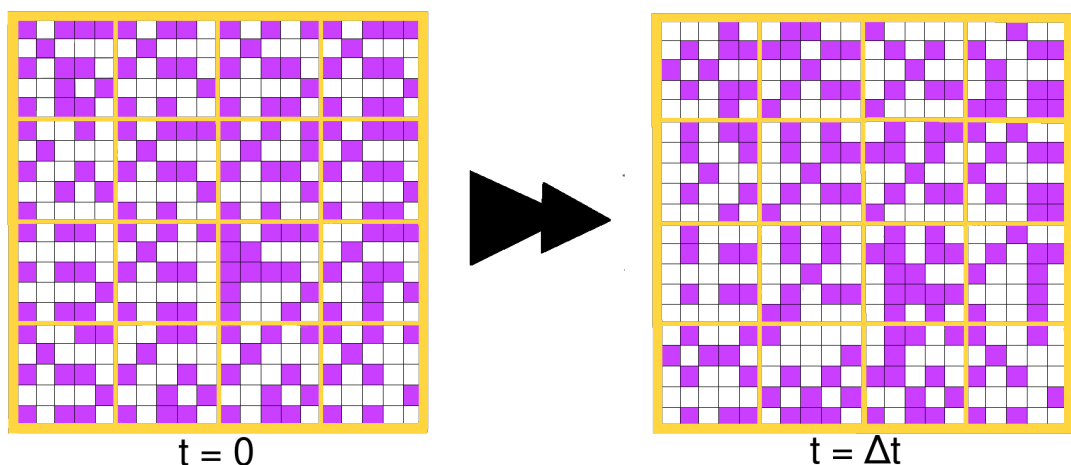
**Kuva 2.1.** Valon tasaisen intensiteettijakauman digitointi. Vasemmalla luonnollinen, jatkuva jakauma. Oikealla kameran tallentamat diskreetit arvot

Tarkasteluun riittää yksi kamera, mutta tällöin näytteen ja kaikkien sen muodonmuutosten on pysyttävä kaksiulotteisessa tasossa. Tätä menetelmää kutsutaan 2D-DIC:ksi. 2D-kuvista ei ole mahdollista erotella perspektiiviä, jolloin taittuminen kameraa kohti tulkitaan virheellisesti kappaleen paisumiseksi ja kamerasta etäännyminen kapenemiseksi. Kaikki

tason ulkopuolella tapahtuvat muodonmuutokset aiheuttavat siksi virheitä laskennassa. Virheistä voidaan pyrkiä eroon käyttämällä useampaa kameraa. [9] DIC-mittausten virhelähteisiin perehdytään tarkemmin luvussa 3.

Kahden kameran stereo-DIC -menetelmä soveltuu kolmiulotteisten muodonmuutosten mittaamiseen [1][9]. Eri kulmissa sijaitsevien kameroiden kuvia vertaillaan nyt paitsi aiempiin kuviin, myös toisiinsa. Tarkastevasta alueesta kerätään dataa molemmilla kameroilla hieman eri kulmista, jolloin kuviin saadaan perspektiivi. [10] Suuremman kolmiulotteisemman kuvapinnan luomiseksi voidaan kameroiden määrää lisätä edelleen [9].

Kuvien korrelaatio perustuu pienempien pikselialijoukkojen tarkasteluun. Yksittäisten pikselien seuraaminen ei ole mahdollista, koska saman intensiteetin pikseleitä on useita. Alijoukkojen on oltava tarpeeksi suuria suhteessa kappaleen pintakuviin, jotta ne olisivat tunnistettavia. Valitut alijoukot voivat joko limittyä tai olla kokonaan erillisiä toisistaan. [1][3] Kuvassa 2.2 on esitetty eräs järjestely. Vasen ruutu esittää alkuperäistä referenssikuvaa ja oikea jollain ajanhetkellä  $\Delta t$  otettua kuvaa. Tarkasteluja varten valitut alijoukot on rajattu keltaisella värillä.



**Kuva 2.2.** Vertailtavien alijoukkojen valinta. Vasemmalla ajanhetkellä  $t=0$  otettu referenssikuva, jossa pikselit alkuperäisillä paikoillaan. Oikealla jollain ajanhetkellä  $t=\Delta t$  otettu kuva, jossa kappaleen muodonmuutos on siirtänyt pintakuviota.

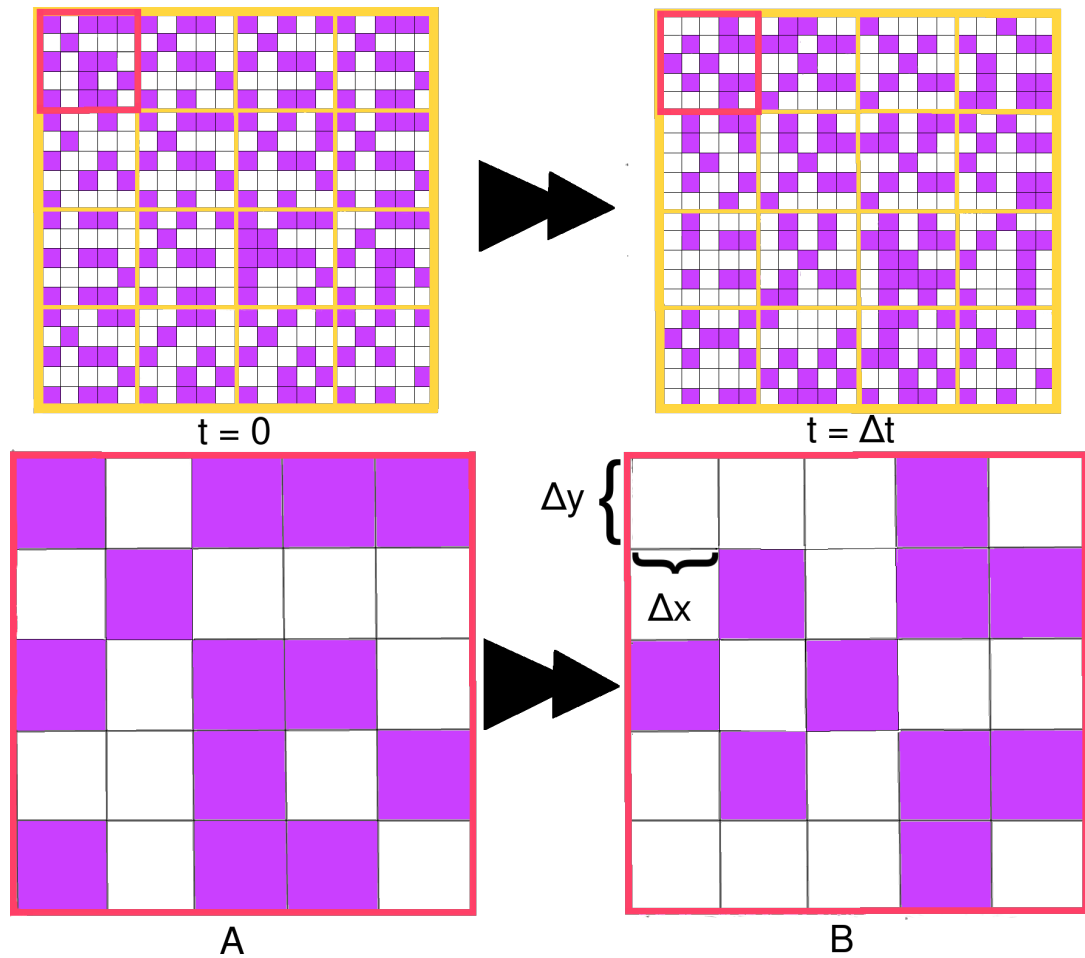
Muodonmuutosten määrittämiseksi verrataan yleensä saman sijainnin alijoukkoja kummastakin kuvasta. Jos mittauksen aikana tapahtuvat muodonmuutokset ovat suuria, ei kuvia välttämättä pystytä luotettavasti korreloimaan alkuperäiseen referenssikuvaan, sillä tunnistettava kuvio voi siirtyä kokonaan toisen alijoukon alueelle. Tällaisissa tilanteissa voidaan laskea korrelaatio aina edellisen kuvan kanssa alkuperäisen referenssikuvan sijasta. [1][11, s. 51] Laskentaan perehdytään syvemmin seuraavassa osiossa.

## 2.1 Laskenta

Alijoukkojen korrelaation laskemiseen käytetään yleensä ristikorrelaatiota [1][2][3]. Se on kahden signaalin samankaltaisuuden tarkasteluun soveltuva funktio. Tässä osiossa laskentaa visualisoidaan kuvan 2.2 datalle. Kuvien vasemman yläkulman alijoukot on esitetty



tarkemmin kuvassa 2.3.



**Kuva 2.3.** Vertailtavien alijoukkojen valinta. Vertaillaan eri ajanhetkillä otettujen kuvien samoissa koordinaateissa sijaitsevia alijoukkoja keskenään siirtymän määrittämiseksi.

Tästä eteenpäin käytetään referenssikuvan ( $t=0$ ) alijoukosta merkintää  $A$  ja tarkasteltavan kuvan ( $t=\Delta t$ ) vastaavasta alijoukosta merkintää  $B$ . Ristikorrelaatio voidaan yleisessä tapauksessa laskea kahdelle  $m \times n$  -alijoukolle  $A$  ja  $B$

$$k(\Delta x, \Delta y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n [A(i + \Delta x, j + \Delta y)] [B(i, j)], \quad (2.1)$$

missä  $\Delta x$  kuvaa joukon  $B$  vaakasuuntaista siirtymää suhteessa joukkoon  $A$  ja  $\Delta y$  vastaavasti pystysuuntaista [12]. Joukko käydään siis läpi arvo kerrallaan, ja jokainen arvo kerrotaan samasta pisteestä vakiomäärän siirtyneellä arvolla toisesta joukosta. Korrelaatio on näiden tulojen summa. Tapahtuneen muodonmuutoksen tunnistaminen perustuu siirtymien  $\Delta x$  ja  $\Delta y$  arvojen läpikäyntiin. Ne siirtymän arvot, joilla saadaan suurin korrelaatio kuvaavat tapahtunutta siirtymää. Kuvan 2.3 tapauksessa  $\Delta x$  ja  $\Delta y$  saavat kaikki kokonaislukuarvot väliltä  $(-4,4)$ , ja paras korrelaatio saadaan kun  $\Delta x = \Delta y = 1$ .

Funktio voidaan skaalata välille (-1,1) muokkaamalla edellistä kaavaa muotoon

$$k_n(\Delta(x), \Delta(y)) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n [A(i + \Delta x, j + \Delta y) - \bar{A}] [B(i, j) - \bar{B}]}{\sqrt{(\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n [A(i, j) - \bar{A}]^2 \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n [B(i, j) - \bar{B}]^2)}}, \quad (2.2)$$

missä  $\bar{A}$  ja  $\bar{B}$  ovat alijoukkojen keskiarvoja [1]. Skaalatun funktion arvo 1 vastaa täydellistä positiivista korrelaatiota. Korrelaation voimakkuutta on helpompi arvioida, kun maksimiarvo tunnetaan. Alijoukon siirtymä voidaan tunnistaa laskemalla kaavan 2.2 mukainen korrelaatio referenssikuvasta valitulle alijoukolle ja kuormituksen jälkeisen kuvan kaikille halutuille alijoukoille. Alijoukko on siirtynyt siihen paikkaan, missä saavutetaan korkein korrelaation arvo. [3]

Kaavojen 2.1 ja 2.2 summafunktiot eivät sievene, mikä tekee niistä hitaita laskea. Todellisissa sovelluksissa hyödynnetään siksi yleensä nopeampia Fourier-muunnoksia [13][14]. Funktion tai signaalin Fourier-muunnos perustuu sen muuntamiseen sinimuotoisten termien summaksi.  $M \times N$  -kuvan  $A$  Fourier-muunnos  $\hat{A}$  voidaan laskea

$$\hat{A}(a, b) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A(m, n) e^{-i2\pi(\frac{am}{M} + \frac{bn}{N})}, \quad (2.3)$$

missä  $i$  on imaginaariyksikkö [15]. Summan termit voidaan purkaa sini- ja kosinifunktioiksi Eulerin kaavan  $e^{ix} = \cos x + i \sin x$  avulla. Trigonometrinen funktioiden jaksollisuus mahdollistaa summan sieventämisen. Fourier -muunnosten laskemiseen onkin olemassa useita nopeita algoritmeja. [16, s. 471-477] Fourier-muunnetun kuvan pisteet esittävät intensiteettien sijaan taajuuksia, joista kuva muodostuu [15].

Muunnetuista kuvista korrelaatio voidaan laskea matriisitulon avulla

$$k(\Delta x \Delta y) = F^{-1}(\hat{A} \hat{B}^*) \quad (2.4)$$

, missä  $F^{-1}$  on Fourier-muunnoksen käänteisoperaatio ja  $\hat{B}^*$  on joukon  $B$  kompleksikonjugaatti, eli sen jokaisen arvon imaginaariosa on käännetty vastakkaismerkkiseksi [14].

## 2.2 Valmiit laskentaohjelmit

Korrelaation ja muodonmuutoksen laskentaan on tarjolla monia valmiita ohjelmia. Näistä ilmaiseksi saatavilla ovat GOM ja Optecal [17][18]. Optecal on laitteistovalmistajien ohjelmista eroten suunniteltu myös tavallisten kameroiden kanssa käytettäväksi [17]. Itse rakennetun laitteiston tueksi on tarjolla myös vapaan lähdekoodin kirjastoja, kuten Python-kirjasto  $\mu$ DIC. Kirjasto sisältää valmiit metodit muodonmuutosten laskentaan tallennetusta kuvasarjasta ja tulosten visualisointiin, sekä mahdollisuuden virtuaalisten koekiden simulointiin.  $\mu$ DIC on kuitenkin huomattavasti valmiita ohjelmistoja suppeampi ja edellyttää käyttäjältä ohjelmointiosaamista. [19]

Monet laitteistovalmistajat tarjoavat myös ohjelmistoja osana laitteistopakettia. Esimerkiksi Correlated Solutionsin tarjoamien laitteistojen mukana tarjottava VIC-ohjelma kykenee yrityksen mukaan laskemaan kappaleen ja muodonmuutoksen nopeuden sekä muodonmuutosten suunnat ja suuruudet lähes reaaliaikaisesti mittauksen aikana. Tulokset ovat jatkuvasti mittaajan nähtävissä. [20] Dantec Dynamics kertoo ohjelmistonsa näyttävän siirtymän ja venymän reaaliaikaisena ja lupaa virhemarginaalien automaattista laskentaa [21]. Trilion Quality Systemsin maksullisen ARAMIS-järjestelmän osana tarjotaan aiemmin mainitun GOM-ohjelman laajempaa, maksullista versiota, joka tukee ilmaisversiota ominaisuuksien lisäksi mm. käyttäjän omia skriptejä sekä tarkempaa analyysiä [18][22]. LaVisionin StrainMaster-ohjelmisto lupaa helposti aseteltavia virtuaalisia ekstensometrejä yksittäisen suunnan muodonmuutoksen tarkasteluun sekä erilaisten jännitysvektori-kenttien laskentaa [23]. Kaikki näistä laitevalmistajista lupaavat soveltuvuutta materiaalin mekaanisten ominaisuuksien määrittämiseen, sekä erilaisia graafeja ja visualisatioita mitausdatasta ja laskentatuloksista.

**Taulukko 2.1.** Ohjelmistojen ominaisuuksien vertailu. Taulukkoon on koottu edellä esitellyjen ohjelmistojen ominaisuuksia: pystyvätkö ne laskemaan korrelaation mittauksen aikana vai vasta jälkikäteen, voidaanko simuloida virtuaalisia kokeita, millaista dataa ohjelmistoista voidaan viedä, muodostaako ohjelma 3d-mallin näytteestä sekä vaaditaanko käyttäjältä jotain taitoja laskennan suorittamiseen.

	korrelaation laskenta	virtuaaliset kokeet	vienti muihin ohjelmiin	3d-malli	vaadittu osaaminen
GOM[18]	simultaani	ei	data, tulokset, CAD	kyllä	ei
Optecal[17]	jälkikäteen	ei	data, tulokset	ei	ei
$\mu$ DIC[19]	jälkikäteen	kyllä	data, tulokset	ei	ohjelmointi
VIC[24]	simultaani	ei	kyllä	ei	ei
Dantec[21]	simultaani	ei	data, tulokset, FEA	ei	ei
Strain-Master[23]	jälkikäteen	ei	data, tulokset	ei	ei

Kuten taulukosta 2.1 voidaan havaita, peruslaskenta sekä tulosten vienti erillisiin ohjelmiin lisätarkastelua varten onnistuu kaikilta ohjelmistoilta. Kaikki ohjelmat pystyvät piirtämään jonkinlaisia kuvaajia datasta, mutta raakadatan vienti mahdollistaa erilaisten kuvaajien piirtämisen esimerkiksi MatLabilla. Jotkin ohjelmista on myös suunniteltu toimimaan yhteen tiettyjen erillisten ohjelmien kanssa, kuten GOM, johon voidaan tuoda CAD-malleja ja josta voidaan myös viedä ohjelman tuottamia malleja kuvannetusta kappaleesta [18]. Dantec Dynamicsin ohjelmisto tukee datan vientiä suoraan FEA-ohjelmiin (Finite Ele-

ment Analysis), joissa voidaan mallintaa ja ennakoida mm. kappaleen kulutus- ja kuormituskäyttäytymistä [21]. Tarkastellut ohjelmistot on suunniteltu hieman erilaisia laitteistoja varten. Laitteistovalmistajat ovat pääsääntöisesti suunnitelleet ohjelmansa toimimaan omissa kokoonpanoissaan, sen sijaan ilmaisohjelmat  $\mu$ DIC, Optecal ja GOM pyrkivät tukemaan myös käyttäjän itse kokoamia laitteistoja [17][18][19].

Laskentaohjelmistotarjonnan ansiosta käyttäjän ei tarvitsekaan tuntea tässä luvussa käsiteltyä laskentaa kovin syvällisesti. Seuraavassa luvussa käsitellään mittauslaitteistoa ja mittauksen tarkkuuden muodostumista.

## 3 LAITTEISTO, VIRHELÄHTEET JA KALIBROINTI

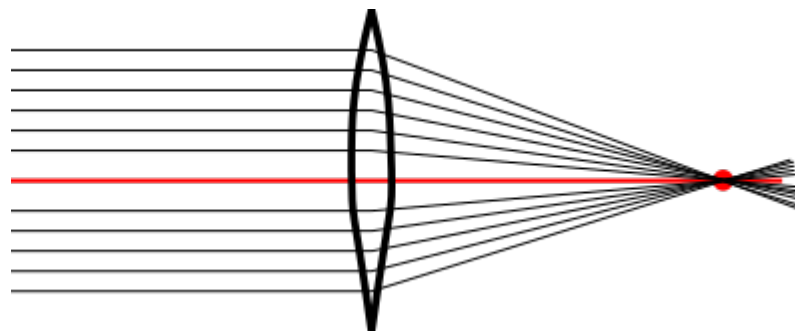
Edellisissä luvuissa käsitellyyn laskentaan päästään vasta, kun data on mitattu. Laskenta itsessään on tarkkaa, joten DIC-mittauksen onnistuminen riippuu lähes pelkästään mittauslaitteistosta ja huolellisista mittausvalmisteluista.

Laitteisto koostuu kameroista, kameraoptiikasta, kamerajalustoista sekä mittausta ohjaavasta tietokoneesta. Kaikkien näiden osien on toimittava yhteen toivotulla tavalla ja lisäksi täytettävä asetetut vaatimukset, joihin perehdytään tarkemmin myöhemmin. [10] Lisäksi koevalmisteluissa on tärkeää huomioida kokeen valaistus sekä varmistaa näytteen riittävä pintakuviointi [25].

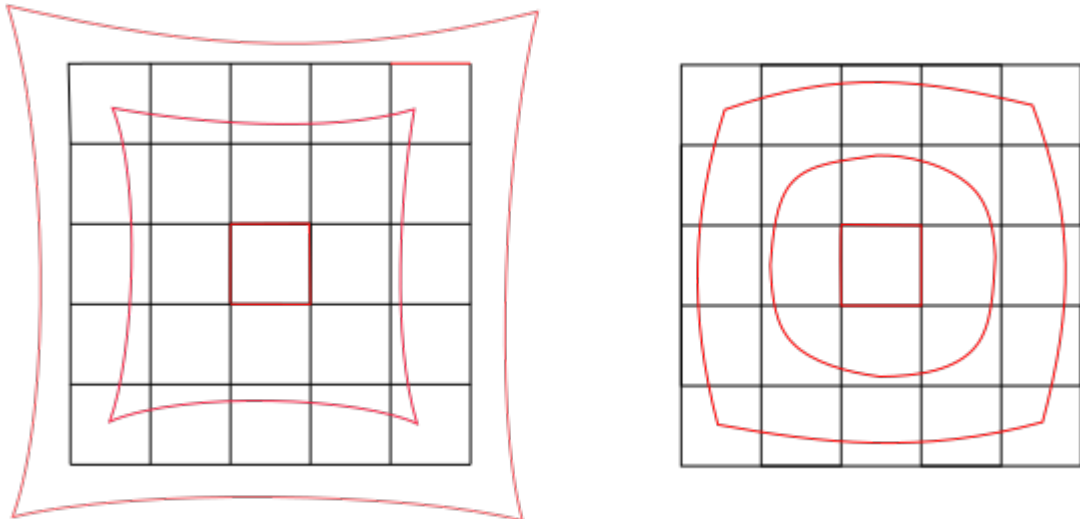
### 3.1 Linssit

Linssin tehtävä on koota näytteestä heijastuvat valonsäteet kameran sensorikennolle. Linssi taittaa siihen saapuvan valon niin, että kaikki säteet kulkevat polttopisteen lävitse [2, s. 14-16][26]. Valon taittumista on havainnollistettu kuvassa 3.1. Polttopiste on merkitty punaisella pallolla.

Mikäli linssissä on jonkinlaisia virheitä, kaikki valonsäteet eivät leikkaakaan samassa polttopisteessä. Tämä näkyy otetussa valokuvassa sumeutena tai vääristymisenä, joista kumpikin kasvattaa DIC-mittauksen epävarmuutta. Erityisen haitallisia ovat erilaiset vääristymät, sillä ne vaikuttavat näytteen havainnoituun geometriaan. [27, s. 28] Vääristymiä on havainnollistettu kuvassa 3.2. Vääristymä voi olla joko kuvassa vasemmalla esitettyä neulatyynyvääristymää, oikeanpuolista tynnyrivääristymää tai näiden yhdistelmää. Ilmiö johtuu linssin kaarevuudesta, jonka vuoksi kuvan suurennos muuttuu kuljettaessa keskel-



**Kuva 3.1.** Kokoava linssi. Vasemmalta tulevat valonsäteet taittuvat linssissä kulkemaan punaisella pallolla merkityn polttopisteen kautta.



**Kuva 3.2.** Vääristymä. Mustat viivat osoittavat, mihin suuntiin viivat kulkevat kuvattavassa esineessä, punaiset miten ne kuvautuvat vääristävän linssin lävitse. Oikealla neulatyynyvääristymä, jossa kauempana kuvan keskipisteestä sijaitsevat kohteet kuvantuvat suurempina. Vasemmalla sille käänteinen tynnyrivääristymä, jossa kaukana keskipisteestä sijaitsevat kohteet kuvantuvat pienempinä.

tä reunaan kohden. Neulatyynyvääristymässä kauempana keskipisteestä olevilla alueilla on voimakkaampi suurennos, tynnyrivääristymässä pienempi. Molemmissa vääristymän vaikutus voimistuu kun etäisyys kuvan keskipisteestä kasvaa. [28] Laskennassa oletetaan kuvan osien suhteiden vastaavan todellisuutta. Vääristyneessä kuvassa tämä ei kuitenkaan toteudu. Samanlaiset muodonmuutokset eri etäisyyksillä keskipisteestä tulkittaisiin keskenään eri suuruisiksi. [29]

Vähemmän tärkeitä virheitä on koottu taulukkoon 3.1. Astigmatismi, koma ja pallopoikkeama johtuvat vääristymän tavoin linssin muodosta. Väriaberraatio puolestaan seuraa linssin materiaalista, jossa valon eri aallonpituuksilla on eri taitekerroin. Nämä virheet aiheuttavat pääsääntöisesti jonkinlaista sumeutta. Sumeutta voi seurata myös siitä, että kuva ei ole kunnolla tarkennettu. Tämä on kuitenkin korjattavissa kameraa siirtämällä, siinä missä linssin muodosta johtuvia virheitä voidaan korjata vain laskennallisesti.

Hyvälaatuisissa linssissä on tyypillisesti vähemmän erilaisia virheitä [8]. Täysin virheetöntä linssiä on kuitenkin käytännössä mahdoton valmistaa: yhden virheen korjaus aiheuttaa uusia virheitä [8][28]. Onkin tärkeää tunnistaa millaisia virheitä mittauskäytössä olevassa linssissä on, jolloin niitä voidaan kompensoida laskennallisesti [27, s. 14]. Linsivirheiden korjausmenetelmää käsitellään tarkemmin kalibrointiosiossa 3.3.

## 3.2 Kamerat

Kamera on DIC-menetelmän pääasiallinen mittausinstrumentti. Tärkeää on tarpeeksi hyvä resoluutio, eli se, että kuvassa on riittävästi pikseleitä eikä olennaista informaatiota katoa. Mittauksissa käytetään yleensä mustavalkoisia kameroita, sillä värillisten kuvien käsittely on laskennallisesti raskaampaa ja intensiteettidataa menetetään tallennuksessa.

**Taulukko 3.1. Linssivirheet**

	syy	seuraus
Väriaberraatio [30]	eri aallonpituuksilla eri taitekerroin linssissä	värikuvassa spektrejä, mustavalkoisena sumeutta
Astigmatismi [31]	linssin muodossa virhettä	eri tasoissa kulkevilla säteillä eri polttopiste, osa kuvasta sumea
Koma[32]	linssin muodossa virhe	valonsäteet taittuvat kuvatasolle, mutta väärään paikkaan. pisteillä ikään kuin komeetan pyrstö
Pallopoikkeama[33][32]	linssin kaarevuus	kauempana linssin keskipisteestä valo taittuu joko liikaa tai liian vähän, sumeutta

Puuttuvan datan interpoloinnista aiheutuu kuvaan kohinaa, jonka minimoimiseksi suositaan konenäkökameroita. Nämä kamerat on myös suunniteltu niin, että niiden sensoreita voidaan ohjata monipuolisesti. [5]

Kameran tulee ottaa kuvia riittävällä tahdilla kokeen nopeuteen nähden, jotta informaatiota ei katoa. [5] Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuvassa 2.3 esitettyjen alijoukkojen pitää vielä limittyä. Jos liikenopeus suhteessa kuvanottotaajuuteen on niin korkea, että kuvien välissä siirrytään yli alijoukon mitta, ei korrelaation laskentakaava 2.2 enää päde. Myös valotusajan valinnassa on huomiotava koenopeus: valotusaikana tapahtuva liike ilmenee sumeutena kuvassa. Valotusaikana tapahtuva liike ei saa ylittää toivottua mittaustarkkuutta. [34]

Kameran kuvanottotahti ja kuvan resoluutio, eli se, montako pikseliä kuhunkin kuvaan tallennetaan, tyypillisesti korreloivat negatiivisesti keskenään [5]. Mittaajan on siis joskus tehtävä kompromissejä kokeen nopeuden ja tarkkuuden välillä. Tämä johtuu siitä, että datan tallentamiseen kuluu aikaa. Korkeamman resoluution kuvassa on enemmän dataa, joten sen tallentamiseen vaaditaan enemmän aikaa. Ongelmaa voidaan nopeissa mittauksissa pyrkiä korjaamaan määrittämällä kuvapinnasta vain osa tallennettavaksi. [5][34]

Tallennusnopeutta rajoittaa myös kuvan valotusaika. Ellei kameran sensoriksenno ehdi saada riittävästi valoa, tuloksena on alivalottunut kuva. Alivalottuneen kuvan kontrasti on matala, eikä pintakuvio erotu siinä kunnolla [10]. Kuva valottuu sitä nopeammin, mitä suuremman apertuurin linssiä käytetään. Toisaalta kuvan optinen resoluutio, eli se, kuinka tarkasti näyte kuvantuu kameran sensorikennolle paranee apertuuria pienentäessä. [8] Iskukokeiden kaltaisissa hyvin nopeissa kokeissa on mahdollista käyttää suurnopeuskameroita. Näissä kameroissa on valotustehostimia mahdollistamassa erittäin lyhyitä valotusaikoja. Tehostimet aiheuttavat kuvaan voimakasta kohinaa, joka haittaa laskentatarkkuutta. Valotusaikaa voidaan joissain kameroissa lyhentää myös yhdistämällä useita pikseleitä käytännössä yhdeksi suuremmaksi pikseliksi, joka ehtii samassa ajassa saada enemmän valoa. [4]

Usean kameran järjestelyissä on erittäin tärkeää, että kaikki kamerat ottavat kuvan täsmälleen samalla hetkellä. Tätä kutsutaan synkronisoinniksi. Muutaman millisekunninkin ero voi aiheuttaa virhettä, kun eri kulmissa olevat kamerat havainnoivar näytteen muuttuneen eri tavoilla. Konenäkösovelluksiin tarkoitetut kamerat useimmiten hallitsevat synkronisoinnin automaattisesti. [5] Kaikki osiossa 2.2 käsitellyt laitevalmistajat lupaavat valmispaketeilleen automaattista synkronisointia joko kameran tai mittausohjelman avulla [18][20][21][23].

Kameran jalustalta vaaditaan ennen kaikkea vakautta. Epävakaa jalusta mahdollistaa kameran liikkeen, joka laskennassa tulkitaan virheellisesti näytteen liikkeeksi. Pahimmassa tapauksessa systeemi ei kameran liikuttua ole enää kalibroitu: kamera ei esimerkiksi olekaan enää tarkennettu näytteeseen tai kuvan suurennos muuttuu kesken mittauksen. Erityisen haitallista kameran liike on useamman kameran systeemeissä, joissa yhden kameran liikuttua suhteessa muihin ei kameroiden yhteinen alue enää ole sama kuin mittauksen alussa, jolloin koko kappaleen geometrian havainnoidaan muuttuneen. Kamera ei saa myöskään päästä tärisemään. [10][11, s. 34]

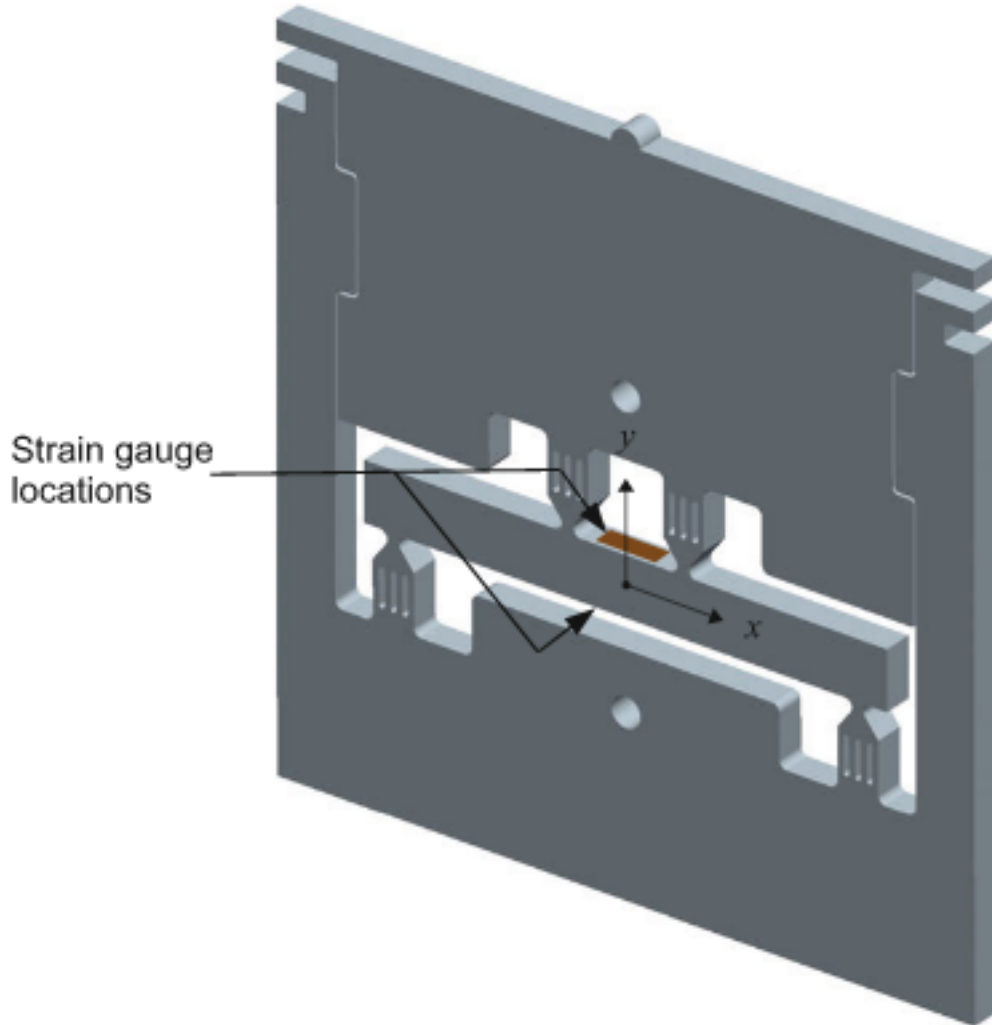
Kamera, linssi ja kameran etäisyys kohteesta valitaan yhdessä niin, että kohde mahtuu kameran kuvaan kokonaan, kuva valottuu tarpeeksi ja on riittävän tarkka [5]. Linssin polttovälin kasvattaminen pienentää kuvassa näkyvää alaa. Polttoväli vaikuttaa myös suurenokseen, jota voidaan kasvattaa linssin lisäksi kameran ja objektiivin väliin asennettavilla loittorenkailla. [8]

### 3.3 Kalibrointi

Laitteiston huolellinen kalibrointi poistaa monia mahdollisia virhelähteitä esimerkiksi varmistamalla kameroiden synkronisoinnin [9]. Kalibroidessa pyritään myös selvittämään mittaukseen liittyviä parametrejä, kuten kuvan suurennos ja linssin polttoväli [27, s. 20]. On erittäin tärkeää, etteivät nämä asetukset pääse muuttumaan kesken mittauksen, sillä tuntemattomat muutokset voivat aiheuttaa suuriakin virheitä mittaustuloksiin.

Kalibrointi suoritetaan usein kuvaamalla jonkinlaista tunnettua kappaletta, esimerkiksi mahdollisimman tarkalleen näytteen kokoista ruudukkoa ja siirtelemällä sitä hallitulla tavalla tulosten varmistamiseksi [8]. DIC-laitteiston kalibrointiin ei ole olemassa kunnollisia standardeja, mikä vaikeuttaa omalta osaltaan mittaajan työtä sekä eri mittauslaitosten tulosten vertailua [35]. Standardisation Project for Optical Techniques of Strain measurement (SPOTS) esittää kuvattavaksi kuvan 3.3 mukaista kappaletta, jota kuormitettaisiin mitaten samalla muodonmuutoksia myös venymäliuska-antureiden avulla. Tämä menetelmä noudattaa samaa periaatetta kuin vanhemman optisen mittaustekniikan, interferometrian, kalibrointi. Kalibroinnin jäljitettävyyden tarkastettu. SPOTSin metodin mukaisesti kalibroidun koejärjestelyn minimiepävarmuus on 5 % kun venymät ovat noin 120  $\mu$  ja 1.4 % kun venymät ovat 1000  $\mu$  suuruusluokassa. [35] Yhtenäisen kalibrointimetodin käyttö mahdollistaisi eri mittaajien tulosten helpomman vertailun, sillä niiden epävarmuus olisi näin varmasti samaa luokkaa keskenään.





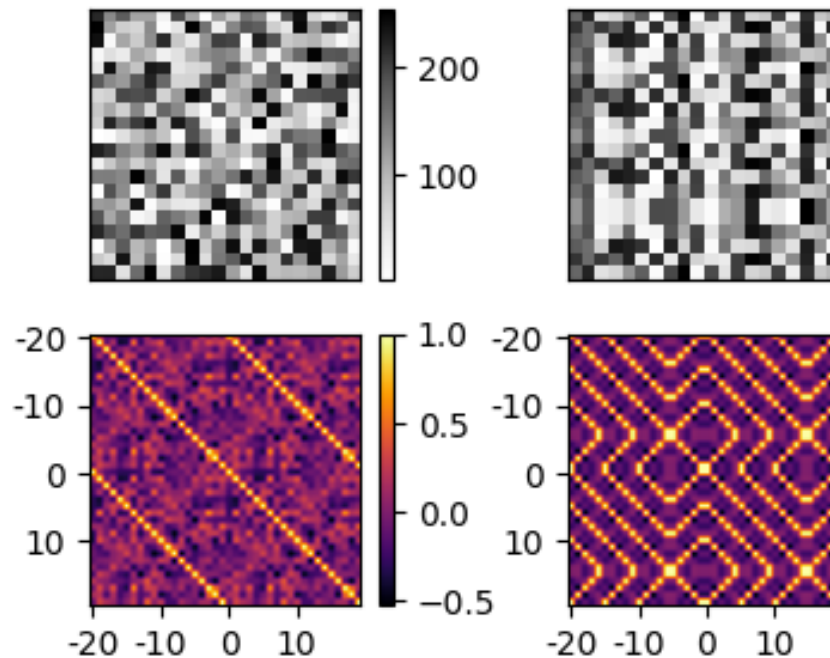
**Kuva 3.3.** SPOTS:n ehdottama kalibraatiokappale. Nuolten osoittamiin kohtiin on kiinnitetty venymäliuska-anturit (eng. strain gauge), joita käsitellään enemmän luvussa 4. Kuvan lähde [35].

Linssin tunnettuja vääristymiä voidaan kompensoida laskennallisesti, mikäli ei ole mahdollista hankkia vähemmän vääristävää linssiä [27, s. 28]. Vääristymästä johtuvan virheen suuruus voidaan selvittää liikuttamalla kuvioitua esinettä määrättyllä tavalla kameran edessä, ottamalla kuvia joiden välinen siirtymä tunnetaan, ja laskemalla korrelaatio näiden kuvien välillä. Näin tunnetaan sekä DIC:llä mitatut siirtymät että kuvion todellinen siirtymä. Vähentämällä todellinen siirtymä kokeellisesta siirtymästä saadaan virheen arvo. Kuvion siirtelyn epätarkkuudesta ja tallennetun datan kohinasta johtuva satunnaisvirhe on ennen tätä eliminoitava toistamalla siirtelyvaihetta usemman kerran. [8]

### 3.4 Koevalmistelut

Osiossa 2.1 esitellyt kaavat korrelaation laskemiseen toimivat sillä edellytyksellä, että kuvan alijoukot ovat uniikkeja. Kappaleen pintaan onkin jollain tavalla tuotettava kuvio,

joka ei ole säännöllinen tai toistuva. Säännöllisen kuvioinnin tapauksessa olisi riskinä laskea kahden alijoukon siirtyneen samaan kohtaan. [1] Tätä on havainnollistettu kuvassa 3.4.

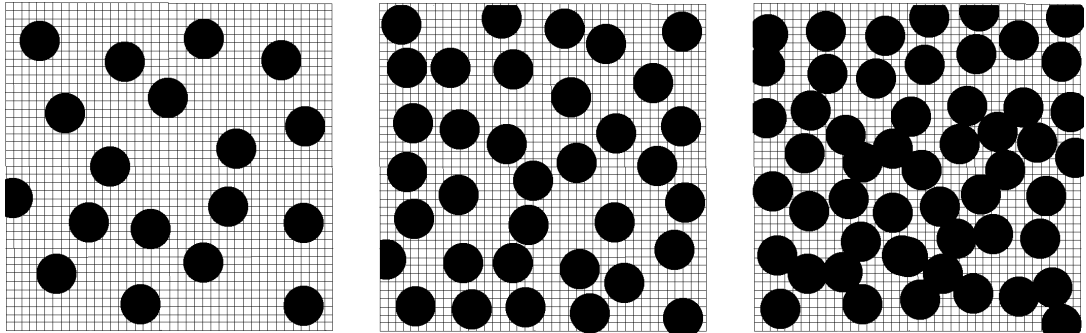


**Kuva 3.4.** Pintakuvion säännöllisyyden vaikutus laskentaan. Vasen yläkulma satunnainen kuvio, oikea yläkulma toistuva. Alarivissä kummankin kuvion korrelaatiomatriisi (korrelaatio laskettuna kaikilla  $x$ -suuntaisen siirtymän arvoilla) itsensä kanssa. Kuvan  $x$ -akseli on paljonko referenssiä on siirretty ja  $y$ -akseli paljonko vertailtavaa siirretty. Referenssi ja vertailtava tässä siis sama kuva, joita on vain siirretty toistensa suhteen. Havaitaan satunnaisen kuvion tapauksessa korkea korrelaatio lävistäjällä, eli kun referenssiä ja vertailtavaa on siirretty yhtä paljon. Toistuvassa kuviossa puolestaan saadaan täydellinen korrelaatio kaikissa kohdissa, joissa siirtymä on kuvion levyinen

Kuvassa on esitetty kaksi satunnaisgeneroitua  $20 \times 20$  kuvaa, joista vasemmanpuoleisen kuvio on satunnainen eikä toistu. Oikeanpuoleisessa kuvassa on toistuva kuvio. Kuvien alapuolelle on laskettu niiden korrelaatiomatriisit itsensä kanssa, eli kaavan 2.2 mukainen korrelaatio kaikilla  $x$ -suuntaisen siirtymän arvoilla. Epäsäännöllisen satunnaiskuvion tapauksessa korrelaation arvo on korkea vain kun kuviota ei ole siirretty itsensä suhteen. Säännöllisen kuvion korrelaatio itsensä kanssa on korkea aina, kun siirtymä on kuvion leveyden monikerta, mikä havaitaan toistuvina kirkkaina alueina alarivin kuvassa.

Kuvioon kohdistuu vaatimuksia myös sen kontrastin ja pilkkukoon suhteen. Liian matalan kontrastin kuvio ei erotu kunnolla, jolloin tarkastelu on vaikeaa. Havaittavaan kontrastiin vaikuttaa myös valaistus: liian hämärässä kontrasti vähenee. Kuvion koko ei saa olla liian suuri eikä liian pieni, samoin kuviotiheyden tulee olla sopiva. Nämä vaatimukset juontuvat kuvan digitoinnista (kuva 2.1). Liian pieni kuvio ei tallennu selkeästi, vaan sekoittuu ympäröivään pohjaväriin, kun pikselin intensiteetin keskiarvo lasketaan. Liian harvalla kuviolla

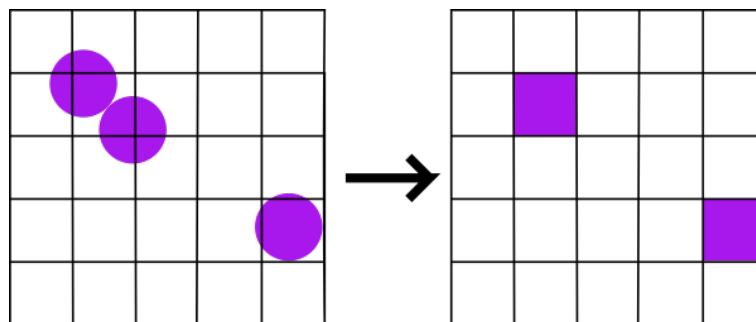
ei joihinkin kuvan alijoukkoihin välttämättä osu kuviota lainkaan, jolloin niiden uniikkisuus ei toteudu. Liian tiheällä kuviolla käänteisesti pohjaväriin alueet jäävät liian pieniksi. Tätä kuvioiden sekoittumista kutsutaan aliasoinniksi, ja sitä käsitellään tarkemmin luvussa 3. Sopiva koko kuviolle (yksittäiselle pilkulle) on noin 3-7 px [25][36]. Sopivaa kuvioitiheyttä on havainnollistettu kuvassa 3.5. Vasemmanpuolimmaisessa kuvassa kuviot ovat liian harvoja, keskimmaisessä sopivia ja oikeanpuolimmaisessa liian tiheitä. Laskennallisesti on toivottavaa, että noin 50% kappaleen pinta-alasta olisi kuvion peitossa ja noin 50% siten pohjaväriä [36].



**Kuva 3.5.** Satunnaisia pilkkukuvioita. Pilkkutiheys vasemmalta oikealle: liian harva, sopiva, liian tiheä

Kuvion on muutettava muotoaan samalla tavoin kuin kappaleen pinta. Sen täytyy siksi olla täysin sitoutunut pintaan ja käyttäytyä kuormituksessa samalla tavoin kuin kappale itse. Hauraassa kappaleessa myös kuvion on käyttäytyttävä hauraasti ja sitkeässä sitkeästi. [1][37] Yleisimpiä kuvioita ovat mustavalkoiset maaliroiskekuviot, joita voidaan saada aikaan esimerkiksi spraymaalilla. Niissä saavutetaan hyvä kontrasti ja satunnaisuus, mutta kuvion kokoa on vaikea säädellä. Metallisissa näytteissä kuviona voidaan käyttää esimerkiksi etsatussa pinnassa näkyviä raerajoja, joiden hyvä puoli on taattu materiaalin mukainen käyttäytyminen. [1][11, s. 26-28]

Samantyyppisissä oloissa hyvin tai huonosti kuvioitujen näytteiden mittauksen tarkkuuden ero voi olla jopa 20% [10]. Tämä johtuu pitkälti pilkkujen aliasoitumisesta. Aliasoituminen tarkoittaa sitä, että kaksi eri muotoa kuvantuvat samantyyppisiksi. Saadusta kuvasta ei ole

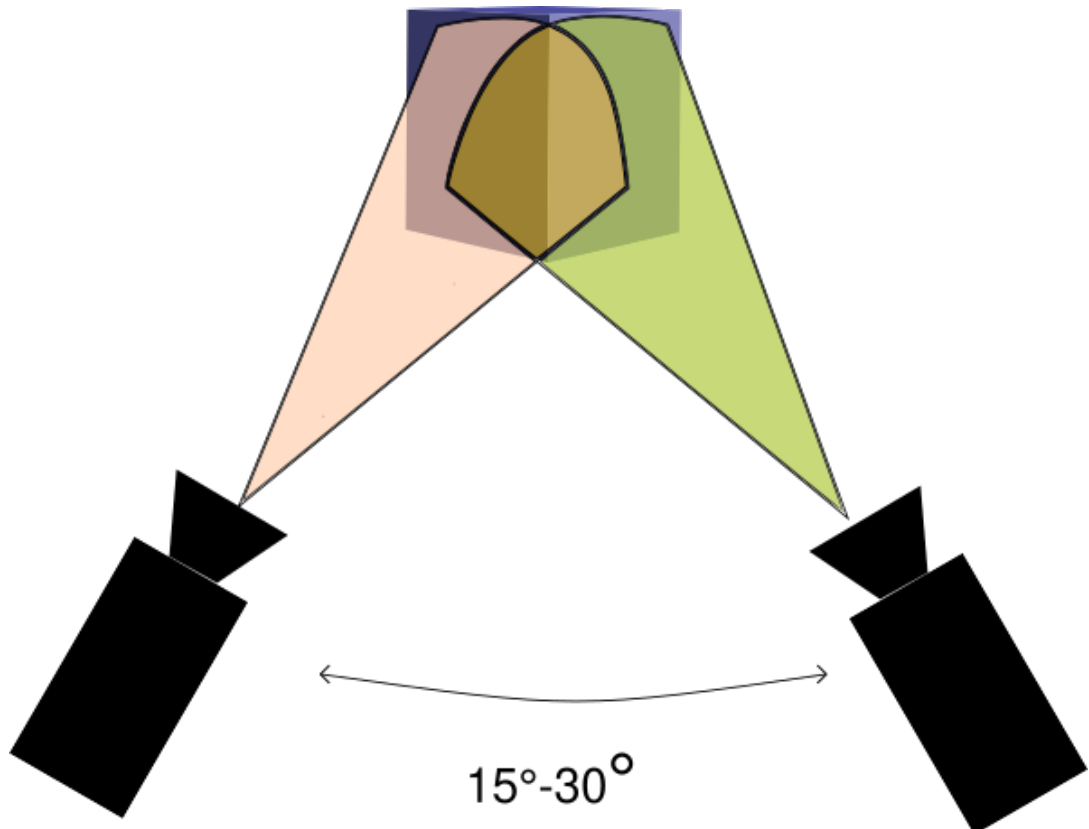


**Kuva 3.6.** Aliasoituminen. Tässä kuviossa kaikki, missä on yli 50% violettiä aluetta muuttuu digitoimissa (kuva 2.1) violetiksi, muu valkoiseksi. Sekä yläkulman kaksi pilkkua että alakulman yksi pilkku muuttuvat digitoimissa yhdeksi violetiksi pikseliksi, jolloin kuvioita ei voida digikuvassa enää erottaa.

mahdollista päätellä, kumpi muoto on alunperin ollut läsnä. [25] Asiaa on havainnollistettu kuvassa 3.6. Oikealla esitetyistä tallennetuista ei voida päätellä kumpi vasemmanpuolisista on todellinen alkuperäistilanne.

Huolellisesti tuotetun pintakuvion lisäksi on huomioitava myös valaistuksen vaikutus. Sekä ali- että ylivalottuminen heikentävät kuvan kontrastia, jolloin kuviot eivät erotu taustastaan riittävän hyvin [10]. Seurauksena on kuvan kasvanut kohina. Valaistuksen muutos kesken koetta aiheuttaa myös virhettä, sillä valo heijastuu silloin näytteen samasta kohdasta eri tavalla. Tämä vaikeuttaa korrelaation laskemista. [27, s. 29]

Kuvion ohella myös kameroiden asettelulla on suuri merkitys mittauksen onnistumisen kannalta [1][9]. Yhden kameran kaksiulotteisessa mittauksessa kameran on sijaittava kohtisuorassa tarkasteltavan tason suhteen. Useamman kameran mittauksissa kameroiden sijainti toisiinsa nähden vaikuttaa saatavaan tietoon. Kuvassa 3.7 esitetään stereokamerasysteemi. Kahden kameran tarkastelualueet leikkaavat osittain. Pienempi stereokulma kasvattaa leikkauksen osuutta kuvamateriaalista, suurempi kulma puolestaan johtaa suurempaan eroon kuvien välillä. Kulman kasvattaminen lisää tästä syystä tason ulkopuolisten muodonmuutosten varmuutta tasomuutosten varmuuden kustannuksella. Stereokulma on yleensä 15-35 astetta [38].



**Kuva 3.7.** Havainnekuva koejärjestelystä. Kameroiden näkemä alue on esitetty värillisillä kiilloilla. Vasemmanpuoleinen kamera kuvaa enimmäkseen kuution vasenta tahkoa (oranssi kiila), oikeanpuoleinen oikeaa (vihreä kiila), mutta molemmat kattavat myös kulmasta riippuvan leikkauksen (keltainen).

## 4 KÄYTTÖKOHTEET JA VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN

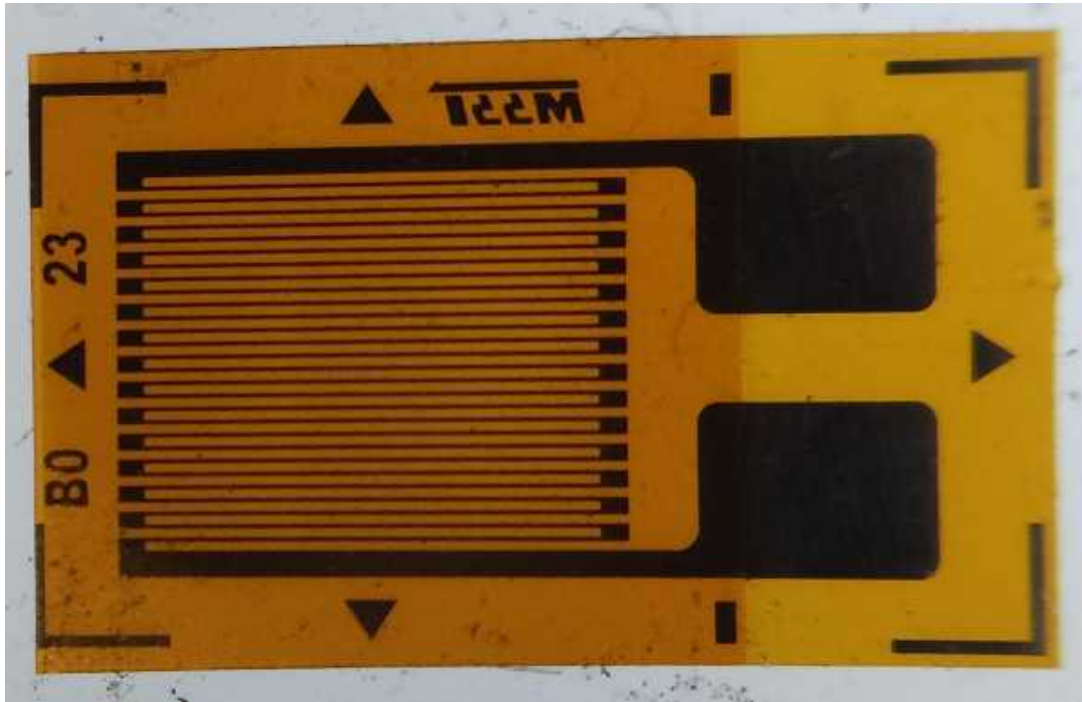
Tässä luvussa tarkastellaan ensin DIC:tä verrattuna muihin muodonmuutoksen mittaukseen soveltuviin antureihin. Tämän jälkeen pohditaan menetelmän käyttökohteita.

### 4.1 Vertailu muihin menetelmiin

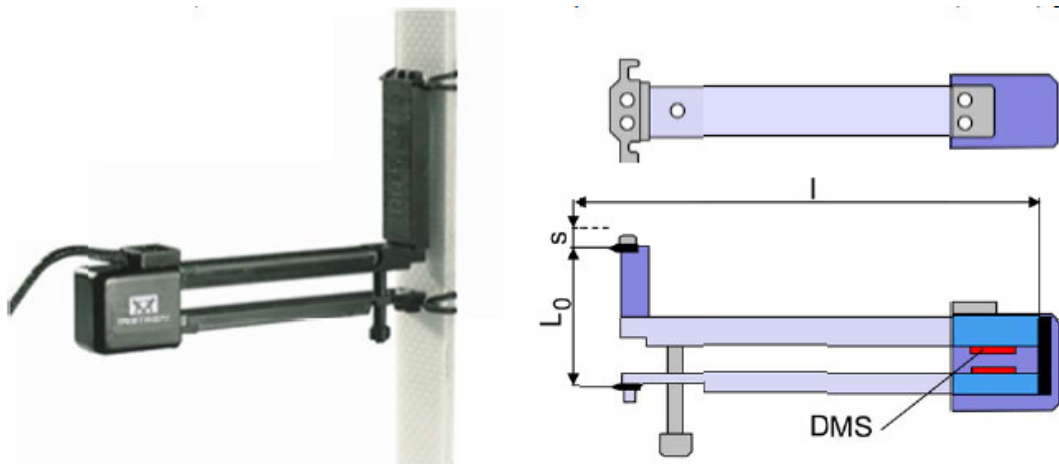
Kappaleen muodonmuutosten seuraamiseen voidaan käyttää kuvakorrelaation lisäksi esimerkiksi venymäliuska-antureita. Anturit sisältävät kierteisen metallikappaleen, jonka resistanssi muuttuu kun anturi muuttaa muotoaan. [39, s. 65-71][40] Kuvassa 4.1 on esitetty tyypillinen venymäliuska, jossa johtava kalvo on taiteltu haitarimaiseen muotoon. Venymäliuskat ovat DIC-menetelmää tarkempia pienillä muodonmuutoksilla sekä puristuskokeissa, joissa pintakuvio muuttuu helposti tunnistamattomaksi [3]. Liuskat on liimattava näytteeseen hyvin tiukasti, joten niitä ei voida käyttää uudelleen [41, s. 81]. Ne myös soveltuvat pidempiin syklisen rasituksen kokeisiin vain rajoitetusti, koska liuskan sisältämä johdinkappale väsy [42]. Yleiskäyttöliuskoille tämä väsymisraja noin  $1.2 \times 10^7$  toistoa. Venymäliuskat ovat muihin menetelmiin verrattuna paljon edullisempia, joten jos tehtäviä mittauksia on vain vähän, ovat ne taloudellinen valinta [43][44].

Erilaisia venymäliuskoja on saatavilla moniin eri tarkoituksiin, erisuuruisille venymille, eri materiaaleille ja koeolosuhteille [40]. Erona on esimerkiksi johtimen koko, muoto ja materiaali sekä kalvon materiaali ja kiinnitysmenetelmä. Suunnitellun mitta-alueen ulkopuolella johtimen muodonmuutuskäyttäytyminen alkaa aiheuttaa virhettä mittaukseen [39, s. 65-71]. Tavallisimpien materiaalityyppien standardinmukaisten mittausten suorittamiseen soveltuvat venymäliuskat ovat hinnaltaan joitain kymmeniä euroja, erityisempien tarkoitusten mittatilausliuskat voivat maksaa useita satoja euroja [44][43].

Ekstensometrit ovat venymäliuskoihin perustuvia mittalaitteita, jossa on näytteeseen helposti kiinnitettävät leuat tai koukut. Koska ekstensometria ei tarvitse liimata pysyvästi näytteen pintaan, sen käyttökerrat ovat käytännöllisesti katsoen rajattomat. Myös ekstensometrejä on saatavilla eri venymäalueille. Kuvassa 4.2 on esitetty lyhyen matkan ekstensometri ja sen rakenne. Ekstensometrin kiinnitysleuat asettavat usein joitain rajoitteita näytegeometrialle. Ekstensometrit ovat useita kertaluokkia venymäliuskoja kalliimpia. Tästä syystä herkätkä lyhyen matkan ekstensometrit usein irrotetaan näytteestä jo ennen murtumaa ekstensometrin suojelemiseksi. [41, s. 83]



**Kuva 4.1.** Venymäliuska [45]. Tumma haitarikuvioiden johdinmateriaalista valmistettua ohutta kalvoa, joka on kiinnitetty käsittelyä helpottavaan muovikalvoon.



**Kuva 4.2.** Lyhyen matkan ekstensometri [46]. Vasemmalla näytteeseen kiinnitetty ekstensometri. Oikealla ylhäällä sama ekstensometri kuvattuna ylhäältä päin. Oikealla alhaalla kaavakuva, joka osoittaa venymäliuskan (kuvassa DMS) sijainnin ekstensometrin perässä sen leukoihin kiinnitettyinä.

Nimestään huolimatta pitkän matkan ekstensometri ei toimi samalla periaatteella kuin lyhyen matkan ekstensometri. Pitkän matkan ekstensometrin kumpikin kiinnitysleuka on kiinnitetty omaan vetopyöräänsä, jonka varassa se liikkuu vapaasti sileää tankoa myöten. Leukojen etäisyyden muutos vetää niitä yhdistävää kaapelia. Tämä kaapeli on kiinnitetty potentiometriin, jonka resistanssia se muuttaa kulkiessaan. Leukojen irrallisuus toisistaan mahdollistaa niille suuremman liikunta-alueen. Tällainen ekstensometri voidaan myös jättää näytteeseen sen murtumaan saakka. [47]

Sekä ekstensometrit että venymäliuskat mittaavat kiinnityskohtansa keskimääräistä muutosta. Erilaiset lokalisoituneet muodonmuutokset kuten kuroutuminen haittaavatkin tuloksen luotettavuutta. DIC pystyy erottelamaan eri puolilla kappaletta tapahtuvia muodonmuutoksia, jolloin on mahdollista esimerkiksi tarkastella erikseen sekä kuroumaa että muuta näytettä. [48]

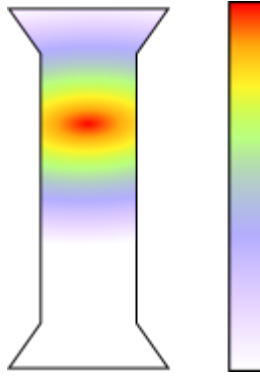
Käsiteltyjen mittausmenetelmien erot on koottu taulukkoon 4.1. Taulukkoon valitut venymäliuskojen ominaisuudet ovat Kyowan KFGS-sarjan yleiskäyttövenymäliuskojen ominaisuuksia[49]. Erilaisiin erikoistarkoituksiin tarkoitettujen venymäliuskojen lisäksi minkä tahansa ominaisuuden osalta. Toisaalta myös erilaisten DIC-laitteistojen välillä on luontaisesti eroja. Laadukas konenäkökamera antaa tarkempia tuloksia kuin vaikkapa tavallinen USB-kamera, ja näiden hintaero on myös huomattava [5]. Kaikkia mahdollisia laitteistokokoonpanoja ei siten ole mahdollista tai järkevää vertailla. Tämän taulukon hinta-arvio vastaa LaVisionin valmiita StrainMaster-järjestelmiä, joihin sisältyy kaikki ohjelmistoista kamerajalustaan [23].

**Taulukko 4.1.** Venymäantureiden vertailu

	kontakti	käyttökerrat	tarkkuus $\mu$	mitta-alue (%)	hinta €
DIC	ei	monta	>150[50][10]	-40-10000 [5][10]	20-40×10 <sup>3</sup>
Venymäliuska	kyllä	yksi	0.5[51]	±5.0[40]	10-30[43]
Ekstensometri, lyhyt[52]	kyllä	monta	10-100	-50-100	1-20×10 <sup>3</sup>
Ekstensometri, pitkä[47]	kyllä	monta	200-500	-90-7500	1-20×10 <sup>3</sup>

Taulukosta 4.1 voidaan havaita hinnan suuruusluokkaero. Taulukossa ei ole venymäliuskojen kohdalla otettu huomioon datan tallennuslaitteiston tuottamaa kertakustannusta. Tämänkin hankinnan jälkeen ovat venymäliuskat siis vähän mittaavalle huomattavasti edullisin vaihtoehto. Jatkuvia mittauksia tekeväälle tutkimuslaitokselle kannattavuus kallistuu suuremmat toistokerrat sallivien laitteiden puolelle.

DIC on vertailluista menetelmistä uusin. Jonkinlaisia ekstensometrejä on kehitetty jo 1800-luvun loppupuolella [53]. Venymäliuska keksittiin ja patentoitiin 1930-luvun loppupuolella, minkä jälkeen niiden käyttö yleistyi nopeasti tarkkuuden ja käytännöllisyyden vuoksi[54]. Kuvakorrelaation käyttö muodonmuutosten määrittämiseksi esiteltiin ensimmäistä kertaa 1980-luvulla[55]. Sen yleistyminen alkoi vasta 2000-luvulla, digitaalikameroiden laadun ja saatavuuden parannuttua[2, s. 9]. DIC:n käyttöönottoon onkin hinnan lisäksi myös opettelukynnys, sillä menetelmä on useimmille mittajille täysin uusi.



**Kuva 4.3.** Muodonmuutoksen lokalisoituminen. Punainen väri suuri venymä, violetti pieni, muu spektri välissä. Monet DIC-ohjelmat tuottavat tämänkaltaisia lämpökarttoja muodonmuutoksesta, jolloin käyttäjän on helppo havainnoida erilaisia muodonmuutosalueita.

## 4.2 Soveltuvuus

Edellisessä osiossa käsiteltiin DIC-menetelmää verrattuna toisiin menetelmiin. Tilanteissa, joissa menetelmien soveltuvuuden välille ei muodostu olennaisia eroja, DIC on harvoin laboratorion ensimmäinen valinta johtuen sen uutuudesta ja hankintakustannuksia [41, s. 84]. Menetelmää käytetäänkin verrattain vähän rutiininomaisissa, standardinomaisissa aineenkoetuskokeissa, vaikkeivät sen ominaisuudet rajoita soveltuvuutta. Tällaisissa kohteissa vanhojen menetelmien korvaaminen ei vain ole tarpeellista tai kannattavaa. Kimmokertoimen määrittämisen kaltaisiin tarkkoihin mittauksiin venymäliuskat ja lyhyen matkan ekstensometrit soveltuvat DIC:tä paremmin, kuten taulukosta 4.1 voidaan havaita. DIC on epätarkempi myös hyvin nopeissa kokeissa johtuen suurnopeuskameroiden huonosta resoluutiosta, jonka syitä käsiteltiin osiossa 3.4. DIC:n tärkeimpiä käyttökohteita ovatkin sellaiset, joissa sen erityisominaisuuksista on merkittävää etua perinteisempiin menetelmiin verrattuna.

Eräs DIC-menetelmän huomattava etu on sen kontaktittomuus. On olemassa muitakin optisia mittaussuunnitelmia, kuten erilaiset interferometriset menetelmät, mutta DIC on niistä nykyään eniten käytetty. Interferometriä vaatii tyypillisesti paljon mittaussuunnittelua ja näytteen pinnalta, mistä syystä niitä ei käytetä kovinkaan laajalti. [3] Kontaktittomuudesta on hyötyä erityisesti erilaisten herkkien materiaalien, kuten biomateriaalien ja pintajännityksille arkojen komposiittien tapauksessa [27, s. 32][56][41, s. 83]. DIC:tä käytetään myös haastavissa oloissa tehtäviin kokeisiin, kuten elektronimikroskoopissa suoritettaviin *in-situ* -kokeisiin sekä olosuhdekaapeissa tehtäviin kokeisiin [57][58]. Näihin kokeisiin vaadittaisiin kontaktiantureilta erityisiä ominaisuuksia. DIC:n tapauksessa riittää hyvä visuaalinen yhteys.

Joissain tapauksissa DIC:n soveltuvuutta rajoittaa se, että kokeen näkemiseen vaadittava optiikka aiheuttaa liian paljon erilaisia virheitä, jolloin tulokset eivät ole enää luotettavia [8]. Esimerkiksi boroskoopit ovat tämän suhteen hyvin haasteellisia, joten on suora näkyvyys näytteeseen on toivottavaa [59].



Kontaktittomuuden lisäksi myös koko pinnan kuvantaminen kerralla on tärkeä etu. Kuten osiossa 4.1 todettiin, venymäliuskat ja ekstensometrit tutkivat vain kiinnityskohtansa keskimääräistä muodonmuutosta. DIC-menetelmällä saadaan tieto kaikkien alijoukkojen liikkeestä erillisenä toisistaan, jolloin mittadatasta voidaan havainnoida monia samanaikaisia muodonmuutoksia eri puolilla kappaletta. Esimerkiksi kuvassa 4.3 esitetyn kouruman muodostuminen voidaan tarkastella erillisenä muun kappaleen vähäisemmästä muodonmuutoksesta. Koko muodonmuutosjakauman tarkastelu mahdollistaa myös vertailukelpoisemmat tulokset epätavallisemman muotoisten näytteiden tapauksessa, mikäli jostain syystä standardinäytteiden käyttö ei ole mahdollista [4]. Ominaisuutta on hyödynnetty esimerkiksi kokonaisen tuulimyllyn lavan tarkasteluun. Kokeessa havaittiin muodonmuutoksen keskittyminen tunnetun särön kohdalle. Menetelmällä voitaisiin siis tunnistaa murtuman kohta jo ennakoivasti. [60]

## 5 YHTEENVETO

DIC perustuu tutkittavasta kappaleesta otetun videon kuvien vertailuun keskenään. Kuvista valikoidaan pienempiä alijoukkoja, joista kunkin siirtymä lasketaan. Sama toimenpide suoritetaan koko kuvalle, joten menetelmä tuottaa kattavasti tietoa kaikista kuvattavalla alueella tapahtuvista muodonmuutoksista. Laskentaan käytetään useimmiten ristikorrelaatioalgoritmia, jolla lasketaan minkä suuruisella siirtymällä kuviot osuisivat parhaiten kohdakkain. Laskennalla saadaan erittäin tarkkoja tuloksia, kunhan mitattu data on tarkkaa ja todenmukaista. Esimerkiksi kuvan sumeus ja virheet kappaleen geometrian kuvantamisessa aiheuttavat virhettä laskennassa.

Merkittävimmät virhelähteet liittyvät laitteistoon ja koejärjestelyihin. Käytettävä kamerajärjestelmä koostuu monesta osasta, joiden kaikkien on toimittava hyvin yhdessä. Mittauksissa käytetyt kamerat ovat useimmiten mustavalkoisia konenäkökamaroita, joiden ohjausliittymä soveltuu hyvin mittaukseen ja kuvien kohina on vähäistä. Yhdellä kameralla voidaan tutkia tasossa tapahtuvia muodonmuutoksia, useampi kamera mahdollistaa kolmiulotteisen tarkastelun. Usean kamerasysteemeissä on hyvin tärkeää, että kaikki kuvat otetaan yhtäaikaisesti. Kameroiden asento ei saa muuttua kesken mittauksen, koska tämä liike tulkitaan laskennassa kappaleen muodonmuutokseksi.

Täysin virheettömiä linsejä ei ole mahdollista valmistaa, joten linseistä aiheutuu aina jonkin verran epäluotettavuutta. Useimmat linssivirheet, kuten väriaberraatio, astigmatismi ja pallopoikkeama, aiheuttavat kuvaan lähinnä sumeutta. Mittauksen kannalta haitallisin linssivirhe on mahdollinen vääristymä, jossa kuvan suurennos muuttuu keskeltä reunaan kohti kuljettaessa. Tällöin saman mittainen siirtymä eri puolilla kuvaa tulkitaan virheellisesti eri mittaiseksi. Vääristymää, kuten muitakin linssivirheitä, voidaan kompensoida myös laskennallisesti. Linssien valinnassa on virheiden lisäksi tärkeää huomioida sopiva apertuuri, jotta kuviin saadaan hyvä resoluutio ja ne ehtivät valottua tarpeeksi.

Koetta valmistellessa varmistetaan edellisten kohtien täytyminen ja laitteiston asetukset. Tarkkojen mittaustulosten saavuttamiseksi on huolehdittava myös sopivasta valaistuksesta, sekä siitä, että kappaleessa on hyvin erottuva pintakuvioiden yksityiskohtat eivät saa myöskään olla toistuvia, jotta alijoukkojen siirtymät ja siten muodonmuutos voidaan laskea yksiselitteisesti.

DIC-menetelmän etuja perinteisempiin venymäliuskoihin ja ekstensometreihin verrattuna ovat sen kontaktittomuus sekä mahdollisuus erotella missä kohdissa muodonmuutosta tarkalleen ottaen tapahtuu. Esimerkiksi biomateriaalit ovat usein niin herkkiä, että niihin

on hyvin vaikeaa kiinnittää anturi vahingoittamatta näytettä. Huonoja puolia ovat laitteiston korkea hankintakustannus sekä mittauksen monimutkaisuus. Menetelmällä voidaan saavuttaa hyvin tarkkoja tuloksia, mutta tämä edellyttää myös mittaajalta tarkkuutta monen eri asian suhteen. DIC:tä käytetään siksi ainakin toistaiseksi lähinnä sellaisissa sovelluksissa, joissa sen ominaisuuksista on huomattavaa etua. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi herkkien materiaalien analyysit, syklisen rasituksen kokeet, joissa perinteinen anturi saattaa väsyä tutkittavan kappaleen mukana sekä monimutkaiset rasitusympäristöt, kuten esimerkiksi tuulimyllyn lavat.

## LÄHTEET

- [1] M. A. Sutton. Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Toim. W. Sharpe. Boston, MA: Springer, 2008.
- [2] M. Sutton et al. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*. Tammikuu 2009. ISBN: 978-0-387-78746-6. DOI: 10.1007/978-0-387-78747-3.
- [3] C. Sciammarella. Optical Techniques That Measure Displacements: A Review of the Basic Principles. *Optical Measurements, Modeling, and Metrology. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Toim. T. Proulx. Vol. 5. Society for Experimental Mechanics. New York, NY: Springer, 2011, 155–180.
- [4] F. Pierron et al. Ultra High Speed DIC and Virtual Fields Method Analysis of a Three Point Bending Impact Test on an Aluminium Bar. eng. *Experimental mechanics* 51.4 (2010), 537–563. ISSN: 1741-2765.
- [5] P. Reu. Stereo-rig Design: Camera Selection—Part 2. eng. *Experimental Techniques* 36.6 (2012), 3–4. ISSN: 0732-8818.
- [6] M. Küntz et al. Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33.11 (2006), 1418–1425. DOI: 10.1139/106-106. eprint: <https://doi.org/10.1139/106-106>. URL: <https://doi.org/10.1139/106-106>.
- [7] R. Wu et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering* 65 (2015). Special Issue on Digital Image Correlation, 38–45. ISSN: 0143-8166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.04.020>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816614001158>.
- [8] P. Reu. Stereo-rig design: Lens selection—part 3. eng. *Experimental Techniques* 37.1 (2013), 1–3. ISSN: 0732-8818.
- [9] Y. Wang et al. Application of a Multi-Camera Stereo DIC Set-up to Assess Strain Fields in an Erichsen Test: Methodology and Validation. *Strain* 49.2 (2013), 190–198. DOI: 10.1111/str.12027. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/str.12027>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/str.12027>.
- [10] P. Reu. Stereo-rig design: Creating the stereo-rig layout—part 1. eng. *Experimental Techniques* 36.5 (2012), 3–4. ISSN: 0732-8818.
- [11] E. Jones et al. *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*. International Digital Image Correlation Society, 2018. URL: <http://idics.org/guide/>.

- [12] D. Hale. CWP-544 An efficient method for computing local cross-correlations of multi-dimensional signals (tammikuu 2006).
- [13] A. A. Grebenyuk ja V. P. Ryabukho. Digital image correlation with fast Fourier transform for large displacement measurement. *Saratov Fall Meeting 2010: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XII*. Toim. V. V. Tuchin ja E. A. Genina. Vol. 7999. International Society for Optics ja Photonics. SPIE, 2011, 68–72. DOI: 10.1117/12.887673. URL: <https://doi.org/10.1117/12.887673>.
- [14] K. A. Stetson. Analysis of speckle photographs by subtracting phase functions of digital Fourier transforms. *Optical Measurements, Modeling, and Metrology. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Toim. T. Proulx. Vol. 5. Society for Experimental Mechanics. New York, NY: Springer, 2011, 199–207.
- [15] R. Fisher et al. *Fourier Transform*. 2003. URL: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/fourier.htm> (viitattu 21.06.2020).
- [16] T. K. Rawat. Oxford University Press, 2015. ISBN: 978-0-19-808193-7. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDSP00003/digital-signal-processing/digital-signal-processing>.
- [17] C. Barthes. *Optecal*. 2020. URL: <http://optecal.com/> (viitattu 09.09.2020).
- [18] GOM GmbH. *GOM Correlate*. 2020. URL: <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html> (viitattu 09.09.2020).
- [19] S. N. Olufsen et al.  $\mu$ DIC: An open-source toolkit for digital image correlation. *SoftwareX* 11 (2020), 100391. ISSN: 2352-7110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100391>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711019301967>.
- [20] Correlated Solutions Inc. *The VIC-3D 8 System*. 2020. URL: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/> (viitattu 21.08.2020).
- [21] Dantec Dynamics. *Digital Image Correlation (DIC)*. 2020. URL: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/> (viitattu 21.08.2020).
- [22] Trillion Quality Systems. *ARAMIS. Strain & Displacement Measurements*. 2020. URL: <https://trillion.com/aramis/> (viitattu 21.08.2020).
- [23] LaVision Inc. *StrainMaster DIC*. 2020. URL: <https://www.lavision.de/en/applications/materials-testing/system-components/dic-software/index.php> (viitattu 21.08.2020).
- [24] isi-sys GmbH. *Digital Image Correlation: Vic-Software*. 2020. URL: <http://www.isi-sys.com/software/vic-software/> (viitattu 10.09.2020).
- [25] P. Reu. All about Speckles: Aliasing. *Experimental Techniques* 38.5 (2014), 1–3. DOI: 10.1111/ext.12111. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ext.12111>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ext.12111>.
- [26] R. Fitzpatrick. *Thin Lenses*. 2007. URL: <https://farside.ph.utexas.edu/teaching/3021/lectures/node140.html> (viitattu 26.10.2020).

- [27] A. Soltani. *In-Vivo Digital Image Correlation Studies of the Motion and Deformation of the Human Heart during Open Heart Surgery*. Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta - Faculty of Engineering ja Natural Sciences, 2020.
- [28] B. Hönlinger ja H. H. Nasse. *Distortion*. 2009. URL: <https://lenspire.zeiss.com/photo/app/uploads/2018/04/Article-Distortion-2009-EN.pdf> (viitattu 13.09.2020).
- [29] Q. Sun et al. Lens distortion correction for improving measurement accuracy of digital image correlation. eng. *Optik (Stuttgart)* 126.21 (2015), 3153–3157. ISSN: 0030-4026.
- [30] H. Karttunen. *Väriaberraatio*. URL: <http://www.astro.utu.fi/zubi/optics/chromab.htm> (viitattu 16.10.2020).
- [31] P. van Walree. *Astigmatism and field curvature*. 2017. URL: <https://web.archive.org/web/20170720024633/http://toothwalker.org/optics/astigmatism.html> (viitattu 26.10.2020).
- [32] A. E. Conrady. Dover Publications, 1988. ISBN: 978-0-486-67008-9. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpA00DP0T3/applied-optics-optical/applied-optics-optical>.
- [33] P. van Walree. *Spherical aberration*. 2016. URL: <https://web.archive.org/web/20160715135830/http://www.toothwalker.org/optics/spherical.html> (viitattu 26.10.2020).
- [34] P. L. Reu ja T. J. Miller. The application of high-speed digital image correlation. eng. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 43.8 (2008), 673–688. ISSN: 0309-3247.
- [35] C. Sebastian ja E. A. Patterson. Calibration of a digital image correlation system. eng. *Experimental Techniques* 39.1 (2015), 21–29. ISSN: 0732-8818.
- [36] P. Reu. All about speckles: Speckle Size Measurement. *Experimental Techniques* 38.6 (2014), 1–2. DOI: 10.1111/ext.12110. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ext.12110>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ext.12110>.
- [37] Y. Barranger et al. Strain Measurement by Digital Image Correlation: Influence of Two Types of Speckle Patterns Made from Rigid or Deformable Marks. *Strain* 48.5 (2012), 357–365. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2011.00831.x. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1475-1305.2011.00831.x>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-1305.2011.00831.x>.
- [38] P. Reu. Stereo-rig Design: Stereo-Angle Selection – Part 4. *Experimental Techniques* 37.2 (2013), 1–2. DOI: 10.1111/ext.12006. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ext.12006>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ext.12006>.
- [39] W. Nawrocki. *Measurement Systems and Sensors*. Artech House, Inc, 2005. ISBN: 9781580539456.

- [40] Kyowa Electronic Instruments Co. *KFGS Series. General-purpose Foil Strain Gages*. URL: [https://www.kyowa-ei.us/eng/product/category/strain\\_gages/kfgs/index.html](https://www.kyowa-ei.us/eng/product/category/strain_gages/kfgs/index.html) (viitattu 14. 09. 2020).
- [41] P. R. Byron et al. Test Specimen Preparation, Strain and Deformation Measurement Devices, and Testing Machines. *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. 4th Edition ed. Taylor & Francis, 2014, 73–86. ISBN: 1439848580.
- [42] HBM Inc. *The Fatigue Life of Electrical Foil Strain Gauges and the Limits of Durability Testing*. 2020. URL: <https://www.hbm.com/en/8153/fatigue-life-of-electrical-strain-gauges/> (viitattu 18. 07. 2020).
- [43] Elkome Oy. *Venymäliuskat*. 2020. URL: [https://shop.elkome.com/fi/anturit/venymaliuskat?seo\\_name=Yleisk%C3%A4ytt%C3%B6inen+venym%C3%A4liuska](https://shop.elkome.com/fi/anturit/venymaliuskat?seo_name=Yleisk%C3%A4ytt%C3%B6inen+venym%C3%A4liuska) (viitattu 03. 09. 2020).
- [44] Digi-Key Electronics. *Strain Gauges*. 2020. URL: <https://www.digikey.fi/products/fi/sensors-transducers/strain-gauges/559?FV=-8%5C%7C559&quantity=0&ColumnSort=1000011&page=1&pageSize=25> (viitattu 15. 07. 2020).
- [45] Pleriche. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/untuned\\_strain\\_gauge.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/untuned_strain_gauge.jpg) (viitattu 26. 08. 2020).
- [46] Oluschinski. URL: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Datei:Dms1.jpg> (viitattu 26. 08. 2020).
- [47] Illinois Tool Works Inc. *Instron Long Travel XL Extensometer*. 2018. URL: <https://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2007/03/2603-080-long-travel-extensometer.pdf> (viitattu 14. 09. 2020).
- [48] Y. Wang et al. Whole field sheet-metal tensile test using digital image correlation. *Experimental Techniques - EXP TECH* 34 (maaliskuu 2010), 54–59. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2009.00483.x.
- [49] Kyowa Electronic Instruments Co. *Major Properties of KYOWA Strain Gages*. URL: [https://www.kyowa-ei.us/eng/technical/strain\\_gages/properties.html](https://www.kyowa-ei.us/eng/technical/strain_gages/properties.html) (viitattu 14. 09. 2020).
- [50] M. A. Sutton et al. Full-field representation of discretely sampled surface deformation for displacement and strain analysis. eng. *Experimental mechanics* 31.2 (1991), 168–177. ISSN: 1741-2765.
- [51] Kyowa Electronic Instruments Co. *Dynamic Strain Amplifiers*. URL: [http://straintech.fi/pdf/dynamic\\_strain\\_amp.pdf](http://straintech.fi/pdf/dynamic_strain_amp.pdf) (viitattu 28. 09. 2020).
- [52] Illinois Tool Works Inc. *Instron Strain Gauge Extensometers*. 2018. URL: <https://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2013/06/2630-series-strain-gauge-extensometers.pdf> (viitattu 14. 09. 2020).
- [53] C. Huston. The effect of continued and progressively increasing strain upon iron. eng. *Journal of the Franklin Institute* 107.1 (1879), 41–45. ISSN: 0016-0032.
- [54] A. G. Piersol ja T. L. Paez. STRAIN GAGE INSTRUMENTATION. eng. *Harris' shock and vibration handbook*. 6th ed. McGraw-Hill's AccessEngineering. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN: 0071508198.

- [55] W. H. Peters et al. Application Of Digital Correlation Methods To Rigid Body Mechanics. *Optical Engineering* 22.6 (1983), 738–742. DOI: 10.1117/12.7973231. URL: <https://doi.org/10.1117/12.7973231>.
- [56] V. Jokinen. *Reliability and Limitations of Compression Testing of Various Biomaterials*. eng. Kemia ja biotekniikka – Chemistry ja Bioengineering, 2017.
- [57] W.-N. Hsu et al. Load path change on superelastic NiTi alloys: In situ synchrotron XRD and SEM DIC. eng. *Acta materialia* 144 (2018), 874–883. ISSN: 1359-6454. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645417309783> (viitattu 02.09.2020).
- [58] E. Lindfeldt et al. Using DIC to Identify Microscale Strain Fields from In-situ SEM Images of Pearlitic Steel. *Experimental Mechanics* 54 (2014), 1503–1513. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9937-4>.
- [59] P. L. Reu. Digital image correlation through a rigid borescope. *Optical Measurements, Modeling, and Metrology. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Toim. T. Proulx. Vol. 5. Society for Experimental Mechanics. New York, NY: Springer, 2011, 141–145.
- [60] B. LeBlanc et al. Damage detection and full surface characterization of a wind turbine blade using three-dimensional digital image correlation. eng. *Structural health monitoring* 12.5-6 (2013), 430–439. ISSN: 1741-3168.
- [61] T. Proulx, toim. *Optical Measurements, Modeling, and Metrology. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Vol. 5. Society for Experimental Mechanics. New York, NY: Springer, 2011.