

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

LIIKKEENVAHVISTUSTEKNIIKAN OMINAISUUDET VÄRÄHTELYANALYY-
SISSÄ SUHTEEN MUIHIN OPTISIIN MITTAUSMENETELMIIN

PROPERTIES OF MOTION MAGNIFICATION TECHNOLOGY IN VIBRATION
ANALYSIS IN RELATION TO OTHER OPTICAL MEASURING TECHNIQUES

Lappeenrannassa 10.12.2021

Jarno Heikkinen

Tarkastaja TkT Eerik Sikanen

Ohjaaja TkT Eerik Sikanen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Jarno Heikkinen

Liikkeenvahvistustekniikan ominaisuudet värähtelyanalyysissä suhteen muihin optisiin mittaamenetelmiin

Kandidaatintyö

2021

28 sivua ja 7 kuvaa

Tarkastaja: TkT Eerik Sikanen

Ohjaaja: TkT Eerik Sikanen

Hakusanat: värähtelyanalyysi, liikkeenvahvistustekniikka, laser vibrometri

Tässä kandidaatintyössä perehdytään liikkeenvahvistustekniikkaan värähtelyanalyysissä. Työssä tutustutaan toiseenkin optiseen värähtelymittaustapaan eli laser vibrometrillä toteutettavaan värähtelyanalyysiin. Myös värähtelyanalyysin periaatetta selitetään työssä. Työn tavoitteena on vertailla edellä mainittujen kahden analyysimenetelmän etuja ja haittoja värähtelyanalyysin toteutuksessa. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Liikkeenvahvistustekniikka voi toimia saatavilla olevien lähdemateriaalien mukaan tulkituna yhtä tarkkana ja käytännöllisenä kontaktittomana värähtelymittaustapana kuin laser vibrometri. Liikkeenvahvistustekniikan tarkkuus on kuitenkin suhteellinen kameran resoluutioon ja mittausetäisyyteen, eli niin sanotusti kuvan pikselin edustamaan fyysiseen alueeseen. Merkittävin etu laser vibrometriin nähden on liikkeenvahvistustekniikan edullisuus. Liikkeenvahvistustekniikan huonoksi puoleksi nousee videon ja datan käsittelyn laskennallinen haastavuus. Muut huonot puolet ovat lähinnä tuloksiin mahdollisesti haittaavasti vaikuttavia tekijöitä mittauksen aikana. Rajallisen lähdemateriaalien saatavuuden vuoksi ei kovin kattavaa vertailua vielä kykene tekemään pelkän kirjallisuuden avulla.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jarno Heikkinen

Properties of motion magnification technology in vibration analysis in relation to other optical measuring techniques

Bachelor's thesis

2021

28 pages and 7 figures

Examiner: D.Sc. (Tech.) Eerik Sikanen

Supervisor: D.Sc. (Tech.) Eerik Sikanen

Keywords: vibration analysis, motion magnification, laser vibrometer

In this bachelor's thesis, a motion magnification technology is studied. The thesis also studies another optical method of vibration analysis done using a laser vibrometer. The principle of vibration analysis is also described in the work. The goal of the work is to compare the pros and cons of both mentioned techniques applied in vibration analysis. The work is done by literature review.

Motion magnification can work according to the available sources as an equally accurate and practical method of non-contact vibration measuring as a laser vibrometer. However, the accuracy of motion magnification is relative to the resolution of the camera and the measuring distance, or in other words the presented physical area of the pixel in a picture. The most significant benefit compared to a laser vibrometer is the low cost of motion magnification. A drawback of the motion magnification is its high computational demand in the video and data processing. Other drawbacks are mainly factors that may affect the results during measurements. Due to limited availability of source material, a more comprehensive comparison cannot yet be done just by using literature.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
LYHENNELUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Työn tausta.....	6
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus.....	7
1.3 Tutkimusmetodi	8
2 MENETELMÄT	9
2.1 Värähtelyanalyysi	9
2.1.1 Käytönaikaisten värähtelymuotojen mittaus.....	9
2.1.2 Kokeellinen moodianalyysi	9
2.2 Liikkeen vahvistustekniikka	11
2.2.1 Liikkeen vahvistustekniikan toimintaperiaate	11
2.2.2 Liikkeen vahvistustekniikan sovelluskohteet	17
2.3 Laser Doppler - vibrometri	19
3 TULOKSET JA ANALYSOINTI	21
3.1 Liikkeen vahvistustekniikan edut	21
3.2 Liikkeen vahvistustekniikan haitat ja huomioon otavat tekijät	23
4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	25
LÄHTEET	26

LYHENNELUETTELO

EMA	Kokeellinen moodianalyysi (engl. Experimental Modal Analysis)
LDV	Laser Doppler vibrometri
ODS	Käyttönopeudella esiintyvät värähtelymuodot (engl. Operational Deflection Shape)
SLDV	Skannaava laser Doppler vibrometri

1 JOHDANTO

Teollisuudessa kunnonvalvonta on tänä päivänä tärkeä osa koneiden kunnossapitoa. Kunnonvalvonnan avulla pystytään ennakoimaan kunnossapidon tarvetta, suunnittelemaan seisokkien ajankohtia ja näiden myötä pidentämään koneiden elinikää. Ennen varsinaista kunnonvalvontaa koneiden kuntoa valvottiin yksinkertaisesti kuuntelemalla ja tunnustelemalla koneita ja tarkkailemalla lopputuotteen laatua. Tällöin ei kuitenkaan pystytty kirjaamaan mittaustuloksia ja täten esimerkiksi mittaustulosten trendeissä ei kyetty havaitsemaan muutoksia. Nykykoneiden monimutkaistumisen ja käyttönopeuksien kasvun myötä myös vikojen kehittyminen on nopeutunut ja niiden havaitseminen ajoissa ennen niiden kehittymistä liian pitkälle on tärkeää. (Opetushallitus 2020)

1.1 Työn tausta

Yleisesti kunnonvalvonnassa käytetty menetelmä on värähtelyanalyysi (Barszcz 2019). Tyypillisesti värähtelymittauksia ja -analyyseja tehdessä käytetään yksittäisiä mittauspisteitä, joilta saadaan mittaustuloksia. Viimeisen parin vuosikymmenen aikana on kehitetty uudenlainen tapa analysoida värähtelyjä, jota kutsutaan liikkeenvahvistustekniikaksi (engl. Motion Magnification). Liikkeenvahvistustekniikalla tutkittava kohde kuvataan videokameralla, jonka jälkeen jälkikäsitteilyllä vahvistetaan pikselitasolla havaittavat värähtelyt. Kuvassa 1 on kuvattu keinuvaa henkilöä ja tämän jälkeen keinun rakenteisiin syntyvä liikehdintä on vahvistettu. Joillain järjestelmillä tekniikka mahdollistaa värähtelyjen ja niiden aiheuttajien paikantamisen melko nopeasti jo paikan päällä. Koska liikkeenvahvistustekniikassa jokainen yksittäinen kuvapikseli toimii ikään kuin mittauspisteenä, on värähtelyn havainnollistaminen käytännössä helpompaa kuin värähtelymittaus yksittäisillä mittauspisteillä.



(a) Input sequence



(b) Motion magnified sequence

Kuva 1. Tutkittavasta videomateriaalista otetut kuvaparit, joista (a) on käsittelemättömiä ja (b) on käsitelty liikkeenvahvistustekniikalla. (Liu et al. 2005, s.519)

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tässä työssä perehdytään ensisijaisesti liikkeenvahvistustekniikan toimintaperiaatteeseen, ominaisuuksiin ja sovelluskohteisiin. Samalla perehdytään myös toiseen optiseen värähtelymittaustapaan, joka on tässä työssä laser Doppler-vibrometri. Työn käytännönosuudessa vertaillaan esitettyjen menetelmien etuja ja haittoja. Mahdollisesti tämän työn pohjalta voitaisiin harkita liikkeenvahvistuslaitteiston hankintaa LUT-yliopiston konedynamiikan laboriolle tutkimustyötä varten.

1.3 Tutkimusmetodi

Tässä työssä tutkimus suoritetaan kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsauksessa kirjoittaja käy analyttisesti läpi omaan aiheeseensa ja tutkimusongelmiinsa liittyvää tieteellistä kirjallisuutta ja aiempia tutkimuksia. Aiempi tutkimus toimii uudessa tutkimuksessa suuntaa antavana, ja on välttämätöntä oman näkökulman ja tutkimuksen perustelemisessa. (Koppa 2020)

2 MENETELMÄT

2.1 Värähtelyanalyysi

Värähtelyanalyysi on yleisimmin käytetty kunnonvalvonnan metodi. MarketsandMarkets vuonna 2018 tekemän kyselyn mukaan värähtelyanalyysi kattaa noin 58 % koko kunnonvalvonnan markkinasta. Värähtelyanalyysiä käytetään paljon, koska tyypillisesti käytetyt mittalaitteet ovat yksinkertaisia ja edullisia. Värähtelyanalyysin etuna on värähtelyjen trendien seuraaminen, jolloin pystytään havaitsemaan vian kehittyminen jo ennen kuin se muodostuu ongelmaksi. Värähtelyanalyysin avulla pystytään myös paikantamaan vian lähde. Vian kehittymisen alkuvaiheessa sen aiheuttama värähtely on paikallista ja se heijastuu muualle laitteessa. Koska laitteiston eri kohdissa tämä värähtely muuttuu, on mahdollista paikallistaa värähtelyn aiheuttaja. (Barszcz 2019, s.27)

2.1.1 Käytönaikaisten värähtelymuotojen mittaus

Käytönaikaisten värähtelymuotojen (engl. Operational Deflection Shape, ODS) mittaus tai havainnointi on hyvin yleinen värähtelyanalyysin menetelmä. Käytönaikaisen värähtelymuodon muuttuessa on mahdollista havaita ja jopa paikallistaa vaurioita rakenteessa. Asnaashari ja Sinha (2014, s.114) mukaan ”ODS avainetu on se, että se käyttää värähtelyvasteen sekä amplitudia, että vaihetta kartoittaakseen siirtymän [engl. deflection] kuvion rakenteessa”. Tämän vuoksi pystytään kuvaamaan hyvin todenmukaisesti rakenteet värähtelymuodot. (Asnaashari et al. 2014, s.114) ODS ei välttämättä vaadi moodianalyysiä, analyytisiä tai numeerisia malleja rakenteesta, ja se käyttää värähtelydataa sellaisenaan ilman jälkikäsittelyä. (Sampaio et al. 2016, s.630)

2.1.2 Kokeellinen moodianalyysi

He ja Fu (2001, s.2) mukaan ”moodianalyysi on prosessi, jossa määritellään systeemin luontaiset dynaamiset ominaisuudet ominaistajuuksilla, vaimennuskertoimilla ja moodimuodoilla ja näitä hyödyntäen luodaan matemaattinen malli sen dynaamiselle käyttäytymiselle”. Tätä matemaattista mallia kutsutaan järjestelmän moodimalliksi. He et al. (2001, s.2) mukaan ”moodianalyysi perustuu siihen tosiasiaan, että lineaarisen ajasta riippumattoman dy-

naamisen järjestelmän värähtelyvaste voidaan ilmaista lineaarisena yhdistelmänä yksinkertaisia harmonisia liikkeitä, joita kutsutaan järjestelmän ominaismoodeiksi”. Tämä esittää Fourierin sini ja kosiniaaltojen yhdistelmän tapaan monimutkaisia aaltomuotoja. Värähtelyn ominaismuodot ovat luontaisia dynaamiselle systeemille, ja ovat täysin määrättyjä sen fyysisten ominaisuuksien eli massan, jäykkyyden ja vaimennuksen, ja näiden jakauman mukaan. Jokainen moodi on kuvattu moodisten parametrien suhteen, joita ovat ominaistajuus, moodinen vaimennustekijä ja moodimuoto. (He et al. 2001, s.2)

Moodianalyysi voidaan toteuttaa sekä teoreettisesti, että kokeellisesti. Teoreettinen moodianalyysi toteutetaan fysikaalisen mallin avulla, joka koostuu massan, jäykkyyden ja vaimennuksen arvoista. He et al. (2001, s.2) mukaan ”kuitenkin todennukaisempi fysikaalinen malli muodostuu tavallisesti massan, jäykkyyden ja vaimennuksen ominaisuuksien alueellisista jakaumista, toisin sanoen massa-, jäykkyyden- ja vaimennusmatriiseista”. Nämä matriisit ovat osana tyypillisiä liikkeen differentiaaliyhtälöitä, ja ne voidaan muuttaa tavalliseksi itseisarvo-ongelmaksi superpositioperiaatteen avulla. Ratkaisemalla matriisit saadaan järjestelmän moodiarvot. (He et al. 2001, s.2)

Viimeisen parin vuosikymmenen aikana kyky kerätä ja prosessoida suurta määrää dataa on kehittynyt huomattavasti ja samasta syystä kokeellinen moodianalyysi on alkanut yleisty-mään. Mooditestauksella luodaan kokeellisesti moodimalli jostain lineaarisesta ajasta riippumattomasta järjestelmästä. Tekniikan teoreettiselta pohjalta luodaan suhde jonkin pisteen värähtelyvasteen ja joko samassa tai eri pisteessä sijaitsevan herätteen välille herätetaajuuden funktiona. Tämä suhde toimii taajuusvastefunktiona. He et al. (2001, s.3) mukaan ”herätteen ja vasteen yhdistelmät eri sijainneissa johtavat kokonaiseen sarjaan taajuusvastefunktiota, jotka voidaan kooten esittää järjestelmän taajuusvastefunktio-matriisina”. Taajuusvastefunktion mittaaminen toteutetaan mittaamalla yhden herätteen aiheuttamat värähtelyt yhdestä tai mielellään useammasta eri kohdasta rakenteessa. Heräte mitataan tyypillisesti painanturilla kohdasta, johon heräte tulee, jos heräte ei ole tarkkaan ohjattu. Värähtelyvasteen sijaan voidaan mitata perinteisesti kiihtyvyyssantureilla tai tässä työssä esiteltävillä liikkeen vahvistustekniikalla tai laser Doppler-vibrometrillä. (He et al. 2001, s.2–3)

Taajuusvastefunktiota varten tarvitaan varsin paljon mittausdataa, jotta voidaan luoda riittävän tarkka moodimalli analysoitavasta järjestelmästä. Yksinkertaisessa vasaratestissä herätepiste eli vasaran lyöntikohtaa muutetaan eri kohtiin rakennetta ja värähtelyn vaste mitataan koko ajan samasta pisteestä. Tällä tavoin saatava data vastaa taajuusvastefunktio­matriisiin yhtä riviä. Vaihtamalla mittauspistettä, mutta toistamalla samat herätepisteet, luodaan toinen rivi. Vastaavasti yksinkertaisessa täristyskokeessa herätepiste pidetään samana, mutta vastet mitataan eri kohdista, ja täten saatava data vastaa matriisiin yhtä saraketta. Samalla tavalla vaihtamalla herätteen sijaintia pitäen mittauspisteet samoina saadaan seuraava sarake. Kun mittausdataa on saatu kerättyä riittävästi, voidaan numeerisella analyysillä johtaa moodiset parametrit käyräsovituksen avulla ja johdetut parametrit luovat rakenteen moodimallin. Tätä mittaus- ja analysointiprosessia kutsutaan kokeelliseksi moodianalyysiksi (engl. Experimental Modal Analysis, EMA). (He et al. 2001, s.3)

2.2 Liikkeen­vahvistustekniikka

Liikkeen­vahvistus on vielä melko hiljattain kehitetty tekniikka. Ensimmäisenä liikkeen­vahvistustekniikan esittelivät Liu et al. vuonna 2005. (Liu et al. 2005, s.519) Tästä johtuen liikkeen­vahvistustekniikasta kertovaa kirjallisuutta on saatavilla vielä rajallisesti. Erilaisia toteutustapoja itse liikkeen­vahvistukseen, että käsitellystä videosta saatavan datan analysointiin on kuitenkin viimeisten vuosien aikana kehitetty erilaisia. Eri tekniikoiden myötä myös sovelluskohteet ovat vaihdelleet. Varsinkin tästä syystä on haastava löytää kattavasti kirjallisuutta jostain tietystä toteutustavasta. (Le Ngo, Phan 2020, s.1) Tässä kirjallisuuskatsauksessa perehdytään ensimmäiseen tunnettuun toteutustapaan, jonka Liu et al. esittivät.

2.2.1 Liikkeen­vahvistustekniikan toimintaperiaate

Rakenteissa tapahtuva liikehdintä voi tapahtua eri amplitudeilla ja eri taajuuksilla. Kuitenkin hyvin pienet liikkeet voivat olla erittäin haastavia havaita pelkällä ihmiskatseella. Liikkeen­vahvistustekniikka toimiikin ikään kuin liikemikroskooppina, jota käytetään videokuvaan. Liu et al. (2005, s.519) esittelemässä tekniikassa ”algoritmi analysoi liikkeet syötetystä videosarjasta, mahdollistaen käyttäjän määrittämään vaikutettavan pikselijoukon ja kuinka paljon niiden liikettä vahvistetaan”. Valittu pikselijoukko ryhmitellään automaattisesti teko­älyn avulla pikselijoukon sijaintia, väriä ja liikettä hyödyntäen. Haluttu liikkeen taajuusalue voidaan tämän jälkeen vahvistaa halutun verran. Tyypillisesti suuremmat liikkeet pidetään täysin ennallaan ja pienimmät liikkeet vahvistetaan. Kun valitun pikselijoukon liikehdintä

on vahvistettu, lisätään pikselijoukko takaisin alkuperäiseen videoon. Lopuksi tekoäly täyttää liikkeen alta paljastuvat aukot syntetisoimalla taustan muun ympäristön mukaan. (Liu et al. 2005, s.519)

Yksinkertaisimmillaan ajateltuna liikkeenvahvistus voitaisiin toteuttaa analysoimalla pikselitason siirtymiä jokaisen kuvan välillä ja lopuksi vain renderöidä video uudelleen korostamalla näitä pieniä liikkeitä. Tällä tapaa kuitenkin todennäköisesti lopulliseen videoon syntyisi hyvin paljon häiriöitä korostettujen ja korostamattomien alueiden välillä. Varsinkin suuremmilla ja monimutkaisilla kuvattavilla rakenteilla tekisivät nämä jäännökset kuvasta epäselvän ja vaikeasti tulkittavan. Liu et al. (2005, s.520) mukaan liikkeenvahvistustekniikan monimutkaisuus syntyy ”luotettavasta liikkeiden ennustamisesta, ja pikseleiden, joiden liike tulisi vahvistaa, keräämisestä ryhmiin”. (Liu et al. 2005, s.520)

Liikkeenvahvistusprosessi aloitetaan rekisteröimällä jokainen kuva videomateriaalista, jotta voidaan poistaa ylimääräinen lähinnä kameran heilumisesta johtuva pieni liikehdintä. Tätä pientä liikehdintää voi syntyä, vaikka kamera olisikin jalustalla. Videosta valitaan paikallaan oleviksi määritellyt referenssipisteet, joiden mukaan jokainen kuva vakautetaan. Ilman tätä rekisteröintiä saattaisi osa pienistä liikkeistä jäädä havaitsematta analysoinnissa ja hyvin todennäköisesti muu pieni liike voi vääristyä. Videon valotuksen normalisoinnin jälkeen jokainen yksittäinen kuva on valmis liikkeen analysointiin. Kuvassa 2 on esitetty yksi rekisteröity kuva, jota aletaan vaiheittain käsittelemään. (Liu et al. 2005, s.520–521)



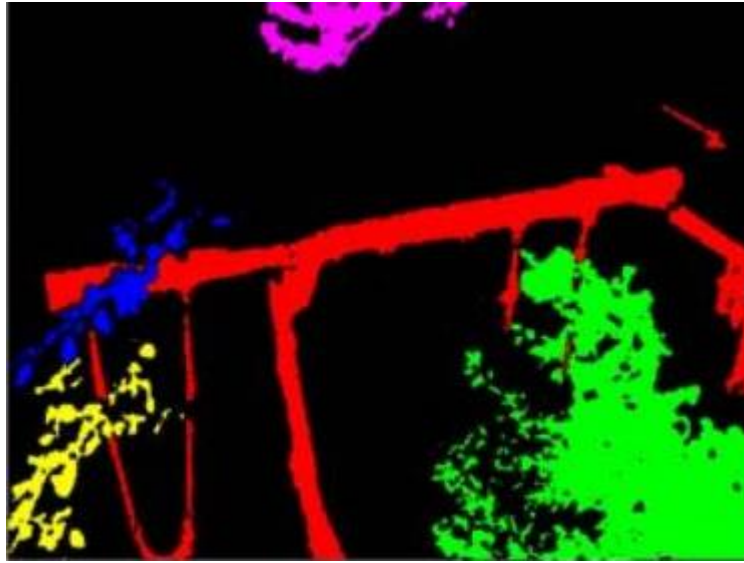
Kuva 2. Yksittäinen rekisteröity kuva videomateriaalista valmiina liikkeenvahvistusprosessiin. (Liu et al. 2005, s.520)

Jotta liikkeenvahvistus ei rikkoisi yhtenäisiä rakenteita, on videosta ryhmiteltävä seuraavaksi kohdat, jotka liikkuvat yhtenäisesti. Yhtenäinen liike ei siis ole välttämättä identtistä liikehdintää. Ryhmittely toteutetaan seuraamalla valittuja referenssipisteitä ja ryhmittelemällä niiden liikeradat yhteen korreloivien liikkeiden kanssa. Liu et al. (2005, s.520) mukaan tausta on ”yksi erityinen joukko referenssipisteitä, jotka eivät liiku kuvien välillä”. Ryhmittely yhtenäisten liikkeiden perusteella ottamatta kuitenkaan huomioon liikkeen suuruutta on tärkeää, jotta pienet liikehdinnät voidaan ryhmitellä yhteen suurempien, mutta kuitenkin korreloivien liikkeiden kanssa. Tämän tapaista liikehdintää esiintyy esimerkiksi kuvan 3 keinun rungon poikkipalkissa, jossa tuennan toisella puolella värähtelyn amplitudi on suurempi kuin toisella puolella. Vaikka tuennan eri puolilla värähtelyjen amplitudit ovat eri ja mahdollisesti vaiheet päinvastaiset, kuuluvat ne silti samaan rakenteeseen ja johtuvat samasta värähtelyn aiheuttajasta ja tämän takia ne kuuluvat samaan ryhmään. Ilman ryhmittelyä saattaisi rakenne rikkoutua liikkeenvahvistuksessa tai vähintään vahvistus ei näyttäisi oikeanlaiselta. (Liu et al. 2005, s.520)



Kuva 3. Kuva, josta näkyy havaitut yhtenäiset liikeradat ryhmiteltynä. Eri liikeradat erottuvat kuvasta liikkeen värityksenä. Keinujan liikerataa ei ole huomioitu liikkeen suuruuden vuoksi. (Liu et al. 2005, s.520)

Kun referenssipisteiden liikeradat on ryhmitelty, on seuraavaksi eriteltävä jokaisen pikselin liikerata referenssipisteiden mukaan. Jokaiselle liikeryhmälle interpoloidaan liikekenttä, joka antaa jokaiselle pikselille mahdolliset liikevektorit. Liu et al. (2005, s.520) mukaan periaatteessa olisi mahdollista ”suorittaa segmentointi käyttäen ainoastaan liikettä, mutta luotettava segmentointi vaatii lisää ominaisuuksia”. Luotettavaan ryhmittelyyn käytetäänkin liikkeen lisäksi pikselin väriä ja sijaintia. Jotta jokaisen pikselin vahvistettu liike olisi vielä yhdenmukaista koko videon ajan, määritetään pikseli käyttämään sen eniten käyttämää liikerataa, jos pikselin alueella on myös toista säännöllistä liikehdintää. Kuvassa 4 on esitetty pelkkien värien avulla jokainen videolta havaittu liikeryhmä. Liu et al. (2005, s.520) mukaan ”pikselit, jotka eivät sovi malliin asetetaan erityiselle poikkeamatasolle [engl. outlier layer]”. Taso voi kuitenkin pitää sisällään tärkeitä elementtejä tarkastettavasta kohteesta. Esimerkiksi kuvassa 4 keinuva ihminen on liian nopeasti ja suuresti liikkuva kohde, joten analyysi ei pysty käsittelemään sitä ja se siirretään poikkeamatasolle. Lopussa kun jokainen kerros on käsitelty ja videota aletaan kokoamaan, lisätään poikkeamataso heti taustan jälkeen. Tällöin, jos keinun rungon värähtely vahvistetaan, nähdään keinuva ihminen värähtelyn aiheuttajana. (Liu et al. 2005, s.520–521)



Kuva 4. Käsiteltävän kuvan jokainen liikeryhmä esitettynä värien avulla. (Liu et al. 2005, s.520)

Liu et al. (2005, s.521) mukaan liikkeenvahvistustekniikassa videon niin kutsuttu malli koostuu siis ”joukosta ajallisesti säännöllisiä pikselijoukkoja, jotka on ryhmitelty kerroksiin, jotka liikkuvat interpoloitujen liikeratojen mukaan--, jotka ovat yksilöllisiä jokaiselle pikselille”. Näiden ryhmien järjestely kerroksiin voidaan määritellä käyttäjän mukaan tai tietokoneellisesti. Käytännössä taustasta erottuvia kerroksia ei tarvitse järjestellä sen tarkemmin, jos kerrokset eivät peitä toisiaan. Tämä usein toteutuu järjestetyissä mittausympäristöissä. (Liu et al. 2005, s.521)

Kun kerrokset on määritelty, käyttäjä valitsee liikeryhmän tai -ryhmät, joiden liike halutaan vahvistaa lopulliseen videoon. Valittujen liikeryhmien liikkeet vahvistetaan Liu et al. (2005, s.521) mukaan ”vakiolla kertoimella, joka on tyypillisesti 4 ja 40 välillä”. Kun valittujen liikeryhmien liikkeet on vahvistettu, paljastuu väistämättä näiden takaa aukkoja taustakerroksessa, jos liikettä tapahtuu rakenteen reunalla. Kuvassa 5 on kaikkien liikeryhmien liikkeet vahvistettu ja näiden takaa on paljastunut mustana näkyvät aukot taustakerroksessa. Nämä aukot täytetään tekstuurisynteesillä taustakerrokseen. Kuvassa 6 on täytetty taustakerrokseen syntyneet aukot, jotka havaitaan kuvassa 5. (Liu et al. 2005, s.521)



Kuva 5. Kuvasta havaitut liikkeet vahvistettu, jonka seurauksena liikeryhmien takaa on paljastunut aukkoja taustakerroksessa. (Liu et al. 2005, s.520)



Kuva 6. Kuva, josta liikkeenvahvistuksen jälkeen syntyneet aukot on täytetty tekstuurisynteetillä taustakerrokseen. (Liu et al. 2005, s.520)

Jos liikkeenvahvistuksen jälkeen käyttäjä havaitsee, että on tarpeellista korjata liikeryhmiä, on se tässä kohtaa vielä mahdollista. Esimerkiksi käyttäjä on havainnut liikkeenvahvistuksen ja tekstuurisynteetin jälkeen keinun rungon katkenneen, joten käyttäjä on korjannut rungon liikeryhmää kuvassa 7. (Liu et al. 2005, s.520)



Kuva 7. Kuva, jossa käyttäjä on korjannut aikaisemmin tehtyjä liikeryhmiä liikkeenvahvistuksen jälkeen havaittujen rakenteiden rikkoontumisten myötä. Tässä vaiheessa liikkeenvahvistus on käytännössä valmis. (Liu et al. 2005, s.520)

Liikkeenvahvistuksen jälkeen muokattu video renderöidään eli kaikki edellä mainitut vaiheet toistetaan tietokoneellisesti jokaiselle yksittäiselle kuvalle. Taustakerros pysyy vakiona koko videon ajan, joten se renderöidään ensimmäisenä. Seuraavana poikkeamatason pikselit lisätään taustakerroksen päälle sen mukaan, kun ne ovat ilmaantuneet syötteessä. Tämän jälkeen jokaisen liikeryhmän kerros lisätään videoon aikaisemmin määritellyssä järjestyksessä. (Liu et al. 2005, s.520–521)

2.2.2 Liikkeenvahvistustekniikan sovelluskohteet

Liikkeenvahvistustekniikka on osoittautunut varsin monipuoliseksi työkaluksi. Liikkeenvahvistustekniikkaa hyödynnetään muun muassa konetekniikassa, rakennustekniikassa ja biotekniikassa. Laajin kirjo liikkeenvahvistustekniikan erilaisista sovelluskohteista löytyy biotekniikasta.

Liikkeenvahvistustekniikkaa hyödynnetään konetekniikassa värähtelyanalyysin toteutuksessa. ODS on mahdollista määrittää suoraan liikkeenvahvistusvideosta. Yksinkertaisimmillaan selitettynä liikkeenvahvistusvideo pysäytetään kohtaan, jossa rakenteen poikkeama on suurimmillaan. Tutkittava kappale leikataan tästä kuvasta osin tekoälyllä ja käyttäjä tarvittaessa tekee viimeistelyn itse, jos leikatussa kuvassa ilmenee ylimääräisiä häiriötekijöitä.

Kuitenkin saadut tulokset tällä tavoin eivät välttämättä ole kovin luotettavia ihmisen tekemän korjauksen takia. Tätä korjatakseen kuvasta dataa analysoivaa tekoälyä on kehitetty viime vuosina eri keinoin tunnistamaan kohteiden rajapintoja ja rakenteiden ominaisuuksia paremmin, jotta saataisiin poistettua ihmisen tuoma muuttuja mittaustuloksista. Todellisuudessa ODS määrittäminen on syvällisempi laskennallinen prosessi ja siitä on kehitetty erilaisia toteutustapoja. (Chen et al. 2015, s.60) ODS lisäksi liikkeen vahvistustekniikkaa on hyödynnetty myös EMA toteutuksessa. Liikevahvistettua videota ei suoraan itsenään voi arvatunkaan hyödyntää EMA määrittämisessä, kuten ei myöskään tarkemman ODS datan analysointiin, mutta vaihepohjaisen kuvan analysoinnin avulla voidaan videosta saada dataa suoraan EMA varten. Liikkeen vahvistuksen vaihepohjaisella analyysillä muodostetaan moodimuotoja, joissa vapausasteet ovat vaiheita fyysisten liikkeiden sijaan. (Rohe, Reu 2020, s.297–298)

Le Ngo ja Phan (2020, s.13) mukaan ”Chen et al. osoittivat ensimmäisinä, että rakennusten rakenteiden kuntoa voidaan valvoa liikkeen vahvistustekniikan avulla”. He osoittivat, että liikkeen vahvistuksella voidaan tarkkailla rakenteiden värähtelyä ja luoda näistä moodimuotoja moodianalyysiä varten, jolla voidaan valvoa rakenteiden kuntoa. Muutoksia rakenteiden resonanssitaajuuksissa ja ODS:ssä käytetään dynaamisina ominaisuuksina, joilla voidaan erottaa tutkittava mahdollisesti vaurioitunut rakenne vertailukohtasta eli ehjästä rakenteesta. Liikkeen vahvistusta on myös hyödynnetty muinaisten rakenteiden kunnan valvonnassa. Le Ngo et al. (2020, s.14) mukaan ”saadut tulokset eli saavutetut mooditaajuudet olivat hyvin lähellä perinteisiä värähtelymittauslaitteiden mittauksia, kuten kiihtyvyyssantureiden”. Nämä tulokset on saavutettu jopa ulkoilmassa matalaresoluutioisilla videokameroilla. (Le Ngo et al. 2020, s.13–14)

Lääketieteessä liikkeen vahvistusta hyödynnetään mitättömien pienten liikkeiden havaitsemiseen tutkiessa eri ruumiinosien terveydentilaa analysoiden niiden fyysisiä ominaisuuksia. Esimerkiksi kalkkiutuneiden valtimoiden pulssiaaltojen nopeus on korkeampi kuin terveiden valtimoiden, ja tämä on havaittavissa vahvistamalla valtimoiden liikettä veren virratessa. Yksi ensimmäisistä liikkeen vahvistustekniikan käyttökohteista oli fysiologisten signaalien mittaaminen, kun osoitettiin, että tekniikka soveltuu hyvin esimerkiksi nukkuvan vauvan sydämen sykkeen mittaamiseen. Liikkeen vahvistuksella voidaan tutkia tahdosta riippumattomia

silmän mitättömän pieniä liikehdintää, joka on vain 10–400 mikronin luokkaa. Liikkeenvahvistusta voidaan hyödyntää myös vauvojen hengitystahdin mittaamiseen. Hengitystahdin mittaaminen toteutetaan vahvistamalla koko kehon liikehdintää, koska nukkuvan vauvan tapauksessa liikehdintä on lähinnä hengittämisestä johtuvaa. Liikkeenvahvistustekniikkaa käytetään myös mikroilmeiden havaitsemisessa ja liikemikroskooppina biologisissa tutkimuksissa. (Le Ngo et al. 2020, s.12–13)

Liikkeenvahvistustekniikkaa on hyödynnetty myös silmän värikalvon eli iiriksen biometrisen tunnistusjärjestelmän huijauksenestossa. Iiriksen biometristä tunnistusta voidaan yrittää huijata toistamalla videota iiriksestä oikean ihmissilmän esittämisen sijaan. Kuitenkin videota toistettaessa toistolaitteen näytön kuvataajuus vaikuttaa myös videolla näkyvään liikkeeseen. Täten liikkeenvahvistuksen avulla on mahdollista erottaa luonnollinen iiriksen liikehdintä videolta toistettavasta liikehdinnästä. (Le Ngo et al. 2020, s.16–17)

2.3 Laser Doppler - vibrometri

Laser Doppler-vibrometri (LDV) esiteltiin ensimmäistä kertaa 1980-luvulla. Tuohon aikaan kuitenkin laitteiden rajallinen herkkyys ja alhainen signaalin suhde kohinaan mahdollisti käytön ainoastaan todella karkeilla pinnoilla tai mittauspisteeseen lisättävän teipin avulla. 1990-luvun alkupuolella laitteistot ja järjestelmät kehittyivät ja LDV alkoi yleistyä tutkijoiden käytössä. LDV:tä voidaan käyttää tarkkana ja varsin joustavana kontaktittomana värähtelyjen mittaustapana. LDV toimii varsinkin hyvin etäisenä kontaktittomana mittauslaitteena, koska sillä pystyy mittaamaan Castellini, Martarelli ja Tomasini (2006, s.1266) mukaan ”riittäväällä tarkkuudella (1–2.5 % RMS lukemasta) yli 30 metrin etäisyydeltä”. (Castellini et al. 2006, s.1266)

Castellini et al. (2006, s.1266) mukaan ”yksinkertainen LDV on yhden pisteen ’aksiaalinen’ (sillä se mittaa ainoastaan nopeuden komponentin laserin näkölinjalta) vibrometri, perustuen Doppler efektiin, joka ilmenee, kun laservalo--siroaa liikkuvalta pinnalta, ja interferenssillä mittausta ja referenssisäteiden välillä mahdollistaen välittömän liikkeen--muuttamiseksi Dopplerin taajuuden muutokseksi”. Tämä taajuuden muutos on suoraan suhteessa pinnan nopeuteen ja täten sen havaitseminen on kätevä tapa tutkia pinnan värähtelyä. (Castellini et al. 2006, s.1266) Taajuuden muutoksen havaitseminen ei ole täysin yksinkertaista, koska lase-

rin taajuus on tavallisesti paljon suurempi kuin Dopplerin muutoksen, joka on yleensä muutamana MHz luokkaa. Kohteesta siroava valo on siis yhdistettävä interferometrisesti referenssisäteeseen kanssa, jotta voidaan korostaa kohteesta siroavan ja referenssisäteeseen taajuuseroa. (Rothberg et al. 2017, s.11) Tarkemmat aksiaaliset LDV:t ovat skannaavia laser Dopplervibrometrejä (SLDV), joissa on lisäksi kamera ja peilien avulla toimiva skannausjärjestelmä. SLDV mahdollistaa mittauspisteen nopean ja tarkan siirtelyn mittauksen aikana mahdollistaen suuren alan analysoinnin korkeammalla resoluutiolla nopeammassa ajassa kuin käyttäen yksinkertaista LDV:tä. Korkeampi analysointiresoluutio on tärkeää esimerkiksi korkeammilla taajuusalueilla, äärellisen elementtimallin (engl. Finite Element Model) päivittämisessä, ja pienten rakennevaurioiden paikallistamisessa. (Castellini et al. 2006, s.1266–1267)

LDV on hyvin monikäyttöinen ja sitä hyödynnetään liikkeen vahvistustekniikan lailla muun muassa konetekniikassa, biomekaniikassa, arkeologiassa ja rakennustekniikassa. Konetekniikassa LDV:tä hyödynnetään esimerkiksi värähtelyanalyysissä eli ODS ja EMA määrittämisessä, pyörivien rakenteiden analysoinnissa, laatutarkastelussa, rakenteellisten vaurioiden havaitsemisessa ja kalibroinnissa. (Castellini et al. 2006, s.1267)

3 TULOKSET JA ANALYSOINTI

Sekä liikkeenvahvistustekniikan, että LDV:n etuina perinteiseen esimerkiksi kiihtyvyyssantureilla toteutettuun värähtelyanalyysiin nähden on se, että ne toimivat täysin ilman kontaktia tutkittavaan kohteeseen. Vaikka kiihtyvyyssanturit toimivat hyvin luotettavasti ja tuottavat hyvin tarkkoja mittaustuloksia, ne voivat kuitenkin vääristää mittaustuloksia varsinkin kevyissä rakenteissa tuottamalla uusia massakuormituspisteitä rakenteeseen. (Yang et al. 2017, s.568) Rakenteen kuormittaminen antureilla vaikuttaa saataviin moodiparametreihin Castellini et al. (2006, s.1266) mukaan ”varsinkin kun testataan kevyitä tai pieniä rakenteita tai erittäin vaimentavia epälineaaraisia materiaaleja (kuten kumia)”. Tämän lisäksi kiihtyvyyssantureiden asentaminen on aikaa vievää ja suurissa rakenteissa melko kallista ja hankalaa, koska antureita tarvitaan suurempi määrä. Kiihtyvyyssanturit tarvitsevat myös mittauskohteessa ylläpitoa kytkentöjen osalta tai akkujen osalta, jos kyseessä on langattomat anturit. Toki myös kontaktittomat mittauslaitteet vaativat ylläpitoa, mutta tämä voidaan suorittaa käytännössä missä tahansa. Pääsääntöisesti kiihtyvyyssantureilla ei saada aikaiseksi yhtä tarkkaa mittausrésoluutiota. Tämä toki olisi mahdollista asentamalla tutkittavaan kohteeseen enemmän antureita, mutta samanaikaisesti kustannukset kasvaisivat antureiden hankintojen, asennuksen ja ylläpidon kannalta. Liikkeenvahvistustekniikalla ja DLV:llä saadaan molemmilla aikaiseksi hyvinkin suuria mittausrésoluutioita luomatta lainkaan kuormitusta tutkittavaan kohteeseen. (Yang et al. 2017, s.568)

3.1 Liikkeenvahvistustekniikan edut

LDV laitteistot ovat verrattain kalliita liikkeenvahvistustekniikkaan tarvittaviin laitteisiin nähden (Yang et al. 2017, s.568, Sarrafi et al. 2018, s.301). Laitteistojen hintoja on kuitenkin vaikea suoraan verrata tätä tutkimusta varten. Esimerkiksi Siringoringo, Wangchuk ja Fujino tekemässä tutkimuksessa he käyttivät liikkeenvahvistuksessa SONY NXCAM kameraa ja LDV mittauksessa Polytec RSV-150 laitetta (Siringoringo, Wangchuk, Fujino 2021, s.8). Hakukoneiden avulla LDV laitteelle ei löydy hintaa, koska jokaisen jälleenmyyjän sivuilla on jätettävä erillinen tarjouspyyntö. Tästä voitaisiin kuitenkin kuvitella, että kyseessä on mahdollisesti kymmenien tuhansien eurojen arvoinen laite, joka on suunnattu ainoastaan ammattilaiskäyttöön. SONY NXCAM kamera on kuitenkin saatavilla esimerkiksi Suomi-

lammen verkkokaupassa, jossa ohjehinta on noin 1600 € ilman arvonlisäveroa (Suomilampi, 2021). Käytettävän kameran kohdalla hinta voi kuitenkin vaihdella paljon halutuista ominaisuuksista riippuen. Näitä ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi kameran resoluutio ja kuvaustaajuus. Kameran lisäksi kustannuksiin vaikuttaa todennäköisesti liikkeenvahvistukseen ja analysointiin käytettävä ohjelmisto, jos se joudutaan hankkimaan valmiina. Liikkeenvahvistus ja analysointi suoritetaan tietokoneen avulla, joten todennäköisesti itse tietokone ei ole laboratorioissa tai edes esimerkiksi tehtaiden kunnonvalvonnan osastolla erikseen hankittava kuluera. Kuitenkin liikkeenvahvistus ja tulosten analysointi voi vaatia varsin paljon laskentatehoa tietokoneelta, joten nopeampien tulosten saavuttamiseksi voidaan vaatia tehokkaampaa tietokonetta.

LDV:llä mitatessa useita rakenteita, on mittaukset suoritettava jaksottaisesti. Tämä voi osoittautua työlääksi mittauksen kannalta, jos analysoitava alue on suuri. Liikkeenvahvistustekniikalla sen sijaan on mahdollista kuvata kerralla koko analysoitava alue laajasti ja korkealla mittausresoluutiolla, ja suorittaa jokaiselle rakenteelle oma analysointi samanaikaisesti. (Yang et al. 2017, s.568, Sarrafi et al. 2018, s.301) Sen lisäksi, että liikkeenvahvistustekniikalla saadaan aikaiseksi varsin korkearesoluutioista mittausdataa, toimii liikevahvistettu video myös erittäin hyvin käytännöllisenä värähtelyn moodin visualisointina. (Yang et al. 2017, s.568)

Tarkkaa mittausetäisyyttä, jolla liikkeenvahvistustekniikan avulla saadaan vielä luotettavia mittaustuloksia, ei ole toistaiseksi tutkittu. Siringoringo et al. tekivät mittaauksensa 2021 tehdyssä tutkimuksessaan noin 100 metrin etäisyydeltä kohteista. Tutkimuksessaan he saavuttivat sekä kokeellisessa laboratoriotestissä, että kentällä todellisia rakenteita testatessa varsin tarkkoja mittaustuloksia, jotka olivat yhdenmukaisia LDV mittauksella toteutettujen kontrollien kanssa. (Siringoringo et al. 2021, s.7–8) Tarkkaan mittausetäisyyteen toisaalta varmasti vaikuttaa se millä tavoin liikkeenvahvistustekniikka ja videon analysointi toteutetaan, ja millainen kamera on käytössä. Tarkemmalla kameralla, jossa on suurempi tarkennusetäisyys, saadaan varmasti parempia mittaustuloksia, kuin esimerkiksi älypuhelin kameralla. (Siringoringo et al. 2021, s.7)

3.2 Liikkeen vahvistustekniikan haitat ja huomioon otavat tekijät

Liikkeen vahvistustekniikan ollessa vielä melko tuore menetelmä ei sitä ole testattu vielä kovinkaan paljon ODS tai EMA määrittelyyn, varsinkin LDV käyttöön verrattuna, joka on ollut olemassa jo usean vuosikymmenen ajan. Liikkeen vahvistustekniikka on kuitenkin osoittautunut edukseen esimerkiksi sillä, että tekniikalla saavutetaan korkearesoluutioisia moodimuotoja melko vaivatta. Riippuen millä tekniikalla liikkeen vahvistus on toteutettu, voi kuitenkin tarkemmassa mittauksessa analysoitavan kohteen pinta olla tarpeen merkitä esimerkiksi pistekuvioinnilla, jotta pystytään seuraamaan tarkemmin mittauspisteiden siirtymiä. Tässä tapauksessa tekniikan haitaksi alkaa nousta tutkittavan kohteen valmistelu mittauksista varten. On kuitenkin kehitetty tapoja tekoälyn avulla tunnistaa ja seurata tutkittavan pinnan ominaisuuksia niin sanotun kehittyneen tietokone näkökyvyn (engl. advanced computer vision) avulla. (Yang et al. 2017, s.568)

Hieman liikkeen vahvistustekniikan ja analysoinnin toteutustavasta riippuen videomateriaalin käsittely on laskennallisesti erittäin raskasta. Tämän vuoksi reaaliaikainen datankeruu ei ole mahdollista muilla kuin matalilla taajuuksilla. (Sarraf et al. 2018) Myös videon kuvausresoluutio ja kuvataajuus vaikuttaa laskentaan. Jos kuvaus toteutetaan hyvin suurella resoluutiolla ja kuvataajuudella, kasvaa analysoitavien pikselien määrä nopeasti. Siringoringo et al. (2021, s.7) tekemässä tutkimuksessa ”laskenta-aika yhden minuutin videolla 2160×1080 pikseliresoluutiolla ja 30 fps [engl. frames per second] kuvataajuudella—prosessi vie noin neljä tuntia”. (Siringoringo et al. 2021, s.7)

Liikkeen vahvistustekniikassa on joitain huomionarvoisia tekijöitä varsinkin kohteen kuvausvaiheessa. Yksi näistä on kameran sijainti ja katselukulma mitattavaan kohteeseen nähden. Siringoringo et al. (2021, s.12) mukaan paras kuvauskulma on ”kohtisuoraan tasoon nähden, jolla kappale värähtelee”. Tämä voi tositilanteessa olla kuitenkin haastava toteuttaa, joten suositellaan, että kamera olisi enintään 45 asteen kulmassa kohtisuorasta akselista, jotta kappaleen värähtelyn kaksi päätasoa pysyvät selkeästi erotettavissa. Siringoringo et al. (2021, s.12) mukaan tämä on ”tekniikan rajoite, kun käytössä on ainoastaan yksi videokamera”. (Siringoringo et al. 2021, s.12)

Toinen huomionarvoisista tekijöistä on sääolosuhteet, jos tutkittava kohde on ulko-olosuhteissa. Ihanteellinen sääolosuhde kuvaukseen liikkeen vahvistusta varten on arvatenkin tyyni

poutasää. Siringoringo et al. (2021, s.12) mukaan taustallaolevat pilvet ”vaikeuttavat prosessia erottaa kohderakenne taustasta, ja vääristäen johtaa useisiin geometrisiin painopisteisiin”. Tuuli taas ymmärrettävästi voi häiritä videomateriaalin käsittelyä, jos kamera pääsee heilumaan. Riippuen paljolti mittauskohteesta, voi tuuli aiheuttaa myös ylimääräistä häiriötä itse kappaleen värähtelyyn. (Siringoringo et al. 2021, s.12)

Kolmas huomionarvoinen tekijä on kuvattavan videon kuvataajuus. Kuvataajuus ilmoitetaan tyypillisesti hertsien sijaan kuvaa sekunnissa. Siringoringo et al. (2021, s.12–13) mukaan Nyquistin periaate huomioon ottaen 30 kuvaa sekunnissa ”pitäisi olla riittävästi kuvatakseen värähtelyä kappaleesta, jonka ominaistajuus on vähemmän kuin 15 Hz tarkasti”. Videon kuvataajuus on siis määriteltävä tutkittavan kohteen ominaistajuus huomioon ottaen. Siringoringo et al. (2021, s.12) mukaan ”hallitsevat rakennusten ominaistajuudet ovat tavallisesti alle 5 Hz”. (Siringoringo et al. 2021, s.12–13)

4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä käytiin läpi sekä liikkeenvahvistustekniikan toimintaperiaate vaihe vaiheelta ja sen erilaisia sovelluskohteita. Liikkeenvahvistuksen tekniikaksi valittiin Liu et al. vuonna 2005 esittämä toteutustapa, joka oli ensimmäinen tunnettu esitys liikkeenvahvistustekniikasta. Liikkeenvahvistustekniikan lisäksi käytiin läpi laser Doppler-vibrometerin toimintaperiaatetta. Toimintaperiaatteita ei käyty läpi laskennalliselta kannalta, vaan selitettiin käytännön tasolla mitä tapahtuu jokaisessa vaiheessa.

Työssä toteutettiin liikkeenvahvistustekniikan ja LDV:n ominaisuuksien vertailua optisina värähtelymittauksina. Päälimmäisenä etuna liikkeenvahvistustekniikalle osoittautui sen edulliset kustannukset LDV laitteistoon nähden. Suoraa vertailua ei pystytty toteuttamaan ilman LDV laitteesta pyydettävää hintatarjousta, joten tyydyttiin arvioimaan laitteen hintaluokka. Hinnan lisäksi tutkimustyötä tehdessä ei noussut esiin muita varsinaisia etuja LDV laitteisiin verrattuna. Sen sijaan liikkeenvahvistustekniikkaa perusteltiin vähintään yhdenvertaiseksi LDV laitteisiin. Jyrkkiä huonojakaan puolia ei löytynyt juurikaan, joten listattiin esiin tulleita asioita, jotka voivat osoittautua haitaksi liikkeenvahvistustekniikkaa hyödyntäessä. Lähdemateriaalien tutkimuksissa liikkeenvahvistustekniikkaa ei ole vielä suoranaisesti vertailtu toisiin värähtelymittaustekniikoihin, vaan muilla tekniikoilla on tähän mennessä lähinnä verifioitu liikkeenvahvistustekniikalla saavutettuja mittaustuloksia.

Liikkeenvahvistus on kohtalaisen hiljattain kehitetty tekniikka ja siitä on viimeisten vuosien aikana esitetty erilaisia kehitysversioita itse liikkeenvahvistuksen, että videomateriaalin tulosten analysoinnin osalta. Tämän vuoksi osa työssä käsitellyistä asioista liikkeenvahvistustekniikan osalta voi olla jonkin toteutustavan kannalta väärin kuvailtu, koska työssä on liikkeenvahvistustekniikasta löytyvän rajallisen lähdemateriaalin johdosta yhdistetty materiaalia eri toteutustavoista. Jatkotutkimuksissa voitaisiin kuitenkin valita jokin tietty toteutustapa, kuten monessa lähdemateriaalissa esiintyvä vaihepohjainen (engl. phase-based) liikkeenvahvistustekniikka ja analysointi. Tämä työ toimii mielestäni kuitenkin hyvin yleiskatsauksena liikkeenvahvistustekniikkaan.

LÄHTEET

Asnaashari, E. & Sinha, J.K. 2014. Development of residual operational deflection shape for crack detection in structures. *Mechanical systems and signal processing*, 43(1-2), s. 113-123.

Barszcz, T. 2019. *Vibration-Based Condition Monitoring of Wind Turbines*. 1 edn. Cham: Springer International Publishing.

Castellini, P., Martarelli, M. & Tomasini, E.P. 2006. Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs. *Mechanical systems and signal processing*, 20(6), s. 1265-1285.

Chen, J.G., Wadhwa, N., Cha, Y., Durand, F., Freeman, W.T. & Buyukozturk, O. 2015. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, 345, s. 58-71.

He, J. & Fu, Z. 2001. *Modal analysis*. Oxford ;: Butterworth-Heinemann.

Koppa. 2020. Kirjallisuuskatsaus. [www-dokumentti]. [viitattu: 6.12.2021]. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/kirjasto/kirjastotuutori/aihehaku-tutkimusprosessissa/aiheavainkasitteiksi/kirjallisuuskatsaus>

Le Ngo, A. & Phan, R. 2020. Seeing the Invisible: Survey of Video Motion Magnification and Small Motion Analysis. *ACM computing surveys*, 52(6), s. 1-20.

Liu, C., Torralba, A., Freeman, W., Durand, F. & Adelson, E. 2005. Motion magnification. *ACM transactions on graphics*, 24(3), s. 519-526.

Opetushallitus. 2021. Johdanto kunnanvalvontaan. [www-dokumentti]. [viitattu 1.12.2021]. Saatavissa: http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k1_johdanto_kunnanvalvontaan.html

Rohe, D.P. & Reu, P.L. 2020. Experimental Modal Analysis Using Phase Quantities from Phase-Based Motion Processing and Motion Magnification. *Experimental techniques* (Westport, Conn.), 45(3), s. 297-312.

Rothberg, S.J., Allen, M.S., Castellini, P., Di Maio, D., Dirckx, J.J.J., Ewins, D.J., Halkon, B.J., Muyshondt, P., Paone, N., Ryan, T., Steger, H., Tomasini, E.P., Vanlanduit, S. & Vignola, J.F. 2017. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Optics and lasers in engineering*, 99, s. 11-22.

Sampaio, R.P.C., Maia, N.M.M., Almeida, R.A.B. & Urgueira, A.P.V. 2016. A simple damage detection indicator using operational deflection shapes. *Mechanical systems and signal processing*, 72-73, s. 629-641.

Sarrafi, A., Mao, Z., Niezrecki, C. & Poozesh, P. 2018. Vibration-based damage detection in wind turbine blades using Phase-based Motion Estimation and motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, 421, s. 300-318.

Siringoringo, D.M., Wangchuk, S. & Fujino, Y. 2021. Noncontact operational modal analysis of light poles by vision-based motion-magnification method. *Engineering Structures*, 244, s. 112728.

Suomilammi Oy. 2021. Sony HXR-NX100 Professional NXCAM kamera. [www-tuotodokumentti]. [viitattu 8.12.2021]. Saatavissa: <https://kauppa.suomilammi.fi/product/5786/sony-hxr-nx100-professional-nxcam-kamera>

Tveit, D.M., Engan, K., Austvoll, I. & Meinich-Bache, O. 2016. Motion based detection of respiration rate in infants using video. *IEEE*.

Wadhwa, N., Rubinstein, M., Durand, F. & Freeman, W. 2013. Phase-based video motion processing. *ACM transactions on graphics*, 32(4), s. 1-10.

Yang, Y., Dorn, C., Mancini, T., Talken, Z., Kenyon, G., Farrar, C. & Mascareñas, D. 2017. Blind identification of full-field vibration modes from video measurements with phase-based video motion magnification. *Mechanical systems and signal processing*, 85, s. 567–590.