

MISKOLCI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**Vonalkamerás rezgésmérési és feldolgozó
módszerek fejlesztése**

című

PhD értekezés tézisei

Készítette:

Bodolai Tamás

okleveles mérnök-informatikus

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Iskolavezető:

Szigeti Jenő, CSc, dr. habil

egyetemi tanár

Tudományos vezető:

Váradiné Szarka Angéla, PhD, dr. habil

egyetemi docens

Miskolc

2014

A BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG TAGJAI

Elnök:

Dr. habil Kovács László

(egyetemi docens, Általános Informatikai Intézeti Tanszék)

Titkár:

Dr. Szilágyi Attila

(egyetemi docens, Szerszámgépek Intézeti Tanszék)

Tagok:

Dr. Csáki Tibor

(nyug. egyetemi docens, Szerszámgépek Intézeti Tanszék)

Dr. Szabó István

(egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Fizikai Intézet)

Dr. Jónap Károly

(nyug. egyetemi docens, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet)

Bírálok:

WENZEL Gottfriedné Dr. Gerőfy Klára egyetemi magántanár

(BME, Mechatronikai, Optikai és Gépészeti Informatikai Tanszék)

Dr. Czap László egyetemi docens

(Automatizálási és Kommunikációtechnológiai Intézeti Tanszék)

I. A KITŰZÖTT KUTATÁSI FELADAT ISMERTETÉSE, AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSE

Kutatásom kezdeti szakaszában tanulmányoztam a rezgésmérés területén alkalmazható és gyakorlatban is alkalmazott mérési módszereket, a rezgésdiagnosztika tudományos eredményeit és ezen a területen az ipari igényeket. A megismert információk alapján megállapítottam, hogy számos olyan ipari, érintésmentes rezgésmérési feladattal találkozhatunk, amelynek megoldása a jelenlegi mérési módszerekkel nem lehetséges.

Általános célkitűzésem olyan új, optikai érintésmentes rezgésmérési módszerek kidolgozása, amelyek megoldást nyújthatnak az eddig megoldhatatlan, vagy csak túlzottan nagy költséggel megoldható feladatokhoz. Szintén alapvető elvárás, hogy az újonnan kidolgozott módszerek gyakorlati alkalmazása gazdaságos legyen, felvegyék a versenyt a napjainkban elérhető, széles körben alkalmazott szenzorokkal.

Az egyik alapvető célom, hogy line scan kamera felhasználásával olyan érintésmentes rezgésmérést dolgozzak ki, amely mintavételezési frekvenciában meghaladja az általános lézeres távolságmérők teljesítményét.

A szakirodalmi kutatásaim során nem találtam olyan line scan kamerás mérési eljárást, ahol folyamatos mérést valósítottak volna meg. Ennek okait megvizsgálva, arra a következtetésre jutottam, hogy a kamerákban előálló hatalmas adatmennyiség online feldolgozási módszere nem áll rendelkezésre a feladat megoldásához. A gyakorlatban viszont sokszor találkozhatunk olyan problémával, amelynek megoldásához a folyamatos mérés elengedhetetlen. Ezért célul tűztem ki egy olyan adatredukálási módszer kidolgozását és megvalósítását, amellyel a folyamatos line scan kamerás rezgésmérés magas mintavételi frekvencia mellett is megvalósítható.

Ipari körülmények között könnyen előfordulhat, hogy egy felület vagy egy alkatrész rezgését nem csupán egy irányban kívánják mérni, hanem az objektum komplex mozgására, rezgésére kíváncsiak. Ez a legtöbb esetben több szenzor szinkronizált használatát, komplex mérőrendszert igényel. Ezért a kutatásaim célkitűzéseit kiterjesztettem olyan optikai mérési eljárás kidolgozására is, amellyel egy felület teljes térbeli elmozdulása mérhető nagy mintavételezési frekvenciával.

II. A KAPCSOLÓDÓ SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

A különböző rezgés- és elmozdulásmérési módszereket az ipar számos területén használják. Alkalmazásuk egyaránt előfordul a tömeggyártásban, termékellenőrzésben, gépállapot-felmérésben.

Kutatásom kezdeti szakaszában megismertem a rezgésmérés elvi lehetőségeit, és tanulmányoztam a gyakorlatban is alkalmazott szenzortípusokat. Megállapítottam, hogy a kontakt rezgésmérés területén a jelenlegi szenzorkínálat mind mintavételezési sebességben, mind pontosságban, mind sáv szélességben lefedi az ipar elvárásait, így figyelmemet az érintésmentes rezgésmérés területére koncentráltam.

Először a szenzorgyártók kínálatát, specifikációit tanulmányoztam. Felmértem a napjainkban elérhető érintésmentes mérési módszerek nyújtotta lehetőségeket.

Szakirodalmi kutatásomat ezt követően az egyre nagyobb teret hódító kamerás mérési módszerek területére fókuszáltam. Az ipar számos területén alkalmaznak kamerákat különböző mérési feladatok ellátására.

Az optikai alkalmazásokban elterjedt, úgynevezett „area scan” kameráknak a mérés technika területén legnagyobb hátránya az alacsony működési sebesség. Napjainkban ugyan elérhető olyan nagysebességű digitális kamera, amely másodpercenként 100 000 kép készítésére alkalmas, de ezt a sebességet csak igen kicsi, ~128x64 pixelből álló szenzor esetén érhetjük el. Ez a felbontás a mérés technikai alkalmazások nagy részéhez elégtelen. A szenzorméret növelésével viszont az elérhető sebesség csökken. Például egy 640x480 pixelből álló szenzor esetén már csak 36 000 fps (frame per second). A másik nagy probléma az adatmennyiség. A nagysebességű kamerák még viszonylag kis szenzorméret esetén is hatalmas adatmennyiséget állítanak elő, amelynek folyamatos továbbítása már nem lehetséges a számítógép felé. Ebből kifolyólag ezek a kamerák annyi képet képesek készíteni megszakítás nélkül, amennyi a gyorsítótárunkba (szenzor mellé integrált memória) belefér. Gyakorlatilag a legtöbb nagysebességű kamera megszakítás nélkül 5-7 másodperc rögzítésére alkalmas.

Véleményem szerint az érintésmentes rezgésmérés területén az area scan kamerák alacsony sebességük és felbontásuk miatt nem veszik fel a versenyt a lézeres távolságmérőkkel.

A line scan, azaz vonalkamerák egy pixelsorból álló képet készítenek, amely sor általában 2 048, 4 096, 6 144, 8 192 pixelt tartalmaz, de napjainkban

24 576 képpontos modellek is elérhetőek. A nagy felbontás ellenére ezek a kamerák másodpercenként akár 80 000 kép készítésére is alkalmasak. Ezen két tulajdonság alapján döntöttem úgy, hogy megvizsgálom a line scan kamerák gyakorlati alkalmazásait. A vonalszenzorok és line scan kamerák eredeti alkalmazása elterjedőben van az ipar több területén is, azonban rezgésmérési alkalmazásukra alig néhány esetet találtam.

Az első mértékadó publikációnak a line scan kamerás érintésmentes rezgésmérés területén a *Visual measurement of pile movements for the foundation work using a high-speed line-scan camera* című, 2008-ban az *Elsevier, Pattern Recognition* folyóiratban megjelent publikációt tekintem (a továbbiakban Lim&Lim néven hivatkozott). A két szerző építkezéseken használt acélcölöpök leverésének megfelelőségi vizsgálatára dolgozta ki a line scan kamerát alkalmazó mérési eljárást. A méréshez egy fekete-fehér területekből álló mintát ragasztanak a cölöp oldalára, melyet a néhány méterrel távolabb elhelyezett line scan kamerával figyelnek. A mérési eljáráshoz és az általuk kidolgozott mintához egy matematikai formulát is kidolgoznak, amely alapján a szerzők megállapítják, hogy a szenzorra merőleges elmozduláson túlmenően a vele párhuzamos mozgások is meghatározhatóak egyetlen line scan kamera felhasználásával. A megállapítás általános esetben nem állja meg a helyét, de a szerzők gyakorlati alkalmazásánál, ahol a mért cölöp fizikailag megakadályozza a minta éles síkból történő kifordulását, már kétségtelenül helytálló. A szerzők, kihasználva a line scan kamera magas sorsfrekvenciáját, 10 kHz-cel mintavételeztek. A méréseket 10 másodperces, kötött mintaszámú méréssel végezték. Megállapításuk szerint 120 μm -es pontossággal tudták a méréseket elvégezni.

A másik releváns cikk a 2010-ben publikált *Seismic structural displacement measurement using a high-speed line-scan camera: experimental validation*, amely a Lim&Lim közleményben kidolgozott mintát és mérési módszert teszteli. A line scan kamerás mérőrendszert szeizmikus rezgések mérésére kívánják használni, amelyhez az objektívet úgy választják meg, hogy a felbontás $\sim 30\mu\text{m}$ legyen. Az alkalmazás nem igényel nagy mintavételezési frekvenciát, ezért a szerzők a még folyamatos mérés esetén is kezelhető adatmennyiséget előállító, 1 kHz-cel dolgoznak. A teszteléshez használt harmonikus és dinamikus rezgéseket két külön berendezésen állítják elő. Mindkét tesztnél 3%-nál kisebb relatív hibával tudták a méréseket elvégezni.

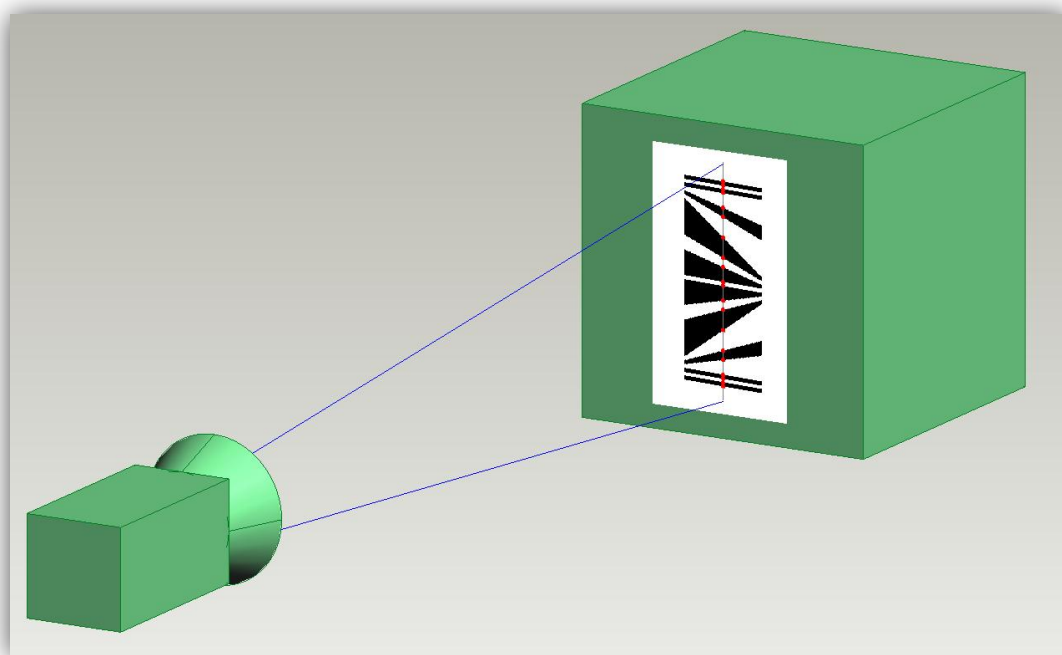
Összességében elmondható, hogy az iparban az érintésmentes rezgésmérés területén számos olyan mérési feladattal találkozhatunk, amelyekre a szenzorgyártóknak jelenleg nincs megfelelő megoldásuk. Megismerve a szenzorgyártók kínálatát, az online és nyomtatott formában megjelent

szakirodalmat, több fejlesztési irányvonalban láttam nagy lehetőségeket. A line scan kamerás nagyfrekvenciás, folyamatos mérés megvalósítása újabb lehetőségeket nyit az optikai méréstechnika területén. A Lim&Lim által kidolgozott mintát alaposan tanulmányozva megállapítottam, hogy kialakítása több szempontból sem célszerű, ezért célul tűztem ki egy olyan minta kidolgozását, amely sokkal eredményesebben alkalmazható az egy- és kétpixelsoros line scan kamerás alkalmazásokban. A harmadik terület olyan, két pixelsort alkalmazó mérési módszer kidolgozása, amellyel egy felület teljes térbeli mozgása szimultán meghatározható.

III. AZ ÚJ, TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK RÖVID ÖSSZEFOGALALÁSA, HASZNOSÍTÁSA

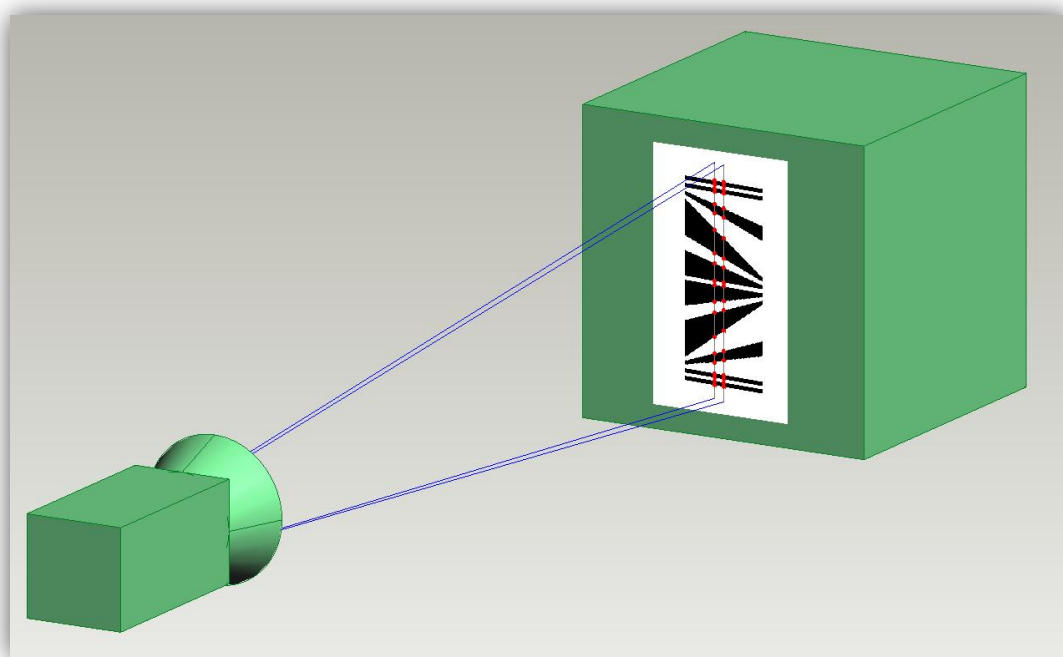
Az új tudományos eredmények rövid összefoglalása

Célkitűzéseim között a térbeli rezgésmérés többdimenziós mérésének egyidejű, azaz szimultán megvalósítása is szerepelt. Véleményem szerint ez egy vonalkamerával csak akkor valósítható meg, ha a mérni kívánt tárgy felületén egy ismert, jól definiált mintát helyezek el. Ezért kutatási területemet erre a módszerre szűkítettem. A mérési módszer szemléltetése a következő ábrán látható.



1. ábra
A vonalkamerás mérési elv szemléltetése

Értekezésemben megmutatom, hogy egyetlen pixelsorral az összes paraméter megmérése nem lehetséges. Ezért megvizsgálom a két pixelsor adatai alapján történő transzformációs paraméterek meghatározásának elméleti és gyakorlati lehetőségét, használhatóságát. Ennek a módosított mérési elvnek a szemléltetése a következő ábrán látható.

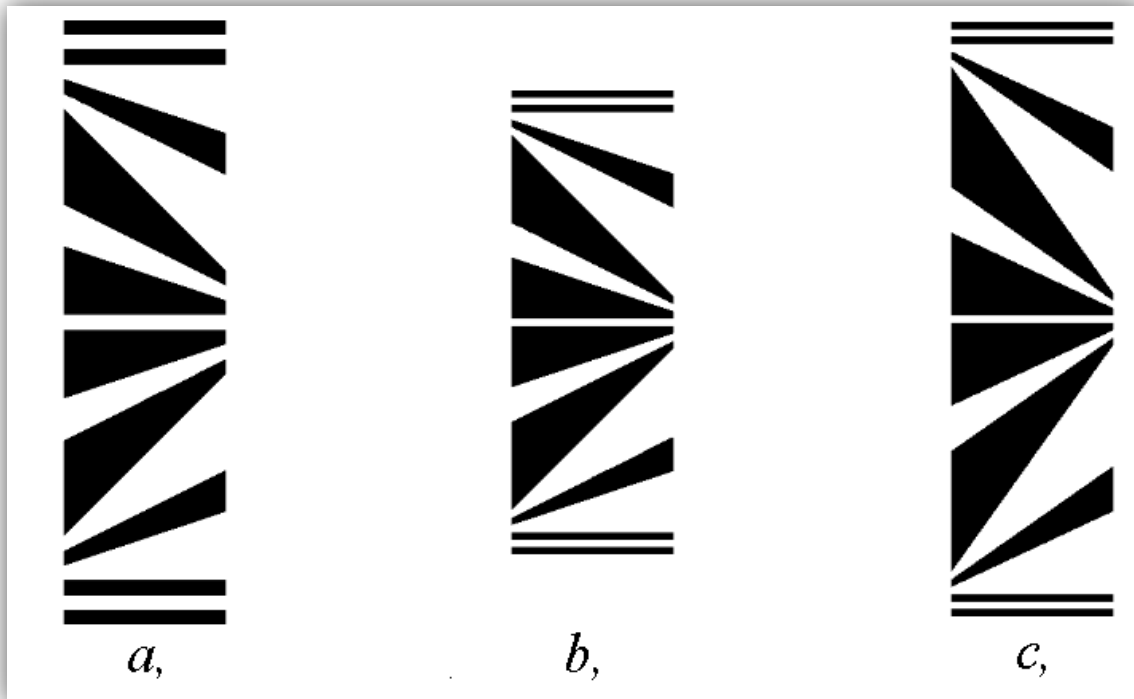


2. ábra

A két pixelsort alkalmazó mérési módszer szemléltetése

Irodalomkutatásaim során megállapítottam, hogy a Lim&Lim által kidolgozott minta alkalmas ugyan többdimenziójú mozgás detektálására, de több szempontból is célszerű továbbfejleszteni. A hivatkozott cikkből kiderül, hogy a mintát egy speciális feladathoz dolgozták ki, amelynek szinte csak mellékhatása, hogy mérni lehet vele a kamera pixelsorára merőleges irányú elmozdulást és a kamera optikai tengelye körüli elfordulást is. Az én célom egy olyan minta kialakítása volt, amely jóval általánosabban használható rezgésmérésre, több irányú eltolódás és elfordulás mérésére, a mért paraméterek lehető legpontosabb meghatározására.

Az új minta kialakításánál számos tényezőt figyelembe kellett vennem (homályosodás, szimmetria, méret, stb.). Végeredményben három mintaméret paraméterrel megadható, dinamikusan méretezhető mintát dolgoztam ki.



3. ábra

A véglegesen kialakított minta

a: szóródási kör (z) 1 mm, maximum meredekség(C_{\max}) 1, b: z=0,5 mm, $C_{\max}=1$; c: z=0,5 mm, $C_{\max}=1,5$

Tézis 1: Kidolgoztam egy speciálisan kialakított, fekete-fehér területekből álló mintát, amely a mérendő tárgy sík felületére illesztve alkalmas a tárgy többdimenziójú mozgásának szimultán meghatározására vonalszenzorok felhasználásával.

Az általam megtervezett minta nem egy univerzális, fix méretekkel rendelkező alakzat, amellyel csak annyi a felhasználó dolga, hogy kinyomtatja és felragasztja a mérni kívánt testre. A megtervezett minta változtatható méretparaméterekkel rendelkezik, amelynek célja, hogy a mintát a mérési feladathoz lehessen igazítani, optimalizálni.

Értekezésemben egy olyan mintaméretező módszert mutatok be, amely alapján a mérési módszert felhasználó személy képes előállítani a mérési körülményekhez leginkább illeszkedő mintát.

Tézis 2: Az 1. tézisben ismertetett új minta alkalmazásspecifikus tervezéséhez új méretparaméterező módszert dolgoztam ki. A módszer lehetővé teszi a minta méretparamétereinek dinamikus változtatását, figyelembe véve a dimenzióként elvárt méréstartományokat és felbontásokat.

Irodalomkutatásaim során azt tapasztaltam, hogy az eredetileg futószalagon mozgó tárgyak fényképezéséhez kifejlesztett vonalkamerákat

ritkán használják a mérés technika területén. Ezen felül nem találtam olyan publikációt, amelyben a line scan kamerát folyamatos méréshez használták volna. Arra a kérdésre, hogy ennek mi lehet az oka, azt a választ valószínűsítettem, hogy különleges problémákat vet fel a folyamatos mérés közben előálló hatalmas adatmennyiség. Jelenleg nem áll rendelkezésre olyan módszer, amely a vonalkamerák által előállított adatot valamilyen módon megszüntetné, és kinyerné a mérések kiértékeléséhez szükséges információkat. Az én kutatási célkitűzéseim között a folyamatos mérés megvalósítása is szerepelt, ezért elengedhetetlenül fontosnak tartottam egy olyan módszer kifejlesztését, amely már mérés közben, valós időben kezelhető méretűre képes redukálni a vonalkamera által szolgáltatott adatmennyiséget, folyamatos mérés esetén is. Értekezésemben kidolgoztam és gyakorlatban megvalósítottam egy olyan adatredukáló egységet, amely képes a vonalkamerák szolgáltatotta képadatok online előfeldolgozására, amelynek következtében a vonalkamerák legnagyobb sorszámajánál előálló adatmennyiség is kezelhető méretűre csökken. Ehhez kapcsolódóan tézist nem fogalmaztam meg.

A Lim&Lim alkalmazásában a mérendő felületre rögzített minta a fizikai korlátokból adódóan csak a kamera optikai tengelyére merőleges síkjában mozoghat. Mivel az én célkitűzésem egy meghatározott mérésstartományon belül szabadon mozgó felület elmozdulás- és/vagy rezgésmérése, szükségem volt egy a térben alkalmazható matematikai modellre. A modellben a mintát síkban elhelyezkedő, egymáshoz képest rögzített elhelyezkedésű egyenesek egyenletrendszeriként írtam fel. A felület mozgásából eredő tengelyek körüli elfordulásokat és eltolódásokat a háromdimenziós grafikában is alkalmazott transzformációs mátrixokkal írtam le. A levezetett modellt szimulációs alkalmazással ellenőriztem és helyességét igazoltam.

Tézis 3: *Kidolgoztam egy matematikai modellt, amelyet felhasználva olyan egyszerűsített feldolgozó algoritmusokat fejlesztettem ki, amelyekkel az egy és többvonalas szenzorok szolgáltatott eredmények hatékonyan feldolgozhatóak számítógép segítségével. A matematikai úton levezetett, kidolgozott modell működését a megvalósított szimulációs és tesztelő alkalmazással részletesen megvizsgáltam, és működését, helyességét statisztikai úton igazoltam.*

Az általánosan alkalmazható matematikai modell levezetését követően, kidolgoztam az egy- és kétpixelsoros mérési módszereket és a hozzájuk tartozó feldolgozó algoritmusokat az egyszerűsített modellre, amely nem veszi figyelembe a perspektivikus torzítás hatásait. A kidolgozott algoritmusok helyességét a szimulációs és tesztelő alkalmazással statisztikai úton megvizsgáltam és igazoltam.

Tézis 4: Olyan mérési módszereket és hozzájuk tartozó feldolgozó algoritmusokat dolgoztam ki, amelyek egy illetve két pixelsor alkalmazásával képesek egy meghatározott méréstartományon belül minden irányban szabadon mozgó felület tengelyenkénti elfordulásának és elmozdulásának nagy pontosságú meghatározására. Egy pixelsor alkalmazása esetén egy tengely körüli elmozdulás és elfordulás, két pixelsor esetén két tengely menti eltolódás és három tengely menti elfordulás határozható meg.

Az algoritmusok gyakorlati alkalmazhatóságát nagymértékben meghatározó tényező, hogy az algoritmusok az adatokat mennyi idő alatt képesek feldolgozni. Kihasználva a két pixelsor nyújtotta egyszerűsítési lehetőségeket, olyan feldolgozó algoritmust fejlesztettem ki, amely egy általános teljesítményű számítógépen lehetővé teszi a napjainkban elérhető legmagasabb sorkfrekvenciájú vonalkamerák szolgáltatata adatok online feldolgozását (az adatredukáló egység használatával).

Tézis 5: A két pixelsorra kidolgozott módszerrel és algoritmussal olyan online érintésmentes rezgésmérési módszert dolgoztam ki, amely két pixelsor alkalmazása esetén nagy mintavételezési sebességgel képes a térben szabadon mozgó felület két tengely mentén történő elmozdulását és három tengely mentén történő elfordulását online módon detektálni és feldolgozni.

Az új tudományos eredmények hasznosítása

Az előzőekben bemutatott és kidolgozott új mérési és feldolgozó eljárások jelenlegi formájukban is alkalmasak nagyfrekvenciás elmozdulás- és/vagy rezgésmérésre azokban az esetekben, amikor a mérési körülmények és méréshez helyesen megválasztott elemek garantálják, hogy a perspektivikus torzítás hatása elhanyagolható.

Az adatredukáló módszer kifejlesztése és megvalósítása a mérés technika számos területén új lehetőségeket nyit meg, amelyeknek kihasználása további kutatásoknak és fejlesztéseknek ad helyet.

A mintát sík felületek mérésére dolgoztam ki. Azonban az ipar több területe igényelné a forgó tengelyek (turbinák) többdimenziójú rezgésfigyelését is. Az egyik továbbfejlesztési lehetőség, hogy a mintát forgó, tengelyszimmetrikus testek mérésére dolgozzam át. A másik továbbfejlesztési lehetőség a minta egy részének síkból való kiemelése, amellyel háromdimenziós minta jön létre. Ezzel lehetőség nyílna további transzformációs paraméterek meghatározására már egy pixelsor esetén is.

Értekezésemben az egyszerűsített modellre dolgoztam ki a feldolgozó algoritmusokat. Az így elért eredmények már önmagukban is alkalmazhatóak az ipar bizonyos területein, de a perspektivikus torzítást feloldó általános

feldolgozó algoritmusokban is nagy lehetőség rejlik. Kidolgozása azért is indokolt, mert kellően nagy perspektivikus torzítás esetén az optikai tengely menti eltolódás is meghatározható, tehát lehetőség nyílik egy felület teljes háromdimenziós mozgásának meghatározására. A perspektivikus torzítást is kezelő matematikai modell egzakt megoldása – komplikáltságából adódóan – nem célravezető, azonban a könnyen előállítható eredményhalmazok alapján nincs akadálya egy többrétegű neurális hálózat betanításának.

Az egypixelsoros mérési eljárás gyakorlati tesztelésére részben lehetőségem volt, azonban a kétpixelsoros eljárás gyakorlati teszteléséhez jelenleg nem áll rendelkezésre megfelelő kamera. A jövőben szándékomban áll megvalósítani a vonalkamerákban alkalmazott szenzormodulokból egy olyan speciális kamerát, amely a kétpixelsoros rezgésmérésre optimalizált.

Az FPGA-ra kidolgozott adatredukáló algoritmus a várakozásaimnak megfelelően teljesített, de a továbbfejlesztése több szempontból is indokolt. A jövőben kezelnem kell a nem tiszta átmeneteket, ezen felül célszerűnek látom a homályosodási sáv mérését az előfeldolgozóban, az FPGA-n megvalósítani.

Az előzőekben felsorolt, csupán néhány továbbfejlesztési irányon túlmenően, a kutatási terület és a vonalkamerák viszonylag újszerű, mérés technikai alkalmazása további kutatási témáknak adhat helyet.

IV. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Folyóirat

Lektorált idegen nyelvű külföldi cikk

- [S1] Bodolai Tamás, Váradiné Szarka Angéla: *Solving the Big Data Problem in Area of High-Speed Optical Vibration Measurement*, Journal of Computer Science and Control Systems Vol. 6, Nr. 2: pp. 9-12., 2013, ISSN: 1844-6043

Lektorált magyar nyelvű cikk

- [S2] Bodolai Tamás, Váradiné Szarka Angéla: *Érintésmentes elmozdulás- és rezgésmérés vonalkamerák felhasználásával*, Magyar Elektronika Professzionális elektronikai és automatizálási szakfolyóirat, 2013/5. szám XXX. évfolyam, 50-53. oldal, ISSN: 0236-6134
- [S3] Bodolai Tamás: *Optikai távolságmérés lehetőségeinek vizsgálata, Analysis of possibilities of the optical distance measuring*, GÉP, A Gépipari Tudományos Egyesület műszaki folyóirata, 2012/3. szám LXIII. évfolyam, 99-102 oldal, ISSN: 0016-8572

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelenő anyag

Nem lektorált

- [S4] Bodolai Tamás: *Line scan kamerák használhatóságának vizsgálata mozgás- és rezgésmérés céljára*, Számítástechnika az Oktatásban Konferencia, 2011, ISSN 1842-4546, 128-132. oldal
- [S5] Bodolai Tamás: *Lézeres távolságmérő paramétereinek meghatározása*, Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, 2009, ISSN: 1842-4546, 165-169. oldal

Helyi konferencia-kiadványban megjelenő anyag

Lektorált idegen nyelvű

- [S6] Bodolai Tamás: *Development of a Research Support Application for Line Scan Measurements*, International Scientific Conference, 2012, ISBN 978-963-661-773-8, CD H-8
- [S7] Bodolai Tamás: *Development of a New Method for Contactless Vibration Measurement*, International Scientific Conference, 2011, ISBN 978-963-661-962-6, 13-16. oldal

Magyar nyelvű

- [S8] Bodolai Tamás: *Mintatesztelő szoftver fejlesztése line scan kamerás alkalmazásokhoz*,. Doktoranduszok Fóruma, 2011, Nyomdászám: TNO.2012-96.ME, 7-10. oldal
- [S9] Bodolai Tamás: *Ultrahang adó-vevők és line-scan kamerák felhasználhatóságának vizsgálata érintésmentes rezgésmérés céljára*, Doktoranduszok Fóruma, 2010, Nyomdászám: ME. Tu-99/2011., 19-24. oldal

V. AZ ÉRTEKEZÉSBEN FELHASZNÁLT IRODALMAK, ALKALMAZOTT REFERENCIÁK

Nyomtatásban megjelent hivatkozások

- [P1] M. Decker, K. Hintz, J. Nobis, C. Gühmann: *Controlling a Diesel Engine with Engine Management Based on Structure-Borne Sound*, IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, 2012
- [P2] M. J. Usher, D. A. Keating: *Sensors and Transducers*, Macmillian Press, 1996, ISBN 0-333-60487-3
- [P3] H. K. Tönshoff, I. Inasaki: *Sensors in Manufacturing*, WILEY-VCH, 2001, ISBN 3-527-29558-5
- [P4] Jon S. Wilson: *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, 2005, ISBN 0-7506-7729-5
- [P5] P. Hariharan: *Optical Interferometry*, Elsevier, Academic Press, 2003, ISBN 0-12-311630-9
- [P6] Jia Shuhai, Yue Kaiduan, Tan Yushan: *The system of double-optical-path ESPI for the vibration measurement*, Elsevier, Optics and Lasers in Engineering, 2000, ISSN 0143-8166
- [P7] Saba Mirza, Priti Singh, Rajesh Kumar, A.L. Vyas, Chandra Shakher: *Measurement of transverse vibrations/visualization of mode shapes in square plate by using digital speckle pattern interferometry and wavelet transform*, Elsevier, Optics and Lasers in Engineering, 2006, doi:10.1016/j.optlaseng.2005.02.001
- [P8] A. Ota, Y. Kobayashi, O. Takano, N. Kasai: *Development of Digital Demodulator for Laser Vibrometer Standard*, IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, 2012
- [P9] C. Hirunyapruk, P. Rattanangkul, B. Thummawut, V. Plangsangmas: *A Calibration System for Laser Vibrometers at NIMT*, IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, 2012
- [P10] Richard Hartley, Andrew Zisserman: *Multiple View Geometry in computer vision*, Cambridge University Press, 2003, ISBN 0521-54051-8

- [P11] Thomas Luhmann, Stuart Robson, Stephen Kyle, Ian Harley: *Close Range Photogrammetry*, Whittles Publishing, 2006, ISBN 0-470-10633-6
- [P12] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Brooks/Cole Publishing Company, 1999, ISBN 0-534-95393-X
- [P13] Daniel Malacara, Brian J. Thompson: *Handbook of Optical Engineering*, Marcel Dekker, Inc., 2001, ISBN 0-8247-9960-7
- [P14] Singiresu S. Rao: *Mechanical Vibrations*, Prentice Hall, 2005, ISBN 013-196751-7
- [P15] J. S. Daruwalla, P. Balasubramaniam: *Moiré Topography in Scoliosis*, The Journal of Bone and Joint Surgery, vol. 67-B No. 2. March 1985
- [P16] Lénárt József: *Érintésmentes rezgésmérés*, GÉP, A Gépípari Tudományos Egyesület műszaki folyóirata, 2012/3. szám LXIII. évfolyam, 7-10 oldal, ISSN: 0016-8572
- [P17] Jean-José Orteu: *3-D computer vision in experimental mechanics*, Elsevier, Optics and Lasers in Engineering, 2009, doi:10.1016/j.optlaseng.2007.11.009
- [P18] K. Vacharanukul, S. Mekid: *In-process dimensional inspection sensors*, Elsevier, Measurement, 2005, doi:10.1016/j.measurement.2005.07.009
- [P19] Andy Wison: *Linescan Camera System Scores a Hole in One*, Vision System Design, 2012, ISSN 1089-3709
- [P20] M. Hrabovský, P. Šmíd, P. Horváth, Z. Bača: *Measurement of object vibrations using the theory of speckle pattern decorrelation*, International Journal for Light and Electron Optics, 2002, doi:10.1078/0030-4026-00133
- [P21] Hu. Eryi; He. Yuming; Hua. Yu: *Deformation and vibration inspection using a line-scan imaging system*, International Conference on Experimental Mechanics, 2008
- [P22] Mee-Seub Lim, Joonhong Lim: *Visual measurement of pile movements for the foundation work using a high-speed line-scan camera*, Elsevier, Pattern Recognition, 2008, doi:10.1016/j.patcog.2007.10.025
- [P23] M. Nayerloo, X.-Q. Chen, J.G. Chase, A. Malherbe, G.A. MacRae: *Seismic structural displacement measurement using a high-speed line-scan camera: experimental validation*, NZSEE Conference, 2010
- [P24] Kalman Babković, László Nagy, Damir Krklješ: *Optical Sensor for Vibration Monitoring*, International Symposium on Power Electronics, 2011
- [P25] Barabás János, Gróh Gyula Dr.: *A fényképezés kézikönyve*, Műszaki könyvkiadó, 1956
- [P26] Sárközi Zoltán, Dr. Sevcsik Jenő, Kun Miklós: *Fotósok könyve*, Műszaki könyvkiadó, 1977, ISBN 963-10-1851-2
- [P27] Rejtő Ferenc: *EMC alapok*, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, 2006, ISBN 9639299081

- [P28] Gunasekaran G: Study of Performance for The CPU and GPU Architecture, International Journal of Research in IT, Management and Engineering, Volume2, Issue2, 2012, ISSN: 2249-1619

Online hivatkozások

- [O1] <http://www.pim-kft.hu>
- [O2] <http://www.keyence.co.hu>
- [O3] <http://www.industrial.omron.hu>
- [O4] <http://www.lionprecision.com>
- [O5] <http://www.micro-epsilon.com>
- [O6] <http://www.sios.de>
- [O7] <http://www.lasertex.eu>
- [O8] <http://www.visionpro.com>
- [O9] <http://www.hdi-solutions.com>
- [O10] <http://www.photron.com>
- [O11] <http://www.teledynedalsa.com>
- [O12] <http://www.baslerweb.com>
- [O13] <http://www.farnell.com>
- [O14] <http://www.imagelabs.com>
- [O15] <http://www.nndb.com>
- [O16] <http://www.awaiba.com>
- [O17] <http://www.ni.com>

VI. THESES

Thesis 1: I have developed a special pattern containing black and white areas which should be fitted to the surface to be measured. The method using line scan sensors for recording movement of this pattern is suitable for simultaneous determination of multidimensional movements of the object.

Thesis 2: I have developed a new method for sizing the pattern described in thesis 1. in order to make it suitable for application specific definition. This method is suitable for dynamical changing of the pattern's sizing parameters considering expected ranges and resolutions of each dimension.

Thesis 3: I have developed a mathematical model for simplified algorithms used for the effective computerised processing of data provided by one and more lines sensors. Functioning of the mathematically deduced and developed model was analysed in details and its pertinence and operation was verified by my simulation and testing application.

Thesis 4: I have developed measurement methods and processing algorithms using one or two pixel rows suitable for determination of axial movements and rotations of a surface performing free movement within a defined measurement range. Using one pixel row one axial movement and rotation can be determined. Using two pixel rows two axial movements and three rotations can be determined.

Thesis 5: Using method and algorithm described in thesis 4, for two pixel rows I have developed an online contactless vibration measurement method suitable for online detection and processing of two axial movements and three axial rotations of a free-moving surface measured by high sampling frequency.