



Vonalkamerás rezgésmérési és feldolgozó módszerek fejlesztése

PhD értekezés

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

Tartalomjegyzék

Témavezető ajánlása	1
Köszönetnyilvánítás	2
Rövidítések, jelölések, idegen kifejezések jegyzéke	3
1. Bevezetés.....	7
1.1. Tudományos kutatásom célkitűzései	7
1.2. Az értekezés felépítése.....	7
2. A hazai és A nemzetközi szakirodalom áttekintése	9
3. Mintatervezés többdimenziós mozgás egyidejű detektálásához.....	14
3.1. Az alkalmazott mérési elv ismertetése.....	14
3.2. Új, saját minta kifejlesztése	15
3.3. Mintatesztelő alkalmazás fejlesztése	26
3.4. A kidolgozott minta tesztelése, következtetések.....	30
3.5. Új minta méretezési módszerének kidolgozása	32
3.6. Új tudományos eredmények	41
4. Adatmennyiség-redukálási módszer kidolgozása	42
4.1. A redukálási elv ismertetése	42
4.2. Az adatredukálás megvalósítása FPGA felhasználásával	42
4.2.1. A fejlesztő- és tesztkörnyezet kialakítása.....	43
4.2.2. Előkészületek, adatfolyam-vizsgálat	51
4.2.3. Az adatszimuláló egység kifejlesztése	55
4.2.4. Az adatredukáló egység kifejlesztése	56
4.2.5. Tesztelési eredmények és következtetések.....	61
5. A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból	64
5.1. Az alkalmazott minta matematikai leírása	64
5.2. A matematikai modell.....	66
5.3. A transzformációs paraméterek meghatározása kereséssel	69
5.4. A továbbfejlesztett szimulációs és tesztelő alkalmazás ismertetése	78
5.5. A mérési eredmények összefoglalása, következtetés.....	83
5.6. Új tudományos eredmények	88
6. A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból	89
6.1. Az alkalmazott minta matematikai leírása	89
6.2. A matematikai modell.....	89
6.3. A transzformációs paraméterek meghatározása.....	91
6.4. A továbbfejlesztett szimulációs és tesztelő alkalmazás ismertetése	94
6.5. A mérési eredmények összefoglalása, következtetés.....	95

6.6. Új tudományos eredmények	100
7. Új tudományos eredmények	102
Továbbfejlesztési lehetőségek.....	103
Összefoglalás.....	104
SUMMARY	105
Saját publikációk.....	106
Folyóirat.....	106
Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelenő anyag	106
Helyi konferencia-kiadványban megjelenő anyag	107
Irodalomjegyzék, alkalmazott referenciák	108
Mellékletek.....	110

TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

A doktori értekezés az érintésmentes rezgésmérés témakörében készült. A dolgozatban bemutatásra kerül több újonnan kidolgozott modell, módszer és algoritmus. A dolgozat kiemelt értéke, hogy a tudományos módszerességgel kidolgozott új matematikai modelleket és algoritmusokat a lehetőségek függvényében a gyakorlatban is implementálta, vagy az implementációt szimulálta, a módszerek helyességét alkalmazhatósági és statisztikai hibabecslési vizsgálatokkal támasztotta alá.

A témavezető megítélése szerint a munka tudományos eredményei több szempontból értékelhetők: az ipari alkalmazások területén a legkiemelkedőbb eredmény a jelentősen megnövelt mintavételezési sebesség, amihez magas színvonalon, igényes munkával kidolgozott, értékes matematikai modelleket hozott létre, az informatikai tudományok szempontjából pedig a munka legnagyobb értéke az adatredukálási módszer kidolgozása.

Meg kell jegyezni, hogy a jelölt az elméleti módszerek kidolgozását követően a módszer helyességét a gyakorlatban nem tudta tesztelni, de a szimulációs eredmények megfelelően alátámasztják a precízen kidolgozott módszerek összehangolt rendszerének működőképességét és hatékonyságát.

Az értekezés jól felépített egységet alkot, magába foglalja a jelölt elmúlt 4 év alatt elért legfontosabb kutatási eredményeit. A jelölt doktori tevékenységének ideje alatt 3 lektorált és 1 nem lektorált folyóiratcikket publikált, 7 rangos nemzetközi és 7 helyi konferencia-kiadványban jelentette meg eredményeit, valamint 3 db magyar nyelvű, írásban meg nem jelent előadást tartott.

Tudományos munkában való folyamatos részvétele, szorgalma, és az itt feltüntetett eredmények együtt igazolják a jelölt magas színvonalú tudományos ismeretét és az önálló kutatómunkára való alkalmasságát. Kijelenthető, hogy a jelölt magasán kiemelkedő képességekkel rendelkezik, az elméleti felkészültség, a tudományos kutatásra való alkalmasság, valamint a gyakorlatias szemlélet egészen kivételes összhangját képes megvalósítani. A jelölt doktori értekezésben foglalt új tudományos eredményei szakmai meggyőződésem szerint nagymértékben hozzájárulnak a szakterület fejlődéséhez.

Kijelentem, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz, az abban foglalt eredmények a jelölt saját eredményei, valamint a dolgozat minden vonatkozásban megfelel a Hatvány József Informatikai Tudományok Doktori Iskola által megkövetelt tartalmi és formai követelményeknek.

Fentiek alapján a PhD cím odaítélését támogatom és javaslom.

Váradiné Szarka Angéla

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik biztatásukkal, támogatásukkal, segítségükkel hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez.

Megköszönöm a segítségét tudományos témavezetőmnek, Váradiné Szarka Angélának, aki az évek során nagy figyelmet fordított szakmai fejlődésemre, tanácsaival és segítőkész hozzáállásával aktívan támogatott értekezésem elkészítésében.

Köszönet a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai – Elektronikai Tanszék munkatársainak, akik mindig igyekeztek segítségemre lenni. Külön köszönöm meg Kovács Ernőnek és Radács Lászlónak, közvetlen feletteseimnek a rugalmas munkabeosztást és támogatást, amely a tudományos kutatásom előrehaladását segítette.

Szeretném megköszönni Tóth Tibor Professzor Úrnak, a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola volt vezetőjének a Doktoranduszi Szemináriumokon és Fórumokon adott bölcs tanácsait, amelyekkel aktívan hozzájárult tudományos kutatásomhoz.

Külön köszönet illeti meg az NI Hungary Kft.-t, amiért ideiglenesen rendelkezésemre bocsátotta azt a line scan kamerát, amely a kutatómunkám kezdetén a gyakorlati tesztek biztosította, s ezzel megalapozta a további elméleti eredményeket.

Köszönetet mondok szerető feleségemnek és gyermekemnek, akik türelmükkel, szeretetükkel és biztatásukkal járultak hozzá értekezésem megírásához. Szüleimnek köszönöm a belém vetett hitet és az értem hozott áldozatokat, amellyel az egyetemi tanulmányaimat lehetővé tették.

Hálával gondolok Polonkai Gáborra, nagyapámra, akinek azt a hozzáállást köszönhetem, amely nélkül ezt az eredményt nem érhettem volna el.

RÖVIDÍTÉSEK, JELÖLÉSEK, IDEGEN KIFEJEZÉSEK JEGYZÉKE

Rövidítések jegyzéke

Rövidítés	Leírás
AOI	Automated optical inspection; automatizált optikai ellenőrzés
LDV	Laser Doppler Vibrometer; lézer Doppler rezgésmérő
FPGA	Field Programmable Gate Array
FlexRIO	Flexible Reconfigurable Input Output; flexibilis, újraprogramozható bemenet, kimenet
TTL	Transistor–Transistor Logic; tranzisztor-tranzisztor logika
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor; komplementer fém-oxid félvezető
LVDS	Low Voltage Differential Signaling; alacsony feszültségű differenciális jelátvitel
CLK	Clock; órajel
FVAL	Frame Valid; érvényes kép
LVAL	Line Valid; érvényes vonal
DVAL	Data Valid; érvényes adat
MSB	Most significant bit; legmagasabb helyiértékű bit
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation; PCI kiterjesztés műszerezéshez
VI	Virtual Instruments; virtuális műszerek
VHDL	Very High-Speed. Integrated Circuit Hardware Description Language; Nagyon magas sebességű integrált áramkörök hardveres leíró nyelve
FIFO	First In, First Out; az elsőre bemenő, az elsőre kimenő
GPU	Graphics Processing Unit; grafikus feldolgozó egység

Jelölések jegyzéke

Jelölés	Leírás
f	fókusz távolság
k	képtávolság
t	tárgytávolság
R	rekesztérték
z	szóródási kör
t_k	mélységélesség közeli határa
t_t	mélységélesség távoli határa
v	egy pont koordinátáit tartalmazó vektor (kiindulási állapot)
r	egy pont koordinátáit tartalmazó vektor (transzformációk után)
r_{pers}	egy pont koordinátáit tartalmazó vektor (perspektivikus torzítás után)
M_{ROTX}	x tengely menti elforgatást megvalósító transzformációs mátrix
M_{ROTY}	y tengely menti elforgatást megvalósító transzformációs mátrix
M_{ROTZ}	z tengely menti elforgatást megvalósító transzformációs mátrix
M_{trans}	x, y, z tengelyek menti eltolást megvalósító transzformációs mátrix
M_{pers}	a perspektivikus torzítást megvalósító transzformációs mátrix
$M_{\text{pers_trans}}$	a perspektivikus torzítás helyes megvalósításához szükséges segéd, eltolásokat tartalmazó transzformációs mátrix

Jelölés	Leírás
d_x, d_y, d_z	a felhasználói felületen x, y, z tengely menti eltolások beállítására szolgálnak
α, β, γ	x, y, z tengelyek menti elfordulást jelölik, transzformációs paraméterek
m_p	kamera pixelmérete (élhosszúsága)
m_{sz}	kamera szenzormérete (hossza)
$\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$	α, β, γ szögek legnagyobb kitérése
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	x, y, z tengely menti legnagyobb kitérések
r_x, r_y	x, y, tengelyek menti eltolódások felbontása
$r_\alpha, r_\beta, r_\gamma$	α, β, γ szögek felbontása
N_{min}	szükséges leképezési arány
m_t	tárgyméret, annak a vonalnak hosszúsága, amelyet a kamera az éles síkban lát
$m_{y,max}$	a minta y irányú valós, maximális kiterjedése
C_{max}	szükséges legnagyobb meredekség
$C_{max,korr}$	korrigált szükséges legnagyobb meredekség
m_{3p}	$3 \cdot m_p$
α_{min}	szükséges α szög
α_{kamera}	kiindulási helyzetben a kamera elhelyezési szöge x tengely menti elfordulásban
α_{bizt}	beállítási bizonytalanság α szögre nézve
α_{max}	α szög mérés közben elérhető legnagyobb értéke
$t_{közeli}$	legrosszabb esethez tartozó közelponti tárgytávolság
$R_{valós}$	valós rekeszérték
Z_{sz}	szükséges szóródási kör mértéke
$Z_{valós}$	mintában alkalmazandó szóródási kör mértéke
$m_{x,min}$	minta legkisebb x irányú kiterjedése alapállapotban
x_0, y_0, z_0	az x térbeli pont x, y, z koordinátája
x_t	térbeli pont koordinátáit jelöli a transzformációkat követően
m_y	minta y irányú valós kiterjedése
$m_{y,latsz}$	a minta kamera által érzékelt y irányú kiterjedése
$P_0(x_0, y_0, z_0)$	a térbeli egyenes egy tetszőlegesen választott pontja
$I(x_{diff}, y_{diff}, z_{diff})$	a térbeli egyenes irányvektora
$P(x, y, z)$	a térbeli egyenes egy pontja
$P'(t)$	a térbeli egyenes transzformált pontja
M_{rot}	összevont forgatást végző transzformációs mátrix
x_{trans}, y_{trans}	x, y irányú transzformációs paraméter
$x(\dots)$	a transzformált egyenes x koordinátája
$y(\dots)$	a transzformált egyenes y koordinátája
t	térbeli egyenes irányvektor szorzója
x_n, y_n	az n-edik transzformált egyenes x és y koordinátája ($n=1..20$)
x_i, y_i	az i-edik transzformált egyenes x és y koordinátája ($i=1..20$)
x_k, y_k	a k-adik transzformált egyenes x és y koordinátája ($k=1..20$)
$x_{n,0}, y_{n,0}$	az n-edik egyenes kezdőpontjának x és y koordinátája ($n=1..20$)
$x_{i,0}, y_{i,0}$	az i-edik egyenes kezdőpontjának x és y koordinátája ($i=1..20$)
$x_{k,0}, y_{k,0}$	a k-adik egyenes kezdőpontjának x és y koordinátája ($k=1..20$)
x_{diff}, y_{diff}	az egyenes irányvektorának x és y koordinátája
$x_{n,diff}, y_{n,diff}$	az n-edik egyenes irányvektorának x és y koordinátája ($n=1..20$)
$x_{i,diff}, y_{i,diff}$	az i-edik egyenes irányvektorának x és y koordinátája ($i=1..20$)

Jelölés	Leírás
$x_{k,diff}, y_{k,diff}$	a k-adik egyenes irányvektorának x és y koordinátája ($k=1..20$)
a, a_n	bevezetett változó, az n-edik egyenlet bevezetett változója ($n=1..20$)
$y_{n,L}, y_{n,R}$	az n-edik egyenes bal és jobb oldali pixelsor metszéspontjának y koordinátája ($n=1..20$)
x_{v1}, x_{v2}	a két pixelsor (bal, jobb) x koordinátája
v_{tav}	a két pixelsor távolsága pixelben kifejezve

Idegen kifejezések jegyzéke

Idegen kifejezés	Leírás
Area scan	Olyan digitális kamera, amely egy területet lát. Szenzorját mátrix alakzatban elhelyezett képpontérzékelők alkotják.
Line scan	Olyan speciális digitális kamera, amelyben a képpontérzékelők egyetlen sorban helyezkednek el.
LabVIEW	A National Instruments vállalat grafikus fejlesztőkörnyezete.
Camera Link	A vonalkamerák egyik lehetséges csatlakozó felülete.
Frame grabber	Olyan mérőkártya vagy egység, amely képes a kamerák által küldött adatok fogadására, dekódolására, a kamera paramétereinek beállításra.
Channel Link	Adatátviteli protokoll, amelyet a „Camera Link” csatlakozófelülettel ellátott vonalkamerák is használnak.
Tap	Szakkifejezés annak közlésére, hogy a kamera hány portot használ az adatok továbbítására.
Real time	Szakkifejezés a valós időben való cselekvés (mérés, feldolgozás) kifejezésére.
Triggerjel	Olyan jelzőjel, amellyel a mérés aszinkron módon elindítható.
Tick	Az órajel egy periódusának lefutása.
Queue	A LabVIEW terminológiában az adatok szálak közötti átadására használható FIFO memória.
Translate	Eltolás
Rotation	Forgatás
Camera projection	A felhasználói felületen a perspektivikus torzítás (centrális vetítés) paramétereinek csoportja.
Calculate	A felhasználói felületen a perspektivikus torzítás (centrális vetítés) be- kikapcsolására szolgál.
Magnification	A felhasználói felületen a perspektivikus torzítás (centrális vetítés) leképezés (nagyítás) paramétere.
Focal distance	A felhasználói felületen a perspektivikus torzítás (centrális vetítés) fókusz-távolság paramétere.
New reference	A felhasználói felületen új referenciaállapot felvételére használható.
Save image	A felhasználói felületen az eredménykép (átmenetek megjelenítése) mentésére szolgál.
Using pattern	A felhasználói felületen a tesztelni kívánt minta kiválasztására szolgál.
Pattern width in mm	A felhasználói felületen a minta szélességének beállítására szolgál.
Pattern min. gap in mm	A felhasználói felületen a minta minimális távolságára szolgál.
Pattern max. line coefficient	A felhasználói felületen a minta legnagyobb meredekségének beállítására szolgál.
.NET Framework	A Microsoft futtató környezete, szolgáltatások gyűjteménye.

Idegen kifejezés	Leírás
Graphics	A .Net Framework egyik osztálya, amellyel képek szerkesztése valósítható meg.
MatrixLib	Saját fejlesztésű függvénygyűjtemény a mátrixműveletek kezelésére.
Benchmark	Teljesítményteszt
Lisbox	A .Net Framework egyik osztálya, amellyel listaszerűen lehet egy szövegdobozba adatokat kiírni.
Generate result list	A felhasználói felületen az eredményhalmaz előállítására szolgáló nyomógomb.
Search the best	A felhasználói felületen a legjobb eredmény megkeresésére szolgáló nyomógomb.
Generation	Az eredményhalmaz előállítása közben a generálási szakasz jelzésére szolgál.
Shorting	Az eredményhalmaz előállítása közben a rendezési szakasz jelzésére szolgál.
Lines distance	A szimulációs és tesztelő alkalmazásban a két pixelsor távolságának beállítására szolgál.
Label	Magyarul címek, egysoros szöveg kiírására használható.
Host	Az értekezés szempontjából a számítógépen futó alkalmazás, amellyel az FPGA-n futó program használható.
Sim data type	A felhasználói felületen a szimulált adat típusának kiválasztására szolgál.
Custom data	A felhasználói felületen a személyre szabott szimulációs módot jelenti.
# elements in fifo	A FIFO-ban maradt elemek számának kijelzésére szolgál.
# elements in queue	A sorban maradt elemek számának kijelzésére szolgál.

1. BEVEZETÉS

1.1. *Tudományos kutatásom célkitűzései*

Kutatásom kezdeti szakaszában tanulmányoztam a rezgésmérés területén alkalmazható és gyakorlatban is alkalmazott mérési módszereket, a rezgés-diagnosztika 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 elfordulhat, 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.

Távoli célkitűzésem az alábbiakban bemutatott mérési módszerekhez a perspektivikus torzításokat is kezelő, általános feldolgozó algoritmusok kidolgozása. Azonban az általános modell összetettségéből adódóan célszerűnek láttam először az egyszerűsített modellen megvizsgálni a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát.

1.2. *Az értekezés felépítése*

Jelen fejezetben ismertetem kutatásom célkitűzéseit, röviden vázolom az értekezésem felépítését.

A 2. fejezetben az értekezésemhez kapcsolódó irodalomkutatások összefoglaló elemzését ismertetem. Feltérképezem a napjainkban alkalmazott kontakt és érintésmentes rezgésmérési módszereket, az ezen területen elért tudományos eredményeket, fejlesztéseket.

A kutatási témámhoz kapcsolódó közlemények bemutatása után egy olyan, új minta kidolgozásának lépéseit ismertetem, amely speciális kialakításának következtében lehetővé teszi egy felület többirányú elmozdulásának, elfordulásának egyidejű detektálását line scan kamera felhasználásával.

Az optikai mérési eljárásokban szinte mindig problémát okoz a nagy adatmennyiség, amelynek továbbítása, mentése és feldolgozása is speciális módszereket, eszközöket igényel. A kapcsolódó szakirodalom feldolgozása után nyilvánvalóvá vált, hogy az optikai mérési eljárások és azon belül is a line scan kamerás alkalmazások elterjedése a folyamatos mérést ellehetetlenítő adatmennyiség miatt nem lehetséges. Ez a probléma az általam alkalmazott mérési eljárásnál is felmerült, azonban a kidolgozott mérési eljárást csak abban az esetben láttam versenyképesnek, ha a folyamatos mérést is meg tudom valósítani. Ez az oka, hogy értekezésem következő fejezetében a legkritikusabb kérdéssel, az adatredukálás megvalósításával foglalkozom.

A következő két fejezetben az általános mérési módszer egyszerűsített esetével foglalkozom, amely speciális, elsősorban kislátászögű esetekben a gyakorlatban is alkalmazható mérési eljárás. Az 5. fejezetben az egy pixelsoros, a 6. fejezetben a két pixelsoros mérési eljárást részletezem. A két fejezet szerkezetileg azonosan épül fel a követhetőség és összehasonlíthatóság érdekében. A fejezetek első részében a mérési eljárások matematikai megfogalmazását ismertetem. Ezt követően röviden bemutatom a szimulációs és tesztelő alkalmazásomat, amellyel az általam kifejlesztett algoritmusok statisztikai módszerekkel is tesztelhetők. A fejezetek végén a mérési eredményeket és az új tudományos eredményeket ismertetem.

Az értekezés végén összefoglalom az új tudományos eredményeimet, röviden szemléltetem a továbbfejlesztésben rejlő lehetőségeket, majd az Összefoglalás fejezettel zárom az értekezés érdemi részét.

2. A HAZAI ÉS A NEMZETKÖZI SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

A különböző rezgés- és elmozdulásmérési módszereket az ipar számos területén használják. Alkalmazásuk egyaránt előfordul a tömeggyártásban, termékellenőrzésben, gépállapot-felmérésben. [P1],[O1],[O2],[O3]

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. [P2], [P3], [P4]

Először a szenzorgyártók kínálatát, specifikációit tanulmányoztam. Felmértem a napjainkban elérhető érintésmentes mérési módszerek nyújtotta lehetőségeket. A következőkben összefoglalom szenzortípusonként a leglényegesebb tulajdonságokat.

A kapacitív érintésmentes módok elsősorban a nm-es felbontású méréseknél kimagaslóak. Az általam vizsgált Lion Precision szenzorgyártó kínálatában találtam olyan szenzort is, amely 0,05 nm-es felbontással rendelkezik, igaz, ezt a teljesítményt rendkívül kis mintavételezési frekvencia (100 Hz) és méréstartomány (10 μ m) mellett képes teljesíteni. Ugyanennek a szenzornak a felbontása már 0,25 nm-re romlik a maximális, 15 kHz-es mintavételezési frekvenciánál. Ipari berendezések rezgésvizsgálatánál ez a mérési tartomány nem elegendő. A tartomány növelésével a szenzorok felbontása egyre jobban romlik. Az elérhető legnagyobb mérési tartomány 12,5 mm, ekkor a felbontás 350 nm. A kapacitív mérési elv alkalmazásának véleményem szerint két fő hátránya van. Az elérhető legnagyobb mintavételezési frekvencia sok esetben nem elegendő a rezgésmérési feladatokhoz. A szenzort meglehetősen közel (maximum 2 mm) kell helyezni a mért felülethez, amely hozzáférhetőségi problémák miatt nem mindig lehetséges. [O4]

Az induktív érintésmentes módszerek esetében az elérhető legnagyobb, ~80 kHz-es mintavételezési frekvencia már kielégítő. Felbontásuk jócskán elmarad a kapacitív szenzorokétól. Az általam vizsgált, szintén Lion Precision szenzorgyártó U50-es mérőfejével a specifikáció szerint 10 μ m-es felbontást érhetünk el 80 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett. Az induktív szenzoroknak is megvan az a hátrányuk, hogy a mért felülethez nagyon közel (maximum 2 mm) kell elhelyezni a mérőfejet. [O4]

A lézeres távolságmérőket egyre gyakrabban alkalmazzák az ipari rezgésmérés területén. Használatukat több pozitív tulajdonság is indokolja. A Micro Epsilon IDL 1302-es sorozatú, alsó kategóriás szenzorait például 30-60 mm-re helyezhetjük el a mérendő felülettől, de elérhetőek olyan típusok is (ILD 1402-600), amelyek 200 mm-es minimum távolsággal rendelkeznek. A háromszögelési mérési elvből következik, hogy minél távolabb van a szenzortól a mért felület, a felbontás annál rosszabb lesz. Az igen kis méréstartományú (± 1 mm), felső kategóriás szenzorok esetében akár a 0,1 μ m-es pontosság is elérhető, a nagy méréstartományú (± 100 mm) szenzorok esetében már a 40-100 μ m is jó felbontásnak számít. A lézeres távolságmérők mintavételezési frekvenciája okozza a legnagyobb problémát a rezgésmérés területén. Az általános modellek csupán néhány kHz-es teljesítményre képesek. A fejlesztések tendenciáját jól tükrözi, hogy néhány évvel ezelőtt a lézeres távolságmérők csúcskategóriájában 10 kHz volt az elérhető legnagyobb frekvencia. Napjainkban ez az érték eléri a 100 kHz-et. A nagy sebességnek természetesen ára van mind gazdasági, mind

pontossági vonatkozásban. Például az LD 1630-50 típusú, ± 25 mm méréshatárú szenzor 100 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett csupán 50 μ m-es pontosságra képes. Az ilyen speciális, felső kategóriájú szenzorok alkalmazását csak néhány ipari résztvevő tudja vállalni gazdasági vonatkozásban. [O5]

A lézer Doppler vibrométerek (LDV) szintén használhatóak érintésmentes rezgésmérésre. A Michelson típusú interferométerek alkalmazása a legtipikusabb, amelynél egy lézersugarat bocsátanak a mért felületre, és egy másikat egy referenciátükörre. A mért felületről visszaverődő sugarat összehasonlítva a referenciasugárral állapítható meg a felület sugárirányú rezgése. Ezt az elvet alkalmazza a SIOS Meßtechnik GmbH LSV sorozatú vibrométere is. Az adatlap szerint a berendezés maximum 1 MHz mintavételezési frekvenciára képes 0,1 nm-es felbontás mellett. A szenzor és a mért felület közötti távolság 240 mm és 2500 mm között változtatható. A módszernek és a szenzornak azonban nagy hátránya, hogy ezt a mintavételezési frekvenciát csak maximum 1 μ m amplitúdójú rezgések mérésénél használhatjuk. Ennél nagyobb, például 1 mm amplitúdójú rezgések esetén a mintavételezési frekvencia drasztikusan csökken, hozzávetőlegesen 100 Hz-re. Összességében elmondható, hogy az ilyen elven működő lézer Doppler vibrométerek általános rezgésmérésre alkalmatlanok, alkalmazásuk gazdasági okokból kifolyólag sem elterjedt. [P5]-[P9], [O6]

A vibrométerek egy módosított kialakításánál a mért felületre egy, a berendezéshez mellékelt speciális prizmat helyeznek. A prizma a fénynyalábot visszafordítja, amely így szinte szóródásmentesen jut a feldolgozó egységbe. A Lasertex Co. Ltd. HPI-3D berendezése ezt a megoldást képviseli. A specifikáció szerint 50 kHz-es mintavételezési frekvenciával mérhetünk 100 pm érzékenység mellett. Az eljárás hátránya, hogy a felületre rögzített prizma nem túl könnyű, így kisebb tömegű berendezéseknél befolyásolhatja a mérést. Ezen felül a prizma miatt forgó alkatrészek vizsgálatára nincs lehetőség. [O7]

Szakirodalmi kutatásomat ezt követően az egyre nagyobb teret hódító kamerás mérési módszerek területére fókuszáltam. Az ipar számos területén alkalmaznak kamerákat különböző mérési feladatok ellátására. A kamerával készített kép feldolgozása alapvetően három különböző elven történhet. [P10]-[P14]

Termékellenőrzés esetén legáltalánosabb eljárás a termék nevezetes, jól megkülönböztethető pontjainak beazonosítása a képen, majd ezek alapján a szükséges mérések elvégzése. Ilyen eljárást használ például az elektronikai gyártásban alkalmazott AOI (Automated Optical Inspection), amelyet egyaránt használhatnak a forrasztópasztá felvitelének és az alkatrészek beforrasztásának ellenőrzésére is. [O8],[O9]

A kamerás alkalmazások egy másik csoportja, amikor a mérendő tárgy felületére egy mintát vetítenek. A kamerával készített kép és a vetített minta ismeretében a tárgy felületi deformációi meghatározhatóak. Ilyen alkalmazási példa a termékreprodukció vagy az orvostudományban gerincferdülés mérésére alkalmazott Moiré-fotográfia. A fenti két módszer határterületére sorolhatóak azok az eljárások, amelyek különböző megvilágítási módokkal, például kontúrfény használatával teszik lehetővé a tárgy egy-egy pontjának beazonosítását. [P15]

A harmadik csoportba sorolhatóak azok az eljárások, amikor a mérendő tárgy felületére valamilyen mintát helyeznek el. A sorozatgyártásban, leszámítva a vonalkódokat, ez a módszer nem célravezető, ugyanakkor az érintésmentes rezgésmérés területén, elsősorban gyártóberendezések rezgésvizsgálatánál jól alkalmazható megoldás lehet. [P16]

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, $\sim 128 \times 64$ 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 640×480 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) befér. Gyakorlatilag a legtöbb nagysebességű kamera megszakítás nélkül 5-7 másodperc rögzítésére alkalmas. [P17], [O10]

Az *In-process dimensional inspection sensors* című közlemény 2005-ben jelent meg az Elsevier Measurement folyóiratában. A cikk több, gyakorlatban is alkalmazható mérési módszert mutat be, amelyek közül néhányat kiemelek. Az egyik érdekes és elgondolkodtató megoldás, amikor a mért felületre több, általában 4 fénynyalábot (lézersugarat) vetítenek. A négy pont mozgásait egy area scan kamerával rögzítik. A vetítési szögek és az eredménykép alapján a felület mozgásai detektálhatóak. A másik, hasonló elvű mérés lényege, hogy egy lézervonalat vetítenek a mért felületre oldalirányból, amelyet a felületre merőleges optikai tengelyű kamerával figyelnek. Az alacsony vetítési szög következtében a tárgy felületi változása nagy pontossággal kimutatható. Az eljárások nagy hátránya, hogy pontos méréshez nagyfelbontású area scan kamerára van szükség, amely az elérhető mintavételezési frekvenciát nagymértékben behatárolja (30-60 fps). [P18]

A másik említésre méltó eljárás, amely egyaránt alkalmazható area és line scan kamerával is, az árnyékmérés. Az eljárás lényege, hogy a mért alkatrész mögé fénykibocsátó felületet (illuminátor) helyeznek el. A vele ellentétes oldalon a kamera a tárgy által létrehozott árnyék nagyságát határozza meg. A mérés egyidejűleg több irányból is elvégezhető, ha a tárgy kialakítása azt lehetővé teszi. Az eljárás hátránya, hogy a mért elemnek mindkét oldalról hozzáférhetőnek kell lennie, amely ipari környezetben sokszor nem valósítható meg. [P18]

Véleményem szerint az érintésmentes rezgésmérés területén az area scan kamerák alacsony sebességük és felbontásuk miatt nem veszik fel a versenyt a lézeres távolságmérőkkel. [O2], [O3], [O5]

A line scan, azaz vonalkamerákkal még 2006-ban, a diplomamunkám kapcsán találkoztam először [S1]. Ezen kamerák 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 [O11], [O12]. 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 [P19], azonban rezgésmérési alkalmazásukra alig néhány esetet találtam [P20]-[P23], [P16].

A line scan kamerák lemezüzemi felhasználását mutatja be a *Deformation and vibration inspection using a line-scan imaging system* című közlemény [P21]. A kamerákat egyaránt használják a megmunkálás közbeni lemez-deformációk kimutatására és a feszítő acélhuzal rezgéseinek mérésére is. Utóbbi esetben a kamera szenzorját az acélhuzalra merőlegesen helyezik el, így a huzal berezgése nagy pontossággal megállapítható.

Az *International Journal for Light and Electron Optics* folyóiratban 2002-ben megjelent *Measurement of object vibrations using the theory of speckle pattern decorrelation*

közleményében a szerzők hangszóró rezgésmérését valósítják meg több vonalszenzor felhasználásával [P20]. A mérés elve, hogy a hangszóró fényes felületére egy lézernyalábot bocsátanak, amelynek szóródott, visszaverődő sugarait két egymástól független, a lézernyaláb tengelyével meghatározott szögben és távolságban elhelyezett vonalszenzorral detektálják. A cikk szerint így $0,1\text{ }\mu\text{m}$ felbontással 1 mm -es méréshatárral tudtak méréseket végezni. A szerzők a cikk végén megállapítják, hogy a memóriakapacitás-problémák miatt csak 125 Hz -es mintavételezéssel tudtak méréseket végezni.

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 [P22]. 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 arrébb elhelyezett line scan kamerával figyelnek. A mérési eljárásához 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, sajnos, általános esetben nem állja meg a helyét, mint azt a későbbiekben látni fogjuk, 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 sorkfrekvenciáját, 10 kHz -cel mintavételeztek. A méréseket 10 másodperces, kötött mintaszámú méréssel végezték. Megjegyzem, ekkor az általuk használt kamera másodpercenként $\sim 40\text{ MByte}$ adatot állított elő, amely adatmennyiség napjaink korszerű számítógépeivel még folyamatos mérés esetén is éppen lementhető lenne. Ennél nagyobb sorkfrekvenciánál, illetve nagyobb felbontású kamera esetén a folyamatos mérésnél előálló adatmennyiség speciális berendezések nélkül már nem rögzíthető. Megállapításuk szerint $120\text{ }\mu\text{m}$ -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* [P23], amely az előzőekben ismertetett Lim&Lim [P22] által 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 $\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 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. Továbbfejlesztési célkitűzésként a Lim&Lim [P22] mintájára alapozott több line scan kamerát alkalmazó mérőrendszer kifejlesztését jelölték meg, amely teljes 3D mozgás és forgás detektálására alkalmas.

Összességében elmondható, hogy az érintésmentes rezgésmérés területén számos olyan mérési feladattal találkozhatunk az iparban, amelyekre a szenzorgyártóknak jelenleg nincs megfelelő megoldásuk. Megismerve a szenzorgyártók kínálatát, az online és nyomtatott formában megjelent szakirodalmat, több fejlesztési irányvonalban látok nagy lehetőségeket. A line scan kamerás nagyfrekvenciás, folyamatos mérés megvalósítása újabb lehetőségeket nyitna az optikai mérés technika területén. A Lim&Lim [P22] által kidolgozott mintát alaposan tanulmányozva megállapítottam, hogy kialakítása több szempontból sem célszerű, ezért célul tűztam ki egy olyan minta kidolgozását, amely sokkal eredményesebben

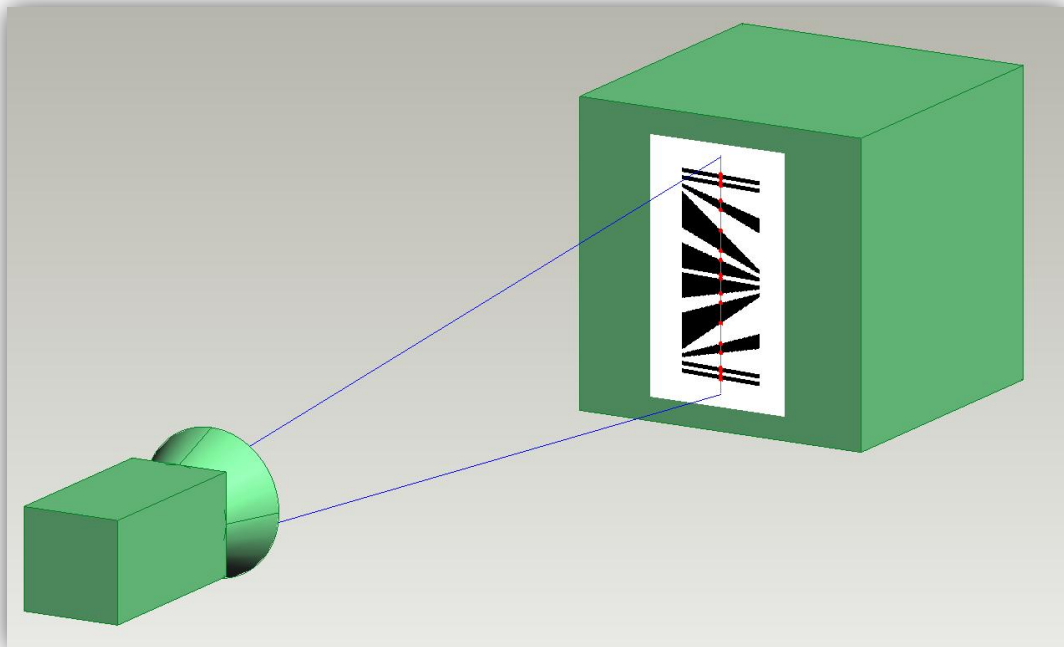
alkalmazható az egy- és kétpixelsoros line scan kamerás alkalmazásokban. A harmadik terület olyan, két pixelsort alkalmazó mérési módszer kidolgozása, amellyel egy felület teljes térbeli mozgása szimultán meghatározható.

3. MINTATERVEZÉS TÖBBDIMENZIÓS MOZGÁS EGYIDEJŰ DETEKTÁLÁSÁHOZ

3.1. Az alkalmazott mérési elv ismertetése

Az értekezés fő fejezeteiben kifejtett eredmények mindegyike az alábbiakban bemutatott mérési elvekre épül.

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.



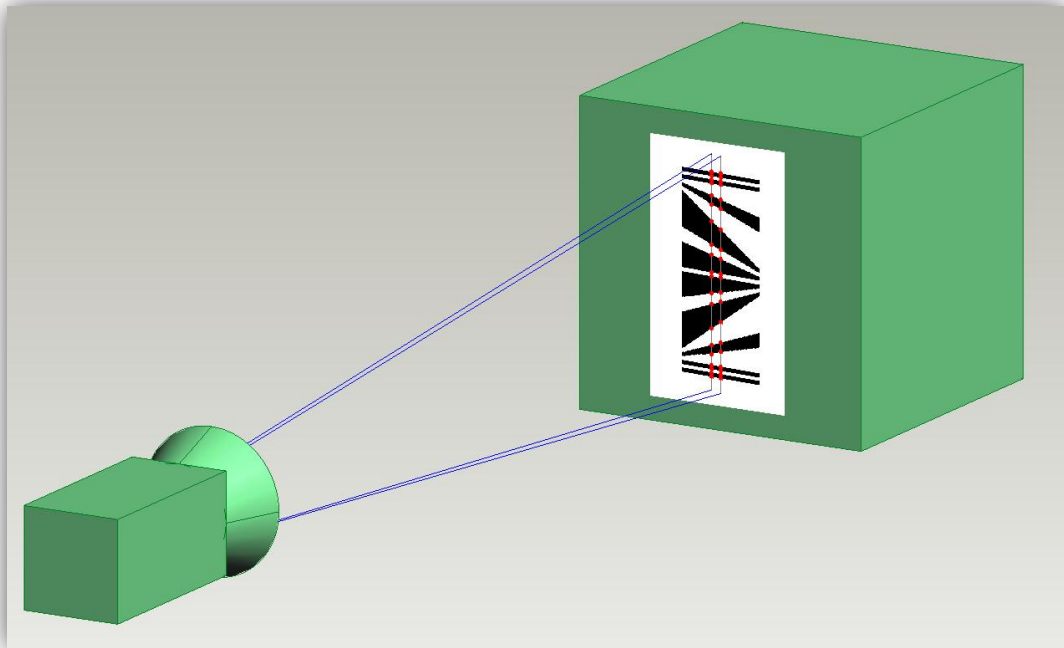
1. ábra

A vonalkamerás mérési elv szemléltetése

A mérendő tárgy felületére egy ismert felosztású, fekete-fehér területekből álló mintát rögzíték. A kamerát úgy helyezem el, hogy a kamera által érzékelt vonal teljes egészében metssze a mintát alkotó fekete területeket. A kamerával készített képen a feketéről fehérre, illetve fehérrel feketére történő átmenetek szolgáltatják a mérés szempontjából lényeges adatokat. Abból, hogy a kamera pixelsorában hányadik pixeleknél voltak az átmenetek, és a minta felépítéséből a térbeli elmozdulások, rezgések bizonyos mértékig meghatározhatóak.

Egy rögzített Descartes-féle koordináta-rendszerben egy felület elhelyezkedését hat transzformációs paraméterrel adhatom meg. Jelen fejezetben és az értekezés további fejezeteiben a következő tengelyirányokat, vonatkozási irányokat fogom használni. A koordináta-rendszer középpontja a kamera éles síkjának (minta kiindulási állapota) és a kamera optikai tengelyének metszéspontja. A jobb sodrású x , y , z tengelyek közül a z a kamera optikai tengelyével egybe esik, a kamera felé mutat, az y tengely a kamera pixelsorával párhuzamos, az 1. ábra elrendezésében felfelé mutat.

Gyakorlatilag egyetlen pixelsorral, mint azt a későbbiekben látni fogjuk, az összes paraméter megmérése nem lehetséges. Ezért a disszertáció 6. fejezetében megvizsgálom a két pixelsor adatai alapján történő transzformációs paraméterek meghatározásának elméleti és gyakorlati lehetőségét, használatosságát. Ennek a módosított mérési elvnek a szemléltetése a következő ábrán látható.

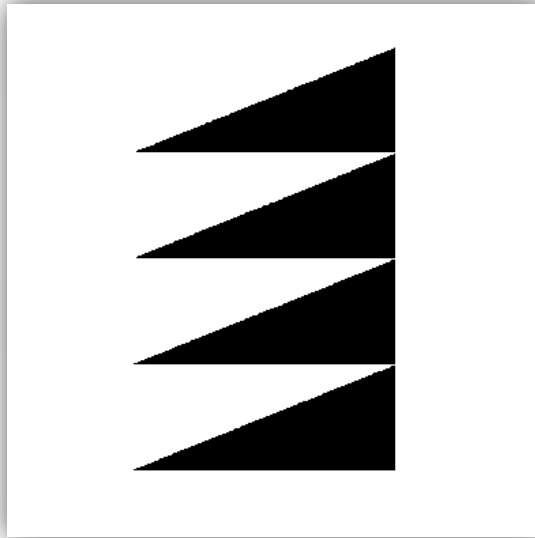


2. ábra
A két pixelsort alkalmazó mérési módszer szemléltetése

A kétpixelsoros mérés gyakorlati megvalósítása kétféle módon történhet. Az egyik lehetőség az egymás mellé mereven rögzített két line scan kamera alkalmazása. A másik az egy kamerába integrált két, egymással szinkronizált szenzormodul használata.

3.2. Új, saját minta kifejlesztése

Irodalomkutatásaim során megállapítottam, hogy a Lim&Lim által kidolgozott minta (3. ábra) alkalmas ugyan többdimenziójú mozgás detektálására, de több szempontból is célszerű továbbfejleszteni. A hivatkozott cikkből egyértelműen látszik, 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. A Lim&Lim által kidolgozott eljárás azonban csak akkor alkalmazható, ha a mérési körülményekből adódóan garantálni lehet, hogy a minta csak a kamera optikai tengelyére merőleges síkban mozog [P22]. Az én célom egy olyan minta kialakítása, amely jóval általánosabban használható rezgésmérésre, több irányú eltolódás és elfordulás mérésére, a mért paraméterek lehető legpontosabb meghatározására. A minta tervezését azon szempontok összegyűjtésével kezdtem, amelyeket figyelembe kellett vennem a kialakításnál.



3. ábra
A Lim&Lim által tervezett minta [P22]

Tervezési szempontok

Amikor megismertem Lim&Lim mintáját [P22], az első dolog, ami elgondolkodtatott, hogy kiindulási állapotban a mintában vízszintes és a vízszintesre hozzávetőlegesen 15° -os szöget bezáró átmenetek vannak, és a szerző kijelenti, hogy a mintával az x (vízszintes) és y (függőleges) irányú eltolódások is mérhetőek. Vegyünk egy példát, amikor a használt mintában a háromszög vízszintes befogója 4 egység, a függőlegesé pedig 1 (ez körülbelül megegyezik a cikkben a gyakorlati alkalmazás során felhasznált minta arányával). Tegyük fel, hogy a kamera objektíve, a képtávolság és a tárgytávolság úgy van megválasztva, hogy a kamera 1 pixelének a tárgyon 1 mm felel meg. Amikor a tárgy 1 mm-t eltolódik y irányba, akkor a kamera ezt már 1 pixel eltolódással érzékelni tudja. Azonban a tárgynak x irányba már 4 mm-t kell eltolódnia, hogy a kamera érzékelje az elmozdulást. Ez a Lim&Lim gyakorlati alkalmazásában [P22] nem okozott problémát, azonban egy univerzális minta tervezésekor célszerű a mintát úgy kialakítani, hogy mindkét elmozdulási irányra hasonló vagy azonos érzékenységgű legyen.

A későbbiekben a mintáról készült sorokból szeretném megállapítani a minta, azaz a tárgy térbeli elmozdulásait, amihez értelemszerűen matematikát, geometriát kell alkalmaznom. Éppen ezért a minta tervezésénél fő szempont volt, hogy a minta viszonylag egyszerűen leírható, megfogalmazható legyen matematikai formában.

Fontos szempont a minta méretaránya, azaz hogy a minta x irányú (kamera pixelsorára merőleges) és y irányú (kamera pixelsorával párhuzamos) kiterjedése hogyan aránylik egymáshoz. A példa kedvéért vegyünk egy 1:1 arányú és egy 1:3 arányú (3 egység az y irányú kiterjedés) mintát. Figyelembe véve, hogy a kamerának az elmozdulások detektálásához a teljes mintát metszenie kell (minden átmenetet érzékelni), értelemszerű, hogy az 1:1 arányú mintánál a z tengely körüli maximális, még mérhető elfordulás 45° , míg az 1:3 arányú mintánál ez az érték $18,43^\circ$. Következésképpen a kialakított minta méretei szoros összefüggésben vannak a mérési tartományokkal.

Az optikai lencsék leképezése még az úgynevezett „méregdrága”, ipar számára gyártott objektívek esetén sem tökéletes. Ezen felül megvilágításból, élettenségből eredő

hibák is terhelhetik a mintáról készült képeket. Ezért célszerűnek tartottam a mintába redundanciát vinni ott, ahol azt egyéb szempontok nem gátolják. Hasonló megfontolásból alakítottam ki a mintát az x tengelyre szimmetrikusan.

Kifejezetten rezgésmérés területén, ahol a kamera 7-10 μm pixelméretének a tárgyon az esetek többségében 10-50 μm -t feleltetünk meg, az objektív célszerű megválasztásából adódó homályosodással kell számolni. Ez a homályosodás egészen addig nem gátolja a módszer használatát, ameddig a mintán alkalmazott fekete és fehér sávok elkülöníthetőek maradnak. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy nem alkalmazhatok akármilyen keskeny sávot a mintában.

Nem utolsósorban arra is gondolnom kellett a minta tervezésénél, hogy a minta eleget tudjon tenni a 4. fejezetben bemutatott adatredukálásnak. Tehát egy pixelsor információtartalma maximum annyi lehet, amennyit egy általános számítógép még folyamatosan, biztosan le tud menteni a legmagasabb sorkfrekvencia esetén is.

Általános megállapítások

Az előzőekben felsorolt tervezési szempontokból lesűrűsíthető néhány alapvető megállapítás. A mintában az átmeneteknek egyértelműnek, kontrasztosnak kell lenniük, ezért fekete és fehér területekkel célszerű dolgozni. Ez azért is indokolt, mert a kamera, amit ilyen mérésekhez célszerű használni, monokróm, tehát semmi nem indokolja például különböző színek használatát. Fölmerült egy szürke sáv elhelyezése a mintában, amely a 8 bites szürkeárnyaltos színskálán a 127-es értéknek felel meg. Ez gyakorlatban a kamerához használt, homogén megvilágítás jó beállításához nyújthatott volna segítséget. A sáv használatától két okból eltekintettem. Egyfelől a világítás beállítását csak a mérés megkezdése előtt kell elvégezni, így a sáv főlegesen terhelné a mintát mérés közben. Másfelől egy másik minta, amely teljes egészében ezzel az árnyalattal van kitöltve, egy hisztogram segítségével sokkal egyszerűbbé teszi a fényforrás beállítását.

A mintát térbeli eltolódások, elfordulások mérésére szeretném használni. Ebből következik, hogy a minta matematikai leírásakor síkban és térben is jól kezelhető formára kell törekednem. Ennek az elvárásnak az egyenes felel meg legjobban, melyet síkban az egyenes egyenletével, térben pedig olyan, három egyenletről álló egyenletrendszerrel lehet leírni, amelyet viszonylag egyszerű mátrixokkal kezelni. Első pillantásra talán nem egyértelmű, de a Lim&Lim által használt minta (3. ábra) is egyenesekből áll, és bár a szerző nem használja térbeli elmozdulások vizsgálatára, a minta elvileg alkalmas lenne rá (bizonyos korlátok mellett). A háromdimenziós transzformációk tanulmányozása után úgy döntöttem, hogy kizárólag egyenesekből építem fel a mintámat (megjelenésében fekete-fehér csonkolt háromszögekből).

Az adatredukálás érdekében arra kellett figyelnem, hogy minél kevesebb nem kellően indokolt egyenest (élt) képezzek a mintán, mert amint látni fogjuk az *Adatmennyiség-redukálási módszer kidolgozása* című fejezetben, egy képen egy átmenet leírásához 16 bit szükséges, azaz másodpercenként egy 80 kHz mintavételi frekvenciával dolgozó kamera esetén az egy átmenethez tartozó adatmennyiség 156,25 kByte/s. Manapság egy korszerű számítógép 20 Mbyte/s adatmennyiséget nagy biztonsággal tud rögzíteni, következésképpen maximum ~132 átmenetet definiálhatok.

Homályosodástűrés

Az már az előzőekből is kiderült, hogy homályosodással számolni kell. Egyfelől elképzelhető, hogy a gyakorlatban nem sikerül kellően gondosan beállítani a kamerát. Másrészt a mért felület térben mozog, tehát nem meglepő, ha időről időre kilép az éles síkból. Harmadrészt a későbbiekben látni fogjuk, hogy mérésnél nem célszerű, ha a minta a kamera tengelyére merőleges. Ha viszont nem merőleges, akkor a mintának csak egy része, azaz egy vonala (line scan kamera esetén egy pontja) eshet az éles síkba.

Homályosodástűrésen azt értem, hogy az alkalmazott mintán mi az a maximális szóródási kör, amely mellett a mintáról készült kép még kiértékelhető marad.

Ahhoz, hogy megértsük a homályosodás jelenségét, vizsgáljunk meg néhány esetet. Tegyük fel, hogy a kamera egy, az éles síkban elhelyezett fehér felületet lát ideális megvilágítás mellett (a fehér 255-ös, a fekete 0-s pixelintenzitásnak felel meg 8 bites színmélységnél, az átmenet lineáris). A felületen egy, a kamera pixelsorára merőleges, a kamera pixelméretének megfelelő szélességű fekete vonal húzódik. Ideális esetben a kamerával készített képen egy pixel értékét 0-nak, a többi 255 értékűnek látjuk. Ez csak abban az esetben lehetséges, ha a vonal egy pixelnek megfelelő felülete a kamera szenzorán is pontosan egy pixelre vetül. Ettől eltérő esetben azonban a képen 0 értékű pixelt nem fogunk találni, a vonal fekete felülete két pixel között oszlik meg (szóródik).

Abban az esetben, ha duplájára növeljük a vonal vastagságát, tökéletes leképezés esetén, a vonalkamerán két pixelt fogunk feketének látni. Ettől eltérő esetekben egy pixel intenzitása mindig 0 értékű lesz, a szomszédos pixelek a szürke valamely árnyalatát veszik fel.

Az előző, elvben lefolytatott kísérletekből két megállapítást teszek. A vonalkamera képen annak ellenére előfordulhatnak élettenségek tűnő jelenségek, hogy a tárgy pontosan az éles síkban helyezkedik el. Ahhoz, hogy egy line scan kamerával biztosan érzékelni tudjak egy fekete vonalat (amely az éles síkban helyezkedik el), a pixel élének megfelelő tárgyoldali élhosszúság minimum dupláját kell vennem a vonal vastagságának.

Térjünk vissza az egy pixelnek megfelelő vonalvastagsághoz, továbbá tegyük fel, hogy a leképezés ideális. A felületet mozdítsuk ki az éles síkból. Ekkor a kamera képen a következőt kell tapasztalnunk. Először az eredetileg egy darab fekete pixel fákulni, míg a mellette lévő két szomszédos pixel szürkülni kezd. A folyamatot tovább folytatva eljuthatunk egy olyan állapotba, amikor a három, egymás melletti pixel egyformán szürkés intenzitásértékű lesz. Ez az a pont, amikor az egy pixel szélességű vonalról a kamera szenzorján pontosan három pixel szélességű kép jön létre. Úgy is fogalmazhatok, hogy a vonal az eredeti képének háromszorosára szóródott szét. Ha a kamera pixelei $10\text{ }\mu\text{m}$ élhosszúságúak, akkor ebben az esetben a z szóródási kör értéke $3/100\text{ mm}$. Folytatva a távolítást az éles síktól a vonal tovább szóródik, miközben a fekete jelenléte a kamera képen egyre jobban eltűnik. Azon a ponton, amikor azt tapasztaljuk, hogy az egymás melletti öt pixel intenzitása egyenlő, akkor a vonal pontosan ötszörösére szóródott, azaz $z = 5/100\text{ mm} = 1/20\text{ mm}$. Megjegyzem, hogy már a háromszoros szóródás esetén sem

találtunk volna vonalat a képen, ha azt a legegyszerűbb módon, a 128-as érték átlépésére, azaz a legfelső bit változása alapján kerestük volna.*

Most a felület fele legyen fekete, és az éles síkból távolítsuk. Ekkor a helyzet már bonyolultabb, mert minden egyes sor elkezd szóródni, ezzel befolyásolva a képen a szomszédos pixelek intenzitásértékét. Abban az esetben, amikor az átszóródás pontosan háromszoros, akkor minden egyes sor az alatta és fölötte lévő sorra van befolyásoló hatással. Ötszörös szóródás esetén már a két-két szomszédos sor is érintett. A 4. ábra bal oldala a teljesen kontrasztos átmenetet (éles sík), középső része a háromszoros, jobb oldala a pontosan ötszörös szóródás esetét mutatja.**



4. ábra
Fekete-fehér átmenet éles, háromszoros, ötszörös átszóródás esetére

Figyeljük meg, hogy az átmenet ugyan elmosódik, de a 128-as intenzitásértéket mindhárom esetben ugyanazon pixelnél lépjük át. Ez azt jelenti, hogy ideálisan beállított megvilágítás esetén önmagában a homályosodás nem okoz problémát az átmenetek pozíciójának detektálásában.

Felmerül a kérdés, hogy a mintát milyen szóródási körre tervezzem. Az előzőekben már említettem, hogy elsősorban nagy felbontású rezgésmérés területén kell erőteljes homályosodással számolnunk. Vizsgáljuk meg, milyen paraméterektől függ, hogy a tárgy az éles síktól milyen mértékben mozdulhat ki [P25], [P26]. Ezek a paraméterek:

- az objektív fókusz távolsága (f),
- tárgytávolság (t),
- rekesznyílás (R),
- és a szóródási kör (z).

A mélységélesség közeli határának (t_k) és távoli határának (t_l) kiszámítására szolgáló képletek a következők [P26].

$$t_k = \frac{t \cdot f^2}{f^2 + R(t-f) \cdot z} \quad (1)$$

*A leírás a valóságnak nem felel meg 100%-ban, ugyanis a szóródási kört egy minden irányban nulla kiterjedésű pont szóródására definiálják, azonban a témakör megértését nagymértékben segíti a pixelekre történő átforgalmazása, ugyanakkor végeredményben, kellően nagy szóródási kör esetén az elhanyagolás okozta hiba minimális lesz.

**A szóródási kör az esetek többségében ovális, a szóródás nem egyenletes. Ezeket a tényezőket az elv megértését segítő leírásban nem vettem figyelembe.

$$t_t = \frac{t \cdot f^2}{f^2 - R(t-f) \cdot z} \quad (2)$$

A line scan kamera nagyon rövid expozíciós időkkel dolgozik. Ez az idő 1/1 000 másodperctől akár 1/80 000 másodpercig is terjedhet. Aki egy kicsit is járatos a fényképezésben, az tudja, hogy egy fényképezőgéppel csak igen jó fényviszonyok mellett (tűző napsütés) lehet 1/2000 másodperces expozíciós időt használni. Amikor a lehető legnagyobb mintavételi frekvenciával szeretnénk egy line scan kamerával mérni, akkor 40-szer rövidebb idő alatt kell exponálni. Ebből következik, hogy az ilyen alkalmazásokhoz már teljesen nyitott blende (legkisebb rekeszérték) esetén is meglehetősen erős, homogén megvilágításra van szükség. Tehát figyelembe kell vennem, hogy a rekeszértéket a megvilágítás szempontjából célszerű a legkisebb értéken hagyni.

A fókusz távolság megválasztása már hagy némi rugalmasságot, de gyakorlati szempontból az 50-200 mm fókusz távolságú objektívek használata javasolt. 50 mm-nél kisebb fókusz távolság esetén az objektívhibák már erősen érezhetőek, 200 mm-nél nagyobb fókusz távolság esetén az optikai tubus hossza egyre kezelhetetlenebbé válik.

A fókusz távolság rögzítése után a tárgytávolság már a kívánt nagyítás mértékéből következik.

Összességében elmondható, hogy a z paraméter az egyetlen, amellyel hatékonyan lehet befolyásolni a mélységélesség határait.

A következőkben egy gyakorlatilag is valószínű példán szeretném bemutatni, hogy milyen fontos a mintát megfelelően homályosodástűrőre tervezni. Tegyük fel, hogy egy 10 µm élhosszúságú pixelekkal rendelkező line scan kamerát használunk, 50 mm-es fókusz távolságú, F=1:2,8 fényértékű (teljesen nyitott blende, tárgytávolság=∞ esetén az R értékét adja meg) objektívvel, 1:1 leképezési aránnyal. Az R rekeszérték itt rögtön korrekciót igényel, ugyanis az R helyes értékét a képtávolságból és a hatásos átmérőből számolhatjuk. 1:1 arányú leképezésnél a képtávolság pontosan kétszerese a fókusz távolságnak, amire megadják a fényértékét, illetve rekeszszámot. Ebből következik, hogy a számításoknál R=5,6 lesz a helyes érték. Összegezve: f = 50 mm, t = 100 mm, R = 5,6.

Szóródási kör	1/100	2/100	10/100	20/100	30/100	50/100	1	mm
Szóródási arány	1	2	10	20	30	50	100	
Közeli határ	99,89	99,78	98,89	97,81	96,75	94,7	89,93	mm
Távoli határ	100,11	100,23	101,13	102,29	103,48	105,93	112,61	mm
Megengedett közeledés	0,112	0,223	1,108	2,191	3,251	5,303	10,072	mm
Megengedett távolodás	0,112	0,225	1,133	2,291	3,477	5,932	12,613	mm
Átfogás	0,224	0,448	2,240	4,482	6,728	11,235	22,685	mm

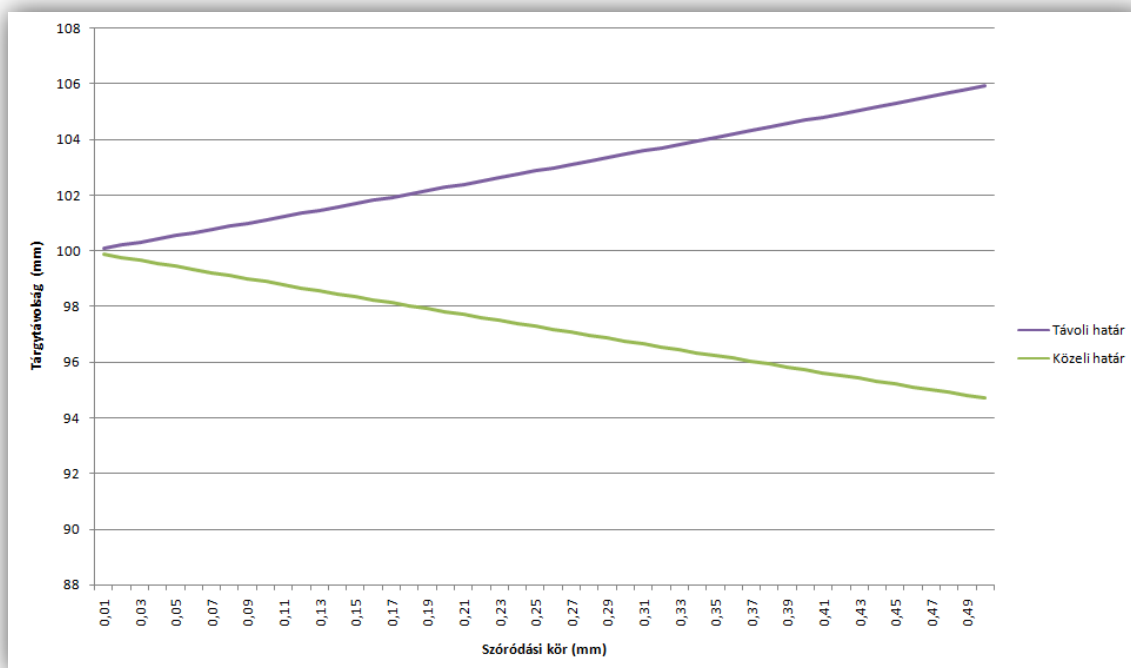
1. táblázat

A mélységélesség határai f=50 mm, t=100 mm, R=5,6 esetén

Vizsgáljuk meg az 1. táblázatban kiszámolt adatokat. Az első sorban a szóródási kör mérete van feltüntetve a fényképészetben szokásos formában. Esetünkben talán kifejezőbb a következő sorban megadott „Szóródási arány”, amely azt mondja meg, hogy a szóródás hányszorosa a 10 µm-es pixelnek. Ezt követően találjuk a kiszámolt közeli és távoli határokat. A követhetőség kedvéért 100 mm-re vonatkoztatva kiszámoltam a megengedett közeledés és távolodás mértékét, illetve a kettő különbségét is.

A számítások első oszlopában, amikor z szóródási kör értéke éppen $10\text{ }\mu\text{m}$, felmerülhet a kérdés, hogy az átfogás miért nem nulla. A szóródási kört a fényképészetben egy minden irányban nulla kiterjedésű pont szóródására definiálják. Ennek megfelelően, ha megengedem, hogy a nulla kiterjedésű pont szóródjék $10\text{ }\mu\text{m}$ -es körben, akkor már kell lennie átfogásnak. A digitális szenzorokra a szóródást speciálisan kell értelmezni, ugyanis az egy pixelnél kisebb pont feldolgozása lehetetlen, leszámítva, hogy az egy pixelnél kisebb terület is okoz a pixelintenzitásban változást. Valójában az első oszlop azt fejezi ki, hogy egy kontrasztos vonal legszélső, még fekete pontja maximum $5\text{ }\mu\text{m}$ -re szóródhat át a fehér területbe. Nem követünk el nagy hibát, ha a továbbiakban a táblázatban szereplő „Szóródási arány”-t vesszük alapul, ugyanis a figyelmen kívül hagyott hiba mértéke ezen szám növekedésével egyre csökken.

A 4. ábra jobb oldalán a szóródási arány értéke öt volt. Ez azt jelentette, hogy egy pixelvonal a mellette lévő két-két pixelsorra volt hatással. Ha egy mintát ötszörös átszóródásra tervezek, az azt fogja jelenteni, hogy olyan vonalvastagságot kell használnom, amelynek a legrosszabb szóródás esetén is egy pixele teljesen fekete marad a képen. Ez az eset ötszörös átszóródás esetén akkor áll fenn, ha öt pixel széles vonalat használok, azaz a szóródási arányt használhatom szorzószámnak. Természetesen az előforduló hibák miatt, mint leképezési, megvilágítási, objektívhiba, célszerű némi ráhagyással dolgozni. A következő diagramon megfigyelhetjük, hogy a közeli és távoli határ hogyan változik a szóródási kör függvényében.



5. ábra
Közei és távoli határ a szóródási kör függvényében

Most már csak egy kérdés maradt. Milyen szóródási aránnyal tervezek? Tegyük fel, hogy egy munkadarab rezgéseit szeretném megmérni. Előzetes mérésekkel vagy szemrevételezéssel előre lehet sejteni, hogy hozzávetőlegesen milyen kitérésekre lehet számítani. A minta végleges meghatározásánál tehát az lesz a mérvadó, hogy az adott alkalmazásnál a kamera tengelye felé mekkora lehet a minta bármelyik pontjának (forgások is

lehetnek) közeledése. Összességében tehát ezt a paramétert nem célszerű fixre választani, mert elképzelhető olyan alkalmazás, amelynél minden irányban egyforma mérvű elmozdulásokra kell számítani, és olyan is, ahol valamilyen mechanikai kötöttség miatt az ilyen irányú elmozdulás csekély. Az sem jó megoldás, ha a paramétert túl nagyra választom, ugyanis ez a paraméter nagyban befolyásolja a mintám y irányú kiterjedését. Amennyiben minden irányban azonos elmozdulásokra lehet számítani, körülbelül az 50-150-es szóródási arány lesz megfelelő.

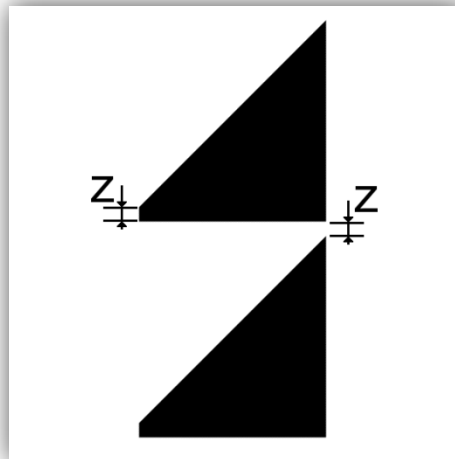
Maximális meredekség

A Tervezési szempontok című alpont kapcsán már kiderült, hogy a mintába nullától eltérő meredekségű átmenetet kell elhelyezni ahhoz, hogy a kamera pixelsorára merőleges mozgást is detektálni tudjam. A fenti példa alapján azt gondolhatnánk, hogyha 45° -os, azaz 1-es meredekségű átmenetet alkalmazok, akkor az egy pixelnyi elmozdulás mind x , mind y irányba érzékelhetővé válik. Azonban nem szabad elfelejtkezni arról sem, hogy a tárgy elfordulhat bizonyos mértékben a kamera optikai tengelye körül. Ha egy olyan mintám van, amely tartalmaz 0 és 1-es meredekségű átmeneteket, az jó eredményt fog adni mindkét irányú elmozdulásra, ha nincs elfordulás. Azonban ha a kamera optikai tengelye körül a tárgy elfordul az óra járásának megfelelő irányba például $22,5^\circ$ -ot, akkor az x irányú elmozdulásmérés ismét pontatlanabbá válik. Szimmetrikusan kialakított mintával ez a probléma orvosolható. Másik probléma, hogy az x tengely menti elfordulás hatására a minta y irányra nézve tömörödik, így csökken a minta képén megjelenő meredekség.

Megállapítható tehát, hogy a mintában célszerűen alkalmazott legnagyobb meredekség attól függ, hogy a koordináta-rendszer tengelyei körül az elfordulás mekkora lehet a mérés közben. Gyakorlati tapasztalatom, hogy gépszerkezeteknél feszültségekből adódó néhány fokos elcsavarodással ugyan lehet számolni, de a fenti $22,5^\circ$ -os kitérés abszolút nem jellemző. A minta tervezésekor ezt a paramétert is dinamikusan állíthatónak definiáltam, de a maximális meredekség kiindulási értékének 1,2-t alkalmaztam.

A maximális meredekség megválasztásakor figyelembe kell venni, hogy ez a paraméter nagy mértékben befolyásolja a minta y irányú kiterjedését.

Az eddig felsorolt szempontokat figyelembe véve a legegyszerűbben kialakított minta, amely 45° -os átmenetet is tartalmaz, a következő.



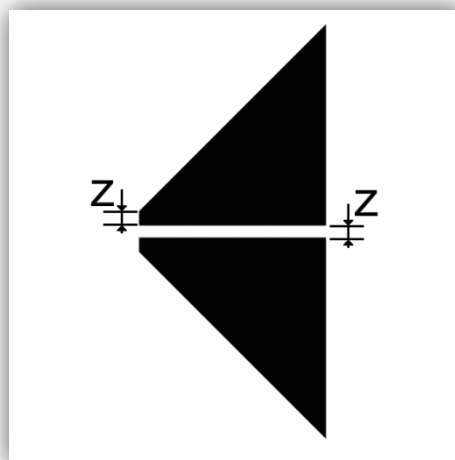
6. ábra
Kezdetleges minta

Ez a minta hasonlít a Lim&Lim által kidolgozott mintához [P22]. Két különbséget fedezhetünk fel. A nem vízszintes vonal jóval meredekebb, és a háromszögek végei csonkoltak. Valójában nem szükséges a csonkolás, a rajzon csupán így szemléltettem, hogy a minta csak azon része használható ténylegesen a méréshez, ahol a szóródási kritériumnak még eleget tesz.

A mintának legalább két háromszöget, azaz négy átmenetet kell tartalmaznia ahhoz, hogy a Lim&Lim által kidolgozott algoritmus használható legyen.

Szimmetria

Az előző, kezdetleges mintával van egy komoly probléma. Ha a mért tárgy az óramutató járásával megegyezően elfordul z tengely körül, akkor az x tengelyű elmozdulás pontos meghatározása nem lehetséges. Ha viszont a mintában egy pozitív és egy negatív meredekségű átmenet is van, akkor ez a probléma megszűnik. Ezért célszerű a mintát szimmetrikusan kialakítani úgy, hogy a háromszögek egymásnak tükörképei legyenek.



7. ábra
Szimmetrikus kezdetleges minta

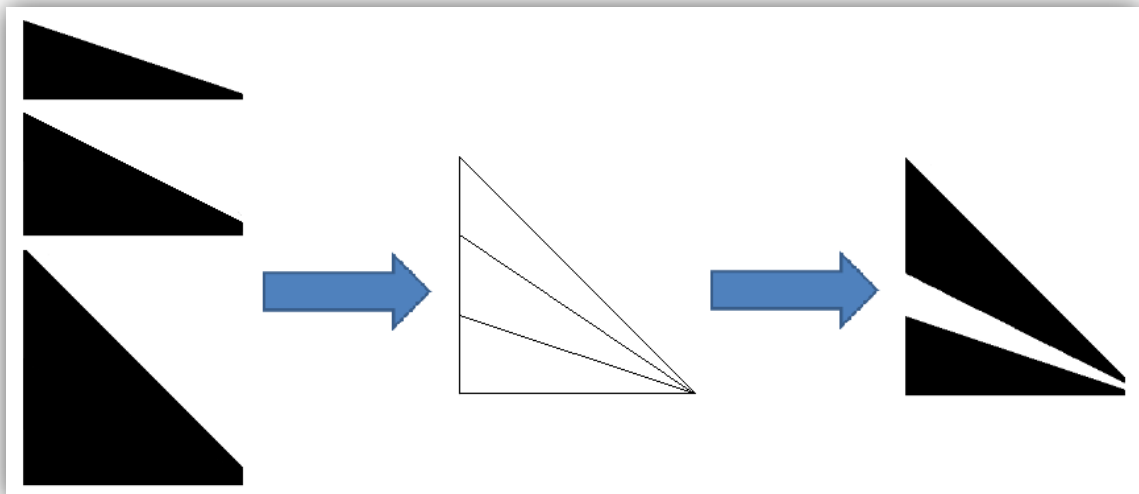
Tömörítés, redundancia

Az előző, szimmetrikus kezdetleges minta elméletileg már alkalmas lenne pontos mérések elvégzésére, de szükségesnek láttam redundanciát vinni a mintába. Ez több szempontból is indokolt. A homályosodás csak jól beállított, homogén megvilágítás esetén nem okoz átmenetelcsúszást. Az objektív hibák következtében a leképezésben is előfordulhat pixeleltolódás.

Közvetlenül egymás mellé nem célszerű redundáns átmeneteket elhelyezni, mert az előbb felsorolt hatások szinte azonosan hatnak rájuk. Ha viszont több háromszöget helyezek egymásra, akkor a mintám y irányú kiterjedése meglehetősen megnő.

A fenti okokból kifolyólag azt a megoldást választottam, hogy a legnagyobb meredekségből csak kettőt, de annál kisebb meredekségű átmenetekből többet helyezek el a mintában a szimmetria megtartása mellett.

Különböző meredekségű háromszögek egymásra helyezése a z szóródási hézag megtartásával nem célravezető a minta méretei miatt. Azonban a nagyobb háromszögbe a kisebb meredekségű háromszögek belehelyezhetők, így a szóródási rés következtében a mintám y irányba ugyan növekedni fog, de jóval kisebb mértékben. A háromszögek egymásba hangolása látható a következő ábrán.



8. ábra

A mintát alkotó különböző meredekségű háromszögek egymásba ágyazása

Kihasználva a mintában még kihasználatlan fehér területet, redundanciát vihetek a mintába anélkül, hogy annak y irányú mérete jelentősen növekedne. Ez a megoldás látható szimmetrikus kialakításban a következő képen.

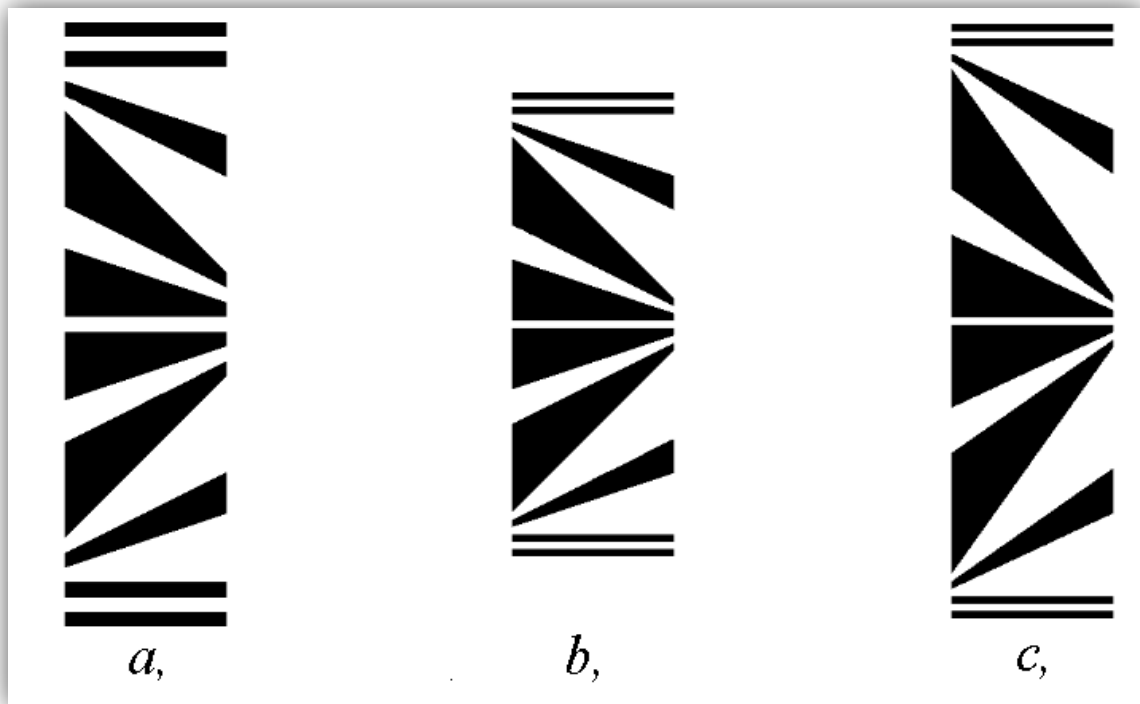


9. ábra
Redundáns, tömörített minta

Záró tagok

Az eddig kialakított mintával már csak egy probléma van. Nulla meredekségű, azaz vízszintes átmenet csak két darab van benne, amelyek közvetlenül egymás mellett helyezkednek el. Célszerűnek tartottam nulla meredekségű átmeneteket a minta szélein is elhelyezni. Ez a megoldás elsősorban *A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból* című fejezetben jut majd szerephez.

Az általam kifejlesztett, új minta a következő ábrán látható, amelynek a tényleges mérete a szóródási kör, mintaszélesség és a maximális meredekség paraméterekkel állítható.



10. 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, $C_{\max}=1,5$

3.3. Mintatesztelő alkalmazás fejlesztése

A fejlesztés célja, elvárások

Először a Lim&Lim által használt minta (3. ábra) tesztelésekor, majd a saját mintám tervezésekor merült fel az igényem egy olyan szimulációs alkalmazásra, amellyel lehetőségem van a mintákat paraméterezhető eltolási és elfordulási értékekkel tesztelni. A háromdimenziós tervező szoftverek egyike sem felelt meg az én elképzeléseimnek, ezért egy saját szimulációs alkalmazás kifejlesztése mellett döntöttem.

Az alkalmazás elsődleges célja, hogy a mintát a transzformációs paramétereknek megfelelően lehessen mozgatni, forgatni, és képes legyen előállítani egy virtuális line scan kamerán látható képet. Az alkalmazás segítségével vizuálisan láthatóvá kívántam tenni a transzformációs paraméterek okozta hatást a line scan kamera eredményén.

Céлом volt a Lim&Lim mintájának tesztelése is, amelyet a cikkben közölt arányaival kívántam vizsgálni [P22]. A saját mintám tekintetében több, állítható rajzolási paramétert határoztam meg a minél átfogóbb tesztelhetőség kedvéért. Ezek: a minta x irányú szélessége, a mintában előforduló legnagyobb meredekség és a szóródási kör mértéke.

A tesztelés szempontjából feltétlenül fontosnak tartottam a pixelhelyes, minél pontosabb optikai leképezést, ahol a kamera felbontásának megfelelő eredménykép pixeleinek a kamera pixelei felelnek meg.

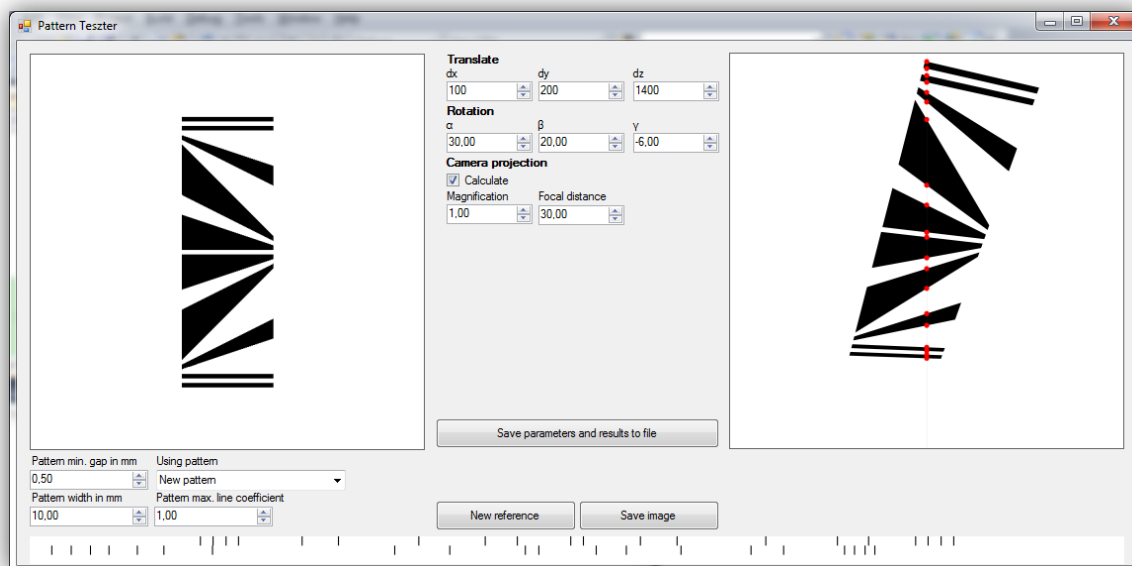
Fontos volt összehasonlítani a minta kiindulási állapotát és a beállított transzformációs paraméterek hatására előálló eredményképet az értelmezést megkönnyítő formában.

Az optikai leképezéseknél fellép a perspektivikus torzítás hatása. A perspektivikus torzítást létrehozó mátrixműveleteket kapcsolható és paraméterezhető formában valósítottam meg. Így felmérhettem az ezen torzítás elhanyagolásából származó hibák mértékét.

Nem utolsósorban gondolnom kellett egy-egy tudományos szempontból értékes eset mentésére is.

Felhasználói felület

A tervezéskor figyelembe vettem a felhasználói felületekre vonatkozó általános tervezési konvenciókat. A felhasználó felület végleges megjelenését a 11. ábra mutatja.



11. ábra
Mintatesztelő alkalmazás felhasználói felülete

A bal oldalon látható képen mindig az a minta jelenik meg, amelyet éppen vizsgálok, abban az állapotban, amikor minden transzformációs paraméter értéke nulla, azaz a vizsgált tárgy nem mozdult és nem fordult el semmilyen mértékben. A program minden elfordulás- és eltolódásértéket ehhez a kiindulási helyzethez fog kiszámolni.

Középen, felül azok a transzformációs paraméterek láthatóak, amelyekkel a kiindulási állapotból a mérendő felületet el akarom forgatni, mozgatni. Itt beállítható a Descartes-féle koordináta-rendszerben a tengelyek menti eltolódás („Translate”), illetve a tengelyek körüli elfordulás („Rotation”) mértéke is.

A jobb oldali képen a beállított paramétereknek megfelelő, transzformált kép jelenik meg. A képen függőleges vonal jelzi azt a pixelsort, amelyet a valóságban egy line scan kamera érzékelne. Az alkalmazás egy Dalsa gyártmányú, 6144 pixelt tartalmazó line scan kamera szimulációjához készült, ezért az eredménykép 6144x6144 képpontból áll. Piros pontokkal jelöltem a vonal mentén detektált átmeneteket. Középen lehetőség van bekapcsolni („Camera projection”, „Calculate”) és beállítani („Magnification”, „Focal distance”) a perspektivikus megjelenítést. Ennek hatására az eredményképen a perspektivikus torzítás hatásai is megjelennek. Ez elsősorban nagy látószög esetén szembetűnő.

A két kép között egy nyomógomb segítségével menthetem el a beállított paramétereket és a hozzájuk tartozó, kamera által érzékelt átmenetek indexeit. A program elindítását követően, a gomb első megnyomásakor egy fájlválasztó ablakban kell megadni a file nevét az adatok számára. Ezt követően a gomb újbóli megnyomásakor a megadott file-hoz csak hozzáíródnak az új beállítások és eredmények.

A felhasználói felület alján, fehér alapon függőleges, fekete vonalak láthatóak. Ezen terület felső részén a referenciahelyzetnek, míg az alsó részen az aktuális transzformációknak megfelelő átmenetindexek vannak fekete vonalakkal jelölve. Ezen terület célja, hogy szemléletessé tegye a különböző tengelyeken végzett transzformációk egyedi és kombinált hatásait. Közvetlenül felette a „New reference” gomb megnyomásával lehet az aktuális állapotot referenciaállapottá tenni. A mellette található „Save image” gombbal lementhetjük az alsó képet.

A bal oldali kép alatt választható ki, hogy a Lim&Lim által kialakított, vagy az általam fejlesztett mintával dolgozzon a program („Using pattern”). Amennyiben az utóbbi kerül kiválasztásra, úgy lehetőség van egyéb paraméterek beállítására is: a minta szélessége („Pattern width in mm”), a legkisebb függőleges irányú távolság („Pattern min. gap in mm”) és a mintában jelenlévő legmeredekebb egyenes meredeksége („Pattern max. line coefficient”).

Tesztelhető minták implementálása

A programmal lehetőségem van mindkét mintát tesztelni. A különbség a két eset között mindössze annyi, hogy a saját mintám paraméterezhető, azaz méretei dinamikusan változtathatóak.

A Lim&Lim által kidolgozott minta (3. ábra) teszteléséhez előre meghatároztam a kirajzolni kívánt négy darab háromszög csúcsainak konstans koordinátáját. A program bal oldali képére a kiindulási mintát a .NET Framework „Graphics” objektumával, kitöltött területekkel rajzoltam ki. Ezt követően a pontokat átadom az általam fejlesztett „MatrixLib” osztálynak, amely a felhasználói felületen beállított paramétereknek megfelelően kiszámolja a transzformált pontok koordinátáját. Az így kapott koordinátákat az előbb ismertetett módszerrel rajzoltatom ki a line scan kamera felbontásának megfelelő eredményképre.

A saját mintám szimulációja az előzőekben leírtakkal teljesen azonos, azzal a különbséggel, hogy itt a pontok kiindulási koordinátáját dinamikusan állítom elő, a felhasználói felületen beállított mintaméretezési paramétereknek megfelelően.

Háromdimenziós transzformációk megvalósítása

A Descartes-féle koordinátarendszer tengelyeit a felhasználói felület bal oldali képén a következőképpen értelmezem: a kép közepétől vízszintesen jobbra az x tengely, függőlegesen felfelé az y tengely, és a z tengely a képet szemlélő felé mutat.

A térbeli elmozdulások leképezéséhez a háromdimenziós grafikában általánosan alkalmazott 4×4 -es mátrixokkal dolgoztam [P10]. Mindhárom tengely körüli elforgatáshoz tartozik egy-egy transzformációs mátrix. A három eltolásparamétert egy mátrix tartalmazza összevontan. A perspektivikus leképezéshez is egy mátrix tartozik, amit én az egyszerűbb átláthatóság kedvéért két részre bontottam. Megjegyzem, az általam használt perspektivikus torzítást létrehozó mátrix felépítése jóval egyszerűbb, mint az általánosé. Az egyszerűsödés annak köszönhető, hogy a koordinátarendszer z tengelye mentén történik a centrális vetítés, azaz ez lesz az a tengely, amelyen a pontok nem szenvednek torzítást. Az általánosan használt mátrixban ez a tengely tetszőlegesen megadható.

A transzformációk sorrendje lényeges. Először az x tengely (M_{ROTX}), majd az y (M_{ROTY}) és végül a z tengely körüli elforgatások (M_{ROTZ}) transzformációja hajtódik végre. Ezt követi az eltolásokat tartalmazó mátrix (M_{trans}). Ha felhasználói felületen be van kapcsolva a perspektivikus nézet, akkor utoljára a vetítés mátrixai (M_{pers} , M_{pers_trans}) hajtódnak végre.

Az alábbi formulákban a „ v ” egy kiszámítandó pont eredeti koordinátáit tartalmazó vektor, „ r ” a forgatások és eltolások után kapott vektor, az „ r_{pers} ” a perspektivikus vetítés eredményét tartalmazó vektor.

$$r = M_{trans} \cdot M_{ROTZ} \cdot M_{ROTY} \cdot M_{ROTX} \cdot v \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ r_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ v_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$r_{pers} = M_{pers} \cdot M_{pers_trans} \cdot r \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} r_{persX} \\ r_{persY} \\ r_{persZ} \\ r_{persA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{d_k} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_k - \frac{d_k}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ r_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

Az összes számítás dupla pontosságú, lebegőpontos számokkal történik, a kerekítés csak a pixelek hozzárendelésekor, a legvégső lépésben, a megjelenítésnél történik. Ennek köszönhetően minimális a kerekítésekből adódó hibák mértéke. Az alkalmazásban a mátrix-számításokat egy külön-, a „MátrixLib” függvénykönyvtárban valósítottam meg.

Eredményképek és értelmezésük

A felhasználói felület jobb oldalán látható eredménykép 1:1 arányú, a kamera felbontásának megfelelő méretű. A kutatásom keretében az NI Hungary Kft. jóvoltából használhattam egy Dalsa gyártmányú, 6144 pixeles vonalkamerát. Az összehasonlíthatóság kedvéért az eredménykép felbontása ennek megfelelően 6144x6144 pixel. A kétdimenziós eredményképből ugyan a kamera csak egyetlen sort lát, de a felhasználónak célszerű látnia, hogy a minta pontosan hogyan helyezkedik el az aktuálisan vizsgált transzformációs és méretezési paraméterekkel.

Az eredményképen a könnyű nyomon követhetőség kedvéért függőleges vonallal jelöltem azt a pixeloszlopot, amelyet a szimuláció során a vonalkamera pixelsorának feleltetnek meg. Jól látható, piros foltokkal jelöltem az átmenetekhez tartozó pixelek helyét.

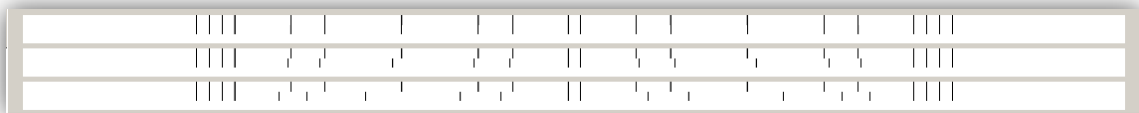
A szimulációs alkalmazásomnak a célja elsősorban az volt, hogy a minta kiindulási helyzetéhez tartozó átmenetek indexeit (azaz hogy a kamera hányadik pixeleinél voltak az átmenetek) össze tudjam hasonlítani az aktuálisan vizsgált transzformált eredmény indexeivel. Ezért a felhasználói felület alján kialakítottam egy, a kamera pixelszámaival megegyező szélességű, de csak néhány pixel magasságú képet. Ezt a képet függőlegesen két részre osztottam, így két nézetsort képeztem. Az első nézetsorba kerülnek a kiindulási állapotnak

megfelelő átmenethelyek (függőleges vonalakkal ábrázolva). A második nézetsorban szintén függőleges vonalakkal jelöltem az aktuálisan vizsgált paraméterek hatására kialakuló átmenetek pozícióit. Mindkét esetben a tényleges eredményképen, a kamera pixeloszlopát végigpásztázva határozom meg az átmenetek helyét.

A tesztelések során felmerült az igényem, hogy egy a transzformációs paraméterekkel beállított esethez tudjak hasonlítani más eseteket. Ezért úgy gondoltam, hogy az eredetileg kiindulási állapotnak fenntartott első nézetsort az aktuális nézetnek megfelelően frissítem a „New reference” gomb megnyomásával.

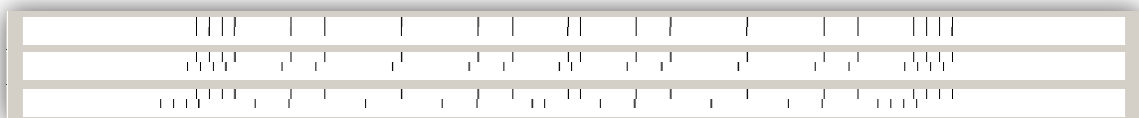
3.4. A kidolgozott minta tesztelése, következtetések

A saját mintám kidolgozását és a mintatesztelő alkalmazás implementálását követően megkezdtem a vizsgálatokat. Először is arra voltam kíváncsi, hogy a transzformációs paraméterek külön-külön milyen hatással vannak a line scan kamera eredményére. A következő ábrákon a mintatesztelő alkalmazás alsó, összehasonlító sávjait láthatjuk. A tesztekhez a következő mintaméret-paramétereket használtam: mintaszélesség 10 mm, legnagyobb meredekség 1, minimum távolság 0,5 mm. A teszteknel a perspektivikus leképezés ki van kapcsolva.



12. ábra
Önmagában x irányú eltolás
Fentről lefelé: $d_x=1$, $d_x=50$, $d_x=200$ pixel

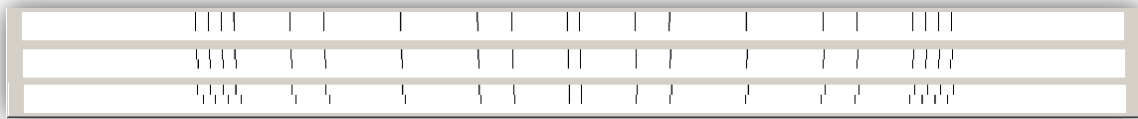
A disszertáció írásos anyagában a $d_x=1$ pixelnyi eltolás nem látszik a képek interpolálásából adódóan, de az eredetileg kimentett képet felnagyítva egyértelműen megállapítható, hogy balról és jobbról is a hetedik átmenetnél (a -1-es és az 1-es meredekségű átmenet) láthatunk egy pixelnyi eltolódást. A többi vonal esetében nincs elmozdulás. A $d_x=200$ esetében jól megfigyelhető, hogy az elvártnak megfelelően a legnagyobb meredekségű átmenetek okozzák a legnagyobb elmozdulást.



13. ábra
Önmagában y irányú eltolás
Fentről lefelé: $d_y=1$, $d_y=50$, $d_y=200$ pixel

Az y irányú eltolásnál azt láthatjuk, hogy minden vonal annyi pixellel tolódott el, amennyi a d_y értéke. Az ábrán történő arányosítást elősegítheti, hogy egy függőleges vonal hossza 50 pixel.

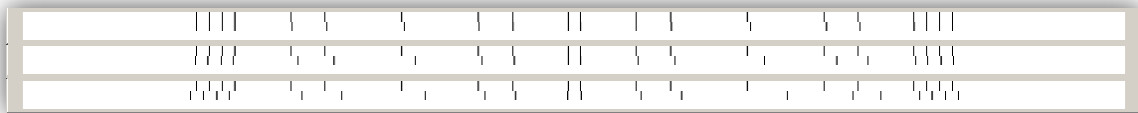
A perspektivikus leképezés kikapcsolásának következtében a z tengely menti eltolásnak nincs hatása.



14. ábra
Önmagában x tengely körüli forgatás
 Fentről lefelé: $\alpha=1^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$

Az $\alpha=1^\circ$ esetén azt tapasztaltam, hogy a mintán nem érzékelhető változás. Az $\alpha=2^\circ$ esetén már egyértelmű a változás. Az $\alpha=5^\circ$ és $\alpha=10^\circ$ esetén az átmenetek torzulása már jól megfigyelhető az ábrán is. Lényeges azonban, hogy ha $\alpha=45^\circ$ esetéhez viszonyítom a változásokat, akkor már a $0,2^\circ$ eltérés is biztonsággal megállapítható.

Az y tengely körüli elfordulás, azaz β szög önmagában nincs hatással az eredményre, ugyanis a kamera pixelsora ilyenkor egy vonalba esik az y tengellyel. Azonban ezt a paramétert nem szabad figyelmen kívül hagyni az összetett elmozdulások vizsgálatakor, mert a $dx \neq 0$ pixel eltolással, vagy az $\alpha \neq 0^\circ$, illetve $\gamma \neq 0^\circ$ szögekkel együtt már befolyásoló hatása van.



15. ábra
Önmagában z tengely körüli forgatás
 Fentről lefelé: $\gamma=1^\circ$, $\gamma=5^\circ$, $\gamma=10^\circ$

A z tengely körüli forgatásnak, ellentétben az x tengely körüli forgatással, már 1° esetén is szembe tűnő eredménye van. A szimuláció szerint a legkisebb, még biztonsággal érzékelhető szögelfordulás $\gamma=0,2^\circ$ körül van. Ez az érték nagy mértékben a mintában jelen levő legnagyobb meredekség függvénye.

Az elvégzett tesztek alapján a következőket állapítottam meg.

- Egyértelműen látszik, hogy a minta alapállapotban a γ szög meghatározására a legérzékenyebb.
- Az x és y tengely menti forgatások a mintában jelen lévő vonalak meredekségeit befolyásolják. A β szög növekedésével a meredekség növekszik, az α szög növelésével a meredekség csökken.
- A mintában jelen lévő nulla meredekségű vonalak csak és kizárólag $\gamma \neq 0^\circ$ esetén térnek ki az eredetileg vízszintes állapotból, amennyiben a perspektivikus torzítás hatása elhanyagolható.

Tekintve, hogy a további fejezetekben a perspektivikus torzítást nélkülöző egyszerűsített modellel foglalkozom, ezen torzítások részletes ismertetésétől már csak a disszertáció szűkösre szabott keretei miatt is eltekintek.

3.5. Új minta méretezési módszerének kidolgozása

Feltételrendszer, kiindulási adatok

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. Jelen alfejezet célja annak bemutatása, hogy a mérési körülmények ismeretében hogyan állítható elő a feladatnak legmegfelelőbb (az optimum-kritériumot kielégítő) méretű és arányú minta. Kellően kis látószög esetén a perspektivikus torzítás csak minimálisan befolyásolja a minta látszólagos méretét, így azt úgy kezelhetjük, mintha párhuzamos vetítéssel állt volna elő. Ez az egyszerűsítés nagymértékben megkönnyíti a mintával történő számításokat és az alábbiakban részletezett méretezést is.

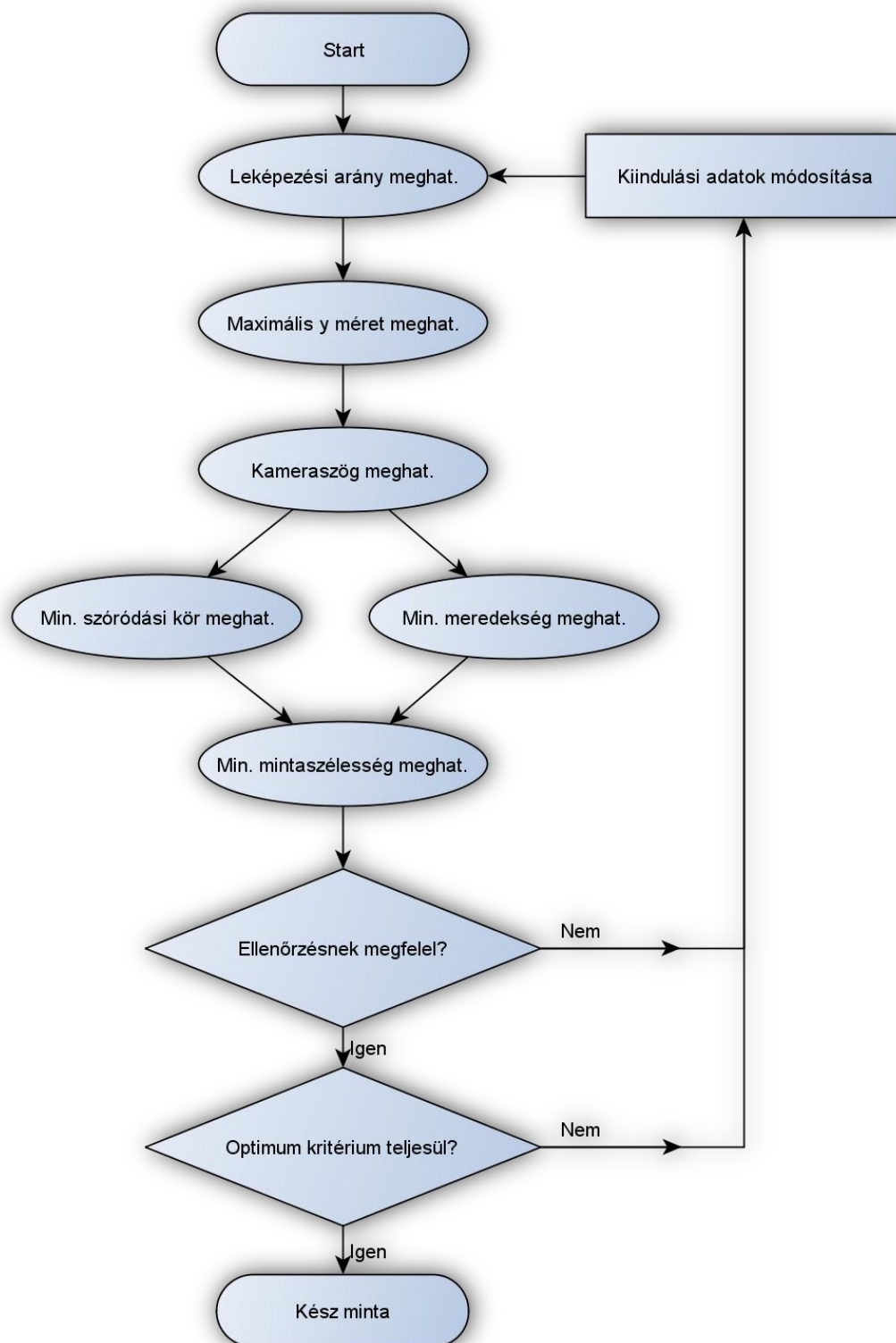
Egy jól méretezett minta kialakításához a következő adatokra van szükség:

- az alkalmazott objektív fókusz távolsága (f),
- az objektív rekesztértéke (R),
- a kamera pixelmérete (m_p),
- a pixelsor hossza (m_{sz}),
- az x , y , z irányú várható legnagyobb kimozdulás (Δx , Δy , Δz),
- az x , y irányú elvárt felbontás (r_x , r_y),
- az α , β , γ szögek várható legnagyobb elfordulása ($\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, $\Delta \gamma$),
- az α , β , γ szögek elvárt felbontása (r_α , r_β , r_γ).

Az alábbi számításoknak kettős célja van. Először is meg kell állapítani, hogy létezik-e olyan minta, amely megfelel az előírt elvárásoknak, másodszor, ha létezik, meg kell keresni a legmegfelelőbbet. A minta méretezésénél valamilyen fontossági sorrendet kell kialakítani. A számításaimban az y és x irányú eltolásra vonatkozó paramétereket, majd az α szögekre vonatkozó elírásokat tekintettem a leglényegesebbnek. A számításokban feltételezem, hogy az objektív és a kamera már adott, tehát ki van választva, azonban a gyakorlati alkalmazásban előfordulhat olyan eset, amikor a feladat megoldása csak objektívcserével, rosszabb esetben csak másik kamerával lehetséges.

Az érthetőség kedvéért az alábbi összefüggéseket egy, a gyakorlatban megoldható mintapéldán is bemutatom, amelyekhez a kiindulási értékek a következők: $f=100\text{ mm}$, $R=8$, $m_p=10\text{ }\mu\text{m}$, $m_{sz}=61,44\text{ mm}$, $\Delta x=5\text{ mm}$, $\Delta y=5\text{ mm}$, $r_x=20\text{ }\mu\text{m}$, $r_y=20\text{ }\mu\text{m}$, $\Delta \alpha=5^\circ$, $\Delta \beta=5^\circ$, $\Delta \gamma=5^\circ$, $r_\alpha=0,5^\circ$, $r_\beta=0,5^\circ$, $r_\gamma=0,5^\circ$.

A következő folyamatábrán szemléltetem a minta méretezésének főbb lépéseit, amelyeket a későbbiekben részletezek.



16. ábra
Mintaméretezés algoritmus

Leképezési arány

Az y irányú felbontás a többi paramétertől független (kivéve az éles síkból történő elmozdulás). A kamera egy pixelének a tárgyon megfelelő élhosszúsága határozza meg az y irányú felbontást. Ennek következtében a szükséges leképezési arány (N_{min}) a pixelméretből és az y irányú felbontásból határozható meg, az alábbiak szerint:

$$N_{min} = \frac{m_p}{r_y} = 1:2 = 0,5 \quad (7)$$

A leképezési arány és a szenzorméret ismeretében már kiszámolható, hogy a tárgyon (éles síkban) milyen hosszú lesz az a vonal (továbbiakban: tárgyméret), amit a kamera látni fog.

$$m_t = \frac{m_{sz}}{N_{min}} = \frac{61,44 \text{ mm}}{0,5} = 122,88 \text{ mm} \quad (8)$$

A minta a kiindulási feltételeknek megfelelően y irányba $\pm \Delta y$ -nal mozdulhat el, ezért a tárgyméretből kétszer kivonva az y irányú legnagyobb kimozdulást, megkapjuk, hogy a minta y irányú, képen megjelenő kiterjedése ($m_{y.max}$) mekkora lehet. Ez az érték elsősorban az ellenőrzésekhez lesz szükséges.

$$m_{y.max} = m_t - 2 \cdot \Delta y = 112,88 \text{ mm} \quad (9)$$

Szükséges meredekség

A következő lépésben az x irányú elmozdulásból és felbontásból indulok ki. Az x irányú felbontást a mintában alkalmazott legnagyobb meredekség határozza meg. A szükséges legnagyobb meredekséget (C_{max}) az y és x irányú felbontás hányadosából kaphatom meg.

$$C_{max} = \frac{r_y}{r_x} = \frac{20 \text{ } \mu\text{m}}{20 \text{ } \mu\text{m}} = 1 \quad (10)$$

A fenti összefüggéssel megkapjuk azt a meredekséget, amelynek jelen kell lennie a kamerával készült képen ahhoz, hogy az x irányú felbontás biztosítható legyen. Azonban az x tengely menti forgatás, mint azt az előző alponthan megemlítettem, ezt a meredekséget befolyásolja, tehát az α szög növelésével a megjelenő meredekség csökken. Ebből következik, hogy a meredekség végleges értékének megállapításához figyelembe kell venni a kamera kiindulási elhelyezését és a $\Delta\alpha$ értékét is. Az előző alponthan megállapítottam, hogy ha a kamera optikai tengelyére merőleges a minta, akkor csak 2° elfordulás érzékelhető, ha viszont az $\alpha=45^\circ$ kiindulási helyzethez képest vizsgáltam a legkisebb érzékelhető elfordulást, akkor az eredményem jóval kisebb, $0,2^\circ$ volt. A pixeleltolódás relatív változása $\alpha=1^\circ$ és $\alpha=2^\circ$ között mindössze 0,045 %-os, míg $\alpha=45^\circ$ és $\alpha=46^\circ$ között már 1,76 %-os. Értelemszerű tehát, hogy minél nagyobb a kiindulási szög (a kamera elhelyezésétől függ), annál pontosabban tudom mérni az α szög értékét. A kérdés tehát az, mekkora az a legkisebb α szög, amely esetén az előírt felbontást a minta már teljesíteni tudja. A kérdés megválaszolásához induljunk ki abból, hogy az α szög r_α -val történő megváltoztatására a képen a minta legszélső vonalának legalább három pixelt kell elmozdulnia. Elméletileg egy pixel is elegendő lenne, azonban a gyakorlatban fellépő objektív és leképezési hibák indokolják a három pixel használatát.

A következő számításokban feltételezem, hogy a minta végleges mérete szinte teljesen ki fogja tölteni a rendelkezésre álló területet ($m_{y.max}$), ezért a feltételrendszert kielégítő szög (α_{min}) meghatározásához ebből a hosszúságból indulok ki. A számításokat egyaránt végezhetem a tárgypoldalon és a képoldalon is a megfelelő konverziókat követően.

A következő összefüggésekben m_{3p} jelöli a mintán, azaz a tárgyon a három pixelnek megfelelő méretet.

$$m_{3p} = r_y \cdot 3 = 20 \mu m \cdot 3 = 60 \mu m \quad (11)$$

A szükséges α szög (α_{min}) meghatározásához az előzőekben ismertett elv alapján a következő összefüggést használhatom:

$$\cos(\alpha_{min} + r_\alpha) \cdot \frac{m_{y.max}}{2} + m_{3p} = \cos(\alpha_{min}) \cdot \frac{m_{y.max}}{2} \quad (12)$$

Az egyenletet megoldva valamilyen, például iterációs módszerrel, a példára vonatkoztatva $\alpha_{min}=17,774^\circ$ eredményt kapunk. Megjegyzem, nem cél az egyenlet egzakt megoldása, csupán arra kell figyelni, hogy legalább akkora α szöget válasszunk, amely esetén az elvárt felbontás teljesíthető. Az is igaz persze, hogy túlzottan nagy szög választása esetén a minta egyéb paraméterei romlanak. Összességében elmondható, hogy 1-2°-os ráhagyást célszerű alkalmazni a várható hibák miatt. Ezért a következőkben α_{min} értékét 19°-nak veszem.

Figyelembe véve α szög legnagyobb várható elfordulását ($\Delta\alpha$), meghatározhatom, hogy a kamera optikai tengelye kiindulási állapotban hány fokos szöget zárjon be a referencia-koordinátarendszer z tengelyével a z-y síkon (α_{kamera}). Vegyük figyelembe, hogy valós körülmények között egy kamera meghatározott szögbe állítása nem mindig egyszerű, ezért célszerű az összefüggésbe egy ráhagyást is beletenni. Ezt az értéket (α_{bikt}) a példában én 2°-ra választom.

$$\alpha_{kamera} = \alpha_{min} + \Delta\alpha + \alpha_{bikt} = 19^\circ + 5^\circ + 2^\circ = 26^\circ \quad (13)$$

A minta elfordulása hatással van az eredményképen észlelhető legnagyobb meredekségre. A β szög növelésével a meredekségek csak növekedhetnek, $\gamma \neq 0$ szög esetén a minta szimmetrikus kialakításából adódóan az egyik oldal átmeneteinek meredeksége csökken, de a másik oldalon nő, ezért mindig lesz legalább egy olyan átmenet, amely rendelkezik a megfelelő meredekséggel. A mintában alkalmazandó, α szög hatásával korrigált meredekség kiszámításához szükségem van arra a legnagyobb α szögre (α_{max}), amely a mérés során elvileg előfordulhat. Ezt értelemszerűen a következő összefüggések valamelyikével számolhatom ki:

$$\begin{aligned} \alpha_{max} &= \alpha_{min} + 2 \cdot \Delta\alpha + 2 \cdot \alpha_{bikt} = \alpha_{kamera} + \Delta\alpha + \alpha_{bikt} = \\ &= 19^\circ + 2 \cdot 5^\circ + 2 \cdot 2^\circ = 33^\circ \end{aligned} \quad (14)$$

Ahhoz, hogy a legnagyobb α szög esetén is megfelelő felbontással tudjam mérni az x irányú eltolódás mértékét, az előzőekben kiszámított „szükséges legnagyobb meredekség” (C_{max}) értékét az α_{max} szög torzító hatásával kell korrigálnom, más szavakkal meg kell határoznom azt a meredekséget, amely a legnagyobb α szög esetén éppen a C_{max} -ként jelenik

meg az eredményképen. A korrigált meredekséget ($C_{max.korr.}$) a következő összefüggéssel kaphatom meg:

$$C_{max.korr.} = \frac{C_{max}}{\cos \alpha} = \frac{1}{\cos 33^\circ} = \frac{1}{0,8387} = 1,1923 \approx 1,2 \quad (15)$$

A szóródási kör mértéke

A szóródási kör értelmezéséről, fontosságáról már korábban szó volt. Jelen alpont célja meghatározni azt a z paraméterértéket, amellyel a mérés a megadott feltételeknek megfelelően elvégezhető. A következő számítások kiindulópontja a már előzőekben meghatározott minimális nagyítás (N_{min}) mértéke. Az objektív fókusz-távolságát (f) felhasználva kiszámolható a képtávolság (k) és a tárgytávolság (t) a következők szerint [P26]:

$$k = (1 + N_{min}) \cdot f = (1 + 0,5) \cdot 100 \text{ mm} = 150 \text{ mm} \quad (16)$$

$$t = \frac{k}{N_{min}} = \frac{150 \text{ mm}}{0,5} = 300 \text{ mm} \quad (17)$$

Az imént kiszámított tárgytávolság az éles síkra vonatkozik. Azonban a mért tárgyra rögzített minta ebből a síkból a z tengely menti eltolódással és x , y tengelyek menti elfordulással is kimozdulhat. A mintában alkalmazandó minimális vonalvastagság meghatározásához ki kell számolnom, hogy a feltételezett mozgások, forgások legrosszabb kombinációja esetén a minta kamera által érzékelt pontjai (fekete) maximum mennyire távolodnak el az éles síktól. Problémát jelent azonban, hogy még nem tudjuk a minta végleges méretét, ezért az előzőekben már kiszámolt maximális mérettel ($m_{y,max}$) számolok. Mivel ez a döntés viszonylag nagy biztonsági tartalékokat visz a számításokba, az egyszerűsítés érdekében β és γ szögek viszonylag kicsi közvetett hatását a most következő számításokban elhanyagolom. Azonban azt a tényt, hogy α_{max} mértékű x tengely menti elfordulás esetén a minta szélső pontjai nagymértékben kimozdulnak az éles síkból, már figyelembe kell vennem. Ezt a helyzetet súlyosbítja, ha a z tengely menti eltolódás is maximális mértékű.

Az optikai törvények miatt ezt a számítást csak az éles síkból a kamera felé történő kimozdulásra kell elvégezni, ugyanis ugyanolyan mértékű távolodás a képen kisebb homályosodást okoz.

Az előzőeket figyelembe véve a legrosszabb esethez tartozó közelponti tárgytávolságot ($t_{közel}$) a következő összefüggéssel határozhatom meg:

$$\begin{aligned} t_{közel} &= t - |\Delta z| - \sin \alpha_{max} \cdot \frac{m_{y,max}}{2} = \\ &= 300 \text{ mm} - 5 \text{ mm} - \sin 33^\circ \cdot \frac{112,88}{2} = 264,26 \text{ mm} \end{aligned} \quad (18)$$

Az objektíveken feltüntetett rekeszszám az minden esetben a fókusz-távolságra van megadva, amely érték lényegében csak végtelen távoli tárgy esetén áll fenn. Az alkalmazásból adódóan ez a feltétel nem teljesül, ezért elengedhetetlen a valós rekeszszám meghatározása. A fényképezőgépeken feltüntetett rekeszszám a fókusz-távolság és az objektív hatásos

átmérőjének hányadosa. A valós rekeszszám viszont a tényleges képtávolság és az objektív hatásos átmérőjének hányadosa. A már meghatározott képtávolság (k), az objektív fókusz-távolsága (f) és a beállított rekeszszám (R) alapján kiszámítható a valós rekeszszám ($R_{valós}$).

$$R_{valós} = \frac{k}{f} \cdot R = \frac{150 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \cdot 8 = 12 \quad (19)$$

Az előzőeket felhasználva, az (1)-es összefüggést átrendezve kiszámítható a szükséges szóródási kör (z_{sz}) mértéke.

$$z_{sz} = \frac{\frac{t \cdot f^2}{t_{közeli}} - f^2}{R_{valós}(t-f)} = \frac{\frac{300 \cdot 100^2}{264,26} - 100^2}{12(300-100)} = 0,5635 \text{ mm} \quad (20)$$

A fent kiszámolt szóródási kör a képoldalra van értelmezve, azaz a tárgyon ennek az értéknek a leképezési aránnyal kompenzált értékét kell figyelembe venni. Ezen felül, ha az így kapott értéket használom a tárgy felületén, akkor a minta α_{max} mérvű x tengely menti elfordulás esetén már vékonyabbnak fog látszani, azaz kompenzálni kell ennek hatását is. Ezek figyelembevételével a mintában alkalmazandó $z_{valós}$ értéket a következő összefüggéssel határozhatom meg:

$$z_{valós} = \frac{z}{N_{min} \cdot \cos \alpha_{max}} = \frac{0,5635}{0,5 \cdot \cos 33^\circ} = 1,4712 \text{ mm} \approx 1,5 \text{ mm} \quad (21)$$

A minta szélessége

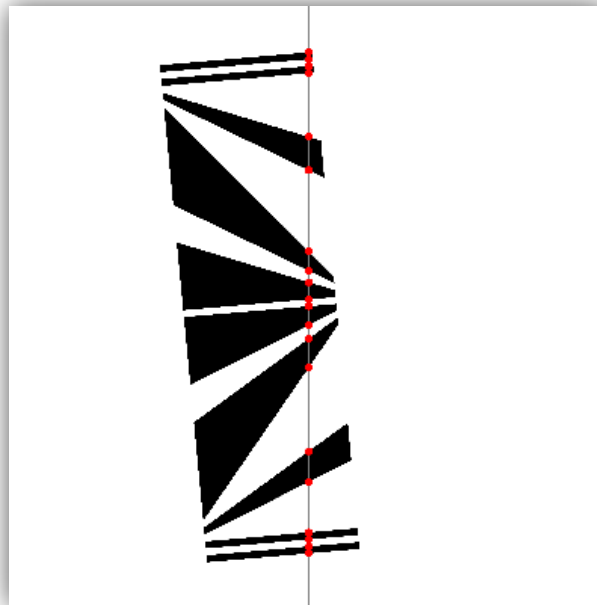
A szükséges vonalvastagság után célszerű a minta minimum szélességét meghatározni. Ehhez bevezetem az „aktív szélesség” és az „aktív sáv” fogalmát. Utóbbi alatt az eredményképpen azt a sávot (sáv szélességét) értem, amelyen belül úgy tudok függőleges vonalat húzni, hogy a vonal az összes átmenetet metssze. Értelemszerű, hogy $\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$, $\gamma=0^\circ$ esetén az aktív szélesség megegyezik a minta tényleges szélességével. Ha erre az esetre tervezném a mintát, akkor a minta minimum szélessége ($m_{x,min}$) az x irányú várható elmozdulásból adódna.

$$m_{x,min} = 2 \cdot |\Delta x| \quad (22)$$

Azonban az aktív sávot a tengelyek menti elfordulások általában szűkítik. Ez alól kivétel az önmagában fellépő x tengely menti elfordulás, ekkor az aktív szélesség nem változik. A z és/vagy y tengelyek menti elfordulással kombinált x tengely menti elfordulás hatása kettős. Egyfelől függőlegesen összenyomja a mintát, ezzel kis mértékben ellensúlyozza a γ szög aktív sávcsökkentő hatását, másfelől erősíti az y tengely menti elfordulás okozta sávcsökkenést. A mintatesztelő alkalmazással megvizsgálva a jelenséget arra a következtetésre jutottam, hogy azonos várható szögelfordulások mellett az x tengely menti elfordulás elsősorban a sávcsökkenést erősíti. Nyilvánvalóvá vált az is, hogy az aktív szélesség csökkenésében a z tengely menti elfordulás a legdominánsabb. Számos esetet

megvizsgálva arra a következtetésre jutottam, hogy az $\alpha=+|\Delta\alpha|$, $\beta=-|\Delta\beta|$, és $\gamma=+|\Delta\gamma|$ eset a legrosszabb a sávcsökkenésre nézve. Megjegyzem, hogy az α szög kettős hatásának köszönhetően elképzelhető olyan eset, amelynél az előbbi megállapítás már nem állja meg a helyét.

A cél tehát az, hogy a szögek legrosszabb hatása mellett, a feltételezett legnagyobb x irányú elmozdulás esetén, a kamera érzékelni tudja az összes átmenetet a mintában. Tekintsük az alábbi ábrát, amely igazodva a számszerű példához $\alpha=+5^\circ$, $\beta=-5^\circ$, $\gamma=+5^\circ$, és $dx=-500$ (-5 mm-nek felel meg) paraméterek esetét mutatja. A mintaparaméterek úgy lettek beállítva, hogy még éppen eleget tegyenek a feltételeknek.



17. ábra
Eredménykép $\alpha=+5^\circ$, $\beta=-5^\circ$, $\gamma=+5^\circ$, $dx=-500$ esetén

A cél az, hogy a minta legfelső átmenetének jobb szélső pontja (a minta jobb felső sarka) a legrosszabb esetben is a szürkével jelzett ($x=0$) vonal jobb oldalán maradjon. Abból indulok ki, hogy egy térbeli pont (x_0, y_0, z_0) x koordinátáját kell meghatároznom a rajta elvégzett transzformációk után (x_t). Ezt a 17. ábra alapján a következő összefüggéssel tehetem meg:

$$x_t = \cos \gamma \cdot \cos \beta \cdot x_0 + \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot y_0 + \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot z_0 - \sin \gamma \cdot \cos \alpha \cdot y_0 + \sin \gamma \cdot \sin \alpha \cdot z_0 + |\Delta x| \quad (23)$$

Az összefüggés egyszerűsödik, ugyanis a z tengely menti pozíció sem a kiindulási, sem az eredményképen nem releváns, így értéke tetszőlegesen megválasztható. Tehát $z_0=0$ esetén a következő összefüggéshez jutunk:

$$x_t = \cos \gamma \cdot \cos \beta \cdot x_0 + \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot y_0 - \sin \gamma \cdot \cos \alpha \cdot y_0 + |\Delta x| \quad (24)$$

Ezt az összefüggést kellene megoldanom $x_t=0$ esetére. Egyelőre az x_0 és y_0 értéke nem ismert, de a két ismeretlen egymással szoros összefüggésben van. A 10. ábra alapján megállapítható, hogy a jobb felső pont y_0 értékét kiszámíthatjuk az x_0 , az alkalmazott legnagyobb meredekség ($C_{max,korr.}$) és a szóródási kör ($z_{valós}$) paraméterek ismeretében. Az y_0 és x_0 közötti összefüggés a következő:

$$y_0 = 9,5 \cdot z_{valós} + 2 \cdot x_0 \cdot C_{max,korr.} \quad (25)$$

Ezt behelyettesítve a (24)-ik egyenletbe, kiemelést és átrendezést követően az alábbi eredményre jutunk ($z=1,5 \text{ mm}$, $\Delta x=-5 \text{ mm}$, $C_{max,korr.}=1,2$, $\alpha=+33^\circ$, $\beta=-5^\circ$, $\gamma=+5^\circ$ mellett):

$$x_0 = \frac{-|\Delta x| + 9,5 \cdot z \cdot (\sin \gamma \cdot \cos \alpha - \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha)}{\cos \gamma \cdot \cos \beta + 2 \cdot C_{max,korr.} \cdot (\cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \alpha)} = 9,54 \text{ mm} \quad (26)$$

Azaz a minta szélességét $2 \cdot x_0=19,08 \text{ mm}$ -re kell választanom ahhoz, hogy a mozgások legrosszabb kombinációja esetén is minden paraméter mérhető legyen a megadott elméleti pontosság mellett. Az x_0 ismeretében a (25)-ös egyenletet felhasználva kiszámíthatom y_0 értékét és annak dupláját, a minta teljes y irányú kiterjedését (m_y).

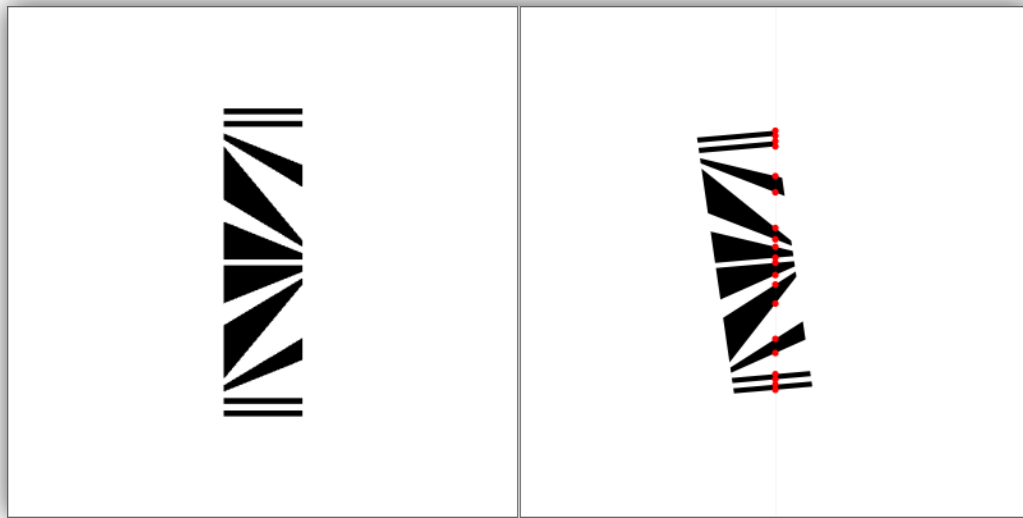
$$m_y = 2 \cdot y_0 = 2 \cdot (9,5 \cdot z + 2 \cdot x_0 \cdot C_{max,korr.}) = 74,29 \text{ mm} \quad (27)$$

Az előzőekben, a számszerűsített példa kapcsán már kiderült, hogy a kamera optikai tengelye a mérés alatt soha nem lesz a minta síkjára merőleges, azaz a kamera soha nem láthatja m_y méretűnek a mintát. A minta α_{min} mértékű x tengely menti elfordulás esetén fog a legnagyobb látszani. A kamera által érzékelt legnagyobb y irányú kiterjedés ($m_{y,latsz}$) a következő összefüggéssel számolható ki.

$$m_{y,latsz} = m_y \cdot \cos \alpha_{min} = 74,29 \text{ mm} \cdot \cos 19^\circ = 70,24 \text{ mm} \quad (28)$$

A minta méreteinek ellenőrzésekor az $m_{y,latsz} \leq m_{y,max}$ kritériumnak teljesülnie kell, azaz a minta nem lóghat ki a kamera látómezőjéből.

Az eddig kiszámolt eredmények alapján arányosan ábrázoltam a kiindulási mintát (bal oldal) és a legrosszabb esetnek megfelelő transzformált eredményt (jobb oldal).



18. ábra

A kiszámolt minta arányos ábrázolása alapállapotban és a legrosszabb esetben

Optimalizálás

Összehasonlítva a számításokkal kapott minta y irányú kiterjedését ($m_{y,latsz}$) a megengedett legnagyobb kiterjedéssel ($m_{y,max}$), megállapítható, hogy a rendelkezésre álló területet nem használtam ki teljesen. Azonban a számításokban feltételeztem, hogy a minta ki fogja tölteni a rendelkezésre álló területet, így szükséges és célszerű is a mintát növelni a már kiszámolt méretkorlát figyelembevételével. Ezzel elérhető a mérés pontosságának növekedése, méréstartományának kiterjedése.

A minta méretének növelésére három lehetőségem van:

- a szóródási kör ($z_{valós}$) változtatása,
- a legnagyobb meredekség ($C_{max,korr}$) változtatása,
- a minta szélességének változtatása.

A paraméterek változtatását egy bizonyos mértékig, ha egyéb szempontokat nem kell figyelembe vennünk, célszerű arányosan végezni. A bizonyos mértéken azt értem, hogyha elérjük a szükséges szóródási kör értékének a dupláját, akkor $z_{valós}$ értékét már nem célszerű tovább növelni. Ekkor már csak a másik két paraméter arányos növelését javaslom.

Speciális eset, amikor az elvárt kritériumokon felül valamelyik paraméter minél pontosabb megmérése a cél. Például ha az előzőekben meghatározott feladatra az x irányú elmozdulás minél pontosabb megmérése lenne a cél, akkor elsődlegesen a legnagyobb meredekséget kellene növelnem.

Figyelembe kell venni, hogy egy-egy paraméter változtatása magával vonja a minta méreteinek változását, így módosítva a szükséges minimális méreteket is. Például, nem tudom csak a z paramétert növelni, mert annak hatására nagyobb lesz a minta y irányú kiterjedése, ami azt eredményezi, hogy a legrosszabb esetben már szélesebb mintára van szükség.

A leképezési arányt az y irányú felbontás alapján határoztam meg. A minta optimalizálásánál annak érdekében, hogy az összes mérhető paraméter felbontása javuljon, a leképezési arányt is változtatni szükséges.

A minta optimalizálását Excel táblázat segítségével végeztem el, amelyben az előzőekben ismertetett összefüggéseket felhasználva a kiindulási adatokból számoltam ki

minden paramétert. A táblázatba az ellenőrző funkciókat is beépítettem. Az optimalizálással az eredetileg felvett felbontásokat, méréstartományokat mintegy 24 %-kal tudtam növelni. Az így kapott minta szinte teljesen kihasználja a kamera és az objektív adta lehetőségeket. A kiindulási adatok és a kapott eredmények az alábbi táblázatban láthatóak.

Kiindulási adatok			Számított eredmények		
Jelölés	Érték	Mértékegység	Jelölés	Érték	Mértékegység
f	100	mm	$N_{\min}$	0,62	-
m_p	10	μm	m_t	99,1	mm
m_{sz}	61,44	mm	$m_{y,\max}$	86,7	mm
Δx	6,2	mm	$C_{\max}$	1	-
Δy	6,2	mm	$C_{\max,\text{kor}}$	1,21	-
Δz	6,2	mm	$R_{\text{valós}}$	12,96	-
r_x	16,13	μm	k	162	mm
r_y	16,13	μm	$t_{\text{közel}}$	230,7	mm
$\Delta\alpha$	6,2	$^\circ$	z_{sz}	0,6337	mm
$\Delta\beta$	6,2	$^\circ$	$z_{\text{valós}}$ (számított)	1,38	mm
$\Delta\gamma$	6,2	$^\circ$	m_x	13,08	mm
r_α	0,2	$^\circ$	m_y	89,84	mm
r_β	0,2	$^\circ$	$m_{y,\text{latsz}}$	85,54	mm
r_γ	0,2	$^\circ$			
α_{biz}	2	$^\circ$			
$z_{\text{valós}}$	1,4	mm			
R	8	-			

2. táblázat
Az optimalizált minta számításai

3.6. Új tudományos eredmények

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.

Tézis 2: Az 1. tételben 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.

4. ADATMENNYISÉG-REDUKÁLÁSI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA

Irodalomkutatásaim során azt tapasztaltam, hogy az eredetileg futószalagon mozgó tárgyak fényképezéséhez kifejlesztett vonalkamérákat 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 vonalkamérák által előállított adatot valamilyen módon megszüntné, 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. Jelen fejezetben ennek az új adatredukálási módszernek az elvét és egy, a gyakorlatban is megvalósított, tesztelt megoldását mutatom be.

4.1. *A redukálási elv ismertetése*

A line scan kamerákat, mint tudjuk, (általában futószalagon) mozgó termékek fényképezéséhez fejlesztették ki. Ilyen alkalmazásoknál egyértelműen az a cél, hogy minden egyes pixelsor minden egyes pixelintenzitás-értékét továbbítsák a számítógép felé. Ekkor a kamera által szolgáltatott teljes adatmennyiségre szükség van, más szavakkal: az összes adat egyben információ is.

A megismert mérési elv alapján már tudjuk, hogy az értekezésemben tárgyalt mérési módszerek szempontjából az információt nem közvetlenül a pixelintenzitás-értékek hordozzák, hanem az pixelátmenetek pozíciói.

Az adatredukálás elve tehát az, hogy az adatok számítógéppel történő feldolgozása előtt egy hardveres előfeldolgozó segítségével minden pixelsorban detektálom az átmenetek pozícióit, és csak ezeket, tehát az egy-egy sorhoz tartozó pozíció tömböket továbbítom a számítógép felé.

Tekintve, hogy a mérni kívánt felületre rögzített minta fekete és fehér területekből áll, homogén és jól beállított megvilágítás esetén elvileg elegendő minden pixel legmagasabb helyiértékű bitváltozását (MSB – Most Significant Bit) figyelni. A képen átmenet van, ha az egymást követő pixeleknél ez a bit alacsony szintről magasra vagy magasról alacsonyra változik. Az alábbiakban ismertetett, megvalósított tesztrendszerrel ezt a logikát követtem.

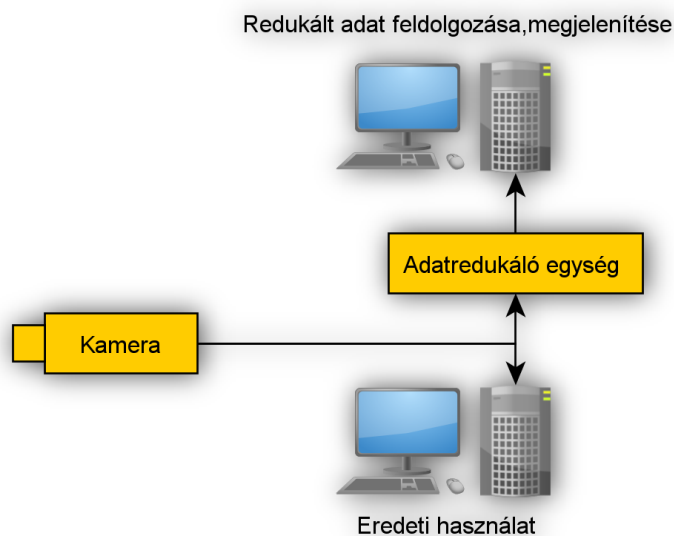
4.2. *Az adatredukálás megvalósítása FPGA felhasználásával*

A redukálási elv megvalósítására több lehetőség is felmerült, azonban ismerve az FPGA (Field Programmable Gate Array) nyújtotta rugalmas fejlesztési lehetőségeket, úgy döntöttem, hogy az adatredukálást FPGA-n, LabVIEW fejlesztőkörnyezetben valósítom meg [O17].

4.2.1. A fejlesztő- és tesztkörnyezet kialakítása

Tervezési szempontok

Az NI Hungary Kft.-től néhány hónapra kölcsön kapott Dalsa gyártmányú P2-6k40 típusú line scan kamera úgynevezett „Camera Link” interfésszel rendelkezik [O11]. Céлом egy olyan fejlesztőkörnyezet kialakítása volt, amely lehetőséget biztosít a kamera eredeti, frame grabber kártyás használatára, ugyanakkor ezzel párhuzamosan lehetővé teszi az adatredukálás megvalósítását egy másik számítógépen. Így a kamera beállításához szükséges kommunikációs csatornák külön megvalósítására nem volt szükség. A fejlesztőkörnyezet vázlatja a következő ábrán látható.



19. ábra
A tesztkörnyezet felépítése

A kamera a tápegység bekapcsolását követően a legutolsó beállításoknak megfelelően működik. A képadatok továbbítása folyamatosan zajlik akkor is, ha a vevő oldalon senki nem fogadja azokat. Ez számomra azért lényeges, mert így azokban az üzemállapotokban is tudtam tesztelni az adatredukáló egységet, amelyekben az eredeti használattal, folyamatos képkészítés mellett erre nem volt lehetőségem a vevő oldalon előálló adatmennyiség miatt.

Az adatredukáló egység fejlesztésekor nyilvánvaló volt, hogy a kamerát vissza kell adnom, ezért célul tűztem ki egy olyan szimulációs egység kifejlesztését is, amely a kamera protokolljának megfelelően képes szimulált adatokat előállítani és küldeni az adatredukáló egység felé. Így kívántam biztosítani, hogy a kamera nélkül is tudjam folytatni a fejlesztést.

Hardverelemek kiválasztása

A hardverelemek kiválasztásánál két szempontot kellett figyelembe vennem. Az egyik, hogy a két rendszer (eredeti és adatredukáló egység) egymással párhuzamosan működtethető legyen. A másik szempont, hogy a felhasznált alkatrészek, hardverek mind értékben, mind elérhetőségben olyanok legyenek, amelyek számomra, illetve a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai – Elektronikai Tanszéke számára beszerezhetők.

A National Instruments kínálatában számos olyan terméket találunk, amely alkalmas Camera Link interfészes kamerákhoz. Ezek között vannak FPGA-val ellátott, újrakonfigurálható frame grabber kártyák is. Ezeket a kártyákat elsősorban area scan kamerákhoz fejlesztették ki azzal a céllal, hogy az iparban gyakran előforduló képfeldolgozási műveleteket egy előfeldolgozóban, az FPGA-ban lehessen elvégezni. A következő képen egy ilyen, valójában két termékből álló együttes látható. Az NI-PXI-79XX sorozatú, úgynevezett „FlexRIO” (flexibilis, újrakonfigurálható) kártya lényegében egy programozható mérőkártya, amelyhez az NI-1483R adaptermodullal illeszthetőek Camera Link interfésszel rendelkező kamerák. Ez a termék elméletileg alkalmas lett volna a céljaimhoz, azonban nem állt módomban használni. [O17]



20. ábra

Az NI 1483 Adaptermodul NI FlexRIO mérőkártyával [O17]

Az Elektrotechnikai – Elektronikai Tanszék rendelkezett egy, a FlexRIO termékcsaládba tartozó mérőkártyával, de sajnos az NI-PXI-78XX sorozatból, amely nem kompatibilis a fent említett adaptermodullal.

Nyilvánvaló volt, hogy az adaptermodul olyan áramköröket tartalmaz, amelyek a Camera Link kábelén továbbított aszinkron, alacsony feszültségű jeleket az FPGA számára értelmezhető TTL/CMOS szintű digitális jelekké alakítják át. Ezért olyan áramköröket kerestem, amelyek el tudják látni ezt a feladatot, remélve, hogy használatukkal a Tanszék tulajdonát képező, NI-PXI-7852R típusú kártya is alkalmassá válik az adatredukáló egység létrehozására.

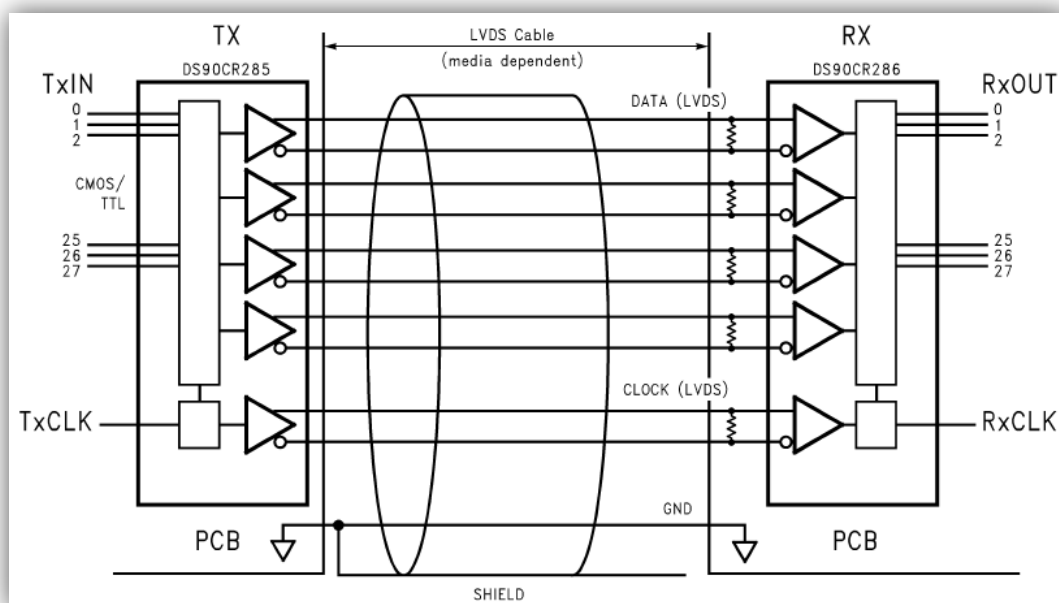
A DS90CR282 28 bites, Channel Link vevőáramkör alkalmasnak tűnt a feladatra, azonban Magyarországon és a környező országokban nem volt beszerezhető. A Farnell áramkör-forgalmazó a DS90CR286 típust ajánlotta helyettesítő áramkörnek [O13]. Ez a típus kisebb feszültségen (3,3 Volt) és nagyobb frekvencián (66 MHz) üzemel, mint az előző, az általam használt kamera frekvenciájához (40 MHz) tökéletesen illeszkedő áramkör.

Úgy döntöttem, hogy a DS90CR286 típusú áramkört és a már rendelkezésre álló NI-PXI-7852R kártyát fogom használni az egység megvalósításához.

Az adatmásoló adapter létrehozása

Céлом nem a National Instruments adaptermoduljához hasonló átalakító létrehozása volt, ugyanis az nem tette volna lehetővé a kamera eredeti rendszerrel való párhuzamos használatát. Nekem egy olyan elágazóra volt szükségem, amely megvalósítja az eredeti rendszerrel a teljes-oda-vissza irányú kapcsolatot, ugyanakkor az adatredukáló egység felé csak a feldolgozás szempontjából lényeges adatokat közvetíti.

Az adapter megtervezését a Camera Link protokoll és a DS90CR286 típusú integrált áramkör adatlapjának tanulmányozásával kezdtem [O14], [O13]. A következő ábrán az integrált áramkör tipikus alkalmazása látható.



21. ábra
A DS90CR28X áramkörök tipikus alkalmazása [O13]

Összességében elmondható, hogy a DS90CR285 áramkör 28 digitális jelet és a hozzájuk tartozó órajelet konvertálja LVDS (Low Voltage Differential Signaling) formátumra, amelyet a Camera Link interfészen is használnak. A vevő oldalon ezen művelet fordítottját hajtja végre a DS90CR286-os áramkör.

A protokoll célja az adatátvitel hibamentes lebonyolítása. Az átvitel alapvetően egy kábelen történik, amely tartalmazza a kétirányú kapcsolatot és a soros kommunikációt. Így maximálisan 2,38 Gbit/s sávszélesség érhető el. Amennyiben ez kevés, lehetőség van kétkábeles konfigurációt használni, amellyel a sávszélesség „medium” kiépítésben

4,76 Gbit/s-ra, teljes kiépítésben 6,34 Gbit/s-ra növelhető. Az általam használt kamerához egy kábel bőségesen elegendő. [O14]

Az egy ütemhez tartozó 28 bit adat protokoll szerinti felosztása a következő:

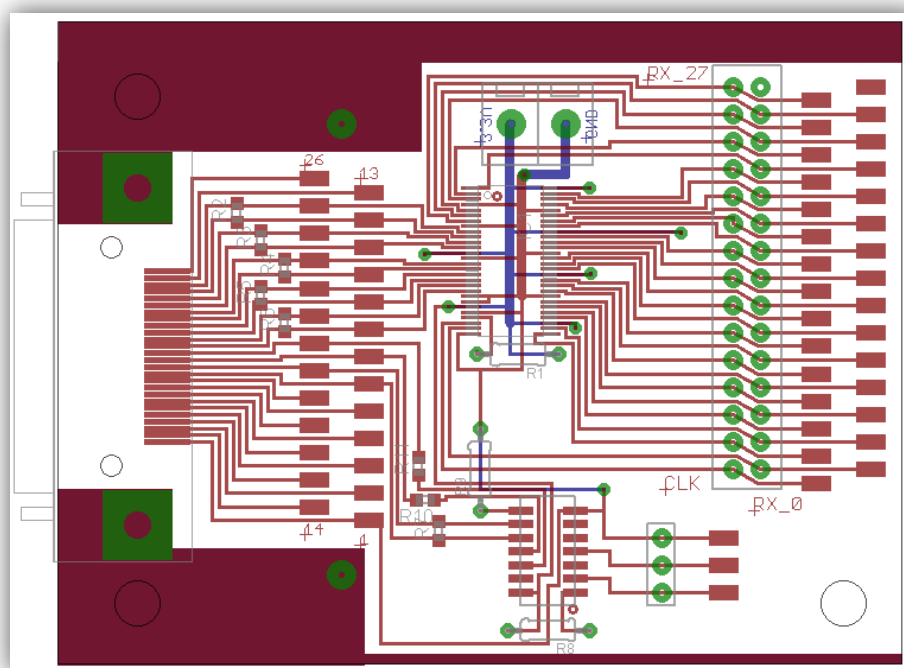
- 3x8 bit pixelinformáció,
- FVAL (Frame Valid) bit az érvényes vonal jelzésére,
- LVAL (Line Valid) bit az érvényes pixelek jelzésére,
- DVAL (Data Valid) bit az érvényes adat jelzésére,
- Spare bit későbbi felhasználásra fenntartva.

A 3x8 bit adat A, B, C port néven értelmezett a specifikációban. Az általam használt kamera az úgynevezett „2 tap”-es modellek családjába tartozik, ami gyakorlati szempontból annyit jelent, hogy két portot használ az adatok továbbítására. A kamerát 8 és 10 bites módban is lehet működtetni. A 8 bites üzem előnye, hogy a két porton egy ütemben két pixel értéke továbbítódik. A 10 bites módnál viszont mindkét portra szükség van egyetlen pixelérték továbbítására. Figyelembe véve, hogy a céloom csak az MSB figyelése, semmi nem indokolta 10 bites mód használatát, ezért az adatredukáló egységet a 8 bites használathoz terveztem meg. [O14]

A DS90CR286-os áramkör kimenetei közül csak a következőket kellett az FPGA kártya bemeneteire vezetnem:

- CLK órajel, aminek magas szintje jelzi, hogy az adatok olvashatóak,
- LVAL, ami jelzi, hogy a kamera pixelsora mikor továbbítódik,
- az A port MSB-je,
- a B port MSB-je.

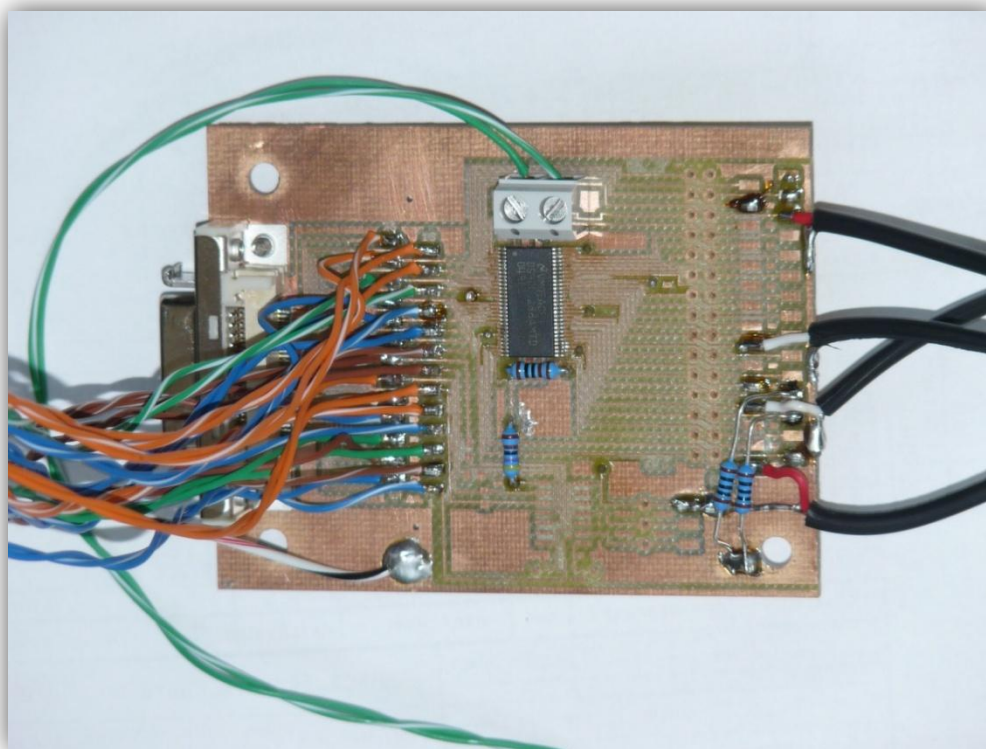
Annak érdekében, hogy a létrehozott áramkörrel különböző méréseket, tesztek is el tudjak végezni, az áramkör legtöbb kimenetét kivezettem egy forrasztható felületre. Az áramkör 50 lábbal rendelkezik, melyek távolsága 0,5 mm. Figyelembe véve a technikai lehetőségeimet, valószínűsíthető volt, hogy az áramkör kiforrasztására és újbóli beforrasztására nem lesz lehetőségem, így a hordozó panelt a lehető legrugalmasabb formában kívántam kivitelezni. Éppen ezért még a protokoll soros kommunikációját megvalósító DS90LV019 típusú integrált áramkör [O13] helyét is ráterveztem a panelra, aminek beforrasztására, illetve használatára nem volt szükségem. A következő ábrán a megtervezett panel látható.



22. ábra
A nyomtatott áramkör a DS90CR286 áramkörhöz

A kétoldalas panelt a Tanszék tulajdonát képező Protomat S62 nyomtatott áramkörök prototípus-gyártására tervezett, számítógép vezérlésű marógéppel állítottam elő.

Az igen kis lábtávolságú integrált áramkört és a panel bal oldalán látható MDR26 felületszerelt csatlakozót forrasztópaszta és forrólevegős forrasztóállomás segítségével forrasztottam be. A beforrasztott panel (végleges verziója) a hozzá kapcsolódó vezetékekkel együtt a következő képen látható.



23. ábra

A beforrasztott nyomtatott áramkör

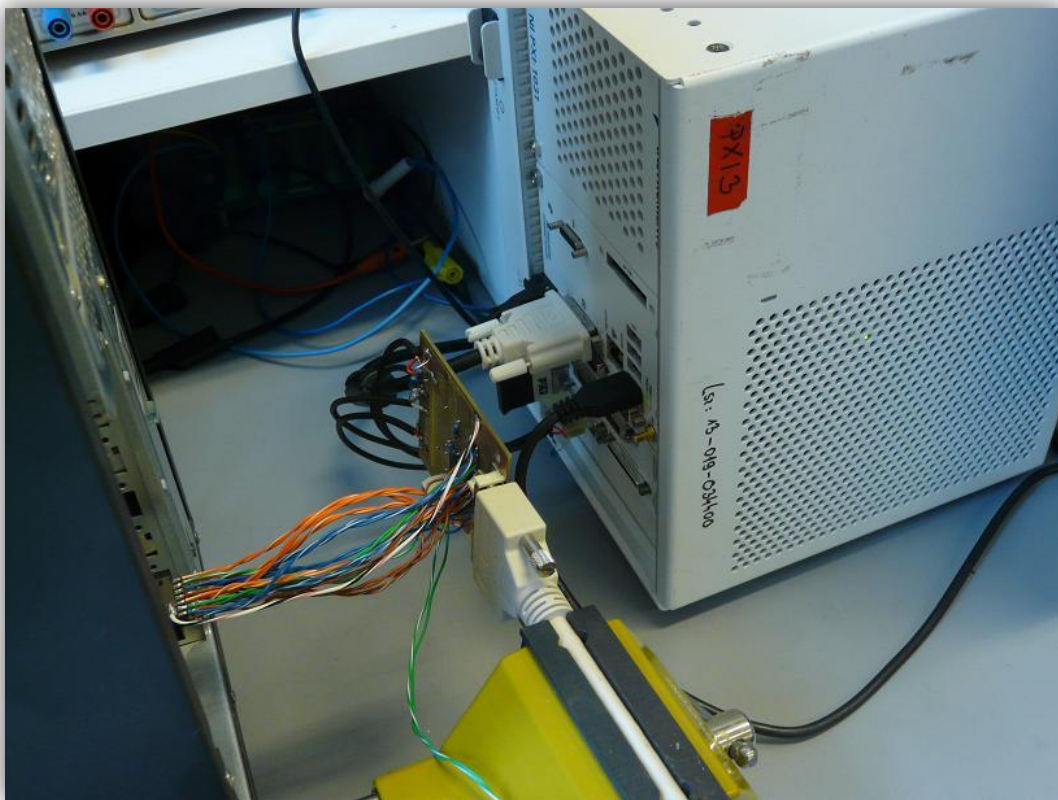
A kamera kábele a panel bal oldalára forrasztott csatlakozóra kapcsolható. A kép bal oldalán távozó vezetékek az eredeti összeköttetést biztosító csatlakozóhoz futnak. A kép jobb oldali vezetékei kapcsolódnak az FPGA kártyára egy adapterpanelen keresztül. Az áramkör felett a tápellátást biztosító vezetékek láthatóak.

A National Semiconductor tervezési szempontjait [O15] már a panel tervezésénél figyelembe vettem, ennek ellenére többször gondot okozott a nagyfrekvenciás digitális jelek áthallása. A hibamentes adatátvitel érdekében több módosítást is végre kellett hajtanom a fejlesztés folyamán. A 23. ábra jobb oldalán látható vezetékeket kicseréltem erenként árnyékoltra. Törekednem kellett a lehető legrövidebb vezetékek használatára.

A többfunkciós panel tervezésének hátrányává vált, hogy a kivezetett, de nem használt csatlakozási pontok sugárzó antennaként hatottak néhány számomra lényeges kimenetre.

Ezen hatást csökkentendő utólag ellenállásokat forrasztottam be a panel jobb alsó részére, hogy a lényeges vezetékek közvetlen szomszédságában futó kivezetéseket terhelje, csökkentve ezzel a vezetékek közvetlen közelében kialakuló zavaró villamos tér erősségét [P27].

A tesztelésekhez használt működőképes, beépített áramkör a szükséges kiegészítőkkel együtt a következő képen látható (24. ábra). Ezt követően a teljes tesztrendszer látható a két számítógéppel, a kamerával és a megvilágítással (25. ábra).



24. ábra
A Camera Link adapter beszerelt állapotban



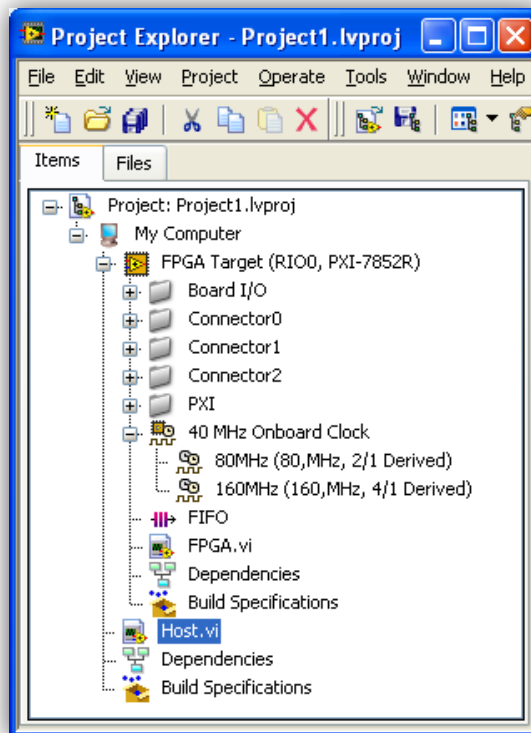
25. ábra
A teljes teszrendszer

A bal oldali számítógép és monitor az eredeti használathoz szükséges. A bal oldali monitor mögött elhelyezett ipari számítógépben (PXI) található az előfeldolgozást megvalósító FPGA kártya.

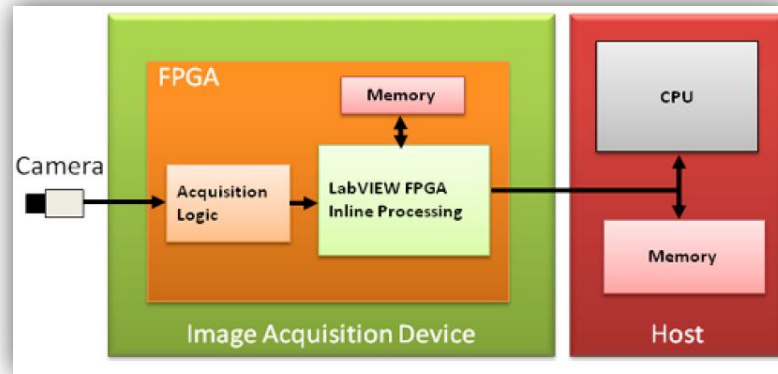
A szoftverelemek kiválasztása

A National Instruments a számítógéppel támogatott mérőrendszerek, mérőkártyák gyártása mellett az azok könnyebb használatát megvalósító szoftvertermékek fejlesztésével is foglalkozik. Tanszékünk évek óta használja a cég hardver és szoftver termékeit. Ismerve az FPGA általános VHDL-ben (Very High-Speed. Integrated Circuit **H**ardware **D**escription Language), és a National Instruments LabVIEW szoftverében történő programozásának menetét, úgy döntöttem, hogy az utóbbi, vizuális fejlesztőkörnyezetet fogom használni [O17].

FPGA-t tartalmazó termékeket a LabVIEW környezetben az úgynevezett „Real time” és „FPGA” kiegészítő modulokkal használhatunk. Ezen kiegészítők feltelepítését követően FPGA projektet hozhatunk létre, amelynek szerkezete a következő ábrán látható (26. ábra). Az FPGA-s képfeldolgozást sematikus szemlélteti a 27. ábra.



26. ábra,
Az FPGA project LabVIEW-ban



27. ábra
Képfeldolgozás FPGA felhasználásával [O17]

Az FPGA projekt két logikai részre osztható. Az egyik a számítógép, a másik a számítógépben vagy hálózaton elhelyezett FPGA eszköz. Az FPGA mappában létrehozott program (VI, Virtual Instrument) az FPGA áramkörön fut. Az eszköz programozását (huzalozását) a LabVIEW automatikusan elvégzi.

A projekt My Computer mappájába helyezhetjük el a National Instruments terminológiájában host alkalmazásnak nevezett programot, amely kapcsolatot tud létesíteni az FPGA-val. A két program az FPGA eszközön definiálható FIFO (first-in, first-out) memóriatartományokon, illetve az FPGA program felhasználói felületén definiált kontrollok segítségével képes kommunikálni.

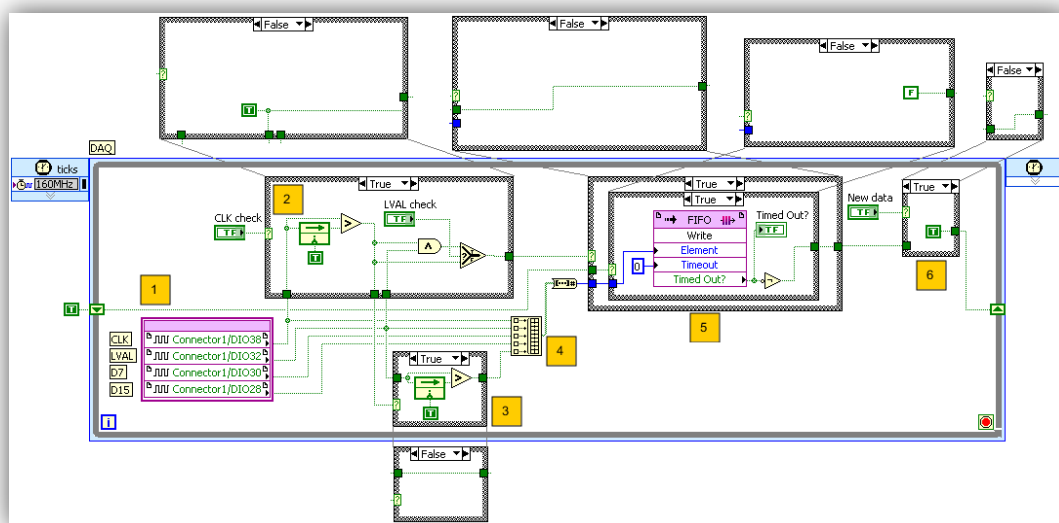
4.2.2. Előkészületek, adatfolyam-vizsgálat

Az áramkör helyes működésének ellenőrzése és a várható nagyfrekvenciás zavarhatások miatt szükségesnek láttam egy olyan mérés megvalósítását, amellyel a nyers adatfolyam megfigyelhető.

Az áramkör kimenetén a jelek 40 MHz frekvenciával is változhatnak, azaz olyan eszközt kellett használnom, amely alkalmas ilyen frekvenciájú jelek mérésére. A Tanszék mérőkártyáinak többsége csak 1-20 MHz mintavételi frekvenciával képes digitális jeleket mérni. Ezért döntöttem úgy, hogy ezt a mérést is a rendelkezésre álló FPGA mérőkártyával valósítom meg. A kártya 40 MHz-es alapórajellel rendelkezik, amelyet lehet szorozni és osztani is. A méréshez nem használtam triggerjelet, ezért annak érdekében, hogy a CLK jel is egyértelműen mérhető legyen, az alapórajelt négyszeres szorzóval használtam, így 160 MHz-es mintavételi frekvenciát értem el.

Az órajel négyszerezésének két komoly hátránya van a fejlesztés szempontjából. Az egyik, hogy az áramkörök időzítése miatt meglehetősen kevés művelet fűzhető egymás után. A másik, hogy csak olyan művelet használható a programban, amely egyfelől a LabVIEW-ban valós idejű (Real time) alkalmazásra implementált, másfelől a végrehajtásához egy órajel (tick) elegendő (például szorzás, osztás művelet nem alkalmazható). Ez a két kritérium gyakran megnehezítette a fejlesztést.

Összegezve: az FPGA oldalon olyan programnak kellett futnia, amely 160 MHz mintavételi frekvenciával gyűjti az adatokat a digitális bemenetekről, és egy FIFO memóriaterületen keresztül továbbítja a mért adatokat a host alkalmazás felé. A host oldal feladata a mért adatok átvétele, az adatok megjelenítése, mentése, betöltése.



28. ábra
Az FPGA mérőkártyán futtatott program

A fejlesztés szempontjából kritikus pont volt a FIFO méretének helyes megválasztása. Ezt a területet ugyanis az FPGA-n belül kell lefoglalni. A túlzottan nagy memóriaterület lehetetlenné teszi a program időzítésnek megfelelő levezetését. A legnagyobb memóriaterület, amely előjel nélküli, 8 bites, egész típusú számokból 8191 darabot tudott tárolni, még éppen eleget tett az időkritériumnak. 160 MHz-es mintavételi frekvenciánál ez azt jelenti, hogy a FIFO $\sim 51 \mu s$ alatt telik meg. Ez az időtartam rövidnek tűnhet, de ha figyelembe vesszük, hogy a kamera egyetlen sorának továbbítása mindössze $\sim 77 \mu s$ -ot vesz igénybe, belátható, hogy az adatfolyam megvizsgálásához több részletben ugyan, de elegendő.

Az FPGA mérőkártyán futó program működése röviden a következő. A teljes program egy időzített struktúrában fut, amely biztosítja, hogy a program másodpercenként 160 milliószor fusson le. A 28. ábra 1-es pontjával jelzett rész beolvassa az aktuális értéket a négy digitális lábról. A program alapvetően az adatfolyam vizsgálatára készült, de a FIFO kritikus méretének köszönhetően egy teljes sor vizsgálata nem volt lehetséges, ezért két kapcsolót építettem a programba (2-es pont), amelyeket a host alkalmazásból lehet állítani. A „CLK check” gomb aktív állapotában a FIFO-ba csak akkor kerül adat, ha a CLK jelében felfutás van. Ennek hatására a host alkalmazásban egy teljes képsor adata analizálható, igaz a „CLK” jel változása nem követhető. Az „LVAL check” kapcsoló aktív állapotával érhető el, hogy a host alkalmazásban csak az érvényes adatok jelenjenek meg. Ekkor azonban az „LVAL” jel változása nem látszik, így a felhasználói felületen nem tudtam megállapítani, hogy melyik adat melyik sorhoz tartozik. Ezt a problémát oldottam meg a 3. ponttal jelzett, új sor esetén impulzust generáló struktúrával. Az előállított impulzus a host alkalmazás diagramján jelenik meg. A 4-es pont összegyűjti a host alkalmazás felé továbbítani kívánt adatokat (CLK, LVAL, D7, D15, LVAL_start), és előjel nélküli, 8 bites, egész típusú számmá konvertálja. A FIFO-ba írásért az 5-ös ponttal jelzett rész a felelős. A beírásnak két feltétele van. Az egyik, hogy a 2-es ponttal jelzett struktúra felől igaz érték érkezzon, azaz a beírás engedélyezett legyen. A másik, hogy a FIFO az előző iterációban nem telt meg, tehát van szabad kapacitása. A FIFO-t a felülírástól meg kell védeni, ezért egy logikai változó értéke átbillen, ha a memóriaterület megtelt, és egészen addig megakadályozza a beírást, ameddig a

6-os ponttal jelzett rész azt újra engedélyezi. Az újbóli beírás engedélyezésére a host alkalmazásból van lehetőség a „New data” gomb megnyomásával.

Az előzőekben bemutatott, újrakonfigurálható mérőkártyán futó programhoz tartozó host alkalmazás felhasználói felülete (29. ábra) és blokkdiagramja (30. ábra) alább látható.

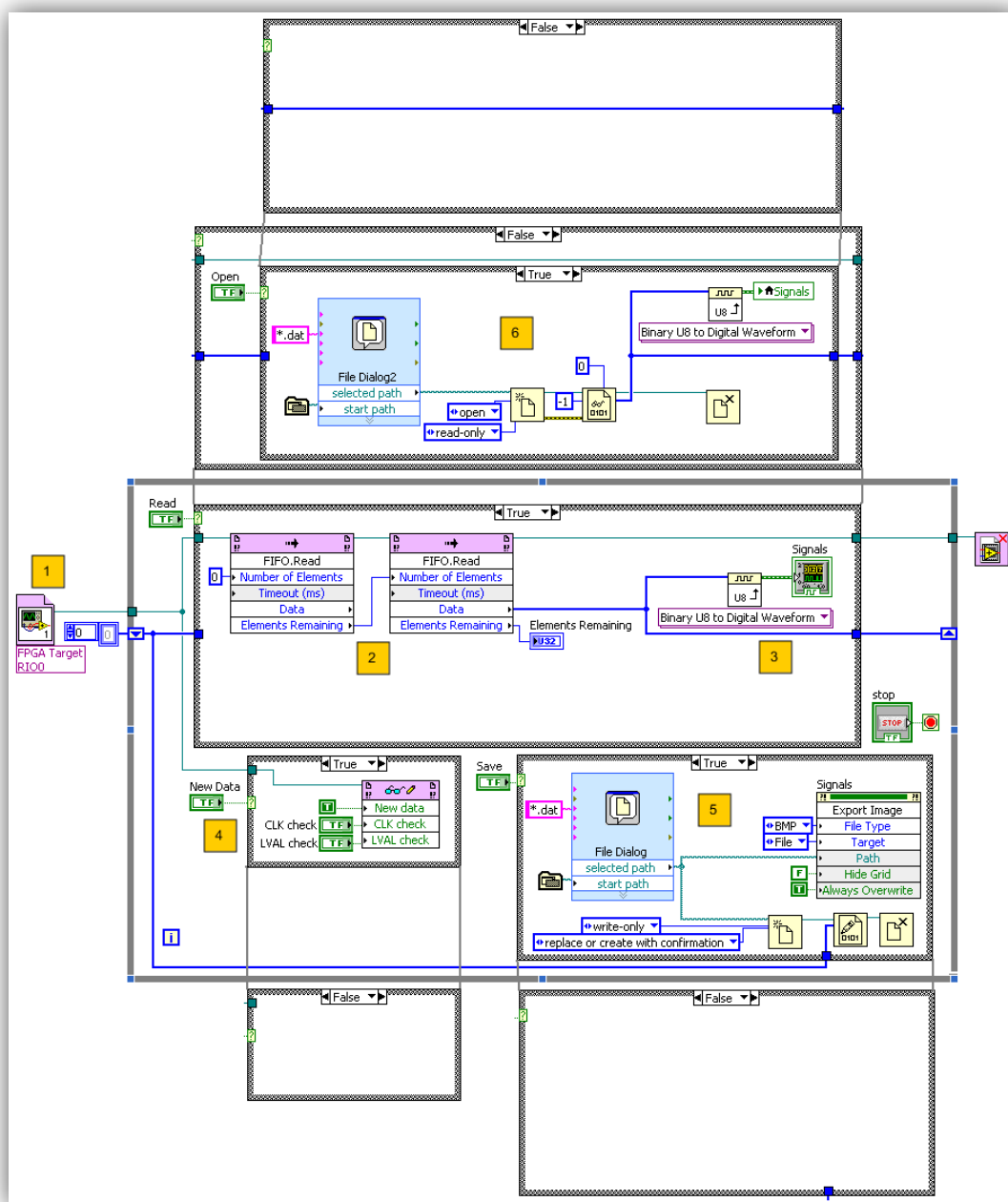


29. ábra

Az adatfolyam-vizsgáló host alkalmazás felhasználói felülete

A program elindítását követően a „Read” gomb megnyomásával olvashatóak ki az FPGA által a FIFO memóriatartományra gyűjtött adatok. Új mérést a „New Data” gomb megnyomásával kérhetünk az FPGA-tól. A „Save” és az „Open” gombok megnyomásával értelemszerűen elmenthetünk, illetve betölthetünk adatokat. A „CLK check” és „LVAL check” kapcsolók állításával módosíthatjuk a mérési módot.

A 29. ábra grafikonján egy teljes pixelsor adatfolyama látható a „CLK check” aktív mérési móddal. A mérés folyamán a kamerát szimulációs módban (67. ábra) használtam, ezért ennek megfelelően a „D7” és a „D15” adatvezetéken 12 periódusnyi négyszögjel látható. A grafikon eszköztárával lehetőség van az adathalmaz nagyítására, görgetésére, kurzorok elhelyezésére, beállítására, amely funkciók megkönnyítik a mintavételezett jel analizálását.



30. ábra
Az adatfolyam-vizsgáló host alkalmazás blokkdiagramja

A host alkalmazás blokkdiagramjának működése a következő. Az 1-es ponttal jelölt funkció (30. ábra) kapcsolatot létesít az FPGA áramkörre huzalozott programmal. Az így kapott referencián keresztül lehet a beépített kapcsolókat működtetni, illetve a FIFO memóriaterületet olvasni. A 2-es ponttal jelölt rész kiolvassa a FIFO területről az összes rendelkezésre álló adatot, amennyiben aktiváltuk a kiolvasás (Read) funkciót. A 3-as ponttal jelölt rész egy konverziót követően a kiolvasott adatokat jeleníti meg a digitális, grafikus kijelzőn. Új mérés kérése esetén lefut a 4-es ponttal jelzett programrész, amely egyszerre engedélyezi az új mérést és állítja be a két kapcsoló értékét. Az 5-ös ponttal jelzett kódrészlet a mentés (Save) gomb megnyomására fut le. Ez a funkció egyrészt fájlba menti a memóriaterületről utoljára kiolvasott adatokat, másrészt kép formájában is elmenti a grafikonon aktuálisan megjelenített képet. A betöltés (Open) gomb megnyomása esetén lefut

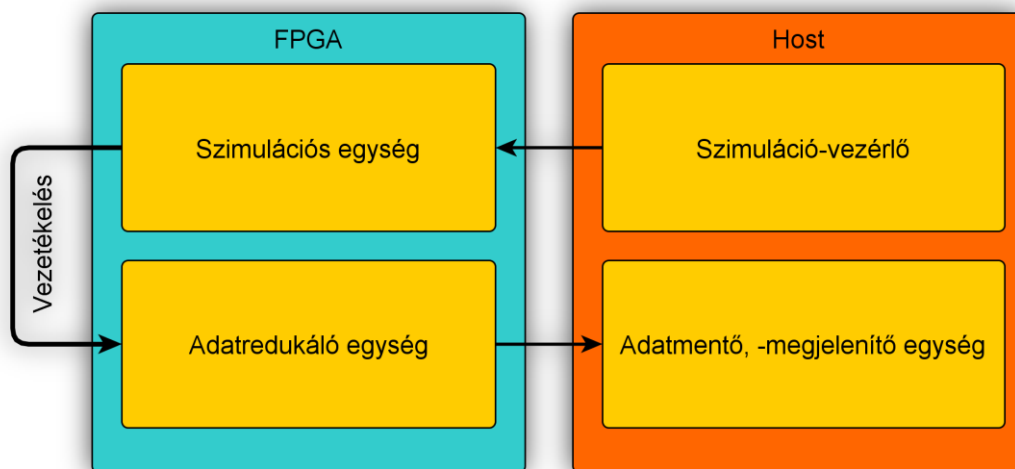
a 6-os ponttal jelzett programrész, amelynek hatására a fájlválasztó párbeszédpanelon kiválasztott adatfájl tartalma betöltődik, és megjelenik a grafikonon.

Az alkalmazással lehetőségem volt az adaptermodul első változatánál fellépő, elsősorban a vezetékek árnyékolásának hiányából és vezetékek hosszúságából eredő hibák érzékelésére, majd az átalakítások eredményeinek ellenőrzésére. Egyúttal lehetőségem nyílt a következő alponthban bemutatott szimulációs egység számára elengedhetetlen jelváltozások pontos megfigyelésre is.

4.2.3. Az adatszimuláló egység kifejlesztése

A Dalsa P2-6k40 típusú line scan kamerát csak néhány hónapra kaptam kölcsön az NI Hungary Kft.-től [O17]. A kezdeti mérések és az adaptermodul kivitelezését követően már csak kevés idő állt rendelkezésemre. Ezért célszerűnek láttam az FPGA mérőkártyával kifejleszteni egy olyan szimulációs egységet, amely adatvonal szinten képes leutánozni, szimulálni a vonalkamera által küldött adatokat. Az egység kifejlesztését az is indokolta, hogy az adatredukáló egység egy-egy programrészének teszteléséhez szükségem volt olyan speciális adatmintákra, amelyeknek az előállítása a kamerával nehézkes vagy lehetetlen lett volna.

Az adatszimulációs és adatredukáló egységek egységes sematikus tervét a 31. ábra mutatja. Mind a hostnak, mind az FPGA-n futó programnak kettős szerepe van. A szimulációs és a redukáló funkciók közötti kapcsolatot a mérőkártya digitális lábainak összekötése valósítja meg.



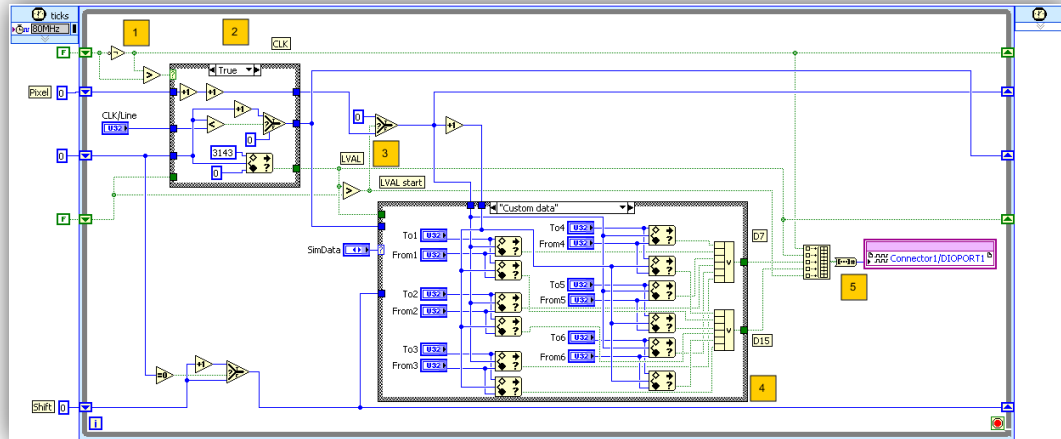
31. ábra
A szimulációs és adatredukáló egységek sematikus terve

A kamera teszt üzemmódja (67. oldal) már az adaptermodul fejlesztésénél is nagy segítségemre volt, ezért a szimulációs egység fejlesztésénél elsődleges célom volt ezen üzemmódnak megfelelő szimulált adatfolyam megvalósítása. Az adatredukáló egység fejlesztésénél néhány programrészlet teszteléséhez ez az adatminta nem volt megfelelő, ezért két további szimulációs lehetőséget is beépítettem. Az egyik üzemmódban a kamera tesztsorának megfelelő adatfolyamot használom, de sorról sorra két pixellel eltolom az átmenetek pozícióit, így összesen 128 féle adatsor jöhet létre. A másik lehetőség, hogy a host alkalmazásban 6 sáv, azaz 12 átmenet pozícióját adom meg. Ezek a pozíciók továbbítódnak az

FPGA egységbe, így szimuláció közben változtathatóak az átmenetek pozíciói. Az első sáv pozíciója ezen felül egy szinuszosan változó függvénnyel modulálódik.

Ahogy a kamerában, úgy a szimulációs egységben is megadható, hogy egy másodperc alatt hány pixelsor adatát továbbítsa. A sorsfrekvencia 1 és 12 300 sor/s között változtatható a host alkalmazásban.

Az FPGA-n futó program szimulációs része a következő ábrán látható.



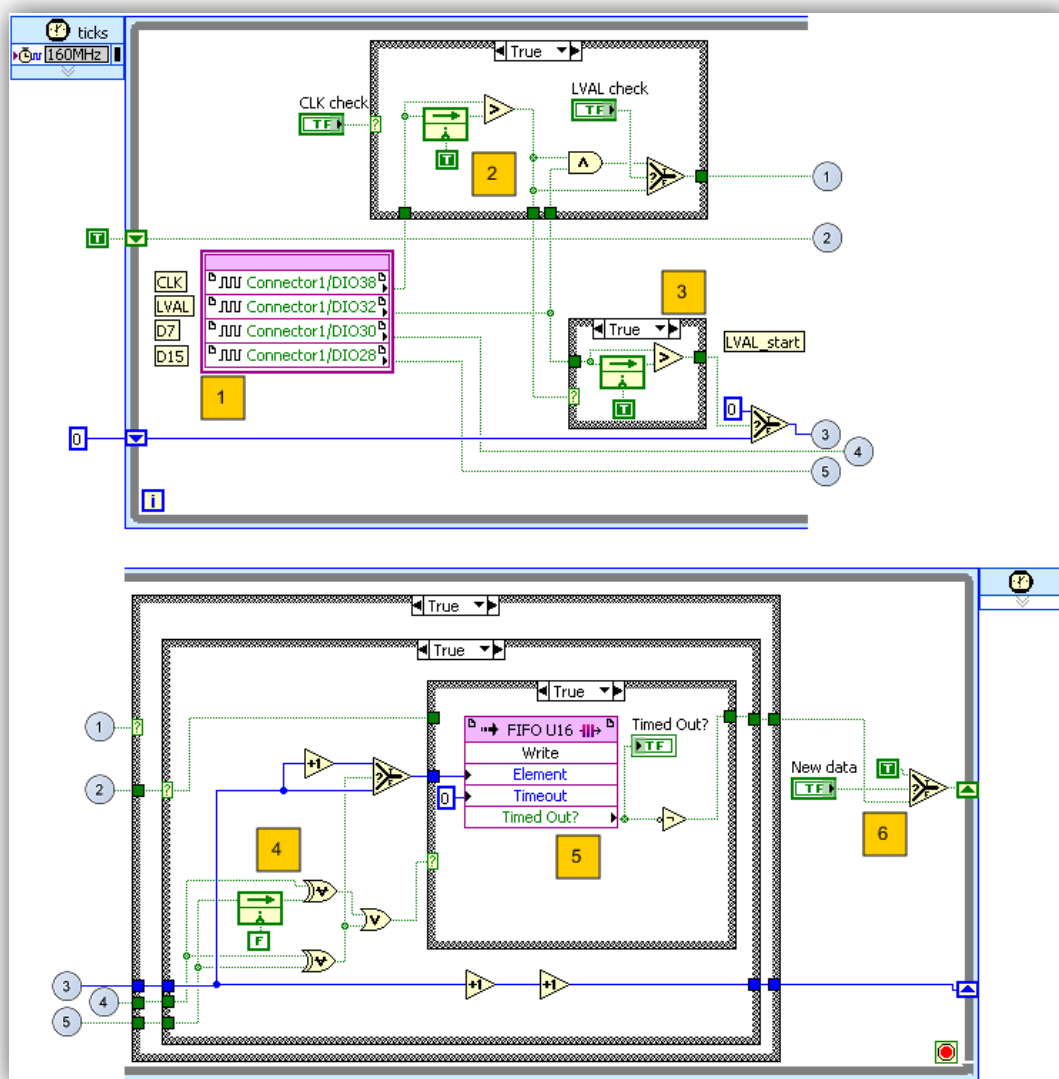
32. ábra
Az adatszimulációs egység FPGA-n futó programja

A külső, időzített struktúra garantálja, hogy a belső programkód másodpercenként 80 milliószor fusson le. Az 1-es ponttal jelölt rész biztosítja, hogy a CLK jel egy ütemben alacsony, egy ütemben magas szinten legyen. Ennek következtében a CLK kimeneten 40 MHz-es négyszögjel áll elő. A 2-es ponttal jelzett struktúra feladata a szimulált kamerának megfelelő hosszúságú és sűrűségű LVAL jel előállítása. A 3-as pontnál látható összehasonlítási művelet az LVAL_start jelet állítja elő, amely egy magas szintű impulzust ad minden sor elején. A kimeneteken erre a jelre a szimuláció szempontjából nem lenne szükség, de az egység tesztelésénél triggerforrásként nagy hasznát vettem. Ezen felül a pixelszámláló változóját is ez a logikai jel nullázza. A 4-es ponttal jelzett, a hagyományos programozási nyelvekben „switch case” szerkezetnek megfelelő struktúra felelős a különböző szimulációs módoknak megfelelő adatok előállításáért. Az előállított jeleket a mérőkártya kimenetére továbbítom az 5-ös pont műveleteivel.

A host alkalmazás szimulációs és adatgyűjtő része nem különíthető el, ezért annak felhasználói felületét, illetve programjának lényegesebb részeit a következő, *Az adatredukáló egység kifejlesztése* című alfejezetben ismertetem.

4.2.4. Az adatredukáló egység kifejlesztése

Az adatredukáló egység fejlesztésének célja az információk kinyerése a line scan kamera adatfolyamából, a 4.1 alfejezetben ismertetett elv alapján. Az alábbi, FPGA-n futó programkód felismeri a pixelintenzitás legmagasabb helyiértékű bitjeiben (D7 és D15) bekövetkező változásokat, majd továbbítja a host alkalmazás felé, hogy az átmenetek a szenzor hányadik pixelénél voltak.



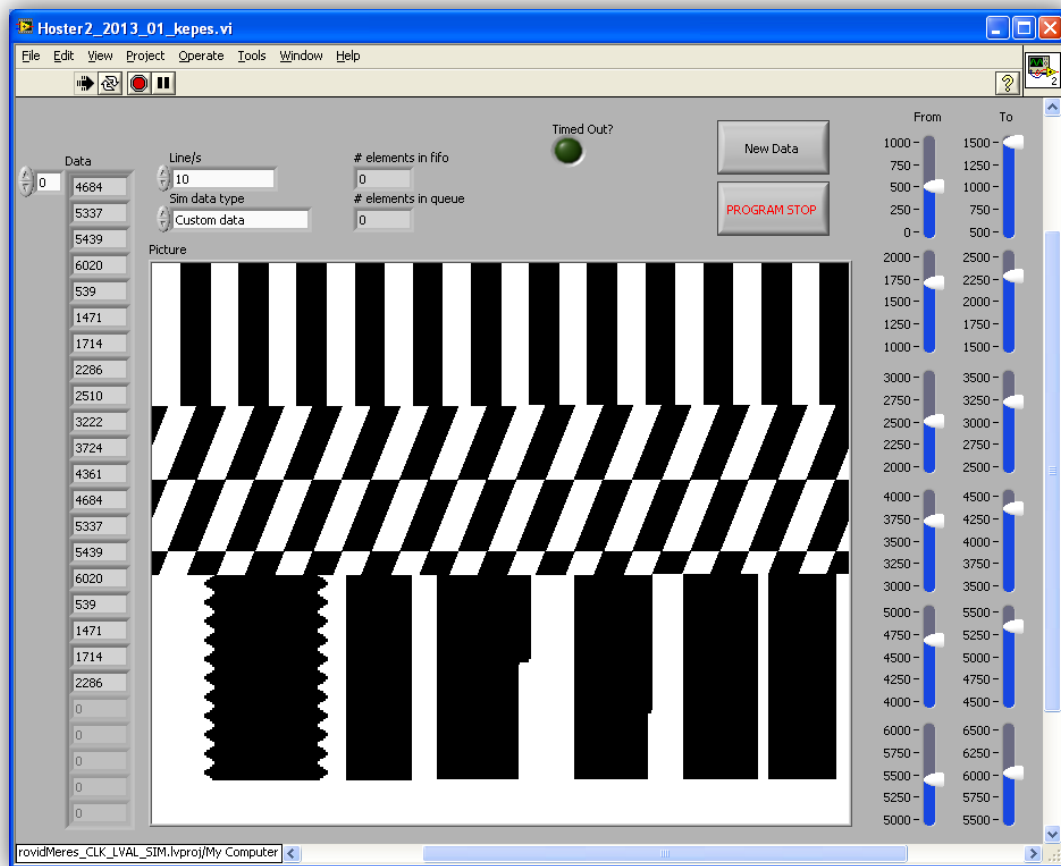
33. ábra
Az adatredukáló egység FPGA-n futó programja

Az időzített struktúra 160 MHz-en működik. A CLK frekvenciájától négyszer nagyobb frekvenciájú mintavételezés (1-es pont) biztosítja, hogy a CLK jel minden magas és alacsony állapotát biztosan érzékelni tudjam. A 2-es ponttal jelzett struktúra feladata, hogy csak azokban az iterációkban vegyem figyelembe az adatvonalakat, amelyekben a CLK jel magas szintre változik, és az LVAL vonal értéke magas, azaz a mért adatok érvényesek. A „CLK check” és az „LVAL check” vezérlő csak a tesztelés miatt maradt kapcsoló, az algoritmus helyes működéshez az alaphelyzetnek megfelelő, igaz (true) értéken kell állniuk. A 3-as ponttal jelzett struktúra feladata az LVAL jelből az új pixelsor észlelése, amelynek hatására a pixelszámláló (kék vezeték) nullázódik a struktúra mellett látható „select” művelettel.

A kamera adatfolyamában egyszerre két pixel értéke továbbítódik, ezért a 4-es ponttal jelzett programrész feladata kettős. A CLK és az LVAL vonalak érvényessége esetén összehasonlítja a megelőző iteráció második pixelének MSB értékét az aktuális iteráció első pixelének MSB értékével, illetve az aktuális iteráció két pixelének MSB értékét.

Amennyiben bármelyikben változás történt, azaz fekete területről fehérre vagy fehér területről feketére léptünk, aktívva válik az 5. ponttal jelzett, FIFO memóriaterületre történő írás, amelybe a pixelszámláló vagy a pixelszámláló eggyel növelt értéke kerül attól függően, hogy az átmenet melyik pixelnél történt. A pixelszámláló értéke kettővel növekszik minden érvényes iterációban. A 6-os ponttal jelzett, memóriába írást engedélyező jel visszaállítására üzemszerű állapotban nincs szükség, azonban az FPGA újraprogramozásakor, illetve néhány teszt esetében elengedhetetlen volt az alkalmazása.

Az FPGA-n futó szimuláció vezérléséhez és az adatredukáló adatainak fogadásához szükség van egy host oldali alkalmazásra. A kettős funkciót egyben megvalósító program felhasználói felülete (34. ábra) és programjának lényeges részei (35. ábra) a következők.



34. ábra

A szimulációs és az adatredukáló egység host oldali alkalmazásának felhasználói felülete

A felhasználói felületnek egyfelől lehetőséget kell biztosítania a szimulációs egység állítható paramétereinek módosítására, másfelől vizuálisan és számszerűen láthatóvá kell tennie az FPGA kártyával gyűjtött és redukált adatokat. Gondoskodnom kellett az adatok folyamatos mentéséről is. A célfájl a program elindulásakor felugró fájlválasztó párbeszédablakban adható meg.

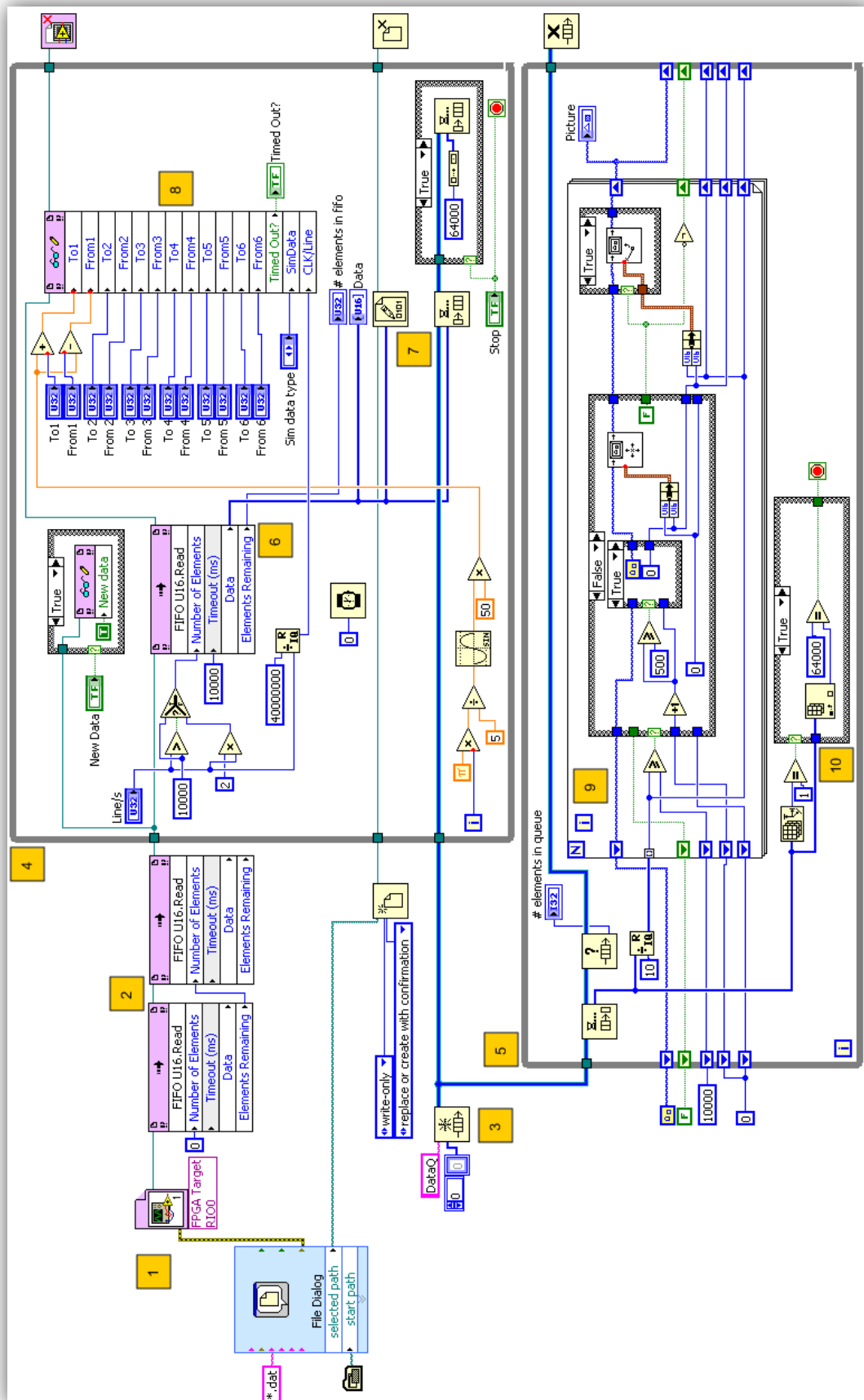
A szimulációs egységhez tartozó paraméter a „Line/s”, amellyel meghatározható, hogy egy másodperc alatt hány sor adatot szimuláljon az egység; a „Sim data type” a háromféle szimulációs mód közötti választást teszi lehetővé; és a „From”, „To” feliratok alatti 12 darab csúszkával a „Custom data” módban szimulált, hat fekete sáv kezdő- és végpozíciója adható meg.

A „Time Out?” visszajelző aktív jelzése a „New data” gomb megnyomásával oldható ki, de erre csak abban az esetben van szükség, ha az FPGA programja valamilyen okból a host alkalmazás nélkül futott, például a program szabálytalanul lett leállítva. Üzemszerű állapotban ezekre a vezérlőkre nincs szükség.

Az FPGA egységtől elhozott redukált adatok megjelennek a „Data” tömbkijelzőben, vizuálisan pedig a „Picture” feliratú képen. A 34. ábra eredményképén mindhárom szimulációs mód megfigyelhető.

A „# elements in fifo” és „# elements in queue” kijelző annak ellenőrzésére szolgál, hogy a host alkalmazás folyamatos mérés esetén képes-e az adatok fogadására, mentésére és kijelzésére. Amennyiben a futtató számítógép teljesítménye nem elegendő a feladat ellátására, úgy valamelyik kijelző értéke növekedni fog.

A „PROGRAM STOP” nyomógomb értelemszerűen a program szabályos leállítására szolgál.



35. ábra
A szimulációs és az adatredukáló egység host oldali alkalmazásának programkódja

A programkód rövid ismertetése a következő. A program elindítását követően az 1-es pont alatt látható fájlválasztó párbeszédablak fut le. A felhasználónak itt kell megadnia az adatfájlt megnevezését. Az 1-es pont jobb oldalán látható funkció (FPGA Target RIO0) az összekötő hibavezetéknek köszönhetően csak a párbeszédablak bezárását követően fut le. Ez a funkció elindítja az FPGA programját. Itt a sorrendiség különösen fontos, ugyanis a FIFO memóriaterület pillanatok alatt megtelne, ha az FPGA a párbeszédablakkal párhuzamosan indulhatna el. A 2-es ponttal jelzett, egymást követő két FIFO olvasás művelet célja az előző programfutásból visszamaradt, még kiolvasatlan adatok törlése.

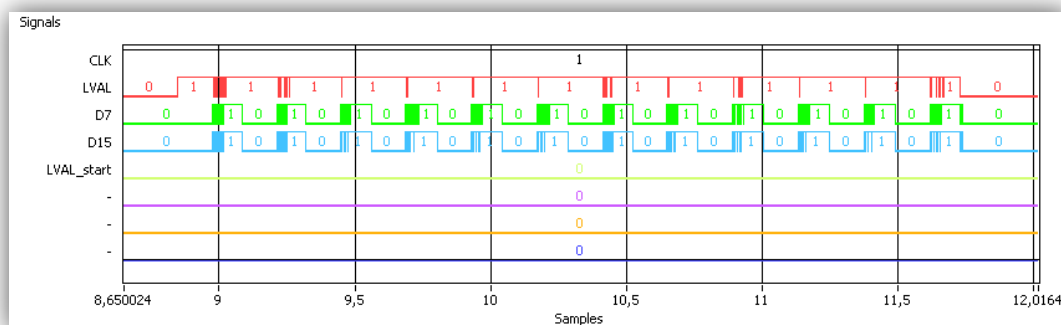
A 3-as pontnál létrehozott adatsor (queue) a 4-es, 5-ös ponttal jelzett ciklusokkal a National Instruments terminológiájában master-slave (mester-szolga) tervezési mintát valósít meg. Ennek lényege, hogy a mesterciklus (4-es) adatokat helyez az adatsorba, majd a szolga ezeket kivéve feldolgozza azokat. A szerkezet előnye, hogy a két ciklus külön számban, akár különböző sebességgel, esetleg külön processzoron is futhat. Az adatsort egy programrészek között működő FIFO memóriaként is felfoghatjuk. A mestercikluson belül a 6-os ponttal jelzett memóriaolvasás elhozza az adatokat az FPGA memóriaterületéről. A kiolvasott adatok a 7-es pontnál fájlba íródnak, és bekerülnek az adatsorba is. A 8-as ponttal jelzett programrész feladata az összes szimulációs paraméter továbbítása az FPGA felé.

A szolga (5-ös) cikluson belül 9-es ponttal jelzett „for” programszerkezet feladata az adatsorban továbbított adatok képi megjelenítése. A kép kialakítása fehér háttérre fekete vonalak rajzolásával történik. A 10-es ponttal jelzett programrész feladata a program szabályos leállítása. A „PROGRAM STOP” gomb megnyomása esetén a mesterciklus még a leállása előtt egy speciális értéket (64000) helyez az adatsorba, amely a képrajzolás szempontjából értelmezhetetlen. Az érték kiolvasásakor a szolgaciklus is leáll. A két ciklus leállítását követően az FPGA programja is leáll, illetve az adatsor és az adatmentésre használt fájl referenciája is felszabadul.

4.2.5. Tesztelési eredmények és következtetések

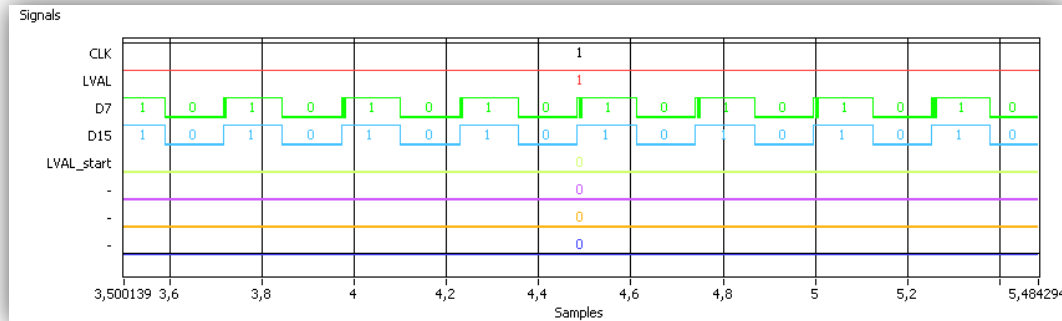
Az adatfolyam-vizsgálat eredményei

Az adatfolyam-vizsgáló alkalmazást elsősorban az adaptermodul helyes kialakítására, hibáinak feltérképezésére használtam. Az alábbi képen egy, a modul kezdeti állapotában mért pixelsor látható. A kamera ekkor szimulációs módban volt. A képen jól látható a hosszú, árnyékolatlan vezetékek hatása mind az LVAL, mind az adatvonalak (D7, D15) esetében.



36. ábra
A zavarokkal terhelt teljes pixelsor adatfolyama

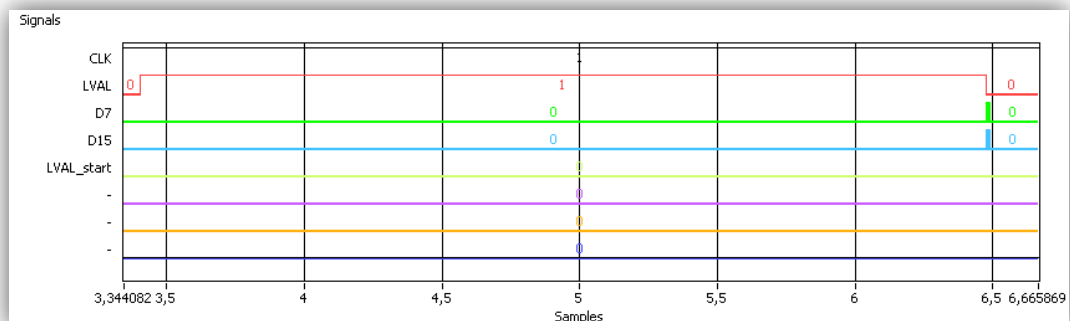
A vezetékek hosszának csökkentésével, illetve a vezetékek enkénti árnyékolásával a következő képen látható eredményt sikerült elérnem. Látható, hogy az LVAL vonal és a D15 adatvonal kitisztult, azonban a D7 vonal felfutó élénél továbbra is bizonytalanság van.



37. ábra
Az árnyékolás és a vezetékrövidítések eredménye

A 23. ábra jobb alsó részén látható, utólag beforrasztott terhelő ellenállásoknak, illetve közvetlenül az FPGA kártya bemeneténél alkalmazott zavarssűrítő kondenzátoroknak köszönhetően a mintavételezett jelek a szimulációs módnak megfelelő eredményt nyújtották, amint az a 29. ábra felhasználói felületén látható.

Az LVAL jel alacsony szintre váltásakor mindkét adatvezetéken (D7, D15) némi billegés figyelhető meg. Kísérletet végeztem letakart objektívú kamerával (ekkor elméletileg minden pixeladat alacsony szintű) annak megállapítására, hogy ez a bizonytalanság honnan ered. A következő képen megállapítható, hogy az LVAL jel magas szintről alacsonyra váltásakor a bizonytalanság továbbra is fennáll az adatvonalakon. Ez a jelenség a kamera használata során bármilyen képi információ esetén folyamatosan, változatlan formában megmaradt, ezért arra a következtetésre jutottam, hogy a kamerában vagy az adaptermodulban alkalmazott áramköri elemek okozzák ezt a hatást. Az adatátvitel szempontjából ez nem okoz problémát, hisz ekkor az LVAL jelzése szerint az átvitt adatok nem valósak. Megjegyzem, a protokoll nem tiltja az adatvonalak ingadozását, ha nincs „valid” (érvényes) jelzés.



38. ábra
A letakart objektívú kamera pixelsorának adatfolyama

Végeredményben elmondható, hogy a megvalósított mérőrendszer teljesítette az elvárásaimat. Segítségével kialakítottam az adatredukáló egységhez elengedhetetlen adaptermodult, megfelelő zavartűréssel.

A szimulációs és az adatredukáló egységek eredményei

Az FPGA-n megvalósított adatfolyam-vizsgáló program lehetőséget biztosított az adatszimulációs egység tesztelésére is. A mérések alapján megállapítottam, hogy teljes mértékben sikerült megvalósítani a line scan kamera szimulációs módjának megfelelő adatfolyamot. A két további szimulációs mód is az elvárásaimnak megfelelően működött. A kialakított szimulációs egységgel a sorfrekvencia a két „tap”-es, 40 MHz-es kameráknak megfelelően 1-12 300 Hz között állítható. Az adatfolyamban törést nem okozó, folyamatosan változtatható sorfrekvencia rugalmas tesztelési lehetőséget biztosított az adatredukáló egység fejlesztéséhez.

A végleges adatredukáló egységet csak a szimulációs egységgel volt lehetőségem tesztelni. Az egységgel a legmagasabb sorfrekvencia mellett előálló adatmennyiség lementése sem okozott problémát.

5. A TRANSZFORMÁCIÓS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA EGYSZERŰSÍTETT MODELL ESETÉN, EGY PIXELSORBÓL

A 3. fejezetben a *Mintatesztelő alkalmazás fejlesztése* alponthan bemutattam a módszert, amivel a mozgási paraméterek és a minta méretei alapján meghatároztam az eredményképet és a virtuális line scan kamera képén érzékelhető átmenetek pozícióit. Azonban a céloom egy olyan mérési eljárás kifejlesztése, ahol ezt a folyamatot visszafelé kell kivitelezni, azaz a minta ismert méretei és a vonalkamera átmenetindexei (adatredukáló egységtől kapott adatok) alapján kell meghatároznom a térbeli elmozdulásokat, elfordulásokat leíró paramétereket. Jelen fejezetben bemutatom azt az általánosan alkalmazható új módszert, amellyel a fent leírt feladat úgy oldható meg, hogy a méréshez egyetlen pixelsort, azaz egy vonalkamerát használunk fel.

5.1. Az alkalmazott minta matematikai leírása

A 29. oldalon a *Mintatesztelő alkalmazás fejlesztése* alfejezetből, a (3) és (4) összefüggés kapcsán már tudjuk, hogy egy rögzített, Descartes-féle koordináta-rendszerben hogyan számolható ki egy pont elfordulások és eltolódások következtében kialakuló új pozíciója.

A mintát fehér alapon fekete területek alkotják, amelyeknek élei egyenesek. A mérés közben igazából nem releváns, hogy fehér területről feketére, vagy fekete területről fehérre történik az átlépés. Ezt az információt egyébként a 4. fejezetben, az adatredukálás következtében el is hagyom. Tehát a kialakított mintát matematikailag úgy is felfoghatom, mint síkban elhelyezkedő, egymáshoz képest rögzített elhelyezkedésű egyenesek csoportját. Evidens tehát, hogy a minta mérés szempontjából lényeges éleit mint egyeneseket írjam le a modellben.

Az egyenest a térben három egyenletből álló egyenletrendszerrel lehet leírni. Megjegyzem, hogy az egyenes térbeli megfogalmazása a síkbeli megfogalmazáshoz nagyon hasonló. Az alábbi összefüggésben egy térbeli egyenes tömör (29), alatta részletes leírása látható (30), ahol $P_0(x_0, y_0, z_0)$ az egyenes egy tetszőlegesen választott pontja, $I(x_{diff}, y_{diff}, z_{diff})$ az egyenes irányvektora. A t skalár szám, amely azt mondja meg, hogy a P_0 kiindulási ponttól számítva hányszor kell vennem az irányvektort ahhoz, hogy $P(x, y, z)$ pontot kapjam.

$$P(t) = P_0 + t \cdot I \quad (29)$$

$$x(t) = x_0 + t \cdot x_{diff}$$

$$y(t) = y_0 + t \cdot y_{diff}$$

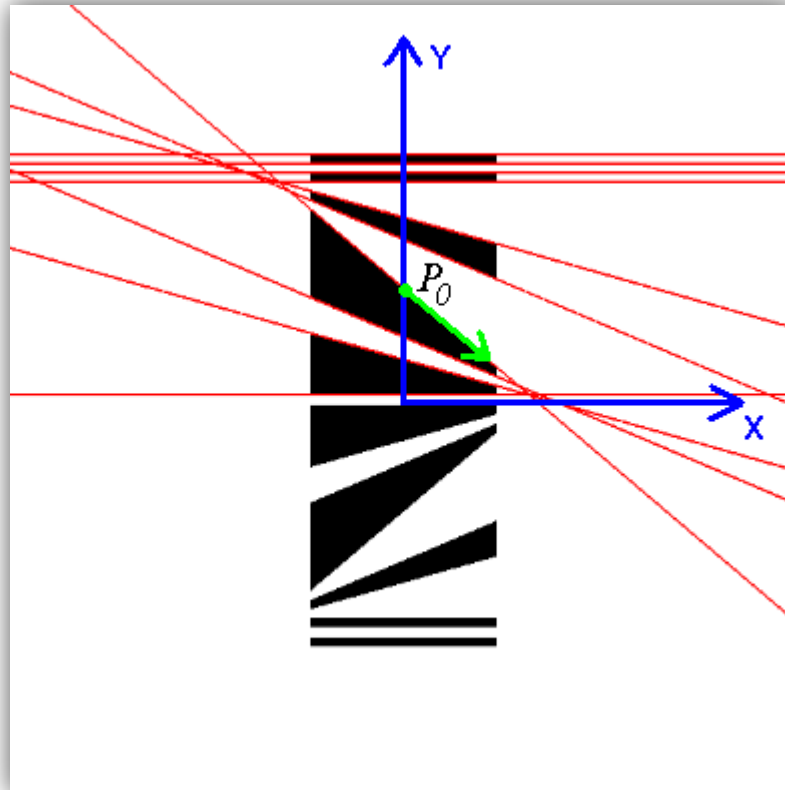
$$z(t) = z_0 + t \cdot z_{diff} \quad (30)$$

Ebben a formában tehát le tudom írni a minta éleit, azonban lényeges a P_0 pontok és a referencia-koordináta-rendszer helyes, célszerű megválasztása. Számításaim annál jobban egyszerűsödnek, minél több nulla értéket tartalmaznak az egyenesek egyenletei. Ez a cél a

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

referencia-koordinátarendszer megválasztását is befolyásolja, ugyanis a z tengelyre vonatkozó egyenletben akkor lesz a lehető legtöbb nulla, ha a minta kiindulási helyzetben, a koordinátarendszer xy síkjában helyezkedik el. Ekkor a z_0 és a z_{diff} értéke is nulla lesz. Ezen felül kikötöm, hogy kiindulási állapotban a koordinátarendszer y tengelye és a kamera pixelsora egymással párhuzamos.

A P_0 pontokat úgy választom meg, hogy azok a $z=0$, $x=0$ egyenesre essenek. Ennek hatására minden egyenes x_0 értéke nulla lesz. A könnyebb érthetőség kedvéért egy számszerű példán mutatom be, hogy az alábbi kép felső részén látható, legnagyobb esésű egyenes egyenletét hogyan lehet felírni, ha a minta méretparaméterei: $z_{valós}=0,5\text{ mm}$, $C_{max.korr}=1,2$ és $m_x=20\text{ mm}$.



39. ábra
A minta egyeneseseinek definiálása

Azt már megállapítottam, hogy x_0 értéke nulla lesz, x_{diff} értékét választhatom egynek. Jelen esetben a zöld ponttal jelölt P_0 pont y_0 koordinátáját a következő összefüggéssel kapom meg:

$$y_0 = 3,5 \cdot z_{valós} + C_{max.korr} \cdot \frac{m_x}{2} = 3,5 \cdot 0,5 + 1,2 \cdot \frac{20}{2} = 13,75\text{ mm} \quad (31)$$

Az $x_{diff}=1$ következtében y_{diff} értéke pontosan $-C_{max.korr}$ értékével egyezik meg. Az egyenes egyenletrendszere tehát a következő:

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

$$\begin{aligned}x(t) &= 0 + t \cdot 1 \\y(t) &= 13,75 + t \cdot (-1,2) \\z(t) &= 0 + t \cdot 0\end{aligned}\tag{32}$$

A kialakított minta összesen 20 átmenetet, azaz a mérés szempontjából releváns egyenest tartalmaz. Elvileg összesen 60 egyenest kellene felírni, de mivel a z tengelyre vonatkozó egyenlet felírásának nincs értelme, így összesen 40 egyenlettel kell foglalkoznom.

5.2. A matematikai modell

A *Multiple View Geometry in computer vision* [P10] című könyv szerint a térbeli egyenes egyenletrendszerére is lehet alkalmazni az eddig csak egy-egy ponthoz használt transzformációs mátrixokat. Ha van egy M transzformációs mátrix, akkor a transzformált egyenes egyenletrendszere ($P'(t)$) a következő módon írható fel:

$$P'(t) = M \cdot P_0 + t \cdot M \cdot I\tag{33}$$

A gyakorlati tesztelésnél jöttem rá, hogy ez a felírás csak abban az esetben igaz, ha az M mátrix nem tartalmaz eltolást, azaz csak és kizárólag forgatást végez. Nekem azonban szükségem van forgatásra (M_{rot}) és eltolásra (M_{trans}) is. Ebben az esetben a helyes összefüggés a következő:

$$P'(t) = M_{trans} \cdot M_{rot} \cdot P_0 + t \cdot M_{rot} \cdot I\tag{34}$$

Annak következtében, hogy jelen fejezet az egyszerűsített modellre vonatkozik, az egyeneseken a perspektivikus nézetet létrehozó mátrixot nem kell alkalmaznom. Esetemben az eltolási mátrix (M_{trans}) és a forgatási mátrix (M_{rot}) a következő, ahol x_{trans} , y_{trans} , z_{trans} rendre x , y , z tengely menti eltolásokat, α , β , γ pedig x , y , z tengely menti forgatásokat jelöli. Megjegyzem, hogy az M_{rot} forgatási mátrix a (4) összefüggésben bemutatott tengelyenkénti forgatások mátrixainak szorzatából adódik.

$$M_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{trans} \\ 0 & 1 & 0 & y_{trans} \\ 0 & 0 & 1 & z_{trans} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{35}$$

$$M_{rot} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & 0 \\ \cos \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & 0 \\ -\sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{36}$$

A (34), (35), (36) kifejezések alapján felírom a transzformált egyenes egyenleteit. Mind a P_0 , mind az I vektor negyedik koordinátája 1, és ez annak következtében, hogy

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

torzítást okozó mátrixom nincs, nem is fog megváltozni. Tehát ennek felírása szükségtelen. Az eredményképpen a perspektivikus torzítás hiányában nem érzékelhetjük a mélységet, ezért főleg a z koordinátára vonatkozó egyenlet felírása. A maradék kettő, x és y koordinátára vonatkozó egyenletek a következők:

$$\begin{aligned} x(\alpha, \beta, \gamma, x_{trans}, t) = & \cos \beta \cos \gamma \cdot x_0 + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_0 - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_0 + \\ & + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot z_0 + \sin \alpha \sin \gamma \cdot z_0 + x_{trans} + \\ & + t \cdot \left(\begin{aligned} & \cos \beta \cos \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{diff} + \\ & + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot z_{diff} + \sin \alpha \sin \gamma \cdot z_{diff} \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} y(\alpha, \beta, \gamma, y_{trans}, t) = & \cos \beta \sin \gamma \cdot x_0 + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_0 + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_0 + \\ & + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot z_0 - \sin \alpha \cos \gamma \cdot z_0 + y_{trans} + \\ & + t \cdot \left(\begin{aligned} & \cos \beta \sin \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{diff} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{diff} + \\ & + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot z_{diff} - \sin \alpha \cos \gamma \cdot z_{diff} \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

A felírt egyenleteket nagy mértékben egyszerűsíteni tudom annak következtében, hogy a minta egyeneseit célszerűen írtam fel, így $x_0=0$, $z_0=0$, és $z_{diff}=0$. Ezen egyszerűsítések után a következő egyenleteket kapom:

$$\begin{aligned} x(\alpha, \beta, \gamma, x_{trans}, t) = & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_0 - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_0 + x_{trans} + \\ & + t \cdot (\cos \beta \cos \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{diff}) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} y(\alpha, \beta, \gamma, y_{trans}, t) = & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_0 + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_0 + y_{trans} + \\ & + t \cdot (\cos \beta \sin \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{diff} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{diff}) \end{aligned} \quad (40)$$

A (39)-es összefüggésből kifejezem a t változót, majd az így kapott alakot a (40)-es egyenletbe helyettesítem be.

$$t = \frac{x - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_0 + \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_0 - x_{trans}}{\cos \beta \cos \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{diff}} \quad (41)$$

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

$$\begin{aligned}
 y(\alpha, \beta, \gamma, x_{trans}, y_{trans}, x) = & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_0 + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_0 + y_{trans} + \\
 & + \frac{x - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_0 + \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_0 - x_{trans}}{\cos \beta \cos \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{diff}} \cdot \\
 & \cdot (\cos \beta \sin \gamma \cdot x_{diff} + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{diff} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{diff})
 \end{aligned} \quad (42)$$

Az így kapott egyenlet nagyon fontos, ugyanis az alábbiakban ismertetett szimulációs és tesztelő alkalmazásomban ezt az általános alakot fogom használni a szoftver több funkciójánál, úgymint az eredménykép kirajzolása, az eredménytér és a tesztadatok előállítása, és a hibaszámítás.

A line scan kamera természetesen csak egyetlen sort (pixeloszlopot) lát, még hozzá a koordinátarendszer megválasztásából adódóan pontosan az $x=0$ értéknek megfelelőt. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy ha a mintám legfelső vonalát leíró egyenleteket egyes indexszel jelölöm, akkor a line scan kamerával érzékelt első átmenetindex (y_1) ki kell, hogy elégítse a következő egyenletet (végtelen felbontású kamera esetén):

$$\begin{aligned}
 y_1(\alpha, \beta, \gamma, x_{trans}, y_{trans}) = & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{1,0} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{1,0} + y_{trans} + \\
 & + \frac{-\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{1,0} + \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{1,0} - x_{trans}}{\cos \beta \cos \gamma \cdot x_{1,diff} + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{1,diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{1,diff}} \cdot \\
 & \cdot (\cos \beta \sin \gamma \cdot x_{1,diff} + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{1,diff} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{1,diff})
 \end{aligned} \quad (43)$$

Átrendezem az összefüggésben szereplő utolsó szorzatot, és a továbbiakban a -val, illetve a_n -nel jelölöm (ahol n az egyenlet számát jelöli) a következőt:

$$a_n = \frac{\cos \beta \sin \gamma \cdot x_{n,diff} + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{n,diff} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{n,diff}}{\cos \beta \cos \gamma \cdot x_{n,diff} + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{n,diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{n,diff}} \quad (44)$$

A bevezetett változóval az általános egyenlet egyszerűbben, jóval áttekinthetőbb formában írható fel:

$$\begin{aligned}
 y_n(\alpha, \beta, \gamma, x_{trans}, y_{trans}, x) = & y_{trans} - a_n \cdot x_{trans} + a_n \cdot x + \\
 & + y_{n,0} \cdot (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma + a_n \cdot (-\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma))
 \end{aligned} \quad (45)$$

A mintában néhány egyenes meredeksége nulla, azaz $y_{diff}=0$. Ezen egyenesek esetében a bevezetett a_n változó és a felírható egyenlet még egyszerűbb:

$$a_n = \frac{\cos \beta \sin \gamma \cdot x_{n,diff}}{\cos \beta \cos \gamma \cdot x_{n,diff}} = \tan \gamma \quad (46)$$

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

$$y_n(\alpha, \gamma, x_{trans}, y_{trans}, x) = y_{trans} - \tan \gamma \cdot x_{trans} + \\ + \tan \gamma \cdot x + y_{n,0} \cdot (\cos \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \tan \gamma) \quad (47)$$

Az eredményül kapott összefüggésből látható, hogy a nulla meredekségű egyenesekre a β szögnek nincs hatása.

Az általam kidolgozott minta 20 átmenetből áll, ami azt jelenti, hogy a méréshez 20 darab formailag megegyező, x változótól független ($x=0$), csupán az egyenesek kiindulási adataiban különböző egyenlet írható fel. A kamerával mért átmenetindexeknek (y_n , ahol $n=1..20$ az átmenetek száma) ezeket az egyenleteket kellene kiegyenlíteniük.

Mindegyik egyenlet eredménye öt változótól függ. A következő alpontban ismertetett megoldáshoz ez túl sok, ezért el kellett érnem, hogy a változók száma csökkenjen. Ezen megfontolásból két, tetszőlegesen választott egyenes (y_i, y_k) egyenletét kivonom egymásból.

$$y_i - y_k(\alpha, \beta, \gamma, x_{trans}) = y_{trans} - y_{trans} - a_i \cdot x_{trans} + a_k \cdot x_{trans} + \\ + y_{i,0} \cdot (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma + a_i \cdot (-\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)) - \\ - y_{k,0} \cdot (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma + a_k \cdot (-\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)) \quad (48)$$

Az így kapott függvényből az y_{trans} kiesik, azaz már csak négy változótól függ. A következő alpontban ismertetett módszer alkalmazásához ez már elegendő lenne, de érdemes megvizsgálni néhány speciális esetet is a számításigény további csökkentése érdekében.

Vizsgáljuk meg a (48)-as összefüggést arra az esetre, amikor a két egyenes meredeksége megegyezik. Ilyen egyenesekből a mintámban négy pár található. Figyeljük meg, hogy a bevezetett a_n változó ((44)-es összefüggés) értéke csak az egyenes meredekségétől függ, tehát azonos meredekségű egyenesek esetén ugyanazzal az a értékkel kell számolnom. Így a már egyszerűsített (48)-as függvény a következőképpen alakul:

$$y_i - y_k(\alpha, \beta, \gamma) = -a \cdot x_{trans} + a \cdot x_{trans} + \\ + (y_{i,0} - y_{k,0}) \cdot (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma + a \cdot (-\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)) \quad (49)$$

Látható, hogy az így kapott összefüggésből az x_{trans} kiesik, azaz a két átmenet pixelindex-különbsége csak az α, β, γ szögtől és a kiindulási értékektől függ.

5.3. A transzformációs paraméterek meghatározása kereséssel

Képzeld el, hogy van egy „fekete doboz”, amely ezt a 20 egyenletből álló egyenletrendszert meg tudja oldani a megadott kiindulási adatok és a line scan kameráról kapott átmenetindexek alapján. Vélhetően a doboz nagyon sok esetben „az egyenletrendszernek nincs megoldása” eredményt szolgáltatná. Ennek számos oka van. Ugyan az egyenletek matematikai szempontból helyesek, de mint minden mérésnél, itt is kell mérési hibákkal számolni. Akár a kép pixelekre történő leképezése, akár a megvilágítás hibájából történő egyetlen pixelnyi eltolódás is azt okozhatja, hogy az egyenletrendszernek

nem lesz megoldása. Ebből következik, hogy nem az egyenletrendszer egzakt megoldása a cél, hanem megkeresni azon elfordulások, eltolások kombinációját, amelyeknek az eredménye a legközelebb van a kamerával érzékelt eredményekhez. Tekintve, hogy a megoldandó egyenletrendszer nem lineáris, és megoldása bonyolult, a feladatot két részre bontva oldottam meg. Először az α , β , és γ méréstartományának és kívánt pontosságának megfelelő felbontású eredményteret hoztam létre. Ezt követően a (49)-es összefüggést felhasználva a kamerával (képzetbeli) mért eredményeket már csak meg kell keresni az előállított térben.

Az eredményhalmaz előállítása

Először a minta méretparaméterei, a kiválasztott objektív és a beállítások alapján elő kell állítani a mérés pontosságának és méréstartományának megfelelő teljes eredményhalmazt. Ezt a műveletet szerencsére csak egyszer, a mérés megkezdése előtt kell végrehajtani.

Az eredményhalmazt nem célszerű mind az öt változóra előállítani, ugyanis a 3.5 alpontban hozott példára vonatkoztatva ez azt jelentené, hogy $501 \cdot 501 \cdot 71 \cdot 51 \cdot 51$ esetre, azaz ~46 milliárd kombinációra kéne kiszámolni és tárolni a 20 pont 16 biten tárolható koordinátáját, a hozzájuk tartozó szögekkel ($3 \cdot 64$ bit) és elmozdulásértékekkel ($2 \cdot 16$ bit). Egy kombinációra nézve ez 68 byte adatot jelent. Mindösszesen mintegy ~3,15 Tbyte adattal kellene számolnunk. Elméletileg egy korszerű számítógépnek az eredményhalmaz előállításához elegendő lenne hozzávetőlegesen 200 óra. Azonban a mérési eredmények gyors visszakeresése csak abban az esetben lehetséges, ha az eredményhalmaz rendezett. Az adatok rendezése még az alábbiakban ismertetett előrendezési, többszintű rendezési módszerek felhasználásával is az előállítási időnek legalább a tízszeresét igényelné. Azaz ennek a módszernek a gyakorlati használhatósága erősen megkérdőjelezhető.

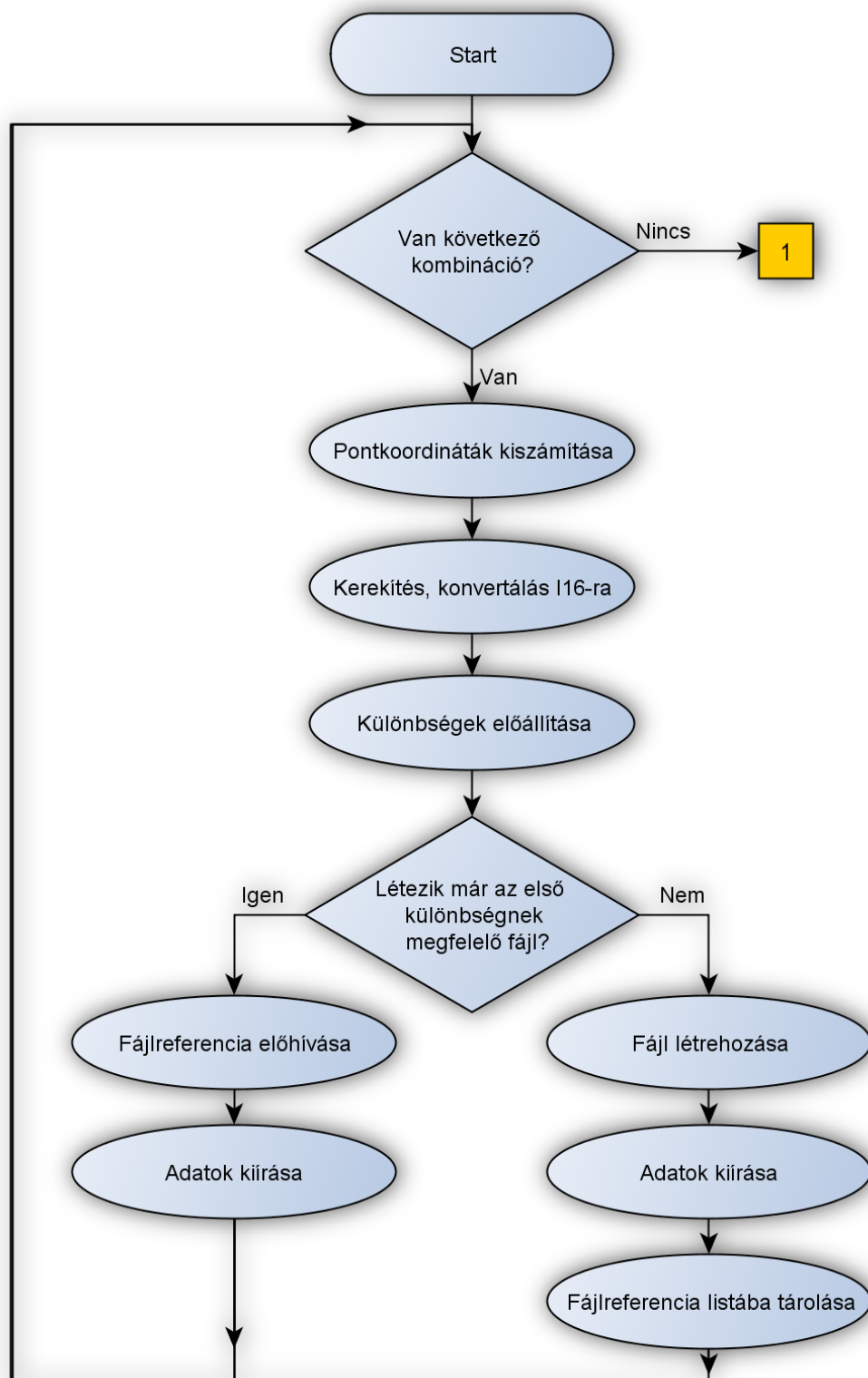
Gyakorlatilag is alkalmazható megoldást nyújtanak az előző alpontban, a (48)-as, (49)-es összefüggések kapcsán megfogalmazottak. Lehetőségem van három, jól megválasztott két-két egyenes különbségét alapul venni. Ekkor két eset lehetséges, attól függően, hogy a párba választott egyenesek meredeksége megegyezik vagy sem.

Amennyiben a meredekségek nem egyeznek meg, a felírható egyenesek az y_{trans} változótól függetlenek lesznek, de az x_{trans} -tól nem. Ebben az esetben a 3.5 alpontban hozott példára vonatkoztatva $501 \cdot 71 \cdot 51 \cdot 51 = 92\,520\,171$ kombinációra kell létrehozni a ~3 Gbyte rendezett adathalmazt. Ez az alábbiakban ismertetett, általam alkalmazott előrendezési módszerrel becslésem szerint ~25 perc alatt előállítható.

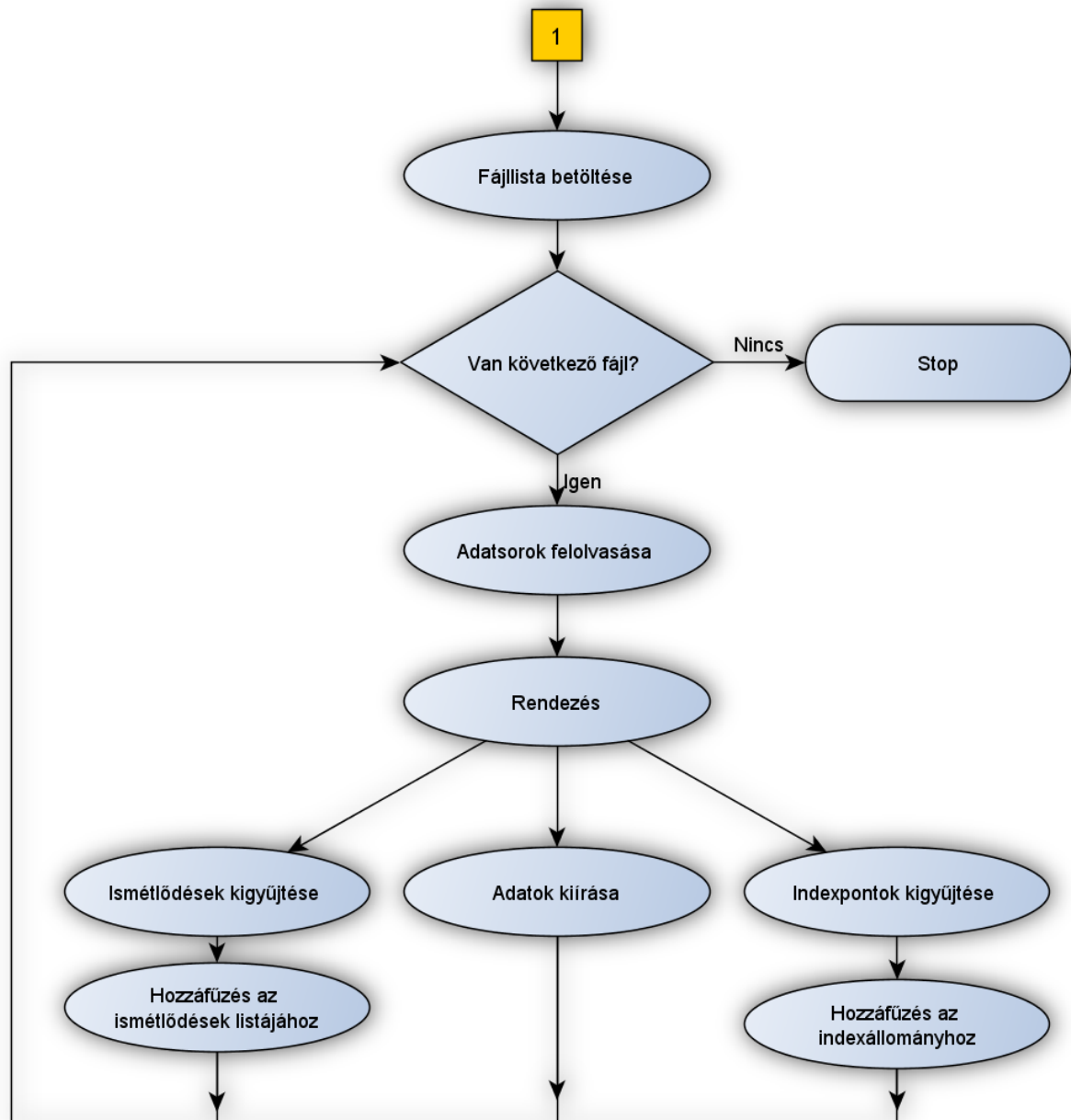
Amennyiben a párba választott egyenesek meredeksége megegyezik, akkor a felírható összefüggések csak az α , β , γ szögtől függnak. Az eredményhalmazom ekkor 184 671 kombinációból és nem egészen 6 Mbyte rendezett adatsorból áll.

Az utóbbi két lehetőség közül bármelyik megvalósítható. A gyors feldolgozást szem előtt tartva utóbbit teszteltem részletesen, amellyel igen jó eredményeket értem el, de meg kell jegyezni, hogy az x eltolást is tartalmazó eredményhalmaz elvileg kevésbé érzékeny a kerekítések okozta hibára, amely a pixelekre történő leképezés miatt feltétlenül szükséges.

Az eredményhalmaz előállításának folyamatábrája, amelyet a következő alpontban ismertetett szimulációs és tesztelő alkalmazásomban is megvalósítottam, a következő:



40. ábra
Az eredményhalmaz előállításának folyamatábrája 1/2



41. ábra
Az eredményhalmaz előállításának folyamatábrája 2/2

Előrendezés, többszintű rendezés, indexelés

A cél az, hogy az előállított eredményhalmaz rendezett legyen az indexkülönbségekre nézve. Az eredményhalmaz 3 vagy 4 egymásba ágyazott „for” ciklussal állítható elő attól függően, hogy az x eltolásos esetet választjuk vagy sem. A ciklusokkal előállítom az összes kombinációt a változók előre meghatározott tartományán, legalább a megválasztott pontosságnak megfelelően. Minden egyes kombinációban kiszámolom a (45)-ös összefüggés alapján a választott 8 egyenes (minimum 6) y_n értékét az $x=0$, $x_{trans}=0$, $y_{trans}=0$, és az éppen aktuális α , β , γ szög kombinációjának megfelelően. Az így kapott értékeket „Int16” (16 bites, előjeles egész) típusúra kerekítem, majd konvertálok, szimulálva ezzel a valóságnak megfelelő esetet, amikor az átmenet egy pixelre képeződik le. Az így kapott egész számok

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

különbségei (azonos meredekség szerint párosítva) adják az eredményét egy-egy szögekombinációnak.

Az eredményeket tárolhatom egy rendezett listában, amely megoldáshoz a fejlesztőkörnyezet előre definiált osztályokkal rendelkezik, azonban ez csak viszonylag kis darabszám esetén működik gyorsan, egy bizonyos elemszám felett használhatatlanná válik. Ezért dolgoztam ki az általam előrendezésnek nevezett megoldást, amelynek lényege a következő.

Az eredménysorokat az első két egyenletből kapott különbség szerint csoportosítva külön fájlokba mentem. Ha például az egyik szögekombináció esetén az első különbség 1024-re adódik, akkor megvizsgálom, hogy volt-e már ilyen eredmény. Ha igen, akkor hozzáírom a már megnyitott fájlhoz (1024.bin), ha nincs, létrehozom a fájlt, és lementem a sort. A már létező fájlok referenciáit egy listában tárolom, ezzel lehetővé téve a gyors fájlreferenciához való hozzáférést. Mire a ciklusok lefutnak, annyi fájl keletkezik, ahány különböző különbségérték fordult elő. Ezzel a módszerrel elértem, hogy az eredményhalmaz részlegesen rendezett legyen.

A következő lépés, hogy egyenként végigmegyek a fájlreferenciákon. Minden egyes fájlt a már említett rendezett listába beolvasok, majd a már rendezett sorokat újra kiírom. Így az eredményhalmazom teljesen rendezetté válik.

A csak szögek szerint előállított eredményhalmaznál igazából nincs szükség indexelésre, illetve a fájlnevek jegyzéke egyfajta indexelésnek tekinthető, amely segítségével a keresett kombináció gyorsan megtalálható. Azonban a kutatásaim során nem csak ezt a lehetőséget vizsgáltam, így a nagyobb méretű adathalmazoknál már szükségessé vált az indexállomány előállítása. Ezen állomány előállítását a végleges rendezéssel párhuzamosan végeztem el. Minden 200. (értéke változtatható) különböző esetről tettem egy bejegyzést az „index.bin” nevű fájlba, amely tartalmazta az aktuális eredményt, és azt, hogy az melyik fájlban, milyen pozíción található.

A redundanciavizsgálat

A kutatásom során szükségessé vált annak megvizsgálása, hogy az eredményhalmazban előfordulnak-e ismétlődések. Mivel ez a vizsgálat az indexeléssel és a végleges rendezéssel párhuzamosan elvégezhető, célszerűnek láttam az eredményhalmaz előállításába beépíteni. A rendezés közben statisztikát készítek arról, hogy összesen hány esetben volt ismétlődés, mennyi volt a legnagyobb ismétlődésszám, az ismétlődésekben mekkora volt a legnagyobb eltérés az α , β , γ szögre vonatkozóan. Ezen felül kigyűjtöm azt is, hogy a legnagyobb eltérések melyik kombinációknál fordultak elő. Az ismétlődő eseteket és a statisztika eredményét egy szöveges fájlba mentem.

Keresés az eredményhalmazban

Az eredményhalmaz célszerű előállítása után a keresés funkció megvalósítása már egyszerű. Kutatásaim során foglalkoztam a csak szögekre és a szögekre és x eltolásra előállított eredményhalmazzal is, ezért kétféle keresési módszert is alkalmaztam.

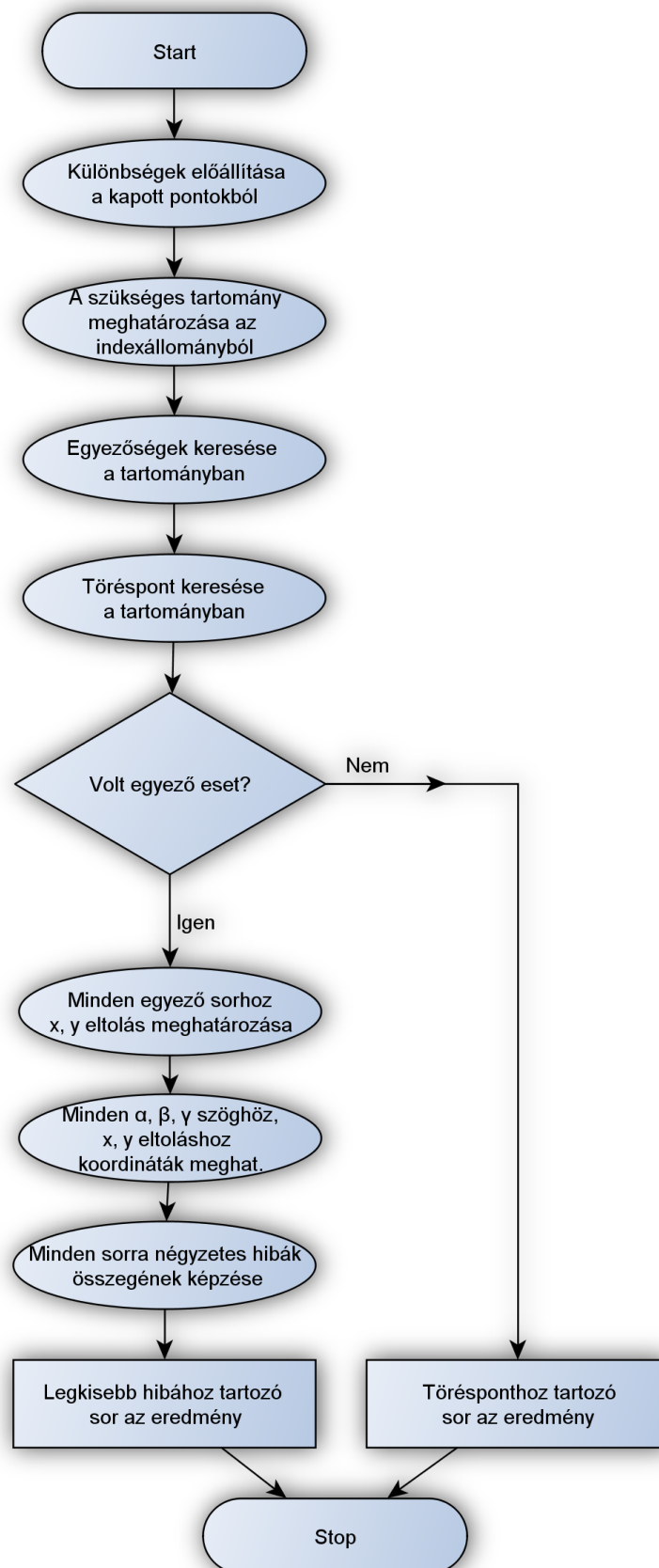
A csak szögekre előállított eredményhalmaz esetében nem használtam indexfájlt, ugyanis egy-egy fájlban átlagosan ~1000 eredmény tárolódott, amely végigolvasása nem okozott problémát. Megjegyzem, hogy kétoldali közelítéssel eljárásal a keresési idő még tovább csökkenthető.

A nagyobb eredményhalmazon már felhasználtam az előállított indexállományt. Ebből az állományból megkerestem, hogy az eredményhalmaz melyik tartományában kell keresnem a szög- és eltoláskombinációt. Ezt követően a célfájl a tárolt pozícióban megnyitottam, és a szükséges, maximum 200 (indexállomány csoportszámától függ) kombinációt olvastam végig.

Az alábbiakban bemutatott tesztelő alkalmazásomban megvalósított teljesítményteszteknel a teljes eredményhalmazt a memóriába töltve használok, így a feldolgozás jelentősen gyorsabb, mint a fájlok merevlemezről történő elérésével. Ez a módszer azonban csak a három változóra (α , β , γ) előállított eredménytérrel lehetséges.

Az eredmények végigolvasása többféle eredménnyel szolgálhat. Az egyik; a legkedvezőbb eset, hogy a keresés egy egyező esetet ad. Ekkor természetesen a keresésnek ez lesz az eredménye. A másik lehetőség, hogy több egyező eset van. Ekkor valami alapján el kell dönten, hogy melyik esetet választom. Az egyik elv, hogy az előző mérés eredményeit figyelembe véve valószínűsítem az aktuális eredményt. A másik lehetőség, hogy a legkisebb négyzetes hibák összege alapján döntök, hogy melyik esetet tekintem jónak. Ehhez mindegyik esetben kiszámolom az x_{trans} , y_{trans} értéket, majd ezekkel ismét kiszámolom az egyenesek y_n ($x=0$ esetén) koordinátáit. Az így kapott eredményeket kerekítés nélkül összehasonlítva a mérésből kapott eredményekkel meghatározom a négyzetes hibák összegét. A legkisebb hiba esetét tekintem a helyes eredménynek. A teljesítményteszteknel egymástól független szög- és eltoláskombinációkat vizsgállok, így a négyzetes hibák módszerét valószínűsítem meg. Van még egy eredmény, amikor nincs egyező eset. Ilyen a pixelekre történő kerekítések következtében, az esetleges optikai, megvilágítási hibákból adódóan is előfordulhat. Ilyenkor véleményem szerint a helyes eljárás az lenne, hogy minden különbségre nézve ± 1 pixel eltolódással meg kéne vizsgálni minden esetet a legkisebb négyzetes hibák összegével. A probléma ezzel az, hogy az eredményhalmaz nem ilyen szempontból rendezett. Tehát ezt a néhány esetet körülbelül 6000 eredményből kell kikeresni. A mai, korszerű számítógépekkel ez egyébként rövid idő alatt elvégezhető, és tapasztalataim alapján megállapíthatom, hogy ezek az esetek nem túl gyakoriak. A doktori disszertációmban egy jóval egyszerűbb megoldást választottam. Amikor az egymás mögé fűzött különbségek értéke kisebb lesz, mint az eredményhalmazból éppen beolvasott eredményé, akkor megállok a keresésben, és azt mondom, hogy ez lesz a jó érték. Ezzel az egyszerűsítéssel feltételezem, hogy az utolsó különbségben volt az eltérés. Ez a feltételezés egyébként, az egyenespárok ilyen szempontból is célszerű sorrendjének következtében, az esetek jelentős részében igaz is lesz. Azt az egyenespárt választom utolsónak, amelybe a legtöbb hibát viszi a különbségképzés és a kerekítés, így vélhetően ez a különbség fog a legtöbbször ismétlődni. Ez egyébként a legnagyobb meredekséghez tartozó pár.

A transzformációs paraméterek visszakeresésének folyamatábrája, amelyet a következő alponthan ismertetett szimulációs és tesztelő alkalmazásomban is megvalósítottam, a következő:



42. ábra

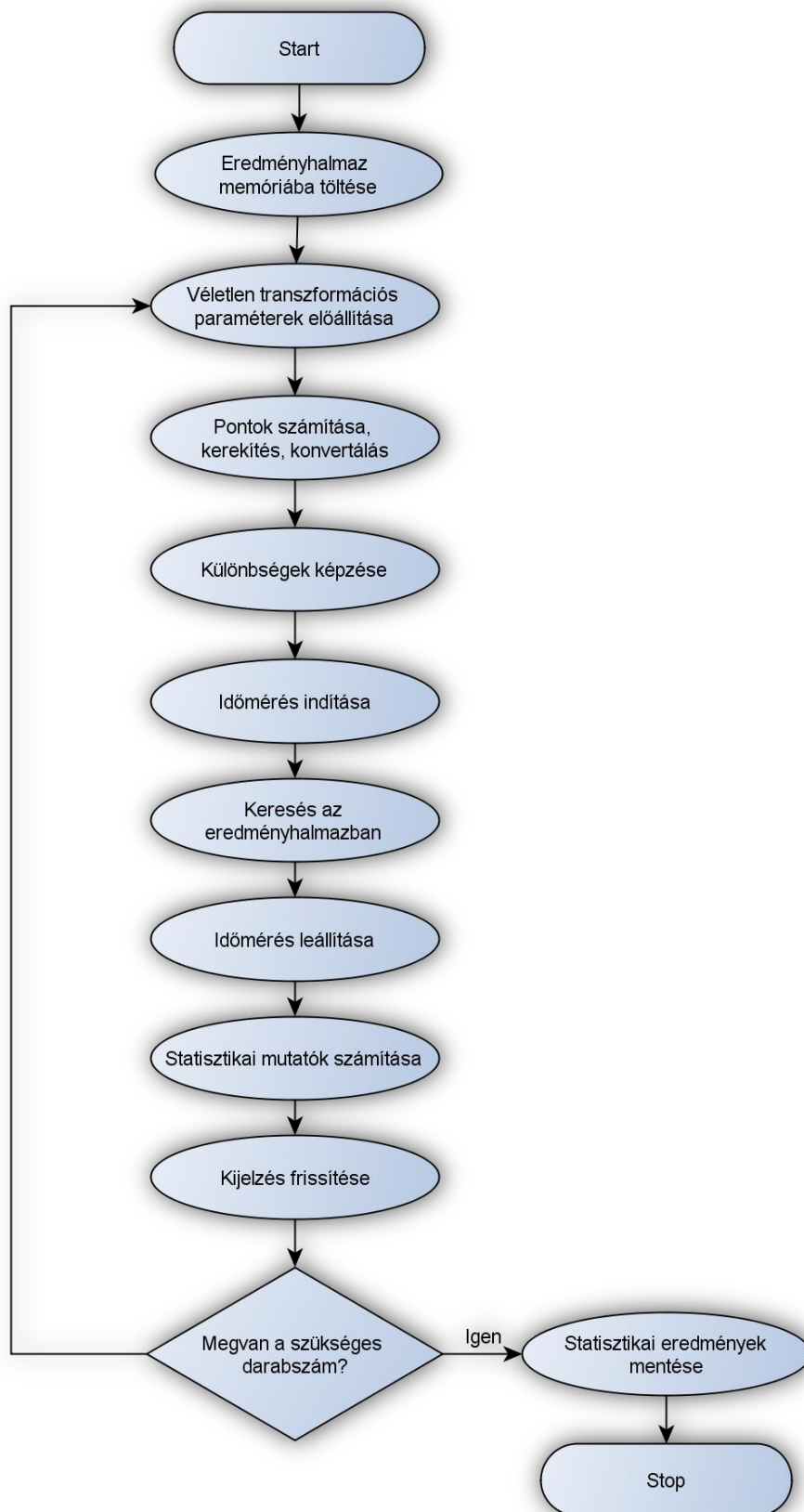
A transzformációs paraméterek visszakeresésének folyamatábrája

A teljesítményteszt

Mérés közben a kiválasztott méréstartományon belül α , β , γ , x_{trans} és y_{trans} változóknak végtelen sok kombinációja fordulhat elő. A tartomány igen finom felbontással történő bejárása, tesztelése meglehetősen sok időt venne igénybe, ugyanakkor a mérés pontosságára vonatkozóan éppen a konstans lépésközök miatt nem adna valósághű képet. Ezen szempontokat figyelembe véve úgy döntöttem, hogy egy úgynevezett benchmark-ot, teljesítménytesztet készítek. Ennek lényege, hogy véletlenszám-generátorral előállított teszteseteket vizsgálok. Ekkor elvileg teljesen véletlen kombinációk adódnak. Gyakorlatilag persze a számítógépek véletlenszám-generátorának működése valamennyit ront az elven, de a konstans lépésközök okozta korlát egész biztosan megszűnik. A teljesítményteszt statisztikai elven alapul, azaz arra alapoz, hogy kellően sok esetet megvizsgálva ugyanolyan valószínűséggel találkozhatok nagyon pontatlan és szinte teljesen pontos esetekkel. Nyilvánvaló, hogy viszonylag sok esetet kell megvizsgálnom ahhoz, hogy kellően valósághű képet kapjak a módszer gyakorlati alkalmazhatóságáról. Az esetek számát én az összes teljesítménytesztnél 200 000-re választottam. Ez az esetszám még megfelelő és kezelhető futásidővel rendelkezik, ugyanakkor a mérési hibára vonatkozó statisztikai mutatók a tesztelés első harmadában beálltak a végleges értékre, így a végeredmény kellően stabilnak tekinthető.

A teljesítményteszt folyamatábrája, amit a következő alponthan ismertetett tesztelő alkalmazásomban is megvalósítottam, az alábbi képen (43. ábra) látható. A folyamatábrán néhány művelet technikai háttere nem egyértelmű, ezért a következőkben a folyamatot röviden ismertetem.

A teszt megkezdése előtt a legenerált eredményteret a memóriába töltöm. Az indexállomány szerinti keresést továbbra is használom, de már a memóriában, lehetővé téve, hogy nagy eredményterek se okozzanak problémát. Ez a keresés műveletét jelentősen felgyorsítja. Minden iterációban először a mérési tartományoknak megfelelően véletlenszám-generátorral előállítom az α , β , γ , x_{trans} , y_{trans} értékeit. Ezt követően az 5.2. fejezetben bemutatott (45) összefüggést felhasználva előállítom a szimulált kamerával érzékelt átmenetindexek értékeit. A kapott lebegőpontos értékeket kerekítem, ezzel szimulálva az átmenetek pixelekre történő leképezését. Az így kapott egész számokkal végzem el az előzőekben már ismertetett keresés műveletét a memóriában. A rendszeróra lekérdezésével mérem és összegezek a keresésekhez szükséges időt. A kapott eredményt összehasonlítom az eredetileg előállított változók értékével. Minden változóra az előforduló legnagyobb különbséget rögzítem. Minden kétszázadik iterációban frissítem a felhasználó információs ablakát, amelyre kiírom a változók addigi legnagyobb eltérését, illetve a mért időből és az iterációk számából számított feldolgozási sebességet. Amikor az iterációszám elérte a kívánt értéket, azaz a teljesítményteszt érdemi része befejeződött, képként mentem a felhasználó információs ablakát, ezzel dokumentálva a mérési eredményt.



43. ábra
A teljesítményteszt folyamatábrája

A feldolgozási idő csökkentésének lehetőségei

Az előzőekben ismertetett eredményhalmaz-előállítást és a keresési algoritmust egy processzoron, egy szálon valósítottam meg. Az alábbiakban ismertetett szimulációs és tesztelő alkalmazásomban megvalósított teljesítményteszt azt mutatta, hogy másodpercenként mintegy 2500 eset kikeresése lehetséges. Az algoritmus megvalósítása nem optimális, ugyanis kétoldali közelítéssel a feldolgozási idő jelentősen csökkenne. Véleményem szerint az algoritmus átalakításával a másodpercenkénti 10 000 eset kikeresése megvalósítható lenne. Egy line scan kamera csúcsteljesítményben 80 000 mintát szolgáltat másodpercenként, következésképp csak offline feldolgozás jöhet szóba. Ekkor a feldolgozási idő és a mérési idő hányadosa 8. Tehát egy 10 perces mérés kiértékeléséhez 80 percre lenne szükség. Ez az időszükséglet gyakorlati szempontból már megfelelő, de megvizsgáltam, hogyan tudnám ezt a szorzót csökkenteni. A keresési algoritmus nagyon jól párhuzamosítható, azaz egy napjainkban általánosan elérhető négymagos számítógépen ez a szorzó körülbelül kettőre csökkenthető.

Amennyiben szeretnénk megközelíteni vagy elérni az online feldolgozási sebességet, nagyobb számítási kapacitással rendelkező számítógépre (többprocesszoros szerver) vagy hardveres megoldásra van szükségünk. Utóbbinál elsősorban memóriablokkra, FPGA-ra, illetve a jól párhuzamosítható, nagy számításigényű feladatokhoz jól használható GPU-ra (Graphics Processing Unit) gondolok [P28]. A kidolgozott algoritmus véleményem szerint ezekre az eszközökre implementálható, de ez már nem tartozik a jelen értekezés témakörébe.

5.4. A továbbfejlesztett szimulációs és tesztelő alkalmazás ismertetése

A továbbfejlesztés célja, elvárások

A 3.3. alfejezetben bemutattam a mintatesztelő alkalmazásomat. Az alkalmazás elsődleges célja az volt, hogy a mintát a transzformációs paramétereknek megfelelően lehessen mozgatni, forgatni és képes legyen előállítani egy virtuális line scan kamerán látható képet. Az alkalmazás segítségével vizuálisan láthatóvá kívántam tenni a transzformációs paraméterek okozta hatást a kamera képén.

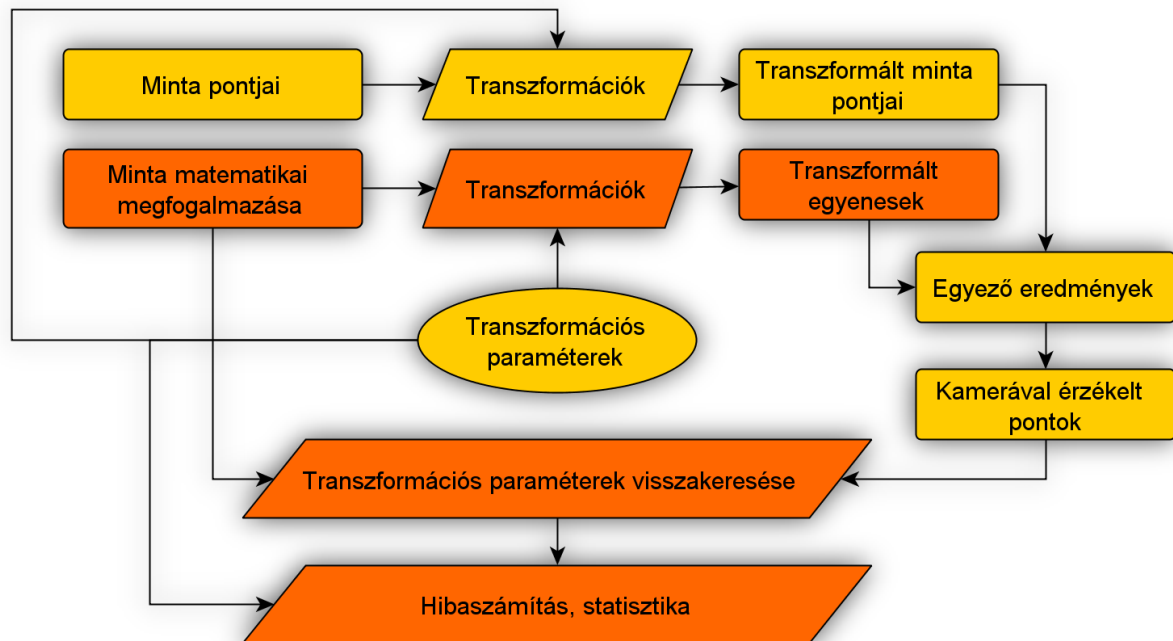
A matematikai modell elkészítését követően a már meglévő alkalmazást továbbfejlesztettem azzal a céllal, hogy a modellben megfogalmazottakat szimulációs úton, vizuálisan is láthatóvá tegyem. Ezt követően az eredménytér gyors előállítását tűztem ki célul. Természetesen a szoftvert úgy írtam meg, hogy alkalmas legyen a programkód minimális változtatásával többféle teszt elvégzésére. Így például néhány változó állításával befolyásolhatom az α , β , γ tartományát, felbontását. Könnyen tudom változtatni az eredménytérben szereplő egyenesek különbségeinek sorrendjét, az indexelés csoportszámát.

Az eredménytér megfelelő előállítását követően arra voltam kíváncsi, hogy milyen gyorsan és milyen pontossággal határozhatóak meg a transzformációs paraméterek a felhasználói felületen beállított állapothoz.

Végző célkitűzésem egy teljesítményteszt létrehozása volt, amely meghatározott tartományon belül, véletlenszerűen előállított állapotokhoz keresi vissza a transzformációs paramétereket. Mivel az összes, végtelen sok állapot végigjárása nem lehetséges, ezt az eljárást használtam a kidolgozott módszer gyakorlati alkalmazhatóságának felmérésére.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

A továbbfejlesztett alkalmazás funkcionális diagramját a következő ábra szemlélteti. A világos területek a már eredeti alkalmazásban is megvalósított részeket, a sötét területek az alkalmazásba újonnan beépített funkciókat szimbolizálják.

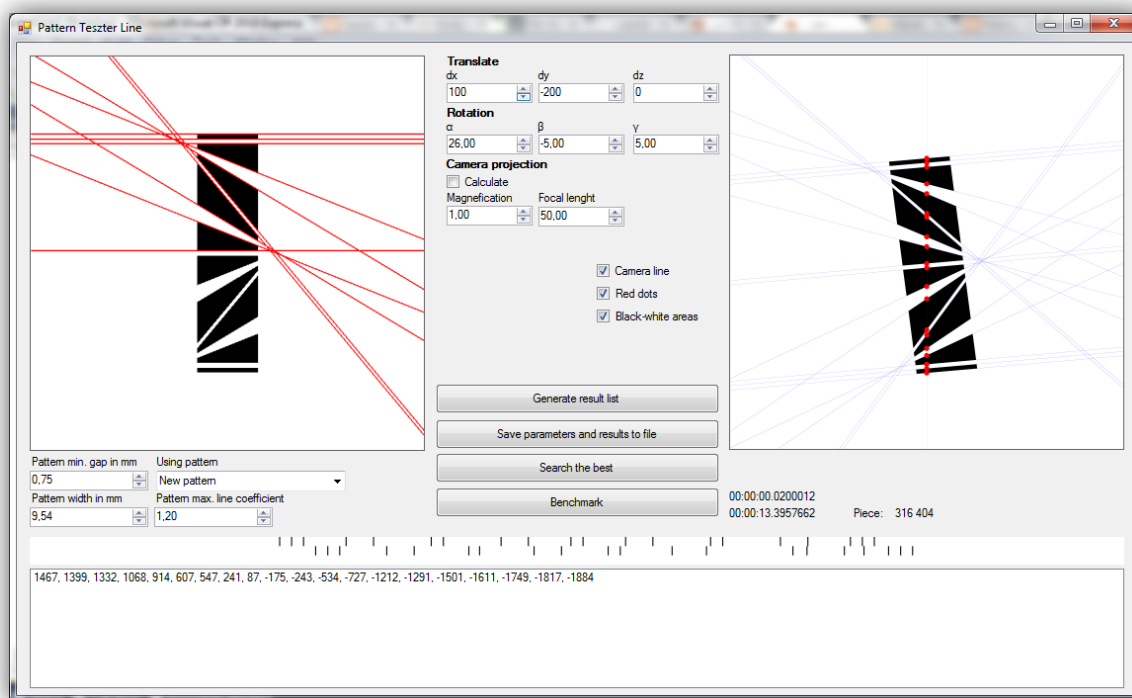


44. ábra
A szimulációs és tesztelő alkalmazás funkcionális diagramja

A felhasználói felület

Tekintve, hogy a továbbfejlesztett alkalmazás a 3.3. fejezetben bemutatott „mintatesztelő” szoftver továbbfejlesztése, kibővítése, a két program felületében sok hasonlóságot fedezhetünk fel.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból



45. ábra

A továbbfejlesztett szimulációs és tesztelő alkalmazás

Az alkalmazás alapvető funkciója (transzformációk hatásának vizsgálata) változatlan. A bal és jobb oldali képen a már megismert kirajzoláson túl a matematikai modellt alkotó egyenesek és transzformált egyenesek is kirajzolódnak piros és kék színnel. Középen három darab jelölőnégyzettel eltüntethetők a jobb oldali képről a fekete területek, a piros foltok és a kamera pixelsorát jelképező függőleges vonal.

A jobb oldali kép alatt két sorban szövegmezőt láthatunk. Az első sort az egy állapot megkereséséhez szükséges idő kijelzésére, a másodikat az eredményhalmaz előállításához szükséges idő és az előállított kombinációk számának kijelzésére használom.

Az egyik, talán leginkább szembetűnő különbség a felhasználó felület alján elhelyezkedő lista (listbox). Ennek, a szövegsorok kiírására alkalmas elemnek a funkciója más és más a programmal végzett műveletek függvényében. Ha a mintán valamilyen transzformációt hajtok végre, akkor a listában az egyenesek $x=0$ esetének megfelelő y koordinátái jelennek meg. Egy állapot visszakeresésénél itt jelenik meg az összes keresési feltételnek megfelelő eset, és ezen felül az utolsó sorban a kiértékeléskor legjobbnak ítélt találat. Egy ilyen állapot látható a következő képen.



46. ábra

A keresési eredmények megjelenítése

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

Az újonnan beépített funkciók a középén elhelyezkedő nyomógombokkal érhetőek el: az eredményhalmaz előállítása („Generate result list”), az aktuális állapotnak megfelelő transzformációs paraméterek megkeresése („Search the best”) és a teljesítményteszt („Benchmark”).

Az eredményhalmaz előállítása közben egy kis ablak jelenik meg, amelyben egy szövegmezőn és egy folyamatjelzőn követhetjük, hogy az eredménytér előállítása a generálási (Generation), illetve rendezési (Shorting) szakasz hány százalékánál jár. Az eredménytér előállítását követően használható a másik két funkció. Az aktuális kameraeredményhez tartozó transzformációs paraméterek szinte azonnal, a másodperc töredéke alatt megjelennek a felhasználói felület alsó részén. A teljesítményteszt gomb megnyomására az eredetileg fájlban tárolt eredményhalmaz a memóriába beolvasásra kerül, ezt követően elindul a véletlenül előállított tesztesetek tesztelése. Eközben egy állapotjelző ablak jelenik meg, amelyben az addig lefutott mérési statisztikáról kaphatunk információt. Egy ilyen ablak látható a következő ábrán (a szögeltérések fokban, az eltolások képpontban értendők).



47. ábra
A teljesítményteszt visszajelző ablaka

A 45. ábra eredményképén látható minta nem teljesen azonos a 3. fejezetben részletesen bemutatott mintával. Ennek oka az, hogy az eredeti mintában a legnagyobb meredekségű átmenetnek nincs azonos meredekségű párja. A fejlesztés egy bizonyos szakaszában tesztelni kívántam azt az esetet, amikor a legnagyobb meredekségű egyenesekből képzett különbséget használok fel az eredménytér előállításához. Ez a megoldás a pixelekre történő leképezéshez szükséges kerekítések következtében nem hozott jobb eredményt, mint az eredeti minta, ezért nem láttam indokoltnak a megtervezett minta módosítását. Azonban a már megváltoztatott minta az eredetivel kompatibilis, univerzális tesztelési lehetőséget biztosít, illetve összehasonlítható tesztek elvégzését is lehetővé teszi. Ezért úgy döntöttem, hogy a szimulációval és a teljesítményteszttel nem térek vissza az eredeti mintára. A minta teljes mérete megegyezik a 3. fejezetben bemutatott mintáéval, tehát a rá vonatkozó méretezési módszer változatlanul használható. Lényegében a felhasználó döntése, hogy melyik mintát használja. A teljesítményteszteken a minták azonos eredményt szolgáltattak.

A matematikai modell tesztelése

Az alkalmazás továbbfejlesztésének elsődleges célja a kidolgozott összefüggések helyességének igazolása. Ehhez a (45)-ös összefüggést implementáltam egy függvény formájában. Itt az eredmény az α , β , γ , x_{trans} , y_{trans} és x függvénye. Azért választottam az összefüggés ezen, univerzális formáját, mert a szoftver minden részénél ezt a függvényt használok fel. Ez szükséges is, ugyanis így a műveletek sorrendje minden lépésben azonos, ezért az azok okozta kerekítési, túlcsondulási hibák is azonosak lesznek.

Az eredménykép kirajzolásánál kikapcsolható formában megtartottam az eredeti alkalmazásban már létrehozott fekete területeket, de megvalósítottam a fenti összefüggéssel (45) kiszámított egyenesek kirajzolását is. A transzformációs mátrixokkal kirajzolt fekete területek élei pontosan illeszkedtek a függvénnyel kiszámolt egyenesekre, amely visszaigazolást adott, hogy a megalkotott elv és a levezetés helyes.

A differenciálok sorrendje

Az eredményhalmaz előállításához elméletileg 3×2 egyenes különbsége szükséges. Feltétel persze, hogy a 3 pár egyenes meredeksége különbözzön. Az eredeti mintában 5 ilyen egyenespár volt, a módosított mintában a két legnagyobb meredekségű átmenet megduplázásával már 7 pár alkotható.

Alapvető probléma annak eldöntése, hogy ezek közül melyeket válasszam, és az is, hogy milyen sorrendben használjam a különbségeket. A különböző meredekségű párok más-más információtartalommal bírnak. Ha megvizsgálom a nulla meredekségű párokat, akkor megfigyelhető, hogy $\gamma=0$ szög esetén x_{trans} -ra vonatkozó információt nem tartalmaznak. A legnagyobb meredekségű egyenesek a legérzékenyebbek az x irányú eltolásra, ezért felmerült, hogy ilyen egyenespárt használjak az eredménytér előállításánál. Ennek köszönhető, hogy a mintát minimálisan módosítottam. Azonban a megduplázott egyenesek metszéspontja csak minimális mértékben tér el egymástól, és ez a pixelre történő kerekítéskor nagy hibát visz a számításokba. A 200 000 mintán végzett teljesítményteszt azt mutatta, hogy nincs különbség a kapott eredmények pontosságában a legnagyobb meredekséget használó és nem használó eredménytér között. Nyilvánvaló, hogy a kerekítés okozta hiba a nulla meredekségű, egymástól legtávolabb elhelyezkedő egyenesek esetében a legkisebb.

Az már a tesztelések kezdetén egyértelművé vált, hogy a minta mindkét szimmetrikus részéből használnom kell egyenespárokat, azaz pozitív és negatív meredekségre egyaránt szükség van.

Számos kombinációt megvizsgálva, tesztelve, a teljesítményteszt a következő különbségek használata mellett adta a legkisebb eltéréseket (az egyenesek fentről lefelé 1-től 20-ig számozottak):

- 1, 20, nulla meredekségű egyenesek metszéspontjainak különbsége,
- 4, 9, $-C_{max.korr}/3$ meredekségű egyenesek metszéspontjainak különbsége,
- 12, 17, $C_{max.korr}/3$ meredekségű egyenesek metszéspontjainak különbsége,
- 5, 8, $-C_{max.korr}/2$ meredekségű egyenesek metszéspontjainak különbsége,
- 13, 16, $C_{max.korr}/2$ meredekségű egyenesek metszéspontjainak különbsége.

Elméletileg a helyes eredményhez elegendő három különbség figyelése, de számítva a gyakorlatban előforduló és kerekítésből származó hibákra, indokoltnak láttam a pozitív és

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

negatív meredekségű egyeneseket is figyelembe venni, így összesen öt különbséget használtam. A két additív különbséggel az eredmények pontosíthatóak.

5.5. *A mérési eredmények összefoglalása, következtetés*

A továbbfejlesztett szimulációs és tesztelő alkalmazással számos mérés és teszt elvégzésére volt lehetőségem. Az alábbiakban ezek eredményeit foglalom össze.

A matematikai modell felírásakor nem vettem figyelembe a kamera felbontását, így azok csak végtelen felbontású kamerára igazak. Végtelen felbontású kamera nyilván nem létezik, így az elv gyakorlati alkalmazásánál az átmenetek pixelekre képeződnek le. A matematikai modell szempontjából ez azt jelenti, hogy a kapott eredményeket egész számra kell kerekítenem, az eredménytér értékeit egész számra kerekítve tárolom. A következőkben ismertetett méréseknek hármas célja volt. Az egyik megállapítani, hogy a kerekítésekből adódó hibákkal az elv mennyire marad használható a gyakorlatban, a kerekítések milyen mértékű ismétlődést okoznak az eredményhalmazban. A teljesítménytesztek másik fontos szerepe, hogy megállapítsam, mely egyenespárok alkalmazása a legcélszerűbb. Gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából az is lényeges kérdés, hogy a kidolgozott módszerrel milyen gyors adatfeldolgozás valósítható meg.

A kerekítésből adódó ismétlődések és a mérési hibák meghatározása

Az elv és az összefüggések helyességét igazoló méréseket követően figyelmem a gyakorlati alkalmazás szempontjából lényeges, kerekített értékekkel dolgozó tesztek felé irányult.

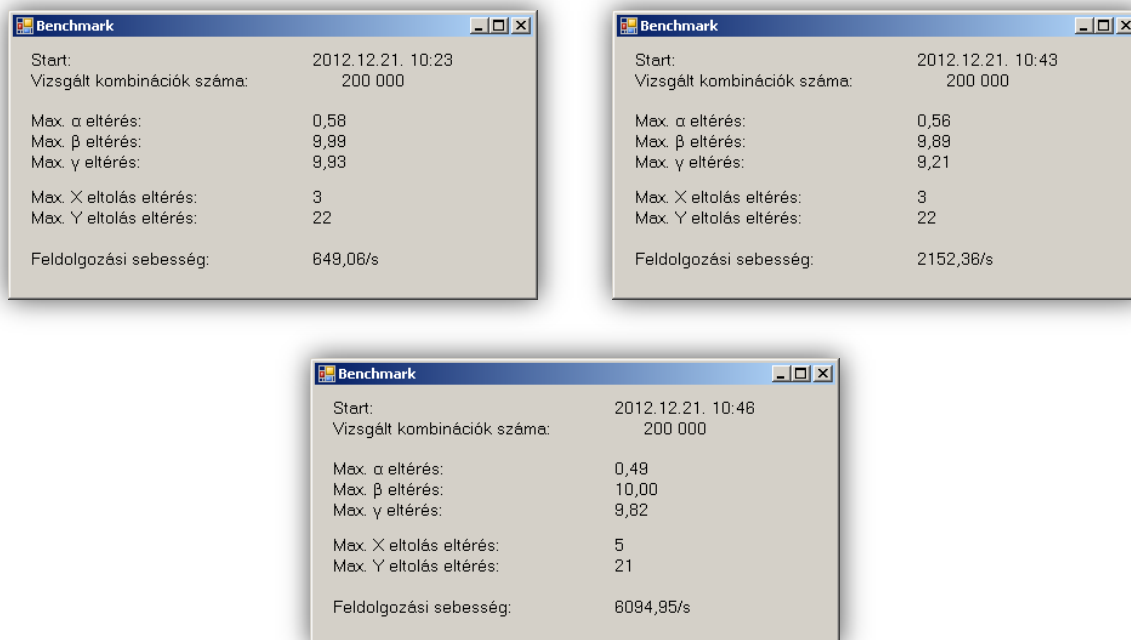
Az alábbi tesztek esetében a minta méretparaméterit a 3. fejezetben, *Új minta méretezési módszerének kidolgozása* című alfejezetben, a számszerű példára kapott, optimalizálást megelőző értékekkel használtam. Ennek az volt a célja, hogy igazoljam a méretezésnél figyelembe vett elvek helyességét, illetve megteremtsem a kiindulási kritériumok és a teljesítménytesztek szolgáltatása eredmények összevethetőségét.

Az eredményteret az $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$, $\gamma=\pm 5^\circ$ tartományra állítottam elő $0,1^\circ$ -os, majd $0,2^\circ$ és végül $0,4^\circ$ -os lépésközzel. A $0,1^\circ$ -os lépésközzel (1 466 964 kombináció) az ismétlődésteszt 157 752 esetben mutatott ki egyezőséget, maximum 96 kombináció szolgáltatva ugyanazt a kerekített eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre $0,6^\circ$, a β szögre 10° , a γ szögre $6,6^\circ$ volt. A lépésközt $0,2^\circ$ -ra növelve (184 671 kombináció) az egyező esetek száma 41 695-re csökkent. A legrosszabb esetben 21 kombinációra kaptam ugyanazt az értéket. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre $0,6^\circ$, a β szögre 10° , a γ szögre $6,4^\circ$ volt. Ezt követően az eredményteret $0,4^\circ$ -os lépésközzel (24 336 kombináció) is teszteltem. Ekkor 2 332 esetben tapasztaltam ismétlődést, maximum 7 eset szolgáltatva ugyanazt az eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre $0,4^\circ$, a β szögre 10° , a γ szögre 6° -ra adódott.

Az előállított eredménytereken a már előzőekben ismertetett módon teljesítménytesztet is végeztem. Minden teljesítményteszttel az eredménytér tartományán belüli, véletlenszám-generátorral előállított 200 000 kombinációt vizsgáltam meg. Az alábbi ábrán (48. ábra) balról jobbra, fentről lefelé haladva $0,1^\circ$, $0,2^\circ$ és $0,4^\circ$ lépésközü eredménytérhez tartozó teljesítménytesztek eredménye látható. A szögekre vonatkozó eltérések fokban, az eltolásokra vonatkozó értékek pixelben, a kamera oldalára vonatkoztatva értendők.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

A feldolgozási sebességre vonatkozóan figyelembe kell venni, hogy a megvalósított algoritmus a feladatra nézve nem optimális (egy szálon futó, két oldali közelítést nem alkalmazó algoritmus). A tesztet négymagos processzorral (Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q8200 @2.33GHz, és 4 GB memóriával rendelkező számítógépen végeztem.



48. ábra

A teljesítményteszt eredménye $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$, $\gamma=\pm 5^\circ$ tartományra, 0,1, 0,2 és 0,4° lépésközzel

Az ismétlődésteszt és a teljesítményteszt eredményéből megállapítottam, hogy a pixelekre történő kerekítések olyan nagymértékű hibát visznek a mérési eredményekbe a transzformációs változók ilyen tág tartományán, hogy csak az α szög és az x_{trans} meghatározása lehetséges elfogadható, 0,6°-os, illetve 3 pixeles pontossággal. Mivel a gyakorlatban számos olyan feladat előfordulhat, amikor valamelyik szög tartománya jóval kisebb a kiindulási értéktartománynál, ezért tesztet végeztem az α , β , és γ szög tartományának csökkentésével. A csökkentett tartományt az α szög esetében 25-27°, a β és a γ szög esetében $\pm 0,2^\circ$ -kal vettem figyelembe.

A csökkentett α szögtartományra a redundanciateszt 0,1°-os lépésközzel (214 221 kombináció) 24 005 esetben mutatott ki ismétlődést, és maximum 83 kombináció adta ugyanazt az eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre 0,5°, a β szögre 10°, a γ szögre 5,2° volt. A lefuttatott teljesítményteszt az alábbi eredményt mutatta.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

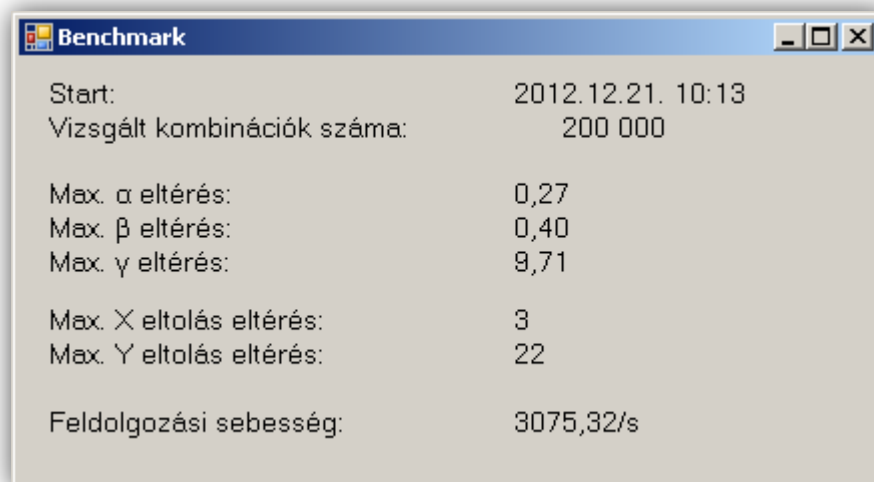


Start:	2012.12.21. 11:16
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,48
Max. β eltérés:	9,86
Max. γ eltérés:	5,28
Max. X eltolás eltérés:	2
Max. Y eltolás eltérés:	22
Feldolgozási sebesség:	1497,33/s

49. ábra

A teljesítményteszt eredménye $\alpha=25-26^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$, $\gamma=\pm 5^\circ$ tartományra, $0,1^\circ$ lépésközzel

A csökkentett β szögtartományra a redundanciateszt $0,1^\circ$ -os lépésközzel (71 205 kombináció) 18 098 esetben mutatott ki ismétlődő eseteket, maximum 7 kombináció adta ugyanazt az eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögére $0,1^\circ$, a β szögére $0,4^\circ$, a γ szögére 5° volt. A lefuttatott teljesítményteszt az alábbi eredményt mutatta.



Start:	2012.12.21. 10:13
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,27
Max. β eltérés:	0,40
Max. γ eltérés:	9,71
Max. X eltolás eltérés:	3
Max. Y eltolás eltérés:	22
Feldolgozási sebesség:	3075,32/s

50. ábra

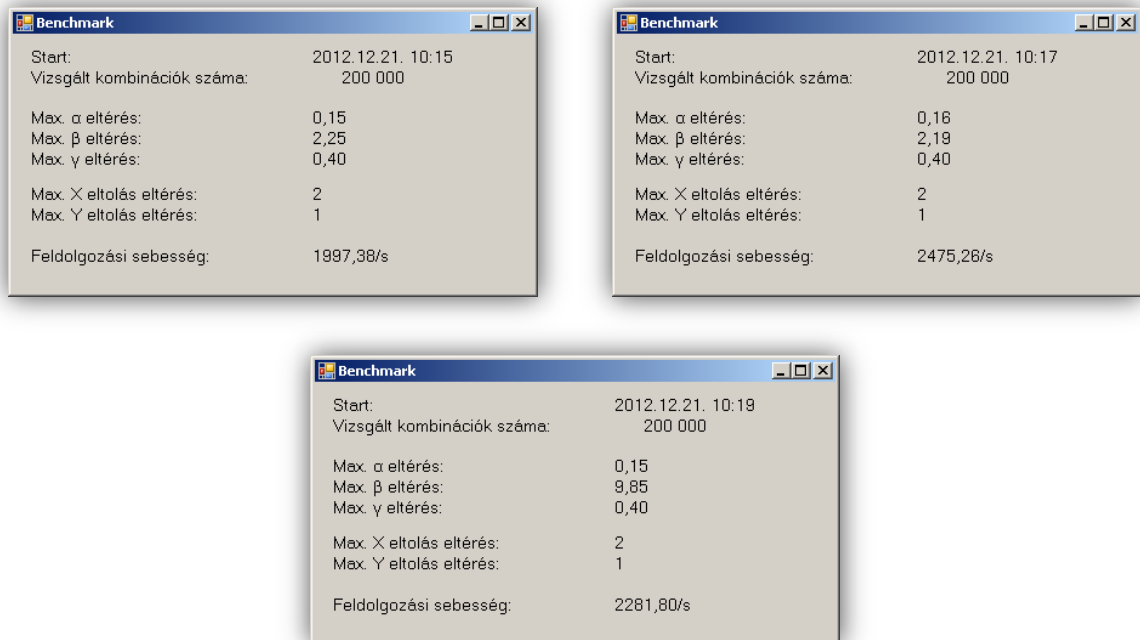
A teljesítményteszt eredménye $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 0,2^\circ$, $\gamma=\pm 5^\circ$ tartományra, $0,1^\circ$ lépésközzel

A csökkentett γ szög esetére a teszteket $0,1^\circ$, $0,2^\circ$, és $0,4^\circ$ lépésközzel is elvégeztem. A $0,1^\circ$ -os lépésközzel (71 205 kombináció) az ismétlődésteszt 16 987 esetben mutatott ki egyezőséget, maximum 15 kombináció szolgáltatott ugyanazt a kerekített eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögére $0,1^\circ$, a β szögére 5° , a γ szögére $0,4^\circ$ volt. A lépésközt $0,2^\circ$ -ra növelve (10 863 kombináció) az egyező esetek száma 2 524-re csökkent. A legrosszabb esetben 6 kombinációra kaptam ugyanazt az értéket. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögére $0,0^\circ$, a β szögére 5° , a γ szögére $0,4^\circ$ volt. Ezt követően az eredményteret $0,4^\circ$ -os lépésközzel (1 872 kombináció) is teszteltem. Ekkor ismétlődést 185

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

alkalommal tapasztaltam, maximum 2 eset szolgáltatta ugyanazt az eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre 0° , a β szögre 5° , a γ szögre $0,4^\circ$ volt.

A lefutott teljesítményteszt eredményei növekvő lépésközzel az alábbiak.



51. ábra

A teljesítményteszt eredménye $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$, $\gamma=\pm 0,2^\circ$ tartományra, 0,1, 0,2 és $0,4^\circ$ lépésközzel

A csökkentett szögtartományú mérések alapján a következő megállapításokat tettem:

- az α szög tartományának csökkentése nem javít a módszer használhatóságán,
- a β szög tartományának csökkentése javítja az α szög meghatározásának pontosságát, de a többi paraméter meghatározásában nem okoz radikális változást,
- a γ szög tartományának csökkentése egyfelől javítja az α szög és az x tengely menti eltolás meghatározásának pontosságát, másfelől lehetővé teszi y tengely menti eltolás gyakorlati szempontból is értékelhető pontosságú meghatározását,
- az eredménytér szükségesnél finomabb lépésközzel történő előállítása a paraméterek pontosabb meghatározása céljából nem célszerű,
- nyilvánvalóan a csökkentett szögtartomány, és így a csökkenő kombinációból álló eredménytér jóval gyorsabb feldolgozást tesz lehetővé.

Az iparban előforduló rezgésmérési feladatokban a gépelemek rögzítettségének köszönhetően könnyen találkozhatunk olyan feladattal, amelynél az y és a z tengely menti elfordulás csak minimális mértékben fordulhat elő. Ezért célszerűnek láttam olyan tesztet is végezni, amelynél a β és a γ tartománya is $\pm 0,2^\circ$ -ra korlátozott.

A csökkentett β és γ szög esetére a teszteket $0,1^\circ$, és $0,2^\circ$ lépésközzel végeztem el. A $0,1^\circ$ -os lépésközzel (3 525 kombináció) az ismétlődéstezt 865 esetben mutatott ki egyezőséget, maximum 7 kombináció szolgáltatta ugyanazt a kerekített eredményt. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre 0° , a β szögre $0,4^\circ$, a γ szögre $0,4^\circ$ volt. A lépésközt $0,2^\circ$ -ra növelve (639 kombináció) az egyező esetek száma 44-re csökkent.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

A legrosszabb esetben 3 kombinációra kaptam ugyanazt az értéket. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre 0° , a β szögre $0,4^\circ$, a γ szögre $0,4^\circ$ volt.

A lefuttatott teljesítménytesztek eredményei növekvő lépésközzel az alábbiak.

Benchmark		Benchmark	
Start:	2012.12.21. 10:11	Start:	2012.12.21. 10:09
Vizsgált kombinációk száma:	200 000	Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,14	Max. α eltérés:	0,13
Max. β eltérés:	0,40	Max. β eltérés:	0,40
Max. γ eltérés:	0,40	Max. γ eltérés:	0,40
Max. X eltolás eltérés:	1	Max. X eltolás eltérés:	1
Max. Y eltolás eltérés:	1	Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	7049,17/s	Feldolgozási sebesség:	8188,36/s

52. ábra

A teljesítményteszt eredménye $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 0,2^\circ$, $\gamma=\pm 0,2^\circ$ tartományra, 0,1, és $0,2^\circ$ lépésközzel

A teszteredményekből látszik, hogy az α szög meghatározásának pontossága nem változott jelentősen (a csak a γ szög tartományát szűkítő teszthez képest), ugyanakkor az x és y tengely menti eltérés egy pixelre csökkent. Továbbá megállapítható, hogy az eredménytér radikális csökkentésével a feldolgozási sebesség jelentősen javult. Zavaró lehet, hogy a durvább lépésközzel előállított, így kisebb méretű eredménytérén a feldolgozási sebesség kisebb értékű, mint a finomabb felbontásún. Ez véleményem szerint annak köszönhető, hogy az igen kis elemszámú eredménytérén nem célravezető az indexelést használó algoritmus (memóriában) alkalmazása.

A módosított mintamérettel végzett tesztek mérési eredményei

Az előzőekben ismertetett méréseknél olyan méretű mintával dolgoztam, amely nem használja ki optimálisan a szimulált line scan kamera adottságait. Felmerült a kérdés, hogy a minta valamely méretparaméterének módosításával a mérések pontossága milyen változást mutat. A kérdés megválaszolására két kísérletet végeztem az $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$ és $\gamma=\pm 0,2^\circ$ tartományokra. Az első esetben a mintában jelenlévő legnagyobb meredekséget növeltem meg (2,25-re) oly mértékben, hogy az még éppen eleget tegyen a 3.5. alfejezetben definiált elfordulás- és elmozdulástartományoknak. A második esetben a minta szélességét növeltem, amely közvetetten növeli a minta y irányú kiterjedését is.

A legnagyobb meredekségében növelt mintával az eredményhalmazt $0,1$ és $0,2^\circ$ -os lépésközzel állítottam elő. A $0,1^\circ$ -os lépésköz esetén (71 205 kombináció) az ismétlődésvizsgálat 17 617 esetben talált egyezést, maximum 10 eset egyezett meg. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre 0° , a β szögre 5° , a γ szögre $0,4^\circ$ volt. A $0,2^\circ$ -os lépésköz esetén (10 863 kombináció) az ismétlődésvizsgálat 884 esetben talált egyezést, maximum 3 eset egyezett meg. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögre 0° , a β szögre 5° , a γ szögre $0,4^\circ$ volt.

A lefuttatott teljesítménytesztek eredményei növekvő lépésközzel az alábbiak.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, egy pixelsorból

Benchmark	
Start:	2012.12.21. 12:16
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,10
Max. β eltérés:	1,43
Max. γ eltérés:	0,40
Max. X eltolás eltérés:	1
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	1357,16/s

Benchmark	
Start:	2012.12.21. 12:21
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,08
Max. β eltérés:	1,44
Max. γ eltérés:	0,40
Max. X eltolás eltérés:	1
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	1683,19/s

53. ábra

A teljesítményteszt eredménye $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$, $\gamma=\pm 0,2^\circ$ tartományra, 0,1 és 0,2° lépésközzel, $C_{\max, \text{korrt}}=2,25$

Az eredményhalmazt szintén 0,1 és 0,2°-os lépésközzel állítottam elő a szélességében növelt (19 mm a kamera oldalára vonatkoztatva) mintánál is. A 0,1°-os lépésköz esetén (71 205 kombináció) az ismétlődésvizsgálat 19 053 esetben talált egyezést, maximum 12 eset egyezett meg. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögére 0°, a β szögére 5°, a γ szögére 0,4° volt. A 0,2°-os lépésköz esetén (10 863 kombináció) az ismétlődésvizsgálat 1734 esetben talált egyezést, maximum 5 eset egyezett meg. Az egyező esetekben a legnagyobb eltérés az α szögére 0°, a β szögére 5°, a γ szögére 0,4° volt.

A lefuttatott teljesítménytesztek eredményei növekvő lépésközzel az alábbiak.

Benchmark	
Start:	2012.12.21. 12:28
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,10
Max. β eltérés:	1,83
Max. γ eltérés:	0,40
Max. X eltolás eltérés:	2
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	1268,82/s

Benchmark	
Start:	2012.12.21. 12:24
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,10
Max. β eltérés:	1,48
Max. γ eltérés:	0,40
Max. X eltolás eltérés:	2
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	1571,10/s

54. ábra

A teljesítményteszt eredménye $\alpha=19-33^\circ$, $\beta=\pm 5^\circ$, $\gamma=\pm 0,2^\circ$ tartományra, 0,1 és 0,2° lépésközzel, 19 mm mintaszélességgel

A minta bármelyik méretparaméterének növelése közvetett módon növeli a minta y irányú kiterjedését. Ebből következően a minta szélső vonala távolabb esik a koordinátarendszer origójától. A 3.5. alfejezetben már ismertettem, hogy ez a távolság szoros összefüggésben áll az α szög meghatározásának pontosságával. Így a mérési eredményektől azt vártam, hogy az α szögére vonatkozó legnagyobb eltérés csökkenjen. Elméletem igazolódott: az eltérés mindkét esetben 0,1°-ra csökkent. A meredekség növelésével az x tengely menti eltolás pontossága is csökkent.

5.6. Új tudományos eredmények

A fejezethez tartozó tudományos eredmények összetartozásuk miatt a 6. fejezet végén találhatók.

6. A TRANSZFORMÁCIÓS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA EGYSZERŰSÍTETT MODELL ESETÉN, KÉT PIXELSORBÓL

Jelen fejezet szerkezetileg az 5. fejezettel azonos módon van felépítve. Ennek oka, hogy lehetőséget biztosítson a két fejezet párhuzamos olvasására, illetve megkönnyítse az egyezőségek és különbségek összehasonlítását.

6.1. *Az alkalmazott minta matematikai leírása*

A méréshez felhasznált minta és annak matematikai leírása teljesen azonos 5.1. alfejezetben ismertetettel. A minta mérés szempontjából releváns részeit itt is térben, egymáshoz képest rögzített elhelyezkedésű, egy síkot alkotó egyenesek alkotják.

6.2. *A matematikai modell*

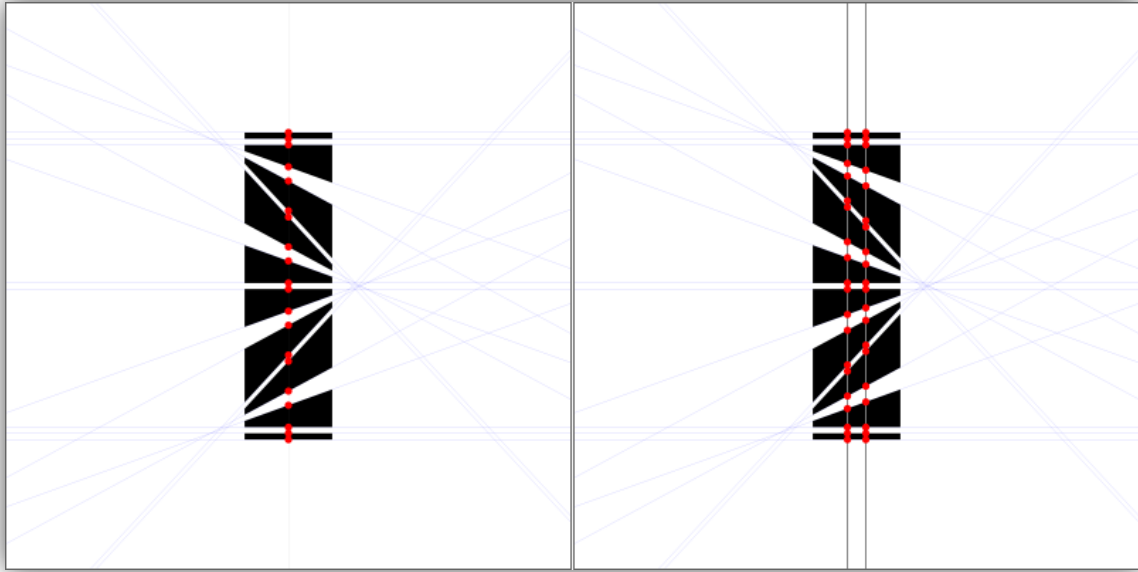
Az 5. fejezetben leírt matematikai modellre vonatkozó megállapítások jelen fejezetben is igazak. A következőkben ismertetett összefüggések, szabályok csupán kiegészítik azt, így alkalmassá téve a modellt a kétpixelsoros esetek kezelésére is.

Az 5. fejezetben a referencia-koordinátarendszert úgy vettem fel, hogy a képzeletbeli vonalkamera pixelsora kiindulási helyzetben pontosan az y tengelyre nézzen. Ennek következménye volt, hogy a modellben megfogalmazott egyenleteket a kamerával érzékelt pontoknak $x=0$ értékre kellett kielégítenie.

Jelen fejezet célja megvizsgálni, hogy milyen eredmény érhető el, ha két pixelsort alkalmazok. Ennek gyakorlati megvalósítására több lehetőség is van. Az ipar számára gyártanak olyan, úgynevezett dual line scan kamerákat is, amelyekben két sorban helyezkednek el a pixelek. A kamerákban használt szenzorok kiegészítő áramkörökkel együtt megvásárolhatóak komplett modulokban (69. ábra), így nincs akadálya annak, hogy olyan kamerát építsünk, amelyben két független modul van. A modulokat szinkronizálni lehet egymással. Az sem kizárt, hogy két azonos típusú kamerát használjunk mereven egymás mellé rögzítve. Az általam kidolgozott, a következőkben bemutatott módszerhez a második megoldás a legcélszerűbb.

Az alábbi ábra az egy- és kétpixelsoros esetet szemlélteti.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból



55. ábra

Az eredménypontok egy és két pixelsor esetén

A modell szempontjából alapvető, hogy a két vonal távolságát pontosan ismerjem. Ezt a következőkben $v_{táv}$ jelöléssel, míg a két pixelsor x szerinti pozícióját x_{v1} és x_{v2} jelöléssel fogom azonosítani.

A modellt logikailag kétféle módon is fel lehet építeni. Az egyik, hogy a két pixelsorhoz külön-külön koordináta-rendszert hozok létre, amelyek között egy $v_{táv}$ eltolás teremti meg a kapcsolatot. A másik megoldás, hogy egy koordináta-rendszert alkalmazok, és a pixelsoroknak más-más x változó értéket feleltetek meg. A két ekvivalens lehetőség közül az utóbbi mellett döntöttem. A továbbiakban a bal oldali vonal metszéspontjait az eddig szokásos számozás mellett az „L”, a jobb oldali vonal pontjait „R” kiegészítő indexszel jelölöm.

Tekintsük a minta legfelső, nulla meredekségű élet (számozás szerint 1-es). A (46), (47) összefüggéseket felhasználva felírom a bal és jobb oldali pixelsor metszéspontjára ($y_{1,L}$, $y_{1,R}$) vonatkozó egyenleteket.

$$y_{1,L}(x_{trans}, y_{trans}, \alpha, \gamma) = y_{trans} - \tan \gamma \cdot x_{trans} + \tan \gamma \cdot x_{v1} + y_{1,0} \cdot (\cos \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \tan \gamma) \quad (50)$$

$$y_{1,R}(x_{trans}, y_{trans}, \alpha, \gamma) = y_{trans} - \tan \gamma \cdot x_{trans} + \tan \gamma \cdot x_{v2} + y_{1,0} \cdot (\cos \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \tan \gamma) \quad (51)$$

Ezt követően képezem a két egyenlet különbségét. A tagok jelentős része a kivonás következtében kiesik.

$$y_{1,L} - y_{1,R} = \tan \gamma \cdot (x_{v1} - x_{v2}) \quad (52)$$

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból

Az $x_{v1}-x_{v2}$ különbség pontosan azonos a $-v_{táv}$ értékével, így az egyenletből a γ szög értéke közvetlenül meghatározható a következő szerint:

$$\gamma = \tan^{-1} \left(-\frac{y_{1,L}-y_{1,R}}{v_{táv}} \right) \quad (53)$$

Az 5.2. fejezetben a (47) összefüggés kapcsán már megállapítottam, hogy a nulla meredekségű egyenesek értékeire a β szög nincs hatással. A megfelelően kiválasztott egyenesek különbségképzésével kiejthető az x_{trans} és az y_{trans} . Tehát tudok választani olyan egyeneseket, amelyek különbségéből az α szög közvetlenül meghatározható. Felírom a minta legalsó, számozás szerint 20-as egyenes egyenletét az (50) egyenlet formájának megfelelően, a bal oldali pixelsorra vonatkoztatva.

$$y_{20,L} = y_{trans} - \tan \gamma \cdot x_{trans} + \tan \gamma \cdot x_{v1} + y_{20,0} \cdot (\cos \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \tan \gamma) \quad (54)$$

Képezem az $y_{1,L}$ és az $y_{20,L}$ egyenlet különbségét.

$$y_{1,L} - y_{20,L} = \cos \alpha \cdot (y_{1,0} - y_{20,0}) \cdot (\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma) \quad (55)$$

A kapott összefüggés utolsó szorzótagjára a következő egyszerűsítés alkalmazható:

$$\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma = \frac{\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma}{\cos \gamma} = \frac{1}{\cos \gamma} \quad (56)$$

Az egyszerűsítést felhasználva az (55) összefüggésből az α szög értékét közvetlenül meghatározhatom:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{(y_{1,L}-y_{20,L}) \cdot \cos \gamma}{y_{1,0}-y_{20,0}} \right) \quad (57)$$

Ezt követően a β szög elvileg bármelyik két, azonos meredekségű egyenes különbségéből meghatározható. Azonban a legegyszerűbb esetben is (nem nulla meredekségű átmenet két pontjának különbsége) a β szög szinusza és koszinusza is többször megjelenik az összefüggésben, így a β szög meghatározás matematikai úton nem triviális. Például a hatodik, célszerűen választott átmenet esetén a megoldandó összefüggés a következő lenne:

$$y_{6,L} - y_{6,R} = (x_{v1} - x_{v2}) \cdot \frac{\cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cdot y_{6,diff} + \cos \alpha \cos \gamma \cdot y_{6,diff}}{\cos \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cdot y_{6,diff} - \cos \alpha \sin \gamma \cdot y_{6,diff}} \quad (58)$$

6.3. A transzformációs paraméterek meghatározása

A transzformációs paraméterek kiszámítása jóval egyszerűbb két pixelsorral. Ez annak köszönhető, hogy néhány transzformációs paraméter közvetlenül kiszámítható.

Az előző alfejezet (53) összefüggésével a γ transzformációs paraméter közvetlenül meghatározható a kamerával érzékelt pixelsorok átmenetindexeiből. Nem szabad

megfelejtkezni arról, hogy az átmenetek pixelekre történő leképezése itt is kerekítésként jelenik meg matematikai szempontból. A két vonal távolsága ($v_{\text{táv}}$) az összefüggésben a két egész szám különbségének osztójaként van jelen, és mint ilyen befolyásolja a γ szög meghatározásának felbontását. Például a γ szög értéke egy pixelnnyi y irányú különbség esetén 10 pixel vonaltávolságnál $5,71^\circ$, míg 200 pixelnnyi vonaltávolságnál $0,2864^\circ$ lenne. Az iparban használatos, úgynevezett dual line scan kamerák éppen azért nem alkalmazhatók ilyen mérési módszerhez, mert ezen kamerákban a két pixelsor egymáshoz képest a lehető legközelebb helyezkedik el.

A kidolgozott mintában több, a kiindulási állapotban nulla meredekségű egyenes van. Megvizsgálva a 15. ábrán látható, kizárólag a z tengely menti elforgatás eredményképét, láthatjuk, hogy a minta legszélső egyenesei szenvedik a legnagyobb elmozdulást. Ebből következik, hogy a γ szöget a minta valamelyik legszélső átmenetének pontjaiból célszerű meghatározni. A minta szimmetriájából adódik, hogy elvileg mindkét legszélső átmenettel ugyanazt az eredményt kell kapnom. Tekintettel arra, hogy gyakorlati alkalmazásnál különböző hibák terhelhetik az eredményképet, megvalósítható olyan algoritmus is, amely mindkét egyenes pontjait figyelembe véve számolja ki a γ szög értékét.

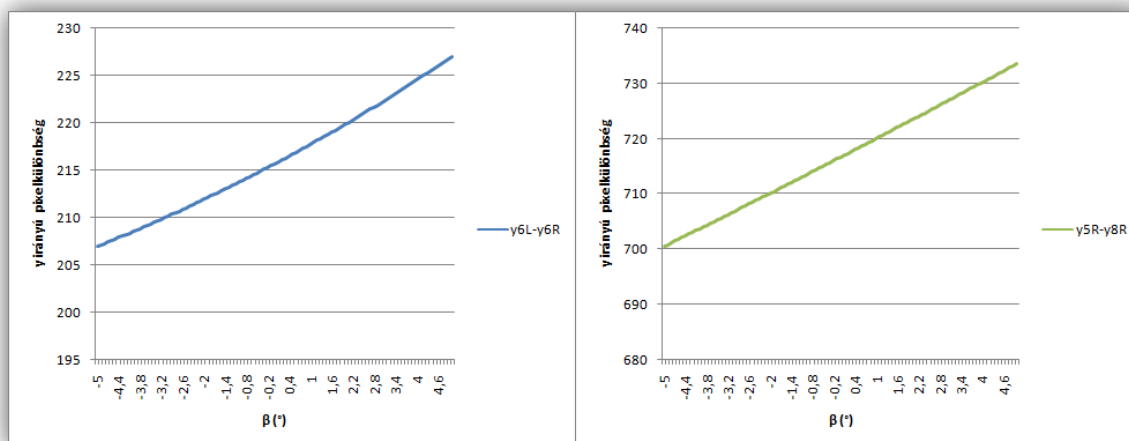
A γ szög meghatározását követően az (57) összefüggést felhasználva kiszámolhatom az α szög értékét két, kiindulási állapotban nulla meredekségű egyenes felhasználásával. Az *Új minta méretezési módszerének kidolgozása* című alfejezetben már kiderült, hogy az α szög meghatározhatósága szoros összefüggésben van a minta y irányú kiterjedésével és így annak legszélső vonalaival. Ezért nem volt kérdés, hogy az α szög meghatározásához melyik két átmenet összefüggéseit használom. Az algoritmus szempontjából teljesen mindegy, hogy a bal vagy jobb oldali vonal eredményeit használom fel. A minta szélein a nulla meredekségű egyenesek redundánsan vannak jelen, így összetett algoritmus is megvalósítható, amely bizonyos mértékben képes csökkenteni a megvilágításból, objektívhibából származó mérési hibákat.

Az α és a γ szög meghatározása után bármelyik két, nem nulla meredekségű egyenes két pontjából elvileg meghatározható a β szög, de az így kapott összefüggések meglehetősen bonyolultak és nem lineárisak. Ezért az egyenlet konkrét megoldása helyett megvizsgáltam, hogy az azonos meredekségű egyenesek két pontja közötti különbség milyen összefüggésben áll a β szöggel, ha az α és a γ szögek értéke rögzített. Az eltolási paraméterek ekkor kiesnek, tehát nem befolyásolják az eredményeket.

Az 56. ábrán két különböző pontkülönbséghez tartozó eredményt láthatunk ugyanazon a mintán. Az első esetben (bal oldali grafikon) a mintában szereplő legnagyobb meredekségű átmenet bal ($y_{6,L}$) és jobb ($y_{6,R}$) pixelsorához tartozó pontokból képzett különbség látható a β szög függvényében. A jobb oldalon két azonos meredekségű egyenes (fentről lefelé számozva 5. és 8.) jobb pixelsorához tartozó átmenetindexeiből ($y_{5,R}$, $y_{8,R}$) képzett különbségértékek láthatók. Megfigyelhető, hogy mindkét függvény monoton nő, és ez a tulajdonságuk az általam vizsgált méréstartományon ($19^\circ < \alpha < 33^\circ$, $\gamma = \pm 5^\circ$) belül nem is változik meg. Kihasználva a függvény ezen tulajdonságát, kétoldali közelítéssel határozhatom meg a még hiányzó β szög értékét. Azt, hogy a közelítést hány lépésben kell elvégeznem, a későbbiekben állapítom meg.

Az algoritmus pontossága szempontjából lényeges kérdés, hogy melyik pontok különbségét használjam fel a β szög meghatározásához. A két diagramon ábrázolt függvényeket megvizsgálva láthatjuk, hogy a $\beta = \pm 5^\circ$ -os tartományon belül a függvények legnagyobb és legkisebb értékei közötti különbség a bal oldalon 20, míg a jobb oldalon 33. Ez

az érték azért lényeges, mert az átmenetek pixelekre történő leképezése miatt a két pont különbsége csak egész szám lehet. Ennek következtében a β meghatározásának pontossága attól függ, hogy a tartományon belül hány különböző különbségérték van. Tehát célszerűbb két azonos meredekségű egyenes azonos pixelsorhoz tartozó pontjait alkalmazni β szög meghatározáshoz, még akkor is, ha így nem a mintában előforduló legnagyobb meredekségű egyenes pontjait használom, amire egyébként a β szög a legnagyobb transzformációs hatással van. Következésképp nem célszerű használni a nullától különböző, legkisebb meredekségű átmeneteket sem.



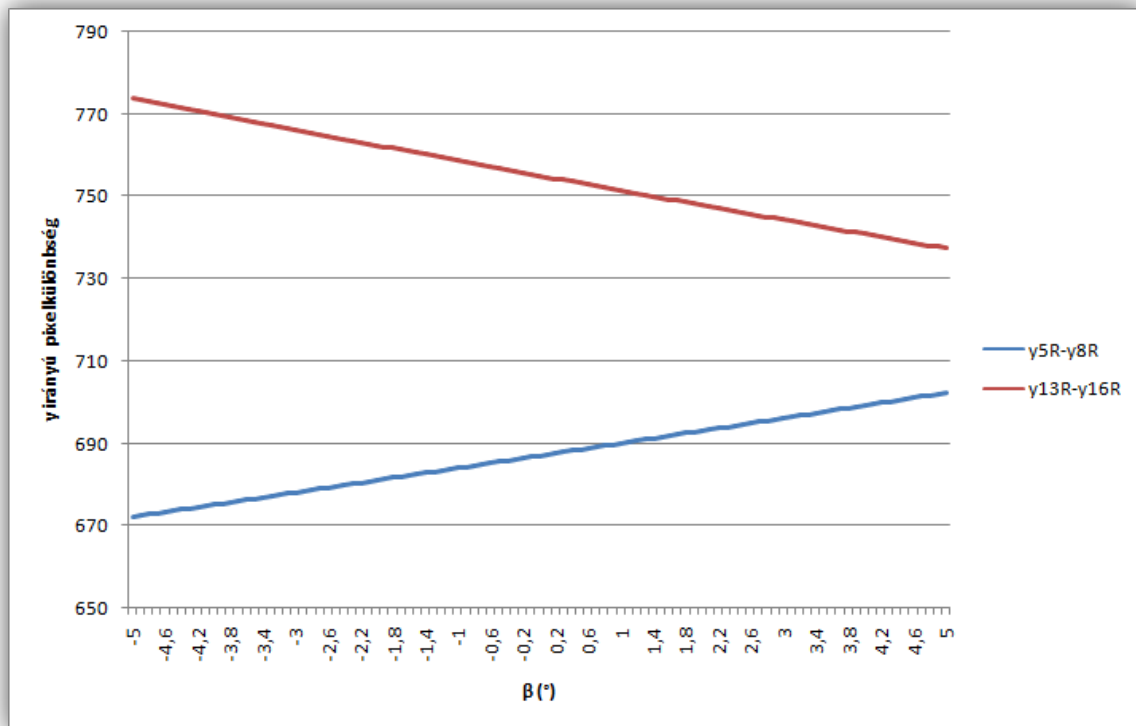
56. ábra

Az y irányú pixelkülönbségek a β szög függvényében, $\alpha=26^\circ$, $\gamma=0^\circ$

A mérés szempontjából irreleváns, hogy a bal vagy a jobb oldali pixelsor értékeivel számolok, ugyanis az azonos meredekség és a perspektivikus torzítás hiánya miatt mindkét különbségnek azonosnak kell lennie. Az a kérdés azonban már közel sem egyértelmű, hogy a minta felső vagy alsó részében előforduló egyenespárokkal számoljak. A következő ábrán (57. ábra) az 5., 8. egyenesekkel és ezeknek az alsó oldalon megfelelő, ellentétes meredekségű párjukkal (13., 16.) képzett pixelkülönbségeket láthatjuk ábrázolva a β szög értéke szerint, arra az esetre, amikor $\alpha=26^\circ$ és $\gamma=5^\circ$. Megfigyelhetjük, hogy a két egyenes meredeksége nem azonos. Az 5., 8. átmenetek különbsége ekkor 30 különböző, az algoritmus szempontjából lényeges, egészen kerekített értéket vehet fel, míg a 13., 16. egyenesek esetén 36-ot. Ez az eredmény fordítottnak jelentkezik, ha a tesztet a $\gamma=-5^\circ$ értékre végzem el. Tehát megállapítható, hogy pozitív γ szög esetén a minta alsó részén, míg negatív γ esetén a minta felső részén elhelyezkedő egyenespárok használata célszerű.

Az általam vizsgált tartományon belül a tesztekhez általánosan használt mintaméret mellett ez a 36 különböző érték a maximum, ami előfordulhat. Ebből következik, hogy a kétoldali közelítésnél 6 lépés ($2^5 < 36 < 2^6$) alkalmazása bőségesen elegendő.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból



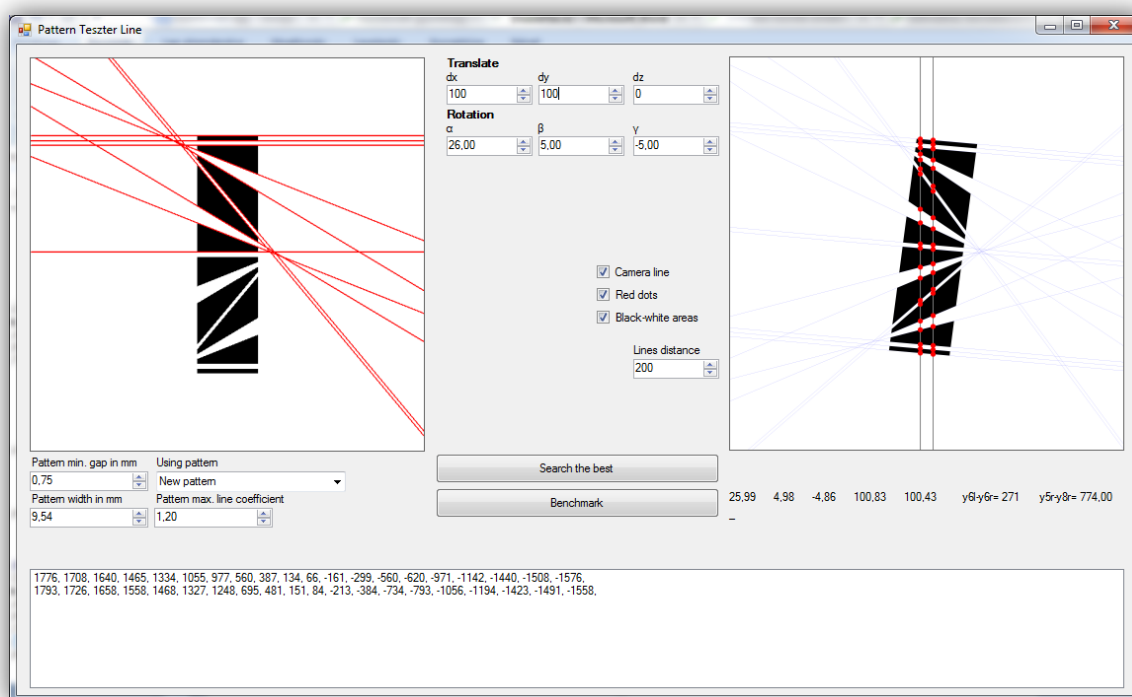
57. ábra

Az y irányú pixelkülönbségek a β szög függvényében, $\alpha=26^{\circ}$, $\gamma=5^{\circ}$ esetén

A három transzformációs szög meghatározását követően az x és y irányú eltolásértékek már triviálisan meghatározhatóak.

6.4. A továbbfejlesztett szimulációs és tesztelő alkalmazás ismertetése

Az 5. fejezetben bemutatott szimulációs és tesztelő alkalmazást rugalmas, modern szoftverfejlesztési technikákat alkalmazva valósítottam meg, ezért nem okozott problémát a szimuláció és a teljesítményteszt átalakítása kétpixelsoros esetre. A tesztelés szempontjából lényegtelen dolgokat nem valósítottam meg erre a módzatra. Ennek következtében néhány már korábban megvalósított funkció eltűnt a felhasználói felületről.



58. ábra
A kétpixelsoros tesztelő és szimulációs alkalmazás felhasználói felülete

A szoftver szimulációs funkciója gyakorlatilag változatlan maradt. A leglényegesebb változás a jobb oldali kép mellé került numerikus vezérlő, amely a két pixelsor távolságát állítja be („Lines distance”). A „Search the best” feliratú nyomógomb és funkciója megmaradt, bár az eredményt más algoritmussal éri el, mint az 5. fejezetben. Ezen funkció nagyon gyors, ezért bármelyik transzformációs paraméter változására automatikusan végrehajtódik, eredménye a jobb oldali kép alatt található szövegsorban (label) jelenik meg. Egymás után az α , β , γ szög, majd az x és y irányú eltolások értékei jelennek meg. Ezt követően még két érték jelenik meg, melyekre a fejlesztés közben volt szükség. Az alul elhelyezkedő két szövegsorban jelennek meg a két pixelsor metszéspontjainak y koordinátái (bal oldali az első sor).

A „Benchmark”, teljesítményteszt itt is használható, amelynek hatására az előző verziónál ismertett információs ablak tájékoztatja a felhasználót az aktuális állapotról. Természetesen ez a funkció is a kétpixelsoros esetre kidolgozott algoritmust használja.

A felhasználói felületen ugyan nem jelenik meg, de a háttérben elvégeztem a felület egy modellezett rezgésmérését is. Ekkor az öt mérhető transzformációs paramétert egymástól különböző frekvenciával, szinusz függvény szerint változtatom a mérés 500 kombinációja alatt. Az így kapott kombinációkat és az újonnan kifejlesztett algoritmussal kapott, hozzájuk tartozó eredményeket szöveges állományba mentem, amely utólag táblázatkezelővel kiértékelhető.

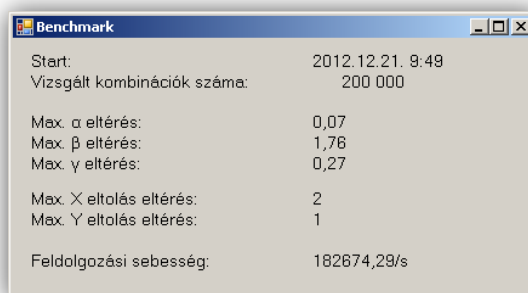
6.5. A mérési eredmények összefoglalása, következtetés

Az alábbiakban a két pixelsorra módosított tesztelő alkalmazással kapott mérési eredményeket ismertetem egyfelől kronológiai, másfelől az 5.5. alfejezetben alkalmazott sorrendben.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból

A β szög meghatározása a legnagyobb meredekségű egyenes két pontjából

Az alkalmazás kétpixelsoros átalakítását először úgy valósítottam meg, hogy a β szög meghatározásához a mintában előforduló legnagyobb meredekségű átmenet két metszéspontját használtam fel. Ezzel a módszerrel 200 pixeles vonaltávolság mellett a következő eredményt kaptam.



Start:	2012.12.21. 9:49
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,07
Max. β eltérés:	1,76
Max. γ eltérés:	0,27
Max. X eltolás eltérés:	2
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	182674,29/s

59. ábra

A teljesítményteszt eredménye két pixelsorral, a β meghatározása $y_{6,L}$, $y_{6,R}$ pontokból, 200 pixel vonaltávolságra

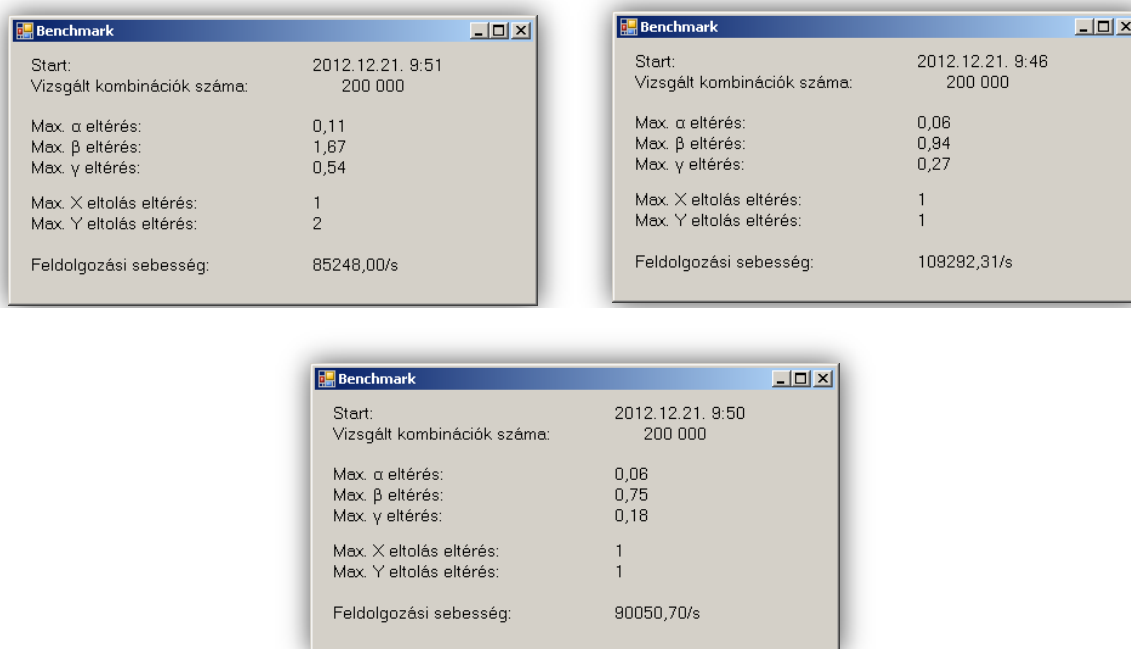
A teljesítményteszt eredményéből látható, hogy a β szög kivételével az összes transzformációs paraméter viszonylag nagy pontossággal meghatározható. A β szög bizonytalansága okozza, igaz, kis mértékben az x tengely menti eltolás pontatlanságát is.

Felhívom a figyelmet a feldolgozási sebesség igen magas értékére, amelyből látható, hogy ezen módszer használatával online mérés is megvalósítható, az adatok feldolgozása külön időt nem igényel.

A β szög meghatározása két, azonos meredekségű egyenessel

Ezt követően a 6.3. alfejezetben leírtaknak megfelelően módosítottam az algoritmust, így a β szög meghatározásához a minta felső részén elhelyezkedő két, második legnagyobb meredekségű egyenesek azonos pixelsorából származó metszéspontjainak koordinátáit használtam fel. Az alábbiakban különböző vonaltávolságokkal végzett teljesítménytesztek eredménye látható.

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból



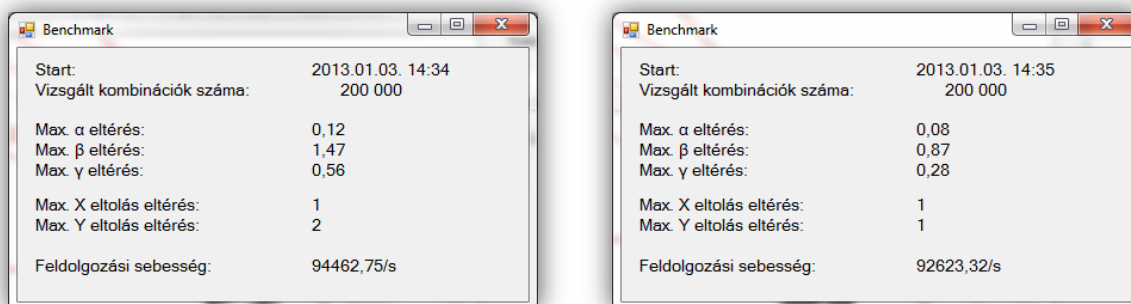
60. ábra

A teljesítményteszt eredménye két pixelsorral, a β meghatározása y_{5r} , y_{8r} pontok alapján, vonaltávolság ($V_{táv}$)=100, $V_{táv}$ =200, $V_{táv}$ = 300 pixel esetére

A 200 pixel vonaltávolságra futtatott teljesítményteszt alapján látható, hogy ezzel a módszerrel nagyobb pontosságot értem el a β meghatározásában.

A 6.3. alfejezetben már elméleti úton megállapítottam, hogy a γ szög meghatározásának pontossága szoros összefüggésben van a pixelsorok távolságával. Megállapításomat a mérési eredmények is alátámasztják.

A fenti tesztek követően kíváncsi voltam, hogy a β szög meghatározhatóságán mennyit javít, ha pozitív γ esetén a minta alsó részében, negatív γ esetén a minta felső részében elhelyezett egyeneseket használom. A módosított algoritmus futáseredményei láthatóak a következő képen.



61. ábra

A teljesítményteszt eredménye két pixelsorral, a β meghatározása y_{5r} , y_{8r} és y_{13} , y_{16} pontok alapján, vonaltávolság ($V_{táv}$)=100, $V_{táv}$ = 200 pixel esetére

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból

A két-két teljesítménytesztet összehasonlítva megállapítható, hogy a módosított algoritmus 100 pixeles vonaltávolságnál ~12%-kal, míg 200 pixeles vonaltávolságnál ~7,5%-kal javított a β meghatározásának pontosságán.

A β szög meghatározása két, azonos meredekségű egyenessel, módosított mintamérettel

Hasonlóan az 5. fejezetben bemutatott tesztekhez, a kétvonalas algoritmusnál is megvizsgáltam, hogy az eredmények milyen mértékben változnak meg, ha a minta méretparamétereit, nevezetesen a legnagyobb meredekségét és a minta szélességét jelentősen megnövelem. A 62. ábra a megnövelt meredekségű (2,25), míg a 63. ábra a megnövelt szélességű (19 mm) mintán futtatott teljesítményteszt eredményeit mutatja.

Benchmark	
Start:	2013.01.03. 14:37
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,11
Max. β eltérés:	1,50
Max. γ eltérés:	0,54
Max. X eltolás eltérés:	3
Max. Y eltolás eltérés:	2
Feldolgozási sebesség:	93011,47/s

Benchmark	
Start:	2013.01.03. 15:03
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,07
Max. β eltérés:	0,71
Max. γ eltérés:	0,26
Max. X eltolás eltérés:	1
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	93271,99/s

62. ábra

A teljesítményteszt eredménye két pixelsorral, a β meghatározása y_{5r} , y_{8r} és y_{13} , y_{16} pontok alapján, $C_{\max.korr}=2,25$, vonaltávolság ($V_{táv}$)=100, $V_{táv}=200$ pixel esetére

Benchmark	
Start:	2013.01.03. 14:38
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,11
Max. β eltérés:	1,56
Max. γ eltérés:	0,57
Max. X eltolás eltérés:	2
Max. Y eltolás eltérés:	2
Feldolgozási sebesség:	91646,10/s

Benchmark	
Start:	2013.01.03. 14:38
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,08
Max. β eltérés:	0,79
Max. γ eltérés:	0,28
Max. X eltolás eltérés:	1
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	91520,11/s

Benchmark	
Start:	2013.01.03. 14:39
Vizsgált kombinációk száma:	200 000
Max. α eltérés:	0,05
Max. β eltérés:	0,60
Max. γ eltérés:	0,19
Max. X eltolás eltérés:	1
Max. Y eltolás eltérés:	1
Feldolgozási sebesség:	92494,78/s

63. ábra

A teljesítményteszt eredménye két pixelsorral, a β meghatározása y_{5r} , y_{8r} és y_{13} , y_{16} pontok alapján, mintaszélesség=19 mm, vonaltávolság ($V_{táv}$)=100, $V_{táv}=200$, $V_{táv}=300$ pixel esetére

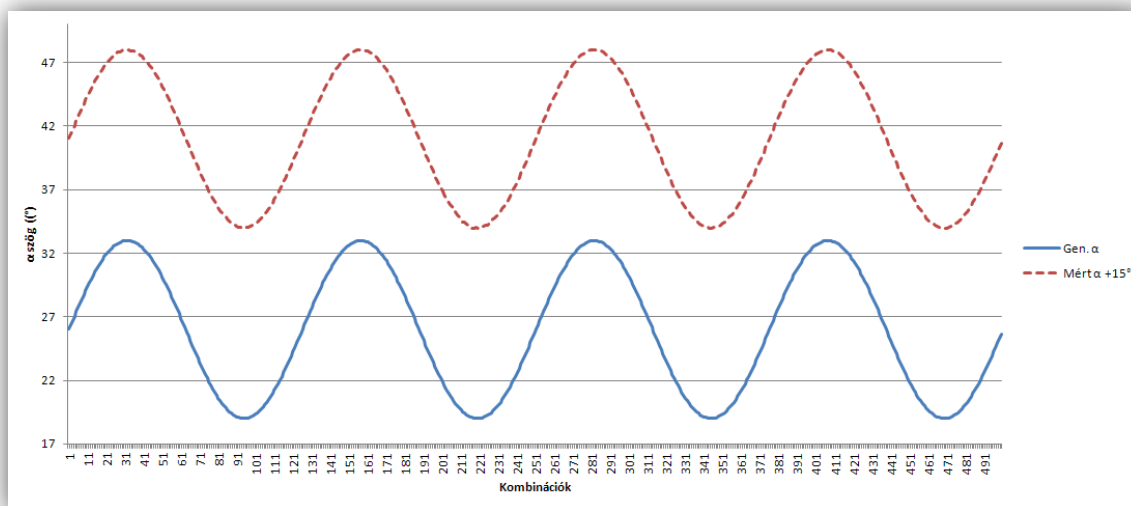
A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból

Az elvégzett tesztek alapján megállapítottam, hogy a mintában előforduló meredekség növelése, illetve a minta szélességének növelés a transzformációs paraméterek meghatározhatóságát jelentősen nem javítja.

Az összes teljesítményteszt futási sebessége alapján megállapítható, hogy a megvalósított algoritmus olyan gyors feldolgozást tesz lehetővé, hogy a mérés közbeni, azaz online feldolgozásra is alkalmas.

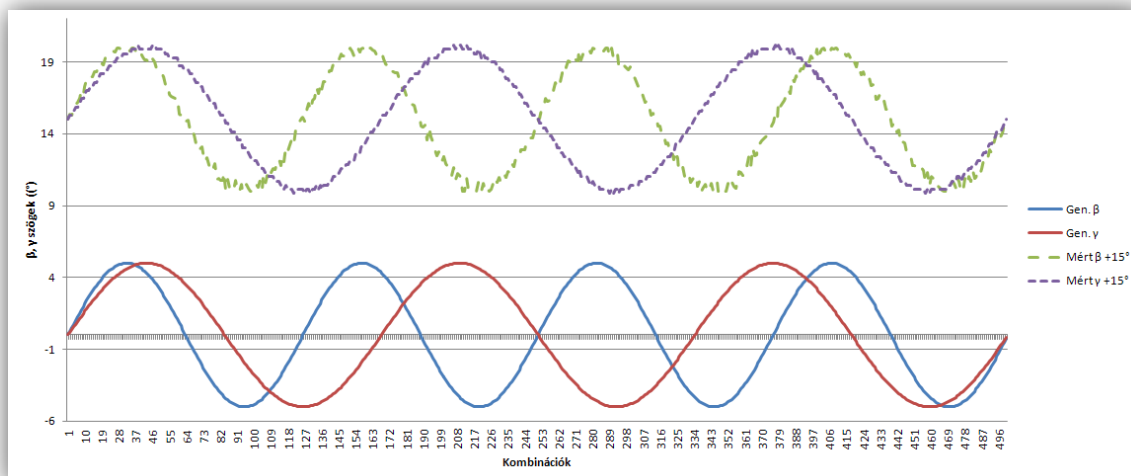
A modellezett rezgésmérés eredményei

A teljesítményteszteken túlmenően szükségesnek tartottam az új feldolgozási algoritmus gyakorlati használhatóságát egy modellezett rezgésen (felületmozgáson) keresztül is bemutatni. A szimuláció alatt az α 19-33°, a β és a $\gamma \pm 5^\circ$, az x és y irányú eltolódás ± 250 pixel tartományon mozog, rendre 5, 4, 3, 2, 1 periódust bejárva. A teszt elvégzéséhez az *Új minta méretezési módszerének kidolgozása* című alfejezet Optimalizálás alpontban ismertetett optimalizált mintaméretekét használtam. Az alábbi képeken (64. ábra, 65. ábra, 66. ábra) a transzformációs paraméterek előállított (generált) és mért értékei szerepelnek. A láthatóság kedvéért a mért paraméterek a függőleges tengelyen eltolva vannak ábrázolva.

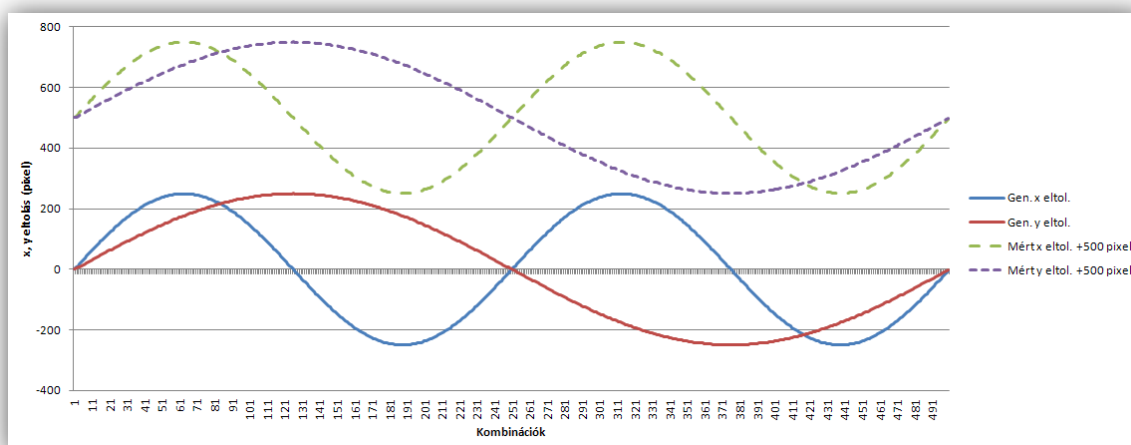


64. ábra
A modellezett rezgésmérés generált és mért α szöge

A transzformációs paraméterek meghatározása egyszerűsített modell esetén, két pixelsorból



65. ábra
A modellezett rezgésmérés generált és mért β és γ szöge



66. ábra
A modellezett rezgésmérés generált és mért x, y eltolása

A grafikonokon jól látható, hogy az α szög, az x és az y tengely menti eltolások esetében az előállított és mért eredmények szinte azonosak. Az α szög esetében $0,0798^\circ$, míg az x és az y tengely menti eltolásoknál 1 pixel volt a legnagyobb eltérés. A β és a γ szög meghatározása már pontatlanabb. A két pixelvonal távolsága 200 pixel volt a mérés alatt, így hasonlóan a 60. ábra második teljesítménytetsztjén tapasztaltakhoz, a β szögre $0,8434^\circ$, míg a γ szög esetében $0,2823^\circ$ volt a legnagyobb eltérés.

6.6. Új tudományos eredmények

Tézis 3: Kidolgoztam egy matematikai modellt, amelyet felhasználva olyan egyszerűsített feldolgozó algoritmusokat fejlesztettem ki, amelyekkel az egy és többvonalas szenzorok szolgáltatja 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.

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.

- Egy pixelsor (méréstartomány: x, y elmozdulás ± 250 pixel; x, y, z tengely körüli elfordulás $\pm 5^\circ$) esetén a viszonyítási koordinátarendszerben az x tengely menti elfordulás $0,6^\circ$ -os, az x tengely menti eltolás 3 pixel pontossággal határozható meg.
- Egy pixelsorral a viszonyítási koordinátarendszerben a z tengely menti elfordulásában erősen korlátozott ($\pm 0,2^\circ$), de egyébként a méréstartományon belül szabadon mozgó felület (méréstartomány: x, y elmozdulás ± 250 pixel; x, y tengely körüli elfordulás $\pm 5^\circ$) esetén az x tengely menti elfordulás $0,2^\circ$, az x tengely menti eltolódás 2 pixel, és az y tengely menti eltolódás 1 pixel pontossággal határozható meg.
- Két pixelsorral, kellően nagy pixelsortávolság (200 pixel) esetén mindhárom tengely menti elfordulás és az x és az y tengely menti eltolás is nagy pontossággal (x, y, z tengely menti elfordulások: $0,06^\circ, 0,94^\circ, 0,27^\circ$; x, y irányú eltolódás 1 pixel) meghatározható.

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.

7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

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.

Tézis 2: Az 1. tételben 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.

Tézis 3: Kidolgoztam egy matematikai modellt, amelyet felhasználva olyan egyszerűsített feldolgozó algoritmusokat fejlesztettem ki, amelyekkel az egy és többvonalas szenzorok szolgáltatja 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.

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.

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.

TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Az előzőekben bemutatott és kidolgozott új mérési és feldolgozó eljárások gyakorlati alkalmazhatósága, versenyképessége bebizonyosodott, azonban ahhoz, hogy ezek az elvek az ipar számára is alkalmazható formát öltsenek, még további fejlesztésekre van szükség. Az adatredukáló módszer kifejlesztése és megvalósítása a méréstechnika számos területén új lehetőségeket nyit meg, amelyeknek kihasználása szintén további kutatásokat és fejlesztéseket igényel. A továbbiakban bemutatok néhány, elsősorban a kutatási területemre vonatkozó továbbfejlesztési lehetőséget.

A 3. fejezetben bemutatott 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 többretegű neurális hálózat betanításának.

Az egy pixelsoros 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 adatredukáló egység gyakorlati megvalósítása a jelenlegi hardver- és szoftverigénnyel gazdasági szempontból nem versenyképes, ezért a végleges kialakításánál egy önálló egység kifejlesztése a cél, amely univerzálisan használható a legtöbb line scan kamerához, emellett speciális mérőkártya nélkül képes az adattovábbításra a számítógép felé.

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

ÖSSZEFOGLALÁS

A szenzorgyártók által a gyakorlatban alkalmazott módszerek és a tudományos szakirodalom tanulmányozását követően nyilvánvalóvá vált, hogy az érintésmentes rezgésmérés területén számos olyan speciális feladattal találkozhatunk, amely megoldása a jelenlegi lehetőségekkel nem, vagy csak igen nagy költséggel oldható meg. Ezért a doktori kutatásaim elsődleges célja az volt, hogy olyan mérési és adatfeldolgozási módszereket dolgozzak ki, amelyek lehetővé teszik a nagy mintavételezési sebességű online feldolgozású érintésmentes rezgésmérést.

Értekezésemben az optikai mérési eljárásokkal, azon belül is a line scan kamerás mérési eljárások fejlesztésével foglalkozom. A speciálisan kidolgozott minta egyaránt eredményesen használható az egy- és kétpixelsoros line scan kamerás mérési eljárásokban az egyidejűleg többirányú elmozdulások, rezgések detektálására. A mért felület térbeli eltolódásainak, elfordulásainak, mintára ható összetett torzító hatásának elemzésére olyan tesztelő alkalmazást fejlesztettem ki, amellyel a kamerával készített képen létrejövő átmenet-eltolódások hatásai nagy pontossággal elemezhetőek. A minta alkalmazásfüggő, dinamikus méretezéséhez kidolgoztam az irányelveket, alkalmazandó összefüggéseket.

Az elmozdulási paraméterek meghatározására olyan matematikai modellt és feldolgozási algoritmust fejlesztettem ki, amely segítségével az egy pixelsoros vonalkamerás mérési eredmények nagy hatékonysággal, megfelelő teljesítményű számítógéppel akár valós időben is feldolgozhatóak. A kidolgozott mérési módszer lehetővé teszi egyetlen vonalkamera felhasználásával az x tengely menti eltolódás és elfordulás egyidejű meghatározását akár 160 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett is. Amennyiben a mérési körülmények fizikailag megakadályozzák valamely, tengely körüli elfordulást, úgy további paraméterek meghatározására is lehetőség nyílik.

Két vonalkamera-szenzorral új mérési eljárást dolgoztam ki, amellyel nagy mintavételezési frekvenciával határozható meg a mért felület térbeli mozgásának két tengely menti eltolódása és három tengely menti elfordulása. A továbbfejlesztett matematikai modell alapján olyan feldolgozó algoritmust dolgoztam ki, amellyel egy általános számítógéppel az adatok feldolgozása valós időben elvégezhető. Szimulációs és tesztelő alkalmazást fejlesztettem ki, amellyel a kidolgozott algoritmusok helyes működését igazoltam, a mérési eljárások alkalmazhatóságának alátámasztására statisztikai hibabecslést végeztem.

FPGA felhasználásával olyan adatredukáló módszert dolgoztam ki, amely megoldást nyújt a nagyfrekvenciás vonalkamerás mérési eljárások esetén jelentkező nagy adatmennyiség problémájára. A gyakorlatban is megvalósított egység a kamerában előálló adatmennyiséget hozzávetőlegesen 200-ad részére tömöríti.

Az értekezésben leírt eredmények gazdasági és versenyképességi vonatkozásban is megállják a helyüket. Az adatredukáló módszer új utat nyit az eddig megoldhatatlan, nagyfrekvenciás, folyamatos mérést alkalmazó kamerás mérési eljárások területén. Az új, kétpixelsoros mérési eljárással a berendezések teljes háromdimenziós rezgésvizsgálata lehetségessé válik, amelyre eddig csak speciális szenzorrendszerekkel volt lehetőség.

SUMMARY

In many industrial applications vibration measurement can not be performed by contact sensors, e.g. piezoelectric accelerometers, because the vibrating surface to be measured is closed by housing or other parts of the machine, or it is in movement during measurement, which makes impossible the wiring. In such cases only contactless measuring methods can be used. From the other side, contactless vibration measurement has highly limited possibilities in practice.

Analysing scientific results published in this field and also studying methods used in practice by sensor developers became clear that solving special contactless vibration measurement tasks, especially on high speed, is a real theoretical and technical problem. On the basis of the studied scientific results I decided to development new measuring and data analysing methods for high speed-online-contactless vibration measurement.

The main focus of my research was the optical measurement methods, particularly development of methods using line scan cameras. Based on scientific research I have developed a special pattern suitable for effective line scan camera application of one or two pixel lines. This pattern provides possibility for simultaneous detection of displacement (vibration) in three dimensions. I have also developed a testing method, which can be used for analysis of complex distortion of the pattern caused by displacement and rotation of the measured surface. This method is used for efficiency analysis of transitions shifting on the picture recorded by line scan camera. Theoretical development of mathematical functions and interrelations was performed in order to provide application-dependent dynamic sizing of the pattern.

Mathematical model and processing algorithm are developed for determination of displacement parameters. These parameters are necessary for high-performance online processing of measured data coming from one line scan camera. The developed method is suitable for simultaneous detection of displacement and rotation in one direction, as maximum by 160 kHz speed. In case of limited rotation in space, further parameters can also be determined.

New measurement process is developed for complex measurement of a surface moving in space. This process uses two pixel lines and high sampling frequency while it is suitable for measurement of displacement in two dimensions and rotation in three dimensions. New algorithm providing online data processing were developed using new mathematical model. This algorithm can be used effectively even by a general performance computer. Simulation and testing applications were developed to verify operation of new algorithms and also statistical error analysis was performed to prove application performance of new methods and processes.

Using FPGA I have developed new data reduction method solving big-data problems coming from high-speed line-scan camera measurement. The new method was implemented and tested in practice, results have proved data reduction in ratio of 1/200.

Results of the doctorate research are also competitive in economical and practical means. The new data reduction method opens new perspective for high-speed, online measurement methods using line-scan camera. The new two pixel-line method provides three-dimension displacement and rotation measurement of a surface which was possible until now only by special sensor systems.

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Bodolai Tamás: *Képfeldolgozó szoftver fejlesztése ipari vonalkódolvasó rendszerhez*, Diplomamunka, 2006

Folyóirat

Lektorált idegen nyelvű külföldi cikk

- [S2] 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
- [S3] Bodolai Tamás: *Computer-aided Measurement Method for Determination of Torque-Speed Characteristics of Electrical Motors Used in Practical Education*, Journal of Physics: Conference Series 238, 2010, ISSN: 1742-6588 doi:10.1088/1742-6596/238/1/012010

Lektorált magyar nyelvű cikk

- [S4] 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
- [S5] 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

Könyv

Magyar nyelvű

- [S6] Borsody Zoltán, Váradiné Szarka Angéla, Bodolai Tamás, Unhauzer Attila: *Bojlercsoportok teljesítményprofiljának meghatározása a közép feszültségű hálózat betáplálási pontjain: Kutatási jelentés (I. fejlesztési fázis)* Miskolci Egyetem, 2009. 40 p.

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelenő anyag

Nem lektorált

- [S7] Bodolai Tamás: *Távoli elérés biztosítása laboratóriumi számítógépeken mérésadatgyűjtés oktatásához*, Számítástechnika az Oktatásban Konferencia, 2012, ISSN 1842-4546, 206-210. oldal
- [S8] Marcsák Gábor Zoltán, Bodolai Tamás: *Vasúti kocsik automatizált azonosítása NFC technológiával*, Számítástechnika az Oktatásban Konferencia, 2012, ISSN 1842-4546, 308-313. oldal
- [S9] Bodolai Tamás: *Line scan kamerák használhatóságának vizsgálata mozgás- és rezgésmérés céljára*, Számítástechnika az Oktatásban Konferencia, 2011, ISSN 1842-4546, 128-132. oldal

- [S10] Lángi Máté, Gyarmati Tamás, Bodolai Tamás: *Moduláris rendszerű hálózatanalizáló műszer paramétereinek vizsgálata, kalibrálása*, Számítástechnika az Oktatásban Konferencia, 2011, ISSN 1842-4546, 224-228. oldal
- [S11] Bodolai Tamás: *Lézeres távolságmérő paramétereinek meghatározása*, Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, 2009, ISSN: 1842-4546, 165-169. oldal
- [S12] Unhauzer Edina, Bodolai Tamás: *Hálózatanalizáló műszer hardver tervezése*, Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, 2009, ISSN: 1842-4546, 349-354. oldal
- [S13] Bodolai Tamás, Váradiné Dr. Szarka Angéla: *Hogyan tegyük érdekesebbé a gyakorlati foglalkozásokat*, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2009, ISBN:978-973-8231-87-0, 53-56. oldal

Helyi konferencia-kiadványban megjelenő anyag

Lektorált idegen nyelvű

- [S14] 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
- [S15] Bodolai Tamás: *Development of a New Method for Contactless Vibration Measurement*, International Scientific Conference, 2011, ISBN 978-963-661-962-6, 13-16. oldal

Nem lektorált idegen nyelvű

- [S16] Bodolai Tamás, Rónaföldi Arnold: *Determination of Moment-Speed of Rotation Characteristic of Electrical Motors by Computer-Aided Measurement Method*, International Scientific Conference, 2010, ISBN 978-963-661-925-1 Ö, ISBN 978-963-661-915-2, 13-18. oldal
- [S17] Bodolai Tamás, Váradiné Dr. Szarka Angéla: *How to Motivate Students at the Laboratory?*, Nemzetközi Tudományos Konferencia, 2009, ISBN: 978-963-661-866-7, ISBN: 978-963-661-875-9, 7-12. oldal

Magyar nyelvű

- [S18] Bodolai Tamás: *Mintatesztelő szoftver fejlesztése line scan kamerás alkalmazásokhoz*, Doktoranduszok Fóruma, 2011, Nyomdaszám: TNO.2012-96.ME, 7-10. oldal
- [S19] Bodolai Tamás: *Ultrahang adó-vevők és line-scan kamerák felhasználhatóságának vizsgálata érintésmentes rezgésmérés céljára*, Doktoranduszok Fóruma, 2010, Nyomdaszám: ME. Tu-99/2011., 19-24. oldal
- [S20] Bodolai Tamás: *Moduláris hálózat analizáló mérőműszer egységeinek digitális azonosítása*, Doktoranduszok Fóruma, 2009, Nyomdaszám: ME. Tu- 196 /2010., 27-32. oldal

IRODALOMJEGYZÉK, ALKALMAZOTT REFERENCIÁK

Nyomtatásban megjelent hivatkozások

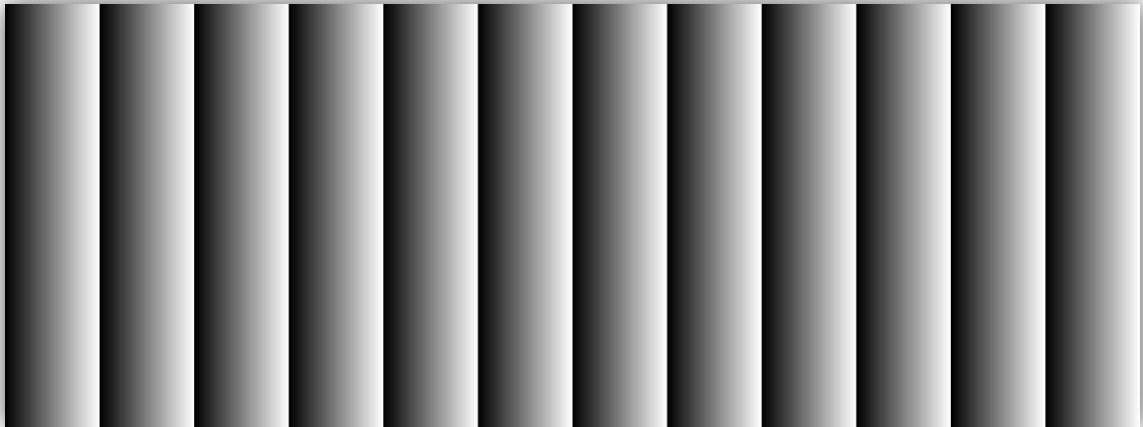
- [P1] M. Decker, K. Hintz, J. Nobis, C. Gühmann: *Controlling a Diesel Engine with Engine Management Based on Structure-Borne Sound*, IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, 2012
- [P2] M. J. Usher, D. A. Keating: *Sensors and Transducers*, Macmillian Press, 1996, ISBN 0-333-60487-3
- [P3] 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 Gépipari 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. Nayyerloo, 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

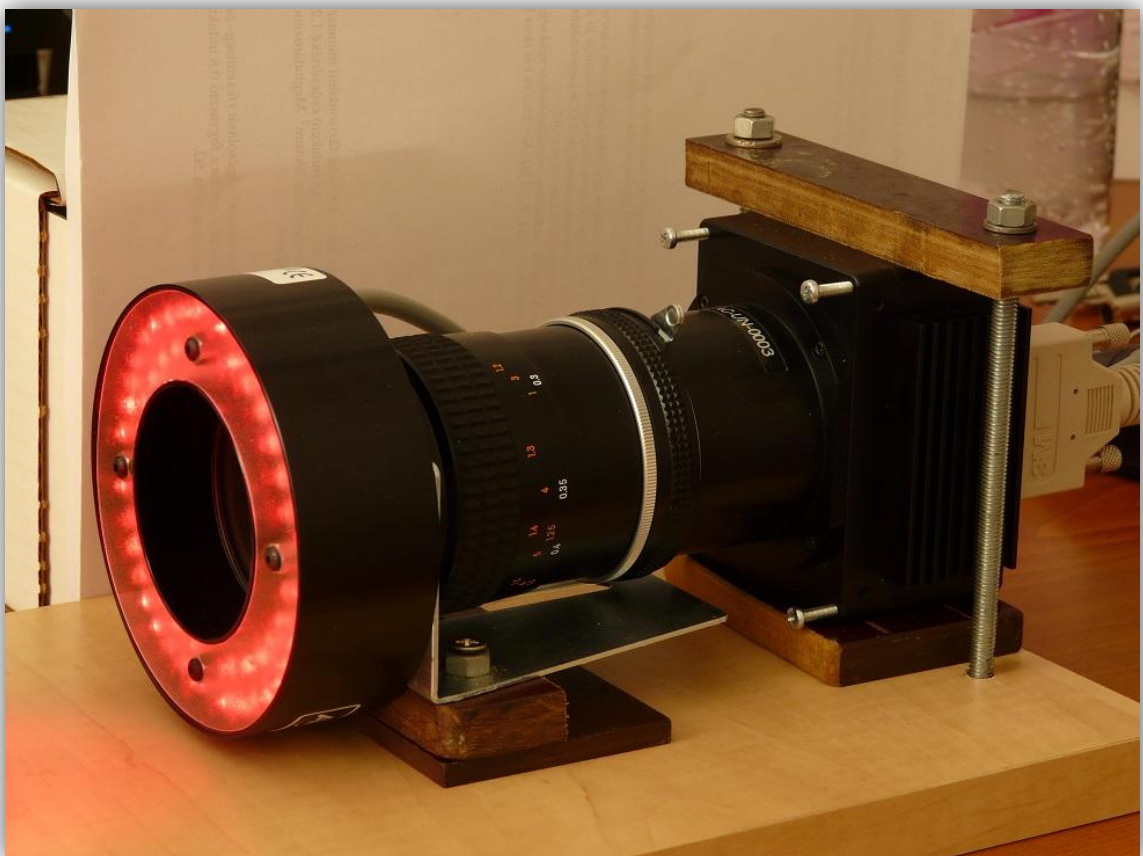
Online hivatkozások

- [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>

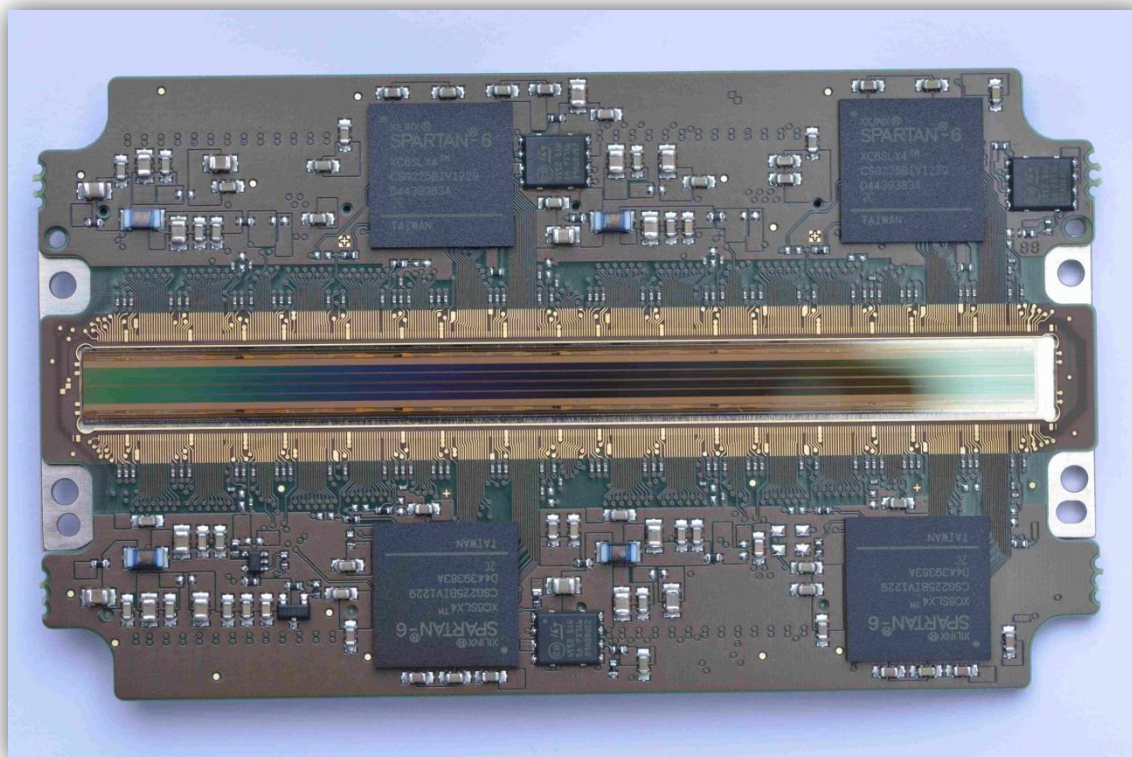
MELLÉKLETEK



67. ábra
A kamera szimulációs módjában továbbított kép



68. ábra
A teszteléshez használt Dalsa kamera



69. ábra

A kétpixelsoros mérés kialakításához alkalmas szenzormodul [O16]