

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



NAGYSEBESSÉGGEL FORGÓ ALKATRÉSZEK MOZGÁSÁNAK
VIZSGÁLATA LINE SCAN KAMERÁVAL

PHD ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Forgács Zsófia

okleveles villamosmérnök

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
TERMELÉSINFORMATIKA, MÉRÉS- ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI INFORMÁCIÓS
RENDSZEREK TÉMATERÜLET
MÉRÉS- ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TÉMACSOPORT

Doktori iskola vezető:

Prof. Dr. Szigeti Jenő

egyetemi tanár

Témavezetők:

Prof. Dr. Czap László

egyetemi tanár

Dr. Trohák Attila

egyetemi docens

Miskolc

2024

NYILATKOZAT

Alulírott Forgács Zsófia büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskolába beadott PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljeseek. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Dátum: 2024. augusztus 28.

.....
Forgács Zsófia

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálámat mindazoknak, akik támogattak a tanulmányaim és az értekezésem elkészítése során.

Elsősorban témavezetőimnek köszönöm a szakmai iránymutatást és támogatást. Prof. Dr. Czap László kép- és jelfeldolgozáshoz kapcsolódó munkáit az alapszakos éveim alatt ismertem meg, amely jelentős hatást gyakorolt a későbbi kutatási tevékenységeimre. A meghatározó szakmai ismereteken túl köszönet illeti a tudományos munkássághoz és közléshez kapcsolódó értékes tanácsaiért. Dr. Trohák Attila 2013 óta támogatja a mérnöki és tudományos pályám fejlődését. Versenyek, konferenciák, kutatási és fejlesztési projektek keretein belül és TDK dolgozataim, a szakdolgozatom és a diplomamunkám témavezetőjeként egyaránt hozzájárult az elért szakmai eredményeimhez.

Köszönet illeti az Automatizálási és Infokommunikációs Intézet munkatársait, akik mindenben készséggel segítettek, tanácsaikkal és útmutatásukkal hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez. Hálás vagyok az Informatika épületben dolgozó kollégáimnak és barátaimnak, hogy szüntelenen motiváltak és javaslataikkal segítettek a munkámat. Köszönetet mondok minden szakmai és baráti támogatásukért.

Szeretném megköszönni szüleimnek és minden családtagomnak a folyamatos támogatásukat. Köszönöm a sok áldozatot, és hogy mindvégig ösztönöztek a céljaim elérésében.

Köszönetet mondok minden barátomnak az állandó támogatásukért és biztatásukért. Hálás vagyok, hogy mindvégig mellettem álltak és átsegítettek minden felmerülő kihívás leküzdésében.

Támogatói köszönetnyilvánítás

A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.

Rövidítések jegyzéke

FOV	Field of View
FPGA	Field Programmable Gate Array
GenICam	Generic Interface for Cameras
GigE	Gigabit Ethernet
GVCP	GigE Vision Control Protocol
GVSP	GigE Vision Streaming Protocol
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
IETF	Internet Engineering Task Force
NIC	Network Interface Card
OPS	Object Pixel Size
OSI	Open Systems Interconnection
PLL	Phase-Locked Loop
ROI	Region of Interest
SFS	Smallest Feature Size
UDP	User Datagram Protocol

Szótár

Field of View	látómező
Field Programmable Gate Array	programozható logikai kapuáramkör
Generic Interface for Cameras	általános interfész kamerákhoz
Line rate	sorfrissítési frekvencia (a line scan kamera mintavételi frekvenciája)
Network Interface Card	hálózati kártya
Object Pixel Size	objektum pixelméret
Open Systems Interconnection	nyílt rendszerek összekapcsolása
Phase-Locked Loop	fáziszárt hurok
Region of Interest	érdekelt terület
Smallest Feature Size	legkisebb jellemző méret

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	1
1.1.	A kutatás célkitűzései	3
1.2.	Az értekezés felépítése.....	3
2.	A gépi látáson alapuló rendszerek tervezési szempontjai.....	4
2.1.	A képrögzítés folyamata	5
2.1.1.	A kamerabeállítás paraméterei.....	5
2.1.2.	Képrögzítési módszerek.....	7
2.1.3.	Képzékelők	10
2.1.4.	Kamerainterfészek	11
2.1.5.	A kutatómunka során használt kamera	14
2.2.	A megvilágítás tervezési szempontjai.....	15
2.2.1.	Fényforrások	15
2.2.2.	Megvilágítási technikák	16
3.	Megvilágítási módszer kidolgozása line scan kamerához	17
3.1.	Az expozíció és világításvezérlő jelkarakterisztikák vizsgálata	23
3.1.1.	A jelkarakterisztikák vizsgálatának eredménye.....	24
3.1.2.	Algoritmus kidolgozása a pixelintenzitás becslésére a jelkarakterisztikák alapján 26	
	I. Tézis.....	28
3.2.	A frekvenciakülönbség kompenzálása.....	29
	II. Tézis	35
3.3.	Futási eredmények a javasolt algoritmus alkalmazásával	36
4.	Fordulatszám meghatározás line scan kamerával	40
4.1.	A mérési pontok kiválasztási módszere.....	40
4.1.1.	Statisztikai módszerek alkalmazása a képfeldolgozásban	40
4.1.2.	Varianciaszámításon alapuló kiválasztási eljárás	41
4.2.	Fordulatszám mérési eljárás line scan kamerával	46
4.3.	A javasolt algoritmus tesztelése.....	50
4.3.1.	Validáció fordulatszám visszacsatolás nélkül.....	50

4.3.2. Validáció fordulatszám visszacsatolással	53
III. Tézis	56
5. Forgástengelymenti elmozdulás mérése line scan kamerával	58
5.1. A varianciagörbe előfeldolgozása.....	59
5.2. A mérési pont kiválasztása.....	63
IV. Tézis.....	66
6. Összefoglalás	68
I. Tézis.....	69
II. Tézis	70
III. Tézis.....	71
IV. Tézis.....	72
7. Summary	74
Thesis I.....	75
Thesis II.	76
Thesis III.	77
Thesis IV.....	78
8. Irodalomjegyzék	80
9. Saját publikációk.....	84
10. Mellékletek	85
1. A fordulatszám meghatározás validációs eredményei fordulatszám visszacsatolás nélkül ..	85
2. A fordulatszám meghatározás validációs eredményei fordulatszám visszacsatolással ...	92

1. Bevezetés

Az intelligens gyártási folyamatok megjelenésével egyre növekszik az igény a gyártási folyamatok professzionális vizsgálatára és a minőségi adatok iránt, ezért válik egyre fontosabbá a gépi látás szerepe az ipar számos területén. A gépi látáson alapuló alkalmazások köre jelentősen megnőtt az elmúlt években, amire egy példa a 2D képfeldolgozásról a háromdimenziós rendszerekre történő fejlődés. Az optikai rendszerek nemcsak a legkisebb hibákat észlelik, hanem értékes adatokat szolgáltatnak, amelyek a gyártási folyamat optimalizálására használhatók fel [3].

Az értekezésben ismertetett fordulatszám- és elmozdulás mérési eljárás kidolgozásának igénye korábban egy autóiipari vállalat és a Miskolci Egyetem együttműködésében fogalmazódott meg. A kitűzött cél az volt, hogy a cég által fejlesztett indítómotorok tesztelésekor, annak fordulatszáma és a motor fogaskerekének tengelymenti visszacsapódása érintésmentesen legyen mérhető, a termék megbontása és megjelölése nélkül.

A fordulatszám mérése számos módon történhet, azonban a hagyományos mérőeszközök alkalmazásával olyan korlátokba ütközhetünk (például a termék megjelölésével) [42], amelyekkel a fejlesztéssel szemben támasztott követelményeket nem tudnánk kielégíteni. A hagyományos mérési módszereken túl számos kutatómunka foglalkozik a fordulatszám mérési lehetőségeivel. Egy tanulmányban egy alacsony költségű kamerát alkalmaznak erre a célra [44]. A módszer a feldolgozott képek sorozatát használja, amelyeket egy hasonlóság értékelő algoritmus elemel, meghatározza a képek közötti periodikus hasonlóságokat, és ezek alapján kiszámítja a forgási sebességet.

A szakirodalomban számos különböző módszert javasoltak a fordulatszám mérésének kihívásaira magas hőmérsékleten és poros környezetben. Az egyik megközelítés elektrosztatikus érzékelőt használ [29], amely egy forgó tengelyre rögzített töltött csík mozgását érzékeli, így mérve a fordulatszámot. Szűk helyeken és nehezen telepíthető környezetekben a tengely nyomatékát és forgási sebességét az ellenállás és kapacitás változásainak mérésével [10] javasolták. A Lézer Doppler Vibrométerek (Laser Doppler Vibrometer – LDV) is érintésmentesen mérik a felületi rezgéseket [7]. Az LDV-k a Dopplereffektus alapján a rezgés frekvenciáját elemzik, így közvetetten becsülhető a forgási sebesség [31], [45] is.

A mérési módszer tervezése során egy gépi látáson alapuló rendszer kidolgozása mellett döntöttem, ahol a kamera kiválasztására nagy hangsúlyt kell fektetni. A kihívást a tesztelendő termék nagysebességű mozgása jelentette, hiszen a vizsgált indítómotor fogaskerekének sebessége több ezer fordulat/perc fordulatszámot ér el működés közben. A képelemzéshez korábban egy nagysebességű kamerával, 15000 fps mellett rögzítettünk felvételeket [S1]. A kamera tiszta, könnyen feldolgozható képet nyújtott a motor működése során, így alkalmas volt a mérési feladatra, de a magas költségei (30 000 USD, kb. 10 500 000 HUF) miatt egy alternatív

mérési módszer kifejlesztésére törekedtünk. A kutatómunka során használt line scan kamera jelenlegi nettó listaára 929 EUR (kb. 370 000 HUF), amely csaknem harmincszoros költségcsökkentést jelent az alkalmazott kamera árában.

A line scan kamerák gyakori felhasználása a mozgó alkatrészek és termékek vizsgálata, például szállítószalag felé [32] vagy forgó hengeres test elé, a forgástengelyre merőlegesen helyezve. A hagyományos alkalmazásoknál, ha a képrögzítés túl alacsony frekvencián történik, akkor a kép összecsiszódik, ha pedig túl magasra van állítva, akkor szétesik. A fordulatszám mérési eljárás kidolgozásakor ezt a jelenséget használtam ki. A mérési folyamat első lépése azon pontok kiválasztása a felvételen, ahol a számítások elvégezhetők. Ezt a feladatot statisztikai eszközökkel valósítottam meg.

Az elmozdulás mérés a vizsgált objektum képpontméretének ismeretében már elvégezhető. A kihívást ennél a mérési eljárásnál is a mérési pontok kiválasztása jelentette, melyet szintén statisztikai eszközökkel és a képpontsorok varianciagörbéinek előfeldolgozásával végeztem el.

A gépi látáson alapuló mérőrendszerek működését nagyban befolyásolja az alkalmazott megvilágítási technika. A line scan kamerák csak egy (vagy pár) sornyi képpontot olvasnak be egy mintavételi ciklus során és a szenzorfelületük sokkal kisebb, mint a hagyományos area scan kameráké. A megvilágítás kialakításakor emiatt nem a világítóegység geometriája lesz a fő tervezési szempont; egy egyszerű sorvilágítás alkalmas lesz a megfelelő szögpozícióban elhelyezve a vizsgált objektum előtt. Fontosabb tényező, hogy a rövid expozíciós idők miatt a kamerának nagyobb fényintenzitásra van szüksége ahhoz, hogy elegendő fényt gyűjtsön be a képalkotáshoz.

Az ipari kamerák többsége jelezheti az aktív expozíciós időt a képfelvétel során, amely lehetővé teszi a világítás vezérlését az expozícióval összehangolva. Ezzel megvalósítható például egy impulzusvezérelt LED világítás. Az impulzus üzemmód előnye a LED élettartamának meghosszabbítása, mivel a LED rövidebb ideig világít időegységenként, így kevesebb hőt termel. Mivel a hagyományos, kamera kimeneti jellel történő világításvezérlésnél nincs visszacsatolásunk a rögzített és feldolgozott képi adatokról, egy alternatív megvilágítási módszer kidolgozását tűztem ki célul. Egy független világításvezérlő egység lehetőséget biztosít a képi adatok visszacsatolására, ezáltal a LED fényforrások vezérlőjelének szabályozására, vagy például elmozdulás mérés esetén a világítóegységek be- és kikapcsolására az elmozdulás tengelye mentén.

A kameraexpozíció jel és a LED impulzussorozat különböző forrásokból származnak és nincs garancia arra, hogy a kezdőidőpontjuk megegyezik. Amennyiben az expozíció jel és a világítás vezérlőjel megegyező frekvenciájú, a két jel teljes átfedését utóbbi fáziseltolásának megfelelő beállításával biztosíthatjuk. A gyakorlatban azonban a kamera mintavételi frekvenciája és a világításvezérlő által szolgáltatott jel frekvenciája különbözhet, ami rezonanciajelenséget és az intenzitás változását okozhatja a rögzített képeken.

A jelenség megértéséhez és a frekvenciakülönbséget kompenzáló algoritmus későbbi fejlesztéséhez kidolgoztam egy olyan eljárást, amellyel két jel alapján megbecsülhető a jelgörbék átfedéséből adódó intenzitás az egyes pixelsorokra. A szimulációt felhasználva kidolgoztam egy eljárást a frekvenciakülönbség kompenzálására.

1.1. A kutatás célkitűzései

A kutatómunka elsődleges célja egy olyan fordulatszám- és elmozdulásmérési eljárás kidolgozása monokróm line scan kamera felhasználásával, amellyel akár 3000 rpm fordulatszámmal forgó alkatrészek mozgása is vizsgálható. A célkitűzés az alábbi részfeladatokat foglalja magába:

- Az alkalmazott megvilágítási technika optimalizálása a line scan kamera számára, biztosítva a megfelelő fényintenzitást és kontrasztot a rövid expozíciós idők alatt és kerülve a mintavételi- és LED frekvencia közötti különbségből adódó periodikus intenzitásváltozásokat a felvételen.
- Algoritmus fejlesztése a képi adatok feldolgozására és elemzésére, amely lehetővé teszi a valós idejű fordulatszám- és elmozdulásmérést. Kiemelt szempont, hogy az algoritmusok egyszerűek legyenek, ne igényeljenek komplex számításokat, így biztosítva, hogy azokat alacsony erőforrásigényű, nagy sebességű FPGA-kon is hatékonyan lehessen futtatni.
- Az eljárás tesztelése és validációja különböző forgó alkatrészekben, környezetekben, biztosítva a módszer általánosíthatóságát és széleskörű alkalmazhatóságát.

1.2. Az értekezés felépítése

A Bevezetés után a gépi látáson alapuló rendszerek tervezési szempontjait ismertetem, amely a vizsgálat környezetének beállításához szükséges, ideértve a kamerabeállítás paramétereit és a különböző megvilágítási technikákat. A 3. fejezetben a line scan kamerával végzett mérésekhez kidolgozott megvilágítási módszert mutatom be.

A fordulatszám meghatározására kidolgozott eljárás a 4. fejezetben kerül bemutatásra, ahol a mérési pontokat kiválasztó- és a fordulatszám-mérésért felelős algoritmusok ismertetését a mérési eljárás tesztelési eredményeinek összefoglalása követi. Az 5. fejezetben az elmozdulásmérésre kidolgozott módszert mutatom be.

A 6. és 7. fejezetben az értekezésben bemutatott eredmények kerülnek összefoglalásra a tézisek felsorolásával, a 8. és 9. fejezet pedig az értekezéshez kapcsolódó irodalomjegyzéket és a saját publikációk listáját tartalmazza.

Az értekezésben szereplő, forrásmegjelölés nélküli ábrák és fotók saját készítésűek.

2. A gépi látáson alapuló rendszerek tervezési szempontjai

A gépi látáson alapuló rendszerek egyre gyakoribb alkalmazása tapasztalható az iparban, különösképpen a gyártási folyamatok minőségellenőrzése területén, annak megbízhatósága, gyorsasága, pontossága és ismételhetősége következtében. A negyedik ipari forradalomban támasztott irányelvek szerint a gyártás hatékonysága az adatok következetes gyűjtése- és feldolgozása által növelhető, melyben fontos szerepet kapnak a korszerű automatizálási technológiákkal támogatott intelligens gyártási folyamatok.

A gépi látás rendszerek fejlesztése több tudomány- és szakterületet érintő ismereteket és a potenciális alkalmazási területek azonosítását követeli meg. Bár a gépi látás rendszerek különféle technológiákat alkalmazhatnak, jellemzően hasonló lépéseket követnek a képrögzítéstől a beavatkozásig. Ezek a lépések tipikusan az optikai adatgyűjtés a jelenet (angolul „scene”) korlátozásainak figyelembevételével, az előfeldolgozás, a szegmentálás, a vizsgált jellemző, mint képi információ kinyerése, az osztályozás és képelemzés, majd végül a döntéshozatal és beavatkozás [47].

A gépi látás rendszerek a képrögzítéshez az ipari kamerákon belül digitális szenzorokra támaszkodnak, speciális optikával, így a számítógépes hardver és szoftver képes feldolgozni, elemezni és mérni a különböző jellemzőket a döntéshozatalhoz [3]. A gépi látás egyre széleskörűbb felhasználása figyelhető meg mind az iparban, mind az oktatási, kormányzati vagy katonai alkalmazásokban [13].

A gépi látáson alapuló rendszerek tervezési módszertana már számos tanulmányban összefoglalásra került. Az első tervezési lépés a jelenet vizsgálata és az alapján a megfelelő megvilágítási technika és optikai rendszer kiválasztása [21]. A második lépésben az optikai adatgyűjtés történik a (jellemzően CCD vagy CMOS) képérzékelőkkel a megvilágított jelenetről, a harmadik lépés a digitalizálás, azaz a képrögzítés és -megjelenítés. Az utolsó lépés a képfeldolgozás, amely során olyan módosításokat hajtunk végre a digitális képadatokon, hogy megfelelő formát kapjanak a későbbi műveletekhez.

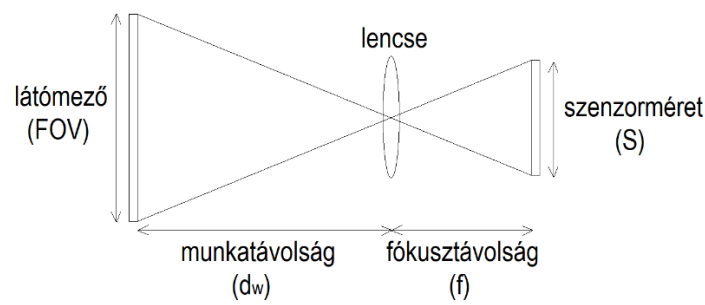
Az általam javasolt tervezési módszer első lépése a jelenet vizsgálata és a rendszer környezetének előkészítése, azonban a megvilágítás tervezését csupán az optikai paraméterek meghatározása és a képrögzítő eszköz kiválasztása után tartom célszerűnek. Ennek az oka, hogy a képrögzítés módja és az optikai rendszer fizikai kialakítása nagymértékben befolyásolhatja az alkalmazott megvilágítási technika hatékonyságát [S2]. Az adatgyűjtés és megvilágítás tervezése után fontos szempont, hogy az optikai adatok digitalizációja és továbbítása hogyan, milyen interfészen keresztül történik a feldolgozóegység felé. Az utolsó lépés a képfeldolgozásért és az egyéb irányítástechnikai feladatokért felelős szoftver tervezése és az ezt végrehajtó vezérlőegység kiválasztása, figyelembevéve a kiválasztott képrögzítő eszköz és a rendszert felépítő további eszközök jellemzőit és a vezérléssel szemben támasztott követelményeket. A következő alfejezetekben a gépi látás rendszerek tervezéséhez szükséges alapismeretek kerülnek bemutatásra.

2.1. A képrögzítés folyamata

A rendszer meghatározó eleme a kamera, melynek kiválasztásánál számos szempontot kell figyelembe vennünk. Elsőként az optikai rendszer paramétereit sorra véve meghatározzuk a szükséges szenzorméretet és felbontást, a munkadarab távolságának függvényében a megfelelő fókusz távolságot, majd ezután az alkalmazáshoz mérten a képrögzítés módját, végül pedig megvizsgálva a lehetséges kamera típusokat és interfészeket kiválasztjuk az alkalmazásunkhoz legjobban illeszkedő eszköztípust.

2.1.1. A kamerabeállítás paramétere

A kameraszenzorok legtöbbször kétdimenziós pixeltömböket tartalmaznak, melyek a fény intenzitását érzékelik, ezek a mérési adatok pedig sorosan vagy párhuzamosan egy kimeneti regiszteren keresztül továbbíthatók a feldolgozóegység felé. A szenzor felbontását (*Res* – Resolution) a vizsgált objektum legkisebb jellemzőjének mérete (*SFS* – Smallest Feature Size) és a kamera látómezője (*FOV* – Field of View) segítségével határozhatjuk meg. Az összefüggésben lévő paramétereket szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra A kamerabeállítás paramétere

Az alkalmazható legkisebb szenzorfelbontás két dimenziójának (Res_x , Res_y) meghatározásához az 1. összefüggések használhatók:

$$\begin{aligned} \min (Res_x) &= \frac{FOV_x}{SFS_x} \cdot 2 \\ \min (Res_y) &= \frac{FOV_y}{SFS_y} \cdot 2, \end{aligned} \tag{1}$$

ahol

FOV_x [m]: a látómező X dimenziója,

FOV_y [m]: a látómező Y dimenziója,

SFS_x [m]: a vizsgált objektum legkisebb jellemzőjének X dimenziója,

SFS_y [m]: a vizsgált objektum legkisebb jellemzőjének Y dimenziója.

A fókusz távolság (f) az objektív jellemző paramétere, a nagyítás mértékének meghatározására használt mérőszám, melyre a munkatávolság (d_w), a látómező (FOV) és a

szenzorméret (S) is hatással lesz. A szenzorméret két dimenziójának (S_X, S_Y) kiszámításához a kamera pixelméretét (P) és a felbontást használjuk fel a 2. összefüggések szerint:

$$\begin{aligned} S_X &= P_X \cdot Res_X [m] \\ S_Y &= P_Y \cdot Res_Y [m], \end{aligned} \quad (2)$$

ahol

$S_X [m]$: a szenzorméret X dimenziója,

$S_Y [m]$: a szenzorméret Y dimenziója,

$P_X [m]$: a kamera pixelméret X dimenziója,

$P_Y [m]$: a kamera pixelméret Y dimenziója,

Res_X : a szenzorfelbontás X dimenziója képpontban kifejezve,

Res_Y : a szenzorfelbontás Y dimenziója képpontban kifejezve.

A fókusz távolságot a 3. összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$f = S_X \cdot \frac{d_w}{FOV_X} = S_Y \cdot \frac{d_w}{FOV_Y} [m], \quad (3)$$

ahol

$d_w [m]$: munkatávolság,

$f [m]$: fókusz távolság.

A fókusz távolság meghatározásánál tehát a szenzorméret és a látómező tetszőleges dimenzióját felhasználhatjuk, a helyes érték meghatározásának követelménye, hogy mindkét jellemzőjének megegyező (X vagy Y irányú) dimenziójával számoljunk. Ennek szemléltetésére vizsgáljuk az alábbi lehetséges esetet: egy kamera felbontása 1280×720 pixel és a pixelméret mindkét dimenziója 4 μm. A rögzített képeken egy képpont 1 mm² felületet fed le a fizikai térben, tehát az objektum pixelméret (OPS – Objext Pixel Size) mindkét dimenziója 1 mm, így a látómező 1280 mm × 720 mm. A kamera szenzormérete ez alapján:

$$\begin{aligned} S_X &= P_X \cdot Res_X = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 1280 = 5,12 \cdot 10^{-3} m \\ S_Y &= P_Y \cdot Res_Y = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 720 = 2,88 \cdot 10^{-3} m \end{aligned} \quad (4)$$

A munkatávolság egydimenziós mennyiség és az egyes dimenziók számításánál állandó, ezért az 5. összefüggés helyességét vizsgáljuk:

$$\frac{S_X}{FOV_X} = \frac{S_Y}{FOV_Y} \quad (5)$$

A fenti példa értékeinek behelyettesítésével látható, hogy a két hányados értéke pontosan megegyezik:

$$\frac{5,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1280 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = \frac{2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{720 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \quad (6)$$

$$4 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3}$$

Mivel a lencsék csak bizonyos szabványos fókusztávolságokkal érhetőek el a piacon (pl. 6 mm, 9 mm, 12,5 mm), ezért az objektív kiválasztását követően a munkatávolságot úgy kell beállítani, hogy a vizsgált munkadarab a fókuszpontban helyezkedjen el [33].

2.1.2. Képrögzítési módszerek

Alapvetően két technológiát különböztethetünk meg, az area scan és line scan kamerákat. Az area scan kamerák egy időben egy pixelterületet rögzítenek, a line scan kamerák esetén a képrögzítés sorról sorra történik, ezáltal egy gyorsabb adatgyűjtést biztosítva. Ez a módszer további feldolgozási feladatokat követel meg a rögzített képpontsorok egymáshoz illesztéséhez, a kép felépítéséhez. A line scan kamerák olyan alkalmazásokban előnyösek, ahol a vizsgált objektum mozgást végez, például egy szállítószalagon [17].

A képrögzítési módszert tehát az adott alkalmazás és a jelenet tulajdonságai szerint választjuk ki. Azért célszerű a tervezés első lépéseiben meghatározni, mert a világítási technika tervezésénél a képrögzítési módszer egy alapvető szempont. Area scan kamerák megvilágításánál a világítóegység geometriai kialakítása is fontos szempont, line scan kameráknál a fényforrás fotometriai tulajdonságaira kerül nagyobb hangsúly. A line scan kamerák megvilágításhoz kapcsolódó kihívások a 2.2 és 3. fejezetben kerülnek részletezésre.

A line scan kamerák fontos jellemzője az, hogy időegység alatt hány sornyi képpontot képesek olvasni. Erre a maximális sebességre, amellyel az expozíció és képolvasás megtörténhet, az angol szakirodalomban „line rate” elnevezéssel hivatkoznak és többnyire kilohertzben adják meg. Erre a mennyiségre a továbbiakban sorfrissítési frekvenciaként hivatkozom.

A line scan kamerák elterjedt alkalmazási területe a mozgó alkatrészek és termékek vizsgálata, például a szállítószalag felett [32] vagy a forgástengelyre merőlegesen elhelyezett forgó hengeres test előtt (pl. a nyomdaiparban). Ennek alátámasztásához nyolc line scan kamerát gyártó cég tanulmányait, kézikönyveit vettem alapul, amelyek a forgalmazott kamerák alkalmazási lehetőségeit és felhasználási módját ismertetik, illetve azt, hogy milyen ipari- és szakterületeken javasolt a használatuk.

Az Alkeria cég NECTA termékcsaládját nagysebességű mérésekhez javasolja ipari és orvosi területen. A kézikönyvben [2] található konkrét példában a kamera egy szállítószalagon szállított tárgyról készít felvételt. A szállítószalag sebessége nem állandó, ezért a kép torzulásának elkerülése érdekében a sorexpozíció kezdetét szinkronizálni kell a szállítószalagon elhelyezett forgójeladóval, amely triggerjel közvetlenül becsatolható a kamerába.

A Basler túl hosszú tárgyak, vagy akár végtelen anyaghalók vizsgálatára javasolja a line scan kamerák használatát [5]. Leggyakoribb felhasználási területként a minőségbiztosítási és válogatási eljárásokat nevezi meg.

A Chromasens prizma alapú és trilineáris line scan kamerákat hasonlította össze [11] ömlesztett anyagok vizsgálata esetén. A prizma alapú kamerákat gyakran választják, amikor ömlesztett anyagok vizsgálatáról van szó, mert a trilineáris kamerák velejáró vonaleltolódása csak akkor korrigálható, ha ismert a kamera mintavételi frekvenciája. Amikor ömlesztett anyagot szállítószalagon szállítanak, a tárgy sebessége általában jól ismert. Vannak azonban olyan alkalmazások is, amelyekre ez nem vonatkozik, például a szabadon eső ömlesztett anyag, ahol az egyes anyagdarabok közötti sebességeloszlás homogénnek tekinthető, és a légsúrlódás csak kis mértékben befolyásolja. Egy másik említett példa az ömlesztett anyag vizsgálata ferde síkon, ahol az egyes anyagdarabok közötti sebességeloszlást az anyag és a sík súrlódási együtthatója befolyásolja. Egy trilineáris vonal-szenzor esetében az ismeretlen tárgysebesség halo-effektust eredményezhet. A tanulmányban bemutatásra került, hogy a trilineáris kameraérzékelő típusának és konfigurációjának megfelelő kiválasztása a színes képminőség szempontjából egyenértékű egy prizma alapú kamerával. Ugyanez a cég egy másik tanulmányában a félvezetőgyártásból hoz példát [12], ahol minőségellenőrzési célra használnak line scan kamerákat. Ezzel a megoldással kisméretű, akár μm nagyságrendű repedéseket, karcolásokat, foltokat, forgácsolási és egyéb gyártási hibákat detektálnak a vizsgált alkatrészen, amely nagy sebességgel halad el a kamera előtt.

A Cognex szerint bár a line scan technológia számos előnnyel rendelkezik az area scan kamerákkal szemben, általában nehézkesnek tekintik a használatát, mivel a vizsgált alkatrészek mozgásban kell lennie, ismert sebességgel [14]. A vizsgált objektum mozgása változó lehet, ezért a megfelelő mintavételezéshez ismerni kell a tárgy sebességét. Ez egy hardveres forgójeladó, vagy virtuális, szoftveres kódoló használatával érhető el. A tanulmány több alkalmazási példát is összegyűjt, mint a hengeres tárgyak vizsgálatát, ahol az ívelt felületről kétdimenziós képet hozunk létre, vagy a szűkös helyen végzett vizsgálatokat. Utóbbi oka, hogy a kamerának a teljes kép elkészítéséhez csak a termék egy szeletét kell látnia, ahogy az elhalad a kamera mellett, ráadásul a megvilágítás is egyetlen pixeles vonalra csökken, ami leegyszerűsítheti az alkalmazás világítási igényeit és a szükséges hely sokkal kisebb lesz, mint amennyit az area scan kamerák igényelnek. A tanulmány ezek mellett a nagysebességű és nagy felbontásigényű vizsgálatokat emeli ki. A Cognex egy másik tanulmányában [15] kijelenti, hogy a kép elkészítéséhez mozgásra van szükség a kamera és az objektum között, általában szállítószalag vagy forgó tengely mentén. Alkalmazási példának szintén a gyorsan mozgó diszkrét alkatrészek rögzítését említi egy szállítószalagon, a hengeres tárgyak minden oldalának vizsgálatát és a nagyon nagy kiterjedésű tárgyak képeinek elkészítését. Műanyag, textil, fém vagy papír felületek diszkrét vagy folyamatos vizsgálatára egyaránt alkalmas.

A JAI szerint a nagy sebességű gyártás természetéből adódóan bizonyos termékeket csak line scan kamerákkal lehet vizsgálni, mely lehetővé teszi hosszú tárgyak vagy végtelen

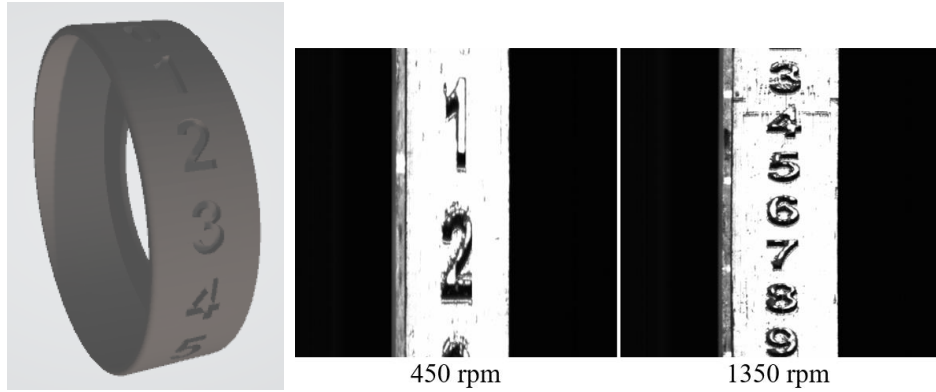
objektumok, például anyaghalók vizsgálatát [23]. Az elmúlt évtizedben a technológia az anyaghaló- és dokumentumszkenneléstől kibővült és ma már elterjedten használják a forgalom vizsgálat és útdíjfizetés, növényi, ásványi és szemcsés válogatás, vasúti kocsik- és pályavizsgálat, út- és kifutópálya-ellenőrzés, valamint fa- és üvegvizsgálat esetén is. A tanulmány az egyszorosos többsoros kamerák és a prizma alapú line scan kamerákat hasonlítja össze. Sok olyan gépi látási alkalmazás létezik, ahol a sebesség változó vagy ismeretlen. Az egyszorosos, többsoros kamerák felépítésük miatt nehezen tudják fenntartani a képminőséget ezekben a helyzetekben, míg a prizma alapú képminőséget ez nem befolyásolja. Ezenkívül a prizma alapú kamerák ideálisak olyan esetekben is, amikor a kamerát nem lehet merőlegesen elhelyezni a tárgy síkjára vagy a gyakori tárgyrezgések és hullámlások esetében, a zavaró halo-effektus elkerülése érdekében.

A Keyence a korábbi példákhoz hasonló alkalmazásokat sorol fel [27], mint a folyamatos vizsgálatokat (pl. gumilap szélességmérése, szennyeződések ellenőrzése), a hengeres testek, szállítószalagon szállított alkatrészek vagy folyamatosan érkező anyaghalók vizsgálatát.

A LUCID Vision Labs is a nagy sebességű alkalmazásokat említi [30], mint a papír-, műanyag- és fémgyártás folyamatos ellenőrzését, vagy a tárgyak mozgásának vizsgálatát, például vonat- vagy közúti forgalom esetén. Kiemeli az OCR-felismerést (postai küldemények, vonalkód-leolvasás), élelmiszer-válogatást, PCB-ellenőrzést, gyógyszerészeti vizsgálatokat és egyéb szállítószalag-alkalmazásokat, ahol a vizsgált tárgyak állandó mozgásban vannak.

A Teledyne DALSA szerint is olyan alkalmazásokhoz ideális ez a technológia, ahol nagy felbontású vagy nagy sebességű képrögzítésre van szükség [41], például folyamatos (papír, textil, fém vagy üvegszalag) anyaghalós alkalmazásoknál, vagy vasúti és közúti ellenőrzéshez, műholdképfeldolgozáshoz és felszíni topográfia szkenneléshez, továbbá jól működik a szabadon eső termékekkel, beleértve az olvadt üveget és acélt vagy a postai válogatást.

A felsorolt esetekben tehát a vizsgált tárgyat szállító vagy forgató berendezés forgási sebessége a gépi látás rendszer fontos bemeneti paramétere, hiszen ehhez kell hangolni a kamera sorfrissítési frekvenciáját. Ha a sorfrissítési frekvencia túl alacsony, akkor a rögzített képen az objektum képe összecúszhat, ha pedig túl magasra van állítva, akkor a kép szétesik. A 2. ábra bal oldalán lévő, karakterekkel ellátott tárcsafedő 3D nyomtatványát egy aszinkron motor tengelyére szerelt tárcsára helyeztem. A 2. ábra jobb oldalán azonos sorfrissítési frekvencia és különböző motor fordulatszámok mellett készült felvételek láthatók a tárcsafedőről.



2. ábra A sorfrissítési frekvencia beállításának jelentősége

A line scan kamerák hagyományos használatakor a minimális sorfrissítési frekvencia (f_s) meghatározásához a látómező (FOV) és felbontás (Res) hányadosából számítható objektum pixelméretet (OPS) és az alkatrész sebességét (v) használjuk fel a 7. képlet szerint:

$$\min(f_s) = \frac{v}{OPS} = \frac{v}{\frac{FOV_x}{Res}} = \frac{v \cdot Res}{FOV_x} \text{ [Hz]}, \quad (7)$$

ahol

v [m/s]: az alkatrész sebessége,

OPS [m]: az objektum pixelméret,

FOV_x [m]: a látómező X dimenziója,

Res : a vonalszenzor felbontása képpontokban kifejezve.

Az összefüggésben megfigyelhető, hogy az objektum pixelméret kiszámításánál a látómező X irányú dimenzióját használjuk. Ennek egyszerű oka, hogy a line scan kamera működéséből adódóan egy (vagy pár) sornyi képpontot olvas be, a sorfrissítési frekvencia egy pixelsor vételére és ennek megfelelően a kamera felbontása is az X irányú dimenzió értelmében.

2.1.3. Képzékelők

Leggyakrabban kétféle szenzortípust alkalmaznak gépi látás rendszerekben: CCD (Charge-Coupled Device – töltéscsatolt eszköz) vagy CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor – komplementer fénoxid félvezető) érzékelőket. A CCD érzékelők pixeleit rendszerint MOS kondenzátorok alkotják, amelyekben az expozíció során a foton abszorpció által generált elektronok tárolódnak [22]. Ez az elektronikus alkatrész alapján véve egy analóg léptetőáramkör (shift regiszter), amely az elektronikus töltéseket továbbítja. A legtöbb gépi látás rendszerben CCD szenzoros kamerát alkalmaznak [36].

A CMOS érzékelőkben a pixeleket fotodiódák építik fel. Minden egyes pixelhez elektronikus alkatrészek tartoznak, például tranzisztorok vagy erősítők, ezért az érzékelőket aktív-pixeles szenzoroknak nevezik [22]. Ez az időkritikus alkalmazásoknál lehet hasznos, ahol

a képnek csak egy bizonyos része lesz releváns. A CMOS érzékelők előnye a CCD szenzorokkal szemben az alacsonyabb előállítási költség és kisebb fogyasztás, amely következtében a CCD érzékelőket fokozatosan kiszorítják a piacról.

2.1.4. Kamerainterfészek

Az analóg kamerák esetén a kimeneti videójel egy folytonosan változó feszültségjel. Elterjedt analóg interfész szabványok például az RS-170, NTSC, CCIR és a PAL. Gépi látás rendszerek esetén leggyakrabban digitális kamerákat alkalmaznak [36], melyek a képet digitális adatként továbbítják a feldolgozóegység felé. A legelterjedtebb digitális kameráknál alkalmazott interfészek a Camera Link, az USB 3.0, a GigE (Gigabit Ethernet) Vision és IEEE 1394 szabványok, továbbá a nem szabványos párhuzamos interfész.

Az USB 3.0 előnye, hogy Plug and Play (automatikus eszközfelismeréssel bír) és az összes modern operációs rendszer támogatja. Kifejezetten gépi látás feladatokhoz készült és tudományos eszközök, kamerák, kábelek támogatják a Camera Link interfész szabványt. A GigE Vision szabványt nagy teljesítményű ipari kamerákhoz fejlesztették és a nagy sebességű videótartalom Ethernet-hálózaton keresztüli átviteléhez nyújt keretrendszert. Az IEEE 1394 szabvány egyszerű daisy chain (láncba fűzött) kábelezést tesz lehetővé [33] lassabb adatátviteli sebesség mellett.

Az értekezésben bemutatott kutatómunka során használt kamera GigE Vision interfésszel rendelkezik. A GigE Vision egy Etherneten alapuló kommunikációs interfész gépi látás alkalmazásokhoz. Ez az interfész szabványos CAT-5e/6 kábel vagy más, Ethernet által támogatott fizikai közeg használatával biztosít kapcsolatot a GigE Vision eszközök és hálózati kártyák között [4]. A GigE Vision rendszerek különféle hálózati topológiák szerint alakíthatók ki, a legegyszerűbb megoldás egy PC és egy GigE kamera közötti pont-pont kapcsolat. A kapcsolat létrehozásához az alkalmazás eszközfelderítést végez, hogy információt gyűjtsön a hálózaton lévő eszközökről. Ezt a folyamatot a GigE Vision Control Protocol (GVCP) üzenetváltással valósítják meg az eszköz és az alkalmazás között [4].

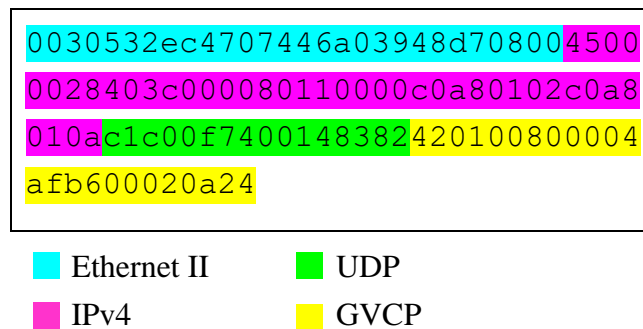
A GVCP egy alkalmazási réteg protokoll, amely az UDP szállítási réteg protokolljára épül és lehetővé teszi az alkalmazás számára az eszköz konfigurálását és stream csatornák létrehozását az eszközön. A GVCP alatt az alkalmazás a master, az eszköz pedig a slave szerepét tölti be. A parancs- és nyugtázó üzenetek egy csomagban kerülnek továbbításra. Az alkalmazás megvárja a nyugtázó üzenetet, mielőtt elküldi a következő parancsüzenetet, így egy egyszerű kézfogásos vezérlést (handshaking) biztosít [4].

A GigE Vision Streaming Protocol (GVSP) egy alkalmazási réteg protokoll, amely az UDP szállítási réteg protokolljára épül. Ez a protokoll lehetővé teszi, hogy a GVSP vevő képadatokat vagy más információkat fogadjon a GVSP adótól. A specifikáció jelenlegi verziója az UDP IPv4-et használja szállítási réteg protokollként. Az adatblokk több elemre van felosztva, hogy a GVSP vevőt ellássa a blokk dekódolásához szükséges információkkal. Az adatblokkot a Data Leader (vezérlőinformáció) indítja, amely információt ad az üzenet

típusáról. Ezt követi a Data Payload, amely az aktuális adatfolyamot tartalmazza. Végül a Data Trailer zárja az adatblokkot, jelezve annak végét [4].

A hálózati csomagok olyan bitsoportok, amelyek vezérlőinformációkkal kiegészített adatokat tartalmaznak. Ezek az adategységek vezérlő információkból (például forrás- és cél cím, hibadetektáló kódok) és hasznos adatból állnak, és az OSI-modell szerinti 3. (hálózati) rétegen keresztül továbbítódnak. Az OSI-modell 2. (adatkapcsolati) rétegében egy adategységet keretnek, a 4. (szállítási) rétegben szegmensnek nevezünk [39]. Bár az Ethernet 1. (fizikai) rétege nem kapcsolódik szorosan a hálózatelemzéshez, itt végezhető el a pontos időbélyegzés [9], ami a csomagképletelés mérésének szempontjából fontos lehet.

A hálózati csomagelemző szoftverekkel naplózható a digitális hálózaton áthaladó hálózati forgalom. A rögzített csomagok a nyers adatok dekódolásával elemezhetőek és vizualizálhatóak a tartalom értelmezéséhez. A csomagelemzéshez hardveres és szoftveres implementációk is elérhetőek [39]. A GigE csomagok vizsgálatát a Wireshark nevezetű szoftver alkalmazásával végeztem el. A 3. ábrán egy vett GVCP csomag felépítése látható, amelyet a PC-n futó alkalmazás küldött a GigE eszköz számára a képrögzítés indítása előtt.



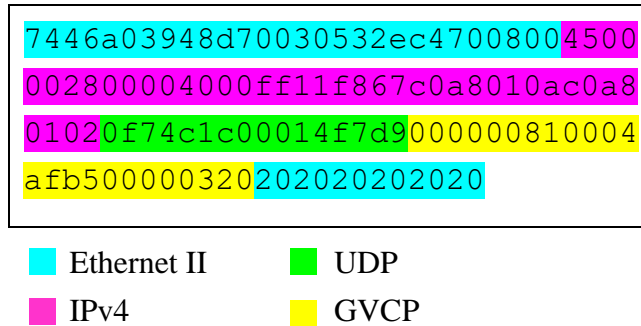
3. ábra A Wireshark szoftver segítségével elemzett GVCP csomag felépítése

Az Internet Engineering Task Force (IETF) a 3956-os portot jelölte ki szabványos GVCP portként. Több szolgáltatást nyújtó eszköz esetén ez az első szolgáltatáshoz kapcsolódó port [4]. Az UDP keretrész 12 bájttal hosszú és az 1. táblázatban látható GVCP protokollt használja.

GVCP mező	Hossz [byte]
Command Header (parancs fejléc):	8
- Message Key Code (üzenetkulcs kód)	1
- Flags (flag-ek)	1
- Command (parancs)	2
- Payload Length (üzenethossz)	2
- Request ID (kérés azonosító)	2
Custom Register Address (egyéni regisztercím)	4

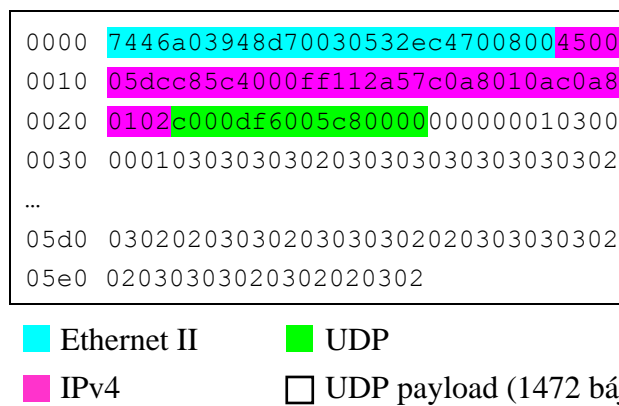
1. táblázat A GVCP mező felépítése

A kamerától kapott GVCP-csomagokban az Ethernet keret egy 6 bájtos Trailer mezőt is tartalmaz a csomag végén a 4. ábra szerint.



4. ábra Egy GigE kamerától érkező GVCP csomag felépítése a Wireshark elemzés alapján

A képrögzítés megkezdése után a GVSP csomagok tartalmazzák a képi adatokat. A GVSP szállítási réteg protokollként az UDP-t használja, így a csomagelemző felületén is UDP csomagokként jelennek meg a kamera által küldött adatok, ahogy az az 5. ábrán látható.



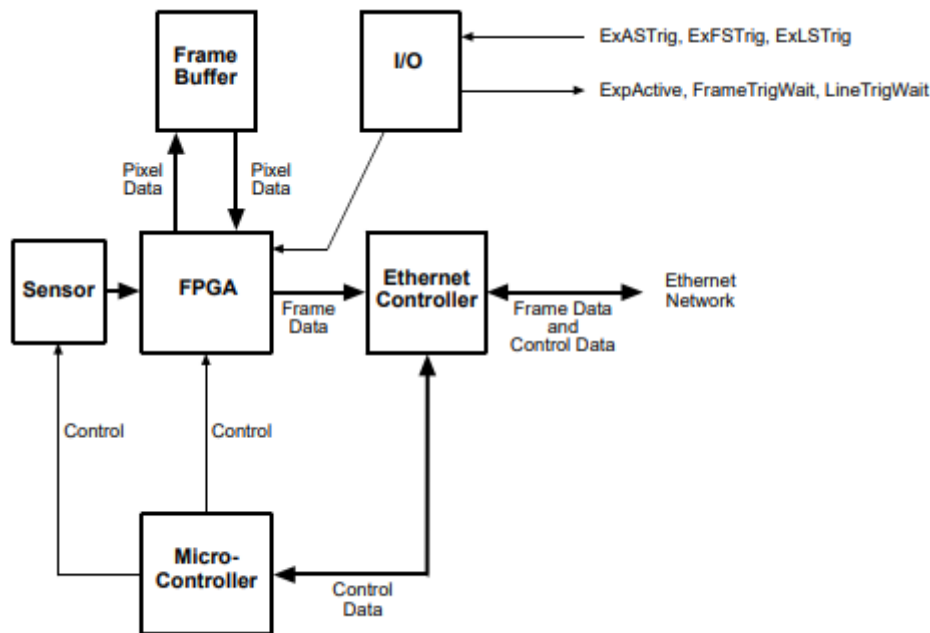
5. ábra GigE kamera által küldött UDP csomag felépítése (Wireshark elemzés)

A csomagok felépítését a GigE Vision szabvány tanulmányozásával és a csomagelemző szoftver által végzett mérésekkel sikerült feltárni [S3]. A mérések során az is bebizonyosodott, hogy bizonyos feladatokat a kameravezérlő alkalmazás végez el, és ezek függetlenek a képrögzítés során küldött GVSP csomagoktól. Például, bár a line scan kamera egyszerre csak egy sornyi pixelt olvas be, a kamera egyik bemeneti paraméterénél (AOI Controls / Height) megadható, hogy hány pixelsornyi legyen a ROI (Region of Interest – a vizsgált képterület). Ez az adat azonban nem jelenik meg az UDP csomagokban, mivel egy UDP csomag csak egy pixelsornyi adatot tartalmaz.

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a mérési feladatok megvalósíthatók a GVSP csomagok nyers adatainak feldolgozásával egy Gigabit Ethernet kommunikációra képes eszköz segítségével. A későbbi fejlesztési feladatokat azonban a kameragyártó által támogatott Python függvénykönyvtár (pypylon modul) és a National Instruments szoftvereszközei (NI MAX, NI-IMAQ, LabVIEW Real-Time Module) alkalmazásával valósítottam meg.

2.1.5. A kutatómunka során használt kamera

A kutatómunka során egy Basler racer raL2048-48gm típusú, GigE Vision kommunikációs interfésszel rendelkező monokróm line scan kamerát alkalmaztam. Az 51 kHz maximális sorfrissítési frekvenciát biztosító kamera egy mintavételi ciklusban egy 2048 képpont széles pixelsort olvas. Az eszköz 3 digitális bemeneti- és 2 digitális kimeneti csatornával rendelkezik az adatgyűjtés vezérléséhez és státuszának visszajelzéséhez (pl. trigger jelek fogadásához vagy az expozíciós jel küldéséhez). A kamera blokkdiagramja látható a 6. ábrán.



6. ábra Az alkalmazott line scan kamera felépítése [6]

A kamera belső adatfeldolgozásának és vezérlésének fő komponensei:

1. **„Sensor”**: A szenzor rögzíti az optikai információt, és az adatokat pixelek formájában továbbítja az FPGA (Field Programmable Gate Array – programozható logikai kapuáramkör) felé. A szenzor a kamera központi képérzékelője, amely a képadatok digitalizálásának első lépése.

2. **„FPGA”**: Az FPGA felelős a beérkező képadatok feldolgozásáért és továbbításáért. A szenzortól érkező pixeladatokat feldolgozza és részben továbbítja a „Frame Buffer” felé, amely az ideiglenes adattárolásért felel.

3. **„Frame Buffer”**: Ez az egység ideiglenesen tárolja a képadatokat az FPGA-tól, mielőtt azok továbbítódnak az Ethernet vezérlőhöz. A puffer biztosítja a folyamatos adatáramlást a nagy sebességű képrögzítés során.

4. **„Ethernet Controller”**: Az Ethernet vezérlő a GigE Vision szabványnak megfelelően kezeli a képadatok és vezérlőjelek átvitelét az Ethernet hálózaton keresztül.

5. **„Microcontroller”**: A mikrovezérlő felelős a vezérlőjelek és a kamerabeállítások kezeléséért.

6. „**I/O**”: Az I/O (Input / Output – bemenet / kimenet) interfész kezeli a be- és kimeneti jeleket (pl. trigger jelek). Ez fogadja a külső jeleket, mint a trigger bemenetek (pl. „ExASTrig”), és kimeneti státuszjeleket biztosít (pl. „ExpActive”), amelyekkel a kamera és más rendszerek közötti szinkronizáció biztosítható.

A kameratulajdonságok a kamera által vannak definiálva, melyekhez a GenICam (Generic Interface for Cameras) technológia biztosít hozzáférést. A kamerában található egy GenICam XML leíró fájl, amelyből egy fordító egy GenAPI nevű alkalmazásprogramozási felületet generál. A megfelelő regiszterekben lévő paraméterek olvasásával, illetve írásával érhetők el a kamerában lévő funkciók és tulajdonságok, mint a pixel formátum vagy az expozíciós idő. A GigE Vision szabványban követelmény, hogy a GigE interfésszel rendelkező kamerák biztosítsák ezt az XML leíró fájlt.

2.2. A megvilágítás tervezési szempontjai

A képrögzítő eszköz kiválasztása után alaposan meg kell fontolni, hogy milyen fényforrást és megvilágítási technikát alkalmazzak a rendszerben. A megfelelő minőségű világítás biztosítása érdekében figyelembe kell venni a fény hullámhosszát, terjedési szögét, intenzitását, meg kell terveznünk a világítóegység kialakítását és elhelyezkedését a kamerához képest.

A megfelelő világítás a kamerás vizsgálatok egyik nélkülözhetetlen eleme, inhomogenitása nagymértékben befolyásolja a gépi látást alkalmazó vizsgálati módszer pontosságát és robusztusságát. Egyre több tudományos vizsgálat és alkalmazás fókuszában áll a megvilágítás, amellyel speciális mérési feladatok is elvégezhetők, világítás kompenzációs technikákat használnak például a talaj felületi érdességének meghatározására [25].

2.2.1. Fényforrások

A gépi látás alkalmazásokban leggyakrabban fluoreszcens, fémhalogén, LED, kvarc halogén és xenon fényforrásokat használnak. Kisebb méreteknél jellemzően fluoreszcens, LED és kvarchalogén fényeket, nagyméretű alkalmazásoknál, vagy ahol nagyon erős fényforrásra van szükség, xenont és fémhalogént használnak. Kamerás vizsgálatoknál a fény spektrális összetételét is figyelembe kell vennünk a tervezés során, össze kell hangolni a fényforrás kimeneti spektrumát a kamera spektrális érzékenységgel. A mikroszkópos vizsgálatoknál gyakran egy teljes spektrumú kvarc halogén vagy xenon fényforrást használnak, különösen színes képeken. A monokróm LED fényforrás megfelelő fekete-fehér CCD kameránál és színes alkalmazásokban is [34].

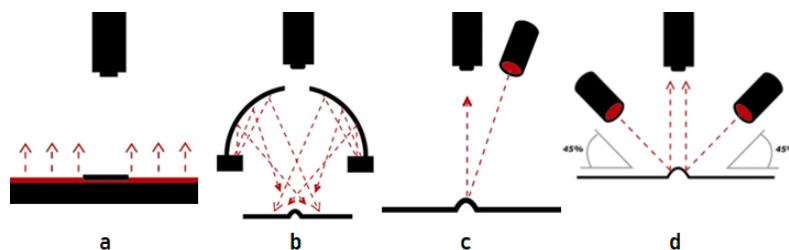
Az optimális megvilágítás kialakítása érdekében figyelembe kell venni a vizsgálat közvetlen környezetét, majd a vizsgált minta és a fény közötti kölcsönhatásokat. A környezeti fény befolyásolhatja a vizsgálat eredményét, ezért ki kell küszöbölnünk villanófénnyel, szűrővel vagy egy burkolattal. A minta és a fény kölcsönhatását a minta felületének alakja, a fényforrás elhelyezkedése, a minta és a fény színe is befolyásolja. A különböző anyagok a fény különböző

hullámhosszait más-más módon tükrözik vissza vagy nyelik el. Míg a felület színével azonos színű fények a felületet világosabbá teszik, addig az eltérő színek elnyelődnek és sötétebbé teszik azt [34]. A megfelelő színkeveréssel tehát kontrasztot lehet képezni a háttér és a vizsgálni kívánt felület között.

A felületi érdesség, a fényesség és a felület színe nagy mértékben befolyásolják a színállandóságot [28]. A fényes és sima felületek nagyobb színállandósággal rendelkeznek, mint az érdes és matt felületek. A megvilágítás változása vagy az objektum elmozdítása a kamerához képest befolyásolni fogja az objektum színeit és következtetésképp annak felismerését.

2.2.2. Megvilágítási technikák

Az ipari gépi látás rendszerekben leggyakrabban alkalmazott megvilágítási technikák a háttérvilágítás, a diffúz-, az irányított- és a sötéltátóteres megvilágítás, amelyet a 7. ábra szemléltet.



7. ábra Az ipari rendszerekben alkalmazott különböző megvilágítási technikák [34]

A háttérvilágítás (7. ábra 'a' jelölésű kép) alkalmazásakor a világos háttér előtt lévő alkatrészek sötét sziluettjét vizsgálhatjuk. Ennek előnye, hogy éles kontrasztot hoz létre, mely által az élek detektálása és távolságok mérése könnyen elvégezhető, hátránya, hogy az ívelt tárgyak eltérítik a megvilágítás fényét. A diffúz megvilágítást leggyakrabban fényes, visszatükröződő minták esetén alkalmazzák, ahol egyenletes, de többirányú fényre van szükség. Számos megvalósítása ismert, melyek közül a dóm vagy henger és az axiális diffúz megvilágítás a leggyakoribb. A dóm világítás (7. ábra 'b' kép) ívelt, tükröződő felületek megvilágításakor hatékony [34].

Az irányított (direkt) megvilágítás (7. ábra 'c' kép) a gépi látás rendszerekben leggyakrabban alkalmazott világítástechnikai megoldás, ahol tipikusan egy pontszerű fényforrásból történik a megvilágítás. Jó választás lehet kontraszt előállításához és a minta felületi jellemzőinek kiemeléséhez. A sötéltátóteres megvilágítás (7. ábra 'd' kép) alkalmazásakor a nagymennyiségű beeső fény egy tükröződő felületen, amely egyébként csillogó részekkel árasztaná el a képünket, nem a kamera felé, hanem attól eltérő irányba verődik vissza. A kamerába visszaverődő fényvel pedig egy kisebb jellemző éleit lehet detektálni, ahol a fényvisszaverődés szöge megegyezik a beesési szöggel [34].

3. Megvilágítási módszer kidolgozása line scan kamerákhoz

A line scan kamerák csak egy (vagy néhány) sornyi képpontot olvasnak be egy mintavételi ciklus során és a szenzorfelületük sokkal kisebb, mint a hagyományos area scan kameráké. A megvilágítás kialakításakor emiatt nem a világítóegység geometriája lesz a fő tervezési szempont ebben az esetben, így egy egyszerű sorvilágítás alkalmas lesz a megfelelő szögpozícióban elhelyezve a vizsgált objektum előtt. Fontosabb tényező, hogy a rövid expozíciós idő miatt a kamerának nagyobb fényintenzitásra van szüksége ahhoz, hogy elegendő fényt gyűjtsön be a képalkotáshoz.

Az ipari gépi látás rendszerekben elterjedten alkalmaznak LED fényforrásokat, hosszú élettartamuk, alacsony fogyasztásuk és gyors válaszidejük miatt. A LED fényforrások vezérlése történhet konstans feszültséggel és impulzussorozattal. Az állandó feszültséggel történő vezérlés előnyei közé tartozik az egyszerűség és a megbízhatóság, mivel nincs szükség speciális vezérlésre vagy időzítésre. A LED fényerőssége közvetlenül függ a feszültségtől és a megfelelő fényintenzitás beállítása is könnyű. Ugyanakkor a konstans feszültség miatt a LED élettartama rövidebb lehet a folyamatos terhelés miatt, ami hőt termel.

Impulzusvezérlés alkalmazása esetében a LED fényforrás rövid ideig tartó, de intenzív fényvillanásokat bocsájt ki. Az impulzussorozatot a kamera mintavételi frekvenciájához igazítva kell időzíteni, hogy a kamera megfelelően érzékelje a megvilágítást. Ennek előnye a LED élettartamának meghosszabbítása, mivel a LED csak rövid ideig világít, így kevesebb hőt termel. Az impulzussorozatos vezérlés lehetővé teszi, hogy a kamera expozíciós időszakában pontosan szabályozzuk a megvilágítási időtartamot, ami élesebb és tisztább képeket eredményezhet. Továbbá, a LED fényforrásokat impulzussorozatokkal vezérelve lehetőség van a fényintenzitás szabályozására is az impulzusszélesség változtatásával.

A megfelelő minőségű felvételek előállítására érdekében meghatározó a megvilágítás frekvenciája. A line scan kamerák jellemzően magas (több 10 kHz) sorfrissítési frekvencián végzik a mintavételezést, emiatt pedig a megvilágítás frekvenciájának megfelelően nagy mértékűnek kell lennie ahhoz, hogy minden egyes felvételkor megfelelő világítás érje az érzékelőket. A megvilágítás frekvenciájának legalább a kamera sorfrissítési frekvenciájával megegyezőnek kell lennie a megfelelő szinkronizáció és tiszta képalkotás érdekében.

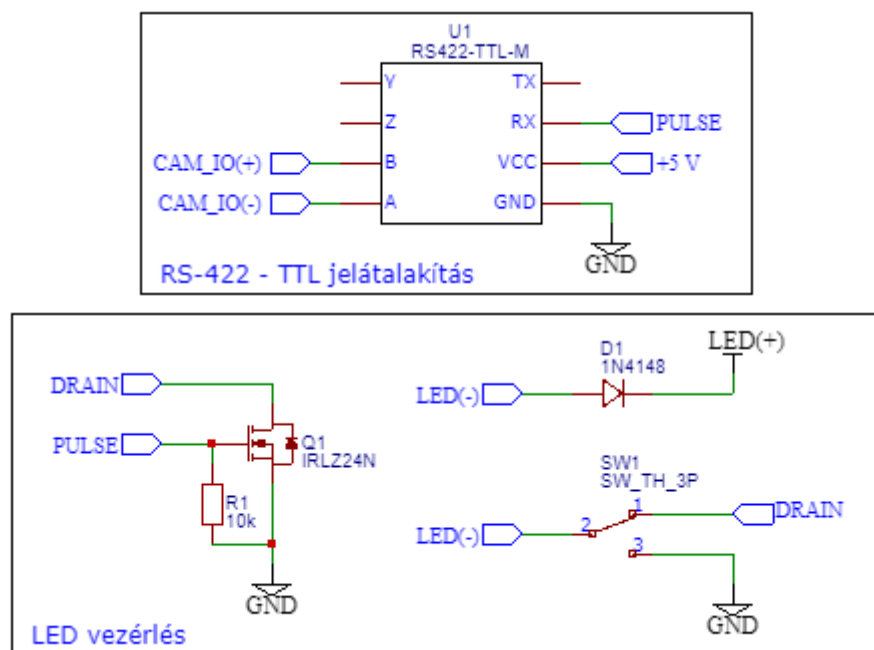
Az ipari kamerák többsége jelezheti az aktív expozíciós időt a képfelvétel során. Ez az információ lehetővé teszi a világítás vezérlését az expozícióval összehangolva. Amikor az expozíció aktív, a megfelelő pillanatban lehet indítani vagy szabályozni a megvilágítást annak érdekében, hogy a rögzített képek megfelelő minőségűek legyenek. Az értekezésben összefoglalt kutatómunka során használt kamera 3 digitális bemenettel és 2 digitális kimenettel rendelkezik, melyek az RS-422 szabványnak megfelelő szimmetrikus átviteli vonalakat biztosítanak. Az RS-422 szabvány egy szimmetrikus átvitelt megvalósító (differenciális feszültségmérésen alapuló) soros kommunikációs szabvány, amely nagy megbízhatóságot és zajmentes adatátvitelt biztosít. A differenciális jelátvitel javítja a jel immunitását az

elektromágneses interferenciával szemben, ami különösen fontos ipari alkalmazásokban, ahol gyakoriak a zavaró hatások.

A kamera digitális kimenetének világításvezérléshez való felhasználásakor a kimeneti jelet egy vezérlő áramkör fogadja, amely ezt az információt LED fényforrás vezérlésére használja fel. Az RS-422 jel által vezérelt áramkör szabályozza a LED világítását, szinkronizálva azt a kamera expozíciós időszakával. Ez a megoldás több előnnyel is rendelkezik. A kamera digitális kimenetének felhasználása egyrészt lehetővé teszi a pontos szinkronizációt a kamera expozíciós időszakával, amely így javítja a képfeldolgozás pontosságát és megbízhatóságát.

A I/O vonalakkal történő világításvezérléshez a kamera „ExpActive” kimeneti jelét használtam (lásd 6. ábra), amely minden egyes képpontsor beolvasásakor, az expozíció kezdetekor magas jelszintre vált, annak végén pedig alacsony jelszintre.

Világítóegységként három 10 W teljesítményű, sorba kapcsolt LED-ből kialakított sorvilágítást alkalmaztam. Ennek a vezérléséhez egy MOSFET-alapú áramkört építettem a 8. ábra szerint, amelyen megfigyelhető, hogy az RS-422 adatokat előzetesen egy unipoláris, bináris jelsorozattá szükséges alakítanom. Ehhez egy olyan átalakító modult használtam, amely már rendelkezik az olyan, a kommunikációhoz szükséges áramköri elemekkel, mint a 120 Ω -os lezáró ellenállások.



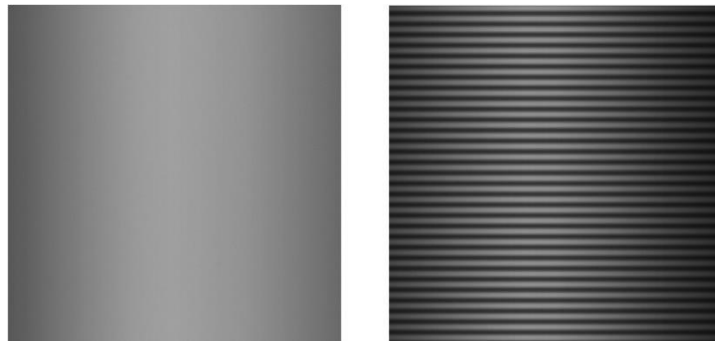
8. ábra Az alkalmazott világításvezérlő áramkör a kamera I/O vonalaival

Az áramkört teszteltem és az elvárásoknak megfelelően működött, a kamera expozíciós jelével megegyező frekvenciájú és kitöltési tényezőjű vezérlőjellel egységes világítást valósított meg. A hagyományos, kamera I/O vonalakkal történő világításvezérlési módszer hiányossága azonban, hogy a fényforrások vezérléséhez szükséges impulzussorozat az expozíció jel alapján állítja elő, így nincs visszacsatolásunk a rögzített és feldolgozott képi

adatokról és az RS-422 vonalak használatához egy további jelátalakító áramkör beépítésére van szükség.

Ennek következtében egy alternatív megvilágítási módszer kidolgozását tűztem ki célul, amely lehetőséget biztosít a képi adatok visszacsatolására, ezáltal a LED fényforrások vezérlőjelének szabályozására.

A világítás későbbi teszteléséhez egy egyszínű, mintázat nélküli tesztlapot helyeztem a kamera elé. Ha egy felvételi periódusban nem megfelelő a világítás (csak az expozíció idejének egy részében aktív), az a rögzített képen sötétebb pixelsorként jelentkezik. Ez a jelenség látható a 9. ábrán.



9. ábra Konstans feszültséggel (bal oldali ábra) és impulzussorozattal (jobb oldali ábra) vezérelt LED megvilágítás hatása a felvételekre

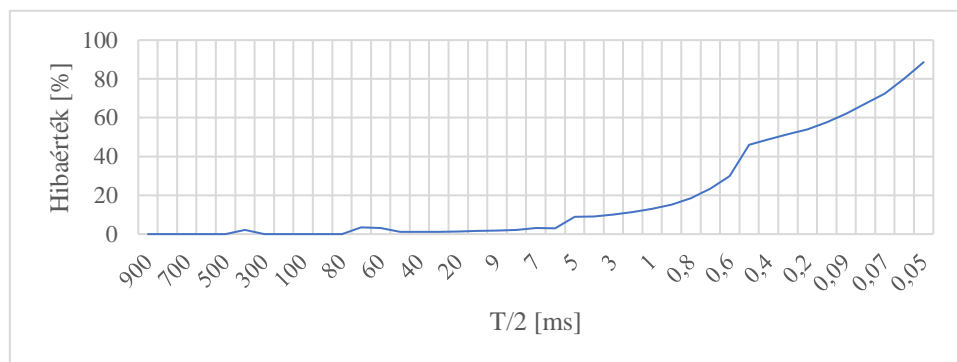
Az 51 kHz sorfrissítési frekvenciával készült képek közül a bal oldali felvételen (9. ábra) konstans feszültséggel, a jobb oldali felvételen (9. ábra) pedig 50 kHz impulzussorozattal vezéreltem a világítóegységet a 8. ábrán lévő LED vezérlő áramkörrel, amely impulzus („PULSE”) bemenetét egy Altera Cyclone II FPGA szolgáltatta.

Az alternatív megvilágítási módszer célja, hogy a világításvezérlő egység a kamerán beállított sorfrissítési frekvencia, illetve a feldolgozott képi adatok alapján olyan impulzussorozatot hozzon létre, amely nem eredményez a rögzített képeken sötét (megvilágítás nélküli vagy gyengén megvilágított) pixelsorokat. A javasolt világításvezérlési módszer alkalmazásához a kamerában beállított sorfrissítési frekvencia olvasása, a felvétel elemzése, majd ez alapján az impulzussorozat előállítása szükséges.

A sorfrissítési frekvencia olvasásához egy kameravezérlő alkalmazás implementálása szükséges, amely a kamera kommunikációs interfészén keresztül hozzáfér a kamerában lévő eszközeleíró fájlhoz és olvasni tudja az abban lévő regisztereket.

A kameratulajdonságok olvasásához és a rögzített felvételek feldolgozásához olyan eszközre van szükségünk, amely a megfelelő kommunikációs interfésszel rendelkezik a kameraadatok eléréséhez. GigE kamerák elérésére alkalmas a National Instruments IC-3120 valós idejű ipari vezérlőegysége és egy Raspberry Pi 4 (RPI) mikroprocesszor-alapú fejlesztőkártya is, melyek rendelkeznek Gigabit Ethernet porttal. A megvilágítás teszteléséhez a kameravezérlő alkalmazást ezeken az eszközökön implementáltam.

A több 10 kHz nagyságrendű impulzussorozat előállítására egy hagyományos mikroprocesszor-alapú vezérlőegység nem ideális, mert az általa futtatott operációs rendszereknél a feladatok ütemezése nem garantálja a valós idejű működést. Az operációs rendszer prioritásaitól és a háttérben futó egyéb folyamatoktól függően a válaszidők változhatnak. Ezt megvizsgáltam egy RPi-n futtatott tesztalkalmazással, amely különböző frekvenciájú, 50% kitöltési tényezőjű jelsorozatot állított elő, majd összehasonlítottam a generált jel számított és oszcilloszkóppal mért jellemzőit [S4]. A méréseket 0,5 Hz – 50 kHz közötti jeleken végeztem el. A 10. ábrán lévő diagramon az látható, hogy a mért félperiódusidők a várt értéktől hány százalékban tértek el.



10. ábra Mikroprocesszorral generált jelsorozat frekvenciahibái

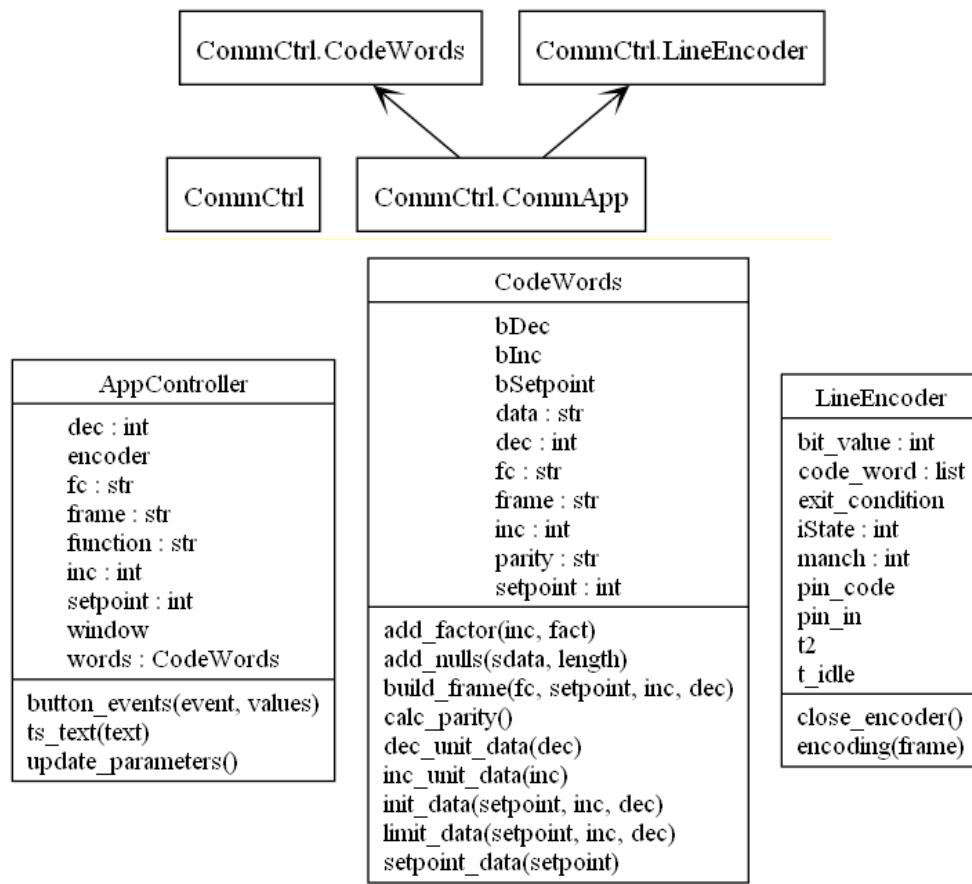
A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a LED vezérléshez szükséges, több 10 kHz nagyságrendű impulzussorozat előállítása nem valósítható meg ezen az eszközön. Egy FPGA precízebb megoldást nyújt erre a feladatra. Az FPGA-k belső architektúrája minimalizálja a késleltetést azáltal, hogy közvetlenül köti össze a logikai elemeket, emellett pedig dedikált hardveres erőforrásokat is tartalmaznak bizonyos műveletekhez, például DSP blokkokat, memóriablokkokat és PLL egységeket, amelyek nagy sebességgel és pontossággal képesek feldolgozni az adatokat.

A megvilágítás tesztelése során egy Altera Cyclone II típusú EP2C2T5 FPGA-val ellátott fejlesztőkártyát használtam erre a célra. Az eszköz egy 50 MHz frekvenciájú kivezetett órajellel és 2 PLL-lel rendelkezik. A feldolgozási frekvencia rugalmas változtatási lehetőségéért egy PLL által előállított órajelet használtam 10-100 MHz között. A mérések során megállapítottam, hogy a világításvezérléshez szükséges frekvenciát 1% pontossággal tudja biztosítani az eszköz.

Az RPi-vel megvalósított világításvezérlés esetén tehát az RPi-re a kameravezérlő- és képfeldolgozási funkciók implementálása miatt van szükség, az FPGA-alapú fejlesztőkártyára pedig a LED fényforrások vezérléséhez szükséges jelsorozat előállítása miatt. A frekvenciaszabályozáshoz szükséges numerikus adatok továbbítására a két eszköz között egy a feladatra optimalizált soros kommunikációs protokollt javasoltam [S4].

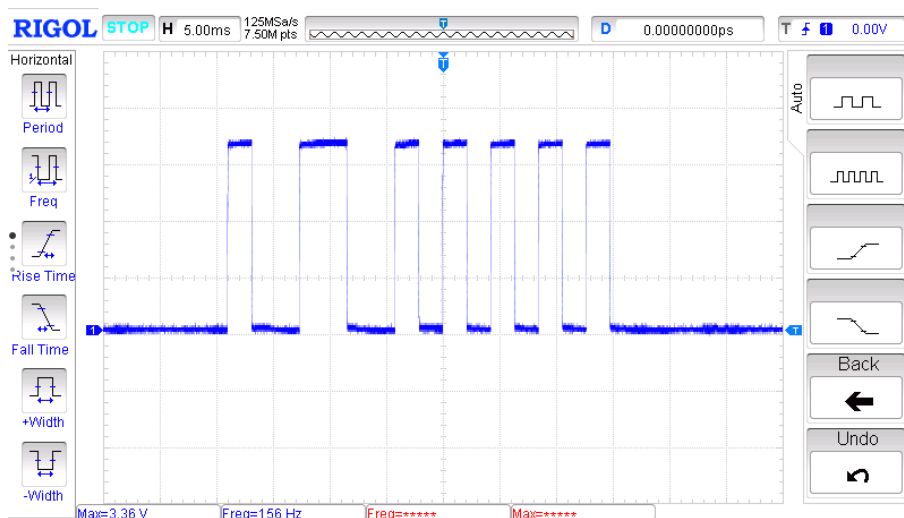
A működés tesztelésére egy olyan alkalmazást fejlesztettem az RPi-re, amely egy interfészt biztosít a felhasználó számára, amelyen keresztül adatokat küldhet és fogadhat a

kidolgozott kommunikációs protokoll segítségével. A fejlesztett Python alkalmazás csomag- és osztálydiagramja a 11. ábrán látható.



11. ábra A kommunikációvezérlő Python alkalmazás csomag- és osztálydiagramja

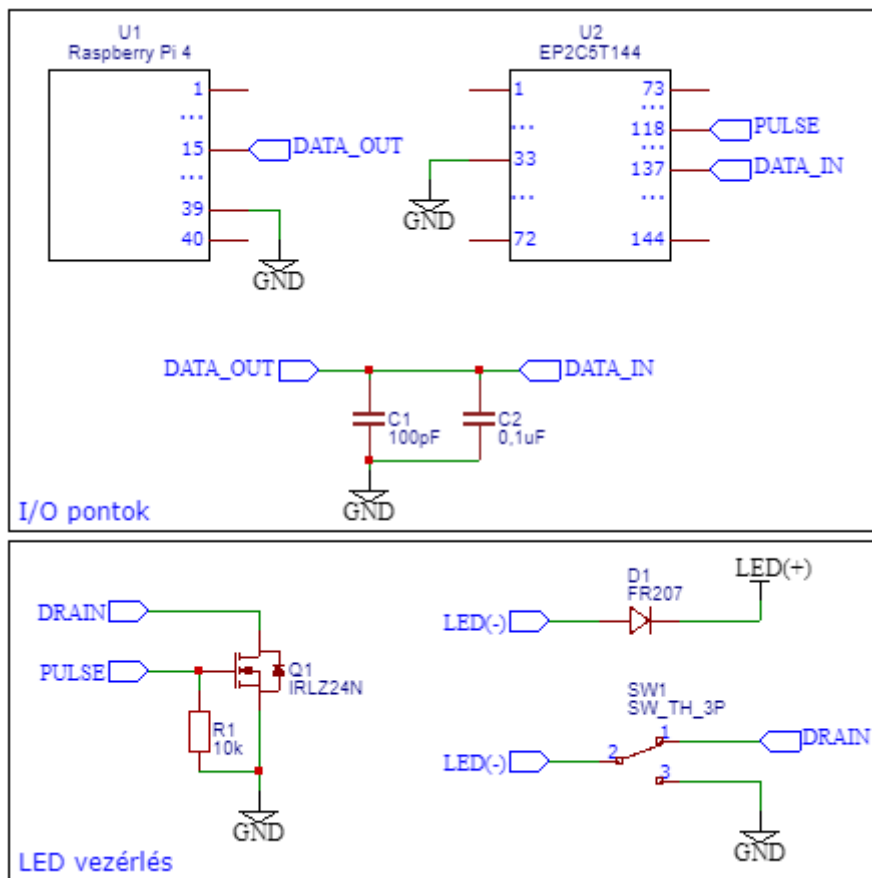
A kidolgozott protokollnak megfelelően implementáltam az adóegységként működő RPi kódoló funkcióit. A 12. ábrán egy frekvencianövelés parancs oszcilloszkóppal végzett mérési eredménye látható, melyet a 01011111 bitsorozat reprezentál.



12. ábra Frekvencianövelés parancs üzenet a mikroprocesszor felől

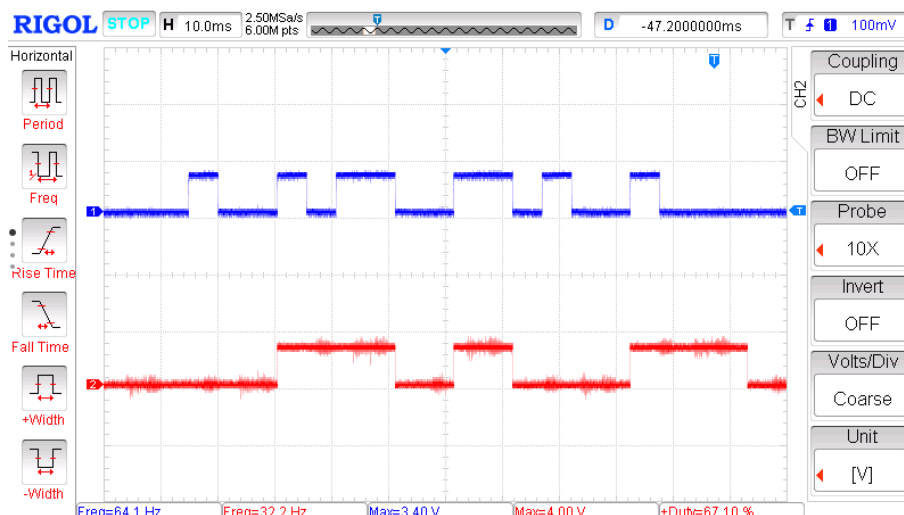
A világítóegység kapcsolási rajza látható a 13. ábrán. A 'DATA_OUT' a LED vezérléshez szükséges, a javasolt protokollnak megfelelő bitsorozatot az FPGA (EP2C5T144)

'DATA_IN' bemenetére küldi. Az előállított LED vezérlő impulzussorozatot a PULSE kimeneten szolgáltatja az FPGA.



13. ábra A Raspberry Pi-vel megvalósított világításvezérlés sematikus ábrája

Az üzenetek dekódolását az FPGA-n valósítottam meg a kidolgozott protokoll szerint. A 14. ábrán egy az RPi által kódolt- és az FPGA által dekódolt üzenet oszcilloszkóppal végzett mérési eredménye látható.



14. ábra Kódolt és dekódolt üzenetek az RPi és FPGA között

3.1. Az expozíció és világításvezérlő jelkarakterisztikák vizsgálata

A kameraexpozíció jel és a LED impulzussorozat különböző forrásokból származnak és nincs garancia arra, hogy a kezdőidőpontjuk megegyezik, mert a kameraexpozíció jelet a kamera szolgáltatja a leíró fájljában beállított sorfrissítési frekvencia alapján, a világításvezérlést pedig egy ettől független vezérlőegység valósítja meg. A két jel közötti szinkronizáció biztosításához a fáziseltolás alkalmazása szükséges a LED impulzussorozatnál. A fáziseltolás segítségével az impulzussorozat kezdőpontja eltolható, hogy az jobban igazodjon a kamera expozíciós jeléhez, így maximalizálva az átfedést és biztosítva a megfelelő időzítést.

Jelölje a kamera aktív expozíciós idejét reprezentáló jelfüggvényt $f(t)$, a LED bekapcsolási impulzussorozatát $g(t)$. Ebben az esetben a két függvény definíciója a 8. egyenletekkel adható meg.

$$f(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } (t) \bmod T_f < D_f \cdot T_f \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (8)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } (t - \varphi) \bmod T_g < D_g \cdot T_g \\ 0, & \text{egyébként,} \end{cases}$$

ahol

T_f [s]: a kameraexpozíció jel periódusideje,

D_f [%]: a kameraexpozíció jel kitöltési tényezője,

T_g [s]: a LED vezérlőjel periódusideje,

D_g [%]: a LED vezérlőjel kitöltési tényezője,

φ : a LED vezérlőjel fáziseltolása a kameraexpozíció jelhez képest.

Az aktív intervallumok (magas jelszintek idői) n periódus esetén:

$$f(t): [nT_f, nT_f + D_f T_f]$$

$$g(t): [nT_g + \varphi, nT_g + \varphi + D_g T_g]$$
(9)

A két görbe átfedési intervalluma egy perióduson belül az f és g függvény metszetével, a 10. összefüggés alapján adható meg.

$$O(f, g) = [nT_f, nT_f + D_f T_f] \cap [nT_g + \varphi, nT_g + \varphi + D_g T_g] \quad (10)$$

Az átfedési időpontok egy perióduson belül a 11. egyenlet szerint fejezhető ki:

$$t_0 = [t_{01}, t_{02}] = [\max(nT_f, nT_g + \varphi), \min(nT_f + D_f T_f, nT_g + \varphi + D_g T_g)] \quad (11)$$

Az átfedés intervallumának hossza N perióduson belül a 12. összefüggés által határozható meg.

$$I_o = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{t_{o1}}^{t_{o2}} 1 dt \quad (12)$$

A referenciajel integrálja N periódusra vonatkoztatva:

$$I_{ref} = N \cdot D_f T_f \quad (13)$$

Ahhoz, hogy a mintavételi időszakokban aktív legyen a megvilágítás, az a cél, hogy a két görbe átfedése a lehető legnagyobb legyen, azaz, hogy az átfedési integrál és a referencia integrál aránya minél inkább megközelítse az 1-et:

$$\frac{I_o}{I_{ref}} \rightarrow 1 \quad (14)$$

Ehhez a 15. összefüggésekben megadott feltételek teljesülése szükséges:

$$\begin{aligned} D_g &\geq D_f, \\ nT_g + \varphi &\leq nT_f, \\ nT_f + D_f T_f &\leq nT_g + \varphi + D_g T_g, \\ t_o &> 0. \end{aligned} \quad (15)$$

3.1.1. A jelkarakterisztikák vizsgálatának eredménye

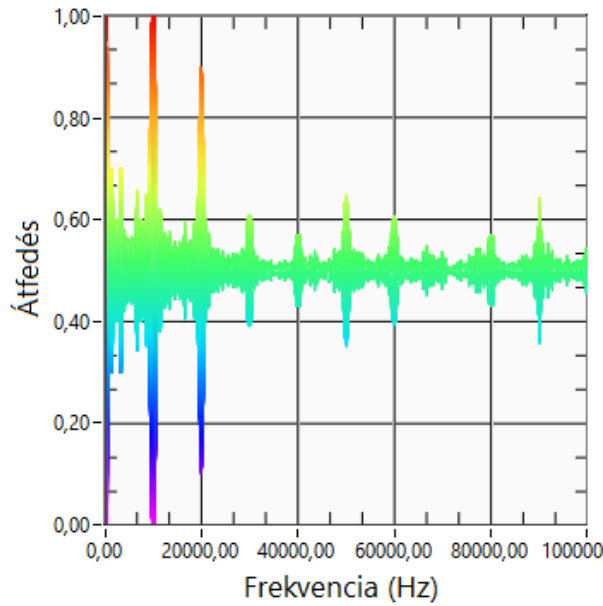
Megvizsgáltam, hogy a jelek frekvenciája és fázisa hogyan befolyásolják az átfedés mértékét. A vizsgálat során előállított referenciajel egy 10 kHz frekvenciájú, 27,6% kitöltési tényezőjű négyszögjel volt. A változó jel kitöltési tényezője 50% volt. A vizsgált adatmátrixok:

$$\text{Fázis } (^\circ): X = \{\varphi_i \mid \varphi_i = i, \text{ ahol } i = 0, 1, 2, \dots, 360\}$$

$$\text{Frekvencia } (Hz): Y = \{f_j \mid f_j = j \cdot 100, \text{ ahol } j = 0, 1, 2, \dots, 1000\}$$

$$\text{Átfedés}: Z = \left\{ R_{ij} \mid R_{ij} = \frac{I_o(\varphi_i, f_j)}{I_{ref}} \right\}$$

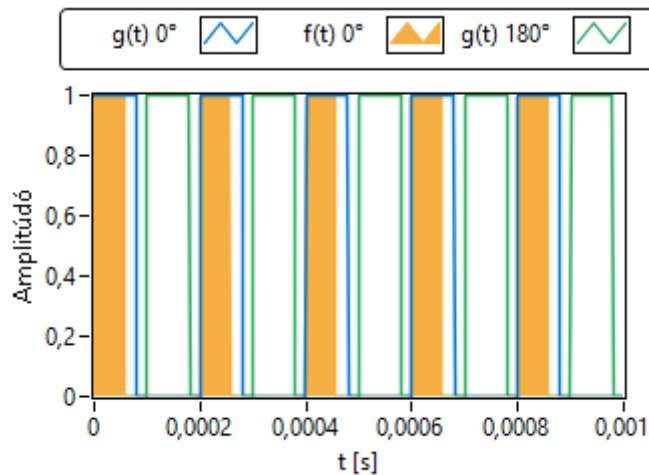
Az eredményekből megfigyelhető, hogy a 10 kHz frekvenciánál, kis fáziseltolás mellett az átfedési arány 1, mivel ez a referenciajel frekvenciája. A 0 Hz frekvencia a konstans feszültséggel történő világításvezérlést jelenti, ami azt eredményezi, hogy a LED folyamatosan világít, így az expozíció jel fedésének mértéke független a fáziseltólástól, és mindig maximális értéket mutat. 0-20 kHz között a nagyobb kitöltési tényező miatt a változójel gyakrabban átfedi a referenciajelet. A 15. ábrán az átfedés aránya látható a frekvencia függvényében:



15. ábra Az átfedés aránya a frekvencia függvényében

A 10 kHz frekvencia többszöröse esetén az átfedési értékek magasabbak, mint más frekvenciáknál, azonban ezek az értékek nem érik el az 1-et. Ilyenkor egy referenciajel periódus alatt több változójel periódus zajlik le és az alacsony jelszintű félperiódusok miatt az átfedés nem lehet 100%.

A 16. ábrán látható szimulált négyzetjelek frekvenciája egységesen 5 kHz, az $f(t)$ kitöltési tényezője 27,6%, a $g(t)$ jelek kitöltési tényezője 40%. Látható, hogy az expozíciós időben történő megvilágításhoz azonos frekvenciák mellett alapvető a helyes fázisbeállítás is.

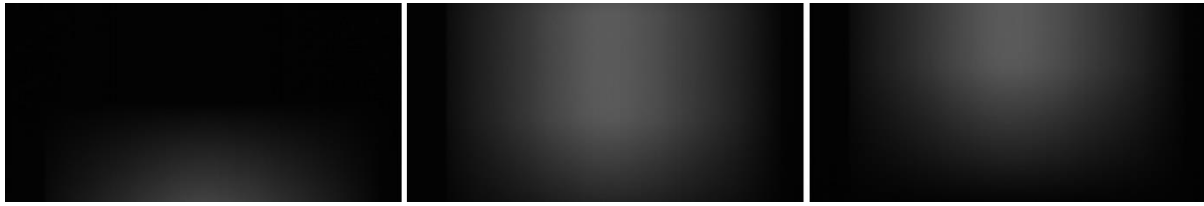


16. ábra A fáziseltolás jelentősége a világításvezérlés során

Amennyiben az $f(t)$ expozíció jel és a $g(t)$ világítás vezérlőjel megegyező frekvenciájú, a két jel teljes átfedését a $g(t)$ fáziseltolásának megfelelő beállításával biztosíthatjuk.

A gyakorlatban azonban a kamera mintavételi frekvenciája és a világításvezérlő által szolgáltatott jel frekvenciája különbözhet, ami interferenciát és az intenzitás változását okozhatja a rögzített képeken. Ezt szemlélteti a 17. ábra, ahol 20 kHz sorfrissítési frekvencia

mellett 20 kHz világítás alapjelet állítottam be, azonban a valós frekvenciák különbsége miatt változó intenzitású képpontsorokat rögzítettem:



17. ábra Frekvenciakülönbség okozta zavaró intenzitásváltozások

3.1.2. Algoritmus kidolgozása a pixelintenzitás becslésére a jelkarakterisztikák alapján

A jelenség megértéséhez és a frekvenciakülönbséget kompenzáló algoritmus későbbi fejlesztéséhez kidolgoztam egy olyan eljárást, amellyel az $f(t)$ expozíció jel és a $g(t)$ világítás vezérlőjel alapján megbecsülhető a jelgörbék átfedéséből adódó intenzitás az egyes pixelsorokra. Legyen $f[n]$ és $g[n]$ diszkrét időbeli megfelelője f -nek és g -nek f_s mintavételi frekvencia esetén a 16. egyenletek szerint.

$$f[n] = \begin{cases} 1, & \text{ha } \left(\frac{n}{f_s}\right) \bmod \left(\frac{1}{f_f}\right) < D_f \cdot \frac{1}{f_f} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (16)$$

$$g[n] = \begin{cases} 1, & \text{ha } \left(\frac{n}{f_s} - \varphi\right) \bmod \left(\frac{1}{f_g}\right) < D_g \cdot \frac{1}{f_g} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$$

Az $f[n]$ és $g[n]$ átfedési arányainak kiszámításához meg kell számolni azt a 17. egyenletek szerint, hogy az $f[n]$, illetve a $g[n]$ az $f[n]$ aktív időszakában hány mintavételi ciklusban szolgáltat magas jelszintet. Ezeket az értékeket az s_f és s_g tartalmazza N mintaszám esetén:

$$s_f[0] = 0, \quad s_g[0] = 0$$

$$\forall n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}:$$

$$s_f[n] = \begin{cases} s_f[n-1] + 1, & \text{ha } f[n] = 1 \\ 0, & \text{ha } f[n] = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$s_g[n] = \begin{cases} s_g[n-1] + 1, & \text{ha } f[n] = 1 \wedge g[n] = 1 \\ s_g[n-1], & \text{ha } f[n] = 1 \wedge g[n] = 0 \\ 0, & \text{ha } f[n] = 0 \end{cases}$$

Az átfedési arányokat tartalmazó O vektor a 18. egyenlet szerint fejezhető ki.

$$O = \begin{cases} 0 \cup \left\{ \frac{s_g[n-1]}{s_f[n-1]} \right\}, & \text{ha } f[n] = 0 \wedge f[n-1] = 1 \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (18)$$

Az O vektor elemszámának meghatározása $k = 0$ kezdőértékkel:

$$k = \begin{cases} k + 1, & \text{ha } f[n] = 0 \wedge f[n - 1] = 1 \\ k, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (19)$$

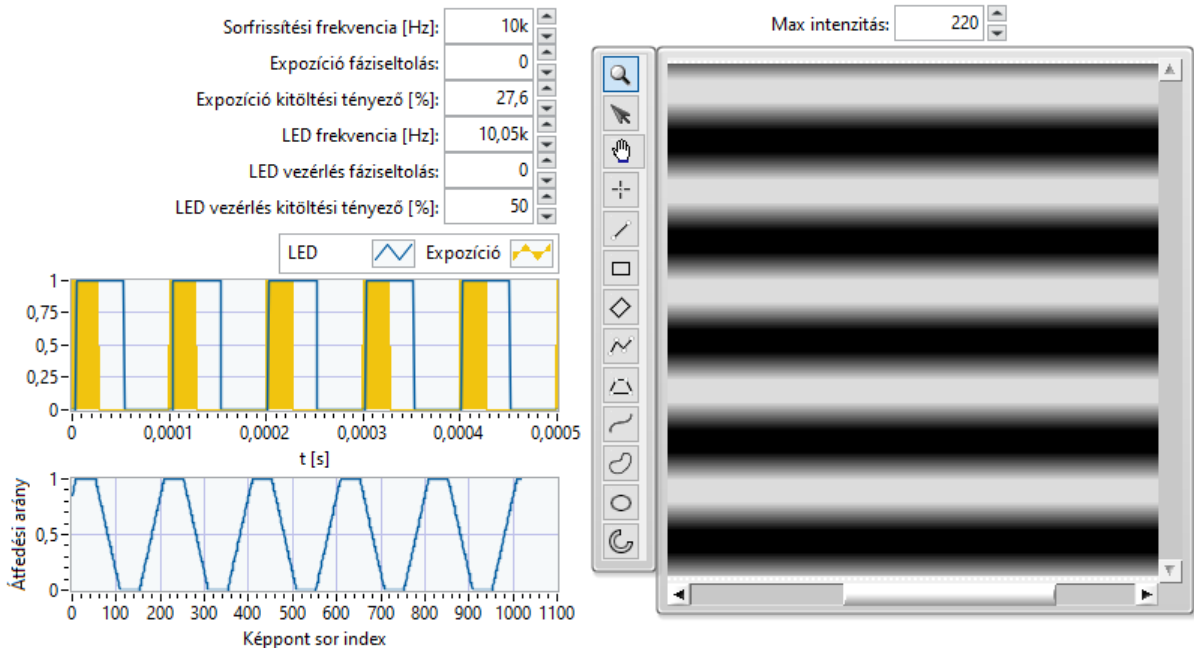
Amely az $f[n]$ impulzusainak számát jelenti a 20. egyenlet szerint, az adott N mintaszám alatt.

$$k = \left\lfloor \frac{N \cdot f_f}{f_s} \right\rfloor \quad (20)$$

Az O vektor átfedési arány adataiból létrehozható az a W képpont széles kép $Q[i, j]$ a 21. összefüggéssel, amelyet egy egyszínű felület $g(t)$ vezérlőjellel történő megvilágításával kapunk $f(t)$ expozíció mellett, ha a felvételen elérhető legnagyobb intenzitás érték I_{max} :

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, W - 1\}, \forall j \in \{0, 1, \dots, k - 1\}: Q[i, j] = [O[j] \cdot I_{max}] \quad (21)$$

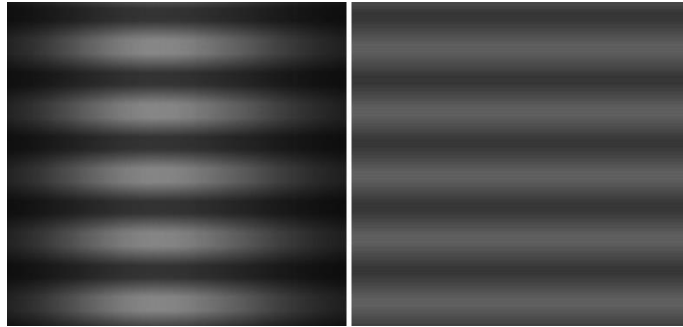
A képpont intenzitás becslésére kidolgozott algoritmust LabVIEW fejlesztőkörnyezetben implementáltam. Az alkalmazás felülete látható a 18. ábrán. A két vizsgált jel jellemzőinek (frekvencia, fáziseltolás, kitöltési tényező) beállításán túl a maximális intenzitásérték megadására van lehetőség a kezelőfelületen. A grafikonokon a két jel viszonya került ábrázolásra az időtengelyen való közelítéssel, illetve az egyes képpont sorokra kiszámolt átfedési arányok. A felület jobb oldalán az algoritmussal generált, szimulált felvétel látható.



18. ábra A pixelintenzitást becsülő algoritmus ellenőrzésére fejlesztett LabVIEW alkalmazás

A 19. ábra az algoritmus működését szemlélteti egy eredeti felvételhez viszonyítva. A bal ábrán az eredeti felvétel látható, amely 10 kHz sorfrissítési frekvencia mellett készült, 50 kHz LED megvilágítással. Ha a megvilágítás frekvenciájának alapjele és tényleges értéke megegyező (a világításvezérlő és expozíció jel pedig egymás többszöröse) lenne, akkor egy

homogén intenzitású képet kapnánk, a két jel közötti fáziseltolás az intenzitás értékét egységesen változtatná meg a felvételen. A jobb oldali képen látható a szimuláció eredménye, ahol a 10 kHz sorfrissítési frekvencia mellett 49,95 kHz világításvezérlő jelet állítottam be.



19. ábra A frekvenciakülönbségek hatása az eredeti és egy szimulált felvételen

A jelek beállított és valós frekvencia közötti, kismértékű (1% alatti) eltérése esetén is jelentős (periodikus) intenzitásváltozást okozhatnak a felvételen, amely a későbbi feldolgozási feladatok szempontjából hátrányos. Ennek következtében a világításvezérlés frekvencia alapjelét kompenzálni célszerű a felvételek kiértékelése alapján.

I. Tézis

Az O átfedési arány vektorból létrehozható az a W képpont széles kép $(Q[i, j])$, amelyet egy egyszínű felület $g(t)$ vezérlőjellel történő megvilágításával kapunk $f(t)$ expozíció mellett, ha a felvételen elérhető legnagyobb intenzitás érték I_{max} :

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, W - 1\}, \forall j \in \{0, 1, \dots, k - 1\}: Q[i, j] = \lfloor O[j] \cdot I_{max} \rfloor,$$

ahol

$$k = \left\lfloor \frac{N \cdot f_f}{f_s} \right\rfloor$$

$$O = \begin{cases} O \cup \left\{ \frac{s_g[n-1]}{s_f[n-1]} \right\}, & \text{ha } f[n] = 0 \wedge f[n-1] = 1 \\ O \text{ egyébként} \end{cases}$$

$$s_f[0] = 0, s_g[0] = 0, \forall n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}:$$

$$s_f[n] = \begin{cases} s_f[n-1] + 1, & \text{ha } f[n] = 1 \\ 0, & \text{ha } f[n] = 0 \end{cases}$$

$$s_g[n] = \begin{cases} s_g[n-1] + 1, & \text{ha } f[n] = 1 \wedge g[n] = 1 \\ s_g[n-1], & \text{ha } f[n] = 1 \wedge g[n] = 0 \\ 0, & \text{ha } f[n] = 0 \end{cases}$$

Magyarázat: Amennyiben az $f(t)$ kameraexpozíció jel és a $g(t)$ világítás vezérlőjel megegyező frekvenciájú, a két jel teljes átfedése a $g(t)$ jel fáziseltolás beállításával biztosítható. A megvilágítás ebben az esetben biztosítja a jelenet környezetétől függő

legnagyobb intenzitásértékeket. A gyakorlatban azonban a kamera mintavételi frekvenciája és a világításvezérlő által szolgáltatott jel frekvenciája különbözhet, ami a rögzített képeken zavaró, periodikus intenzitásváltozást okoz.

A jelgörbék átfedéséből adódó intenzitás az egyes pixelsorokra megbecsülhető a jelek $f[n]$ és $g[n]$ diszkrét időbeli megfelelőinek bevezetésével f_s mintavételi frekvenciával:

$$f[n] = \begin{cases} 1, & \text{ha } \left(\frac{n}{f_s}\right) \bmod \left(\frac{1}{f_f}\right) < D_f \cdot \frac{1}{f_f} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$g[n] = \begin{cases} 1, & \text{ha } \left(\frac{n}{f_s} - \varphi\right) \bmod \left(\frac{1}{f_g}\right) < D_g \cdot \frac{1}{f_g} \\ 0, & \text{egyébként,} \end{cases}$$

ahol

f_f [Hz]: a kameraexpozíció jel frekvenciája,

D_f [%]: a kameraexpozíció jel kitöltési tényezője,

f_g [Hz]: a LED vezérlőjel frekvenciája,

D_g [%]: a LED vezérlőjel kitöltési tényezője,

φ : a LED vezérlőjel fáziseltolása a kameraexpozíció jelhez képest.

Az I. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S5]

3.2. A frekvenciakülönbség kompenzálása

Az előző (3.1.2.) fejezetben bemutatott szimulációs algoritmus alkalmazásával méréseket végeztem, hogy megállapítsam a kameraexpozíció és a világításvezérlő jel közötti frekvenciakülönbség meghatározásának pontosságát. A kapott mérési eredmények alapján egy frekvenciakereső algoritmus kidolgozása vált szükségessé. A következőkben az algoritmus működését és a megelőző vizsgálatokat mutatom be.

A világítás frekvenciáját a felvétel periodikus intenzitásváltozásai alapján lehet szabályozni, ha a jel valamely jellemzője alapján meghatározható a frekvenciakülönbség. A vizsgálatot az intenzitásgörbe átmenetének hosszával (Δx) kezdtem. Megvizsgáltam, hogy a sorfrissítési frekvencia és a beállított- és valós frekvencia közötti különbség alapján hogyan változik Δx , az átmenet hossza az alábbi adatokkal:

- Sorfrissítési frekvencia [Hz]: $X = \{f_i \mid 1000 + f_i \cdot 500, \text{ ahol } i = 0, 1, 2, \dots, 97\}$
- Frekvenciakülönbség [Hz]: $Y = \{\Delta f_j \mid \Delta f_j = j - 500, \text{ ahol } j = 0, 1, 2, \dots, 1000\}$
- Változási szakasz hossz [px]: $Z = \{\Delta x_{ij}\}$

A Δx értékét a 22. összefüggéssel határoztam meg.

$$\Delta x = \delta \cdot (\max_index_O - (|R| - index_{R'})) + (1 - \delta) \cdot (\min_index_O - (|R| - index_{R'})), \quad (22)$$

ahol

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{ha } \max_index_O \leq \min_index_O \text{ (ereszkedő)} \\ 1, & \text{ha } \max_index_O > \min_index_O \text{ (emelkedő)}, \end{cases}$$

$$\min_index_O = \min(j \mid 0 \leq j < H \wedge O[j] = \min(O)),$$

$$\max_index_O = \min(j \mid 0 \leq j < H \wedge O[j] = \max(O)),$$

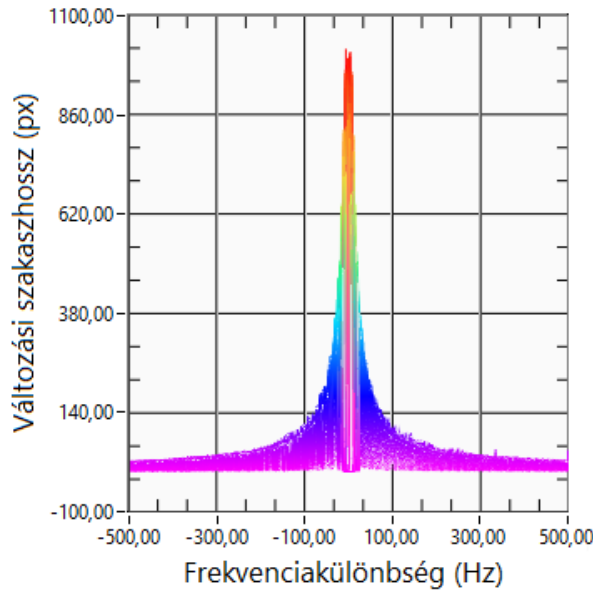
$$|R| = \delta \cdot (\max_index_O + 1) + (1 - \delta) \cdot (\min_index_O + 1),$$

$$index_{R'} = \min(i \mid R'[i] = \delta \cdot \min(R') + (1 - \delta) \cdot \max(R')),$$

$$R = \{O[j] \mid 0 \leq j \leq \delta \cdot \max_index_O + (1 - \delta) \cdot \min_index_O\},$$

$$R'[i] = \{R[\delta \cdot \max_index_O + (1 - \delta) \cdot \min_index_O - i] \mid i \in \{0, 1, \dots, |R| - 1\}\}.$$

Az átmenet hossza a frekvenciakülönbség függvényében látható a 20. ábrán egy $H = 1024$ képpont magas képen.



20. ábra Az átmenet hossza a frekvenciakülönbség alapján

A rezonanciajelenségek leírására gyakran alkalmazott Lorentz-függvény jól modellezheti az amplitúdó csúcsokat és a rezonancia szélességét. A Δx átmenet hosszt megadó függvény alakja Δf frekvenciakülönbség, f_s sorfrissítési frekvencia és γ csillapítási tényező esetén a 23. egyenlettel adható meg egy H képpont magas képen.

$$\Delta x = \left(\frac{H - 1}{\pi} \right) \cdot \frac{|\Delta f|}{\sqrt{\Delta f^2 + \left(\frac{\gamma(f_s)}{2} \right)^2}} \quad (23)$$

Amely alapján a frekvenciakülönbség abszolút értéke:

$$|\Delta f| = \sqrt{\frac{-\Delta x^2 \cdot \left(\frac{\gamma(f_s)}{2}\right)^2}{\Delta x^2 - \left(\frac{H-1}{\pi}\right)^2}} \quad (24)$$

A $\gamma(f_s)$ korrekciós tényező bevezetésével figyelembe vesszük a sorfrissítési frekvencia változásának hatását a szimulációs eredményeken. Ennek egy lehetséges közelítése, ahol γ_0 , k és m a szimulációs adatok alapján meghatározható paraméterek:

$$\gamma(f_s) = \gamma_0 + k \cdot f_s^m \quad (25)$$

A legjobb közelítés keresése során azonban, az algoritmus ellenőrzésekor 10% feletti átlagos hibát eredményezett. A közelítési módszer finomhangolható a $\gamma(f_s)$ összetett függvényként való alkalmazásával, további $k \cdot f_s^m$ tagok bevezetésével a 26. egyenlet által:

$$\gamma(f_s) = \gamma_0 + k_1 \cdot f_s^{m_1} + k_2 \cdot f_s^{m_2} + \dots + k_n \cdot f_s^{m_n} \quad (26)$$

További vizsgálatokat végeztem az intenzitásgörbe más jellemzőin, mint a fel- és lefutási meredekségén, azonban a vizsgálatok során arra a következtetésre jutottam, hogy a frekvenciakülönbség meghatározásának a számítási igénye az elérhető pontossághoz képest igen költséges (az olyan erőforrások, mint a szükséges memória és processzoridő tekintetében). Emiatt egy egyszerűbben megvalósítható, kisebb költségigénnyel rendelkező keresőalgoritmuson alapuló szabályozási módszer megvalósítását tűztem ki célul.

A javasolt frekvenciakereső algoritmus célja a világításvezérlő jel f_g frekvenciájának megállapítása, amely mellett a felvétel intenzitásértékeinek átlaga a lehető legjobban megközelíti I_{max} értékét, azt a maximális intenzitást, ahol az O vektor átlaga 1 és a varianciaértéke 0. A variancia a változó szóródását vagy változékonyságát méri az adatmátrixban, jelezve, hogy mennyire térnek el az értékek az átlagtól. Ez azt jelenti, hogy a legnagyobb varianciával rendelkező oszlop tekinthető a leginkább változónak. A variancia (σ^2) a 27. összefüggéssel fejezhető ki, ahol N a mintaszám, X_i az aktuális érték és μ a minta átlaga.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (X_i - \mu)^2 \quad (27)$$

Az algoritmus egy meghatározott tartományon belül, egy beállított lépésközzel, mindegyik frekvenciaértéket beállítja a világításvezérléshez, miközben folyamatosan gyűjti az O vektor átlag- és varianciaértékeit. A tartomány és lépésköz által meghatározott minden frekvencián több vizsgálatot végez a pontosabb adatok érdekében.

A keresőalgoritmus az átfedési arányokat tartalmazó O vektor átlagát és varianciáját vizsgáló feltétel teljesülésekor indul, ha az átlaga nagyobb, a varianciája pedig kisebb, mint egy megadott küszöbérték, azaz $K_\mu < \bar{O}$ és $K_{\sigma^2} > \sigma^2(O)$. A feltétel teljesülése után következik a világításvezérlő jel frekvenciájának folyamatos növelése a 28. egyenletek szerint és közben a felvétel elemzése.

$$\begin{aligned}
n_f[i+1] &= \begin{cases} 0, & \text{ha } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ n_f[i] + 1, & \text{egyébként} \end{cases} \\
n_r[j+1] &= \begin{cases} 0, & \text{ha } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ n_r[j] + 1, & \text{egyébként} \end{cases} \\
f_g[k+1] &= \begin{cases} f_g[0], & \text{ha } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ f_g[k], & \text{ha } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ f_g[0] - \frac{N_r \cdot \Delta f_g}{2} + \Delta f_g \cdot \left\lfloor \frac{n_f[i] + 1}{N_r} \right\rfloor, & \text{egyébként} \end{cases} \\
\mu[k+1] &= \bar{O} \\
\sigma^2[k+1] &= \sigma^2(O),
\end{aligned} \tag{28}$$

ahol

n_f : a mérési ciklusok száma az adott frekvencián,

N_f : a különböző frekvenciák maximális száma,

n_r : az adott frekvencián belüli ismétlések száma,

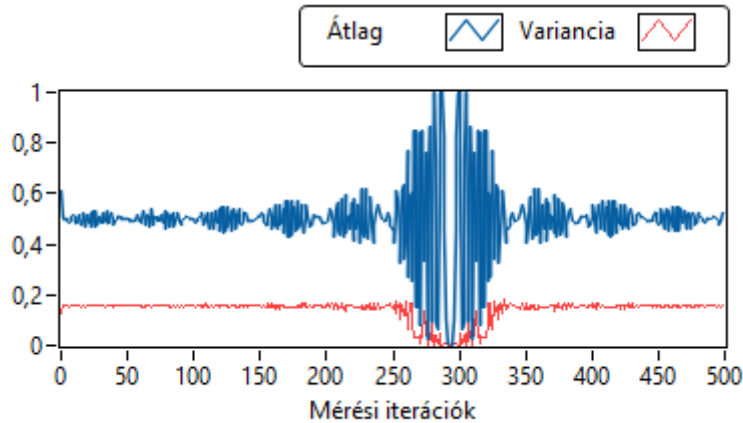
N_r : az adott frekvencián belüli maximális ismétlések száma,

Δf_g : frekvencia lépésköz,

μ : az $\bar{O}[j]$ átlag értékek vektora,

σ^2 : a $\sigma^2(O[j])$ variancia értékek vektora.

A 21. ábrán egy futtatás eredménye látható az $N_f = 100$, $N_r = 5$, $\Delta f_g = 1$ Hz és $f_g[0] = 9992$ Hz beállított paraméterekkel, miközben a keresendő f_s sorfrissítési frekvencia értéke 10 kHz.



21. ábra A frekvenciakereső algoritmus futási eredménye

Ha az $n_r[k] + 1 \geq N_r$ feltétel teljesül, az algoritmus kiértékeli az μ és σ^2 vektorok adatait. A grafikonon megfigyelhető, hogy a frekvenciák vizsgálata során az átlagértékek görbéjén egy széles csúcs alakul ki, amely a 10 kHz-es keresett frekvenciához közeli értékeket

jelzi. A cél a csúcs középpontjának meghatározása, mivel ez a pont reprezentálja a legnagyobb átlagos intenzitásértékeket és egyben a varianciaértékek minimumát.

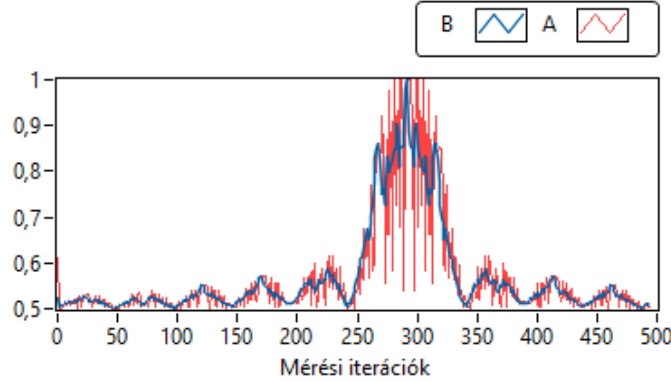
Az átlagértékeket ábrázoló görbe feldolgozásához elsőként meghatároztam a görbe $A(\mu_k) = [A(\mu_1), A(\mu_2), \dots, A(\mu_m)]$ amplitúdó értékeit a következő összefüggés által:

$$A(\mu_k) = \begin{cases} \mu_k, & \text{ha } \mu_k \geq \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \\ \max(\mu) + \min(\mu) - \mu_k, & \text{ha } \mu_k < \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \end{cases} \quad (29)$$

Az amplitúdógörbe simítása érdekében átlagolom az értékeit és hozzáadom a $B = [B_1, B_2, \dots, B_{m-n+1}]$ vektorhoz a 30. egyenlet szerint.

$$B_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=k-n+1}^k A(\mu_i), \text{ ha } k \geq n \quad (30)$$

Az így létrehozott A és B vektor értékeinek grafikonja látható a 22. ábrán.



22. ábra Az átlagértékgörbe amplitúdója és annak átlaga

A kidolgozott algoritmus a görbecsúcs c középpontjának kiválasztásához megkeresi azt a legkisebb és legnagyobb indexű iterációt, ahol a B vektorértékek egy küszöbérték feletti, majd meghatározza ezek számtani közepét. A csúcs megtalálásához szükséges küszöböléshez a legnagyobb és legkisebb átlagérték számtani közepét alkalmazom a 31. összefüggés alapján.

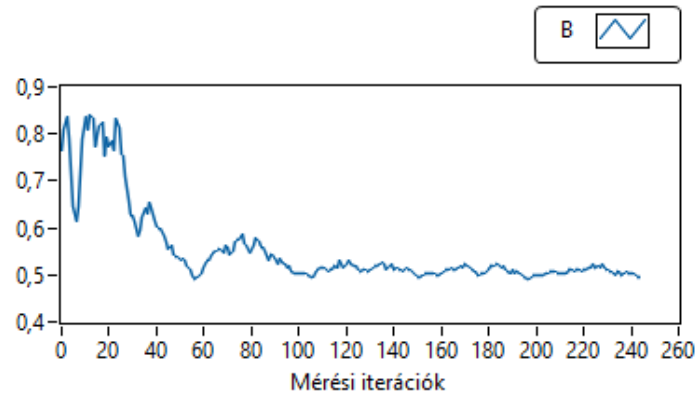
$$c_0 = \frac{i_{min} + i_{max}}{2}, \text{ ahol:}$$

$$i_{min} = \min \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\} \quad (31)$$

$$i_{max} = \max \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\}$$

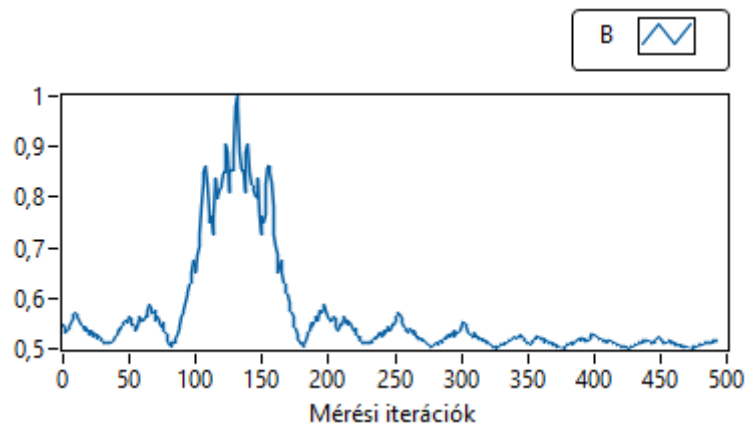
Amikor az első vagy utolsó iterációknál található a keresett frekvencia, a vizsgált görbe nem tartalmaz egy teljes csúcsot, mint a 23. ábrán látható adatsor esetén, $N_f = 50$, $N_r = 5$,

$\Delta f_g = 1 \text{ Hz}$ és $f_g[0] = 10024 \text{ Hz}$ beállított paraméterekkel, 20 kHz sorfrissítési frekvencia mellett.



23. ábra Átlagértékek, ha a keresett frekvencia a szélső iterációknál található

Ebben az esetben a keresőalgorithmus módosított bemeneti paramétereivel egy új keresés futtatható. Erre mutat egy példát a 24. ábra, a mérési iterációk számának $N_f = 100$ értékre növelésével.



24. ábra Átlagértékek megnövelt iterációszámmal

A c_0 pont kiválasztási eredménye pontosítható a varianciaértékek vizsgálatával a pont környezetében, az $[i_{min}, i_{max}]$ tartományban. Ez az ellenőrzés akkor fut le, ha a B görbéjén kiválasztott átlagértéknél a variancia nagyobb, mint 0, mert ekkor feltételezhető intenzitásváltozás a felvételen. A vizsgálat során a 32. összefüggéssel határozhatók meg azok a mérési iterációs indexek, ahol a variancia minimális, majd ezek közül a c_0 -hoz legközelebbi c pont kerül kiválasztásra.

$$i_{min_var} = \{j \mid i_{min} \leq j \leq i_{max}, \sigma^2(j) = \min(\sigma^2(i))\}$$

$$c = \begin{cases} c_0, \text{ ha } \sigma^2(c_0) = 0 \\ i \mid i \in i_{min_var}, |i - c_0| = \min(|j - c_0| \mid j \in i_{min_var}), \text{ egyébként} \end{cases} \quad (32)$$

II. Tézis

Egy line scan kamera-alapú mérőrendszerben meghatározható a világításvezérlő jel f_g frekvenciája, amely az átfedési arányokat tartalmazó O vektor átlag- és varianciaértékeit vizsgálja. A kidolgozott keresőalgoritmussal meghatározható az a c pont, ahol az O vektor átlagértékeinek maximuma és varianciaértékeinek minimuma reprezentálja az optimális frekvenciát:

$$c = \begin{cases} \frac{i_{min} + i_{max}}{2}, & \text{ha } \sigma^2(c_0) = 0 \\ i \mid i \in i_{min_var}, \mid i - c_0 \mid = \min(\mid j - c_0 \mid \mid j \in i_{min_var}), & \text{egyébként,} \end{cases}$$

ahol

$$i_{min} = \min \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\},$$

$$i_{max} = \max \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\},$$

$$i_{min_var} = \{ j \mid i_{min} \leq j \leq i_{max}, \sigma^2(j) = \min(\sigma^2(i)) \},$$

$$B_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=k-n+1}^k A(\mu_i), \text{ ha } k \geq n,$$

$$A(\mu_k) = \begin{cases} \mu_k, & \text{ha } \mu_k \geq \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \\ \max(\mu) + \min(\mu) - \mu_k, & \text{ha } \mu_k < \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2}. \end{cases}$$

Magyarázat: A keresési folyamat első lépése a világításvezérlő jel frekvenciájának folyamatos növelése:

$$n_f[i + 1] = \begin{cases} 0, & \text{ha } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ n_f[i] + 1, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$n_r[j + 1] = \begin{cases} 0, & \text{ha } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ n_r[j] + 1, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$f_g[k + 1] = \begin{cases} f_g[0], & \text{ha } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ f_g[k], & \text{ha } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ f_g[0] - \frac{N_r \cdot \Delta f_g}{2} + \Delta f_g \cdot \left\lfloor \frac{n_f[i] + 1}{N_r} \right\rfloor, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$\mu[k + 1] = \bar{0}$$

$$\sigma^2[k + 1] = \sigma^2(O),$$

ahol

n_f : a mérési ciklusok száma az adott frekvencián,

N_f : a különböző frekvenciák maximális száma,

n_r : az adott frekvencián belüli ismétlések száma,

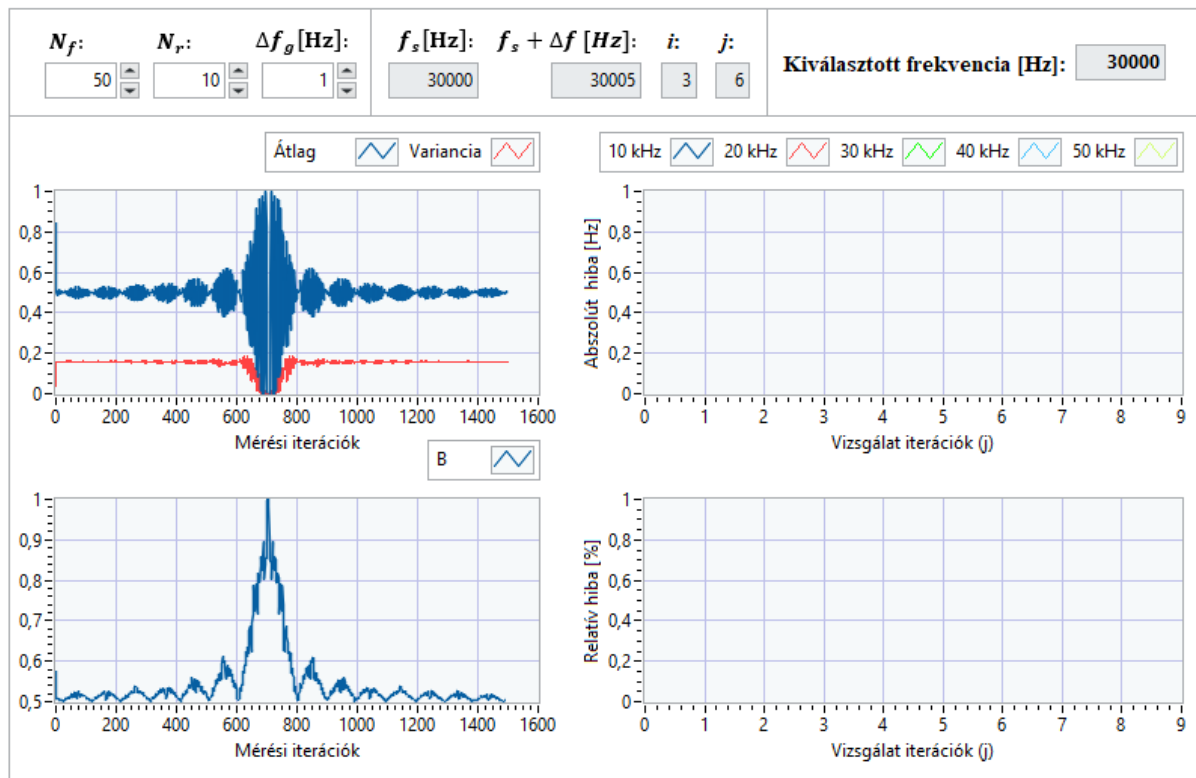
N_r : az adott frekvencián belüli maximális ismétlések száma,

Δf_g : frekvencia lépésköz,
 μ : az $\bar{O}[j]$ átlag értékek vektora,
 σ^2 : a $\sigma^2(O[j])$ variancia értékek vektora.

A II. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S6]

3.3. Futási eredmények a javasolt algoritmus alkalmazásával

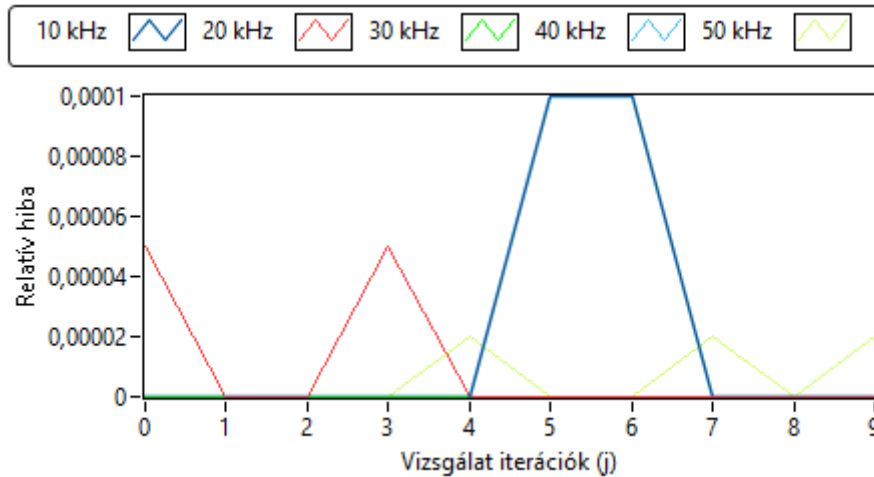
A frekvenciakereső algoritmust a 3.1. fejezetben bemutatott szimulációs algoritmus felhasználásával teszteltem. A vizsgálatok kiértékelésénél a meghatározott frekvencia alapjel relatív hibáját használtam fel a sorfrissítési frekvenciához képest. A tesztalkalmazást LabVIEW fejlesztőkörnyezetben valósítottam meg. A fejlesztett alkalmazás kezelőfelülete a 25. ábrán látható egy vizsgálat futtatása közben.



25. ábra A frekvenciakereső algoritmus ellenőrzése LabVIEW fejlesztőkörnyezetben

Az alkalmazás felületének felső sorában az N_f , N_r és Δf_g paraméterek adhatók meg, illetve monitorozható az aktuálisan vizsgált sorfrissítési frekvencia (f_s), a LED vezérlőjel ($f_s + \Delta f$) és az iterációs változók (i, j) aktuális értéke. A keresőalgoritmussal kiválasztott frekvenciaérték a felület menüsorának jobb szélén ellenőrizhető az adott tesztciklus alatt. A következőkben az egyes vizsgálatok bemeneti paramétereit és eredményeit foglalom össze.

1. eset: $N_f = 50$, $N_r = 5$, $\Delta f_g = 1$ Hz, $f_s = i \cdot 10$ kHz és $\Delta f = j \cdot 1$ Hz, ahol $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ és $j \in \{1, 2, \dots, 10\}$. A vizsgálat során 5 különböző, 10...50 kHz sorfrissítési frekvencia és 10 különböző, 1...10 Hz frekvenciakülönbség mellett, 1 Hz lépésközzel végeztem vizsgálatokat. Egy ij ciklusiterációban $5 \cdot 50 = 250$ mérést végeztem. A 26. ábrán a kiszámolt frekvencia alapjel relatív hibája látható.



26. ábra A keresési algoritmus első teszteredményei

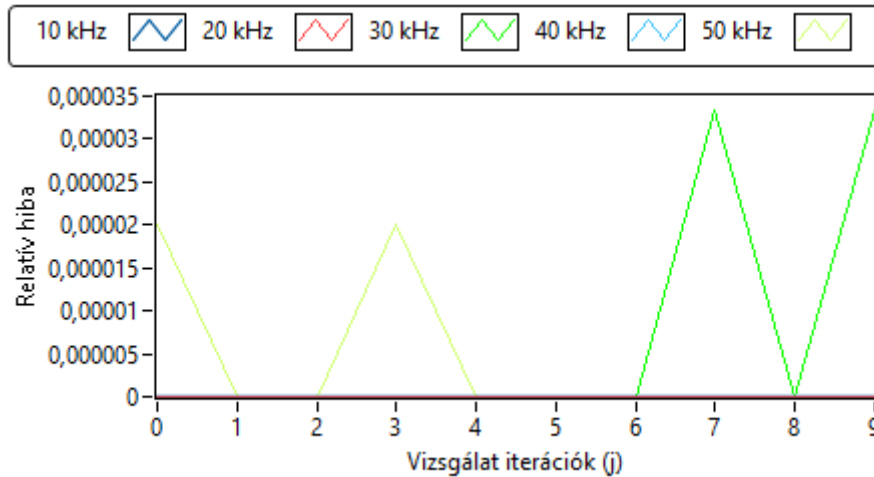
A 2. táblázat a futási eredményeket részletezi.

$\Delta f: \backslash f_s:$	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	50 kHz
1	0	0,005	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0,005	0	0	0
5	0	0	0	0	0,002
6	0,01	0	0	0	0
7	0,01	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0,002
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0,002

2. táblázat Relatív hibaértékek (%) az 1. tesztciklusban

Az alacsonyabb sorfrissítési frekvenciáknál a mérések pontossága az N_r , az egy frekvencián végzett mérések ismétlésszámának növelésével javítható. A következő teszt futtatásakor ennek megfelelően kerültek módosításra a vizsgálati paraméterek.

2. eset: $N_f = 50$, $N_r = 10$, $\Delta f_g = 1$ Hz, $f_s = i \cdot 10$ kHz és $\Delta f = j \cdot 1$ Hz, ahol $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ és $j \in \{1, 2, \dots, 10\}$. A vizsgálat során 5 különböző, 10...50 kHz sorfrissítési frekvencia és 10 különböző, 1...10 Hz frekvenciakülönbség mellett, 1 Hz lépésközzel végeztem vizsgálatokat. Egy ij ciklusiterációban 500 mérést végeztem. A második tesztciklusok eredményeit foglalja össze a 27. ábra és a 3. táblázat.

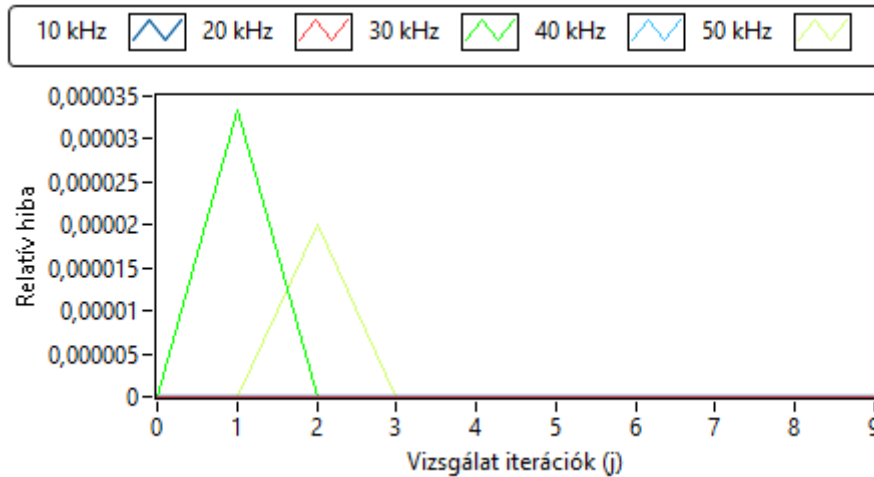


27. ábra A keresési algoritmus 2. teszteredményei

$\Delta f: \backslash f_s:$	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	50 kHz
1	0	0	0	0	0,002
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0,002
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0,0033	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0,0033	0	0

3. táblázat Relatív hibaértékek (%) a 2. tesztciklusban

3. eset: $N_f = 100$, $N_r = 10$, $\Delta f_g = 1$ Hz, $f_s = i \cdot 10$ kHz és $\Delta f = j \cdot 1$ Hz, ahol $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ és $j \in \{1, 2, \dots, 10\}$. A vizsgálat során 5 különböző, 10...50 kHz sorfrissítési frekvencia és 10 különböző, 1...10 Hz frekvenciakülönbség mellett, 0,5 Hz lépésközzel végeztem vizsgálatokat. Egy ij ciklusiterációban 1000 mérést végeztem. A harmadik tesztciklus eredményeit foglalja össze a 28. ábra és a 4. táblázat.



28. ábra A keresési algoritmus 3. teszteredményei

$\Delta f: \setminus f_s:$	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	50 kHz
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0,0033	0	0
3	0	0	0	0	0,002
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0

4. táblázat Relatív hibaértékek (%) a 3. tesztciklusban

4. Fordulatszám meghatározás line scan kamerával

A kutatómunkában ismertetett fordulatszámmerési eljárás kidolgozásának igénye korábban egy autóiipari vállalat és a Miskolci Egyetem együttműködésében fogalmazódott meg. A kitűzött cél az, hogy a cég által fejlesztett indítómotorok tesztelésekor, annak fordulatszáma és a motor fogaskerekének tengelymenti visszacsapódása érintésmentesen legyen mérhető, a termék megbontása és megjelölése nélkül. A probléma megoldása érdekében egy line scan kamera alapú rendszer kidolgozására tettem javaslatot. A kidolgozott algoritmus működése két fő részre bontható: a mérési pontok kiválasztására és azok értéke alapján a fordulatszám meghatározására.

4.1. A mérési pontok kiválasztási módszere

A line scan kamerával végzett mérési folyamat első lépése azon pontok kiválasztása a felvételen, ahol a számítások elvégezhetők. A probléma megoldására statisztikai eszközök alkalmazását javaslom, melyek részletezése a következő alfejezetekben valósul meg.

4.1.1. Statisztikai módszerek alkalmazása a képfeldolgozásban

A rögzített képek vizsgálata adatmátrixok statisztikai elemzéseként is értelmezhető, amely különböző statisztikai technikák alkalmazását jelenti a (kétdimenziós) mátrixba rendezett adatok elemzésére. A mátrixban lévő adatok elemzésére szolgáló általános technikák közé tartozik a leíró statisztika, amelyek az adatok összegzéséhez szükséges mértékek kiszámítását foglalják magukban [1]. Ezek a technikák az adatkészlet fő jellemzőit foglalják össze, mint a központi tendenciák mértékeit (átlag, medián) és a változékonyság mértékeit (terjedelem, szórás). Az inferenciális statisztika következtetéseket von le a populációról a minta adatai alapján [40]. Ezen technikák közé tartozik a t-próba, ANOVA (ANalysis Of VAriance – varianciaanalízis), khi-négyzet próba és regresszióanalízis. A korrelációs elemzés két változó közötti kapcsolatot vizsgál egy mátrixban, hogy megállapítsa, pozitív vagy negatív korreláció áll-e fenn közöttük [26]. A regresszióanalízis segít megérteni a függő változó és egy vagy több független változó közötti kapcsolatot a mátrixban [8], becslési és következtetési célból. A hipotézisvizsgálat során a kapcsolatok vagy különbségek statisztikai szignifikanciájának értékelése történik annak meghatározása érdekében, hogy ezek a véletlennek köszönhetőek-e, vagy valóban szignifikánsak [38]. Ez a módszer a null- és alternatív hipotézisek megfogalmazásával, a megfelelő próbastatisztika kiválasztásával és a p-érték meghatározásával történik, hogy döntést hozzon a hipotézis állításáról. A klaszterelemzés hasonló adatpontokat csoportosít jellemzőik alapján, segítve a minták vagy klaszterek azonosítását az adatokban [35].

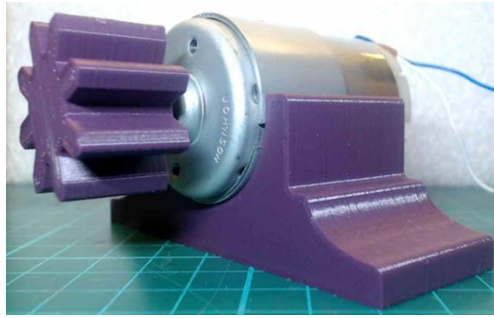
A statisztikai képfeldolgozás a képfeldolgozás egy olyan tématerülete, amely statisztikai technikák és módszerek alkalmazását javasolja a képek elemzésére és manipulálására [37]. Statisztikai modellek és algoritmusok használatát foglalja magában, hogy értelmezhető információkat nyerjenek ki a képekből, javítsák a képminőséget, és következtetéseket vonjanak le a kép tartalmáról [18]. A statisztikai képfeldolgozási technikák közé tartozik a képsimítás, éldetektálás, szegmentálás, objektumfelismerés és osztályozás.

A gyakori statisztikai képfeldolgozási technikák közé tartozik a kép simítása, amely célja a képminőség javítása a zaj csökkentése vagy az irreleváns részletek eltávolítása által. Olyan módszerekkel, mint az átlagolás vagy a Gauss-szűrés [20], a kép pixelértékeit statisztikai mérések alapján módosítják, hogy egységesebb megjelenést hozzanak létre. Az éldetektálás célja az élek és határok azonosítása a képen, amely hasznos lehet az objektumfelismeréshez és képszegmentáláshoz. Statisztikai megközelítésekkel, mint például a Sobel-operátor [19] vagy a Canny éldetektálás [46] alkalmazásával, az intenzitásgradiens elemzésére kerül sor a képen [16], lehetővé téve az élek jelentős változásainak felismerését a pixelértékekben. A képszegmentálás célja a kép jelentős régiókra vagy objektumokra való felosztása [24] a szín, textúra vagy intenzitás hasonlóságai alapján. Statisztikai technikák, mint a klaszterezés vagy küszöbölés felhasználásával a kép pixelértékeit vizsgálják és különálló régiókra vagy entitásokra kategorizálják. Az objektumfelismerés célja objektumok azonosítása és osztályozása [43] a képen statisztikai minták és jellemzők alapján. A sablonillesztés vagy gépi tanulási algoritmusok használhatók specifikus objektumok vagy minták azonosítására, amely az objektumfelismerés és -osztályozás feladatainak automatizálását teszi lehetővé. A kép osztályozása a képek különböző osztályokba vagy kategóriákba sorolását jelenti a különböző jellemzők statisztikai elemzése alapján. Ezeket a technikákat a mintafelismerésben is használják, ahol statisztikai modelleket képeznek a mintázatok vagy objektumok felismerésére és osztályozására a képeken.

4.1.2. Varianciaszámításon alapuló kiválasztási eljárás

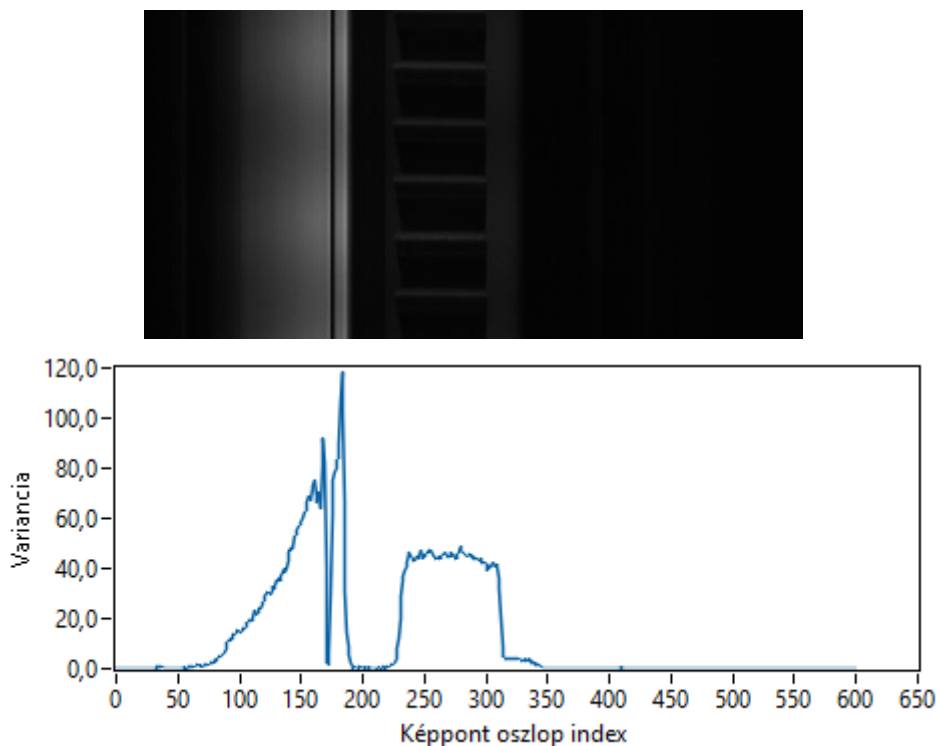
A line scan kamerás vizsgálat során a mérési pontok azonosításának lényeges lépése a legnagyobb változékonyságú pixeloszlop kiválasztása. Ez a megközelítés azon az elven alapul, hogy a rögzített képen a dinamikus (mozgó) elemek különböző intenzitásokat, míg a statikus objektumok homogén megjelenést mutatnak. Egy módszer a leginkább változó adatoszlop azonosítására a mátrixban az, ha kiszámítjuk az egyes oszlopok szórását vagy szórásnégyzetét, majd összehasonlításokat végzünk.

Fontos megjegyezni, hogy a kamerapozíció és megvilágítás nagyban befolyásolja a képpontoszlopok varianciaértékét. Ennek szemléltetéséhez a 29. ábrán lévő DC motor tengelyére szerelt 3D nyomtatott fogaskerék forgását vizsgáltam különböző beállításokban.



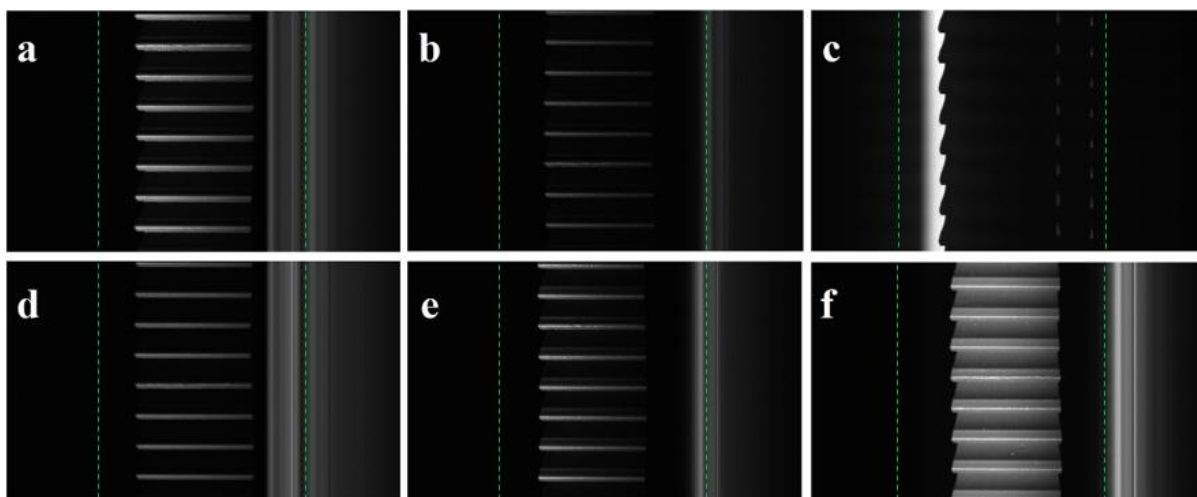
29. ábra A varianciaértékek szemléltetésére használt DC motor és nyomtatott fogaskerék

Nem megfelelő beállítás esetén a felvétel álló részein is megjelenhetnek fényintenzitás változások, amely miatt a variancia-alapú megközelítés nem működőképes. Ezt a jelenséget jól szemlélteti a 30. ábrán látható pillanatfelvétel és az ahhoz tartozó varianciaértékek.



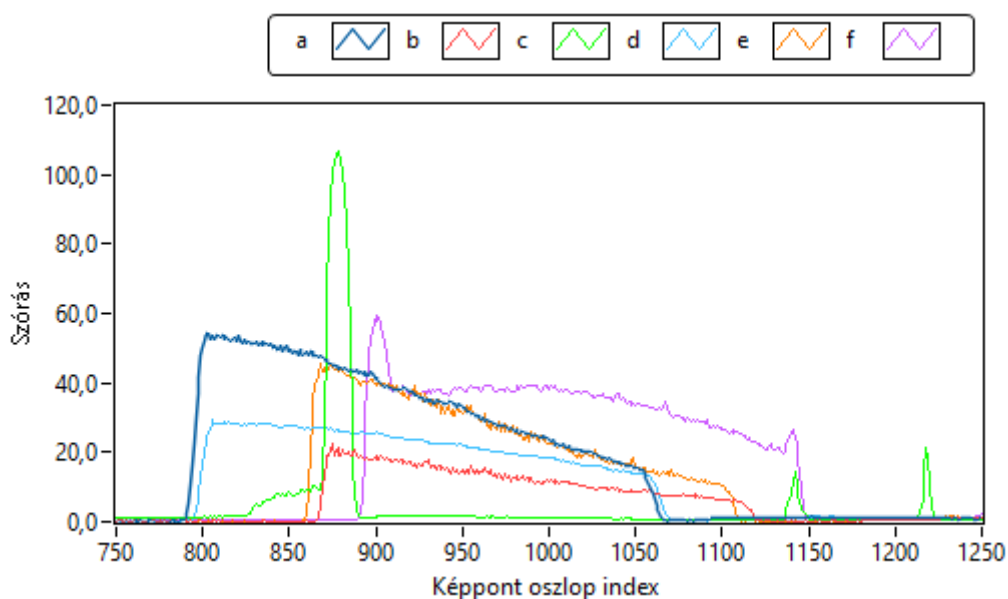
30. ábra A megvilágítás hatása a képpontvektorok variancia értékeire

A világítóegység nem megfelelő pozíciója miatt a motor fémházán változó intenzitású fényvisszaverődések tapasztalhatók, emiatt pedig a fogaskerék nem azonosítható be a képen a legnagyobb varianciaértékek alapján. A különböző világítóegység- és kamerapozíciók felvételre gyakorolt hatásának vizsgálatához további felvételeket készítettem, amelyekről a 31. ábrán láthatók részletek.



31. ábra Különböző megvilágítás- és kamerapozíciók hatása a felvételekre

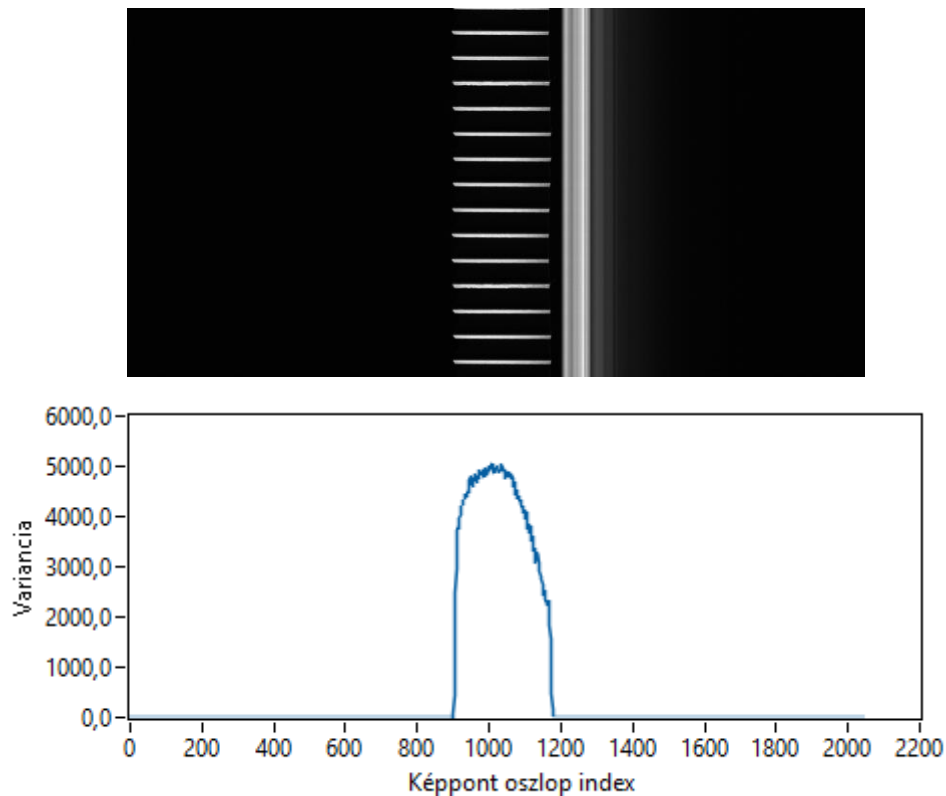
A 31. ábrán az „a” és „e” jelenetek nagyobb megvilágítási szöggel készültek, mint a „b” és „d” felvételek, utóbbiak ezáltal egy sötétlátóteres megvilágítást valósítanak meg. A „c” jelenet háttérvilágítással, az „f” felvétel pedig irányított, nagyszögű megvilágítással készült. A 32. ábra ezeknek a jeleneteknek a pixeloszlopaikra számolt szórásértékeit foglalja össze. A könnyebb értelmezhetőségért csak a jelentős változást mutató oszlopainak az adatait jelenítem meg a grafikonon, a 750. előtti és 1250. utáni képpont oszlopok szórásai mind zérushoz közeli értékek.



32. ábra A vizsgált jelenetek pixeloszlopainak szórása

A felvételek és a kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a kompenzált megvilágítással beállított jelenetek alkalmasak a variancia-alapú mérési pont kiválasztási folyamatra. A következő fejezetben olvasható fordulatszám mérési eljárás szempontjából a háttérvilágítás („c” jelenet) és nagyszögű irányított megvilágítás („f” jelenet) nem alkalmas a fejlesztett algoritmus alkalmazására. A sötétlátóteres megvilágításhoz hasonlóan, a vizsgált

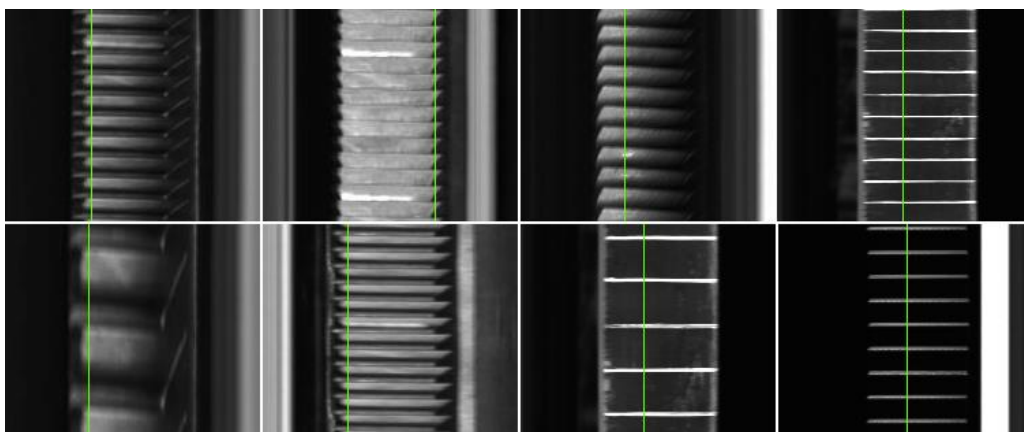
jellemző kis szögben történő megvilágítása nyújt ideális, könnyen feldolgozható felvételeket. Erre nyújt példát a 33. ábrán látható felvétel és annak varianciaértékei.



33. ábra Varianciaszámításon alapuló mérési pont kiválasztásra alkalmas beállítás

Ahhoz, hogy megbizonyosodjak a javasolt kiválasztási eljárás hatékonyságáról, további méréseket végeztem. A vizsgálat első lépéseként különböző forgó alkatrészekről készítettem felvételeket, eltérő forgási sebesség, sorfrissítési frekvencia és fényintenzitás mellett. A felvételeken ezután kiválasztottam a legnagyobb varianciájú képpont oszlopot.

Következő lépésben megvizsgáltam, hogy a mérési pontokat meghatározó, kiválasztott képpont oszlop a forgó alkatrész képterületén helyezkedik-e el. Ha a kiszámolt oszlopindex ezen a tartományon belül helyezkedett el, akkor a kiválasztási algoritmust alkalmasnak ítélt meg. A tesztfelvételekből mutat néhány részletet a 34. ábra.



34. ábra A varianciaszámításon alapuló algoritmus tesztelése

Bár a módszer alkalmas a forgó alkatrészek detektálására a felvételen, azonban a fentiek közül több jeleneten megfigyelhető, hogy a legnagyobb variancia a fogaskerek széléin mérhető, ami a későbbi feldolgozási feladatok szempontjából nem előnyös. Ennek következtében az algoritmus úgy módosult, hogy a varianciagörbe csúcs tartományának közepét válassza ki. Ha $\sigma^2(x)$ a variancia függvénye, ahol x a pixeloszlop indexe, akkor a legnagyobb varianciaérték a W képpont széles képen a 33. összefüggéssel határozható meg.

$$\sigma^2_{max} = \max_{x \in [0, W-1]} \sigma^2(x) \quad (33)$$

A küszöbértéket tapasztalati úton, a varianciagörbék elemzését követően a legnagyobb varianciaérték egyharmadaként határoztam meg a 34. kifejezés szerint.

$$T_V = \frac{\sigma^2_{max}}{3} \quad (34)$$

A tartomány $[x_1, x_2]$ határértékei, amelyen belül $\sigma^2(x)$ értékei magasabbak, mint a T_V küszöbérték:

$$[x_1, x_2] = \{x \in [0, W - 1] \mid \sigma^2(x) > T_V\} \quad (35)$$

A mérési pontok x koordinátáit meghatározó oszlopindex, amely a varianciagörbe csúcs tartomány közepéről vetül:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (36)$$

Összefoglalva, a kiválasztott mérési pontok x koordinátája a 37. összefüggéssel határozható meg:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2}, \text{ ahol } [x_1, x_2] = \left\{x \in [0, W - 1] \mid \sigma^2(x) > \frac{1}{3} \max_{x \in [0, W-1]} \sigma^2(x)\right\} \quad (37)$$

A mérési pontokat tartalmazó M vektor az x_m indexű képpont oszlopban lévő összes pont, amely H képpont magasságú kép esetén a 38. kifejezéssel írható le.

$$M = [(x_m, y) \mid y \in [0, H - 1]] \quad (38)$$

Az algoritmus módosítását követően újabb méréseket végeztem. A tesztelés során elemzett felvételekből mutat részleteket a 35. ábra.

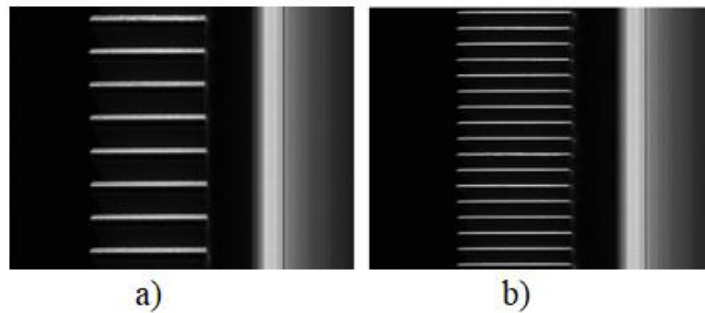


35. ábra A módosított algoritmussal meghatározott mérési pontok

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a javasolt algoritmus alkalmazható a forgó alkatrészek megtalálásához és ezáltal a vizsgálati pontok kiválasztásához a felvételen. A módszerrel szemben támasztott követelmény a megfelelő megvilágítás alkalmazása, amellyel biztosítható, hogy a forgó alkatrészt ábrázoló és az azon kívüli képrészek intenzitásának átlaga jelentősen eltérjen, a képpont oszlopokra kiszámolt varianciagörbe ugyanis ekkor előnyös a keresési folyamathoz.

4.2. Fordulatszám mérési eljárás line scan kamerával

A line scan kamerák hagyományos alkalmazásánál, ha a mintavételezés túl alacsony frekvencián történik, akkor az objektum képe összecúszik a rögzített képen, ha pedig túl magasra van állítva, akkor a kép szétesik. Ezt a tényt felhasználva arra lehet következtetni, hogy a motor fordulatszáma a felvételen látható jellemzők (fogak) közötti képponttávolság meghatározásával kiszámítható. Alacsony fordulatszámok esetében a fogak sűrűbben, míg magasabb fordulatszám esetén távolabb vannak egymástól a rögzített felvételeken, ahogy a 36. ábrán is megfigyelhető.



36. ábra DC motorral forgatott fogaskerék a) alacsonyabb és b) magasabb fordulatszámon

A fordulatszám meghatározására fejlesztett algoritmus alkalmazásának követelményei:

- A forgó alkatrésznek legalább egy olyan detektálható jellemzője (jelölés, mintázat, fog stb.) legyen, amivel beazonosítható a megtett fordulat. Ha n a jellemzők száma, $n \in \mathbb{N}; n > 0$
- Amennyiben több ilyen jellemzővel rendelkezik a vizsgált alkatrész, azok egymástól egyenlő szögbeli távolságra (periodikusan) helyezkedjenek el a test területén. Ha θ a jellemzők forgásponttól számított szöge:

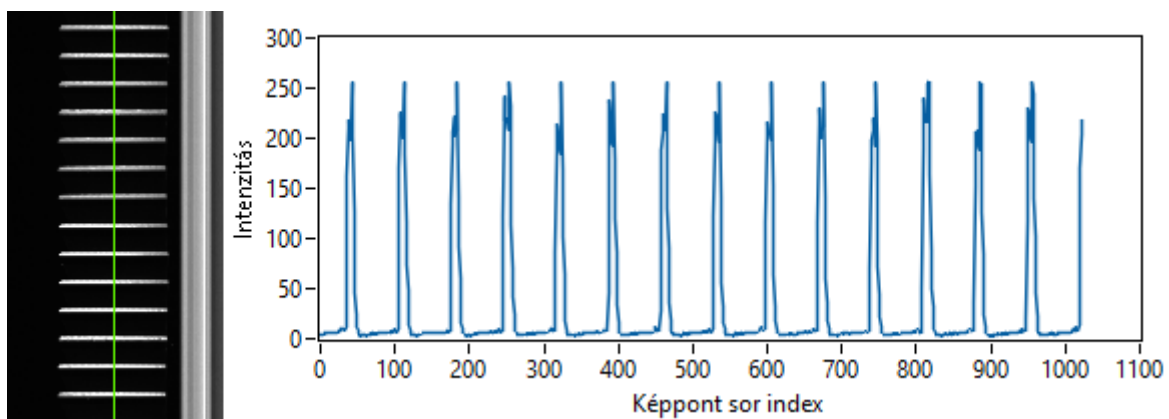
$$\forall k, l \in \{1, 2 \dots n\}, \quad k \neq l, \quad \exists m \in \mathbb{Z}: (\theta_l - \theta_k) \bmod 2\pi = m \cdot \Delta\theta, \text{ ahol:} \quad (39)$$

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{n}$$

- A felvételen n értékétől függetlenül legalább két jellemző látható legyen. (Például, ha az alkatrészen csak egy jelölés található, akkor több, mint egy teljes fordulatot kell rögzíteni ahhoz, hogy a jelölés kétszer szerepeljen a jeleneten.) A képen detektálható jellemzők száma: $n_d \geq 2$.

- A jellemzők számának (n) és a sorfrissítési frekvenciának (f_s) előzetes ismerete szükséges, ezek az algoritmus bemeneti paraméterei lesznek.

A vizsgált alkatrész fordulatszáma kiszámítható a felvételen látható jellemzők számának meghatározása után, a sorfrissítési frekvencia és az alkatrész tényleges jellemzőszámának figyelembevételével. A felvételen látható jellemzők megszámlálásához elsőként a vizsgálat helyét adó képpont oszlopot szükséges kiválasztani. Ehhez az előző fejezetben ismertetett varianciaszámításon alapuló kiválasztó algoritmust alkalmazom (lásd 37. és 38. egyenlet). A mérési pontokat tartalmazó vektor adataiból létrehozható egy olyan vonalprofil, amely az egyes képpontok intenzitását tartalmazza és amelyből kiszámítható a képen látható jellemzők száma. Egy felvétel részletét és a kiválasztott képpont-vektorból generált vonalprofilra mutat be a 37. ábra.



37. ábra Példa a kiválasztott képpont vektorból generált vonalprofilra

A generált vonalprofil alapján megszámlálható a felvételen látható jellemzők száma. Ennek leírásához az alábbi mennyiségek bevezetése szükséges:

H : a kép magassága képpontokban kifejezve

$P = [p_1, p_2, \dots, p_{H-1}]$: a kiválasztott képpont vektor

T_p : a vizsgálat küszöbértéke

n_d : a detektált jellemzők száma

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_d}\}$: a detektált jellemzők Y koordinátái

f_i : a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye

A felsorolt paraméterek kezdeti értékei:

$$n_d = 0$$

$$Y = \emptyset$$

$$f_{i-2} = f_{i-1} = HAMIS$$

Az $i \in (0, H - 1)$ ciklusban:

1. Feltételvizsgálat:

$$f_i = \begin{cases} IGAZ, ha (p_i \geq p_{i-1}) \text{ és } (p_i \geq T_P) \text{ és } (f_{i-1} = HAMIS) \\ HAMIS, ha (p_i < p_{i-1}) \text{ és } (p_i < T_P) \text{ és } (f_{i-1} = IGAZ) \\ f_{i-1}, \text{ egyébként} \end{cases} \quad (40)$$

2. Jellemzők számolása:

$$n_d = n_d + \begin{cases} 1, ha f_i = IGAZ \text{ és } f_{i-1} = HAMIS \\ 0, \text{ egyébként} \end{cases} \quad (41)$$

3. Y koordináták gyűjtése:

$$Y = Y \cup \{i \mid f_i = IGAZ\} \quad (42)$$

A fordulatszám meghatározásának következő lépése az y koordinátákat tartalmazó vektor elemei sorrendjének megfordítása, amely az Y' vektort eredményezi a 43. kifejezés szerint:

$$Y' = [y_{n_d-1}, y_{n_d-2}, \dots, y_0], \text{ ahol} \quad (43)$$

$$y'_i = y_{n_d-1-i} \quad \forall i \in \{0, 1, \dots, n_d - 1\}$$

Az algoritmus ezt követően két ágon futhat attól függően, hogy a felvételen látható-e egy teljes fordulat. Ha igen, tehát $n_d \geq (n + 1)$, akkor a fordulatszám (f) a sorfrissítési frekvencia hatvanszorosának (mivel fordulat/perc egységgel szeretnénk számolni) és a vonalprofilon detektált, egy teljes fordulatot reprezentáló két szélső jellemző távolság hányadosa lesz a 44. összefüggés alapján:

$$f = \frac{f_s \cdot 60}{Y'_0 - Y'_n} [rpm] \quad (44)$$

Amennyiben a feltétel nem teljesül, a felvételen nem látható egy teljes fordulat, tehát $n_d < (n + 1)$, akkor a vonalprofilon detektált két szélső jellemző pozíciója közötti különbség alapján becsülöm meg azt, hogy egy teljes fordulat ábrázolásához hány pixelsorra lenne szükség. Ezt fejezi ki a 45. egyenlet:

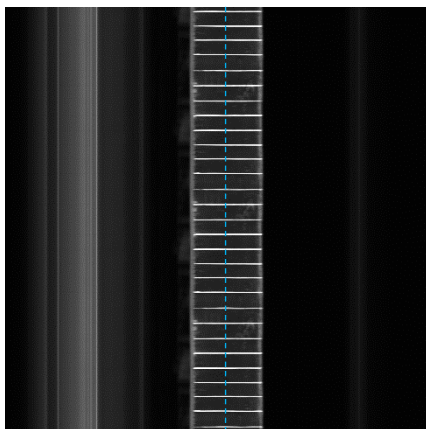
$$f = \frac{f_s \cdot 60}{(Y'_0 - Y'_{n_d-1}) \cdot \frac{n}{n_d - 1}} [rpm] \quad (45)$$

A fordulatszám meghatározására alkalmas algoritmust a 46. egyenlet fejezi ki:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (46)$$

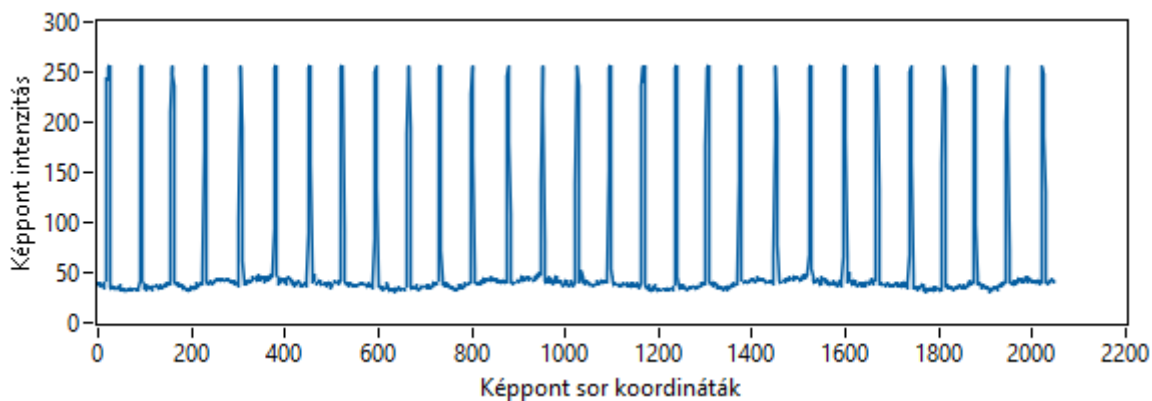
$$f = \frac{f_s \cdot 60}{(1 - H(n_d - (n + 1))) \left((Y'_0 - Y'_{n_d-1}) \cdot \frac{n}{n_d - 1} \right) + H(n_d - (n + 1)) (Y'_0 - Y'_n)} [rpm]$$

Az algoritmus működésének bemutatását szolgálja a következő példa, ahol a következő fejezetben bemutatásra kerülő aszinkron motor tengelyére szerelt, 8 egymástól egyenlő távolságra lévő jelöléssel ellátott tárcsát vizsgáltam. A tesztmérés egyik pillanatfelvétele látható a 38. ábrán.



38. ábra Pillanatfelvétel egy tesztmérésről 1050 rpm fordulatszámmal

A motort egy frekvenciaváltóval vezéltem 1050 rpm fordulatszámmal. A jelenet alkalmas a fordulatszám meghatározására, hiszen ismert a jellemzők száma, $n = 8$, és a sorfrissítési frekvencia, $f_s = 10022 \text{ Hz}$. A felvételt $H = 2048$ képpont sorral készítettem. A 39. ábrán látható a fenti felvétel 1020. képpont oszlopából generált vonalprofil, amelyet az előző fejezetben bemutatott algoritmussal választottam ki (lásd 37. és 38. egyenlet).



39. ábra A felvételtől generált vonalprofil

A pillanatfelvételen $n_d = 29$ detektált jellemző számolható meg az alábbi pixelsor koordinátákban:

$$Y = \{20, 91, 157, 227, 304, 378, 451, 521, 592, 663, 730, 800, 877, 951, 1024, 1093, 1165, 1236, 1302, 1373, 1449, 1523, 1596, 1666, 1737, 1808, 1875, 1945, 2022\}$$

Amelyből létrehozható Y' , a sorindexeket tartalmazó vektor elemeivel fordított sorrendben:

$Y' = \{2022, 1945, 1875, 1808, 1737, 1666, 1596, 1523, 1449, 1373, 1302, 1236, 1165, 1093, 1024, 951, 877, 800, 730, 663, 592, 521, 451, 378, 304, 227, 157, 91, 20\}$

A $H(x)$ egységugrás függvény értéke 1 lesz, mivel $20 \geq 0$:

$$H(x) = H(n_d - (n + 1)) = H(29 - (8 + 1)) = H(20) = 1 \quad (47)$$

Az $Y'_0 = 2022$, $Y'_n = 1449$ és $Y'_{n_d-1} = 20$ paraméterekkel kiszámolt fordulatszámértéket a 48. kifejezés tartalmazza.

$$f = \frac{f_s \cdot 60}{(1 - H(n_d - (n + 1))) \left((Y'_0 - Y'_{n_d-1}) \cdot \frac{n}{n_d - 1} \right) + H(n_d - (n + 1)) (Y'_0 - Y'_n)} = \frac{10022 \cdot 60}{(1 - 1) \left((2022 - 20) \cdot \frac{8}{29 - 1} \right) + 1 \cdot (2022 - 1449)} = \frac{601320}{573} = 1049,42 \text{ rpm} \quad (48)$$

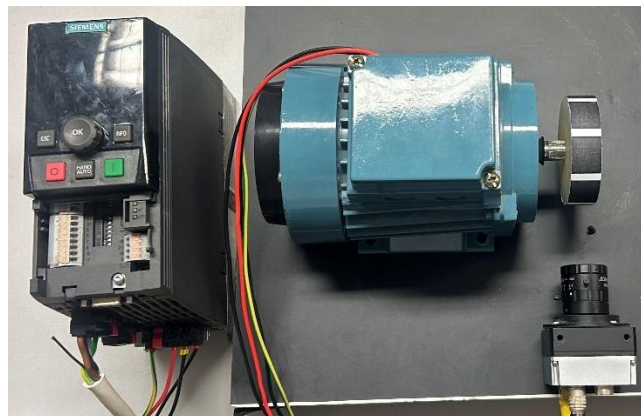
A bemutatott példában tehát az 1050 rpm alapjelhez képest 0,05% relatív hibával sikerült meghatározni a motor fordulatszámát.

4.3. A javasolt algoritmus tesztelése

A következőkben a mérési módszer működésének ellenőrzésére fejlesztett validációs rendszereket ismertetem. Az első megoldásban egy aszinkron motor forgási sebességét vizsgálom rögzített fordulatszám alapjellel. A második megoldásban egy EtherCAT interfésszel rendelkező szervohajtást használtam a fordulatszámértékek dinamikus változtatására és azok valós értékeinek ciklikus lekérdezésére a fejlesztett tesztalkalmazásom által.

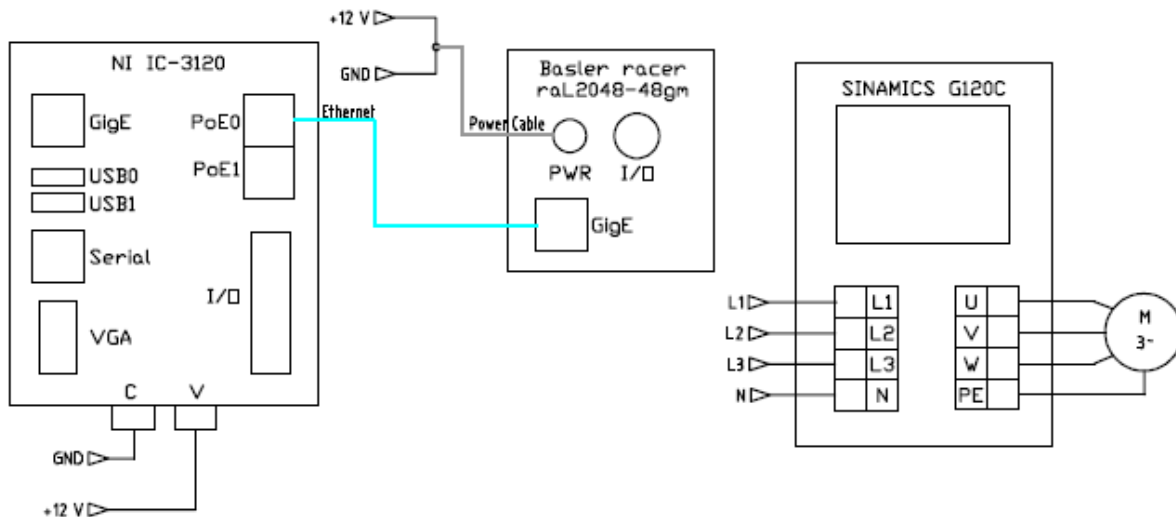
4.3.1. Validáció fordulatszám visszacsatolás nélkül

A mérőrendszer validációját elsőként egy Siemens SINAMICS G120C DP frekvenciaváltó segítségével valósítottam meg, amely egy ABB MT63B14-4 típusú, 200 W teljesítményű aszinkron motort vezérelt. A rendszer főbb elemei a 40. ábrán láthatók.



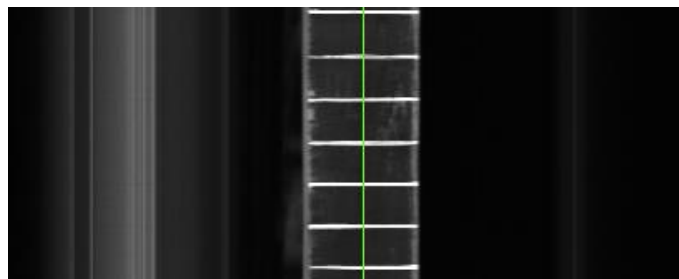
40. ábra A validációs rendszer komponensei

A frekvenciaváltóval vezérelhető maximális fordulatszám 1500 rpm. A vizsgált alkatrészként egy olyan tárcsa volt a motor tengelyére szerelve, amelyen 8, egymástól egyenlő távolságra lévő vonaljelölés található. A felvételek rögzítését és elemzését LabVIEW fejlesztőkörnyezetben valósítottam meg. A validációs alkalmazás futtatására alkalmas az Intézetben elérhető NI IC-3120 ipari vezérlőegység, amely rendelkezik a kamera fogadásához szükséges Gigabit Ethernet porttal a 41. ábra szerint.



41. ábra Irányítórendszer a validációs alkalmazás futtatásához

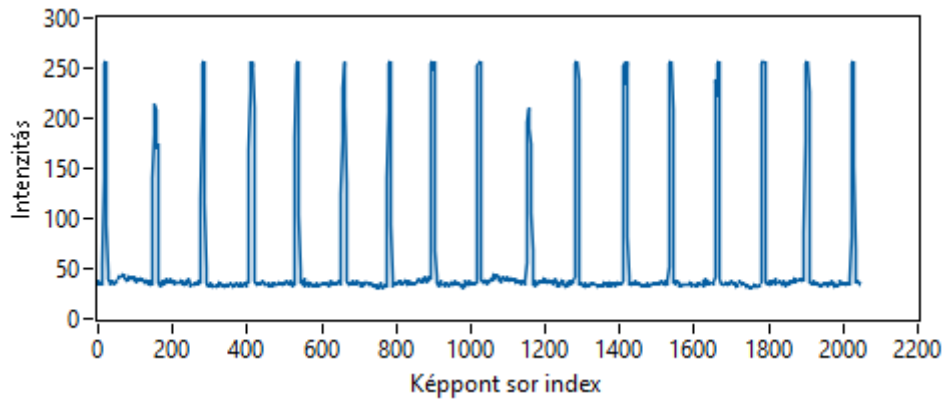
A tesztelés során a felvétel rögzítéséért és a motorvezérlésért felelős eszközök nem valósítottak meg adatcserét. Egy tesztfelvételből mutat részletet a 42. ábra.



42. ábra Részlet az aszinkron motorra szerelt alkatrészből készített felvételről

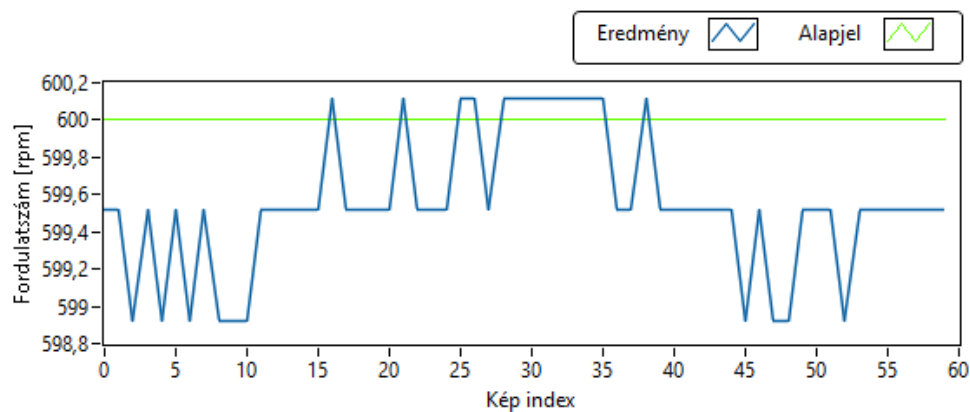
Mivel a frekvenciaváltó által vezérelt fordulatszám nem került visszacsatolásra a mérőrendszerbe, ezért az egyes tesztfelvételek készítése során mindig egy meghatározott fordulatszámot állítottam be. Később, a felvételek elemzésekor ez a beállított fordulatszám érték szolgáltatta a referenciajelet a vizsgálatokhoz. A felvételek készítése során 150 – 1500 rpm közötti fordulatszámokkal, 150 rpm-es lépésközökkel vezéreltem a motort és a sorfrissítési frekvenciát állandó, 10 kHz értékre állítottam be.

A felvételek feldolgozásakor az előző fejezetekben ismertetett algoritmust alkalmaztam. A 600 rpm fordulatszám mellett rögzített felvétel elemzésekor generált vonalprofilra mutat példát a 43. ábra.



43. ábra Vonprofil a tesztfelvételen 600 rpm esetén

A fordulatszám meghatározását az előző alfejezetben bemutatott 46. egyenlet alapján végeztem. Egy mérési sorozatot mutat be a 44. ábra, ahol korábban 600 rpm fordulatszám alapjelet állítottam be.



44. ábra Mérési eredmények 600 rpm fordulatszám mellett

A vizsgálatok értékeléshez, a felvétel feldolgozását és a javasolt mérési algoritmus futtatását követően az alábbi adatokat jelenítettem meg:

- Fordulatszám alapjel,
- Mérési adatok,
- Hibaértékek,
- Legnagyobb hiba,
- Legkisebb hiba.

A hibaértékek a mérési adatok és az alapjel különbségét jelentik. A legnagyobb hiba a legnagyobb abszolút eltérést, a legkisebb hiba a hibaértékek abszolútértékének minimumát jelenti, százalékban kifejezve. Az adatok későbbi elemzéséhez ezeket az adatokat egy CSV fájlban is rögzítem. A mérési eredmények az 1. mellékletben találhatóak, az 5. táblázat ezek összegzését tartalmazza.

Alapjel [rpm]	Mért adatok átlaga [rpm]	Min hiba [%]	Min hiba [rpm]	Max hiba [%]	Max hiba [rpm]
150	149,7010012	0,01996	0,02994	4,612944	6,919416
300	299,8967376	0,048488	0,145464	1,191549	3,574647
450	499,4885952	0,01996	0,08982	0,204132	0,918594
600	599,5515507	0,01996	0,11976	0,179283	1,075698
750	749,7378336	0,029925	0,2244375	0,154421	1,1581575
900	899,955381	0,01996	0,17964	0,129547	1,165923
1050	1050,12177	0,054849	0,5759145	0,11988	1,25874
1200	1200,167359	0,01996	0,23952	0,22	2,64
1350	1350,35656	0,094881	1,2808935	0,129547	1,7488845
1500	1500,661901	0,029925	0,448875	0,22	3,3

5. táblázat Validációs eredmények aszinkron motorral

Mivel 10 kHz sorfrissítési frekvencia mellett egy 2048 képpont magas képen nem látható egy teljes fordulat ($n_d < (n + 1)$) 150 rpm esetén, 300 rpm fordulatszámánál pedig ez az állapot váltakozik (olykor 8, máskor 9 jellemzőt lehet detektálni egy képen), ezért az alacsony fordulatszámoknál tapasztalt nagyobb eltérések a becslési módszer pontatlanságával magyarázhatók. Hatása kiküszöbölhető a becslési eljárás finomhangolásával vagy a sorfrissítési frekvencia csökkentésével.

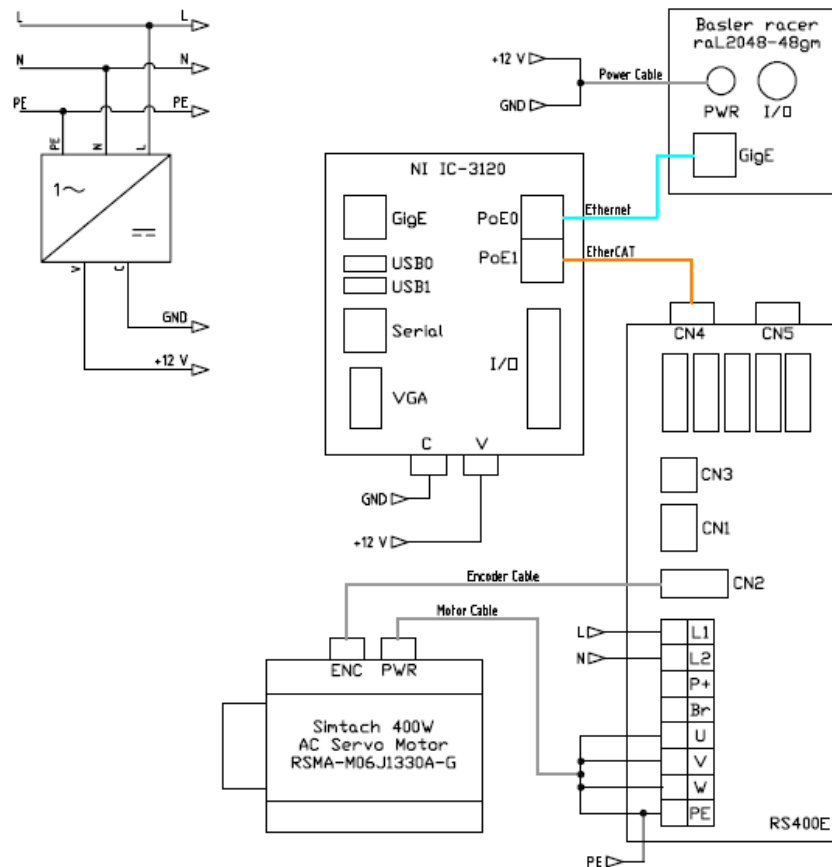
4.3.2. Validáció fordulatszám visszacsatolással

Az előző (4.3.1.) alfejezetben bemutatott, fordulatszám visszacsatolás nélküli rendszerben a kapott eredmények alátámasztották az algoritmus alkalmasságát a fordulatszám meghatározására. A mérési módszer hatékonyságát és a mérési adatok megbízhatóságát növeli azonban, ha az alapjel helyett a motor fordulatszámának tényleges értékéhez képest kerül megvalósításra a kiértékelés. Ehhez egy AC szervomotor vezérlőt használtam, amely EtherCAT protokollon keresztül is elérhető. A rendszer főbb komponensei láthatók a 45. ábrán.



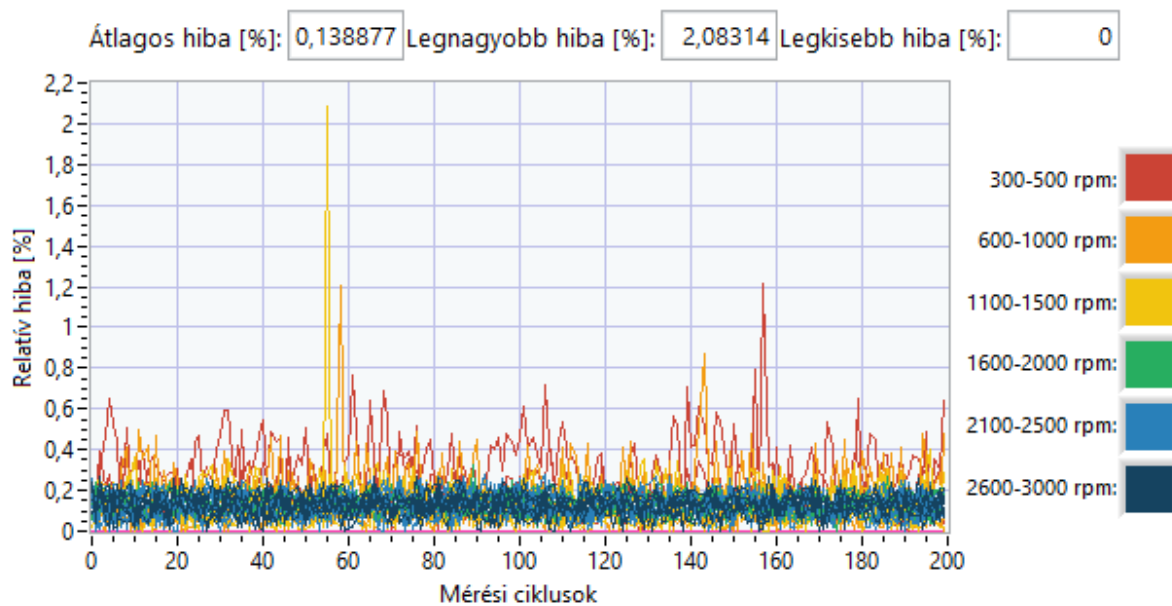
45. ábra A validációs rendszer főbb komponensei

A GigE kamera és az EtherCAT szervovezérlő központi irányításához szintén az NI IC-3120 vezérlőegységet használtam, a 46. ábrán látható irányítórendszerben.



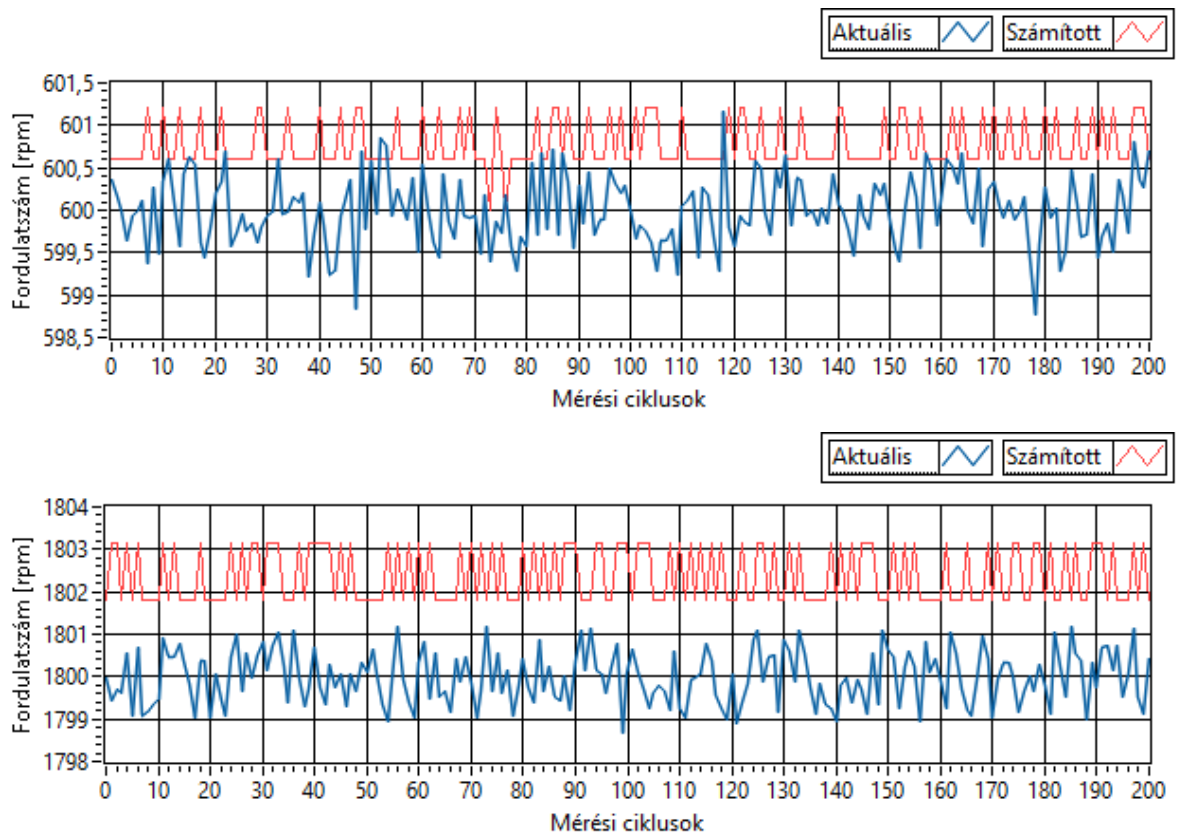
46. ábra Irányítórendszer a validációhoz fordulatszám visszacsatolással

A méréseket 300-3000 rpm alapjellel, 100 rpm lépésközzel valósítottam meg. A futtatások eredményei, a számított fordulatszámértékek relatív hibája látható a 47. ábrán.



47. ábra A számított fordulatszámértékek relatív hibája

A számított értékeknél, az előző validációs eredményekhez hasonlóan megfigyelhető egy (véltetően kerekítési hibákból adódó) állandó ofszet hiba. Ez látható a 48. ábrán 600 és 1800 rpm beállított fordulatszám esetén.



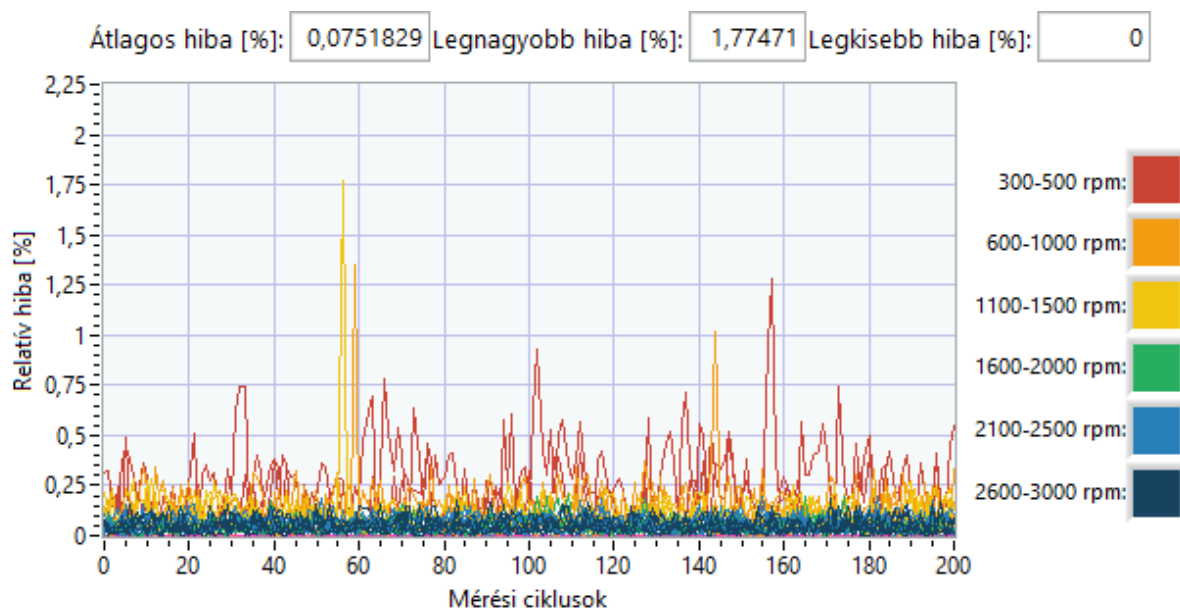
48. ábra Az aktuális és számított fordulatszámértékek 600 és 1800 rpm alapjelnél

Az állandó hiba kompenzálásához a hibatípust lineárisan változóként feltételezve a fordulatszám függvényében, bevezettem egy 0,0015 értékű korrekciós tényezőt, amellyel a számított eredményből kivontam annak 0,15%-át. A korrekciós tényező meghatározásánál a számított fordulatszám két leggyakoribb értékéhez tartozó hiba számtani közepét vettem alapul, amely 300 rpm esetén 0,45 és 3000 rpm esetén 4,5 értékű. Ez figyelhető meg a 49. ábrán.



49. ábra A korrekciós tényező meghatározásához vizsgált hibaértékek

A korrekciós tényező alkalmazása után kapott adatok figyelhetők meg az 50. ábrán. Látható, hogy a 0,138% átlagos hibaértéket 0,075%-ra, a legnagyobb hibát pedig 2,08%-ról 1,77%-ra csökkentettem a korrekcióval.



50. ábra A fordulatszámértékek relatív hibája az adatok korrekciója után

A korrekció után kapott részletes mérési adatok az értekezés 2. mellékletében tekinthetők meg.

III. Tézis

A forgó alkatrészek fordulatszáma meghatározható monokróm line scan kamerával az alábbi összefüggések alkalmazásával.

a) **A mérési pontok kiválasztása a képpont oszlopok intenzitásának varianciavizsgálatával megvalósítható. A mérési pontokat tartalmazó M vektor az x_m indexű képpont oszlopban lévő összes pont, amely H képpont magasságú és W képpont széles kép esetén:**

$$M = [(x_m, y) \mid y \in [0, H - 1]],$$

ahol

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} \mid [x_1, x_2] = \left\{ x \in [0, W - 1] \mid Var(x) > \frac{1}{3} \max_{x \in [0, W - 1]} Var(x) \right\}.$$

b) **A fordulatszám meghatározására az alábbi összefüggés alkalmazható, ha n_d a detektált jellemzők száma, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_d}\}$ a detektált jellemzők y koordinátái, f_i a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye, $P = [p_1, p_2, \dots, p_{H-1}]$ a mérésre kiválasztott képpont vektor és T_P a vizsgálat küszöbértéke:**

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$f = \frac{f_s \cdot 60}{(1 - H(n_d - (n + 1))) \left((Y'_0 - Y'_{n_d-1}) \cdot \frac{n}{n_d - 1} \right) + H(n_d - (n + 1)) (Y'_0 - Y'_n)} \text{ [rpm]},$$

ahol

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, n_d - 1\}:$$

$$Y' = [y_{n_d-1}, y_{n_d-2}, \dots, y_0], \text{ ahol } y'_i = y_{n_d-1-i},$$

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, H - 1\}:$$

$$Y = Y \cup \{i \mid f_i\},$$

$$n_d = n_d + \begin{cases} 1, \text{ ha } f_i = \text{IGAZ} \text{ és } f_{i-1} = \text{HAMIS} \\ 0, \text{ egyébként,} \end{cases}$$

$$f_i = \begin{cases} \text{IGAZ, ha } (p_i \geq p_{i-1}) \text{ és } (p_i \geq T_p) \text{ és } (f_{i-1} = \text{HAMIS}) \\ \text{HAMIS, ha } (p_i < p_{i-1}) \text{ és } (p_i < T_p) \text{ és } (f_{i-1} = \text{IGAZ}) \\ f_{i-1}, \text{ egyébként.} \end{cases}$$

A javasolt módszer alkalmazásának feltételei:

- A forgó alkatrészen detektálható jellemzők száma: $n \in \mathbb{N}: n > 0$
- $n > 1$ esetén, ha θ a jellemzők forgásponttól számított szöge:

$$\forall k, l \in \{1, 2 \dots n\}, \quad k \neq l, \quad \exists m \in \mathbb{Z}: (\theta_l - \theta_k) \bmod 2\pi = m \cdot \Delta\theta, \text{ ahol:}$$

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{n}$$

- A felvételen detektálható jellemzők száma: $n_d \geq 2$.
- A jellemzők számának (n) és a sorfrissítési frekvenciának (f_s) előzetes ismerete.

A III. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S7], [S8]

5. Forgástengelymenti elmozdulás mérése line scan kamerával

A forgó alkatrész tengelymenti, fizikai pozíciójának meghatározása elvégezhető, ha ismert az objektum pixelméret (OPS), ami a látómező (FOV_x) és szenzorfelbontás (Res_x) forgástengely irányú méreteinek hányadosát jelenti esetben. Az alkatrész tengelymenti pozíciója egy d_0 kezdőponthoz képest a 49. összefüggéssel meghatározható:

$$d_m = |x_0 - x_m| \cdot OPS = |x_0 - x_m| \cdot \frac{FOV_x}{Res_x} [mm], \quad (49)$$

ahol

d_m [mm]: az elmozdulás mértéke a d_0 (0 mm) referenciaponthoz képest,

x_0 : a referenciapont képpontban kifejezve,

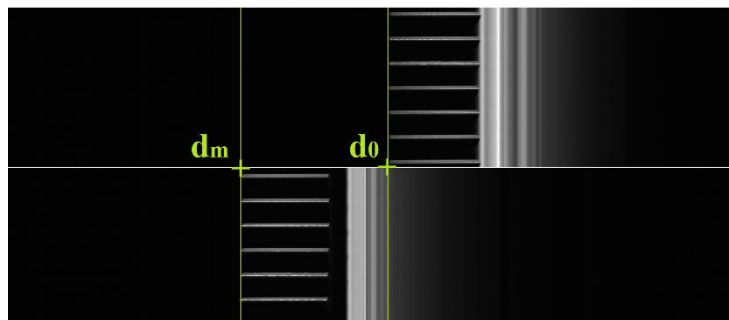
x_m : az alkatrész elmozdulás utáni helyzete képpontban kifejezve,

OPS [mm]: objektum pixelméret,

FOV_x [mm]: a látómező X dimenziója,

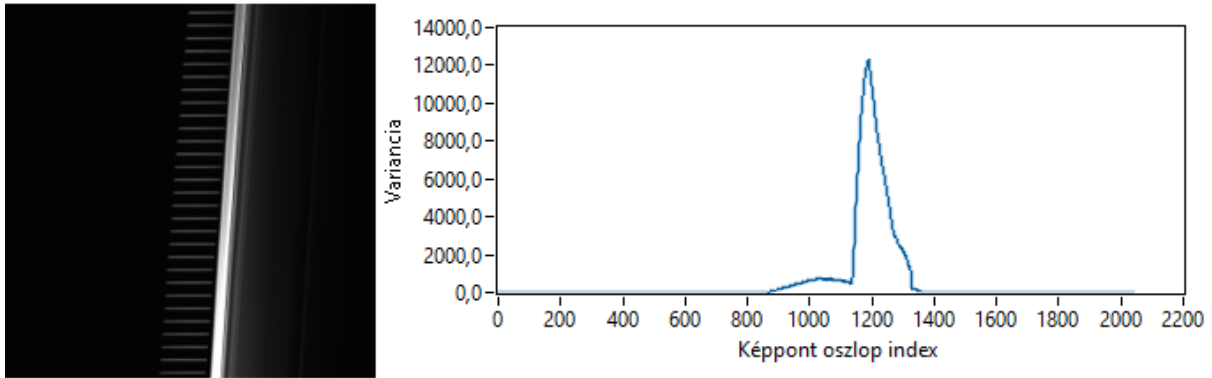
Res_x : a kamera felbontás X dimenziója képpontban kifejezve.

Az összefüggésben lévő x_0 annak a referenciapontnak az x koordinátáját jelöli, amelyhez képest a mérést végezzük, x_m pedig az elmozdult alkatrész kijelölt mérési pontjának x koordinátáját. Az 51. ábrán két különböző pozícióban készült felvétel látható.



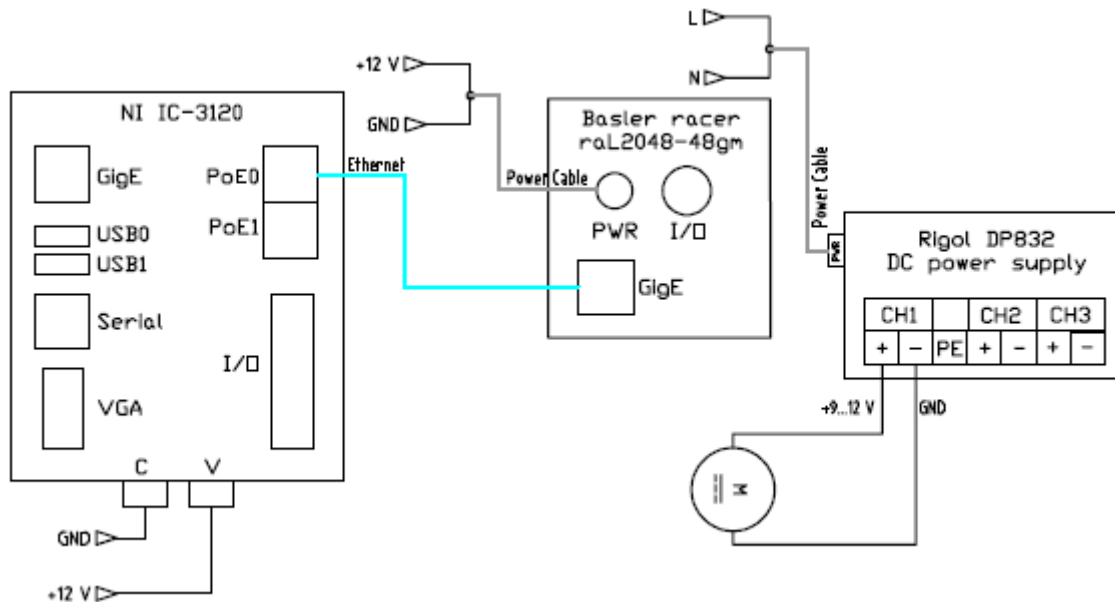
51. ábra Részletek pozíciómeghatározásra készült felvételekből

A fenti felvételek a forgó alkatrészek állandósult helyzetében készültek. Amennyiben az alkatrész elmozdulása detektálható a rögzített képen, mint az 52. ábrán, a fordulatszám mérésnél használt kiválasztó algoritmus nem alkalmas a feladatra.



52. ábra Pillanatfelvétel és varianciaértékek az alkatrész elmozdulása közben

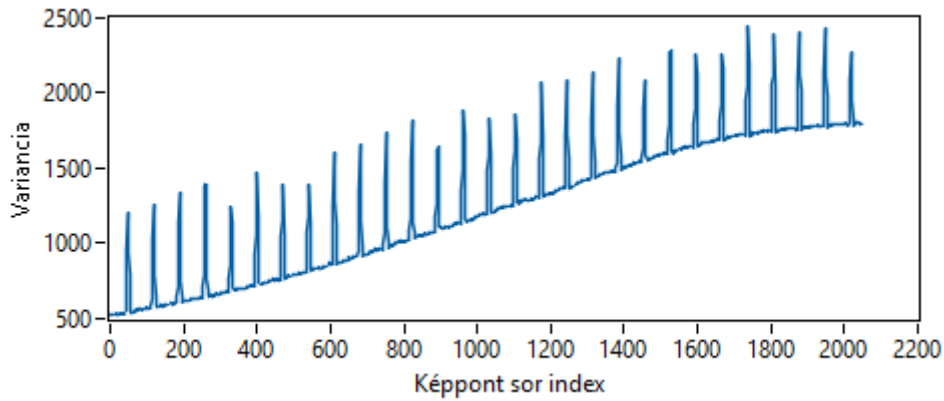
A tesztfelvételek készítésekor a korábban használt (29. ábrán látható) DC motor tengelyére szerelt 3D nyomtatott fogaskereket vizsgáltam, miközben a forgástengellyel párhuzamos irányban, meghatározott távolságra mozdítottam el a motort. Ennek az irányítórendszernek a váza látható az 53. ábrán.



53. ábra Irányítórendszer elmozdulás méréshez

5.1. A varianciagörbe előfeldolgozása

Az alkatrész elmozdulása a kép alsó képpontsoraiban detektálható, a képpont oszlopokra kiszámolt varianciagörbéből azonban ez a mérési pont nem határozható meg. A legelső képsorok kiválasztásához, ahol detektálható az alkatrész, megvizsgáltam a képsorok varianciáját. Az 52. ábrán látható felvétel képpont soraira számolt varianciagörbe látható az 54. ábrán.

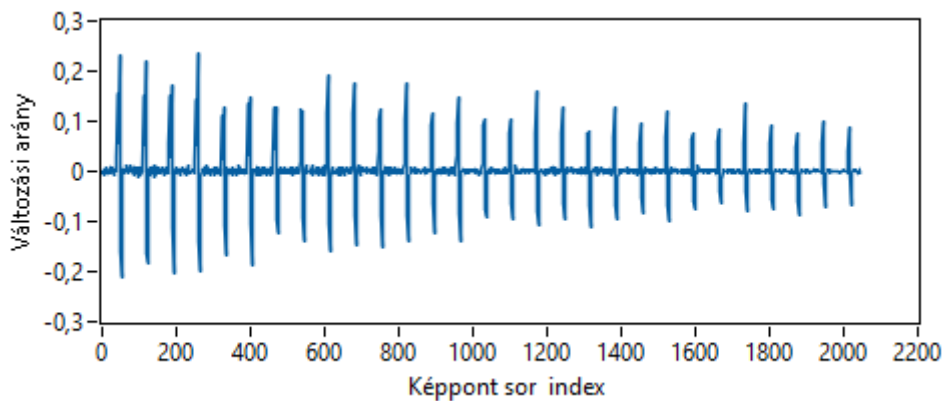


54. ábra Varianciaértékek a felvétel pixelsorain

Ha a későbbi képpont-oszlop vizsgálatokhoz szűkítjük a mérési tartományt a képpont sorokban mért varianciaértékek alapján megtalált utolsó jellemző pozíciójára (a fenti ábra alapján a jobb szélső görbecsúcs x koordinátájának keresése a cél), a varianciavizsgálat alkalmas lesz az elmozdulás mértékének kiszámításához. A görbe jellege miatt viszont az utolsó alkatrészejellemző nem választható ki egyszerű küszöbérték vizsgálattal. Az alkatrész jellemzőit reprezentáló kiugró értékek detektálásához ezért megvizsgáltam a varianciaértékek változási arányát a képpontsor minden pontjában, amely egy diszkrét (előretekinthető) derivált és az aktuálisan beolvasott érték hányadosaként értelmezhető az 50. összefüggés szerint.

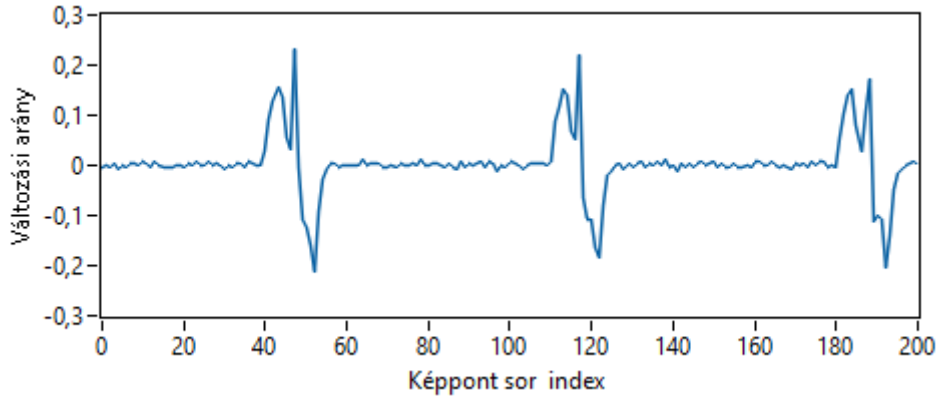
$$v_i = \frac{\Delta Var(y_i)}{Var(y_i)} = \frac{Var(y_{i+1}) - Var(y_i)}{Var(y_i)} \quad (50)$$

Az összefüggés alkalmazásának eredménye látható az 55. ábrán:



55. ábra Változási arányértékek a felvétel képpont sorain

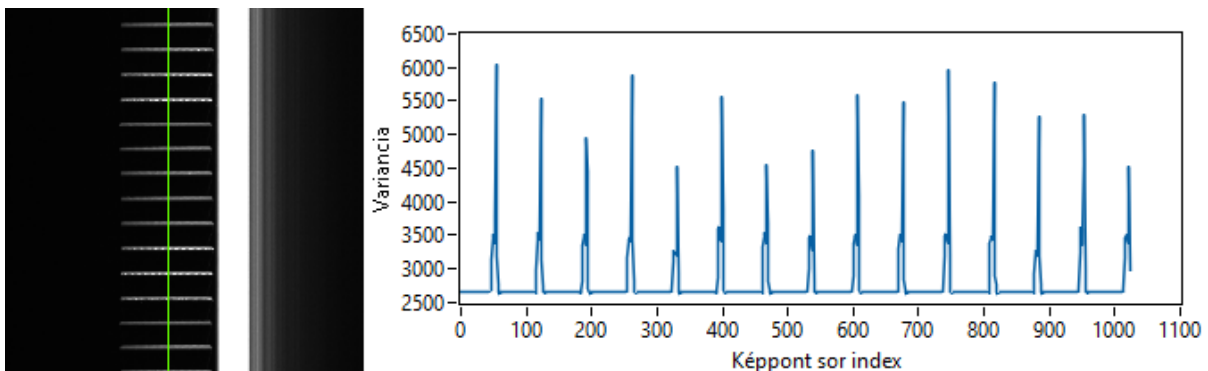
A változási aránygörbe már könnyebben feldolgozható, azonban küszöbölésre még nem alkalmas közvetlenül a görbecsúcsok változásának jellege miatt, amely az 56. ábrán, a fenti grafikon adataira való ráközelítéssel megfigyelhető.



56. ábra Változási aránygörbe az első 200 sor varianciáértékére

Ha a fenti görbén például egy $K=0,05$ értékű küszöböt alkalmaznánk a jellemzők megszámlálásához és azok pozícióinak megtalálásához (a 4.2. fejezetben bemutatott algoritmust és a 40-42. egyenleteket alkalmazva a képpont sorokra), helytelen eredményt kapnánk, hiszen némelyik görbecsúcsot kétszer adnánk hozzá az eredményhez.

Egy további felmerülő problémát jelenthet a jellemzők számolásának algoritmusában, ha a képen a legelső jellemző nem teljes egészében jelenik meg a felvételen, ilyenkor ugyanis előfordulhat, hogy az utolsó jellemző és a felvétel legelső y koordinátája (H) közötti különbség 1. Ilyen esetben csak egy képpontsor kerül kiválasztásra a vizsgálathoz, amelyen viszont az oszlop irányú varianciaszámítás nem értelmezhető. Erre az esetre mutat példát az 57. ábrán lévő felvételrészlet és annak képpont soraira kiszámolt varianciagörbe.



57. ábra Nem teljes jellemző hatása a képpont sor varianciagörbéjére

Ennek a problémának egy lehetséges megoldása, ha az alsó képpont sorok kiválasztását egy feltételvizsgálattal bővítem, ami szerint a kiválasztott sorok számának legalább a görbecsúcsok közötti távolsággal kell egyenlőnek lennie. Amennyiben sikerül meghatározni ezt az értéket a variancia változási aránygörbén, akkor az 56. ábrával szemléltetett küszöbölési probléma is megoldódik.

A feladat értelmezhető az aránygörbe periodicitásának vizsgálataként, amelynek eredményeként meghatározható az adatsor periódusa. A frekvenciatartalom elemzésére alkalmazható lenne a diszkrét Fourier-transzformáció (DFT), melynek kifejtése az 51. egyenlet szerint történik.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{n}kn}, \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (51)$$

ahol X_k a k . frekvenciakomponens, x_n az n . minta az adatsorban, N az adatsor hossza és k a k . frekvenciaindex, ami a Fourier-transzformáció során a k . frekvenciát jelenti.

Bár a DFT átfogó megoldást nyújt a diszkrét adatsorok periodicitásának elemzéséhez és számos platform függvénykönyvtárai támogatják, azonban egy olyan algoritmus fejlesztése a célom, amely egyszerű műveletekkel, alacsony szintű eszközökön is implementálható. A j képzetes egység kezelése olyan kihívást jelentene, amely miatt egy alternatív megoldás kidolgozását tűztem ki célul. Ezért, a vizsgálatot az autokorrelációs függvény segítségével folytattam az 52. egyenlet alapján, a változási aránygörbe pontjaira egy H képpont magas képen.

$$R_k = \frac{1}{H} \sum_{i=k+1}^H (v_i - \bar{v})(v_{i-k} - \bar{v}), \quad k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}, \quad (52)$$

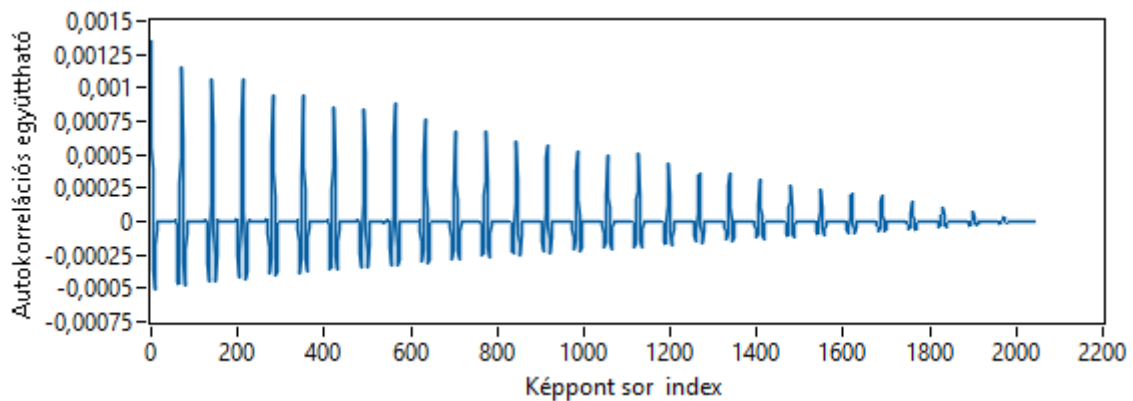
ahol

H : a kép magassága képpontokban kifejezve,

v_i : a varianciaértékek változási aránya a képpontsor i . pontjában,

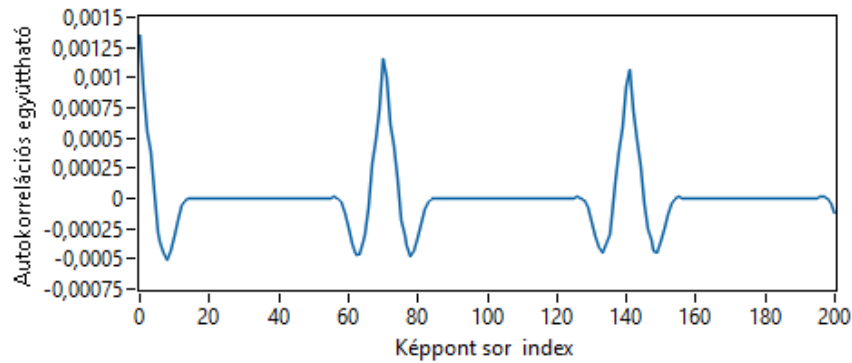
\bar{v} : a varianciaértékek átlaga.

A kifejtést az 55. ábrán bemutatott változási aránygörbén alkalmaztam, melynek eredménye az 58. ábrán látható.



58. ábra Korrelációs együtthatók a változási aránygörbén

Az eredményül kapott görbék a periódus meghatározására küszöböléssel is alkalmasak, nem tartalmaznak a változási görbén tapasztalt zavaró jelváltozásokat, amint az az 59. ábrán is megfigyelhető.



59. ábra A küszöbölésre alkalmas korrelációs együtthatók görbéje

5.2. A mérési pont kiválasztása

A periódust a görbecsúcsok x koordinátái közötti különbséggel határoztam meg. Ennek első lépése a görbecsúcsok pozíciójának megkeresése, hasonló módon, mint ahogyan a fordulatszám mérésnél számoltam a felvételen látható jellemzőket a generált vonalprofil alapján. A görbecsúcsok kereséséhez használt mennyiségek:

H : a kép magassága képpontokban kifejezve

R_k : autokorrelációs együtthatók a változási aránygörbe pontjaira

$k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}$: iterációs változó

T_R : a vizsgálat küszöbértéke

n_g : a detektált görbecsúcsok száma

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_g}\}$: a detektált görbecsúcsok x koordinátái

f_k : a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye

A felsorolt be- és kimeneti paraméterek kezdeti értékei:

$$n_g = 0$$

$$X = \emptyset$$

$$f_{k-2} = f_{k-1} = \text{HAMIS}$$

Az x koordináták meghatározását szolgálják az 53-56. összefüggések.

1. Küszöbérték számítás:

$$T_R = 0,2 \cdot \max(R_k) \quad (53)$$

2. Feltételvizsgálat:

$$f_k = \begin{cases} \text{IGAZ}, & \text{ha } (R_k \geq R_{k-1}) \text{ és } (R_k \geq T_R) \text{ és } (f_{k-1} = \text{HAMIS}) \\ \text{HAMIS}, & \text{ha } (R_k < R_{k-1}) \text{ és } (R_k < T_R) \text{ és } (f_{k-1} = \text{IGAZ}) \\ f_{k-1} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (54)$$

3. Görbecsúcsok számolása:

$$n_g = n_g + \begin{cases} 1, & \text{ha } f_k = \text{IGAZ} \text{ és } f_{k-1} = \text{HAMIS} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (55)$$

4. X koordináták gyűjtése:

$$X = X \cup \{k \mid f_k = IGAZ\} \quad (56)$$

A küszöbérték számításnál alkalmazott 0,2 értékű szorzót tapasztalati úton határoztam meg. A periódusszámítás nem érzékeny erre a küszöbértékre, ugyanis a meghatározásához nem a képen látható összes görbecsúcs azonosítása a követelmény, hanem a közöttük lévő átlagos távolságérték kiszámítása. Ugyanakkor, minél pontosabban határozom meg a görbecsúcsok számát, annál pontosabb lesz a periódusszámítás és ennél fogva az elmozdulás mérésre kiválasztott képmetszet minimális sormagassága.

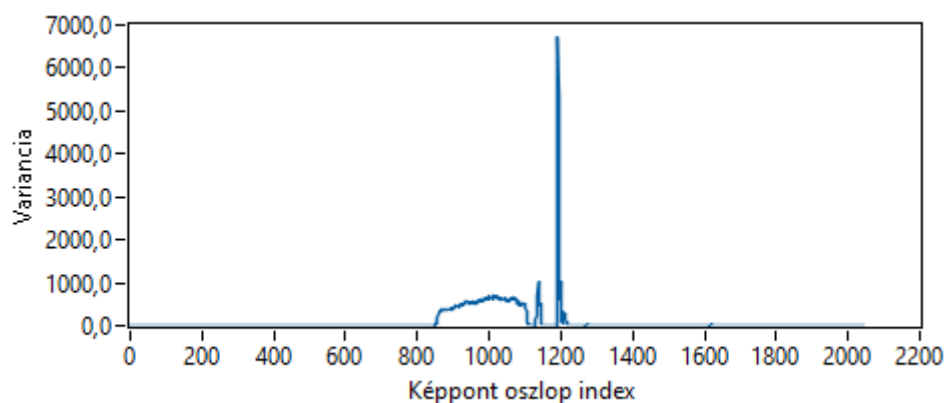
A görbecsúcsok x koordinátáinak ismeretében kiszámítható az átlagos periódushossz, ha $X = [x_1, x_2, \dots, x_{n_g}]$ a görbecsúcsok x koordinátáit tartalmazó vektor és $i \in \{0, 1, 2, \dots, n_g\}$ iterációs változó. A periódushosszként értelmezhető H_m , amely a korrelációs együtthatókat reprezentáló görbe csúcsai közötti átlagos távolság, az 57. összefüggés szerint fejthető ki:

$$H_m = \frac{1}{n_g - 1} \sum_{i=0}^{n_g-2} (x_{i+1} - x_i) \quad (57)$$

A H_m lesz tehát annak a képmetszetnek a magassága, amelyen belül a varianciaszámításon alapuló mérési pont kiválasztó algoritmust futtatom. A képmetszet kifejezése az 58. összefüggés szerint történik, ha a teljes beolvasott képet a $W \times H$ méretű P adatmátrixként értelmezzük.

$$P' = P[0 : W, (H - \lfloor H_m \rfloor) : H] \quad (58)$$

A P' képmetszet képpont oszlopaira kiszámított varianciagörbét mutatja a 60. ábra az előző példát folytatva.

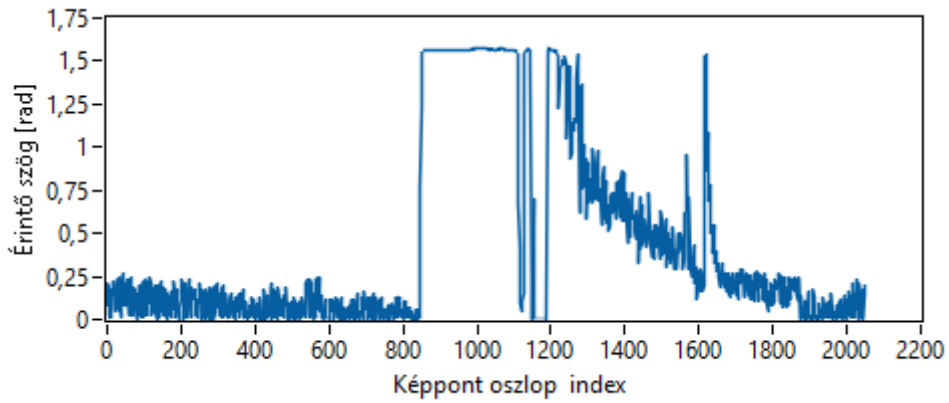


60. ábra Varianciagörbe a képmetszeten

A varianciagörbe egyszerű küszöböléséhez a kiugró, túszerű görbeszakasz hatását kompenzálni szükséges. Ennek egy módja a görbe érintő szögének kiszámítása minden pontban. Ha a képmetszet képpont oszlopainak varianciája $Var(x'_i)$, akkor az érintő szög értéke az 59. egyenlettel adható meg.

$$\theta_i = \tan^{-1}(\text{Var}(x'_i)), i \in [0, [H_m]] \quad (59)$$

amelynek eredménye a fenti példára a 61. ábrán látható.

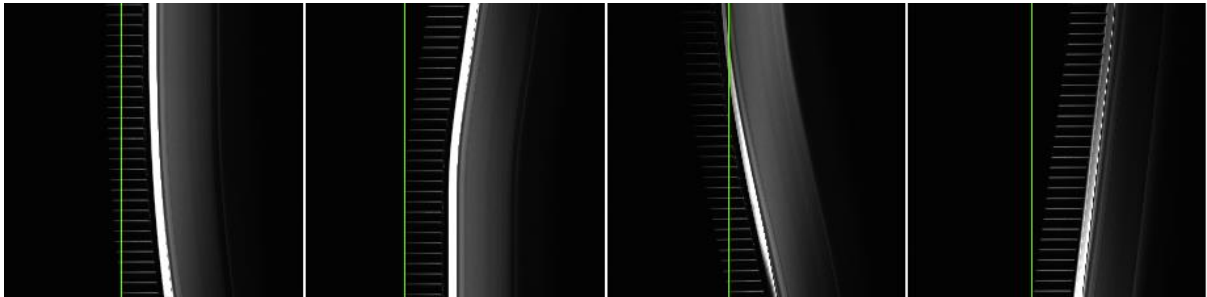


61. ábra A varianciagörbe érintő szögei

Az érintő szögek görbéjén már egyszerűen megtalálható a forgó alkatrész, melynek kezdő x koordinátájának meghatározásához a 60. egyenlet alkalmazható.

$$x_m = \min_{i \in [0, [H_m]]} \{i \mid \theta_i > T_\theta\} = \min_{i \in [0, [H_m]]} \left\{ i \mid \theta_i > \frac{1}{2} \max_{i \in [0, [H_m]]} \theta_i \right\} \quad (60)$$

Az x koordináta kiválasztó algoritmusának működését ellenőriztem a tesztfelvételeken, ezek eredményiből válogattam össze pár példát a 62. ábrán.



62. ábra Az elmozdulás mérési pont kiválasztásának tesztelése

A javasolt módszerrel tehát meghatározható az az x_m képpont a képen, amely az alkatrész vizsgált pontját reprezentálja az elmozdulást követően. A meghatározott x_0 referencia képpont ismeretében megállapítható az alkatrész képpontokban kifejezett elmozdulása. Az x_m és x_0 képpont indexek különbségéből pedig, az objektum pixelméret ismeretében kiszámolható a valós elmozdulás (mm egységben) a 49. összefüggés alapján.

IV. Tézis

A forgó alkatrészek forgástengelymenti elmozdulása meghatározható monokróm line scan kamerával.

a) Az x_m mérési pont kiválasztására alkalmas az alábbi összefüggés:

$$x_m = \min_{i \in [0, [H_m]]} \{i \mid \theta_i > T_\theta\} = \min_{i \in [0, [H_m]]} \left\{ i \mid \theta_i > \frac{1}{2} \max_{i \in [0, [H_m]]} \theta_i \right\}$$

$\forall i \in \{0, 1, 2, \dots, n_g\}$:

$$\theta_i = \tan^{-1}(\text{Var}(x'_i)), i \in [0, [H_m]]$$

$$H_m = \frac{1}{n_g - 1} \sum_{i=0}^{n_g - 2} (x_{i+1} - x_i)$$

$$P' = P[0 : W, (H - [H_m]) : H],$$

ahol

H : a kép magassága képpontokban kifejezve,

W : a kép szélessége képpontokban kifejezve,

$v_i = \frac{\Delta \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)} = \frac{\text{Var}(y_{i+1}) - \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)}$: a képpont sorokra számolt varianciaértékek

változási aránya,

$R_k = \frac{1}{H} \sum_{i=k+1}^H (v_i - \bar{v})(v_{i-k} - \bar{v})$, $k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}$: autokorrelációs

együtthatók a változási aránygörbe pontjaira,

$T_R = 0,2 \cdot \max(R_k)$: a vizsgálat küszöbértéke,

n_g : a detektált görbecsúcsok száma az autokorrelációs függvényen,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_g}\}$: a detektált görbecsúcsok X koordinátái,

f_k : a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye.

$\forall k \in \{0, 1, \dots, H - 1\}$:

$$f_k = \begin{cases} \text{IGAZ}, & \text{ha } (R_k \geq R_{k-1}) \text{ és } (R_k \geq T_R) \text{ és } (f_{k-1} = \text{HAMIS}) \\ \text{HAMIS}, & \text{ha } (R_k < R_{k-1}) \text{ és } (R_k < T_R) \text{ és } (f_{k-1} = \text{IGAZ}) \\ f_{k-1}, & \text{egyébként,} \end{cases}$$

$$n_g = n_g + \begin{cases} 1, & \text{ha } f_k = \text{IGAZ és } f_{k-1} = \text{HAMIS} \\ 0, & \text{egyébként,} \end{cases}$$

$$X = X \cup \{k \mid f_k = \text{IGAZ}\}.$$

b) A forgó alkatrészek forgástengelymenti elmozdulása az objektum pixelméret (OPS) ismeretében határozható meg line scan kamerával. Az alkatrész tengelymenti pozíciója egy x_0 kezdőponthoz képest:

$$d_m = |x_0 - x_m| \cdot \text{OPS} = |x_0 - x_m| \cdot \frac{\text{FOV}_x}{\text{Res}_x} [\text{mm}],$$

ahol

FOV_x : a látómező forgástengely irányú mérete [mm],

Res_x : a szenzorfelbontás,

x_0 : a referenciapont x koordinátája,

x_m : az elmozdult alkatrész kijelölt mérési pontjának x koordinátája.

A IV. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S9]

6. Összefoglalás

A kutatómunka célja egy olyan fordulatszám- és elmozdulás mérési eljárás kidolgozása volt monokróm line scan kamerával, amely képes akár 3000 rpm fordulatszámmal forgó alkatrészek mozgását vizsgálni. Az értekezés első fejezetében a kutatómunka mögötti motivációt és a kutatás célkitűzéseit részleteztem. A 2. fejezetben a gépi látáson alapuló rendszerek tervezéséhez szükséges alapismereteket foglaltam össze.

A gépi látáson alapuló mérőrendszerek működését nagyban befolyásolja a megvilágítás. A hagyományos, kamera I/O vonalakkal történő világításvezérlésnél nincs visszacsatolás a képi adatokról, ezért egy attól független világításvezérlő rendszert fejlesztettem, amely lehetőséget biztosít a képi adatok visszacsatolására és a LED vezérlőjel szabályozására. Ha a kameraexpozíció jel és a LED impulzussorozat frekvenciája eltér, rezonanciajelenség és intenzitásváltozás léphet fel a rögzített képeken. Első tézisként kidolgoztam egy olyan módszert, amellyel a felvétel pixelértékei megbecsülhetők a kameraexpozíció jel és világításvezérlő jel karakterisztikái alapján. Második tézisként kidolgoztam egy eljárást, amely a kameraexpozíció és világításvezérlő jel közötti frekvenciakülönbség kompenzálására szolgál, az első tézisben bemutatott szimulációs algoritmus alapján megbecsülve az intenzitást az egyes pixelsorokra. A megvilágítási módszert a 3. fejezetben ismertettem.

A fordulatszám line scan kamerával történő meghatározására kidolgoztam egy olyan eljárást, amely azon alapul, hogy a gyorsabban forgó alkatrészek jellemzői sűrűbben helyezkednek el a felvételen, mint a lassabban forgóké. A line scan kamerák működéséből adódóan a felvételeken a mozgó objektumok nagyobb intenzitás szórást okoznak a képpont oszlopokban, mint a statikus elemek, amelyek homogén képet nyújtanak. Ezért, a fordulatszám meghatározásához szükséges mérési pontok kiválasztása megvalósítható egy varianciaszámításon alapuló algoritmussal. A kidolgozott algoritmust és az ezt összegző harmadik tézist a 4. fejezetben ismertetem.

Az elmozdulás meghatározásánál szintén a mérési pontok kiválasztási módja jelentette a kihívást, amelyre negyedik tézisként javasoltam megoldást az 5. fejezetben. Az algoritmus alkalmas az alkatrész mozgás közbeni helyzetének meghatározására egy referenciaponthoz képest. A varianciaszámításon alapuló algoritmus alkalmazásához a képpontsorok intenzitásgörbéinek előzetes feldolgozása volt szükséges.

A világításvezérlő, illetve a fordulatszám és elmozdulás meghatározására algoritmusokat úgy dolgoztam ki, hogy azok alacsony erőforrásigényű eszközökön, mint az FPGA alapú vezérlőegységeken is futtathatók legyenek.

A következőkben az értekezés téziseit foglalom össze.

I. Tézis

Az O átfedési arány vektorból létrehozható az a W képpont széles kép ($Q[i, j]$), amelyet egy egyszínű felület $g(t)$ vezérlőjellel történő megvilágításával kapunk $f(t)$ expozíció mellett, ha a felvételen elérhető legnagyobb intenzitás érték I_{max} :

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, W - 1\}, \forall j \in \{0, 1, \dots, k - 1\}: Q[i, j] = [O[j] \cdot I_{max}]$$

ahol

$$k = \left\lfloor \frac{N \cdot f_f}{f_s} \right\rfloor$$

$$O = \begin{cases} O \cup \left\{ \frac{s_g[n-1]}{s_f[n-1]} \right\}, & \text{ha } f[n] = 0 \wedge f[n-1] = 1 \\ O \text{ egyébként} \end{cases}$$

$$s_f[0] = 0, s_g[0] = 0, \forall n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}:$$

$$s_f[n] = \begin{cases} s_f[n-1] + 1, & \text{ha } f[n] = 1 \\ 0, & \text{ha } f[n] = 0 \end{cases}$$

$$s_g[n] = \begin{cases} s_g[n-1] + 1, & \text{ha } f[n] = 1 \wedge g[n] = 1 \\ s_g[n-1], & \text{ha } f[n] = 1 \wedge g[n] = 0 \\ 0, & \text{ha } f[n] = 0 \end{cases}$$

Magyarázat: Amennyiben az $f(t)$ kameraexpozíció jel és a $g(t)$ világítás vezérlőjel megegyező frekvenciájú, a két jel teljes átfedése a $g(t)$ jel fáziseltolás beállításával biztosítható. A megvilágítás ebben az esetben biztosítja a jelenet környezetétől függő legnagyobb intenzitásértékeket. A gyakorlatban azonban a kamera mintavételi frekvenciája és a világításvezérlő által szolgáltatott jel frekvenciája különbözhet, ami a rögzített képeken zavaró, periodikus intenzitásváltozást okoz.

A jelgörbék átfedéséből adódó intenzitás az egyes pixelsorokra megbecsülhető a jelek $f[n]$ és $g[n]$ diszkrét időbeli megfelelőinek bevezetésével f_s mintavételi frekvenciával:

$$f[n] = \begin{cases} 1, & \text{ha } \left(\frac{n}{f_s} \right) \bmod \left(\frac{1}{f_f} \right) < D_f \cdot \frac{1}{f_f} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$g[n] = \begin{cases} 1, & \text{ha } \left(\frac{n}{f_s} - \varphi \right) \bmod \left(\frac{1}{f_g} \right) < D_g \cdot \frac{1}{f_g} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$$

ahol

f_f [Hz]: a kameraexpozíció jel frekvenciája,

D_f [%]: a kameraexpozíció jel kitöltési tényezője,

f_g [Hz]: a LED vezérlőjel frekvenciája,

D_g [%]: a LED vezérlőjel kitöltési tényezője,

φ : a LED vezérlőjel fáziseltolása a kameraexpozíció jelhez képest.

Az I. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S5]

II. Tézis

Egy line scan kamera-alapú mérőrendszerben meghatározható a világításvezérlő jel f_g frekvenciája, amely az átfedési arányokat tartalmazó \mathbf{O} vektor átlag- és varianciaértékeit vizsgálja. A kidolgozott keresőalgoritmussal meghatározható az a c pont, ahol az \mathbf{O} vektor átlagértékeinek maximuma és varianciaértékeinek minimuma reprezentálja az optimális frekvenciát:

$$c = \begin{cases} \frac{i_{min} + i_{max}}{2}, & \text{ha } \sigma^2(c_0) = 0 \\ i \mid i \in i_{min_var}, \mid i - c_0 \mid = \min(\mid j - c_0 \mid \mid j \in i_{min_var}), & \text{egyébként} \end{cases}$$

ahol

$$i_{min} = \min \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\}$$

$$i_{max} = \max \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\}$$

$$i_{min_var} = \{ j \mid i_{min} \leq j \leq i_{max}, \sigma^2(j) = \min(\sigma^2(i)) \}$$

$$B_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=k-n+1}^k A(\mu_i), \text{ ha } k \geq n$$

$$A(\mu_k) = \begin{cases} \mu_k, & \text{ha } \mu_k \geq \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \\ \max(\mu) + \min(\mu) - \mu_k, & \text{ha } \mu_k < \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \end{cases}$$

Magyarázat: A keresési folyamat első lépése a világításvezérlő jel frekvenciájának folyamatos növelése:

$$n_f[i + 1] = \begin{cases} 0, & \text{ha } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ n_f[i] + 1, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$n_r[j + 1] = \begin{cases} 0, & \text{ha } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ n_r[j] + 1, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$f_g[k + 1] = \begin{cases} f_g[0], & \text{ha } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ f_g[k], & \text{ha } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ f_g[0] - \frac{N_r \cdot \Delta f_g}{2} + \Delta f_g \cdot \left\lfloor \frac{n_f[i] + 1}{N_r} \right\rfloor, & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$\mu[k + 1] = \bar{0}$$

$$\sigma^2[k + 1] = \sigma^2(0)$$

ahol

- n_f : a mérési ciklusok száma az adott frekvencián,
 N_f : a különböző frekvenciák maximális száma,
 n_r : az adott frekvencián belüli ismétlések száma,
 N_r : az adott frekvencián belüli maximális ismétlések száma,
 Δf_g : frekvencia lépésköz,
 μ : az $\bar{O}[j]$ átlag értékek vektora,
 σ^2 : a $\sigma^2(O[j])$ variancia értékek vektora.

A II. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S6]

III. Tézis

A forgó alkatrészek fordulatszáma meghatározható monokróm line scan kamerával az alábbi összefüggések alkalmazásával.

a) **A mérési pontok kiválasztása a képpont oszlopok intenzitásának varianciavizsgálatával megvalósítható. A mérési pontokat tartalmazó M vektor az x_m indexű képpont oszlopban lévő összes pont, amely H képpont magasságú és W képpont széles kép esetén:**

$$M = [(x_m, y) \mid y \in [0, H - 1]]$$

ahol

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} \mid [x_1, x_2] = \left\{ x \in [0, W - 1] \mid Var(x) > \frac{1}{3} \max_{x \in [0, W - 1]} Var(x) \right\}$$

b) **A fordulatszám meghatározására az alábbi összefüggés alkalmazható, ha n_d a detektált jellemzők száma, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_d}\}$ a detektált jellemzők y koordinátái, f_i a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye, $P = [p_1, p_2, \dots, p_{H-1}]$ a mérésre kiválasztott képpont vektor és T_P a vizsgálat küszöbértéke:**

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$f = \frac{f_s \cdot 60}{(1 - H(n_d - (n + 1))) \left((Y'_0 - Y'_{n_d-1}) \cdot \frac{n}{n_d - 1} \right) + H(n_d - (n + 1)) (Y'_0 - Y'_n)} \quad [rpm]$$

ahol

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, n_d - 1\}:$$

$$Y' = [y_{n_d-1}, y_{n_d-2}, \dots, y_0], \text{ ahol } y'_i = y_{n_d-1-i}$$

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, H - 1\}:$$

$$Y = Y \cup \{i \mid f_i\}$$

$$n_d = n_d + \begin{cases} 1, & \text{ha } f_i = \text{IGAZ és } f_{i-1} = \text{HAMIS} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$f_i = \begin{cases} \text{IGAZ, ha } (p_i \geq p_{i-1}) \text{ és } (p_i \geq T_p) \text{ és } (f_{i-1} = \text{HAMIS}) \\ \text{HAMIS, ha } (p_i < p_{i-1}) \text{ és } (p_i < T_p) \text{ és } (f_{i-1} = \text{IGAZ}) \\ f_{i-1} \text{ egyébként} \end{cases}$$

A fordulatszám meghatározására javasolt módszer alkalmazásának feltételei:

- A forgó alkatrészen detektálható jellemzők száma: $n \in \mathbb{N}: n > 0$
- $n > 1$ esetén, ha θ a jellemzők forgásponttól számított szöge:

$$\forall k, l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad k \neq l, \quad \exists m \in \mathbb{Z}: (\theta_l - \theta_k) \bmod 2\pi = m \cdot \Delta\theta, \text{ ahol:}$$

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{n}$$

- A felvételen detektálható jellemzők száma: $n_d \geq 2$.
- A jellemzők számának (n) és a sorfrissítési frekvenciának (f_s) előzetes ismerete.

A III. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S7], [S8]

IV. Tézis

A forgó alkatrészek forgástengelymenti elmozdulása meghatározható monokróm line scan kamerával.

a) Az x_m mérési pont kiválasztására alkalmas az alábbi összefüggés:

$$x_m = \min_{i \in [0, [H_m]]} \{i \mid \theta_i > T_\theta\} = \min_{i \in [0, [H_m]]} \left\{ i \mid \theta_i > \frac{1}{2} \max_{i \in [0, [H_m]]} \theta_i \right\}$$

$\forall i \in \{0, 1, 2, \dots, n_g\}$:

$$\theta_i = \tan^{-1}(\text{Var}(x'_i)), \quad i \in [0, [H_m]]$$

$$H_m = \frac{1}{n_g - 1} \sum_{i=0}^{n_g-2} (x_{i+1} - x_i)$$

$$P' = P[0 : W, (H - [H_m]) : H]$$

ahol

H : a kép magassága képpontokban kifejezve,

W : a kép szélessége képpontokban kifejezve,

$v_i = \frac{\Delta \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)} = \frac{\text{Var}(y_{i+1}) - \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)}$: a képpont sorokra számolt varianciaértékek

változási aránya,

$R_k = \frac{1}{H} \sum_{i=k+1}^H (v_i - \bar{v})(v_{i-k} - \bar{v})$, $k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}$: autokorrelációs

együtthatók a változási aránygörbe pontjaira,

$T_R = 0,2 \cdot \max(R_k)$: a vizsgálat küszöbértéke,

n_g : a detektált görbecsúcsok száma az autokorrelációs függvényen,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_g}\}$: a detektált görbecsúcsok X koordinátái,

f_k : a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye.

$\forall k \in \{0, 1, \dots, H - 1\}$:

$$f_k = \begin{cases} IGAZ, & \text{ha } (R_k \geq R_{k-1}) \text{ és } (R_k \geq T_R) \text{ és } (f_{k-1} = HAMIS) \\ HAMIS, & \text{ha } (R_k < R_{k-1}) \text{ és } (R_k < T_R) \text{ és } (f_{k-1} = IGAZ) \\ f_{k-1} & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$n_g = n_g + \begin{cases} 1, & \text{ha } f_k = IGAZ \text{ és } f_{k-1} = HAMIS \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$X = X \cup \{k \mid f_k = IGAZ\}$$

b) A forgó alkatrészek forgástengelymenti elmozdulása az objektum pixelméret (*OPS*) ismeretében határozható meg line scan kamerával. Az alkatrész tengelymenti pozíciója egy x_0 kezdőponthoz képest:

$$d_m = |x_0 - x_m| \cdot OPS = |x_0 - x_m| \cdot \frac{FOV_x}{Res_x} [mm]$$

ahol

FOV_x : a látómező forgástengely irányú mérete [mm],

Res_x : a szenzorfelbontás,

x_0 : a referenciapont x koordinátája,

x_m : az elmozdult alkatrész kijelölt mérési pontjának x koordinátája.

A IV. Tézishez kapcsolódó publikációk: [S9]

7. Summary

The aim of the research was to develop a rotational speed and position measurement method using a monochrome line scan camera capable of examining the motion of components rotating at speeds of up to 3000 rpm. In the first chapter of the dissertation, the motivation behind the research and the research objectives were described. In the second chapter, the basic knowledge necessary for designing machine vision-based systems was summarized.

The performance of machine vision-based control systems is significantly influenced by the lighting conditions. Traditional lighting control methods using camera I/O lines lack feedback from the image data. Consequently, an independent lighting control system was developed that enables feedback from image data and allows for the regulation of the LED control signal. Discrepancies in the frequencies of the camera exposure signal and the LED pulse train can result in resonance phenomena and variations in intensity within the captured images. In my first thesis, I developed a method by which the pixel values of the recording can be estimated based on the characteristics of the camera exposure signal and lighting control signal. As my second thesis, I developed a procedure for compensating the frequency difference between the camera exposure and the lighting control signal, estimating the intensity for each pixel row based on the simulation algorithm presented in the first thesis. The detailed description of this lighting method is provided in Chapter 3.

A method for determining rotational speed using a line scan camera was developed, based on the principle that characteristics of faster rotating components appear more densely in the captured image compared to those of slower rotating ones. Due to the operation of line scan cameras, moving objects cause greater intensity variation in the pixel columns of the images than static elements, which produce a homogeneous image. Therefore, the selection of measurement points necessary for determining rotational speed can be achieved through an algorithm based on variance calculation. The developed algorithm and the corresponding third thesis are detailed in Chapter 4.

In determining displacement, the selection of measurement points also presented a challenge. As my fourth thesis, I proposed a solution to this issue in Chapter 5. The algorithm can determine the position of a component in motion relative to a reference point. The application of the variance-based algorithm required preliminary processing of the intensity curves of the pixel rows. The lighting control algorithms, as well as the algorithms for determining rotational speed and displacement were developed to be executable on low-resource devices such as FPGA-based control units.

In the following sections, the theses of the dissertation will be summarized.

Thesis I.

The overlap ratio vector O can be used to create the W -pixel-wide image $Q[i, j]$, which is obtained by illuminating a monochromatic surface with the $g(t)$ control signal under $f(t)$ exposure, where the maximum achievable intensity value in the image is I_{max} :

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, W - 1\}, \forall j \in \{0, 1, \dots, k - 1\}: Q[i, j] = [O[j] \cdot I_{max}]$$

where

$$k = \left\lfloor \frac{N \cdot f_f}{f_s} \right\rfloor$$

$$O = \begin{cases} O \cup \left\{ \frac{s_g[n-1]}{s_f[n-1]} \right\}, & \text{if } f[n] = 0 \wedge f[n-1] = 1 \\ O & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_f[0] = 0, s_g[0] = 0, \forall n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}:$$

$$s_f[n] = \begin{cases} s_f[n-1] + 1, & \text{if } f[n] = 1 \\ 0, & \text{if } f[n] = 0 \end{cases}$$

$$s_g[n] = \begin{cases} s_g[n-1] + 1, & \text{if } f[n] = 1 \wedge g[n] = 1 \\ s_g[n-1], & \text{if } f[n] = 1 \wedge g[n] = 0 \\ 0, & \text{if } f[n] = 0 \end{cases}$$

Explanation: If the $f(t)$ camera exposure signal and the $g(t)$ lighting control signal have the same frequency, the complete overlap of the two signals can be ensured by adjusting the phase shift of the $g(t)$ signal. This lighting condition provides the highest intensity values depending on the scene environment. However, in practice, the camera sampling frequency and the frequency of the signal provided by the lighting controller may differ, causing disruptive, periodic intensity variations in the recorded images.

The intensity resulting from the overlap of the signal curves can be estimated for each pixel row by introducing the discrete-time counterparts of the signals, $f[n]$ and $g[n]$, with a sampling frequency of f_s :

$$f[n] = \begin{cases} 1, & \text{if } \left(\frac{n}{f_s} \right) \bmod \left(\frac{1}{f_f} \right) < D_f \cdot \frac{1}{f_f} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$g[n] = \begin{cases} 1, & \text{if } \left(\frac{n}{f_s} - \varphi \right) \bmod \left(\frac{1}{f_g} \right) < D_g \cdot \frac{1}{f_g} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

where

f_f [s]: exposure signal frequency,

D_f [%]: duty cycle of the exposure signal,

f_g [s]: frequency of the LED control signal,
 D_g [%]: duty cycle of the LED control signal,
 φ : the phase offset of the LED control signal compared to the exposure signal.

Publications related to Thesis I: [S5]

Thesis II.

The frequency f_g of the lighting control signal can be determined in a line scan camera-based measurement system, which examines the average and variance values of the vector \mathbf{O} containing the overlap ratios. The developed search algorithm can be used to determine the point c , where the maximum of the average values and the minimum of the variance values of the vector \mathbf{O} represent the optimal frequency:

$$c = \begin{cases} \frac{i_{min} + i_{max}}{2}, & \text{if } \sigma^2(c_0) = 0 \\ i \mid i \in i_{min_var}, \mid i - c_0 \mid = \min(\mid j - c_0 \mid \mid j \in i_{min_var}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

where

$$\begin{aligned}
 i_{min} &= \min \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\} \\
 i_{max} &= \max \left\{ i \mid B_i > \frac{\max(\mu_B) + \min(\mu_B)}{2} \right\} \\
 i_{min_var} &= \{ j \mid i_{min} \leq j \leq i_{max}, \sigma^2(j) = \min(\sigma^2(i)) \} \\
 B_k &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=k-n+1}^k A(\mu_i), \text{ if } k \geq n \\
 A(\mu_k) &= \begin{cases} \mu_k, & \text{if } \mu_k \geq \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \\ \max(\mu) + \min(\mu) - \mu_k, & \text{if } \mu_k < \frac{\max(\mu) + \min(\mu)}{2} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Explanation: The first step of the search algorithm is to continuously increase the frequency of the lighting control signal:

$$\begin{aligned}
 n_f[i+1] &= \begin{cases} 0, & \text{if } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ n_f[i] + 1, & \text{otherwise} \end{cases} \\
 n_r[j+1] &= \begin{cases} 0, & \text{if } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ n_r[j] + 1, & \text{otherwise} \end{cases} \\
 f_g[k+1] &= \begin{cases} f_g[0], & \text{if } n_f[i] + 1 \geq N_f \cdot N_r \\ f_g[k], & \text{if } n_r[j] + 1 \geq N_r \\ f_g[0] - \frac{N_r \cdot \Delta f_g}{2} + \Delta f_g \cdot \left\lfloor \frac{n_f[i] + 1}{N_r} \right\rfloor, & \text{otherwise} \end{cases} \\
 \mu[k+1] &= \bar{0}
 \end{aligned}$$

$$\sigma^2[k + 1] = \sigma^2(0)$$

where

- n_f : the number of measurement cycles at the given frequency,
- N_f : maximum number of different frequencies,
- n_r : number of repetitions within the given frequency,
- N_r : the maximum number of repetitions within the given frequency,
- Δf_g : frequency step,
- μ : vector of mean values $\bar{O}[j]$,
- σ^2 : the vector of variance values $\sigma^2(O[j])$.

Publications related to Thesis II: [S6]

Thesis III.

The rotational speed of rotating components can be determined using a monochrome line scan camera by applying the following relationships.

a) The selection of measurement points can be achieved through variance analysis of the pixel column intensities. The vector M containing the measurement points includes all points in the pixel column indexed by x_m , for an image with a height of H pixels and a width of W pixels:

$$M = [(x_m, y) \mid y \in [0, H - 1]]$$

where:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} \mid [x_1, x_2] = \left\{ x \in [0, W - 1] \mid Var(x) > \frac{1}{3} \max_{x \in [0, W - 1]} Var(x) \right\}$$

b) The following equation can be applied to determine the rotational speed, where n_d is the number of detected features, $Y = \{y_1, y_2 \dots, y_{n_d}\}$ are the Y-coordinates of the detected features, f_i is the result of the condition check for feature detection, $P = [p_1, p_2 \dots, p_{H-1}]$ is the vector of selected pixels for measurement, and T_p is the threshold value for the examination:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$f = \frac{f_s \cdot 60}{\left(1 - H(n_d - (n + 1))\right) \left((Y'_0 - Y'_{n_d-1}) \cdot \frac{n}{n_d - 1} \right) + H(n_d - (n + 1)) (Y'_0 - Y'_n)} \quad [rpm]$$

where:

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, n_d - 1\}:$$

$$Y' = [y_{n_d-1}, y_{n_d-2} \dots, y_0], \text{ where } y'_i = y_{n_d-1-i}$$

$\forall i \in \{0, 1, \dots, H - 1\}$:

$$Y = Y \cup \{i \mid f_i\}$$

$$n_d = n_d + \begin{cases} 1, & \text{if } f_i = \text{TRUE and } f_{i-1} = \text{FALSE} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_i = \begin{cases} \text{TRUE, if } (p_i \geq p_{i-1}) \text{ and } (p_i \geq T_p) \text{ and } (f_{i-1} = \text{FALSE}) \\ \text{FALSE, if } (p_i < p_{i-1}) \text{ and } (p_i < T_p) \text{ and } (f_{i-1} = \text{TRUE}) \\ f_{i-1}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Conditions:

- The number of detectable features on the rotating component: $n \in \mathbb{N}: n > 0$
- For $n > 1$, if θ is the angle of the features relative to the rotation point:

$$\forall k, l \in \{1, 2 \dots n\}, \quad k \neq l, \quad \exists m \in \mathbb{Z}: (\theta_l - \theta_k) \bmod 2\pi = m \cdot \Delta\theta, \text{ where:}$$

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{n}$$

- The number of detectable features in the captured image: $n_d \geq 2$
- Prior knowledge of the number of features (n) and the line rate (f_s).

Publications related to Thesis III: [S7], [S8]

Thesis IV.

The displacement of rotating components along the axis of rotation can be determined using a monochrome line scan camera.

a) The following equation is suitable for selecting the x_m measurement point:

$$x_m = \min_{i \in [0, [H_m]]} \{i \mid \theta_i > T_\theta\} = \min_{i \in [0, [H_m]]} \left\{ i \mid \theta_i > \frac{1}{2} \max_{i \in [0, [H_m]]} \theta_i \right\}$$

$\forall i \in \{0, 1, 2, \dots, n_g\}$:

$$\theta_i = \tan^{-1}(\text{Var}(x'_i)), \quad i \in [0, [H_m]]$$

$$H_m = \frac{1}{n_g - 1} \sum_{i=0}^{n_g - 2} (x_{i+1} - x_i)$$

$$P' = P[0 : W, (H - [H_m]) : H]$$

where:

H : the height of the image in pixels,

W : width of the image in pixels,

$v_i = \frac{\Delta \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)} = \frac{\text{Var}(y_{i+1}) - \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)}$: the rate of change of variance values

calculated for pixel rows,

$R_k = \frac{1}{H} \sum_{i=k+1}^H (v_i - \bar{v})(v_{i-k} - \bar{v})$, $k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}$: autocorrelation

coefficients for points on the rate of change curve,
 $T_R = 0,2 \cdot \max(R_k)$: threshold value of the examination,
 n_g : the number of detected peaks on the autocorrelation function,
 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_g}\}$: the X coordinates of the detected curve peaks,
 f_k : the result of the condition test for feature detection.

$\forall k \in \{0, 1, \dots, H - 1\}$:

$$f_k = \begin{cases} TRUE, & \text{if } (R_k \geq R_{k-1}) \text{ and } (R_k \geq T_R) \text{ and } (f_{k-1} = FALSE) \\ FALSE, & \text{if } (R_k < R_{k-1}) \text{ and } (R_k < T_R) \text{ and } (f_{k-1} = TRUE) \\ f_{k-1}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$n_g = n_g + \begin{cases} 1, & \text{if } f_k = TRUE \text{ and } f_{k-1} = FALSE \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$X = X \cup \{k \mid f_k = TRUE\}$$

b) The displacement of the rotating parts along the axis of rotation can be determined using a line scan camera, knowing the pixel size (*OPS*) of the object. The axial position of the component relative to a starting point d_0 :

$$d_m = |x_0 - x_m| \cdot OPS = |x_0 - x_m| \cdot \frac{FOV_x}{Res_x} [mm]$$

where:

FOV_x : the size of the field of view in the direction of the rotation axis [mm],

Res_x : sensor resolution,

x_0 : the X coordinate of the reference point,

x_m : the X coordinate of the designated measurement point of the displaced component.

Publications related to Thesis IV: [S9]

8. Irodalomjegyzék

- [1] Z. Ali and Sb. Bhaskar, “Basic statistical tools in research and data analysis,” *Indian J Anaesth*, vol. 60, no. 9, p. 662, 2016, doi: 10.4103/0019-5049.190623.
- [2] Alkeria SRL, “NECTA series USB3 line-scan camera User Guide,” www.alkeria.com.
- [3] V. Alonso, A. Dacal-Nieto, L. Barreto, A. Amaral, and E. Rivero, “Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview,” *Procedia Manuf*, vol. 41, pp. 359–366, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.020.
- [4] Automated Imaging Association (AIA), “GigE Vision Specification version 2.0,” 2013.
- [5] Basler AG, “Basler Line Scan Cameras,” <https://www.baslerweb.com/en-sg/cameras/line-scan-cameras/>.
- [6] Basler AG, “Basler racer USER’S MANUAL FOR GigE VISION CAMERAS,” 2019.
- [7] M. Béres and B. Paripás, “Fűrőszár rezgéseinek mérése lézer doppler módszerrel,” in *The publications of the MultiScience - XXXI. MicroCAD International Scientific Conference*, University of Miskolc, 2017. doi: 10.26649/musci.2017.053.
- [8] V. Bewick, L. Cheek, and J. Ball, “Statistics review 7: Correlation and regression,” *Crit Care*, vol. 7, no. 6, p. 451, 2003, doi: 10.1186/cc2401.
- [9] J. Breuer, V. Vigner, and J. Roztočil, “Precise packet delay measurement in an Ethernet network,” *Measurement*, vol. 54, pp. 215–221, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2014.03.020.
- [10] C. Chen, T. Ma, H. Jin, Y. Wu, Z. Hou, and F. Li, “Torque and rotational speed sensor based on resistance and capacitive grating for rotational shaft of mechanical systems,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 142, p. 106737, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106737.
- [11] Chromasens, “Inspection of bulk material with allPIXA wave and prism camera,” chromasens.de/en/blog/inspection-bulk-material-allpixa-wave-and-prism-camera.
- [12] Chromasens, “Semiconductor wafer inspection: allPIXA wave,” chromasens.de/en/blog/semiconductor-wafer-inspection-using-allpixa-wave.
- [13] Cognex Corporation, “INTRODUCTION TO MACHINE VISION – A guide to automating process & quality improvements,” USA, 2016.
- [14] Cognex Corporation, “A Practical Guide to Using the In-Sight 5604 Line Scan Vision System,” support.cognex.com/en/downloads/detail/in-sight/661/1033.
- [15] Cognex Corporation, “INTRODUCTION TO LINE SCAN VISION TECHNOLOGY – Image acquisition for large, cylindrical, and fast-moving parts,” www.cognex.com.
- [16] L. Czap, *Képfeldolgozás*. Miskolci Egyetem, 2007.
- [17] Edmund Optics Inc., “Imaging Electronics 101: Camera Types and Interfaces for Machine Vision Applications,” <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications>.

- [18] P. Fieguth, *Statistical Image Processing and Multidimensional Modeling*. New York, NY: Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7294-1.
- [19] P. Gao, Y. Song, M. Song, P. Qian, and Y. Su, “Extract nanoporous gold ligaments from SEM images by combining fully convolutional network and Sobel operator edge detection algorithm,” *Scr Mater*, vol. 213, p. 114627, May 2022, doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114627.
- [20] B. Garg and G. K. Sharma, “A quality-aware Energy-scalable Gaussian Smoothing Filter for image processing applications,” *Microprocess Microsyst*, vol. 45, pp. 1–9, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.micpro.2016.02.012.
- [21] H. Golnabi and A. Asadpour, “Design and application of industrial machine vision systems,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 23, no. 6, pp. 630–637, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.rcim.2007.02.005.
- [22] H. Helmers and M. Schellenberg, “CMOS vs. CCD sensors in speckle interferometry,” *Opt Laser Technol*, vol. 35, no. 8, pp. 587–595, Nov. 2003, doi: 10.1016/S0030-3992(03)00078-1.
- [23] JAI, “Prism-based line scan cameras vs. single-sensor multi-line cameras for color and multi-spectral imaging,” www.jai.com.
- [24] L. Ji, Y. Du, Y. Dang, W. Gao, and H. Zhang, “A survey of methods for addressing the challenges of referring image segmentation,” *Neurocomputing*, vol. 583, p. 127599, May 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.127599.
- [25] J. G. John and A. N., “Illumination Compensated images for surface roughness evaluation using machine vision in grinding process,” *Procedia Manuf*, vol. 34, pp. 969–977, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.099.
- [26] J. Josse and S. Holmes, “Measuring multivariate association and beyond,” *Stat Surv*, vol. 10, no. none, Jan. 2016, doi: 10.1214/16-SS116.
- [27] KEYENCE Corporation, “Customizable Vision System – XG-X Series,” www.keyence.eu/products/vision/vision-sys/xg-x.
- [28] V. Kumar and C. P. Sudheesh Kumar, “Investigation of the influence of coloured illumination on surface texture features: A Machine vision approach,” *Measurement*, vol. 152, p. 107297, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107297.
- [29] L. Li, H. Hu, Y. Qin, and K. Tang, “Digital Approach to Rotational Speed Measurement Using an Electrostatic Sensor,” *Sensors*, vol. 19, no. 11, p. 2540, Jun. 2019, doi: 10.3390/s19112540.
- [30] LUCID Vision Labs, “Triton Line Scan,” www.thinklucid.com/product/triton-2k-dragster-linescan/.
- [31] L. F. Lyu and W. D. Zhu, “Operational modal analysis of a rotating structure under ambient excitation using a tracking continuously scanning laser Doppler vibrometer system,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 152, p. 107367, May 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.107367.

- [32] Z. M. Mosa and E. Akin, "Design and sorting of an object identification on machine vision by using line scan camera," *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 100–112, Apr. 2021, doi: 10.47577/technium.v3i3.3181.
- [33] National Instruments Inc., "LabVIEW Machine Vision and Image Processing Online Course," Austin, Texas.
- [34] National Instruments Inc., "A Practical Guide to Machine Vision Lighting," 2019.
- [35] J. M. Prats-Montalbán, A. de Juan, and A. Ferrer, "Multivariate image analysis: A review with applications," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 107, no. 1, pp. 1–23, May 2011, doi: 10.1016/j.chemolab.2011.03.002.
- [36] R. Labudzki, S. Legutko, and P. Raos, "The essence and applications of machine vision," *Tehnički vjesnik*, vol. 21, no. 4, pp. 903–909, 2014.
- [37] M. De Santo, C. Liguori, A. Paolillo, and A. Pietrosanto, "Standard uncertainty evaluation in image-based measurements," *Measurement*, vol. 36, no. 3–4, pp. 347–358, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.measurement.2004.09.011.
- [38] J. J. Shaughnessy, E. B. Zechmeister, and J. S. Zechmeister, *Research Methods in Psychology*. University of Minnesota Libraries Publishing, 2016. doi: 10.24926/8668.2201.
- [39] L. F. Sikos, "Packet analysis for network forensics: A comprehensive survey," *Forensic Science International: Digital Investigation*, vol. 32, p. 200892, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.fsidi.2019.200892.
- [40] S. H. Simpson, "Creating a Data Analysis Plan: What to Consider When Choosing Statistics for a Study," *Can J Hosp Pharm*, vol. 68, no. 4, Aug. 2015, doi: 10.4212/cjhp.v68i4.1471.
- [41] Teledyne DALSA, "Understanding Line Scan Camera Applications," www.automate.org/tech-papers/understanding-line-scan-applications.
- [42] Turck, "How to Use Inductive Proximity Sensors in Rotational Speed Monitoring," <https://www.turck.de/attachment/G1031.pdf>.
- [43] J. Wang, F. Hu, G. Abbas, M. Albekairi, and N. Rashid, "Enhancing image categorization with the quantized object recognition model in surveillance systems," *Expert Syst Appl*, vol. 238, p. 122240, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122240.
- [44] T. Wang, L. Wang, Y. Yan, and S. Zhang, "Rotational speed measurement using a low-cost imaging device and image processing algorithms," in *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, IEEE, May 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/I2MTC.2018.8409665.
- [45] Y. F. Xu, D.-M. Chen, and W. D. Zhu, "Operational modal analysis using lifted continuously scanning laser Doppler vibrometer measurements and its application to baseline-free structural damage identification," *Journal of Vibration and Control*, vol. 25, no. 7, pp. 1341–1364, Apr. 2019, doi: 10.1177/1077546318821154.

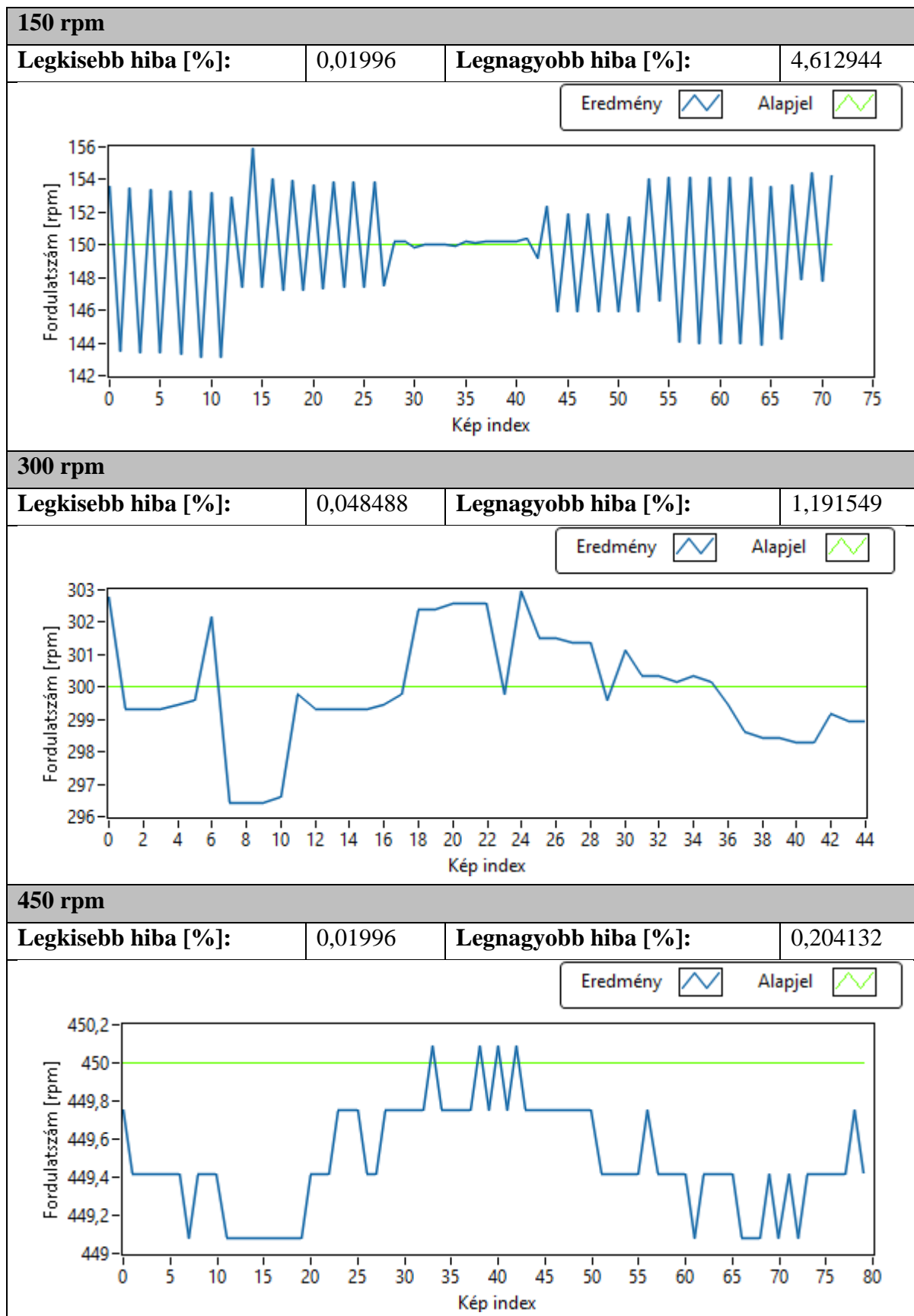
- [46] Y. Yang, X. Zhao, M. Huang, X. Wang, and Q. Zhu, "Multispectral image based germination detection of potato by using supervised multiple threshold segmentation model and Canny edge detector," *Comput Electron Agric*, vol. 182, p. 106041, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106041.
- [47] E. Zancul, H. O. Martins, F. P. Lopes, and F. A. T. V. da Silva Neto, "Machine Vision applications in a Learning Factory," *Procedia Manuf*, vol. 45, pp. 516–521, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.069.

9. Saját publikációk

- [S1] Trohák Attila, Forgács Zsófia: Indítómotorok gépi látás alapú tesztelési lehetőségeinek vizsgálata, ENELKO 2018 XIX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia SzámOkt 2018 XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, Románia, pp. 337-340., 2018
- [S2] Forgács, Zsófia: Gépi látáson alapuló demonstrációs alkalmazások fejlesztése, MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 10:4, 2020, pp. 56-65., doi.org/10.35925/j.multi.2020.4.9
- [S3] Zsófia Forgács, Attila Trohák: The Development of an Application to Analyse GigE Vision Packets, Proceedings of the 2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC), Szilvásvárad, Magyarország, pp. 151-156., 2023
- [S4] Zsófia Forgács: A serial communication method for illumination control in a line scan camera-based measurement system, PSAIE folyóirat, Miskolc, bíráló alatt
- [S5] Zsófia Forgács: A Method to Estimate Pixel Intensity In Line Scan Camera-Based Measurement Systems Using Exposure And Lighting Control Signal Characteristics, Multidiszciplináris tudományok, Miskolc, bíráló alatt
- [S6] Zsófia Forgács: Search Algorithm for Determining the Illumination Frequency in a Line Scan Camera-Based Measurement System, PSAIE folyóirat, Miskolc, beküldve
- [S7] Zsófia Forgács, Attila Trohák: A Measurement Method for Determining Speed of High-Speed Rotating Parts, 2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC), IEEE, pp. 203-207., 2022
- [S8] Zsófia Forgács, Attila Trohák: The Determination Of The Line Of Interest In A Line Scan Camera-Based Measurement System, Pollack Periodica, Pécs, megjelenés alatt, Q3
- [S9] Zsófia Forgács: A Method for Determining the Axial Displacement of Rotating Parts Using a Line Scan Camera, IEEE, bíráló alatt, Q4/3

10. Mellékletek

1. A fordulatszám meghatározás validációs eredményei fordulatszám visszacsatolás nélkül

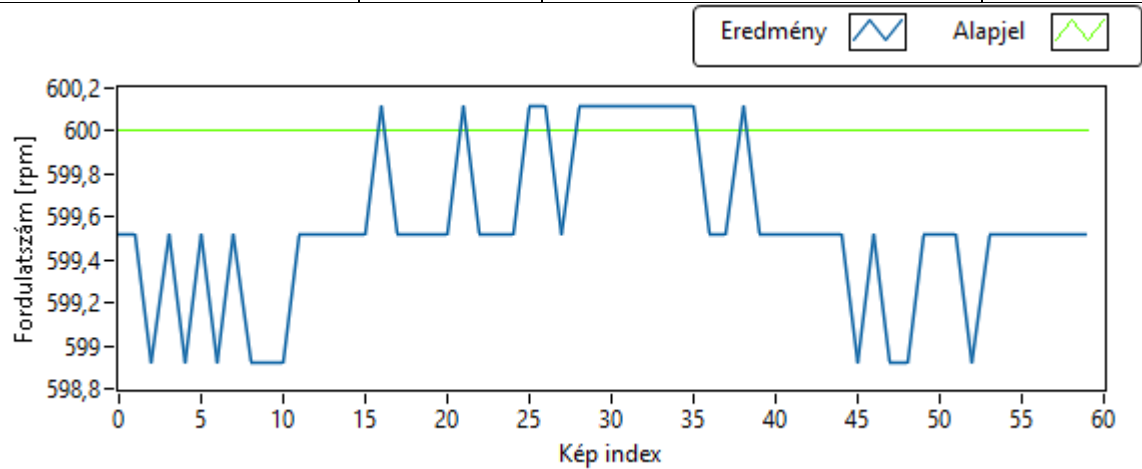


600 rpm**Legkisebb hiba [%]:**

0,01996

Legnagyobb hiba [%]:

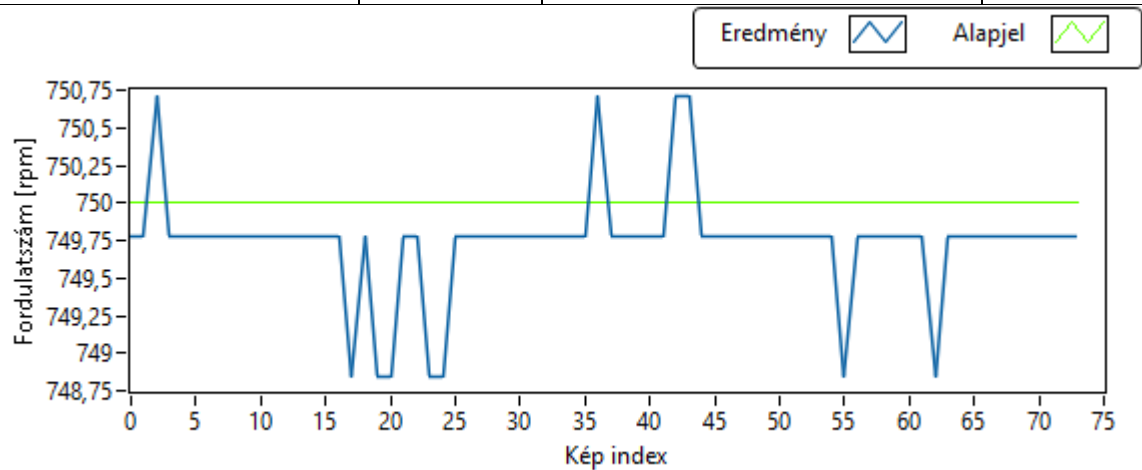
0,179283

**750 rpm****Legkisebb hiba [%]:**

0,029925

Legnagyobb hiba [%]:

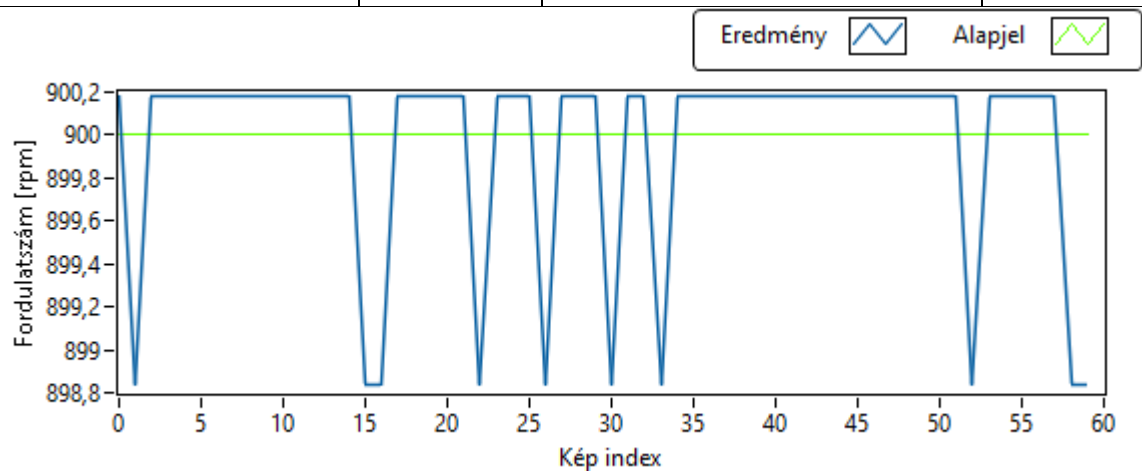
0,154421

**900 rpm****Legkisebb hiba [%]:**

0,01996

Legnagyobb hiba [%]:

0,129547



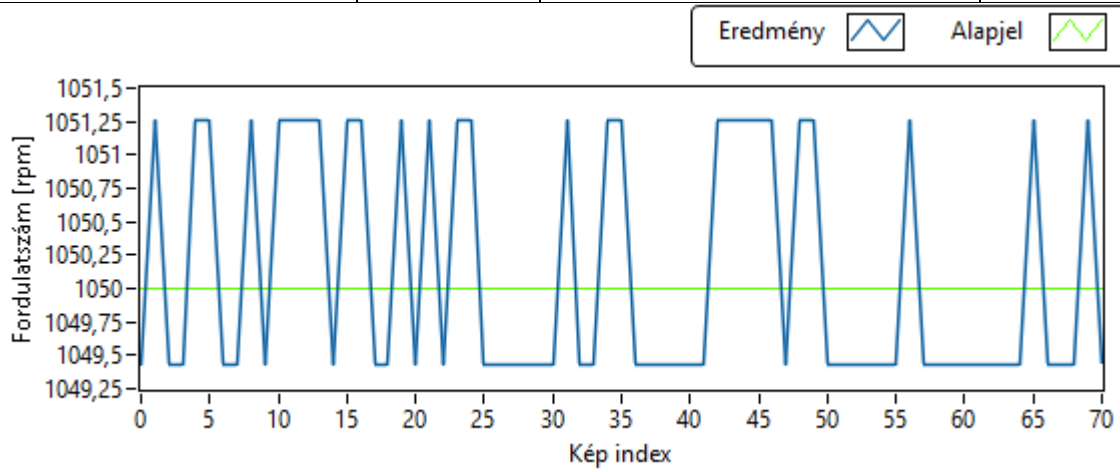
1050 rpm

Legkisebb hiba [%]:

0,054849

Legnagyobb hiba [%]:

0,11988



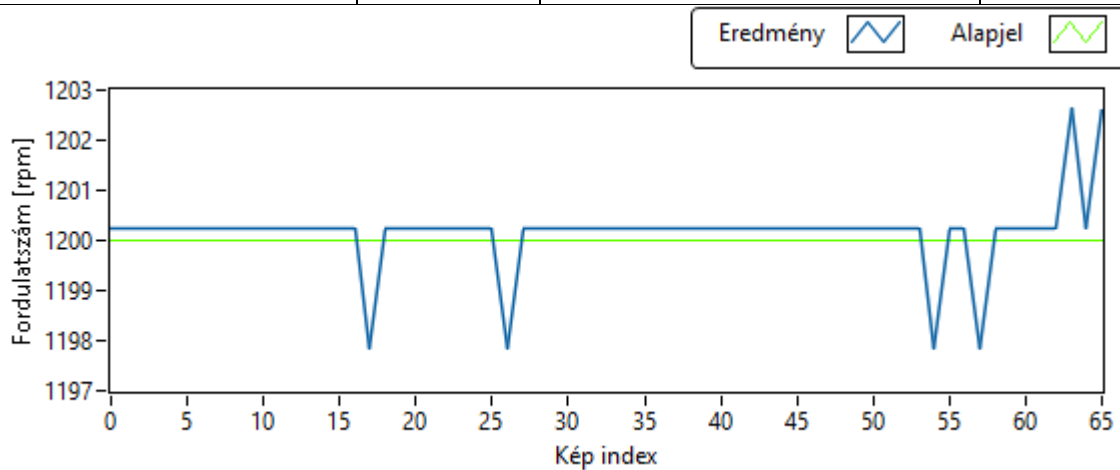
1200 rpm

Legkisebb hiba [%]:

0,01996

Legnagyobb hiba [%]:

0,22



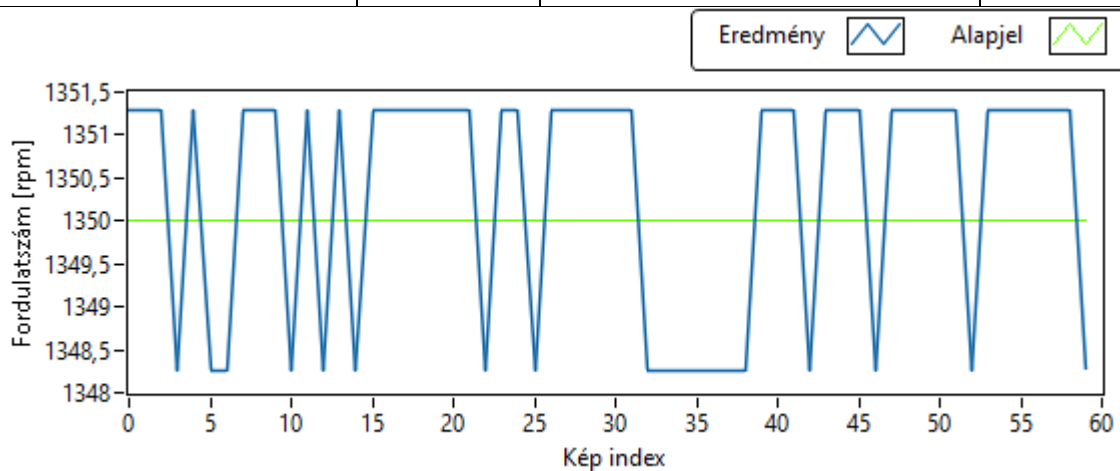
1350 rpm

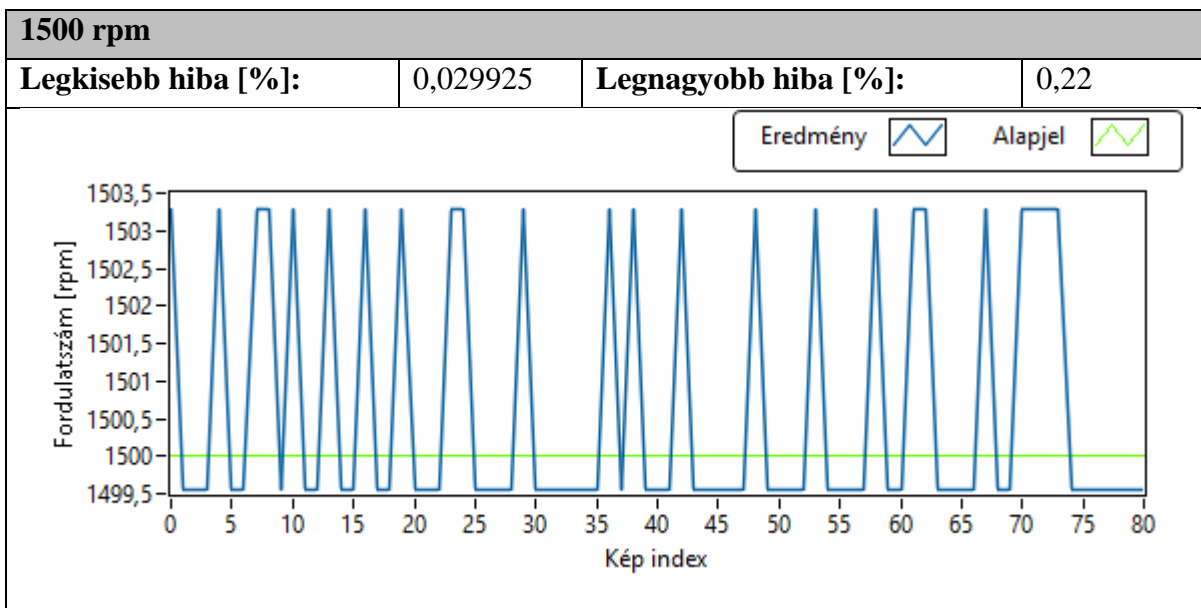
Legkisebb hiba [%]:

0,094881

Legnagyobb hiba [%]:

0,129547





A validáció során mért adatok és hibaértékek

150 rpm									
f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]
153,607	2,404632	147,3824	-1,7451	149,8306	-0,11296	151,8485	1,232323	143,9943	-4,00383
143,536	-4,30936	154,0266	2,684426	150,0299	0,01996	145,9515	-2,69903	154,1319	2,754614
153,502	2,334922	147,1899	-1,87337	150,0299	0,01996	151,8485	1,232323	143,9943	-4,00383
143,445	-4,37023	153,9215	2,614334	150,0299	0,01996	145,9515	-2,69903	154,1319	2,754614
153,398	2,265306	147,1899	-1,87337	149,9302	-0,04654	151,8485	1,232323	143,9024	-4,06509
143,353	-4,43102	153,7117	2,474438	150,2298	0,153231	145,9515	-2,69903	153,5546	2,369765
153,294	2,195785	147,2861	-1,80928	150,1298	0,086551	151,7463	1,164199	144,2706	-3,81958
143,262	-4,49174	153,8165	2,544338	150,2298	0,153231	145,9515	-2,69903	153,6331	2,422075
153,294	2,195785	147,3824	-1,7451	150,2298	0,153231	154,0266	2,684426	147,8656	-1,42295
143,081	-4,61294	153,8165	2,544338	150,2298	0,153231	146,6157	-2,25618	154,4486	2,965753
153,19	2,126359	147,3824	-1,7451	150,2298	0,153231	154,1056	2,737058	147,7687	-1,48755
143,081	-4,61294	153,8165	2,544338	150,4303	0,286858	144,0863	-3,94249	154,3429	2,895277
152,93	1,953204	147,4787	-1,68084	149,2109	-0,52606	154,1319	2,754614		
147,382	-1,7451	150,2549	0,169915	152,3872	1,591485	143,9943	-4,00383		
155,944	3,962656	150,1798	0,11988	145,9515	-2,69903	154,1319	2,754614		
300 rpm									
f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]
302,779	0,926485	296,5924	-1,13585	302,5618	0,853939	301,1117	0,370556	298,2738	-0,5754
299,292	-0,23606	299,7607	-0,07976	302,5618	0,853939	300,3168	0,105594	298,2738	-0,5754
299,292	-0,23606	299,2918	-0,23606	302,5618	0,853939	300,3168	0,105594	299,1642	-0,27861
299,292	-0,23606	299,2918	-0,23606	299,7607	-0,07976	300,1455	0,048488	298,9517	-0,34943
299,462	-0,17928	299,2918	-0,23606	302,932	0,97733	300,3168	0,105594	298,9517	-0,34943
299,611	-0,12955	299,2918	-0,23606	301,5215	0,507163	300,1455	0,048488		
302,171	0,723618	299,4622	-0,17928	301,5215	0,507163	299,4622	-0,17928		
296,425	-1,19155	299,7607	-0,07976	301,3488	0,449599	298,6124	-0,46254		
296,425	-1,19155	302,3879	0,795977	301,3488	0,449599	298,443	-0,519		
296,425	-1,19155	302,3879	0,795977	299,6114	-0,12955	298,443	-0,519		

1350 rpm									
f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]
1351,28	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881
1348,25	-0,12955	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955
1348,25	-0,12955	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881
1348,25	-0,12955	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881	1351,281	0,094881
1348,25	-0,12955	1348,251	-0,12955	1348,251	-0,12955	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881
1351,28	0,094881	1351,281	0,094881	1348,251	-0,12955	1351,281	0,094881		
1500 rpm									
f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]	f [rpm]	hiba [%]
1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993
1499,55	-0,02993	1503,3	0,22	1503,3	0,22	1503,3	0,22	1503,3	0,22
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22
1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22
1499,55	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993
1503,3	0,22	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993
1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993
1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993
1499,55	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993
1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993		
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22	1499,551	-0,02993		
1499,55	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993		
1503,3	0,22	1499,551	-0,02993	1499,551	-0,02993	1503,3	0,22		

2. A fordulatszám meghatározás validációs eredményei fordulatszám visszacsatolással

