

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**Nagysebességgel forgó alkatrészek mozgásának
vizsgálata line scan kamerával**

Tézisfüzet

Készítette:

Forgács Zsófia

okleveles villamosmérnök

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Doktori iskola vezető:

Prof. Dr. Szigeti Jenő

egyetemi tanár

Témavezetők:

Prof. Dr. Czap László

egyetemi tanár

Dr. Trohák Attila

egyetemi docens

Miskolc

2024

TARTALOMJEGYZÉK

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | BEVEZETÉS | 1 |
| 1.1 | A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI..... | 4 |
| 2 | ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK | 5 |
| 2.1 | MEGVILÁGÍTÁSI MÓDSZER KIDOLGOZÁSA LINE SCAN KAMERÁKHOZ..... | 5 |
| 2.1.1 | <i>Algoritmus kidolgozása a pixelintenzitás becslésére a jelkarakterisztikák alapján</i> | 5 |
| I. | TÉZIS..... | 6 |
| 2.1.2 | <i>A frekvenciakülönbség kompenzálása</i> | 7 |
| II. | TÉZIS..... | 8 |
| 2.2 | FORDULATSZÁM MEGHATÁROZÁS LINE SCAN KAMERÁVAL.... | 9 |
| III. | TÉZIS..... | 10 |
| 2.3 | FORGÁSTENGELYMENTI ELMOZDULÁS MÉRÉSE LINE SCAN KAMERÁVAL..... | 12 |
| III. | TÉZIS..... | 12 |
| 3 | ÖSSZEFOGLALÁS | 15 |
| 4 | SUMMARY | 16 |
| | THESIS I..... | 18 |
| | THESIS II..... | 19 |
| | THESIS III..... | 21 |
| | THESIS IV..... | 23 |
| 5 | AZ ÉRTEKEZÉS IRODALOMJEGYZÉKE | 26 |
| 6 | SAJÁT PUBLIKÁCIÓK | 30 |

1 BEVEZETÉS

Az intelligens gyártási folyamatok megjelenésével egyre növekszik az igény a gyártási folyamatok professzionális vizsgálata 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 elemez, 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 Doppler-effektus 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 miatt egy alternatív mérési módszer kifejlesztésére törekedtünk.

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 összezsúszik, 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 elvégezhetőek. 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 vezérlőjének 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.

2 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben az elért új tudományos eredmények, a line scan kamera alapú mérőrendszerekhez kidolgozott megvilágítási módszer, a fordulatszám meghatározására és a tengelymenti elmozdulás mérésére kidolgozott eljárások kerülnek bemutatásra.

2.1 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 fényintenzításra van szüksége ahhoz, hogy elegendő fényt gyűjtsön be a képalkotáshoz.

2.1.1 Algoritmus kidolgozása a pixelintenzitás becslésére a jelkarakterisztikák alapján

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.

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. 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 pixel sorokra.

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]

2.1.2 A frekvenciakülönbség kompenzálása

A kidolgozott 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.

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:

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

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

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

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

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

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]

2.2 FORDULATSZÁM MEGHATÁROZÁS LINE SCAN KAMERÁVAL

A kutatómunkában ismertetett fordulatszám-mérési 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 fordulatszámja 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.

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

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

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:

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

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

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:

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

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

- 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]

2.3 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 elmozdulása a kép alsó képpontsoraiban detektálható, a képpont oszlopokra kiszámolt varianciagörből azonban ez a mérési pont nem határozható meg. Az elmozdulás meghatározásánál tehát szintén a mérési pontok kiválasztási módja jelentette a kihívást, amelyre negyedik tézisként javasoltam megoldást. Az algoritmus alkalmas az alkatrész mozgás közbeni helyzetének meghatározására egy referenciaponthoz képest. A varianciaszámításon alapuló algoritmus alkalmazásához a képpontsorok intenzitásgörbéinek előzetes feldolgozása volt szükséges.

III. 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,

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

varianciaértékek változási aránya,

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

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.

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

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

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

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

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:

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

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]

3 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.

4 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:

$$\mathbf{c} = \begin{cases} \frac{i_{min} + i_{max}}{2}, & \text{if } \sigma^2(\mathbf{c}_0) = 0 \\ i \mid i \in i_{min_var}, |i - \mathbf{c}_0| = \min(|j - \mathbf{c}_0| \mid j \in i_{min_var}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

where

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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, $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_{H-1}]$ is the vector of selected pixels for measurement, and T_p is the threshold value for the examination:

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

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

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:

$$\forall k, l \in \{1, 2 \dots n\}, \quad k \neq l,$$

$\exists m \in \mathbb{Z}: (\theta_l - \theta_k) \bmod 2\pi = m \cdot \Delta\theta, \text{ where:}$

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

- 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:

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

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

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

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

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

where:

H : the height of the image in pixels,

W : width of the image in pixels,

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

values calculated for pixel rows,

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

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 do:

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

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]

5 AZ ÉRTEKEZÉS IRODALOMJEGYZÉKE

- [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, “Fúrósász 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. Czup, 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.

6 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, bírálólat 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, bírálólat 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

[S9] Zsófia Forgács: A Method for Determining the Axial Displacement of Rotating Parts Using a Line Scan Camera, JEEE, bírálólat alatt