

Kísérleti rendszer acélbugák vizsgálatára alkalmas képfeldolgozó algoritmusok értékeléséhez

Experimental framework for evaluating image processing algorithms for steel billet inspection

FORGÁCS Zsófia

Miskolci Egyetem Automatizálási és Infokommunikációs Intézet
H-3515 Miskolc-Egyetemváros, E-mail: zsofia.forgacs@uni-miskolc.hu

Abstract

A billet is a semi-finished product produced during steelmaking, and its identification and tracking are fundamental requirements for establishing a reliable material tracking system. The aim of the research is to develop a control system capable of detecting billets through image processing and transmitting the results to an industrial control system. The present work is related to the development of an experimental system, which provides a test environment for evaluating the effectiveness of different image processing algorithms by processing recordings captured with an analog camera.

Keywords: steel production, machine vision, image processing, statistical methods, algorithm evaluation

Kivonat

A buga az acélgyártás során keletkező egyik félkész termék, amely azonosítása és nyomon követése alapvető feltétele egy megbízható anyagkövető rendszer kialakításának. A kutatómunka célja egy olyan irányítórendszer kidolgozása, amely képfeldolgozás segítségével képes a bugák detektálására és az eredmények továbbítására egy ipari vezérlőrendszer számára. Jelen munka egy kísérleti rendszer fejlesztéséhez kapcsolódik, amely egy analóg kamera által rögzített felvételek feldolgozásán keresztül biztosít tesztkörnyezetet különböző képfeldolgozó algoritmusok hatékonyságának vizsgálatához.

Kulcsszavak: acélgyártás, gépi látás, képfeldolgozás, statisztikai módszerek, algoritmusértékelés

1. BEVEZETÉS

Az acélgyártás egyik jellegzetes félkész terméke a buga, amelyet a folyamatos öntés során állítanak elő, és amely alapanyagul szolgál a további meleg- és hideghengerlési folyamatokhoz [1], például acélrudak vagy huzalok gyártásához. A bugák megbízható azonosítása és nyomon követése kulcsfontosságú az anyagkövető rendszerekben, amelyek célja a gyártási folyamatok átláthatóságának és automatizálhatóságának növelése.

Jelen kutatás célja a bugák kezelésének és azonosításának támogatása automatizált módon, egy acélipari hengermű előhevítő kemencéjénél. Az előhevítő kemencébe a bugák három forrásból érkehetnek: közvetlenül az acélműből forrón kitolva, illetve a bugatér nagy- vagy kisorakás bontóiról hideg állapotban betáplálva. A kemence bemeneténél a bugák sorrendje és minősége alapvetően meghatározza a további gyártási folyamatot, különösen a minőségváltások kezelésekor. A kitolási művelet során a kezelő személyzetnek manuálisan kell kiválasztania és a kitoló szerkezettel továbbítani az utolsó négy pozícióban lévő bugák közül a megfelelőt. A kitolás sikeres végrehajtása szempontjából elengedhetetlen a pontos azonosítás, ugyanis hibás kitolás esetén a buga elakadhat a kemence falában, amely komoly károsodást okozhat.

A tervezett rendszer fő célja tehát, hogy meghatározza és egy központi PLC (Programmable Logic Controller – programozható logikai vezérlő) felé továbbítsa, hogy a kemencéből melyik buga került kitolásra. Ezzel lehetővé válik a gyártási sorrend folyamatos és megbízható nyomon követése, valamint az adott adagszámhoz tartozó bugák pontos hozzárendelése. Ez az automatizált adatátadás kulcsszerepet játszik abban, hogy az előhevítő kemence bemeneténél történő kezelői döntések és műveletek közvetlenül

beépüljenek a központi anyagkövető rendszerbe, biztosítva a későbbi gyártási és minőségellenőrzési folyamatok hibamentes alapját.

A kísérleti rendszer felépítése a meglévő ipari környezethez igazodva alakult ki. A vizsgálatok alapját egy korábban telepített analóg kamera biztosítja, amely az előhevítő kemence bemeneténél figyeli a bugák helyzetét. A kamerajel digitalizálását egy videónkóder végzi, amely lehetővé teszi a képi adatok feldolgozását beágyazott vezérlőegységeken. A képfeldolgozási és adatátviteli feladatokat egy Raspberry Pi 4 látja el, amely egyrészt feldolgozza a kamera által rögzített képeket, másrészt továbbítja a detektált eredményeket az ipari vezérlőrendszer felé. A Raspberry Pi és a PLC közötti kommunikáció galvanikus leválasztással és jelszintillesztéssel biztosított. A 3,3 V-os digitális kimenetek relés áramkörön keresztül illeszkednek a PLC 24 V-os digitális bemeneteihez. A PLC ezen felül digitális jeleket szolgáltat a mérési folyamat indítására és szinkronizálására, például a kemenceajtó nyitására vagy a kitolási parancs kiadásának jelzésével.

A cikkben bemutatott kísérleti rendszer a fejlesztés tervezési szakaszához kapcsolódik. Elsődleges funkciója, hogy tesztkörnyezetet biztosítson különböző képfeldolgozó algoritmusok hatékonyságának értékeléséhez. Az alkalmazott módszerek elsősorban egyszerű statisztikai jellemzőkre, például intenzitásátlagokra és -varianciákra épülnek, amelyek alapján előzetesen megítélhető az algoritmusok alkalmassága a bugaazonosítás feladatának ipari környezetben történő megvalósítására. A rendszerhez kapcsolódóan kézi annotációs eljárás is kialakításra került, amely lehetővé teszi a felvételekhez tartozó kulcsinformációk, mint a kitolt buga vagy a kemenceajtó állapota rögzítését és ezáltal biztosítja a feldolgozott adatok és a képi jellemzők összekapcsolását.

2. MÓDSZERTAN

A képfeldolgozás statisztikai megközelítése a képadatok mátrixként történő kezelésén alapul, ahol az egyes pixelek intenzitásértékei numerikus adatként jelennek meg. Ezen adatokra a hagyományos leíró statisztikai módszerek, mint az átlag, szórás és variancia közvetlenül alkalmazhatók, lehetővé téve a kép főbb jellemzőinek kvantitatív leírását [2]. Az ilyen alapmutatók különösen hasznosak ipari környezetben, mivel egyszerű számítási igény mellett robusztus információt biztosítanak a vizsgált objektum jelenlétéről vagy elmozdulásáról.

A statisztikai képfeldolgozás módszerei közé tartozik a zajcsökkentés (például simítás átlagolással vagy Gauss-szűrővel [3]), az éldetektálás intenzitásgradiens alapján [4-5], valamint a képek szegmentálása, amely az intenzitás- vagy textúraértékek hasonlósága mentén választja szét a régiókat [6]. Ezek az alapvető műveletek lehetővé teszik, hogy a képi információ redukált, de informatív formában álljon rendelkezésre további feldolgozás vagy döntéstámogatás céljára. Korábbi eredmények [7-9] alapján megállapítható, hogy a variancia és az intenzitásátlag statisztikai jellemzők önmagukban is képesek pontosan jellemezni a vizsgált objektumok helyzetét és mozgását. Forgó gépelemek vizsgálatoknál például a pixeloszlopokra számított varianciagörbékkel megbízhatóan azonosíthatók voltak a mérési pontok, lehetővé téve az elmozdulások nagypontosságú meghatározását line scan kamerás felvételeken. Ez a megközelítés előnye, hogy egyszerű algoritmusokkal is implementálható, akár erőforrás-korlátozott eszközökön, beágyazott rendszereken.

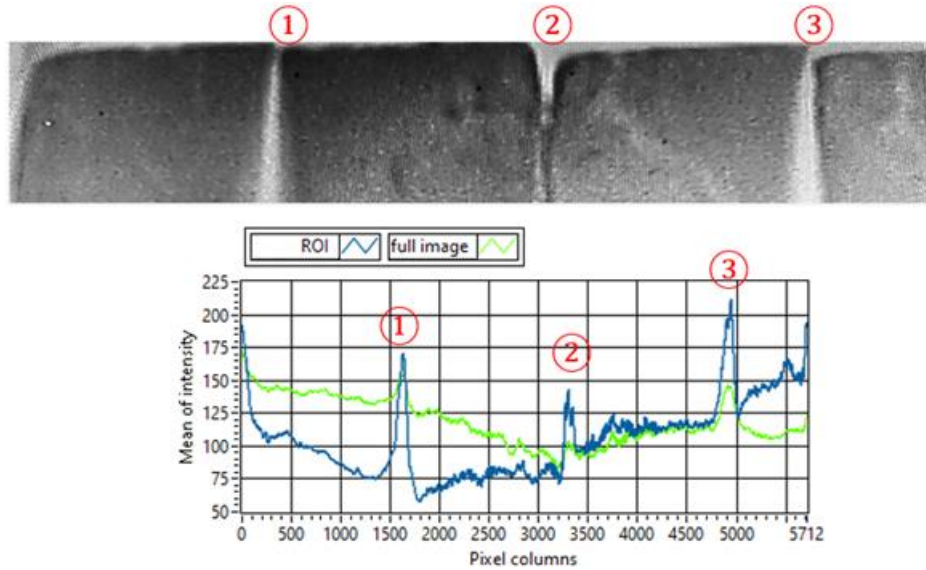
A jelen munka módszertani háttérét tehát a statisztikai alapú képfeldolgozás jelenti: olyan egyszerű, de informatív jellemzők kinyerése, amelyek az ipari környezetben rögzített képekből is megbízhatóan előállíthatók. A módszer kifejezett előnye, hogy bonyolult gépi tanulási modellek nélkül is alkalmas a bugaazonosítási feladat támogatására, ami különösen értékes az acélipar hagyományosan robusztus és hosszú élettartamú berendezéseihez történő illesztéskor.

A statisztikai megközelítés alkalmazása a bugaazonosítás feladatában is kipróbálásra került előzetesen készített tesztfelvételeken. A feldolgozás első lépéseként a képpontsorok átlagintenzitásának kiszámításával a bugák vertikális elhelyezkedése vált meghatározhatóvá. Ez a módszer lehetővé tette a vizsgálati régió (Region of Interest, ROI) kijelölését, amely a további elemzések alapját biztosította. A felvételen kiválasztott ROI az 1. egyenlettel határozható meg:

$$R(x, y) = I(x_0 + x, y_0 + y) \mid 0 \leq x < H_R, 0 \leq y < W_R, \text{ ahol} \quad (1)$$

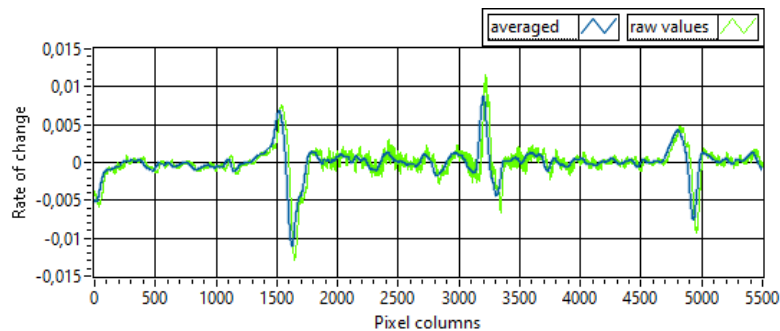
$R(x, y)$: ROI mátrix (I egy részhalmaza),
 $I(x, y)$: bemeneti képmátrix (2D, szürkeárnyaltos),
 x_0, y_0 : a ROI kezdőkoordinátái,
 H_R, W_R : a ROI magassága és szélessége,
 x, y : lokális ROI indexek.

A vizsgálati régió és a teljes képfelvétel képpontjaira kiszámolt átlagos intenzitásprofil látható az 1. ábrán. A kijelölt ROI alapján generált oszlopirányú intenzitásprofil jól kirajzolta a bugák közötti hézagokat, amelyek a profilban lokális maximumokként jelentek meg.



1. ábra. Intenzitásprofilok a vizsgálati régióban és a teljes képen

Az intenzitásgörbe közvetlen küszöbölése ugyanakkor a görbemeredekségek változó irányai miatt nem nyújt robusztus megoldást. Ennek javítására bevezethető a változási arány görbéje, amely kisimítja a fő trendet. A 2. ábrán látható változási arányok mozgóablakos átlaga a 2. egyenlettel fejezhető ki.



2. ábra. Képpont oszlopok intenzitás-változási arányai

$$\bar{G}[x] = \frac{1}{w} \sum_{i=0}^{w-1} G[x + i], \text{ ahol} \quad (2)$$

$G[x] = \frac{M[x+1] - M[x]}{M[x+1]}$; a változási arányok,

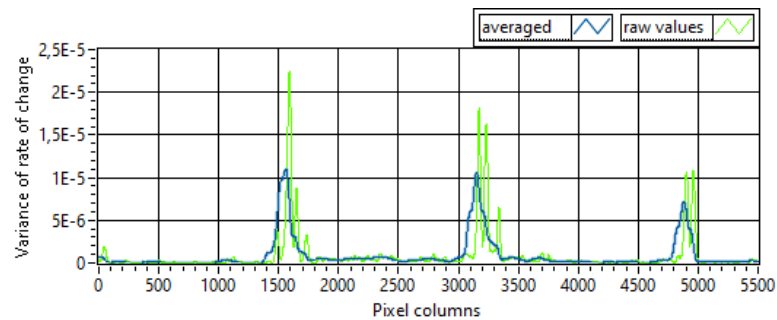
M : intenzitásadatok,

w : a mozgóablak szélessége.

A változási arányok varianciaszámításával unipolárisra és ezáltal könnyebben feldolgozhatóvá tehető a vizsgált görbe a 3. egyenlet szerint.

$$V[x] = \frac{1}{w} \sum_{i=0}^{w-1} (G[x + i] - \bar{G}[x])^2 \quad (3)$$

A megoldás a 3. ábrán látható, jól értelmezhető csúcsokat eredményezett, amelyek küszöböléssel megbízhatóan feldolgozhatók.



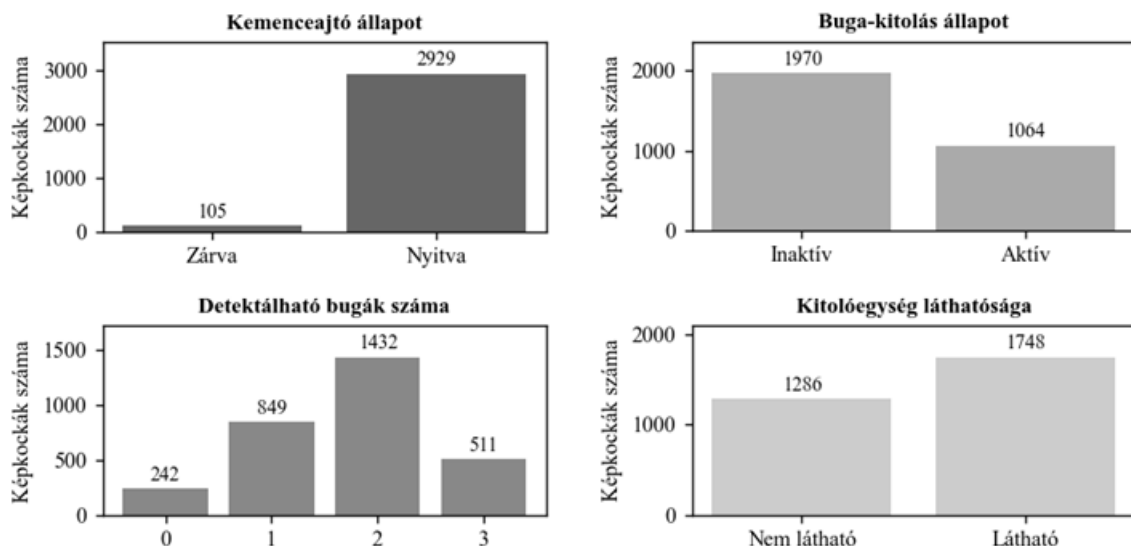
3. ábra. Élkiemelés a változási arány varianciájával

A fenti eredmények igazolták, hogy a vizsgált jelenetekben a képi információk egyszerű statisztikai jellemzőkön keresztül hatékonyan leírhatók és feldolgozhatók. A következő lépésként szükségessé vált egy olyan keretrendszer kialakítása, amelyben a módszerek szisztematikusan értékelhetők és összehasonlíthatók későbbi felvételeken, szerkezetek által részben takart jeleneteken is. Ehhez az előhevíto kemencénél rögzített videófelvételek szolgáltak alapul, amelyeket egy fejlesztett segédalkalmazás segítségével képkockákra bontva lehet elemezni.

A képfeldolgozó algoritmusok objektív értékeléséhez egy olyan referenciarendszer kialakítása szükséges, amely független a vizsgált eljárásoktól és egységes módon tartalmazza a képi adatokat és azok értelmezési szempontjait. A videófelvételek feldolgozása után a képkockák manuális annotációja történt meg, amely során az egyes bugákhoz és a kitolási folyamat kulcspozícióihoz kapcsolódó attribútumok kerültek rögzítésre.

A felvételek egy korábban telepített analóg kamera kimenetének digitalizálásával készültek, amely RTSP (Real-Time Streaming Protocol) streamen keresztül került rögzítésre egy Python-alapú alkalmazással. A szoftver valós idejű előnézet mellett AVI formátumban tárolta a képsorozatot, valamint lehetőséget biztosított pillanatképek mentésére és a felvétel állapotának ellenőrzésére. Az annotációhoz a rögzített videókat képkockákra bontva és szűrve 3034 reprezentatív állókép került kiválasztásra.

A képekhez kapcsolódó értelmezési információk manuálisan kerültek rögzítésre egy CSV formátumú táblázatban. Az annotáció során a bugák pozíciói, a kitolási művelet ténye, a kitoló mechanizmus láthatósága, valamint a kemenceajtó állapota lettek dokumentálva. A 4. ábrán a képkockák megoszlása látható a rögzített attribútumok szerint.



4. ábra. Annotációs jellemzők eloszlása a képkockákban

A kidolgozott struktúra lehetővé teszi a képfeldolgozó algoritmusok kimeneteinek összevetését a referenciával és alapot teremt teljesítménymutatók számításához.

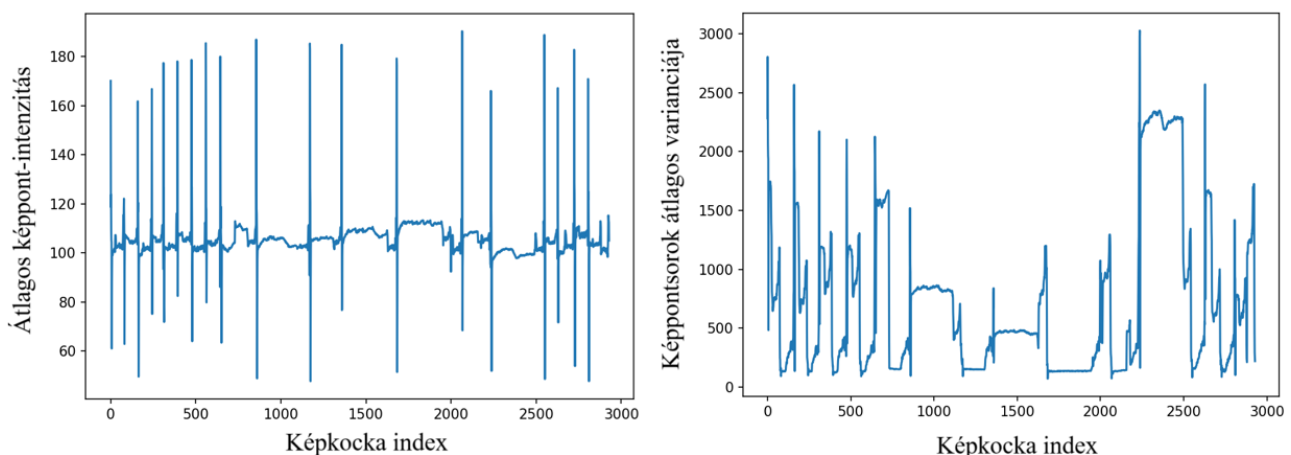
3. EREDMÉNYEK

A képi adatok feldolgozásának következő lépéseként a statisztikai jellemzők kiszámítása történt meg a fejlesztett „FrameStatisticsCalculator” modul segítségével. Az alkalmazás minden képkockához meghatározta az átlagos intenzitást, a sor- és oszlopírányú varianciák minimum, maximum és átlagértékeit, valamint egy előre kijelölt vizsgálati régió mutatóit. Az eredmények CSV formátumban kerültek mentésre, amely biztosította azok közvetlen összekapcsolását az annotációs adatokkal, és lehetővé tette az események (például kitolás, ajtónyitás) kvantitatív vizsgálatát.

A kifejlesztett vizsgálati keretrendszer két részből állt: egy feldolgozó modulból és egy grafikus kezelőfelületből. A feldolgozó modul („StudyEngine”) feladata a képkockákból számított statisztikai adatok szűrése, összegzése és ábrázolása. A program a megadott szűrőfeltételek alapján kiválasztja a releváns adatsorokat, majd az egyes metrikákra vonatkozóan (pl. átlagintenzitás, sor- és oszlopvariancia) alapvető statisztikai mutatókat (mint elemszám, átlag, szórás, minimum, maximum) számít. Az eredményeket táblázatos formában és vonaldiagramokon rögzíti, amelyek időbélyeggel ellátott könyvtárakba kerülnek.

A grafikus felület („StudyGUI”) lehetővé teszi a vizsgálati paraméterek egyszerű beállítását és a feldolgozás futtatását. A felhasználó megadhat szűrési feltételeket (pl. buga pozíció, kitolás állapota, joystick láthatósága, ajtó nyitott/zárt állapota), kiválaszthatja az elemzendő metrikákat, valamint beállíthatja az ábrázolás opcióit (pl. indexelés, mozgóátlag). A keretrendszer kimeneteként összegző CSV-fájlok és automatikusan generált ábrák készülnek, ezzel biztosítva a különböző vizsgálati feltételek közötti eredmények összehasonlíthatóságát.

A statisztikai feldolgozás eredményeit a program automatikusan mentette vonaldiagramok formájában. Az 5. ábra például a képkockák átlagintenzitásának lefutását és a képpontsorokra számolt átlagos varianciaprofil mutatja nyitott kemenceajtó mellett, 2929 felvételen.



5. ábra. A képkockák átlagintenzitása nyitott kemenceajtó mellett, 2929 felvételen

Az ábrán az index az időbeli sorrendet jelzi, azonban a vizsgált képkockák szűrték, a lefutás nem folytonos. A diagramokon megfigyelhető hirtelen kiugrások elsősorban a kemenceajtó nyitásához köthetők. A kamera érzékelője ilyenkor rövid ideig nem alkalmazkodik a hirtelen megnövekedett fényintenzitáshoz, ami a teljes kép világosságának ugrásszerű változását eredményezi. A feldolgozás során ezeket az anomáliákat célszerű előfeldolgozási szűréssel kezelni, vagy az annotációs jellemzők pontosításával figyelembe venni.

A vizsgálati rendszer a grafikus ábrák mellett táblázatos összegző riportokat is készít CSV formátumban. Az 1. táblázat például nyitott ajtó mellett készült felvételek adatait mutatja külön bontva arra az esetre, amikor a kitolóegység látható (1725 kép) és amikor nem (1204 kép).

Átlag- és szórásadatok a CSV-formátumú összefoglaló riportokból

1. táblázat

	Átlag			Szórás		
Kitolóegység látható:	nem	igen	eltérés:	nem	igen	eltérés:
Képkocka átlagintenzitás:	108,37	103,75	-4,26%	8,99	7,85	-12,64%
Képpontsorok átlagos varianciája:	199,38	1072,65	438,00%	84,10	629,78	648,88%
Képpontoszlopok átlagos varianciája:	3010,74	3398,08	12,87%	325,82	345,14	5,93%

Az eredmények alapján a képkockák átlagintenzitása csak kis mértékben változik ($-4,26\%$), ugyanakkor a képpontsorokra számolt átlagos variancia nagyságrendekkel megnő (438%), ami a kitoló erős képpontsor-irányú hatását jelzi. Az oszlop-irányú varianciákban ezzel szemben csak mérsékelt eltérés figyelhető meg ($12,87\%$). Az ilyen riportok tehát kulcsfontosságúak a későbbi képfeldolgozó alkalmazás fejlesztése szempontjából, hiszen segítenek azonosítani azokat a statisztikai jellemzőket, amelyek a legnagyobb hatással bírnak az események megkülönböztetésére.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk célja egy olyan kísérleti rendszer bemutatása volt, amely acélbugák vizsgálatára alkalmas képfeldolgozó algoritmusok objektív értékelését támogatja ipari környezetben. A rendszer alapját egy analóg kamera jeleinek digitalizálása adja, amelyből a felvételek képkockákra bontva, kézi annotációval kiegészítve és különböző statisztikai jellemzők számítása után egységes riportok készülnek. Ez a struktúra lehetővé teszi a módszerek közvetlen összehasonlítását és a releváns képi információk kvantitatív leírását. A vizsgálatok során a sorirányú variancia bizonyult a legérzékenyebb mutatónak a kitolóegység megjelenésére, míg az átlagintenzitás főként a megvilágítás ingadozásait tükrözte. Az eredmények arra is rámutattak, hogy a kemenceajtó nyitása rövid időre jelentős fényességváltozást okoz a teljes képen, ami anomáliaként jelenik meg az adatokban. Ezek kezelése a későbbi feldolgozás során előfeldolgozási szűréssel, illetve az annotációs jellemzők finomhangolásával válhat szükségessé. A következő lépésekben a rögzített képfelvételek részletes vizsgálata és az azokból kinyerhető információk elemzése történik, a fejlesztett feldolgozó modulok és statisztikai módszerek együttes alkalmazásával. Ez a folyamat képezi az alapot a bugaazonosítást támogató képfeldolgozó algoritmusok további fejlesztéséhez és ipari környezetben való validálásához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási témát a Miskolci Egyetem SteelTech-Center Hungary projektje támogatja.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Harcsik B., Kiss L., Józsa R. *Az űsmetallurgia és a folyamatos öntés technológiatervezésének, technológia-fejlesztésének gyakorlati szempontjai*, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2013.
- [2] Ali Z., Bhaskar Sb., *Basic statistical tools in research and data analysis*, Indian J Anaesth, 2016, 60(9), 662, doi: 10.4103/0019-5049.190623.
- [3] Garg B., Sharma G. K. *A quality-aware Energyscalable Gaussian Smoothing Filter for image processing applications*, Microprocess Microsyst 2016, 45, 1-9., doi: 10.1016/j.micpro.2016.02.012.
- [4] Gao P., Song Y., Song M., Qian P., Su Y., *Extract nanoporous gold ligaments from SEM images by combining fully convolutional network and Sobel operator edge detection algorithm*, Scr Mater, 2022, 213, p. 114627, doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114627.
- [5] Yang Y., Zhao X., Huang M., Wang X., Zhu Q. *Multispectral image based germination detection of potato by using supervised multiple threshold segmentation model and Canny edge detector*, Comput Electron Agric, 2021, 182, p. 106041, doi: 10.1016/j.compag.2021.106041.
- [6] Ji L., Du Y., Dang Y., Gao W., Zhang H., *A survey of methods for addressing the challenges of referring image segmentation*, Neurocomputing, 2024, 583, p. 127599, doi: 10.1016/j.neucom.2024.127599.
- [7] Forgács Zs., Trohák A. *A Measurement Method for Determining Speed of High-Speed Rotating Parts*, 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC), IEEE, 2022, 203-207., doi: 10.1109/ICCC54292.2022.9805948.
- [8] Forgács Zs. *A Method for Determining the Axial Displacement of Rotating Parts Using a Line Scan Camera*, Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2024, 17(2), 11-16., doi: 10.1556/606.2024.01187.
- [9] Forgács Zs., Trohák A. *The determination of the line of interest in a line scan camera-based measurement system*, Pollack Periodica – An International Journal for Engineering and Information Sciences, Akadémiai Kiadó, 2024, 20(2), 113-118., doi: 10.1556/606.2024.01187.