

# Mérnökfotogrammetriai támogatás a tartószerkezetek vizsgálatához

Paulik Dániel – Tóth Márton Tamás – Molnár Bence – Neuberger Hajnalka – Horváth László

DOI: <https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.2.2>

## Bevezetés – a digitális képkorreláció

A fotogrammetria fejlődésének legutóbb a digitális érzékelők adtak nagy lendületet, melyet most tovább fokoznak az informatika további vívmányai. Nagy előrelépési lehetőséget hordoz magában, hogy a képeken az objektumok azonosítása, majd a képek közti követése automatikusan végrehajtható, mindez nagy pontsűrűség mellett. Ezt az előnyt lehet kihasználni az építőmérnöki gyakorlatban a tervezés, kivitelezés és monitoringozás során. Cikkünkben bemutatunk egy lehetséges módszert a szerkezetvizsgálatokra, az elmozdulás és feszültségeloszlás meghatározására, így egy újabb mérnöki tevékenység támogatása valósulhat meg a fotogrammetria segítségével. A hagyományos módszerekkel nehéz a teljes testre kiterjedő elmozdulások és feszültségek mérése, holott ez igen hasznos lenne a fizikai modellek ellenőrzéséhez és pontosításához.

A feszültségek közvetlen mérésére nincs mód, csak közvetett módon, az alakváltozásokon keresztül tudunk következtetni a mértékére. Meghatározásukra több módszer is létezik. A hagyományos módszerek közé tartoznak a nyúlásmérő bélyegek, induktív útadók vagy a teljes testre kiterjedő fotoelasztikus vizsgálatok [1]. Ezek általában sok előkészületet, illetve költséges eszközök és műszerek használatát igénylik. Napjainkban egyre nagyobb teret kapnak a képkorrelációs eljárások, amelyek a próbatestről készített fényképeket feldolgozva jutnak eredményre, a több képen megtalált azonos pontok közötti pixeltávolságok segítségével. A digitális képkorreláció (Digital Image Correlation, továbbiakban DIC) olyan távérzékelési eljárás, amellyel hétköznapi eszközök használatával, képfeldolgozás mellett akár teljes elmozdulás- és nyúlásmezőt vizsgálhatunk a próbatest kamera által látható

részein [2]. Ezen mérések nagy előnye, hogy a hagyományos vizsgálati módszerekkel szemben nem szükséges előre ismerni a tönkremenetel helyét, hiszen a mérési eredmények a teljes próbatestre vonatkoznak, és feldolgozásuk utólag történik, alapelvük pedig mind mikroszkopikus (milliméter nagyságrendű próbatest), mind makroszkopikus (méter nagyságrendű próbatest) skálán érvényes [2].

A DIC egy képsorozat képeinek összehasonlítására támaszkodik az eredeti állapotból indulva, fokozatosan eljutva a kívánt terhelési és deformált állapotokig. Az eredeti állapothoz tartozó referenciaképen egyedi részleteket keresünk, majd ezen részleteket a deformált állapotokhoz tartozó képeken (iteratív módon), mintakereső algoritmus használatával szintén megkeressük, és koordinátáik változásait (alakváltozási paralaxis) eltávolítjuk (1. ábra). Vizsgálataink során biztosítottuk, hogy a képeken tapasztalható változások csak a próbatest alakváltozásait tükrözzék, ehhez például az állványra rögzített kamerát távolról sütöttük el.

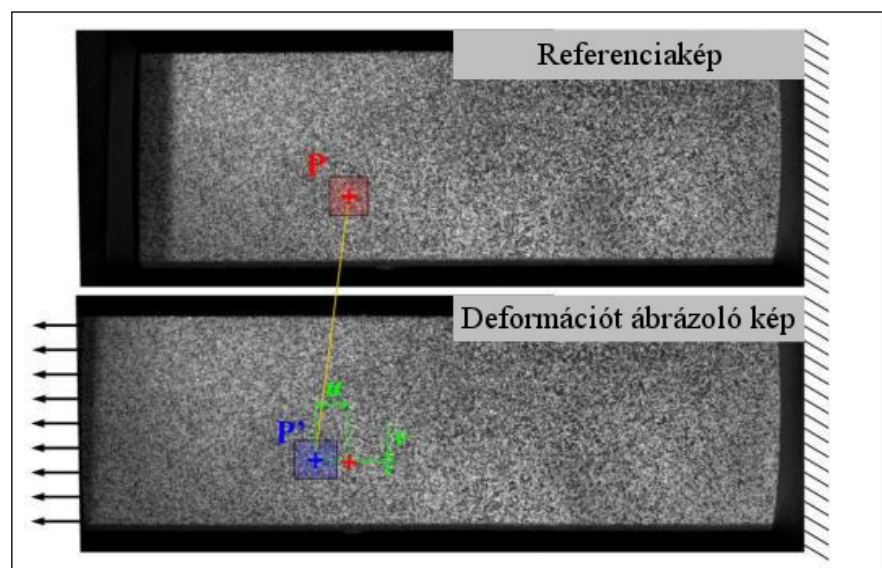
Megfelelő számú és eloszlású egyedi részlet esetén a tárolt adatok alapján

a próbatest felületén a teljes elmozdulás- majd nyúlásmező leképezhető, ekkor azonban előtérbe kerül a DIC egyik legfőbb hátránya, a képzaj befolyása az adatokra. A leképezéshez szükséges művelet, a numerikus differenciálszámítás ugyanis erősen érzékeny a zajra, az elmozdulásvektor bármilyen hibája növelni fogja az alakváltozás-mező hibáit. A zaj hatásának csökkentésére többféle simító eljárás alkalmazható (Gauss-szűrő, legkisebb négyzetes síkillesztés), teljes kiküszöbölésük azonban nem megoldott [3] [4].

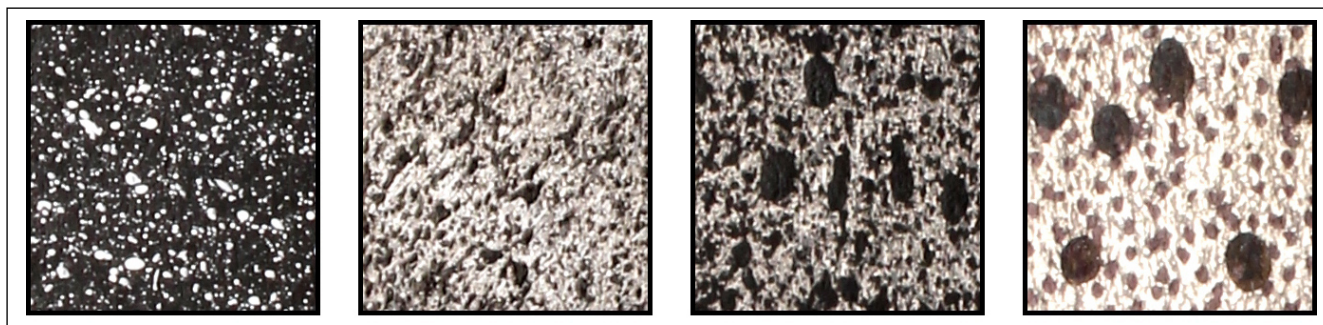
## Acéllemez szakítókísérlet

Az eljárás teszteléséhez szükséges adatokat egy kísérlet, jelen esetben egy acéllemez szakítókísérlete szolgáltatja. A próbatest felületét a képkorreláció sikerességéhez valamilyen véletlenszerű mintázattal kell bevonni annak érdekében, hogy a feldolgozó szoftver képes legyen a próbatesten egyedi részletek felismerésére, melyeket a deformáció során követni tud [2] [3][5][6].

A kísérlet előtt összesen 14 minta felvihető és fényképezhető



1. ábra. A digitális képkorreláció alapelve [4]



2. ábra. Optimális minták acél próbatesten

szempontok alapján történő tesztelésére került sor, ez alapján 4 optimális minta adódott (2. ábra).

A kísérleti elrendezés egy egyszerű szakítóképzőgépről csak annyiban tér el, hogy a próbatesten egy mérőszalagot, illetve arra merőlegesen digitális fényképezőgépet és vakut helyeztünk el a korreláció bemenő adataként szolgáló képsorozat elkészítéséhez (3. ábra).

A kísérlet előkészítése során megfontolandó a próbatest és a fényképezőgép távolsága, hiszen a mérési eredmények felbontása adott fényképezőgép (adott a szenzorfelbontás, a szenzorméret és a fókusztávolság) esetén elsősorban ettől függ. Acélanganyag vizsgálatoknál ez különösen fontos kérdés, az acél ugyanis a folyáshatára előtt alig nyúlik, utána viszont jelentősen, ezért a felbontás és a látómező közti egyensúly megtalálása nem mindig egyértelmű. Kísérletünk során – lévén, hogy kis szilárdságú, nagy duktilitású<sup>1</sup> acéllal dolgoztunk – ezt az egyensúlyt a kisebb felbontás és nagyobb látómező irányába toltuk el. A közelről fényképezett, nagy szilárdságú acéllemezek szakítóképzőgépén végzett képkorrelációs vizsgálatok az acélanganyag rugalmas tartományában már igazolták a módszer helyességét [7][8].

### Mérési hibák és kiküszöbölésük

A fényképezés útján nyert adatokat – mint bármilyen mérés adatait – hibák terhelik, hiszen a méréseink valószínűségi változóknak tekinthetők. Célunk, hogy ezeknek a hibáknak a mérésre gyakorolt hatását a lehető



3. ábra. Képkorrelációs vizsgálat kísérleti elrendezése

legkisebbre csökkentsük, ezért fontos ismerni a hibák forrásait és mértékét, illetve hogy hogyan lehet őket hatékonyan kiküszöbölni vagy korrigálni.

A digitális fényképezőgépek szenzorai az őket terhelő hibák szempontjából nagyon hasonlóak bármely egyéb elektronikus mérőeszközhöz. A „méréseiket” (a pixelek leolvasásait) terhelő képzaj statisztikai szempontból felosztható szabályos és véletlenszerű hibákra. A szabályos hibákat a digitális gépek CCD vagy CMOS képképzőpaneljének tökéletlenségei okozzák. Ezeknek köszönhetően a képképzőpanel különböző pixeleinek érzékenysége eltér, így két különböző pixelt érő fény hiába azonos intenzitású és hullámhosszú, a pixelek mégis rendszeresen eltérő értékeket mutatnak majd. A véletlenszerű hibák legfőbb oka, hogy a fotonok érzékelése statisztikai folyamat. Az egyes pixelek több expozíció során végzett leolvasási értékei Poisson-eloszlást követnek [2].

A képzaj mértékét a képek készítésekor elsősorban a megfelelő fényviszonyok kialakításával csökkenthetjük, korlátozások mellett még a szenzor kvantálási mélységének a növelésével, azaz az ISO csökkentésével, illetve utólag, a képfeldolgozás során szűrők alkalmazásával (pl. Gauss-szűrés).

Az objektívekben használt lencsék, illetve a képképzőpanel és ezek összeszerelési hibái minden, lencsét használó fényképezőgép képein jellegzetes leképezési hibajelenségeket okoznak. Mivel ezek a hibák objektív-kamera párosra jellemzőek, ezért néhány optikai paraméter meghatározásával, tehát a kamera kalibrációjával korrigálhatók. A legtöbb, így az általunk használt kamerakalibrációs implementáció is a Brown-modell szerint dolgozik, és két alapvető torzítási hatást, a radiális és tangenciális torzítást veszi figyelembe [9]. A kalibrációt minden kísérletsorozatot követően elvégeztük a beállítások

<sup>1</sup> Duktilitás (szívósság): Szerkezetek képlékeny alakváltozási képessége. Minél nagyobb a duktilitása egy anyagnak annál nagyobb alakváltozásokat szenved a tönkremenetele előtt.

változatlanul hagyásával, azonos tárgy-távolság mellett.

Az optikai tengely és a próbatest síkja ideális esetben derékszöget zárnak be, a számítás egyszerűsítése érdekében. A valóságban tökéletes derékszöget nem lehet beállítani, ezért a bezárt szög hibája kis mértékben mindig rontja a mérések pontosságát. A hiba kielégítő mértékben javítható, ha az optikai tengelyt az állványokon általában megtalálható libellák segítségével vízszintesbe hozzuk, és a fényképezőgépet a próbatesttel pontosan szembe állítjuk. Ennél precízebb megoldás, ha a próbatest mért felületén egy nagy pontossággal ismert geometriai alakzatot jelölünk ki, mely a felvételeken jól azonosítható. A pontok képen lévő helyzete alapján a próbatest és a képsík párhuzamossági hibájából adódó perspektív torzítás utólag, szoftveresen javítható a centrális vetítés alapelvei alapján.

Alapvetően nem mérési hibát, mint inkább a mérés ellehetetlenülését okozó akadály a kamera bemozdulása. Ennek elkerüléséhez robosztus kameraállvány és kis gyújtótávolságú, a próbatesthez közel elhelyezett objektív használata szükséges.

## Képkorrelációs szoftver fejlesztése

A piacon jelenleg elérhető fejlett képkorrelációs szoftverek jellemzően vagy csak a velük együtt forgalmazott konkrét mérőeszközökkel való együttműködésre alkalmasak (pl. VIC2D [10]) – ezen komplett csomagok használata a kísérletek elvégzése szempontjából egyszerűbb lehet, ugyanakkor jóval drágább is –, vagy működésük lassú és nehézkes (pl. Ncorr [11]). Sor került ezért egy könnyen elérhető eszközzel is kompatibilis, általános felhasználású képkorrelációs szoftver kifejlesztésére.

A fejlesztés a futási sebesség szempontjából előnyös C++ nyelven [12], a nyílt forráskódú OpenCV (Computer Vision) függvénykönyvtár [9][13] használatával történt. A szoftver jelenlegi állapotában képes rácshálós, vagy pettymintás felületkezeléssel ellátott próbatestek kétdimenziós (síkbeli) korrelációs vizsgálatának elvégzésére.

## Kiértékelés

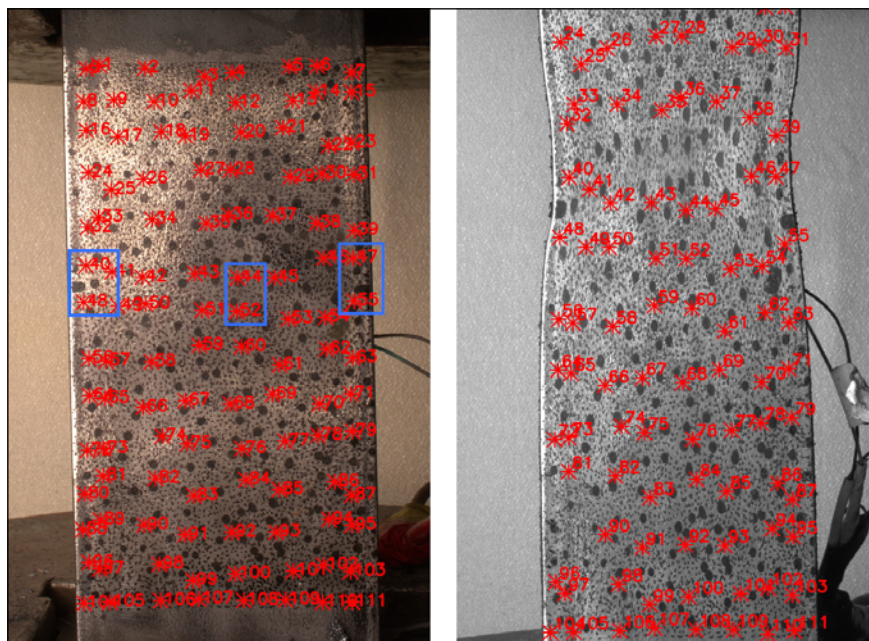
A négy különböző mintával elvégzett kísérlet közül csak a legjobb petty-pixel arányú került kiértékelésre. A nyúlásmérőkkel történő összehasonlításához a három bélyeg helyével megegyező mérési helyeket jelöltünk ki (4. ábra), ahol két pont által definiált, ~10 milliméter bázishosszú szakaszt, „virtuális nyúlásmérőket” vettünk fel (az ábrán téglalappal jelölve). A nyúlásmérő bélyegek méréseit az összehasonlítások alatt hibátlannak feltételezzük.

## Pontossági elvárások

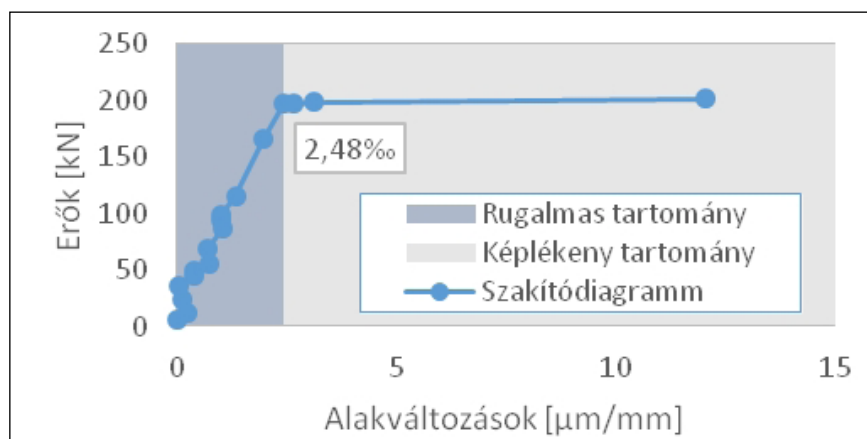
Az acélanyagú próbatest viselkedését a folyáshatár rugalmas és képlékeny tartományokra bontja. Míg a képlékeny tartományban történő nagy

elmozdulások távoli kameraállással is viszonylag pontosan követhetők, a rugalmas tartományról ugyanez nem mondható el.

Már a kísérlet előtt a próbatestre helyezett mérőszalag alapján a perspektív torzítás pontos kiküszöbölése nélkül, megközelítőleg megállapítható, hogy a képi és valós mértékegységek közötti váltószám 0,04 mm/pixel. A kísérlet szakítódiaagramjairól leolvasható, hogy az általunk használt acéllemez megfolyása ~2,46%-os nyúlásnál következik be (5. ábra), ami 10 milliméteres (megnyúlási) bázishosszon csupán 0,0246 milliméter megnyúlást jelent. Nyilvánvaló tehát, hogy az adott felbontású kamerával és adott távolságból végzett méréseink csak képlékeny tartományban rendelkeznek megfelelő pontossággal.



4. ábra. Korrelációra kijelölt pontok és a virtuális nyúlásmérők



5. ábra. A vizsgált acélanyag rugalmas nyúlása

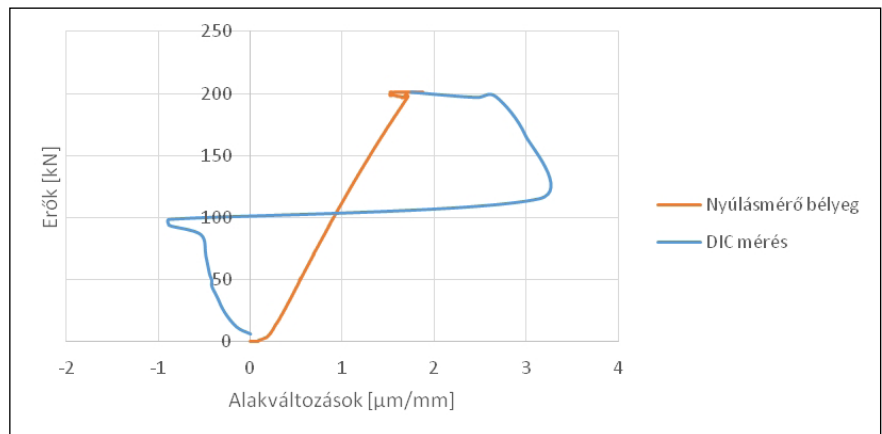
## Eredmények

A 6. ábra szerint a két módszerrel mért folyáshatár megegyezik ugyan, a pontossági hiányosságok miatt azonban az odáig vezető rugalmas tartományon viszont a DIC-mérésekben jelentős eltérések vannak. A DIC mérésein (7. ábra, 6. ábra) megfigyelhető diszkrét ugrások a virtuális nyúlásmérők egy-egy pixelnyi hosszváltozását jelzik, a változás pixel alatti komponense az optikai elrajzolás korrekciójából adódik. Megfelelő felbontású fényképezőgéppel, közelebbi kameraállással, esetleg több kamera egyidejű használatával a mérés pontossága jelentősen növelhető.

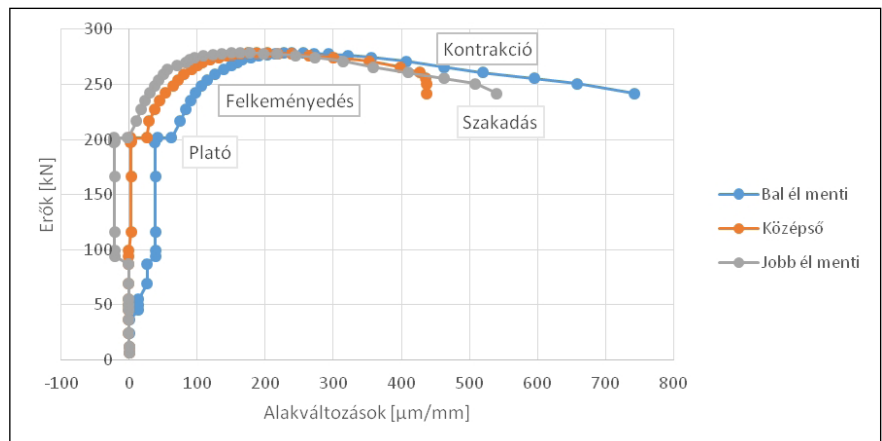
A teljes tartományon végzett mérésekben már jól látszik, hogy a folyáshatár átlépését követően, a nyúlások megnövekedésével a képponkorreláció szolgáltat használható adatokat (a nyúlásmérők már a folyáshatáron leestek, a 8. ábrán fekete ponttal jelölve). A 7. ábrán felfedezhetők a szakítódiagram jellegzetes szakaszai: a plató, a felkeményedés, a kontrakció, majd a szakadás. A lemez közepén és szélein mért relatív alakváltozás (amely nyúlásmérő bélyegek mérésein is felfedezhető) eltérései, a szakadónyúlás eltérő értékei a szakítógépfogási hibájából adódó enyhe hajlításnak, illetve a különböző (megnyúlási) bázishosszú méréseknek tudhatók be.

A két módszer lemezközépen végzett méréseinek eredményeit egymás mellé helyezve egyértelmű összefüggés látható a mért adatok között (8. ábra): míg a nyúlásmérő bélyegek a rugalmas tartományon adtak használható eredményeket, úgy a képlékeny tartományon a DIC szolgált megfelelő adatokkal.

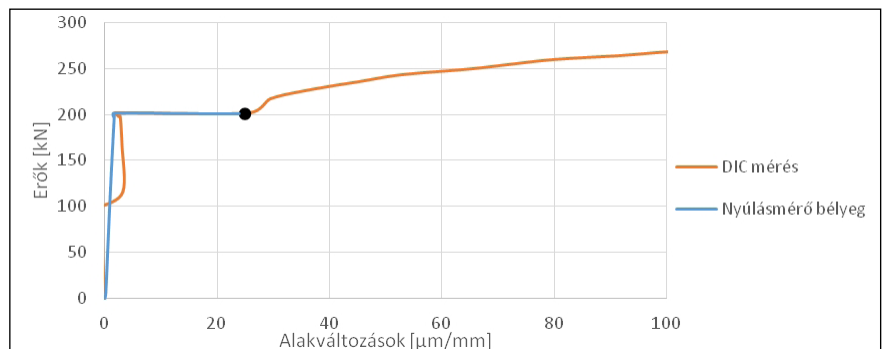
A képponkorrelációs számítások eredményeként minden képre vonatkozóan megkaptuk az egyes követett pontok koordinátáinak referenciaképhez képest történt  $x$  és  $y$  irányú elmozdulásait. Ha vesszük a releváns irányú elmozdulásokat (esetünkben ez a húzóerő hatásvonalának megfelelő, függőleges  $y$  irány), és az egyes pontok próbatest síkjában történő elmozdulásait  $z$ -értékként a pontokhoz rendelve térbeli koordináta-rendszerben ábrázoljuk, majd a kapott „térbeli” pontokra



6. ábra. Nyúlások összehasonlítása rugalmas tartományon



7. ábra. A nyúlásmérők helyein elhelyezett DIC-mérések, teljes tartomány



8. ábra. Virtuális és valós nyúlásmérők összehasonlítása a lemezközépen

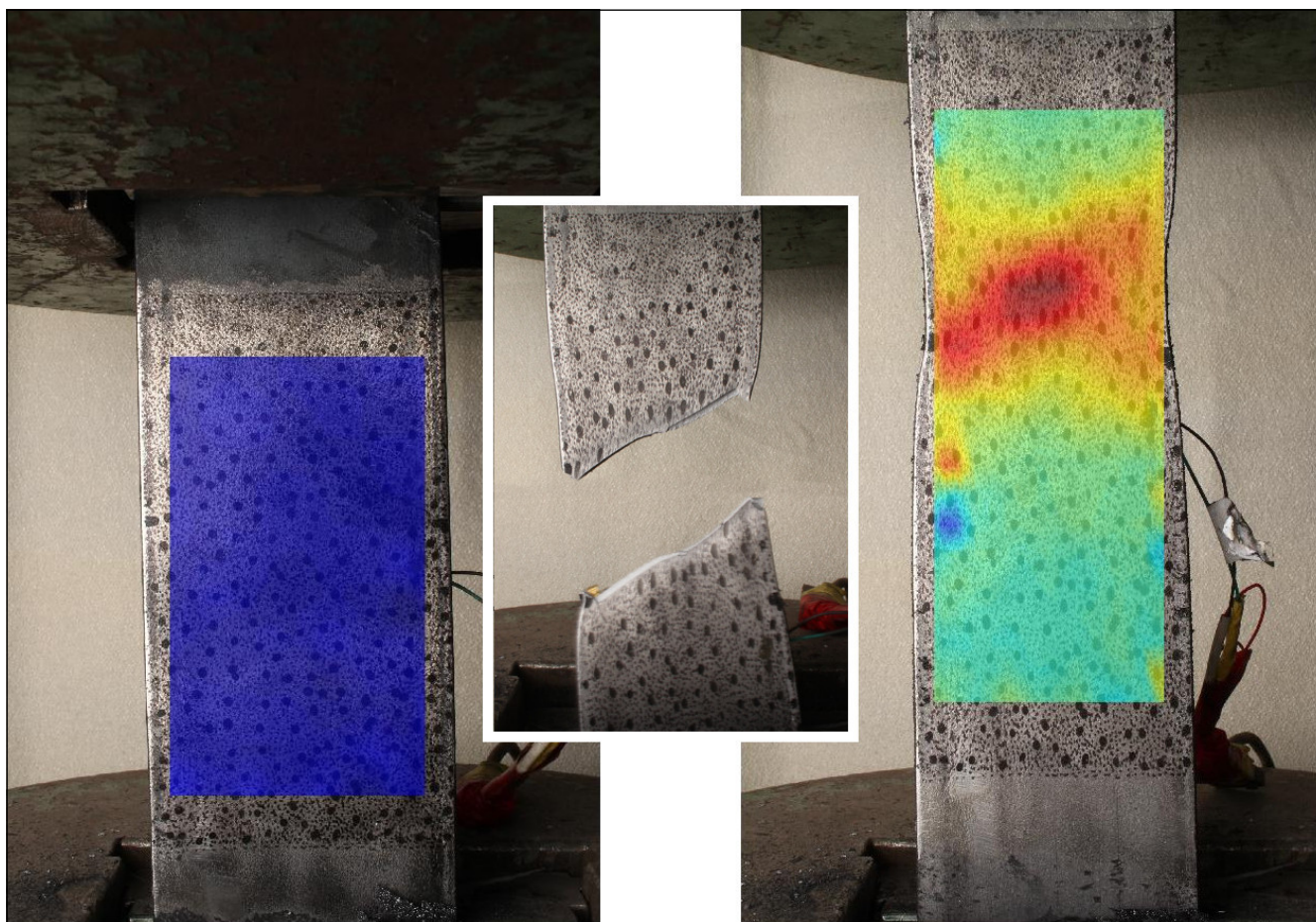
harmadfokú spline-interpolációval regressziós felületet illesztünk, a képteteje felé emelkedő felületet kapunk. Mivel a próbatestet felülről húztuk, így az elmozdulások felül a legnagyobbak. Az  $y$  irányú felületi változások (megnyúlások) színfokozatos módon ábrázolhatók a legszemléletesebben (9. ábra).

A folyáshatáron alig látszanak nyúlások, a szakadás előtti állapotban viszont a legnagyobb nyúlásokat jelző piros területeken jól megfigyelhető a képlékenyedés kialakulása. Ez igazolja a nyúlásmérőkkel való összehasonlítás

során tett feltételezést, és vizuális megerősítést ad a módszer helyes működésére. A nyúlások jó előrejelzést adnak a tönkremenetel várható helyére és módjára is.

## Összefoglalás

Digitális képponkorrelációs szoftverünk működését acéllemez szakító kísérletének segítségével vizsgáltuk, és a kapott eredményeket összehasonlítottuk a hagyományos nyúlásmérő bélyeg méréseivel. Ez utóbbi csak rugalmas tartományon mér, míg az általunk



9. ábra. Teljes mezős nyúlások a folyáshatáron (bal oldali ábra) és szakadás előtt (jobb oldali ábra), középen a töréskép

használt kamera az általunk alkalmazott tárgytávolsággal csak képlékeny tartományon pontos, a két tartomány határán (a folyáshatáron) azonban a két módszer mérései pontos egyezést mutatnak. A mérés felbontásának növelésével (nagyobb felbontású fényképezőgéppel, és/vagy közelebbi kameraállással) a mérés pontatlanságai kiküszöbölhetők, így a rugalmas tartomány is összehasonlíthatóvá válik. A DIC segítségével a teljes nyúlásmezőt is vizsgálni tudtuk, ami lehetőséget ad a próbatest felületén uralkodó alakváltozás-állapot átfogó vizsgálatára, grafikus szemléltetésére is.

A módszer a kísérleti eljárástól a számításokat végző szoftverig olyan látványos fejlesztési lehetőséget rejt magában, mint például több kamera használata esetén a térbeli alakváltozások mérése. A hétköznapi felhasználó számára jelenleg hozzáférhető eszközök segítségével a rendszer adottságaiból és véletlen hibáiból adódóan még nem érhető el olyan pontosság, mint a hagyományos mérés technológiák (pl.

nyúlásmérő bélyeg) használata esetén, ezek a hibák azonban a módszer és a számítástechnika fejlődésével kiküszöbölhetők lesznek.



Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3-i kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült

### Irodalomjegyzék

- [1] Thamm Frigyes – Huszár István – Ludvig Győző – Szántó István 1968. A szilárdságtan kísérleti módszerei, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 337
- [2] Freddi, Alessandro – Olmi, Giorgio – Cristofolini, Luca 2015. Experimental Stress Analysis for materials and Structures – Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies, Springer, Cham, p. 509
- [3] Blaber, J. – Adair, B. – Antoniou, A. 2015. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software, Experimental Mechanics, p. 18 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- [4] Mazzoleni, Paolo 2013. Uncertainty Estimation and reduction in Digital Image Correlation Measurements, Politecnico di Milano, p. 142
- [5] Correlated Solutions: Application Note AN-1701 Speckle Pattern Fundamentals, <http://www.correlatedsolutions.com/support/index.php?/Knowledgebase/Article/GetAttachment/80/14750>, 2017. 09. 20.
- [6] Chen, Zhenning – Quan, Chenggen – Zhu, Feipeng – He, Xiaoyuan 2015. A Method to Transfer Speckle Patterns for Digital Image Correlation, Measurement Science and Technology DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/9/095201>
- [7] Turán Pál – Horváth László 2015. Experimental behaviour of tension plates with centre hole made from high strength steel, Proceedings of The 13th Nordic Steel Construction Conference: NSCC-2015, Tampere
- [8] Piri Dávid – Weszelovits Gergő 2013. Vasúti pálya függőleges elmozdulásának vizsgálata, TDK dolgozat, Budapest, p. 83
- [9] OpenCV dokumentáció, <https://docs.opencv.org/3.2.0/index.html>, 2017. 10. 25.
- [10] <http://correlatedsolutions.com/vic-2d>, 2017. 10. 27.
- [11] <http://www.ncorr.com>, 2017. 10. 27.
- [12] Benedek Zoltán – Levandovszky Tihamér 2013. Szoftverfejlesztés C++ nyelven, SZAK Kiadó
- [13] Brahmbhatt, Samarth 2013. Practical OpenCV, Apress, p. 229 DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-6080-6>

## Summary

Several experimental methods exist for strain and stress measurement. There are traditional techniques including strain gauges, inductive displacement sensors, or full-field measurements using photoelastic analysis. These

methods usually require complex instruments, and/or great amount of preparation. Image correlation methods are nowadays gaining traction. The results are calculated by processing multiple digital images of the specimen, measuring distances between identical points through

the entire sequence of images. The accessibility of solutions available on the market is restricted, hence our goal is to develop a Digital Image Correlation method that is easy to use and compatible with accessible equipment, test it, and compare the results with those of traditional methods.



**Paulik Dániel**  
*BSc. egyetemi  
hallgató*

BME Építőmérnöki Kar  
paulikdani@gmail.com



**Dr. Molnár  
Bence**  
*adjunktus*

BME Építőmérnöki Kar  
molnar.bence@epito.bme.hu



**Tóth Márton**  
*MSc. egyetemi  
hallgató*

BME Építőmérnöki Kar  
tancaj11@gmail.com



**Neuberger  
Hajnalka**  
*doktorjelölt*

BME Építőmérnöki Kar  
neuberger.hajnalka@epito.bme.hu



**Dr. Horváth  
László**  
*egyetemi docens*

BME Építőmérnöki Kar  
horvath.laszlo@epito.bme.hu

**Kulcsszavak:** fotogrammetria, alakváltozások és feszültségek mérésére, fotoelasztikus vizsgálatok

**Keywords:** photogrammetry, strain and stress measurement, photoelastic analysis