

PROFILOMETRIÁS FELVÉTELEK FELDOLGOZÁSA WAVELET – TRANSZFORMÁCIÓVAL

Forgács Imre*, Antal Ákos

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék



DOI: [10.17489/biohun/2025/1/611](https://doi.org/10.17489/biohun/2025/1/611)

Absztrakt

Az elmúlt évtizedekben a technológiai fejlődés és a digitalizáció hatására számos új eszköz és mérési technika jelent meg az optika területén. Napjainkban, egyre nagyobb és nagyobb hangsúlyt kapnak az érintésmentes mérési eljárások, különösen a Covid19 okozta világjárvány óta. A profilometria, mint optikai mérési technika, lehetővé teszi a tárgyak felületének pontos és sérülésmentes vizsgálatát. Az ilyen módszerek számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos érintéses technikákkal szemben, ezért különösen hasznosak az orvostudományban. Lehetővé teszi a biológiai felületek és szövetek részletes vizsgálatát fizikai érintkezés nélkül, ami gyakran elengedhetetlen a páciensek biztonsága szempontjából. Ezek a technikák alkalmazhatók a bőr szerkezetének elemzésére, a sebgyógyulás folyamatának nyomon követésére, az implantátumok és protézisek felületi tulajdonságainak vizsgálatára, miközben minimalizálják a fertőzés és más komplikációk kockázatát. Azonban, nem csak az orvostudományban alkalmazhatók hatékonyan a profilometriás eljárások. Többek között, a hadiparban, az anyagtudományban és a termelői szektorban is egyaránt fontos feladat az objektumok geometriájának minél pontosabb és gyorsabb meghatározása egy kontaktus mentes eljárás segítségével. Az ilyen és ehhez hasonló feladatokra biztosít egy lehetséges megoldást a profilometria. Kutatásunkban ezt az optikai mérési technikát és ennek alkalmazását mutatjuk be különböző modelleken. Az eljárás lényege, hogy struktúrált fényt vetítünk a vizsgálni kívánt felületre és a felület által torzított, vetített mintát rögzítjük. Ugyanis, a vizsgált testről reflektálódó fény tartalmazza felület tulajdonságait, így az elkészített digitális kép megfelelő feldolgozásával kinyerhető a vizsgált test geometriája. A feldolgozáshoz használt, leggyakrabban alkalmazott matematikai eszköz a Fourier-transzformáció. Azonban, mi egy wavelet-transzformációs módszert mutatunk be, mivel bizonyos esetekben ez a megoldás pontosabb eredményt ad, a skálázási és eltolási tulajdonságai miatt.

Kulcsszavak: képfeldolgozás, optika, felületekonstrukció, profilometria, wavelet-transzformáció

***Levelező szerző elérhetősége:** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. **E-mail:** forgacsimre@edu.bme.hu **Tel.:** +36 1 463-2422

Citáció: Forgács I, Antal Á. Profilometriás felvételek feldolgozása wavelet – transzformációval. *Biomech Hung.* 2025;18(1):7-21.

Beérkezés ideje: 2025.02.11. **Elfogadás ideje:** 2025.10.28.

PROCESSING OF PROFILOMETRIC IMAGES USING WAVELET TRANSFORM

Abstract

In recent decades, the field of optics has witnessed the emergence of numerous innovative tools and measurement techniques, driven by advancements in technology and digitalization. Currently, contactless measurement methods are becoming increasingly significant, particularly in light of the COVID-19 pandemic. Profilometry, an optical measurement technique, facilitates the accurate and non-destructive analysis of object surfaces. These methods offer several advantages over traditional contact techniques, rendering them especially valuable in the medical field. They enable detailed assessments of biological surfaces and tissues without physical interaction, which is often critical for ensuring patient safety. Applications include the analysis of skin structures, monitoring of wound healing, and evaluation of the surface characteristics of implants and prosthetics, all while reducing the risk of infection and other complications. Moreover, profilometric methods extend beyond the medical domain. They are equally vital in sectors such as defense, materials science, and manufacturing, where the precise and rapid assessment of object geometry through non-contact means is essential. Profilometry presents a viable solution for these applications. In our research, we explore this optical measurement technique and its implementation across various models. The methodology involves projecting structured light onto the surface under examination and capturing the distorted pattern. The light reflected from the object carries information regarding its surface properties, and through suitable digital image processing, the geometry of the object can be derived. The Fourier transformation is the most commonly employed mathematical tool for this processing. However, we introduce a wavelet transformation method, which can yield more accurate results in certain scenarios due to its scaling and shifting capabilities.

Keywords: image processing; optics; surface reconstruction; profilometry; wavelet transformation

BEVEZETÉS

Napjaink egyre jobban digitalizált világában, a képfeldolgozás az egyik legdinamikusabban fejlődő terület, melynek számos alkalmazása van az orvosi diagnosztikától a műholdas felvételek elemzéséig. Évről évre egyre nagyobb hangsúly kerül a különböző optikai eljárások és képfeldolgozási módszerek fejlesztésére. Ezzel párhuzamosan az érintésmentes módszerek is népszerűsödnek, főleg a SARS-CoV-2 vírus okozta Covid19-világjárvány óta, különösen az orvostudományban.¹ Az ilyen eljárások alapjai többnyire mechatronikai és optikai technikák. Erre kiváló példa a robotsebészet, aminek a jól ismert zászlóshajója a Da Vinci sebészeti rendszer.² Ez a megoldás elősorban a telemanipuláció területéhez tartozik, de sikere és gyors elterjedése jól szemlélteti

ti a kontaktusmentes eljárások szükségességét az egészségügyben.

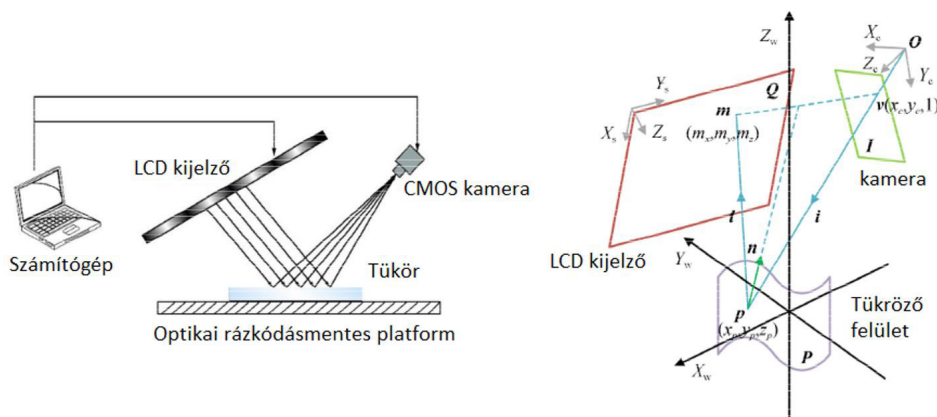
Az érintésmentes mérési technikák egyik fajtája a profilometria³, ami egy olyan optikai mérési módszer, amely lehetővé teszi a tárgyak felületének háromdimenziós, pontos és sérülésmentes vizsgálatát. A deflektometria⁴ egy hasonló eljárás, amit főként tükröző felületek topográfiajának és hibáinak meghatározására használnak. Fontos kiemelni, hogy a profilometria és a deflektometria, mint felületanalizáló mérési technikák nagyon hasonlóak. Ez az állítás különösen igaz a fázismérő profilometria^{5,6} (Phase Measuring Profilometry (PMP)) és a fázismérő deflektometria⁷⁻⁹ (Phase Measuring Deflectometry (PMD)) esetében. Mind a kettő technika a fényforrás és a detektorok geo-

metriai viszonyán alapulva méri a 3D alakot, viszont, eltérés van a méréshez felhasznált matematikai és fizikai eszközökben. Ugyanis, a PMP a diffúz felületet az optikai háromszögelés szabálya alapján méri, míg a PMD tükröződő felületekkel dolgozik a visszaverődés törvénye alapján (1. ábra). Továbbá, a PMP módszer esetében a visszanyert fázisértékek közvetlenül a magassági adatokhoz kapcsolódnak, míg a PMD eljárásnál a fázisértékek mind a lejtéshez, mind a magassághoz kötődnek.¹⁰ Ezért megfelelő regularizációra és numerikus integrációra van szükség az utóbbi technika alkalmazásakor. Azonban, ha részben tükröződő és részben diffúz felületeket mérünk, akkor a szóban forgó két technika kombinálható úgy, hogy a PMP magassági adatait használják a PMD inverz problémájának regularizálására.¹¹

Továbbá, mindkét technika általában szinuszos fáziscsík-mintázatokat használ. A csíkok elemzési eljárása hasonlóan tartalmazza a csík demodulációját és a fázis kicsomagolását.¹³ A csíkmintázatok demodulálhatóak a legkisebb négyzetes elvű fáziseltolások algoritmusokkal vagy az egyképes demodulációs technikákkal, mint különböző transzformációs módszerek.¹⁴

Ezért mindkét módszer ugyanazokkal a gyakorlati kérdésekkel szembesül a csíkok elemzésében, valamint megosztják a meglévő megoldásokat is, például a digitális fényberendezések nemlineáris válaszával kapcsolatban.¹⁵

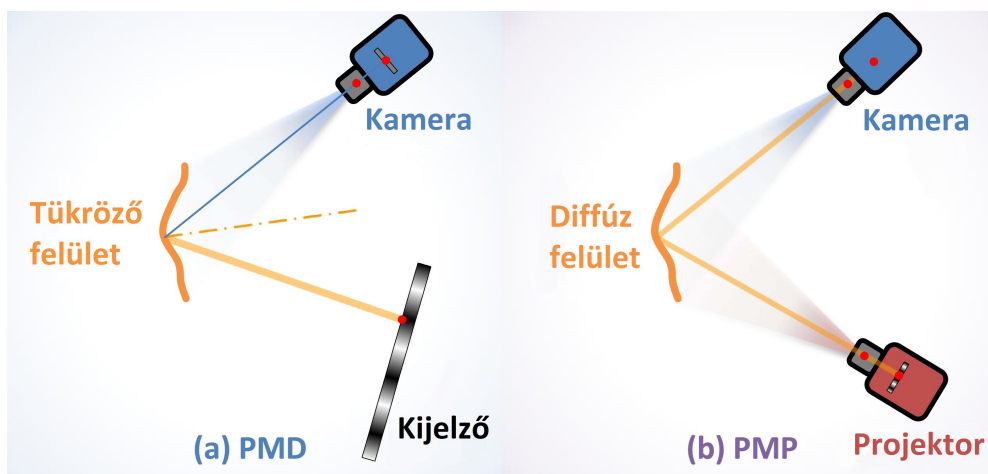
Az adatrögzítéstől a képfeldolgozásig számos hasonlóság van a két felületanalizáló technika között, azonban néhány jellegzetes eltérés is megfigyelhető. Például a fázismérő profilometriának hosszabb múltja van, ami egészen az 1980-as évek elejéig nyúlik vissza.⁵ A fő különbséget mégis a mérési elvek és a mérési összeállítások között lehet megtalálni (2. ábra). Röviden összefoglalva, a profilometria esetében van egy projekciós rendszer - egy leképező optika - ami az ő tárgysíkjában lévő egyenközű rácsot vagy egyedi profilt rávetíti a felületre, és a felület a pozíciójától és az alakjától függően deformálni fogja a rávetített mintázatot, amit rögzítünk egy a vetítőtől eltérő pozícióból. Míg a deflektometria esetében, nincsen leképező optika, hanem a tér egy adott pontján van egy ernyőn (pl. monitoron) egy csíkos profil és maga a felület egy képalkotó felület (pl. tükröz), ami erről az említett profilról képet alkot és az így keletkező képet kell rögzíteni és feldolgozni.



1. ábra. A deflektometriás mérési összeállítás és az ehhez tartozó elméleti háttér.¹²

A profilometriának és a deflektometriának is több különböző fajtája van. Az előbbi esetében beszélhetünk kontakt profilometriáról, ami nagy pontosságú méréseket tesz lehetővé, de nem alkalmas puha vagy sérülékeny felületek vizsgálatára mert a mérés során egy finom tű érintkezik a vizsgált felülettel.¹⁶ A kontaktusmentes fajták közül a legelterjedtebb a Fourier-transzformációs profilometria¹⁷⁻¹⁹ (Fourier Transform Profilometry (FTP)). Ezenkívül, ebben a kategóriában kiemelendően kutatott a már említett fázismérésen alapuló, a konfokális és a vivőfrekvencia érzékelős változat is.^{19,20} A számítógépes képfeldolgozás fejlődésének köszönhetően új fajta mérési eljárások jelentek meg a tárgyalt kategóriában. Például a lézeres profilometria, ami egy gyors és pontos módszer.²¹ Viszont az eddig részletezett mérési eljárásokon kívül számtalan másik felületrekonstrukciós technika létezik, amelyek különböző alkalmazási területeken hatékonyak.^{22,56} Ilyen például a közismert lézeres szkennelés, aminek az alapja a lézeres trianguláció. Ezt a technikát leggyakrabban a 3D modellezésben, a fogászatban és a minőségellenőrzésben használják.^{23,24} A kutatás szempontjából azonban a strukturált fényveti-

tésen alapuló érintésmentes mérési technikák a kiemelten fontosak, mivel ezekkel hatékonyabban és biztonságosabban lehet nagyponosságú méréseket készíteni, mint az érintéses eljárásokkal. Az érintésmentes módszereket nem korlátozzák olyan fizikai határok mint-hogy károsíthatják, deformálhatják vagy egészségügyi esetben megfertőzhetik a mintát és torzíthatják az eredményt a fizikai kontaktus miatt. Ellenben az optikai tulajdonságok változékonysága és a mérési körülmények valamennyi esetben befolyásolják az ilyen eljárásokkal készült mérések megbízhatóságát.²⁵ Azonban mintavetítésen alapuló módszereknek a megbízhatóságát tovább fokozza, hogy a mérési idő viszonylag rövid és egyetlen mérés a vizsgált objektum több különböző pontjáról szolgáltat hasznos információkat, éppen ezért az orvostudományokban a kontaktusmentes módszerek vannak elterjedve, mivel ezen a területen a hatványozottan fontos a gyorsaság, a pontosság és a biztonság kombinációja. Természetesen a bemutatott és felhasznált mérési módszereknek vannak hiányosságaik. Mind a profilometriai (PMP), mind a deflektometriai (PMD) eljárásoknak vannak egyértelmű korlátaik és gyenge pontjaik. Például előb-



2. ábra. A fázismérő deflektometria (a) általános mérési összeállítása és a fázismérő profilometria (b) általános mérési összeállítása.¹⁰

bi érzékeny a diffúz visszaverődésből adódó torzításokra és a zajra, míg utóbbi a tükröződő felületek esetében igényel bonyolultabb regularizációt és numerikus integrációt, ami növeli a hibalehetőségeket. Emellett fontos még megemlíteni, hogy mindkét mérési eljárás pontosságát nagymértékben befolyásolják a mérési körülmények, például a fényviszonyok és az optikai elemek elhelyezkedése. Az említett higiéniai és egészségügyi okok mellett ezen hiányosságok azonosítása alapozta meg jelen kutatás célkitűzéseit, amelyek a mérési és feldolgozási pontosság növelésére, a különböző módszerek bemutatására és alkalmazására, valamint az érintésmentes technikák megbízhatóságának javítására irányulnak.^{19,23,26,27}

CÉLKITŰZÉSEK

Különböző alkalmazási területeken az adott tárgyak felszínének a mérése, a felületrekonstrukció és a vizsgált objektum térbeli modelljének a megalkotása meglehetősen körülményes feladatok lehetnek, amiknek a megvalósítása a kellő pontossággal, gyakran nem lehetséges. Ezekre a kihívásokra adott válasz gyanánt egy strukturált fényvetítésen alapuló érintésmentes mérési technikát megvalósító szoftver prototípusa került kifejlesztésre. A mérés elvégzéséhez mindössze egy képrögzítő és egy mintavetítő eszközre van szükség, a szokásos adatfeldolgozó számítógépen kívül. A szoftverben az elterjedt Fourier – transzformáció^{28,29} (Fourier transform (FT)) helyett a kevésbé közismert, de rugalmasabb wavelet – transzformáció képezi a felületrekonstrukció alapját. A wavelet – transzformáció³⁰⁻³² (Wavelet transform (WT)) egy integrál transzformáció, amelyet főleg az idő – és a térbeli jelek elemzésére használnak. A számos paramétere miatt a WT – t hatékonyabban lehet a mindenkori feladathoz igazítani, mint a FT – t, sőt a skálázási és eltolási tulajdonságának köszönhetően sok esetben jobb

eredményeket is szolgáltat.^{33,34} A koncepció lényege, hogy ösztönzi a műszaki, az orvosi és az orvosbiológiai szakemberek gyakorlati és felfedező jellegű kutatásait az érintésmentes módszerek tekintetében, oly módon, hogy egy reális és megvalósítható megoldási eljárást ajánl, a kevésbé hatékony érintéses módszerek helyett. A javasolt szoftver alapú prototípus célja a kontaktusmentes vizsgálatok előtérbe helyezése és népszerűsítése különösen az egészségügyi alkalmazások esetében, a kórházi fertőzések számának csökkentése és a mindenkori járványok (pl. Covid19) elterjedésének elkerülése céljából.

ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

A profilometria egy hatékony felületanalizáló mérési technika, amely lehetővé teszi a tárgyak felületének pontos háromdimenziós meghatározását, ezért egyre több helyen alkalmazzák a tudományban és az iparban is. A sávvetítő eljárásnak nagy előnye, annak mérési tartománya és felbontása, hiszen a mért tárgyak mérete néhány mikrométertől több méterig is terjedhet.⁵⁶ Ennélfogva az optikai mérési módszerek, amilyen a profilometria is, lehetővé teszik a hát, a nyak és a gerinc deformációinak (pl. scoliosis) minimális kockázatú vizsgálatát, de még az olyan érzékeny emberi szervek esetén is használhatók, mint az erek vagy a belső szervek.^{20,27,35-37} Ezenkívül alkalmazzák a fogászatban^{23,38} is, mivel minden ember fogsora, hasonlóan az ujjlenyomatainkhoz, egyedülálló, ezért az orvosok és a fogorvosok nem használhatnak egy általános 3D-modellt az esetleges vizsgálat vagy beavatkozás esetén. Azonban használhatják a különböző strukturált fényt vetítő eljárásokat, hasonlóan a szépségiparhoz és a kozmetikához. A profilometriának ezt a típusát használják még a felületi érdesség mérése³⁹, korrózióanalízisre⁴⁰, a bőr és a sebek monitorozására⁴¹, de rezgésanalízisre⁴² és a nyomtatott áramkörök és az áramköri elemek minőségellenőrzésére⁴³ is.

Általánosságban, két fő részre lehet bontani a profilometriás felületrekonstrukciós mérési eljárást, a képalkotásra, ami az első lépés a [3. ábrán](#), és az adatfeldolgozásra, ami a következő három lépés összességét jelenti a [3. ábrán](#). Mindegyik lépésnél több lehetőség áll rendelkezésre, amikből a mindenkori feladat paraméterei és a többi lépésben választott módszerek szerint lehet kiválasztani az ideális kombinációkat. A strukturált fényt felhasználó profilometriák^{44,45} (Fringe Projection Profilometry (FPP)) fizikai kivitelezésének a lényeg, hogy ismert mintázatú fényt vetítünk a mérendő objektumra, majd a reflektálódott, torzult mintázatot egy erre alkalmas eszközzel (pl. digitális kamerával) rögzítjük és az így begyűjtött adatokat különféle matematikai és képfeldolgozó eszközök segítségével feldolgozzuk.

A mérési folyamat első lépését három részre lehet bontani: a minta vetítésére, a minta reflektálódására és a minta rögzítésére.⁴⁶ A leggyakrabban használt minták szinuszos, bináris vagy szürkeárnyalatos csíkok, amelyek viszonylag egyszerűen előállíthatók és használhatók, ugyanakkor pontos eredményeket lehet velük elérni.^{44,56}

A [3. ábra](#) értelmében a vetítés és az adatgyűjtés után, a sávminták kiértékelése és a fázisszámí-

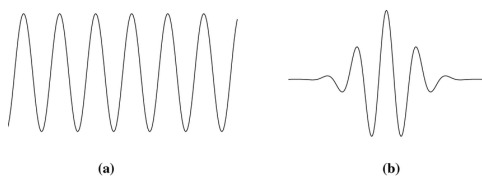
tás következik. A reflektált és deformálódott mintázat elemzéséhez többféle matematikai módszer áll rendelkezésre. Ezeket az eljárásokat különböző szempontok szerint lehet csoportosítani, például beszélhetünk térbeli vagy időbeli technikákról attól függően, hogy egy vagy több képre van szükség az adatok feldolgozásához. Hatékony megoldást kínál a Fourier- és a wavelet-transzformáció, amelyek sok szempontból különböznek, de mind a kettő megoldásra igaz, hogy a képfeldolgozást teljes mértékben a frekvenciatartományban végzik, majd utána az eredményt egy inverz transzformációval visszaalakítják térbeli tartományba ([3. ábra](#)).^{47,48}

A WT-nak több csoportja (pl. diszkrét és folytonos idejű) és azokon belül számos különböző fajtája létezik.^{30,49} A korai változatok még egyszerűbb függvényekkel dolgoztak, mint amilyen az egységugrás függvény is. A jel- és képfeldolgozásban gyakran alkalmazzák a Biortogonális wavelet családokat (sima és fordított), mivel lineáris fázissal rendelkeznek. Viszont a profilometriában a sávminták vizsgálatára komplex anya-waveleteket (pl. Paul, Shannon, Komplex Gauss) szoktak használni, mivel ezek segítségével maximálisan ki lehet használni a WT előnyeit más transzformációkkal szemben. A wavelet-transzformáció egy olyan matematikai eszköz, amely lehe-



3. ábra. A profilometriai mérési folyamat végrehajtásának általános lépései.²⁰

tővé teszi, a mindenkori jel vizsgálatát mind frekvenciatarományban, mind idő vagy tér dimenzióban. Ez az eljárás a jelet nem szinuszos harmonikusokra, hanem az anya-wavelet átskálázott és eltoltt egységeire, azaz különböző tulajdonságokkal rendelkező lokalizált hullámokra (3. ábra), úgynevezett waveletekre bontja le, amelyek képesek egyszerre információt adni a frekvenciáról és arról is, hogy mikor vagy hol jelenik meg a jel adott frekvencia komponense. A waveletek szabálytalan, aszimmetrikus és véges, adott hosszúságú hullámok (3. ábra), amelyek átlagértéke zérus, és jellemzésük a skálázás, azaz a függvény összenyomása vagy megnyújtása, és a pozíció segítségével lehetséges.^{31,32,49} Ezzel szemben a FT szabályos és szimmetrikus, végtelen intervallumú és különböző frekvenciájú szinusz jelekre bontja az eredeti vizsgált jelet (4. ábra).^{28,29}



4. ábra. Szinusz- (a) és wavelet hullám (b)⁵⁰

Az előbbi tulajdonságok miatt a WT alkalmazásával kiküszöbölhetőek az átlapolódásokból adódó hibák, így pontosabb eredményt elérve, például a képek szélein. Továbbá a wavelet-transzformáció esetén a számoláshoz elég az adott érték és annak a negatívja (ellentétje), azaz nem kell szögfüggvényeket használni, és ezzel a megoldással olyan adatokra is szert tudunk tenni, amik a Fourier-transzformáció esetében elérhetetlenek (pl. mikor és hol).

A wavelet-transzformáció a sokszínűségét többek között a bázisfüggvényekre ($\psi(t)$) vonatkozó szabályoknak is köszönheti, mivel egy adott függvény csak akkor lehet a WT bázisfüggvénye, ha ezeknek az említett alábbi kritériumoknak megfelel.

1. $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$.
2. Zérus bemenet esetén a bázisfüggvény ($\psi(t)$) Fourier-transzformáltjának ($F(\psi(t))$) zérusnak kell lennie, azaz $\hat{\Psi}(\omega = 0) = 0$.

Ennek a két feltételnek számos függvény megfelel, így sok függvény lehet a WT alapja, ami szélesebb körben alkalmazhatóbbá és rugalmasabbá teszi a módszert. Az (1) egyenlet egy általános $x(t)$ függvény (jel) Fourier-transzformáltját ($\hat{X}(\omega)$) írja le, míg a (2) összefüggés ugyanennek az $x(t)$ jelnek a wavelet-transzformáltját ($X(a,b)$) szemlélteti.

$$F(x(t)) = \hat{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot \omega \cdot t} dt \quad (1)$$

Ahol, az ω a frekvenciát, a t pedig az időt jelöli.

$$W(x(t)) = X(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \cdot x(t) dt \quad (2)$$

Ahol, az a a skálázási tényező (scaling factor), míg a b az (időbeli) eltolási tényező (time shift factor). Az $1/\sqrt{a}$ a normalizációs tag, ami általában a skálázási tényező részeként jelenik meg, de bizonyos esetekben más értékeket használhatnak vagy teljesen kihagyhatják, attól függően, hogy milyen WT-t és milyen céllal használnak.⁴⁷ A ψ^* pedig a wavelet-transzformáció alapfüggvényének (anya-wavelet) a komplex konjugáltja.

A fáziseloszlás meghatározása után, a rögzített adatok feldolgozásának következő fontos lépése a fázis (3. ábra), azaz fázistérkép kibontása⁵¹ (phase unwrapping), amire azért van szükség mert a számolás során felhasznált szögfüggvények inverzei csak a $[-\pi, \pi]$ intervallumon vehetnek fel értéket, ami pontatlanságokhoz vezethet, azonban a megfelelő fáziskibontási technika segít kiküszöbölni ezeket. Éppen ezért, a legegyszerűbb fáziskibontására

alkalmas algoritmusok, úgy végeznek műveleteket, hogy a két pixel közötti relatív fázis a $[-\pi, \pi]$ intervallumba essen. Ez ideális esetben egy sima kivonást vagy összeadást jelent 2π -vel. Azonban a valós méréseket különböző környezeti hatások (pl. árnyék) és zajok terhelik, amik megnehezítik a fázis kibontást, ezért számos módszer alakult ki az évek során, amik különböző képpen közelítik az említett feladatot és más-más előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek.

Végül, a profilometriás képfeldolgozás utolsó kihagyhatatlan lépése az egész rendszer kalibrációja (más néven koordináták meghatározása vagy modellalkotás), ami a negyedik lépés a 3. ábrán.⁵² Ennek a lépésnek a 3D alakmeghatározás a célja, a rögzített felvétel és egyéb információk ismeretében. A lényeg, a valós világ koordinátái és a képi koordináták közötti kapcsolat meghatározása, amihez használhatunk relatív vagy abszolút koordináta értékeket.⁵³ Ha relatív koordinátákkal dolgozunk akkor a mérési folyamat során felhasznált eszközöknek, mint a kamera, a projektor és a mért tárgy, ismernünk kell a térbeli elhelyezkedését, mivel ebben az esetben mindent a referenciasíkhöz viszonyítunk. Viszont, ehhez a feladathoz gyakran a hagyományos optikai és kamera kalibrációs módszereket használják, amivel hasonló eredmények érhetőek el, csak más megközelítéssel. Ehhez meg kell határoznunk az optikai eszközeink külső és belső paramétereit, majd a megfelelő értékek meghatározására használhatjuk a már említett háromszögelési törvényt egy ideális mérési elrendezés esetében.

Fontos kiemelni, hogy a mérnöki gyakorlatban a profilometriás folyamat utolsó lépéséhez szükséges tényezők pontos megmérése körülményes lehet az adott feladattól függően, ezért ezekben az esetekben használhatunk különböző lineáris és nemlineáris kalibrációs eljárásokat, amikkel hatékonyan lehet közelíteni a

keresett értékeket és megfelelően pontos becsléseket adnak.⁵⁴ Például a lineáris kalibráció esetében kiemelhető két megbízható és sokat alkalmazott módszer. Az egyik a kétsíkú kalibrációs eljárás, a másik pedig a homográfia-alapú kalibráció. Az előbbi esetben két ismert magasságú síkot használnak referenciafelületként, és a kamera–projektor geometriai viszonyait egy lineáris leképezési modell alapján határozzák meg. A nemlineáris kalibrációs eljárások közül is számos technika létezik, így ezekből is csak kettő széles körben ismert módszer emelek ki, a Zhang-féle kamera–projektor kalibrációt, ami egy iteratív, nemlineáris optimalizáláson alapuló eljárás. Illetve a nemlineáris hibaminimalizálást, amit különböző algoritmusok segítségével lehet alkalmazni és a lényege, hogy a projektor és a kamera paramétereit egy többváltozós hibafüggvény minimalizálásával határozza meg. Továbbá fontos megjegyezni, hogy az utóbbi időben egyre elterjedtebb és kutatótabbá válnak az általánosított (más néven rugalmas) kalibrációs technikák, ugyanis ezek a módszerek képesek automatikusan meghatározni a mérési összeállítás geometriai paramétereit.^{52,55,56} Mi több, olyan esetekben is hatékonyan alkalmazhatóak, amikor a kamera, a vetítő és a vizsgált test tetszőlegesen van elhelyezve a térben, ezzel csökkentve a hagyományos optikai geometriák követelményeit.

EREDMÉNYEK

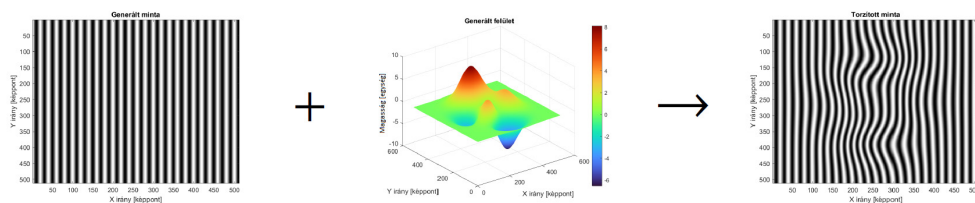
A részletezett szempontok alapján a wavelet-transzformációs prototípus MATLAB R2023a környezetben készült el, annak előnyös matematikai és ábrázolási tulajdonságai miatt. A megoldást először generált virtuális felületeken érdemes tesztelni a gyakorlati alkalmazás előtt, a felmerülő esetleges komplikációk könnyebb és gyorsabb javíthatósága, illetve kiküszöbölése érdekében. A 5. ábra közepén látható tesztfelületet a MATLAB peaks() függvényével lehet előállítani, ez a módszer egy

olyan alakzatot hoz létre, amely a felhasznált paraméterezésnek megfelelően skálázott és transzformált, több Gauss-függvény kombinációjából áll össze. Így ez a felület egyenletesebben változó éllel rendelkezik, mint például egy kocka, de bonyolultabb és szemléletesebb, mint egy síklap vagy egy egyszerű görbe, ezért kellően komplex és ezáltal ideális választás a profilometria tesztelésére. A megfelelő geometria és a csíkozott mintázat létrehozása után a következő lépés az elkészített minta torzítása, és így egy olyan sávminta előállítás, ahol a hullámformában lokális fáziseltérések jönnek létre, ezáltal a csíkozás követni fogja a mesterséges felület topográfiáját (5. ábra).

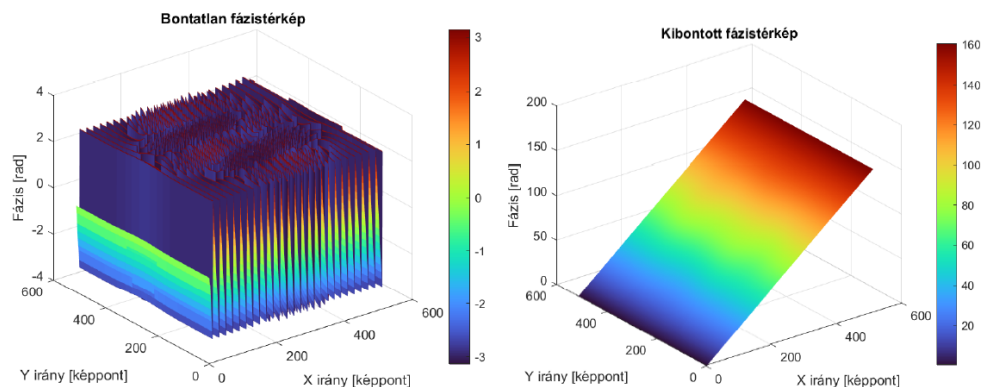
Ezután a deformált mintázatot érdemes szétbontani és soronként folytatni a számolást, mivel így nem csak gyorsabban érhető el az eredmény, de pontosabb megoldás is előállít-

ható. A megjelölt elvek szerint paraméterezett komplex Morlet wavelet alapú folytonos idejű wavelet-transzformáció alkalmazása után a beépített `abs()` és `angle()` függvények segítségével lehet kiszámítani a modulust és a fázist. A bontatlan fázistérkép előállítása a direkt maximum módszerrel történik, míg a szakadásmentes fáziseloszlás a MATLAB `unwrap()` függvényével számítható (6. ábra).

Ezt követően már a kezdeti tesztfelület egyszerűen visszaállítható egy elemi kivonás elvégzése után. A generált kiindulási geometriát közel kifogástalanul sikerült rekonstruálni a wavelet-transzformációs módszerrel, viszont a helyreállított felület szélein megfigyelhetők kisebb eltérések az eredetihez képest, még így is, hogy a mérést nem terhelték a valós környezetre jellemző pontatlanságok és zajok (7. ábra). Azonban a rekonstruált és az eredeti



5. ábra. A generált sávminta deformálása a mesterséges felülettel



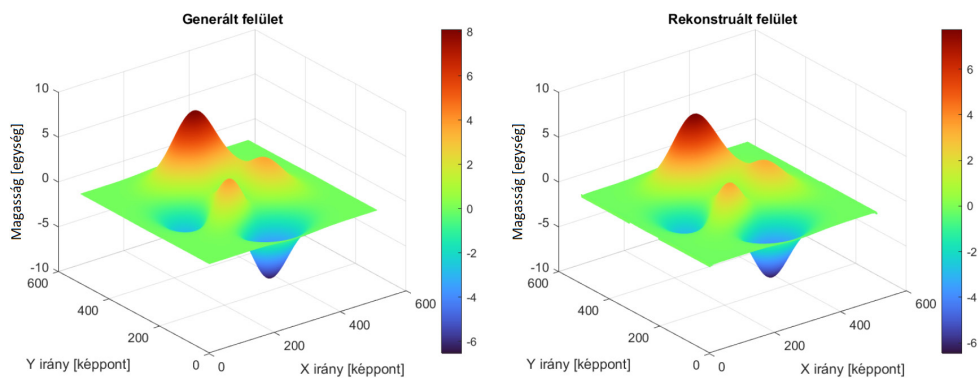
6. ábra. A bontatlan (balra) és a kibontott fázistérkép (jobbra) térben megjelenítve

felület közötti differencia elhanyagolhatóan kicsi és főleg a felület szélein jelentkezik, ami lényegesen nem befolyásolja a felületrekonstrukció hatékonyságát (7. ábra).

A mesterséges alakzatokkal elért eredmények igazolták a wavelet-transzformációs profilometria alkalmazhatóságát, ezért a fejlesztési folyamat következő lépése a szükséges változtatások elvégzése után a valós mérés előkészítése, megvalósítása és kiértékelése. A mérést a lehetőségekhez képest a legsötétebb fényviszonyok között a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Látorendszer Laboratóriumában végeztem, azonban a háttérvilágítás ennek ellenére sem volt figyelmen kívül hagyható, sőt további tényezők is negatív hatással voltak a mérésre, mint például a referencia felület és a vetített minta hibái vagy az árnyékok. A mért objektum a saját bal kezem volt, szétnyitott pozícióban fényképezve (8. ábra). Az ismertett profilometriás mérés összeállításának az első lépése a kamera, illetve a projektor pozíciójának és a megfelelő paramétereinek a beállítása volt, a minél élesebb kép érdekében.

A mérés kiértékeléséhez a generált felületek esetén alkalmazott eljárás módosított változatán kívül egy Gauss szűrő is szükséges volt,

a mérés során jelentkező zajok hatásának a mérséklése céljából, amivel csak minimális simítást lehetett végezni, mivel a csíkok kontúrjainak jól detektálhatónak kellett maradniuk, a feldolgozás sikeressége miatt. Ami a változtatásokat illeti, ebben az esetben a vizsgált geometria rekonstruálásához a referencia felületről készült kép is hasonlóan fel kellett dolgozni, mint a valós objektumról készített felvételt, mivel ezek különbségeként állítható elő a keresett 3D modell. Továbbá, a felhasznált anya-wavelet tulajdonságai is változtak a pontosabb eredmény elérésének az érdekében. A komplex Morlet wavelet Haar waveletre lett cserélve, ami egyszerűbb, ezáltal kevésbé alkalmas a nagyon finom fázisváltozások észlelésére, viszont ugyanebből az okból adódóan, jobban érzékeli az éles átmeneteket, ami az egyik legfontosabb szempont volt a bemutatott mérés esetében, mivel a nyitott ujjak nagy és hirtelen átmeneteket alakítottak ki (8. ábra). Azonban a folyamat alapja nem változott, mivel a csíkozott mintázat előállítás, a deformálódott sávminta sorokra bontása, a valós és a képzetes részek kiszámítása és a fázistérképek meghatározása is hasonló módon történt, mint a mesterséges alakzatok tekintetében. Az így előálló bontatlan fázistérképen, már szépen kirajzolódik a bal kéz alakja, azonban az említett hibák, mint például a mérést terhelő

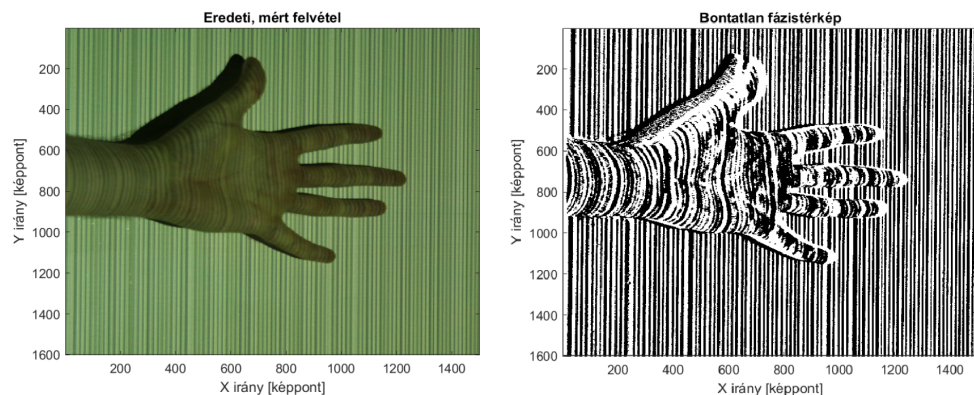


7. ábra. Az eredeti (balra) és a rekonstruált (jobbra) felületek

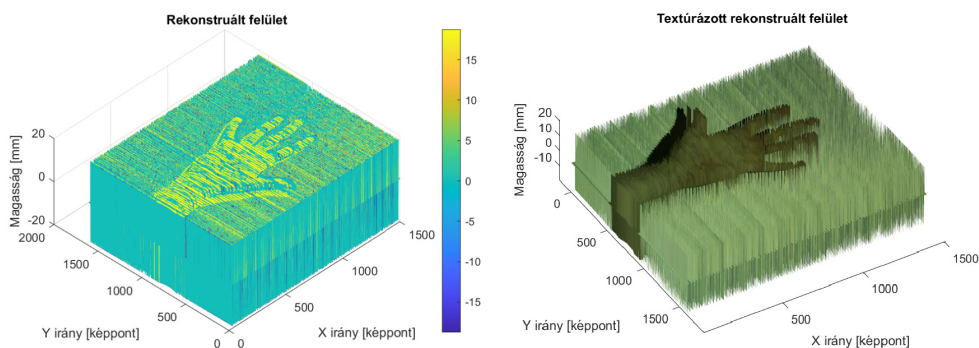
zaj vagy az árnyékok, különösen a nagyujj környékén, jobban láthatóvá válnak (8. ábra).

A következő lépés a fázistérképek kibontása, és a modellalkotás, mivel a kibontott fázistérképeket segítségével elvégezhető az említett kivonás, majd az így kapott különbségből már könnyedén számolható a rekonstruált eredmény felület. A felhasznált wavelet-transzformáció módosított tulajdonságai miatt a megjelenítés típusa ebben az esetben eltérő, de ennek ellenére is egyértelműen felismerhető az eredeti alakzat geometriája a visszaállított kimeneten, különösen a textúrázott eredményen (9. ábra). Továbbá, az ábrák mellett megtalálható színskálának megfelelően, az

egyes pontokhoz tartozó magasságértékek is megfelelően pontosak és jól azonosíthatóak a helyreállított felületen. Viszont az alkalmazott simítás ellenére is észrevehetőek a különböző mérési körülményekből és az árnyékokból adódó minimális, de egyértelműen látható eltérések a vizsgált alakzat és az előállított felületmodell között. Az árnyék hatások például a végtag szélein lévő kontúrvonalakat tették nehezen detektálhatókká, a referencia felület hibái, a mérési zaj, és a valós környezetből származó mérési pontatlanságok pedig az egész folyamatra hatással voltak (9. ábra). Mindezek ellenére, a bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy habár ezek a felületek csak közelítései a valóságos végtagnak,



8. ábra. A vizsgált objektumról készült felvétel (balra) és az ehhez tartozó bontatlan fázistérkép (jobbra)



9. ábra. A térbeli modell a vizsgált felületről (balra) és annak textúrázott változata (jobbra)

mégis a lényeges körvonalak és a topográfiai sajátosságok megfelelően kiemelkednek, így felismerhetővé válik a mérés tárgyául szolgáló bal kéz modellje, amit tovább finomítva különféle alkalmazási területeken lehet felhasználni. Mi több, mivel összetett folyamatról van szó, ahol minden rész lépésben több lehetőség áll rendelkezésre, ezáltal többféle módszerrel lehet módosítani és pontosítani a bemutatott eredményeken.

MEGBESZÉLÉS

A profilometria, mint mérési módszer, lehetővé teszi a tárgyak háromdimenziós szerkezetének sérülésmentes vizsgálatát, anélkül, hogy fizikai érintkezés történe, így növelve a mérés fizikai biztonságát. A strukturált fényvetítésen alapuló technikák egyre fejlettebbé válnak és a felhasználási területük is folyamatosan bővül, különösen napjainkban, amikor hétről hétre zsúfoltabbak a városok és növekszik a bolygó lélekszáma, időről időre felbukkannak járványok és érintkezés útján terjedő vírusok vagy baktériumok. Mindezek mellett fontos kiemelni még a mindennapi használati tárgyak, illetve fogyóeszközök növekvő komplexitását és az ezekhez tartozó gyártási vagy javítási folyamatokat, ahol szintén egyre gyakrabban használják az említett módszereket. Az alkalmazott és bemutatott profilometriás felületrekonstrukció wavelet-transzformációs változtatának a prototípusa gyors és hatékony modellalkotást tesz lehetővé, ami igazolja a kontaktusmentes vizsgálati módszerek felhasználhatóságát és tovább bővíti azok lehetőségeit.

Ezzel a megoldással a mesterségesen előállított felületek esetében közel kifogástalanul sikerült rekonstruálni az eredeti alakzat felszínét, bár minimális eltérést tapasztalni lehetett a generált forma és a helyreállított felület között. Apróbb változtatásokat követően, a programot a valós környezethez igazítva is

meggyőző eredményeket szolgáltatott az implementált eljárás. Több különböző wavelet kipróbálása után elmondható, hogy a generált felületek rekonstrukciójában megfelelő pontosságú eredményt sikerült elérni, míg a valós mérésből származó felvétel feldolgozása után előállított modellt lényegesen több hiba terhelte, mint a virtuális geometriákat. Viszont ez többnyire a valós környezetből származó hibáknak tudható be, beleértve az árnyékokat, a zajt, az emberi pontatlanságból származó hibákat és a referencia felület, illetve a vizsgált objektum topográfiai és optikai tulajdonságait. Összefoglalva, a wavelet-transzformációs profilometria effektíven alkalmazható a felületek rekonstrukciójára és a topográfiaiak pontos modellezésére, habár a mérést az említett hibák terhelték, amelyek árnyalták a folyamat végeredményét, azonban az eredeti geometria a kimenet alapján jól meghatározható maradt, ezért a valódi mérés és az ahhoz tartozó objektum rekonstrukciója is sikeresnek tekinthető. Továbbá, a mérés és az ehhez tartozó programok stabilizására és továbbfejlesztésére is több lehetőség van, tekintve, hogy egy igen bonyolult mérési eljárásról van szó, ahol minden lépésben számos lehetőség közül lehet választani. Bár a számítási bonyolultság ellenére, a kedvező tulajdonságai miatt, a wavelet-transzformáció az egyik legelterjedtebb módszer az érintésmentes felületvizsgálat területén, mégis érdemes lehet más transzformáció implementálása (pl. Fourier, Hilbert) és gyakorlati alkalmazásuk. Azonban a wavelet-transzformáció tekintetében is többféle továbblépési lehetőség kínálkozik. Például fejlettebb zajszűrési technikák felhasználása a felvételek előkészítése során, az említett dinamikus kalibrációs eljárás implementálása vagy másféle módszer alkalmazása a fázistérkép előállításához, segíthet optimalizálni a jelenlegi eredményt. Mindemellett, fontos megemlíteni a mesterséges intelligenciát és a gépi tanulást a valós mérés esetében is, hiszen az ilyen algoritmusok bevezetésével,

illetve ezeknek a hatékony alkalmazásával, egyebek mellett lehetőség nyílik a hibajavítás és az időigényes paraméterezés automatizálására, illetve a képfeldolgozási lépések optimalizálására is. A kutatás legfőbb újdonságát az jelenti, hogy egy saját fejlesztésű, MATLAB környezetben megvalósított szoftver segítségével sikerült a wavelet-transzformáció alkalmazásával egy valós emberi kéz felületét mérni és megközelítőleg pontosan rekonstruálni, ami igazolja a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát és pontosságát. A vizsgálat ugyanakkor több korláttal is rendelkezik, mivel az emberi test nem tekinthető ideális mérőfelületnek a

bőr fényvisszaverő tulajdonságai miatt, továbbá a laboratóriumi fényviszonyok, a környezeti tényezők, valamint a használt kamera optikai és érzékelési paraméterei egyaránt befolyásolták a mérési eredmények megbízhatóságát és így a mérés korlátait. Összefoglalva, a mérés tárgyául szolgáló kéz geometriájának sikeres rekonstruálása bizonyította, hogy a wavelet-transzformáció jelentős potenciált rejt magában, mivel rugalmasságának és skálázhatóságának köszönhetően jól adaptálható a mindenkor mérési és feldolgozási feladatokhoz, ezáltal hatékony alternatívát kínál a hagyományos optikai módszerekkel szemben.

A szerzők részvétele: Kutatásvezető, kutatási célok meghatározása, kísérletvezető, módszertani szakember: A.Á.; Adatgazdász, adatgyűjtés lebonyolítása, adatok kezelése és metaadatolása: A.Á., F.I.; Programozói, informatikai és hardveres feladatok elvégzése: F.I.; Vizualizáció, eredmények előállítás, modellalkotás és adatmegjelenítés: F.I.; Kutatási terv készítése és ellenőrzése, mentorálás: A.Á.; Eredmények és módszertan ellenőrzése: A.Á.; Eredeti kézirat megfogalmazása: F.I.; Kézirat végleges változatának megfogalmazása, lektorálási folyamatok kezelése: A.Á., F.I.

Összeférhetlenség: Nincs.

IRODALOM

1. Nagy Á. Koraszülött csecsemők légzésének és aktív, valamint alvó fázisainak érintésmentes, kamera alapú monitorozása [PhD Thesis]. Pázmány Péter Katolikus Egyetem; 2023.
2. Freschi C, Ferrari V, Melfi F, Ferrari M, Mosca F, Cuschieri A. Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2013;9(4):396–406.
3. Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020;135:106193.
4. Burke J, Paç A, Höfer S, Ziebarth M, Roschani M, Beyerer J. Deflectometry for specular surfaces: an overview. *Advanced Optical Technologies*. 2023;12:1237687.
5. Srinivasan V, Liu HC, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Applied optics*. 1984;23(18):3105–8.
6. Zheng RH, Wang YX, Zhang XR, Song YL. Two-dimensional phase-measuring profilometry. *Applied optics*. 2005;44(6):954–8.
7. Werling S, Mai M, Heizmann M, Beyerer J. Inspection of specular and partially specular surfaces. *Metrology and Measurement Systems*. 2009;16(3):415–31.
8. Balzer J, Werling S. Principles of shape from specular reflection. *Measurement*. 2010;43(10):1305–17.
9. Zhang Z, Wang Y, Huang S, Liu Y, Chang C, Gao F, et al. Three-dimensional shape measurements of specular objects using phase-measuring deflectometry. *Sensors*. 2017;17(12):2835.
10. Huang L, Idir M, Zuo C, Asundi A. Review of phase measuring deflectometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018;107:247–57.

11. Huang L, Nan J guo, Guo L, Lin Q ying. A bayesian network approach in the relevance feedback of personalized image semantic model. In: Advances in Multimedia, Software Engineering and Computing Vol 1: Proceedings of the 2011 MSEC International Conference on Multimedia, Software Engineering and Computing, November 26–27, Wuhan, China. Springer; 2012. p. 7–12.
12. Lu R, Cheng Z. Measurement technique of high-reflected surface based on phase measuring deflectometry. *Acta Photonica Sinica*. 2020;49(1):0112002.
13. Huang PS, Zhang S. Fast three-step phase-shifting algorithm. *Applied optics*. 2006;45(21):5086–91.
14. Huang L, Kemao Q, Pan B, Asundi AK. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010;48(2):141–8.
15. Guo H, He H, Chen M. Gamma correction for digital fringe projection profilometry. *Applied optics*. 2004;43(14):2906–14.
16. Teague EC, Scire FE, Baker SM, Jensen SW. Three-dimensional stylus profilometry. *Wear*. 1982;83(1):1–12.
17. Su X, Chen W. Fourier transform profilometry:: a review. *Optics and lasers in Engineering*. 2001;35(5):263–84.
18. Takēda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *JosA*. 1982;72(1):156–60.
19. Zappa E, Busca G. Static and dynamic features of Fourier transform profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012;50(8):1140–51.
20. Nocha G, Antal Á. Ortopédiai célú deflektometriai képek Fourier-módszeres feldolgozása. *Biomechanica Hungarica*. 2017;9(1).
21. Kaller O, Boleček L, Kratochvíl T. Profilometry scanning for correction of 3D images depth map estimation. In: Proceedings ELMAR-2011. IEEE; 2011. p. 119–22.
22. Chetwynd DG, Smith ST. High precision surface profilometry: from stylus to STM. In: *From Instrumentation to Nanotechnology*. CRC Press; 1990. p. 273–300.
23. Joshi M, Joshi N, Kathariya R, Angadi P, Raiḡar S. Techniques to evaluate dental erosion: a systematic review of literature. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*. 2016;10(10):ZE01.
24. Whitehead S, Shearer A, Watts D, Wilson N. Comparison of two stylus methods for measuring surface texture. *Dental Materials*. 1999;15(2):79–86.
25. Van der Jeught S, Dirckx JJ. Real-time structured light profilometry: a review. *Opt and Las in Eng*. 2016;87:18–31.
26. Balla P, Prommer K, Antal Á. Digitális moiré képek vizsgálata gerincferdüléses betegek nyomon követésére. *Biomechanica Hungarica*. 2014;7(1).
27. Bogdán Cs, Magony AD, Hargitai GE, Antal Á, Tunyogi-Csapó M. Scolioticus gerinc moiréfelvételeinek szoftveres szegmentációja. *Biomechanica Hungarica*. 2023;15(2):7–21.
28. Bochner S, Chandrasekharan K. *Fourier transforms*. Princeton University Press; 1949.
29. Sneddon IN. *Fourier transforms*. Courier Corporation; 1995.
30. Zhong J, Weng J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. *Applied optics*. 2004;43(26):4993–8.
31. Burrus CS, Gopinath RA, Guo H. *Wavelets and wavelet transforms*. rice university, houston edition. 1998;98.
32. Pathak RS. *The wavelet transform*. Vol. 4. Springer Science & Business Media; 2009.
33. Sifuzzaman M, Islam MR, Ali MZ. Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform. 2009;
34. Strang G. Wavelet transforms versus Fourier transforms. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1993;28(2):288–305.
35. Hanafi A, Gharbi T, Cornu JY. In vivo measurement of lower back deformations with Fourier-transform profilometry. *Applied optics*. 2005;44(12):2266–73.

36. *Genovese K, Pappalettere C.* Whole 3D shape reconstruction of vascular segments under pressure via fringe projection techniques. *Optics and lasers in engineering.* 2006;44(12):1311–23.
37. *Wenzel K, Antal A, Molnar J, Toth B, Tamas P.* New optical equipment in 3D surface measuring. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems.* 2009;3:29–31.
38. *Su X, Zhou W.* Complex object profilometry and its application for dentistry. In: Cerullo LJ, Heiferman KS, Liu H, Podbielska H, Wist AO, Zamorano LJ, editors. Los Angeles, CA; 1994 [cited 2025 Feb 11]. p. 484–9. Available from: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=951662>
39. *Chen LC, Chang YW.* High Accuracy Confocal Full-Field 3-D Surface Profilometry for Micro Lenses Using a Digital Fringe Projection Strategy. *KEM.* 2007 Dec;364–366:113–6.
40. *Huang PS, Jin F, Chiang FP.* Quantitative evaluation of corrosion by a digital fringe projection technique. *Optics and Lasers in Engineering.* 1999;31(5):371–80.
41. *Hain T, Eckhardt R, Kunzi-Rapp K, Schmitz B.* Indications for optical shape measurements in orthopaedics and dermatology. *Medical Laser Application.* 2002;17(1):55–8.
42. *Yılmaz ST, Özugürel UD, Bulut K, Inci MN.* Vibration amplitude analysis with a single frame using a structured light pattern of a four-core optical fibre. *Optics communications.* 2005;249(4–6):515–22.
43. *Hong D, Lee H, Kim MY, Cho H, Moon JI.* Sensor fusion of phase measuring profilometry and stereo vision for three-dimensional inspection of electronic components assembled on printed circuit boards. *Applied Optics.* 2009;48(21):4158–69.
44. *Zuo C, Feng S, Huang L, Tao T, Yin W, Chen Q.* Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and lasers in engineering.* 2018;109:23–59.
45. *Wang Z, Du H, Park S, Xie H.* Three-dimensional shape measurement with a fast and accurate approach. *Applied optics.* 2009;48(6):1052–61.
46. *Creath K, Wyant J.* Moiré and fringe projection techniques. *Optical shop testing.* 1992;2:653–85.
47. *Zhang Z, Zhong J.* Applicability analysis of wavelet-transform profilometry. *Optics Express.* 2013;21(16):18777–96.
48. *Huang L, Kemao Q, Pan B, Asundi AK.* Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering.* 2010;48(2):141–8.
49. *Young RK.* Wavelet theory and its applications. Vol. 189. Springer Science & Business Media; 2012.
50. *Stokfiżewski K, Wieloch K, Yatsymirskyy M.* An efficient implementation of one-dimensional discrete wavelet transform algorithms for GPU architectures. *The Journal of Supercomputing.* 2022;78(9):11539–63.
51. *Zuo C, Huang L, Zhang M, Chen Q, Asundi A.* Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review. *Optics and lasers in engineering.* 2016;85:84–103.
52. *Gorthi SS, Rastogi P.* Fringe projection techniques: whither we are? *Optics and lasers in engineering.* 2010;48(2):133–40.
53. *Talebi R, Johnson J, Abdel-Dayem A.* Binary code pattern unwrapping technique in fringe projection method. In: *Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV).* The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer; 2013. p. 1.
54. *Jia P, Kofman J, English C.* Comparison of linear and nonlinear calibration methods for phase-measuring profilometry. *Optical Engineering.* 2007;46(4):043601–043601.
55. *Yu C, Peng Q.* A unified-calibration method in FTP-based 3D data acquisition for reverse engineering. *Optics and lasers in engineering.* 2007;45(3):396–404.
56. *Geng J.* Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in optics and photonics.* 2011;3(2):128–60.