

MOIRÉ-KÉPALKOTÁSHOZ ILLESZTETT KUTATÁSI KERETRENDSZER KONCEPCIÓJA SCOLIOSISBAN

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Szerző: Bogdán Csaba

Neptun-kód: ORSAKF

*A Klinikai Orvostudományok Doktori Iskola (D94) Mozgásszervi klinikai
tudományok programján (B-1/2010)*

A doktori Iskola vezetője:

Prof. Dr. Bogár Lajos, PhD, med. habil

A doktori program vezetője:

Prof. Dr. Than Péter, MD, PhD, med. habil.

Témavezetők:

Dr. Magony Andor Dániel, PhD

Dr. Tunyogi-Csapó Miklós, PhD, med. habil



Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar

OGYDHT

Pécs, 2023

TARTALOM

I. Bevezetés	1
II. Célok és módszerek	3
III. Tézisek	6
1. tézis	6
2-4. tézis.....	8
5. tézis.....	12
IV. Moiré: jelenség, kutatások és technikák	13
Az árnyék- és projekciós-moiré-technikák	14
A moiré topográfia alkalmazásának megfontolásai a scoliosis diagnosztikában	18
V. Eredmények és megbeszélés	21
Egy kutatási keretrendszer koncepciója moiré-képkalkotáshoz scoliosisban.....	21
<i>Az állampolgári tudomány mint eszköz a Moiré Imaging Tool for Scoliosis koncepciójának továbbfejlesztésére</i>	31
A scolioticus gerinc moirésávjainak szegmentálása	32
VI. Összegzés és záró gondolatok	45
Köszönetnyilvánítás	48
Táblázatok jegyzéke	49
Képek jegyzéke	50
Hivatkozások	52
A disszertációhoz kapcsolódó publikációk jegyzéke	53

Rövidítések jegyzéke

2-D	kétdimenziós
CAT	Contour Analysis Tool
FST	Fringe Segmentation Tool
IKT	információs és kommunikációs technológiák
KPI	key performance indicator (kulcs teljesítménymutató)
MITS	Moiré Imaging Tool for Scoliosis
MK	moirékép
MM	moirémódszer
MPT	Moiré Production Tool
MS	moirésáv
MT	moiré topográfia
PM	projection moiré (projekciós moiré)
PMT	projection moiré technique (projekciós moirétechnika)
PSNR	peak signal-to-noise ratio (csúcs jel-zaj arány)
QRT	quasi-real-time (kvázi valós idejű)
R&D	research and development (kutatás-fejlesztés)
RMS	root mean square (négyzetes közép)
ROI	region of interest (figyelt terület)
SD	standard deviation (szórás)
SMT	shadow moiré technique (árnyékmoiré-technika)
SOAR	Strengths, Opportunities, Aspirations, and Results (Erősségek, Lehetőségek, Ambíciók és Eredmények)
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats (Erősségek, Gyengeségek, Lehetőségek és Veszélyek)
XOR	eXclusive OR (<i>kizáró</i> VAGY Boolean logikai művelet)

I. Bevezetés

A különböző gerincdeformitások diagnosztizálása már régóta foglalkoztatja az orvostudományt. A gyermekek és serdülők posturalis elváltozásai komoly orvosi és társadalmi problémát jelentenek, melyek gyakori megjelenésére és progressiójára a kutatások mintegy aggasztó jelenségeként mutatnak rá. Következésképpen a deformitások előrehaladásának megelőzésében a szűrés tekinthető a legfontosabb tényezőnek.

A testtartás diagnosztizálása azonban objektív módszereket igényel. A gerinc helyzetében bekövetkező változások diagnosztikájának aranystandardját ma a röntgen-képalkotás adja. A röntgenvizsgálat hátrányai, mint a felmerülő költségek, az idő- és ismétlésigény, a szükséges eszközi és környezeti feltételek, valamint a páciensre gyakorolt ionizáló sugárzás nem elhanyagolható, és indokolnak olyan, a moiré technikához vagy moiré topográfiahöz (MT) hasonló módszertani kutatásokat, amelyek lehetővé teszik a gerinc elváltozásainak gyors, költséghatékony és káros sugaraktól mentes diagnosztikáját.

A MT a moiré jelenségén alapul, amelynek révén váltakozó világos és sötét sávokból (ti. moirésávok, MS-k) álló moiréképek (MK-k) jönnek létre. A vizsgált felület MS-jainak mintázata további elemzésekre alkalmazható. Az MT fő előnye, hogy non-invazív, gyors, káros sugaraktól mentes, könnyen mobilizálható eszközöket használ és költséghatékony mérést tesz lehetővé. A MT-t bár alkalmazzák a scoliosis korai stádiumainak és a gerinc különböző elváltozásainak detektálásában, azonban a topogramok elemzésének javítása még további kutatásokat igényel. Egy MT-n alapuló algoritmus, amely bizonyítottan alkalmas a gerinc görbületi szögének kiszámítására, akár kiegészítheti vagy helyettesítheti a káros röntgen-képalkotást.

A moiréfelvételek kiértékeléshez szükséges munkaintenzitás jelentős mértékű, ennek legjobb megoldását egy automatikus rendszerben látják. Azonban a moiréfelvételek feldolgozása számos egyedi megoldást igényel, amelyre kihat az optikai elrendezés, a zaj és a detektálás jellege, valamint az alkalmazott megvilágítás. Ennélfogva, egy teljesen automatizált moirékép-elemző és -kiértékelő rendszer megvalósítása komoly kihívást jelent, ugyanakkor kívánatos célt is a területen.

Ezek a körülmények ösztönözték ezt a doktori kutatást, amelynek célja, hogy (I) összefoglalja a moirémódszer (MM) elméletét, és (II) koncepciót dolgozzon

ki moiré-képkalkotáshoz illesztett szoftveralapú kutatási keretrendszerre és MS-szegmentálási módszerekre scoliosisban. A szoftveralapú megközelítés a MS-k detektálásához és matematikai-geometriai elemzéséhez kíván egy manuális/félautomatikus eszközt biztosítani.

II. Célok és módszerek

A kutatás alapvető célja, hogy megvalósítható és reális válaszokat adjon az (1-5) tézisekben felvetett kihívásokra. A disszertáció további célja, hogy kidolgozza a scoliosishoz javasolt és a posztdoktori munka során megvalósítandó kutatási keretrendszer bizonyos munkacsomagjait. A kutatás pontos célkitűzései és módszerei tételesen az alábbiak (a-f):

(a) Hogy bemutassa a MM elméletét, történetét és orvostechnikai alkalmazását, különös hangsúlyt fektetve a két fő moirétechnikára az árnyék- és projekciós moiréra.

Módszer: Szakirodalom kiválasztása és áttekintése különböző adatbázisokból, mint például Scopus, PubMed, Science Direct and IEEE Xplore®.

(b) Hogy egy lépésekre lebontott útmutatót adjon a digitális projekciós-moiré-képzőkhöz scoliosisban a jövőbeni mérések támogatása céljából.

Módszer: Balla és tsai [1] által bemutatott digitális projekciós moirétechnika folyamatának áttekintése, általánosítása és kiegészítése.

(c) Hogy válaszoljon az (1-5) tézisekben felvetett kihívásokra azáltal, hogy (1) megtervezi a kulcsjellemzőit és funkcióit és (2) kidolgozza a felhasználói felület tervezésének irányelveit a scolioticus gerinc MK-einek létrehozására, feldolgozására és kiértékelésére javasolt kutatási keretrendszer, a Moiré Imaging Tool for Scoliosis (MITS) számára.

Módszer: (1) Az MITS kulcsjellemzői és funkciói a scolioticus páciensekről készült MK-k feldolgozásában és kiértékelésében fellépő problémák alapján kerültek meghatározásra. Az MITS szegmentációs funkciói (ti. szűrési és morfológiai műveletei) a (d) cél megvalósulása során folytatott megfigyelések és következtetések alapján kerültek kiválasztásra. (2) Az MITS felhasználói felületének tervezési irányelvei funkcionális és kényelmi szempontokat követnek, ahol a hangsúly a WIKLUND [2] által javasolt egyszerű és felhasználóbarát megoldáson van.

(d) Hogy a scolioticus gerinc MK-einek kontúrozására morfológiai műveleteken alapuló szegmentációs algoritmusokat fejlesszen MATLAB® környezetben

Módszer: Felfedező jellegű szekvenciák és megfigyelések alapján különböző morfológiai műveletek alkalmazása statikus és adaptív függvényparaméterekkel a SALUS Ortopédtechnika Kft.¹ által rendelkezésre bocsátott 11 db digitális (projekciós) moirétechnikával és XOR-logikával létrehozott² MK-n.

(e) Hogy SWOT-elemzést készítsen el az MITS és MM életképességének vizsgálatára orvosi kutatásokban.

Módszer: Az MITS és MM erősségeinek, gyengeségeinek, lehetőségeinek és veszélyeinek feltérképezése tudományos, finansziális és műszaki szempontok alapján.

(f) Hogy az (a-e)-célok implementálásával lerakja egy startup alapjait, amely az MITS teljeskörű lefejlesztésére és kiadására irányul a doktori tanulmányokat követően.

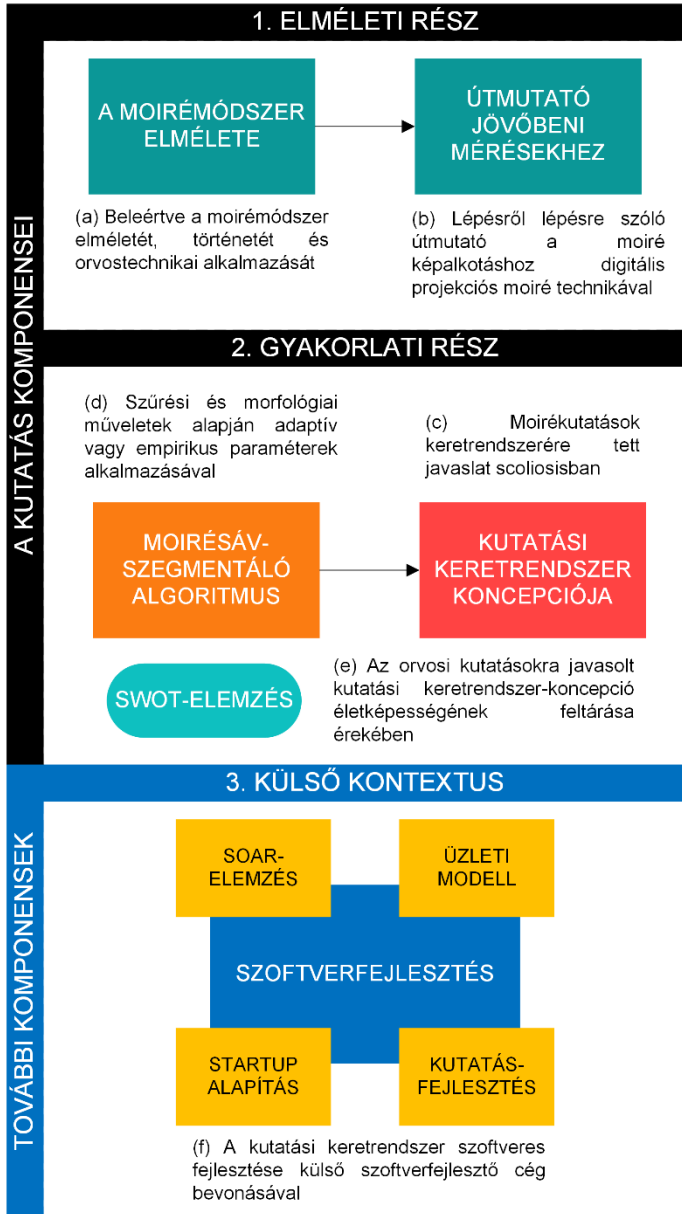
Method: ld. (a-e)-célok módszerei.

Az 1. ábra a disszertáció tartalmát mutatja a célok (a-f) kontextusában.

A téziszüzetem szakirodalmi hivatkozásai kizárólag a kutatás módszereihez releváns munkákra koncentrálnak. A releváns szakirodalomra a disszertációmban természetesen a hivatkozási normákat követve utalok.

¹ A SALUS Ortopédtechnika Kft. egy orvostechikail eszközöket gyártó és forgalmazó magyar cég.

² A képfeldolgozásban az XOR (kizáró VAGY) logikai művelet alkalmas két kép vagy képrészlet közötti különbség kiemelésére. Az XOR-logikai kapcsolat akkor igaz, ha a két bemeneti képen a pixelek értéke különböző. Ez az elv a különbségek és kontrasztok megjelenítésével különösen alkalmas MK-k generálására, ha a két bemeneti kép egy alaprácsot és annak valamely felületre vetített, torzult állapotát tartalmazza.



1. ábra: A disszertáció tartalma a célok (a-f) kontextusában

III. Tézisek

Ez a kutatás hiányalapú, de megoldásra összpontosító megközelítést alkalmaz, amely azt jelenti, hogy a moiré kutatásokban azonosított hiányosságokra és kihívásokra építve keres megoldásorientált válaszokat. A tézisek megfogalmazásakor kutatási hiányosságokra és a kutatást gátló tényezőkre összpontosítottam, törekedve egyszerű és konzisztens következtetések levonására.

1. tézis

A MM és orvostechikai kutatása, mivel egy interdiszciplináris terület, jellemzően több szakma és tudományág szakértelmét igényli, beleértve a(z) (orvosbiológiai) mérnököket, orvosokat és egészségügyi szakembereket, de ideális esetben fizioterapeutákat és korzettkészítőket is. Ezekben a kutatásokban a MM méréstechnikai megvalósítása mérnöki tervezéshez kötődik, amely többek között kiterjed az eszközök beállítására és kalibrálására, a mérések végrehajtására, hibajavításra és képfeldolgozásra. Mivel az egészségügyi személyzet munkája nagymértékben függ az MT műszaki feltételeit biztosító mérnöki munkától, a munkaszervezési hiányosságok, valamint a mérnökök és az egészségügyi szakemberek között fellépő kommunikációs problémák pontatlan kalibrálásokhoz, a moiré minták helytelen elemzéséhez, és ezáltal a moirékutatásokban rejlő potenciál kiaknázatlanságához vezethet – ahogy arról már korai jelentésekből is értesülünk az 1980-as évekből.

Az egészségügyi és mérnöki tudományterületeket egyaránt lefedő multifunkcionális (azaz multi- és interdiszciplináris) munkacsoportok azonban nem mindig állnak rendelkezésre, így a képalkotáshoz, a képfeldolgozáshoz és a képelemzéshez szükséges komplex ismeretek beemelése nehézkessé válik. Bár az interdiszciplinaritás fogalmát ma gyakran omnipotens megoldásként használják, valójában egy olyan kollaborációs formát takar, amit tanulni és elsajátítani szükséges. Ez egyben azt is jelenti, hogy az inter- és a transzdiszciplináris munkafolyamatokat folyamatosan meg kell kérdőjelezni – különösen az elkerülhetetlen sűrűlódási veszteségek miatt, amelyek a tudományterületek, nyelvek és kultúrák közötti fordításból adódnak. Ez a körülmény egy olyan további kutatást is indukált, melynek során e disszertáció

írója kísérletet tett egy ideális kollaboratív prototípusgyártó környezet modelljének megalkotására a legkülönbözőbb tudományterületekhez illesztve, beleértve az orvosi és mérnöki területeket egyaránt. Ez a munka külön könyvként került publikálásra [3]. Másfelől pedig a közvetlen interdiszciplináris interakciók szükségességének újragondolása és lehetséges helyettesítése szintén a munkaszervezés hatékonyságnövelő megoldása lehet, például automatizált szoftveres munkafolyamatok alkalmazásával.

A moirékutatásokban a mérnöki jelenlét részleges vagy teljes helyettesítésével jelentősen csökkenthető az egészségügyi csapat közvetlen mérnöki munkától való függősége, és ezáltal növekedhet az önállóan végezhető munkájának terjedelme és hatékonysága. Az 1. táblázat összefoglalja a mérnöki tevékenység főbb feladatait a moirékutatásokban.

1. táblázat: A moirékutatás legfontosabb mérnöki feladatai

A MOIRÉKUTATÁS LEGFONTOSABB MÉRNÖKI FELADATAI	
Feladat	Szükséges szaktudás
Moiréberendezés	
Tervezés	műszaki
Kalibráció	műszaki
Működtetés	műszaki / procedurális
Karbantartás	műszaki
Mérés	
Képrögzítés <i>együtműködve az egészségügyi személyzettel</i>	műszaki
Moiré létrehozása	műszaki / szoftveres
Optimalizáció	procedurális / műszaki
Képfeldolgozás	
Moirésáv-szegmentáció	szoftveres
Kéпкиértékelés	orvosi-módszertani / szoftveres
Optimalizáció	procedurális / szoftveres

Az első tézisem egy szoftveralapú megoldás szükségességét és potenciálját hangsúlyozza a mérnöki munka funkcióinak helyettesítésére MK-k létrehozásában, feldolgozásában és kiértékelésében:

1. tézis

A moiré mérés technikát alkalmazó orvosi munka egy moirékutatásokhoz illesztett, felhasználóbarát szoftverkörnyezet használatával, amely lefedi a képalkotási, képfeldolgozási és képértékelési funkciókat, jelentősen függetleníthető a mérnöki jelenléttől.

2-4. tézis

A MT egy érzékeny módszer, amelyre kihatással van a vizsgálat alanyának helyzete, amely ideális esetben egy meghatározott mérési standardnak megfelelő pozíciót jelent. A gerinc felülettopográfiai vizsgálatánál azonban nem beszélhetünk általánosan elfogadott standardizált testtartásról és mérési paraméterekről. Ezért, bár a MT jelentős információt nyújt a felületről, komoly hátrányt jelenet, hogy könnyen adódhatnak kétértelmű következtetések.

A szakirodalom alapján ez a PhD-kutatás kizárólag a standardizáció iránti igényt azonosította be, de komoly erőt befektető törekvést annak megállapítására nem. Ahhoz, hogy kihasználhassuk a felülettopográfia fontos előnyeit a páciensek szolgálatában, további erőfeszítésekre van szükség a MT gerincvizsgálatokban alkalmazható standardizációja terén.

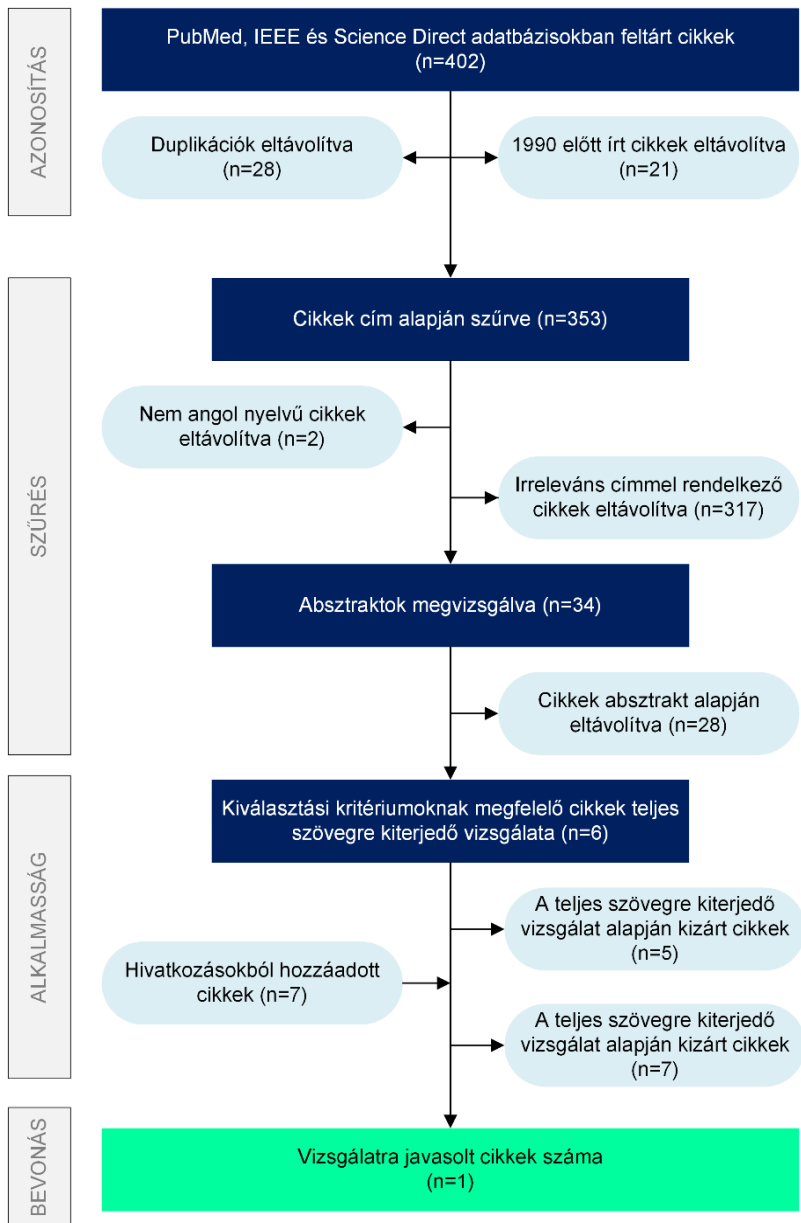
Ez a kutatás bár nem terjed ki a scoliosisban alkalmazott MT-t szabványosító módszerek kutatására, célja, hogy támogassa azokat az erőfeszítéseket, amelyek standarizálható MT-i megoldások ajánlására irányulnak. A MT szabványosítás hiányából adódó problematikája, valamint a MK-k feldolgozásának és kiértékelésének kihívásai inspirálták egy kényelmesen használható, szoftveralapú kutatási keretrendszer ötletét, amely a moiré-képalkotásban és MS-elemzésben rugalmasan alakítható, felfedező jellegű vizsgálatokat tesz lehetővé.

A felfedező jellegű tanulmányok előnyei közé tartozik, hogy a kutatók új irányokra és ötletekre mutathatnak rá a meglévő problémák megértése és/vagy a további kutatási kihívások felismerése során. Különösen ráépülő kutatások folytatásában, a felfedező jellegű tanulmányok segíthetnek azonosítani a kutatási célokat szolgáló megközelítéseket. A tudományos zsákutcák korai felismerésével a felfedező jellegű vizsgálatok időt, költségeket és szükségtelen ismételéseket takaríthatnak meg. Az ilyen típusú kutatások elvégzése azonban értelemszerűen kockázatokkal is jár, mivel nem lehet előre garantálni, hogy az egész vizsgálat eredményeként új és jelentős felfedezések születnek – ennek megválaszolására a kutatási folyamat bizonyos szintű mélységére van szükség.

Annak érdekében, hogy feltérképezsem olyan szoftveralapú kutatási keretrendszerek megoldásait, amelyek a scoliosis diagnosztikájában alkalmazott moiré-képpalkotáshoz illeszkednek és funkcióik kiterjednek moiréminták létrehozására, szegmentálására és elemzésére, szisztematikus szakirodalmi áttekintést végeztem PubMed, Science Direct és IEEE elektronikus adatbázisokban. A tanulmányok kiválasztási kritériumai teljesültek, ha kapcsolódtak (1) gerincferdülésben alkalmazott MT-hoz köthető kutatás-fejlesztéshez és (2) szoftveralapú diagnosztikai megoldásokhoz (képpalkotás és kiértékelés), ha (3) angol nyelven publikálták őket, és az (4) az elmúlt 31 évben (1990. januárja és 2022. április 30. között) jelentek meg. Az irodalomkutatás 402 db cikket eredményezett. A teljes szöveges áttekintést követően 1 db cikk felelt meg a további elemzéshez szükséges kritériumoknak. Az irodalmi áttekintés különböző fázisaiban figyelembe vett és kizárt cikkek számát a 2. ábra PRISMA folyamatábrája mutatja.

Az absztraktokat és a szakirodalmi áttekintés fázisait tartalmazó eredmények elérhetők A és B digitális mellékletként a disszertációhoz mellékelte DVD-n vagy a <https://bit.ly/3ErXc99> címen, illetve az alábbi QR kódon 2023. december 31-ig.





2. ábra: A szakirodalmi áttekintés PRISMA folyamatábrája

Az áttekintett szakirodalom alapján – valamint a kutatási időszak alatt folytatott informális és formális szakmai egyeztetések nyomán szintén – megállapítható, hogy a scoliosisban alkalmazott moiré-képkalkotás területén nem létezik ajánlás vagy széles körben elérhető és működőképes implementáció szoftveralapú kutatási környezetre vagy annak működési modelljére. Ennek fényében fogalmaztam meg második tézisemet:

2. tézis

A felfedező jellegű matematikai-geometriai műveleteken alapuló diagnosztikai kutatásokhoz egy olyan felhasználóbarát szoftveres kutatási keretrendszer szükséges, amely lehetővé teszi a scolioticus gerinc moiréképeinek létrehozását, szegmentációját és elemzését.

Az az információtartalom pedig, amit egy ilyen felfedező jellegű, matematikai-geometriai kiértékelést lehetővé tevő kutatási környezetben a scolioticus gerinc különböző posturalis állapotokban készült MK-k kiértékelése során nyerünk, alkalmas az (1) alkalmazott testtartások és (2) a moiréképkalkotás és képkiértékelés fázisaiban használt paraméterek megbízhatóságának összehasonlítására és értékelésére. Erre alapozva fogalmaztam meg harmadik és negyedik tézisemet:

3. tézis

Egy olyan szoftveres környezet használata, amely az emberi gerincen létrehozott moirécsíkok alapján lehetővé tesz felfedező jellegű, matematikai-geometriai alapú felülettópográfiai vizsgálatokat, alkalmas a scoliosis moiréképkalkotással végzett diagnosztikájában testtartási optimum beazonosítására, és ezáltal világszinten szabványosítható testtartási standard ajánlására.

4. tézis

Egy olyan szoftveres környezet használata, amely az emberi gerinc moirécsíkjai alapján lehetővé tesz felfedező jellegű, matematikai-geometriai alapú felülettópográfiai vizsgálatokat, alkalmas a scoliosis moiré-képkalkotással végzett diagnosztikájában egységes

felülettópográfiai paraméterek beazonosítására, és ezáltal világszinten használható aranystandard paraméterek ajánlására.

5. tézis

A moiréfelvételek szegmentációjához és kiértékeléshez szükséges munkaintenzitás jelentős, ennek legjobb megoldását némelyek egy automatikus rendszerben látják. Azonban a moiréfelvételek feldolgozása számos egyedi megoldást igényel, amelyre különösen kihat az optikai elrendezés, az alkalmazott megvilágítás, valamint a zaj és a detektálás jellege. A moirémintázat-analízis bizonytalansági faktorainak csökkentésében a MS-ok precíz szegmentációja kiemelkedő jelentőséggel bír. A precíz szegmentálás alapkövetelmény a moirémintázat értékelésére szolgáló matematikai-geometriai algoritmusok kidolgozásához.

Szintén a doktori tanulmány célját képezi, hogy képszűrési és morfológiai műveleteket alkalmazó algoritmikus megoldásaival hozzájáruljon a scolioticus gerinc MK-analízisének szegmentációs fázisához. Ötödik tézisem egy olyan képfeldolgozó megoldást ír le, amely szűrési és morfológiai műveleteket alkalmaz XOR-logikával generált digitális (projekciós) MK-k szegmentálására.

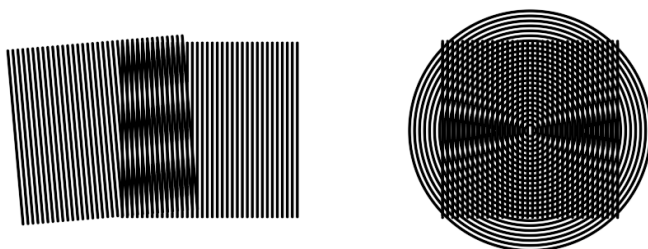
5. tézis:

Az XOR logikával előállított digitális projekciós moiréképek szegmentálása megvalósítható olyan képfeldolgozó algoritmussal, amely adaptív vagy empirikus paramétereket használ olyan szűrési és morfológiai műveletek alapján, amelyek kiterjednek (1) kontraszt- és (2) fényerő-korrektúra, (3) 2-D Gauss-féle elmosásra, (4) dilatációra, (5) hisztogram kiegyenlítésre, (6) küszöbölésre és (7) szkeletonizációra.

IV. Moiré: jelenség, kutatások és technikák

Ebben a részben rövid összefoglalást nyújtunk a moirékutatások elméleti és történeti háttéréről, amely az értekezés szerves részét képezi. Bár nem közvetlenül kapcsolódnak a konkrét kutatási eredményekhez, az elméleti és történeti perspektívák biztosítják a moirékutatás fejlődésének alapvető kontextusát és értelmezését.

A moiré jelenséget akkor figyelhetjük meg, ha két vagy több, hasonló geometriával rendelkező struktúra (közel azonos vonalak vagy pontok hálózatai) átfedik egymást. Ekkor a mechanikai interferencia hatására a megfigyelő számára egy világos és sötét sávokból álló mintázat jelenik meg (3. ábra). Általában a sötét sávokat nevezik MS-knak vagy moirécsíkoknak.



3.ábra: Példák geometriai struktúrák moirémintáira

Tudományos státuszba a MS-kat először LORD RAYLEIGH emelte, amikor a diffrakciós rácsokkal foglalkozott 1874-ben. Arra a következtetésre jutott, hogy a moiré jelensége hasznos lehet mérési célokra.

RAYLEIGH mellett több kutató, mint például FOUCAULT, RIGHI, RONCHI, RAMAN és DATTA, foglalkozott a moiré jelenségével, azonban az 19. század közepéig megfigyeléseik metrológiai előnyei nem kaptak kellő figyelmet tudományos körökben. Ennek oka, hogy számos probléma merült fel a moirémintázatok előállításához szükséges megfelelő rácsszerkezet reprodukálásában és a vizsgálati módszerek alkalmazásában. Az 1950-es években SIR THOMAS MERTON által bevezetett új elv megoldotta a minőségi rácsok mérsékelt költségekkel történő előállításának problémáját a mérés technikai alkalmazások számára.

Ezt követően jelentős fellendülés következett be a moirékutatásokban, amelynek során új felhasználási területek születtek. A számítástechnika

fejlődése és elterjedése ugyancsak jelentős hatással volt a moirékutatások és a kapcsolódó publikációk növekedésére.

Az 1970-es években a MT-t ipari használaton túlmenően emberi testfelületek mérésére is javasolták.

Az 1980-as évektől napjainkig a testfelületek elemzése a talpaktól kezdve a lábakon át a törzs, gerinc és szájüreg feltérképezéséig egyaránt elvégezhető. Az alkalmazási területek felsorolását folytathatjuk a csontok és fogak valamint a csontvázrendszer változásainak vizsgálatával. Még az arcprofil-, orrszimmetria- és igazságügyi fogászati elemzések (nemmeghatározás) sem merítik ki a moirétechnikában rejlő lehetőségeket.

Az árnyék- és projekciós moiré-technikák

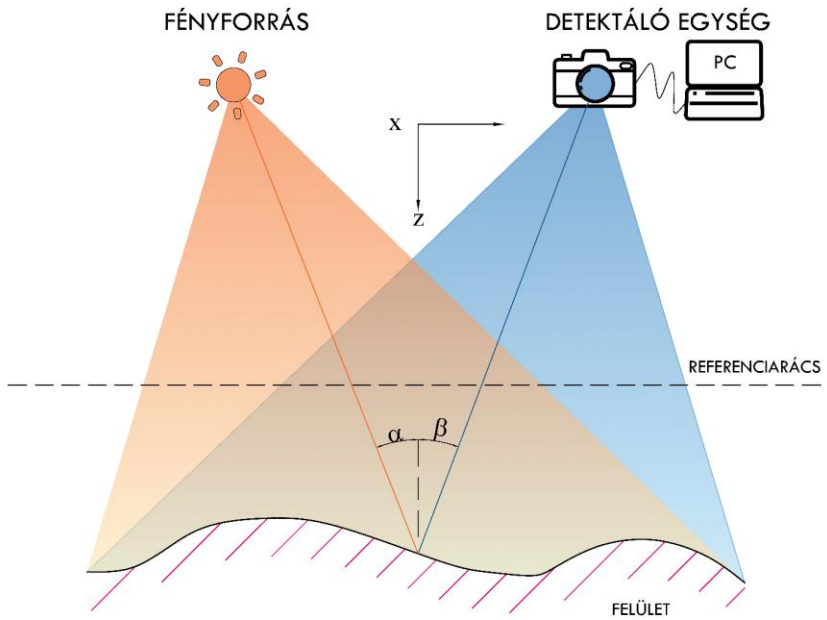
A moirétechnikák sztereometrikus módszerek, amelyek lehetővé teszik a vizsgált felület háromdimenziós elemzését kétdimenziós képek alapján. A moirétechnikák aszerint különböznek egymástól, hogy hogyan történik a moiréjelenség létrehozása és további felhasználása a topográfiai analízisben. Az MT egy egyszerű módszer, amelyhez csak egy fényforrás, rácso, fényképezőgép (detektálás) és egy számítógépe szükséges.

A moiréjelenség mérés technikai alkalmazása arra az alapgondolatra épül, hogy míg az alapstruktúrák egyikét a vizsgált felülettel hozzák összefüggésbe (projekciós rácso), addig a másik referenciaként szolgál (referenciarácso). A két struktúra eredő csíkozatából következtetni lehet a vizsgált felület két állapota közötti eltérésre.

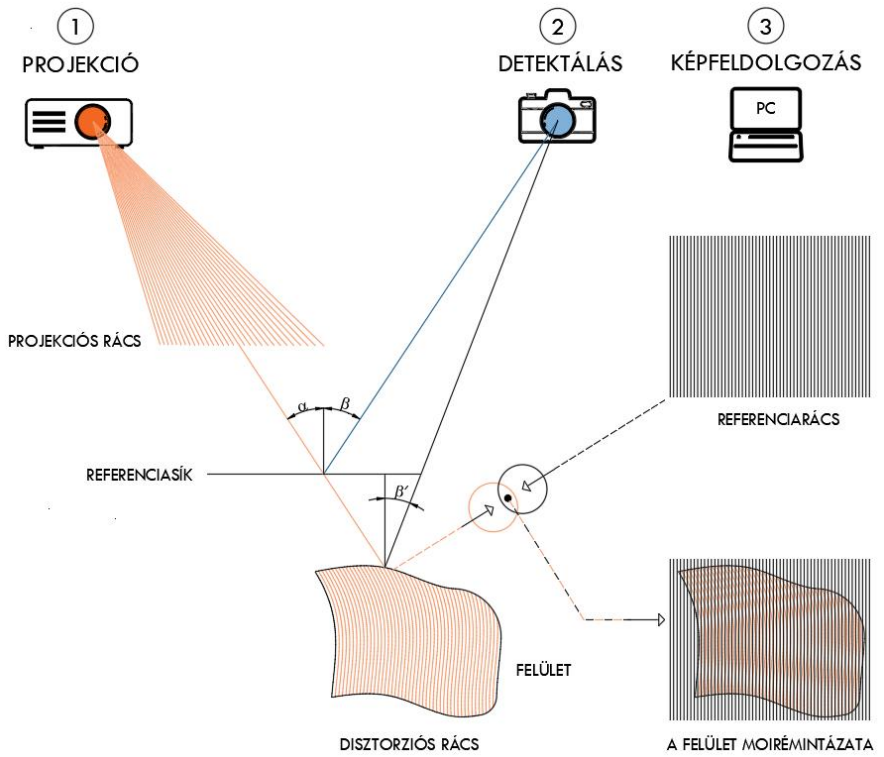
A moiré-effektust többféle technikával is elő lehet állítani, a tudományos irodalom alapján az árnyék (SMT, shadow moiré technique) és a projekciós moiré (PMT, projection moiré technique) technikák tűnnek a MT két fő módszerének az emberi test mérésére.

Az árnyék moiré-technikában (4. ábra) egyetlen fizikai rácso és annak vizsgált felületre vetített árnyéka szolgál az interferencia és ezáltal a moirémintázat létrehozására.

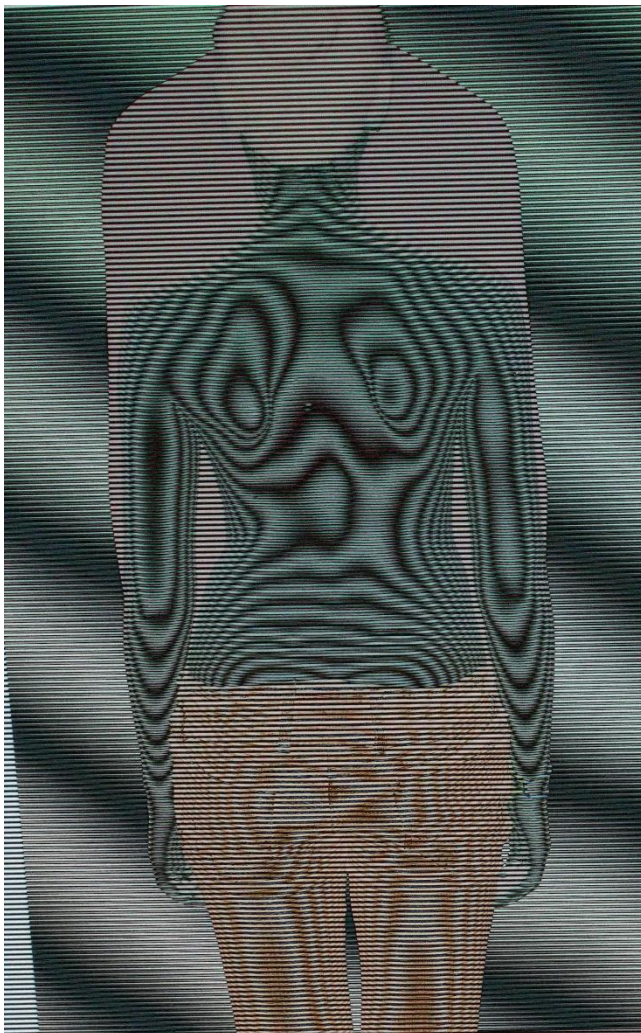
A projekciós moiré technika (5-6. ábra) két azonos tulajdonságú rácso használ: az egyiket a vetítéshez, a másikat pedig a moirémintázatok detektálásához szükséges referenciaként.



4. ábra: Az árnyékmoiré-technika optikai elrendezése



5.ábra: A projekciós moiré-technika optikai elrendezése .



6.ábra: Az emberi hátról készített digitális (projekciós) moiréfelvétel

A moiré topográfia alkalmazásának megfontolásai a scoliosis diagnosztikában

A scoliosis diagnosztikájában a MM jelentős előnye, hogy gyors, non-invazív, hordozható, költséghatékony, káros sugaraktól mentes, és nem igényel magasan képzett szakembereket. A moirétechnika lehetővé teszi nagy célcsoportok gyors, reprodukálható és költséghatékony vizsgálatát. A jól megválasztott és algoritmizált moirétechnika alkalmas lehet scoliosisban a röntgenfelvételek helyettesítésére vagy kiegészítésére.

A MT scoliosisban való alkalmazásában a módszertani szabványosítás hiánya azonban megoldásért kiáltó problémát jelent. Bár ismerni néhány moirévizsgálatok során alkalmazott testtartási protokollt, nem beszélhetünk olyan konkrét metodológiáról, amely általánosságban megbízható eredményekhez vezet. Egy metodológiai standard segíthetné a gerincferdüléssel páciensek MK-einek jobb kiértékelését, különösen olyan esetekben, ahol a törzs torzult, és az eredmények könnyen félreértelmezhetők. Ennélfogva komoly hátrányt jelent a MT-ban az egyértelmű következtetések hiánya.

A szakirodalom alapján egyértelműen látszik a szabványosítás iránti igény, azonban komoly erőfeszítések annak megállapítására nem.

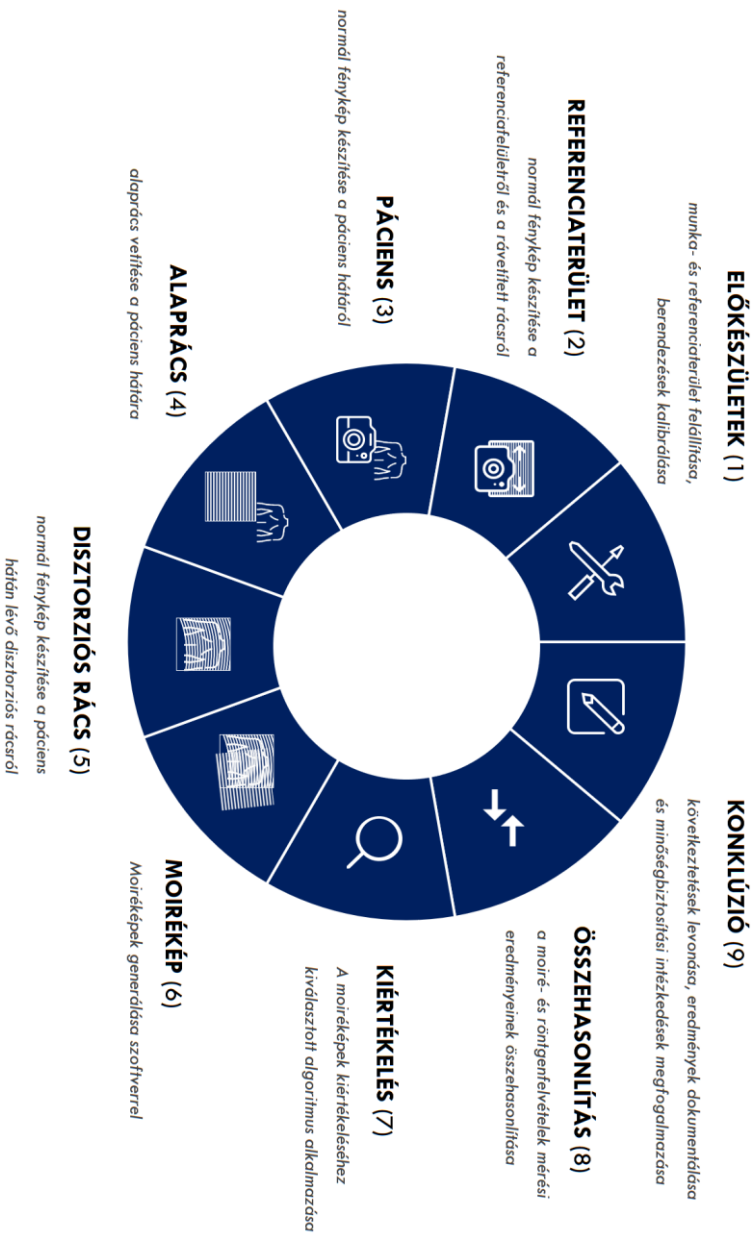
Ugyancsak fontos körülmény a MK-k kiértékeléséhez szükséges munkaintenzitás jelentősége. Ennek legjobb megoldását némely kutató egy automatikus rendszerben látja. Azonban egy teljesen automatizált képelemzés és képkértékelés megvalósítása a MS-ok komplexitása és a különféle egyedi megoldásokat igénylő optikai-geometriai paraméterek miatt kihívást jelentő folyamat.

A moirétechnika sikeres fejlesztéséhez és alkalmazásához elengedhetetlen az is, hogy az interdiszciplináris kutatócsoportokon belül egyértelmű kommunikációs folyamatok működjenek. Korábban előfordultak olyan esetek, amikor a moirétechnika gondatlan használata téves kalibrálásokhoz és interpretációkhoz vezetett. Ennek a kutatásnak hosszú távú célja egy részletes folyamatleírás biztosítása megfelelő kiértékelő algoritmussal, amely közelebb hozza az orvosi és mérnöki tudást, valamint ösztönzi és támogatja a moiré kutatást az orvosi (ortopédiai) körökben. Ehhez egy folyamatáttekintést adok

mint egy lehetséges módszert a moiré képalkotás alkalmazására scoliosisban. Az illusztráció és lépésvázlat a BALLA és tsai [1] által bemutatott digitális PMT-n alapul, általánosított és részben kiegészített formában – különösen az 1., 7., 8. és 9. lépések hozzáadásával (7. ábra).

A sikeres együttműködés feltételeinek biztosítása ugyan minden interdiszciplináris kutatócsoport alapvető feladata, de az intelligens, praktikus és kényelmes szoftveralapú megoldások kulcsfontosságúak lehetnek a tudományterületek közötti függőségek csökkentésében, és ezáltal a kutatások hatékonyságának növelésében.

A fent vázolt problémák megoldására alkalmas lehet egy olyan felhasználóbarát rendszer, amely lehetővé teszi a képfeldolgozási kihívások kezelését és a diagnosztikai módszertanok rugalmasan tesztelését.



7.ábra: A digitális moiré-képkalkotás és -vizsgálat folyamata

V. Eredmények és megbeszélés

A kutatási eredmények és értékelésük átfogó és strukturált bemutatása érdekében két alfejezet kerül felhasználásra. Az 5.1. fejezet a javasolt szoftveralapú kutatási keretrendszer koncepcióját vázolja fel, míg az 5.2. szakasz bemutatja és kritikusán értékeli a szegmentálási algoritmusok teljesítményét és hatékonyságát. Az *eredmények* és a *megbeszélés* szekciók összevonásával a kutatási eredmények relevanciájának értelmezését kívánom elősegíteni.

Egy kutatási keretrendszer koncepciója moiré-képalkotáshoz scoliosisban

A MM hátrányai, mint például a képkiértékelés nagy munkaintenzitása és a gerincgörbületi szögértékek megállapításának következetlenségei megbízható megoldásokat igényelnek. A munkaintenzitás kompenzálásában – különösen nagy betegpopuláció gyors vizsgálatához – automata rendszert tekintenek megoldásnak. Mindazonáltal a moirécíkok automatikus detektálása esetén is fennállnak olyan problémák, mint a félreértelmezhető és nem folyamatos MS-k. A moirémintázat-analízis bizonytalansági faktorainak csökkentése érdekében a MS-ok pontos szegmentálása szükséges.

A fenti körülményeket figyelembe véve, a szerző a 2-4. tézisekre adott válaszként a Moiré Imaging Tool for Scoliosis (MITS, magyarul: “Moiré képalkotó eszköz scoliosisra”) koncepcióját és ötletét javasolta. A MITS koncepciója egy olyan szoftveralapú kutatási keretrendszert vezet be, amely a scolioticus gerinc MK-einek létrehozását, feldolgozását és kiértékelését célozza meg manuális és félautomatikus megoldásokkal, egy felhasználóbarát környezetben. A koncepció mögötti cél az, hogy stimulálja az orvosi és orvosbiológiai szakemberek gyakorlat alapú és felfedező jellegű moirékutatásait scoliosisban oly módon, hogy életképes és reális válaszokat ad a képfeldolgozási és képkiértékelési kihívásokra.

Az MITS specifikus céljai a scolioticus gerinc MK-einek létrehozása, feldolgozása és elemzése tekintetében a következők (I-III):

(I) Hogy a **MS-ok kvázi valós idejű (QRT, quasi-real-time) szegmentációjával** manuálisan szabályozható morfológiai műveletek és

beépített algoritmusok útján támogassa a moirémintázatok kiértékelési folyamatát: ez a **Fringe Segmentation Tool** (FST, magyarul: “Sávszegmentáló eszköz”, 8. ábra).

A MITS-koncepció MS-szegmentáló funkciójának gyakorlati bemutatásához egy alkalmazás készült MATLAB környezetben (9. ábra). A prototípus egy dinamikusan változtatható és felhasználóbarát képfeldolgozási konfigurációt tesz lehetővé XOR-logikával létrehozott MK-k szegmentációjában. A prototípus MATLAB App Designer alkalmazásban készült, és képszűrési és morfológiai műveletekkel biztosítja a MS-k szegmentációját (1) fényerő- és (2) kontrasztjavítás, (3) 2-D Gauss-féle elmosás, (4) küszöbölés, (5) hisztogram kiegyenlítés, (6) inverzió, valamint a (7) szkeletonizáció implementálásával. A prototípus használatával viszonylag pontos manuális és automatikus szegmentálás végezhető QRT-ben, olyan vizuálisan nyomon követhető eredményekkel, amelyek akár konkrét mérésekhez is felhasználhatók.

Az alkalmazásba épített szűrési és morfológiai műveletek, bár lehetővé teszik az adaptív és rugalmas szegmentálási folyamatot, adatvesztéshez, és ezáltal sporadikus szegmentációhoz vezethetnek. A szoftver továbbfejlesztett megoldása helyettesítheti az időigényes és összetett szegmentációs módszereket. Az MFST továbbfejlesztésének lehetséges módja, ha funkcióit olyan képfeldolgozási műveletekkel bővítjük, mint (1) a dilatáció, azaz az előtérben lévő pixelek körüli régiók fokozatos növelése; (2) a képélesítéshez alkalmazható felüláteresztő szűrők; (3) adaptív küszöbölés lokális és globális átlagértékek alapján; (4) bitenkénti XOR műveletek alul- és túlkontrasztált moiréfelvételek alapján; (5) fuzzy logikai rendszer a manuális és előre definiált algoritmusok kombinálásához; valamint (6) nagy mennyiségű mintaadat alapján mély gépi tanulás (deep learning) útján fejlesztett automatikusan szegmentáló algoritmusok.

Az FST prototípusának működését mutatja be a dolgozathoz mellékelt DVD lemez digitális mellékletének C pontja (Digital Appendix C), amely 2023. december 31-ig elérhető a <https://bit.ly/3ErXc99> címen vagy az alábbi QR-kódon keresztül.



(II) Hogy elemezhesük a szegmentált moiré-kontúrvonalakat és matematikai-geometriai összefüggéseiket annak érdekében, hogy módszereket azonosíthassunk be a Cobb fokhoz közelíthető gerincgörbületi szögértékek kiszámítására: ez a **Contour Analysis Tool** (CAT, magyarul: "Kontúrelemző eszköz", 10. ábra).

A CAT kulcselemei (1) a MS-okra irányuló mérési funkciók mint a terület- és kerületszámítás, szögszámítás, legnagyobb aszimmetria számítása (például a hát középvonalához képest), (2) a gombsor az automatizált számításokhoz (a 10. ábra ezt a Kamal-féle³ algoritmus gombjával példázza), (3) a panel a képek és képjelöltek kiválasztására, (4) Cobb-fok-kalkulátor és (5) standard gombok a képek betöltésére, eltávolítására, exportálására, a paraméterek visszaállítására és az alkalmazás bezárására.

(III) Hogy támogassa a moirémintázatok előállítását olyan digitális PMT-vel készült bemeneti képeken, amelyek csak projekciós rácsot tartalmaznak: ez a **Moiré Production Tool** (MPT, magyarul: "Moiré-előállító eszköz", 11. ábra).

Az MPT koncepciója, hogy segítse a digitális PMT alkalmazását scoliosisban azáltal, hogy testreszabható átfedéssel alkalmazható geometriai struktúrákat biztosít a moiréminták generálásához a projekciós rácsot már tartalmazó bemeneti képeken. Az MPT kulcselemei (1) a választható geometriai struktúrák és azok testreszabhatóságának lehetőségei, (2) a bemeneti kép és az átfedő geometriák közös panelje, valamint (3) a standard gombok.

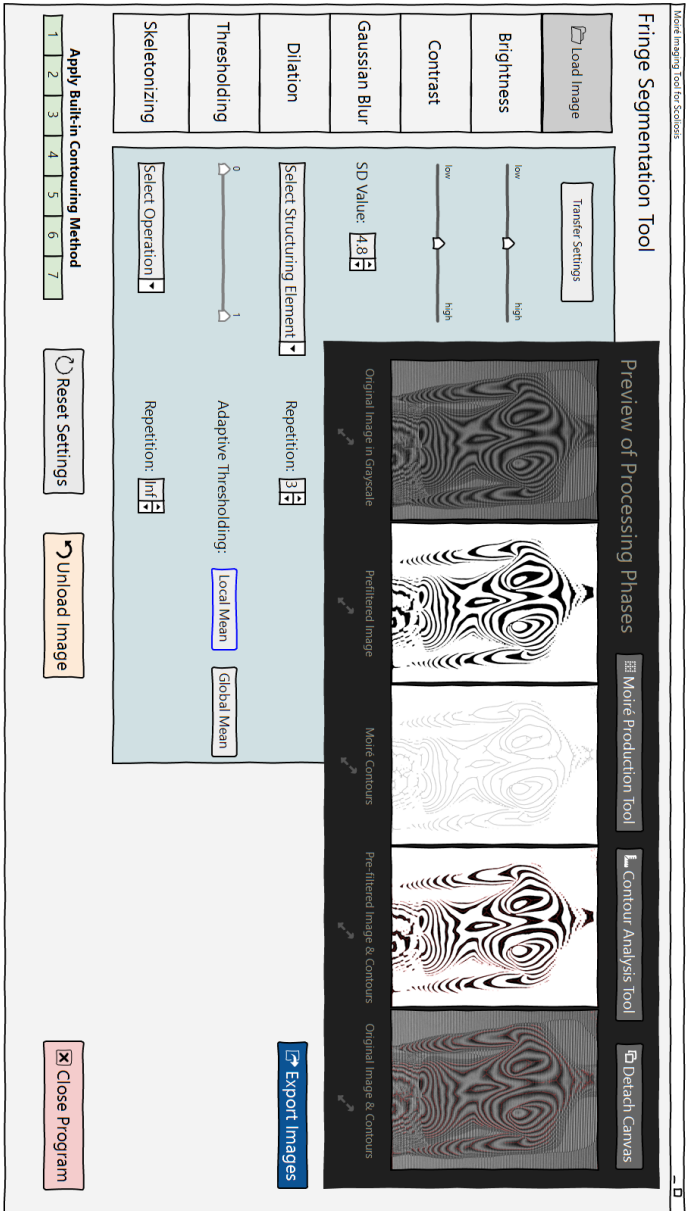
³ KAMAL-módszere a gerinc görbületi szögének meghatározására a MT segítségével vizualizált hát szimmetriáját vagy aszimmetriáját leíró pontok közötti összefüggéseket használja.

A MITS implementációja annak valamennyi tervezett jellemzőjével és funkciójával egy szoftverfejlesztő céggel együttműködésben valósítandó meg. A javasolt kutatási keretrendszer végső funkciói a szoftver béta verziójában összegyűjtött végfelhasználók (például orvosok és orvosi biológiai szakemberek) visszajelzései alapján kerülnek kialakításra.

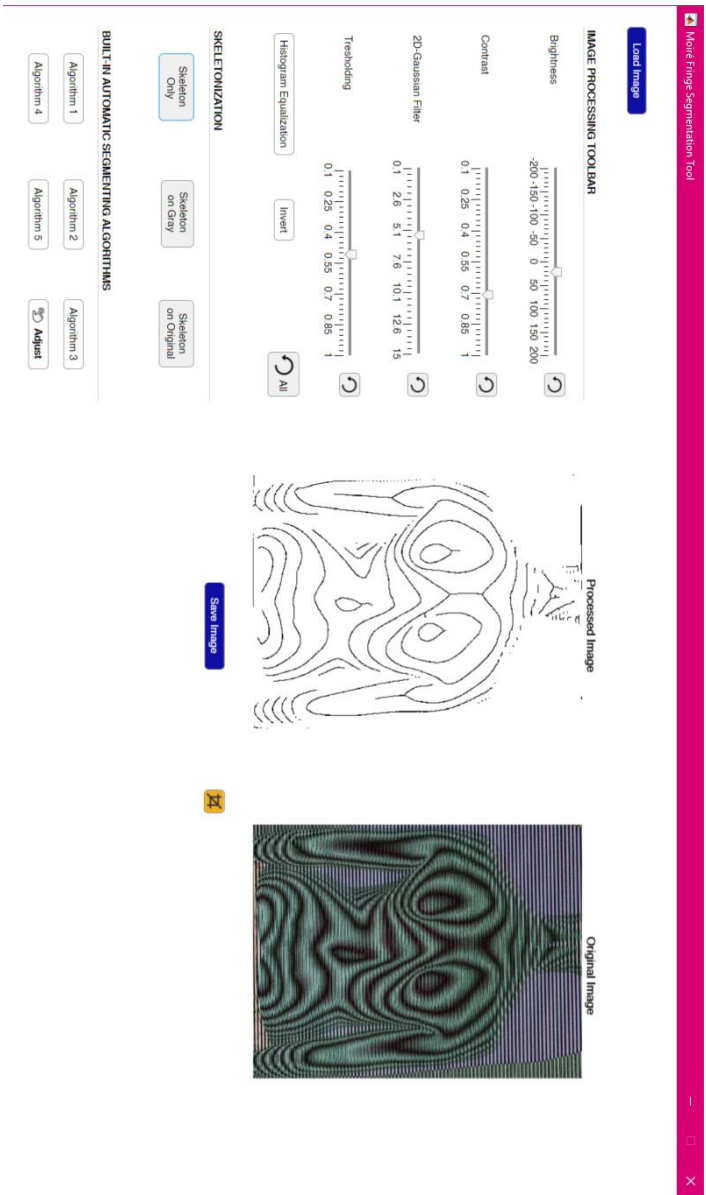
Az egészségügyi és orvosi kutatásokkal kapcsolatos információk és adatok megértése és közlése bonyolult lehet. A felhasználói felületek gyakran felületes tervezési problémákkal küzdenek, amelyek negatív hatással vannak a termék használhatóságára és vonzerejére. A MITS felhasználói felületének koncepciója az előkészítés fázisában van. A fejlesztés célja egy jól strukturált, átlátható és felhasználóbarát szoftverkörnyezet létrehozása, amely egyértelműen jeleníti meg az információ tartalmát és a felhasználó rendelkezésére álló vagy általa előidézett műveleteket.

Az MITS felhasználói felületének tervezéséhez az irányadó szempontokat az orvostechikai eszközök interfészeire és egészségügyi alkalmazásokra vonatkozó gyakorlati megfontolások képezik: (1) csökkentett képernyősűrűség, (2) navigációs jelzések és opciók biztosítása, (3) rácsos megjelenítési rendszer alkalmazása, (4) vizuális egyensúly megteremtése, (5) színhasználat korlátozása, (6) egyszerűsített tipográfia, (7) hierarchikus címkék használata, (8) egyszerű nyelvezet alkalmazása, (9) ikonok finomítása és harmonizálása, (10) következtelenségek kiküszöbölése, (11) általánosan bevált gyakorlati normák követése.

Bár a MITS üzleti modellje még fejlesztés alatt áll, a koncepció célja egy költséghatékony és széles körben elérhető, alacsony rendszerigényű eszköz terejstése. A MM és a MITS orvosi kutatásokban való életképességének összegzése érdekében tudományos, pénzügyi és technikai szempontokat figyelembe vevő SWOT-elemzés készült (2-5. táblázat).



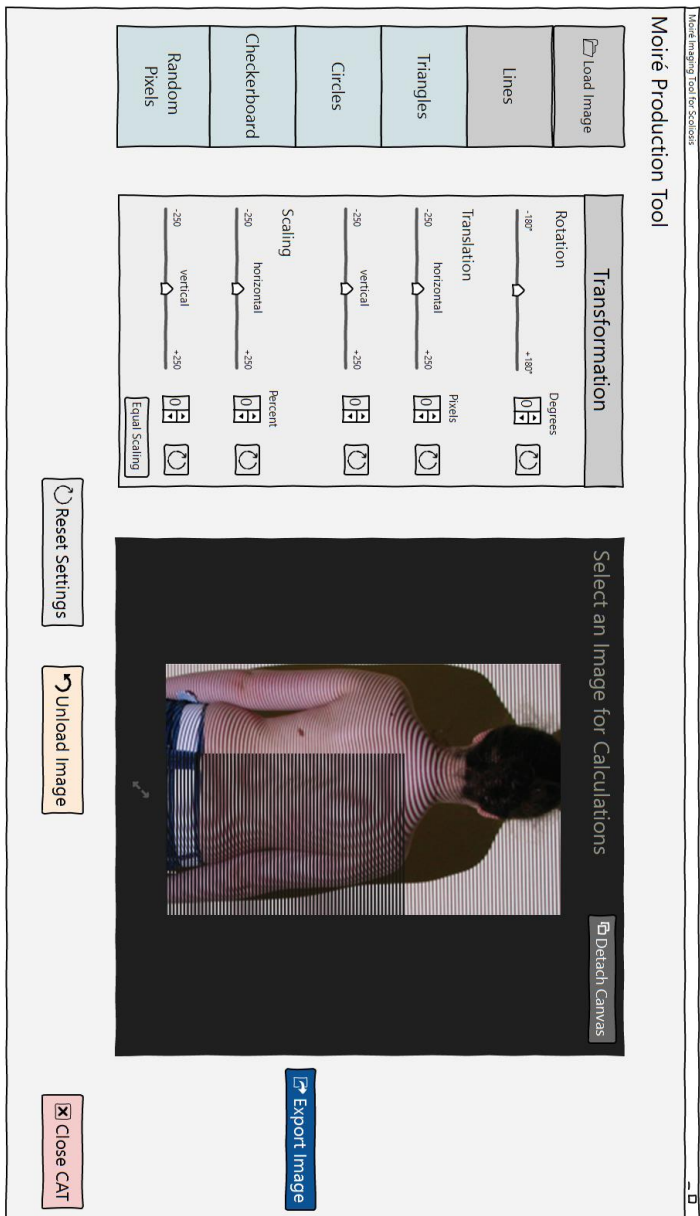
8.ábra: A Fringe Segmentation Tool látványterve



9.ábra: A Fringe Segmentation Tool prototípusának fő képernyője.



10.ábra: A Contour Analysis Tool látványterve



11.ábra: A Moiré Production Tool látványterve

2. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: erősségek

ERŐSSÉGEK		
Moirémódszer		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A módszer egyszerű és gyorsan működik ▪ Gyors adatgyűjtés szinte valós időben ▪ Rugalmasság: mind statikus, mind dinamikus események tanulmányozhatók ▪ Ismételhetőség ▪ Könnyen hozzáférhető eszközök ▪ Nem gyakorol nyomást a testre ▪ Non-invazív, nem ionizáló vizsgálatok: politikai, vallási, vagy egyéb hitelveket és etikai szempontokat nem sért ▪ Hordozható berendezés ▪ Alacsony költségű eszközök (számítógép, projektor, fényképezőgép) 		
Moiré Imaging Tool for Scoliosis (MITS)		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptálható paraméterek, változtatható felbontás ▪ Kvázi valós idejű kísérleti kutatás válik lehetővé az FST, CAT, MPT használatával ▪ Multifunkciós szoftver (3 az 1-ben) ▪ Automatikus algoritmusok támogatása (moirésáv-szegmentálás és kiértékelés) ▪ Nem igényel speciális tréninget ▪ Potenciális gyorsító szerepkör testtartási szabványok meghatározásában ▪ A szoftver alacsony rendszerkövetelményekkel rendelkezik (számítógép és tárhely) ▪ Alacsony költségű (szoftver és berendezés) ▪ Hely- és időfüggetlen használat ▪ A gyors működés csökkenti a kutatásokra fordított munkaidőt 		
TUDOMÁNYOS SZEMPONT	MŰSZAKI SZEMPONT	FINANCIÁLIS SZEMPONT

3. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: gyengeségek

GYENGESÉGEK		
Moirémódszer		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A testtartási standard hiánya hamis vagy következetlen eredményekhez vezethet ▪ A moiré topográfia érzékeny a geometriai elrendezésre ▪ Az alapos felületi elemzés komoly figyelmet és utófeldolgozást igényel ▪ A megnövelt felbontás technológiai korlátokhoz vezethet, vagy csak más mérés technikailag releváns jellemzők rovására valósítható meg ▪ A magas kontraszt elérése kihívást jelent ▪ A meredek felületek vizsgálata problematikus 		
Moiré Imaging Tool for Scoliosis (MITS)		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Megbízható kiértékelő algoritmusok hiánya ▪ A moirésávok pontos szegmentálása problematikus ▪ Az alapos felületi elemzés komoly utófeldolgozást igényel 		
TUDOMÁNYOS SZEMPONT	MŰSZAKI SZEMPONT	-

4. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: veszélyek

VESZÉLYEK		
Moirémódszer		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A testtartás szabványosítása kapcsán csupán az igény mutatkozik, ám komoly erőfeszítés megtevése nem ▪ Kommunikációs problémák a moiréberendezések hibás kalibrációihoz vezethetnek ▪ Kollaborációs eszközök és módszerek nem ismertek vagy nem megfelelően kerülnek felhasználásra a kutatócsoportokban ▪ Földrajzi távolságok logisztikai és kommunikációs problémákat okozhatnak ▪ A moirémódszer használatára vonatkozó utasítások/felhasználói útmutatók elégtelensége ▪ Befektetők és pénzügyi támogatás beemelése a kutatásokba nehézkes lehet ▪ Pénzügyi források nem feltétlenül állnak rendelkezésre időben a pályázatok és befektetők számára 		
Moiré Imaging Tool for Scoliosis (MITS)		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nincs alapos tesztelés a kiadás előtt ▪ Nem sikerül elérni a célcsoportot ▪ Hiányos vagy nem teljes implementáció (bonyolult használat, felhasználóbarátság hiánya, lassú működés stb.) ▪ Hiányos kézikönyv/felhasználói útmutató a módszer és a szoftver használatához ▪ Adatvédelmi problémák 		
TUDOMÁNYOS SZEMPONT	MŰSZAKI SZEMPONT	FINANCIÁLIS SZEMPONT

5. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: lehetőségek

LEHETŐSÉGEK		
Moirémódszer		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Röntgenfelvételek helyettesítője vagy kiegészítője 		
Moiré Imaging Tool for Scoliosis (MITS)		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A kísérletező/felfedező jellegű kutatások tudományos és innovációpotenciált hordoznak, például általános testtartási protokollokat azonosíthatnak a szoftver használatával ▪ A szoftver használatából eredő digitális adatbázis alapján továbbfejlesztett vagy újonnan kifejlesztett kiértékelő algoritmusok (big data, gépi tanulás) 		
Moirémódszer és MITS		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A moirémódszert és a szoftvert a világon bárhol használhatják, mivel nem függ helyi technológiáktól 		
TUDOMÁNYOS SZEMPONT	MŰSZAKI SZEMPONT	FINANCIÁLIS SZEMPONT

Az állampolgári tudomány mint eszköz a Moiré Imaging Tool for Scoliosis koncepciójának továbbfejlesztésére

A javasolt koncepció a gerincferdüléshez adaptált moirékutatások eszközeként hivatott szolgálni, így potenciális felhasználói elsősorban olyan orvosi és orvosbiológiai szakemberek, akik értékes hozzájárulást tudnak biztosítani kutatás-fejlesztésekben. A koncepció továbbfejlesztésének hatékony és innovatív módja az állampolgári tudomány (CS, citizen science) módszertanának alkalmazása. A CS lényege, hogy olyan emberek, akik nem rendelkeznek szakosodott tudományos háttérrel, adatgyűjtést végeznek tudományos projektek támogatására – jellemzően kutatás-fejlesztésekben érdekelt intézmények orientációja mellett. Az elmúlt évtizedekben a CS mint adatgyűjtési módszertan elnyerte a tudományos közösség legitimitását, és az orvostudomány területén is érvényes eredményeket hozott.

A MITS esetében az állampolgárok célcsoportját várhatóan a mozgásszervi betegségek iránt érdeklődő szakemberek (edzők, ápolók, iskolai egészségügyi dolgozók) és gerincdeformitásban érintett emberek alkotják. Másfelől pedig bevonhatók a javasolt manuális MS-szegmentációs folyamat finomhangolásába azok a polgárok, akik érdeklődnek az informatika iránt, és próbára tennék átlagon felüli IKT-kompetenciáikat.

A béta kiadásba beágyazott analitikai rendszer pedig könnyen gyűjthet olyan felhasználói adatokat, amelyek értékes hozzájárulást jelentenek a szoftver jövőbeli fejlesztéséhez.

A szerző egy külön kutatás részeként kidolgozott egy CS mentorprogramot is, amely módszertani keretet javasol a tudományos adatgyűjtés és -elemzés iránt érdeklődő állampolgárok tudományos kutatásba való bevonására és támogatására [4].

A hosszú távú cél az, hogy a MITS képes legyen összegyűjteni és felhasználni több millió állampolgár független felfedezéseinek analitikai adatait gerincdiagnosztikai megoldások kidolgozására.

A scolioticus gerinc moirésávjainak szegmentálása

A moirémintázat-analízis bizonytalansági faktorainak csökkentésében a MS-ok precíz szegmentációja alapvető jelentőségű. A gerinc MS-jainak szegmentálására ebben a kutatásban két módszer került megadásra MATLAB® környezetben: egy statikus és egy adaptív algoritmus. Az algoritmusok a SALUS Ortopédtechnika Kft. által rendelkezésre bocsátott 11 db moiréképen empirikusan megállapított képszűrési és morfológiai műveletsort alkalmaznak. Az eredeti MK-eket szoftveresen generálták digitális PMT alkalmazásával és XOR-logikával.

A kutatás kezdeti szakasza a statikus függvényparamétereket alkalmazó szűrési és morfológiai műveletek algoritmikus szekvenciáját mutatja be. Az algoritmus alkalmazhatóságát az egyszerű, gyors működés, és a mintaképek nagy részében pontos szegmentáció igazolja. Az eredmények azt mutatják, hogy a statikus algoritmus megfelelő alapot jelent az adaptív és dinamikus függvényparaméterekkel és képfeldolgozási megoldásokkal kapcsolatos további kutatásokhoz, valamint az időigényes és komplex képfeldolgozási technikák helyettesítéséhez.

A statikus algoritmus alapján került kifejlesztésre a teljesen automatizált, adaptív szegmentáló megoldás. Az adaptív módszer alkalmazhatóságát, hasonlóan a statikus algoritmushoz, egyszerű és a mintaképek nagy részében pontos MS-szegmentáció igazolja.

Az általános alkalmazhatóság szempontjából a statikus algoritmus használata – még a gyorsasága ellenére is – a függvényparaméterek manuális utánállításának szükségessége miatt kihívást jelent, és különösen nagy betegpopuláció esetén időigényes folyamat. Ahhoz, hogy hasonló eredményeket kapjunk a tanulmányban vizsgált 11 mintaképen kívül is, a függvényparaméterek manuális/empirikus meghatározása és kódba történő implementálása szükséges. Ezért vált kívánatosá a statikus algoritmus automatikus paraméterezéssel történő továbbfejlesztése. Ezt valósították meg az adaptív függvényparaméterek. Az adaptív algoritmus, bár sikeresen kiküszöböli a paraméterek kézi utánállításának szükségét, sebessége a négyzetes középértéken (RMS, root mean square) alapuló 2-D Gauss-féle elmosás alkalmazásában még további optimalizálást igényel.

A 12-19. ábra 3 példát mutat a 11 db MK statikus és adaptív szegmentációjából, az eredményeket egymás mellett a szürkeárnyalatos képre helyezve (12.; 14.; 16.; 18. ábra), valamint az eredeti képpel és egymással átfedésben vizualizálva (13.; 15.; 17.; 19. ábra). A 6. és 7. táblázatban összegezve találhatóak a statikus és adaptív algoritmusok időbeli változásai átlagos eltelt és átlagos részidőben megadva. A két algoritmus lépéseinek összefoglalása a 8. táblázatban található.

A szegmentáló algoritmus mindkét megoldás esetében részleges vagy szórványos szegmentáláshoz vezet. A képek részletei (ti. a MS-ok részei) és a szegmentációs pontosság főleg az eredeti MS-ok minőségének és olyan jellemzőknek köszönhetően vesznek el, mint (a) halvány (többnyire a vállak és a derék környékén), (b) összefutó, és (c) szélesebb/elmosódott MS-ok, valamint (d) a reziduális rács okozta képzaj, és (e) a szkeletonizáció műveletéből adódó nem kívánt "kiágazások" (20. ábra).

Az (a-e) problémák kezelésére kifinomultabb megoldásra van szükség. Az algoritmus továbbfejlesztésének egy lehetséges módja olyan adaptív és dinamikus függvényparaméterek használata, amelyek alacsony- és túlkontrasztos képek értékein alapulnak adaptív küszöböléssel kombinálva. A kutatás másik lehetséges iránya az algoritmus kombinálása fuzzy következtetési rendszeren (fuzzy interference system) alapuló szegmentációs megközelítésekkel.

6. táblázat: A statikus algoritmus időbeli lefutása

LÉPÉS	FOLYAMAT	ÁTLAGOS IDŐ [sec]*	
		<i>Eltelt</i>	<i>Részidő</i>
1	ROI manuális kijelölése	kizárt	kizárt
2	Az objektum (kép) osztályának meghatározása	0.02567	0.02567
3	A kép duplikációja referencia gyanánt	0.02593	0.00026
4	Szűrkeárnyalatos konverzió	0.02717	0.00124
5	Kontraszt javítása	0.03990	0.01272
6	Fényerő növelése	0.04036	0.00046
7	Kontraszt finomítása	0.04348	0.00312
8	2-D Gauss-féle elmosás	0.05781	0.01433
9	Dilatáció	0.06195	0.00414
10	Küszöbölés	0.06901	0.00705
11	Szkeletonizáció	0.17165	0.10264
12	Képek mentése .png-fájlban	0.61555	0.44390
13	Eredmények megjelenítése	0.73376	0.11821

*Használt rendszer: CPU: Intel® Core™ i5-8300H @ 2.30 GHz, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1050 (4 GB VRAM), RAM: 8 GB.

A kimeneti képek szkeletonizált moiré-kontúrokként (áttetsző és fehér háttérrel) és a binarizált (küszöbölt) és eredeti képpel átfedésben kerültek exportálásra.

7. táblázat: Az adaptív algoritmus időbeli lefutása

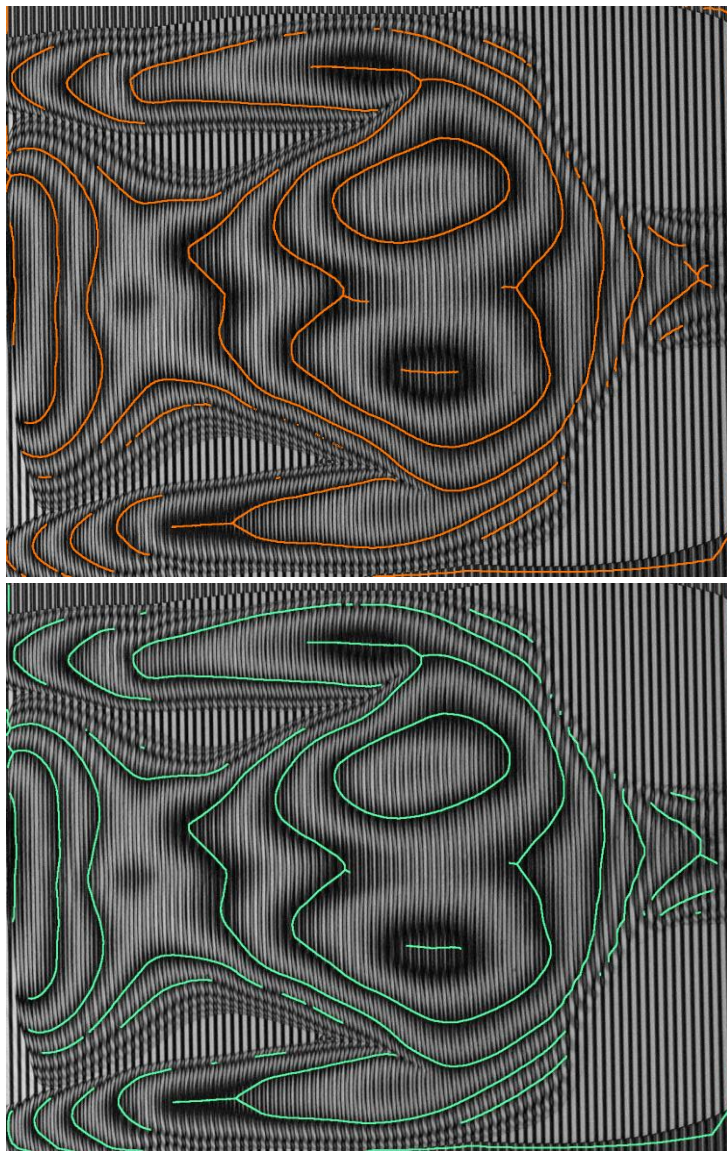
LÉPÉS	FOLYAMAT	ÁTLAGOS IDŐ [sec]*	
		Eltelt	Részidő
1	Kép beolvasása és szürkeárnyaltos konverzió	0.02655	0.02655
2	Kontraszt javítása	0.08345	0.05690
3	2-D Gauss-féle elmosás [RMS alapján]	390.76934	390.68588
4	Hisztogram kiegyenlítés	390.78183	0.01249
5	2-D Gauss-féle elmosás [PSNR alapján]	390.80406	0.02224
6	Küszöbölés	390.80862	0.00455
7	Szkeletonizáció	390.92148	0.11286
8	Kép mentése	391.23279	0.31131

*Használt rendszer: CPU: Intel® Core™ i5-8300H @ 2.30 GHz, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1050 (4 GB VRAM), RAM: 8 GB.

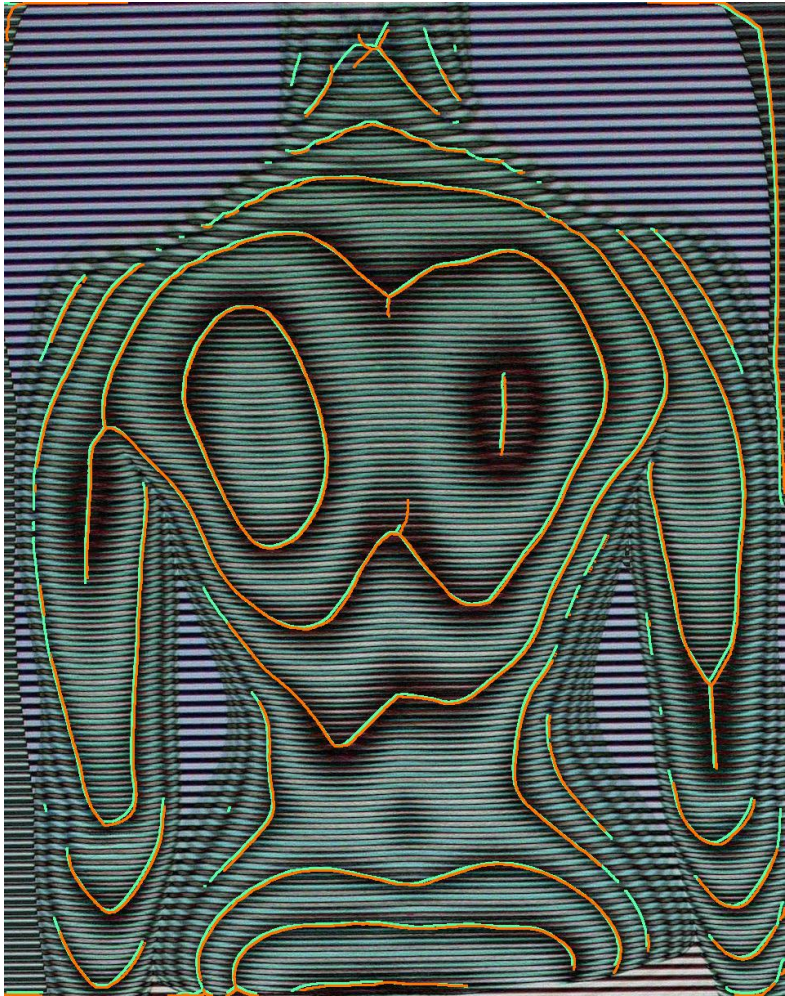
A kimeneti képek szkeletonizált moiré-kontúrokként (áttetsző és fehér háttérrel) és a binarizált (küszöbölt) és eredeti képpel átfedésben kerültek exportálásra.

8. táblázat: A statikus és adaptív algoritmusok lépéseinek összefoglalója

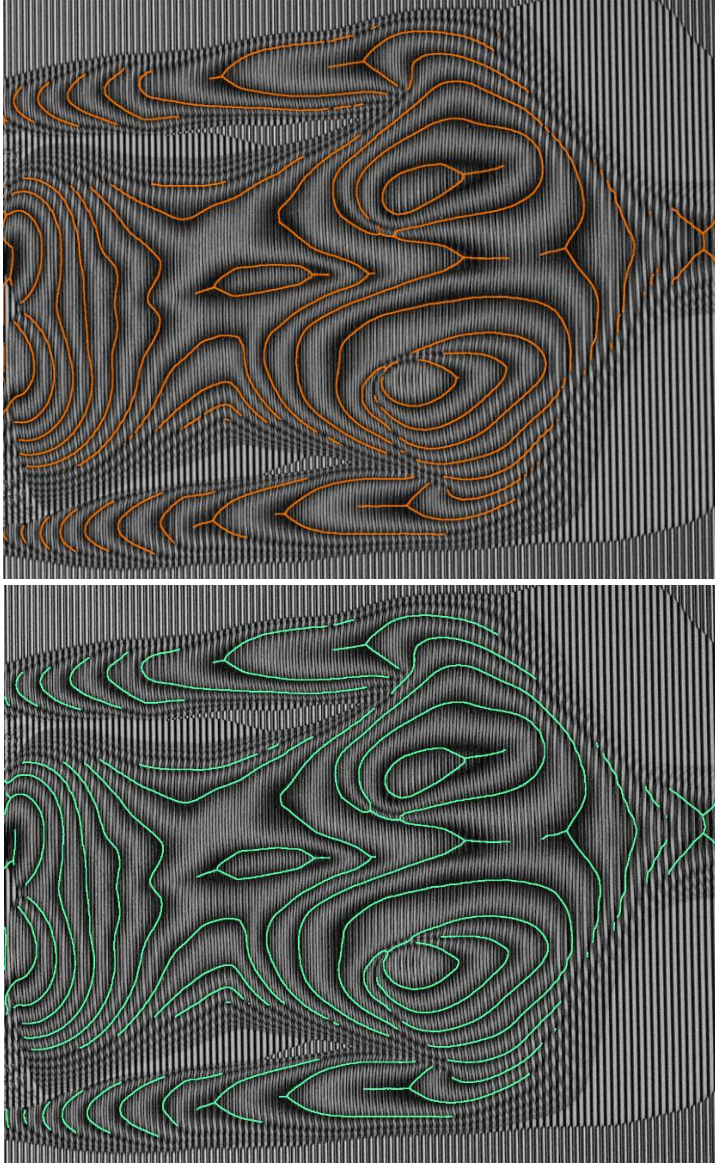
LÉPÉS	STATIKUS ALGORITMUS	ADAPTÍV ALGORITMUS
1	Kontraszt javítása az <i>imadjust</i> -függvény alapértelmezett értékével	Kontraszt javítása RMS értékeken alapulva
2	Fényerő növelése előre meghatározott értékekkel	2-D Gauss-féle elmosás RMS értékeken alapulva
3	Kontraszt finomítása előre meghatározott értékekkel	Hisztogram kiegyenlítés a <i>histeq</i> -függvény használatával
4	2-D Gauss-féle elmosás előre meghatározott szórás [SD] alapján	2-D Gauss-féle elmosás PSNR értékeken alapulva
5	Dilatáció 3-szor alkalmazva előre meghatározott értékekkel	Küszöbölés <u>globálisan</u> alkalmazva Otsu-módszer alapján
6	Küszöbölés előre meghatározott értékekkel	Szkeletonizáció a <i>bwmorph</i> -függvény használatával
7	Szkeletonizáció a <i>bwmorph</i> -függvény használatával	—



12.ábra: Az 1. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.



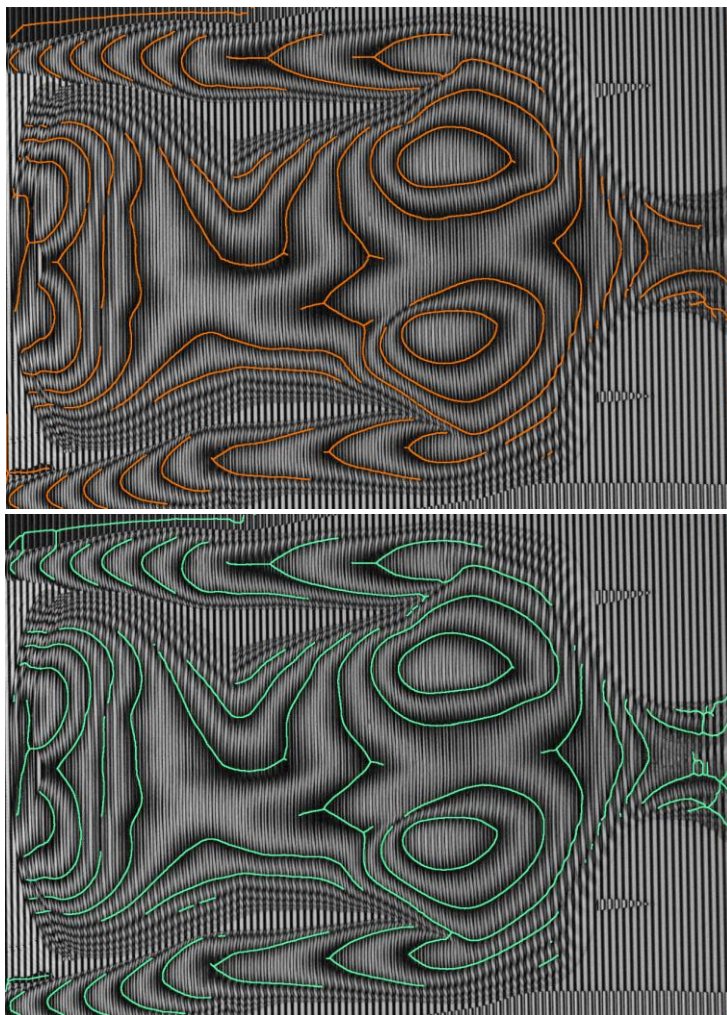
13.ábra: Az 1. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemlélítve.



14.ábra: A 2. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.



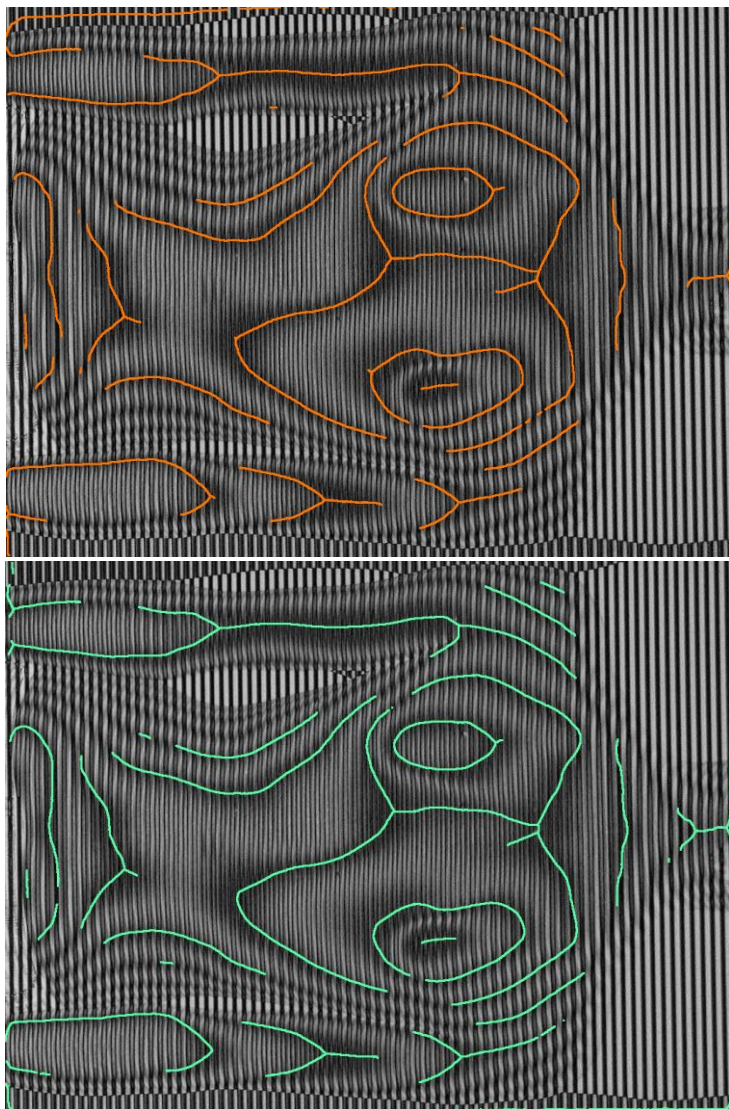
15.ábra: A 2. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemlélítve.



16.ábra: A 3. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.



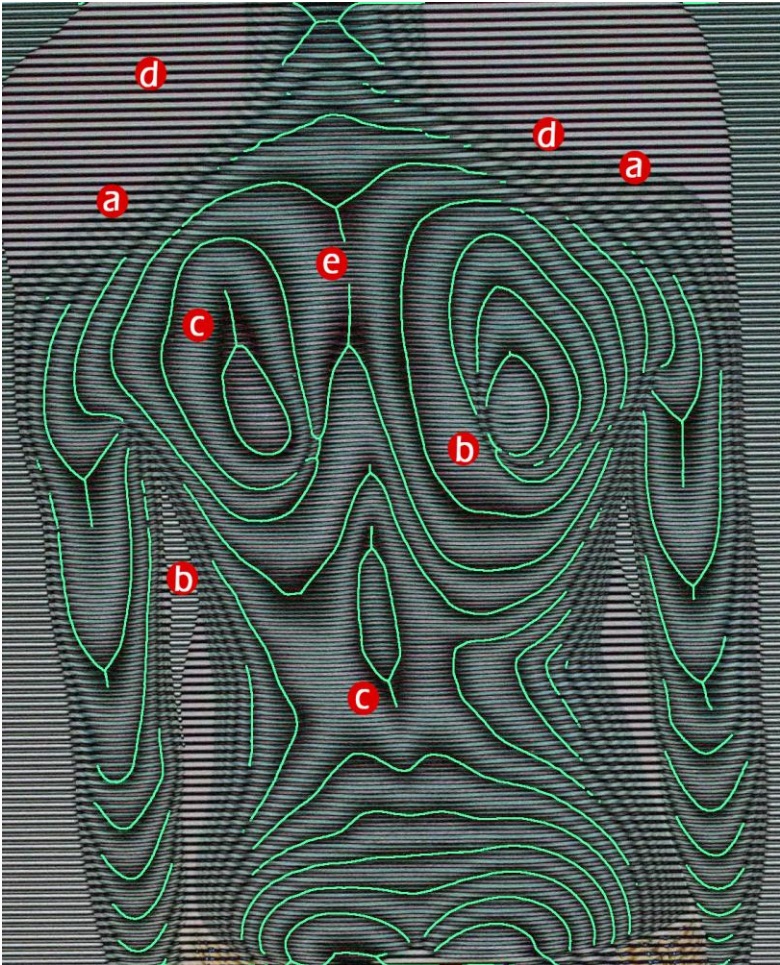
17.ábra: A 3. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemléltetve.



18.ábra: A 4. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemlélítve.



19.ábra: A 4. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemlélítve.



20.ábra: Moirésáv-szegmentáló algoritmusok megoldandó problémái
(a 2. számú, statikus algoritmussal szegmentált felvételen illusztrálva)
(a-c) halvány, összeérő és szélesebb/elmosódott moiré sávok
(d) a reziduális rács által képzett zaj
(e) nem kívánt “kiágazások”

VI. Összegzés és záró gondolatok

Ez az értekezés egy olyan interdiszciplináris területre fókuszál, amely inkább tartozik az innovációpotenciállal rendelkező kutatás-fejlesztések kategóriájába, mintsem a hagyományos kutatások közé. Az értekezés középpontjában egy olyan szoftveres kutatási keretrendszer koncepciója áll, amely moirémintázatok létrehozására, szegmentálására és elemzésére irányul. Bár a dolgozat témája jellegéből fakadóan orvosi és műszaki szempontokat egyaránt érint, nyelvezete főként utóbbi szemléletet tükrözi, hiszen a szerző maga is mérnök. Ennek megfelelően az értekezés helyenként összetett mondanivalójának megértéséhez az olvasó nyitottságára és befogadókészségére támaszkodik. A téma összetettségét és a kutatás-fejlesztés gazdag potenciálját mutatja, hogy a dolgozatban bemutatott koncepció implementálása túlmutat egy ember munkáján, hiszen annak érdekében, hogy célja, azaz a moiré-alapú képalkotás és -elemzés orvosi alkalmazása hatékonyan valósulhasson meg, interdiszciplináris, orvosokból és mérnökökből álló munkacsoport bevonása indokolt. Az ehhez szükséges megközelítés tehát egy izgalmas találkozási pont az orvosi kutatásoknak és a műszaki fejlesztéseknek, ahol a sikeres eredmények eléréséhez az egészségügyi és mérnöki háttérrel rendelkező szakértők együttműködése elengedhetetlen.

Az alábbiakban összegzem, hogy miként és milyen eredményekkel sikerült megválaszolni a megcélzott kihívásokat, valamint milyen irányokban tervezem továbbvinni az interdiszciplináris projektet.

Az értekezés az 1-5. tézisekben bevezetett kihívásokra próbált megvalósítható és reális válaszokat adni. Ezek a kihívások a következők:

- (1) A MT-t alkalmazó orvosi munkához és kutatáshoz szükséges mérnöki jelenlét csökkentése (1. tézisben bevezetett kihívás)
- (2) Szoftveralapú keretrendszer biztosítása a diagnosztikai kutatások számára a scolioticus gerinc moiréfelvételeinek létrehozására, feldolgozására és kiértékelésére felfedező jellegű matematikai-geometriai műveletek alapján (2. tézisben bevezetett kihívás)
- (3) Testartási optimumok beazonosítása a moiré-képalkotásban MK-n végzett felfedező jellegű matematikai-geometriai műveletek alapján (3. tézisben bevezetett kihívás)

- (4) Egységes felülettópográfiai paraméterek beazonosítása a moiré-képkalkotásban MK-n végzett felfedező jellegű matematikai-geometriai műveletek alapján (4. tézisben bevezetett kihívás)
- (5) XOR-logikával és projekciós moirétechnikával előállított MK-k adaptív vagy empirikus szegmentációja képszűrési és morfológiai műveletek alapján (5. tézisben bevezetett kihívás)

A moirékutatások (1-5) kihívásainak kezelésére a MITS koncepcióját, egy felfedező jellegű kutatásokat támogató felhasználóbarát, szoftveralapú keretrendszert javasoltam a scolioticus gerinc MK-einek létrehozására, feldolgozására és kiértékelésére. A javasolt koncepció célja, hogy egy könnyen használható eszköz legyen a scoliosisban alkalmazott moirékutatások számára, orvosi és orvosbiológiai szakemberek potenciális felhasználóival számolva.

A kutatási keretrendszer koncepciója lehetővé teszi az egészségügyi szakemberek számára, hogy önállóan hozzanak létre, szegmentáljanak és értékeljenek ki MK-et, anélkül, hogy helyhez vagy időhöz lennének kötve és számottevő számítási kapacitással rendelkezzenek (1-2. kihívás).

A MITS koncepciója a felfedező jellegű kutatásokat olyan matematikai-geometriai módszerekkel keretezi, amelyek alkalmassá tesznek testtartási optimumok és/vagy egységes felülettópográfiai paraméterek javaslatára különböző testhelyzetekben rögzített MK-k összehasonlításával és értékelésével (3-4. kihívás).

Az MITS koncepciójában a felfedező jellegű kutatást rugalmas képfeldolgozási és képkiértékelési műveletek biztosítják, amelyek végső funkciói a végfelhasználói visszajelzések alapján kerülnek beépítésre a tervezett szoftverfejlesztés béta verziójába.

A koncepció szegmentáló funkciójának (FST) alkalmazhatósága MATLAB-környezetben kifejlesztett szoftveres prototípus által került bemutatásra. A digitális PMT-val és XOR-logikával előállított MK-k szegmentációja szűrési és morfológiai műveletek szekvenciájával valósult meg statikus és adaptív függvényparaméterekkel (5. kihívás). További kutatás-fejlesztés mindkét algoritmust alkalmassá teheti időigényes és komplex szegmentációs módszerek helyettesítésére.

A MM és a MITS orvosi kutatásokban való életképességéhez nyújt támpontot a tudományos, pénzügyi és technikai szempontokat figyelembe vevő SWOT-elemzés. A MITS projekt egy későbbi szakaszában pozitív és jövőorientált megközelítéssel alapuló SOAR-elemzés is készül a termék és innovációs potenciáljának értékelésére jól meghatározott KPI-k alapján.

A jövőbeni fejlesztési lehetőségektől függően az MITS koncepciója nyitott arra, hogy a szoftvertermék mellett egy könnyen használható projekciós moiréberendezés kifejlesztésére is kiterjedjen. Ezáltal megvalósítható a mérnöki jelenlét teljes kiváltása, amely jelenleg minden MT-t alkalmazó orvosi kutatásnál követelmény.

A MITS-projekt következő fázisa magában foglalja (a) az üzleti modell és a reklámkampány kidolgozását, (b) a MITS béta verziójának egy szoftverfejlesztő cég által történő kifejlesztését és terjesztését a praktikus végfelhasználói visszajelzések gyűjtésére, (c) a szoftver fejlesztését és tesztelését az összegyűjtött adatokkal összhangban, és (d) a MITS alfa verziójának kiadását.

A szoftver további finomhangolásának hatékony és innovatív módja az állampolgári tudomány (CS) módszertanának beépítése.

Mindezzel a PhD értekezés célja, a MITS kiválasztott munkacsomagjainak előkészítése a professzionális szoftverfejlesztéshez sikeresen megvalósult.

Az MITS megvalósulása azonban csak a kereteket tudja biztosítani a moirékutatásokhoz. A sikerhez többre van szükség: az egészségügyi szakemberek elszántságára, felfedezési és kutatási vágyára, és nem utolsósorban kitartó szakmai alázatára.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm, hogy (be)fogadtattatok és támogattatok – időrendben:

Szüleim

Dr. Hargitai Evelin Gabriella

Kedves barátaim, Faragó Géza és Bíró Sándor

Dr. Antal Ákos

Dr. Sándor Nagy

Dr. Lajos Bogár

Dr. Than Péter

Dr. Tunyogi-Csapó Miklós

Joó István

Marlok Ferenc

Prommer Kata

Dr. Wolfgang Birkfellner

Dr. Magony Andor Dániel

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: A moirékutatás legfontosabb mérnöki feladatai	7
2. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: erősségek	29
3. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: gyengeségek.....	29
4. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: veszélyek	30
5. táblázat: Az MITS SWOT-elemzése: lehetőségek.....	30
6. táblázat: A statikus algoritmus időbeli lefutása	34
7. táblázat: Az adaptív algoritmus időbeli lefutása.....	35
8. táblázat: A statikus és adaptív algoritmusok lépéseinek összefoglalója	35

Képek jegyzéke

1. ábra: A disszertáció tartalma a célok (a-f) kontextusában.....	5
2. ábra: A szakirodalmi áttekintés PRISMA folyamatábrája	10
3. ábra: Példák geometriai struktúrák moirémintáira	13
4. ábra: Az árnyékmoiré-technika optikai elrendezése	15
5. ábra: A projekciós moiré-technika optikai elrendezése	16
6. ábra: Az emberi hátról készített digitális (projekciós) moiréfelvétel	17
7. ábra: A digitális moiré-képkalkotás és -vizsgálat folyamata	20
8. ábra: A Fringe Segmentation Tool látványterve	25
9. ábra: A Fringe Segmentation Tool prototípusának fő képernyője.	26
10. ábra: A Contour Analysis Tool látványterve.....	27
11. ábra: A Moiré Production Tool látványterve.....	28
12. ábra: Az 1. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.	36
13. ábra: Az 1. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemléltetve.	37
14. ábra: A 2. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.	38
15. ábra: A 2. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemléltetve.	39
16. ábra: A 3. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.	40
17. ábra: A 3. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemléltetve.	41

18.ábra: A 4. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye külön szemléltetve.	42
19.ábra: A 4. számú kép statikus (narancssárga) és adaptív (zöld) szegmentációjának eredménye együttesen szemléltetve.	43
20.ábra: Moirésáv-szegmentáló algoritmusok megoldandó problémái	44

Hivatkozások

- [1] Petra B, Kata P, Ákos A. Evaluation of digital moiré pictures for following conditions of patients with spinal deformities [Digitális moiré képek vizsgálata gerincferdüléssel betegek nyomon követésére]. (in Hungarian). Biomechanica Hungarica. 2014;7(1).
- [2] Wiklund ME, Wilcox SB. Designing usability into medical products: CRC Press; 2005.
- [3] Makerspace at the University: a Recommendation and Technical Assistance for the Integration of Makerspaces in Higher Education [Makerspace az egyetemen: Ajánlás és műszaki segédlet digitális közösségi alkotóműhelyek felsőoktatási integrációjához] (in Hungarian language). Pécs, Hungary: University of Pécs Medical School; 2022. 144 p.
- [4] Hargitai EG, Bogdán C, Sik A, Samoczi A, Hathazi M. Bottom-Up and Reciprocal Citizen Science: Untapped Resources of Novel Ideas. Preliminary Experiences of a Citizen Science As Public Engagement Program. Lusophone Journal of Cultural Studies. 2022;9(2):119-35.

A disszertációhoz kapcsolódó publikációk jegyzéke

Tudományos publikációk

Bogdán C, Magony AD, Wolfgang B, Antal Á, Tunyogi-Csapó M. Segmentation of moiré fringes of scoliotic spines using filtering and morphological operations. Acta Polytechnica Hungarica, 2023, 20(2):223-241. **Impakt faktor: 1.711 | Besorolás: Q2**

DOI: [10.12700/APH.20.2.2023.2.12](https://doi.org/10.12700/APH.20.2.2023.2.12)

Bogdán C, Magony AD, Hargitai EG, Antal Á, Tunyogi-Csapó M. Software-based segmentation of moiré images of scoliotic spine [Scolioticus gerinc moiréfelvételeinek szoftveres szegmentációja] (in Hungarian language). Biomechanica Hungarica, 2022, 15(2):7-21.

DOI: [10.17489/biohun/2022/2/558](https://doi.org/10.17489/biohun/2022/2/558)

Hargitai EG, Bogdán C, Sík A, Sámóczi A, Hatházi M. Bottom-Up and Reciprocal Citizen Science: Untapped Resources of Novel Ideas. Preliminary Experiences of a Citizen Science As Public Engagement Program. Lusophone Journal of Cultural Studies (LJCS), 2022, 9(2):119-135.

DOI: <https://doi.org/10.21814/rlec.3996>

Konferenciaközlemények

Bogdán C. The moiré method and its application in scoliosis. In: Háber IE, Bogdán C, Szoke A (eds). Proceedings of 4th International Interdisciplinary 3D Conference. Pécs, Hungary: University of Pécs, 2018. p. 81-7. ISBN: 9789634292678.

Bogdán C. Moiré Fringe Segmentation Tool: a software-based prototype for the detection of moiré fringes of scoliotic spine [Moiré Fringe Segmentation Tool: szoftveralapú prototípus a scolioticus gerinc moirésávjainak detektálásához] (in Hungarian language). In: Kajos LF, Bali C, Puskás T, Szabó R (eds). 11th Interdisciplinary Doctoral Conference 2022 Conference Book, Pécs, Hungary: Doctoral Student Association of the University of Pécs, 2022, 88-99. ISBN: 9789636260705.

Absztraktok

Bogdán C. A Software-based Segmentation of Moiré Fringes of Scoliotic Spines. In: Halász R, Zimmermann I (eds). Abstract Book of the 1st International Conference of

Biomedical Engineering and Innovation (24-26 Oct 2022, Pécs, Hungary), 20. ISBN: 97896362605382022

Available: https://icbei.pte.hu/assets/doc/icbei_abstract_book.pdf [Accessed: 07 Nov. 2022].

Bogdán C. Moiré Fringe Segmentation Tool: a Software-based Prototype for Detection of Moiré Fringes of Scoliotic Spines. In: Kajos LF, Bali C, Puskás T, Horváth-Polgár PI, Glázer-Kniesz A, Tislér Á, Kovács E (eds). 11th Interdisciplinary Doctoral Conference 25-26th of November 2022. Pécs, Hungary: Doctoral Student Association of the University of Pécs, 2022, 134. ISBN: 9789636260699

Available:

https://dok.pte.hu/sites/dok.pte.hu/files/files/Kiadvanyok/Book_of_Abstracts_2022.pdf [Accessed: 08 Feb. 2023].

Szerkesztett könyvek

Bogdán C, Hargitai EG (eds). Makerspace at the University: a Recommendation and Technical Assistance for the Integration of Makerspaces in Higher Education [Makerspace az egyetemen: Ajánlás és műszaki segédlet digitális közösségi alkotóműhelyek felsőoktatási integrációjához] (in Hungarian language). Pécs, Hungary: University of Pécs Medical School; 2022. 144 p. ISBN: 9789637178740.

Könyvfejezetek

Bogdán C. Technical Recommendation for Creating University-organized Makerspaces [Műszaki ajánlás egyetemi szervezésű makerspace-ek létrehozásához]. (in Hungarian language) In: Bogdán C, Hargitai EG (eds). Makerspace az egyetemen: Makerspace at the University: a Recommendation and Technical Assistance for the Integration of Makerspaces in Higher Education [Ajánlás és műszaki segédlet digitális közösségi alkotóműhelyek felsőoktatási integrációjához]. Pécs, Hungary: University of Pécs Medical School; 2022. p. 62-108., ISBN: 9789637178740.

Bogdán C, Hargitai EG. Makerspace at the University: a Recommendation for the Integration of Makerspaces in Higher Education [Makerspace az egyetemen. Ajánlás digitális közösségi alkotóműhelyek felsőoktatásba történő integrációjához]. (in Hungarian language) In: Bogdán C, Hargitai EG (eds). Makerspace at the University: a Recommendation and Technical Assistance for the Integration of Makerspaces in Higher Education [Makerspace az egyetemen: Ajánlás és műszaki segédlet digitális közösségi alkotóműhelyek felsőoktatási integrációjához]. Pécs, Hungary: University of Pécs Medical School; 2022. p. 32-50. ISBN: 9789637178740.

Előadások

Bogdán C. The moiré method and its application in scoliosis. In 4th International Interdisciplinary 3D Conference Engineering Section, Pécs, Hungary, 6 October 2018.

Bogdán C. A Software-based Segmentation of Moiré Fringes of Scoliotic Spines. In: 1st International Conference of Biomedical Engineering and Innovation (24-26 Oct 2022, Pécs, Hungary), Pécs, Hungary, 26 October 2022.

Bogdán C. Moiré Fringe Segmentation Tool: a Software-based Prototype for Detection of Moiré Fringes of Scoliotic Spines. In: 11th Interdisciplinary Doctoral Conference 25-26th of November 2022. Pécs, Hungary, 25 November 2022.

Poszter-prezentációk

Bogdán C. The moiré method and its application in scoliosis (poster). In: Háber I. E., Bogdán C., Szőke A (eds). Proceedings of 4th International Interdisciplinary 3D Conference. Pécs, Hungary, 5-6 October 2018, University of Pécs, 2018, 115. ISBN: 9789634292678.

Konferenciakötet szerkesztője

Háber I. E., Bogdán C., Szőke A (eds). Proceedings of 4th International Interdisciplinary 3D Conference: Engineering Section, Pécs, Hungary, October 5-6, 2018, ISBN: 9789634292678, Available: https://pte3d.hu/konferencia/assets2/doc/Proceedings_4th-3D-Conf-2018.pdf [cited 2022 April 23].

Diplomamunkák

Bogdán C. The theory of the moiré method and its application in scoliosis [A moirémódszer és alkalmazásának elmélete scoliosisban] [Bachelor's thesis] (in Hungarian language): Institute of Mechatronics Engineering and Research (Zalaegerszeg, Hungary), University of Pannonia; 2018.

Bogdán C. The Moiré Method and a Research Framework Concept Adapted to Moiré Imaging in Scoliosis [Master's thesis]: Fachhochschule Wiener Neustadt; 2020.