



EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
INFORMATIKAI KAR
NUMERIKUS ANALÍZIS TANSZÉK

Orvosi jel- és képfeldolgozás transzformációs módszerekkel

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Bognár Gergő

Témavezető: Dr. Fridli Sándor, egyetemi tanár, DSc.

Budapest, 2019.

Doktori iskola: ELTE Informatika Doktori Iskola
Az iskola vezetője: Dr. Csuha Varjú Erzsébet, egyetemi tanár, DSc.
Doktori program: Numerikus és szimbolikus számítások
A program vezetője: Dr. Weisz Ferenc, egyetemi tanár, DSc.

Bevezetés

Értekezésem témája egyes orvosi jel- és képfeldolgozás problémák vizsgálata. A célkitűzésem olyan, gyakorlati körülmények között is megbízhatóan működő, automatikus módszerek fejlesztése volt, amelyek az adott problémákhoz illeszkedő, elméletileg is megalapozott matematikai modellből származnak. Kutatásaim központi témája a transzformációs módszerek, illetve az ezekhez kapcsolódó approximációs kérdések, numerikus optimalizálás, szegmentálás, osztályozás, és klaszterezés lehetőségeinek vizsgálata volt. Munkámat *Dr. Fridli Sándor* témavezetésével, az ELTE Informatika Doktori Iskola ösztöndíjas hallgatójaként, majd az ELTE IK Numerikus Analízis Tanszék tanársegédjeként végeztem. Kutatásaimmal az ELTE IK Numerikus Analízis Tanszéken korábban megkezdett jelfeldolgozási kutatásokba kapcsolódtam be, melyek közül kiemelném az EKG jelek racionális rendszerekkel történő modellezésének ötletét *Dr. Schipp Ferenc* és *Dr. Fridli Sándor* kezdeményezése nyomán (lásd [FriLocSch12]). Értekezésemben további gyakorlati alkalmazások lehetőségeit, és a kapcsolódó elméleti háttérrel vizsgáltam, EKG és CT feldolgozási feladatok alapján.

Az elektrokardiogram (EKG) az emberi szív keltette elektromos mezőt méri a testfelületen elhelyezett elektródák segítségével. Az egyes elvezetéseken mért jelek elemzésével információt nyerhetünk a szív működéséről. A neminvaszív eljárás a klinikai kardiológia legelterjedtebb diagnosztikai eszköze, ugyanakkor elterjedése folyamatban van hétköznapi felhasználásra is, kézi- és okoseszközök formájában. Az EKG egyrészt számos jelfeldolgozási problémát felvet, másrészt a jelek számítógépvezérelt analízise hatékony eszköz az orvosszakértők kezében, segítve egyes klinikai helyzetek kezelését. A felmerülő problémák közül a szívütések aritmia szerinti osztályozásának és a hullámformák szegmentálásának feladatait vizsgáltam, valós, annotált adatbázis felhasználásával, ezekre a célokra kifejlesztett adaptív racionális transzformációs módszerek segítségével. Vizsgáltam továbbá egy approximációs problémát, a reprezentációhoz használt racionális transzformáció rendszerparamétereinek érzékenységét.

A komputertomográfia (CT) napjaink egyik legelterjedtebb háromdimenziós képalkotási technológiája, melynek elsősorban orvosi célú alkalmazása terjedt el, diagnosztika és műtéti támogatás céljából. A módszer alapja a vizsgált objektum több irányból történő átvilágítása, melyből a belső szerkezet 3D képe rekonstruálható. A röntgen ionizáló jellege miatt azonban az eljárás invazív, szövetkárosító, rákkeltő hatása van. A széleskörű felhasználás szempontjából tehát célszerű a sugárdózis csökkentése, amely ugyanakkor a képminőség romlásához vezet. Ennek egy eszköze az alacsony dózisu CT felvételek, melyek egyre népszerűbbek tüdőszűrés céljából. Kutatásom során alacsony dózisu tüdő CT felvételek képminőségének mérését, és kapcsolódó modellezési feladatokat: CT szimulációt és tüdőfantom-konstrukció lehetőségét vizsgáltam.

Matematikai és informatikai háttér

A kidolgozott eljárások fő eszközei a transzformációs módszerek. Ehhez kezeljük a jeleket alkalmas $f \in I \rightarrow \mathbb{K}$ függvény diszkrét mintavételezéseként, ahol $I \subset \mathbb{R}$ egy intervallum, és $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ vagy \mathbb{C} . A transzformációs módszerek bevezetéséhez tekintsük az $L_w^2(I)$ függvényosztályokat, azaz $I \subset \mathbb{R}$ intervallumon $w : I \rightarrow \mathbb{R}$ súlyfüggvénnyel négyzetesen integrálható valós vagy komplex függvények osztályait, mint Hilbert-tereket. A transzformáció matematikai alapját a Hilbert-térbeli approximáció adja: a függvények adott rendszerrel Fourier-sorba fejthetőek, illetve approximálhatóak a Fourier-részletösszegekkel. Tekintsünk ehhez egy $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ szeparábilis Hilbert-teret adott alaphalmazzal és skaláris szorzattal, és ennek egy $e_k \in H$ ($k \in \mathbb{N}$ vagy \mathbb{Z}) bázisát. Approximáljuk az $f \in H$ függvényt az (e_k) rendszer szerinti m -edik Fourier-részletösszeggel ($m \in \mathbb{N}^+$), azaz tekintsük az $f \approx P_m f$ közelítést. Itt P_m az $e_k \in H$ ($|k| < m$) rendszer által kifeszített $S_m \subset H$ altér projekciós operátora. A transzformációs módszerek a jelfeldolgozás fontos eszközei, a jelek megfelelő reprezentációját és alkalmas dimenziócsökkentését teszik lehetővé a releváns részletek kiemelése mellett. Példaként megemlíteném a klasszikus trigonometrikus Fourier-transzformációt, az Hermite és Walsh-függvények szerinti transzformációt, illetve a waveleteket (lásd pl. [Add05]). Ezen módszerek általános értelemben jól teljesítenek, azonban egyes problémák esetén speciális, az adott feladathoz illeszkedő adaptív módszer hatékonyabb lehet. Ehhez tekintsünk egy $e_k^\alpha \in H$ ($|k| < m$) rendszert, melynek tagjai egy $\alpha \in \Gamma$ nemlineáris rendszerparamétertől függenek. Rögzített α mellett ez egy hagyományos értelemben vett transzformációs módszert generál: a jelet az (e_k^α) rendszer által generált S_m^α altérre vett P_m^α projekciós operátorral approximáljuk. A paraméterek változtatásával azonban egy adaptív, a jelhez, vagy a jelek egy halmazához illeszkedő rendszer konstruálható, melynek segítségével jobb approximációs és reprezentációs tulajdonságok érhetőek el. Az $\alpha \in \Gamma$ paraméter megválasztásához tekinthetjük az

$$\alpha \in \arg \min_{\beta \in A} \|f - P_m^\beta f\|$$

minimalizálási feltételt (lásd *variálható vetítőoperátorok*, [GolPer73]).

Az EKG jelek modellezésére a racionális függvényekkel végezhető adaptív transzformáció lehetőségeit vizsgáltam, [FriLocSch12] alapján. Jelölje \mathbb{D} a nyílt és $\overline{\mathbb{D}}$ a zárt komplex egységdiszket, valamint $H^2(\mathbb{D})$ az egységdiszken analitikus, négyzetesen integrálható komplex függvények Hardy-terét. Tekintsük az

$$r_a(z) := \frac{1}{1 - \bar{a}z}, \quad r_{a,k}(z) := r_a^k(z) = \frac{1}{(1 - \bar{a}z)^k} \quad (z \in \overline{\mathbb{D}})$$

alakú *racionális alapfüggvényeket*, ahol az $a \in \mathbb{D}$ szabad paraméter az ún. *inverzpólus*, $k \in \mathbb{N}^+$ pedig az alapfüggvény rendje. Az alapfüggvények segítségével előállíthatóak a zárt egységdiszken analitikus, komplex együtthetős valódi racionális törtfüggvények, to-

vább az alapfüggvények módosított változatával az összes ilyen tulajdonságú racionális törtfüggvény. Jelfeldolgozási szempontból alkalmas a függvények \mathbb{T} egységkörre történő leszűkítése, amely lehetővé teszi $L^2(\mathbb{T}) \equiv L^2[-\pi, \pi]$ -beli függvények approximációját. Ehhez tekintsük alapfüggvények egy

$$\{r_{a_j, k_j} : j = 1, 2, \dots, n; k_j = 1, 2, \dots, m_j\}$$

rendszerét az $\mathbf{a} = (a_j) \in \mathbb{D}^n$ különböző inverzpólusok, és a hozzájuk tartozó $\mathbf{m} = (m_j) \in (\mathbb{N}^+)^n$ multiplicitások mellett. Adott $f \in L^2(\mathbb{T})$ függvény approximációjához tekintsük a rendszer által generált $R_{\mathbf{m}}^{\mathbf{a}}$ altérre vett $P_{\mathbf{m}}^{\mathbf{a}} f$ projekciót. Az approximáció előállítható ortonormált bázis (Malmquist–Takenaka), és alkalmas biortogonális rendszer segítségével is. A racionális rendszerek alkalmazásának fő motivációjaként a racionális alapfüggvények és az EKG hullámformák alakja között megfigyelhető hasonlóságot emelném ki, de további fontos szempont a rendszer matematikai egyszerűsége, és nagyfokú flexibilitása. A tetszőleges számú inverzpólus szabadon megválasztható akár az adott jelhez vagy jelekhez illeszkedően is, egy adaptív transzformációs módszert generálva. Az inverzpólusok és az alapfüggvények alakja közötti kapcsolatot tekintve ez azt jelenti, hogy a rendszerparaméterek is közvetlen diagnosztikai információt hordoznak az EKG hullámformákról. A módszer alkalmazásának központi kérdése a póluskombináció megfelelő, az adott feladathoz és a konkrét vizsgált jelekhez illeszkedő megválasztása, amely jellemzően egy nemlineáris optimalizálási problémaként fogalmazható meg. A feladat itt az inverzpólusok számának, multiplicitásának, és értékének megválasztása. Számos kérdés merül fel, és stratégia jöhet szóba, melyet a dolgozatban részletesen ismertettek, elsősorban Hiperbolikus Nelder–Mead szimplex [Fri+12] felhasználásával. A tapasztalatok alapján nemcsak jeltípusonként, hanem alkalmazásonként is eltérő szempontok lehetnek érdekesek, lásd pl. a szívütés-osztályozás és tömörítés problémáit. Utóbbi esetben a jel minél pontosabb approximációja szükséges, előbbi esetben viszont annak morfológiailag releváns reprezentációja a fontosabb, akár az approximációs tulajdonságok kis mértékű rovására is.

A CT képképzés alapja a *Radon-transzformáció*, amely síkbeli integrálható függvények egyenesek mentén vett integráltranszformációja:

$$\mathcal{R}f(L) := \int_L f \quad (L \in \mathcal{L}),$$

ahol $\mathcal{L} \subset \mathbb{R}^2$ a sík egyeseinek halmaza. A nyers CT képek rekonstrukciójának eszközei a Radon-transzformáció invertálási technikái: a *szűrt visszavetítés* és az *iteratív rekonstrukciós módszerek*. A transzformáció tulajdonságai, különösen az affin transzformációkkal való kapcsolata révén analitikus modellek, ún. *fantomok* kidolgozását teszi lehetővé. A dolgozatban a Shepp–Logan agyfantom [SheLog74] mintájára ellipszisekből felépített fantomokkal foglalkoztam, amelyek mint a CT képek sematikus modelljei, analitikusan kiértékelhető tesztkörnyezetet biztosítanak például szimulációs feladatokhoz.

További kapcsolódó területek az *osztályozási és klaszterezési technikák*, melyeket *gépi tanulás* szempontból tárgyalom. A célkitűzés itt megfelelő *jellemzővektorral* adott objektumok adott szempontok szerinti kategóriákba sorolása. Értekezésemben két speciális esettel foglalkoztam: a referenciaadatok szerinti osztályozással mint irányított, és az objektumok közötti hasonlóság alapján történő klaszterezéssel mint irányítatlan tanulóval. Előbbihez a tartóvektor-gépeket (SVM, lásd [CorVap95]) és mesterséges neurális hálókat (ANN, lásd pl. [Sch15]), utóbbihoz a K- és C-közepet (lásd [Llo82; Bez81]), illetve azok továbbfejlesztéseit (lásd pl. [ZhaChe04]) vizsgáltam.

Az értekezés tézisei

A továbbiakban tézisek formájában ismertetem az elért eredményeket, az értekezésben bemutatott módon.

1. tézis: EKG szívütés-osztályozás

|| *Kidolgoztam egy új, páciens-specifikus modellezésen alapuló szívütés-osztályozási módszert, melynek teljesítménye meghaladja a korábbi eljárásokat.*

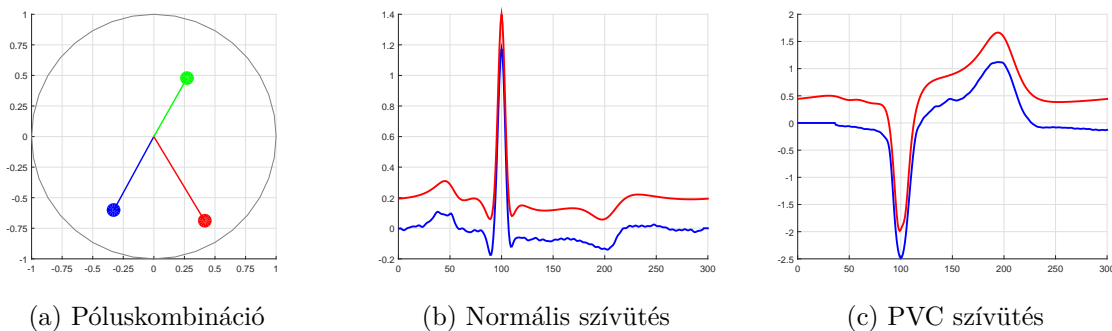
Az EKG jelek diagnosztikai célú, számítógépvezérelt analizisének egyik eszköze a szívütések *aritmia* szerinti osztályokba történő sorolása. Az aritmia egy tág gyűjtőfogalom a szív abnormális viselkedési formáinak jellemzésére, melyből itt az [AA12] szabványban javasolt 5, illetve 16 osztályt vizsgáltam, melyek közvetlen életveszélyt nem jelentő, de orvosi kezelést igénylő rendellenességek. A feladat aktuális és jelentős több szempontból is: számos klinikai szituáció (pl.: intenzív megfigyelés, 24 órás Holter) segítheti a kardiológusok munkáját, illetve a kézi és okoseszközökben is hatékonyan alkalmazható lehet.

A témakör kiterjedt szakirodalommal rendelkezik (lásd pl.: [ChaODwRei04; YeVK-Coi12; Luz+16]), általános módszertanának lépései az EKG jel előfeldolgozása és szívütésekre bontása, az egyes szívütések modellezése adott transzformációs módszer segítségével, jellemzővektor származtatása a transzformációból (ált. annak együtthatói alapján), majd irányított gépi tanulás végrehajtása az osztályozáshoz. A kiértékelés alapja a PhysioNet [Gol+00] hálózaton elérhető *MIT-BIH Arrhythmia Database* [MooMar01], amely egy orvosszakértők által annotált tesztadatbázis, aritmia szerinti kiértékelésre.

Kutatásom alapötlete egy adaptív transzformációs módszer kidolgozása racionális rendszerek alapján, helyettesítendő az általános transzformációkat. A kidolgozott pólusválasztásai stratégia mellett a jelek morfológia szempontból releváns reprezentációja adható, ahol nem csak a projekció együtthatói, de a rendszerparaméterek is információt hordoznak a jelekről. Munkám során az általános módszertan több pontját továbbfejlesztettem, illetve új eszközöket javasoltam. A következő új eredményeket értem el:

1. Kidolgoztam egy adaptív szegmentálási technikát a szívütésekre bontáshoz, amely a korábbi módszerek előnyeinek megőrzése mellett azoknál megbízhatóbb eredményt nyújt.
2. Kifejlesztettem egy páciens-alapú pólusoptimalizációs eljárást a szívütések modellezésére. Az így kapott adaptív racionális transzformáció a szívütések jó közelítését, és morfológiailag releváns reprezentációját adják. (Lásd 1. ábra)
3. Javasoltam egy adaptív kezdőpontválasztási stratégiát az optimalizációhoz, melynek segítségével növelhető a pólusoptimalizálás hatékonysága.
4. Kibővítettem az osztályozáshoz használt jellemzővektort a pólusszögekkel mint globális morfológiai jellemzőkkel.
5. Többféle stratégia fúzióját javasoltam az osztályozási pontosság növeléséhez.

Az eredményeket a [BogFri18; BogFri19a; DozBogKov19] cikkekben közöltem. A korábbi munkákkal összevetve megállapítható, hogy a javasolt módszer a szívütések hatékonyabb reprezentációját eredményezi, és megbízhatóbb osztályozást tesz lehetővé.



1. ábra. Pólusoptimalizálás és racionális approximáció szívütés-osztályozáshoz

Adatok forrása: MIT-BIH Arrhythmia Database

2. tézis: EKG szegmentálás

Egy új, adaptív megközelítést javasoltam az EKG hullámformák modellezésére, szegmentálására és rekonstrukciójára. A kritikus pontok detektálására kifejlesztett módszer több szempontból meghaladja a korábbi eljárások hatékonyságát, melyek közül a P-hullám helyének eddigieknél pontosabb meghatározását emelem ki.

Az aritmia szerinti osztályozáshoz hasonlóan az EKG analízis másik eszköze lehet az EKG szívütéseket felépítő hullámformák, a P, QRS, és T hullámok elemzése. Diagnosztikai szempontból releváns ezen hullámok alakja, egymáshoz viszonyított elhelyezkedése, és a közöttük eltelt időintervallumok hossza. Az elemzés általános eszköze a hullámformák kritikus pontjainak (kezdő-, csúcs-, és végpont) detektálása, melyekből további diagnosztikai

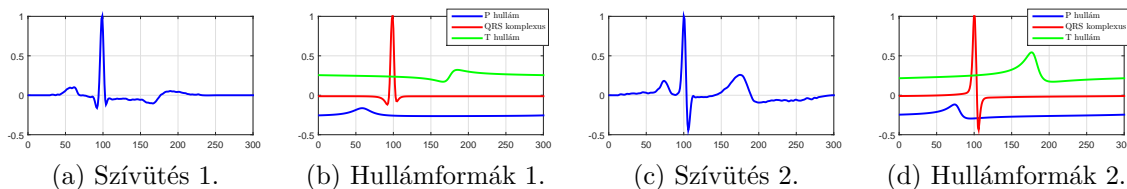
mennyiségek származtathatóak. Ezen mennyiségek segítségével a páciens aktuális állapotát, illetve állapotának időbeli változása jellemezhető, továbbá egyes abnormalitásokat is jelezhetnek.

A szakirodalmi előzmények közül a [LagJanCam94; Mar+04; Kov+17] eredményeket emelném ki, melyek a hullámformák alkalmas modellezésén, és a modellgörbék vizsgálatán alapulnak. A kiértékelés alapja itt a PhysioNet [Gol+00] hálózaton elérhető *QT Database* [Lag+97], amely szintén egy orvosszakértők által annotált tesztadatbázis, hullámformák kiértékelésére.

Kutatásom alapötlete a hullámformák racionális függvényekkel történő modellezése a korábbi tapasztalatok alapján. A kidolgozott modellek a hullámformák morfológiailag pontos reprezentációját adják, továbbá különböző technikákon keresztül lehetőség nyílik a kritikus pontok detektálására. Az elért eredmények a következők:

1. Kidolgozásra került a QRS komplexus racionális függvényeken alapuló geometriai modellje a kritikus pontok és diagnosztikai mennyiségek származtatásához.
2. Javasoltam rekonstrukciós technikákat, melyek az inverzproblémát, a jel diagnosztikai mennyiségekből történő visszaállítását célozzák meg. Megmutattam a módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát. Felvettem a rekonstrukció alkalmazását mint szívütés-szintetizáló módszer, és mint alternatív pólusválasztási stratégia, utóbbit a pólusoptimalizáció helyettesítésére vagy kiegészítésére.
3. Kidolgoztam egy determinisztikus szegmentálási eljárást a szívütések hullámformákra bontására, és a kritikus pontok detektálására. A módszertan részeként adaptív szűrési technikákat javasoltam, és egy, a feladathoz illeszkedő páciens-alapú pólusoptimalizációs módszert fejlesztettem ki. (Lásd 2. ábra)

Az eredményeket a [BogSch18; BogFri19b] cikkekben közöltem. A szegmentálást a korábbi munkákkal összevetve megállapítható, hogy egy hatékony és pontos reprezentációja adható a szívütéseknek racionális függvények segítségével. A rekonstrukciós módszereknek pedig további alkalmazása lehetséges pólusválasztási célból, szívütés-szintetizálásra, illetve más módszerek tesztelése során.



2. ábra. Szívütések és szegmentált hullámformáik

Adatok forrása: QT Database

3. tézis: Az inverzpólusok érzékenysége

|| *A racionális rendszerekkel történő approximáció problémakörét vizsgálva alkalmas felső korlátot adtam a pólusnagyság perturbációjára a megengedhető approximációs hiba függvényében.*

A szívütések osztályozására és hullámformák szerinti szegmentálására kidolgozott adaptív racionális transzformációk vizsgálatakor több kérdés merült fel az inverzpólusok érzékenységét illetően. Az egyes szívütések racionális approximációjának hibája közvetlenül vagy közvetve meghatározza a reprezentáció helyességét. Egyrészt jellemzi a modell pontosságát (lásd pl. tömörítés), másrészt befolyásolja a kinyert paraméterek (lásd pl.: együtthatók és kritikus pontok) megbízhatóságát. A pólusoptimalizáció azonban csak az optimális póluskombináció egy közelítését eredményezi, így felmerül kérdésként az inverzpólusok perturbációjának az approximációs hibára gyakorolt hatása. Mivel a gyakorlati tapasztalatok és elvi megfontolások alapján a pólusszög megváltoztatására érzékeny a rendszer, másrészt viszont ennek (szívütésenkénti és páciensenkénti) meghatározása stabil, így vizsgálataimat a pólusnagyság perturbációjára korlátoztam. A kapott eredmények alapján a pólusnagyság lehetséges megváltoztatása a megengedhető hiba függvényében tárgyalható. Ez által közvetve vagy közvetlenül alkalmazható lehet az adaptív racionális transzformáció során, például az inverzpólusok kvantálására, és a pólusoptimalizálás vezérlésére. Fontos részeredmények továbbá a racionális függvények skaláris szorzataira felírt összefüggések, és a racionális Gram-mátrix Cholesky-felbontásának meghatározása.

Az eredményeket a [BogFri19c] cikkben közöltem.

4. tézis: CT képminőségmérés

|| *Egy új metrikát fejlesztettem ki alacsony dózisú tüdő CT felvételek képminőségének objektív mérésére, valamint egy CT szimulációs környezetet alakítottam ki egy új tüdőfantom felhasználásával.*

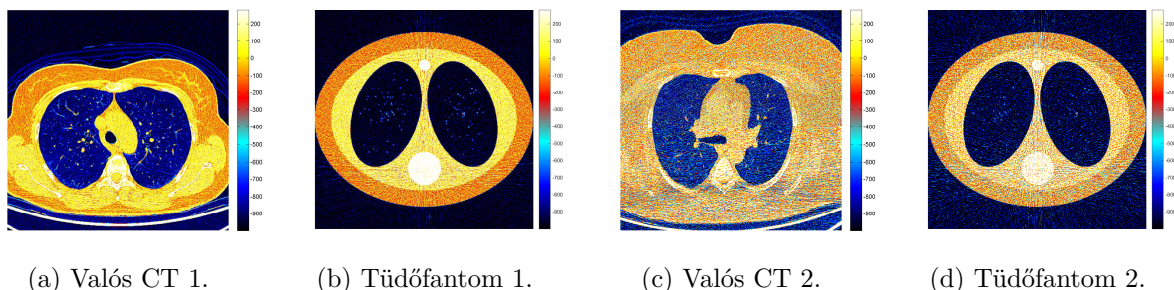
Az alacsony dózisú CT képalkotás központi kérdése a képminőség a sugárdózis csökkentésével együtt járó romlása, amely közvetlenül befolyásolja a felvételek diagnosztikai kiértékelhetőségét. Kutatásom során a képminőség objektív mérését tűzttem ki célul. Egy ilyen mérőszám közvetlenül alkalmazható a felvételezés során a kép kiértékelésére, és az alkalmazott sugárdózis adaptív változtatására. Közvetett módon alkalmazható lehet a rekonstrukció során is, például iteratív rekonstrukciós módszerek hibafüggvényeként felhasználva.

A képminőségmérés kiterjedt szakirodalommal rendelkezik (lásd [LinKuo11]), de eredményei elsősorban a természetes képek elemzésére, illetve referenciaképpel rendelkező képekre szorítkoznak. Előbbi a fényképek, utóbbi a képfeldolgozó algoritmusok kiértékelését

teszi lehetővé. A CT képek nyilvánvalóan nem természetes képek ilyen értelemben, jellemzően nem áll rendelkezésre jó minőségű referenciakép a kiértékelésre, és a meglévő módszertan nem elég kiforrott (lásd az előtér és háttér összehasonlításán alapuló CNR és SNR). Ez motiválta egy teljesen automatikus, objektív, a képek összehasonlítását is lehetővé tevő mérőszám kidolgozását. A fejlesztést és a módszertan kiértékelését a Pozitron Diagnosztika Központ felvételein, továbbá az ELCAP [Ree+09] és LIDC-IDRI [Arm+11] adatbázisokon végeztem. Ugyan ezen források számos felvételt tartalmaznak, az egyes páciensekről jellemzően csak egy felvétel áll rendelkezésre, korlátozva a módszer kiértékelhetőségét. Ennek kiküszöbölésére egy szimulációs környezetet alakítottam ki, melynek segítségével tetszőleges képminőségű, a valós CT felvételeknek is megfelelő képek szintetizálhatóak, algoritmusfejlesztési és tesztelési célból. A következő eredményeket értem el:

1. Adaptáltam egy alkalmas zajmodellt, melynek segítségével mesterséges CT képeket szintetizáltam megfelelő paraméterek alapján.
2. Konstruáltam egy tüdőfantomot analitikus modellek segítségével. A tüdőfantom a CT szimulációval együtt egy jól kezelhető, flexibilis, és kontrollálható modellezési lehetőséget biztosít különböző minőségű tüdő CT képek előállítására. (Lásd 3. ábra)
3. Kifejlesztettem egy referenciakép nélküli képminőségmérő metrikát tüdő CT képek kiértékelésére, melynek eredménye egy összehasonlítható mérőszám. A metrika teljesen automatizált, közvetlenül alkalmazható CT felvételekre. A CT szimuláció és a szubjektív szakértői kiértékelés is alátámasztja a metrika alkalmazhatóságát alacsony és normál dózisú CT felvételeken egyaránt.

Az eredményeket a [Bog15; Bog16] cikkekben közöltem. A tapasztalatok szerint a tüdőfantom szimulációjával a valós tüdő CT felvételekhez hasonló karakterisztikájú képek szintetizálhatóak, szabályozható zajszint mellett. A képminőségmérés pedig mind a szimuláció segítségével végzett objektív, mind szakértői pontozás segítségével végzett szubjektív kiértékelés alapján jól követi a felvételek érzékelhető képminőségét.



3. ábra. Alacsony dózisú tüdő CT képek és a tüdőfantom összehasonlítása

Adatok forrása: Pozitron Diagnosztika Központ

Irodalomjegyzék

- [AA12] *Testing and reporting performance results of cardiac rhythm and ST segment measurement algorithms*. Standard ANSI/AAMI EC57:2012. American National Standards Institute, Inc. (ANSI), Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI), 2012.
- [Add05] P. Addison. „Wavelet transforms and the ECG: A review”. *Physiol. Meas.* 26.5 (2005. nov.), R155–99.
- [Arm+11] S. G. Armato III et al. „The Lung Image Database Consortium (LIDC) and Image Database Resource Initiative (IDRI): A Completed Reference Database of Lung Nodules on CT Scans”. *Medical Physics* 38.2 (2011. febr.), 915–931.
- [Bez81] J. C. Bezdek. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Springer US, 1981.
- [ChaODwRei04] P. de Chazal, M. O’Dwyer és R. B. Reilly. „Automatic classification of heartbeats using ECG morphology and heartbeat interval features”. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51.7 (2004. júl.), 1196–1206.
- [CorVap95] C. Cortes és V. Vapnik. „Support-Vector Networks”. *J. Mach. Learn.* 20.3 (1995. szept.), 273–297.
- [Fri+12] S. Fridli, P. Kovács, L. Lócsi és F. Schipp. „Rational modeling of multi-lead QRS complexes in ECG signals”. *Ann. Univ. Sci. Budapest., Sect. Comp.* 37 (2012), 145–155.
- [FriLocSch12] S. Fridli, L. Lócsi és F. Schipp. „Rational Function Systems in ECG Processing”. *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol. 6927*. Szerk. R. Moreno-Díaz et al. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, 88–95.
- [Gol+00] A. L. Goldberger et al. „PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals”. *Circulation* 101.23 (2000. jún.), e215–e220.
- [GolPer73] G. H. Golub és V. Pereyra. „The Differentiation of Pseudo-Inverses and Nonlinear Least Squares Problems Whose Variables Separate”. *SIAM J. Numer. Anal.* 10.2 (1973. ápr.), 413–432.
- [Kov+17] P. Kovács, C. Böck, J. Meier és M. Huemer. „ECG segmentation using adaptive Hermite functions”. *Asilomar Conf. Signals. Syst. Comput.* 2017. okt., 1476–1480.

-
- [Lag+97] P. Laguna, R. G. Mark, A. Goldberg és G. B. Moody. „A database for evaluation of algorithms for measurement of QT and other waveform intervals in the ECG”. *IEEE Comput Card*. 1997. szept., 673–676.
- [LagJanCam94] P. Laguna, R. Jané és P. Caminal. „Automatic Detection of Wave Boundaries in Multilead ECG Signals: Validation with the CSE Database”. *Comput. Biomed. Res.* 27.1 (1994. febr.), 45–60.
- [LinKuo11] W. Lin és C.-C. J. Kuo. „Perceptual visual quality metrics: A survey”. *J. Vis. Commun. Image R.* 22.4 (2011), 297–312.
- [Llo82] S. Lloyd. „Least squares quantization in PCM”. *IEEE Trans. Info. Theo.* 28.2 (1982. márc.), 129–137.
- [Luz+16] E. J. d. S. Luz, W. R. Schwartz, G. Cámara-Chávez és D. Menotti. „ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection: A survey”. *Comput. Methods Programs Biomed.* 127 (2016. ápr.), 144–164.
- [Mar+04] J. P. Martinez, R. Almeida, S. Olmos, A. P. Rocha és P. Laguna. „A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases”. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51.4 (2004. ápr.), 570–581.
- [MooMar01] G. B. Moody és R. G. Mark. „The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database”. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 20.3 (2001. máj.), 45–50.
- [Ree+09] A. P. Reeves, A. M. Biancardi, D. Yankelevitz, S. Fotin, B. M. Keller, A. Jirapatnakul és J. Lee. „A public image database to support research in computer aided diagnosis”. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2009. szept., 3715–3718.
- [Sch15] J. Schmidhuber. „Deep Learning in Neural Networks: An Overview”. *Neural Networks* 61 (2015. jan.), 85–117.
- [SheLog74] L. Shepp és B. F. Logan. „The Fourier Reconstruction of a Head Section”. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 21.3 (1974. jún.), 21–43.
- [YeVKCoi12] C. Ye, B. V. K. Vijaya Kumar és M. T. Coimbra. „Heartbeat Classification Using Morphological and Dynamic Features of ECG Signals”. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 59.10 (2012. okt.), 2930–2941.
- [ZhaChe04] D.-Q. Zhang és S.-C. Chen. „A novel kernelized fuzzy C-means algorithm with application in medical image segmentation”. *Artificial Intelligence in Medicine* 32.1 (2004. szept.), 37–50.

A szerző publikációi

- [Bog15] G. Bognár. „Image quality measurement for low-dose human lung CT scans”. *38th Int. Conf. Telecom. Sign. Proc. (TSP)*. 2015. júl., 587–591.
- [Bog16] G. Bognár. „A No-Reference Image Quality Metric with Application in Low-Dose Human Lung CT Image Processing”. *Int. J. Adv. Telecom. Elect. Sign. Syst.* 5.1 (2016. jan.), 1–7.
- [Bog+19] G. Bognár, S. Fridli, P. Kovács és F. Schipp. „Adaptive Rational Transformations in Biomedical Signal Processing”. *Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2018*. Szerk. S. Péter et al. Springer, megjelenés alatt.
- [BogFri18] G. Bognár és S. Fridli. „Heartbeat Classification of ECG Signals Using Rational Function Systems”. *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10672*. Szerk. R. Moreno-Díaz et al. Springer, Cham, 2018, 187–195.
- [BogFri19a] G. Bognár és S. Fridli. „ECG Heartbeat Classification by Means of Variable Rational Projection”. *Biomed. Sign. Process. Control* (közlésre benyújtva).
- [BogFri19b] G. Bognár és S. Fridli. „ECG Segmentation by Adaptive Rational Transform”. *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2019. Lecture Notes in Computer Science*. Szerk. R. Moreno-Díaz et al. Springer, megjelenés alatt.
- [BogFri19c] G. Bognár és S. Fridli. „On the Pole Stability of Rational Approximation”. *Ann. Univ. Sci. Budapest., Sect. Comp.* 49 (2019. okt.), 35–49.
- [BogSch18] G. Bognár és F. Schipp. „Geometric interpretation of QRS complexes in ECG signals by rational functions”. *Ann. Univ. Sci. Budapest., Sect. Comp.* 47 (2018. aug.), 155–166.
- [DozBogKov19] T. Dózsa, G. Bognár és P. Kovács. „Ensemble learning for heartbeat classification using adaptive orthogonal transformations”. *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2019. Lecture Notes in Computer Science*. Szerk. R. Moreno-Díaz et al. Springer, megjelenés alatt.