Dr. Kovács Melinda Ágnes

Kognitív infokommunikációs módszerek az orvostudományban

Előtanulmányok májgócok detektálásához és karakterizáláshoz CT képekről számítógép-asszisztált rendszerek számára

doktori tézisek

témavezetők:
Dr. Nagy Szilvia
Széchenyi István Egyetem

Dr. Lilik Ferenc
Széchenyi István Egyetem

Széchenyi István Egyetem
Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Győr
2023.

1. Motiváció és célkitűzések

Az informatikai fejlesztések és a mesterséges intelligencia egyre nagyobb szerepet kap az életünkben, így egészségünkben is. Az egészségügyben régóta folynak kutatások a számítógép erőforrásainak kihasználására, a diagnosztika pontosabbá tételére. A radiológia az orvostudomány egy speciális ága, ami a legerősebb kapcsolatban van az informatikával, hiszen az általa alkalmazott magasabb szintű képalkotó berendezések mindegyike nagyon komoly matematikai és számítási igényeket támaszt. Nem csak a képek létrehozása, hanem azok utófeldolgozása is informatikai tevékenység.

A számítási kapacitás fejlődésével nemcsak a képalkotó eljárások lettek jobbak, hanem a keletkezett képek mennyisége is rendkívüli módon megnőtt. A képek elemzésekor a radiológus nagyszámú felvétel áttekintését végzi, melynek során – részben emberi, részben élettani okokból – az idő múlásával a percepció, felismerés gyengülhet.

A vizsgálatok nagy száma, az egyre növekvő képmennyiség, és a szakemberhiány magukban hordozzák a tévedés esélyét. Több tanulmány igazolja, hogy a képalkotó eljárásokon alapuló diagnosztika során a leterheltség jelentősen hozzájárul diagnosztikai hibák kialakulásához.

A minél pontosabb diagnosztika igénye hozta azt a gondolatot, hogy próbáljuk meg a számítógépeket megtanítani arra, hogy segítsék az orvosok munkáját azáltal, hogy előszűrést végeznek a felvételeken, kiemelik azokat a részeket, amelyeket jobban meg kell vizsgálni, esetleg javaslatokat tesznek az orvosoknak a potenciális diagnózisra is.

Az intelligens döntéssegítő eljárások rohamos fejlődésének lehetünk tanúi a hetvenes-nyolcvanas évek óta. Az első, a Stanford Egyetem kutatói által kifejlesztett, döntésilánc-építő szakértői rendszer a MYCIN volt, s azóta számos kemény és lágy számítási módszeren alapuló eljárást hoztak létre az orvosi diagnózis támogatására is. Ezen eljárások célja nem a diagnózist végző szakember kiváltása, hanem segítése.

A máj a daganatok áttétképződésének leggyakoribb helye, de számos más, jóindulatú, illetve rosszindulatú elváltozás is megjelenhet benne. Sok esetben a daganat egy más okból elvégzett hasi CT vizsgálat során a májáttétek kimutatásával kerül

felismerésre. Rendkívül fontos, hogy a máj vizsgálatánál talált, véletlenül felfedezett gócokat pontosan karakterizáljuk viselkedésük szempontjából. A máj áttétes megbetegedése sokkal gyakoribb, mint az elsődleges májtumor előfordulása. Mivel a májáttétek jelenléte alapjaiban megváltoztathatja a páciens életkilátásait, stádium-besorolását, és ezáltal onkológiai kezelését, rendkívül fontos, hogy a májban véletlenül talált gócokat pontosan el tudjuk különíteni dignitásuk szerint. A kis elváltozások (<15 mm) meglehetősen gyakori mellékleletek a rutin ultrahang- vagy CT-vizsgálatok során. Ezen elváltozások kb. 30%-a rosszindulatú a teljes populációra vetítve, ismert daganatos betegeknél ez az arány mintegy 50%.

A kivizsgálás célja egy felfedezett elváltozás esetében a rosszindulatúság kizárása vagy megerősítése. E célból különböző képalkotó és laboratóriumi vizsgálatokat végeznek, és az összes információt együtt értékelik. Az értékelést minden egyes esetben speciálisan képzett orvosok csoportja végzi. Ez jelentős mennyiségű munkaórát és pénzt emészt fel, és sokszor felesleges vizsgálatokhoz vezet. A mesterséges intelligencia segítségével a hibalehetőség és a felesleges erőforrások használata minimálisra csökkenthető.

1.1. A kutatás célja

Kutatásom célja olyan tulajdonságok meghatározása, amelyek a máj betegségeinek diagnosztikájában szerepet játszanak. Munkám előtanulmányul szolgálhat egy későbbi diagnosztikai segítő rendszer felépítéséhez. Célom, hogy előkészítsem egy olyan, szakértői véleményen alapuló, fuzzy-szignatúrás döntéstámogató rendszer kiépítését, ami alkalmas lesz előre szegmentált májléziók (máj gócos elváltozásai) elkülönítésére.

A kutatás elkezdésekor a mélytanuló algoritmusok alkalmazása a máj diagnosztikájában még nem volt ilyen szélesen kutatott terület, mint most, mert ez a többi szervhez képest bonyolultabb képelemzést, komplexebb algoritmusokat igényel. Ezen kívül az ehhez szükséges mennyiségű képanyag beszerzése adatvédelmi okokból nem volt lehetséges a munkám kezdetekor, ezért más irányba kezdtem kutatni. Azt találtam, hogy a szakértői tudás implementálása fuzzy szabálybázisként és szignatúrákként áthidalhatja a kis számú minták okozta nehézségeket. Kutatásaim során megállapítottam, hogy az általam választott módszer jól használható, de vannak bizonyos korlátok. Úgy

gondolom, hogy ezeknek a feloldásában a mesterséges intelligencia alkalmazása jelenthet megoldást.

Ahhoz, hogy az orvosok elfogadják a diagnosztikus algoritmust, és megbízzanak az eredményeiben, szükséges, hogy – amennyire lehetséges – átlássák a működését, ezért az orvosi diagnosztikus gondolkodást modellező rendszert terveztem kialakítani. Ehhez kérdőívet állítottam össze, amely felméri a diagnosztikai folyamat során az orvos által figyelembe vett tulajdonságokat és azok sorrendiségét, fontosságát a döntés meghozatala szempontjából.

A máj szegmentációja már megoldott, azonban a májon belül az elváltozások megkeresése még problémákba ütközik. Ezen problémák oka az lehet, hogy sokszor nehéz az elkülönítés az egészséges és beteg májszerkezet között, az elkülönítés pontatlansága pedig potenciálisan elveszíthet olyan területeket, amelyek az osztályozás szempontjából alapvető fontosságúak. A kutatás során továbbfejlesztettem egy módszert, amely lehetséges megoldást nyújt erre a problémára.

2. A kutatás során alkalmazott módszerek

A kutatás során alkalmazott eljárások a következők:

- A releváns tulajdonságok megállapításához kérdőíves módszert alkalmaztam, amelyet a disszertáció 3.3. fejezetében mutatok be részletesen.
- A gyűjtött adatok alapján képfeldolgozó algoritmusokat és fuzzy szignatúrát fejlesztettem. A fuzzy módszer és fuzzy szignatúra leírása a disszertáció 5.1., illetve 5.2.2. fejezetében található.
- A szegmentációra és az adatok kinyerésére általam elméletben kidolgozott és alkalmazott algoritmust a disszertáció 3. és 4. mellékletében mutatom be.

A kutatás során alkalmazott adatbázis:

- A felhasznált CT vizsgálatokat a győri Petz Aladár Egyetemi Oktató Kórház (korábban Petz Aladár Megyei Oktató Kórház) bocsátotta rendelkezésemre a disszertáció 1. és 2. mellékletében bemutatottak alapján.

1. táblázat. Gócos májelváltozások jellemző tulajdonságai. (Saját szerkesztés.)

Gócos májelváltozás	Jellemző CT tulajdonság
Ciszta	• közel vízdenzitású • nem halmozza a kontrasztanyagot • kerek • egyedüli vagy többszörös
Hemangióma	• kontraszthalmozása megegyezik a véráramával • tócsaszerű, széli halmozás • fokozatos betelődés a periféria felől a későbbi fázisokban • fennmaradó halmozás a késői fázisban előfordul
Fokális noduláris hiperplázia (FNH)	• gyakran a májfelszín alatt • jól körülírt kontúrok • gyakran lobulált • általában egyedüli • jellegzetes központi heg (central scar), amely halmozást mutat a késői fázisban • kerékküllő-szerű halmozási minta (legkifejezettebb a korai artériás fázisban) • portális és késői fázisban izodenz – nehezen különíthető el
Májsejtes adenóma	• éles kontúr • gyakran inhomogén (különösen nagyobb méretben) – vérzés, meszesedés, szövetelhalás • artériás halmozás, későbbi fázisokban gyakran elkülöníthetetlen
Májsejtes rák (HCC)	• különböző szövettani típusok megjelenése különböző • erős artériás halmozás • kimosódás a portális és késői fázisban • gyűrű halmozás lehet a késői fázisban
Metasztázisok (áttétek)	• változó megjelenés • kifejezett kimosódás portális és késői fázisban • lehet inhomogén (különösen nagyobb méret esetén)

3. Saját eredmények

I. tézis

Megvizsgáltam a máj megbetegedéseinek diagnosztikai döntéshozatala során a terület szakértői szerint az elváltozás képi megjelenésének legnagyobb súllyal/mértékben figyelembe vett jellemzőit: a denzitást, a homogenitást, az alakot, a kontúrélességet, és a méretet. A szakértői vélemények felmérésén alapulva a jellemzők között páros összehasonlításos módszerrel a jellemzőkhöz súlyokat rendeltem, mely arányos az adott jellemző döntéshozatalban betöltött szerepével. Ezen súlyok felhasználhatók a fuzzy szignatúrák felhasználásával történő diagnosztikai eljárásban a szignatúrák által leírt tulajdonságok kiválasztása során.

A szakértők által preferált legfontosabb tulajdonság a léziók denzitása és annak változásai az idő függvényében, a legkevésbé fontos jellemző a méret. Az alak, homogenitás, kontúrélesség tulajdonságok egyforma mértékben vesznek részt a szakértők döntésében.

A tézishez tartozó saját publikáció

Kovács, M. Lilik, F., Nagy, Sz.: On selecting and quantifying features in building liver CT diagnosis aiding computational intelligence method. Applied Sciences 13(6) (2023), 3462. [S1]

II. tézis

Számítógépen egyszerűen implementálható módszereket javasoltam májról készült CT felvételeken meghatározott májgócok alakjának, homogenitásának és kontúrvonalának orvosi diagnosztika szempontjai szerinti jellemzésére alkalmas mérőszámok meghatározására. Megállapítottam, hogy az alak jellemzésére megfelelő átskálázás után a szakértőkkel jó egyetértésben alkalmazható a gépészeti köralakvizsgálatban használatos mennyiség, a köralakhiba. A homogenitás jellemzésére az általam javasolt metrikák közül a lézió és a normál májszövet standard deviációjának

aránya bizonyult a legalkalmasabbnak. A kontúrélességnek csak nagyon durva jellemzését tudtam elérni a javasolt paraméterekkel.

A tézishez tartozó saját publikáció

Kovács, M. Lilik, F., Nagy, Sz.: On selecting and quantifying features in building liver CT diagnosis aiding computational intelligence method. Applied Sciences 13(6) (2023), 3462. [S1]

III. tézis

Megállapítottam, hogy a fuzzy Hough-transzformáció akkor alkalmazható a máj CT felvételek gépi értékelésére, ha a máj kontúrja már ismert, ezért javaslatot tettem ennek alkalmazására és a hozzá tartozó előfeldolgozási eljárásra.

III.A. altézis

Megmutattam, hogy a klasszikus Hough-transzformációval szemben, a fuzzy Hough-transzformáció a mesterségesen generált, illetve a CT képek Canny-féle éldetektáló eljárással feldolgozott verzióján nem pontos körök esetén is képes a körszerű objektumok detektálására, ami a májbeli körszerű metszettel rendelkező léziók detektálásában nyújt segítséget. Mesterségesen generált ellipsziseket és sokszögeket tartalmazó képekkel megmutattam, hogy a 0,33-as köralakhibát a 9 feletti σ-val rendelkező fuzzy Hough-transzformciók tudták tolerálni, a kisebb fuzzy paraméterű transzformációk legfeljebb 0,1-0,2 relatív köralakhibájú objektumokat voltak képesek még detektálni.

III.B. altézis

Javaslatot tettem a medián szűrő alkalmazására a fuzzy Hough-transzformáció előfeldolgozó algoritmusaként a máj CT felvételek vizsgálatában. Demonstráltam, hogy 512×512 pixeles szeletek esetén 10-es, illetve 15-ös kernelszélességű medián szűrő alkalmas arra, hogy a Canny-éldetektáló algoritmus által generált, a máj inhomogenitásából eredő felesleges éleket eltávolítsa, de a léziók határait még megtartsa, azzal a feltétellel, hogy a máj kontúrjain belül végezzük el e transzformáción alapuló

keresést. A májon kívüli objektumokból eredő lokális maximumok ugyanis általában magasabbak, mint a léziók lokális maximumainak kétszerese.

A tézishez tartozó saját publikációk

Kovács M., Nagy Sz.: On the Applicability of Fuzzy Lines in Circular Hough Transform in Lesion Segmentation on Liver CT Images, Computational Intelligence and Mathematics for Tackling Complex Problems 4, SCI 1040, Springer, Cham (2023), 45-54. [S2]

Nagy, Sz., Kovács M, Sziová, B, Kóczy L.T.: Fuzzy Hough transformation in aiding computer tomography based liver diagnosis. 2019 IEEE Africon, Accra, Ghana (2019), 1-4. [S3]

IV. tézis

Fuzzy szignatúra alapú modellt hoztam létre máj CT felvételeken található kóros eltérések osztályozására. A modellkészítés során többféle lehetséges kimenet mindegyikére külön-külön szignatúrát építettem és felrajzoltam a szignatúrák struktúráját.

A tézishez tartozó saját publikáció

Kovács, M., Lilik, F., Nagy, Sz., Kóczy, L.T.: On using fuzzy c-means clustering in the fuzzy signature concept classification of liver lesions. 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives (2022), 1-6. [S5]

V. tézis

Javaslatot tettem a fuzzy c-means klaszterezés felhasználására a szignatúrák levelein található tagsági függvények létrehozása céljából. Ennek működőképességét egy egyszerűsített, öt szignatúrát tartalmazó modell-rendszerrel demonstráltam.

A tézishez tartozó saját publikáció

Kovács, M., Lilik, F., Nagy, Sz., Kóczy, L.T.: On using fuzzy c-means clustering in the fuzzy signature concept classification of liver lesions. 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives (2022), 1-6. [S5]

VI. tézis

Javaslatot tettem egy, az orvosi gondolkodást modellező szignatúra alapú rendszerre, mely minden diagnózishoz független szignatúrát alkalmaz. A módszer működése bizonytalan az eredetileg feltételezett öt kimenet esetén (konkrét diagnózis – adenóma, FNH, HCC, metasztázis, ciszta), ellenben megfelelően működik három kimenetre, melyek a következők: jóindulatú góc, rosszindulatú góc, ciszta. Ezekre a bemutatott modell minimum 73%-os hatékonysággal működik.

A tézishez tartozó saját publikáció

Kovács, M., Lilik, F., Nagy, Sz., Kóczy, L.T.: On using fuzzy c-means clustering in the fuzzy signature concept classification of liver lesions. 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives (2022), 1-6. [S5]

Lilik F., Nagy Sz., Kovács M., Szujó Sz.K., Kóczy L.T.: Interpolative decision in the fuzzy signature based image classification for liver CT. FuzzIEEE 2021 Luxembourg (2021) 1-6. [S4]

4. Összefoglalás

Kutatásom célja a szakterületemen – képalkotó diagnosztika – az orvosi munka számítógéppel történő támogatási lehetőségének és az e célra alkalmazható döntéstámogató algoritmusok vizsgálata volt. A cél eléréséhez az eddig széles körben alkalmazott, ám a felhasználó számára kevéssé követhető módon döntésre jutó hibrid és mélytanuló rendszerek alternatíváinak lehetőségeit vizsgáltam.

Értekezésemben célul tűztem ki olyan képi jellemzők vizsgálatát, amelyek egy későbbi szakértői rendszer alapjává válhatnak. Bemutattam a radiológiai képalkotó vizsgálatok közül a komputertomográfiát, illetve a máj leggyakoribb betegségeiről adtam egy összefoglalót. Ezután a szakirodalom elemzésében megmutattam, hogy a legtöbb, napjainkban konstruált számítógép-asszisztált diagnosztikus rendszer vagy valamilyen hibrid eljárást tartalmaz, vagy tisztán mélytanuló rendszert használ. Ezeknél a legfőbb probléma, hogy a szegmentáció elmosódott kontúrú elváltozásoknál, illetve a máj szélein elhelyezkedő gócoknál bizonytalan, illetve, hogy a tanításhoz szükséges adatbázis felépítése nehézkes. Ez utóbbi miatt nem biztosítható a tanító és tesztelő adatbázis elkülönítése sem. Ennek a problémának a megoldására javasoltam a fuzzy szignatúrákat, amelyek képesek a szakértői tudást alkalmazni és azokban az esetekben, amikor nincs meg minden lehetséges adat, a hiányzó adatokat rugalmasan kezelni.

Első lépésként meghatároztam és súlyoztam azokat a tulajdonságokat, amelyek jellemzik az orvosi fogalmakat, amik alapján a májgócokat osztályozni lehet. Erre a célra egy kérdőívet állítottam össze és töltettem ki tapasztalt radiológusokkal, és válaszaik feldolgozása alapján meghatároztam a tulajdonságok döntéshozatalban mutatott fontossági sorrendjét. Megállapítottam, hogy a májgócok diagnosztikája során a legfontosabb tulajdonság azok denzitása. Ez a góc erezettségével függ össze, és változik a vizsgálat során az érpályába beadott kontrasztanyag pillanatnyi helyzetétől függően – ezt a változást figyelik a radiológusok. A legkevésbé fontos jellemző a méret a szakértők szerint. Ennek oka az, hogy bár az elváltozás alapvető jellemzője a mérete, önmagában nem ad támpontot a jó- vagy rosszindulatúság eldöntésére, inkább a követésben van szerepe. Az időbeli változás szakértői rendszerbe való beépíthetősége egy későbbi kutatás tervezett témája. Az elváltozás alakja, kontúrélessége, homogenitása, esetleges egyéb jellemzői a szakértői vélemények alapján egyforma súllyal veendők figyelembe a döntéshozatal során. Mindennek a fuzzy szignatúrák kialakításakor lesz jelentősége, mert ezen súlyok meghatározásával a szignatúra aggregációs függvényei megállapíthatók.

A denzitás és a méret jól mérhető metrikák. A speciális orvosi képformátumban (DICOM) tárolt mátrixból mindkét adat pontosan kinyerhető. Az alak, kontúrélesség, homogenitás mérése azonban nehézségekbe ütközik. Különböző módokon vizsgálva őket, metrikákat javasoltam, amelyeket teszteltem az általam gyűjtött mintákon. Megmutattam, hogy az alak szabályossága jól közelíthető a kerekség meghatározásával. A homogenitás mérésére a standard deviáció vizsgálata jó iránynak tűnik, azonban a máj

alapszerkezetének inhomogenitása és a nem egyértelműen meghatározott homogenitás fogalom miatt a terület további kutatásokat igényel. A kontúrélesség jellemzése a legnehezebb, amelynek oka lehet a szegmentációs nehézség is. Az általam vizsgált metrikákkal csak durva elkülönítésre (nagyon éles kontúr, illetve nagyon elmosott kontúr differenciálása) ad lehetőséget, így ezt is szükséges tovább vizsgálni.

A májléziók elkülönítése céljából javaslatot tettem a fuzzy Hough-transzformáció alkalmazására. Különböző paraméterekkel vizsgálva a képeket, kimutattam, hogy a nagyobb szélességű kernelek toleránsabbak a kerekded, de nem tökéletesen kör alakú elváltozások szabálytalanságával szemben. Ha azonban a sugár pásztázási tartománya túl nagy, a szavazó tagsági függvények az elváltozások mellett a májkontúr egyes részeit és akár más, májon kívüli szerveket is megtalálnak. Megmutattam, hogy a CT képek Canny-féle éldetektáló eljárással feldolgozott verzióján a 10-es és 15-ös kernelméretű medián szűrő alkalmazásával megfelelő élfelismerés érhető el.

A következőkben stabilizált Kóczy-Hirota-szabályinterpoláció segítségével kíséreltem meg a májléziók fuzzy osztályozását. Megállapítottam, hogy a klasszikus szabálybázisok alkalmazása gyakorlati szempontból nem alkalmazható, mert a ki- és bemeneti állapottér kifeszítése miatt keletkező szabálybázis kezelhetetlenül bonyolult lenne, ezért a fuzzy szignatúrák alkalmazásának lehetőségeit kezdtem vizsgálni. Megalkottam öt elváltozásra a fuzzy szignatúrát, majd c-means klaszterezéssel meghatároztam a tagsági függvényeket. Azt találtam, hogy bár a vizsgált öt kimenetre a rendszer működése bizonytalan, három kimenet esetén – jóindulatú, rosszindulatú elváltozás, illetve ciszta – az eredmények a rendelkezésemre álló kis mintakészlet ellenére is biztatóak.

Munkám előtanulmányul szolgálhat olyan algoritmusok fejlesztéséhez, melyek célja a májgócok felismerése és karakterizálása. További vizsgálatok szükségesek a jellemzők közül a kontúrélesség és homogenitás meghatározása és mérhetővé tétele céljából. Érdemes tovább vizsgálni a fuzzy szignatúrák alkalmazási lehetőségeit az orvosi CAD rendszerekben, és részletekbe menő szignatúrákat kifejleszteni. Mivel a fő probléma – nemcsak a saját munkámban, hanem irodalmi adatok alapján is – a szegmentáció minőségével volt, a megfelelő gócszegmentálási eljárás megtalálása alapvető feladat.

A multidiszciplináris kutatás során sokat tanultam, sok érdekes problémával szembesültem, illetve voltak olyan részek, amelyeket nem sikerült teljesen feltérképeznem. Kutatásaimat szeretném tovább folytatni egyrészt a fel nem térképezett

irányokban, másrészt szeretném megvizsgálni a szakértői tudás-alapú és mesterséges intelligenciát használó rendszerek hibrid módszereinek lehetőségeit is.

5. Publikációk listája

Saját, a tézishez tartozó publikációk

[S1] Kovács, M. Lilik, F., Nagy, Sz.: On selecting and quantifying features in building liver CT diagnosis aiding computational intelligence method. Applied Sciences 13(6) (2023), 3462.

[S2] Kovács M., Nagy Sz.: On the Applicability of Fuzzy Lines in Circular Hough Transform in Lesion Segmentation on Liver CT Images, Computational Intelligence and Mathematics for Tackling Complex Problems 4, SCI 1040, Springer, Cham (2023), 45-54.

[S3] Nagy, Sz., Kovács M, Sziová, B, Kóczy L.T.: Fuzzy Hough transformation in aiding computer tomography based liver diagnosis. 2019 IEEE Africon, Accra, Ghana (2019), 1-4.

[S4] Lilik, F., Nagy, Sz., Kovács, M., Szujó, Sz.K., Kóczy, L.T.: Interpolative decisions in the fuzzy signature based image classification for liver CT. 2021 IEEE International Conference on Fuzz Systems (FUZZ-IEEE), Luxembourg (2021), 21014128.

Független külföldi hivatkozás: 1

[S5] Kovács, M., Lilik, F., Nagy, Sz., Kóczy, L.T.: On using fuzzy c-means clustering in the fuzzy signature concept classification of liver lesions. 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives (2022), 1-6

A tézisekben nem megjelenő saját publikációk

[1] Kovács M., Nagy Sz.: On image preprocessing methods for preparation liver CT image series database for intelligent segmentation and classification algorithms. ICEST2019 54th International Scientific Conference on Information,

Communication and Energy Systems and Technologies, 27 - 29 June 2019, Ohrid, North Macedonia

[2] Nagy S., Lilik F., Sziová B., Kovács M., Kóczy LT: On the Applicability of Fuzzy Rule Interpolation and Wavelet Analysis in Colorectal Image Segment Classification. Fuzzy Approaches for Soft Computing and Approximate Reasoning: Theories and Applications. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 394. Springer, Cham.Svájc (2021)

[3] Kristóf L.A., Kovács M., Tóth G., Pohárnok L: Széchényi Pál múmiájának paleoradiológiai vizsgálata. Széchényi Pál érsek emlékezete. Adalékok az életúthoz és a nagycenki múmia vizsgálatának eredményei. Universitas-Győr Nonprofit Kft. (2012) 116–125.

[4] Kristóf L.A., Kovács M., Tóth G., Pohárnok L: Széchényi Pál múmiájának paleoradiológiai vizsgálata. Széchényi Pál érsek emlékezete. Adalékok az életúthoz és a nagycenki múmia vizsgálatának eredményei. Győri Hittudományi Főiskola, Győr, (2015)(Második, bővített kiadás) 48-158.

[5] Kristóf L.A., Kovács M., Baksa G., Bereczki Zs., Szatmári F., Patonay L., Pálfi Gy., Pohárnok L.: Condition assessment of two early Christian martyrs', St. Christine's and St. Augustine's relics with paleoradiological methods in HungaryJournal of Cultural Heritage 16(2) (2015) 249-253.

Független külföldi hivatkozás: 5

[6] Kristóf L.A., Kovács M., Baksa G., Patonay L., Szatmári F., Pálfi Gy., Pohárnok L.: Mosonmagyaróváron található két ókeresztény vértanú szent maradványának paleoradiológiai vizsgálata. Magyar Radiológia, 5(8) (2014), 1-12.