

Objektumdetekción alapuló 3D echokardiográfia alkalmazása a gyermekkardiológiában

Dr. Czeilinger Zsolt^{1, 2}, Cserey György², Dr. Környei László¹, Dr. Rekeczky Csaba²

¹Gottsegen György Országos Kardiológiai Intézet Gyermekszív Központ

²MTA SZTAI Analogikai és Neurális Számítások Laboratóriuma

Számos orvosi alkalmazásban a háromdimenziós képalkotás napjaink egyik aktívan fejlődő kutatási területe. Az ultrahang technikára épülő orvosi rendszerek széles körű elterjedtsége lehetővé teszi és motiválja a háromdimenziós rekonstrukciót végző echokardiográfiai rendszerek tervezését és megvalósítását. A várakozások szerint a közeljövőben ezek az eszközök lehetővé teszik majd a műtéti beavatkozások közvetlen (vizuális) támogatását és a terápiás kezelések hatékonyságának javítását.

A közlemény bemutat egy olyan technológiát, amely alkalmas az emberi szív üregeinek (kamrák és pitvarok) B-módú ultrahangfelvételekből történő valós-idejű, háromdimenziós rekonstrukciójának megvalósítására.

A megvalósítás egy kombinált hardver – egy analógikai Celluláris Neurális/Nemlineáris Hálózat (CNN) bázisú tömbprocesszor és egy digitális jelprocesszort (DSP) segítségével történik. A technológiai háttér tárgyalását követően bemutatásra kerül néhány olyan gyermekkardiológiai alkalmazási terület, ahol a technológia képes betölteni a konvencionális metodikák által hagyott űrt.

BEVEZETÉS:

A gyermekkardiológia napjainkban egy igen dinamikusan fejlődő szakterület. Az elmúlt pár évben számos olyan eljárás, módszer látott napvilágot, amely jelentős fokban képes javítani a terápiás eredményeinket, illetve a gyógyulást, a beteg kisebb megterhelésével éri el, alacsonyabb költség mellett. Ezzel párhuzamosan egyre inkább felmerült az igény a precízebb, a korábbiaknál sokkal részletesebb morfológiai ismeretekre, hisz az orvostudomány ezen ágában igen komplex, sokszor a normál anatómiai viszonyoktól jelentősen eltérő strukturális szívbetegségekkel találkozunk. Ahhoz, hogy ezek a malformációk minél nagyobb biztonsággal, pontossággal kezelhetőek legyenek, elengedhetetlen még a beavatkozás előtt a konkrét anatómia, hemodinamikai állapot ismerete. A klinikai gyakorlatban alkalmazott diagnosztikus, képalkotó eljárások számos, a terápia szempontjából fontos paramétert, térbeli struktúrát nem képesek meghatározni, vagy a meghatározáshoz a beteget megterhelő, invazív beavatkozásra van szükség (szívkatéterezés), ami sokszor ezzel együtt is csak közelítő eredményt ad. Más esetekben az eljárás drága, és a technológia nem is érhető el hazánkban (Cine-MR)

A hagyományos 2D képalkotó eljárások sokszor elégtelenek bizonyulnak azokban az esetekben, amikor egy konkrét 3D eszköz sebészi, vagy intervenciós úton történő implantálása előtt kell véleményt mondanunk arról, hogy az hogyan viszonyul térben az adott szívbeli struktúrához. Ez annál inkább is kiemelt jelentőségű, mivel jelenleg hazánkban is történnek olyan, nyitott szívűtétet kiváltó intervenciós beavatkozások, amelyek bizonyos defektusokat képesek bármilyen sebészeti beavatkozás nélkül megoldani. A bonyolultabb intervenciós, sebészeti beavatkozásokat követően egyre inkább felmerül az igény a pontosabb posztoperatív követés szükségességére, amely elsősorban részletesebb információt adó képalkotó eljárás módján történhet meg.

Túl az anatómiai ábrázoláson már régóta felmerült az igény olyan eljárás kifejlesztésére, amely képes pontos geometriai jellemzőket meghatározni a szíven belül. Itt elsősorban egyes üregek térfogatának, térfogatváltozásának pontos ismerete lenne szükséges. A fentiek értelmében egy olyan 3 dimenziós non-invazív képalkotó eljárás szükségessége fogalmazódik meg, amely nemcsak strukturális információt ad, hanem pontos 3D objektumszintű geometriai leképezést végez, méghozzá úgy, hogy az egyes elemek egymástól függetlenül is értelmezhetőek. Ezáltal nemcsak látványban, hanem pontos geometriai értékek meghatározásában is nagy hatékonysággal alkalmazható.

AZ ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIA

Alapelvek

Az általunk fejlesztett 3D echokardiográfias módszer elsősorban a 3D objektum rekonstrukció módjában tér el a hagyományos 3D echokardiográfia alkalmazott módszerektől. Azzal ellentétesen teljes mértékben objektum alapú leképezést végez, azaz nem csupán egy 3D kép, hanem egy matematikailag leírt 3D geometria határozódik meg a leképezés során. A módszer további erőssége, hogy minden egyes anatómiai alegség külön objektumként ábrázolódik, így a feldolgozás, mérés során azok külön-külön is kezelhetőek. A 3D geometria definiálása nem térpontokkal (voxelek), hanem felületi poligonháló leírásával történik. A feldolgozás során a felületi sokszögeket háromszögekre bontjuk (tesszeláció) (háromszögpoligon), amelyek egyértelműen definiálhatóak a csúcspont-koordinátaikkal (vertexek), illetve felületi normálvektoruk irányultságával. [Czeilinger 2002]

Kivitelezés

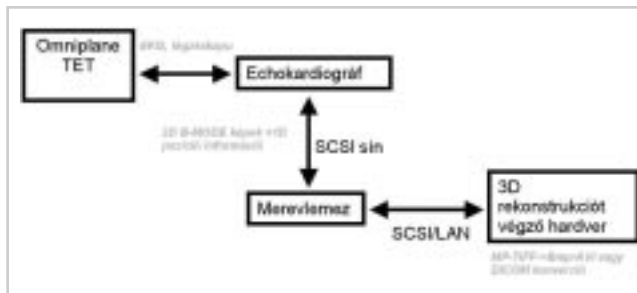
Az objektumrekonstrukciós modul hasonlóan a konvencionális 3D technikákhoz 2 dimenziós B-mode képeket használ bemenetként.

A szkennetek végzéséhez a nyelőcsőbe helyezett omniplane transzoesophageális transzducert használtunk. A vizsgálat során a transzducer egy térbeli pozícióban rögzítve a leképzési sík elektronikus automata forgatásával egy kúp térmetszetét adja a vizsgált területnek.

Az egyes szeletek közötti pozíciókülönbség 1°.

A művelethez a konvencionális 3D vizsgálatra felkészített Hewlett-Packard SONOS5500-as echokardiográfot használtuk. A szkennetek a HP miniTEE, illetve Omnil transzducerekkel történtek.

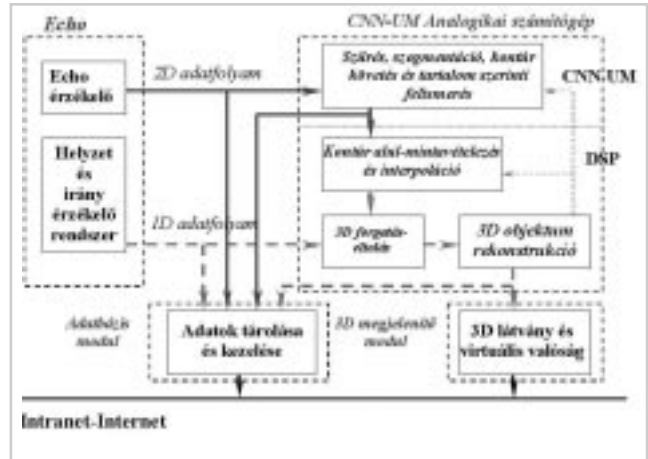
A művelet pontosságához elengedhetetlen a korrekt EKG, illetve légzéskapuzott felvételek képzése. Ezt az echokardiográf közeli feladatát a HP saját fejlesztésű 3D programcsomagja látta el. A lementett 2D szeletek egy nagy kapacitású és nagy sebességű merevlemezre tárolódtak (SCSI sínen keresztül), amelyet mind az echokardiográf, mind a további feldolgozást végző PC közvetlenül képes írni/olvasni. Lehetőség van hálózaton (LAN, Local area Network) keresztül bármely távoli PC számára maximálisan 100Mbit/sec-os adatelérésre is, így a rekonstrukciót végző gép akár egy távoli PC is lehet. [Czeilinger 2002]



1. ábra Adatfolyam a 3D rekonstrukciót végző egységig

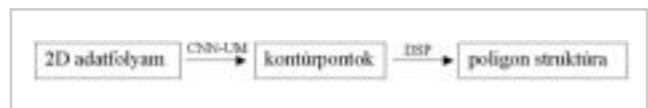
Az orvosi echokardiográfból érkező bemeneti jelfolyamok a CNN-UM (cellular nonlinear/neural network-universal machine) analogikai számítógépből és egy DSP (Digital Signal Processor) egységből álló feldolgozó egységhez érkeznek. A CNN univerzális gép (CNN-UM) celluláris neurális hálózat elvére épül (CNN). Ez az első algoritmikusan programozható analóg tömbszámítógép saját nyelvvel és operációs rendszerrel, melynek chipméretű VLSI implementációja képfeldolgozási feladatokban egy szuperszámítógép számítási teljesítményével azonos. [Roska 1993] A jelenlegi technológiával készült CNN-UM chipek egy négyzetcentiméterre eső számítási teljesítménye $3 \cdot 10^2$ operáció/másodpercrek felel meg. A mi esetünkben a CNN processzor a szűrést, előfeldolgozást, szegmentációt, kontúrkövetést és tartalom szerinti feldolgozást oldja meg a 2D B-mode képszeleteken. A rekonstrukció digitális algoritmusait, lépéseit és a vezérlést pedig a DSP végzi. [Rekeczky 1999, Klinger 1988] Az algoritmikus fejlesztésnél echokardiográfus szakember

által készített referenciák szolgáltak alapul, így biztosítva a detekció minél nagyobb pontosságát. A kapott kontúrponthoz megfelelő sorba rendezése és alul-mintavételezése biztosítja a sikeres rekonstrukciót. Az alul-mintavételezés spline interpolációval, nagy pontossággal történik. A síkok elforgatása és eltolása után ezek segítségével lehet kialakítani a ponthármasokból álló poligon struktúrát.



2. ábra Rendszer specifikáció – adatfolyam diagram

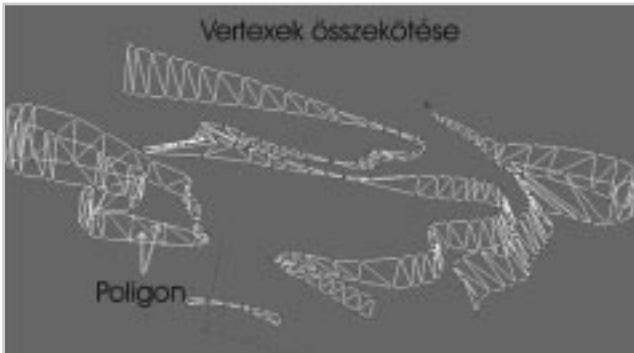
A CNN-UM és DSP modulokon kívül a rendszernek szüksége van egy adatbázis modulra, ahol az adatfolyamok és a kapott kontúrok adatait tárolhatjuk, illetve egy háromdimenziós megjelenítő modulra, mely a kapott poligon struktúrát az orvosok számára kiértékelhető módon megjeleníti. A rendszer kimenetei – adatok illetve látvány – belső, vagy akár Internet hálózaton elérhetővé tehetőek, biztosítva a megfelelő kompatibilitást már létező háromdimenziós adatokat kezelő szoftverekkel.



3. ábra Adatfolyam diagram

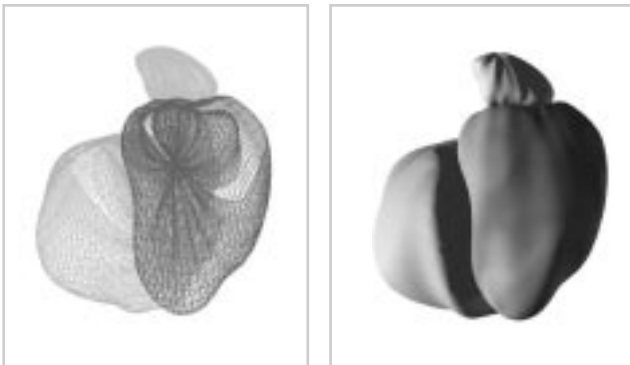
A CNN chip előnye a kétdimenziós adatfolyam feldolgozásánál jelentkezik, ugyanis az adatfolyam feldolgozásához igen jelentős számításteljesítmény szükséges. A CNN chip körülbelül két nagyságrendű adatredukciója után kapott kontúrponthoz a DSP ponthármasokká, majd poligon struktúrává alakítja.

A 3D rekonstrukció során a kapott kétdimenziós felvételekből meghatározott kontúrponthoz, megfelelő transzformációkkal – elforgatással és eltolással – a modellben nekik megfelelő helyre visszük. A pontokat az aktuális ábrázolandó felületnek megfelelően kell egymással összekötnünk. Ez azt jelenti, hogy feltételezve egy térbeli struktúrát az egyes képszeleteken a kontúrok összefüggnek, és az összefüggő kontúrok egymáshoz közeli pontjai között definiálhatjuk a poligon struktúra háromszögeit.



4. ábra A poligonszintézis elve (A 2D kontúrokon felvett pontok képezik a majdani poligonok csúcspontjait, a vertexeket)

A rendszer kimeneteként a vizsgált terület poligon bázisú modelljét kapjuk. A képfeldolgozó egységnek köszönhetően lehetőség van arra, hogy egyes előre definiált szívraktúrák különálló modellként jelenjenek meg. A képfeldolgozó egység által szintetizált poligonháló modelleket standard OpenGL alapú 3D felületen meg tudjuk jeleníteni. Tekintettel a piacon aktuálisan elérhető igen nagy teljesítményű real-time 3D gyorsító hardverekre, a modelleket valós időben tudjuk szemlélni. [Cserey 2001, Czeilingner 2002]



5.1., 5.2. ábra Több objektum poligonhálós modellje

Az objektum alapú poligonhálós leképzés előnyei a konvencionális 3D echokardiográfiával szemben:

- A számítógép számára értelmezhetőek az egyes strukturális egységek, illetve az ahhoz tartozó felületelemek, illetve az egyes poligonok egymáshoz való logikai kapcsolata.
- Az egyes elemek mozgatása, változtatása hatással lehet a modell egészére, mivel logikailag definiálva van geometriai viszonyuk. Bizonyos algoritmusok szerint ezáltal a valóságosnak megfelelő hatásokat válthatunk ki a modell egészén úgy, hogy annak csak egyes alkotóelemeit változtatjuk meg.
- Pontos geometriai számítások végezhetőek. Mivel az egyes anatómiai egységek koordinátái ismertek, így az egyes területelemek térfogata, felülete számítható csupán a háromdimenziós vektorkoordináták ismeretében.
- Anatómiai struktúra szerint kitarthatóak egységek, illetve a valóságban, az adott szögből nem látható részletek.

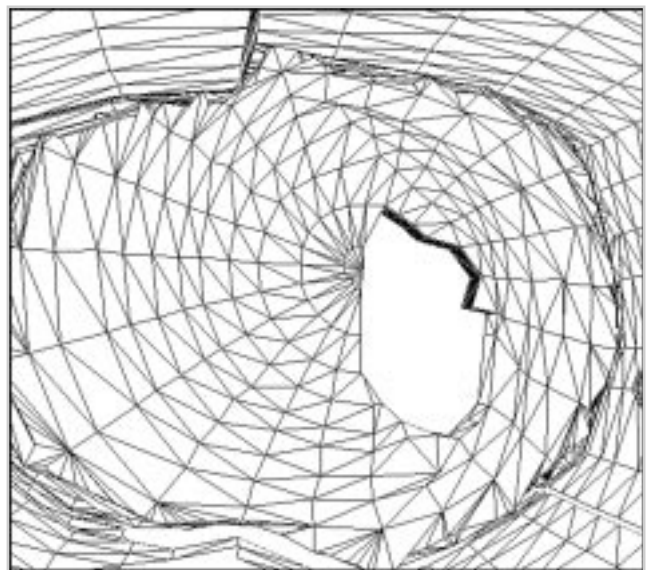
- A jelenleg elérhető háromdimenziós gyorsító felületek, illetve gyorsító hardverek poligon-alapúak, így az ezen a módon leképzett modellek nagy sebességgel ábrázolhatóak, s lehetőség van mozgatni, méretezni azokat valós időben.
- Bármilyen egyéb eljárással leképzett háromdimenziós struktúra ábrázolható ezzel egy felületen. Így gyakorlatilag bármilyen virtuális tárgy (ASD okkluder, szike, katéter, ballon) behelyezhető a modellbe, a valósággal azonos méretarányban, illetve azok valós időben mozgathatóak is.
- Az egyes modellek egymásra való hatása is szimulálható.
- Meghatározhatóak az egyes felületelemek felületi tulajdonságai, illetve ezek anatómiai struktúra szerint is definiálhatóak.

Lehetséges alkalmazási területek a gyermekkardiológiában:

Pitvari defectus transzkatóteres zárása előtt végzett 3D szimuláció

Az alkalmazási területet bemutatandó példaként egy transzkatóteres úton történő pitvari szeptumdefektus (ASD) zárása álljon. Pár éve kifejlesztésre kerültek olyan eszközök, amelyek sebészeti beavatkozás nélkül, az érpályán keresztül a szívbe juttathatóak, és ott egy bizonyos mechanizmus szerint kinyitva képesek elzárni a defektust.

Első lépésben a szükséges pitvarrészlet szkennelése, illetve 3D rekonstrukciója szükséges. Ez már önmagában rengeteg információt szolgáltat az orvos számára, hisz valós térbeli viszonyaiban szemlélheti a defektust, és minden irányú kiterjedéséről információt tud szerezni.



6. ábra A pitvari szeptumdefektus (ASD) drótvázis 3D rekonstrukciós képe a jobb pitvar felől szemlélve

A lehetőségeknek azonban itt nincs vége, hisz az alkalmazandó ASD záró eszköz (okkluder) geometriája is rávihető a grafikus felületre, így egy geometriai térben ábrázolható az interatriális szeptummal. (6. ábra)

Nagy sebességű 3D grafikus gyorsítófelületen a valós beavatkozás el is végezhető. Tekintettel arra, hogy a nagy sebességű objektumábrázolás hardver szinten megoldott, így az egész procedura a maga dinamikájában végezhető még a valós beavatkozás elvégzése előtt. Speciális 3D szemüveget használva (meghajtóprogramja implementálható a 3D megjelenítő szoftverbe) valódi térbeli látvány tárul az orvos szeme elé. A módszer óriási előnye, hogy segítségével pontosan megválasztható az alkalmazandó záróeszköz mérete, illetve típusa a beavatkozás elvégzése előtt.

Ez a módszer alkalmazható sebészeti beavatkozások végzése előtt is, amikor bonyolult 3D geometriájú objektumok térbeli viszonyainak tisztázása szükséges a valós operáció elvégzése előtt. A fentiekkel analóg módon sebészeti eszközök modellezésével (implantálandó műbillentyű, foltok, homograftok stb.) ezek a beavatkozások is sokkal jobb hatásfokkal tervezhetőek. [Czeilinger 2002]

A geometriai adatok korrekt meghatározása

A 3D látványon túl nagy jelentőséggel bír az a lehetőség, hogy a módszer alkalmazásával lehetőség nyílik egyes anatómiai alegységek pontos geometriai jellemzésére. Mint azt a hagyományos 2D/3D képkötő eljárásoknál ismertettem, jelenleg semmilyen vizsgálóeljárással nem lehet kielégítő pontossággal mérni egyes szívösszetevők térfogatát, felszínét, és ami még fontosabb, azok változását egy szív ciklus alatt.

Itt különösen a jobb kamra térfogatának, illetve annak ejekciós frakciójának elemzése bír nagy jelentőséggel. Ugyanis a jobb kamra bonyolult térbeli alakzat, amelynek modellezése során nem alkalmazható egyetlen primitív matematikai objektum sem. Így jellemzése hagyományos technológiákkal szinte lehetetlen.

Mint láthattuk az ismertett 3D objektum rekonstrukciós módszer az egyes szívösszetevőket külön objektumként kezeli és ismeri a határfelületeket képező térbeli koordinátákat is (vertexkoordináták). Így mindenfajta mérés nélkül kalkulálhatóak az egyes objektumok térfogatai, térfogatváltozásai. Ugyanígy kijelölt felületek területének kalkulációja is

megtörténhet. A szívizom endocardium, epicardium határvonalainak detekciója során a két térfogat különbségként kiszámolható a myocardium térfogata is, amely igen nagy jelentőséggel bír bizonyos esetekben. Például teljes nagyértranszpozíció (TGA) során elvégezendő „switch” műtét alapfeltétele a megfelelő nagyságú bal kamrai izomtömeg, amelynek pontos mérése a hagyományos mérési módszerekkel még koránt sem megoldott.

Természetesen a fentiekén kívül még számos alkalmazási területe létezik a technológiának, és a legtöbb esetben képes kitölteni a konvencionális metodikák végzése során keletkezett űrt.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fejlesztés alatt álló objektum alapú 3D/4D echokardiográf analogikái celluláris számítógép felhasználásával képes a szívről ultrahangtechnikával készült B-módú kétdimenziós felvételeken objektumok – üregek – körvonalait valós időben meghatározni, majd azokból a szívüregek háromdimenziós modelljét felépíteni.

A leképezés igen nagy sebességgel történik, így megfelelő sebességű mintavételező transzducer segítségével a vizsgálat valós időben történhet (4D echokardiográf). A technológia segítségével számos olyan strukturális geometriai ismeret nyerhető, amely nagy mértékben segíti a későbbi sebészeti/intervenciós beavatkozás sikerességét, emeli annak terápiás értékét. A technológia létjogosultságát az is jelzi, hogy számos olyan paraméter mérhető a segítségével (jobb kamra térfogat, ejekciós frakció, myocardium izomtömeg), amely a jelenleg elérhető diagnosztikus eljárásokkal nem, vagy erős közelítéssel, sokszor csak igen magas költségek árán határozható meg.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS:

A kutató, fejlesztő munka az NKFP 2001 2/035 (Érzékelő számítógépek és távjelenlét) pályázat keretein belül történik. A munkánkhoz szükséges háttér biztosításáért külön köszönet illeti meg Prof. Dr. Roska Tamást, illetve Dr. Szatmári Andrást.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Cserey Gy.: *Analogikai számítógép algoritmusok a valószínűségi 3D echocardiográfiában*. Szakdolgozat, BME Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék, 2001
- [2] Czeilinger, Zs: *Analogikai celluláris számítógép használata a 3 dimenziós echocardiográfiában* Szakdolgozat, BME Műszer és Méréstechnikai Tanszék, 2002
- [3] Klinger J.W, Vaughan C.L.,Fraker T.D. and Andrews, L.T. : *Segmentation of Echocardiographic Images Using Mathematical Morphology*, IEEE Transactions on Medical Imaging, 35, pp. 925-934, 1988.
- [4] Rekeczky, Cs. Tahy, Á. Végh, Z. Roska T.: *„CNN-Based Spatio-Temporal Nonlinear Filtering and Endocardial Boundary Detection In Echocardiography”*, International Journal Of Circuit Theory And Applications, 27, pp. 171-207, 1999.
- [5] Roska T. and Chua, L. O. *„The CNN Universal Machine: An Analogic Array Computer”*, IEEE Transactions on Circuits and SystemsII: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 40, pp. 163-173, March 1993.

A SZERZŐK BEMUTATÁSA



Dr. Czeilinger Zsolt 1998-ban szerzett diplomát a SOTE általános Orvostudományi Karán. Az egyetemen párhuzamosan 3D modellezéssel, 3D számítógépes grafikával is foglalkozott. Végzése óta az Országos Kardiológiai Intézet Gyermekszív Centrumában dolgozik, ahol a gyakorlatban is elsajátította a konvencionális echocardiográfiás technikákat. 2002-ben diplomát szerzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki Karának Orvosbiológiai Mérnök szakán. A 2001-es évben részmunkaidőben az MTA SZTAKI Analogikai és Neurális Számítások Laboratóriumában dolgozott. Jelenleg PhD hallgató, főbb érdeklődési területei a 3D ultrahangtechnológia, 3D képalkotás, 3D modellezés.



Dr. Környei László 1992-ben szerzett diplomát a Semmelweis Orvostudományi Egyetemen. 1996-ban csecsemő- és gyermekgyógyászatból, majd 2000-ben gyermekkardiológiából szerzett szakorvosi képesítést. Végzése óta a Gottsegen György Országos Kardiológiai Intézet, Csecsemő- és Gyermekosztályán dolgozik. A gyermekkori nyelőkői ultrahang vizsgálat technikáját, ami a szívről készített háromdimenziós képalkotó eljárások alapját képezi 1999-2000 között tanulmányozta hamburgi Universitäts Krankenhaus Eppendorf, Gyermekklinikáján. Hazai tudományos társasági tagságok mellett 2003-tól country delegate-ként képviseli Magyarországot az Európai Gyermekkardiológus Társaságban (Association for European Pediatric Cardiology).



Cserey György a Budapesti Műszaki Egyetemen szerzett villamosmérnöki diplomát 2001-ben. Jelenleg doktorandusz a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézetének Analogikai és Neurális Számítások Laboratóriumában. Kutatási területe a Celluláris Neurális Hálózatok számítási aspektusainak vizsgálata és annak alkalmazása a 3D echocardiográfia, többobjektumos követés és mesterséges immunrendszerek területén.

Dr. Rekeczky Csaba