



PhD Tézisfüzet

Optimalizált mérési és rekonstrukciós módszerek a fázismegszorított párhuzamos MR képalkotásban

Kettinger Ádám Ottó

Témevezető: Légrády Dávid, PhD
Egyetemi docens
Nukleáris Technika Tanszék
Nukleáris Technikai Intézet

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2019

A kutatások előzménye

Napjainkra a mágneses rezonancia képalkotás (MRI) az egyik legjelentősebb orvosi képalkotó eljárássá vált, melynek alkalmazási területe a hagyományos anatómiai képalkotó diagnosztikától az agyműködés vizsgálatán át a szöveti mikrostruktúra feltárásáig, és még tovább is terjed.

A más képalkotó eszközökhöz képest hosszú adatgyűjtési idő ugyanakkor továbbra is komoly hátrányt jelent számos klinikai vizsgálatban, valamint a dinamikus mérések időbeli felbontását is korlátozza. A mérési idő csökkentésére az utóbbi két évtizedben számos módszer látott napvilágot. A párhuzamos képalkotásnak nevezett módszercsoport alapötlete, hogy a nyers adatnak csupán töredékének mérjük meg, a képet pedig a több vevőtekercs által szolgáltatott plusz információ felhasználásával állítjuk helyre. Ezek a gyorsítási módszerek azonban a rekonstruált kép zajának növekedésével járnak, az adott mérés paramétereitől és az alkalmazott vevőtekercsektől függő mértékben. A zajerősítés csökkentésének egyik módja, ha ún. fázismegszorított rekonstrukciót alkalmazunk, kihasználva az adott esetben rendelkezésre álló előzetes (a-priori) fázisinformációt, vagy a nyers adat szimmetriatulajdonságait.

Egy speciális fázismegszorított rekonstrukciós eljárás, az ún. Virtuális Konjugált Tekercs (Virtual Conjugate Coil, VCC) módszer [Blaimer et al., 2009] lehetőséget nyújt a szimmetria implicit kihasználására, ezáltal nem igényel előzetes fázisinformációt, valamint érdekes módon a rekonstruált kép fázisára sem tesz megszorítást, melynek köszönhetően jelentős kutatási érdeklődést váltott ki az utóbbi időben (lásd pl. [Haldar and Zhuo, 2016; Deshmane et al., 2016; Hamilton et al., 2017; Levine et al., 2018; Kim et al., 2019; Manhard et al., 2019; Liao et al., 2019; Bilgic et al., 2019]). További terjedését és klinikai felhasználását azonban gátolja, hogy a Virtuális Tekercs rekonstrukció k-térben szimmetrikus adatgyűjtést igényel, így az aszimmetrikus mérést felhasználó módszerek, pl. részleges Fourier képalkotás mellett nem alkalmazható.

Az eredeti publikációban [Blaimer et al., 2009] a szerzők megmutatták, hogy a leképezendő objektum fázisa jelentősen befolyásolja a zajerősítést VCC rekonstrukció használata esetén, valamint számítógépes szimulációk segítségével azt is igazolták, hogy létezik optimális fáziseloszlás, mely minimalizálja azt. Az elvégzett klinikai mérésekben azonban csupán egydimenziós fázisrámpával közelítették ezt az ideális fáziseloszlást, így a VCC rekonstrukció zajcsökkentési potenciálja részben kihasználatlan maradt.

Célkitűzések

Doktori munkám során a kutatás fókuszában a gyorsított MR képalkotás fázismegszorított rekonstrukciójának zajnövekedése állt, elsősorban a Virtuális Konjugált Tekercs módszer előző fejezetben említett hátrányainak kiküszöbölésére, illetve csökkentésére koncentrálva.

A munka első felében kísérletileg kívántam megmutatni, hogy lehetséges a leképezendő objektum fázisának optimalítása, ezáltal a VCC zajerősítés minimalizálása klinikai MR berendezésen, mind szeleten belüli, mind egyszerre többszeletes gyorsítást alkalmazó képalkotás esetén. A koncepció igazolásán túl meg kívántam vizsgálni, hogy a szeletkiválasztás végrehajtható-e a fázisoptimalizációval egyidejűleg, ami nagyban növelné a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát.

Célul tűztem ki továbbá a Virtuális Konjugált Tekercs és a részleges Fourier képalkotás kombinálását, illetve annak vizsgálatát, hogy ezáltal lehetséges-e a VCC rekonstrukció zajcsökkentésének egy részét megtartani aszimmetrikus adatfelvétel esetén. Szándékomban állt továbbá a kombinált módszer zajerősítésének analitikus levezetése különböző részleges Fourier algoritmusokra az aszimmetria mértékének függvényében, valamint a módszer összehasonlítása részleges Fourier nélküli VCC rekonstrukcióval, azonos eredő gyorsítások esetén.

A kutatómunka közben világossá vált, hogy a hagyományos zajerősítés-számítási módszer valós értékű (magnitúdó) VCC rekonstrukció esetében érvényét veszíti, így célom volt erre az esetre egy új zajszámítási eljárás analitikus levezetése, valamint annak numerikus és kísérleti igazolása is.

Vizsgálati módszerek

A fent említett célokat analitikus és numerikus számítások, valamint kísérletek segítségével valósítottam meg. A rádiófrekvenciás pulzusokat alacsony szögű közelítésben, regularizált legkisebb négyzetek módszer használatával terveztem meg, míg a fázisoptimalizációt derivált-mentes szimplex kereséssel hajtottam végre. Minden rekonstrukció és numerikus számítás MATLAB környezetben (The MathWorks, Natick, MA, USA) történt.

A kísérleteket Siemens MAGNETOM Prisma 3T klinikai szkenneren végeztem (Siemens Healthcare GmbH, Erlangen, Németország), a gyártó által biztosított 20-, illetve 64-csatornás vevőtekercsekkel. Az adatgyűjtés vezérlésére gyári és saját tervezésű, prototípus pulzusszekvenciákat használtam, utóbbiakat a gyártó fejlesztői környezetében, C++ nyelven implementáltam. A hatályos jogszabályoknak és intézményi előírásoknak

megfelelően a mérések előtt minden résztvevő önkéntes a megfelelő tájékoztatás után írásos beleegyezését adta a vizsgálatba.

Új tudományos eredmények

Az új tudományos eredményeket az alábbi tézispontok foglalják össze.

1. Megmutattam, hogy az adott vizsgált személyre és mérési paraméterekre tervezett rádiófrekvenciás gerjesztő pulzus használatával a Virtuális Konjugált Tekercs módszerrel rekonstruált gyorsított MR képalkotás zaja jelentősen, akár kevesebb mint felére csökkenthető. Kísérletileg igazoltam, hogy a módszer mind szeleten belüli, mind egyszerre többszeletes gyorsítást alkalmazó adatgyűjtésnél használható, mindkét esetben spirális gradiens hullámforma alkalmazásával. A gerjesztő pulzusok az optimális fáziseloszlás sikeres létrehozása mellett kellőképp homogén gerjesztési szög-eloszlást eredményeznek. Igazoltam, hogy az optimalizált pulzust használó gyorsított mérés további kalibrációs adat felvétele nélkül, pusztán a kívánt fáziseloszlás számításához megmért kalibrációs adatok és a pulzus szimulált fázisprofilja segítségével rekonstruálható. [T1, T2, T3]
2. Számítógépes szimuláció segítségével megmutattam, hogy a gerjesztési k -térbeli útvonal és a rádiófrekvenciás hullámforma egyidejű, közös optimalizálásával, ún. spokes pulzus alkalmazásával szeletkiválasztás is végrehajtható a kívánt fáziseloszlás létrehozása mellett. A numerikus számítások azt mutatják, hogy ily módon a rögzített gradiens hullámformájú pulzusokhoz hasonló zajcsökkenés érhető el változatlan pulzushossz mellett, a gerjesztési szög homogenitásának csekély mértékű romlásával, térben szelektív módon. [T3]
3. Analitikus számításokkal megmutattam, hogy a hagyományos GRAPPA zajnövekedési formula valós értékű (magnitúdó) Virtuális Konjugált Tekercs rekonstrukció esetén érvényét veszíti. Erre az esetre levezettem egy új g -faktor számítási módszert, melynek helyességét kísérletileg és numerikus számítások segítségével igazoltam. [T5]
4. Kifejlesztettem és teszteltem egy módszert két, eddig kölcsönösen kizárónak tekintett fázismegszorított módszer, a Virtuális Konjugált Tekercs rekonstrukció és a részleges Fourier képalkotás kombinálására. In vivo kísérletekkel és numerikus számításokkal megmutattam, hogy a kombinációs eljárás használatával a Virtuális Konjugált Tekercs rekonstrukció által biztosított zajcsökkenés egy része

megtartható részleges Fourier képalkotást használó mérésekben, mind szeleten belüli, mind egyszerre többszeletes gyorsítás alkalmazása esetén. [T4, T5]

Az eredmények hasznosítása

A leképezendő objektum fázisának optimalizálása, és ezáltal a Virtuális Konjugált Te-kercs rekonstrukció zajcsökkentő hatásának teljes kihasználása kiemelkedő jelentőségű lehet azon méréseknél, melyeknél az erős mérési zaj a képminőség romlásának egyik fő oka; ennek egyik példája a gyorsított nagyfelbontású funkcionális MRI. Az Erwin L. Hahn Institute for Magnetic Resonance Imaging (Essen, Németország) kutatóival folytatott személyes megbeszélések azt jelzik, hogy az első kísérletek ezen technika alkalmazására a rétegspecifikus funkcionális MRI területén már folyamatban vannak.

Ezen túlmenően a munka második felében javasolt kombinált rekonstrukciós módszer lehetővé teheti a VCC rekonstrukció részleges alkalmazását olyan mérésekben, melyek alapvetően alacsony jel/zaj aránnyal rendelkeznek, és gyakran alkalmaznak részleges Fourier adatgyűjtést. Erra az alkalmazásra a diffúzió-súlyozott képalkotás tűnik ígéretes jelöltnek, ugyanis az Athinoula A. Martinos Center for Biomedical Imaging (Massachusetts, USA) kutatói, akikkel együttműködésben zajlott a munka ezen része, nemrég elsőként mutatták meg, hogy a VCC rekonstrukció klinikai körülmények között is jelentősen javíthatja a diffúzió-súlyozott mérések képminőségét [Liao et al., 2019].

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [T1] **Ádám Ottó Kettinger**, Stephan A. R. Kannengiesser, Felix A. Breuer, Zoltán Vidnyánszky, and Martin Blaimer, Tailored RF pulses for optimized phase-constrained parallel imaging: initial experience on a clinical system, in *Proc. Eur. Soc. Mag. Reson. Med.*, 33:661, 2016.
- [T2] **Ádám Ottó Kettinger**, Stephan A. R. Kannengiesser, Felix A. Breuer, Zoltán Vidnyánszky, and Martin Blaimer, Tailored 3D RF pulses for g-factor reduction in phase-constrained simultaneous multislice imaging, in *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.*, 25:1433, 2017.
- [T3] **Ádám Ottó Kettinger**, Stephan A. R. Kannengiesser, Felix A. Breuer, Zoltán Vidnyánszky, and Martin Blaimer, Controlling the object phase for g-factor reduction in phase-constrained parallel MRI using spatially selective RF pulses, *Magn Reson Med*, 79(4):2113-2125, 2018.

- [T4] **Ádám Ottó Kettinger**, Kawin Setsompop, Stephan A. R. Kannengiesser, Felix A. Breuer, Zoltán Vidnyánszky, and Martin Blaimer, Combining Virtual Conjugate Coil reconstruction with partial Fourier imaging for maximized utilization of k-space conjugate symmetry, in *Proc. Eur. Soc. Mag. Reson. Med.*, 34:179, 2017.
- [T5] **Ádám Ottó Kettinger**, Kawin Setsompop, Stephan A. R. Kannengiesser, Felix A. Breuer, Zoltán Vidnyánszky, and Martin Blaimer, Full utilization of conjugate symmetry: combining Virtual Conjugate Coil reconstruction with Partial Fourier imaging for g-factor reduction in accelerated MRI, *Magn Reson Med*, 2019.

További tudományos közlemények

- [F6] Balázs Játékos, Ádám Ottó Kettinger, Emőke Lőrincz, Ferenc Ujhelyi and Gábor Erdei, Evaluation of Light Extraction from PET Detector Modules Using Gamma Equivalent UV Excitation, in *Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference Anaheim, USA*, 2019.
- [F7] Tamás Sarkadi, Ádám O. Kettinger and Pál Koppa, Spatial filters for complex wavefront modulation, *Applied Optics* 52(22):5449, 2013.
- [F8] Ádám Ottó Kettinger, Christian Windischberger, Christopher Hill and Zoltan Nagy, Advanced combinations of dual-echo fMRI data provide no advantages over the simple average at group-level analyses, in *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.*, 24:818, 2016.
- [F9] Ádám Ottó Kettinger, Christopher Hill, Zoltán Vidnyánszky, Christian Windischberger and Zoltán Nagy, Investigating the Group-Level Impact of Advanced Dual-Echo fMRI Combinations, *Frontiers in Neuroscience*, 10:571, 2017.
- [F10] Ádám Ottó Kettinger, Petra Hermann, Pál Vakli, Martin Blaimer, Kawin Setsompop, Stephan A. R. Kannengiesser, Felix A. Breuer and Zoltán Vidnyánszky, Using Virtual Conjugate Coil reconstruction for statistical improvement in highly accelerated Simultaneous Multislice fMRI, in *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.*, 26:261, 2018.

Hivatkozások

- B. Bilgic, I. Chatnuntawech, M. K. Manhard, Q. Tian, C. Liao, S. S. Iyer, S. F. Cauley, S. Y. Huang, J. R. Polimeni, L. L. Wald, et al. Highly accelerated multishot echo

- planar imaging through synergistic machine learning and joint reconstruction. *Magn Reson Med*, 2019.
- M. Blaimer, M. Gutberlet, P. Kellman, F. A. Breuer, H. Köstler, and M. A. Griswold. Virtual coil concept for improved parallel MRI employing conjugate symmetric signals. *Magn Reson Med*, 61(1):93–102, 2009.
- A. Deshmane, M. Blaimer, F. Breuer, P. Jakob, J. Duerk, N. Seiberlich, and M. Griswold. Self-calibrated trajectory estimation and signal correction method for robust radial imaging using grappa operator gridding. *Magn Reson Med*, 75(2):883–896, 2016.
- J. P. Haldar and J. Zhuo. P-loraks: Low-rank modeling of local k-space neighborhoods with parallel imaging data. *Magn Reson Med*, 75(4):1499–1514, 2016.
- J. Hamilton, D. Franson, and N. Seiberlich. Recent advances in parallel imaging for mri. *Progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy*, 101:71–95, 2017.
- T. H. Kim, B. Bilgic, D. Polak, K. Setsompop, and J. P. Haldar. Wave-loraks: Combining wave encoding with structured low-rank matrix modeling for more highly accelerated 3d imaging. *Magn Reson Med*, 81(3):1620–1633, 2019.
- E. Levine, K. Stevens, C. Beaulieu, and B. Hargreaves. Accelerated three-dimensional multispectral mri with robust principal component analysis for separation of on-and off-resonance signals. *Magn Reson Med*, 79(3):1495–1505, 2018.
- C. Liao, M. K. Manhard, B. Bilgic, Q. Tian, Q. Fan, S. Han, F. Wang, D. J. Park, T. Witzel, J. Zhong, et al. Phase-matched virtual coil reconstruction for highly accelerated diffusion echo-planar imaging. *NeuroImage*, 194:291–302, 2019.
- M. K. Manhard, B. Bilgic, C. Liao, S. Han, T. Witzel, Y.-F. Yen, and K. Setsompop. Accelerated whole-brain perfusion imaging using a simultaneous multislice spin-echo and gradient-echo sequence with joint virtual coil reconstruction. *Magn Reson Med*, 2019.