

Intitulé Fr: Reconstruction parcimonieuse d'images IRM 3D et 3D+t à partir de données fortement sous-échantillonnées à haute résolution en imagerie anatomique et fonctionnelle à 7 et 11.7 Tesla.

Mots clés: optimisation convexe ; imagerie 3D ; curvelets ; apprentissage de dictionnaire ; parallélisation GPU ; IRM ; 7 Tesla ; 11.7 Tesla ; reconstruction ; échantillonnage compressif ; imagerie parallèle ; imagerie haute résolution ; IRM anatomique, IRM fonctionnelle.

Title: Compressed sensing 3D and 3D+t MR image reconstruction from highly under-sampled data in high resolution anatomical and functional imaging at 7 and 11.7 Tesla.

Keywords: convex optimization; 3D imaging ; curvelets; dictionary learning; GPU parallelization ; MRI; 7 Tesla; 11.7 T; reconstruction; compressed sensing; parallel imaging; high resolution imaging; anatomical MRI; functional MRI.

Résumé: L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est la modalité d'imagerie médicale de référence pour sonder *in vivo* le cerveau. L'amélioration de la résolution spatiale des images IRM dans un temps d'examen constant (e.g, 200 μ m isotrope en 15 min) est un enjeu majeur pour permettre aux médecins d'améliorer significativement leur diagnostic et la prise en charge des patients. L'avènement, il y a 10 ans, de la théorie de l'échantillonnage compressif a révolutionné la façon de collecter des données dans plusieurs disciplines scientifiques (e.g., en ultrasons, IRM, radio-astronomie) en permettant de réduire drastiquement les temps d'acquisition. Dans ce contexte, les efforts de NeuroSpin (thèses Nicolas Chauffert 2012-15 puis celle de Carole Lazarus, 2015-18) ont porté sur le développement de nouveaux schémas d'échantillonnage et séquence d'acquisition pour l'imagerie anatomique 2D et 3D, l'aspect 3D permettant ici d'atteindre la haute résolution dans la troisième direction de l'espace.

Par ailleurs, le projet DRF Impulsion COSMIC (<https://cosmic.cosmostat.org/>) entre NeuroSpin/UNATI et CosmoStat (IRFU/Sap) a permis à ce jour d'améliorer la qualité des images IRM 2D reconstruites grâce à l'usage de décomposition multi-échelles parcimonieuses optimisées (e.g., curvelets). L'objet de la thèse consistera à étendre ces travaux pour l'imagerie 3D anatomique haute résolution et l'imagerie fonctionnelle (IRMf) 3D+temps, respectivement. Il s'agira d'identifier les meilleurs dictionnaires pour représenter de façon parcimonieuse en espace et en temps les images à reconstruire. Des algorithmes de reconstruction efficaces seront développés pour gérer les données multi-canaux dans le contexte de l'imagerie parallèle. Les validations seront effectuées *in vivo* sur volontaire sain d'abord à 7 Tesla puis sur l'aimant Iseult à 11.7 Tesla à une résolution isotropique de 200 μ m en IRM anatomique et de 500 μ m en IRMf. L'objectif affiché sera de reconstruire à l'aide d'une implémentation GPU chaque volume IRMf de taille 512x512x512 (2 GB en mémoire par volume) en moins de 30 sec et une image anatomique haute résolution en 5 min environ.

Anstract: Magnetic Resonance Imaging (MRI) is the gold-standard medical imaging technique to probe the brain *in vivo* in a non-invasive manner. MR image resolution improvement in a standard scanning time (e.g., 200 μ m isotropic in 15 min) is a major challenge to allow neuroscientists and doctors to push the limits of their current knowledge and to significantly improve both their diagnosis and patients' follow-up. The raise of the new sampling theories like Compressed Sensing (CS) has revolutionized the way of collecting data in numerous scientific fields (e.g., ultrasound imaging, MRI, radio-astronomy) by drastically reducing acquisition times. In this context, NeuroSpin's efforts have been focused on the development of new sampling schemes as well as new MR pulse sequences for 2D and 3D high resolution anatomical imaging. the 3D aspect allowing us to achieve high resolution along the third dimension.

Besides, the DRF impulsion COSMIC project (<https://cosmic.cosmostat.org/>) between the NeuroSpin/UNATI and IRFU/SAP/CosmoStat teams gave us the opportunity to improve 2D MR image quality using multi-resolution analysis based on geometrically-informed sparse dictionaries

(e.g., curvelets). The main goal of this PhD thesis will consist of extending this work to 3D and 3D+t high resolution anatomical and functional imaging, respectively. In particular, the challenge will be to identify optimal sparse dictionaries in space and time for optimal MR images recovery. Efficient reconstruction algorithms will be developed to manage multi-channel data in the parallel imaging context. Ex vivo and in vivo validation will be performed in vivo on healthy volunteers first at 7 Tesla and then on the Iseult scanner at 11.7 Tesla to reach isotropic anatomical (200 μm) and functional (500 μm) high resolution imaging. Using a GPU-based implementation, the objective will be to achieve a reconstruction time less than 20 sec/volume for each 512x512x512 fMRI volume (2GB in memory/volume) and less than 5 min for a single high resolution anatomical image.

description du sujet:

Sciences du vivant – imagerie médicale

Sciences pour l'ingénieur – Mathématiques – Analyse numérique – Simulation

Formation: Master 2 Mathématiques appliquées ou data sciences couplée à une grande école d'ingénieur
01/10/2018

Sites web:

<https://sites.google.com/site/philippeciuciu/>

<https://team.inria.fr/parietal/>

http://joliot.cea.fr/drf/joliot/Pages/Entites_de_recherche/NeuroSpin.aspx

Collaboration: Collaboration établie dans le cadre du projet DRF Impulsion COSMIC financée depuis 2016 sur l'échantillonnage compressif pour l'IRM et la radio-astronomie.

Jean-Luc Starck apportera à la fois son expertise sur l'usage de décomposition 3D optimales pour la représentation parcimonieuse des images IRM ainsi que sur les algorithmes d'optimisation efficaces pour résoudre le problème de reconstruction afférent.

Descriptif de l'encadrement de la these : La thèse se déroulera à NeuroSpin, centre de neuroimagerie dédié à l'IRM à très haut champ, sous la direction de Philippe Ciuciu (UNATI/équipe Parietal) mais sera nourrie des interactions fortes existantes avec Jean-Luc Starck (IRFU/CosmoStatt) grâce à la collaboration établie dans le cadre du projet DRF Impulsion COSMIC financée depuis 2016 sur l'échantillonnage compressif pour l'IRM et la radio-astronomie.

Philippe Ciuciu assurera l'encadrement sur l'échantillonnage compressif et la reconstruction d'images IRM tandis que Jean-Luc Starck apportera à la fois son expertise sur l'usage de décomposition 3D optimales pour la représentation parcimonieuse de ces images ainsi que sur les algorithmes d'optimisation efficaces pour résoudre le problème de reconstruction afférent.

L'encadrement sur la partie GPU sera effectué en interne à NeuroSpin par par Fabrice Poupon.

Profil candidat: Nous recherchons un candidat ingénieur grandes écoles ou Master 2 en imagerie/ingénierie biomédicale possédant des compétences fortes en optimisation (théorie et algorithmie), traitement du signal et des images et en programmation scientifique (langages: C, Python et Matlab) incluant nécessairement i) une expérience préalable dans le développement de codes de calcul parallèles pour une implémentation sur architecture massivement multi-coeurs ou GPU, et ii) une bonne connaissance de l'imagerie par résonance magnétique. Le candidat retenu rejoindra une équipe interdisciplinaire internationale (INRIA-CEA Parietal) comprenant des chercheurs en imagerie médicale, traitement du signal et des images et en apprentissage statistique

pour la neuroimagerie. Il/Elle devra donc démontrer d'excellentes capacités de communication en anglais à l'écrit comme à l'oral.

Profil candidat en anglais: We are seeking a PhD student already graduated from top-level engineer schools or with a Master of science in biomedical imaging/engineering. He/She should have a solid background in optimization theory and algorithms, in signal and image processing as well as in scientific computing (languages to be mastered: C, Python and Matlab). Preliminary experience in software development for parallel computing architectures (either massively many-core or GPU-based) is mandatory. Knowledge in magnetic resonance imaging is also expected. The PhD candidate will join a multi-disciplinary international team (INRIA-CEA Parietal) including research scientists in medical imaging, signal/image processing and machine learning for neuroimaging. He/She should demonstrate excellent oral and written communication skills in English.

Présentation détaillée en français

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est la modalité d'imagerie médicale de référence pour sonder *in vivo* et de façon non invasive les tissus mous, et en particulier le cerveau. L'amélioration de la résolution des images IRM dans un temps d'examen constant (e.g., 200 μm en 15 min) est un enjeu majeur pour permettre aux médecins d'améliorer significativement leur diagnostic et la prise en charge des patients. L'avènement, il y a 10 ans, de nouvelles théories d'échantillonnage, comme l'échantillonnage compressif [1], a révolutionné la façon de collecter des données dans plusieurs domaines en dépassant le théorème de Shannon-Nyquist. Cette percée repose sur i) l'usage de schémas d'acquisition pseudo-aléatoires, ii) la parcimonie ou compressibilité des images dans une représentation adaptée (e.g., ondelettes) et iii) l'utilisation d'un algorithme de reconstruction non-linéaire qui promeut la parcimonie. En utilisant ces trois piliers conjointement, l'échantillonnage compressif permet de sous-échantillonner massivement les données, d'un facteur R , tout en garantissant des conditions pour une reconstruction exacte de l'image. Son utilisation en IRM est apparue en 2007 [2] et très vite, un certain nombre de travaux se sont multipliés (cf e.g., [3-4]). Toutefois, les facteurs d'accélération atteints n'ont jamais dépassé $R=6$.

Dans ce contexte, les efforts de NeuroSpin/UNATI (thèses de Nicolas Chauffert 2012-15 et de Carole Lazarus 2015-18) ont porté jusqu'à présent sur le pilier i) pour offrir de nouvelles trajectoires compressées compatibles avec les contraintes matérielles de l'IRM [5-7]. Des facteurs d'accélération allant jusqu'à $R=20$ ont pu être atteints en simulation [8], puis sur données réelles en 2D sur l'imageur clinique à 7 Tesla (résolution planaire de 400 μm) [9]. Le développement de séquences d'acquisition compressées 3D est impératif et actuellement en cours afin d'accéder à une imagerie à haute résolution isotropique, i.e. identique selon la troisième dimension. L'usage de séquences 3D est également nécessaire pour accroître le rapport signal sur bruit en espace et en temps en imagerie fonctionnelle (IRMf) à haute résolution (500 μm isotrope).

Dans le cadre du projet DRF Impulsion COSMIC (*Compressed Sensing for Magnetic Resonance imaging and Cosmology*, cf <https://cosmic.cosmostat.org/>), nous avons commencé à travailler sur les piliers ii)-iii) dans un contexte 2D en substituant des dictionnaires redondants (e.g., curvelets) aux ondelettes orthogonales [10]. La problématique de cette thèse porte désormais sur les extensions de ces travaux à l'imagerie 3D et 3D+temps pour l'imagerie anatomique et fonctionnelle à haute résolution. L'objectif sera d'une part une meilleure prise en compte de la parcimonie en 3D. On étudiera l'usage de décompositions redondantes intégrant des informations géométriques (*curvelets*, *shearlets*) pour mieux représenter les détails au sein des images IRM. Des stratégies d'apprentissage de dictionnaires seront aussi envisagées. Concernant l'encodage de la parcimonie en temps, nous commencerons par tester des transformées pertinentes physiologiquement comme les *activelets* [10], qui modélisent la réponse hémodynamique [11]. D'autre part, le second objectif sera de proposer des algorithmes de reconstruction 3D et 3D+temps efficaces en temps de calcul (parallélisation GPU). Nous utiliserons pour ce faire l'expertise de l'équipe CosmoStat en optimisation convexe non lisse [12]. La parallélisation de ce type d'algorithmes permettra d'accélérer la reconstruction 3D, notamment dans le contexte de l'imagerie multi-canaux à l'instar de travaux préalables menés à NeuroSpin [13-15]. En outre, une attention particulière sera portée à l'estimation autodidacte des hyper-paramètres. Pour ce faire, différentes stratégies pourront être testées [16].

Enfin, une part importante du travail consistera à implanter et valider les algorithmes sur un cluster de calcul, typiquement une machine multi-coeurs dotée d'une carte GPU, et d'étudier leur passage à l'échelle, i.e. le gain en temps lorsqu'on augmente le nombre d'unités de calcul. Ces algorithmes seront d'abord testés en imagerie anatomique 3D à haute résolution (400 μm isotrope) à 7 T. Puis, l'extension 3D+temps aux examens d'IRMf sera qualifiée sur 5 min d'examen au repos à une

cadence d'1 volume toutes les 2 sec. Le problème de reconstruction 3D+t pourra être appréhendé d'abord comme une succession de problèmes 3D puis comme un problème 4D [15]. Enfin, dès que l'aimant Iseult à 11.7 T sera accessible à l'investigation chez l'Homme (en 2020), nous pourrons tester et valider les algorithmes développés sur de l'imagerie anatomique à 200 μm isotrope.

Pour rendre ces recherches accessibles à la communauté internationale, les développements seront intégrés à PiSAP (<https://github.com/neurospin/pisap>), le logiciel que nous développons dans le projet COSMIC, qui pourra être pérennisé grâce au recrutement récent de Samuel Farrens (IRFU/CosmoStat), sur un poste d'ingénieur scientifique CEA (*Data Scientist*).

Références

- [1] EJ Candès, J Romberg and T Tao. **Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information.** *IEEE Trans on Info Th.* 52(6):489–509, 2006.
- [2] M Lustig, D Donoho and JM Pauly. **Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging.** *Magn Reson Med.* 58(6): 1182–95, 2007.
- [3] JP Haldar, D Hernando and ZP Liang. **Compressed sensing MRI with random encoding.** *IEEE Trans on Med Imag.* 30(4):893–903, 2011.
- [4] G Puy, J Marques, R Gruetter, JP Thiran and D Van De Ville. **Spread spectrum magnetic resonance imaging.** *IEEE Trans on Med Imag.* 31(3):586–598, 2012.
- [5] N Chauffert, P Ciuciu, J Kahn and P Weiss. **Variable density sampling with continuous trajectories.** *SIAM J. Imag Sci.* 7(4):1962-92, 2014.
- [6] N Chauffert, P Weiss, J Kahn and P Ciuciu. **A projection algorithm for gradient waveform design in Magnetic Resonance Imaging.** *IEEE Trans on Med Imag.* 35(9):2026-39, 2016.
- [7] C Boyer, N Chauffert, P Ciuciu, J Kahn and Weiss. **On the generation of sampling schemes for magnetic Resonance Imaging.** *SIAM J. Imag Sci.* 9(4):2039-72, 2016.
- [8] C Lazarus, P Weiss N Chauffert, F Mauconduit, L El Gueddari, CA Vignaud and P. Ciuciu. **Distribution-controlled and optimally spread sampling trajectories for accelerated Magnetic Resonance Imaging.** *Submitted to Nature Biomedical Engineering*, Nov, 2017.
- [9] H Cherkaoui. **2D Magnetic Resonance Image Reconstruction in Compressed Sensing.** Msc Thesis report, September 2017.
- [10] I Khalidov, J Fadili, F. Lazeyras, D Van De Ville, M Unser. **Activelets: Wavelets for sparse representation of hemodynamic responses.** *Signal Proc.* 91(12):2810-21, 2011.
- [11] P Ciuciu, JB Poline, G Marrelec, J Idier, C Pallier, H Benali. **Unsupervised robust nonparametric estimation of the hemodynamic response function for any fMRI experiment.** *IEEE Trans on Med Imag.* 22(10):1235-51, 2003.
- [12] PL Combettes and JC Pesquet. **Proximal splitting methods in signal processing.** *Fixed-point algorithms for inverse problems in science and engineering*, pp. 185-212, 2011.
- [13] L Chaari, JC Pesquet, A Benazza-Benyahia and P Ciuciu. **A wavelet-based regularized reconstruction algorithm for SENSE parallel MRI with applications to neuroimaging.** *Med Image Anal.* 15(2):185-201, 2011.
- [14] L Chaari, P Ciuciu, S Mériaux and JC Pesquet. **Spatio-temporal wavelet regularization for parallel MRI reconstruction : application to functional MRI.** *MAGMA.* 27(6):509-29, 2014.
- [15] L El Gueddari, C Lazarus, H Carrié, A Vignaud and P Ciuciu. **Self-calibrating nonlinear reconstruction algorithms for variable density sampling and parallel reception MRI.** Sub. to the 15th IEEE Inter Symp on Biomed Imag, Oct. 2017.
- [16] S Ramani, Z Liu, J Rosen, JF Nielsen, JA Fessler. **Regularization parameter selection for nonlinear iterative image restoration and MRI reconstruction using GCV and SURE-based methods.** *IEEE Trans on Imag Proc.* 21(8):3659-72, 2012.