

Deep-learning enhanced Compton camera imaging for nuclear medicine

Mots clefs : Deep learning, blind deconvolution, medical imaging, Monte Carlo simulations

Résumé :

Très peu d'études mêlant apprentissage profond et imagerie SPECT avec une caméra Compton (CC) ont été réalisées à ce jour. La CC a un potentiel très fort pour augmenter significativement l'efficacité de détection des photons gamma (de plus d'un ordre de grandeur) en imagerie nucléaire, et pourrait avoir un rôle clé pour la radiothérapie vectorisée.

Contexte scientifique :

L'imagerie gamma, une technologie bien maîtrisée en médecine nucléaire, fait face à des nouveaux défis liés notamment à des nouvelles applications. On peut mentionner le besoin d'augmenter la sensibilité afin de diminuer la dose ou le temps d'acquisition, la faible résolution, l'imagerie simultanée de plusieurs radionucléides et l'utilisation de nouveaux radionucléides. À titre d'exemple, le contrôle de l'alpha thérapie ciblée représente un défi en raison des faibles activités administrées et de l'émission multi-gamma à des énergies hautes. Dans ce contexte, la caméra Compton est de plus en plus étudiée [1,2,3]. Elle permettrait d'augmenter significativement l'efficacité de détection (de plus d'un ordre de grandeur [4]) et d'étendre considérablement la gamme de radionucléides utilisées. La physique des interactions photons-matière impose des limites aux détecteurs actuels qui ne peuvent être dépassées autrement que par un traitement optimisé des données et par des algorithmes de reconstruction tomographique incluant de a priori adapté. Cet a priori sur les images peut être apporté par l'apprentissage profond ([5,6]).

Objectifs :

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'apport de l'apprentissage profond dans la reconstruction d'images caméra Compton et sa capacité d'augmenter la qualité de l'image par rapport aux techniques standard utilisées en médecine nucléaire dans des conditions thérapeutiques. Pour ce faire, le doctorant aura la tâche de proposer, implémenter et tester des algorithmes de reconstruction tomographique incluant des réseaux de neurones.

Verrous scientifiques :

La plupart des radiotraceurs utilisés en médecine nucléaire émettent à des énergies relativement faibles pour lesquelles l'effet Doppler induit des grandes incertitudes sur la mesure d'énergie, conduisant à une faible résolution spatiale dans les images. La correction de PSF telle que proposée jusqu'à présent conduit à des images bruitées et avec des artefacts, d'autant plus que l'estimation précise de la PSF est impossible en particulier pour des faibles activités administrées. Il s'agira dans cette thèse de développer des techniques de déconvolution aveugle par réseaux de neurones.

Une modélisation précise de la réponse des systèmes d'imagerie caméra Compton via simulations Monte Carlo est essentielle [7,8]. Nous évaluerons les méthodes développées dans cette thèse avec différentes technologies de détecteurs, semi-conducteurs (ex. CEA LETI, détecteur CZT) et scintillateurs (ex. prototype MACACO [9], détecteur LaBr3 ou Damavan imaging, détecteur CeBr3). Nous nous intéresserons à des radio-nucléides classiques (dont 131I) mais aussi à des nouveaux candidats pour la radio-thérapie dont 225Ac qui émet des rayons gamma de plusieurs énergies et en faible quantité.

Contributions originales attendues :

- Étude et implémentation d'architectures de réseaux de neurones pour la déconvolution aveugle des images en imagerie Compton.
- Comparaison de différentes technologies de détecteurs du point de vue du potentiel final d'imagerie.
- Comparaison de différentes techniques d'apprentissage profond (post-traitement par déconvolution aveugle, reconstruction end-to-end).
- Test et évaluation sur données simulées pour des radio-traceurs disponibles au Centre Léon Bérard de Lyon.

Points forts :

Notre équipe dispose d'une expertise reconnue en reconstruction d'images caméra Compton, en simulation Monte Carlo de données réalistes et en apprentissage profond pour les problèmes inverses. Les liens avec le Centre Léon Bérard et des contacts avec des laboratoires d'instrumentation, nous permettent d'envisager l'application en médecine nucléaire. La déconvolution de PSF est essentielle pour la caméra Compton comme pour les modalités classiques d'imagerie nucléaire TEP et SPECT. Les méthodes développées dans cette étude pourront être appliquées à ces modalités largement répandues.

Programme de recherche :

Des données seront simulées à l'aide du module Caméra Compton ([8]) développé dans GATE à CREATIS. Nous pourrions nous appuyer sur le modèle Monte Carlo développé et validé avec des données expérimentales d'un prototype basé sur des matériaux scintillateurs (MACACO, [9]), dans le cadre d'une collaboration en cours. Les reconstructions seront effectuées avec le code de reconstruction CORESI développé à CREATIS ([7,10]).

L'un des principaux objectifs de ce travail sera d'étudier et d'implémenter différentes architectures de réseaux de neurones ayant pour but la déconvolution aveugle des images reconstruites afin d'améliorer significativement la résolution spatiale.

Profil du candidat recherché :

Master 2 ou école d'ingénieur.

Compétences attendues : IA, mathématiques appliquées, physique médicale, informatique, traitement d'image

Compétences techniques : Python (Tensorflow, Pytorch)

Un très bon niveau d'expression écrite et orale en français et en anglais est attendu. Des qualités relationnelles sont requises ainsi que de la rigueur et de la curiosité scientifique.

Perspectives professionnelles :

Enseignant-chercheur ou chercheur ; R&D dans l'industrie.

Compétences développées

- Apprentissage profond pour les problèmes inverses
- Modélisation, simulations
- Savoir-faire méthodologique
- Gestion de projet dans un environnement multi-disciplinaire

Pour candidater : merci d'envoyer CV, lettre de motivation et relevés de notes (au moins pour les deux dernières années) aux adresses indiquées en en-tête.

Références bibliographiques :

[1] E.A. Frame et al, "Coded Aperture and Compton Imaging for the Development of Targeted Alpha-Particle Therapy", arxiv preprint 2022

[2] J. Caravaca et al., "Compton and Proximity Imaging of Ac In Vivo With a CZT Gamma Camera: A Proof of Principle With Simulations." IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences 6.8 (2022): 904-915.

[3] Omata et al. "Multi-modal 3D imaging of radionuclides using multiple hybrid Compton cameras." Scientific Reports 12.1 (2022): 2546

[4] M. Fontana et al. "Compton camera study for high efficiency SPECT and benchmark with Anger system." *Physics in Medicine & Biology* 62.23 (2017): 8794

[5] W. Baines et al, "Deep learning for 2D passive source detection in presence of complex cargo", Inverse Problems 2020.

[6] G. Daniel et al, "Application of Deep Learning algorithm to Compton imaging of radioactive point sources with a single planar CdTe pixelated detector", Nuclear Engineering and Technology, 2021.

[7] Y. Feng et al., "Influence of Doppler broadening model accuracy in Compton camera list-mode MLEM reconstruction", Inverse Problems in Science and Engineering 29 (13) (2021).

[8] A. Etxebeeste et al., "CCMod: a GATE module for Compton camera imaging simulation", *Physics in Medicine & Biology* 66(12) (2021).

[9] E. Muñoz et al., "Performance evaluation of MACACO: a multilayer Compton camera", *Physics in Medicine & Biology* 62(18) (2017)

[10] V. Maxim et al., "Probabilistic models and numerical calculation of system matrix and sensitivity in list-mode MLEM 3D reconstruction of Compton camera images", *Physics in Medicine & Biology* 12(4) (2015)