

CT Registration-Derived Lung Function Imaging

Abstract

The function of the lungs is achieved through the processes of ventilation and perfusion. Optimal matching of ventilation and perfusion ensures efficient gas exchange. However, localized and heterogeneous impairment in alveolar ventilation is observed in several pulmonary diseases, particularly as a consequence of mechanical alterations in the lung tissue and airways. Yet, local alterations in lung biomechanics are not detected by standard pulmonary function tests. Computed tomography is the reference method for lung imaging, due to its ability to resolve detailed parenchymal morphology, and to its wide accessibility. Because the change in local gas content with inflation modifies the x-ray attenuation of the lung parenchyma, CT can inform on the regional lung volume change between images acquired at different inflation states. Nonetheless, since the 3D morphology of the lung also changes with volume, the lung images need to be precisely isolated from surrounding tissue and matched or registered. In this thesis, the application of CT registration-based functional imaging (CTFI) is investigated in the context of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and acute respiratory distress syndrome (ARDS). These two major lung diseases are characterized by regional mechanical inhomogeneity and a significant public health impact. First, we examined the relation between CTFI and global lung function, gas exchange, exercise capacity and symptoms in COPD subjects. Subsequently, the capacity of CTFI parameters in clustering ARDS patients was investigated. This analysis resulted in identification of three subgroups, one of which had a 3.7 times higher risk of mortality. Finally, a joint deep learning-based segmentation and registration algorithm is presented that aims to fully automate the image processing framework for CTFI. While the results obtained are promising, further research is needed to optimize the computational requirements and validate the model's performance on larger datasets to assess the generalizability. In conclusion, this work investigated the value of CTFI in describing regional lung function and providing insights into major lung disease mechanisms. It highlights the potential of CTFI in enabling personalized treatment strategies, disease phenotyping, and offers a fully automated framework. As we strive to refine our methods, expand our datasets, and address remaining challenges, the future of CTFI holds great promise for significantly improving patient care and outcomes in respiratory disease.

Keywords : Computed Tomography Ventilation Imaging, Chronic Obstructive Pulmonary Disease, Acute Respiratory Distress Syndrome, Image Registration, Image Segmentation, Deep-learning

Résumé

La fonction des poumons est réalisée à travers les processus de ventilation et de perfusion. Une correspondance optimale entre ventilation et perfusion assure un échange gazeux efficace. Cependant, une altération localisée et hétérogène de la ventilation alvéolaire est observée dans plusieurs maladies pulmonaires, en particulier à la suite d'altérations mécaniques du tissu pulmonaire et des voies respiratoires. Néanmoins, les tests standard de fonction pulmonaire ne détectent pas les altérations locales de la biomécanique pulmonaire. La tomodensitométrie est la méthode de référence pour l'imagerie pulmonaire, grâce à sa capacité à représenter une morphologie parenchymateuse détaillée et à sa grande accessibilité. Parce que le changement de contenu gazeux local avec l'inflation modifie l'atténuation des rayons X du parenchyme pulmonaire, la CT peut informer sur le changement de volume pulmonaire régional entre les images acquises à différents états d'inflation. Cependant, puisque la morphologie 3D du poumon change également avec le volume, les images de poumon doivent être précisément isolées des tissus environnants et appariées ou recalées. Dans cette thèse, l'application de l'imagerie fonctionnelle basée sur le recalage d'image CT (CTFI) est étudiée dans le contexte de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) et du syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA). Ces deux principales maladies pulmonaires sont caractérisées par une inhomogénéité mécanique régionale et ont un impact significatif sur la santé publique. Dans un premier temps, nous avons examiné la relation entre CTFI et la fonction pulmonaire globale, l'échange gazeux, la capacité à l'exercice et les symptômes chez les sujets atteints de BPCO. Dans un second temps, la capacité des paramètres CTFI à regrouper les patients SDRA a été étudiée. Cette analyse a conduit à l'identification de trois sous-groupes, dont l'un avait un risque de mortalité 3,7 fois plus élevé. Enfin, un algorithme d'apprentissage profond est présenté, effectuant de manière conjointe la segmentation et le recalage d'image, visant à automatiser entièrement le processus de traitement d'image pour CTFI. Bien que les résultats obtenus soient prometteurs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les besoins computationnels et valider la performance du modèle sur des bases de données plus vastes afin d'évaluer sa capacité de généralisation. En conclusion, ce travail a exploré l'intérêt du CTFI dans la caractérisation de la fonction pulmonaire régionale et apporte un éclairage sur les mécanismes des maladies pulmonaires majeures. Il met en évidence le potentiel de CTFI pour permettre des stratégies de traitement personnalisées, le phénotypage des maladies, et propose une solution entièrement automatisée. Comme nous continuons à perfectionner nos méthodes, à élargir nos bases de données et à relever les défis restants, l'avenir du CTFI semble prometteur pour une amélioration notable de la prise en charge et du devenir des patients atteints de maladies respiratoires.

Mots-clés : Imagerie de la ventilation par CT, Bronchopneumopathie Chronique Obstructive, Syndrome de Détresse Respiratoire Aiguë, Segmentation d'image, Recalage d'image, Apprentissage Profond

