

Analyse topologique d'images spatio-temporelles 4D par hiérarchies morphologiques

Laboratoire et équipe d'accueil : Laboratoire GREYC - UMR 6072, Équipe IMAGE

Encadrants : Yukiko Kenmochi (CR CNRS), Olivier Lézoray (PR Univ. Caen)

Courriels : yukiko.kenmochi@unicaen.fr, olivier.lezoray@unicaen.fr

Collaboration : Nicolas Passat (PR Univ. Reims Champagne-Ardenne)

Durée : 5-6 mois (et éventuelle poursuite en thèse)

Mots-clefs : Analyse topologique, Images 4D, Topologie discrète, Morphologie mathématique, Homologie persistente

Contexte et enjeux

Aujourd'hui, les séquences d'images tridimensionnelles (3D) sont utilisées dans de nombreux domaines scientifiques, tels que la science des matériaux, la médecine et la biologie. Un défi lié à ces images spatio-temporelles 4D est de détecter automatiquement les changements structurels (des objets) dans les images 3D au fil du temps. Par exemple, en science des matériaux, les géomécaniciens s'intéressent à l'étude de la cinématique d'un assemblage de particules pour modéliser les déformations complexes des matériaux, telles que les bandes de cisaillement. L'approche expérimentale combinée à l'imagerie 3D par tomographie à rayons X (CT) leur permet d'acquérir des séquences de scans 3D de telles déformations des matériaux (voir la figure 1 pour un cas de bande de cisaillement), où ils étudient l'évolution du réseau de particules en contact [1, 2].

Parmi les différents types de changements survenant dans les séquences d'images 3D, nous nous concentrons sur les changements topologiques, qui sous-tendent d'autres informations géométriques. Ces problématiques topologiques dans l'analyse d'images sont cruciales : comprendre la topologie des objets dans les images et leur évolution dans le temps est une propriété souhaitable dans de nombreuses applications de traitement d'images. Ces questions topologiques ont reçu peu d'attention jusqu'à présent. L'objectif de ce stage est de quantifier les propriétés topologiques et de proposer de nouvelles méthodes pour détecter au mieux ces changements topologiques.

État de l'art

À notre connaissance, les images en 4 dimensions (4D, c'est-à-dire 3D+temps) sont rarement prises en compte. En particulier, il est difficile d'utiliser des paradigmes d'apprentissage profond en raison des besoins en mémoire induits par la taille élevée des données et la rareté des ensembles de données 4D disponibles (a fortiori annotés).



FIGURE 1 – Coupes transversales d'images 3D par tomographie à rayon X (CT) à différents moments d'une séquence d'un échantillon cylindrique déformé, acquises lors d'un test de compression triaxiale qui induit une bande de cisaillement.

En outre, les informations géométriques et topologiques 4D ne sont généralement pas prises en compte dans l'analyse des séquences d'images 3D ; en effet, la dimension temporelle est généralement ignorée, ou seules deux images consécutives sont prises en compte. Cependant, la prise en compte de la topologie 4D présente l'avantage suivant : les particules 3D rigides qui se déplacent dans le temps peuvent être considérées comme des tubes en 4D. L'évolution du réseau de particules 3D en contact peut alors être interprétée comme la manière dont ces tubes 4D s'entrecroisent. Notre question sera donc de savoir comment mesurer la complexité topologique de ces tubes 4D entrelacés.

Parmi les divers descripteurs et invariants topologiques pour les objets dans les images en niveaux de gris, l'homologie persistente, qui a été récemment popularisée et largement utilisée dans divers domaines pour étudier la forme et la structure des données, permet de définir des nombres de Betti persistents, mais aussi d'observer l'évolution des groupes d'homologie en fonction des niveaux de gris [3]. Toutefois, ces descripteurs numériques ou vectoriels n'offrent pas une information complète pour détecter les changements topologiques dans une séquence d'images. Pour pallier cette lacune, des descripteurs topologiques arborescents sont couramment utilisés pour caractériser les changements topologiques dans les images en niveaux de gris [4]. Dans cette optique, l'arbre topologique des formes [5], récemment proposé pour la simplification topologique des images en niveaux de gris sur la base de la morphologie mathématique, du fait un temps de calcul raisonnable pour sa construction [6], peut constituer un point de départ pertinent pour ce stage.

Objectives

L'objectif de ce stage sera de développer des outils pour caractériser et quantifier les changements topologiques dans les images spatio-temporelles 4D dans le contexte d'application de la science des matériaux (cf. Figure 1). Plus concrètement, notre objectif n'est pas seulement d'évaluer le mouvement des grains individuels, mais aussi d'analyser les contacts entre eux. En particulier, nous nous intéressons à la manière dont les contacts entre les grains évoluent dans le temps en fonction de leurs mouvements. À cette fin, nous utiliserons l'arbre topologique des formes [5], un descripteur topologique récemment proposé et basé sur des hiérarchies morphologiques. Pour commencer, nous construirons un arbre topologique de formes pour chaque image 3D, et nous comparerons les arbres pour identifier leurs différences. Nous étudierons ensuite le suivi temporel des structures topologiques avec des contraintes géométriques et topologiques supplémentaires.

L'intégration des développements dans la bibliothèque Higr (Hierarchical Graph Analysis) [7] est envisagée.

Profil

Nous recherchons un(e) étudiant(e) très motivé(e) de Master 2/dernière année d'école d'ingénieur en informatique ou en mathématiques appliquées. Les candidats doivent être à l'aise avec la programmation en C++ et python.

Application

Pour postuler, envoyer par email aux encadrants un dossier qui contient un CV, une lettre de motivation, les relevés de notes des deux dernières années de formation, et éventuellement des lettres de recommandation ou des noms de référence.

References

- [1] Edward Andò and Gioacchino Viggiani. On the ease of experimental access to deformation entities in granular assemblies. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 52(2):44–51, 2018.
- [2] Rui Wang, Gustavo Pinzón, Edward Andò, and Gioacchino Viggiani. Modeling Combined Fabric Evolution in an Anisometric Granular Material Driven by Particle-Scale X-Ray Measurements. *Journal of Engineering Mechanics*, 148(1):04021120, January 2022.
- [3] Herbert Edelsbrunner and John Harer. *Computational Topology - An Introduction*. American Mathematical Society, 2010.
- [4] Laurent Nagman and Hugues Talbot. *Mathematical Morphology: from theory to applications*. ISTE-Wiley, 2010.
- [5] Nicolas Passat, Julien Mendes Forte, and Yukiko Kenmochi. Morphological hierarchies: A unifying framework with new trees. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 65(5):718–753, August 2023.
- [6] Julien Mendes Forte, Nicolas Passat, and Yukiko Kenmochi. Building the topological tree of shapes from the tree of shapes. In *International Conference on Discrete Geometry and Mathematical Morphology*, pages 271–285, 2024.
- [7] Benjamin Perret, Giovanni Chierchia, Jean Cousty, Silvio J. F. Guimarães, Yukiko Kenmochi, and Laurent Najman. Higr: Hierarchical graph analysis. *SoftwareX*, 10:100335, 2019.