

Analyse de forme a priori pour la segmentation des torons dans les images tomographiques

Prior Shape Analysis for Yarn Segmentation in XCT images

Hafsa El Herichi^{1,2,3}, Arturo Mendoza¹, Yanneck Wielhorski¹, Hugues Talbot² et Stéphane Roux³

1 : Safran Group

e-mail : hafsa.el-herichi@safrangroup.com, arturo.mendoza-quispe@safrangroup.com et
yanneck.wielhorski@safrangroup.com

2 : CVN

Univ. Paris-Saclay, CentraleSupélec, INRIA
Gif-sur-Yvette

e-mail : hugues.talbot@centralesupelec.fr

3 : LMPS

Univ. Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS
Gif-Sur-Yvette

email : stephane.roux@ens-paris-saclay.fr

Résumé

Cette approche concerne la segmentation automatique de préformes d'aubes en utilisant la tomographie à des résolutions supérieures à 120 μm . L'approche proposée est une analyse 2D orthogonale aux principales orientations des torons (chaîne et trame), permettant l'identification des centres et des sections transversales des torons sur un plan 2D.

La méthode caractérise statistiquement trois propriétés : la forme standard des sections transversales des torons en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP), la fibre neutre continue de chaque toron, et leur arrangement par rapport aux torons voisins. Ces propriétés permettent de proposer une formulation variationnelle pour déterminer des positions optimales des torons.

Les centres des torons sont déterminés sur des plans perpendiculaires à leur orientation moyenne successivement en parcourant l'ensemble du volume d'intérêt, en suivant avec succès environ 1 500 torons sur 900 plans avec un taux de réussite de 95% pour les torons annotés. Ensuite, le processus affine itérativement la segmentation en effaçant la trajectoire segmentée et en resegmentant les torons. Cette méthode montre un intérêt pour l'annotation automatique de textiles à grande échelle.

Abstract

This study addresses the automatic segmentation of textile reinforcements in fan blades using X-ray CT imaging at resolutions above 120 μm . The proposed approach is a scalable 2D analysis orthogonal to the main yarn orientations (warp and weft), involving the identification of yarn centers and cross-sections on a 2D plane.

The method statistically characterizes three properties : the standard shape of yarn cross-sections using Principal Component Analysis (PCA), the continuity of each yarn path, and their arrangement relative to neighboring yarns. These properties are exploited in a variational formulation for optimal yarn positions, displacement from previous planes, and neighbor arrangements.

Yarn center positions are determined over successive planes perpendicular to the mean yarn orientation, successfully tracking around 1,500 yarns over 900 slices with a 95% success rate for annotated yarns. Then the process iteratively refines segmentation by erasing and re-segmenting yarns. This method shows potential for large-scale textile annotation.

Mots Clés : Composites tissés 3D, XCT, segmentation, torons

Keywords : 3D woven composites, XCT, segmentation, yarns

1. Introduction

Ce travail concerne la segmentation automatique de préformes d'aubes de moteurs LEAP de longueurs de plusieurs dizaines de centimètres, tomographiées par rayons-X à des résolutions supérieures à 120 μm . Des travaux précédents ont utilisé diverses approches allant du traitement d'image [1], aux méthodes variationnelles [2, 3], et à l'apprentissage profond [4, 5, 6]. Cependant, ces études se sont concentrées sur des échantillons plus petits, de géométries plus simples et ont utilisé des résolutions bien plus élevées. Ces approches ne sont pas applicables au problème considéré car elles nécessiteraient de meilleures caractéristiques d'image, une initialisation d'annotations trop coûteuse, ou un temps de calcul excessif.

Ainsi, une méthode fondée sur une analyse 2D orthogonale aux principales orientations des torons (chaîne et trame) est proposée. Ici, la segmentation consiste à identifier les centres de torons et les sections transversales sur chaque plan en s'appuyant sur les positions des torons connues du plan précédent. Pour cette étude, seul un sous-ensemble des centres de torons pour une aube a été annoté (manuellement) de manière éparsée.

2. Caractérisation du matériau

La méthode proposée repose sur trois propriétés statistiques du matériau. La première propriété est la forme « standard » de chaque section transversale de toron (pour chaque type de toron). Pour cela, une analyse en composantes principales est utilisée sur des imagerie centrées sur les annotations des torons. Les modes propres obtenus contiennent des caractéristiques uniques et apprenables, qui permettent l'identification de la forme dominante et de certaines de ses variations plus subtiles. Ainsi, la corrélation croisée entre le premier mode propre de chaque type de toron et les images CT génère un champ scalaire dont les valeurs les plus élevées indiquent les positions des centres des torons les plus probables. Dans le but d'identifier les positions les plus probables, un alignement entre le mode principal et l'image tomographique est réalisé en minimisant leur différence quadratique. Seule la partie positive de la différence est utilisée pour se concentrer sur le toron, en ignorant l'arrière-plan visible qui l'entoure.

A partir des annotations disponibles, des histogrammes de différences de positions entre centres de torons annotés, dans des plans consécutifs, ou entre premiers voisins sur un même plan sont établis. Ces histogrammes permettent d'inférer la probabilité de présence des centres à partir de leurs positions dans le plan précédent. Ainsi l'obliquité des trajectoires, et l'ordre hexagonal des torons dans un plan normal constituent respectivement les deuxièmes et troisièmes informations qui seront exploitées dans la suite.

3. Formulation Variationnelle

Une formulation variationnelle incluant trois "énergies" (fig. 1) est construite : la position optimale pour chaque toron selon les modes propres, le déplacement le plus probable par rapport au plan 2D précédent, et la position qui tient compte de l'interaction des torons voisins.

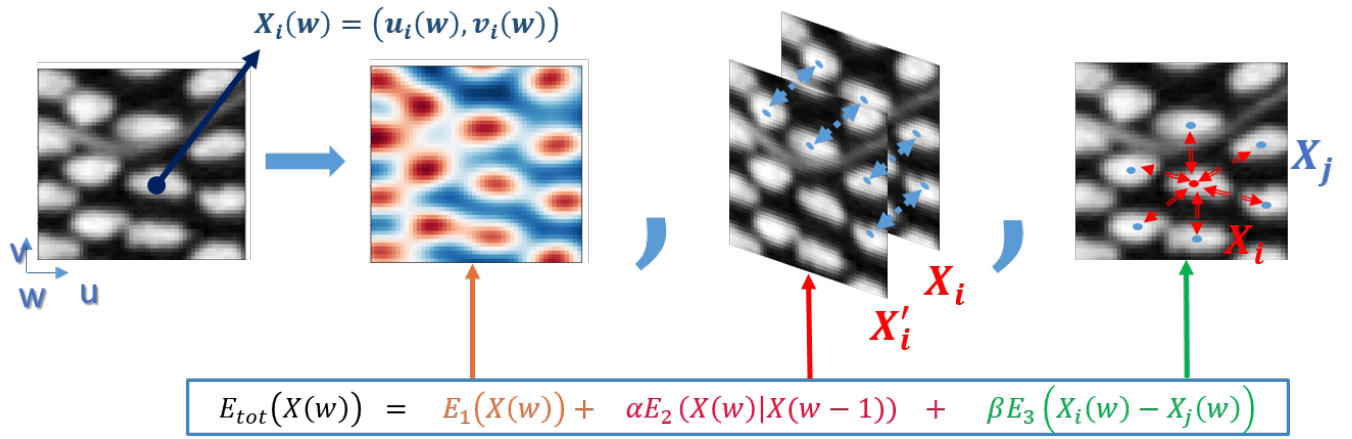


FIG. 1. – Construction de la formulation variationnelle à partir de trois énergies E_1 , E_2 , E_3

La minimisation de l'énergie totale est effectuée pour les plans successifs afin d'obtenir les nouvelles positions des centres des torons. Les positions initiales sont celles du plan 2D précédent et la minimisation est effectuée par un algorithme de Gauss Newton. Cette approche est d'abord appliquée aux torons de chaîne. En suivant environ 1 500 torons sur plus de 900 plans, nous observons un taux de réussite moyen de 95% pour près de 400 torons ayant des annotations manuelles disponibles.

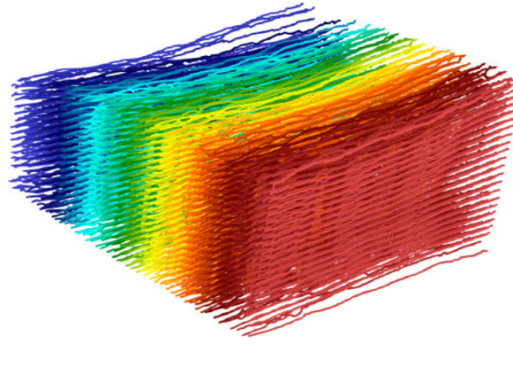
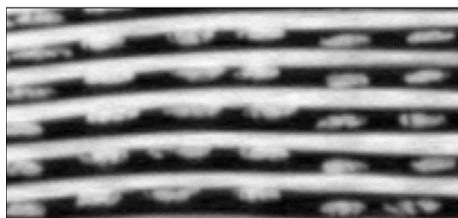


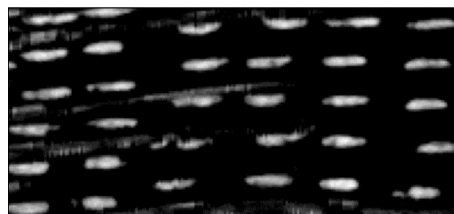
FIG. 2. – Trajectoires des torons de chaîne calculées.

4. Effacement des trajectoires

Les trajectoires estimées des torons de chaîne (fig. 2) sont ensuite "effacées" (fig. 3) de l'image CT initiale, isolant les torons de trame et mettant en évidence d'éventuelles erreurs de segmentation, telles que les torons perdus pendant le suivi. L'image effacée est ensuite utilisée pour segmenter les torons de trame en utilisant la même procédure. Les torons de chaîne sont de nouveau segmentés après l'effacement des torons de trame, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'une solution stationnaire. Cet algorithme de point fixe améliore progressivement la segmentation des torons, et fournit en outre une dernière image 3D de résidus, où les deux familles, chaîne et trame, sont simultanément effacées. L'examen de ce dernier volume permet alors de qualifier le résultat final, ou sanctionner les zones d'ambiguïté.



(a) Image Originale



(b) Image aux torons effacés

FIG. 3. – Effacement des torons de chaîne sur l’image tomographique.

5. Conclusion

Enfin, 1 500 torons de chaîne ont été annotés automatiquement et suivis sur 900 plans, ce qui représente 1 350 000 centres de torons. Étant donné que 11 460 centres de torons ont été utilisés pour l’initialisation (0,85%), la méthode démontre son potentiel pour annoter automatiquement des textiles à grande échelle. La prochaine phase de développement se concentrera sur l’amélioration du processus de suivi des torons de trame après l’effacement des trajectoires de chaîne récupérées, qui constituent aujourd’hui la cause de l’essentiel des erreurs observées lors de la première phase de l’algorithme.

Références

- [1] N. Naouar, E. Vidal-Salle, J. Schneider, E. Maire, P. Boisse « 3D composite reinforcement meso F.E. analyses based on X-ray computed tomography », *Composite Structures* Vol. 132, pp. 1094–1104, 2015, doi : 10.1016/j.compstruct.2015.07.005.
- [2] J. Bénézech, G. Couégnat « Variational segmentation of textile composite preforms from X-ray computed tomography », *Composite Structures* Vol. 230, pp. 111496, 2019, doi :10.1016/j.compstruct.2019.111496.
- [3] V. Pidou-Brion, Y. L. Guilloux « Active yarn meshes for segmentation on X-ray computed tomography of textile composite materials at the mesoscopic scale », *Composite Structures* Vol. 281, pp. 115084, 2022, doi : 10.1016/j.compstruct.2021.115084.
- [4] M. A. Ali, Q. Guan, R. Umer, W. J. Cantwell, T. J. Zhang « Deep learning based semantic segmentation of μ CT images for creating digital material twins of fibrous reinforcements », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 139, pp. 106131, 2020, ISSN 1359835X, doi :10.1016/j.compositesa.2020.106131.
- [5] Y. Sinchuk, Y. Wielhorski, A. Mendoza, S. Blusseau, S. Velasco-Forero « Automatic yarn path extraction of large 3D interlock woven fabrics with confidence estimation », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 186, pp. 108396, 2024, ISSN 1359835X, doi :10.1016/j.compositesa.2024.108396.
- [6] J. Zheng, K. Qian, D. Zhang « Reverse reconstruction of geometry modeling and numerical verification of 2.5D woven composites based on deep learning », *Composite Structures* Vol. 329, pp. 117801, 2024, ISSN 02638223, doi :10.1016/j.compstruct.2023.117801.