Identification et caractérisation des conditions aux limites pour des simulations biomécaniques patient-spécifiques.

Sergei Nikolaev

Résumé de thèse

Objectif: Le traitement du cancer du foie, qui est l'une des maladies les plus courantes dans le monde, s'effectuer souvent par la résection hépatique. Les chirurgiens enlèvent complètement les tumeurs, tout en préservant autant de tissus sains que possible. La tendance principale est d'utiliser des procédures plus sûres avec moins de complications, comme les traitements mini-invasifs. Cependant, au cours de ces procédures, la zone de fonctionnement n'est pas visible directement. Par conséquent, les chirurgiens utilisent diverses modalités d'imagerie médicales, comme les caméras laparoscopiques trois dimensionnels, mais dont le champ de vision est limité. Dans ce cas, une solution complémentaire consiste à utiliser un modèle qui simule le comportement de l'organe réel. Adapté à la partie visible, il prédit les positions des parties invisibles de la zone d'intérêt et montre les emplacements des tumeurs préalablement recalées.

Les conditions aux limites (CAL) sont l'un des éléments cruciaux de la description mécanique d'un système biologique. Pour décrire un problème mécanique, il est nécessaire d'établir ce qui se passe à la surface ou à la limite du domaine d'intérêt. Des CAL soigneusement définies améliorent grandement la capacité prédictive du modèle biomécanique du foie. Par conséquent, le but principal de ce travail est d'estimer les CAL du tissu hépatique.

Malheureusement, dans le cas du foie, les CAL sont principalement données par des ligaments, les vaisseaux sanguins et les organes environnants, dont les propriétés ne peuvent pas être mesurées de manière fiable. Quoi qu'il en soit, le comportement du foie peut être enregistré sur une caméra stéréo, une échographie ou une autre modalité, mais, en raison d'erreurs d'observation, il existe une incertitude dans les données obtenues. L'idée est donc de proposer une approche d'assimilation des données où la déformation du tissu hépatique est utilisée pour estimer les attaches d'organes.

Le système construit: Nous proposons une solution pour estimer les conditions aux limites du foie afin d'avoir une simulation plus précise de sa déformation. Elle est basée sur la combinaison d'un modèle hyperélastique du foie et d'une simulation non linéaire du ligament, initialisée à partir d'un atlas

statistique et corrigé par un processus d'assimilation des données stochastiques. Notre idée comporte deux étapes principales. Dans la première étape, nous créons une approximation initiale généralisée des CAL. Dans la deuxième étape, nous corrigeons l'approximation basée sur des données spécifiques au patient obtenues à partir d'une modalité d'image utilisée en intervention chirurgicale.

Pour simuler le comportement du foie on a choisi le modèle hyperélastique sur la base de matériaux Saint Venant-Kirchhoff. Il est rapide pour effectuer une simulation en temps réel, mais aussi être capable de simuler un comportement non linéaire. Nous avons utilisons aussi des ressorts avec une relation contrainte-déformation non linéaire pour modéliser des attaches du foie. Le point principal ici est que nous prenons en compte les CAL pour améliorer la précision prédictive du modèle. Par conséquent, nous n'avons pas besoin de simuler la déformation exacte des attaches. D'un autre côté, comme elles sont faites d'un matériau mou, nous avons besoin d'un modèle qui prenne en compte leurs déformations.

Pour une première approximation, l'idée générale est d'utiliser un atlas statistique. Malgré le fait que l'atlas ne peut pas nous fournir les propriétés exactes des CAL pour un patient spécifique, il contribue toujours à réduire la zone d'intérêt couverte. Cela permet d'éviter de nombreux calculs redondants, ce qui est crucial pour le processus en temps réel. Généralement, l'atlas contient une forme moyenne qui est générée à partir de la base de données de plusieurs images hépatiques. Pour construire l'atlas, des structures anatomiques segmentées manuellement sur les modèles hépatiques sont utilisées. Les formes de la base de données sont enregistrées de manière déformable sur la forme moyenne, en utilisant une cartographie métrique difféomorphe. Puis les éléments segmentés sont utilisés pour créer des informations statistiques sur l'emplacement des CAL. La procédure de recalage de l'atlas vers le foie du patient utilise la même méthode, mais dans ce cas, la correspondance des foies est utilisée pour transférer les données statistiques sur le modèle de foie cible.

Par contre, pour corriger les CAL, il est nécessaire d'estimer les paramètres par simulation inverse. Pour atteindre cet objectif, nous proposons de représenter les raideurs des ressorts, qui simulent le CAL, comme des variables stochastiques et d'utiliser le filtre de Kalman pour estimer ces paramètres. Le filtre consiste en un processus itératif, calculant les valeurs attendues en fonction des probabilités pour des données et une simulation par éléments finis qui décrit la déformation du foie. Les données initiales pour le filtre sont prises à partir de matériaux préopératoires, puis, pendant la procédure chirurgicale, les valeurs des paramètres sont corrigées. Afin de répondre aux exigences de la chirurgie, le filtre doit effectuer les calculs en temps réel.

En addition, pour réaliser des expériences liées à une simulation stochastique, nous avons implémenté d'un logiciel qui met en oeuvre des approches de filtrage et permet d'estimer diverses caractéristiques du modèle biomécanique. C'est un plugiciel pour le logiciel SOFA, qui traite de la modélisation basée sur la physique, et il s'appelle Optimus.

Les expériences d'estimation et les résultats: Tout d'abord, nous avons décidé de comparer les versions différentes de filtres. Pour les expériences, nous avons pris un objet de forme simple et appliquée des forces périodiques

pour le déformer. Nous avons considéré deux scénarios possibles de conditions aux limites: des conditions fixes et le système des ressorts. Nous avons estimé les coefficients des matériaux et les paramètres du ressort à la frontière ainsi que le temps de calcul. Pour choisir la meilleure solution nous avons comparé quelque version different de filtrage. Par conséquent, nous utilisons un filtrage de Kalman d'ordre réduit, qui diminue la complexité de notre modèle, améliorant ainsi la vitesse de calcul.

Nous avons réalisé des expériences synthétiques pour évaluer l'approche de filtrage. Pour des raisons de simplicité, nous avons décidé de ne pas considérer d'atlas et de se concentrer sur le ligament falciforme. Plusieurs ressorts non linéaires ont émulé les CAL pour le modèle de foie. Pour manipuler le foie, une force périodique a été appliquée. L'approche par filtrage de Kalman corrige généralement les valeurs des paramètres estimés en fonction des informations obtenues à partir des données disponibles. Les paramètres de certains ressorts n'ont pas été bien estimés, mais dans les expériences de validation, le comportement du modèle de foie avec les CAL corrigés était généralement plus proche des données de base qu'avec les approximations initiales. L'erreur entre les différences maximales et moyennes était plus faible après la correction. Par conséquent, le processus de filtrage améliore l'approximation initiale pour simuler plus précisément l'influence des CAL sur le modèle de foie.

Après on fait une expérience pour estimer la précision d'atlas. L'atlas a été créé à l'aide de 15 modèles de foie, et les positions de leurs ligaments respectifs ont été segmentées par un expert. Pour garantir la qualité de l'atlas, un modèle a été sélectionné pour validation. Des statistiques ont été calculées, puis l'atlas a été enregistré sur un modèle ciblé afin de comparer la position moyenne avec la position segmentée. Les résultats montrent une différence moyenne de quelques centimètres. Par conséquent, la moyenne statistique diffère de la position des ligaments segmentés, mais nous pensons pouvoir compenser cet écart en estimant des paramètres légèrement différents lors de l'étape de correction.

Finalement, nous avons réalisé une expérience basée sur des données réelles. Nous avons pris un cadavre humain et simulé la véritable procédure chirurgicale. Nous attachons plusieurs tackers à la surface du foie qui servent comme observations et des points profondes pour valider la différence entre les déformations. Plusieurs images de tomographie par ordinateur ont été acquises au cours de l'expérience. Pour effectuer la manipulation, nous utilisons un outil chirurgical laparoscopique. Pendant la manipulation, nous enregistrons les tackers à l'aide d'une caméra RGB-D. À partir de l'image tomographie par ordinateur, nous reconstruisons le modèle volumique du foie. L'étape finale de l'expérience consiste à effectuer un processus d'assimilation de données et à montrer la différence entre les repères profonds. Nous comparons les cas où seuls les vaisseaux sanguins ont été fixés, avec estimation initiale des ligaments et avec estimation des paramètres des ligaments. Les résultats montrent que la précision s'améliore lorsque nous ajoutons un modèle de ligament et que nous l'estimons ensuite, mais le résultat dépend également de la façon dont nous effectuons le processus de validation, qui peut ne pas être très correct. Cela pourrait aussi dépendre de questions supplémentaires comme les contraintes unilatérales que nous ne

prenons pas en compte.

Conclusion: Dans ce travail, nous avons proposé une nouvelle méthode pour estimer des CAL, basée sur une approche de filtrage de Kalman non linéaire. Les CAL sont présentées comme des ressorts avec des paramètres inconnus. Le filtre les estime en utilisant des informations spécifiques au patient obtenues pendant la chirurgie. L'approximation initiale des CAL est dérivée d'un atlas statistique, construit à partir d'une série de modèles de foie avec des ligaments segmentés.

Travaux publiés

[1] Nikolaev S., Peterlik I., Cotin S. *Correction stochastique des conditions aux limites pendant la chirurgie hépatique.* 2018 Symposium sur la couleur et l'informatique visuelle (CVCS), pp. 1-4, 2018, IEEE

[2] Nikolaev S., Cotin S. *Estimation des conditions aux limites pour modélisation du foie patient spécifique pendant la chirurgie augmentée.* Journal international de radiologie et de la chirurgie assistée par ordinateur, Vol. 15, № 7, pp. 1107-1115, 2020

[3] Mendizabal A., Tagliabue E., Hoellinger T., Brunet J.-N., Nikolaev S., Cotin S. *Simulation basée sur les données pour la chirurgie augmentée.* En: Développement et approches nouvelles en biomécanique et métamatériaux, Chap. 5, pp. 71-96, 2020

[4] Teaniti A., Brunet J.-N., Nikolaev S., Wang C., Edwin B., Cotin S., Elle O. J. *Utilisation de la reconstruction stéréo-laparoscopique de la surface du foie pour compenser la déformation du pneumopéritoine par la modélisation biomécanique.* 2020 Conférence d'humain physiologique virtuel (VPH), pp. 1-2, 2020