

Modélisation et Simulation d'Organes

Avril 2008

Guillaume Saupin

CEA

24 avril 2008

- 1 La simulation médicale
- 2 La simulation des organes
 - Les modèles
 - Les solveurs
- 3 La gestion des contacts
 - Principes
 - Calcul des forces de contact
 - Proposition
 - Vidéo
- 4 Rendu Hatpique
 - Les principes
 - Vidéo

Les enjeux

Permettre l'apprentissage de gestes chirurgicaux

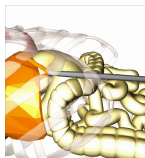
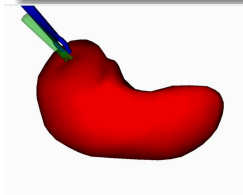
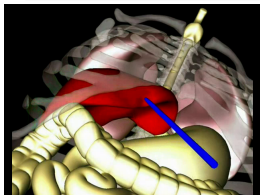
- Réalisme
- Reproductibilité

Alternatives

- Organes synthétiques
- Organes animaux morts

Avantages Simulation

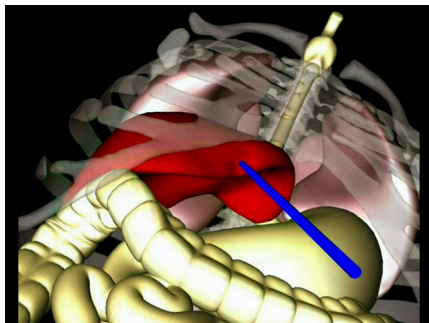
- Souple
- Paramétrable
- Disponible
- Peu coûteux



Les contraintes

Simulation organes déformables

- Comportement physique
- Simulation interactive
- Gestion des contacts



Les étapes de la simulation

Étapes nécessaires à la simulation

- Maillage Volumique
- Calcul de déformations libres - modèle Éléments Finis corotationnel
- Détection de collisions
- Gestions des contacts
- Rendu haptique

Modélisation des organes

État de l'art partiel

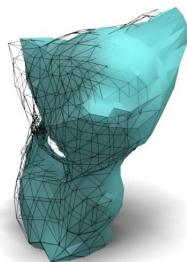
Modèles existants

- Modèle masse-ressort → peu physique
- Modèle par apprentissage → peu physique, limite les déformations simulables
- Modèle éléments finis linéaires → limité aux petits déplacements
- Modèle éléments finis non-linéaires → trop lent
- Modèle éléments finis corotationnels → rapide et physique. Limité aux faibles contraintes

Modèle Éléments Finis

Discrétisation dans l'espace

- Maillage Volumique
- Tétraèdre
- Discrétisation MMC → système matriciel



Modèle Éléments Finis

Discrétisation dans le temps

- Euler Implicite
- Stable, grand pas de temps
- Implique résolution système
- Dimension \rightarrow solveur itératif

Modèle corotationnel

- Grands déplacements
- Raideur pré-calculée

Équation

$$(\mathbf{M} + h\mathbf{B} + h^2\mathbf{K}) d\mathbf{v} = -h^2\mathbf{K}\mathbf{v}_i - h(\mathbf{f}_i + \mathbf{p}_f) + h\mathbf{r}$$

Comment améliorer les performances ?

- Solveur multirésolution
- Déport vers GPU

Solveurs Classiques

Solveurs directs

- Basés sur factorisation LU
 - ▶ Impliquent construction matrices
 - ▶ Matrices creuses
 - ▶ Peu efficaces pour des systèmes complexes

Solveurs itératifs

- Gradient Conjugé
- Particularités →
 - 1 Ne nécessite pas l'assemblage des matrices
 - 2 Rapide
 - 3 Implémentable facilement sur GPU

Solveurs Hiérarchiques

Principes

- Constatation →
 - 1 Gauss-Seidel et Jacobi convergent mais lentement
 - 2 Sauf si solution initiale correcte
 - 3 Meilleur taux de convergence si données peu lisses
- (2) → Utiliser problème simplifié (Maillage grossier)
- (3) → Relaxer le résidu

Outils

- Prolongateur P
- Restricteur R
- $M_{i-1} = R * M_i * P$

Conclusion

Modèle utilisé

- Modèle corotationnel
- Grands déplacements
- Physique pour de faibles contraintes
- Rapide

Solveur utilisé

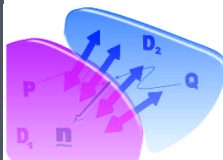
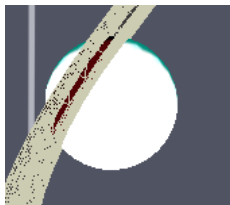
- Gradient Conjugé
- Déporté sur GPU
- Sans assemblages des matrices

La gestion des contacts

Gestion des contacts

Gestion des contacts

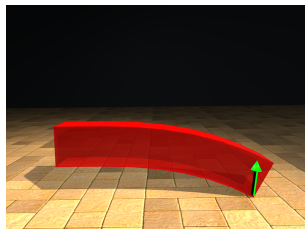
- Principes
 - ① Mouvement libre
 - ② Détection collision
 - ③ Calcul des forces de contact
 - ④ Mouvement contraint
- Calculs des forces
 - ▶ Méthode par pénalité
 - ▶ Méthode par contrainte



Détection de collision

Informations issues de la détection de collision

- Distance d'interpénétration
- Normale au contact



Méthodes par Pénalités

Description

- Principe
 - ▶ Distance interpénétration
 - ▶ Ressort
- Avantages
 - ▶ Simple à mettre en oeuvre
 - ▶ Résolution très rapide
- Inconvénients
 - ▶ Choix des raideurs délicat
 - ▶ Introduit des instabilités
 - ▶ Impose des petits δt
 - ▶ Ne garantie pas la non-interpénétration
 - ▶ Ne modélise pas le couplage entre les contacts

Méthodes par Contraintes

Description

- Principe

- ▶ Lois de Signorini (*contact*) et Coulomb (*frottement*)
- ▶ Construire un système de contraintes → le LCP
- ▶ $\left(\frac{\mathbf{M}}{h^2} + \frac{\mathbf{B}}{h} + \mathbf{K}\right)^{-1} \mathbf{r} = d\mathbf{q}$

- Avantages

- ▶ Physique
- ▶ Stable
- ▶ Respecte le couplage entre les points de contacts
- ▶ Autorise des pas de temps relativement larges

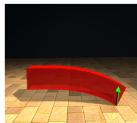
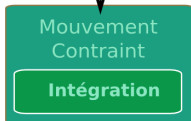
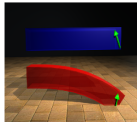
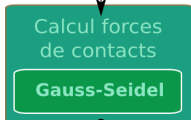
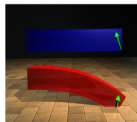
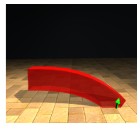
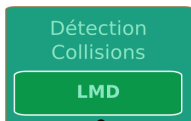
- Inconvénients

- ▶ Nécessité de construire un LCP
- ▶ Nécessité de calculer une partie la matrice de compliance
- ▶ Nécessité de résoudre ce LCP → Gauss - Seidel

Approximation de la compliance

Approximation

- Idée
 - 1 Déformation : modèle corotationnel élémentaire
 - 2 Contact : modèle corotationnel nodal
 - 3 Se ramener par rotation dans la configuration initiale
- Conséquences pratiques
 - ▶ Compliance précalculée
 - ▶ Temps de construction du LCP réduit





Conclusion

Conclusion

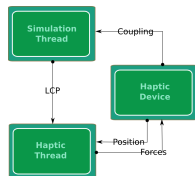
- Simple
- Générique
- Physique - respecte Signorini et Coulomb
- Performances largement accrues

Rendu Haptique

Rendu Haptique

Rendu Haptique

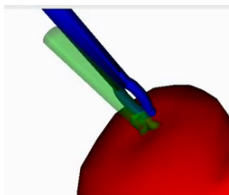
- Contraintes
 - ▶ Insérer l'interface haptique dans la simulation
 - ▶ Fréquence rafraîchissement interface haptique : $> 1\text{KHz}$
- Problèmes
 - ▶ Comment éviter les interpénétrations ?
 - ▶ Fréquence calcul déformation, collision, gestion contacts : 50-100 Hz
- Solutions
 - ▶ Utiliser *god object*
 - ▶ Séparer la boucle haptique
 - ▶ Calcul du retour haptique avec LCP précédent



God Object

Observation

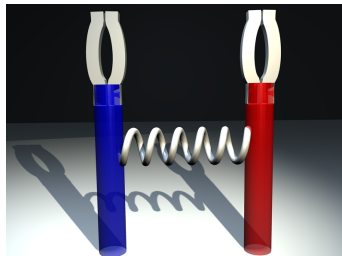
- Observation
 - ▶ Difficile d'empêcher interpénétration sonde haptique
- Solution
 - ▶ Coupler l'interface haptique à un objet virtuel qui subit les contraintes physiques.



Couplage

Rendu Haptique

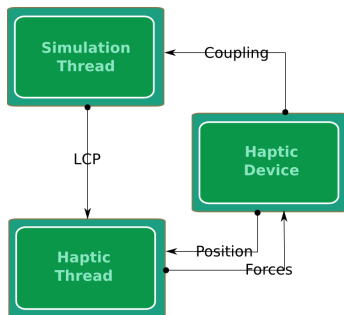
- Ressort - Amortisseur
- Implicite
- $$\left(\frac{M_c}{h^2} + \frac{B_c}{h} + K_c \right) dq_t = \frac{M_c}{h} \dot{q}_{t-1} - K_c q$$

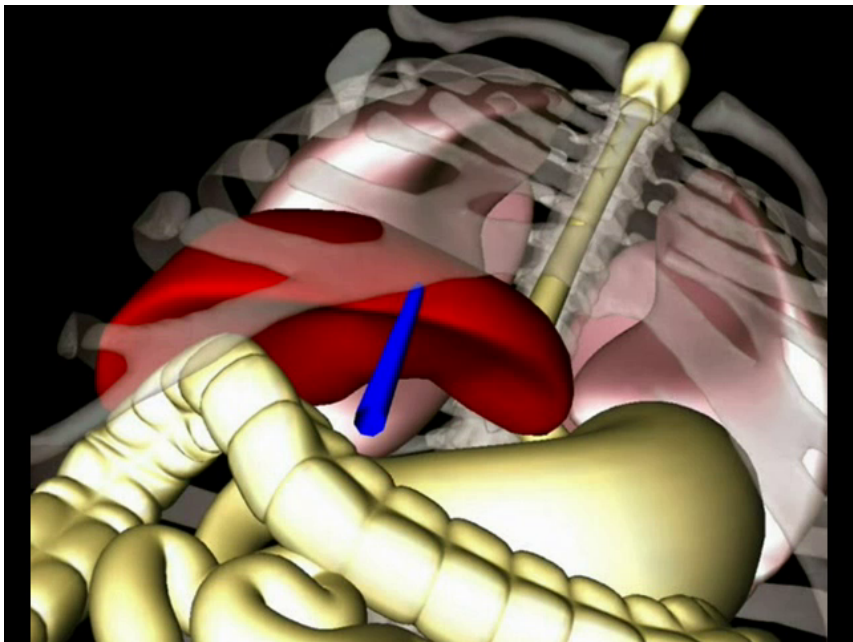


Séparation haptique/physique

Principe

- Haptique 1KHz
- Physique 50Hz
- Échange LCP





Conclusion

Conclusion

- Thread haptique $\sim 1\text{Khz}$
- Rendu haptique satisfaisant
- Problème de contrôle thread haptique

Conclusion Générale

Résultats

- Gestion efficace et physique des contacts
- Début de rendu haptique
- Développements accessibles librement dans SOFA