



Quantification de la qualité d'un geste chirurgical à partir de connaissances a priori

Rémi Wolf

Thèse dirigée par Philippe Cinquin et Sandrine Voros

TIMC-IMAG - Équipe GMCAO

17 juin 2013

- 1 Contexte clinique et scientifique
 - Problématique de la thèse
 - Méthodes d'évaluation existantes
 - Objectifs de la thèse et approche adoptée
- 2 Suivi d'instruments chirurgicaux
 - Méthodes existantes
 - Approche développée
 - Traitement des données et performances
- 3 Analyse de la qualité de gestes chirurgicaux
 - Acquisition des données
 - Analyse de la qualité des gestes
 - Prédiction de la qualité des gestes à partir du suivi d'instruments

Plan

- 1 Contexte clinique et scientifique**
 - Problématique de la thèse
 - Méthodes d'évaluation existantes
 - Objectifs de la thèse et approche adoptée
- 2 Suivi d'instruments chirurgicaux**
 - Méthodes existantes
 - Approche développée
 - Traitement des données et performances
- 3 Analyse de la qualité de gestes chirurgicaux**
 - Acquisition des données
 - Analyse de la qualité des gestes
 - Prédiction de la qualité des gestes à partir du suivi d'instruments

La qualité d'un geste chirurgical : quelle définition ?

Dimensions multiples

- technique
- socio-économique
- éthique

Exemple

- succès de l'intervention
- absence de lésion aux structures adjacentes
- absence d'événement indésirable

La qualité d'un geste chirurgical : quelle définition ?

Dimensions multiples

- technique
- socio-économique
- éthique

Exemple

- respect des indications
- respect des normes de sécurité
- coût pour la société

La qualité d'un geste chirurgical : quelle définition ?

Dimensions multiples

- technique
- socio-économique
- éthique

Exemple

- relation patient-médecin basée sur la confiance
- vécu du patient
- qualité de vie du patient

La qualité d'un geste chirurgical : quelle définition ?

Dimensions multiples

- technique
- socio-économique
- éthique

Définition

La chirurgie la plus **sûre**, la plus **précise**, la **moins invasive** possible, assurant des résultats thérapeutiques et fonctionnels optimaux, avec le moins possible de conséquences négatives à court, moyen et long terme.

La qualité d'un geste chirurgical : quelle définition ?

Dimensions multiples

- technique
- socio-économique
- éthique

Définition

La chirurgie la plus sûre, la plus précise, la moins invasive possible, assurant des **résultats thérapeutiques et fonctionnels optimaux**, avec le moins possible de conséquences négatives à court, moyen et long terme.

La qualité d'un geste chirurgical : quelle définition ?

Dimensions multiples

- technique
- socio-économique
- éthique

Définition

La chirurgie la plus sûre, la plus précise, la moins invasive possible, assurant des résultats thérapeutiques et fonctionnels optimaux, avec **le moins possible de conséquences négatives** à court, moyen et long terme.

Enjeu de la quantification de la qualité des gestes

Contraintes actuelles

- politique de réduction des coûts
- judiciarisation croissante
- évolution rapide des techniques chirurgicales

Réduction des aléas chirurgicaux

- démontrer un niveau de compétence
- réduire la durée de la courbe d'apprentissage
- limiter et corriger les erreurs

Optimisation du geste

- apporter une information supplémentaire au chirurgien,
- la plus pertinente possible,
- au bon moment

Enjeu de la quantification de la qualité des gestes

Contraintes actuelles

- politique de réduction des coûts
- judiciarisation croissante
- évolution rapide des techniques chirurgicales

Réduction des aléas chirurgicaux

- démontrer un niveau de compétence
- réduire la durée de la courbe d'apprentissage
- limiter et corriger les erreurs

Optimisation du geste

- apporter une information supplémentaire au chirurgien,
- la plus pertinente possible,
- au bon moment

Enjeu de la quantification de la qualité des gestes

Contraintes actuelles

- politique de réduction des coûts
- judiciarisation croissante
- évolution rapide des techniques chirurgicales

Réduction des aléas chirurgicaux

- démontrer un niveau de compétence
- réduire la durée de la courbe d'apprentissage
- limiter et corriger les erreurs

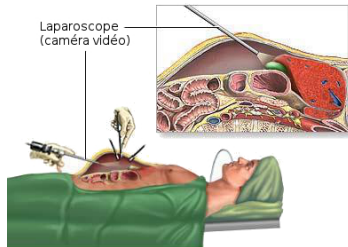
Optimisation du geste

- apporter une information supplémentaire au chirurgien,
- la plus pertinente possible,
- au bon moment

Laparoscopie : définition et spécificités

Chirurgie minimalement invasive

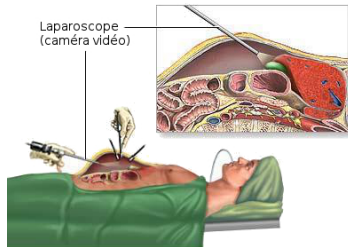
- abord minimal
- geste sous contrôle vidéo
- instruments longs et fins, commande déportée



Laparoscopie : définition et spécificités

Avantages

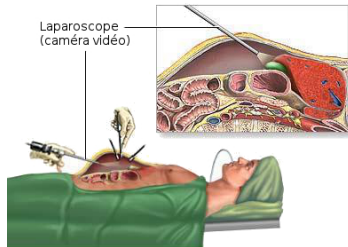
- réduction des douleurs et des saignements
- réduction du temps d'hospitalisation
- bénéfique esthétique



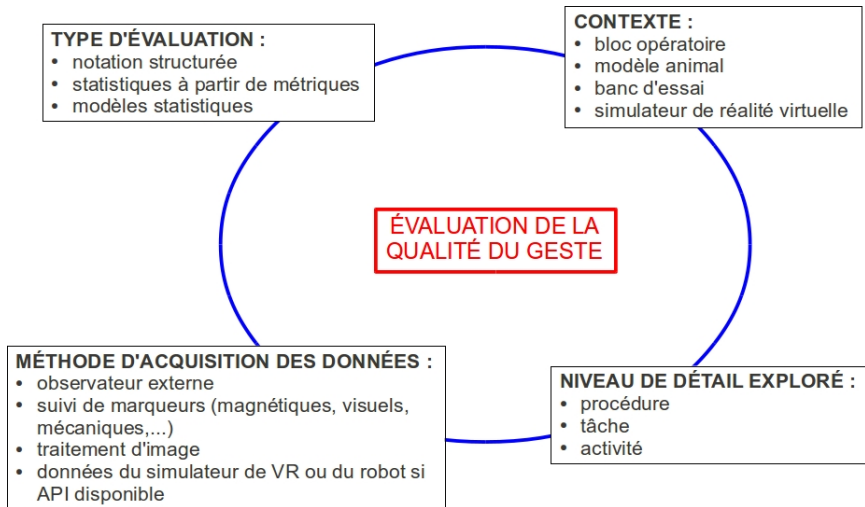
Laparoscopie : définition et spécificités

Limites

- effet pivot (Breedveld et Wentink, 2001)
- vision 2D
- diminution du retour haptique (Bholat et al., 1999)



Composantes de l'évaluation de la qualité du geste



Types d'approches développées

Caractéristiques attendues

- la fiabilité
- la validité
- la faisabilité

Types d'approches développées

Différentes approches

- échelles de notation graduées
- statistiques descriptives
- modèles statistiques

Exemple

OSATS, GOALS, OCHRA,...

ITEM	Not done/ Done incorrectly	Done correctly
<u>CONTROL OF HEMORRHAGE</u>		
1. Applies pressure to stop bleeding first	0	1
2. Asks assistant for suction field	0	1
3. Inspects injury by carefully releasing the IVC	0	1
4. Ensures all equipment needed for repair is at hand before starting	0	1
5. Control of bleeding point (use deBakey forceps/Satinsky clamp or prox/distal pressure)	0	1
<u>REPAIR</u>		
6. Select appropriate suture (4.0/5.0/6.0 polypropylene)	0	1
7. Select appropriate needle driver (vascular)	0	1
8. Select appropriate forceps (deBakey)	0	1
9. Needle loaded 1/3-2/3 from tip 90% of time	0	1

Échelle OSATS (Martin et al., 1997)

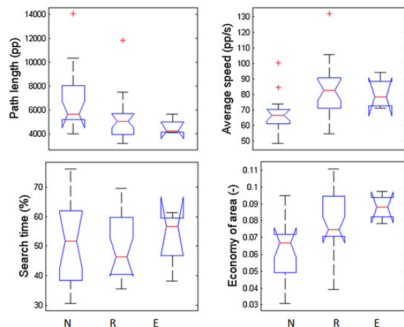
Types d'approches développées

Différentes approches

- échelles de notation graduées
- statistiques descriptives
- modèles statistiques

Exemple

métriques : temps, longueur de trajectoire, nombre de mouvements,...



Oropesa et al., 2013

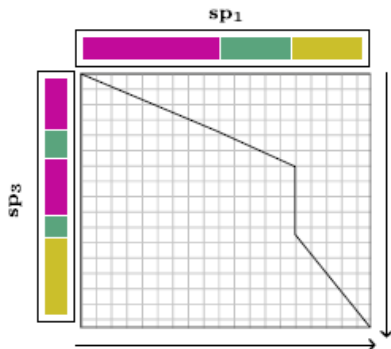
Types d'approches développées

Différentes approches

- échelles de notation graduées
- statistiques descriptives
- modèles statistiques

Exemple

Hidden Markov Models, Dynamic Time Warping,...

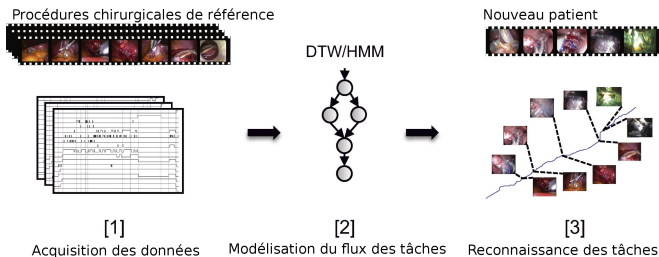


Forestier et al., 2012

Modèles de procédures chirurgicales

Surgical Process Models : propriétés

- décrivent la procédure chirurgicale avec une grammaire spécifique
- niveaux de granularité distincts
- formalisme et outils de modélisation variés



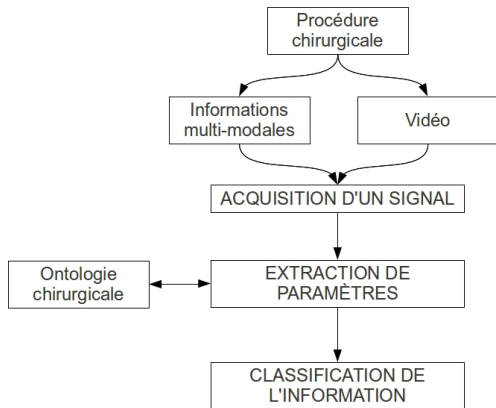
Padoy et al., 2012

Lien entre modélisation et quantification de la qualité en chirurgie

Pourquoi modéliser la procédure chirurgicale ?

- étudier différents paramètres en fonction de la phase de la procédure
- comparaison entre différents déroulés d'une intervention

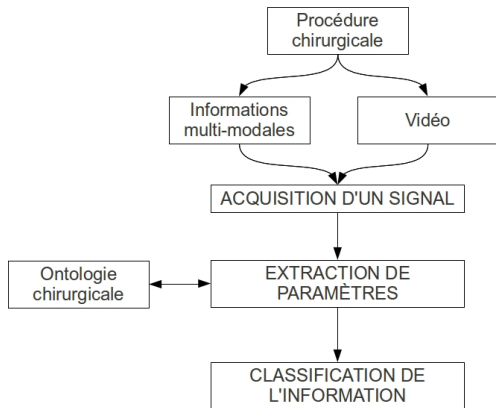
Objectifs et approche choisie pour ce travail



Outils

méthode de suivi de la trajectoire des instruments en laparoscopie

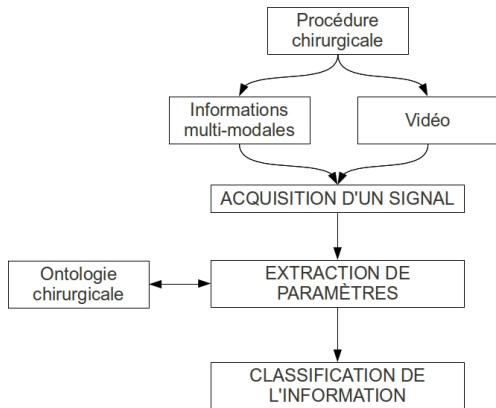
Objectifs et approche choisie pour ce travail



Outils

acquisition de trajectoires pour différents niveaux d'opérateurs, pour des gestes simples

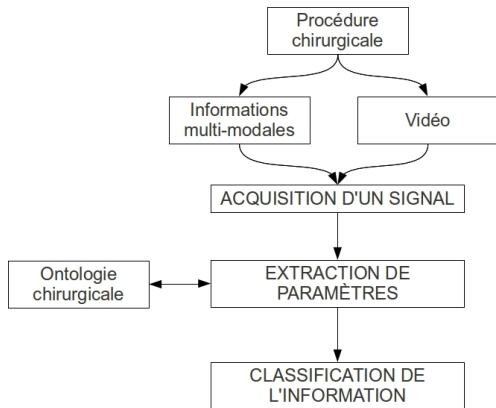
Objectifs et approche choisie pour ce travail



Outils

détermination des métriques pertinentes pour qualifier le geste

Objectifs et approche choisie pour ce travail



Outils

calcul automatique d'un score reflétant la qualité technique du geste

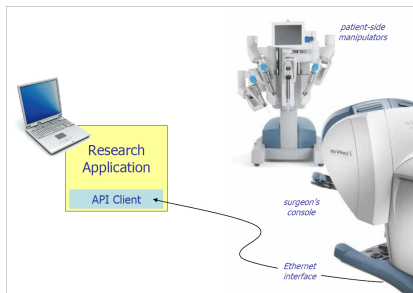
Plan

- 1 Contexte clinique et scientifique
 - Problématique de la thèse
 - Méthodes d'évaluation existantes
 - Objectifs de la thèse et approche adoptée
- 2 Suivi d'instruments chirurgicaux
 - Méthodes existantes
 - Approche développée
 - Traitement des données et performances
- 3 Analyse de la qualité de gestes chirurgicaux
 - Acquisition des données
 - Analyse de la qualité des gestes
 - Prédiction de la qualité des gestes à partir du suivi d'instruments

Méthodes de suivi basées sur des informations non-visuelles

Dépendantes du type d'instrument utilisé

- 1 robots
- 2 simulateurs de réalité virtuelle
- 3 instruments standards



Robot chirurgical (DaVinci)

Données de cinématique
accessibles par l'API

Méthodes de suivi basées sur des informations non-visuelles

Dépendantes du type d'instrument utilisé



- 1 robots
- 2 simulateurs de réalité virtuelle
- 3 instruments standards

Simulateurs de réalité virtuelle

Position de l'instrument dans
l'espace virtuel

Méthodes de suivi basées sur des informations non-visuelles

Dépendantes du type d'instrument utilisé

- 1 robots
- 2 simulateurs de réalité virtuelle
- 3 instruments standards



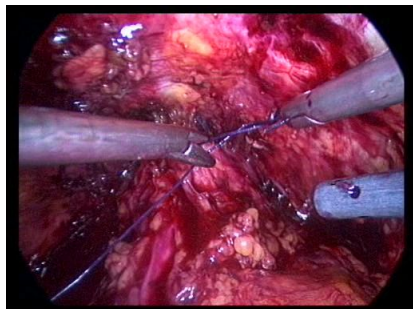
Outils de laparoscopie standards

- localisateurs optiques
- localisateurs acoustiques
- localisateurs magnétiques
- dispositifs mécaniques

Méthodes de suivi basées sur l'image endoscopique

Contraintes

- fond complexe
- occlusions
- reflets spéculaires
- fumée



Problématiques à résoudre

- segmentation de l'instrument
- réduction de l'espace de recherche

Méthodes de suivi basées sur l'image endoscopique

Contraintes

- fond complexe
- occlusions
- reflets spéculaires
- fumée

Objectifs

- fiabilité
- précision
- portabilité
- acceptabilité
- temps réel

Problématiques à résoudre

- segmentation de l'instrument
- réduction de l'espace de recherche

Méthodes de suivi basées sur l'image endoscopique

Contraintes

- fond complexe
- occlusions
- reflets spéculaires
- fumée

Objectifs

- fiabilité
- précision
- portabilité
- acceptabilité
- temps réel

Problématiques à résoudre

- segmentation de l'instrument
- réduction de l'espace de recherche

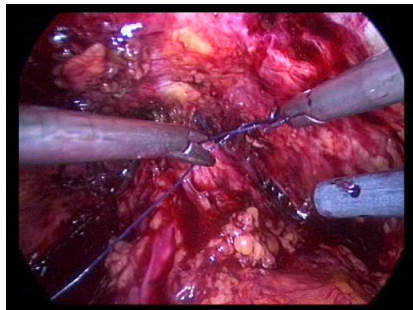
Méthodes de segmentation de l'instrument

Définition

Identification de la zone de l'image correspondant à l'instrument

À partir de primitives
colorimétriques → identification
de la région d'intérêt

À partir de primitives
géométriques → identification
des bords de l'instrument



Réduction de l'espace de recherche de l'instrument

Objectifs

- accélérer le traitement de l'image
- éliminer les fausses détections

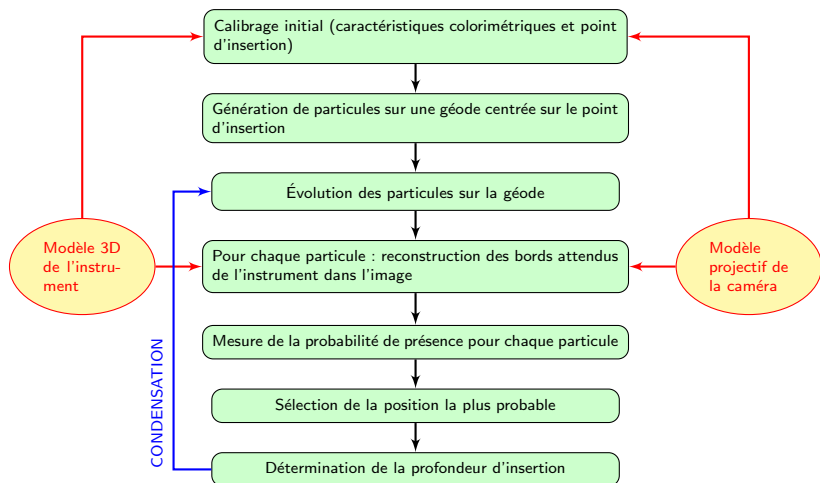
Approche probabiliste

- algorithme de CONDENSATION
- filtre de Kalman

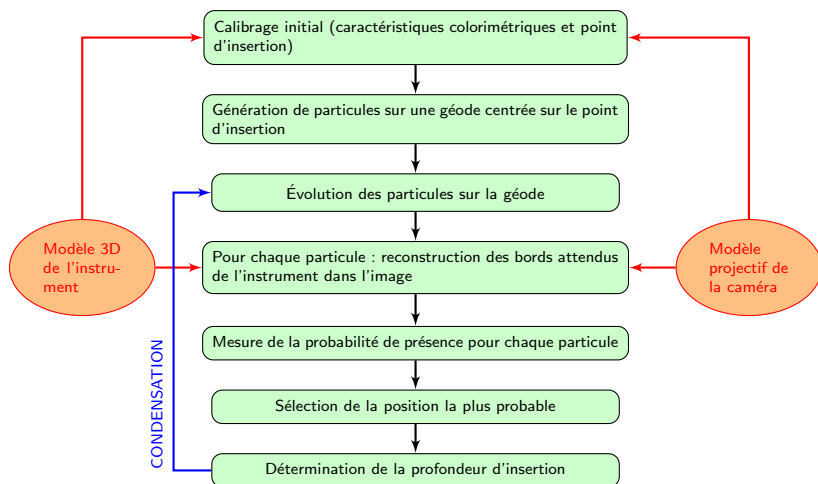
Approche géométrique

- contrainte du point d'insertion
- régions d'intérêt mobiles

Aperçu global de la méthode développée



Aperçu global de la méthode développée



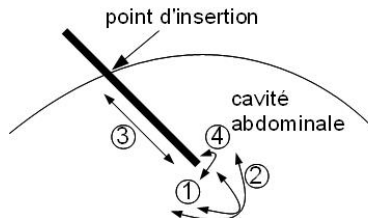
Contrainte du point d'insertion

- globalement fixe dans le repère du patient
- utilisation d'un robot porte-endoscope (ViKy)
- calibrage main-œil du robot et de la caméra (extrinsèque et intrinsèque)

→ connaissance de la position du point d'insertion dans le repère caméra

Intérêt

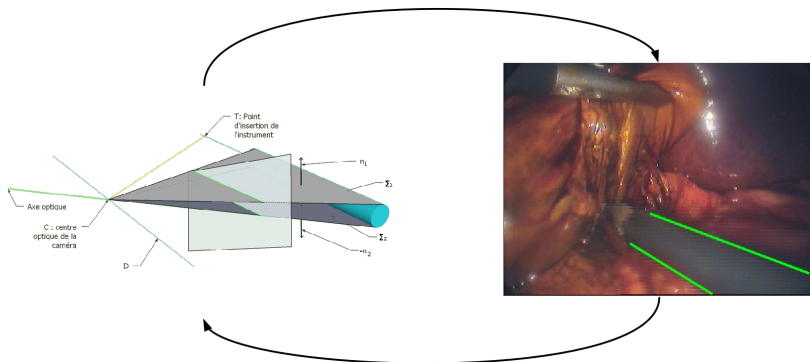
Réduction du nombre de degrés de liberté de l'instrument



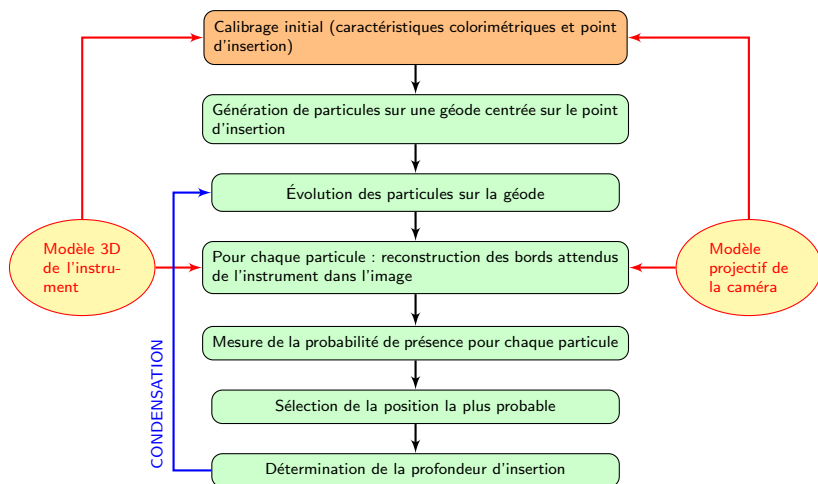
Modèle géométrique de l'instrument

Pré-requis

- cylindre de diamètre fixe connu
- matrices de calibration de la caméra



Aperçu global de la méthode développée



Traitement de l'image



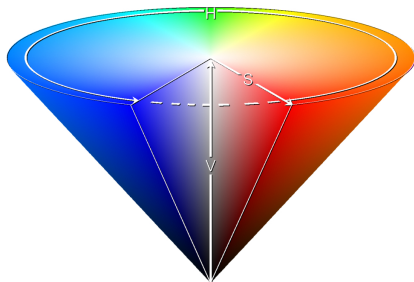
Objectifs

Meilleure stabilité
par rapport aux
conditions
d'illumination

Réduction du bruit
sans flouter les
bords

Détection des
bords significatifs
dans l'image

Changement d'espace colorimétrique



Propriétés

- proche de la perception visuelle naturelle
- teinte et saturation peu sensibles aux variations d'illumination

Changement d'espace colorimétrique



Changement d'espace colorimétrique



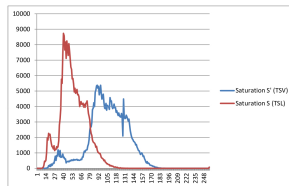
Saturation classique



Saturation modifiée (Doignon, Graebbling et Mathelin, 2005)



Changement d'espace colorimétrique



Saturation classique



Saturation modifiée (Doignon, Graebing et Mathelin, 2005)



Filtrage bilatéral



Enjeu

- diminuer les bruits de mesure
- en préservant les bords

Différents filtres

- filtre de Lee modifié
- filtre bilatéral

Filtrage bilatéral

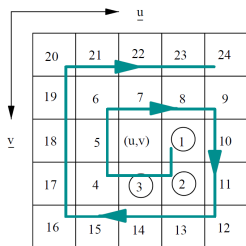


Enjeu

- diminuer les bruits de mesure
- en préservant les bords

Différents filtres

- filtre de Lee modifié (Doignon, Graebling et Mathelin, 2005)
- filtre bilatéral



Filtrage bilatéral

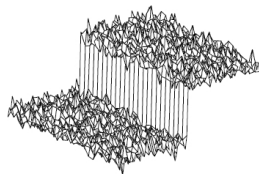


Enjeu

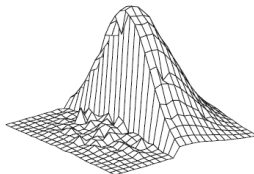
- diminuer les bruits de mesure
- en préservant les bords

Différents filtres

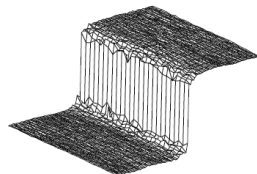
- filtre de Lee modifié
- **filtre bilatéral** (Tomasi et Manduchi, 1998)



(a)



(b)



(c)

Filtrage bilatéral

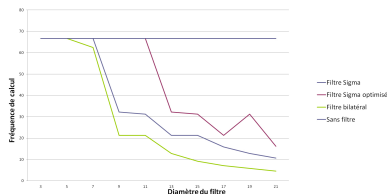


Enjeu

- diminuer les bruits de mesure
- en préservant les bords

Différents filtres

- filtre de Lee modifié
- filtre bilatéral

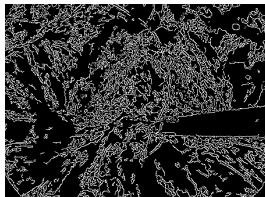
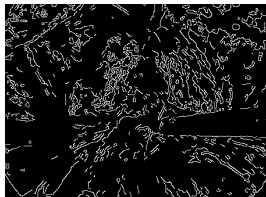


Détection des bords : algorithme de Canny



Principe : détection de contours

- carte des gradients de saturation (valeur et orientation)
- suppression des non-maxima locaux
- seuillage par hystérésis



Canny : avantages et limites



Avantages

- bonne détection
- bonne localisation
- clarté de la réponse

Limite

- choix de la valeur des seuils

Solution proposée : méthode de Yitzhaky et Peli, 2003

- approche statistique
- identifier le couple ayant la meilleure sensibilité et la meilleure spécificité à partir d'une image typique

Canny : avantages et limites



Avantages

- bonne détection
- bonne localisation
- clarté de la réponse

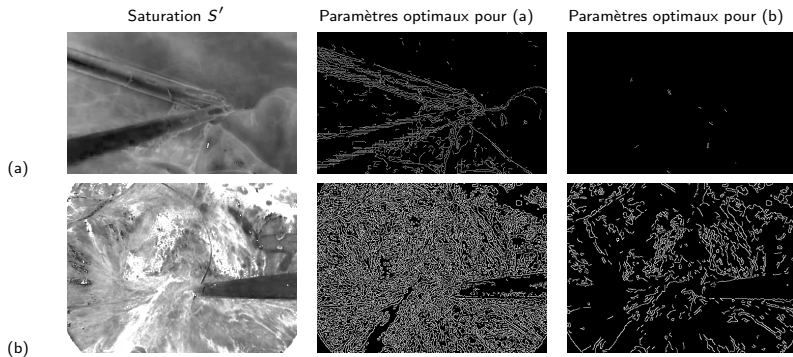
Limite

- choix de la valeur des seuils

Solution proposée : méthode de Yitzhaky et Peli, 2003

- approche statistique
- identifier le couple ayant la meilleure sensibilité et la meilleure spécificité à partir d'une image typique

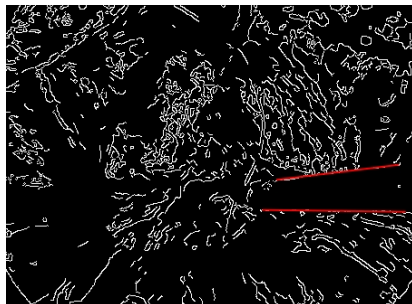
Méthode de Yitzhaky et Peli : résultats



Détermination de la position du point d'insertion

Principe

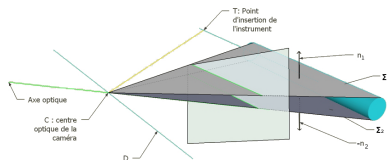
- transformée de Hough probabiliste
- reconstruction de l'axe central de l'instrument en 3D
- intersection des axes (SVD)
- exclusion des droites aberrantes (RANSAC)



Détermination de la position du point d'insertion

Principe

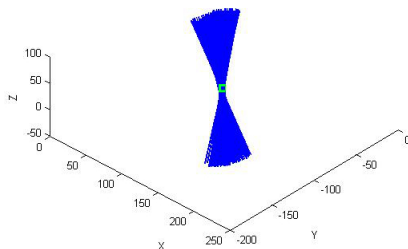
- transformée de Hough probabiliste
- reconstruction de l'axe central de l'instrument en 3D
- intersection des axes (SVD)
- exclusion des droites aberrantes (RANSAC)



Détermination de la position du point d'insertion

Principe

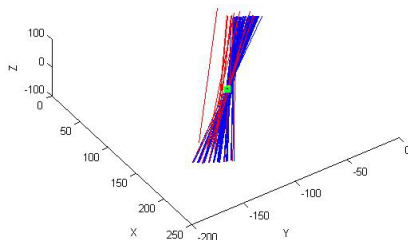
- transformée de Hough probabiliste
- reconstruction de l'axe central de l'instrument en 3D
- intersection des axes (SVD)
- exclusion des droites aberrantes (RANSAC)



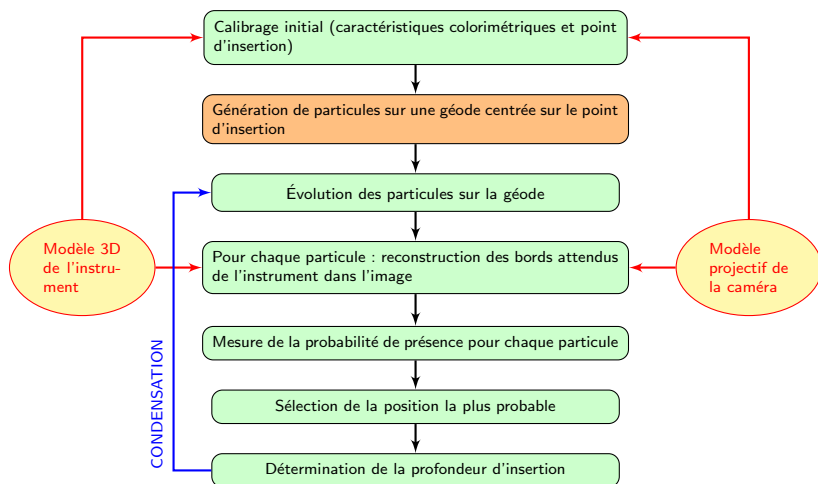
Détermination de la position du point d'insertion

Principe

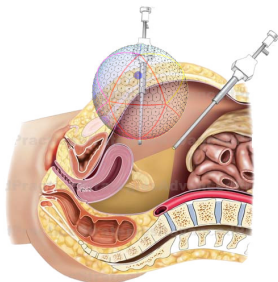
- transformée de Hough probabiliste
- reconstruction de l'axe central de l'instrument en 3D
- intersection des axes (SVD)
- exclusion des droites aberrantes (RANSAC)



Aperçu global de la méthode développée

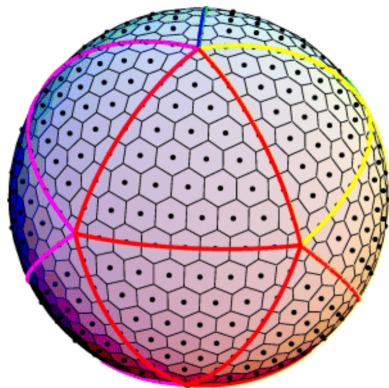


Description de l'orientation de l'instrument



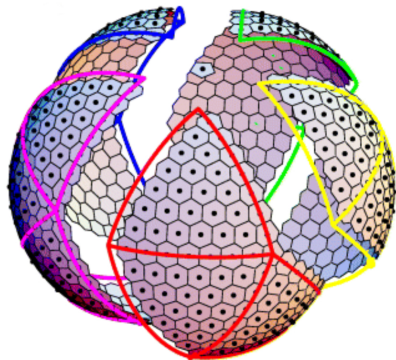
- positions sur une sphère, centrée sur le point d'insertion
 - isotrope
 - homogène
- discrétisation par une grille géodésique sphérique (Heikes et Randall, 1995)

Description de l'orientation de l'instrument



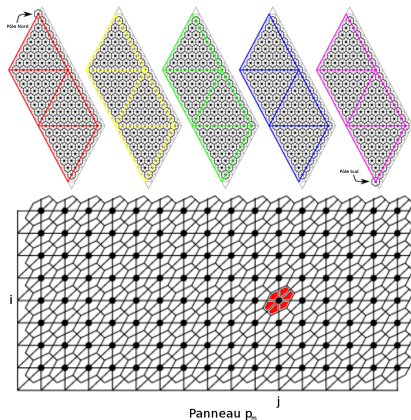
- positions sur une sphère, centrée sur le point d'insertion
 - isotrope
 - homogène
- discrétisation par une grille géodésique sphérique (Heikes et Randall, 1995)

Description de l'orientation de l'instrument



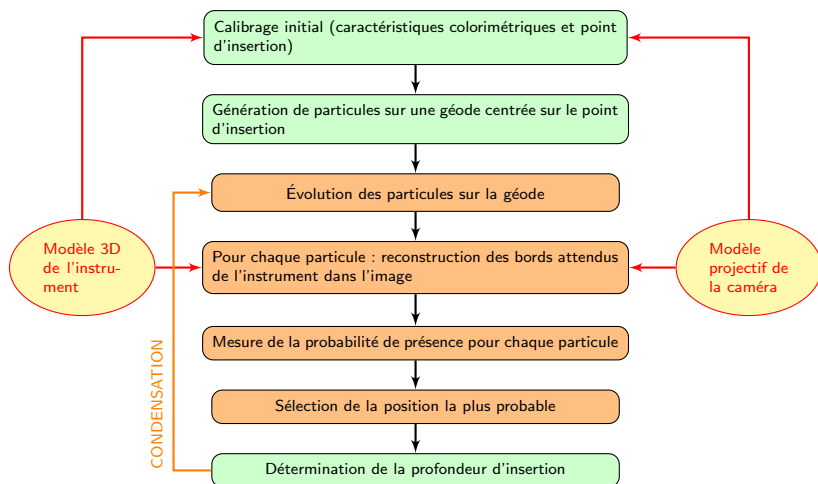
- positions sur une sphère, centrée sur le point d'insertion
 - isotrope
 - homogène
- discrétisation par une grille géodésique sphérique (Heikes et Randall, 1995)

Description de l'orientation de l'instrument



- positions sur une sphère, centrée sur le point d'insertion
 - isotrope
 - homogène
- discrétisation par une grille géodésique sphérique (Heikes et Randall, 1995)

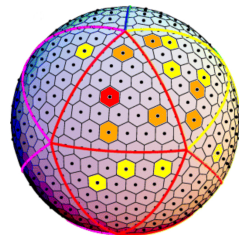
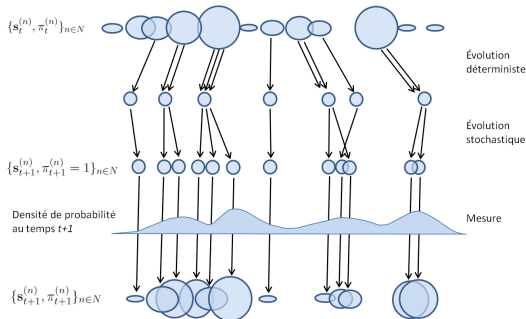
Aperçu global de la méthode développée



Réduction de l'espace des mesure



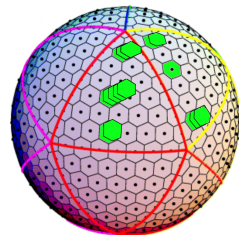
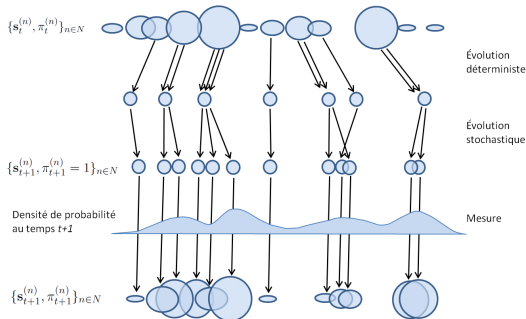
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



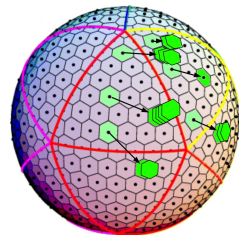
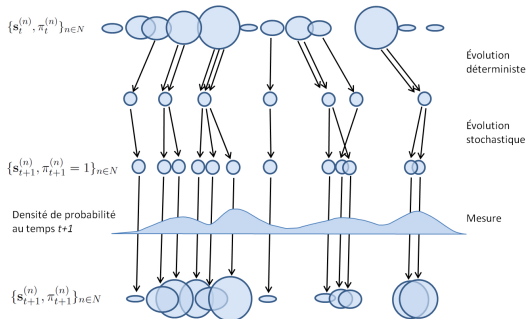
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



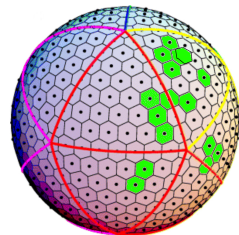
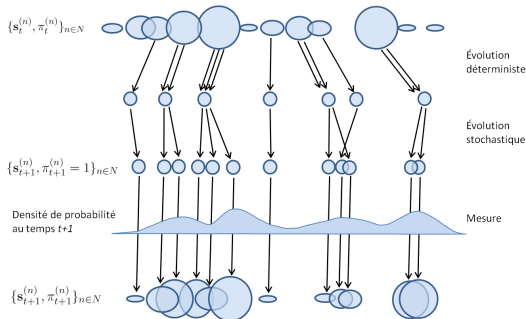
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



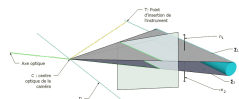
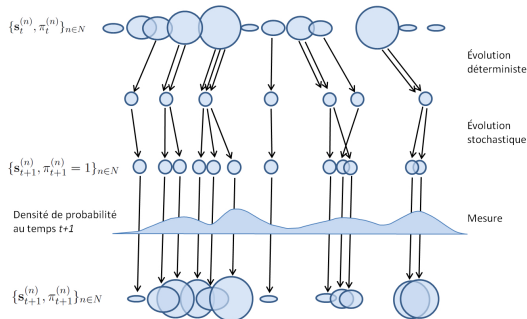
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



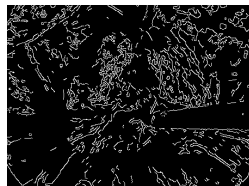
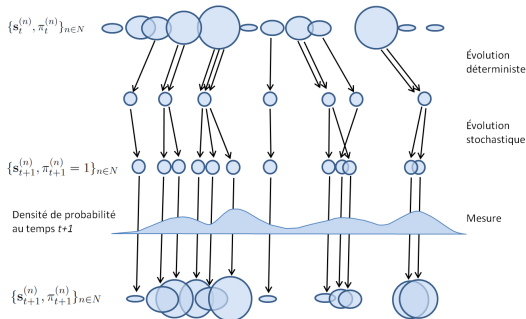
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



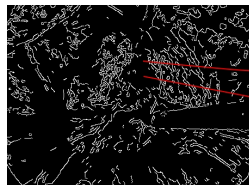
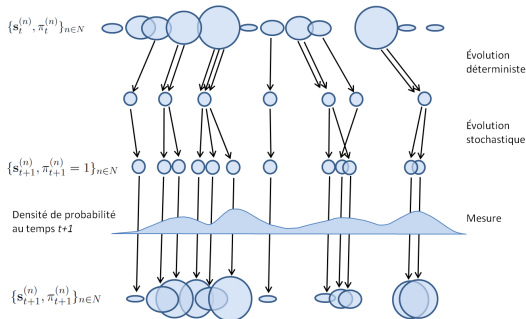
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



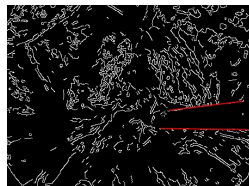
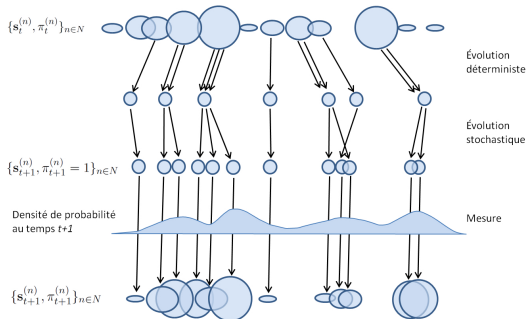
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



Réduction de l'espace des mesure



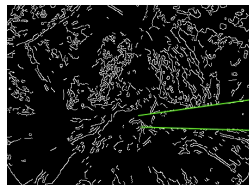
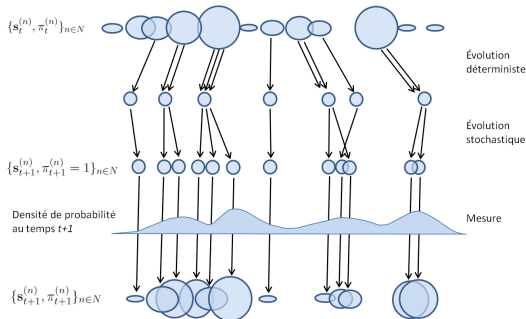
Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



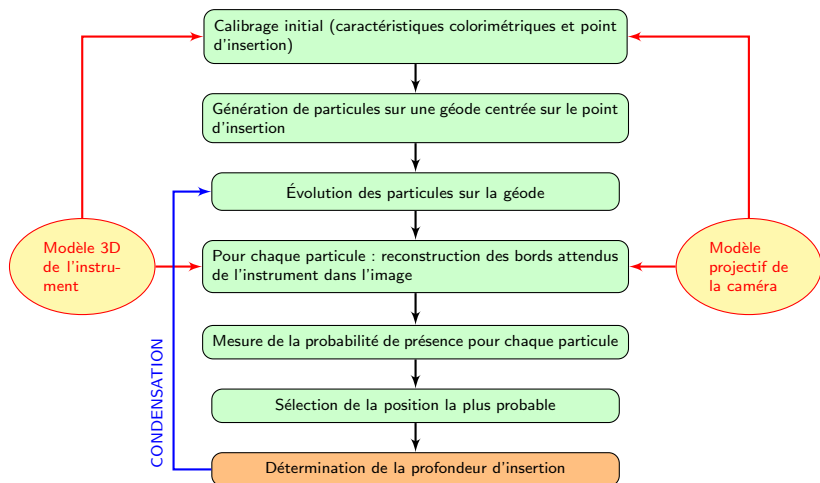
Réduction de l'espace des mesure



Algorithme de CONDENSATION (Blake, Isard et Reynard, 1995)



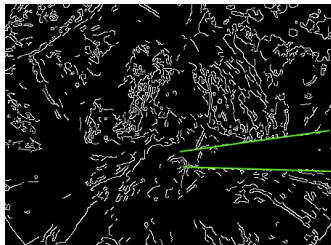
Aperçu global de la méthode développée



Détermination de la profondeur d'insertion

Dernier degré de liberté accessible

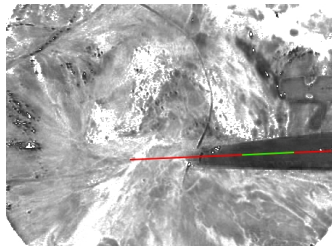
- utilisation de l'image de saturation
- exploration d'un segment glissant le long de l'axe médian
- mesure de la séparabilité inter-classe (algorithme d'Otsu)



Détermination de la profondeur d'insertion

Dernier degré de liberté accessible

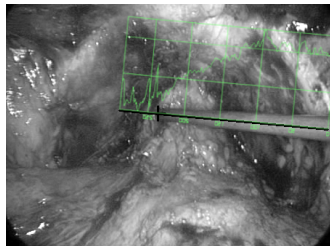
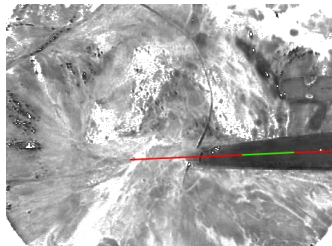
- utilisation de l'image de saturation
- exploration d'un segment glissant le long de l'axe médian
- mesure de la séparabilité inter-classe (algorithme d'Otsu)



Détermination de la profondeur d'insertion

Dernier degré de liberté accessible

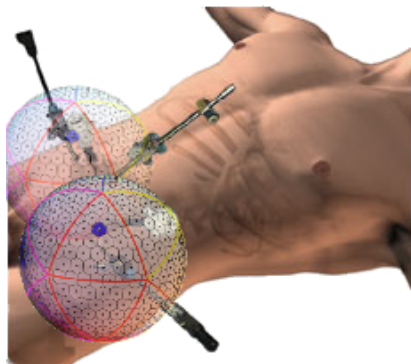
- utilisation de l'image de saturation
- exploration d'un segment glissant le long de l'axe médian
- mesure de la séparabilité inter-classe (algorithme d'Otsu)



Adaptation aux conditions réelles

Améliorations

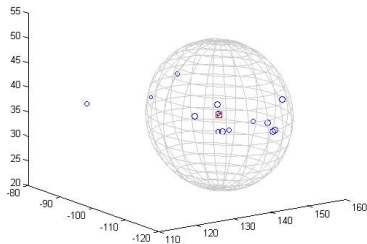
- prise en compte de plusieurs instruments simultanément
- prise en compte des petits déplacements du point d'insertion (Voros, Long et Cinquin, 2006)



Adaptation aux conditions réelles

Améliorations

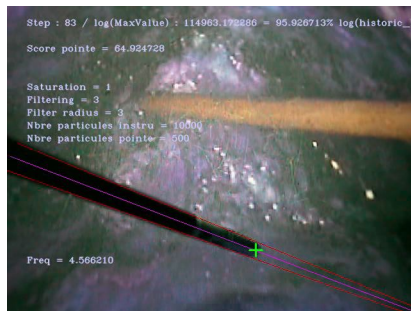
- prise en compte de plusieurs instruments simultanément
- prise en compte des petits déplacements du point d'insertion (Voros, Long et Cinquin, 2006)



Résultats obtenus avant filtrage

Signal fortement bruité

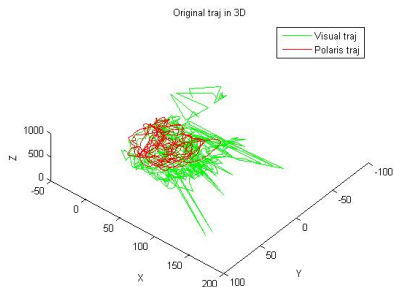
- mesures aberrantes (en cas d'échec de la détection)
- incertitude dans le plan perpendiculaire au plan image



Résultats obtenus avant filtrage

Signal fortement bruité

- mesures aberrantes (en cas d'échec de la détection)
- incertitude dans le plan perpendiculaire au plan image



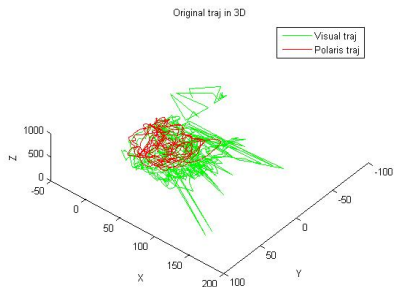
Nécessité de filtrer les trajectoires

- élimination des points aberrants
- lissage de la trajectoire

Résultats obtenus avant filtrage

Signal fortement bruité

- mesures aberrantes (en cas d'échec de la détection)
- incertitude dans le plan perpendiculaire au plan image



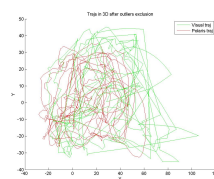
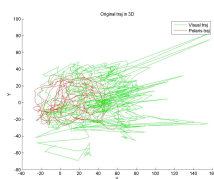
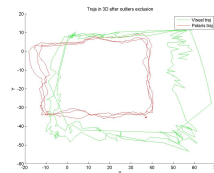
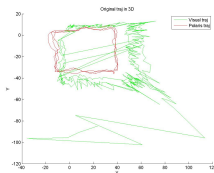
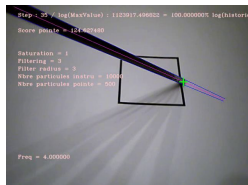
Nécessité de filtrer les trajectoires

- élimination des points aberrants
- lissage de la trajectoire

Élimination des mesures aberrantes

Principe

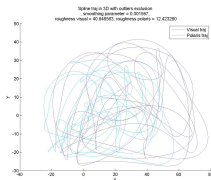
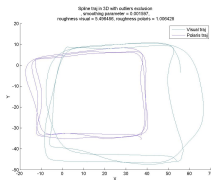
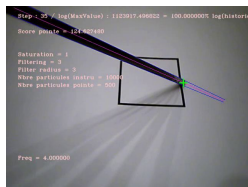
Approche basée sur l'étude de la distribution des vitesses (He et Tian, 1998)



Lissage de la trajectoire

Principe

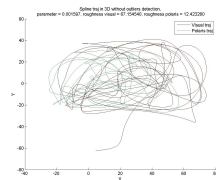
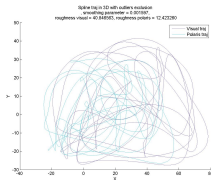
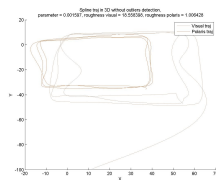
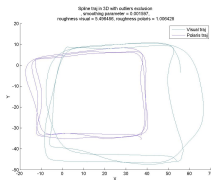
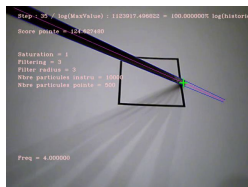
Lissage des faibles perturbations par des B-splines cubiques



Lissage de la trajectoire

Principe

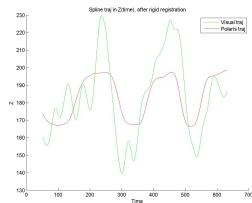
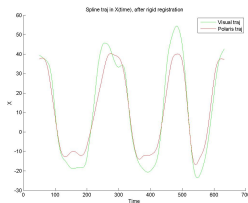
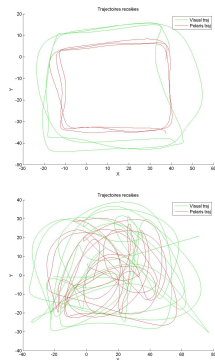
Lissage des faibles perturbations par des B-splines cubiques



Recalage rigide final et erreur résiduelle

Persistance d'une erreur systématique dans la mesure

- probablement liée à une erreur de calibrage extrinsèque
- corrigée par recalage rigide



(a) Projection sur l'axe X (b) Projection sur l'axe Z

Choix des paramètres et applications

Compromis vitesse/précision nécessaire

Application temps réel

- faible nombre de particules
- nombreuses erreurs en 3D
- suivi 2D performant
- asservissement possible d'un robot porte-endoscope (A. Agustinos)

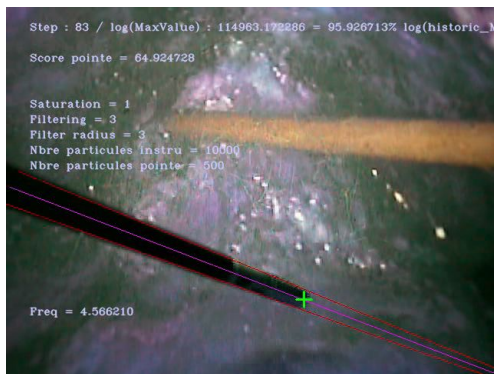


Choix des paramètres et applications

Compromis vitesse/précision nécessaire

Étude du mouvement en 3D

- grand nombre de particules
- suivi 3D performant
- traitement hors-ligne



Discussion

Apports principaux

- suivi simultané de plusieurs instruments sur un fond complexe
- représentation simplifiée des orientations dans l'espace
- détermination automatique des seuils pour l'algorithme de Canny

Limites actuelles

- définition de l'image pour la détection des bords
- erreur dans la détection de la pointe
- vitesse

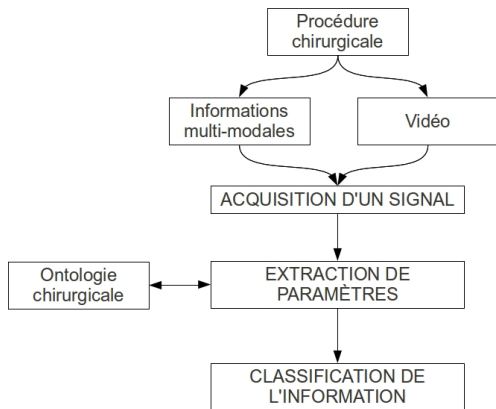
Discussion

Optimisations envisagées

- réduction du bruit dans la mesure de l'orientation (filtre de Kalman)
- amélioration de la détection de la pointe (Sznitman et al., 2013)
- parallélisation sur GPU

Plan

- 1 Contexte clinique et scientifique
 - Problématique de la thèse
 - Méthodes d'évaluation existantes
 - Objectifs de la thèse et approche adoptée
- 2 Suivi d'instruments chirurgicaux
 - Méthodes existantes
 - Approche développée
 - Traitement des données et performances
- 3 Analyse de la qualité de gestes chirurgicaux
 - Acquisition des données
 - Analyse de la qualité des gestes
 - Prédiction de la qualité des gestes à partir du suivi d'instruments



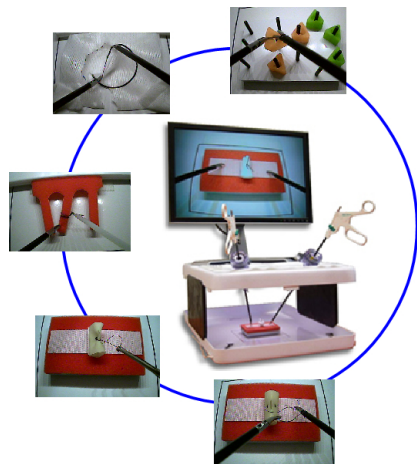
Outils

Acquisition de trajectoires pour différents niveaux d'opérateurs, pour des gestes simples

Banc d'essai MISTELS

Principe

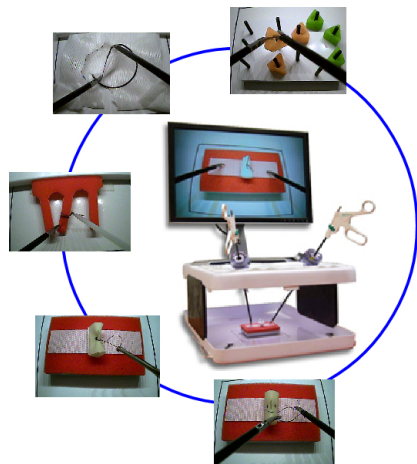
- banc d'entraînement
- 5 tâches élémentaires de laparoscopie
- scores validés pour la formation (temps et pénalités)



Banc d'essai MISTELS

Exercices

- transfert d'objet
- découpe/dissection
- Endoloop
- suture extra-corporelle
- suture intra-corporelle

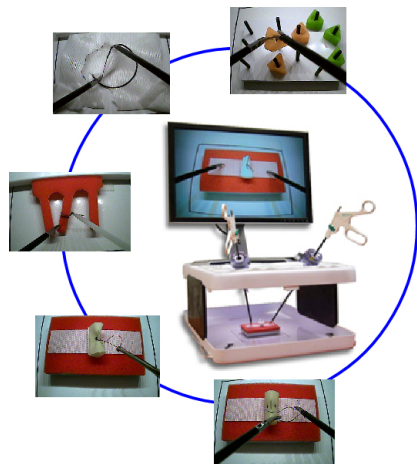


Banc d'essai MISTELS

Volontaires

32 volontaires :

- 13 externes
- 8 internes
- 11 chirurgiens



Mesure d'une référence pour la qualité des gestes

Objectif

→ Analyse plus fine que le score MISTELS

Échelle GOALS

- conçue pour le bloc opératoire
- explore différentes aptitudes du savoir-faire chirurgical
- en direct ou par vidéo

	1	2	3	4	5
Depth perception		Consistently overshoots target, wide swings, slow to correct	Some overshooting or missing of target, but quick to correct		Accurately directs instruments in the correct plane to target
Bimanual dexterity		Uses only one hand, ignores nondominant hand, poor coordination between hands	Uses both hands, but does not optimize interaction between hands		Expertly uses both hands in a complementary manner to provide optimal exposure
Efficiency		Uncertain, inefficient efforts; many tentative movements; constantly changing focus or persisting without progress	Slow, but planned movements are reasonably organized		Confident, efficient and safe conduct, maintains focus on task until it is better performed by way of an alternative approach
Tissue handling		Rough movements, tear tissue, injuries adjacent structures, poor grasper control, grasper frequently slips	Handles tissues reasonably well, minor trauma to adjacent tissue (ie. occasional unnecessary bleeding or slipping of the grasper)		Handles tissues well, applies appropriate traction, negligible injury to adjacent structures
Autonomy		Unable to complete entire task, even with verbal guidance	Able to complete task safely with moderate guidance		Able to complete task independently without prompting

Mesure d'une référence pour la qualité des gestes

Objectif

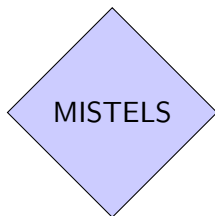
→ Analyse plus fine que le score MISTELS

Échelle GOALS

- notation en aveugle
- 2 experts indépendants
- enregistrement vidéo

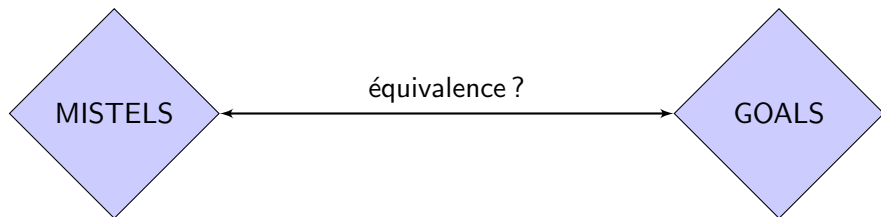
	1	2	3	4	5
Depth perception	Consistently overshoots target, wide swings, slow to correct	Some overshooting or missing of target, but quick to correct	Accurately directs instruments in the correct plane to target		
Bimanual dexterity	Uses only one hand, ignores nondominant hand, poor coordination between hands	Uses both hands, but does not optimize interaction between hands	Expertly uses both hands in a complementary manner to provide optimal exposure		
Efficiency	Uncertain, inefficient efforts; many tentative movements; constantly changing focus or persisting without progress	Slow, but planned movements are reasonably organized	Confident, efficient and safe conduct, maintains focus on task until it is better performed by way of an alternative approach		
Tissue handling	Rough movements, tear tissue, injures adjacent structures, poor grasper control, grasper frequently slips	Handles tissues reasonably well, minor trauma to adjacent tissue (i.e. occasional unnecessary bleeding or slipping of the grasper)	Handles tissues well, applies appropriate traction, negligible injury to adjacent structures		
Autonomy	Unable to complete entire task, even with verbal guidance	Able to complete task safely with moderate guidance	Able to complete task independently without prompting		

Étapes de l'analyse proposée



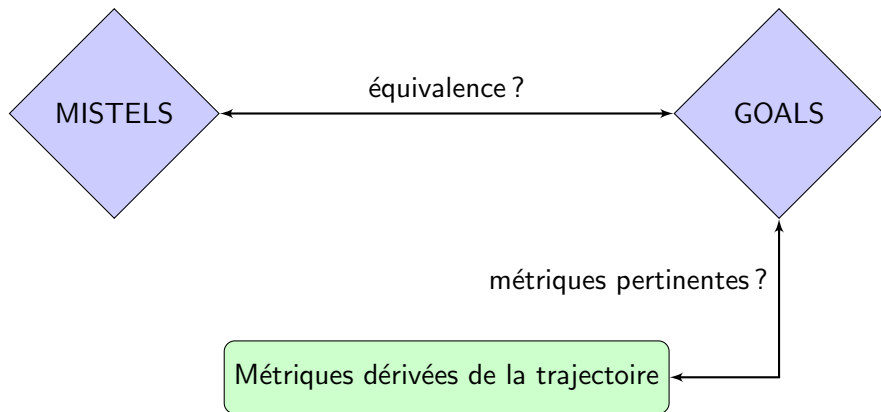
Étude réalisée en collaboration avec le CIC-IT (M. Medici et A. Moreau-Gaudry)

Étapes de l'analyse proposée



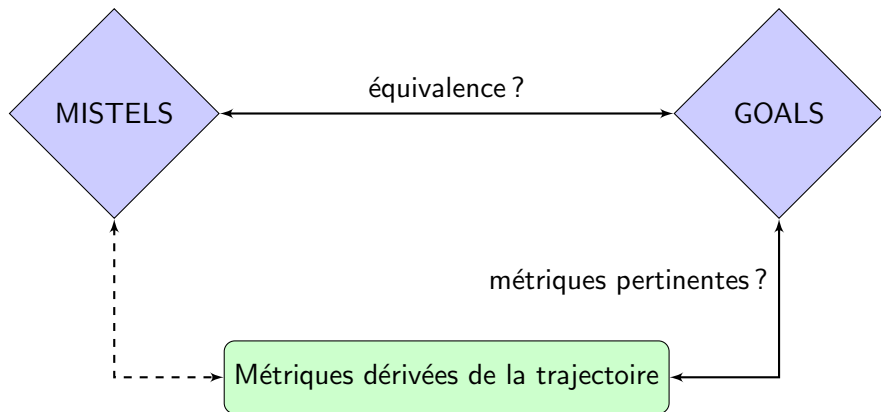
Étude réalisée en collaboration avec le CIC-IT (M. Medici et A. Moreau-Gaudry)

Étapes de l'analyse proposée



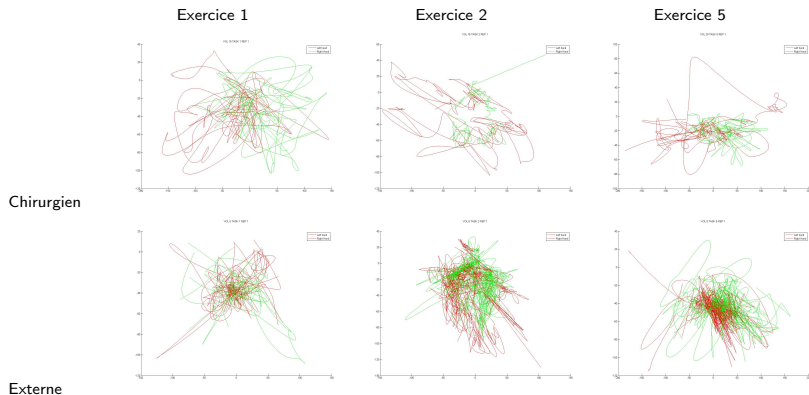
Étude réalisée en collaboration avec le CIC-IT (M. Medici et A. Moreau-Gaudry)

Étapes de l'analyse proposée



Étude réalisée en collaboration avec le CIC-IT (M. Medici et A. Moreau-Gaudry)

Exemple de trajectoires obtenues



Métriques explorées

Existantes ou modifiées

- temps,
- longueur de la trajectoire,
- vitesse,
- rugosité (*jerk*),
- nombre de mouvements,
- économie de volume
- ...

Nouvelles

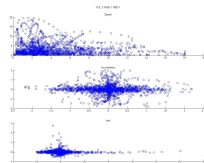
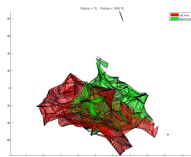
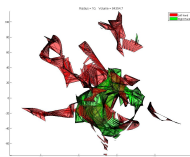
- volume exploré,
- taux de recouvrement des volumes,
- information mutuelle des dérivées de la position

Volume exploré exercice 2

Volume exploré exercice 5

Répartition des couples de
paramètre vitesse,
accélération et *jerk* dans le
plan (exercice 1)

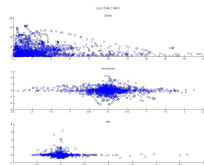
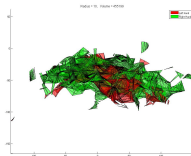
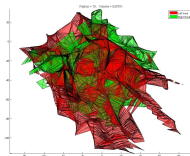
Chirurgien



$$V = 84354mm^3$$

$$V = 163810mm^3$$

Externe



$$V = 529701mm^3$$

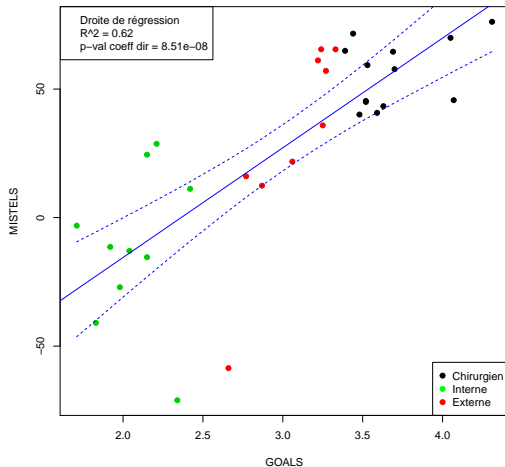
$$V = 455199mm^3$$

Équivalence entre les scores MISTELS et GOALS

Corrélation

	Moyenne
Pearson	0.79
Spearman	0.78

MISTELS en fonction de GOALS – Moyenne des 5 exercices



Validité de construction du score GOALS

Validité de construction

→ la méthode mesure-t-elle la caractéristique (non observable) qu'elle est censée mesurer ?

Méthode

Utilisation d'un classifieur *k-means* pour définir 3 groupes, en fonction des scores des 5 exercices.

Critère de succès

→ taux de reconnaissance entre groupes

Validité de construction du score GOALS

Validité de construction

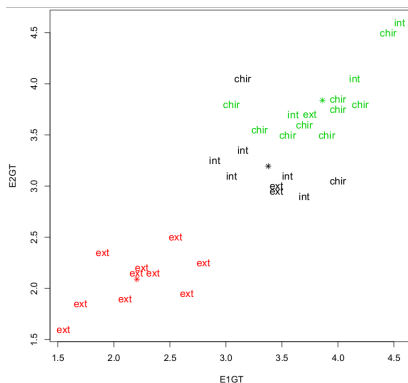
→ la méthode mesure-t-elle la caractéristique (non observable) qu'elle est censée mesurer ?

Méthode

Utilisation d'un classifieur *k-means* pour définir 3 groupes, en fonction des scores des 5 exercices.

Critère de succès

→ taux de reconnaissance entre groupes



GOALS : taux de reconnaissance = 75%

Validité de construction du score GOALS

Validité de construction

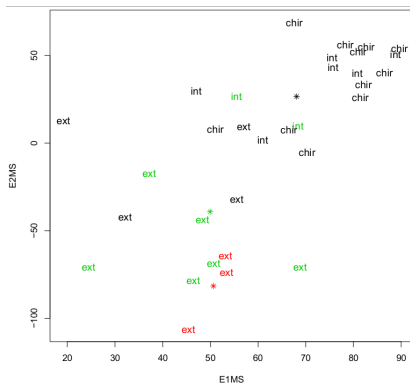
→ la méthode mesure-t-elle la caractéristique (non observable) qu'elle est censée mesurer ?

Méthode

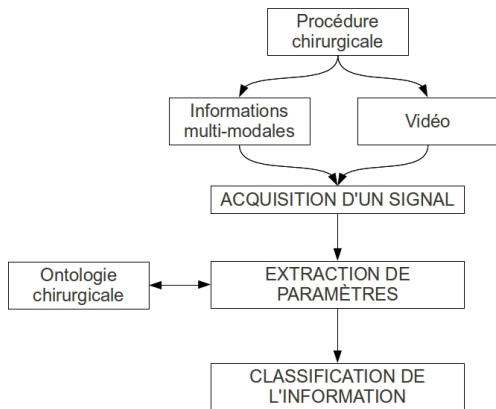
Utilisation d'un classifieur *k-means* pour définir 3 groupes, en fonction des scores des 5 exercices.

Critère de succès

→ taux de reconnaissance entre groupes



MISTELS : taux de reconnaissance = 50%



Outils

Détermination des métriques pertinentes pour qualifier le geste

Détermination des métriques significatives

Approche adoptée

→ régression partielle aux moindres carrés :

- proche d'une ACP
- capable de traiter des observations de grande dimension
- avec un faible nombre d'observations

Variables

- variables explicatives → métriques
- variable à expliquer → score GOALS moyen

Détermination des métriques significatives

Approche adoptée

→ régression partielle aux moindres carrés :

- proche d'une ACP
- capable de traiter des observations de grande dimension
- avec un faible nombre d'observations

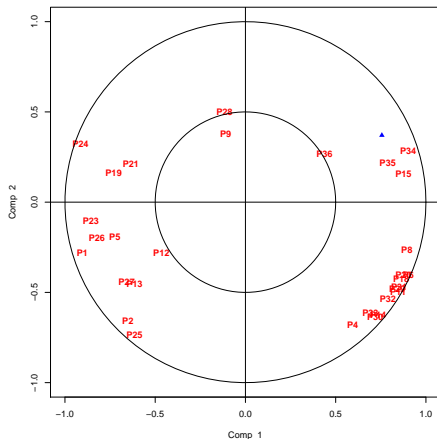
Variables

- variables explicatives → métriques
- variable à expliquer → score GOALS moyen

Détermination des métriques significatives

Variable Importance in Prediction

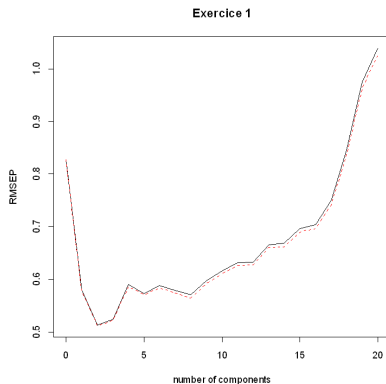
- mesure de la pertinence d'une métrique pour la prédiction finale
- métrique fortement significative si $VIP > 1$
- mais pas forcément inopérante si $VIP < 1$



Détermination des métriques significatives

Plan d'analyse → pour chaque exercice

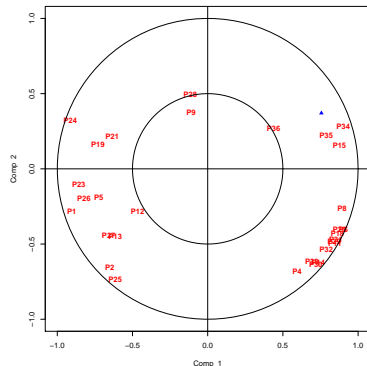
- détermination du nombre de composantes optimal
- détermination des métriques les plus significatives ($VIP > 1$)



Détermination des métriques significatives

Plan d'analyse → pour chaque exercice

- détermination du nombre de composantes optimal
- détermination des métriques les plus significatives ($VIP > 1$)



Détermination des métriques significatives

Résultats

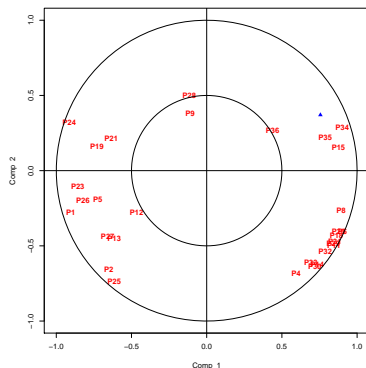
→ corrélations négatives

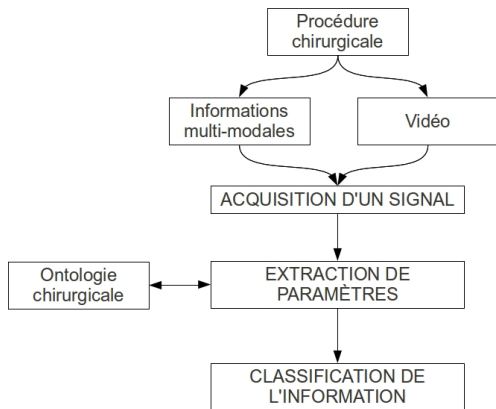
- temps et longueur de chemin
- volume exploré
- économie de volume
- taux de recouvrement des volumes
- nombre de mouvements

Résultats

→ corrélations positives

- information mutuelle entre les mains





Outils

Calcul automatique d'un score reflétant la qualité technique du geste

Prédiction d'un score à partir des métriques

Approche adoptée

- création d'un modèle de prédiction à partir des régressions PLS
- méthode de validation type *leave-one-out*

→ obtention d'un score GOALS prédit pour chaque exercice, pour chaque volontaire

Critères de réussite

- corrélation entre le score GOALS établi par des experts et le score GOALS prédit
- validité de construction du score prédit

Prédiction d'un score à partir des métriques

Critères de réussite

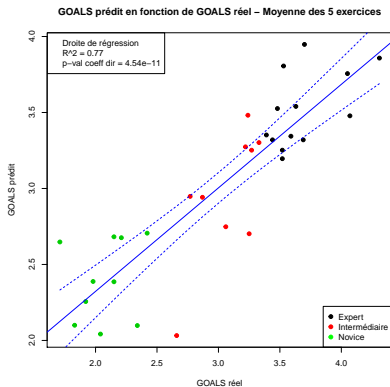
- corrélation entre le score GOALS établi par des experts et le score GOALS prédit
- validité de construction* du score prédit

	Moyenne	Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4	Ex. 5
Pearson	0.88	0.77	0.58	0.83	0.72	0.87
Spearman	0.88	0.82	0.68	0.79	0.8	0.87
IC95%	[0.76;0.93]	[0.62;0.91]	[0.43;0.82]	[0.57;0.89]	[0.63;0.89]	[0.73;0.92]

Prédiction d'un score à partir des métriques

Critères de réussite

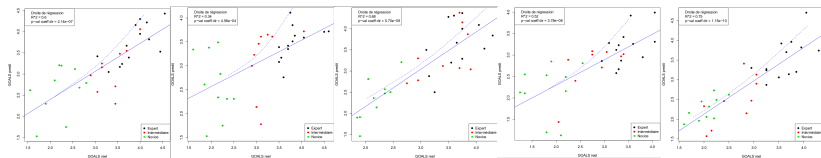
- corrélation entre le score GOALS établi par des experts et le score GOALS prédit
- validité de construction* du score prédit



Prédiction d'un score à partir des métriques

Critères de réussite

- corrélation entre le score GOALS établi par des experts et le score GOALS prédit
- validité de construction* du score prédit

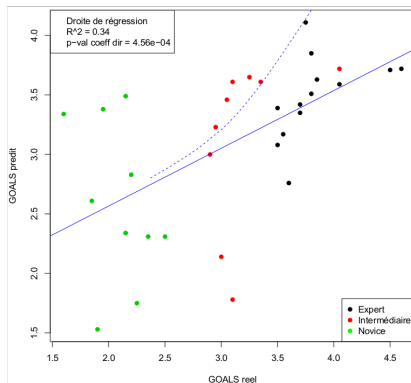


(a) Exercice 1 (b) Exercice 2 (c) Exercice 3 (d) Exercice 4 (e) Exercice 5

Prédiction d'un score à partir des métriques

Critères de réussite

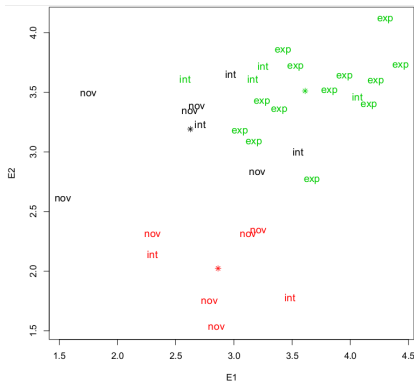
- corrélation entre le score GOALS établi par des experts et le score GOALS prédit
- validité de construction* du score prédit



Prédiction d'un score à partir des métriques

Critères de réussite

- corrélation entre le score GOALS établi par des experts et le score GOALS prédit
- validité de construction* du score prédit



Taux de reconnaissance = 69.1%

*la méthode mesure-t-elle ce qu'elle est censée mesurer ?

Réduction du nombre de métriques

Utilisation des seules métriques significatives pour la prédiction

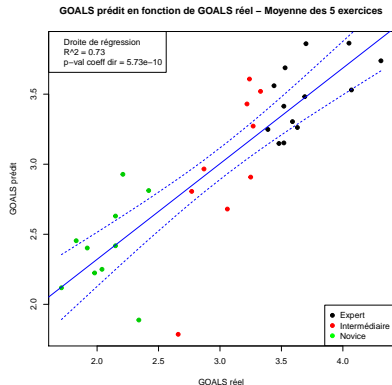
→ limitation du nombre de métriques à calculer

	Moyenne	Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4	Ex. 5
Pearson	0.85	0.78	0.69	0.80	0.64	0.84
Spearman	0.85	0.82	0.71	0.81	0.70	0.86
IC95%	[0.71 ; 0.92]	[0.62 ; 0.91]	[0.49 ; 0.82]	[0.63 ; 0.9]	[0.46 ; 0.84]	[0.72 ; 0.92]

Réduction du nombre de métriques

Utilisation des seules métriques significatives pour la prédiction

→ limitation du nombre de métriques à calculer

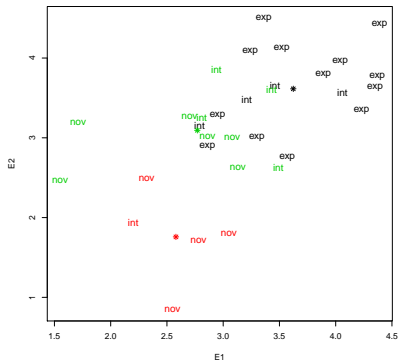


Réduction du nombre de métriques

Utilisation des seules métriques significatives pour la prédiction

→ limitation du nombre de métriques à calculer

Classification des volontaires selon les scores GOALS prédits des 5 exercices avec les métriques



Taux de reconnaissance = 69.1%

Prédiction des aptitudes du score GOALS

Résultats obtenus

→ prédiction d'un score corrélé à la qualité de réalisation globale de chaque exercice

Étape suivante

- prédire un score pour chaque aptitude pour enrichir le retour au volontaire
- méthode adoptée similaire à la précédente
- score GOALS pour chaque aptitude avec moyenne des exercices

Résultats

→ taux de reconnaissance plus faible (trop faible variation du score GOALS au sein d'un exercice)

Discussion

Apports principaux

- obtention d'un score prédisant la qualité de réalisation globale du geste
- utilisation du modèle de régression PLS
- définition de nouvelles métriques (en particulier de coordination) et validation de métriques déjà décrites

Limites actuelles

- analyse en temps différé
- défaut de puissance de l'étude pour prédire plus finement les scores
- exercices peu adaptés pour l'analyse séparée des composantes du score GOALS

Discussion

Optimisations envisagées

- recruter davantage de volontaires
- introduire de nouveaux exercices
- introduction de nouvelles métriques

Conclusion

Résultats de la thèse

- développement d'une méthode de suivi d'instruments basée sur les images endoscopiques
- définition de métriques prédictives de la qualité globale d'exercices réalisés sur banc d'essai

Limitations rencontrées

- défaut de précision de la méthode de suivi en temps réel
- absence d'évaluation de la méthode en conditions réelles de chirurgie
- exercices insuffisamment variés, effectif de volontaires insuffisant

Perspectives

Améliorer l'acceptabilité du dispositif

- au cours de la phase d'apprentissage de la chirurgie, puis lors de l'exercice
- nécessité d'augmenter la fiabilité des scores
- développer une interface utilisateur

Intégrer la méthode à des modélisations de la procédure chirurgicale

- en variable d'entrée pour déterminer l'activité courante
- pour mesurer les métriques spécifiques d'une étape donnée de la chirurgie
- pour définir des métriques décrivant le processus → passage à l'erreur procédurale

Perspectives

Observatoire des GMCAO

- conception d'une banque de données permettant de comparer les différentes méthodes proposées
- partagée par plusieurs équipes
- enrichie par les travaux de chacun

Optimisation de la qualité du geste

- fusion d'informations multi-modales (échographie, fluorescence,...)
- intégration à des modélisations de procédures chirurgicales
- retour d'informations pertinentes au chirurgien

Merci de votre attention

Remerciements

Sandrine et Philippe, mes directeurs

Les membres du jury : Christophe Doignon, Pierre Jannin, Aurel Messas, Nassir Navab, Jocelyne Troccaz

Gaëlle et Jean-Alexandre pour l'évaluation GOALS

Maud et Alexandre pour l'aide pour l'analyse des données

Yohann pour les manipulations au LADAF

L'ensemble des volontaires de l'étude

Djamel et Léo pour l'audiovisuel aujourd'hui

Les membres de l'équipe GMCAO

Ma famille et mes amis

Références I



Bholat, Omar S. et al. (1999). « Tactile feedback is present during minimally invasive surgery ». In : *Journal of the American College of Surgeons* 189.4, p. 349–355. issn : 1072-7515. doi : 10.1016/S1072-7515(99)00184-2. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1072751599001842>.



Blake, A., M. Isard et D. Reynard (1995). « Learning to track the visual motion of contours ». In : *Artificial Intelligence* 78.1-2, 179–212.



Breedveld, P. et M. Wentink (2001). « Eye-hand coordination in laparoscopy-an overview of experiments and supporting aids ». In : *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies* 10.3, 155–162.



Doignon, C, P Graebing et M de Mathelin (déc. 2005). « Real-time segmentation of surgical instruments inside the abdominal cavity using a joint hue saturation color feature ». In : *Real-Time Imaging* 11.5-6, 429–442. doi : 10.1016/j.rti.2005.06.008.



Forestier, Germain et al. (2012). « Classification of surgical processes using dynamic time warping ». In : *Journal of Biomedical Informatics* 45.2, p. 255–264. issn : 1532-0464. doi : 10.1016/j.jbi.2011.11.002. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1532046411001900>.



He, Jiping et Chun-Xiang Tian (1998). « A statistical smoothness measure to eliminate outliers in motion trajectory tracking ». In : *Human movement science* 17.2, p. 189–200. issn : 0167-9457.

Références II



Heikes, Ross et David A Randall (1995). « Numerical integration of the shallow-water equations on a twisted icosahedral grid. Part I : Basic design and results of tests ». In : *Monthly Weather Review* 123.6, p. 1862–1880. issn : 1520-0493.



Martin, JA et al. (1997). « Objective structured assessment of technical skill (OSATS) for surgical residents ». In : *British Journal of Surgery* 84.2, 273–278.



Oropesa, Ignacio et al. (mar. 2013). « EVA : Laparoscopic Instrument Tracking Based on Endoscopic Video Analysis for Psychomotor Skills Assessment ». In : *Surgical endoscopy* 27.3. PMID : 23052495, p. 1029–1039. issn : 1432-2218. doi : 10.1007/s00464-012-2513-z.



Padoy, Nicolas et al. (2012). « Statistical modeling and recognition of surgical workflow ». In : *Medical Image Analysis* 16.3, p. 632–641. issn : 1361-8415. doi : 10.1016/j.media.2010.10.001. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361841510001131>.



Sznitman, Raphael et al. (2013). « Unified Detection and Tracking of Instruments during Retinal Microsurgery ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 35.5, p. 1263–1273. issn : 0162-8828. doi : 10.1109/TPAMI.2012.209.



Tomasi, Carlo et Roberto Manduchi (1998). « Bilateral filtering for gray and color images ». In : *IEEE*, p. 839–846. isbn : 8173192219.

Références III



Voros, Sandrine, Jean-Alexandre Long et Philippe Cinquin (jan. 2006). « Automatic Localization of Laparoscopic Instruments for the Visual Servoing of an Endoscopic Camera Holder ». In : *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2006*. Sous la dir. de Rasmus Larsen, Mads Nielsen et Jon Sporring. Lecture Notes in Computer Science 4190. Springer Berlin Heidelberg, p. 535–542. isbn : 978-3-540-44707-8, 978-3-540-44708-5. url : http://link.springer.com/chapter/10.1007/11866565_66.



Yitzhaky, Yitzhak et Eli Peli (2003). « A method for objective edge detection evaluation and detector parameter selection ». In : *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 25.8, p. 1027–1033. issn : 0162-8828.

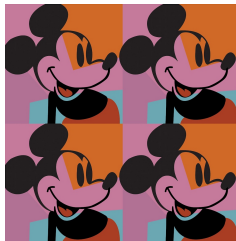
Caractéristiques attendues d'une méthode d'évaluation

- la fiabilité
- la validité
- la faisabilité



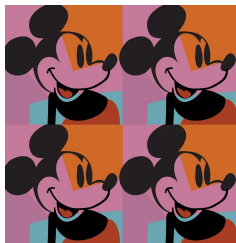
Caractéristiques attendues d'une méthode d'évaluation

- la fiabilité
- la validité
- la faisabilité



Caractéristiques attendues d'une méthode d'évaluation

- la fiabilité
- la validité
- la faisabilité



Caractéristiques attendues d'une méthode d'évaluation

- la fiabilité
- la validité
- la faisabilité



Objectifs et approche choisie pour ce travail

Objectifs

- déterminer des métriques caractérisant la qualité d'un geste chirurgical
- de façon non-supervisée
- sans modifier la procédure habituelle du chirurgien
- pour les interventions sous laparoscopie

Types d'approches développées

ITEM	Not done/ Done incorrectly	Done correctly
<u>CONTROL OF HEMORRHAGE</u>		
1. Applies pressure to stop bleeding <u>first</u>	0	1
2. Asks assistant for suction field	0	1
3. Inspects injury by carefully releasing the IVC	0	1
4. Ensures all equipment needed for repair is at hand before starting	0	1
5. Control of bleeding point (use deBakey forceps/Satinsky clamp or prox/distal pressure)	0	1
<u>REPAIR</u>		
6. Select appropriate suture (4.0/5.0/6.0 polypropylene)	0	1
7. Select appropriate needle driver (vascular)	0	1
8. Select appropriate forceps (deBakey)	0	1
9. Needle loaded 1/3-2/3 from tip 90% of time	0	1

Échelle OSATS (Martin et al., 1997)

Mesure d'une référence pour la qualité des gestes

	1	2	3	4	5
Depth perception	Consistently overshoots target, wide swings, slow to correct		Some overshooting or missing of target, but quick to correct		Accurately directs instruments in the correct plane to target
Bimanual dexterity	Uses only one hand, ignores nondominant hand, poor coordination between hands		Uses both hands, but does not optimize interaction between hands		Expertly uses both hands in a complementary manner to provide optimal exposure
Efficiency	Uncertain, inefficient efforts; many tentative movements; constantly changing focus or persisting without progress		Slow, but planned movements are reasonably organized		Confident, efficient and safe conduct, maintains focus on task until it is better performed by way of an alternative approach
Tissue handling	Rough movements, tear tissue, injuries adjacent structures, poor grasper control, grasper frequently slips		Handles tissues reasonably well, minor trauma to adjacent tissue (ie. occasional unnecessary bleeding or slipping of the grasper)		Handles tissues well, applies appropriate traction, negligible injury to adjacent structures
Autonomy	Unable to complete entire task, even with verbal guidance		Able to complete task safely with moderate guidance		Able to complete task independently without prompting