

Titre de la mission :

Développement d'une procédure robotisée de découpe osseuse - Etude de faisabilité sur un robot industriel et un modèle osseux simplifié

Lieu de la mission :

LIRMM, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, Montpellier, France

Date de la mission :

17/09/2007 – 02/11/2007

Auteur :

Olivier Cartiaux – CEREM Centre de Recherche en Mécatronique, Louvain-la-Neuve, Belgique

Cette mission s'inscrit dans le projet de recherche Sarcome, mené en collaboration avec ORTO (Département d'Orthopédie, Cliniques universitaires St-Luc, Bruxelles, Belgique).

Description de la mission :**1. Introduction**

Le projet Sarcome porte sur le traitement des tumeurs osseuses du pelvis (figure 1) en chirurgie orthopédique. De nos jours, la procédure conventionnelle consiste en une résection large (découpe de la tumeur) associée à une reconstruction par allogreffe osseuse massive (découpe de la greffe et fixation sur le patient). Bien que cette technique soit prometteuse, les chirurgiens ne disposent pas d'outils suffisants pour planifier et réaliser avec la précision suffisante, la procédure tridimensionnelle.

L'objectif principal du projet est donc de permettre l'usinage de structures osseuses 3D complexes dans un volume de travail restreint. La géométrie du pelvis et la difficulté d'accessibilité à l'os doivent être prises en compte pour l'adaptation de technologies d'assistance.

La première technologie envisagée pour la résection tumorale est l'assistance intra-opératoire par navigation optique. La station Surgetics de Praxim (Grenoble, France) a été adaptée à la navigation d'une scie chirurgicale pour la découpe d'un modèle osseux simplifié en polyuréthane. La seconde technologie envisagée est l'assistance robotisée du geste de découpe.

L'objectif du travail, réalisé en collaboration ORTO-CEREM-LIRMM et présenté dans ce document, est donc double : (1) développer une procédure robotisée pour la découpe d'un modèle osseux simplifié, et (2) comparer les performances de cette

nouvelle procédure avec les procédures conventionnelle et naviguée.

2. Matériels & méthode**2.1. Description du matériel utilisé****Modèle osseux**

Le modèle osseux simplifié est un bloc de 40x40x85mm en polyuréthane de marque Sawbones (figure 2) dont les propriétés mécaniques sont : 0.24 g/cm^3 , $E = 143 \text{ Mpa}$, $R_m = 3.9 \text{ MPa}$. Les blocs sont positionnés de manière unique dans un dispositif à 2 états de précision.

Outil de coupe

L'outil de coupe est le Compact Air Drive II de Synthes (figure 3) : scie chirurgicale à actionnement pneumatique (7 bars) et à mouvement oscillant. La lame a une longueur de 100mm et une épaisseur de 1.4mm.

Robot

L'outil de coupe est manipulé par le robot 6 axes Viper s650 de marque Adept (figure 4) : rayon atteignable 653mm, charge max 5 kg et répétabilité 0.02mm.

2.2. Description de l'expérience**Etablissement du protocole et planification (phase réalisée en ORTO)**

3 plans de coupe ont été planifiés sur le bloc selon 1 point et 2 angles (figure 5) : t l'altitude (mm), γ l'angle de face ($^\circ$), et β l'angle de profondeur ($^\circ$).



Fig. 1 : Le pelvis

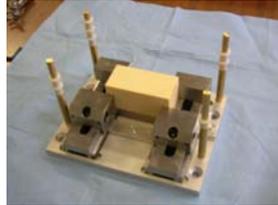


Fig. 2 : Le modèle osseux simplifié et son dispositif de fixation



Fig. 3 : L'outil de coupe et sa fixation au robot

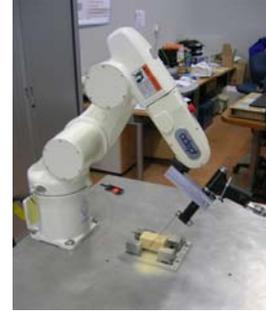


Fig. 4 : Le dispositif de découpe

Recalage (phase réalisée au LIRMM)

Le robot et le dispositif de fixation des blocs sont fixés sur un même plan de travail, la scie est fixée sur l'effecteur du robot par une interface mécanique spécialement conçue à cet effet (figures 3 et 4). L'étape de recalage consiste à transférer la planification sur le bloc. 4 repères ont été construits (figure 6) : R_{base} lié à la base du robot, R_{robot} lié à l'effecteur du robot, R_{lame} lié à l'outil de coupe et R_{bloc} lié au bloc.

Un dispositif de localisation optique, la caméra MicronTracker H40 de Claron Technology, a été utilisé pour numériser, par palpation de surface, les 4 repères de la figure 6. Les 2 transformations T_1 et T_2 , respectivement les transformations de R_{lame} à R_{robot} et de R_{bloc} à R_{base} , ont finalement permis de connaître à tout moment la position et l'orientation du repère R_{lame} dans le repère R_{bloc} .

Programmation et découpe (phase réalisée au LIRMM)

Le robot a été programmé dans l'environnement CIDE, via les méthodes de la librairie CALibrary de la société

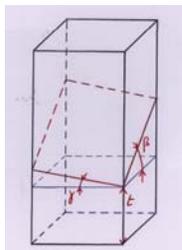
Cerebellum Automation. Les 6 axes du robot étaient commandés en mode actif. Aucun capteur d'effort n'a été intégré. Seule la gâchette d'actionnement de la lame était contrôlée manuellement par l'opérateur.

Il a donc été décidé de découper le bloc en passes successives de 3mm de profondeur (figure 7). L'angle d'attaque de la lame de scie par rapport à la face supérieure du bloc a été fixé à 20°. La vitesse d'avance du robot était d'environ 10mm/s.

Le protocole de découpe s'est déroulé comme suit : 4 séquences de découpe des plans 1, 2 et 3. L'objectif d'un tel protocole est de pouvoir comparer les performances de la procédure robotisée avec celles des 6 opérateurs ayant chacun réalisé les mêmes séquences de découpe selon la procédure conventionnelle (tout manuel) et naviguée optiquement.

Mesures et traitement des résultats (phase réalisée au CEREM)

Les mesures ont été effectuées sur une machine de mesure 3D de marque Mycrona (figure 8). Pour chaque bloc, la numérisation du plan découpé (figure 9) s'est faite en 2



| Plan | t (mm) | γ (°) | β (°) |
|------|--------|--------------|-------------|
| 1 | 25 | 10 | 30 |
| 2 | 30 | -20 | 10 |
| 3 | 45 | 20 | -20 |

Fig. 5 : Les 3 plans de coupe spécifiés

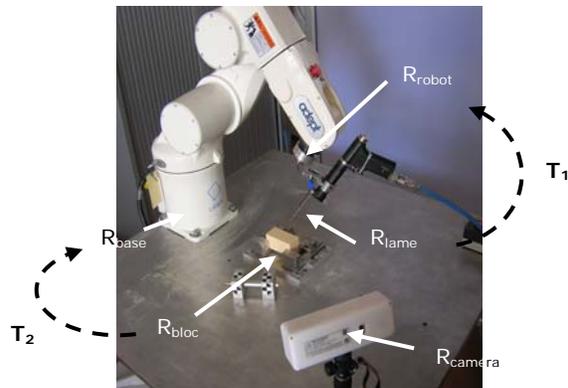


Fig. 6 : Définition des repères R et des transformations T du recalage robot-bloc-outil de coupe

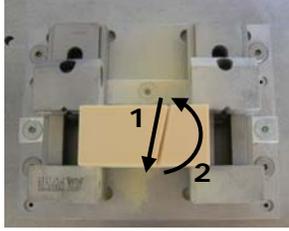


Fig. 7 : La stratégie de coupe :
(1) passe (2) retour outil

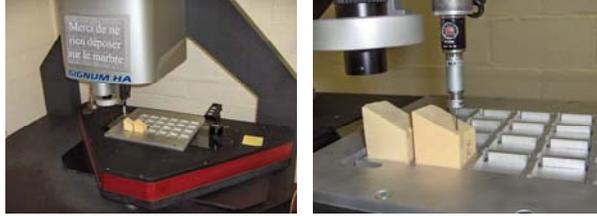


Fig. 8 : Numérisation des plans découpés
sur la machine de mesure

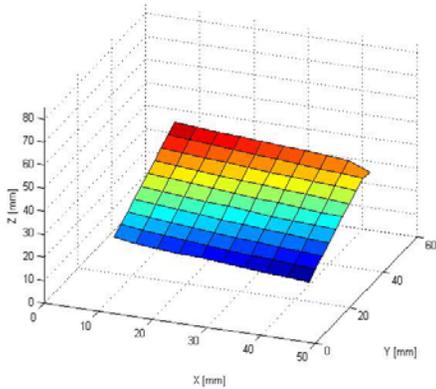


Fig. 9 : Exemple de plan numérisé

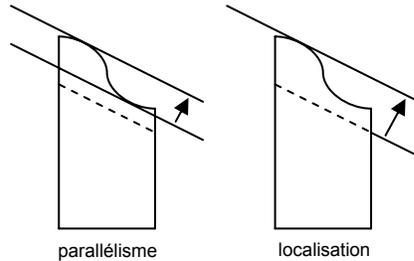


Fig. 10 : Illustration du parallélisme et de la localisation
du plan découpé. En pointillé, le plan spécifié.

étapes : (1) palpation d'une matrice de 10x10 points et (2) construction du plan des moindres carrés. L'altitude t et les 2 angles γ et β du plan numérisé ont ensuite été comparés à la planification.

3 autres paramètres ont également été mesurés : la planéité, le parallélisme et la localisation du plan découpé par rapport au plan spécifié (figure 10). Le parallélisme et la localisation du plan sont définis selon la théorie du tolérancement mécanique. Le parallélisme regroupe la planéité du plan découpé et les erreurs sur les angles γ et β . La localisation regroupe la planéité, les erreurs sur γ et β ainsi que l'erreur sur l'altitude t . L'objectif est de savoir si le parallélisme et/ou la localisation permettront de définir la qualité d'une découpe osseuse.

3. Résultats

12 blocs ont été découpés selon la procédure robotisée (ROB) : 3 plans de coupe et 4 essais. Pour les procédures conventionnelle (ML) et naviguée (NO), 6 opérateurs ont effectué les 12 mêmes découpes : 72 blocs ML et 72 blocs NO.

La figure 11 présente les performances de chaque procédure (moyenne et intervalle de confiance à 95%) pour chacun des 6

paramètres évalués : l'altitude t du plan (mm), l'angle de face γ ($^\circ$), l'angle de profondeur β ($^\circ$), la planéité (mm), le parallélisme (mm) et la localisation (mm).

L'analyse statistique de ces résultats est en cours, et a pour but de déterminer les différences significatives entre les performances des 3 procédures, entre les 6 opérateurs des procédures ML et NO, et entre les 3 plans de coupe spécifiés.

La seconde étude en cours est le problème de la définition de la qualité d'un plan découpé. Elle porte sur l'analyse des notions de parallélisme et de localisation en tant qu'unique paramètre de quantification (au lieu des 4 paramètres t , β , γ et planéité).

4. Discussion

Cette expérience a été réalisée sur un modèle osseux simplifié, sous des conditions de travail idéales : grande accessibilité à la surface osseuse, absence de muscles, nerfs et vaisseaux, et absence de sang. Sous ces conditions expérimentales, les résultats présentés figure 11 montrent clairement que la procédure robotisée a globalement de meilleures performances que la procédure

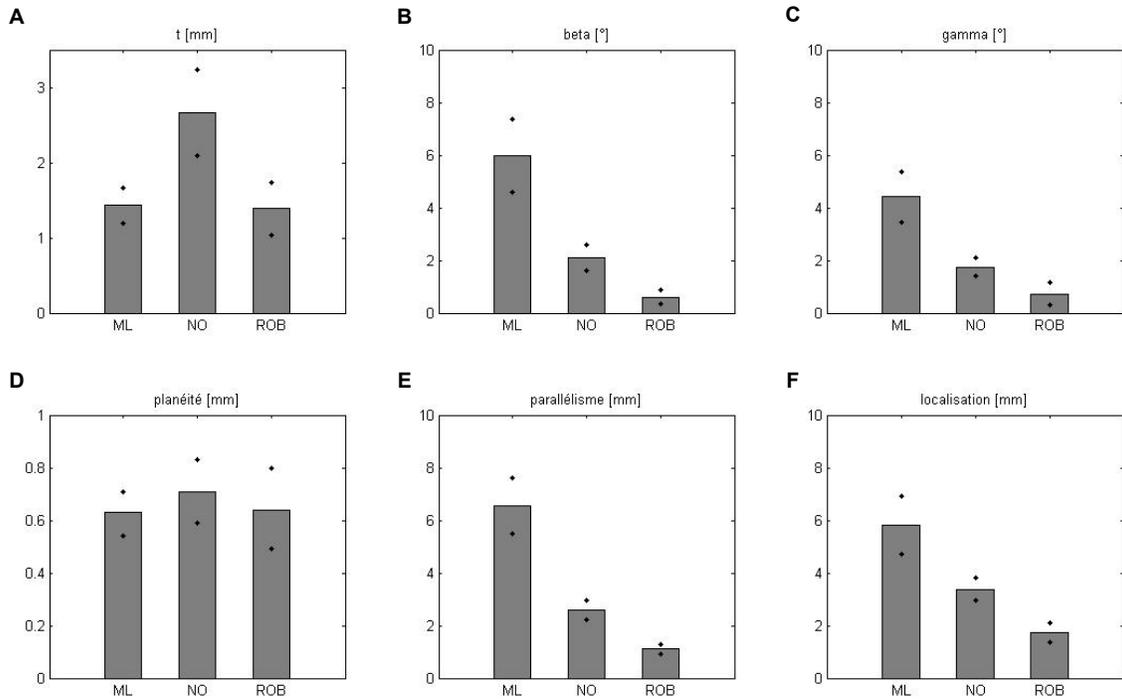


Fig. 11 : Performances des procédures conventionnelle (ML), naviguée (NO) et robotisée (ROB) pour les 6 paramètres d'évaluation des plans découpés : (A) l'altitude t , (B) l'angle de profondeur β , (C) l'angle de face γ , (D) la planéité, (E) le parallélisme et (F) la localisation. Les données sont représentées par la moyenne et l'intervalle de confiance à 95%.

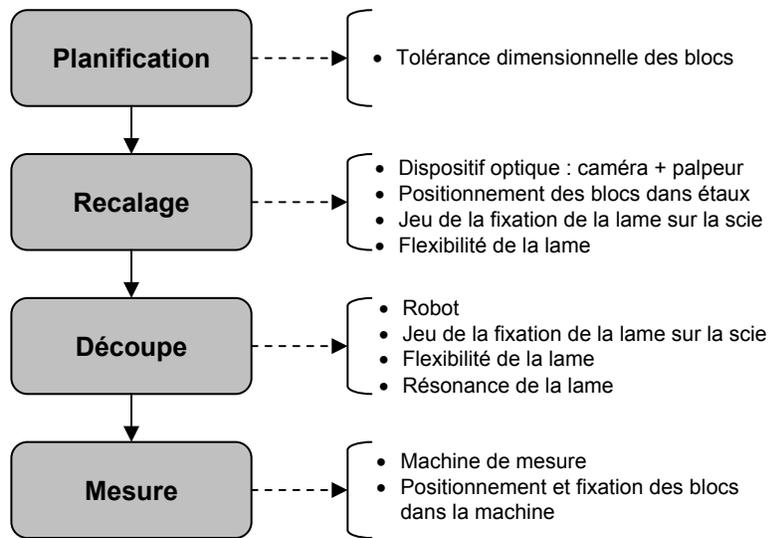


Fig. 12 : Les sources locales d'erreur de la procédure robotisée

naviguée, qui elle-même présente de meilleures performances que la procédure conventionnelle. Pour une réelle résection/reconstruction d'une tumeur pelvienne, il faudra tenir de contraintes supplémentaires telles que la complexité géométrique du pelvis et le volume accessible restreint.

L'expérience a été conçue pour déterminer l'erreur globale de la procédure robotisée. Il en fut de même pour les 2 autres procédures (conventionnelle et naviguée). Les sources locales d'erreur n'ont donc pas été prises en compte. Elles peuvent se résumer en 4 groupes (figure 12) : erreur de planification, erreur de recalage, erreur de découpe, et erreur de mesure.

Les performances intrinsèques du robot ont été vérifiées. L'imprécision due à son utilisation dans la procédure était négligeable par rapport aux autres sources d'erreur, les principales étant le dispositif optique utilisé lors du recalage et l'outil de coupe. Le développement d'une procédure naviguée et/ou robotisée pour une réelle résection/reconstruction pelvienne devra tenir compte de ces différentes sources d'imprécision et les optimiser.

L'erreur sur l'altitude t du plan découpé est plus importante pour la procédure naviguée que pour les 2 autres procédures (figure 11a). Pour les procédures conventionnelle et robotisée, l'erreur est respectivement 1.43 (CI 1.20-1.66) mm et 1.39 (CI 1.04-1.73) mm. L'épaisseur de la lame de scie est de 1.4mm et la perte de matière due à l'utilisation de la scie oscillante était d'environ 2mm. L'erreur plus grande pour la procédure naviguée (2.67 (CI 2.10-3.24) mm) peut s'expliquer par la flexion, non modélisée par le système de navigation, de la lame de scie lors de son positionnement manuel à la surface du bloc.

Concernant l'erreur sur les angles β et γ , il apparaît que pour la procédure conventionnelle, l'angle de profondeur β est plus difficile à maîtriser que l'angle de face γ (figures 11b et 11c) : 6.00 (CI 4.61-7.38) ° contre 4.41 (CI 3.44-5.38) °. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'à main levée, la perception de la profondeur de la structure osseuse à découper est rendue plus ardue par le manque de visibilité. De plus, dès que la découpe est entamée, la lame de scie est guidée par la matière : il est relativement difficile de corriger sa trajectoire, une telle

correction se faisant alors aux dépens des efforts de coupe, de la flexion de la lame, et au risque de provoquer un phénomène de bourrage de la lame dans la matière.

L'assistance au geste (navigation ou robot) permet de fournir au chirurgien l'information supplémentaire concernant la profondeur. Il en résulte que l'erreur sur chacun des angles n'est plus significativement différente (figure 11b et 11c). Pour la procédure naviguée, l'erreur sur β et γ est 2.09 (CI 1.60-2.58) ° et 1.75 (CI 1.40-2.10) ° respectivement. Et pour la procédure robotisée, l'erreur sur β et γ est 0.60 (CI 0.35-0.86) ° et 0.73 (CI 0.32-1.15) ° respectivement.

La planéité du plan découpé apparaît comme indépendante de la technologie d'assistance (figure 11d). Les résultats pour les procédures conventionnelle, naviguée et robotisée sont 0.63 (CI 0.54-0.71) mm, 0.71 (CI 0.59-0.83) mm et 0.64 (CI 0.49-0.80) mm, respectivement. Il peut donc être intéressant de réaliser une étude comparative de différentes lames de scie (en longueur et épaisseur) ainsi que d'une fraise.

L'erreur de parallélisme et de localisation des plans découpés par rapport aux plans spécifiés amène à la même conclusion que celle des angles β et γ : la procédure robotisée a de meilleures performances que la procédure naviguée qui elle-même a de meilleures performances que la procédure conventionnelle (figure 11e et 11f). Pour le parallélisme, les résultats sont respectivement 6.54 (CI 5.47-7.60) mm, 2.59 (CI 2.23-2.94) mm et 1.11 (CI 0.91-1.30) mm. Pour la localisation, les résultats sont respectivement 5.81 (CI 4.73-6.90) mm, 3.38 (CI 2.94-3.83) mm et 1.73 (CI 1.35-2.11) mm.

Le parallélisme et la localisation sont des outils de tolérancement mécanique utilisés dans cette expérience comme outils d'expertise. L'étude en cours porte sur la possibilité de qualifier la précision d'une découpe en 1 seul paramètre plutôt qu'en 4 (t , β , γ et planéité).

La différence entre l'erreur de parallélisme et celle de localisation pour chaque procédure vient du fait qu'outre la planéité et les angles β et γ , la localisation tient également compte de l'altitude t .

L'utilisation de la scie oscillante dans la procédure robotisée a permis de mettre en

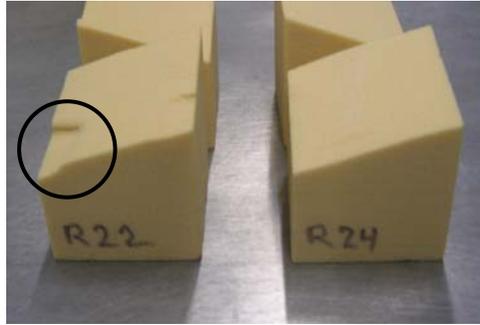


Fig. 13 : Défaut de coupe lors la procédure robotisée dû à la résonance de la lame de scie

évidence un phénomène de résonance de la lame de scie. Dus à son mouvement oscillant et à sa longueur, la lame entrait en résonance de manière aléatoire. La gâchette d'actionnement de la scie permettait de régler manuellement la vitesse d'oscillation, mais n'a pas permis d'annuler ce phénomène. Les défauts résultant de cette résonance sont illustrés à la figure 13 et ont été filtrés lors de la numérisation du plan découpé par la machine de mesure. L'étude de ce phénomène, intrinsèque à l'outil de coupe, est en cours.

En conclusion, bien que la scie oscillante semble ne pas être l'outil de coupe le plus adéquat, l'utilisation d'un robot dans la procédure de découpe fournit les résultats les plus satisfaisants. Lors de cette expérience, l'assistance robotisée a permis de réduire significativement l'imprécision

due au positionnement manuel et à la manipulation de l'outil de coupe par l'opérateur.

La précision souhaitée pour la résection tumorale est moindre que pour la découpe de la greffe. Le principal enjeu d'une résection est de découper en marge saine (entre 10 et 20 mm de la tumeur) afin d'annuler le risque de récurrence. Les performances de la procédure naviguée répondent à ce cahier des charges. Il est intéressant, dans un premier temps, de penser que la résection tumorale soit réalisée selon une procédure naviguée, et la découpe de la greffe selon une procédure robotisée. Ceci permettrait de découper la greffe avec plus de précision que la tumeur et d'ainsi optimiser l'ajustement greffe-patient.