

OuDIni: Outil interactif d'aide à l'inspection de surfaces

Clément Tremblay¹, Robert Bergevin¹ et Paul Freedman²

¹Laboratoire de vision et systèmes numériques
Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval

²Centre de recherche informatique de Montréal

Résumé

Le but de ce projet consiste à développer un outil interactif d'aide à l'inspection de surfaces en faisant appel à la réalité virtuelle. Pour ce faire, la surface des objets est échantillonnée en images de profondeur et modélisée à l'aide de triangles. Un opérateur déplace, à l'aide d'un palonnier à retour de force, l'objet à inspecter vers son modèle de référence. Le retour de force appliqué est calculé en considérant la forme géométrique des surfaces ainsi que les position et orientation relatives des triangles les constituant. Lorsque les surfaces des deux objets sont juxtaposées, un rapport de qualité est produit. Cet article relate le travail réalisé et les résultats obtenus dans le développement d'un premier prototype de l'outil d'inspection appelé OuDIni. Pour ce premier prototype, le palonnier à retour d'effort n'étant pas encore disponible, on utilise plutôt la souris d'un poste de travail graphique comme interface d'entrée des commandes de l'opérateur. Quant aux forces à appliquer au palonnier, elles sont affichées sous forme graphique à l'écran. Nous présentons les différents aspects de l'opération de l'outil d'inspection OuDIni puis nous voyons comment les triangles formant le modèle de l'objet inspecté sont utilisés dans les calculs de positionnement. Par la suite, les forces attractives et répulsives générées par l'interaction des modèles sont introduites. Ces forces sont alors combinées dans le calcul du retour d'effort à appliquer au palonnier. Des résultats expérimentaux permettent de caractériser la performance du prototype réalisé.

Abstract

The aim of this project is to develop an interactive aid for surface inspection using virtual reality. In order to accomplish this, the surface of an object is modeled with triangles after capturing a range image. Using a force feedback joystick, an operator guides a modeled surface region towards a reference model. The applied feedback force is computed by considering the geometrical shape of the modeled surfaces and the relative position and orientation of their constituent triangles. When the surfaces of the two objects are best aligned, a quality of surface contact indicator is generated. This paper describes the work realized and the results obtained in developing a first prototype of the inspection aid, named OuDIni. In this first

prototype, the force feedback joystick not being available, the graphics workstation mouse is used as the user input interface and the forces to be applied to the joystick are displayed in graphical form on the screen. We present the different aspects of the inspection aid operation and explain how the triangles forming the model of the inspected object are used in computing the positioning forces. Attractive and repulsive forces are introduced as a result of the models' interaction. They are then combined in deriving the force feedback to be applied to the joystick. Experimental results provide a performance measure of the realized prototype.

1. Introduction

La technologie d'aujourd'hui exige des pièces usinées complexes et de grande précision. Il est donc important d'inspecter périodiquement leurs surfaces afin de vérifier si elles répondent toujours aux critères de qualité désirés. Plusieurs méthodes ont été proposées afin d'automatiser le plus possible les opérations nécessaires à la détection d'anomalies. Les méthodes d'inspection "traditionnelles" en vision numérique tentent de mettre en évidence des défauts particuliers tels que trous, fissures, etc. Pour ce genre de problème, il est possible d'automatiser presque entièrement le processus. Par exemple, les travaux de Pitre [1] proposent un système formé d'une caméra laser télémétrique permettant de modéliser la pièce à inspecter et une caméra infrarouge permettant de détecter les défauts de surface par une méthode thermographique.

Par contre, d'autres types de défauts comme l'usure ou la déformation d'une pièce peuvent être difficiles à détecter par ce genre d'approche. En effet, puisque l'on ne connaît, a priori, ni l'allure ni la localisation et ni l'ampleur du défaut, on se doit de comparer la pièce à un modèle de référence. Dans plusieurs applications, quelques millimètres suffisent pour juger une pièce défectueuse. Par conséquent, il est rarement possible de pouvoir détecter l'usure ou la déformation de façon complètement manuelle. De plus, de par les formes diverses et les échelles de grandeur variées des objets à inspecter, il devient très complexe et coûteux de créer les capteurs d'analyse appropriés à chaque pièce et permettant de détecter une faible usure sur la surface.

Pour répondre à ce besoin, nous proposons un Outil D'Inspection (OuDIni) utilisant la réalité virtuelle

[2][3][4]. L'idée de base est de remplacer la manipulation de pièces physiques à inspecter par une manipulation virtuelle de la représentation de l'objet en trois dimensions.

A partir des coordonnées spatiales des points de surface de l'objet réel, un modèle formé d'éléments triangulaires couvrant la totalité de la surface est construit, appelé *Modèle de référence* (M_r). Celui-ci est généré une seule fois à partir des mesures faites sur l'objet au moment de sa fabrication (sans usure). Par la suite, certaines surfaces d'intérêt seront aussi modélisées. Ces modèles partiels sont appelés *Modèles de test* (M_t). Ils sont générés à partir des mesures faites sur l'objet dans son état actuel (avec usure). Ainsi, des *Modèles de test* pourront être générés et comparés au *Modèle de référence* à chaque fois qu'une inspection sera jugée nécessaire. Un opérateur sélectionnera alors la partie d'intérêt sur le *Modèle de référence* qu'il désire inspecter¹. La partie sélectionnée aura un attribut dit "attractif" par rapport au reste du modèle qui sera "répulsif". Pour des fins de comparaison, le *Modèle de test* correspondant sera aussi "attractif". L'opérateur déplacera le *Modèle de test*, à l'aide d'un palonnier à retour d'effort, vers la partie attractive du *Modèle de référence* pour obtenir la meilleure juxtaposition possible. Le retour d'effort sera calculé en fonction de la géométrie et des propriétés attractives et répulsives des *Modèles* ainsi que de leur disposition relative dans l'espace. Une fois le *Modèle de test* accolé au *Modèle de référence*, une analyse des surfaces en correspondance sera effectuée afin d'obtenir un rapport sur le degré d'usure de l'objet.

Il est intéressant de noter que ce type d'approche n'est pas limité à l'inspection de pièces industrielles. Ainsi, la méthode développée pourrait aussi servir d'aide au diagnostic médical. Il s'agirait alors de mesurer, par la mise en correspondance de modèles surfaciques tirés d'images médicales, le degré de modification de la morphologie d'un organe au cours de l'évolution d'une maladie.

Cet article relate le travail réalisé et les résultats obtenus dans le développement d'un premier prototype de l'outil d'inspection OuDIni. Pour ce premier prototype, le palonnier à retour d'effort n'étant pas encore disponible, nous avons utilisé la souris d'un poste de travail graphique comme interface d'entrée des commandes de l'opérateur pour le pilotage de la mise en correspondance des modèles. Quant aux forces à

appliquer au palonnier, elles sont affichées sous la forme de graphiques à l'écran.

La prochaine section présentera les différents aspects de l'opération de l'outil d'inspection OuDIni. Par la suite, nous verrons comment les triangles formant le modèle de l'objet inspecté sont utilisés dans les calculs de positionnement. Une section sera consacrée aux forces attractives et répulsives générées par l'interaction des modèles. Elle sera suivie d'une section expliquant la méthode de combinaison de ces forces pour le calcul du retour d'effort à appliquer au palonnier. Finalement, des résultats expérimentaux permettront de caractériser la performance du prototype réalisé et l'article se terminera par une courte conclusion.

2. Opération d'OuDIni

La figure 1 illustre l'ensemble de l'outil d'inspection tel qu'envisagé. A l'aide du palonnier à retour d'effort (ou son substitut, la souris) l'opérateur devra apposer le modèle de test (M_t) sur le modèle de référence (M_r). Le champ de force du palonnier sera modifié de façon à diminuer la résistance vers la partie attractive du modèle de référence.

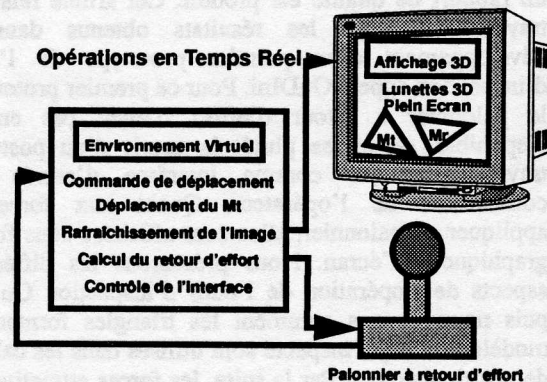


Figure 1 Vue d'ensemble d'OuDIni

Le palonnier constituera l'élément haptique de l'environnement virtuel. Il sera l'interface principale entre l'opérateur et les entités virtuelles. Il recevra les commandes de l'opérateur à savoir la direction et la vitesse de déplacement de l'objet et les transmettra au programme principal afin qu'il calcule les nouvelles forces et repositionne les modèles dans l'environnement graphique. Quant au programme principal, il doit calculer le vecteur force résultant et le transmettre au palonnier. Le vecteur force résultant sera projeté sur les trois axes primaires, le décomposant ainsi en trois vecteurs directionnels et trois moments de rotation qui seront appliqués aux moteurs responsables de la sensation haptique.

L'opérateur sera donc assisté par le retour d'effort quant à la direction et la rotation de l'objet. En effet, le palonnier sera plus rigide vers les directions répulsives et plus souple vers la direction d'intérêt. Selon les conclusions de certains projets similaires menés par

1. Cette sélection ne s'avère nécessaire que dans le cas où seule une petite partie du modèle de référence est d'intérêt pour l'inspection. L'automatisation de cette étape correspondrait à réaliser au départ un appariement entre les deux modèles ce qui rendrait possible (par exemple, en identifiant des points ou courbes caractéristiques sur les surfaces) le calcul de la pose du modèle de test par rapport au modèle de référence. La grande difficulté de ce calcul pour des surfaces de forme arbitraire ainsi que le fait que notre modèle de test soit déformé et ne représente donc pas une vue rigide du modèle de référence explique notre choix d'une approche partiellement interactive pour l'inspection des surfaces.

Iwata [5], la sensation véhiculée par un palonnier à retour d'effort fournit à l'opérateur une information supplémentaire et pertinente à la compréhension de l'étude de l'objet, et ce même à l'aide d'un algorithme grossier. Ceci s'explique par le haut niveau de dextérité et de sensibilité de la main humaine.

Dans cet article, les forces à appliquer au palonnier seront calculées et affichées pour fin d'analyse.

2.1 Contrôle de l'environnement par la souris

La souris en mode "Déplacement" permet de déplacer le modèle de test vers le modèle de référence en translation ou en rotation. La souris transmet au modèle un taux de déplacement plutôt qu'un déplacement absolu. Par conséquent, un déplacement de la souris d'une grande amplitude se traduit par un déplacement plus rapide du modèle. Ainsi, pour réduire la vitesse de déplacement il suffit de ramener légèrement la souris en direction inverse du déplacement du modèle. A chaque fois que l'on relâche le bouton, droit ou central, le taux de déplacement en translation ou en rotation revient à zéro indépendamment d'où se trouve physiquement la souris. Cette façon de faire permet à l'opérateur une plus grande souplesse et une aisance dans ses mouvements. Pour cette même raison, Colin Ware et Danny R. Jessome [6] opèrent un périphérique à 6 degrés de liberté en utilisant un bouton central pour activer les mouvements et réinitialiser le taux de déplacement. Pour leur périphérique, qui est utilisé à main levée dans l'espace en 3 dimensions, l'aisance de l'opérateur est encore plus importante. Le contrôle par taux de déplacement (vitesse) plutôt que par déplacement absolu est confirmé par les travaux de recherche menés par Shumin Zhai [7]. Selon l'auteur, cette façon de contrôler la souris limite les mouvements et accentue la précision de la pose.

2.2 Fonction de transfert

Afin que l'utilisation du périphérique soit le plus intuitif possible, une fonction de transfert a été calculée de façon à ce que le sens du déplacement physique du périphérique corresponde au sens du déplacement visible à l'écran du (ou des) modèle(s). La matrice de transformation suivante permet donc d'ajuster les déplacements de la souris à la vue de la scène présentée à l'écran.

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} M_x & M_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \\ 0 & \sin \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le vecteur contenant T_x , T_y et T_z représente le résultat final de la translation appliquée au modèle de test dépendamment de la vue à l'écran, donnée par les angles α et β , et du mouvement physique de la souris M_x et M_y . Grâce à cette fonction de transfert, la translation résultante du modèle de test visible à l'écran correspondra au déplacement de la souris en 2D.

3. Modélisation par éléments triangulaires

À partir des points 3D d'une pièce réelle, obtenus à l'aide de caméra télémétrique, il est possible d'éliminer l'arrière-plan et de ne conserver que les points de la surface de l'objet. Une fois cette préparation effectuée, pour plusieurs images obtenues de différents points de vue, la création d'un modèle intégré non-redondant est possible en utilisant le programme PIVERT [9]. Toutefois ce modèle est trop lourd pour être directement utilisé dans OuDIni. Une autre étape est nécessaire afin d'éliminer plusieurs points selon la marge d'erreur jugée acceptable. Ainsi, un modèle détaillé aura un nombre important de triangles de fines dimensions tandis qu'un modèle plus grossier aura un nombre plus restreint de triangles de plus grandes dimensions définissant, tout de même, la totalité de la pièce. Le lecteur intéressé aux algorithmes utilisés peut consulter [10]. Par la suite, il s'agit de *polariser* le modèle en fonction des régions attractives et répulsives.

3.1 Le triangle comme base de calcul

Le triangle est utilisé comme élément de base pour la modélisation des pièces d'intérêt. Il est également l'élément mathématique de base pour les calculs des forces. Chaque contribution élémentaire d'un triangle est sommée pour générer un vecteur de force global F_g . Les propriétés mathématiques associées aux triangles telles que le centre, l'aire et la normale à la surface, sont utilisées dans ce calcul. Le triangle est considéré comme une plaque uniformément chargée évoluant dans un champ magnétique.

3.2 Visibilité des triangles

Déterminer la visibilité réciproque des triangles des modèles est nécessaire au bon fonctionnement du logiciel. En effet, il serait impossible pour des objets relativement complexes, possédant un nombre de triangles élevés ($\gg 1000$), de considérer tous les triangles du système pour les traitements mathématiques exigés dans un cadre d'opération en temps réel. Avec un simple test de visibilité, environ la moitié des triangles de l'environnement virtuel sont retirés des traitements ultérieurs. Ceci allège d'autant le nombre d'opérations, permettant au système de calculer les forces et d'afficher les modèles en "temps réel".

Une méthode approximative est utilisée pour déterminer la visibilité. Cette méthode utilise le vecteur $V_{(i,j)}$ créé en joignant les centroïdes des deux modèles. La visibilité de chaque triangle est ensuite calculée en faisant le produit scalaire entre la normale à la surface et le vecteur $V_{(i,j)}$. Si l'angle entre la normale à un triangle et le vecteur $V_{(i,j)}$ est plus grand que 90 degrés, le triangle est considéré "invisible"; si l'angle est inférieur, le triangle est "visible".

3.3 Facteur de visibilité

Le Facteur de Visibilité (FV) est un élément clé dans le calcul du retour d'effort. Il est proportionnel à la

visibilité réciproque de chaque paire de triangles. Pour le calculer, un vecteur distance est construit d'un centroïde à l'autre des triangles. Par la suite on détermine le cosinus de l'angle formé par la normale à la surface et le vecteur distance pour les deux triangles (angles θ_{M_t} et θ_{M_r}). En multipliant les deux valeurs on obtient le facteur de visibilité:

$$FV = \cos\theta_{M_t} \cos\theta_{M_r} \quad (2)$$

Ainsi, si deux triangles sont parfaitement alignés l'un en face de l'autre, ils auront un facteur de visibilité de 1. Par ailleurs, si l'un des deux triangles a un angle de 45 degrés par rapport à l'autre, le facteur de visibilité sera de 0.5.

4. Calcul des forces

Nous décrivons, dans cette section, les principes de base qui serviront au calcul du retour d'effort pour toutes les méthodes expliquées à la Section 5. La différence entre les méthodes se situe au niveau des critères de sélection des triangles impliqués dans le calcul du vecteur force, la formule de base restant la même.

On retrouve, comme conditions initiales, le modèle de référence au centre de l'environnement virtuel et le modèle de test situé à un endroit arbitraire déterminé selon les préférences de l'opérateur. Puisque le calcul du retour d'effort est fonction, entre autres, de la distance entre les modèles et de leur géométrie, une étape de calibration sera nécessaire.

4.1 Le champ de force

L'idée que des forces imaginaires agissent sur un objet dont le mouvement est contrôlé, par exemple un robot mobile, a souvent été utilisée dans le passé [11] [12]. Dans cette approche, les obstacles exercent des forces répulsives sur le robot tandis que s'applique une force attractive sur la cible que veut atteindre le robot. La somme vectorielle de ces forces détermine la direction et la vitesse de la trajectoire du robot. Ce type d'approche est appelé méthode par "champ de force virtuel". Koren et Borenstein [13] ont également utilisé cette approche et notre méthode de positionnement s'inspire de leurs travaux.

Les triangles, éléments de base pour la construction des modèles, sont considérés mathématiquement comme les charges élémentaires de l'environnement virtuel. En fait, chaque triangle représente une plaque uniformément chargée proportionnellement à sa surface. Puisque le modèle est polarisé "attractivement" et "répulsivement", il y a donc présence de forces attractives et répulsives. Le champ de force résultant désiré doit être maximal au début du processus et diminuer en s'approchant de la région attractive du modèle de référence. Ainsi, les sensations haptiques générées aideront l'opérateur à diriger le modèle de test vers la section attractive du modèle de référence. Les

forces attractives diminueront le champ de forces en direction de la section présélectionnée tandis que les forces répulsives tendront à augmenter le champ de force créant ainsi une sensation de répulsion qui permettra à l'opérateur d'éviter les sections non désirées.

4.2 Calcul du vecteur force élémentaire

Selon les besoins de l'outil interactif, la force doit avoir une valeur maximale au départ et décroître en fonction de la distance vers la section attractive. De plus, elle doit être proportionnelle au produit des aires des triangles impliqués dans le calcul. Enfin, le facteur de visibilité (FV) défini à la Section 3.3 module la valeur de la force. Par conséquent, le calcul du vecteur force élémentaire a la forme suivante:

$$F_{(i,j)} \propto KFVA_{M_t}A_{M_r}Vd \quad (3)$$

où:

F(i,j)	Vecteur Force élémentaire
K	Constante de calibration
FV	Facteur de Visibilité
AMt	Aire du triangle du modèle de test
AMr	Aire du triangle du modèle de référence
Vd	Vecteur distance entre les modèles

Soit un triangle (i) du modèle de test et un triangle (j) du modèle de référence contribuant au calcul du vecteur force élémentaire. En sommant chaque composante pour tous les triangles sélectionnés, en normalisant les vecteurs distances par la distance initiale pour les trois dimensions de l'espace (x,y,z), et finalement en divisant par le nombre de relations entre les triangles (i^*j), on obtient le vecteur force global suivant:

$$F_g = \frac{K}{ij} \sum_i \sum_j FV_{(i,j)} A_{M_t} A_{M_r} Vd_{(i,j)} \quad (4)$$

où:

$$Vd_{(i,j)} = \left[\frac{Vdx_j - Vdx_i}{Vd_{init}} + \frac{Vdy_j - Vdy_i}{Vd_{init}} + \frac{Vdz_j - Vdz_i}{Vd_{init}} \right]$$

Fg	Vecteur Force global
K	Constante de calibration
FV(i,j)	Facteur de Visibilité entre deux triangles
AMt(i)	Aire du triangle du modèle de test
AMr(j)	Aire du triangle du modèle de référence
Vdx(j)-Vdx(i)	Composante x du Vecteur distance entre triangles
Vdy(j)-Vdy(i)	Composante y du Vecteur distance entre triangles
Vdz(j)-Vdz(i)	Composante z du Vecteur distance entre triangles
Vdinit	Module du Vecteur distance initial entre les modèles

La boucle de programmation principale comprend le calcul d'un vecteur force global attractif F_{gA} et d'un vecteur force global répulsif F_{gR} respectant la polarité

des triangles prédéterminée par l'opérateur. La soustraction des deux vecteurs forces donne un vecteur résultant F_{gT} qui établit une modification au champ de forces du palonnier vers la section à inspecter.

4.3 Calibration

Le calcul des vecteurs forces dépend de la distance initiale entre les modèles et de la nature de leurs composantes primaires, en particulier l'aire des triangles. Une étape de calibration s'impose pour normaliser tous les cas de positionnement et d'orientation ainsi que les variations dues à la dimension des modèles afin d'éviter le débordement des valeurs calculées par l'algorithme. Cette étape est d'autant plus importante que les valeurs obtenues seront éventuellement dirigées vers une composante physique (le palonnier à retour d'effort). Les modèles étant connus dès le départ, on obtient la normalisation de l'aire des triangles en prenant l'inverse du produit des plus grandes surfaces de chacun des modèles:

$$KA = \frac{1}{A_{Mt_{max}} A_{Mr_{max}}} \quad (5)$$

où:

KA	Gain de calibration des Aires
AMtmax	Aire du plus grand triangle du modèle de test
AMrmax	Aire du plus grand triangle du modèle de référence

Une fois cette constante obtenue, le programme réalise une itération complète du calcul des vecteurs de force afin de calibrer le champ de force entre 0 et 100. Les valeurs 0 et 100 sont arbitraires. Toutefois, les limites 0 et 100 ont été privilégiées compte tenu de leur facilité de traitement mathématique pour l'affichage sur forme graphique ou pour une conversion ultérieure. Cette étape donne un autre gain de calibration (équation (6)), normalisant le système quant à la position des modèles à l'initialisation du logiciel.

$$KF = 100/F \quad (6)$$

où:

KF	Gain de calibration du vecteur force global
F	Vecteur force global

La calibration finale K est obtenue par la multiplication des gains KA et KF.

$$K = KA \cdot KF \quad (7)$$

Il est à noter que, pour éviter tout débordement, l'opérateur doit diriger le modèle de test vers le modèle de référence en diminuant la distance entre ceux-ci. Si initialement l'opérateur augmente la distance, les valeurs des vecteurs de force vont dépasser la limite supérieure de 100. Toutefois, pour protéger la composante physique de sortie, le signal sera limité à 100.

Enfin, un filtrage du signal a été introduit afin

d'atténuer les variations du vecteur force globale. Le traitement est simple et efficace: il s'agit de moyenner les 10 dernières valeurs du vecteur force et d'utiliser ce résultat comme signal de sortie (courbes (3) à la figure 4).

5. Calcul du retour d'effort

Cette section décrit les différentes méthodes de sélection des vecteurs qui contribuent au calcul du vecteur force global. Toutes les méthodes sont basées sur le même calcul de base soit, l'équation (4). Le résultat global du champ de force dépend de ses composantes primaires. Par conséquent, dépendamment des critères de sélection des différentes méthodes, le vecteur force global ainsi que le FV global obtenus seront différents.

5.1 Partie commune

Avant d'aborder chaque méthode en particulier, nous décrirons un algorithme commun aux différentes méthodes, pour éliminer certains triangles et accélérer les calculs. Initialement, les triangles sont indexés par leur aire. Par la suite, un pourcentage de triangles de départ est fixé par l'opérateur. L'algorithme, à la distance initiale entre les modèles, considérera le pourcentage initial de triangles désirés en sélectionnant les plus grands. En diminuant la distance entre les modèles, le nombre de triangles considérés dans les calculs augmentera proportionnellement. Ceci a comme effet qu'à la distance initiale, seuls les triangles les plus grands sont considérés puis en diminuant la distance, les triangles les plus petits sont graduellement impliqués dans les calculs. A partir de ce nombre de triangles, les méthodes suivantes sélectionneront, selon des critères différents, les triangles privilégiés qui contribueront au champ de force global.

5.2 Méthodes "Loin" et "Près"

Nous aborderons deux méthodes dans la même section, puisqu'elles sont toutes les deux simples et que la méthode "Près" est un sous-ensemble de la méthode "Loin". La méthode "Loin" n'a aucun critère de sélection. Elle tient compte de toutes les combinaisons possibles entre paires de triangles. C'est-à-dire que pour un triangle du modèle de test, tous les triangles attractifs du modèle de référence sont considérés. Lorsque le modèle de test est bien positionné par rapport à la partie attractive du modèle de référence le facteur de visibilité tend vers $100/n$, où n est le nombre de triangles attractifs du modèle de test. À grande distance le FV tend vers 100% puisque le cosinus des angles impliqués dans les calculs des FV tend vers 1, d'où l'appellation "Loin".

Comme sous-ensemble de la méthode "Loin", seule la combinaison offrant le meilleur FV sera sélectionnée, créant ainsi la méthode "Près". Ainsi, chacun des triangles du modèle de test sera jumelé avec celui offrant la meilleure visibilité parmi les triangles

attractifs du modèle de référence. Le FV de cette méthode est un bon indicateur de positionnement. Même pour des exemples plus complexes (voir Section 5), le FV global tend vers des valeurs près de 100% signifiant que le modèle de test est bien positionné dans l'espace par rapport au modèle de référence. Cette méthode donnant des FV tendant vers 1, à faible distance, est appelée "Près".

5.3 Méthode "Sélective"

A partir du sous-ensemble déjà défini à la Section 5.1, la méthode "Sélective" comprend plusieurs autres critères de sélection qui d'un sous-ensemble à l'autre parvient à isoler, pour un triangle du modèle de test, un triangle privilégié du modèle de référence. Il est possible, lorsque toutes les conditions de la méthode ne sont pas respectées, qu'un triangle du modèle de test ne trouve pas son "homologue" sur le modèle de référence. Dans ce cas, il ne contribue pas au calcul du champ de force. Les critères de l'algorithme sont illustrés à la figure 2.

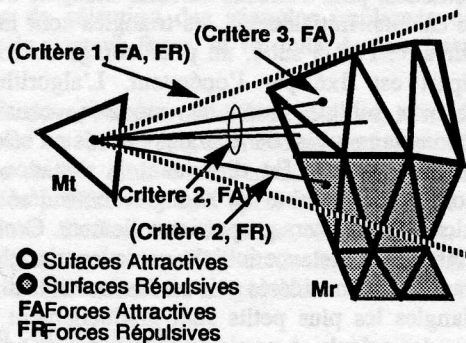


Figure 2 Méthode "Sélective" et Forces "Répulsives"

En premier lieu, l'algorithme applique une contrainte géométrique en créant un cône de recherche à partir de chacun des triangles du modèle de test (Critère 1, FA). Parmi les triangles qui se retrouvent dans le cône, un certain pourcentage, les plus près du triangle du modèle de test, seront conservés (Critère 2, FA). Les valeurs par défaut sont, pour l'ouverture du cône, de 10 degrés et, pour le pourcentage de sélection des triangles les plus près, de 10%. Finalement, le dernier critère qui sélectionnera un seul des triangles du sous-ensemble créé par le cône de recherche et les distances les plus courtes, est basé sur l'aire de la surface. L'algorithme, à cette étape, conservera le triangle du modèle de référence dont l'aire est la plus près de celle du triangle du modèle de test (Critère 3, FA).

5.4 Forces répulsives

Les forces répulsives sont utilisées pour l'évitement des sections non sélectionnées. Elles contribuent au champ de force en l'augmentant vers la valeur maximale de 100, apportant une sensation de résistance à l'opérateur. Elles sont calculées à partir des triangles attractifs du modèle de test et des triangles non sélectionnés du modèle de référence, dit répulsifs.

L'algorithme sélectionnant ces forces utilise, comme dans les autres méthodes, l'indexage par grandeurs de surfaces pour les triangles attractifs du modèle de test.

Le choix des vecteurs élémentaires se fait selon les critères de recherche suivants, illustrés également à la figure 2. Premièrement, l'algorithme recherchera, pour chacun des triangles attractifs du modèle de test appartenant au sous-ensemble déjà décrit, le triangle répulsif le plus près à l'intérieur du cône de recherche (Critère 1, FR) décrit à la Section 5.2.1. Ce vecteur sera conservé seulement si sa distance est plus petite que la distance moyenne des vecteurs attractifs (Critère 2, FR). Ce critère permet d'éviter que la force répulsive devienne plus grande que la force attractive en plus de rejeter les triangles répulsifs éloignés.

D'autres modifications à l'équation (4) sont effectuées pour le calcul des forces répulsives. Premièrement le gain KF (équation (6)) contribuant au gain K de l'équation de base est diminué de moitié soit:

$$KF = 50/F \quad (8)$$

De plus, KD, un facteur atténuant le module de la force répulsive a été ajouté. Ce facteur est proportionnel à la distance entre les modèles. Il vaut 1 à la distance initiale et 0 lorsque les modèles sont bien juxtaposés. Il est obtenu par:

$$KD = (Vd_{moy}) / (Vd_{init}) \quad (9)$$

où:

- KD Gain d'atténuation par la distance
- Vdmoy Module Vecteur distance moyen forces attractives.
- Vdinit Module du Vecteur distance initial entre les modèles

On obtient donc la force répulsive F_{gR} en calculant F à l'aide de l'équation (4), puis en introduisant le facteur d'atténuation KD et en inversant le signe, ce qui donne:

$$F_{gR} = -(KD \cdot F) \quad (10)$$

où:

- FgR Vecteur Force répulsif global
- KD Gain d'atténuation par la distance
- F Vecteur Force global provenant de l'équation de base

Finalement, l'addition vectorielle des forces globales attractives et répulsives donne la variation du champ de force qui est appliquée au palonnier.

5.5 Calcul des moments

L'outil interactif doit de générer un signal sur six degrés de liberté. Trois degrés de liberté sont déjà fournis par le vecteur force global (F_g) qui offre une résistance aux translations du palonnier. Les trois autres, proviennent du calcul du moment découlant du vecteur force global et offrent une résistance aux rotations du palonnier.

Le moment du vecteur force global des différentes

méthodes provient du fait que l'application du vecteur se fait en un point différent du centre de masse du modèle de test. Ce point d'application de la force est la moyenne géométrique (MG) de la base des vecteurs élémentaires sélectionnés par l'algorithme. Une force F étant appliquée à une distance DCM du centre de masse d'un objet crée un moment M égal à $F \times DCM$ sur celui-ci.

Le module et la direction du moment sont obtenus par le produit vectoriel du vecteur distance (DCM) et du vecteur force global (F_g):

$$M = KM \cdot (F_g \times DCM) \quad (11)$$

où:

M	Vecteur Moment
KM	Gain de calibration du moment
F_g	Vecteur Force global
DCM	Vecteur Distance du centre de masse

Le vecteur distance du centre de masse DCM est calculé par la soustraction des coordonnées du centre de masse et les coordonnées de la base du vecteur force global:

$$DCM = (CM_x - MG_x)_i + (CM_y - MG_y)_j + (CM_z - MG_z)_k \quad (12)$$

Le gain de calibration du moment est obtenu de façon similaire au calcul du gain KF (équation (6)). Le calcul du gain KM est réalisé en calculant la valeur du moment avec KM fixé au préalable à 1. Une fois la première valeur du module du moment obtenu, le moment initial sera limité à un module de 50 (équation (6)):

$$KM = 50/M \quad (13)$$

Le moment initial est fixé à 50 pour être à la demie-échelle des forces (0-100), permettant ainsi aux variations de géométrie de l'augmenter ou de le diminuer.

6. Expérimentation et résultats

Le prototype de l'outil d'inspection OuDini a été développé sur plate-forme SiliconGraphics (Iris 4D/310VGX) avec l'environnement GL. Plusieurs expériences de validation du logiciel ont été réalisées avec des modèles synthétiques simples générés manuellement et pour divers niveaux de résolution. Par la suite, d'autres expériences, telles que celles rapportées dans cet article, ont été réalisées en utilisant des modèles générés par le logiciel PIVERT [9] à partir d'images télémétriques d'objets réels provenant du Conseil national de recherches du Canada (CNRC).

6.1 Expérience no. 1: Mt différent de Mr

Cette expérience est réalisée avec un modèle de référence provenant d'une théière. Le modèle de test provient des mêmes points 3D pris sur une seule vue.

Bien que l'anse de la théière ait été préservée dans les deux modèles, elle ne correspond pas à la surface d'intérêt. Cette partie du modèle de référence est donc répulsive et la partie correspondante au modèle de test est neutre. Tous les autres triangles sont polarisés attractivement.

Le modèle de référence compte 846 triangles, dont 47 ont été polarisés attractivement, tandis que le modèle de référence en compte 261, dont 42 polarisés attractivement. Les modèles triangulés sont sous-échantillonnés pour une erreur maximale de 2 mm. La distance initiale entre les deux modèles est de 315 mm. Le pourcentage de sélection du nombre de triangles est au départ de 20% soit 8 triangles dans les deux cas. Au fur et à mesure que les modèles se rapprochent, le nombre de triangles impliqués dans les calculs augmente proportionnellement (Section 5.1).

Les figures 3 a) et b) illustrent le modèle de test en approche vers le modèle de référence assisté par le calcul du retour d'effort de la méthode sélective. Sur la figure 3 a), on voit les vecteurs forces élémentaires qui contribuent au calcul des vecteurs forces globaux attractifs et répulsifs. Le nombre de vecteurs élémentaires est relativement restreint puisque la contrainte du cône de recherche est appliquée (ouverture du cône de 10 degrés). Des vecteurs élémentaires répulsifs *rattachés* à l'anse qui contribuent à l'évitement de cette partie.

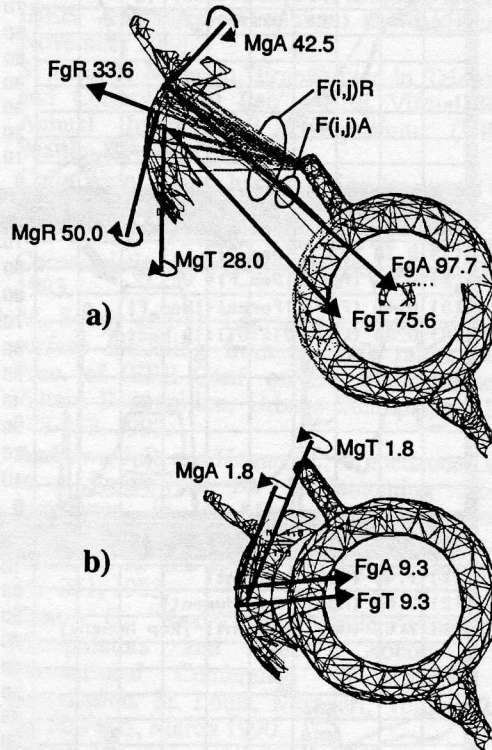


Figure 3 Approche de Mt sur Mr (méthode "Sélective")

Le vecteur résultant global, identifié F_{gT} , est la somme du vecteur force attractif F_{gA} et du vecteur force

excellent FV tout au long de l'expérimentation sans que la position finale ne soit atteinte.

Un bon indice de performance permettant de comparer les méthodes "Près" et "Sélective" dans un cas idéal (Mt identique à Mr), comme ici, est le pourcentage de réussite pour identifier exactement les triangles jumeaux. La méthode "Près" a nécessité 39 appariements sur 42 triangles au total, soit 92%. De ces 92%, 38% sont les bons triangles, soit 15 sur 39. Pour la méthode "Sélective", les résultats sont très différents. Le nombre d'appariements finaux est de 6 sur 42, soit seulement 14%. Sur les 6 triangles sélectionnés, 4 d'entre eux sont les bons, soit 67%. D'autres expériences avec des modèles plus raffinés i.e. ayant un nombre de triangles plus élevé ont donné le même ordre de grandeur de pourcentage de réussite. La méthode "Sélective" accepte donc moins d'appariements, ce qui économise du temps de calcul, et bénéficie d'un algorithme permettant de réaliser un taux élevé de bons appariements.

7. Conclusion

Suite aux expériences réalisées et aux résultats obtenus, la méthode "Près" nous apparait comme étant la plus avantageuse actuellement. En effet, elle a l'avantage d'être très simple d'implantation et elle génère des signaux satisfaisants pour le contrôle du palonnier. En ce qui concerne la méthode "Sélective", elle est certes celle nécessitant le moins de combinaisons de triangles et offre le meilleur FV final. En corrigeant sa lacune principale, soit les manques de signaux dans certaines régions, elle deviendrait sans doute la méthode à privilégier. Les travaux futurs concernant l'amélioration de cette méthode seront basés sur une ouverture de cône adaptative et/ou une méthode hybride entre la méthode "Près" et "Sélective". Parallèlement, les recherches porteront sur la validation des signaux en les appliquant sur un palonnier à retour d'effort en développement au laboratoire. Ainsi, nous recueillerons des données précieuses quant à la pertinence des sensations haptiques pour le guidage de modèles d'objets réels ainsi que pour l'analyse de surfaces.

Le degré de précision requis pour les données d'entrée sera aussi évalué. Ainsi, nous pourrions déterminer un niveau de résolution acceptable pour les images télémétriques. Dans cette optique, l'utilisation d'un ensemble d'images à plusieurs niveaux de résolution permettrait d'affiner les modèles au fur et à mesure que l'on s'approche de la position finale. Par la suite, les modèles les plus fins seraient utilisés dans le calcul du rapport de qualité. Celui-ci pourrait comprendre, entre autres, des facteurs proportionnels à la distance entre les surfaces et leur orientation relative en chaque point.

Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par des subventions du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et par le Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM). Les auteurs remercient le Dr M. Soucy, auteur du logiciel de modélisation PIVERT, ainsi que le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) pour les images télémétriques de la théière.

Références

- [1] L. Pitre, "Suivi d'une surface courbe avec une caméra 3D montée sur un robot à six degrés de liberté pour l'évaluation non destructive par thermographie infrarouge", Mémoire de maîtrise, Université Laval, octobre 1994.
- [2] Grigore Burdea, Philippe Coiffet, "La Réalité Virtuelle", Editions Hermes, 1993.
- [3] Burdea et al, "A Portable Dextrous Master with Force Feedback", Presence, Vol. 1, No. 1, 1993.
- [4] M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F. P. Brooks, M. Behensky, "Feeling and Seeing: Issues in Force Display", ACM pp. 235-243, 1990.
- [5] Hiroo Iwata, "Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", Computer Graphics, Volume 24, No 4, August 1990.
- [6] Colin Ware and Danny R. Jessome, "Using the Bat: A Six-Dimensional Mouse for Object Placement", IEEE computer Graphics & Applications, November 1988.
- [7] S. Zhai, P. Milgram, "Ergonomics in Telerobotics and Control (Etc) Lab", IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS), Seattle, WA, Sept. 1993.
- [8] Colin Ware, "Using hand position for virtual object placement", Visual Computer, 6:245-253, 1990.
- [9] M. Soucy, "PIVERT Manuel de l'utilisateur", Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, 1993.
- [10] M. Soucy and D. Laurendeau, "Multi-resolution surface modeling from multiple range views", Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Urbana-Champaign, IL, pp. 348-353, 1992.
- [11] Andrews, J. R. and Hogan, N., "Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator", Control of Manufacturing Process and Robotic Systems, Eds. Hardt, D. E. and Book, W., ASME, Boston, pp. 243-251, 1983.
- [12] Khatib, O., "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, Missouri, Volume 25-28, pp. 500-505, March 1990.
- [13] Yoram Koren and Johann Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation", Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, April 1991.