

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	18
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	21
1.1 Effets des phénomènes électromagnétiques sur les mesures	21
1.1.1 Le potentiel électromagnétique est proportionnel à la distance.....	22
1.1.2 L'erreur de mesure est proportionnelle à la distance	22
1.1.3 Interférences dues à la proximité d'objets métalliques	24
1.2 Caractérisation des distorsions électromagnétiques	29
1.3 Méthode d'acquisition des mesures d'étalonnage	33
1.3.1 Support physiques / virtuels pour l'acquisition des mesures étalons.....	33
1.3.2 Appareil de mesure complémentaire.....	40
1.4 Modèles mathématiques et techniques d'interpolation.....	50
1.4.1 Interpolation trilinéaire.....	51
1.4.2 Interpolation par le point le plus proche.....	53
1.4.2.1 Méthode de pondération linéaire	54
1.4.2.2 Méthode de pondération exponentielle.....	54
1.4.2.3 Méthode de pondération basée sur le carré de la distance	55
1.4.2.4 Autres méthodes de pondération	55
1.4.3 Polynôme d'interpolation de degré élevé	56
1.4.4 Méthode de Hardy HMQ (Hardy's multi-quadric method).....	58
1.4.5 Méthode basée sur un réseau de neurones.....	60
1.5 Méthode LIO	62
1.5.1 Modèle théorique	62
1.5.2 Implémentation de la méthode d'étalonne du LIO	68
1.6 Résumé des méthodes et modèles d'interpolation.....	71
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	72
2.1 Objectif général	72
2.2 Analyser l'effet de la distance entre les capteurs de l'objet de calibrage sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation	73
2.3 Analyser l'effet du nombre de mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation	73

2.4	Analyser l'effet du nombre de polynômes d'interpolation sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	74
2.5	Analyser l'effet de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	75
2.6	Analyser la robustesse et les limites de la méthode d'acquisition LIO.....	75

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 76

3.1	Matériel.....	76
3.2	Méthode d'acquisition des mesures.....	79
3.2.1	Effet de la distance entre deux capteurs sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	82
3.2.2	Effet du nombre de mesures étalons dans le volume d'étalonnage sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation	83
3.2.3	Effet du nombre de polynômes d'interpolation sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	84
3.2.4	Effet de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	87
3.2.5	Robustesse et limite de la méthode d'acquisition LIO.....	90

CHAPITRE 4 RÉSULTATS 91

4.1	Effet de la distance entre deux capteurs sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	91
4.2	Effet du nombre de mesures étalons dans le volume d'étalonnage sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation	93
4.3	Effet du nombre de polynômes d'interpolation sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation	97
4.4	Effet de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation.....	99
4.5	Robustesse et limite de la méthode d'acquisition LIO	101
4.5.1	Scénario 1 : Effet d'un sur-étalonnage.....	103
4.5.2	Scénario 2 : Effet d'un sous étalonnage	104
4.5.3	Scénario 3 : Effet d'un étalonnage dont le volume est égal au volume de validation.....	105
4.6	Limite de la méthode de correction en fonction de la taille du volume de validation.....	106

CHAPITRE 5 DISCUSSION 108

CHAPITRE 6 RECOMMANDATION ET LIMITATION.....	113
CONCLUSION	115
ANNEXE I EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES D'UN MONITEUR CATHODIQUE SUR LA PRÉCISION DE LA MESURE	116
ANNEXE II EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DUES AU CORDON D'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE D'UN CAPTEUR FASTRAK	118
ANNEXE III ERREUR DE MESURE EN POSITION ET EN ORIENTATION EN PRÉSENCE DE DIFFÉRENTS MÉTAUX	120
ANNEXE IV FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL DE MESURE FASTRAK	122
ANNEXE V ROBUSTESSE ET LIMITE DE LA MÉTHODE DE CORRECTION : PERFORMANCE EN FONCTION DE LA TAILLE DU VOLUME DE VALIDATION.....	126
ANNEXE VI ÉTUDE SUR L'EFFET DES MESURES ABERRANTES SUR LA MÉTHODE DE CORRECTION	129
BIBLIOGRAPHIE	138

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Résultats obtenus en termes d'exactitude et de précision pour trois différentes méthodes d'acquisition (Tiré de Frantz et al. 2003).....	30
Tableau 1.3 Résumé des principales méthodes de correction cités dans ce mémoire	49
Tableau 1.4 Tableau résumé des méthodes mathématiques	71
Tableau 4.1 Nombre de mesures utilisées pour calculer les coefficients de correction.....	84
Tableau 4.2 Nombre de mesures utilisées pour calculer les coefficients de correction.....	86
Tableau 4.3 Caractéristiques des zones d'étalonnages lors de l'utilisation de deux polynômes.....	88
Tableau 4.4 Nombre de mesures utilisées pour calculer les coefficients de correction.....	88
Tableau 4.5 Caractéristiques des différents scénarios lors de l'utilisation de deux polynômes.....	89
Tableau 5.1 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak avant et après l'application de la méthode LIO sur les enregistrements étalons	92
Tableau 5.2 Erreur en translation entre les capteurs Fastrack, après l'application des coefficients de correction 1 et 2 sur les enregistrements de validation A et B	92
Tableau 5.3 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak avant et après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation	94

Tableau 5.4	Synthèse des résultats obtenus par les différentes méthodes de correction.....	97
Tableau 5.5	Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation	98
Tableau 5.6	Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation	99
Tableau 5.7	Comparaison entre les différents volumes et leurs homogénéités et l'utilisation d'un ou de plusieurs polynômes de correction après correction.....	100
Tableau 5.8	Caractéristiques des volumes utilisés pour la validation du scénario 1	103
Tableau 5.9	Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation (sur étalonnage)	103
Tableau 5.10	Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation	105
Tableau 5.11	Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation (sur étalonnage)	106
Tableau 5.12	Résumé des trois scénarios possibles lors de l'acquisition des mesures.....	107

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Schéma du montage 2 pour vérifier l'effet des interférences dues à la proximité d'objets métalliques. (Adaptée de Nixon et al. 1998).	25
Figure 1.2 Erreur de mesure de la position en fonction de la distance de séparation entre un capteur et un objet ferreux. (Adaptée de Birkfellner et al. 1998).	26
Figure 1.3 Erreur de mesure de l'orientation en fonction de la distance de séparation entre un capteur et un objet ferreux. (Adaptée de Birkfellner et al. 1998).	26
Figure 1.4 Erreur de position en fonction de la distance de séparation dtr, pour un système de mesures C.C.. (Adaptée de Chung et al. 2004).	27
Figure 1.5 Erreur d'orientation en fonction de la distance de séparation dtr, pour un système de mesures C.C.. (Adaptée de Chung et al. 2004).	28
Figure 1.6 Bras mécanique robotisé. (Tiré de Frantz et al. 2003).	31
Figure 1.7 Demi-sphère rigide et capteur. (Tiré de Frantz et al. 2003).	31
Figure 1.8 Objet d'étalonnage à deux capteurs électromagnétique. (Tiré de Frantz et al. 2003).	32
Figure 1.9 Exemple d'une planche perforée. (Tiré de Day et al. 2000).	34
Figure 1.10 Pièces du Montage expérimental. (Tiré de Livingston and State 1997).	37
Figure 1.11 Schémas des principaux éléments du montage. (Tiré de Kindratenko 2000).	39
Figure 1.12 Volume d'étalonnage. (Tiré de Kindratenko 1999).	40
Figure 1.13 Projections des cubes virtuels dans le CAVE (Tiré de Ghazisaedy et al. 1995).	41

Figure 1.14	Cube virtuel et point de mesure servant à l'étalonnage. (Tiré de Ghazisaedy et al. 1995).	42
Figure 1.15	Support de plastique pour le capteur électromagnétique. (Tiré de Livingston and State 1997).	43
Figure 1.16	Système de mesures hybride composé du capteur électromagnétique et de DEL. (Tiré de Birkfellner et al. 1998).	45
Figure 1.17	Salle de chirurgie utilisée pour les expérimentations. (Tiré de Birkfellner et al. 1998).	46
Figure 1.18	Montage de la plateforme flexible utilisé pour fixer les capteurs électromagnétiques et les marqueurs optiques. (Tiré de Ikits et al. 2001).	47
Figure 1.19	Schéma du montage de l'étalonnage avec support physique. (Tiré de Périé et al. 2002).	48
Figure 1.20	Schéma du réseau de neurones constitué de 7 nœuds supérieurs. (Tiré de Saleh, Kindratenko et al. 2000).	61
Figure 1.21	Erreur p_e/q_e affectant une mesure p_m/q_m	65
Figure 1.22	Exemple d'une déformation entre deux capteurs.	66
Figure 1.23	Outil d'étalonnage LIO.	68
Figure 2.1	Illustration de la division du volume d'étalonnage en deux zones.	74
Figure 3.1	Système de mesures Fastrak. Tiré de Polhemus.	76
Figure 3.2	Mouvement de balayage à l'intérieur d'une division du volume d'étalonnage.	77
Figure 3.3	Représentation de la surface quadrillée utilisée pour l'étalonnage systématique de tout le volume au-dessus du tapis roulant.	78

Figure 3.4	Schématisation du rayon d'action de l'appareil de mesure Fastrak.....	79
Figure 3.5	Représentation des subdivisions à l'intérieur d'un volume d'acquisition d'un enregistrement d'étalonnage.....	80
Figure 3.6	Schéma de l'objet de calibrage, configuration 15 cm.....	82
Figure 3.7	Schéma de l'objet de calibrage, configuration 20 cm.....	82
Figure 3.8	Association des polynômes d'interpolation à des zones spécifiques du volume d'étalonnage.	85
Figure 4.1	Erreur de mesure moyenne en translation en fonction du nombre de mesure utilisées pour le calcul des coefficients de correction.....	95
Figure 4.2	Erreur de mesure moyenne en rotation en fonction du nombre de mesure utilisées pour le calcul des coefficients de correction.....	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

C.A.	Courant alternatif
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
C.C.	Courant continu
Deg.	Degré
DEL	Diode électroluminescente
d_{tm}	Distance entre l'émetteur et l'objet métallique
d_{tr}	Distance entre l'émetteur et le capteur
d_{mr}	Distance entre l'objet métallique et le capteur
EMTS	Electromagnetic tracking system
FoB	Flock of Bird
HMQ	Hardy's Multi-Quadric
IC 95 %	Intervalle de confiance à 95 %
LIO	Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie
N	Nombre total
N/A	Non applicable
N/D	Non disponible
OTS	Optical tracking system
RMS	Root Mean Square

UMD	Ultrasonic measuring device
PVC	Polyvinyl chloride
R	Rayon

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

cm	centimètre
mm	millimètre
°	degré
m ³	mètre cube
%	Pourcentage
Hz	Hertz
kHz	kilo Hertz

INTRODUCTION

La mesure du mouvement dans le domaine biomécanique se fait fréquemment à l'aide de capteurs électromagnétiques. Ceux-ci constituent une méthode simple et peu coûteuse, comparativement aux systèmes de mesures opto-électroniques. Le principal inconvénient des capteurs électromagnétiques est néanmoins leur sensibilité à l'environnement dans lequel ils sont utilisés. Ainsi, la précision des mesures de ces capteurs est affectée par la présence de matériaux métalliques. Un étalonnage devient donc nécessaire pour atteindre les seuils de précision requis pour mesurer le déplacement relatif entre deux os ou toutes autres applications du domaine biomécanique (quelques mm et approximativement 2 degrés).

La plupart des articles scientifiques spécifiques à l'étalonnage d'un appareil de mesure électromagnétique ont ciblé deux thèmes principaux. D'une part, il y a ceux qui abordent les problèmes de distorsions des champs électromagnétiques, de précision et d'exactitude de la mesure. Par exemple, des études ont été menées pour quantifier l'influence de divers objets métalliques sur la précision et l'exactitude des systèmes de mesures électromagnétiques (Bryson 1992). De l'autre, il y a ceux qui décrivent des méthodes de correction de l'erreur de mesure ou de leurs capacités à la réduire (Kindratenko (1999); Day et al. (2000); Ikits et al. (2001); Périé et al. (2002); Hummel et al. (2006); Ochoa-Mayorga et al. (2006)).

Plusieurs problèmes liés à la performance des méthodes de correction demeurent sans réponses. Premièrement, la plupart des méthodes proposées dans la littérature scientifique sont utilisées pour corriger seulement la position mesurée d'un objet par rapport sa position réelle (Bryson (1992); Livingston and State (1997); Birkfellner et al. (1998); Briggs (1999); Saleh et al. (2000)). Il existe d'autres méthodes qui corrigent également l'orientation (position angulaire) mesurée d'un objet par rapport son orientation réelle (Zachmann (1997); Kindratenko (1999); Ikits et al. (2001)). Ces méthodes requièrent l'utilisation d'un système de mesures complémentaire dispendieux ou nécessitent des manipulations techniques longues et complexes.

Ces méthodes sont souvent inappropriées dans un contexte d'utilisation clinique, les rendant difficilement applicables dans des situations d'analyse de la marche par exemple. La méthode de correction des erreurs qui est à la fois efficace, rapide et peu coûteuse n'est pas encore implantée dans les milieux cliniques. Il persiste aussi un manque d'information sur la meilleure manière de corriger l'erreur de mesure. Par exemple, lors du calcul des coefficients des équations d'interpolations avec des mesures étalons, la meilleure façon de les distribuer au préalable à l'intérieur du volume d'utilisation demeure inconnue selon Kindratenko (2000). De plus, les lacunes observées depuis la première tentative de correction des erreurs n'ont pas été résolues par les méthodes d'étalonnages subséquentes et basées sur l'interpolation polynomiale : performance insuffisante de la correction des mesures près de la source, le nombre de mesures optimales servant à l'étalonnage, l'utilisation combinée de différentes méthodes d'étalonnage (Bryson 1992).

Le but de ce mémoire de maîtrise est de caractériser la performance d'une méthode semi-automatique d'étalonnage pour corriger les erreurs de mesure de la position et de l'orientation d'un ensemble de capteurs électromagnétiques. Cette méthode a été initialement conçue au LIO dans un contexte d'analyse de la marche en biomécanique, mais elle peut être appliquée à d'autres domaines (système de réalité virtuelle, chirurgie assistée par ordinateur). C'est une méthode peu coûteuse et qui effectue rapidement l'acquisition des mesures d'étalonnage, la caractérisation de l'erreur de mesure et la correction des mesures à exploiter. Son implémentation initiale a néanmoins montré des lacunes. Ce travail permettra donc de définir les paramètres permettant d'améliorer sa performance.

L'hypothèse de départ est qu'il est possible d'améliorer la correction des erreurs de mesures de l'appareil Fastrak (système de mesures qui utilise le courant alternatif pour créer un champ électromagnétique) en redéfinissant les opérations d'étalonnage par la méthode de l'interpolation polynomiale. Des expériences préliminaires ont démontré que l'erreur de mesure est influencée par le nombre et la distribution des mesures étalons servant à la caractérisation des distorsions électromagnétiques (Kindratenko 2000). De ce fait, la performance de la méthode LIO pourrait être améliorée en déterminant à priori : les

dimensions optimales du volume d'étalonnage, le nombre et la distribution des mesures étalons à l'intérieur d'un volume d'acquisition servant à l'analyse de la marche.

Ce mémoire commence par une revue de la littérature des publications scientifiques. Les articles retenus décrivent l'utilisation des systèmes de mesures électromagnétiques dans des contextes d'amélioration de la précision de la mesure. La revue de la littérature inclut 1) un modèle théorique qui explique l'effet de différents phénomènes électromagnétiques sur la précision de la mesure; 2) des méthodes existantes de caractérisation des distorsions électromagnétiques; 3) des méthodes de correction et d'acquisition des données d'étalonnage; 4) des modèles mathématiques et des techniques d'interpolation utilisés pour augmenter la précision de la mesure; 5) une présentation de la méthode de correction LIO. Un tableau résumé des méthodes et modèles mathématiques est présenté à la fin de ce chapitre. Ensuite, les objectifs de ce rapport seront présentés ainsi que la méthodologie utilisée, les principaux résultats et variables mesurées, une discussion détaillée des résultats et une conclusion.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Effets des phénomènes électromagnétiques sur les mesures

Dans cette section, deux variétés de capteurs électromagnétiques seront mises en application : le premier, emploie le courant alternatif (C.A.) pour produire un champ électromagnétique, l'autre emploie le courant continu (C.C). Dans un système à C.A. (Polhemus 3Space Fastrak), le courant est envoyé aux bobines de l'émetteur dans un certain ordre de sorte que trois champs magnétiques mutuellement perpendiculaires soient produits. Le champ induit des courants dans le récepteur qui est également composé de trois bobines mutuellement perpendiculaires. La position et l'orientation du capteur sont calculées par les neuf courants induits en calculant les petits changements dans le champ magnétique lors d'un changement de coordonnées.

Contrairement au courant continu produit par les systèmes à C.A., les systèmes à C.C (NDIA Aurora, Polhemus 3Space Isotrak II) émettent une séquence d'impulsion de courant continu C.C. Cette conception a été prévue pour réduire l'effet de la déformation des champs dus aux courants de Foucault induits par les métaux voisins lors de changement du champ magnétique.

La principale différence entre les deux types de système de mesures est l'influence de certains métaux sur la précision de leurs mesures. Nous verrons plus loin dans cette section qu'il y a des métaux qui interagissent plus fortement sur un type d'appareil plutôt que l'autre.

1.1.1 Le potentiel électromagnétique est proportionnel à la distance

Nixon et al. (1998) ont présenté un modèle théorique qui permet d'expliquer les effets de distorsions des métaux et des interférences électromagnétiques. Ce modèle, décrit par l'équation 1.1, permet d'évaluer le potentiel v d'un champ électromagnétique, généré par une bobine électrisée (émetteur Fastrak), à une certaine distance r d'une autre bobine (récepteur / capteur Fastrak) :

$$v \propto r^{-3} \quad (1.1)$$

La distance entre un émetteur et un capteur s'obtient en inversant l'équation 1.1.

$$r \propto v^{-1/3} \quad (1.2)$$

1.1.2 L'erreur de mesure est proportionnelle à la distance

Une erreur de mesure Δr sur la position du capteur a lieu lorsque la distance r est déduite de l'équation 1.1. Elle découle de l'erreur de sensibilité de la mesure Δv . Cette erreur peut être déterminée par la dérivée de l'équation 1.2. L'équation 1.3 montre les étapes de dérivation de l'équation 1.2. Pour une situation où l'interférence électromagnétique à l'intérieur du champ v est constante et que le capteur demeure à une position fixe, l'erreur de position est proportionnelle à la distance d_{tr} séparant l'émetteur et le capteur équation 1.4.

$$\Delta r \propto \frac{dr}{dv} \Delta v \rightarrow \Delta r \propto r^4 \cdot \Delta v \quad (1.3)$$

$$\Delta r \propto d_{tr}^4 \quad (1.4)$$

Lorsqu'un objet métallique est présent à proximité du capteur, le champ magnétique du capteur induit des courants de Foucault dans l'objet métallique. L'amplitude du champ magnétique est proportionnelle, selon l'équation 1.2, à l'inverse du cube de la distance d_{tm} entre l'émetteur et l'objet métallique. De manière similaire, l'erreur de mesure du champ électromagnétique due au courant de Foucault est proportionnelle à l'inverse du cube de la distance d_{mr} entre le métal et le capteur. Par conséquent, la mesure de l'erreur Δv est décrite par l'équation 1.5 (tel que décrit par Nixon et al. (1998)).

$$\Delta v \propto \frac{1}{d_{tm}^3 \cdot d_{mr}^3} \quad (1.5)$$

L'erreur de mesure sur la position d'un capteur due à l'influence d'un objet métallique peut être prédite en combinant les équations 1.4 et 1.5. L'équation 1.6 permet aussi de décrire l'erreur due à l'aimantation des objets ferromagnétiques.

$$\Delta r \propto \frac{d_{tr}^4}{d_{tm}^3 \cdot d_{mr}^3} \quad (1.6)$$

Les travaux de Nixon et al. (1998) ont permis d'établir un modèle mathématique qui décrit les effets de distorsions des métaux et des interférences électromagnétiques sur la distance mesurée par un capteur Fastrak. Les principaux types d'interférences étudiées par Nixon et al. (1998) sont celles provenant d'un circuit de ligne électrique, des écrans cathodiques, des fils d'alimentations électriques des capteurs et des objets métalliques. Les séries d'expériences menées pour étudier les interférences créées par des objets métalliques ont permis d'établir une relation mathématique entre l'erreur de mesure de la position d'un capteur et la distance entre un capteur et un objet métallique. Les annexes (I, II et III) résument les expériences menées par Nixon et al. (1998) pour étudier les types d'interférences causées par un circuit de ligne électrique, des écrans cathodiques et les fils d'alimentations électriques des capteurs Fastrak.

1.1.3 Interférences dues à la proximité d'objets métalliques

Nixon et al. (1998) ont proposés une formulation théorique (équation 1.7) pour mettre en relation l'erreur de mesure de la position et la distance entre un capteur et un objet métallique. Leurs travaux ont confirmé la validité de cette équation avec un coefficient de proportionnalité k_r qui dépend du type de métal utilisé.

$$e_r = \frac{k_r d_{tr}^4}{d_{tm}^3 \cdot d_{mr}^3} \quad (1.7)$$

La figure 1.1 schématise le montage de l'expérience. Le bloc **T** représente l'émetteur, le bloc **R** le capteur et le cercle **M** un des objets métalliques évalués. Les auteurs ont testé l'influence de différents types de métaux dont: l'acier à faible teneur en carbone, le cuivre, l'acier inoxydable (316), le laiton, l'aluminium et la ferrite (Philips 3C85). La majorité des évaluations ont portées sur la caractérisation de l'erreur de mesures en position. Les interférences dues à la proximité d'objets métalliques a été testé sur une grande variétés de distances. Ceci nous permet d'estimer à priori la grandeur de l'erreur de mesure selon la position d'un capteur et d'un objet métallique placé dans le rayon d'action de l'émetteur. Les résultats obtenus sont reportés à l'annexe III.

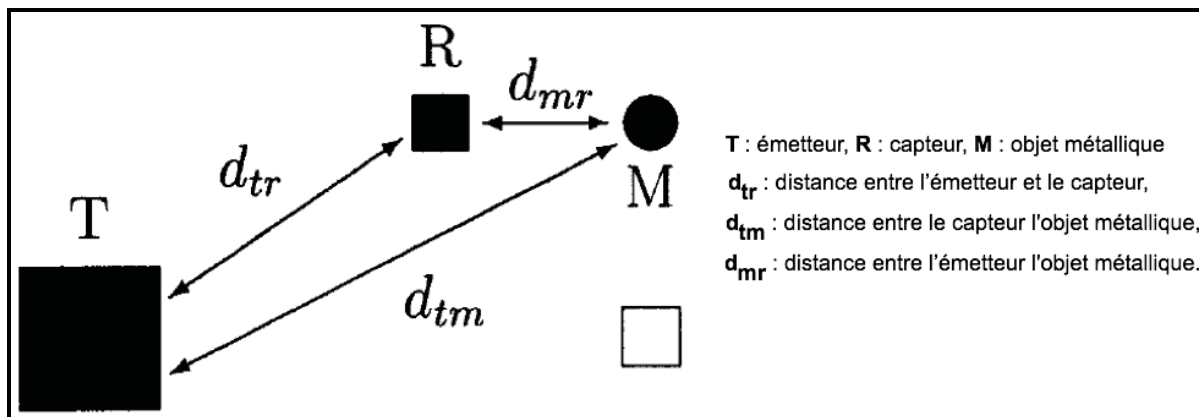


Figure 1.1 Schéma du montage 2 pour vérifier l'effet des interférences dues à la proximité d'objets métalliques. (Adaptée de Nixon et al. 1998).

Parmi les métaux testés par Hummel et al. (2005) (l'acier SST 303 et SST 416, l'aluminium et le bronze), les distorsions les plus grandes ont été mesurées avec un système de mesure électromagnétique NDI Aurora® et elles ont été provoquées par le cylindre métallique en acier SST 416, suivie de l'aluminium, du bronze et de l'acier SST 416. L'erreur maximale de 4,2 mm a été mesurée à 20 cm du cylindre d'acier SST 303. Des distorsions supérieures à 50 mm peuvent se produire lorsque le récepteur est placé à une distance inférieure à 50 mm de l'émetteur.

McGill et al. (1997) ont, quant à eux, étudié l'effet d'un bloc d'aluminium et d'un tore en acier ferreux sur l'erreur de mesure en orientation, lorsque placé entre l'émetteur et un capteur électromagnétique 3Space®. En ce qui concerne le tore ferreux, les distorsions observées sur les mesures en orientation diminuent en fonction de la réduction de la distance entre l'émetteur et l'objet ferreux (d_{tm}) et de la distance entre le capteur et l'objet ferreux (d_{mr}). Le bloc d'aluminium a produit le même type de distorsions que le tore métallique, mais de manière moins importante. Une distance de 20 cm doit être respectée entre le capteur et un objet métallique de dimensions similaires afin de réduire l'erreur d'orientation à moins de 2°.



Birkfellner et al. (1998) ont eux aussi cherché à déterminer l'influence de l'acier, l'aluminium et le cuivre sur la précision d'un appareil de mesure électromagnétique à courant alternatif Isotrak II - Polhemus. Lors des essais avec le système C.A., la distance d_{tr} entre l'émetteur et le capteur variait entre 355 – 375 mm. Les mesures enregistrées avec le système de mesures C.A., à moins de 120 mm de l'objet métallique, se sont révélées significativement bruitées (figure 1.2, 1.3).

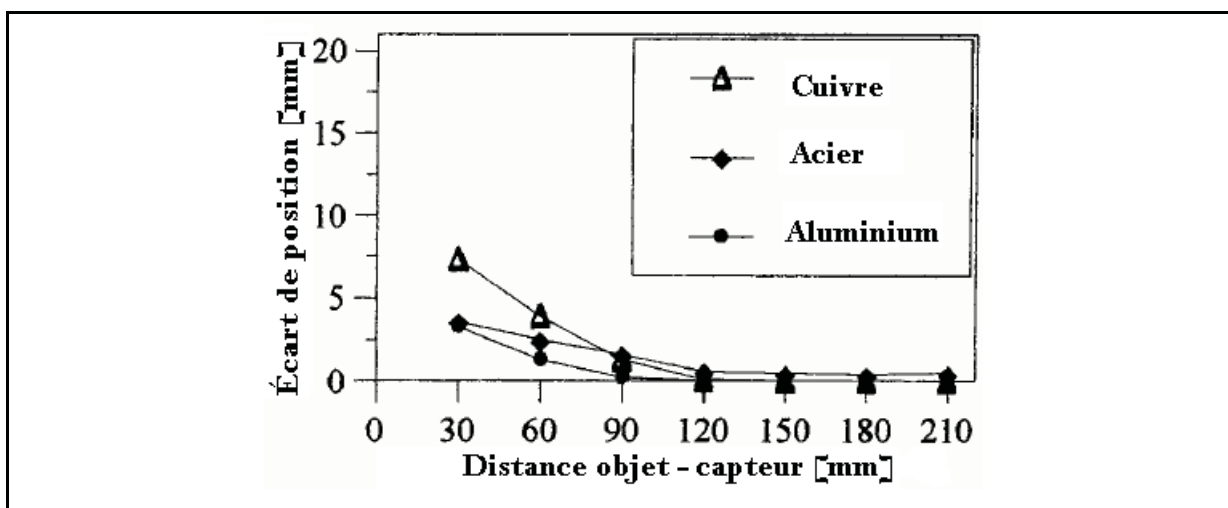


Figure 1.2 Erreur de mesure de la position en fonction de la distance de séparation entre un capteur et un objet ferreux. (Adaptée de Birkfellner et al. 1998).

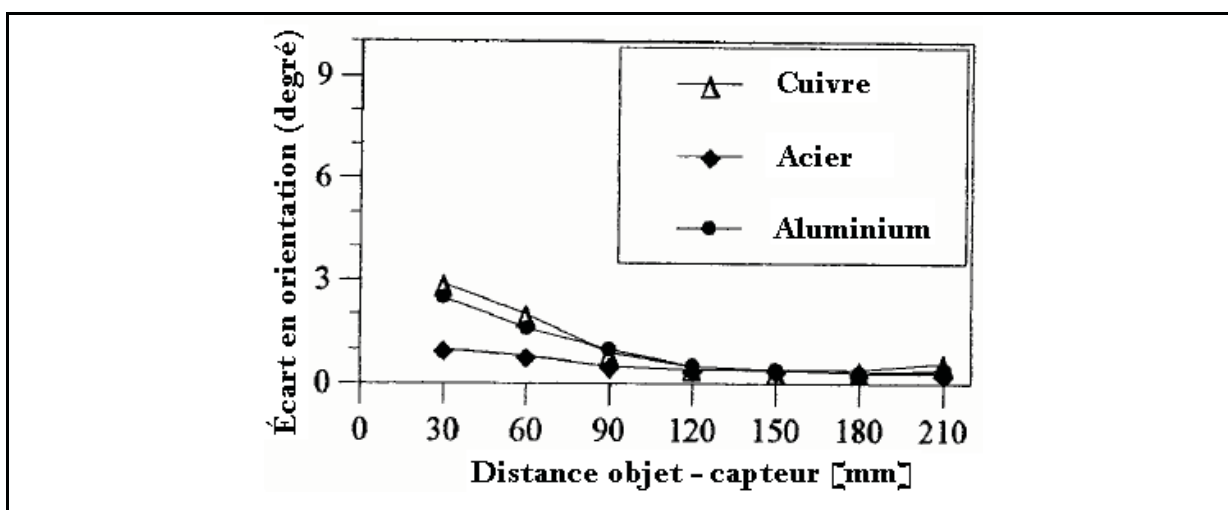


Figure 1.3 Erreur de mesure de l'orientation en fonction de la distance de séparation entre un capteur et un objet ferreux. (Adaptée de Birkfellner et al. 1998).

Les auteurs Chung et al. (2004) ont testé une méthode de correction de l'erreur de mesures NDI Aurora lorsqu'une barre d'acier était placée dans un volume d'utilisation de $0,125 \text{ m}^3$ situé à une distance de $0,05 \text{ m}$ de l'émetteur. Avant la correction de l'erreur de mesure, les distorsions à l'intérieur du volume causées par l'acier causaient une erreur moyenne de $4,21 \text{ mm}$ en position et de $4,87^\circ$ en orientation. Les figures 1.4 et 1.5 présentent l'erreur de position et d'orientation en fonction de la distance (d_{tr}) lorsqu'une barre d'acier est placée dans un volume d'utilisation.

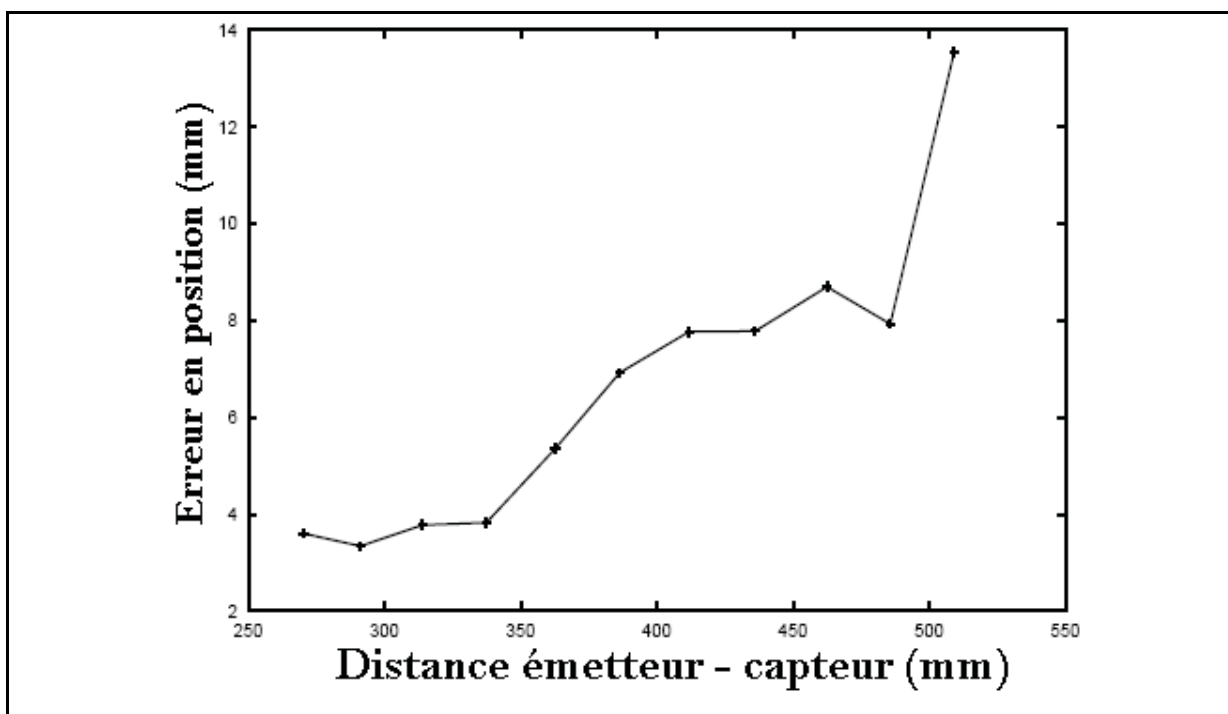


Figure 1.4 Erreur de position en fonction de la distance de séparation d_{tr} , pour un système de mesures C.C.. (Adaptée de Chung et al. 2004).

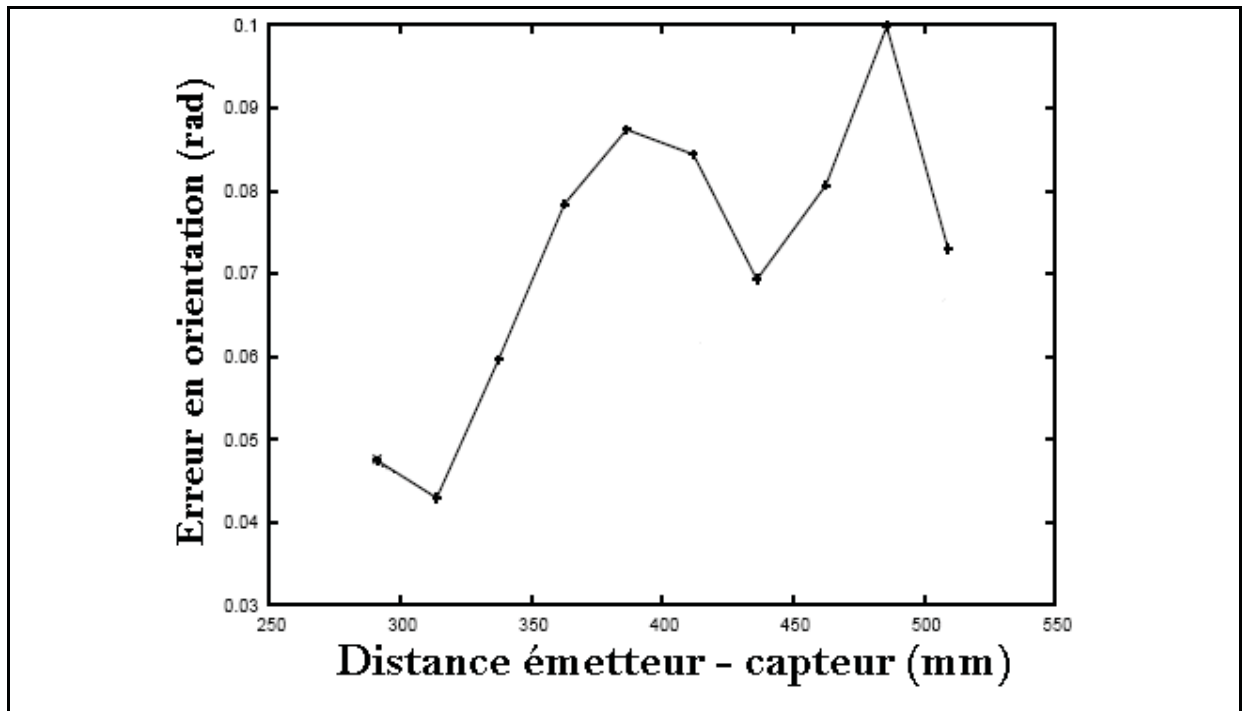


Figure 1.5 Erreur d'orientation en fonction de la distance de séparation dtr, pour un système de mesures C.C.. (Adaptée de Chung et al. 2004).

Toutes ces expérimentations indiquent que :

- 1) L'erreur de mesure varie en fonction de la distance émetteur-capteur d_{tr} : il existe une plage de distance optimale pour laquelle l'erreur est minimale.
- 2) Les objets métalliques créent des interférences qui varient en fonction de la nature du matériel. La distance varie selon la grandeur de la perméabilité et de la conductibilité électrique du métal et selon le type d'appareil de mesures électromagnétiques.
- 3) Dans le cas de métaux non-ferromagnétiques, l'erreur de mesure augmente légèrement en fonction de la fréquence d'échantillonnage. Par contre, une fréquence d'échantillonnage élevée réduit les interférences dues aux moniteurs et au réseau électrique (annexe I).

- 4) Plus la taille des objets augmente, plus les interférences croissent. Donc, afin de réduire les interférences dues à l'environnement, il faut s'assurer d'effectuer les mesures à une distance optimale, éviter la présence ou limiter la taille d'objets métalliques dans l'environnement d'utilisation. Ces contraintes seront parfois difficiles à respecter, surtout lorsqu'on travaille dans un environnement clinique.

1.2 Caractérisation des distorsions électromagnétiques

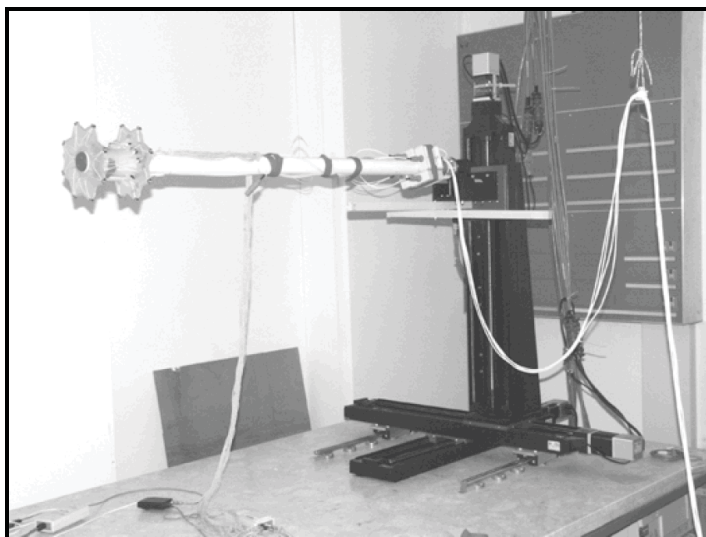
Lorsqu'on utilise des appareils de mesures électromagnétiques, les constructeurs recommandent généralement de travailler dans un environnement exempt d'interférences électromagnétiques. Ceci n'étant pas toujours possible, il est parfois important de pouvoir caractériser les sources de distorsions environnantes, afin de connaître la précision réelle de l'appareil de mesure. La caractérisation des interférences est en outre un premier pas vers la correction des mesures. Avant de présenter les méthodes de correction, il nous apparaît important de présenter dans cette section le travail de Frantz et al. (2003), qui ont comparé plusieurs techniques de caractérisation des distorsions. Ils caractérisent l'erreur de mesure, en absences de sources de distorsions électromagnétiques pour différents scénarios d'étalonnage avec un appareil de mesure électromagnétique (NDI Aurora). Le tableau 1.1 résume les résultats obtenus en termes de précision et d'exactitude de la mesure.

**Tableau 1.1 Résultats obtenus en termes d'exactitude et de précision
pour trois différentes méthodes d'acquisition
(Tiré de Frantz et al. 2003)**

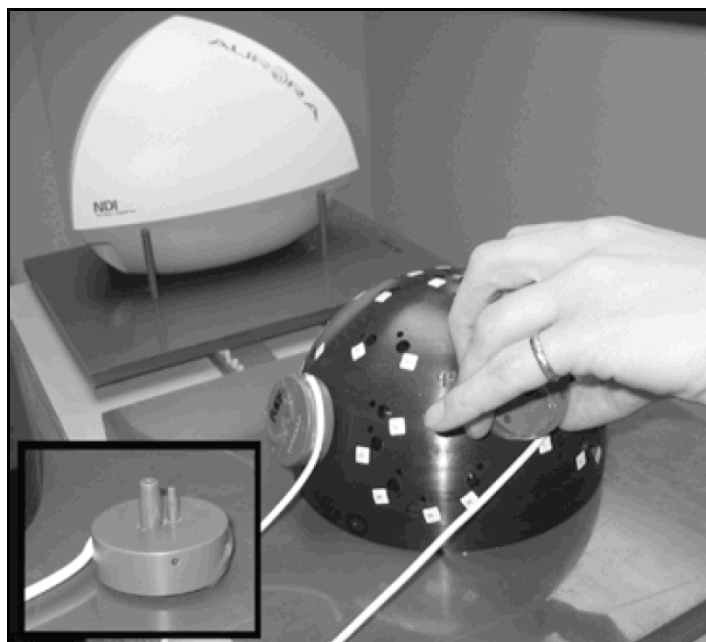
Méthode		Exactitude	Précision	RMS	IC 95 %
<i>Protocole d'étalonnage volumétrique (1)</i>	Position (mm)	1,15	0,30	1,20	2,50
	Orientation (deg.)	0,29	0,10	0,30	0,60
<i>Protocole d'étalonnage avec demi-sphère (2)</i>	Position (mm)	X	1,093	0,937	X
	Orientation (deg.)	X	0,708	0,656	X
<i>Protocole d'étalonnage dynamique avec deux capteurs (3)</i>	Position (mm)	-0,25	1,39	X	2,74
	Orientation (deg.)	X	X	X	X

1. Nombres d'échantillons N non disponibles. 2. N = 50. 3. N = 10 000.

Le protocole d'étalonnage volumétrique est le plus complet pour évaluer un volume d'utilisation dans son entier. Ce type de protocole d'étalonnage utilise un bras mécanique robotisé qui déplace des capteurs électromagnétiques de manière aléatoire à l'intérieur d'un volume d'étalonnage (figure 1.6). Chacune des mesures est enregistrée et comparée avec les coordonnées correspondantes enregistrées par un système de mesures optique complémentaire (Optotrak) pour calculer l'exactitude de la mesure. Le protocole d'étalonnage avec une demi-sphère rigide possède à sa surface plusieurs perforations qui sont utilisées comme points de mesure (figure 1.7). La distance et l'orientation des perforations par rapport à un point de référence de la demi-sphère sont préalablement connues. Chaque mesure est enregistrée et comparée avec la distance et l'orientation de référence pour calculer l'exactitude de la mesure.



**Figure 1.6 Bras mécanique robotisé.
(Tiré de Frantz et al. 2003).**



**Figure 1.7 Demi-sphère rigide et capteur.
(Tiré de Frantz et al. 2003).**

Le scénario le plus intéressant est un protocole d'étalonnage dynamique qui utilise la différence entre les mesures de deux capteurs électromagnétiques (figure 1.8). Ce protocole nécessite l'utilisation d'une tige de céramique équipée de deux capteurs électromagnétiques qui sont espacés de 15 cm (figure 1.8). L'objet est déplacé manuellement, à l'intérieur du volume d'étalonnage de $0,048 \text{ m}^3$, dans toutes les directions et orientations possibles de la part de l'opérateur. L'exactitude des mesures est obtenue en comparant la distance entre les deux capteurs et la distance de référence de 15 cm. La précision est définie comme l'écart-type de la longueur mesurée entre les deux capteurs. La répétabilité et la reproductibilité de la trajectoire utilisée demeurent toutefois assez faibles. L'intérêt de ce protocole repose dans le fait que la position et l'orientation relative entre les deux capteurs demeurent fixes durant tout l'étalonnage. Le protocole d'étalonnage dynamique à deux capteurs a l'avantage d'aborder l'aspect dynamique de la prise de mesures qui n'est pas couvert par la prise de mesures statiques. En revanche, ce protocole a une faible reproductibilité et doit être combiné à une stratégie d'étalonnage plus complète selon Frantz et al. (2003).

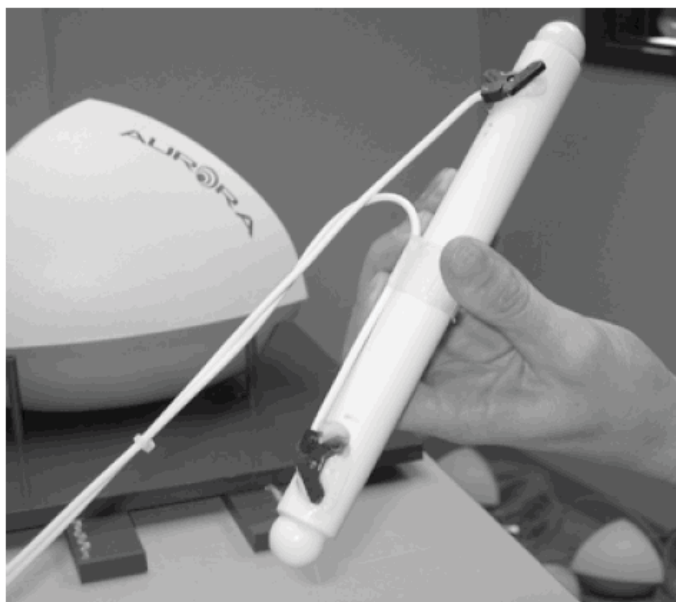


Figure 1.8 Objet d'étalonnage à deux capteurs électromagnétique. (Tiré de Frantz et al. 2003).

1.3 Méthode d'acquisition des mesures d'étalonnage

En réponse à la caractérisation des distorsions du champ magnétique, certains auteurs proposent des méthodes de corrections de ces distorsions. Nous présentons ici ces méthodes. Les méthodes de corrections se distinguent par le type d'équipement utilisé et par le modèle mathématique utilisé pour effectuer la caractérisation et la correction des distorsions qui affectent la mesure. Parmi les équipements utilisés, on note les supports physiques ou virtuels ou encore les appareils de mesures complémentaires tels que des appareils optoélectroniques ou mécaniques. Les modèles mathématiques font généralement appel à de l'interpolation, aux réseaux de neurones artificiels, etc.

Toutes ces méthodes utilisent des mesures étalons $\{p_i\}$ et des mesures réelles $\{q_i\}$, à l'intérieur d'un volume d'étalonnage. Ce volume d'étalonnage est le volume où seront prélevées des mesures (Briggs 1999). Ces mesures permettront de construire par la suite un modèle d'interpolation permettant de corriger les mesures subséquentes à l'aide de la topologie des mesures étalons. Le tableau 1.2 résume les méthodes d'acquisition ainsi que leurs avantages, inconvénients et particularités sont présentés à la fin de la section 1.3.

1.3.1 Support physiques / virtuels pour l'acquisition des mesures étalons

Un support physique typique est généralement composé d'une planche de bois ou de plexiglas perforée et fixée sur une charpente de bois mobile (figure 1.9). Les perforations servent à fixer le capteur à un endroit dont les coordonnées, par rapport à l'émetteur, sont préalablement connues.

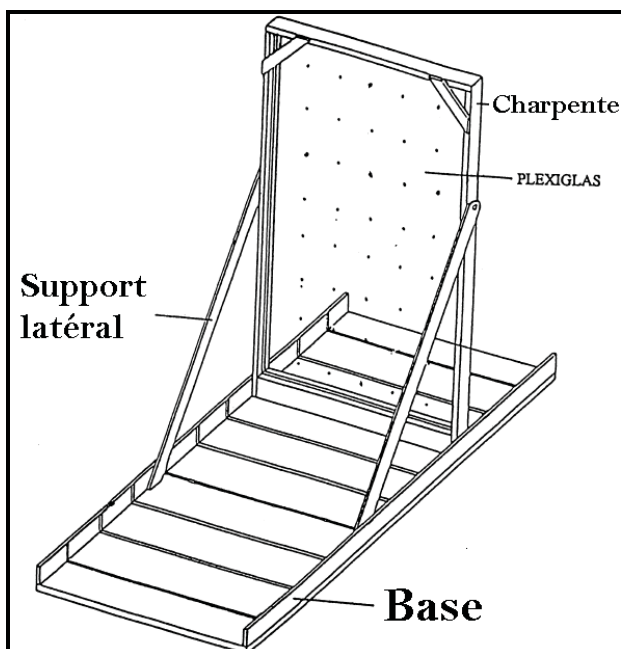


Figure 1.9 Exemple d'une planche perforée.
(Tiré de Day et al. 2000).

La méthode d'acquisition de Bryson (Bryson 1992) combine l'utilisation d'un support physique et de repères à la surface du plancher. La table de conversion des mesures est remplie en déplaçant le capteur électromagnétique à chaque perforation et en y prenant une mesure $\{p_i\}$. Les expressions « table de conversion », « table de mappage » ou « table de mise en correspondance » sont toutes des synonymes et elles désignent « l'association des données appartenant à un ensemble (modèle logique de données, base de données de production, champ source) avec les données appartenant à un autre ensemble (modèle physique de données, entrepôt de données, champ cible), de manière à ce que les données du premier ensemble puissent se substituer à celles du second ensemble, ou encore que l'on puisse passer harmonieusement des premières aux secondes. » (Kindratenko 2000) Le terme anglais généralement utilisé pour décrire une table de conversion est « lookup table ».

Dans la méthode d'acquisition utilisée par Bryson (1992), les mesures étalons $\{p_i\}$ correspondent aux coordonnées des trous perforés dans le plexiglas. Les mesures réelles $\{q_i\}$ correspondent aux mesures enregistrées à chacun des trous où le capteur a été fixé. Chaque

mesure réelle est prise manuellement. À chaque point de mesure $\{p_i\}$, l'orientation du capteur est fixe. Plusieurs mesures sont prises à chaque point de mesures pour calculer la position moyenne $\{q_i\}$ et l'écart-type. La résolution des points de mesures à l'intérieur du volume est de 304,8 mm, c'est-à-dire la distance qui sépare les points de mesure $\{p_i\}$ les uns des autres. La performance de la méthode est évaluée sur un ensemble de mesures de validation, différent des mesures $\{p_i\}$ utilisés pour l'étalonnage. Seules les mesures dont l'erreur vectorielle était inférieure à 508 mm ont été retenues, soit 150 mesures sur les 256 possibles. Cette technique est relativement précise (50,8 mm jusqu'à une distance de 1,016 m), mais elle prend beaucoup de temps à appliquer car le capteur Fastrak doit être déplacé manuellement 256 fois dans tout le volume. Par ailleurs, aucune modification de l'orientation du capteur n'est possible avec cette méthode durant l'acquisition de données (Kindratenko and Bennett 2000).

Dans la méthode d'acquisition utilisée par Briggs (1992) et Kindratenko (2000), les mesures étalons sont recueillies par plusieurs capteurs électromagnétiques fixés sur un montage fait de PVC et assemblé sur une base en bois. La position de l'émetteur et les dimensions du volume d'étalonnage ne sont pas spécifiées (Kindratenko and Bennett 2000). La technique d'étalonnage nécessite que les mesures $\{p_i\}$ soient prises de manière rectiligne, c'est à dire que la forme est définie ou limitée de droites ou de segments de droite.. Chaque point de mesure $\{p_i\}$ du volume rectiligne est entouré par d'autres points de mesures $\{p_i\}$, le tout formant un ensemble de tétraèdres. Puisque les coordonnées des mesures $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$ sont connues dans les repères Q et P, les erreurs vectorielles peuvent être calculées. Le vecteur représentant l'erreur de position est utilisé à chaque point de mesures dans le repère P pour interpoler et reformer le tétraèdre dans le repère Q. Cette technique introduit cependant des erreurs additionnelles dans la table de conversion finale lors de la manipulation du capteur. En outre, le capteur doit avoir une orientation constante tout au long de l'échantillonnage des mesures étalons $\{p_i\}$.

À la même période, une autre méthode a été élaborée. Elle consiste à utiliser un tube de plastique télescopique de longueur variable pour fixer le capteur et une charpente de bois pour soutenir le tube (Kindratenko 1999). L'origine du système d'axe est située au milieu du plancher du système de réalité virtuelle CAVE. Le plancher du CAVE a été marqué par deux lignes perpendiculaires espacées de 304,8 mm pour former une surface rectiligne. Cette surface est utilisée pour le repérage du déplacement de la charpente de bois et ainsi former un ensemble de points de mesures avec précision dans le repère Q. Le capteur est déplacé par incrément jusqu'à ce que tout le volume du CAVE soit couvert. La table de conversion est remplie en déplaçant le capteur à 100 points de mesure $\{p_i\}$ puis en enregistrant les valeurs des mesures $\{q_i\}$ avec le système électromagnétique. Les mesures hors champ ont été exclues de la table ce qui a réduit la taille de la table à 88 enregistrements. Une table de mesure de 64 mesures de validation a été remplie avec une résolution de 304,8 mm.

La précision des techniques d'acquisition manuelle des mesures est estimée à $\pm 0,5$ cm, $\pm 1^\circ$. Bien que cette technique soit relativement précise, elle prend beaucoup de temps à appliquer car encore une fois le capteur doit être déplacé manuellement. L'orientation du capteur doit aussi demeurer fixe tout au long de l'étalonnage (Day et al. 2000). Ces techniques ne permettent donc pas de corriger les erreurs de mesure en position.

Une année plus tard, cette technique a été adaptée pour l'acquisition et la correction des mesures en orientation (Kindratenko and Bennett 2000). La table de conversion est construite en déplaçant le capteur à intervalle régulier à des endroits dont les coordonnées en position et en orientation sont préalablement connues. Après un alignement très soigneux, la précision de cette technique de mesure manuelle est de ± 5 millimètres, $\pm 1^\circ$. De meilleurs résultats pourraient être obtenus avec une table de conversion plus dense en termes de points de mesures, notamment pour ce qui est des mesures aux frontières du volume. La résolution de 304,8 mm utilisée n'est pas suffisante pour obtenir un modèle d'interpolation précis. Il serait nécessaire d'augmenter la densité des points de mesure se situant loin de la source électromagnétique (Ochoa-Mayorga et al. 2006).

La méthode de correction de l'erreur de mesure proposée par Saleh, Kindratenko et al. (2000) utilise une série de réseaux de neurones. La méthode est spécifique à la position d'un capteur à six degrés de liberté. Le réseau de neurones est de type multi-couches à réaction positive qui sert à approximer la forme des distorsions du champ électromagnétique et par conséquent, à prédire la position réelle d'un capteur par rapport à la mesure enregistrée. La méthode d'étalonnage des mesures étalons consiste à utiliser un enregistrement bruité et de générer, à partir du réseau de neurones, un nouvel ensemble pour lequel l'erreur quadratique moyenne atteindrait une valeur cible. Une fois que l'apprentissage du réseau est atteint, il peut être utilisé en temps réel pour corriger un enregistrement de mesures.

Les équipements utilisés incluent entre autres systèmes de mesures SpacePad®. La méthode d'acquisition est similaire à celles décrites par Ghazisaedy et al. (1995). Le montage (figure 1.10) consiste en une base de bois (0,30 m x 0,30 m x 0,03 m), de la charpente et des tuyaux de plastiques de différentes longueurs (0,6096 m à 2,1336 m).

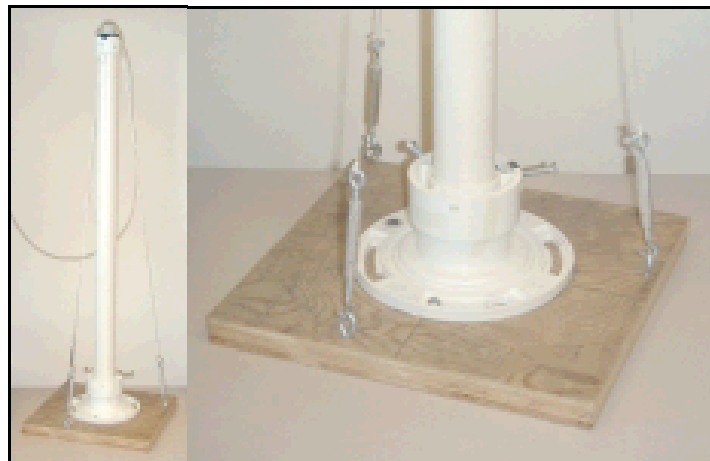


Figure 1.10 Pièces du Montage expérimental.
(Tiré de Livingston and State 1997).

Une série de 140 mesures enregistrées avec un appareil de type Spacepad® est utilisée pour l'apprentissage du réseau et une autre série de 72 mesures pour la validation. Les dimensions du volume d'étalonnage est de 6,296 m³ (résolution de 310 mm) et il est de 5,247 m³ (résolution de 310 mm) pour l'enregistrement de validation. Les mesures de l'enregistrement de validation sont décalées dans l'espace par rapport aux mesures de l'enregistrement initial. Le type d'architecture du réseau de neurones ainsi que le nombre de points de mesures ont un impact significatif sur la performance de la convergence de la méthode. L'erreur de position moyenne du capteur SpacePad avant la correction est de 130 mm et de 40 mm après. Le principal inconvénient des réseaux de neurones est le temps nécessaire à l'apprentissage du réseau qui peut être supérieur à huit heures selon la précision à atteindre. De plus, le nombre de noeuds dans le système ainsi que les paramètres ϵ (niveau de précision), η (taux d'apprentissage), α (momentum) des fonctions utilisées doivent être évalués manuellement avant la mise en application de la méthode. Dans cette méthode, la relation entre les paramètres est inconnue et ils peuvent changer d'une expérience à l'autre. Ceci nécessite de refaire plusieurs fois l'étalonnage (calculs des paramètres) avant de trouver les paramètres optimaux (Bryson 1992). La précision des techniques d'acquisition manuelle des mesures est estimée à ± 10 mm, $\pm 1^\circ$. Cette technique est relativement précise après correction (40 mm en moyenne).

Day et al. (2000) présentent une méthode d'étalonnage d'un système de mesures Fastrak. La méthode de correction a été testée sur deux types d'émetteur : une source de transmission standard et une autre à longue portée. Le montage a été repris des travaux de Day et al. (1998). Les schémas de la figure 1.11 montrent les principaux éléments du montage. Une planche perforée et un gabarit de dimensions 0,8 m x 1,2 m x 1,4 m ont été construits. Le montage est conçu de manière à ce que le capteur puisse être positionné à 360 positions et selon 12 orientations différentes et qui permettent une résolution de 20 cm entre les points de mesures.

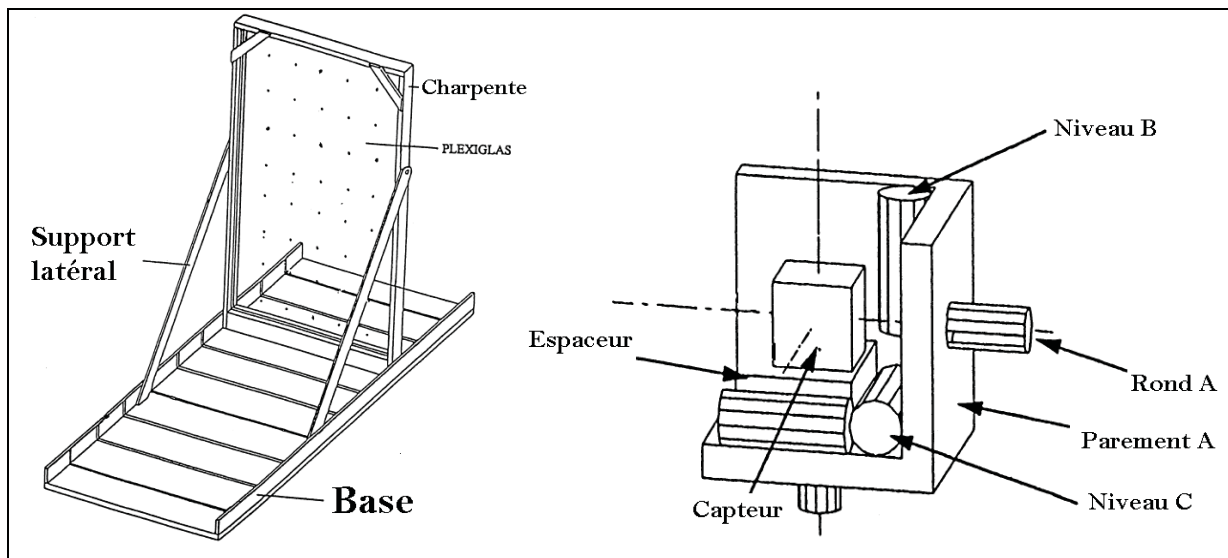


Figure 1.11 Schémas des principaux éléments du montage. (Tiré de Kindratenko 2000).

L'acquisition des mesures se fait en établissant d'abord un cadre de référence, en enregistrant les mesures étalons et en mesurant un petit échantillon de points de mesures pour les tests de répétabilité. Le cadre de référence nécessite de fixer l'émetteur à un endroit fixe tout au long de l'expérimentation. L'erreur moyenne de 60 mesures, divisées en 12 orientations, différentes, est utilisée pour mesurer l'erreur de mesure de la position du capteur. Au total, 8640 mesures ont été enregistrées. Le montage des éléments de l'expérience a été effectué avant de mesurer un échantillon de validation de 1440 mesures et d'une résolution de 40 cm pour le reteste.

Les travaux de Ochoa-Mayorga et al. (2006) présentent une méthode d'étalonnage des mesures en orientation d'un système de mesure électromagnétique à plusieurs capteurs. L'environnement d'étalonnage est une salle de chirurgie fortement bruitée par des distorsions électromagnétiques. Le système de mesures est un appareil à 12 capteurs Ultratrak de Polhemus IncTM. La méthode d'étalonnage globale proposée est semblable à celle présentée par Kindratenko et Bennett (2000) et Bryson (1992). Deux séries d'enregistrements ont été mesurées pour chaque capteur, une première série pour l'étalonnage et une seconde pour la validation. Pour chacune des séries, 400 mesures ont été prélevées à chaque position d'un volume d'étalonnage rectiligne. La position et l'orientation moyenne du capteur sont utilisées

par la suite. La position moyenne est la moyenne statistique des 400 mesures tandis que l'orientation moyenne est transposée en quaternion. Au commencement, le volume d'étalonnage est divisé en cubes rectilignes de $0,20 \text{ m} \times 0,20 \text{ m} \times 0,10 \text{ m}$, (figure 1.12). La série d'enregistrement de validation a été segmentée en divisions de tailles identiques, mais avec un décalage de $0,10 \text{ m} \times 0,10 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$. Les mesures ont été décalées de manière à être situées au centre d'une division de l'enregistrement de validation. Au total, un volume de $2,4 \text{ m} \times 1,6 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ a été étalonné. La méthode utilisée permet principalement de réduire le nombre d'échantillons de mesure en termes d'orientation du capteur.

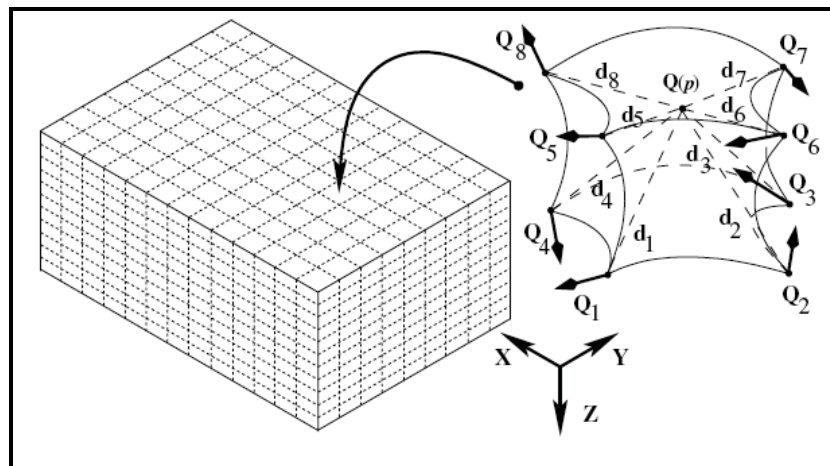


Figure 1.12 Volume d'étalonnage.
(Tiré de Kindratenko 1999).

1.3.2 Appareil de mesure complémentaire

Dans la méthode d'acquisition utilisée par Ghazisaedy Briggs (1999) un appareil de mesure ultrasonique (UMD, Ultrasonic measuring device) est utilisé pour mesurer la position d'un capteur électromagnétique. Les équipements utilisés incluent un système de réalité virtuelle (CAVE), un système de mesures électromagnétiques Flock of Birds, un appareil de mesure ultrasonique (précision de 1,5 % sur une distance de 3,048 m) comprenant quatre transducteurs ultrasoniques polarisants, des lunettes stéréoscopiques, un ordinateur et un

logiciel spécialisé pour obtenir les coordonnées de position mesurées par l'UMD. Le volume P, situé à l'intérieur du système de réalité virtuelle, est d'abord rempli d'images de cubes de 1 cm^3 à intervalle régulier de $0,3048 \text{ m}$ (figure 1.13). Les dimensions des volumes P et Q sont de $28,3 \text{ m}^3$. Les points de mesures sont principalement concentrés au centre du volume. Les mesures de l'UMD qui avaient un angle d'inclinaison « pitch » ou de roulis « roll » supérieur à 10° ont été supprimées. Moins de 400 mesures ont été utilisées au total.

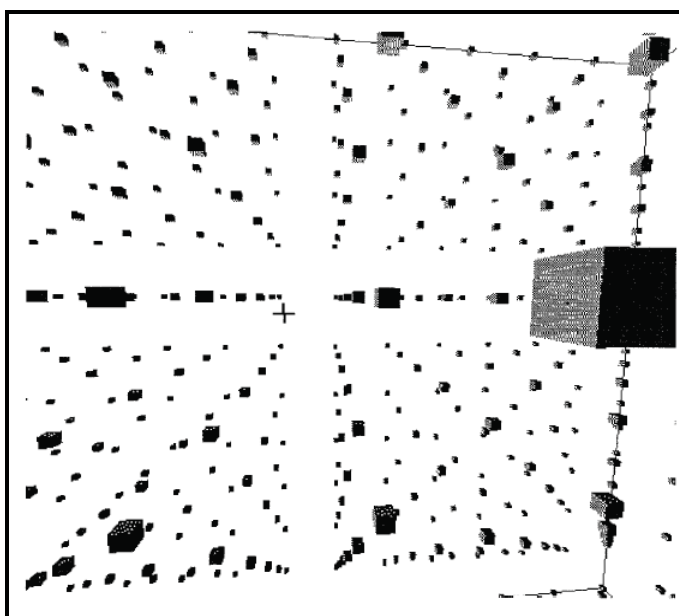


Figure 1.13 Projections des cubes virtuels dans le CAVE (Tiré de Ghazisaedy et al. 1995).

L'opérateur manipule un curseur optique qui représente la position du capteur magnétique dans le volume P. Le capteur est fixé au sommet du capteur ultrasonique. L'opérateur porte des lunettes stéréoscopiques qui permettent de voir le curseur. Ensuite, il positionne le curseur jusqu'à ce qu'il le juge au centre du cube (figure 1.14). La différence de position entre les deux appareils de mesures est l'erreur de position causée principalement par les distorsions électromagnétiques.

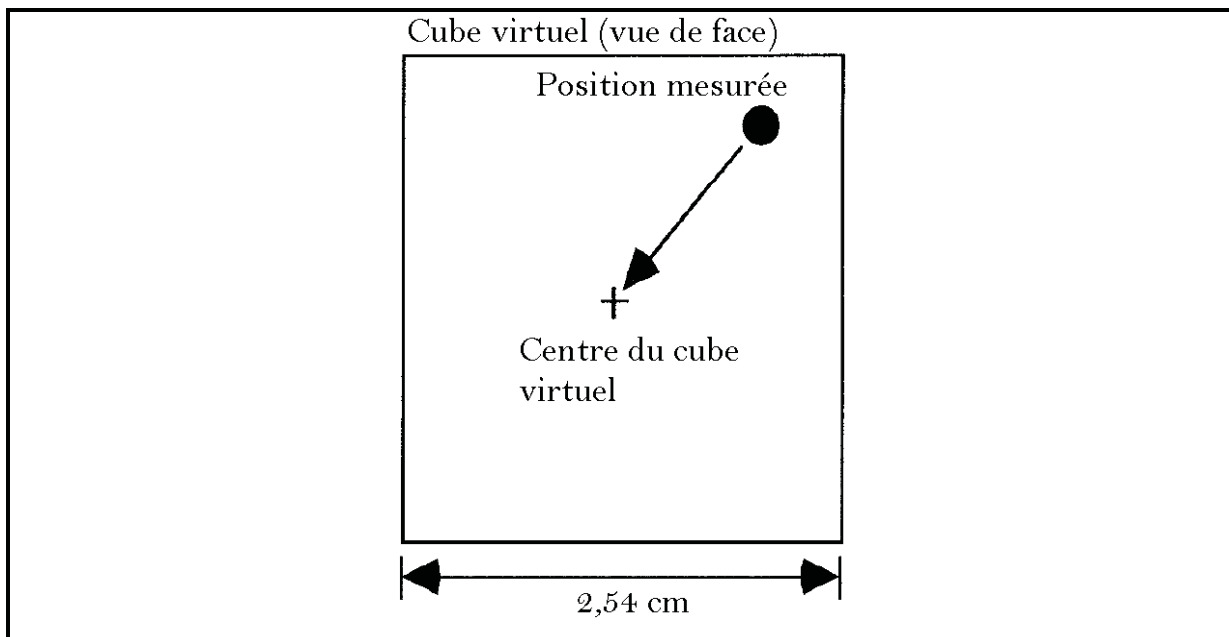


Figure 1.14 Cube virtuel et point de mesure servant à l'étalonnage.
(Tiré de Ghazisaedy et al. 1995).

L'opérateur répète cette procédure jusqu'à ce que tous les cubes à l'intérieur du volume d'étalonnage soient bien positionnés. Le système de mesures ultrasonique a les avantages de pouvoir couvrir de grandes distances, d'être rapide, d'avoir une précision raisonnablement bonne, d'être insensible aux champs magnétiques, d'être plus exact que le capteur magnétique et d'avoir un coût relativement faible. L'UMD n'affecte pas le champ magnétique du capteur, parce qu'il est localisé en dehors du champ électromagnétique du capteur. Les inconvénients incluent le manque d'information de l'orientation du capteur (il n'y a pas de correction en orientation), la nécessité de maintenir les capteurs parallèles aux murs et au niveau. De plus, le chemin parcouru par le signal ne doit pas être physiquement bloqué. Un inconvénient majeur est que le volume d'étalonnage considéré doit être entouré d'une surface réfléchissante de sorte que des ultrasons puissent rebondir sur les parois. Ce procédé est meilleur pour corriger les erreurs de grandes amplitudes plutôt que les plus petites (Kindratenko and Bennett 2000).

Livingston et State (1997) ont utilisé un système de mesures mécanique articulé (figure 1.15) combiné à une table de conversion pour déterminer précisément la position et l'orientation du capteur électromagnétique FoB (Flock of Birds) dans le repère réel Q. Le capteur électromagnétique est installé de façon rigide et reproductible à l'extrémité d'un bras de Faro (voir définition ci-après) par un système articulé de plastique.

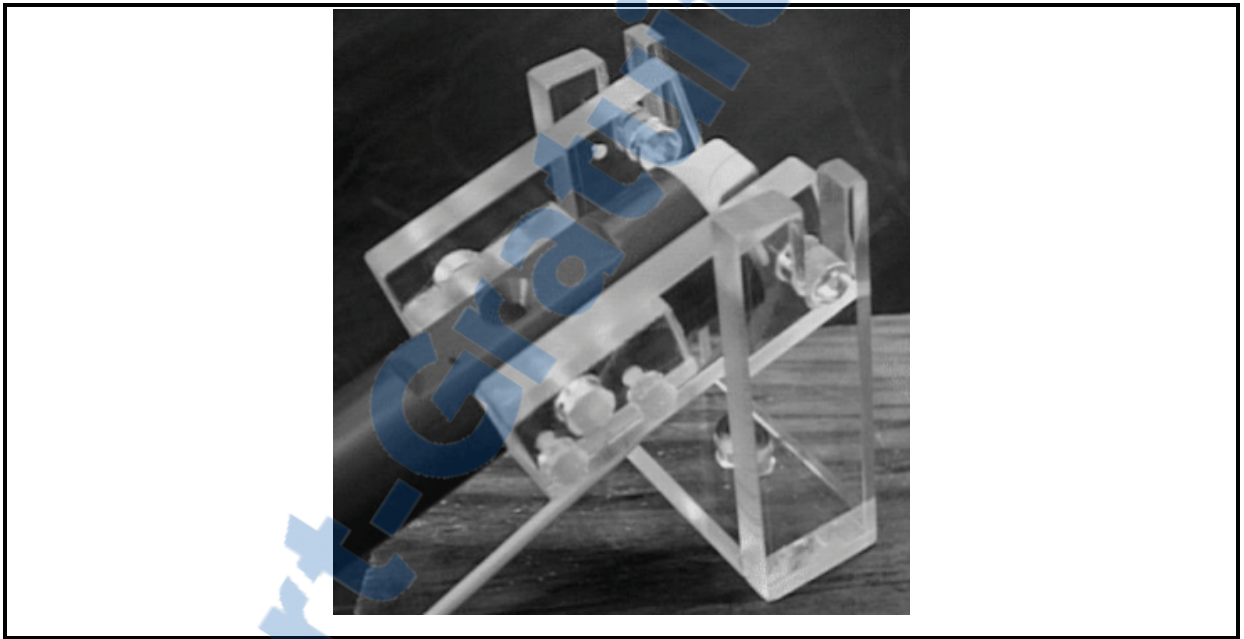


Figure 1.15 Support de plastique pour le capteur électromagnétique.
(Tiré de Livingston and State 1997).

Le bras de Faro est un dispositif à six degrés de liberté, construit avec de l'aluminium anodisé. Le rayon d'action de ce système de mesures est de 1,83 m. Les deux séries de mesures $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$ sont enregistrées en même temps. Les mesures ont été choisies aléatoirement à l'intérieur du volume puis réassemblés de manière à former un volume dont la forme est définie ou limitée de droites ou de segments de droite (rectiligne). Pour chaque échantillon, plusieurs enregistrements ont été effectués pour réduire l'effet du bruit sur la mesure : onze enregistrements ont été pris avec le FoB et trois mesures avec le bras de Faro. La moyenne des enregistrements a été utilisée pour les calculs. Une résolution de cinq centimètres a été choisie. Un total de 12801 échantillons a été conservé. Il n'y a pas de

précision sur le nombre exact de mesures $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$. Les échantillons restants étaient contenus dans une sphère de rayon de 2,0 mètres. Pour vérifier que le procédé de correction est valide, 5334 échantillons non filtrés ont été recueillis de la table de conversion. Pour mesurer les résultats numériques, 720 mesures filtrées ont été choisies indépendamment dans la table. Les mesures qui ont montré une métrique de bruit excessif (méthode non spécifiée) ont été exclues des calculs (1787 des 12801 mesures).

L'échantillonnage des mesures étalons avec le bras de Faro peut être très rapide et précis et l'orientation des capteurs peut être arbitraire. Par contre, le bras de Faro a un rayon d'action limité et son coût est élevé.

La méthode d'étalonnage de Birkfellner et al. (1998) utilise un procédé d'acquisition des mesures similaires à Livingston and State (1997). Un outil d'étalonnage (figure 1.16) a été conçu dans le but d'éliminer les problèmes d'obstructions rencontrés lors de séance de chirurgie assistée par ordinateur à l'aide d'appareil de mesure optique. Les équipements utilisés comprennent un appareil de mesure optique (OTS, Optical tracking system) Flashpoint 5000 (Image Guided Technologies Inc.). Un système de mesures électromagnétique à courant continu (The Bird, Ascension Technologies Inc.) a été aussi utilisé. L'outil d'étalonnage est un stylet de fibre de carbone et de titane, conçu pour permettre de fixer le capteur électromagnétique (EMTS, Electromagnetic tracking system) et 16 LED du système de mesure optique. La table d'opération utilisée pour les expériences est un modèle couramment utilisé (Maquet AG, Rastatt, Allemagne). Les mesures des appareils sont filtrées : une mesure est supprimée si la différence de position entre deux mesures prises par le capteur est supérieure à l'exactitude garantie par le fabricant.

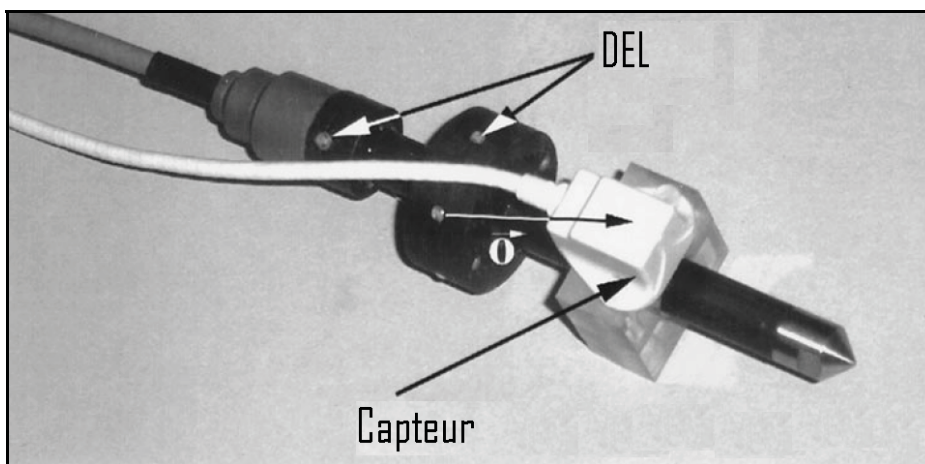
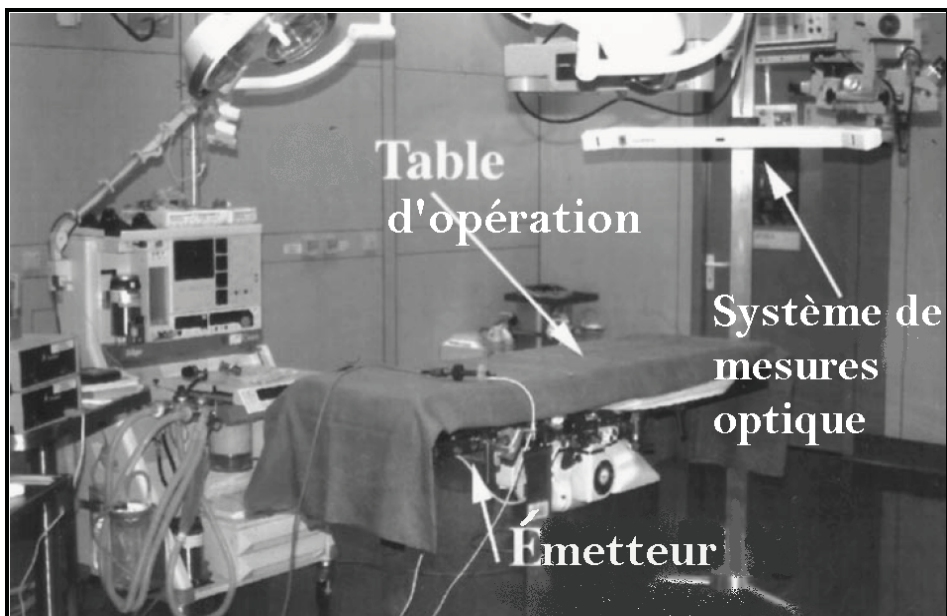


Figure 1.16 Système de mesures hybride composé du capteur électromagnétique et de DEL. (Tiré de Birkfellner et al. 1998).

Les expériences ont été faites dans une salle de chirurgie buccale et maxillo-faciale dont la plupart des pièces de la table et des équipements de la salle d'opération sont faits d'acier austénitique non ferromagnétique (figure 1.17). L'émetteur du système de mesures électromagnétique (ETMS) a été installé en dessous de la table d'opération en raison du rayon d'action relativement petit (0,915 m) de l'émetteur. Le volume d'étalonnage est rectiligne et a les dimensions 0,35 m x 0,35 m x 0,35 m. La résolution utilisée a été de 0,05 m. Cinq séries de mesures ont été utilisées pour déterminer le paramètre initial de l'étalonnage de l'appareil de mesure hybride. Ce paramètre est la distance entre la LED de référence de l'appareil et le point de mesure. Les manipulations nécessaires ont eu lieu à plus d'un mètre de distance de tous matériaux ferromagnétiques. Pour chaque mesure, 10 enregistrements ont été utilisés à l'intérieur du volume d'étalonnage. Pour chaque mesure, une paire de coordonnées provenant des deux systèmes de mesures est enregistrée. L'orientation et la hauteur de la table d'opération sont modifiées pour chaque mesure, de même que la position de l'appareil de mesure OTS dans la salle de chirurgie.



**Figure 1.17 Salle de chirurgie utilisée pour les expérimentations.
(Tiré de Birkfellner et al. 1998).**

La table de conversion est remplie en déplaçant le stylet à 512 mesures différentes à l'intérieur du volume d'étalonnage et pour lesquelles l'orientation du stylet est variable. La qualité de la correction de l'erreur dépend cependant du nombre de mesures à l'intérieur du volume d'étalonnage. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'enregistrer les mesures d'étalonnage qu'une seule fois, même si le volume d'utilisation (salle de chirurgie) change entre deux séances d'utilisation. Le fait que la salle de chirurgie soit composée principalement d'objets non ferromagnétiques contribue à la stabilité des paramètres de la table de conversion.

Ikits et Brederson (2001) ont utilisé un système de mesures optique (NDI Optotrack 3020) à quatre marqueurs pour mesurer la position réelle du capteur électromagnétique dans le repère réel Q (figure 1.18). Le système utilise des marqueurs infrarouges et des équipements vidéo spécialisés pour déterminer la position du capteur électromagnétique (Polhemus Fastrak). Le capteur électromagnétique et les marqueurs infrarouges sont attachés à une plateforme non métallique flexible qui peut être déplacée et avoir une orientation quelconque (6 degrés de liberté). L'échantillonnage des mesures par les systèmes s'effectue en même temps ce qui

permet de déterminer la position et l'orientation du capteur dans les deux repères P et Q. Un total de 600 mesures a été enregistré à l'intérieur d'un volume de 0,9 m x 1,5 m x 1,8 m. De ce nombre, 480 mesures ont servi pour l'étalonnage et 120 mesures prises aléatoirement pour vérifier la méthode. Une résolution de 0,15 cm a été utilisée, ce qui signifie aussi que certaines mesures ont été supprimées. L'orientation du capteur a été randomisée durant l'étalonnage pour couvrir l'ensemble des rotations possibles. À chaque point de mesure, 120 enregistrements ont été pris par le capteur électromagnétique et 100 par l'Optotrack. La moyenne des enregistrements a été utilisée dans les calculs. La source du système électromagnétique était située à 0,8 m du sol.

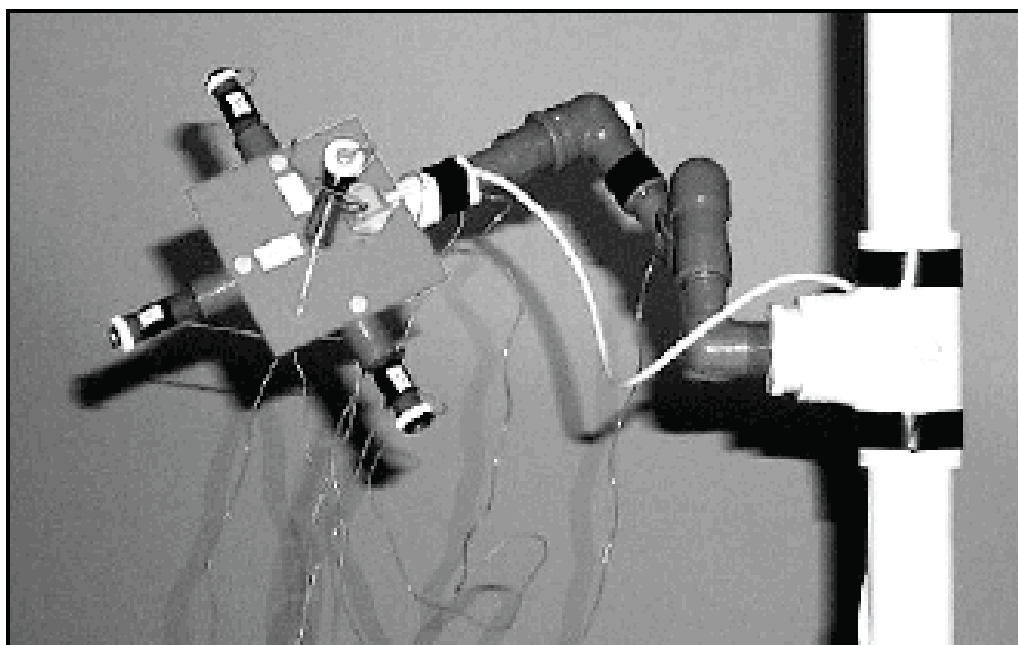


Figure 1.18 Montage de la plateforme flexible utilisé pour fixer les capteurs électromagnétiques et les marqueurs optiques. (Tiré de Ikits et al. 2001).

Les résultats obtenus par Ikits et al (2001) montrent que l'échantillonnage des mesures par le système Optotrack n'est pas aussi rapide qu'avec le bras de Faro (Kindratenko 1999), mais il est certainement plus rapide et plus précis qu'avec la technique de la planche perforée (Kindratenko 1999) ou du montage de Briggs (Briggs 1999). L'orientation du capteur peut

être variable, mais de façon limitée. Le coût de l'Optotrak peut être prohibitif pour beaucoup d'utilisateurs.

Dans une autre étude, Périé et al. (2002) ont évalué l'utilisation d'un émetteur à grande portée pour des applications en biomécanique spécifique à un environnement qui inclut une plateforme de force. Le matériel utilisé inclut un système de mesures électromagnétique Motion Star (Ascension Inc.), un montage d'acquisition des données similaire à celui de Day et al. (1998), Day et al. (2000), un système de mesure optique et une plateforme de force (OR6-1 AMTI). Le volume d'étalonnage est de 1,4 m x 0,8 m x 1,2 m. La résolution utilisée est de 20 cm. La plateforme de force est placée au centre du volume. Elle a les dimensions suivantes : 0,46 x 0,51 x 0,08 m³. L'émetteur est centré à 1,15 m au-dessus du sol et à 0,75 m de la mesure la plus proche (figure 1.19). Le montage permet d'enregistrer les coordonnées de 280 mesures. À chaque mesure, quatre différentes mesures d'orientation prédéterminée sont enregistrées. L'écart-type des mesures est calculé avec 100 mesures. La reproductibilité est validée par deux séries d'enregistrement qui utilisent les mêmes points de mesures et deux autres séries d'enregistrements avec des capteurs différents.

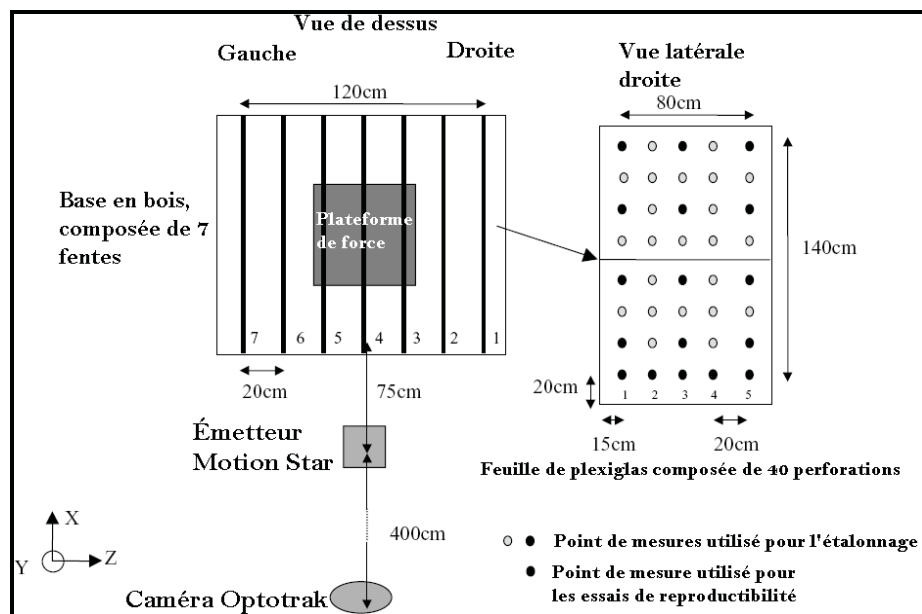


Figure 1.19 Schéma du montage de l'étalonnage avec support physique. (Tiré de Périé et al. 2002).

La méthode d'étalonnage a permis de démontrer que l'erreur de position et d'orientation ne dépend pas de l'orientation du capteur.

Le tableau suivant fait état des principales caractéristiques présentées dans ce chapitre.

Tableau 1.2 Résumé des principales méthodes de d'acquisition cités dans ce mémoire

Auteurs (année)	Bryson (1992)	Czernuszenko et al. (1998)	Briggs (1999)
Appareil de mesure	Fastrak	N/D	N/D
Équipements utilisés	Planche perforée, charpente, points de repère plancher.	Écran ImmersaDesk, et CAVE, lunettes stéréoscopiques, 7 boules suspendues à l'écran.	Syst. de mesures à plusieurs capteurs électromagnétiques, montage en bois sur une base en bois.
Volume (m³)	7,249	0,1699	N/D
Résolution (m)	0,3048	0,0127	N/D
Nombre de mesures	256	7	N/D
Technique	Mesures manuelles Fonction de corrélation entre les séries de mesures.	L'opérateur positionne un curseur visuel de manière à superposer l'objet virtuel sur l'objet réel.	La position des capteurs forme un tétraèdre sur un montage. Le montage est déplacé pour couvrir le volume désiré.
Avantages	Relativement précise.	Rapide, peu dispendieux, l'étalonnage est sélectif : l'utilisateur peut intervenir directement aux endroits où les erreurs sont les plus grandes.	Peut être relativement précise.
Inconvénients	Délais de déploiement. Fabrication de la charpente. Précision dépend de l'opérateur.	Exige un logiciel spécialisé pour guider l'étalonnage, précision limitée correction orientation pas disponible. Performance dépend de l'opérateur.	En outre, le capteur doit avoir une orientation constante tout au long de l'échantillonnage des mesures étalons.
Précision (mm)	50,8 (sur 1,016 m de distance)	0,0305	N/D
Précision (degré)	N/A	N/D	N/D
Précision (%)	50 %	Position : 79,2 %	N/D

1.4 Modèles mathématiques et techniques d'interpolation

Dans cette section, les différentes méthodes de correction des erreurs de position et d'orientation sont reprises entre autres de la revue de la littérature effectuée par Kindratenko Nixon et al. (1998). Le formalisme de Kindratenko a été conservé. Les modèles mathématiques et les techniques d'interpolation ne procurent pas les mêmes performances lors de la correction des erreurs de mesures.

Il faut considérer les prémisses suivantes lorsque l'on aborde la correction de l'erreur de mesure en position :

- 1) L'erreur de position est uniquement dépendante de la position du capteur à l'intérieur du volume d'étalonnage.
- 2) La correction de l'erreur de mesure statique peut être décrite comme un problème d'interpolation en trois dimensions.
- 3) Soit les deux séries de mesures suivantes (1.8 et 1.9),

$$\{p_i\} \subset P \subset R^3 \quad (1.8)$$

$$\{q_i\} \subset Q \subset R^3 \quad (1.9)$$

et l'énumération $i = 1, \dots, n$. Une fonction mathématique est recherchée pour mettre en relation les deux séries de mesures :

$$f : P \rightarrow Q \text{ tel que } f(p_i) = q_i \text{ pour } \forall i = 1, \dots, n \quad (1.10)$$

Les volumes P et Q occupent le même espace et ont des dimensions identiques. Dans ce contexte, $\{p_i\}$ représente l'ensemble des mesures du volume P non corrigées à l'intérieur

du volume d'étalonnage et $\{q_i\}$ représente l'ensemble des mesures du volume Q réellement corrigées à l'intérieur du volume d'étalonnage.

- 4) Les coordonnées des mesures sont exprimées comme suit :

$$\boxed{p_i = (x_i^p, y_i^p, z_i^p)} \quad (1.11)$$

$$\boxed{q_i = (x_i^q, y_i^q, z_i^q)} \quad (1.12)$$

Il faut considérer les prémisses suivantes lorsque l'on aborde la correction de l'erreur de mesure en orientation:

- 1) L'erreur d'orientation est uniquement dépendante de la position du capteur à l'intérieur du volume d'étalonnage.
- 2) La correction de l'erreur de mesure statique peut être décrite comme un problème d'interpolation en trois dimensions semblable à celui de la correction de la position.
- 3) La position du capteur est connue à l'intérieur du volume réel Q. Les positions et orientations mesurées dans le volume P sont exprimées comme suit : $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$, pour lesquelles $i = 1, \dots, n$, où n est le nombre total de mesure. Les volumes P et Q occupent le même espace et ont des dimensions identiques.

1.4.1 Interpolation trilinéaire

L'interpolation trilinéaire effectue une correspondance unique entre n'importe quelle mesure à l'intérieur du volume d'un cube (volume d'étalonnage P) et une coordonnée de position à l'intérieur d'un polyèdre quelconque (volume réel Q). L'étalonnage s'effectue d'abord en prenant huit mesures $\{p_1, \dots, p_8\}$ de manière à former un cube à l'intérieur du volume P.

Ensuite, il suffit de déterminer les coordonnées vraies $\{q_1, \dots, q_8\}$. Cette technique fonctionne correctement uniquement que si le volume d'étalonnage est entièrement subdivisé en petits cubes adjacents les uns des autres. Les subdivisions sont identifiées par les coordonnées $\{p_i\}_j$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$ où m est le nombre de subdivision dans le volume d'étalonnage P.

Une table de mise en correspondance est utilisée pour localiser n'importe quel point de mesure $\{p_i\}$ à l'intérieur du volume d'étalonnage P via l'un des cubes $\{p_i\}_j$ formés préalablement. Les équations 1.13 et 1.14 sont utilisées pour faire correspondre une mesure $\{p\}$ vers sa position correspondante dans le volume réel Q.

$$\begin{aligned}
 q = & (1-t) \cdot (1-u) \cdot (1-w) \cdot q_1 + t \cdot (1-u) \cdot (1-w) \cdot q_2 \\
 & + (1-t) \cdot u \cdot (1-w) \cdot q_4 + t \cdot u \cdot (1-w) \cdot q_3 \\
 & + (1-t) \cdot (1-u) \cdot w \cdot q_5 + t \cdot (1-u) \cdot w \cdot q_6 \\
 & + (1-t) \cdot u \cdot w \cdot q_8 + t \cdot u \cdot w \cdot q_7
 \end{aligned}
 \tag{1.13}$$

Où :

$$u = \frac{y^p - y_1^p}{y_4^p - y_1^p}, \quad v = \frac{x^p - x_1^p}{x_2^p - x_1^p} \quad \text{et} \quad w = \frac{z^p - z_1^p}{z_5^p - z_1^p}
 \tag{1.14}$$

L'une des limitations de cette méthode concerne l'interpolation d'une mesure se trouvant aux frontières des subdivisions. À ces endroits, il y a des discontinuités de la fonction d'interpolation. Cette méthode impose par le fait même une limitation lors de l'acquisition des points de mesures. Chaque subdivision doit être formée par huit mesures formant un cube. Plus les cubes seront petits et plus la précision sera augmentée.

Différents auteurs ont retenu cette technique dans leurs travaux dont : Ghazisaedy et al. (1995); Livingston et State (1997) et Czemuszenko et al. (1998).

1.4.2 Interpolation par le point le plus proche

Pour cette technique de correction de l'erreur de position, un capteur est déplacé à huit positions différentes $\{q_1, \dots, q_8\}$ de manière à former un cube dans le volume réel Q . Les points de mesures $\{p_1, \dots, p_8\}$ sont enregistrés dans une table de correspondance. Les huit points de mesures forment un polyèdre dans le volume P . L'erreur de position $\{v_i\}$ de la mesure $\{p_i\}$ est ensuite calculée avec l'équation 1.15.

$$v_i = q_i - p_i \quad (1.15)$$

Bryson (1992) et Kindratenko (1999) utilisent des méthodes qui nécessitent que l'ensemble du volume Q soit divisé en cube dont les sommets forment les mesures $\{q_i\}_j$. Pour chacune de ces subdivisions, les mesures $\{p_i\}_j$ correspondantes doivent être connues. C'est-à-dire que pour toutes les mesures $\forall p \in P$, leurs polyèdres $\{p_i\}_j$ associés sont localisés dans une table de correspondance. Par la suite, une mesure $\{p\}$ peut être retrouvée à l'intérieur du volume réel Q par les équations 1.15 et 1.16.

Bryson (1992) et Briggs (1999) déterminent le point $\{q\}$ à l'intérieur du polyèdre défini par $\{p_1, \dots, p_8\}$ par l'équation (1.16):

$$q = p + \sum_{i=1}^8 w_i v_i \quad (1.16)$$

À l'équation 1.17, une pondération particulière $\{w_i\}$ influence le choix du point $\{q\}$, de manière à ce que la somme des coefficients de pondération de l'équation 1.16 soit égale à 1 (1.17).

$$w_1 + \dots + w_8 = 1 \quad (1.17)$$

À l'équation 1.18, lorsque toutes les valeurs de la variable $\mathbf{r}$ sont égales entre elles ($r_1 = \dots = r_8$), la somme des erreurs pondérées $\sum_{i=1}^8 w_i v_i$ est égale à la moyenne des huit erreurs

$$\sum_{i=1}^8 \frac{v_i}{8}.$$

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^8 \frac{v_i}{8}} \quad (1.18)$$

1.4.2.1 Méthode de pondération linéaire

La méthode de pondération linéaire définit le poids relatif comme une fonction de la distance $\mathbf{d}$. (1.19)

$$r_i = \prod_{j=1, j \neq i}^8 d_j \quad (1.19)$$

1.4.2.2 Méthode de pondération exponentielle

La méthode de pondération exponentielle (1.20) définit le poids relatif comme une fonction exponentielle décroissante de la distance entre $\{p\}$ et $\{p_i\}$.

$$r_i = \begin{cases} e^{-d_i} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad (1.20)$$

Dans l'expression 1.20, la variable d_i est la distance entre $\{p\}$ et $\{p_i\}$. La variable $d_{\max}$ est une constante représentant une distance, qui est plus petite que la plus petite des distances fournies par les coordonnées des mesures $\{p_1, \dots, p_8\}$.

1.4.2.3 Méthode de pondération basée sur le carré de la distance

La méthode de pondération basée sur le carré de la distance (Raab et al. 1979) pondère l'erreur de position en fonction du carré de la distance séparant les mesures $\{p\}$ et $\{p_i\}$. Elle requiert des mesures $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$ similaires à la topologie utilisée pour la méthode trilinéaire. Ainsi, les mesures $\{p_i\}$ forment un cube dans le volume P et les mesures $\{q_i\}$ un polyèdre associé au volume Q.

Pour chaque mesure $\{p_i\}$, l'erreur de position vectorielle est calculée par l'équation 1.21. L'équation de correction de l'erreur de mesure est définie par l'équation 1.22.

$$\boxed{v_i = p_i - q_i} \quad (1.21)$$

$$\boxed{q = p - \sum_{i=1}^8 w_i v_i} \quad (1.22)$$

La fonction de pondération de l'erreur est définie par l'équation 1.23, où la variable d_i est la distance entre les mesures $\{p\}$ et $\{p_i\}$.

$$\boxed{w_i = \frac{1}{d^2} \sum_{i=1}^8 d_i^2} \quad (1.23)$$

1.4.2.4 Autres méthodes de pondération

Kindratenko (1999) et Raab et al. (1979) utilise trois autres fonctions pondérées (1.24, 1.25, 1.26).

$$\boxed{r_i = \begin{cases} 1 - \frac{d_i}{d_{\max}} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases}} \quad (1.24)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 - \frac{d_i^2}{d_{\max}^2} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad (1.25)$$

$$r_i = \begin{cases} -\ln\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right) & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad (1.26)$$

1.4.3 Polynôme d'interpolation de degré élevé

La méthode d'interpolation par polynômes permet de corriger des erreurs de position (Bryson, (1992); Kindratenko, (1999); Ikits et al. (2001)) et d'orientation (Kindratenko, (1999); Ikits et al. (2001), Nixon et al. (1998)). Dans cette méthode, des mesures $\{q_i\}$ sont effectuées à différents endroits dans une grille rectilinéaire du volume Q, sachant que les mesures correspondantes du volume P sont notées $\{p_i\}$. Le nombre total n de mesures i du volume sont $i = 1, \dots, n$. L'erreur de position vectorielle v_i est exprimée par l'équation 1.27.

$$v_i = p_i - q_i \quad (1.27)$$

Un polynôme de degré r est utilisé pour représenter la position des mesures $p \in P$. Il est formulé par l'équation 1.28.

$$v = f(p) = f(x, y, z) = \sum_{j=1}^R \begin{bmatrix} c_{xj} \\ c_{yj} \\ c_{zj} \end{bmatrix} \cdot x^{s_j} y^{t_j} z^{u_j} \quad (1.28)$$

Les coefficients du polynôme sont représentés par la notation suivante : c_{xj} , c_{yj} , c_{zj} . Le nombre total de termes R du polynôme doit satisfaire les deux conditions suivantes 1.29 et 1.30. À l'équation 1.30, les variables s_j , t_j , u_j sont toutes des exposants positives

$$R = \frac{(r+1)(r+2)(r+3)}{6} \quad (1.29)$$

$$0 \leq s_j, t_j, u_j \leq r \quad (1.30)$$

De plus, s_j, t_j, u_j sont toutes les permutations possibles, mais de puissances uniques. Les coefficients c_{xj}, c_{yj}, c_{zj} doivent être choisis de manière à ce que la fonction polynomiale permette la meilleure approximation de l'erreur de position aux mesure $\{p_i\}$. Ceci est possible en minimisant la fonction objective (1.31). L'équation (1.31) peut être minimisée par la méthode des moindres carrés telle qu'énoncée par l'équation (1.32). Dans ce cas, $k = 1, \dots, R$ et $n > R$.

$$\sum_{i=1}^n \|v_i - f(p_i)\|^2 \quad (1.31)$$

$$\sum_{j=1}^R \begin{bmatrix} c_{xj} \\ c_{yj} \\ c_{zj} \end{bmatrix} \cdot \sum_{i=1}^n (x^{s_j} y^{t_j} z^{u_j}) (x^{s_k} y^{t_k} z^{u_k}) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot (x^{s_k} y^{t_k} z^{u_k}) \quad (1.32)$$

Kindratenko a indiqué que l'utilisation des polynômes d'interpolation de degré élevé permettait la meilleure correction des grandes erreurs de mesures, mais que cette méthode introduisait de petites erreurs lorsque l'erreur de mesure était initialement petite (Kindratenko 2000).

La même méthode peut être appliquée à la correction des erreurs de mesures en orientation. Dans ce cas, les angles d'Euler $[(\alpha, \beta, \gamma)_i]$ sont utilisés et exprimés par $\{o_i\}$. L'équation (1.31) demeure la même sauf qu'elle est utilisée pour approximer l'erreur en orientation au lieu de l'erreur en position. Une fois que les coefficients sont connus, les erreurs en

orientation $[(\alpha^e, \beta^e, \gamma^e)_i]$ pour $\forall p \in P$ peuvent être interpolées. Pour corriger l'erreur en orientation, les mesures enregistrées dans le volume P (α, β, γ) et transposées dans le volume Q $(\alpha^e, \beta^e, \gamma^e)$ doivent être converties en matrice de rotation M et M^e , en multipliant M par M^e et en reconvertissant le résultat obtenu en angles d'Euler selon Nixon et al. (1998).

Ikits, Brederson et al. (2001) utilisent une représentation par quaternions $[w, (x, y, z)_i]$ pour la mesure d'orientation $\{o_i\}$.

L'équation (1.33) demeure identique à l'exception que l'erreur de position est remplacée par la composante vectorielle (x^e, y^e, z^e) de l'erreur en orientation mise sous la forme de quaternions $[w^e, (x^e, y^e, z^e)]$. La partie scalaire du quaternion W^e est obtenue par la relation suivante : $\| [w^e, (x^e, y^e, z^e)] \|^2 = 1$.

L'erreur de mesure en orientation peut être corrigée en multipliant l'inverse du quaternion interpolé par la mesure en orientation $[w, (x, y, z)_i]$ de la manière suivante :

$$[w^e, (x^e, y^e, z^e)] = [w^e, (x^e, y^e, z^e)]^{-1} \cdot [w, (x, y, z)] \quad (1.33)$$

Bien que les deux versions imposent certaines limitations de la topologie des mesures $\{q_i\}$, le capteur peut avoir une orientation quelconque en autant qu'elle soit connue.

1.4.4 Méthode de Hardy HMQ (Hardy's multi-quadric method)

Avec cette méthode, il est possible de corriger les erreurs de position et d'orientation, et ce, même pour des mesures situées à l'extérieur du volume d'étalonnage initial P. Cette méthode est entre autre utilisée par Zachmann (1997). Il n'y a pas de restriction sur la topologie des mesures. Lors de l'acquisition de ces mesures, un capteur est déplacé à différentes coordonnées $\{q_i\}$ d'une grille rectilinéaire du volume Q, sachant que les mesures

correspondantes du volume P sont notées $\{p_i\}$. Le nombre total n des mesures i du volume sont $i = 1, \dots, n$.

La forme générale de la fonction d'interpolation HMQ $f: R^3 \rightarrow R^3$ pour les mesures de position est définie comme suit :

$$f(p) = \sum_{j=1}^n a_j w_j(p) \quad (1.34)$$

La fonction $w_j(p)$ est définie comme suit :

$$w_j(p) = \frac{1}{\sqrt{\|p - p_j\|^2 + R^2}} \quad (1.35)$$

Les coefficients α_j de l'équation 1.36 peuvent être calculés en résolvant un système à n équations de l'équation 1.37, en utilisant une technique de factorisation (Press, 1977) :

$$\sum_{j=1}^n a_j w_j(p) = q_i \quad (1.36)$$

La régularité de l'interpolation dépend du paramètre R^2 . La valeur optimale de ce paramètre a été calculée expérimentalement et elle devrait être incluse entre $10 < R^2 < 1000$. La valeur exacte du paramètre R^2 a un impact très faible sur la qualité de l'interpolation.

Pour corriger les mesures en orientation $\{o_i\}$, une matrice $\{M_i\}$ doit être utilisée. Le calcul des coefficients α_j de l'équation (1.35) se fait en résolvant l'équation (1.37) :

$$\boxed{f(M_i^p) = M_i^q} \quad (1.37)$$

Le résultat de la fonction HMQ est d'interpoler la mesure M^q du volume Q provenant de la mesure M^p du volume d'étalonnage P. Dans ce cas, le capteur peut avoir une orientation quelconque en autant qu'elle soit connue.

1.4.5 Méthode basée sur un réseau de neurones

Avec cette méthode, il est possible de corriger les erreurs en position, et ce, même pour des mesures situées à l'extérieur du volume d'étalonnage initial (Saleh et al. (2000); Kindratenko and Sherman (2005)). Il n'y a pas de restriction sur la topologie des mesures. Lors de l'acquisition de ces mesures, un capteur est déplacé à différentes coordonnées $\{q_i\}$ d'une grille rectiligne du volume Q, sachant que les mesures correspondantes du volume P sont notées $\{p_i\}$. Le nombre total (n) des mesures (i) dans le volume est $i = 1, \dots, n$. L'ensemble des mesures $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$ est utilisé pour le processus d'apprentissage du réseau de neurones, de manière à ce que toutes les mesures $\forall p \in P$ aient une correspondance vers les points $q \in Q$.

La méthode utilise quatre niveaux de rétroaction, dont trois niveaux d'entrées et un de sortie (figure 1.20). Tous les niveaux utilisent une fonction d'activation linéaire (1.38). Le premier niveau contient de sept à huit noeuds, le deuxième niveau contient quatre noeuds, et tous les noeuds utilisent la fonction sigmoïdale d'activation (1.39) :

$$\boxed{f(s) = s} \quad (1.38)$$

$$\boxed{f(s) = (1 + e^{-s})^{-1}} \quad (1.39)$$

Une unité de retard, sans connexion entrante, est introduite dans chaque noeud d'entrée et de sortie (figure 1.21). Un algorithme de rétropropagation (équation 1.40) est utilisé pour

permettre l'apprentissage du réseau de neurones jusqu'à ce que la moyenne de l'erreur dans l'ensemble du réseau soit inférieure à 0,01. Le taux d'apprentissage utilisé pour contrôler les changements durant le processus d'apprentissage a été déterminé expérimentalement entre 0,01 et 0,1.

$$\frac{1}{p} \cdot \sum_p \sum_i (\text{valeur} - \text{vrai}[i] - \text{valeur} - \text{sortie}[i])^2 \quad (1.40)$$

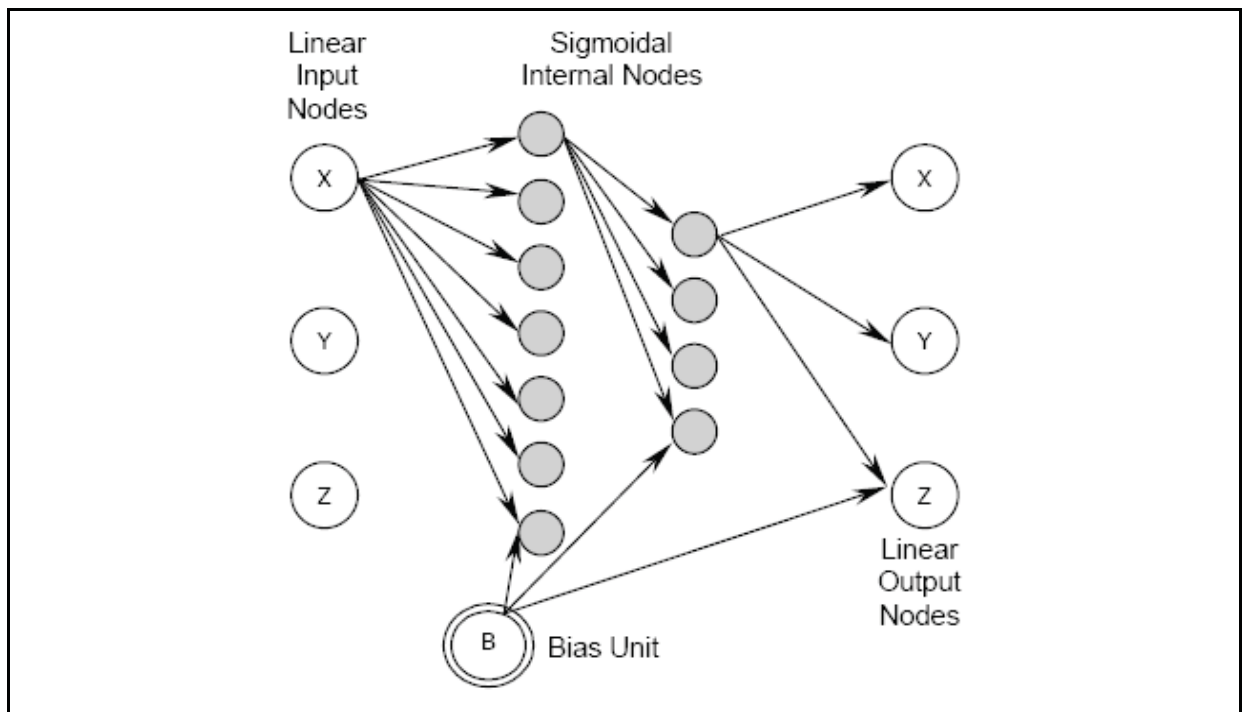


Figure 1.20 Schéma du réseau de neurones constitué de 7 nœuds supérieurs. (Tiré de Saleh, Kindratenko et al. 2000).

1.5 Méthode LIO

1.5.1 Modèle théorique

La méthode proposée par le LIO est inspirée de celle proposée par Ikits. Ikits et Brederson (2001) ont proposé une méthode de correction des distorsions en employant un polynôme d'interpolation de degré 4 pour estimer l'erreur en position et en orientation. Pour faciliter la compréhension de la méthode LIO, les principaux éléments de la méthode Ikits sont d'abord expliqués.

Les auteurs décrivent les déformations se produisant en position (x, y, z) par trois fonctions polynomiales et trois autres pour les déformations se produisant en orientation. La déformation des mesures en orientation est décrite par une algèbre de quaternion : $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$. Par la suite, les auteurs minimisent six fonctions objectives : S_{px} , S_{py} et S_{pz} pour estimer l'erreur de position (équations 1.41, 1.42, 1.43) et S_{qq1} , S_{qq2} et S_{qq3} pour estimer l'erreur en orientation (équations 1.44, 1.45, 1.46). Il n'est pas nécessaire de minimiser le quaternion q_0 puisque la norme d'un quaternion est égale à 1 ($\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} = 1$ et $q_0 = \sqrt{1 - (q_1^2 + q_2^2 + q_3^2)}$). De plus, les angles engendrés par les déformations électromagnétiques sont inférieurs à 90° .

$$S_{px} = \sum_{i=1}^N \|p_e^i - f(c_{px}, p_t^i)\|^2 \quad (1.41)$$

$$S_{py} = \sum_{i=1}^N \|p_e^i - f(c_{py}, p_t^i)\|^2 \quad (1.42)$$

$$S_{pz} = \sum_{i=1}^N \|p_e^i - f(c_{pz}, p_t^i)\|^2 \quad (1.43)$$

$$S_{qq1} = \sum_{i=1}^N \left\| \Delta q_i \right\|^2 = \sum_{i=1}^N \left\| q_e^i - f(c_{q1}, p_t^i) \right\|^2 \quad (1.44)$$

$$S_{qq2} = \sum_{i=1}^N \left\| \Delta q_i \right\|^2 = \sum_{i=1}^N \left\| q_e^i - f(c_{q2}, p_t^i) \right\|^2 \quad (1.45)$$

$$S_{qq3} = \sum_{i=1}^N \left\| \Delta q_i \right\|^2 = \sum_{i=1}^N \left\| q_e^i - f(c_{q3}, p_t^i) \right\|^2 \quad (1.46)$$

Les fonctions $f(c_{px}, p_t^i)$, $f(c_{py}, p_t^i)$, $f(c_{pz}, p_t^i)$, relatives aux équations 1.41, 1.42, 1.43, sont les fonctions d'interpolation polynomiales de degré 4 en position alors que les fonctions $f(c_{q1}, p_t^i)$, $f(c_{q2}, p_t^i)$, $f(c_{q3}, p_t^i)$ relatives aux équations 1.44, 1.45, 1.46, concernent l'orientation du capteur. La variable N , des équations 1.41 à 1.46, est le nombre de points de mesures enregistrés, p_t^i la position rapportée par le capteur, p_e^i l'erreur de position au point de mesures i . L'erreur p_e est définie comme : $p_e = p_m - p_t$; où p_m est la position vraie (enregistrée avec un système optoélectronique insensible aux distorsions causées par les métaux ou par l'utilisation d'un objet d'étalonnage rigide), tandis que p_t est la position enregistrée par le capteur magnétique. q_t^i est une coordonnée en orientation rapportée par le capteur et q_e^i l'erreur d'orientation au point de mesure i . La relation entre q_m , q_t et q_e est définie par la relation : $q_e = q_m q_t^*$, où q_t^* est le quaternion conjugué de q_t ($q_t^* = [q_0 \ -q_1 \ -q_2 \ -q_3]$).

Pour procéder à la correction des mesures par l'intermédiaire d'une fonction d'interpolation polynomiale f , les paramètres c_{px} , c_{py} , c_{pz} et c_{q1} , c_{q2} , c_{q3} doivent être déterminés. Ces paramètres sont les coefficients de déformation obtenus par la méthode des moindres carrés et elles sont décrites aux équations 1.47 à 1.52.

$$c_{px} = \min S_{px} = \min_{c_{px}} \left(\sum_{i=1}^N \|p_e^i - f(c_{px}, p_t^i)\|^2 \right) \quad (1.47)$$

$$c_{py} = \min S_{py} = \min_{c_{py}} \left(\sum_{i=1}^N \|p_e^i - f(c_{py}, p_t^i)\|^2 \right) \quad (1.48)$$

$$c_{pz} = \min S_{pz} = \min_{c_{pz}} \left(\sum_{i=1}^N \|p_e^i - f(c_{pz}, p_t^i)\|^2 \right) \quad (1.49)$$

$$c_{qq1} = \min S_{qq1} = \min_{c_{qq1}} \left(\sum_{i=1}^N \|q_e^i - f(c_{q1}, p_t^i)\|^2 \right) \quad (1.50)$$

$$c_{qq2} = \min S_{qq2} = \min_{c_{qq2}} \left(\sum_{i=1}^N \|q_e^i - f(c_{q2}, p_t^i)\|^2 \right) \quad (1.51)$$

$$c_{qq3} = \min S_{qq3} = \min_{c_{qq3}} \left(\sum_{i=1}^N \|q_e^i - f(c_{q3}, p_t^i)\|^2 \right) \quad (1.52)$$

La méthode LIO proposée réduit considérablement l'utilisation des moyens externes pour mesurer la coordonnée « vraie » afin d'établir la correction qui doit être appliquée aux enregistrements. Par exemple, la méthode développée par Ikits et Brederson (2001) utilisent un système de mesures optique (NDI Optotrack 3020) à quatre marqueurs infrarouges pour mesurer la position réelle du capteur électromagnétique. Le capteur électromagnétique et les marqueurs infrarouges sont attachés à une plateforme non métallique flexible qui peut être déplacée à une position et orientation déterminées.

L'idée principale de la méthode LIO est d'employer plus d'un capteur électromagnétique Fastrak pendant l'étalonnage. La condition nécessaire à cette méthode est de savoir parfaitement la position et l'orientation de chaque capteur, les uns par rapport aux autres. Pour le reste de l'explication, nous utiliseront quatre capteurs électromagnétiques, même si deux capteurs étaient suffisants.

Dans le texte suivant, les capteurs sont appelés F1, F2, F3, et F4. En considérant un capteur F , à une position $\mathbf{p}_m$ « vraie » et $\mathbf{q}_m$ une orientation « vrai », l'interférence causée par les métaux environnants induira une erreur $\mathbf{p}_e$ en position et $\mathbf{q}_e$ en orientation sur la mesure de position $\mathbf{p}_m$ et d'orientation $\mathbf{q}_m$ enregistrée par le capteur. La figure 1.21 schématise l'effet de l'interférence sur une mesure.

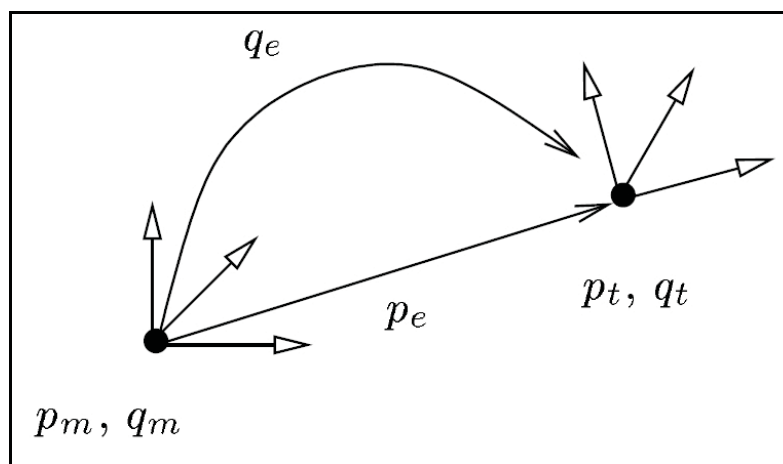


Figure 1.21 Erreur $\mathbf{p}_e/\mathbf{q}_e$ affectant une mesure $\mathbf{p}_m/\mathbf{q}_m$.

Si nous prenons maintenant deux capteurs F_i et F_j qui sont à une distance $d = d(d_x, d_y, d_z)$ connue, chaque capteur subira une déformation différente : Le capteur F_i aura une déformation de position $p_{ie}(x_i, y_i, z_i)$ et une déformation en orientation $\mathbf{q}_{ie}$ (figure 1.22). Il en va de même pour les déformations subites par le capteur F_j : la déformation de position sera $p_{je}(x_j, y_j, z_j)$ et la déformation de l'orientation $\mathbf{q}_{je}$.



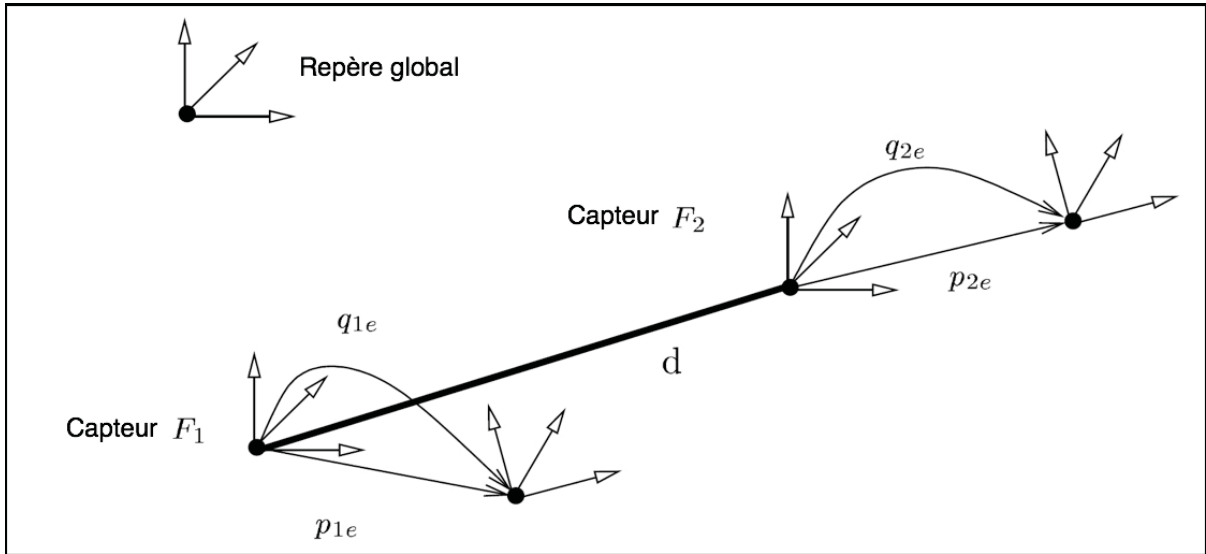


Figure 1.22 Exemple d'une déformation entre deux capteurs.

La matrice de transformation entre les deux capteurs est notée T_{mij} . Cette matrice contient l'information de position et d'orientation entre les deux capteurs. La matrice de transformation de la position et de l'orientation erronées entre les deux mesures p_m et p_t est notée T_{tij} . La différence entre les deux matrices correspond à l'effet de distorsion entre les capteurs F_i et F_j et elle est notée ΔT_{ij} . Puisque la distance d entre les deux capteurs est suffisamment petite, on peut approximer linéairement la distorsion du champ électromagnétique entre les deux capteurs. La différence ΔT_{ij} est donc égale au gradient de chaque fonction f évalué à la mi-distance entre les capteurs F_i et F_j (équation 1.53).

$$\boxed{\vec{\nabla} f \approx [\Delta T_{ij}]} \quad (1.53)$$

Nous pouvons donc estimer les gradients de six fonctions de déformation f (position et orientation) au point médian $F(x, y, z)$ entre les deux capteurs (F_i, F_j) le long du vecteur d , où l'expression mathématique 1.54 représente la différence de position suite aux effets de déformation dans les directions x, y, z au point F entre les capteurs F_i et F_j . L'équation 1.55

représente la différence d'orientation suite aux effets de déformation sur les composantes q_1 , q_2 , q_3 du quaternion normalisé.

$$\nabla f(c_{px}, c_{py}, c_{pz}) \quad (1.54)$$

$$\nabla f(c_{qq1}, c_{qq2}, c_{qq3}) \quad (1.55)$$

Le gradient de chaque fonction **f** est alors exprimé par l'équation 1.56.

$$\vec{\nabla} f(c, F) = \nabla f(c, x, y, z) = \frac{\partial f}{\partial x} dx_{\hat{x}} + \frac{\partial f}{\partial y} dy_{\hat{y}} + \frac{\partial f}{\partial z} dz_{\hat{z}} \quad (1.56)$$

La variable **c** représente les 35 coefficients de déformation, qui caractérise les 35 termes de la fonction polynomiale **f** de degré 4, **F** est le point milieu entre les capteurs **F_i**, et **F_j**, $d = d(d_x, d_y, d_z)$ est le vecteur entre les capteurs **F_i**, et **F_j**. La fonction $\vec{\nabla} f(c, F)$ est obtenue par l'équation 1.71, alors que 34 des 35 coefficients sont trouvés par l'application de la méthode des moindres carrés sur les fonctions objectives (équations 1.57 à 1.62). Le 35e paramètre correspond à une translation globale (une constante commune aux trois fonctions de position **f**).

$$S_{px} = \sum_{k=1}^N \left\| \left[\Delta T_{ij} \right]_x - \vec{\nabla} f(c_{px}, p_k) \right\|^2 \quad (1.57)$$

$$S_{py} = \sum_{k=1}^N \left\| \left[\Delta T_{ij} \right]_y - \vec{\nabla} f(c_{py}, p_k) \right\|^2 \quad (1.58)$$

$$S_{pz} = \sum_{k=1}^N \left\| \left[\Delta T_{ij} \right]_z - \vec{\nabla} f(c_{pz}, p_k) \right\|^2 \quad (1.59)$$

$$S_{qq1} = \sum_{k=1}^N \left\| \left[\Delta T_{ij} \right]_{q1} - \vec{\nabla} f(c_{qq1}, p_k) \right\|^2 \quad (1.60)$$

$$S_{qq2} = \sum_{k=1}^N \left\| \left[\Delta T_{ij} \right]_{q2} - \vec{\nabla} f(c_{qq2}, p_k) \right\|^2 \quad (1.61)$$

$$S_{qq3} = \sum_{k=1}^N \left\| \left[\Delta T_{ij} \right]_{q3} - \vec{\nabla} f(c_{qq3}, p_k) \right\|^2 \quad (1.62)$$

1.5.2 Implémentation de la méthode d'étalonne du LIO

Nous avons construit un objet d'étalonnage rigide (figure 1.23) qui permet de mesurer simultanément la position et l'orientation de quatre capteurs. Les vecteurs reliant les quatre capteurs ont été conçus pour être le moins parallèle possible pour permettre des mesures de gradients dans des directions multiples et plus rapidement. L'objet d'étalonnage rigide a été usiné avec de la matière plastique (PVC - polychlorure de vinyle), afin de connaître avec précision les distances entre les capteurs. Cette distance a été arbitrairement fixée à 20cm.

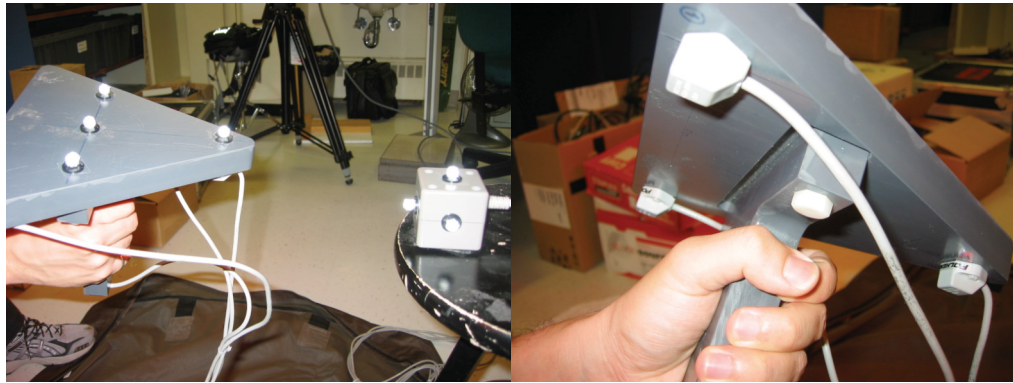


Figure 1.23 Outil d'étalonnage LIO.

D'abord, la position et l'orientation des quatre capteurs sont mesurées les uns par rapport aux autres durant le déplacement de l'objet d'étalonnage rigide. Le protocole de la prise des mesures consiste à déplacer l'objet dans le volume de l'espace d'utilisation. L'opérateur manipule l'objet d'étalonnage en appliquant un mouvement rotatoire du poignet de manière à modifier l'orientation des capteurs tout au long du procédé. La vitesse de déplacement et l'amplitude

du mouvement rotatoire appliqué à l'objet d'étalonnage doivent être relativement constantes. La trajectoire de l'objet d'étalonnage dans le volume (points de mesures) est arbitraire. La tâche de l'opérateur est de couvrir, autant que possible, l'ensemble du volume désiré.

À chaque instant de l'échantillonnage, six paires de mesures entre les différents capteurs sont enregistrées dans un fichier : (F1→ F2, F1→F3, F1→F4, F2→F3, F2→F4, F3→F4). Nous excluons les doublets ($i \neq j$). Des données suivantes sont alors calculées :

- 1) La transformation T_{mij} entre les capteurs F_i et F_j dans un repère local. Cette transformation est connue puisque les capteurs sont placés sur un objet rigide aux positions et aux orientations connues.
- 2) La transformation T_{tij} entre F_i et F_j (repère global).
- 3) La différence de l'effet de la déformation $\Delta T_{ij} = T_{mij} \cdot (T_{tij})^{-1}$ dans le repère local. Dans repère global, l'effet de la déformation $dT_{Global} = F \cdot \Delta T \cdot F^{-1} = F \cdot T_{mij} (T_{tij})^{-1} \cdot F^{-1}$.
- 4) Les vecteurs ΔT_x , ΔT_y , et ΔT_z représentant le déplacement linéaire de dT_{Global} .
- 5) Les vecteurs $\Delta Q1$, $\Delta Q2$, $\Delta Q3$ représentant la rotation de dT_{Global} .
- 6) La position moyenne $F(x, y, z)$ entre F_i et F_j (repère global).
- 7) Le vecteur de distance $d(d_x, d_y, d_z)$ entre F_i et F_j .

À chaque instant de l'échantillonnage, les fonctions objectives S_{px} , S_{py} , S_{pz} , S_{qq1} , S_{qq2} , S_{qq3} (équations 1.74-1.79) sont minimisées et mènent à la détermination des paramètres c_{px} , c_{py} , c_{pz} , c_{qq1} , c_{qq2} , et c_{qq3} . Les coefficients sont réintroduits dans les fonctions f pour estimer des déformations. Ces déformations sont utilisées pour corriger les mesures de position et d'orientation. Puisque le gradient de déformation peut seulement être estimé, le processus entier est répété de façon itérative selon l'algorithme suivant :

Tant que $(S_p + S_q)_{\text{iter}-1} - (S_p + S_q)_{\text{iter}} < \text{epsilon}$,

- (a) Calculer les données ci-dessus $(S_p + S_q)_{\text{iter}}$ et évaluer les paramètres c_p et c_q
- (b) Enregistrer les paramètres c_p et c_q
- (c) Corriger la position et l'orientation des capteurs à l'aide des 6 fonctions f

Les coefficients enregistrés seront réutilisés par la suite pour corriger d'autres mesures enregistrées avec le système électromagnétique dans la même aire de travail. Une fois les 34 coefficients déterminés, le 35e paramètre, un nombre constant, peut être déterminé, par exemple en plaçant l'objet d'étalonnage à une position et orientation connue par rapport à l'émetteur. Il faut cependant noter que durant l'évaluation des équations 1.75 à 1.82, le processus de dérivation partiel des fonctions de déformation $f(c_p, p_i)$ élimine les termes constants qui décrivent le gradient ainsi que le déplacement mesuré au point $F(x,y,z)$. Il est à noter que le nombre d'itération optimal calculé sur l'enregistrement étalonnage n'est pas forcément le même que celui obtenu pour minimiser l'erreur de mesure d'un enregistrement de validation. Puisque les coefficients sont appliqués sur un autre enregistrement que celui d'origine, il est possible que la correction finale ne soit pas optimale.

En résumé, la méthode du LIO combine l'utilisation d'une méthode semi-automatique pour l'acquisition des mesures étalons et une méthode d'interpolation polynomiale pour la réduction des erreurs de mesures. Le protocole semi-automatique a l'avantage d'être rapide à utiliser et ne requiert pas l'utilisation d'un système de mesures complémentaire ou d'un support physique à manipuler durant l'étalonnage. Les études qui ont mesuré la performance du modèle mathématique basé sur l'interpolation polynomiale ont reconnu l'efficacité de ce modèle à réduire efficacement les erreurs de mesures. De plus, son implémentation peut facilement évoluer en modifiant par exemple le degré d'un ou de plusieurs polynômes pour tenter d'améliorer la performance de l'interpolation (Bryson 1992).

1.6 Résumé des méthodes et modèles d'interpolation

Le tableau suivant fait état des principales méthodes et modèles mathématiques présentés dans ce chapitre.

Tableau 1.3 Tableau résumé des méthodes mathématiques

Méthodes & modèles mathématiques	Correction en position	Correction en orientation	Auteurs et domaines d'application	
Interpolation trilinéaire	X		Ghazisaedy et al. (1995) Livingston and State 1997; Czemuszenko et al. 1998	Réalité virtuelle
« Shape »	X		Kenwright and Lane 1996; Ellis et al. 1999	N/A
Interpolation par le point le plus proche	X		Bryson 1992; Briggs 1999; Kindratenko 1999	Réalité virtuelle
Polynôme d'interpolation de degré élevé	X	X	Kindratenko 1999; Ikits et al. 2001 Position uniquement : Bryson 1992	Réalité virtuelle
Méthode de Hardy HMQ	X	X	Zachmann 1997; Zachmann 2000	Réalité virtuelle
Réseau de neurones	X		Saleh et al. (pas publié – Ph.D.)	N/A
Similaire à interpolation trilinéaire + quaternions		X	Livingston and State (1997); Ellis et al. 1999; Kindratenko and Bennett 2000	Réalité virtuelle
Similaire à Polynôme d'interpolation de degré élevé + quaternions	X	X	LIO	Biomécanique
Interpolation trilinéaire et par le point le plus proche.	X		Birkfellner et al. 1998	Chirurgie assistée par ordinateur
			Borst 2004	
			Chung et al. 2004	
			Day et al. 2000	
			Fischer and Taylor 2005	
			Frantz et al. 2003	
			Hummel et al. 2006	
Similaire à interpolation trilinéaire + quaternions		X	Ochoa-Mayorga et al. 2005	N/A
			Périe et al. 2002	
Minisation par Gauss-Newton et algorithme de Veldpaus et al. (1988)	X		Meskers et al. (1999)	Biomécanique

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Le champ électromagnétique généré par le système 3Space de Fastrak est modifié par des facteurs externes qui influencent l'exactitude et la précision de ses mesures. Par exemple, des objets métalliques placés dans l'environnement d'utilisation du Fastrak affectent l'exactitude des coordonnées de position et d'orientation du capteur. La méthode de correction LIO réduit les erreurs de mesures, mais les paramètres optimaux de l'étalonnage ne sont pas connus. Les paramètres identifiés sont la distance entre les capteurs de l'objet de calibrage, la quantité de mesures étalons, la distribution et l'homogénéité des mesures étalons à l'intérieur du volume d'utilisation. Le dernier paramètre encore inconnu est le nombre de polynômes d'interpolation à utiliser pour étalonner le volume d'utilisation ; plus précisément la taille de la division où sera appliqué le polynôme d'interpolation.

2.1 Objectif général

L'objectif principal du mémoire est de réaliser plusieurs expériences qui permettront de déterminer les paramètres qui amélioreront la méthode de correction des erreurs développée par le LIO dans un contexte d'analyse de la marche en biomécanique. Le but est d'obtenir une méthode de correction des mesures en orientation et en position relative rapide et efficace. Les prochaines sections énoncent les objectifs secondaires ainsi que les différents tests qui seront entrepris dans le cadre de ce mémoire.

2.2 Analyser l'effet de la distance entre les capteurs de l'objet de calibrage sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

L'objet de calibrage utilise les mesures provenant de quatre capteurs pour modéliser les distorsions électromagnétiques à l'intérieur d'un volume d'utilisation. La distance entre les capteurs est actuellement de 20 cm. Or, certains auteurs suggèrent que les cordons d'alimentation électrique des capteurs eux-mêmes puissent être une source de distorsion. Ils recommandent d'espacer les capteurs à une distance minimale de 40 cm (Nixon et al. 1998), afin que leur cordon d'alimentation électrique n'interfère pas sur les mesures des autres capteurs. Néanmoins, agrandir l'objet de calibrage aurait pour inconvénient de le rendre moins ergonomique, plus lourd et moins maniable. Nous allons donc tester l'effet de la distance entre les capteurs sur l'erreur de mesure. L'objet de calibrage existant sera tout d'abord utilisé pour tester l'hypothèse selon laquelle une plus petite distance entre les capteurs aurait un effet négatif sur l'erreur de mesure. Si cette hypothèse est vérifiée, il s'agira de concevoir un nouvel objet de calibrage de plus grande dimension. Ce paramètre sera déterminant pour la suite des expériences, car le nouvel objet sera utilisé tout au long des prochaines expérimentations pour optimiser la distance entre les capteurs.

2.3 Analyser l'effet du nombre de mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

La méthode d'acquisition des mesures étalons avec l'objet de calibrage utilise un ensemble de mesures enregistrées aléatoirement à l'intérieur du volume d'étalonnage. L'acquisition se fait en balayant le volume d'étalonnage à l'objet de calibrage de la manière présentée par Nixon et al. (1998). Certains auteurs affirment que la quantité de mesures étalons, qui serviront par la suite à modéliser les distorsions, affectent la performance de la méthode de correction. Cependant, le nombre de mesures optimal par m^3 demeure inconnu. Nous allons donc tester l'effet du nombre de mesures étalons enregistrées en fonction de l'erreur de mesure. L'objet de calibrage existant sera tout d'abord utilisé pour tester l'hypothèse selon laquelle une plus grande quantité de mesures étalons aurait un effet positif sur la réduction de

l'erreur de mesure. Si cette hypothèse est vérifiée, il s'agira d'identifier le nombre de mesures étalons optimales pour les dimensions d'un volume utilisé.

2.4 Analyser l'effet du nombre de polynômes d'interpolation sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

Dans certaines études, dont celle de Ikits et al. (2001), les auteurs suggèrent l'utilisation de différentes méthodes de correction pour tenir compte de la nature du champ électromagnétique et les distorsions générées. Dans cette manipulation, il s'agit de comparer l'effet de deux polynômes d'interpolation obtenus à partir de deux divisions de volume différent. Le volume d'utilisation global est une demi-sphère de 75 cm de diamètre qui est subdivisée en deux tel qu'illustrée à la figure 2.1. Pour ce scénario, il s'agit de calculer les deux séries de polynômes avec les mesures situées à l'intérieur d'une des deux subdivisions. L'erreur de position et d'orientation est analysée en fonction de la taille des divisions définies.

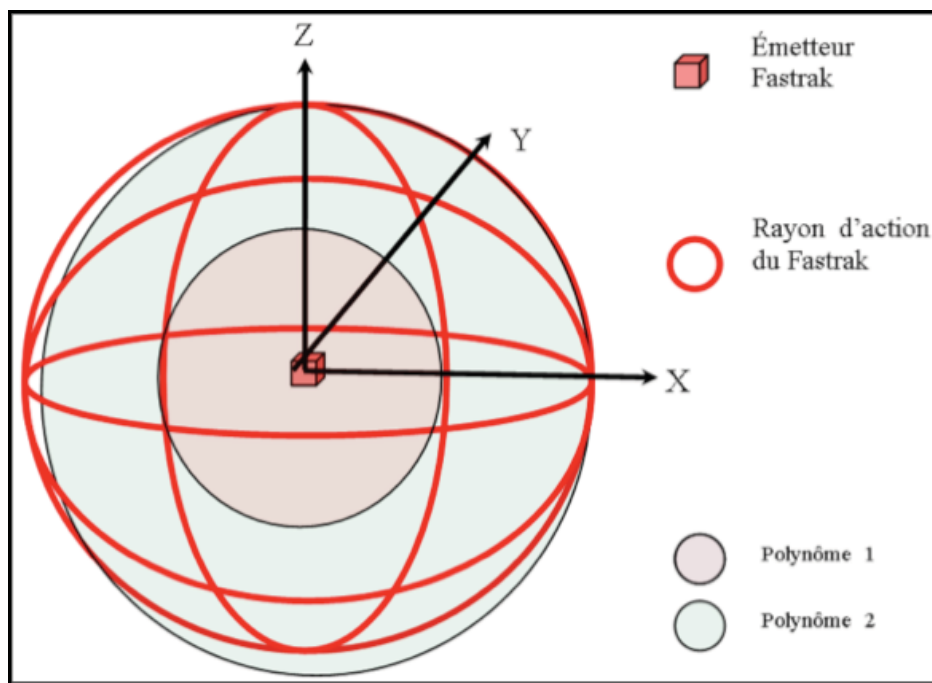


Figure 2.1 Illustration de la division du volume d'étalonnage en deux zones.

2.5 Analyser l'effet de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

Dans plusieurs études, les auteurs ont observé des problèmes d'interpolation des mesures aux frontières des divisions du volume d'étalonnage (Kindratenko 1999) ou encore ciblent des zones spécifiques du volume d'utilisation réelle pour accélérer l'enregistrement des mesures étalons Czernuszenko et al. (1998). Pour tester l'effet de la variation de l'homogénéité entre deux polynômes, il s'agit d'analyser et de comparer différents scénarios d'acquisition des mesures étalons dans le but de minimiser l'erreur de position/orientation en fonction de l'homogénéité. Il s'agit de réaliser les 3 scénarios suivants:

- 1) Effets du nombre de mesures uniformes pour chaque zone de balayage;
- 2) Effets du nombre de mesures supérieures au centre du volume et inférieures aux extrémités;
- 3) Effets du nombre de mesures inférieures au centre du volume et supérieures aux extrémités.

2.6 Analyser la robustesse et les limites de la méthode d'acquisition LIO

Dans cette section, les meilleurs paramètres obtenus jusqu'à présent seront utilisés pour former des coefficients de correction optimaux. Plusieurs enregistrements de validation seront testés pour trouver les conditions maximales d'utilisation de la méthode de correction LIO. L'importance de la taille du volume d'étalonnage par rapport au volume de validation sera évaluée.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Matériel

Le système de mesures électromagnétique utilisé pour les expérimentations est le 3Space™ Fastrak® (Polhemus, Colchester, Vermont É.-U.). La figure 3.1 montre le système de mesures. Quatre capteurs Fastrak sont utilisés et placés sur un objet de calibrage (figure 1.26 et 3.2). L'objet de calibrage permet de maintenir les capteurs en place et les manipuler sans modifier les distances relatives entre eux. Le contrôleur enregistre les données de chaque capteur de manière séquentielle, à un taux de 30 Hz par capteur. L'exactitude et la résolution de la mesure sont données par le constructeur dans un environnement idéal (à l'intérieur d'un rayon d'action de 76 cm de l'émetteur) sont respectivement de 0,8 mm RMS, 0,15° RMS pour l'exactitude et de 0,05 mm/mm de distance, 0,025° pour la résolution. Le fonctionnement de l'appareil de mesure a été décrit en annexe IV.

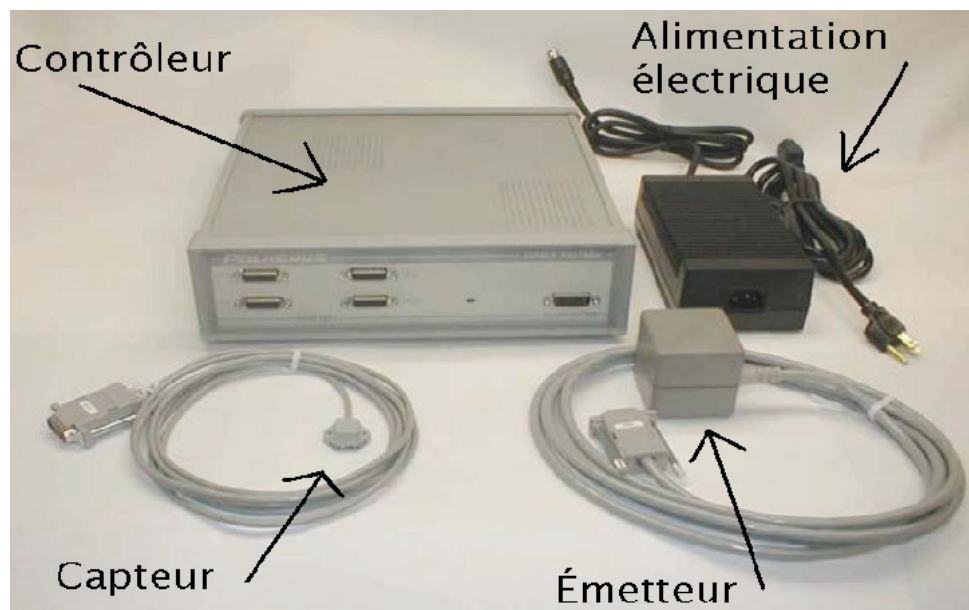


Figure 3.1 Système de mesures Fastrak. Tiré de Polhemus.



Figure 3.2 Mouvement de balayage à l'intérieur d'une division du volume d'étalonnage.

Le volume d'enregistrement a été défini au dessus d'un tapis roulant instrumenté (Adal3D, Tecmachine, France). Ce tapis est composé de deux courroies d'entraînement, une pour chaque jambe, et qui permet de faire varier la vitesse de marche de son utilisateur. Il sert en outre à analyser le patron de marche d'une personne pour détecter des pathologies. Ce scénario a été choisi, car le but ultime est de corriger des mesures enregistrées à la marche. Pour aider à réaliser la prise de mesure systématique de tout le volume d'étalonnage, un quadrillage fait de bandes adhésives a été installé sur le plancher du tapis roulant (figure 3.3). Chaque carré représenté par les bandes adhésives de la figure a des arêtes de 30 cm de longueur.

Chaque grille de la surface quadrillée représente la base du sous volume projetée vers le sol. Une masse suspendue à l'objet de calibrage sert à estimer la hauteur de l'objet de calibrage

durant l'acquisition. Des repères gradués marqués sur le fils permettent de savoir la hauteur de l'objet de calibrage par rapport au sol. La masse suspendue sert aussi à guider le mouvement de balayage à l'intérieur des divisions. Bien que les repères et la masse suspendus ne soient pas nécessaires pour faire la prise de mesure en tant que telle, ils aident l'opérateur à situer l'objet de calibrage à l'intérieur du volume d'étalonnage tout au long de l'acquisition des mesures étalons.

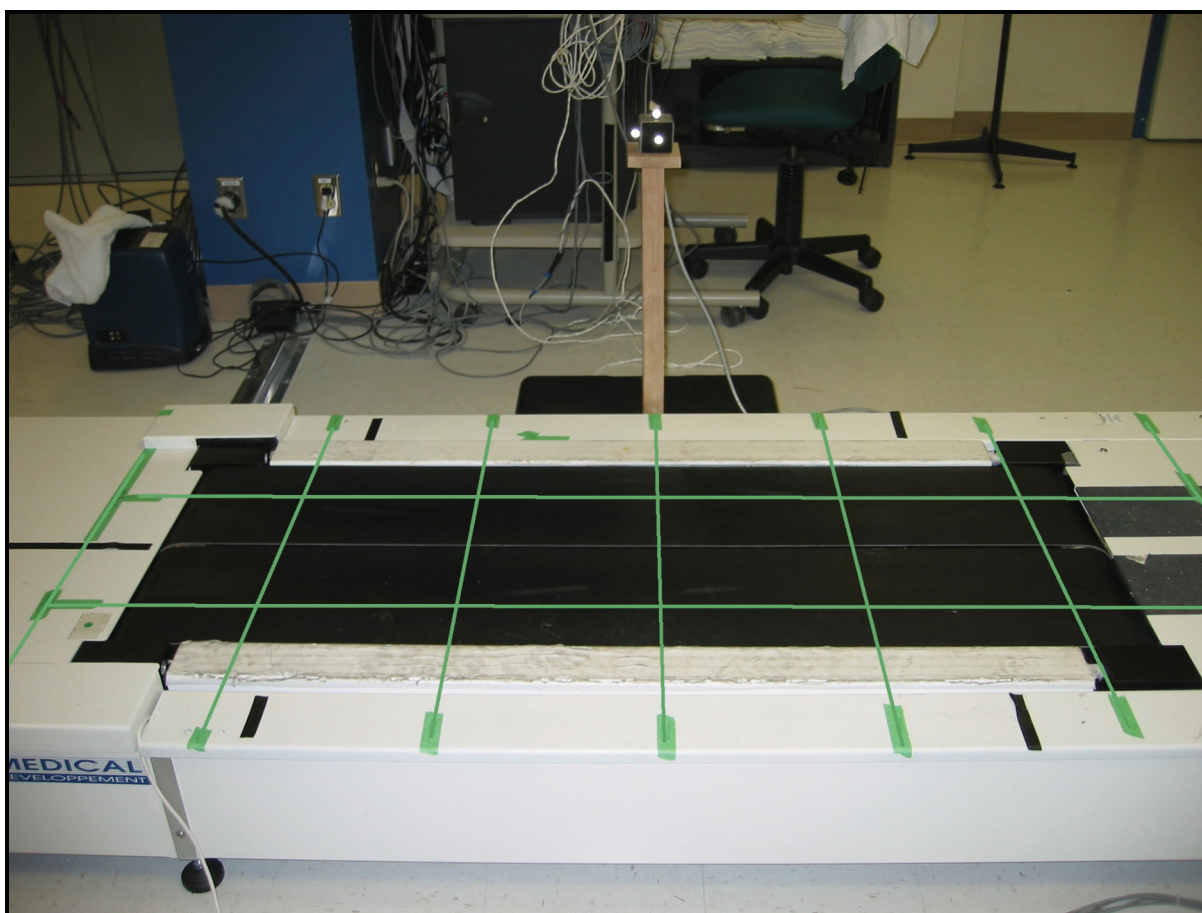


Figure 3.3 Représentation de la surface quadrillée utilisée pour l'étalonnage systématique de tout le volume au-dessus du tapis roulant.

Le volume d'utilisation de l'appareil de mesure Fastrak est représenté à la figure 3.4. Seule la demi-sphère droite est utilisée. L'émetteur Fastrak est déposé sur un tabouret de bois à un mètre du plancher.

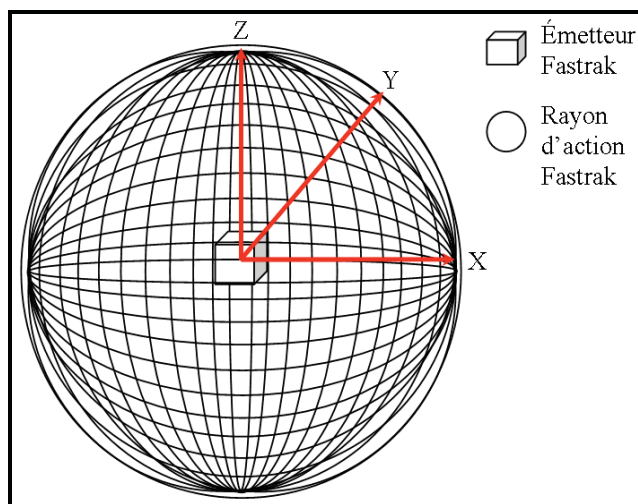


Figure 3.4 Schématisation du rayon d'action de l'appareil de mesure Fastrak.

3.2 Méthode d'acquisition des mesures

Pour toutes les expériences qui suivront, la procédure suivie pour faire l'acquisition des mesures consiste à suivre les étapes décrites plus bas. Il est à noter que certaines manipulations sont réalisées avec des fonctions programmées avec le logiciel Matlab.

- 1) Subdiviser le volume d'étalonnage en zones de balayage (figure 3.5). Une division est une zone de balayage où sera enregistrée une série de coordonnées à l'intérieur du volume d'étalonnage.
- 2) Pour chaque division, effectuer un mouvement de balayage. Un mouvement de balayage est défini par un mouvement de rotation du poignet d'une durée de 15 secondes environ.
- 3) Modifier les enregistrements d'étalonnage afin de satisfaire les critères spécifiques aux scénarios évalués :
 - la quantité de mesures totale dans un enregistrement.
 - la variation de la densité des mesures à l'intérieur du volume d'utilisation des capteurs.

la variation de l'homogénéité des mesures à l'intérieur du volume d'utilisation des capteurs.

- 4) Appliquer la méthode de correction des erreurs de mesures obtenues avec l'utilisation d'un seul polynôme d'interpolation :

Calculer les erreurs de position/orientation obtenues sur les enregistrements de validations en fonction des paramètres évalués.

Identifier le meilleur scénario parmi les enregistrements modifiés et quantifier la performance de la correction.

- 5) Appliquer la méthode de correction des erreurs de mesures obtenues avec l'utilisation de deux polynômes d'interpolation :

Calculer les erreurs de position/orientation obtenues sur les enregistrements de validations en fonction des paramètres évalués.

Identifier le meilleur scénario parmi les enregistrements modifiés et quantifier la performance de la correction.

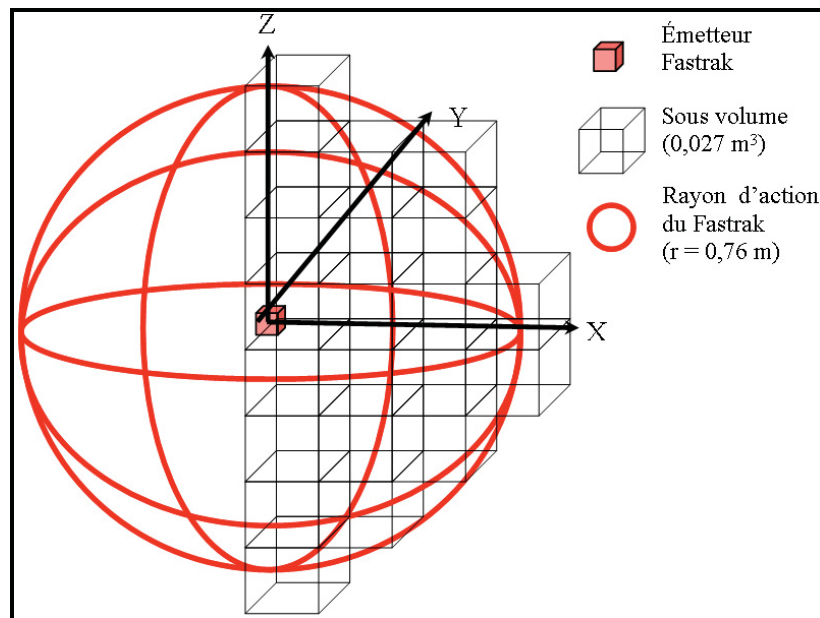


Figure 3.5 Représentation des subdivisions à l'intérieur d'un volume d'acquisition d'un enregistrement d'étalonnage.

La prise de mesure se fait en déplaçant l'objet de calibrage à l'intérieur de chacune des divisions. Un mouvement de balayage de 15 secondes est effectué pour chacun des 48 sous volumes (figure 3.5). On remarque à la figure 3.3 que l'objet de calibrage est légèrement incliné de manière à obtenir le plus de combinaison position-orientation des capteurs possible durant la prise de mesure. À chacun des enregistrements d'étalonnage correspond une série de coefficients de correction unique. Ces coefficients de correction correspondent aux 35 coefficients d'une fonction d'interpolation polynomiale qui est propre à l'acquisition réalisée dans un certain volume. Un exemple de polynôme d'interpolation et de ces coefficients est présenté à l'équation 3.1. Une série de coefficients de correction est calculée tel que décrit par la méthode de correction LIO. Ces coefficients serviront ensuite à corriger les erreurs de mesures des enregistrements qui seront par la suite réalisés dans ce mémoire. Ces enregistrements sont qualifiés d'enregistrements de validation. Les mesures de cet enregistrement correspondent à un ensemble de coordonnées enregistrées au hasard et qui sont différentes de l'enregistrement d'étalonnage.

$$\tilde{x} = x + \left(\begin{aligned} &c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2 + c_7xz + c_8z^2 \\ &+ c_9x^3 + c_{10}yz + c_{11}x^3 + c_{12}x^2y + c_{13}xy^2 + c_{14}y^3 + \\ &c_{15}x^2z + c_{16}xyz + c_{17}y^2z + c_{18}xz^2 + c_{19}yz^2 + c_{20}z^3 \\ &+ c_{21}x^4 + c_{22}x^3y + c_{23}x^2y^2 + c_{24}xy^3 + c_{25}y^4 + c_{26}x^3z \\ &+ c_{27}x^2yz + c_{28}xy^2z + c_{29}y^3z + c_{30}x^2z^2 + c_{31}xyz^2 \\ &+ c_{32}y^2z^2 + c_{33}xz^3 + c_{34}yz^3 + c_{35}z^4 \end{aligned} \right) \quad (3.1)$$

La performance de la méthode de correction est évaluée par rapport aux distances réelles des capteurs Fastrak placés sur l'objet de calibrage. Les dimensions de l'objet de calibrage sont détaillées dans la section suivante, tandis que la méthode de correction est décrite à la section 3.2.5.

3.2.1 Effet de la distance entre deux capteurs sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

Cette section présente l'expérience permettant d'évaluer l'effet de la distance entre les capteurs sur l'objet de calibrage sur la correction des erreurs de mesure. Des points d'ancrage ont été machinés sur l'objet de calibrage afin de permettre deux configurations de la distance entre les paires de capteurs : 15 cm et 20 cm (figures 3.6 et 3.7). Il est à noter que les mesures des figures sont en pouce.

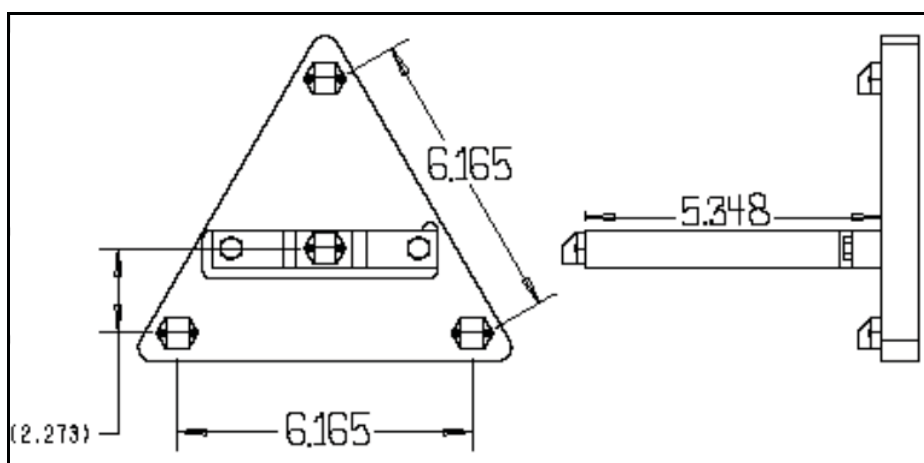


Figure 3.6 Schéma de l'objet de calibrage, configuration 15 cm.

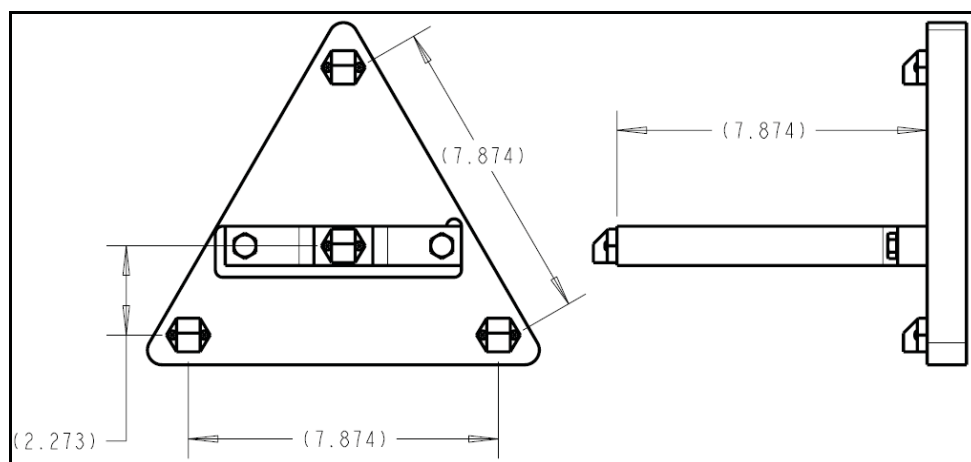


Figure 3.7 Schéma de l'objet de calibrage, configuration 20 cm.

L'expérience nécessite l'utilisation d'acquisitions de données d'étalonnage avec l'objet de calibrage, dont la distance entre les capteurs est de 20 cm et lorsque la distance est de 15 cm. La méthode d'acquisition des mesures diffère de celle mentionnée précédemment. L'acquisition consiste en un balayage systématique de l'ensemble du volume, sans utiliser les sous volumes. Un mouvement de balayage de 240 secondes est utilisé, ce qui correspond approximativement à 10 500 mesures. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque les mesures aberrantes sont filtrées de la manière suivante : toutes mesures dont l'erreur en translation et en rotation est supérieure à 10 mm et à 10° sont supprimées du volume d'étalonnage. Le volume étalonnage idéal est une demi-sphère de 75 cm de rayon et exclut les mesures à moins de 30 cm du tapis. La durée de l'acquisition de mesures étalons est approximativement la même dans les deux configurations évaluées (15 cm et 20 cm). Cependant, le nombre de mesures doit être identique dans les deux enregistrements. Pour ce faire, les mesures seront supprimées aléatoirement de l'enregistrement qui aura le plus de mesures, et ce, jusqu'à ce que le nombre de mesures soit égal dans les deux scénarios. Ces mesures sont choisies après le filtrage des mesures aberrantes. De la même manière que pour les mesures étalons, les mesures de l'enregistrement de validation sont supprimées aléatoirement parmi les mesures enregistrées.

3.2.2 Effet du nombre de mesures étalons dans le volume d'étalonnage sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

L'expérience à mener dans cette section consiste à déterminer le nombre de mesures optimales utilisées pour faire l'étalonnage du volume d'utilisation de l'objet de calibrage. Ici, le balayage initial est réalisé avec la configuration des capteurs qui a permis de minimiser l'erreur de mesure (15 cm ou 20 cm). 11 différents ensembles de mesures étalons seront évalués. Le nombre de mesures évalué est présenté au tableau 3.1. Pour chaque quantité évaluée au tableau 3.1, les mesures seront choisies aléatoirement parmi les 10 562 mesures de l'enregistrement contenant toutes les mesures. L'effet de la quantité des mesures étalons par division est mesuré en calculant l'erreur de mesure en position et en orientation sur les trois enregistrements de validation.

Tableau 3.1 Nombre de mesures utilisées pour calculer les coefficients de correction

Essai	Nombre de mesures	Densité (mesures / m³)	Durée de l'acquisition (seconde)
Enregistrement complet	10 562	23 062	720*
2	10 000	21 835	334
3	7 500	16 376	250
4	1 000	2 184	34
5	100	219	4
6	50	110	2
7	37	88	2
8	25	55	< 1
9	10	22	< 1
10	6	14	< 1
11	5	11	< 1

* Durée totale de l'enregistrement initial.

3.2.3 Effet du nombre de polynômes d'interpolation sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

L'expérience consiste à utiliser deux modèles d'interpolation polynomiale pour caractériser l'erreur de mesures induites par les distorsions électromagnétiques. Une première série de coefficients (polynômes proximales à la source) est utilisée pour corriger les mesures situées à l'intérieur d'un volume d'une certaine distance, tandis que les mesures situées à l'extérieur de ce rayon sont corrigées par une seconde série de coefficients (polynôme distale à la source). Les différentes tailles des rayons évalués sont présentées au tableau 3.2. Par ailleurs, les deux polynômes prendront la forme décrite par l'équation 3.8. Le schéma tridimensionnel d'un des scénarios est représenté par la figure 3.8.

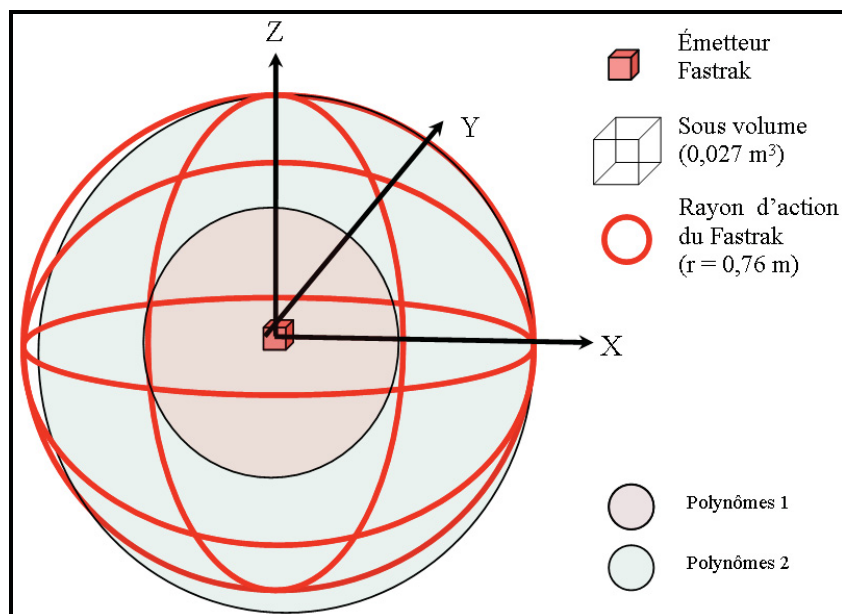
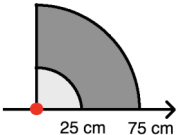
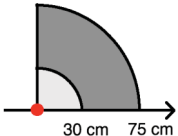
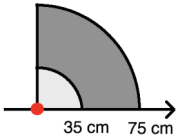
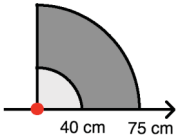
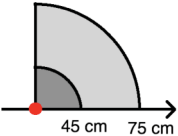
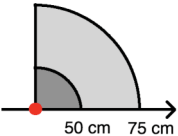
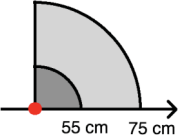


Figure 3.8 Association des polynômes d'interpolation à des zones spécifiques du volume d'étalonnage.

Tableau 3.2 Nombre de mesures utilisées pour calculer les coefficients de correction

Essais	Étendue de la zone proximale	Nombre de mesures dans la zone proximale	Nombre de mesures dans la zone distale
Essai 1 	0cm à 25cm	137	6 185
Essai 2 	0cm à 30cm	1 209	5 247
Essai 3 	0cm à 35cm	2 183	4 464
Essai 4 	0cm à 40cm	3 060	3 794
Essai 5 	0cm à 45cm	3 888	2 520
Essai 6 	0cm à 50cm	4 838	871
Essai 7 	0cm à 55cm	5 839	34

Il est à noter que la densité des mesures dans les deux sous-volumes est équivalente. Le nombre total de mesures varie légèrement d'un scénario à l'autre, car pour que la méthode soit fonctionnelle, les mesures situées à la frontière des deux volumes doivent être supprimées.

3.2.4 Effet de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

L'expérience menée dans cette section consiste à déterminer si la distribution de l'homogénéité des mesures dans le volume d'étalonnage a un effet ou non. Pour rappel, Kindratenko (1999) ne détermine pas le nombre de mesures ni la répartition des mesures étalons dans l'environnement d'étalonnage pour obtenir la meilleure méthode de correction. Pour ce faire, nous testerons d'abord l'utilisation d'un seul polynôme, et ensuite l'utilisation de deux polynômes dans des circonstances particulières. Le tableau 3.3 présente les caractéristiques des deux zones de volume d'étalonnage lorsque deux polynômes sont utilisés. Pour chaque quantité évaluée durant les tests (voir tableau 3.4), les mesures d'une zone seront choisies aléatoirement parmi les 10 562 mesures de l'enregistrement contenant toutes les mesures. Le tableau 3.3 présente les différentes quantités de mesures utilisées dans l'une ou l'autre des zones d'étalonnage. L'effet de l'homogénéité des mesures est mesuré en calculant l'erreur de mesure en position et en orientation sur les trois enregistrements de validation. Les quatre scénarios évalués sont présentés au tableau 3.5. Durant les expériences menées avec les deux polynômes, chaque polynôme sera appliqué sur les mesures incluses dans une section du volume d'utilisation.

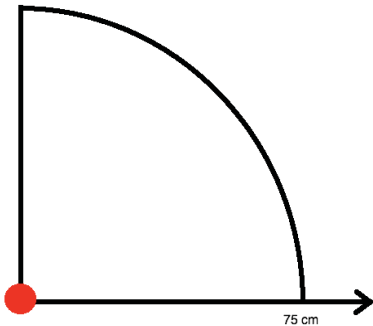
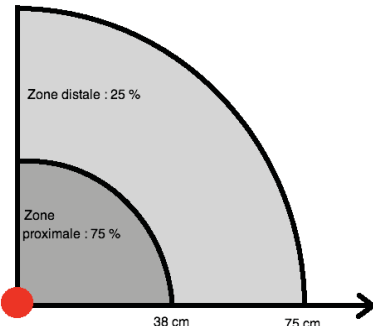
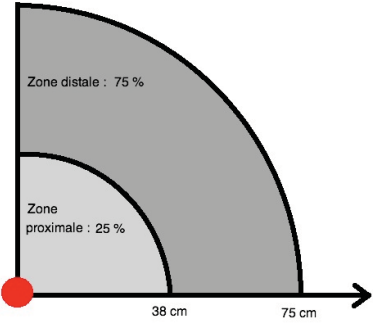
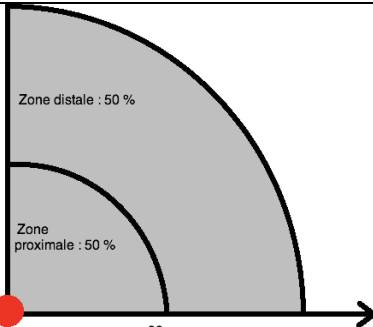
**Tableau 3.3 Caractéristiques des zones d'étalonnages
lors de l'utilisation de deux polynômes**

	Zone proximale	Zone distale
Rayon (cm)	3,217 à 37,5	> 37,5 à 75
Nombre de mesure maximal par zone	2 608	4 170

Tableau 3.4 Nombre de mesures utilisées pour calculer les coefficients de correction

Enregistrement	Nombre de mesures
1	50-50
2	100-100
3	500-500
4	652-3128
5	1000-1000
6	1956-1043
8	2000-2000
9	2608-2608
10	2608-4170

Tableau 3.5 Caractéristiques des différents scénarios lors de l'utilisation de deux polynômes

Scénario	Caractéristiques	Schéma
1	Acquisition homogène de tout le volume.	 A quarter-circle sector with a red dot at the origin. The radius is labeled 75 cm.
2	Acquisition où le nombre de mesures est plus dense proche de l'émetteur.	 A quarter-circle sector with a red dot at the origin. It is divided into two concentric regions. The inner region is labeled 'Zone proximale : 75 %' and has a radius of 38 cm. The outer region is labeled 'Zone distale : 25 %' and extends to a radius of 75 cm.
3	Acquisition où le nombre de mesures est plus dense loin de l'émetteur.	 A quarter-circle sector with a red dot at the origin. It is divided into two concentric regions. The inner region is labeled 'Zone proximale : 25 %' and has a radius of 38 cm. The outer region is labeled 'Zone distale : 75 %' and extends to a radius of 75 cm.
4	Acquisitions où le nombre de mesure est uniforme dans les deux zones.	 A quarter-circle sector with a red dot at the origin. It is divided into two concentric regions. The inner region is labeled 'Zone proximale : 50 %' and has a radius of 38 cm. The outer region is labeled 'Zone distale : 50 %' and extends to a radius of 75 cm.

3.2.5 Robustesse et limite de la méthode d'acquisition LIO

Cette expérience consiste à tester la robustesse et les limites de la méthode LIO. Les paramètres évalués incluent :

- 1) La taille du volume d'étalonnage par rapport au volume d'utilisation réel.
- 2) La distance maximale des mesures, par rapport à l'émetteur, que la méthode de correction peut corriger.
- 3) Le niveau de distorsion maximale que la méthode de correction peut éliminer.
- 4) L'erreur de mesure en fonction de la taille de volume de validation.

Il est à noter que la méthode a été appliquée sur trois volumes de validation.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Effet de la distance entre deux capteurs sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

Dans cette section, nous allons tester l'effet de la distance entre les capteurs sur l'erreur de mesure. L'objet de calibrage existant sera tout d'abord utilisé pour tester l'hypothèse selon laquelle une plus petite distance entre les capteurs aurait un effet négatif sur l'erreur de mesure. Les tableaux 4.1 et 4.2 affichent les caractéristiques des enregistrements étalons et de validation avant et après l'application de la méthode de correction. Les tableaux présentent les erreurs de mesures entre les deux configurations évaluées. Le tableau 4.1 présente les résultats obtenus lorsque les coefficients de correction des configurations 1 et 2 sont appliqués sur les enregistrements de validation A (configuration 15 cm) et B (configuration 20 cm). Pour la suite des expériences, on présentera uniquement les résultats de l'erreur de translation et d'orientation de l'enregistrement de validation.

Tableau 4.1 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak avant et après l'application de la méthode LIO sur les enregistrements étalons

	Configuration 1 : distance de 15 cm entre les capteurs		Configuration 2 : distance de 20 cm entre les capteurs	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Erreur de translation avant/après l'application de la méthode de correction				
Erreur de translation initiale (mm)	5,5	2,9	5,7	3,1
Erreur de translation finale (mm)	4,4	2,4	3,2	2,0
Erreur de rotation avant/après l'application de la méthode de correction				
Erreur de rotation initiale (°)	2,13	0,80	1,54	0,82
Erreur de rotation finale (°)	0,68	0,36	0,30	0,19

Tableau 4.2 Erreur en translation entre les capteurs Fastrack, après l'application des coefficients de correction 1 et 2 sur les enregistrements de validation A et B

	Enregistrement A : 15 cm sans repères visuels (712)		Enregistrement B : 20 cm sans repères visuels (712)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Erreur de translation avant/après l'application de la méthode de correction				
Erreur de translation initiale (mm)	6,0	3,1	7,5	3,2
Erreur de translation finale (mm)	6,9	5,3	6,1	3,0
Erreur de rotation avant/après l'application de la méthode de correction				
Erreur de rotation initiale (°)	1,86	0,84	1,49	0,72
Erreur de rotation finale (°)	1,04	0,60	0,49	0,31

Les résultats du tableau 4.2 montrent que:

- 1) La méthode de correction est plus efficace sur un enregistrement d'étalonnage que sur un enregistrement de validation, car l'optimisation des coefficients de correction a été faite sur les mesures étalons et non sur les mesures de validation.
- 2) La méthode de correction est plus efficace pour réduire l'erreur de mesure en rotation que pour les erreurs en translation.
- 3) La méthode de correction est modérément plus efficace sur l'enregistrement dont la distance entre les capteurs Fastrak est de 20 cm que la configuration dont la distance est de 15 cm.

Dès maintenant, la configuration à 20 cm sera conservée pour le reste des expériences, puis qu'un objet de calibrage avec une configuration de 30 cm n'aurait pas été ergonomique.

4.2 Effet du nombre de mesures étalons dans le volume d'étalonnage sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

Dans cette section, nous allons tester l'effet du nombre des mesures étalons sur la correction des mesures. L'objet de calibrage de la configuration 2 (20 cm) sera tout d'abord utilisé pour tester l'hypothèse selon laquelle une grande quantité de mesures étalons aurait un effet positif sur la réduction de l'erreur de mesure. Si cette hypothèse est vérifiée, il s'agira d'identifier le nombre de mesure optimal à enregistrer avec l'objet de calibrage par m^3 . Pour obtenir des résultats répétables, trois séries de mesures seront choisies au hasard.

Le tableau 4.3 affiche les caractéristiques des enregistrements de validation avant et après l'application de la méthode de correction. Trois enregistrements de validation successifs ont montré que la correction de l'erreur de mesure diverge lorsque le nombre de mesure diminue. Le nombre de mesures minimum se situe entre 100 et 1000 pour les trois enregistrements effectués. Les figures 4.1 et 4.2 présentent les résultats typiques obtenus avec l'un des

enregistrements de validation. L'erreur moyenne avant la correction de l'enregistrement de validation est présentée en vert, tandis que l'erreur moyenne et l'écart-type après la correction sont présentés en noir. Les courbes pointillées représentent l'écart-type.

Tableau 4.3 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak avant et après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation

	Essai de validation		
	100 mesures	1 000 mesures	10 562 mesures
Erreur de translation avant/après l'application de la méthode de correction			
Erreur de translation initiale (mm)	7,5 +/- 3,2	7,5 +/- 3,2	7,5 +/- 3,2
Erreur de translation finale (mm)	6,6 +/- 2,9	6,1 +/- 3,0	6,1 +/- 3,0
Erreur de rotation avant/après l'application de la méthode de correction			
Erreur de rotation initiale (°)	1,49 +/- 0,72	1,49 +/- 0,72	1,49 +/- 0,72
Erreur de rotation finale (°)	0,53 +/- 0,13	0,49 +/- 0,17	0,49 +/- 0,17

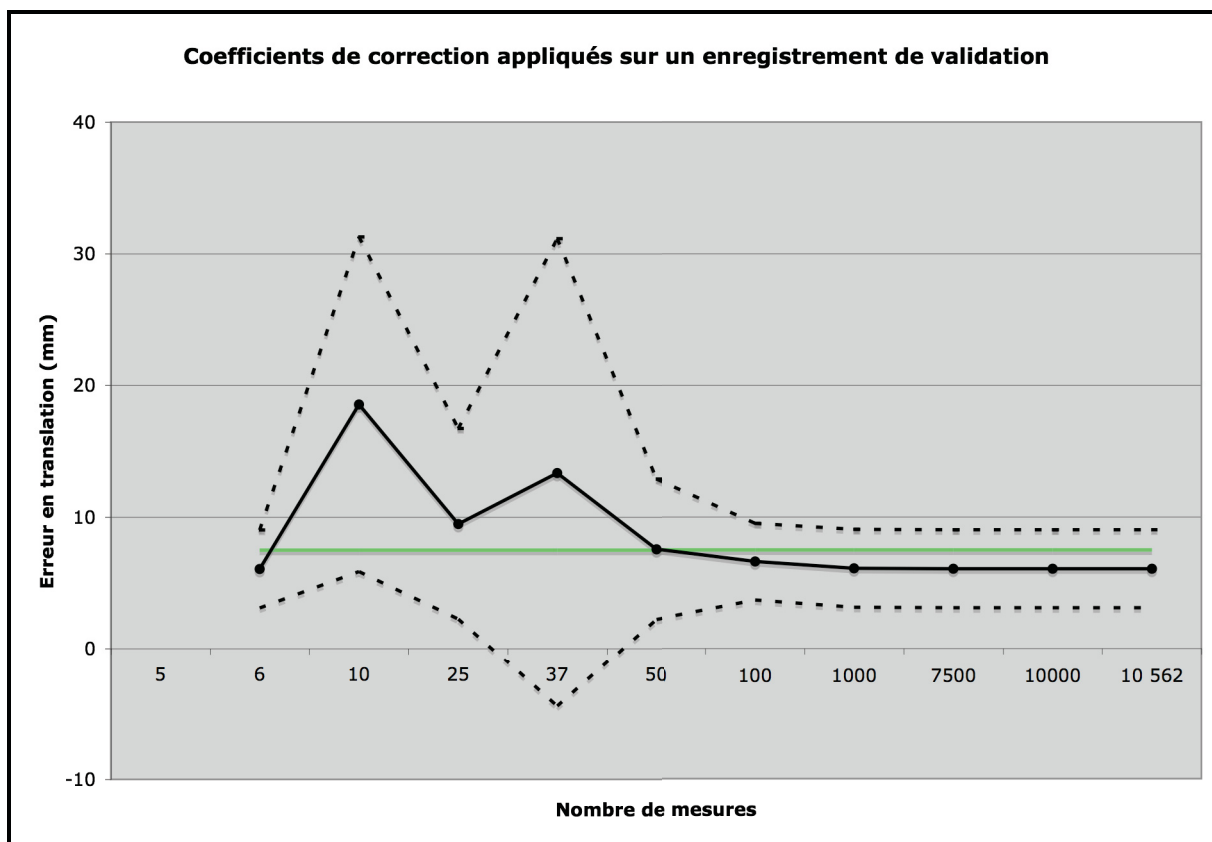


Figure 4.1 Erreur de mesure moyenne en translation en fonction du nombre de mesure utilisées pour le calcul des coefficients de correction. Les courbes pointillées représentent l'écart-type.



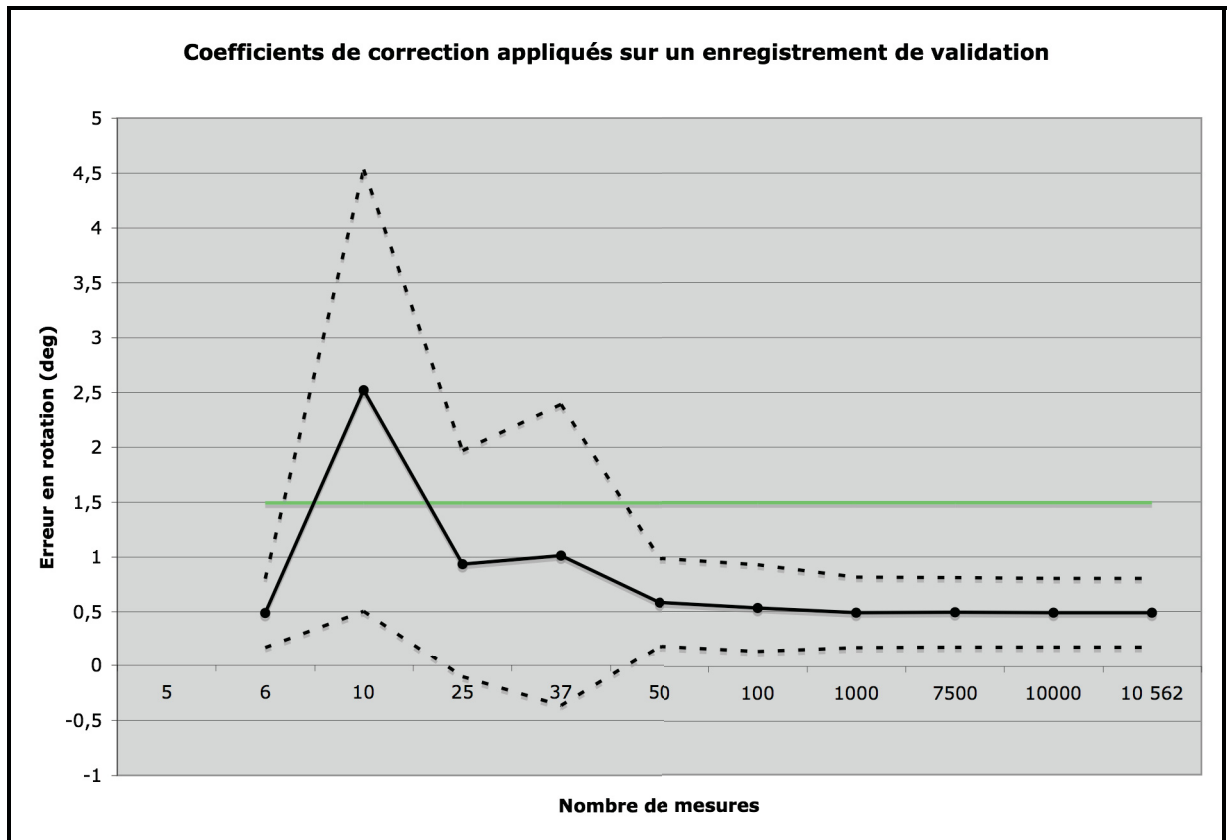


Figure 4.2 Erreur de mesure moyenne en rotation en fonction du nombre de mesure utilisées pour le calcul des coefficients de correction. Les courbes pointillées représentent l'écart-type.

Les résultats présentés aux figures 4.1 et 4.2 montrent que:

- 1) La méthode de correction est plus efficace pour réduire l'erreur de mesure en rotation que pour les erreurs de mesures en translation.
- 2) La méthode de correction est en état oscillatoire lorsqu'il y a moins de 50 mesures utilisées pour calculer les coefficients des polynômes.
- 3) La méthode de correction atteint son état optimal lorsqu'il y a plus de 100 mesures utilisées pour calculer les coefficients des polynômes.

Le tableau 4.4 fait, à titre comparatif, la synthèse des principaux résultats obtenus par les autres auteurs cités dans ce mémoire et inclut les résultats de la méthode LIO obtenues jusqu'à maintenant dans ce mémoire. Tous les résultats sont obtenus avec des mesures qui étaient situées à une distance maximum de 100 cm autour de l'émetteur. Il est à noter que les environnements de tests sont différents d'un auteur à l'autre. Les résultats montrent que la méthode LIO a obtenu les meilleurs résultats de correction parmi les méthodes qui corrigent les erreurs de mesures en translation et en rotation.

Tableau 4.4 Synthèse des résultats obtenus par les différentes méthodes de correction

Auteurs	Dimension du volume (m ³)	Densité (mesures / m ³)	Erreur de translation (mm)	Erreur en rotation (°)
Méthode LIO	0,458	23 062	6,1 +/- 3,0	0,49 +/- 0,17
Bryson (1992)	14.5	261	< 25 +/- 25	n-a
Birkfellner et al. (1998)	0,043	11 628	[1,2-2,9] +/- [0,8-2,3]	n-a
Kindratenko (1999)	10,87	9	59 +/- 27	n-a
Ghazisaedy et al. (1995)	10,87	37	< 46	n-a
Day et al. (2000)	1,34	6 448	< 25	< 2,5°
Périé et al. (2002)	1,34	209	< 25	< 2,5°
Ikits et al. (2001)	2,43	247	4,8 +/- 4	0,93 +/- 0,5

4.3 Effet du nombre de polynômes d'interpolation sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

Dans cette section, nous avons testé l'effet de la taille des volumes d'étalonnage sur la correction des mesures. Puisque la taille des deux volumes utilisés variera, le nombre de mesures à l'intérieur de ceux-ci varieront aussi. Le but est de tester l'hypothèse selon laquelle des polynômes associés aux zones près de l'émetteur et en périphérie du volume d'utilisation auraient un effet positif sur la réduction de l'erreur de mesure. Le volume d'utilisation global

est une demi-sphère de 75 cm de diamètre ($R_{\max}$) qui est subdivisé en deux : la zone proximale et la zone distale. Les mesures de l'échantillon se situent entre 3,217 et 75,0 cm de l'émetteur. Si cette hypothèse est vérifiée, il s'agira d'identifier les rayons optimaux des deux volumes d'étalonnage.

Tableau 4.5 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation

Rayon d'action du polynôme proximal à l'émetteur	Avant correction (mm)*	Avant correction (deg.)*
	7,5 +/- 3,2	1,49 +/- 0,72
	Après correction (mm)	Après correction (deg.)
35 cm	6 +/- 2,9	0,48 +/- 0,43
40 cm	5,9 +/- 2,9	0,47 +/- 0,31
45 cm	6 +/- 3	0,48 +/- 0,29
50 cm	8 +/- 8,2	0,61 +/- 0,55
55 cm	7,4 +/- 7,8	0,62 +/- 0,65
60 cm	6,3 +/- 3,1	0,57 +/- 0,41
65 cm	6,2 +/- 3,1	0,53 +/- 0,34

* Erreur avant correction de l'ensemble de toutes les mesures

Les résultats présentés au tableau 4.5 montrent que :

- 1) L'utilisation de deux polynômes dans un environnement homogène n'améliore pas la correction des erreurs.
- 2) La taille du volume proximal doit être supérieure ou égale aux dimensions de l'objet de calibrage (rayon supérieur ou égale à 35 cm).
- 3) Les résultats optimaux sont obtenus lorsque le rayon du volume proximal est inclus entre 40 et 45 cm. Au-delà de ces dimensions l'erreur de mesures augmente.

4.4 Effet de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des erreurs de mesures en position et orientation

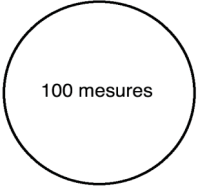
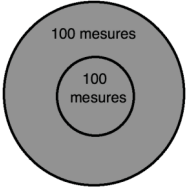
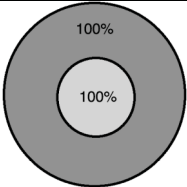
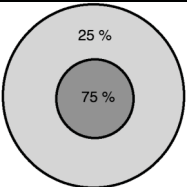
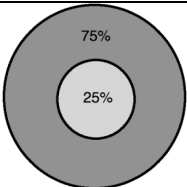
Dans cette section, nous allons analyser l'effet de la variation de l'homogénéité des mesures étalons sur la correction des mesures. Pour pouvoir appliquer la méthode de correction dans cette section, on utilise : 1) un polynôme d'interpolation dans un environnement homogène, 2) deux polynômes d'interpolation dans des conditions homogènes et hétérogènes. Ces deux dernières conditions sont comparées à un enregistrement corrigé avec un seul polynôme et pour lequel le même nombre de mesures étalons a été utilisé pour calculer les coefficients. Le tableau 4.6 regroupe les résultats obtenus pour l'utilisation de deux polynômes, après correction. Le tableau 4.7 compare les résultats de la méthode de correction obtenus en utilisant un ou deux polynômes utilisant approximativement le même nombre de mesures étalons. Le tableau 4.7 est accompagné de schémas pour appuyer la représentation de l'homogénéité des mesures à l'intérieur du volume d'étalonnage. Il est à noter que les 10 561 mesures du volume global sont distribuées de façon homogène.

Tableau 4.6
Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak
après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation

	Avant correction (mm)*	Avant correction (deg.)*
	7,5 +/- 3,2	1,49 +/- 0,72
	Après correction (mm)	Après correction (deg.)
50-50	6,8 +/- 4,1	0,61 +/- 0,77
100-100	7,2 +/- 5,5	0,6 +/- 0,67
500-500	6,3 +/- 3,6	0,53 +/- 0,56
652-3128	6,1 +/- 3,3	0,52 +/- 0,57
1000-1000	6,1 +/- 3,2	0,51 +/- 0,55
1956-1043	6,1 +/- 3,2	0,52 +/- 0,55
2000-2000	6,1 +/- 3,2	0,52 +/- 0,58
2608-2608	6,1 +/- 3,2	0,52 +/- 0,56
2608-4170	6,1 +/- 3,2	0,52 +/- 0,56

* Erreur avant correction de l'ensemble de toutes les mesures

Tableau 4.7 Comparaison entre les différents volumes et leurs homogénéités et l'utilisation d'un ou de plusieurs polynômes de correction après correction

Schéma et distribution de l'homogénéité	Correction avec un polynôme	Correction avec deux polynômes	Effet global
 100 mesures 100 ou 2x 50 mesures	6,6 +/- 2,9 (mm) 0,53 +/- 0,13 °	6,8 +/- 4,1 (mm) 0,61 +/- 0,77 °	Pas d'amélioration sur la moyenne, mais augmentation de l'écart-type.
 100 mesures 100 mesures 100 ou 2x 100 mesures	6,6 +/- 2,9 (mm) 0,53 +/- 0,13 °	7,2 +/- 5,5 (mm) 0,6 +/- 0,67 °	Dégradation de la moyenne et augmentation de l'écart-type.
 100% 100% 7 500 ou 2 608 et 4 170 mesures	6,1 +/- 2,96 (mm) 0,49 +/- 0,81 °	6,1 +/- 3,2 (mm) 0,52 +/- 0,56 °	Pas d'amélioration significative.
 25 % 75 % 1 000 ou 652 et 3 128 mesures	6,1 +/- 3,0 (mm) 0,49 +/- 0,32 °	6,1 +/- 3,3 (mm) 0,52 +/- 0,57 °	Pas d'amélioration significative.
 75% 25% 1 000 ou 1 956 et 1 043 mesures	6,1 +/- 3,0 (mm) 0,49 +/- 0,32 °	6,1 +/- 3,2 (mm) 0,52 +/- 0,55 °	Pas d'amélioration significative.

Les résultats présentés aux tableaux 4.6 4.7 montrent que :

- 1) La variation de l'homogénéité à l'intérieur du volume d'étalonnage n'a aucun effet sur la performance de la méthode de correction lorsque deux polynômes sont utilisés.
- 2) L'utilisation de plus de 1000 mesures par zone procure les meilleurs résultats dans des conditions où deux polynômes sont utilisés.
- 3) L'utilisation de deux polynômes, que ce soit avec ou sans variation de l'homogénéité, n'améliore pas la méthode de correction.

4.5 Robustesse et limite de la méthode d'acquisition LIO

Cette section a pour but de tester la robustesse, la répétabilité et les limites de la méthode préconisée dans différentes situations. À ce stade, tous les paramètres optimaux ont été identifiés et ils seront décrits en détail dans le prochain chapitre. Il est à noter que les enregistrements de validation n'ont pas été filtrés comme pour les sections précédentes, sauf pour les sections 4.5.2 et 4.6. Pour toutes les autres sections, les mesures situées à moins de 30 cm du tapis roulant ont été conservées pour former les enregistrements de validation. Pour rappel, les enregistrements de validation des précédentes sections étaient constitués de mesures dont l'erreur en translation et en rotation étaient inférieure à 10 +/- 10 mm et 10 +/- 10°. Dans la section 4.5.2, les mesures ont été filtrées de manière à conserver uniquement les mesures dont l'erreur en translation et en rotation étaient inférieure à 20 +/- 20 mm et 20 +/- 20°. Les enregistrements de la section 4.6 sont filtrés de manière à faire varier la taille du volume de validation.

Il est à noter que les résultats obtenus lors de l'application de la méthode de correction LIO sur un enregistrement de validation sont identiques d'une fois à l'autre. Les résultats varieront d'un enregistrement de validation à un autre, si les mesures sont différentes dans

chaque enregistrement. Dans cette section, les coefficients de corrections ont été appliqués à trois scénarios de validation qui ont des propriétés différentes :

Scénario 1

Le volume d'étalonnage est plus grand que le volume de validation (sur étalonnage);

Scénario 2

Le volume d'étalonnage est plus petit que le volume de validation (sous étalonnage);

Scénario 3

Le volume d'étalonnage et de validation sont des volumes égaux.

Pour chacun des trois scénarios, nous avons testé les trois approches présentées précédemment, à savoir :

- 1) Utilisation d'un polynôme.
- 2) Utilisation de deux polynômes dans un volume homogène.
- 3) Utilisation de deux polynômes dans un volume hétérogène.

Pour chaque section, le tableau 4.8 présente les caractéristiques des enregistrements étalons et de validation qui ont été utilisés.

Tableau 4.8 Caractéristiques des volumes utilisés pour la validation du scénario 1

Type d'approche	Rayon du volume (cm)	Nombre de mesures
Enregistrement étalon avec un polynôme	75	1 000
Enregistrement étalon avec deux polynômes et dans un environnement homogène	proximal : 0-40 Distal : 40-75	volume proximal : 3 060 volume distal : 3 794
Enregistrement étalon avec deux polynômes et dans un environnement hétérogène	proximal : 0-37,5 Distal : 37,5-75	volume proximal : 652 volume distal : 3 128
Enregistrement de validation : scénario 1	38	2 561
Enregistrement de validation : scénario 2	140	46 481
Enregistrement de validation : scénario 3	75	20 378

4.5.1 Scénario 1 : Effet d'un sur-étalonnage

Les résultats obtenus avec les coefficients des enregistrements étalons et l'enregistrement de validation du tableau 4.8 sont présentés au tableau 4.9.

Tableau 4.9 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation (sur étalonnage)

Type d'approche	Avant correction (mm)*	Avant correction (deg.)*
	4,0 +/- 2,6	1,3 +/- 0,71
	Après correction (mm)	Après correction (deg.)
Un polynôme	2,9 +/- 1,9	0,40 +/- 0,24
Deux polynômes et dans un environnement homogène	2,5 +/- 1,9	0,36 +/- 0,23
Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	2,5 +/- 1,8	0,35 +/- 0,23

Les résultats montrent que :

- 1) La performance de la méthode est grandement améliorée lorsque le volume d'étalonnage est plus grand que le volume de validation comparativement aux résultats obtenus à la section 4.2 (6,1 +/- 3,0 mm vs 2,5 +/- 1,8 mm et 0,49 +/- 0,17 ° vs 0,35 +/- 0,23 °).
- 2) La variation de la densité des mesures n'influence pas la méthode de correction.
- 3) L'utilisation de deux polynômes à un impact plus grand que dans la section 4.4 (variation de l'homogénéité des mesures étalons).

4.5.2 Scénario 2 : Effet d'un sous étalonnage

Les résultats obtenus avec les coefficients des enregistrements étalons et l'enregistrement de validation du tableau 4.8 sont présentés au tableau 4.10. Les résultats montrent que :

- 1) La méthode est tout de même fonctionnelle lorsque le volume d'étalonnage est plus petit que le volume de validation. Par contre, elle demeure moins efficace comparativement aux meilleurs résultats obtenus à la section 4.2 (variation du nombre de mesures étalons) où les résultats étaient égaux à (6,1 +/- 3,0 mm vs 2,5 +/- 1,8 mm et 0,49 +/- 0,17 ° vs 0,35 +/- 0,23 °).
- 2) La variation de la densité des mesures n'influence pas la méthode de correction.
- 3) L'utilisation de deux polynômes à un impact plus grand que dans la section 4.4 (variation de l'homogénéité des mesures étalons).
- 4) L'utilisation de deux polynômes n'a pas d'impacts positifs significatifs sur la réduction de l'erreur en translation, mais a un effet positif significatif sur l'erreur moyenne en rotation et encore plus sur la variabilité (écart-type) de l'erreur de rotation.

Tableau 4.10 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation

Type d'approche	Avant correction (mm)*	Avant correction (deg.)*
	8,3 +/- 4,4	1,76 +/- 0,90
	Après correction (mm)	Après correction (deg.)
Un polynôme	6,5 +/- 5,9	0,67 +/- 0,74
Deux polynômes et dans un environnement homogène	6,2 +/- 5,5	0,51 +/- 0,49
Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	6,4 +/- 5,6	0,49 +/- 0,42

4.5.3 Scénario 3 : Effet d'un étalonnage dont le volume est égal au volume de validation

Les résultats obtenus avec les coefficients des enregistrements étalons et l'enregistrement de validation du tableau 4.8 sont présentés au tableau 4.11. Les résultats montrent que :

- 1) La méthode est tout de même fonctionnelle lorsque le volume d'étalonnage et le volume de validation sont de même taille et atteignent les limites d'utilisation de l'émetteur. Par contre, elle demeure moins efficace comparativement aux meilleurs résultats obtenus à la section 4.2 (6,1 +/- 3,0 mm vs 2,5 +/- 1,8 mm en translation et 0,49 +/- 0,17 ° vs 0,35 +/- 0,23 ° en rotation).
- 2) La variation de la densité des mesures n'influence pas la méthode de correction.
- 3) L'utilisation de deux polynômes a un impact plus grand que dans la section 4.4.

Tableau 4.11 Erreur de translation et de rotation entre les six paires de capteurs Fastrak après l'application de la méthode LIO sur l'enregistrement de validation (sur étalonnage)

Type d'approche	Avant correction (mm)*	Avant correction (deg.)*
	13,2 +/- 20,8	3,4 +/- 2,7
	Après correction (mm)	Après correction (deg.)
Un polynôme	10,9 +/- 31,2	0,90 +/- 1,74
Deux polynômes et dans un environnement homogène	8,8 +/- 23,8	0,89 +/- 1,48
Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	8,5 +/- 20,7	0,91 +/- 1,53

4.6 Limite de la méthode de correction en fonction de la taille du volume de validation

Les résultats obtenus en appliquant les coefficients des enregistrements étalons sur l'enregistrement de validation du tableau 4.8 sont présentés aux tableaux 6.8, 6.9 et 6.10 en annexe V. Les résultats montrent que :

- 1) L'erreur de mesure initiale augmente en fonction de la distance entre un capteur et l'émetteur. La méthode devient moins efficace lorsque la taille du volume est grand et loin de l'émetteur. Elle est inversement proportionnelle à la grandeur de l'erreur de mesure initiale.
- 2) La variation de la densité des mesures n'influence pas la méthode de correction. Par contre, l'utilisation de deux polynômes avec mesures hétérogènes procure systématiquement de meilleurs résultats que pour l'utilisation de deux polynômes avec mesures homogènes.
- 3) La méthode de correction est applicable (surtout en rotation) jusqu'à 140 cm de l'émetteur, alors que la recommandation de Polhemus (Fastrak) est de 75 cm.

Tableau 4.12 Résumé des trois scénarios possibles lors de l'acquisition des mesures

Type d'acquisition	Effets observés avec un polynôme	Effets observés avec deux polynômes
Sur étalonnage (taille supérieure au volume de validation)	Diminution de l'erreur de mesure.	Grande amélioration de la méthode de correction.
Sous étalonnage (taille inférieure au volume de validation)	Diminution de l'erreur de mesure, varie selon la taille du volume.	Grande amélioration de la méthode de correction, varie selon la taille du volume.
Étalonnage équivalent à la taille du volume de validation	Diminution de l'erreur de mesure. Augmentation de la variabilité de l'erreur de mesure en translation.	Grande amélioration de la méthode de correction.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Ce mémoire a pour but général de caractériser la performance de la méthode LIO, dans un contexte de minimisation des erreurs des mesures en translation et en rotation. Les résultats de six approches différentes seront discutés dans cette section.

Rappelons brièvement qu'il n'a pas été possible de corriger un grand ensemble de mesures fortement bruitées (voir annexe VI). Le niveau de distorsion au niveau du tapis roulant est trop élevé et la méthode de correction produit des résultats divergents. C'est pourquoi les mesures situées à 30 cm au-dessus de tapis roulant ont été supprimées tout au long des expériences.

La première approche consistait à déterminer la meilleure configuration des capteurs Fastrak sur l'objet de calibrage, en terme de distance optimale entre les capteurs. Les résultats obtenus lorsque les capteurs Fastrak étaient espacés de 20 cm ont été légèrement meilleurs que lorsque les capteurs étaient espacés de 15 cm. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle une distance plus courte entre les capteurs aurait un effet négatif sur l'erreur de mesure. Compte tenu de ce qui précède et des observations menées par Nixon et al. (1998), une distance plus grande que 20 cm aurait permis d'obtenir de meilleurs résultats. Par contre, l'ergonomie de l'objet de calibrage aurait été affectée que ce soit par l'augmentation en poids et une diminution de sa maniabilité.

La seconde approche consistait à déterminer le nombre de mesures optimales à utiliser pour calculer les coefficients des polynômes de correction. Un des principaux facteurs de choix, excluant la précision de la mesure obtenue avec les mesures, est la rapidité d'obtention de ces mesures par la méthode d'étalonnage. Sachant que la méthode de correction permet de meilleurs résultats en rotation qu'en translation, le nombre de mesures optimales minimum se situe entre 100 et 1000 mesures.

Au-delà des 1000 mesures utilisées pour le calcul des coefficients, la courbe de performance de la méthode de correction atteint une asymptote (valeur maximale de la correction). En deçà de 25 mesures, la reproductibilité des résultats n'est plus assurée, la méthode de correction LIO produit des résultats divergents. Lorsque les résultats de cette section sont comparés à ceux obtenus dans la littérature (tableau 4.4), on remarque que la taille des volumes de validation ainsi que le nombre de mesures étalons utilisées varient d'un auteur à l'autre. L'utilisation de la densité des mesures étalons à l'intérieur du volume de validation permet de mieux comparer les résultats entre les auteurs. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'études qui utilisait cette densité de mesures (mesures / m³) comme caractéristique du volume d'étalonnage ou de validation. De même, les ouvrages de la littérature mettent de l'emphasis sur la représentation graphique de l'augmentation de l'erreur de mesure en fonction de la distance. Souvent, l'erreur de mesure moyenne à l'intérieure du volume d'utilisation est omise et le calcul de l'erreur de mesure moyenne est impossible à calculer à l'aide des graphiques. Ceci aurait pu faciliter la comparaison avec les résultats obtenus par la méthode LIO. Nos résultats confirment l'hypothèse selon laquelle la performance de la méthode de correction LIO augmente en fonction du nombre de mesures utilisées pour effectuer l'étalonnage. Conformément à ce qui précède, la correction maximale des mesures est atteinte avec environ 1000 mesures. Sachant que 34 secondes sont nécessaires pour enregistrer 1000 mesures dans un volume de 0,458 m³ : la méthode LIO se révèle très rapide à utiliser comparativement aux méthodes qui nécessitent de déplacement manuel des étalons entre chaque prise de mesures (Bryson (1992); Kindratenko (1999); Day et al. (2000); Ikits et al. (2001); Périé et al. (2002)). Contrairement à d'autres méthodes d'étalonnage, la méthode LIO utilise un seul système de mesures que sont les capteurs Fastrak. L'opérateur de l'objet de calibrage à la liberté de le déplacer n'importe où dans le volume à étalonnage, suivant un mouvement de balayage continu et ininterrompu et de la durée qui lui convient.

La troisième approche consistait à déterminer la taille idéale des deux volumes utilisés par les deux polynômes d'interpolation, en faisant varier le rayon du premier volume de 5 à 75 cm, et le second de 70 à 5 cm. Rappelons qu'Ikita et al (Ikits et al. (2001)) ont indiqué que l'interpolation polynomiale induisait plus de distorsions sur les mesures situées près de

l'émetteur et qu'il était préférable d'exclure les zones où la correction était négligeable. Par contre, ces hypothèses n'ont pas été exploitées. Dans cette approche, l'ensemble du volume d'étalonnage est couvert par les deux polynômes qui ne seront jamais superposés et qui auront une frontière commune. Nous observons une zone optimale lorsque le premier rayon couvre les distances allant de 40 à 45 cm à partir de l'émetteur. Ici encore, nos résultats ne permettent pas de démontrer que l'utilisation de plusieurs polynômes est la meilleure solution pour atténuer les distorsions dans des zones spécifiques au volume d'étalonnage. Aucune augmentation de l'erreur de mesures n'a été observée aux frontières des deux volumes utilisés dans cette approche. Par contre, on note qu'a priori, la taille des volumes utilisée peut nuire à la méthode de correction. Il est important de souligner que ce n'est pas tant la taille des volumes qui influence la méthode de correction, mais le nombre de mesures ainsi que leurs distributions à l'intérieur de chaque zone.

La quatrième approche consistait à modifier l'homogénéité des mesures d'un enregistrement, de manière à avoir deux polynômes d'interpolation avec un nombre de mesures associées à chacun des polynômes qui varient, mais dont la taille des deux volumes où sont répartis les mesures demeure fixe. Sachant qu'aucune modification de l'homogénéité des mesures ne c'est démarquée, les meilleurs résultats ont toutefois été obtenus en utilisant plus de 500 mesures par zone. En deçà de 500 mesures par zone, ce qui correspond à une densité de 1092 mesures/m³, la méthode de correction LIO augmente surtout l'erreur de mesure en translation. Aucun autre auteur n'utilise un volume d'étalonnage ou une densité similaire au nôtre (0,458 m³). Birkfellner et al. (1998) ont utilisé un volume d'étalonnage de 0,043m³ et une densité de 11 628 mesures/m³ pour obtenir des erreurs de mesures inférieures à 6 mm en translation. Ikits et al. (2001) ont obtenus des erreurs de mesures inférieures à 10 mm en translation et de moins de 2 degrés en rotation, mais en utilisant 500 mesures étalons et un volume d'étalonnage de 2,43m³. Pour ce qui est des autres études citées dans ce mémoire (Bryson (1992); Ghazisaedy et al. (1995); Kindratenko (1999); Day et al. (2000); Périé et al. (2002)), les auteurs ont utilisé des volumes plus grands que 0,458m³ et des densités inférieures à 23 062 mesures/m³, ce qui rend le jeu des comparaisons inadéquat. Nos résultats confirment de nouveau l'hypothèse selon laquelle la performance de la méthode de

correction LIO augmente sensiblement en fonction du nombre de mesures utilisées pour l'étalonnage. De même, l'hypothèse selon laquelle les polynômes créeraient de la distorsion sur les mesures limitrophes à leur domaine d'utilisation n'a pas été observée. En général, la segmentation du volume d'étalonnage global en deux zones plus petites n'améliore que sensiblement la méthode de correction utilisée par rapport à l'approche précédente, elle a plutôt tendance à augmenter sensiblement la variabilité de l'erreur.

Pour terminer, la dernière approche avait pour but de tester les paramètres optimaux des trois derniers scénarios (approches décrites précédemment) dans des conditions variables afin de déterminer les limites de l'utilisation de la méthode. Cette dernière expérience se distingue des expériences réalisées jusqu'à présent. Elle ne compare pas uniquement des méthodes d'étalonnages entre elles, mais cette expérience modifie les paramètres d'un étalonnage (nombre de mesures, taille du volume, distribution des mesures) jusqu'à ce que les limites des méthodes d'étalonnage soient observées.

Dans la première partie de cette section, l'enregistrement de validation ne contient pas de mesures filtrées, mis à part les mesures situées à moins de 30 cm au-dessus du tapis roulant qui ont été supprimées. Dans l'ensemble, lorsque la taille du volume d'étalonnage est supérieure à la taille du volume de validation, il n'y a pas, quant à nous, davantage à utiliser deux polynômes plutôt qu'un seul. Dans ce dernier cas, la valeur moyenne de l'erreur est dans les limites de la précision de l'appareil de mesure.

Lorsque la taille du volume d'étalonnage est inférieure à la taille du volume de validation, il y a un avantage à utiliser deux polynômes plutôt qu'un seul. En effet, lorsqu'un seul polynôme est utilisé avec la méthode de correction, il y a une dégradation notable de la correction de l'erreur moyenne en rotation ainsi qu'une faible diminution de la variabilité de l'erreur de mesure. Pour ce qui est de l'erreur en translation, même s'il y a une réduction de l'erreur moyenne, la variabilité de l'erreur augmente au-delà des valeurs initiales, et ce, avec les trois approches.

Lorsque la taille du volume d'étalonnage est de même taille que le volume de validation, l'utilisation de plusieurs polynômes a un effet positif sur la performance de la méthode. L'augmentation de la variabilité de l'erreur de mesure en translation est toujours observée, mais elle est diminuée lorsque deux polynômes sont utilisés avec des mesures hétérogènes (3^{ième} approche). Il n'y a plus de différences notables pour ce qui est de la réduction de l'erreur moyenne en rotation, mais la variabilité de cette erreur demeure plus importante lorsqu'un seul polynôme est utilisé.

Pour terminer l'analyse de la robustesse de la méthode, nous avons cherché à savoir jusqu'à quelle distance de l'émetteur les coefficients optimaux calculés précédemment pouvaient être utilisés pour réduire l'erreur de mesure. Lorsque deux polynômes sont utilisés, l'utilisation des capteurs Fastrak peut se faire à des distances très éloignées de l'émetteur et ils réduisent plus efficacement la variabilité de l'erreur de mesure. Selon la précision recherchée, une erreur en translation inférieure à 10 mm en translation et de 1° en rotation peut être obtenue à des distances de 115 cm de l'émetteur avec les trois approches. Ceci est valide si les mesures sont filtrées de manière à conserver uniquement les mesures dont l'erreur de mesure est inférieure à 10 mm en translation et 10° en rotation. Nous avons par contre remarqué des problèmes aux frontières du volume de validation à partir de 115 cm de l'émetteur pour le type de filtrage 10 mm et 10°.

CHAPITRE 6

RECOMMANDATION ET LIMITATION

Nous avons noté que lorsque le niveau de distorsion est élevé sur les mesures, l'utilisation de plusieurs polynômes procurait les meilleurs résultats pour minimiser l'erreur de mesures. Il s'agit donc de notre recommandation pour utiliser la méthode LIO. Cependant, l'utilisation de deux polynômes rend la méthode plus complexe à utiliser. Par exemple, des essais de validation doivent être réalisés pour détecter la distance optimale du rayon d'action du volume proximal. Cela peut être difficile à effectuer pour ceux qui ne sont pas familiers à utiliser notre méthode et nos outils d'analyse. En vérité, il y a même un risque d'augmenter l'erreur de mesure si cette précaution n'est pas suivie. Il n'est pas sans rappeler le principe de base de la méthode de correction, qui consiste à minimiser l'erreur de mesures globale selon un modèle basé sur la distance entre quatre capteurs. Si pour une raison ou une autre, l'objet de calibrage venait à enregistrer des mesures de part et d'autre de la frontière entre les deux volumes servant aux calculs des coefficients des polynômes, ces mesures seraient exclues lors de la création des polynômes. Il faudrait donc apporter des modifications de degré logicielle à notre méthode pour considérer ce cas de figure. Les changements apportés consisteraient à prendre en considération les positions où l'objet de calibrage est présent dans les deux zones durant l'étalonnage. Par la suite, il faudrait déterminer dans laquelle des deux zones les mesures en cette position permettraient de minimiser au maximum l'erreur de mesures globale. Une autre manière de faire consisterait à ce qu'en aucun cas, l'objet de calibrage ne franchisse plus d'une zone durant l'étalonnage. Pour des résultats rapides et simples, mais moins efficaces, l'utilisation d'un seul polynôme peut suffire à corriger efficacement des données. Dans ce cas, les mesures situées jusqu'à environ 115 cm de l'émetteur pourront être corrigées, surtout en rotation où l'erreur de mesure atteint 1° seulement.

D'autre part, la méthode de correction LIO demeure efficace dans les limites d'utilisation de l'appareil de mesure. Au delà d'un rayon d'action de 75 cm, l'utilisateur court le risque de

mesurer une valeur dont l'erreur, trop élevée, risque de faire diverger les résultats de la méthode de correction. Cette limite dépend de l'environnement d'utilisation de l'appareil de mesure. Cependant, pour de meilleurs résultats, l'utilisateur pourra opter pour une méthode de filtrage des mesures afin de conserver les mesures dont l'erreur n'excède pas 10 ± 10 mm en translation et $10 \pm 10^\circ$ en rotation. Avec ce type de filtrage, même des mesures situées à 115 cm de l'émetteur pourront être corrigées, et même plus loin encore si l'utilisateur choisi d'utiliser deux polynômes. Les mesures restantes après le filtrage seront utilisées pour calculer les coefficients. Malgré nos efforts, les mesures situées à moins de 30 cm au-dessus du tapis roulant n'ont pas pu être corrigées faute d'une distorsion électromagnétique trop élevée.

Il est à noter que l'erreur de mesure la plus faible a été mesurée en rotation ($0,35^\circ \pm 0,23^\circ$) lors d'un sur étalonnage. Par contre, dans ce cas, l'erreur en translation moyenne était de 2,5 mm $\pm$ 1,9 mm. Ceci laisse supposer que le type de polynôme utilisé dans la méthode LIO est plus adapté à la correction des mesures en rotation. Des expériences supplémentaires pourraient analyser l'effet de le degré du polynôme d'interpolation à la manière de Bryson (1992) sur l'erreur de mesure. Le volume d'étalonnage et la densité de mesure seraient les mêmes que dans cette étude soit de $0,458 \text{ m}^3$ et de 23 062 mesures/ m^3 . Il faudrait démontrer par exemple que le degré du polynôme à utiliser est soit dépendant ou indépendant de la grandeur de l'erreur de mesure, de la distance entre les mesures et l'émetteur ou encore de l'homogénéité des mesures.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons établi un cadre d'utilisation d'une méthode de correction de l'erreur de mesure en position et en orientation qui s'avère rapide, efficace et peu coûteuse. Elle permet aussi de caractériser la distorsion électromagnétique qui perturbe la distance mesurée entre une paire de capteurs Fastrak.

Nous avons noté que le modèle mathématique utilisé n'était pas le seul critère qui influençait la performance de la méthode de correction. Désormais nous savons que les mesures utilisées pour calculer les coefficients des polynômes d'interpolation jouent un rôle crucial dans la qualité de la réduction des erreurs. C'est pourquoi nous avons réservé une grande importance au filtrage des mesures excessivement bruitées qui sont situées près du tapis roulant ou encore les mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'étalonnage. À la suite de ces constatations, il apparaît qu'il existe un nombre optimal de mesure étalon à enregistrer pour diminuer au maximum l'erreur de mesure. Même lorsque le nombre de mesures étalons est optimal, l'effet des distorsions causées par les capteurs Fastrak lorsqu'ils ne sont pas suffisamment espacés ne peut pas être compensé. C'est pourquoi nous avons opté pour la fabrication d'un objet de calibrage dont les capteurs sont espacés de 20 cm. De toutes ces considérations, il ressort que l'utilisation de 12 polynômes (deux ensembles de six polynômes) permettent d'étendre la portée d'utilisation (suggéré par le fabricant) de l'appareil de mesures Fastrak tout en conservant un niveau d'erreur jugé acceptable par l'utilisateur.

ANNEXE I

EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES D'UN MONITEUR CATHODIQUE SUR LA PRÉCISION DE LA MESURE

Pour vérifier l'effet des interférences produites par les écrans cathodiques, Nixon et al. (1998) ont espacé, à distance fixe de 600 mm (figure A-5), un émetteur et un capteur (système de mesures AC). Un moniteur cathodique a été déplacé à différents endroits sur une ligne perpendiculaire à l'axe émetteur-capteur, l'écran du moniteur faisant toujours face au capteur. La figure A-5 représente le montage utilisé durant l'expérience. Le bloc T représente l'émetteur et le bloc R le capteur.

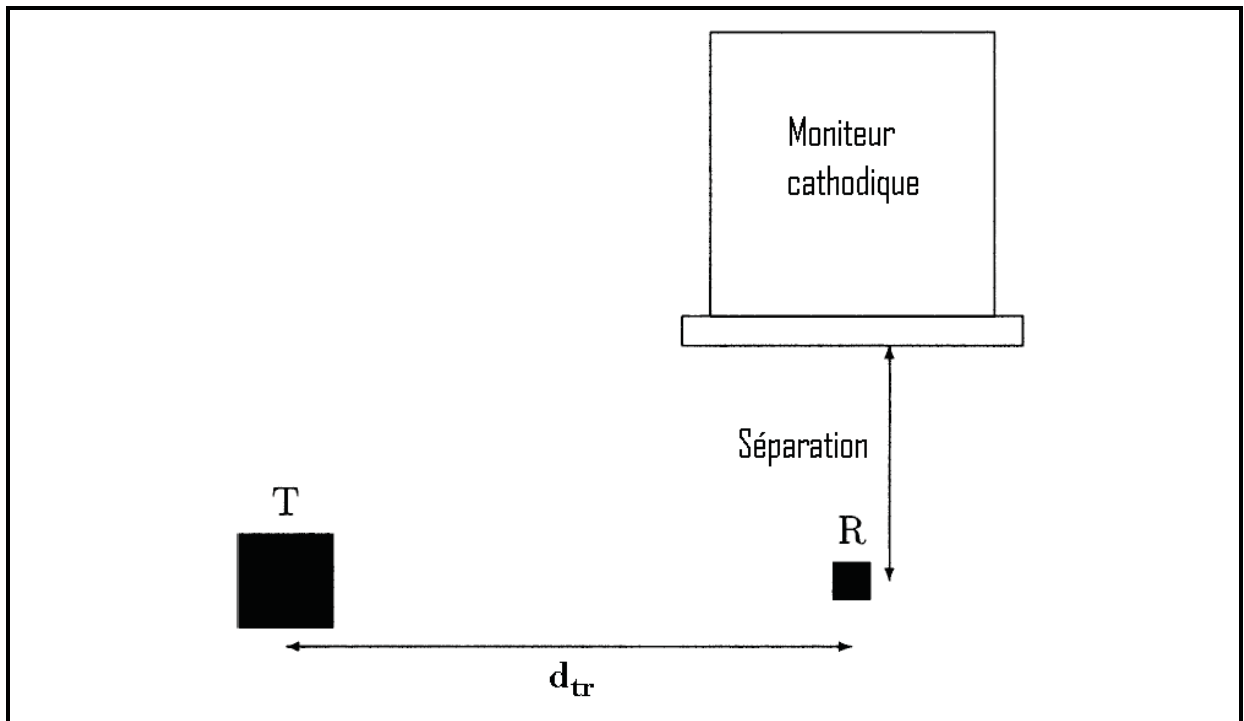


Figure 1 Schéma du montage pour vérifier l'effet des interférences produit par un écran cathodique (Tiré de Nixon et al. 1998).

Lorsque l'échantillonnage des mesures s'effectue à la fréquence du moniteur (70 kHz), les interférences induites par ce dernier sont réduites au niveau de bruit ambiant pour toutes les distances de séparation testées (de 25 mm à 800 mm). Le niveau de bruit ambiant peut être observé en calculant l'écart-type de la mesure. Lorsque la fréquence d'échantillonnage est adaptée au double de la fréquence du réseau électrique (120 kHz), une séparation **dtr** de 800 mm est nécessaire pour réduire le niveau de bruit au niveau ambiant. L'erreur de position est supérieure à 0,5 mm lorsque la distance de séparation **dtr** est inférieure à 200 mm.

ANNEXE II

EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DUES AU CORDON D'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE D'UN CAPTEUR FASTRAK

Pour vérifier l'erreur de mesure d'un capteur à proximité de l'émetteur ou d'un autre capteur, Nixon et al. (1998) ont mesuré l'erreur des coordonnées de position r et l'erreur sur le pointeur p . Dans un premier temps, des mesures ont été prises lorsque le cordon d'alimentation du capteur était enroulé (un seul tour) autour du capteur. Dans un second temps, des mesures ont été prises lorsque le cordon d'alimentation de l'émetteur était enroulé (un seul tour) autour de l'émetteur. Dans les deux cas, la distance de séparation d_{tr} était augmentée jusqu'à ce que le niveau de bruit ambiant ait été atteint. Des erreurs pouvant atteindre jusqu'à 500 mm ont été observées lorsque le cordon d'alimentation du capteur était enroulé autour du capteur. Une distance minimale d_{tr} de 400 mm doit être respectée pour atteindre un niveau de bruit ambiant. Dans la seconde manipulation, des erreurs supérieures à 30 mm ont été observées. Hummel et al. (2005) ont noté pour leur part que le système de mesure AC (Aurora) est moins soumis aux distorsions qu'un système de mesures DC (microBird) lorsque le récepteur est placé près de l'émetteur. Les figures A.6 et A.7 montrent l'effet de la distorsion du capteur en fonction de la distance qui le sépare de l'émetteur.

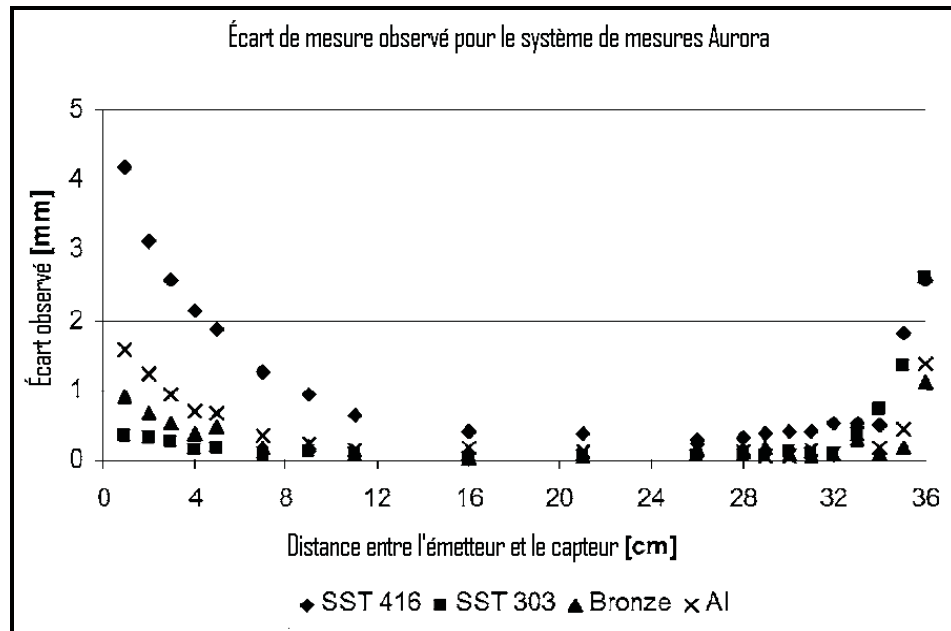


Figure 2 Erreur de mesure pour le système AC.
(Tiré de Hummel et al. (2005)).

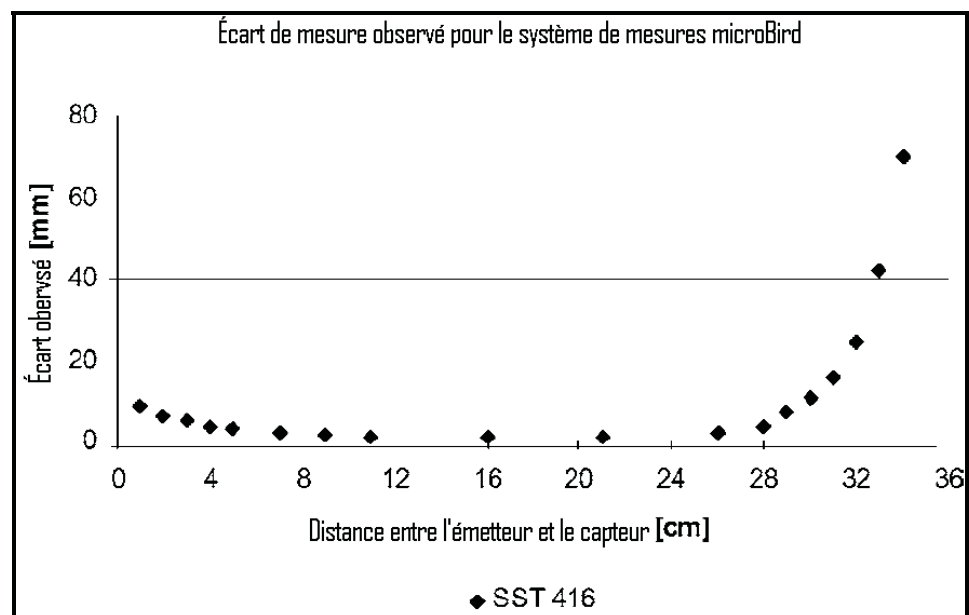


Figure 3 Erreur de mesure pour le système DC.
(Tiré de Hummel et al. (2005)).

ANNEXE III

ERREUR DE MESURE EN POSITION ET EN ORIENTATION EN PRÉSENCE DE DIFFÉRENTS MÉTAUX

(1) Fastrak, (2) Ascension Flock of Birds, (3) Aurora, (4) 3Space, (5) Isotrak II

*Dérivé de l'algèbre de quaternion

Tableau 1 Erreur de mesure en position et en orientation en présence de différents métaux

Auteurs	Caractéristiques des erreurs de mesure			
	Distances	Type de métaux	Erreur de position (mm)	Erreur d'orientation (degré)
Milne et al. (1996) (2)	dtr = 46 cm, dtm = 23 cm, dmr = 23 cm. Fs = 103 kHz	Aluminium (6061)	< 0,25	N/D
		Cobalt-chrome (Co-Cr-Mo)	< 0,25	N/D
		Acier à faible teneur en carbone (1018)	~ 9,5	N/D
		Acier inoxydable (316 L)	< 0,25	N/D
		Titanium (Ti-4A1-6V)	< 0,25	N/D
McGill et al. (1997) (4)	dtr = ~40 cm, Fs = N/D	Acier ferreux	N/D	9.49* pour dtm = 10 cm, dmr = 30 cm.
				3,35* pour dtm = 40 cm, dmr = 0 cm.

**Tableau 2 Erreur de mesure en position et en orientation
en présence de différents métaux (suite)**

Auteurs	Caractéristiques des erreurs de mesure			
	Distances	Type de métaux	Erreur de position (mm)	Erreur en orientation (degré)
Birkfellner et al. (1998) (5)	dtr = 35,5–37,5 cm, dtm = 30 cm, dmr = cm. Fs = N/D	Cuivre Acier Aluminium	~7 ~ 3,5 ~ 3,5	~ 3 ~ 1 ~ 2,5
Nixon et al. (1998) (1)	dtr = 60 cm, dtm = 10 cm, dmr = 50 cm. Fs = 120 kHz	Acier doux Ferrite Cuivre Laiton Aluminium Acier inoxydable 316	0,3 1,8 1,2 1,2 1,2 0,8	N/D N/D N/D N/D N/D N/D
LaScalza et al. (2003) (2)	dtr moyen = 41 cm, dtm moyen = 26 dmr = 15. Fs = 144 kHz	Acier ASTM A-513	~ 32,7	N/D
		Aluminium 6061 T6	~ 24,9	N/D
Chung et al. (2004) (3)	dtr = ~ 36 dtm = N/D dmr = N/D Fs = N/D	Acier	~ 5,5	~ 4,58
Hummel et al. (2005) (3)	dtr = 36 cm, dtm = 36 cm, dmr = N/D Fs = 144 Hz	Acier SST 303	~ 2,5	N/D
		Acier SST 416	~ 2,5	N/D
		Bronze	~ 1	N/D

ANNEXE IV

FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL DE MESURE FASTRAK

Le système de mesures électromagnétique Fastrak comprend trois antennes mutuellement orthogonales qui émettent des ondes électromagnétiques vers trois autres antennes mutuellement orthogonales. Les antennes sont ensuite placées à l'intérieur d'un émetteur et d'un capteur qui sont tous les deux reliés à un système de contrôle. Les ondes électromagnétiques transmises incluent l'information caractéristique de la phase de l'onde électromagnétique. La mesure des trois signaux reçus par les trois antennes mutuellement orthogonales produit neuf paramètres (figure A-1). Les paramètres sont l'ensemble des combinaisons possibles des puissances relatives émises par une antenne (P_{X-Y-Z}) et captées par une antenne réceptrice (P_{U-V-W}).

$P_{Z/U}$	$P_{Z/V}$	$P_{Z/W}$
$P_{Y/U}$	$P_{Y/V}$	$P_{Y/W}$
$P_{X/U}$	$P_{X/V}$	$P_{X/W}$

Figure 4 Paramètres des puissances relatives entre un émetteur et une antenne réceptrice.

Un seul paramètre de position ou d'orientation est nécessaire pour déterminer la position et l'orientation des antennes réceptrices par rapport aux antennes émettrices.

Le champ magnétique utilisé pour transmettre les ondes est créé par la production d'un flux d'induction magnétique dans un circuit magnétique (antenne ou bobine) au moyen d'un courant électrique. Le champ produit peut être séparé en deux composantes, le champ proche

et le champ lointain, qui se distinguent selon leur atténuation en fonction de la distance « ρ » (figure A-2). L'amplitude « H » du champ proche décroît en fonction du cube de la distance.

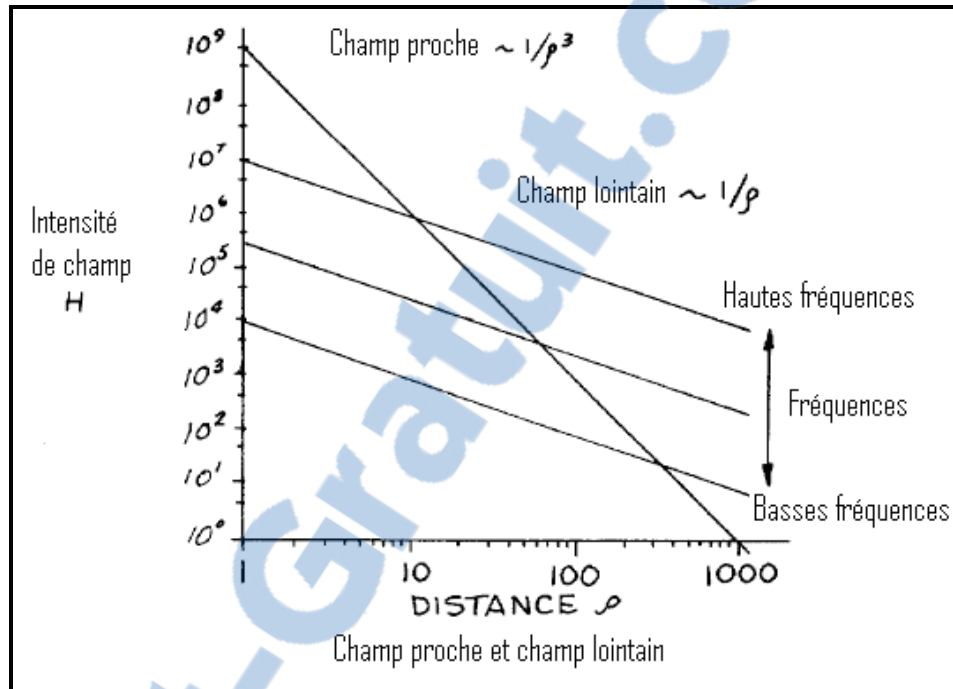


Figure 5 Intensité des champs proche et lointain en fonction de la distance. (Tiré de Raab et al. (1979)).

Le champ proche peut être représenté par des basses fréquences qui ont la particularité de pouvoir pénétrer plusieurs types de matériaux. Dans le vide, un champ magnétique à basse fréquence est conforme à la théorie des dipôles magnétiques. Cependant, des distorsions du champ magnétique peuvent être provoquées par des objets placés dans leurs rayons d'action.

Les équations du champ proche peuvent être décomposées en termes relativement simples de composantes radiales et tangentielles. La distance peut être exprimée par différentes équations (A.1) :

$$C(p) = \left(\frac{N \cdot I \cdot a^2}{2 \cdot \rho^3} \right) = \frac{M}{\rho^3} \quad (1)$$

Où « N » est le nombre de tours de la bobine (antenne), « I » est le courant en ampère dans la bobine, « a » est le rayon de la bobine en mètre, « ρ » est la distance entre deux points à partir du centre de la boucle et « M » est le moment magnétique de la source et de l'antenne. Les composantes radiales et tangentielles du champ électromagnétique (figure A-3) peuvent être représentées par (A.2 et A.3) :

$$H_r = C(\rho) \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

$$H_t = \frac{1}{2} \cdot C(\rho) \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3)$$

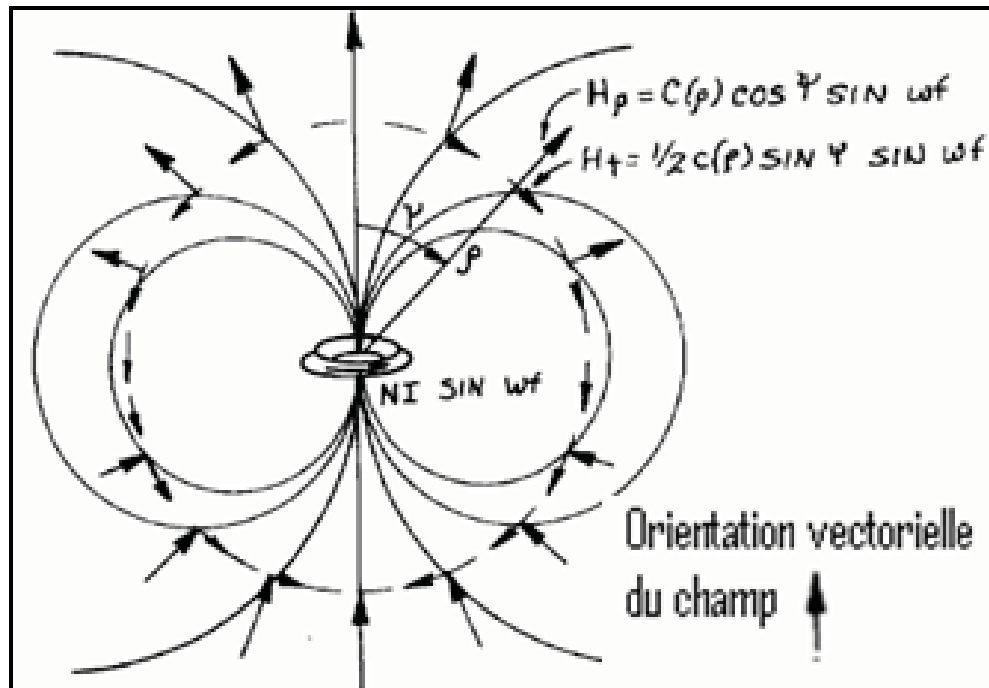


Figure 6 Composantes radiales et tangentielles d'un champ électromagnétique. (Tiré de Raab et al. (1979)).

L'angle d'orientation « ψ » peut être écrit en termes de coordonnées rectangulaires (X, Y, Z) normalisées par la distance « ρ » (équations A.4-A.5).

$$\boxed{\cos(\psi_z) = \frac{z}{\rho}} \quad (4)$$

$$\boxed{\sin(\psi_z) = \sqrt{x^2 + \frac{y^2}{\rho^2}}} \quad (5)$$

La puissance du signal selon l'axe Z est décrite par les équations A.6-A.8 suivantes :

$$\boxed{P_z = \frac{1}{2}C(\rho)^2 \left(\frac{1}{2} \sin(\psi_z)^2 + \cos(\psi_z)^2 \right) = \frac{1}{2}C(\rho)^2 \left[\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{x}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{y}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{z}{\rho} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

$$\boxed{P_x = \frac{1}{2}C(\rho)^2 \left[\left(\frac{x}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{y}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{z}{\rho} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

$$\boxed{P_z = \frac{1}{2}C(\rho)^2 \left[\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{x}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{y}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{z}{\rho} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

Les mesures de puissance sont ainsi liées directement à un système de trois équations avec trois inconnues. La puissance reçue par l'une des trois antennes de transmission est distribuée parmi les trois antennes de réception (équation A.9).

$$\boxed{P_z = P_{z/u} + P_{z/v} + P_{z/w}} \quad (9)$$

À l'équation A.9, les trois quantités du côté droit représentent la mesure de puissance de chacune des trois antennes de réception.

La relation (en fonction de l'orientation) des neuf signaux reçus en X, Y, Z à un point dans l'espace peut être décrite en termes de trois équations de matrice, chacune utilisant les mêmes trois rotations. Les valeurs connues sont les champs prévus en X, Y, Z et les champs mesurés en U, V et W.

ANNEXE V

ROBUSTESSE ET LIMITE DE LA MÉTHODE DE CORRECTION : PERFORMANCE EN FONCTION DE LA TAILLE DU VOLUME DE VALIDATION

Tableau 3 Erreurs de translation et de rotation obtenues sur des enregistrements de validation filtrés avant et après correction (1^{ère} partie)

Erreur de mesures et rayon équivalent	Erreur avant correction	Type d'approche	Erreur après correction
10 mm / 10 °, 115 cm	Erreur en translation : 6,6 +/- 3,4 (mm)	Un polynôme	Erreur en translation : 4,6 +/- 3,3 (mm)
			Erreur en rotation 0,49 +/- 0,46 (deg)
	Erreur en rotation : 1,5 +/- 0,73 (deg)	Deux polynômes et dans un environnement homogène	Erreur en translation : 4,4 +/- 3,4 (mm)
			Erreur en rotation : 0,38 +/- 0,28 (deg)
		Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	Erreur en translation : 4,3 +/- 3,3 (mm)
			Erreur en rotation : 0,39 +/- 0,35 (deg)
13 mm / 13 °, 120 cm	Erreur en translation : 8,3 +/- 4,4 (mm)	Un polynôme	Erreur en translation : 6,5 +/- 5,9 (mm)
			Erreur en rotation : 0,67 +/- 0,74 (deg)
	Erreur en rotation : 1,76 +/- 0,90 (deg)	Deux polynômes et dans un environnement homogène	Erreur en translation : 6,4 +/- 5,6 (mm)
			Erreur en rotation : 0,49 +/- 0,42 (deg)
		Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	Erreur en translation : 6,2 +/- 5,5 (mm)
			Erreur en rotation : 0,51 +/- 0,49 (deg)

Tableau 4 Erreurs de translation et de rotation obtenues sur des enregistrements de validation filtrés avant et après correction (2^{ème} partie)

16 mm / 16 °, 125 cm	Erreur en translation : 10 +/- 5,5 (mm) Erreur en rotation : 2 +/- 1,1 (deg)	Un polynôme	Erreur en translation : 9,8 +/- 10 (mm)
			Erreur en rotation : 0,96 +/- 1 (deg)
		Deux polynômes et dans un environnement homogène	Erreur en translation : 9,3 +/- 8,5 (mm)
			Erreur en rotation : 0,73 +/- 0,71 (deg)
		Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	Erreur en translation : 9 +/- 8,3 (mm)
			Erreur en rotation : 0,74 +/- 0,75 (deg)
20 mm / 20 °, 140 cm	Erreur en translation : 12,1 +/- 6,7 (mm) Erreur en rotation : 3,3 +/- 1,3 (deg)	Un polynôme	Erreur en translation : 17,2 +/- 22,5 (mm)
			Erreur en rotation : 1,41 +/- 1,51 (deg)
		Deux polynômes et dans un environnement homogène	Erreur en translation : 14 +/- 14,9 (mm)
			Erreur en rotation : 1,13 +/- 1,17 (deg)
		Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	Erreur en translation : 13,6 +/- 14,5 (mm)
			Erreur en rotation : 1,14 +/- 1,19 (deg)

Tableau 5 Erreurs de translation et de rotation obtenues sur des enregistrements de validation filtrés avant et après correction (3^{ème} partie)

Aucun filtrage, sauf tapis, 180 cm	Erreur en translation : 20,6 +/- 26 (mm) Erreur en rotation : 3,66 +/- 2,39 (deg)	Un polynôme	Erreur en translation : Pas de correction
			Erreur en rotation : Pas de correction
		Deux polynômes et dans un environnement homogène	Erreur en translation : Pas de correction
			Erreur en rotation : Pas de correction
		Deux polynôme et dans un environnement hétérogène	Erreur en translation : Pas de correction
			Erreur en rotation : Pas de correction

ANNEXE VI

ÉTUDE SUR L'EFFET DES MESURES ABERRANTES SUR LA MÉTHODE DE CORRECTION

Introduction

L'annexe VI présente une brève étude qui met en relation l'effet négatif des mesures aberrantes sur la méthode de correction. Dans cette étude, le seuil de détermination des mesures aberrantes est analysé de trois manières. Le premier seuil inclut les mesures dont l'erreur de translation et de rotation entre les capteurs de l'objet de calibrage sont supérieures à la moyenne de l'erreur additionnée de l'écart type. Par exemple, si l'erreur de translation moyenne de toutes les mesures de l'enregistrement est de 10 +/- 5 mm et que l'erreur d'orientation est de 2 +/- 1 degré, toutes les mesures dont l'erreur est supérieure à 15 mm et à 3 degrés seront considérées comme des mesures aberrantes. La seconde méthode inclut les mesures dont l'erreur de translation et de rotation sont inférieures à 10 mm et à 10 degrés. La dernière méthode inclut les mesures dont l'erreur de translation et de rotation sont inférieures à 5 mm et à 5 degrés. Dans cet exemple, la configuration des capteurs Fastrak à 20 cm avec les repères visuels est utilisée. Les résultats seront présentés sous la forme de tableaux et figures.

L'objectif de cette section est d'identifier le meilleur seuil de détermination des mesures aberrantes, de localiser les mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'analyse, et de les supprimer de l'enregistrement. Le but est de démontrer que la méthode de correction ne peut pas réduire l'erreur de mesures lorsque celle-ci elle est très grande initialement.

Méthode

Pour illustrer la localisation des mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'acquisition, l'ensemble des mesures Vicon est transposé dans un système de coordonnées à trois dimensions. L'enregistrement choisi contient initialement un maximum de mesures et couvre

un maximum de volume au-dessus du tapis roulant. Les marqueurs Vicon et Fastrak ont été initialement transposés les uns sur les autres de manière à ce qu'ils soient physiquement localisés aux mêmes endroits sur l'objet de calibrage. Pour rappel, le système de mesure Vicon est considéré exact, tandis que le système de mesure Fastrak est très sensible aux distorsions électromagnétiques.

Dans un premier temps, une première série de figures sera présentée pour mettre en évidence la localisation des mesures à l'intérieur du volume d'analyse. Seule la représentation des erreurs en translation a été retenue. La représentation des erreurs en rotation aurait permis d'aboutir aux mêmes conclusions. La méthode de correction LIO sera appliquée sur l'enregistrement avec les mesures aberrantes, sans les mesures aberrantes et sur les mesures aberrantes uniquement. Pour terminer, les séries de coefficients seront appliqués sur des enregistrements de validation. Le tableau A.2 caractérise les six enregistrements utilisés pour l'étalonnage. Deux enregistrements de validation seront utilisés pour valider les coefficients de correction calculés par la méthode LIO. Les caractéristiques des enregistrements de correction sont présentées au tableau A.3.

Tableau 6 Caractéristiques des mesures utilisées pour le calcul des coefficients de correction

Scénario de filtrage des mesures aberrantes	Caractéristique du volume d'acquisition	Nombre de mesures utilisées pour le calcul des coefficients
1 - Avec mesures aberrantes	L'ensemble du volume d'acquisition	122 123
2- Sans mesures aberrantes	Excluant les mesures dont l'erreur moyenne est supérieure à 174,2 mm et 22,7 degrés	117 440
3 - Volume idéal 1	Idéal (distance max = 75 cm, 30 cm au-dessus du tapis)	20 025
4 - Volume idéal 2	Idéal (distance max = 75 cm, 30 cm au-dessus du tapis)	3 801
5 - Seuil 10 mm et 10 degrés	Excluant les mesures dont l'erreur moyenne est supérieure à 10 mm et 10 degrés	16 576
6 - Seuil 5 mm et 5 degrés	Excluant les mesures dont l'erreur moyenne est supérieure à 5 mm et 5 degrés	4 683

Tableau 7 Caractéristiques des enregistrements de validation

	Type d'acquisition	Caractéristique du volume d'acquisition	Nombre de mesures utilisées pour le calcul des coefficients
Enregistrement A	Avec repères visuels	Excluant les mesures à moins de 30 cm au-dessus du tapis	8251
Enregistrement B	Avec repères visuels	Idéal (distance max = 75 cm, 30 cm au-dessus du tapis)	2663

Résultats

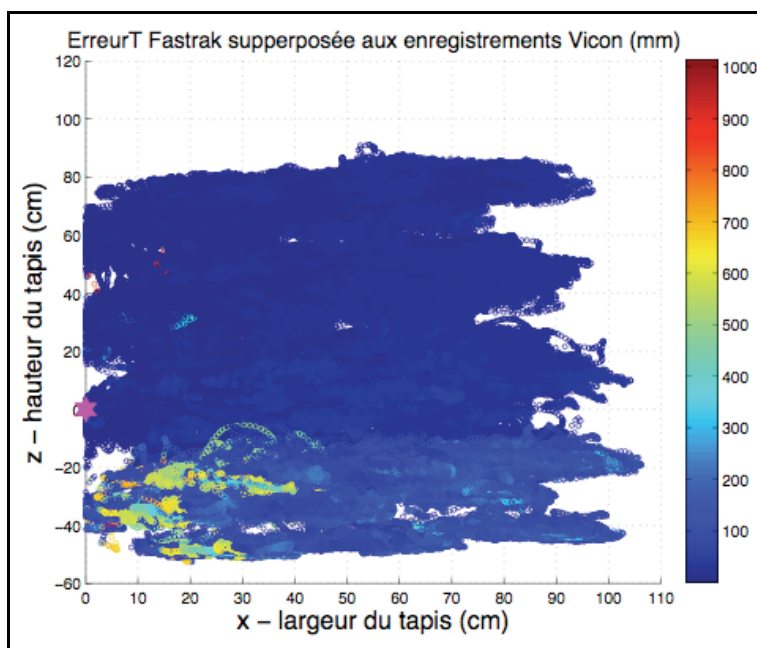


Figure 7 Vue de l'ensemble des mesures étalons par rapport au plan frontal du sujet placé sur le tapis roulant.

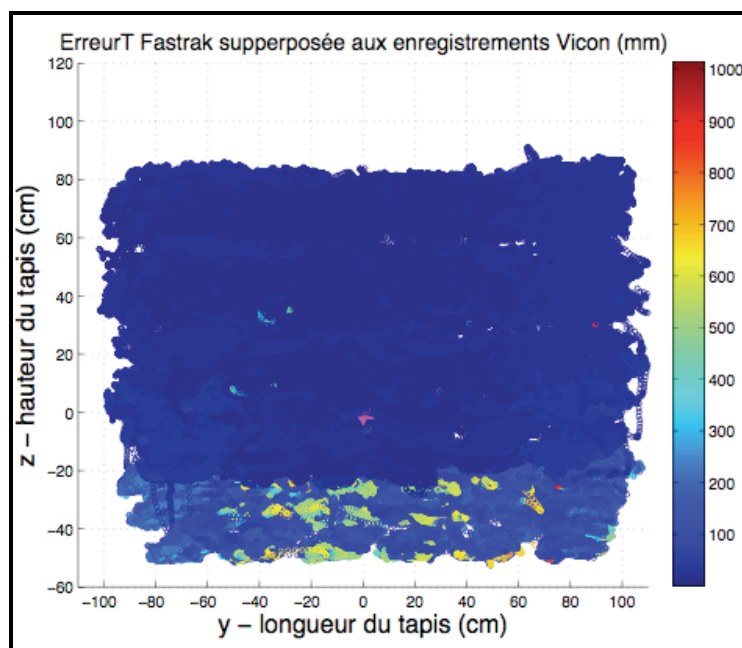


Figure 8 Vue de l'ensemble des mesures étalons par rapport au plan latéral du sujet placé sur le tapis roulant.

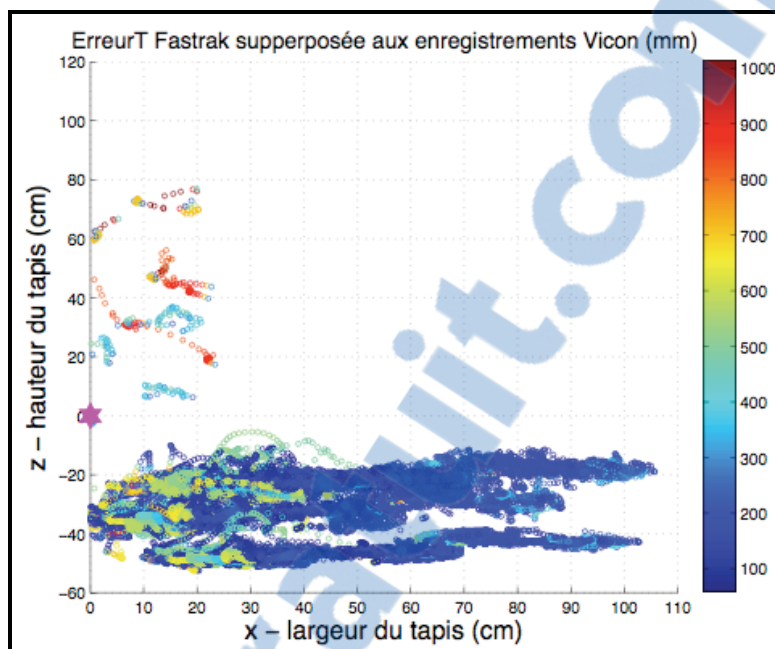


Figure 9 Vue des mesures aberrantes, déterminées selon la moyenne et l'écart-type de l'ensemble des mesures, dans le plan frontal du sujet placé sur le tapis roulant.

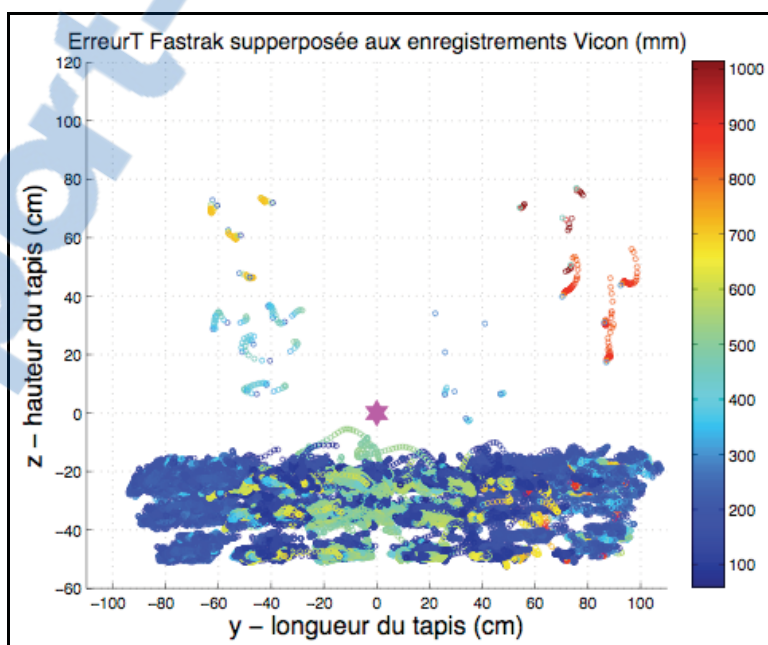


Figure 10 Vue des mesures aberrantes, déterminées selon la moyenne et l'écart-type de l'ensemble des mesures, dans le plan latéral du sujet placé sur le tapis roulant.

Tableau 8 Erreur en translation et de rotation entre les capteurs Fastrack, après l'application des coefficients de correction sur les enregistrements de validation

Scénario de filtrage	Enregistrement de validation A		Enregistrement de validation A	
	Erreur de translation (mm)		Erreur de rotation (degré)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Erreur initiale	14,1	11,4	2,55	1,98
1 - Avec mesures aberrantes	14,11	11,4	2,55	1,98
2 - Sans mesures aberrantes	19,2	8,9	1,82	1,12
3 - Volume idéal 1	20,8	24,3	1,68	1,74
4 - Volume idéal 2	22,1	26,1	1,81	1,95
5 - Seuil 10 mm et 10 degrés	16,4	21,9	1,39	2,34
6 - Seuil 5 mm et 5 degrés	69,2	103,8	2,5	3,28

Tableau 9 Erreur en translation et de rotation entre les capteurs Fastrack, après l'application des coefficients de correction sur les enregistrements de validation B

Scénario de filtrage	Enregistrement de validation B		Enregistrement de validation B	
	Erreur de translation (mm)		Erreur de rotation (degré)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Erreur initiale	6,3	3,4	1,47	0,84
1 - Avec mesures aberrantes	6,3	3,4	1,47	0,84
2 - Sans mesures aberrantes	14,5	5,9	1,48	0,69
3 - Volume idéal 1	4,9	2,6	0,43	0,24
4 - Volume idéal 2	4,9	2,6	0,44	0,25
5 - Seuil 10 mm et 10 degrés	4,1	2,5	0,32	0,23
6 - Seuil 5 mm et 5 degrés	4,9	3,2	0,40	0,32

Discussion

Premièrement, la représentation de l'erreur de mesure dans un environnement à trois dimensions permet de distinguer les variations de l'erreur de mesure en fonction de la position des capteurs Fastrak. Cette méthode permet d'observer si l'erreur de mesures varie en fonction de la distance qui sépare les capteurs de l'émetteur Fastrak, ou encore, si l'erreur est plus grande lorsque les capteurs Fastrak se situent près du tapis roulant. Les figures A-8 à A-11 montrent que les erreurs de translation et de rotation sont plus élevées près du tapis roulant. Les 30 premiers centimètres au-dessus du tapis roulant contiennent la grande majorité des mesures aberrantes, soit près de 1 % des mesures totales (11 794 mesures aberrantes sur un total de 122 123 mesures). Ces mesures sont entre autres localisées près de l'émetteur (figures A-10 et A-11). Cette zone, sous le tapis roulant, contient des pièces d'équipement particulièrement ferromagnétiques, qui ne se retrouvent pas ailleurs sous le tapis. De plus, la valeur des erreurs de translation n'est pas plus importante que la valeur des erreurs de rotation (figure A-12).

Les erreurs de translation et d'orientation sont globalement similaires lorsqu'elles sont analysées sur l'ensemble des mesures du volume d'étalonnage. L'erreur de translation maximum est de 1015 mm par rapport à 0,8 mm qui est la précision de l'appareil Fastrak pour les mesures de la position. De la même manière, l'erreur de rotation maximum est de $187,6^\circ$ par rapport à $0,15^\circ$ qui est la précision de l'appareil Fastrak pour les mesures de l'orientation. Le rapport de l'erreur de translation maximum sur la précision en position est de 1 269 tandis que le rapport de l'erreur de rotation maximum sur la précision en orientation est de 1 251.

Les tableaux A.4 et A.5 montrent l'erreur de translation et de rotation entre les capteurs avant et après l'application de la méthode de correction LIO. On note que les mesures aberrantes du scénario 1 ne peuvent pas être corrigées. Plus particulièrement, lors de l'application de la méthode de correction sur ces mesures, l'erreur de mesure augmente plutôt que de diminuer. Il en va de même lorsque la méthode de correction est appliquée sur

l'ensemble des mesures incluant les mesures aberrantes. Dans ces deux cas, la méthode de correction LIO fait diverger l'ensemble des coefficients à minimiser. Cependant, lorsque la méthode de correction est appliquée uniquement sur les mesures excluant les mesures aberrantes (scénario 2 à 6), l'erreur de mesure peut être diminuée. Parmi les différents scénarios analysés, on note qu'un compromis doit être effectué entre le nombre de mesures totales utilisées dans le calcul des coefficients de correction et le potentiel de minimisation des coefficients de correction. Le tableau A.6 résume les avantages et les inconvénients entre les différents scénarios de filtrage des mesures aberrantes étudiées.

Tableau 10 Résumé des avantages et des inconvénients des six méthodes de filtrages des mesures aberrantes

Scénario	Avantages	Inconvénients
1 - Contient les mesures aberrantes	Aucun	Englobe des mesures dont les erreurs en translation et rotation sont trop grandes pour être minimisées.
2 - Ne contient pas les mesures aberrantes	Englobe un maximum de mesures étalons, y compris celles loin de l'émetteur.	Faible potentiel de correction des erreurs de mesures.
3 - Volume idéal 1 (beaucoup de mesures)	Bon potentiel de correction des erreurs de mesures. Englobe relativement beaucoup de mesures étalons.	La distance moyenne entre les mesures enregistrées et l'émetteur est deux fois plus petite que pour le scénario 2. Ne filtre pas les mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'étalonnage.
4 - Volume idéal 1 (peu de mesures)	Bon potentiel de correction des erreurs de mesures.	La distance moyenne entre les mesures enregistrées et l'émetteur est deux fois plus petite que pour le scénario 2. Ne filtre pas les mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'étalonnage. Englobe peu de mesures étalons.
5 - Excluant les mesures dont l'erreur moyenne est supérieure à 10 mm et 10 degrés	Meilleur potentiel de correction des erreurs de mesures. Filtre l'ensemble des mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'étalonnage.	La distance moyenne entre les mesures enregistrées et l'émetteur est la plus faible de tous les scénarios. Englobe peu de mesures étalons.
6 - Excluant les mesures dont l'erreur moyenne est supérieure à 5 mm et 5 degrés	Meilleur potentiel de correction des erreurs de mesures. Filtre l'ensemble des mesures aberrantes à l'intérieur du volume d'étalonnage. Englobe relativement beaucoup de mesures étalons et celles relatives loin de l'émetteur.	

Conclusion

Certaines mesures nuisent à l'application de la correction de l'erreur de mesure sur l'enregistrement « 20 cm avec repères visuels ». En fait, la méthode de correction ne parvient pas à calculer l'ensemble des coefficients des six polynômes d'interpolation nécessaires pour réduire l'erreur de mesure. Les mesures qui ont une erreur supérieure à la moyenne totale de l'enregistrement et additionnée de l'écart type ne peuvent pas être corrigées. Ces mesures sont généralement localisées à l'intérieur des 30 premiers centimètres au-dessus du tapis roulant. Dans une situation où un enregistrement doit s'effectuer relativement loin de l'émetteur, le filtrage des mesures par la méthode utilisée au scénario 2 (sans mesures aberrantes) doit être envisagé, car l'ensemble du volume d'étalonnage est couvert. Dans une situation où l'erreur de mesure doit être minimisée, le filtrage des mesures par la méthode utilisée au scénario 5 (le seuil de filtrage est 10 mm et 10° d'erreur) ou 6 (le seuil de filtrage est 10 mm et 10° d'erreur) doit être envisagé, car toutes les mesures aberrantes sont de facto supprimées du volume d'étalonnage.

BIBLIOGRAPHIE

- Birkfellner, W., F. Watzinger, et al. (1998). "Systematic distortions in magnetic position digitizers." Med Phys **25**(11): 2242-8.
- Birkfellner, W., F. Watzinger, et al. (1998). "Calibration of tracking systems in a surgical environment." IEEE Trans Med Imaging **17**(5): 737-42.
- Briggs, W. (1999). Magnetic calibration by tetrahedral interpolation, Chicago, IL, USA, ASME.
- Bryson, S. (1992). Measurement and calibration of static distortion of position data from 3D trackers, San Jose, CA, USA.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ) (2005). Office québécois de la langue française.
- Chung, A. J., P. J. Edwards, et al. (2004). Freehand cocalibration of optical and electromagnetic trackers for navigated bronchoscopy, Beijing, China, Springer-Verlag.
- Czernuszenko, M., D. J. Sandin, et al. (1998). Line of Sight Method for Tracker Calibration in Projection-Based VR Systems. Proceedings of 2nd International Immersive Projection Technology Workshop, Electronic Visualization Laboratory, University of Illinois: 1-7.
- Day, J. S., D. J. Murdoch, et al. (2000). "Calibration of position and angular data from a magnetic tracking device." J Biomech **33**(8): 1039-45.
- Ellis, S. R., B. D. Adelstein, et al. (1999). Sensor spatial distortion, visual latency, and update rate effects on 3D tracking in virtual environments, Houston, TX, USA, IEEE Comput. Soc.
- Fischer, G. S. and R. H. Taylor (2005). Electromagnetic tracker measurement error simulation and tool design, Palm Springs, CA, USA, Springer-Verlag.
- Frantz, D. D., A. D. Wiles, et al. (2003). "Accuracy assessment protocols for electromagnetic tracking systems." Phys Med Biol **48**(14): 2241-51.
- Ghazisaedy, M., D. Adamczyk, et al. (1995). Ultrasonic calibration of a magnetic tracker in a virtual reality space, Research Triangle Park, NC, USA, IEEE Comput. Soc. Press.
- Hui, Z., F. Banovac, et al. (2005). Two-stage registration for real-time deformable compensation using an electromagnetic tracking device, Palm Springs, CA, USA, Springer-Verlag.
- Hummel, J. B., M. R. Bax, et al. (2005). "Design and application of an assessment protocol for electromagnetic tracking systems." Med Phys **32**(7): 2371-9.
- Hummel, J. B., M. Figl, et al. (2006). "Evaluation of a new electromagnetic tracking system using a standardized assessment protocol." Physics in Medicine and Biology **51**(10): N205-N210.
- Ikits, M., J. D. Brederson, et al. (2001). An improved calibration framework for electromagnetic tracking devices.
- Ikits, M. and J. M. Hollerbach (1997). Kinematic calibration using a plane constraint.
- Kenwright, D. N. and D. A. Lane (1996). "Interactive time-dependent particle tracing using tetrahedral decomposition." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics **2**(2): 120-9.

- Kindratenko, V. V. (1999). "Calibration of electromagnetic tracking devices." Virtual Reality **4**(2): 139-50.
- Kindratenko, V. V. (2000). "A survey of electromagnetic position tracker calibration techniques." Virtual Reality **5**(3): 169-82.
- Kindratenko, V. V. and A. J. Bennett (2000). "Evaluation of rotation correction techniques for electromagnetic position tracking systems." Virtual Environments 2000: Proceedings of the Eurographics Workshop(Springer Computer Science Series): 13-22.
- Kindratenko, V. V. and W. R. Sherman (2005). "Neural network-based calibration of electromagnetic tracking systems." Virtual Reality **9**(1): 70-78.
- LaScalza, S., J. Arico, et al. (2003). "Effect of metal and sampling rate on accuracy of Flock of Birds electromagnetic tracking system." Journal of Biomechanics **36**(1): 141-144.
- Le grand dictionnaire terminologique (2002). Office québécois de la langue française.
- Livingston, M. A. and A. State (1997). "Magnetic Tracker Calibration for Improved Augmented Reality Registration." In Presence: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press **6**(5): 532-546.
- McGill, S. M., J. Cholewicki, et al. (1997). "Methodological considerations for using inductive sensors (3SPACE ISOTRAK) to monitor 3-D orthopaedic joint motion." Clin Biomech (Bristol, Avon) **12**(3): 190-194.
- Meskers, C. G., H. Fraterman, et al. (1999). "Calibration of the "Flock of Birds" electromagnetic tracking device and its application in shoulder motion studies." J Biomech **32**(6): 629-33.
- Milne, A. D., D. G. Chess, et al. (1996). "Accuracy of an electromagnetic tracking device: a study of the optimal operating range and metal interference." Journal of Biomechanics **29**(6): 791-3.
- Nixon, M. A., B. C. McCallum, et al. (1998). "The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers." Presence **7**(2): 204-18.
- Ochoa-Mayorga, V. M., P. Boulanger, et al. (2006). Local quaternion weighted difference functions for orientation calibration on electromagnetic trackers, Puerto Vallarta, Mexico, IEEE.
- Périé, D., A. J. Tate, et al. (2002). "Evaluation and calibration of an electromagnetic tracking device for biomechanical analysis of lifting tasks." J Biomech **35**(2): 293-7.
- Raab, F. H., E. B. Blood, et al. (1979). "Magnetic position and orientation tracking system." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. **AES-15**(no. 5): 709-718.
- Saleh, T., V. V. Kindratenko, et al. (2000). On Using Neural Networks to Calibrate Electromagnetic Tracking Systems. Technical report.
- Zachmann, G. (1997). Distortion correction of magnetic fields for position tracking, Hasselt and Diepenbeek, Belgium, IEEE Comput. Soc. Press.