

PIERRE-LUC GAGNÉ

ÉTALONNAGE D'UN SYSTÈME DE POSITIONNEMENT 3D OPTIQUE

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

*Pour votre soutien constant, merci à mes parents, à
mes amis et à Patrick.*

*« The true traditional doughnut has
the topology of a sphere. It is a matter
of taste whether one regards this as
having separate internal and external
surfaces. The important point is that
the inner space should be filled with
good raspberry jam. This is also a
matter of taste » — P.B. Fellgett*

Résumé

Ce projet se déroule dans le cadre du projet ICIS-DP (*3d Intelligent and Configurable Inspection System for Deformable Parts*) et il s'agit d'une collaboration entre Creaform inc., l'Université de l'Alberta et l'Université Laval. Le sous-objectif discuté dans ce mémoire est le système de positionnement. Le système retenu est le HiBall de la compagnie 3rdTech. Ce système fonctionne avec une caméra multivue et un ensemble de DEL disposées au plafond. Suite à une étude réalisée par Y. Martin [14] ce système ne satisfait pas les caractéristiques voulues avec une erreur maximale en position de 7 mm. Le système doit avoir une erreur maximale en position inférieure à 500 μm et à 0,1 ° en orientation. Une nouvelle procédure pour l'étalonnage des positions des DEL a donc été développée.

Cette nouvelle méthode est basée sur le « bundle adjustment », ce qui permet d'étalonner les DEL même si les poses du HiBall ne sont pas parfaitement connues. Une barre, appelée *barre de calibrage*, est utilisée afin d'ajouter davantage de contraintes au système et afin de valider l'étalonnage. Cette barre permet de déplacer le HiBall selon une translation pure de norme connue. Dans le but de mieux analyser les résultats, un simulateur a été créé. La méthode initiale a été révisée afin de diminuer davantage l'erreur maximale en position pour atteindre 1,2 mm. Il resterait une étape supplémentaire pour atteindre l'objectif.

Abstract

This project is conducted under the project ICIS-DP (3d Intelligent and Configurable Inspection System for Deformable Parts) and it is a collaboration between Creafom inc., University of Alberta and Laval University. The sub-objective discussed in this thesis is the positioning system. The system chosen is the Hiball developed by 3rd-Tech. This system operates using a multiple view camera and a set of LED arranged on the ceiling. Following a study conducted by Y. Martin [14] this system does not comply with the desired specifications with an maximum error in position of 7mm. The system must exhibit a maximum error less than $500\mu\text{m}$ in position and 0.1° in orientation. A new procedure has been developed for the calibration of the LEDs'positions.

This new method is based on the bundle adjustment, which allows one to calibrate the positions of the LEDs even if the poses of the Hiball are not fully known. A bar, called *calibration bar*, is used to add more constraints to the system and to validate the calibration. Using this bar, the HiBall can be moved along a pure translation of known length. In order to better analyze the results, a simulator was developed. The initial method has been revised to further reduce the maximum errors which were reduced to 1.2mm. An extra step will be needed to achieve the goal.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Le système de positionnement externe	2
1.3 Objectif	5
1.4 Plan du mémoire	5
2 Le système HiBall	6
2.1 Description sommaire	6
2.2 Les composants	7
2.2.1 Le HiBall	8
2.2.2 Les DEL	10
2.3 La prise de mesures	12
2.4 SCAAT	13
2.4.1 La modélisation	14
2.4.2 L'algorithme	17
2.4.3 L'initialisation	20
2.4.4 L'autocalibrage	20
2.5 Conclusion	22
3 Le modèle interne du HiBall	24
3.1 Le modèle du sténopé	24
3.1.1 Résolution des paramètres intrinsèques	25
3.1.2 Le modèle de la caméra multivue	29
3.2 Le modèle du HiBall	29
3.3 La méthode de calibrage	32
3.4 Conclusion	34

4	Étalonnage des positions des DEL	36
4.1	Le traitement des données	37
4.1.1	L'optimisation non linéaire	37
4.2	La méthodologie	46
4.2.1	La barre de calibrage	46
4.2.2	Le choix des positions de la barre	48
4.2.3	Les observations	48
4.2.4	La validation des résultats expérimentaux	50
4.3	Le simulateur	52
4.3.1	La validation des résultats en simulation	54
4.4	Les résultats	55
4.5	Conclusion	56
5	Révision de l'étalonnage des DEL	58
5.1	Le critère du choix des positions de la barre	58
5.1.1	La prise de mesures	59
5.1.2	Les résultats	61
5.2	Le traitement des mesures	63
5.2.1	Le vecteur d'état	64
5.2.2	Les résultats	65
5.3	Les paramètres intrinsèques	66
5.3.1	Les centres de projection	66
5.3.2	L'orientation des capteurs	67
5.3.3	La perpendicularité et l'égalité de l'échelle selon u et v	67
5.3.4	Estimation des paramètres du modèle suggéré	68
5.3.5	Les résultats	69
5.4	Conclusion	70
6	Conclusion	71
6.1	Travaux futurs	72
	Bibliographie	74

Chapitre 1

Introduction

1.1 Mise en contexte

Ce projet se déroule dans le cadre du projet ICIS-DP (*3d Intelligent and Configurable Inspection System for Deformable Parts*) et il s'agit d'une collaboration entre Creaform inc., l'Université de l'Alberta et l'Université Laval. Ce projet a pour but d'améliorer l'efficacité du processus d'inspection industrielle de pièces composées de matériaux déformables. L'inspection industrielle consiste à assurer la conformité de la géométrie de la surface d'une pièce avec son modèle CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*).

Le processus d'inspection peut être décomposé en deux parties, soit l'acquisition et l'analyse du modèle. L'analyse du modèle est réalisée par l'Université de l'Alberta et ne sera pas discutée davantage. L'acquisition de la géométrie de la surface peut aussi être séparée en deux sous-parties, soit l'acquisition d'une portion de la géométrie de la surface et l'alignement de cette portion avec le reste du modèle dans un repère commun. L'acquisition est effectuée à l'aide d'un balayage sans contact d'un laser projeté sur l'objet et elle est réalisée par Creaform inc. L'alignement est effectué à l'aide d'un système de positionnement externe qui a été choisi à la suite d'une étude effectuée par Y. Martin [14].

1.2 Le système de positionnement externe

Le système de positionnement qui a été retenu est le système HiBall [2] de la compagnie 3rdTech. Ce dernier fonctionne avec une caméra multivue, le HiBall (figure 1.1(a)), et un ensemble de DEL infrarouges disposées au plafond (figure 1.1(b)), soit au dessus du volume de travail. La pose est estimée par un filtre de Kalman et l'étalonnage des positions des DEL est effectué par une méthode d'autocalibrage fournie par le fabricant. La figure 1.2 montre une ébauche du système. Les DEL au plafond émettent des signaux qui sont captés par le HiBall, ce qui permet de positionner ce dernier. Le système possède une enveloppe de travail variable pouvant atteindre $12\text{ m} \times 12\text{ m} \times 3\text{ m}$ et plus avec un débit de 2000 poses à la seconde et une précision de $400\text{ }\mu\text{m}$ RMS en position et de $0,02^\circ$ RMS en orientation selon les caractéristiques du fabricant.

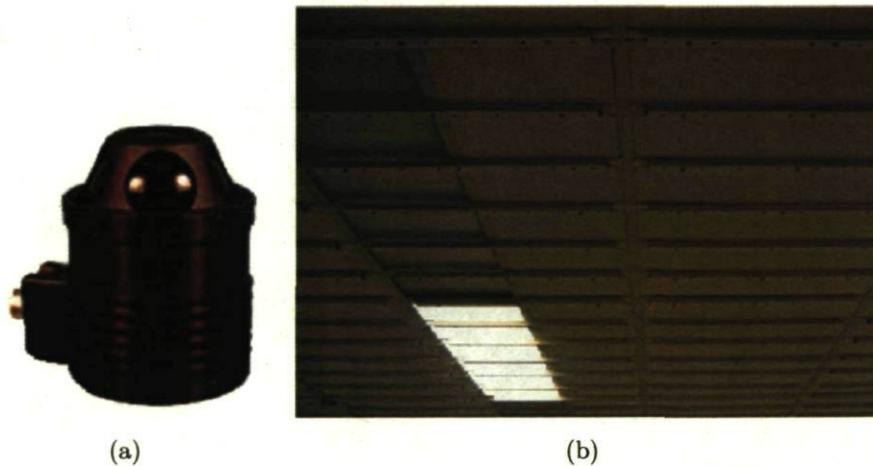


Figure 1.1 – (a) Le HiBall. (b) Une partie des DEL disposées au plafond.

Les caractéristiques du système HiBall en font le système idéal pour ce projet, puisque, pour le projet, les caractéristiques requises du système sont de déterminer la pose en six degrés de liberté, soit la position $[x\ y\ z]^T$ et l'orientation $[\alpha\ \beta\ \gamma]^T$ à une fréquence d'au moins 30 poses/seconde et avec une erreur *maximale* sur le positionnement inférieure à $500\text{ }\mu\text{m}$ sur la position et à $0,1^\circ$ sur l'orientation. De plus, cette précision doit être maintenue à l'intérieur d'un volume de travail minimum de $4\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}$ (longueur \times largeur \times hauteur). Ces caractéristiques ont été déterminées afin d'obtenir un produit ayant une viabilité commerciale en métrologie. Le tableau 1.1 résume les exigences du système.

Dans le but d'en vérifier la qualité, des tests ont été préalablement réalisés avec le système HiBall [14]. Un de ces tests fut de mesurer la distance entre deux points statiques séparés par 250 mm à 23 positions différentes à l'intérieur du volume de

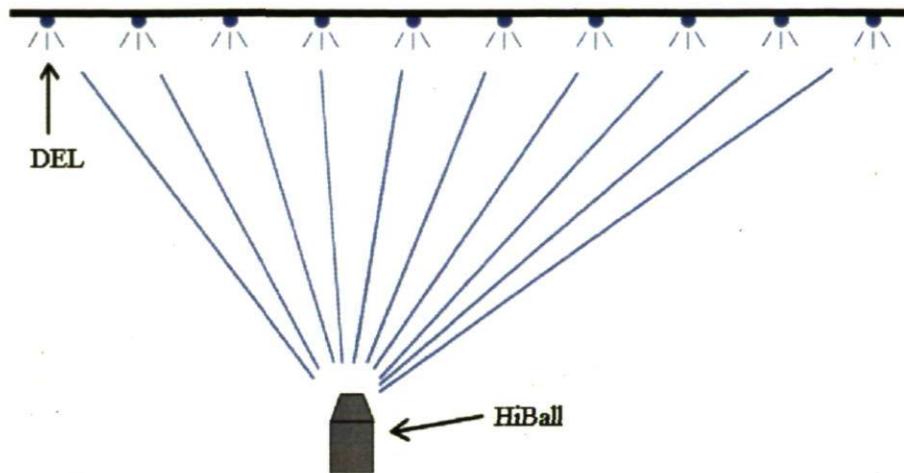


Figure 1.2 – Ébauche du système HiBall. Les DEL au plafond émettent des signaux qui sont captés par le HiBall, ce qui permet de positionner ce dernier.

Tableau 1.1 – Résumé des caractéristiques requises pour le système de positionnement externe.

Caractéristiques du système de positionnement	
Fréquence de la pose :	≥ 30 Hz
6 degrés de liberté	
Erreur maximale sur la position :	$500 \mu\text{m}$
Erreur maximale sur l'orientation :	0.1°
Volume de travail requis :	$\geq 4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

travail (figure 1.3). Ce test a démontré que l'erreur de justesse maximale en position est de 7,069 mm. Donc l'erreur de justesse n'atteint pas la caractéristique voulue de $500 \mu\text{m}$ d'erreur maximale en position. De plus, cette expérience montre que l'erreur est toujours plus élevée sur les bords de l'enveloppe de travail. L'erreur de justesse correspond à l'exactitude de la mesure, soit l'écart entre la moyenne des valeurs mesurées et la valeur de référence (équation 1.1 et figure 1.4(a)). Contrairement à l'erreur de fidélité, l'erreur de justesse ne peut pas être éliminée par filtrage [15]. L'erreur de fidélité correspond, quant à elle, à l'écart-type des valeurs mesurées (équation 1.2 et figure 1.4(b)) :

$$\epsilon_{justesse} = \bar{v} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i, \quad (1.1)$$

$$\epsilon_{fidélité} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}, \quad (1.2)$$

où $\epsilon_{justesse}$ correspond à l'erreur de justesse, $\epsilon_{fidélité}$ à l'erreur de fidélité, \bar{v} à la valeur de référence, v_i à la $i^{\text{ième}}$ mesure, N au nombre de mesures prises et \bar{v} à la moyenne des valeurs mesurées.

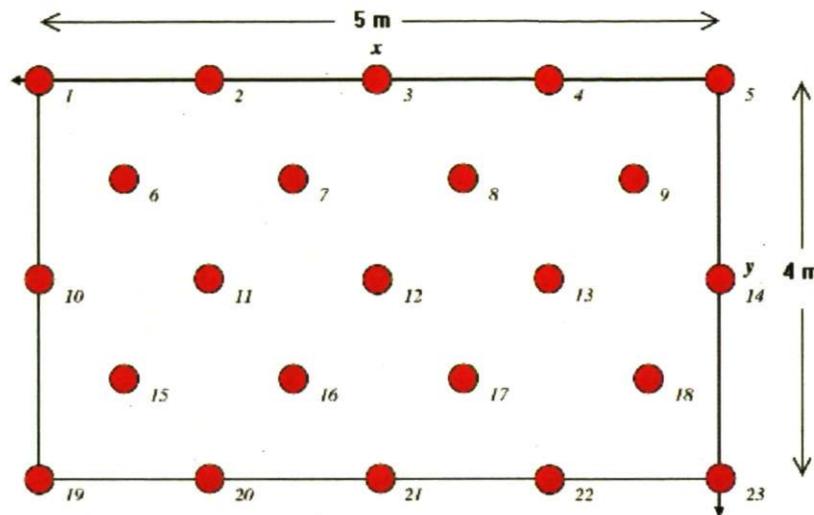


Figure 1.3 – Tiré de [14]. Emplacement des 23 positions de test pour la mesure d'une longueur connue.

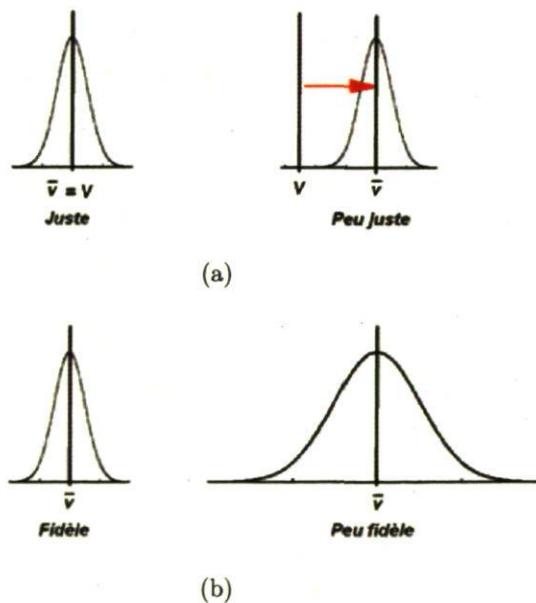


Figure 1.4 – Tiré de [14]. Représentation graphique de (a) l'erreur de justesse et (b) l'erreur de fidélité.

1.3 Objectif

L'objectif du projet est de réduire l'erreur de justesse afin d'obtenir un système de positionnement respectant les caractéristiques exigées. Pour ce faire, le système HiBall sera étudié en profondeur et une nouvelle méthode d'étalonnage sera développée. La méthode développée devra être simple et nécessiter un minimum de matériel.

Le principal défi de ce projet est de réduire l'erreur maximale de plus de 92 %. Parmi les autres défis, l'un d'eux est de devoir travailler avec les capteurs du HiBall qui sont des photodiodes à effet latéral, car, en plus d'être grandement bruitée, elles ne donnent que le centroïde de l'image de la lumière perçue. L'information obtenue par les capteurs est donc très limitée. Un autre défi est le nombre de positions de DEL à étalonner par rapport au champ de vue du HiBall qui est très restreint. Le nombre de DEL utilisées pour le projet est d'environ 2700, tandis que le champ de vue ne permet que de voir environ 150 DEL au maximum. De plus, à cause de sa configuration matérielle, le champ de vue du HiBall est constitué de plusieurs petits champs de vue qui permettent de voir seulement de petits groupes de DEL isolés.

1.4 Plan du mémoire

Ce mémoire présente tout d'abord une description du système HiBall. Cette description permettra de mieux comprendre le fonctionnement du système et, ainsi, mieux développer la nouvelle méthode d'étalonnage. Le chapitre 2 comprend donc une description des composants, de la prise de mesures et le détail de la méthode SCAAT, développée par 3rdTech qui est utilisée pour estimer la pose du HiBall et les positions des DEL. Le chapitre 3 décrit le modèle interne du HiBall, soit les paramètres intrinsèques, et la méthode d'étalonnage de ce modèle. Le chapitre 4 décrit la nouvelle méthode d'étalonnage. Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour l'étalonnage des DEL, soit le traitement apportées sur les mesures ainsi que le choix des positions du HiBall pour la prise de mesures. Le chapitre 5 présente des améliorations qui ont été effectuées à la méthode initiale. Les améliorations ont été apportées au critère des choix des positions des mesures, au traitement des données et au modèle interne du HiBall.

Chapitre 2

Le système HiBall

2.1 Description sommaire

Le système HiBall est grandement intéressant dans le cadre du projet ICIS-DP puisqu'il permet d'obtenir la pose¹ du HiBall² avec simplicité et polyvalence. Cependant, ce système n'a pas été conçu pour le domaine de la métrologie, mais bien pour des applications de réalité virtuelle et augmentée dans le but d'effectuer le suivi d'une personne se déplaçant dans une pièce [25] [21] [24]. Pour ces domaines, le plus important est de réduire au minimum la latence et d'avoir un taux de rafraîchissement le plus élevé possible. Sur ces points, le système HiBall est très efficace puisqu'il possède une latence inférieure à 1 ms et un taux de rafraîchissement pouvant aller jusqu'à 2000 Hz. Le tableau 2.1 résume les caractéristiques du système. Malgré plusieurs qualités, le système devra être amélioré afin d'atteindre les critères de précision voulus, soit une erreur maximale de 500 μm en position et de 0,1 ° en orientation. Suivant ce but, il est nécessaire de bien comprendre le fonctionnement du système.

Le fonctionnement de base du système HiBall est similaire à un système de positionnement optique conventionnel. Le HiBall observe une cible qui est ici une matrice de DEL disposées au plafond. Lorsqu'une DEL est allumée, le HiBall capte la lumière émise par celle-ci. La partie photosensible du capteur permet de mesurer la direction relative du rayon projecteur issu d'une DEL. L'information du capteur est ensuite envoyée à l'ordinateur par le biais du contrôleur et, finalement, la pose est mise à jour à l'aide d'un logiciel. Ce qui en fait un système innovateur est la méthode utilisée pour

-
1. La pose comprend la position et l'orientation, soit les six degrés de liberté.
 2. Le HiBall correspond seulement à la caméra multivue, contrairement au système HiBall qui comprend l'ensemble du système, soit les DEL, le HiBall, le CIB et l'ordinateur.

Tableau 2.1 – Résumé des caractéristiques du système HiBall fournies par 3rdTech.

Caractéristiques du système HiBall	
6 degrés de liberté	
Taux de rafraîchissement :	≥ 2000 Hz
Résolution	
En position (x/y/z) :	200 μm RMS
En orientation (Rx/Ry/Rz) :	0,01 ° RMS
Exactitude absolue/stabilité	
En position (x/y/z) :	400 μm RMS
En orientation (Rx/Ry/Rz) :	0,02 ° RMS
Latence :	≤ 1 ms
Volume de travail :	≥ 12 m \times 12 m \times 3 m

mettre à jour la pose. Normalement, pour obtenir la pose, le nombre d'informations nécessaire doit être au moins égal au nombre de degrés de liberté [19], soit un minimum de 6 informations. Le système HiBall, quant à lui, n'utilise qu'une seule information à la fois. Cette méthode est basée sur un filtre de Kalman et elle se nomme SCAAT [23] pour « Single Constraint At A Time ». L'unique information qui est utilisée pour mettre à jour la pose est la contrainte apportée par la mesure d'une DEL sur un capteur. Cette approche est basée sur l'hypothèse que le bruit de mesure des capteurs et le bruit du mouvement du HiBall peuvent être modélisés par des processus aléatoires normalement distribués. Cette méthode possède plusieurs avantages tels qu'une latence plus faible et un taux d'estimés de la pose plus élevé qu'avec une méthode conventionnelle ainsi que l'autocalibrage en temps réel des positions des DEL.

La suite de ce chapitre explique plus en détail le fonctionnement du système HiBall, en commençant par la description des composants suivie de la méthode de prise de mesures et, finalement, le détail du calcul de la pose et de l'autocalibrage.

2.2 Les composants

Le système HiBall comprend une caméra multivue, appelé HiBall, un ensemble de DEL (diode électroluminescente) infrarouges, appelé plafond, un contrôleur, appelé CIB (*Ceiling-HiBall Interface Board*) et un ordinateur. Le contrôleur effectue la communication entre les différents composants et l'ordinateur. La figure 2.1 représente la connexion

de tous les composants ensemble.

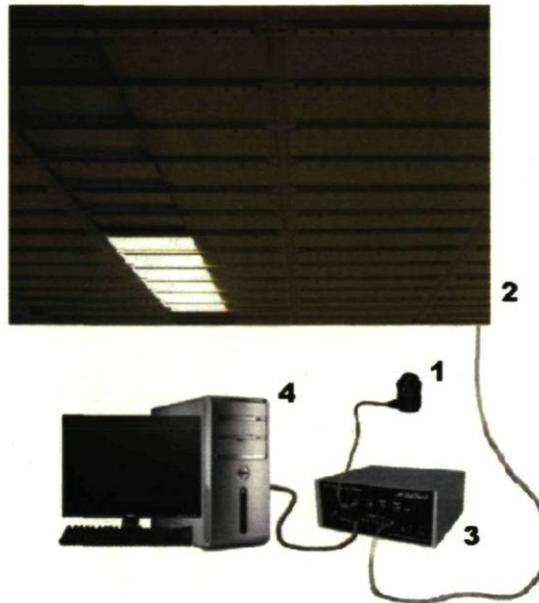


Figure 2.1 – Le système Hiball de la compagnie 3rdTech comprend : le Hiball (1), l'ensemble de DEL infrarouges disposées au plafond (2), le contrôleur (3) et un ordinateur (4).

2.2.1 Le HiBall

Le HiBall est un dispositif optique composé de six capteurs et de six lentilles (figure 2.2(a)). La tête est composée d'un châssis rigide en forme de dodécaèdre où sont placés les capteurs et les lentilles. Les capteurs sont disposés à l'intérieur de la partie inférieure tandis que les lentilles sont situées sur la partie supérieure. Chaque capteur est opposé à une lentille. Un ensemble capteur-lentille est situé au centre et les cinq autres en périphérie. La base contient l'électronique nécessaire à l'amplification et à la numérisation de la mesure des capteurs ainsi qu'à la communication vers le contrôleur. La base comporte aussi un trou fileté et, puisque le tout est très léger (300 g) et compact (environ 7 cm de haut et 5 cm de diamètre), il est facile de le fixer à n'importe quel objet.

Les lentilles sont fabriquées avec un verre permettant de filtrer la lumière afin de transmettre plus de 99 % des longueurs d'onde infrarouges de plus de 830 nm et moins de 0,001 % des longueurs d'onde visibles. Les limites du filtrage sont toutefois imposées par les capteurs puisqu'ils possèdent une pointe de réceptivité à 950 nm et ils ne captent pratiquement rien au-dessus de 1150 nm. Les capteurs sont des photodiodes

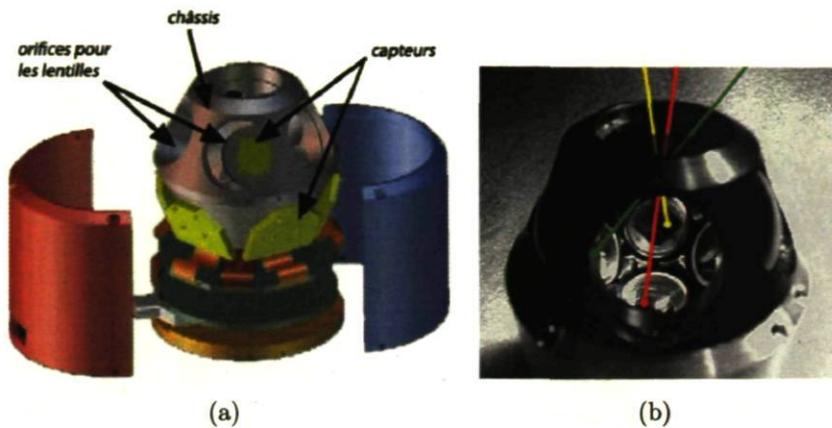


Figure 2.2 – (a) Vue détaillée du HiBall. Le châssis, en gris, est la tête en forme de dodécaèdre. Les orifices correspondent aux lentilles et les capteurs sont vert pâle. (b) Vue détaillée de la tête par le trou d'une lentille retirée. Les lentilles et les capteurs peuvent être vus ainsi qu'un exemple d'une vue *primaire* en rouge (le capteur est opposé à la lentille) et de deux vues *secondaires* en jaune et en vert (les capteurs sont adjacents au capteur opposé à la lentille).

à effet latéral à deux dimensions. L'information obtenue par les photodiodes n'est pas une image, mais seulement quatre valeurs de courants (figure 2.3) qui permettent de connaître directement la position du centroïde du flux lumineux incident au capteur. Pour connaître la position du centroïde, les courants sont d'abord amplifiés et ensuite convertis à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique de 16 bits afin d'obtenir des valeurs utilisables par le logiciel. La position selon x est ensuite calculée à partir de la paire de courants (x^-, x^+) selon la formule suivante :

$$x = \frac{x^+ - x^-}{x^+ + x^-}. \quad (2.1)$$

La position en y est obtenue similairement avec la paire (y^-, y^+) . Pour chacune des dimensions, la position est donc contenue à l'intérieur de l'intervalle $[-1, +1]$. Il est à noter que les capteurs utilisés sont linéaires à 99 % sur seulement 64 % de leur surface et que l'équation 2.1 n'est valide que pour la portion linéaire.

Les six ensembles capteur-lentille qui sont opposés représentent les six caméras principales qui seront appelées les vues primaires. Comme il est montré à la figure 2.2(b), la lumière passant par une lentille peut atteindre un capteur adjacent à celui qui est opposé à la lentille. Donc cinq vues secondaires sont obtenues par la lentille du centre (celle du dessus) et trois pour chacune des lentilles en périphérie pour un total de 26 vues, chacune ayant un champ de vue de moins de 6° . Le champ de vue global du HiBall est montré à la figure 2.4. Les vues secondaires sont d'un grand bénéfice pour le filtre de

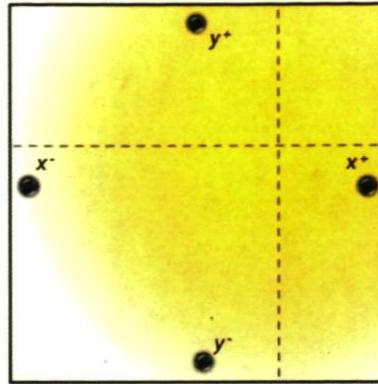


Figure 2.3 – Représentation des courants (x^- , x^+ , y^- , y^+) sur une photodiode à effet latéral à deux dimensions. Dans cet exemple, les courants x^- et y^- sont plus faibles que les courants x^+ et y^+ , ce qui permet de savoir que le centre lumineux est en haut à droite.

Kalman, car elles permettent d'augmenter le champ de vue global sans avoir à diminuer la résolution des capteurs³. Ce qui n'est pas sans conséquence, car l'initialisation du filtre s'en retrouve plus compliquée (section 2.4.3).

2.2.2 Les DEL

Les DEL utilisées émettent dans le proche infrarouge avec une pointe centrale d'émissivité à 880 nm de longueur d'onde et elles possèdent un grand angle de diffusion, 130°. Elles sont fixées sur des rails par groupes de huit (figure 2.5), lesquels sont installés au plafond⁴. C'est pourquoi l'ensemble des DEL est aussi appelé le plafond. Les rails sont conçus pour être facilement installés à un plafond suspendu, puisqu'il suffit de glisser les extrémités entre le treillis métallique et les tuiles. Ils sont ensuite branchés bout à bout en progressant par rangée en va-et-vient, à l'exception du premier rail qui est relié au contrôleur (figure 2.6). Les rangées doivent être alignées et séparées par une distance de 8 pouces (20,32 cm)⁵. Par la suite, une carte du plafond est créée grâce à un logiciel fourni par le fabricant. Cette carte servira d'estimation initiale pour les posi-

3. Il est possible d'augmenter le champ de vue global du HiBall en diminuant les longueurs focales. Cependant, cette méthode diminue la résolution du système, car une plus grande portion du plafond sera vue sur la même surface du capteur.

4. Pour ce projet, les DEL sont disposées seulement au plafond, mais il est possible de les installer sur les murs ou sur n'importe quelle surface en utilisant des vis.

5. La distance de 8 pouces n'est pas obligatoire, celle-ci est la valeur par défaut. Cependant, cette distance doit être constante entre toutes les rangées et, lors de la création de la carte, ce paramètre devra être modifié.

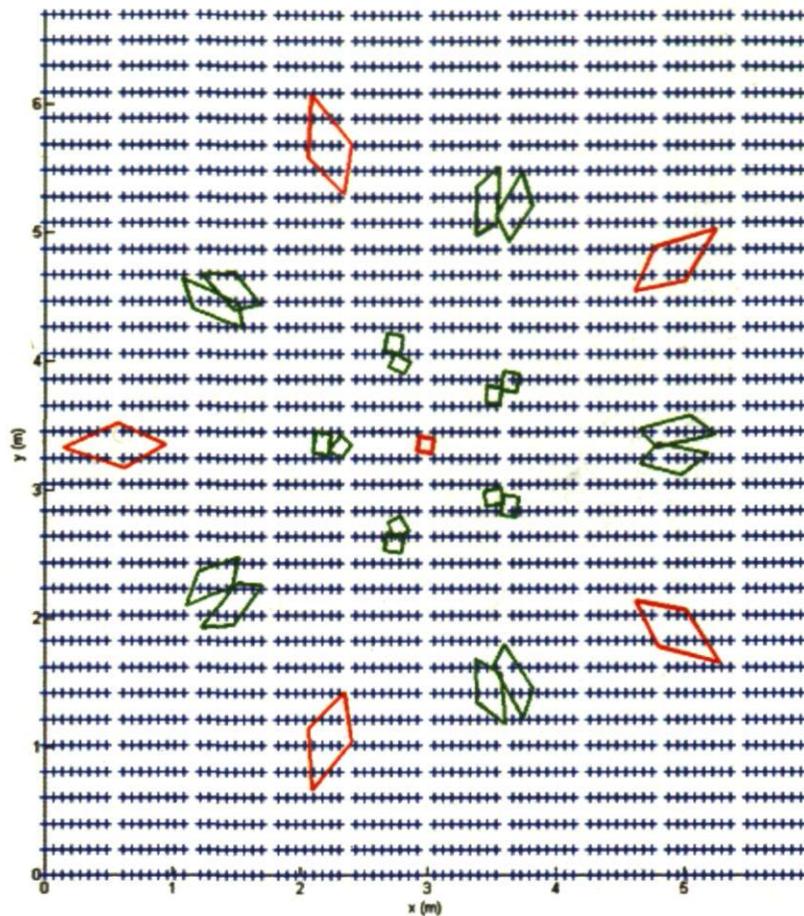


Figure 2.4 – Le champ de vue du HiBall projeté sur le plan formé par les DEL, en bleu, lorsque le HiBall est situé à 1,2 m du plafond. Les projections des vues primaires sur le plafond sont représentées en rouge et celles des vues secondaires en vert.

tions des DEL. Les positions réelles des DEL doivent être le plus près possible de cette carte. Néanmoins, le système tolère une erreur pouvant atteindre $\frac{1}{2}$ pouces (1,27 cm) de différence entre la position idéale d'une DEL (celle de la carte) et sa position réelle [1].

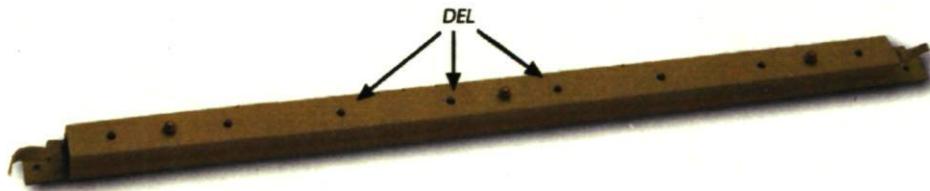


Figure 2.5 – Disposition des DEL en un groupe de huit sur un rail.

Le plafond utilisé pour ce projet s'étend sur une superficie de 6×7 m et comprend

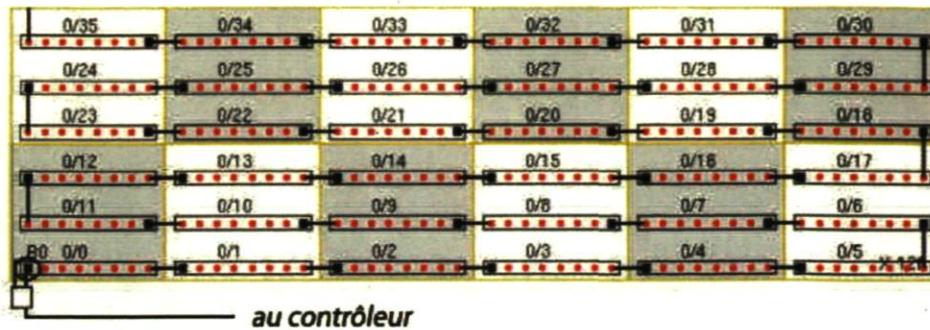


Figure 2.6 – Disposition partielle des rails au plafond en va-et-vient.

environ 2700 DEL. La figure 2.4 est un aperçu du plafond utilisé. Le plafond sert aussi de repère au système, car les poses du HiBall sont obtenues dans le repère de ce dernier. L'origine est située à la position de la première DEL, l'axe z est fixé dans la même direction que la normale au plafond, l'axe y se propage selon la première colonne et l'axe x selon la première rangée. Il est à noter que l'orientation de ce repère ne requiert pas un plan de plafond parfaitement plan, ni des rangées parfaitement alignées. Cette référence est rigoureusement arbitraire.

2.3 La prise de mesures

Une des raisons de la polyvalence du système HiBall, est qu'il peut être utilisé avec un éclairage ambiant. Cependant, même si les composants du système HiBall ont été choisis afin d'éliminer au maximum la lumière ambiante, pour fonctionner efficacement sous une lumière ambiante, la prise de mesure a été adaptée. Une mesure est donc prise en trois étapes, ce qui permet d'éliminer le biais constant des capteurs et le bruit de basses fréquences en plus de la lumière en arrière-plan [25]. Cette procédure appelée DLD (*Dark-Light-Dark*) consiste à prendre une mesure sur un capteur avec la DEL éteinte, ensuite avec la DEL allumée et à nouveau avec la DEL éteinte. De plus, le temps d'intégration de la lumière sur le capteur avec la DEL allumée (t_a) est égal à la somme des temps d'intégration avec la DEL éteinte (t_{e1} et t_{e2}) :

$$t_a = t_{e1} + t_{e2}, \quad (2.2)$$

ce qui permet d'obtenir la mesure corrigée (m_c) :

$$m_c = m_a - \frac{m_{e1} + m_{e2}}{2}, \quad (2.3)$$

où m_a est la mesure prise avec la DEL allumée et m_{e1} et m_{e2} sont respectivement les mesures prises avec la DEL éteinte avant et après qu'elle ait été allumée. La figure 2.7

montre un exemple de prise de mesure pour la position en x . Par la suite, cette mesure est convertie en mesure « idéale » à l'aide d'une table d'interpolation qui sera décrite à la section 3.2. Cette correction permet de compenser la distorsion des lentilles ainsi que la non-linéarité du capteur. Cette nouvelle mesure pourra ensuite être utilisée avec le modèle de prédiction de la mesure présenté à la section 2.4.1.

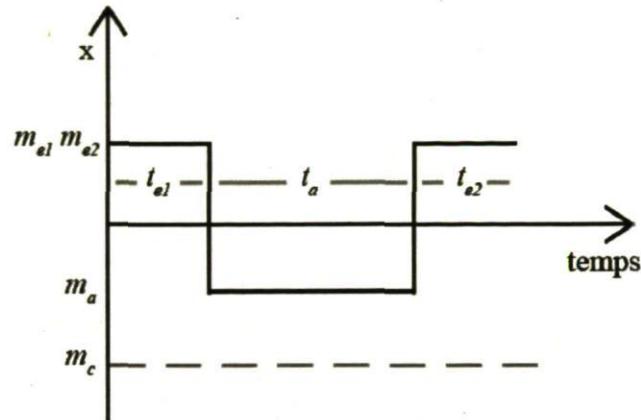


Figure 2.7 – Diagramme de la procédure DLD pour une mesure selon x .

Lors de la prise d'une mesure, une commande est envoyée à la DEL ainsi qu'au capteur voulue par le biais du CIB. L'envoi d'une commande à la DEL voulu est réalisé par encodage de position. Un compteur suit la commande et lorsqu'une DEL la reçoit, si le compteur est égal à zéro, la commande est exécutée, sinon le compteur est décrémenté et la commande est envoyée à la DEL suivante. Afin de maximiser le rapport signal à bruit de la mesure et de ne pas saturer le capteur, un contrôle automatique de l'intensité du courant envoyée à la DEL et du temps d'intégration du capteur est effectué par le logiciel.

2.4 SCAAT

La méthode SCAAT, basé sur un filtre de Kalman, fonctionne à l'aide d'un estimateur stochastique récursif du type *prédiction-correction* ; la pose et la mesure sont prédites à partir d'un modèle et la pose est ensuite corrigée avec la fusion d'une nouvelle mesure. La pose obtenue est optimale au sens où elle minimise la covariance de l'erreur de l'état. Cette covariance est maintenue à l'intérieur d'une matrice correspondant à :

$$\mathbf{P}(t) = E \{ \xi(t) \xi^T(t) \}, \quad (2.4)$$

où $E \{ \bullet \}$ est l'espérance mathématique et $\xi(t) = \mathbf{x}(t) - \check{\mathbf{x}}(t)$ est la différence entre la vraie valeur de l'état, $\mathbf{x}(t)$, et son estimation, $\check{\mathbf{x}}(t)$, au temps t . Cette matrice servira à

pondérer la correction appliquée à la prédiction de la mesure et elle sera mise à jour à chaque itération, tout comme l'état du système.

2.4.1 La modélisation

Le modèle de prédiction du mouvement

Le mouvement du HiBall est prédit à partir d'un modèle simple du type « position-vélocité » représenté par l'équation suivante :

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\delta t)\mathbf{x}(t - \delta t) + \mathbf{w}(\delta t), \quad (2.5)$$

où $\mathbf{x}(t)$ est le vecteur d'état au temps t , $\mathbf{A}(t)$ est la matrice de transition des états, $\mathbf{w}(t)$ est le vecteur du bruit du mouvement (voir [22] pour plus de détails sur le vecteur de bruit) et δt est le temps écoulé entre l'ancienne mesure et la mesure courante.

Le vecteur d'état comprend les six éléments de la pose du HiBall ainsi que les six vitesses correspondantes (la désignation du temps a été omise pour des fins de clarté) :

$$\mathbf{x} = \left[x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \Delta\phi \ \Delta\theta \ \Delta\psi \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi} \right]^T, \quad (2.6)$$

où x , y et z représentent la position cartésienne en mètres, $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ et $\Delta\psi$ représentent un incrément angulaire en radians selon les axes x , y et z respectivement, \dot{x} , \dot{y} et \dot{z} représentent les vitesses cartésiennes en mètres/seconde et $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$ et $\dot{\psi}$ représentent les vitesses angulaires en radians/seconde. Puisque le vecteur d'état ne contient que des différences d'angles entre l'ancienne et la nouvelle orientation, l'orientation est contenue à l'extérieur du vecteur d'état sous la forme d'un quaternion :

$$\mathbf{q} = (q_0, (q_x, q_y, q_z)). \quad (2.7)$$

À la fin de chaque cycle du filtre, le quaternion est augmenté par l'ensemble des incréments et ces derniers sont remis à zéro. L'utilisation des incréments angulaires permet d'éviter la non-linéarité associée au calcul de l'orientation puisque les incréments sont toujours petits. De plus, il n'est pas nécessaire d'exprimer les vitesses angulaires de cette façon, puisqu'elles sont linéaires.

La matrice de transition des états sert à projeter les éléments du vecteur d'état dans le temps par δt . Étant donné le modèle à vitesse constante, cette matrice représente les relations suivantes pour les éléments x et \dot{x} :

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t - \delta t) + \dot{x}(t - \delta t)\delta t \text{ et} \\ \dot{x}(t) &= \dot{x}(t - \delta t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

La projection des autres éléments du vecteur d'état est calculée de la même manière. La matrice complète est représentée par :

$$\mathbf{A}(\delta t) = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} & \Delta\phi & \Delta\theta & \Delta\psi & \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccccccc} 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (2.9)$$

La prédiction de la nouvelle position est donc calculée à partir de l'ancienne position à laquelle est ajouté un déplacement à vitesse constante égale à l'ancienne vitesse pendant un temps δt . La prédiction de la nouvelle vitesse est, quant à elle, la même que l'ancienne vitesse.

Le modèle de prédiction de la mesure

Dans le but de corriger la position du HiBall, il est nécessaire de prédire la mesure d'une DEL sur un capteur, car cette prédiction pourra être comparée avec la mesure observée. Cette prédiction est calculée à partir du modèle suivant :

$$\check{z}_c(t) = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{q}(t), \mathbf{d}(t)) + \mathbf{v}_c(t), \quad (2.10)$$

où $\check{z}_c(t)$ représente la prédiction de la mesure obtenue par la vue c (l'ensemble capteur-lentille) au temps t , $\mathbf{h}_c(\bullet)$ représente la fonction de mesure et les paramètres $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{q}(t)$ et $\mathbf{d}(t)$ sont respectivement le vecteur d'état, l'orientation du HiBall et la position de la DEL au temps t . Le vecteur $\mathbf{v}_c(t)$ correspond au bruit de la mesure [22]. La fonction de

mesure est basée sur la géométrie projective et correspond au modèle du sténopé [7] :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'/w' \\ v'/w' \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \mathbf{V}\mathbf{R}^T(\mathbf{d}_{xyz1} - \mathbf{x}_{xyz1}), \quad (2.12)$$

où $[u \ v]^T$ est la mesure dans le repère capteur, \mathbf{V} est une matrice de projection 3×4 qui transforme et projette un point du repère HiBall vers le repère capteur. Cette matrice est construite à partir des paramètres de la vue et elle sera détaillée au chapitre 3. La matrice de rotation, \mathbf{R} , est obtenue à partir du quaternion $\mathbf{q}(t)$ et des incréments (voir [8] page 244 pour plus de détails). Cette matrice permet d'orienter un vecteur du repère global selon le repère HiBall. Les vecteurs \mathbf{d}_{xyz1} et \mathbf{x}_{xyz1} représentent les positions respectives en coordonnées homogènes, c'est-à-dire $[x \ y \ z \ 1]^T$, de la DEL et du HiBall dans le repère global. La figure 2.8 montre les différents repères utilisés.

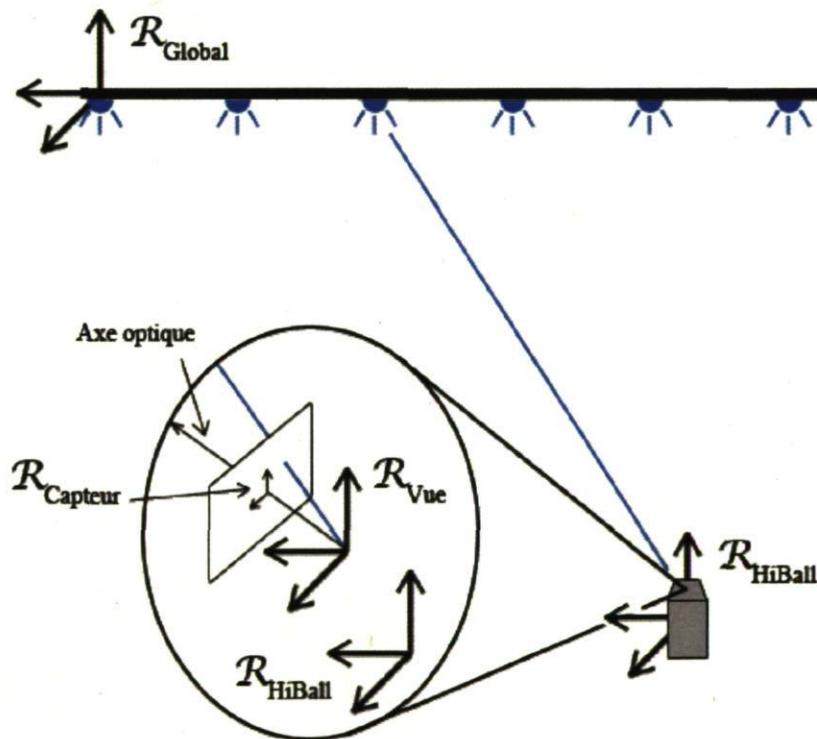


Figure 2.8 – Les différents repères utilisés par le modèle de prédiction de la mesure.

Cependant, puisque le modèle de prédiction de la mesure est non linéaire, une variante du filtre de Kalman, le filtre de Kalman étendu, doit être utilisée [26]. Cette

variante requiert la matrice jacobienne de la fonction de mesure :

$$\mathbf{H}_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{q}(t), \mathbf{d}(t)) \equiv \frac{\partial \mathbf{h}_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{q}(t), \mathbf{d}(t))}{\partial \mathbf{x}}, \quad (2.13)$$

où $\mathbf{H}_c(\bullet)$ est une matrice 2×6 représentant la matrice jacobienne au temps t pour la vue c et $\frac{\partial \mathbf{h}_c(\bullet)}{\partial \mathbf{x}}$ représente les variations sur la mesure $[u \ v]^T$ lors d'une variation selon les différents éléments du vecteur d'état $\mathbf{x}(t)$. Cette matrice possède un double rôle. D'abord, elle transforme un vecteur de l'espace d'état vers l'espace de mesure et, à l'inverse, une mesure de l'espace de mesure vers l'espace d'état. De plus, elle fournit une approximation linéaire de la relation non linéaire entre les états et la mesure.

2.4.2 L'algorithme

Les deux modèles présentés précédemment, soit celui de la mesure et celui du mouvement, permettent de prédire le mouvement du HiBall et la mesure d'une DEL sur un capteur. Ceci constitue la partie prédiction de l'algorithme SCAAT. Cependant, la prédiction du mouvement n'est pas parfaite et il est nécessaire de corriger cette prédiction. Cette rectification est effectuée par la fusion d'une nouvelle mesure au système et de la prédiction de cette mesure. Cette partie se nomme la correction.

La prédiction

Tout d'abord, la différence de temps δt avec l'ancienne mesure est calculée. Par la suite, à partir du modèle du mouvement, l'état courant du système est prédit ainsi que la covariance de l'erreur selon les équations suivantes :

$$\check{\mathbf{x}}^- = \mathbf{A}(\delta t)\check{\mathbf{x}}(t - \delta t) \text{ et} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{P}^- = \mathbf{A}(\delta t)\mathbf{P}(t - \delta t)\mathbf{A}^T(\delta t) + \mathbf{Q}(\delta t), \quad (2.15)$$

où $\check{\mathbf{x}}^-$ et \mathbf{P}^- sont respectivement l'état et la covariance de l'erreur *a priori* et ils sont distingués de l'estimation finale par le symbole moins en exposant ($-$). L'addition de la covariance du bruit du mouvement $\mathbf{Q}(\delta t) \neq \mathbf{0}$ introduit une quantité fixe d'incertitude, ce qui assure que $\mathbf{P}^- \neq \mathbf{0}$ et améliore la stabilité en prévenant que le filtre atteigne un état où toutes les mesures futures seraient ignorées.

C'est à partir de l'état *a priori* que la vue et la DEL sont choisies. La vue est choisie aléatoirement parmi les 26 vues possibles et les quatre coins de la matrice photosensible du capteur choisi sont projetés au plafond ($z = 0$) à l'aide du modèle de la caméra

(équation 2.12). L'intersection de ces droites avec le plafond permet de délimiter une zone où sera choisie la DEL. Dans cette zone, la dernière DEL qui a été allumée sera sélectionnée. Les intersections des coins projetés au le plafond sont obtenus par l'équation suivante qui est du type $ta + b = 0$:

$$t\mathbf{R}^{-1}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{c} + \mathbf{p} - \mathbf{c}_p = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{c}_p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

où (x, y) est un coin du quadrilatère délimitant la zone du plafond vue par l'ensemble capteur-lentille, t est une valeur scalaire, \mathbf{R}^{-1} est l'inverse de la matrice d'orientation et elle permet de passer du repère HiBall au repère global, \mathbf{V}^{-1} est la pseudo-inverse de la matrice du modèle de la vue et elle permet de passer du repère capteur au repère HiBall, \mathbf{c} représente un coin du capteur $[[u_c \ v_c \ -1]^T$) et \mathbf{p} est la position du HiBall dans le repère global. La figure 2.9 permet de visualiser l'équation 2.16.

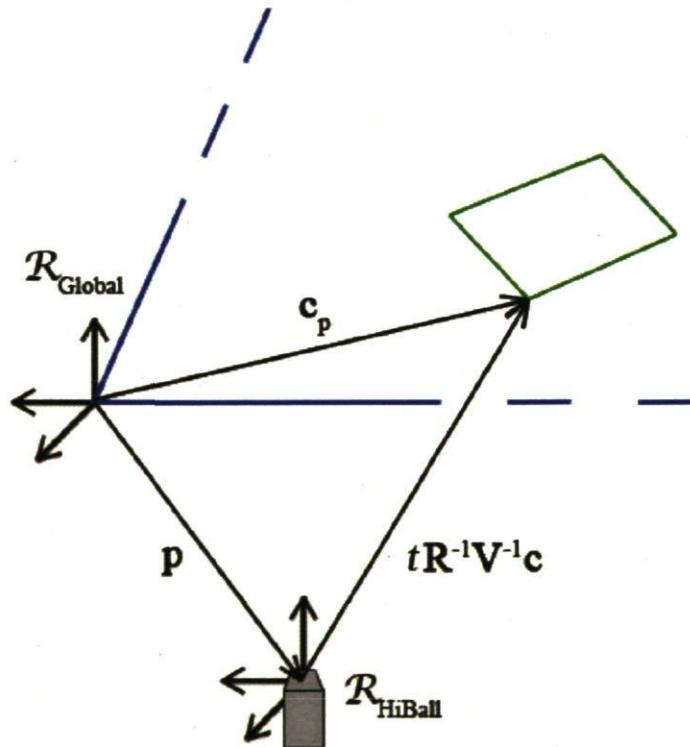


Figure 2.9 – Représentation visuelle de l'équation 2.16. Les limites du plafond sont en bleu et la zone vue par l'ensemble capteur-lentille est en vert.

Par la suite, la prédiction de la mesure, \check{z} , est évaluée à partir de :

$$\check{z} = \mathbf{h}_c(\check{\mathbf{x}}, \mathbf{q}(t), \mathbf{d}(t)) \quad (2.17)$$

et, finalement, la matrice jacobienne est évaluée à partir de :

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_c(\check{\mathbf{x}}^-, \mathbf{q}(t), \mathbf{d}(t)). \quad (2.18)$$

La correction

Puisque les modèles de prédiction du mouvement du HiBall et de la mesure sont incertains, il est nécessaire d'appliquer une correction à l'aide d'une nouvelle mesure. Cependant, il n'est pas possible de rectifier parfaitement la prédiction, car la mesure possède aussi une incertitude. La correction sera donc une moyenne pondérée selon les incertitudes de la mesure et de la prédiction. Cette pondération est le gain de Kalman \mathbf{G} :

$$\mathbf{G} = \mathbf{P}^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^- \mathbf{H}^T + \mathbf{S}_c(t))^{-1}, \quad (2.19)$$

où $\mathbf{S}_c(t)$ est la matrice de la covariance de l'erreur de mesure pour la vue c ; cette matrice est supposée connue et exacte (voir [5] pour plus de détails). Les valeurs de cette matrice proviennent d'une calibration effectuée par le fabricant. Le gain agit à titre de ratio entre l'erreur *a priori* et le total des erreurs. Ce ratio, s'il était exprimé comme des scalaires, ressemblerait à :

$$\mathbf{G} \approx \frac{\mathbf{P}^-}{\mathbf{P}^- + \mathbf{S}_c}.$$

Cependant, cette relation n'est qu'à titre illustratif, puisque les matrices \mathbf{P}^- et \mathbf{S}_c ne sont pas représentées dans le même espace.

Le vecteur d'état est donc mis à jour à partir de l'état *a priori* auquel est ajouté le résiduel, $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z}_c(t) - \check{\mathbf{z}}$, pondéré et transformé dans l'espace du vecteur d'état par la matrice du gain de Kalman :

$$\check{\mathbf{x}}(t) = \check{\mathbf{x}}^- + \mathbf{G} \Delta \mathbf{z}. \quad (2.20)$$

Par la suite, la matrice de covariance de l'erreur est mise à jour comme suit :

$$\mathbf{P}(t) = (\mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{H}) \mathbf{P}^-, \quad (2.21)$$

où \mathbf{I} correspond à la matrice identité. L'origine de cette équation peut être trouvée dans [4].

Finalement, l'orientation externe est mise à jour à partir des éléments $\Delta \phi$, $\Delta \theta$ et $\Delta \psi$ du vecteur d'état et ces derniers sont mis à zéro comme suit :

$$\Delta \mathbf{q} = \text{quaternion}(\check{\mathbf{x}}[\Delta \phi], \check{\mathbf{x}}[\Delta \theta], \check{\mathbf{x}}[\Delta \psi]), \quad (2.22)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{q} \otimes \Delta \mathbf{q}, \quad (2.23)$$

$$\check{\mathbf{x}}[\Delta \phi] = \check{\mathbf{x}}[\Delta \theta] = \check{\mathbf{x}}[\Delta \psi] = 0, \quad (2.24)$$

où $\tilde{\mathbf{x}}[\Delta\phi]$, $\tilde{\mathbf{x}}[\Delta\theta]$ et $\tilde{\mathbf{x}}[\Delta\psi]$ représentent respectivement les éléments $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ et $\Delta\psi$ du vecteur d'état $\tilde{\mathbf{x}}$. La fonction *quaternion* correspond à la transformation des trois angles en quaternion et le symbole \otimes correspond à la multiplication de quaternions. Davantage de détails sur ces deux opérations se trouvent au chapitre 7 de [8].

Le processus est maintenant prêt à recommencer à partir de la nouvelle estimation de l'état et d'une nouvelle mesure.

2.4.3 L'initialisation

L'utilisation de l'algorithme SCAAT nécessite une estimation initiale du vecteur d'état et de la matrice de covariance de l'erreur. Lors du calcul de cette estimation, la pose du HiBall est considérée fixe, sans mouvement, donc $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = \dot{\phi} = \dot{\theta} = \dot{\psi} = 0$. De plus, les valeurs de $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ et $\Delta\psi$ sont 0, car l'orientation est contenue à l'extérieur dans un quaternion. Pour ce qui est de la position et de l'orientation initiales, elles sont obtenues par force brute, soit en essayant toutes les possibilités.

À cette fin, dès le début, le système allume séquentiellement chacune des DEL et vérifie la mesure sur le capteur du centre. Si la DEL est perçue par ce dernier, plusieurs DEL distribuées autour de la DEL sont activées afin de s'assurer que des mesures passent par différentes vues. À partir de cet ensemble de mesures, la rotation autour de l'axe z , l'axe passant par le capteur et la lentille du milieu, est estimée. Si aucune solution n'est trouvée, puisque l'on suppose que la première mesure est passée par la lentille centrale, la séquence d'allumage des DEL continue, sinon d'autres mesures sont prises pour raffiner suffisamment l'estimation pour commencer le suivi avec l'algorithme SCAAT. La matrice de covariance de l'erreur initiale, quant à elle, a été déterminée expérimentalement.

Pour ce qui est du plafond, l'estimation des positions des DEL provient de la carte préalablement conçue (section 2.2.2) ou d'une carte préalablement étalonnée.

2.4.4 L'autocalibrage

L'étalonnage des positions des DEL permet d'obtenir une meilleure prédiction de la mesure sur le capteur (équation 2.12) en fournissant une meilleure position de la DEL choisie. La figure 2.10 montre l'influence sur le capteur d'un mauvais positionnement de la DEL. L'autocalibrage est une option du logiciel qui peut être désactivée une fois

le plafond étalonné.

La méthode SCAAT permet l'amélioration de l'estimation des positions des DEL en parallèle avec le suivi du HiBall. Chaque DEL possède un vecteur d'état distinct $\mathbf{d}(t) = [x \ y \ z]^T$, la position de la DEL, et une matrice de covariance de l'erreur $\mathbf{P}_d(t)$. Puisque les positions des DEL sont supposées constantes dans le temps, la matrice de covariance du bruit des DEL sera $\mathbf{Q}_d(\delta t) \approx \mathbf{0}$ [22] et la matrice de transition sera la matrice identité $\mathbf{A}_d(\delta t) = \mathbf{I}$.

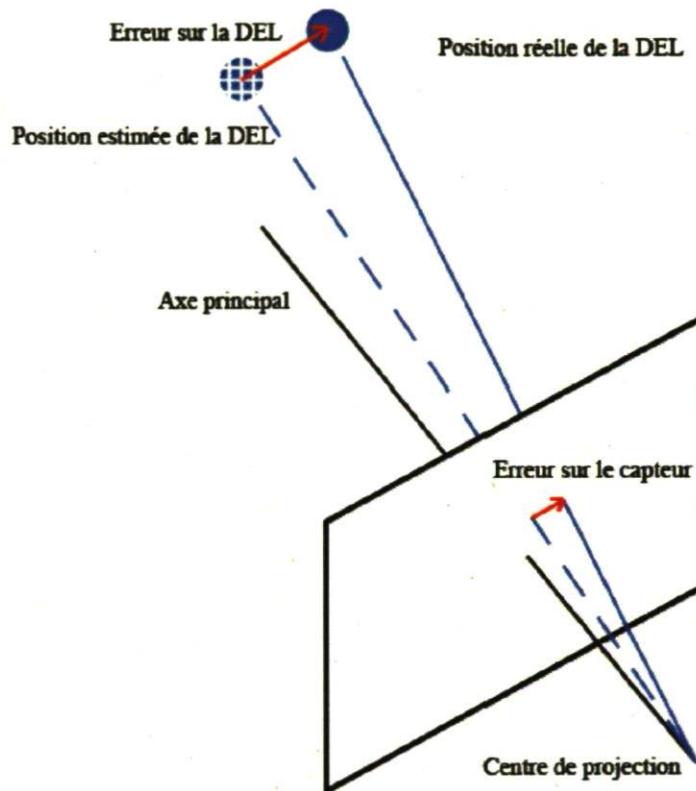


Figure 2.10 – Erreur de prédiction sur le capteur causée par le mauvais positionnement de la DEL.

À chaque itération, l'état et la covariance de l'erreur de la position de la DEL qui a été sélectionnée seront mis à jour. Le vecteur d'état et la matrice de covariance de l'erreur de la pose du HiBall seront augmentés par ceux de la DEL comme suit :

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \hat{\mathbf{d}}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

$$\hat{\mathbf{P}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_d(t) \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

où le symbole $\hat{\cdot}$ représente le vecteur ou la matrice augmentée, $\hat{\mathbf{d}}(t)$ est l'estimé de la position de la DEL au temps t et $\mathbf{P}_d(t)$ est la matrice de covariance de la DEL d . Pour ce qui est de la matrice de transition et de la matrice de covariance du bruit du mouvement, elles deviennent :

$$\hat{\mathbf{A}}(\delta t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\delta t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

$$\hat{\mathbf{Q}}(\delta t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}(\delta t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_d(\delta t) \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

De plus, le modèle de la mesure ainsi que la matrice jacobienne seront calculés à partir de la position de la DEL estimée *a priori* contenue dans le vecteur d'état augmenté. Donc, le modèle de la mesure sera $\mathbf{h}_c(\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{q}(t))$ et la matrice jacobienne sera $\mathbf{H}_c(\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{q}(t))$, où $\mathbf{d}(t)$ se retrouve à l'intérieur de $\hat{\mathbf{x}}(t)$.

Les étapes de l'itération sont les mêmes que celles énoncées à la section 2.4.2, mais avec les modifications présentées précédemment. À la fin de l'itération, les éléments de la position de la DEL sont retirés du vecteur d'état et ils deviennent la nouvelle position de la DEL. Il en est de même pour la covariance de l'erreur. Cette méthode permet donc un raffinement continu des positions des DEL et, par conséquent, améliore la position du HiBall.

2.5 Conclusion

En résumé, le système HiBall est constitué du HiBall, d'un ensemble de DEL infrarouges disposées au plafond, d'un contrôleur et d'un ordinateur. Le HiBall comprend six capteurs et six lentilles qui forment un ensemble de 26 vues (ensemble capteur-lentille). La pose est mise à jour avec l'algorithme SCAAT, un filtre de Kalman qui utilise une seule mesure à chaque itération. Cet algorithme permet d'obtenir un haut débit de mises à jour ainsi qu'une faible latence. Cette méthode consiste à prédire la nouvelle pose ainsi que la mesure d'une DEL sur un capteur à l'aide de modèles et, ensuite, à corriger la prédiction de la pose à partir de la différence entre la mesure obtenue sur le capteur et celle prédite. De plus, cette méthode permet d'autocalibrer les positions des DEL en parallèle avec la mise à jour de la pose. La méthode SCAAT possède cependant deux limites, soit que l'utilisation d'un filtre de Kalman requiert que l'erreur moyenne soit nulle et, puisque la méthode SCAAT utilise un filtre de Kalman étendu, que les approximations des modèles représentent parfaitement les modèles localement. Si ces deux hypothèses sont respectées, la méthode SCAAT donnera alors une solution optimale.

Cependant, il sera montré aux chapitres suivants, que ces deux hypothèses ne sont pas parfaitement respectées, puisque la précision sur le système peut être améliorée.

Chapitre 3

Le modèle interne du HiBall

Comme il est mentionné au chapitre précédent, la prédiction de la mesure dans l'algorithme SCAAT nécessite un modèle permettant de prévoir la mesure d'une DEL sur un capteur à partir de la pose du HiBall et de la position de la DEL. Ce chapitre présente le modèle du HiBall, une caméra multivue dont le modèle est basé sur le modèle du sténopé et suivi par la méthode de calibrage qui permet d'obtenir les différents paramètres du modèle.

3.1 Le modèle du sténopé

Le modèle du sténopé est utilisé afin de modéliser la projection d'une cible, une DEL dans notre cas, sur un capteur. La figure 3.1 ainsi que les équations suivantes représentent ce modèle :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'/w' \\ v'/w' \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \mathbf{KTd}, \quad (3.2)$$

où

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Tout d'abord, la position de la DEL \mathbf{d} , qui est représentée dans le repère global, doit être transformée dans le repère de la caméra. Ceci est effectué à l'aide de la transformation rigide homogène \mathbf{T} , une matrice 4×4 . Cette matrice comprend une rotation \mathbf{R} et une translation \mathbf{t} . La rotation correspond à la différence d'orientation entre le repère caméra et le repère global tandis que la translation correspond à la différence entre l'origine des deux repères et elle est exprimée dans le repère caméra. Par la suite, le modèle du sténopé permet de projeter la position de la DEL sur le plan image situé à une distance f et de convertir la coordonnée de millimètres à pixels¹ à l'aide de la matrice des paramètres intrinsèques² \mathbf{K} . La projection et la conversion sont effectuées avec les symboles α et β qui correspondent aux équations $\alpha = kf$ et $\beta = lf$, où k et l sont en pixels/mm et ils permettent de convertir une valeur en mm en pixels selon les directions u et v respectivement. La longueur focale f , en mm, est la distance entre le centre de projection F et le plan image, qui est le plan du capteur. Le centre de projection est le point, situé sur l'axe optique, où tous les points 3D de la scène convergent lorsqu'ils sont projetés sur le plan image et il correspond à l'origine du repère caméra. L'axe optique est la droite passant par le centre de la lentille et le centre de projection. Il ne passe généralement pas par le centre du capteur, c'est pourquoi il est nécessaire d'ajouter une translation $[u_0 \ v_0]^T$ à tous les pixels. Cette translation est effectuée afin de représenter la coordonnée dans le repère du capteur. Finalement, la coordonnée est projetée dans le plan $w = 1$ pour obtenir la mesure finale (u, v) (équation 3.1).

Les matrices \mathbf{T} et \mathbf{K} de l'équation 3.2 contiennent deux types de paramètres distincts, soit les extrinsèques et les intrinsèques. La transformation \mathbf{T} contient les paramètres extrinsèques du modèle et elle correspond à la pose de la caméra dans le repère global. Tandis que \mathbf{K} correspond aux paramètres intrinsèques du modèle de la caméra. Ces paramètres sont constants pour toutes les mesures prises par la caméra et ce sont ces paramètres qui seront étudiés davantage dans ce chapitre.

3.1.1 Résolution des paramètres intrinsèques

Les paramètres intrinsèques peuvent être trouvés en développant l'équation 3.2, ce qui donne le système d'équations suivant :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{M}\mathbf{d}, \quad (3.3)$$

1. Dans le but de faciliter la compréhension, le terme pixel est utilisé lorsqu'il s'agit d'une coordonnée sur le capteur. Cependant, les mesures obtenues par les capteurs du HiBall ne comportent aucune unité physique.

2. Contrairement à l'équation 2.12, \mathbf{K} est utilisée, car \mathbf{V} contient la transformation (\mathbf{T}) entre le repère de la caméra et le repère commun à l'ensemble des caméras ($\mathbf{V} = \mathbf{K}\mathbf{T}$).

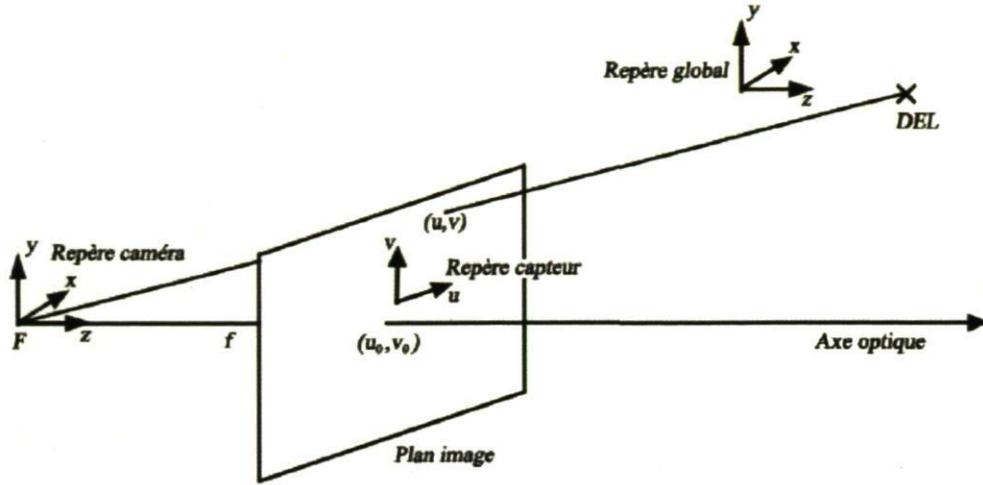


Figure 3.1 – Le modèle du sténopé. Ce modèle est une représentation géométrique d'une caméra et il permet de projeter une cible, une DEL dans notre cas, sur un plan image.

où

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \alpha \mathbf{r}_1^T + u_0 \mathbf{r}_3^T & \alpha t_x + u_0 t_z \\ \beta \mathbf{r}_2^T + v_0 \mathbf{r}_3^T & \beta t_y + v_0 t_z \\ \mathbf{r}_3^T & t_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{r}_2^T \\ \mathbf{r}_3^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{u}' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix}.$$

En tenant compte des propriétés d'orthonormalité de la matrice de rotation et en sachant que les valeurs de α et β sont positives, les différents paramètres du modèle peuvent être retrouvés à partir de \mathbf{M} comme suit :

$$\begin{aligned} \alpha &= \|\mathbf{m}_1 \wedge \mathbf{m}_3\|, \\ \beta &= \|\mathbf{m}_2 \wedge \mathbf{m}_3\|, \\ u_0 &= \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_3, \\ v_0 &= \mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{m}_3, \\ \mathbf{r}_1 &= 1/\alpha (\mathbf{m}_1 - u_0 \mathbf{m}_3), \\ \mathbf{r}_2 &= 1/\beta (\mathbf{m}_2 - v_0 \mathbf{m}_3), \\ \mathbf{r}_3 &= \mathbf{m}_3, \\ t_x &= 1/\alpha (m_{14} - u_0 m_{34}), \\ t_y &= 1/\beta (m_{24} - v_0 m_{34}), \\ t_z &= m_{34} \end{aligned} \tag{3.4}$$

avec

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T & m_{14} \\ \mathbf{m}_2^T & m_{24} \\ \mathbf{m}_3^T & m_{34} \end{bmatrix},$$

où $\mathbf{m}_i = [m_{i1} \ m_{i2} \ m_{i3}]^T$ et m_{ij} est l'élément (i, j) de \mathbf{M} et \wedge correspond au produit vectoriel.

En utilisant les équations 3.1 et 3.3, la mesure peut être écrite sous la forme de deux plans :

$$u = \frac{xm_{11} + ym_{12} + zm_{13} + m_{14}}{xm_{31} + ym_{32} + zm_{33} + m_{34}}, \quad (3.5)$$

$$v = \frac{xm_{21} + ym_{22} + zm_{23} + m_{24}}{xm_{31} + ym_{32} + zm_{33} + m_{34}}. \quad (3.6)$$

Ces équations peuvent ensuite être réécrites sous la forme d'une combinaison linéaire des m_{ij} :

$$xm_{11} + ym_{12} + zm_{13} + m_{14} - uxm_{31} - uym_{32} - uz m_{33} - um_{34} = 0, \quad (3.7)$$

$$xm_{21} + ym_{22} + zm_{23} + m_{24} - vxm_{31} - vym_{32} - vz m_{33} - vm_{34} = 0. \quad (3.8)$$

Avec plusieurs mesures obtenues par des DEL à différentes positions, il est possible de construire un système de la forme $\mathbf{Bm} = \mathbf{0}$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_1^T & \mathbf{0}^T & -u_1 \mathbf{d}_1^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{d}_1^T & -v_1 \mathbf{d}_1^T \\ & \dots & \\ \mathbf{d}_n^T & \mathbf{0}^T & -u_n \mathbf{d}_n^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{d}_n^T & -v_n \mathbf{d}_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ \vdots \\ m_{34} \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (3.9)$$

Dans cette équation, \mathbf{B} est une matrice $2n \times 12$ et n est le nombre de mesures. Puisque chaque mesure fournit deux équations au système, il faudra un minimum de six DEL pour déterminer les 12 inconnues. Parmi ces inconnues, seulement 11 sont indépendantes. Il sera donc nécessaire d'ajouter une contrainte au système pour ne pas obtenir la solution triviale $\mathbf{m} = \mathbf{0}$. La contrainte choisie est $\|\mathbf{m}\| = 1$.

Étant donné que les mesures contiennent un certain niveau de bruit et que les positions des DEL ne sont pas parfaitement connues, il est préférable de prendre un maximum de DEL. Le système sera alors surcontraint et le critère de minimisation sera la somme des erreurs de reprojection au carré :

$$\min_{\mathbf{x} \in R^n} \sum_{i \in D} (\mathbf{u}_i - \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{d}_i))^2, \quad (3.10)$$

où $\mathbf{u}_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$ est la mesure de la DEL \mathbf{d}_i sur le capteur, $\mathbf{z}(\bullet)$ est la fonction de prédiction de la mesure correspondant aux équations 3.1 et 3.3, \mathbf{x} est un vecteur contenant l'ensemble des paramètres du modèle, R^n représente l'ensemble des valeurs possibles des différentes valeurs du modèle et D est l'ensemble des DEL observées.

L'outil utilisé pour résoudre l'équation 3.9 est la décomposition en valeur singulière (SVD — Singular Value Decomposition) [6] [10] puisqu'il est rapide et il présente une excellente stabilité numérique. Cet outil permet de décomposer une matrice comme suit :

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T, \quad (3.11)$$

où \mathbf{U} et \mathbf{V} sont des matrices orthonormales et $\mathbf{\Sigma}$ est une matrice diagonale contenant les valeurs singulières de \mathbf{B} . La solution sera la colonne de \mathbf{V} associée à la plus petite valeur singulière de $\mathbf{\Sigma}$. De plus, la contrainte $\|\mathbf{m}\| = 1$ est respectée, car la solution sera de norme unitaire grâce à l'orthonormalité de \mathbf{V} .

Puisque la solution obtenue est de norme unitaire, il est nécessaire de calculer le facteur d'échelle λ qui permettra de retrouver les éléments de \mathbf{M} . Ce dernier est obtenu grâce aux caractéristiques de la matrice de rotation. Puisque cette matrice est orthonormale, chacun des vecteurs \mathbf{r}_i doit être de norme unitaire. Le facteur d'échelle est donc obtenu à partir de \mathbf{r}_3 , car $\mathbf{r}_3 = \mathbf{m}_3$:

$$\lambda = \frac{1}{\|\mathbf{r}_3\|} \quad (3.12)$$

Cependant, la norme de \mathbf{r}_3 ne permet pas de connaître le signe de λ , puisqu'une norme est toujours positive. Étant donné la connaissance du modèle, t_z ne peut pas être négatif, car un objet derrière la caméra ne peut être vu, donc :

$$\lambda = \begin{cases} -\lambda & \text{si } t_z < 0 \\ \lambda & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

La solution devient alors :

$$\tilde{\mathbf{m}} = \lambda\mathbf{m}. \quad (3.14)$$

Finalement, les différents paramètres du modèle sont retrouvés à partir de $\tilde{\mathbf{m}}$ et des équations 3.4.

Un problème persiste cependant, car la matrice de rotation \mathbf{R} reconstruite à partir de $\tilde{\mathbf{m}}$ n'est pas orthonormale, c'est pourquoi elle doit être ajustée. La matrice orthonormale la plus proche³ de \mathbf{R} est donc obtenue par [9] :

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & |\mathbf{U}\mathbf{V}^T| \end{bmatrix} \mathbf{V}^T, \quad (3.15)$$

où les matrices \mathbf{U} et \mathbf{V} proviennent de la décomposition en valeurs singulières de \mathbf{R} et $|\bullet|$ est le déterminant de la matrice.

3. Étant donné que $\tilde{\mathbf{R}}^T\tilde{\mathbf{R}}$, la matrice orthonormale $\tilde{\mathbf{R}}$ la plus proche de \mathbf{R} est celle qui minimise $\tilde{\mathbf{R}}^T\mathbf{R} - \mathbf{I}$ [9].

Les différentes valeurs retrouvées ne procurent pas un modèle parfait, surtout à cause de la correction de la matrice de rotation. Donc pour obtenir le meilleur modèle possible, une optimisation non linéaire sera nécessaire. Les estimations initiales seront les valeurs de $\tilde{\mathbf{m}}$ et $\tilde{\mathbf{R}}$ et le critère de minimisation sera la somme des erreurs de reprojction au carré, soit le même qu'à l'équation 3.10. Cette méthode sera discutée davantage au chapitre suivant.

3.1.2 Le modèle de la caméra multivue

Puisque le HiBall est composé d'un ensemble de caméras, le modèle du sténopé doit être adapté. Un *repère commun* à toutes les caméras doit être créé afin de combiner l'ensemble des informations provenant de toutes les caméras. Pour ce faire, il suffit d'ajouter une transformation rigide différente pour chaque caméra afin de passer du repère commun au repère caméra :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{V}_c \mathbf{T}_c \mathbf{d}, \quad (3.16)$$

où

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{K}_c \mathbf{T}_c.$$

La matrice de transformation \mathbf{T}_c permet de représenter un point du repère commun dans le repère de la caméra c et \mathbf{K}_c est la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra c . Cette matrice transforme un point du repère caméra vers le repère du capteur. Lorsque les matrices \mathbf{V}_c sont connues pour chacune des caméras, il est possible de retrouver la pose de la caméra à partir des informations obtenues par l'ensemble des caméras.

3.2 Le modèle du HiBall

Le HiBall est une caméra multivue et il a donc un repère commun pour tous les ensembles capteur-lentille. Dans le but de faciliter la compréhension, le repère commun à toutes les caméras est appelé le *repère HiBall* et le repère d'une caméra est appelé le *repère vue*. Comme il a été mentionné précédemment, une vue est un ensemble composé d'un capteur et d'une lentille.

L'origine du repère HiBall est fixée arbitrairement et elle correspond approximativement au centre du dodécaèdre formé par l'ensemble des lentilles et des capteurs⁴ et

4. Après le calibrage, une translation fixe est ajoutée au repère HiBall afin que l'origine soit environ

son orientation est définie par l'axe optique de la lentille centrale pour l'axe z , l'axe x , orthogonal à z , pointant en direction du capteur 1 et l'axe y est le vecteur orthogonal à z et x . La figure 3.2 montre ce repère.

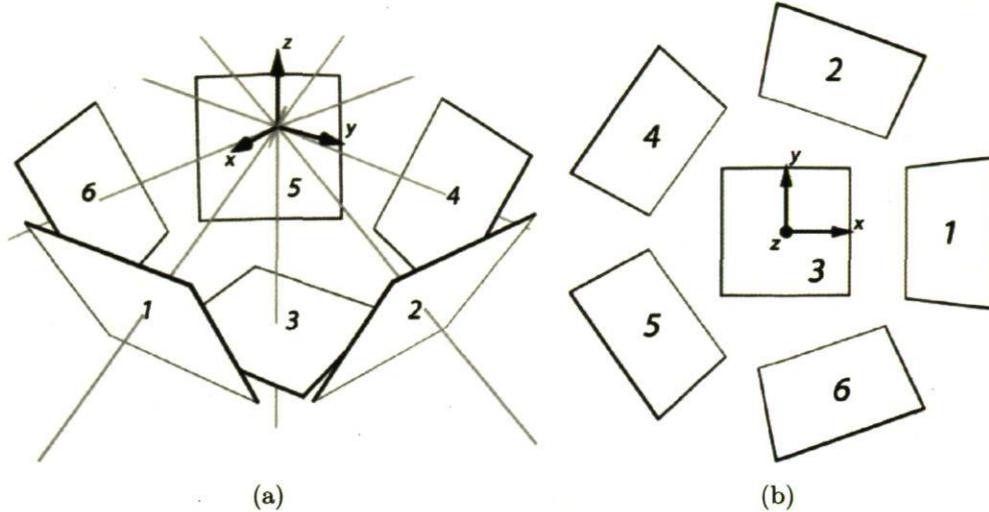


Figure 3.2 – Le repère HiBall et les capteurs. (a) Le repère HiBall est au centre du dodécaèdre et l'axe z correspond à l'axe optique de la lentille centrale (capteur 3). (b) Le repère HiBall vu de dessus.

Pour chacune des vues, la matrice V_c est définie comme suit :

$$V_c = KR_\theta R_{cap} T_{cp}, \quad (3.17)$$

où

$$T_{cp} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{R}_{len}^{-1} \mathbf{t}_{cp} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}.$$

La transformation T_{cp} est une translation pure. Elle permet de traduire un point du repère HiBall au repère de la vue, sans l'orienter. La translation \mathbf{t}_{cp} est fixée à $[0 \ 0 \ -18, 1]^T$. Cette translation est dans la direction de l'axe optique de la lentille et sa norme est obtenue à partir des caractéristiques mécaniques du HiBall et des lentilles. Cependant, cette translation doit être connue dans le repère HiBall pour être utilisée. La matrice de rotation \mathbf{R}_{len}^{-1} permet donc de représenter le centre de projection de la lentille dans le repère HiBall. Cette matrice est unique pour chacune des lentilles. Pour la lentille centrale, $\mathbf{R}_{len}^{-1} = \mathbf{I}$, car l'axe z du repère HiBall est défini par cette lentille et l'orientation des axes x et y n'est pas importante pour l'instant. Pour les lentilles en périphérie, puisque leurs centres forment un pentagone régulier, les axes optiques

à la base du HiBall au lieu du centre du dodécaèdre, cependant cette translation ne sera pas tenue en compte afin de simplifier et de clarifier le modèle.

sont séparés par 72° , soit une rotation ϕ autour de l'axe z du repère HiBall de $0, 72, 144, 216$ et 288° pour les lentilles 1, 2, 4, 5 et 6 respectivement. À partir de ce repère intermédiaire, une rotation ψ autour de l'axe y' de $-63,4^\circ$ est effectuée. Cet angle représente l'inclinaison nominale entre l'axe optique de la lentille centrale et de celles en périphérie. La figure 3.3 montre ces deux rotations.

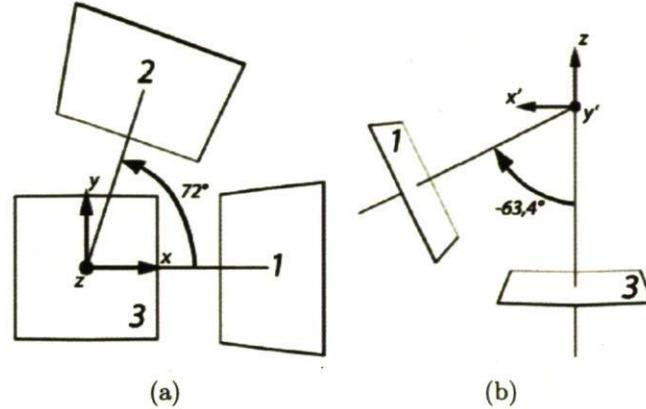


Figure 3.3 – Ensemble des rotations. (a) La rotation autour de l'axe z permet de distancer chacun des axes optiques en périphérie de 72° . (b) La rotation autour de l'axe y' de $-63,4^\circ$ permet d'incliner le repère pour que l'axe z et l'axe optique de la lentille concordent.

La matrice de rotation \mathbf{R}_{cap} est composée des deux mêmes rotations que \mathbf{R}_{len} pour la lentille opposée et elle oriente un point du repère HiBall dans le repère vue associé au capteur. L'axe z du repère de la vue pointe alors dans la même direction que l'axe w du repère vue, soit la normale au plan image. Cependant, les axes x et y ne sont pas alignés sur les axes u et v du repère capteur. La rotation \mathbf{R}_θ effectue une rotation de θ autour de l'axe z du repère de la vue, ce qui permet de représenter un point du repère vue selon l'orientation du capteur. Cette rotation est inconnue et elle est différente pour chacune des vues. La figure 3.4 représente cette dernière rotation.

Les paramètres intrinsèques \mathbf{K} sont indépendants pour chacune des vues et ils sont les mêmes que ceux du modèle présenté précédemment (équation 3.2), à l'exception de β qui est égale à α , puisque les échelles en u et v sont supposés égales. La matrice des paramètres intrinsèques utilisée est donc la suivante :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Ce modèle n'est pas parfait et les manques du modèle (p.e. la distorsion, capteur non linéaire, transformation rigide) sont réduits à l'aide d'une table d'interpolation.

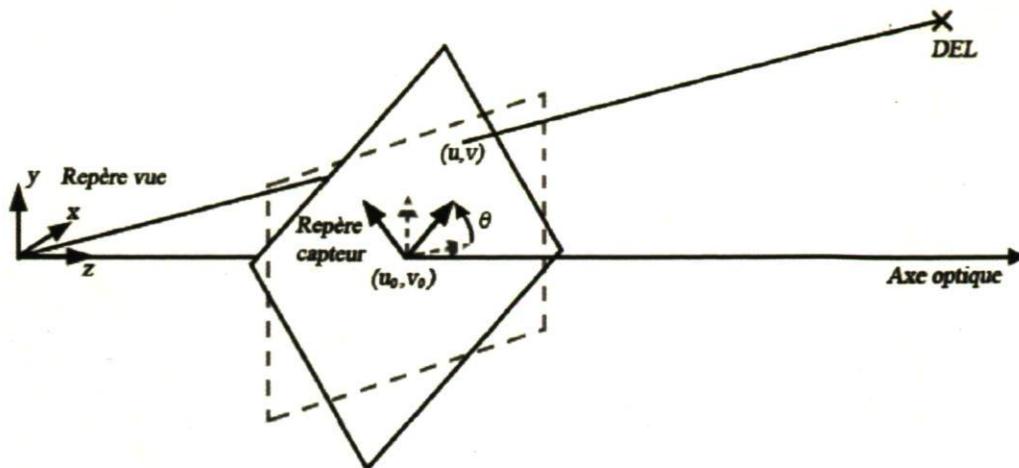


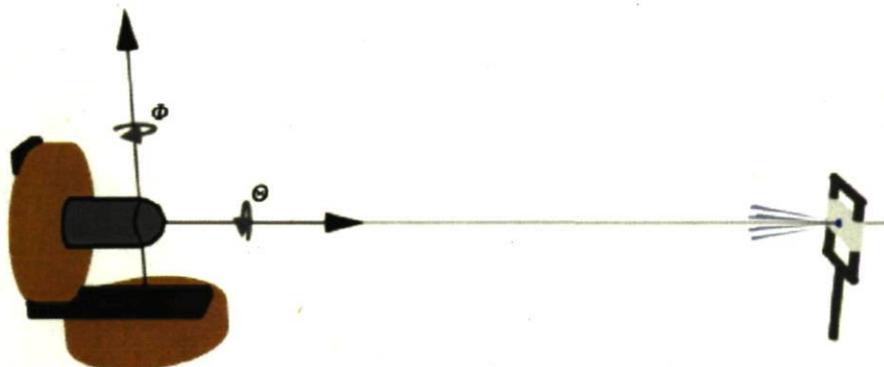
Figure 3.4 – Représentation de la rotation θ autour de l'axe z .

Cette table permet de convertir une mesure en mesure idéale (et vice-versa) grâce à une interpolation bilinéaire effectuée sur la mesure (ou la mesure idéale). La table est construite à partir des différences entre les mesures de la calibration et la prédiction du modèle. Ces différences sont ensuite interpolées pour construire une grille uniforme de 25×25 .

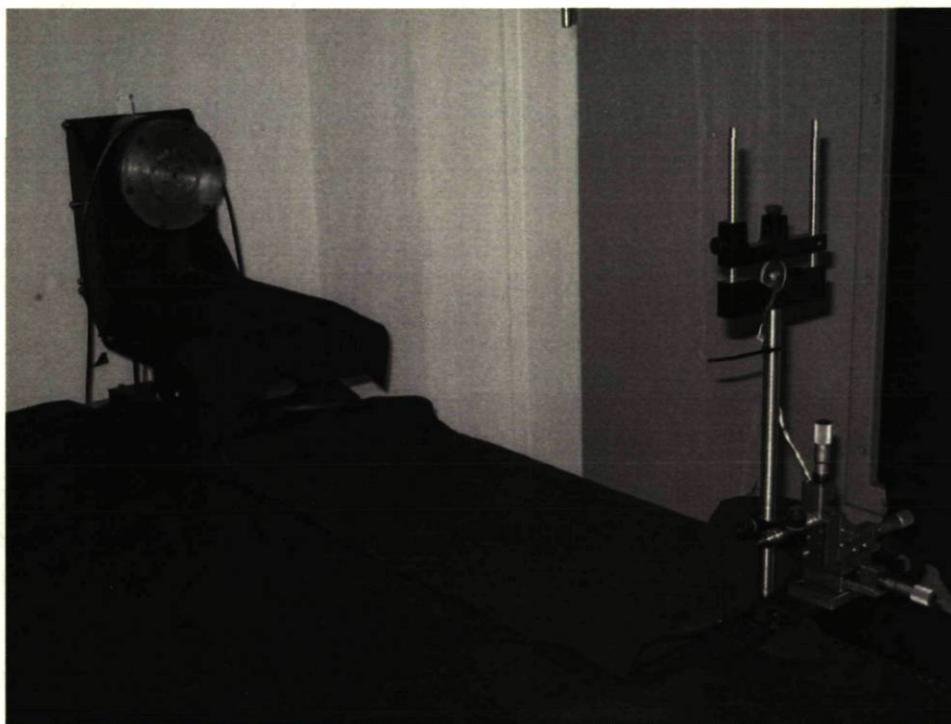
Pour chacune des vues, les paramètres α , u_0 , v_0 , θ et la table d'interpolation sont inconnus. Ils sont trouvés grâce la méthode de calibration présentée à la section suivante.

3.3 La méthode de calibrage

Afin de mieux comprendre la méthode de calibrage, une visite a été effectuée dans les locaux de 3rdTech ainsi qu'à l'University of North Carolina (UNC) à Chapel Hill, où le projet a pris naissance. La méthode de calibrage a été développée par l'UNC et le matériel se trouve toujours dans leurs locaux. La méthode de calibrage consiste à tourner le HiBall autour du repère HiBall et à prendre des mesures d'une DEL fixe. Pour ce faire, le HiBall est vissé sur un ensemble de deux moteurs, appelé *goniomètre*, ce qui permet d'orienter le HiBall selon deux axes, soit l'azimut (Θ) et l'élévation (Φ). Le système a été construit afin que le croisement des deux axes de rotation des moteurs soit approximativement le même point que l'origine voulue du repère HiBall. La position de la DEL peut être obtenue facilement en coordonnées sphériques, puisque la DEL est à une distance fixe du repère global. La figure 3.5(a) montre un schéma du montage et la figure 3.5(b) est une photo du montage réel.



(a)



(b)

Figure 3.5 – Montage pour la calibration. (a) Schéma du montage. (b) Photo du montage actuel à l'UNC.

La procédure consiste donc à prendre des mesures avec les différents capteurs à différentes positions angulaires et pour des distances différentes de DEL. Trois distances de DEL sont prises, 0,6 m, 1,0 m et 1,4 m, ce qui permet d'obtenir un meilleur modèle. Les positions angulaires sont préprogrammées pour obtenir une mesure à toutes les six minutes d'arc ($0,1^\circ$) selon les deux axes pour toutes les vues avec une précision de 20 secondes d'arc ($0,0056^\circ$) pour chaque position. Cet ensemble de positions permet d'obtenir plus de 2500 mesures pour chacune des 26 vues. De plus, chaque mesure est prise 100 fois afin de diminuer le bruit et de connaître son écart-type.

Au départ, la DEL est positionnée à la main à la distance désirée sur un rail millimétrique. L'imprécision due au positionnement de la DEL sur le rail n'est pas importante, car, peu importe la distance de la DEL, cette dernière sera vue au même endroit puisque le repère HiBall et le repère global sont confondus. Ensuite, la DEL est alignée avec l'axe de l'azimut, Θ . Ceci est fait manuellement et avec l'aide d'un logiciel. Tout d'abord, le HiBall effectue une rotation de 360° autour de l'axe Θ et des mesures sont prises à intervalle régulier. À partir du cercle obtenu, la DEL est centrée avec le milieu de ce cercle à l'aide de vis micrométrique, ce qui permet de déplacer la DEL précisément dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. La procédure d'alignement est recommencée jusqu'à ce que les mesures ne représentent plus un cercle.

Puisque le repère HiBall et le repère global sont confondus, la position de la DEL est donc connue dans le repère HiBall, donc, l'équation 3.16 devient alors :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{K}\mathbf{R}_\theta\mathbf{R}_{cap}\mathbf{T}_{cp}\mathbf{d}. \quad (3.19)$$

Ce système est résolu à partir de l'ensemble de mesures recueillies et de la méthode présentée à la section 3.1.1. Par la suite, une table d'interpolation est créée pour chacune des trois distances à partir des coordonnées mesurées et des coordonnées obtenues avec le modèle.

3.4 Conclusion

En résumé, le modèle interne de chacune des vues du HiBall est basé sur le modèle du sténopé. Les différentes vues sont mises en commun à l'aide des caractéristiques mécaniques du HiBall qui permettent de déterminer les centres de projection des lentilles et les positions des capteurs. Une méthode de calibrage permet de récupérer les différents paramètres du modèle. Cette méthode consiste à prendre un ensemble de mesures d'une DEL pour chacune des vues. La DEL est fixée sur un rail millimétrique et sa position est obtenue en coordonnées sphériques grâce à deux moteurs qui permettent au HiBall

de tourner autour de son origine et ce point est le centre du dodécaèdre. Dans les chapitres suivants, il sera montré que l'utilisation des caractéristiques mécaniques pour déterminer les centres de projection des lentilles ainsi que les positions des capteurs n'est pas adéquate pour atteindre la précision voulue. De plus, au niveau du montage, il est fort probable que les axes de rotation des moteurs ne se croisent pas, ce qui cause une erreur de positionnement de la DEL, puisqu'au lieu d'une rotation pure, la DEL effectue une translation et une rotation.

Chapitre 4

Étalonnage des positions des DEL

La méthode fournie par le fabricant est facile à appliquer, mais après des observations faites par Y. Martin [14], l'erreur sur la pose varie grandement selon la position sous le plafond, ce qui permet de supposer que la qualité de l'étalonnage des positions des DEL n'est pas uniforme.

Contrairement à la méthode d'autocalibrage, qui est basée sur une seule mesure à la fois, la méthode d'étalonnage proposée permet de positionner les DEL selon l'ensemble des mesures prises de toutes les DEL. De plus, elle n'utilise pas le modèle de prédiction du mouvement, ce qui permet de retirer l'hypothèse du bruit gaussien sur le déplacement du HiBall (équation 2.5).

La méthode proposée consiste, tout d'abord, à recueillir des mesures des DEL sur les capteurs et, ensuite, à traiter ces données à l'aide d'une méthode appelée « *bundle adjustment* » afin d'obtenir les positions des DEL. Le « *bundle adjustment* » est basé sur l'optimisation non linéaire de moindres carrés et il utilise la géométrie projective et la stéréoscopie multivue pour permettre l'étalonnage des DEL.

Ce chapitre expliquera tout d'abord la méthode de traitement des données ainsi que l'optimisation non linéaire afin de mieux comprendre la mécanique qui permet d'étalonner les positions des DEL. Le traitement des données sera suivi de la prise de mesures, de la méthode de validation et des résultats obtenus.

4.1 Le traitement des données

Comme il est montré à la section 3.1.1, la géométrie projective permet de récupérer la pose du HiBall à partir des positions des DEL et de plusieurs mesures prises sur les capteurs. Tout comme pour la pose, il est impossible de connaître la position d'une DEL à partir d'une seule mesure, mais cela devient possible avec plusieurs mesures. À partir d'une seule mesure, la droite passant par la position de la DEL et le centre de projection de la lentille peut être trouvée. Une autre droite peut aussi être obtenue à partir d'une autre mesure prise d'un point de vue différent. La position de la DEL sera située à l'intersection de ces deux droites. Ce principe est la base de la stéréoscopie multivue et il permet de déterminer la position d'une DEL à partir d'un minimum de deux mesures prises à des endroits différents et connus. En pratique, les deux droites ne se croisent pas à cause des erreurs de mesure et de l'imprécision des poses. C'est pourquoi il est nécessaire d'obtenir plusieurs mesures et de prendre la meilleure position qui sera, dans ce cas-ci, la position qui minimisera le carré de l'erreur de reprojection de la DEL sur les capteurs (équation 3.10). Un problème persiste cependant, car les poses du HiBall ne sont pas connues parfaitement. Il sera donc nécessaire d'utiliser une méthode qui permettra aussi de retrouver les poses du HiBall.

4.1.1 L'optimisation non linéaire

La méthode utilisée est l'optimisation non linéaire. Cette méthode est utilisée dans plusieurs domaines, par exemple, en économie pour augmenter le rendement d'un portefeuille, en robotique pour optimiser une trajectoire ou en géomatique pour ajuster un ensemble de données géodésiques. Dans ce cas-ci, la méthode choisie est plus précisément le « *bundle adjustment* ». Le « *bundle adjustment*¹ » est, par définition, une méthode appliquée au problème du raffinage d'une reconstruction visuelle pour produire *conjointement* une estimation *optimale* d'une structure 3D et des paramètres des vues [20]. Pour l'étalonnage des positions des DEL, la structure 3D correspond à l'ensemble des DEL et les paramètres des vues sont les poses du HiBall. Le terme *optimale* signifie que la solution trouvée minimise une fonction objective qui quantifie l'erreur du problème et le terme *conjointement* signifie que les positions des DEL et les poses du HiBall seront trouvées simultanément.

Il est effectivement possible de résoudre l'ensemble des inconnues grâce à la dua-

1. Puisqu'aucun équivalent français au terme « *bundle adjustment* » n'a été trouvé et que cette méthode est un cas particulier de l'optimisation non linéaire, le terme optimisation non linéaire sera utilisé.

lité entre les positions des DEL et les poses du HiBall. Les positions des DEL sont contraintes par les poses du HiBall, puisque les DEL sont observées à partir de plusieurs points de vue et les poses du HiBall sont contraintes par les positions des DEL, puisque plusieurs DEL sont observées pour chacune des poses.

Il existe plusieurs algorithmes pour résoudre un problème d'optimisation non linéaire, mais ils sont tous itératifs [13]; c.-à-d. qu'à partir d'une approximation de départ \mathbf{x}_0 , une série de vecteurs, $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots$, sont produits afin de converger vers une solution \mathbf{x}^+ de la fonction non linéaire de moindres carrés :

$$F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x}), \quad (4.1)$$

où $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ est une fonction vectorielle non linéaire $\mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$. En général, le minimum global \mathbf{x}^+ est très difficile à trouver [13]. C'est pourquoi le problème est réduit à un cas plus simple, soit de trouver le minimum local \mathbf{x}^* qui donnera la valeur de $F(\mathbf{x})$ minimum à l'intérieur d'une certaine région dont la grandeur est donnée par δ , un petit nombre positif :

$$F(\mathbf{x}^*) \leq F(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{x} \mid \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| < \delta. \quad (4.2)$$

La solution trouvée sera donc dépendante de l'approximation de départ.

L'algorithme utilisé est la méthode *Dog Leg* (dl) développée par Powell [17]. Cette dernière fonctionne avec une combinaison linéaire des directions de la méthode du gradient² (gd) et de la méthode de Gauss-Newton (gn). Ces méthodes possèdent une structure similaire, soit à chaque itération, à partir de la solution précédente, un pas \mathbf{h} est trouvé afin d'atteindre la nouvelle solution, $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{h}$ et les itérations se poursuivent jusqu'à ce que la solution soit trouvée.

La méthode du gradient

La méthode du gradient utilise la direction de recherche :

$$\mathbf{d}_{gd} = -\nabla F(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x}), \quad (4.3)$$

où $\nabla F(\mathbf{x})$, $m \times 1$, est le *gradient* de $F(\mathbf{x})$,

$$\nabla F(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_1}(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

2. Cette méthode est aussi appelée la *méthode de la plus grande pente* (*steepest descent*).

et $\mathbf{J}(\mathbf{x})$, $n \times m$, est la matrice jacobienne de $\mathbf{f}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_1}(\mathbf{x}) \cdots \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \right]. \quad (4.5)$$

Cette direction est la *meilleure localement* pour converger vers la solution. Puisque \mathbf{d}_{gd} ne représente seulement qu'une direction, il est nécessaire de trouver la longueur α du pas à effectuer afin de s'approcher le plus possible de la solution. Cette longueur est trouvée par une recherche linéaire (*line search*) [13] et le pas devient :

$$\mathbf{h}_{gd} = \alpha \mathbf{d}_{gd}. \quad (4.6)$$

La recherche linéaire permet d'obtenir le plus grand pas possible tout en approximant $F(\mathbf{x})$. Le problème est alors unidimensionnel et il devient :

$$\varphi(\alpha) = F(\mathbf{x} + \alpha \mathbf{d}), \quad (4.7)$$

où $\alpha > 0$. La valeur α est trouvée itérativement et généralement, si une valeur α diminue substantiellement $F(\mathbf{x})$, cette valeur sera acceptée.

L'avantage de cette méthode est de toujours trouver une direction \mathbf{d}_{gd} qui convergera vers la solution optimale, mais sa lenteur à converger rend la méthode moins intéressante. Le lecteur est invité à lire [13], [16] et [18] pour plus de détails.

La méthode de Gauss-Newton

La méthode de Gauss-Newton est basée sur l'approximation linéaire de $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ dans le voisinage de \mathbf{x} . Donc, pour un petit pas \mathbf{h} , l'expansion en série de Taylor de $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ donne :

$$\mathbf{f}(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \simeq \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{h}, \quad (4.8)$$

En substituant 4.8 à 4.1, l'approximation linéaire $L(\mathbf{h})$ de $F(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ devient :

$$F(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \simeq L(\mathbf{h}) = F(\mathbf{x}) + \mathbf{h}^T \mathbf{J}^T \mathbf{f} + \frac{1}{2} \mathbf{h}^T \mathbf{J}^T \mathbf{J} \mathbf{h}, \quad (4.9)$$

où $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$ et $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x})$. À partir de cette approximation, il est possible de déterminer que la meilleure direction de recherche sera obtenue par [13] :

$$\mathbf{d}_{gn} = -(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{f}. \quad (4.10)$$

La longueur du pas est ensuite trouvée par une recherche linéaire et le pas devient :

$$\mathbf{h}_{gn} = \alpha \mathbf{d}_{gn}. \quad (4.11)$$

Au contraire de la méthode du gradient, cette méthode converge rapidement vers une solution, cependant cette méthode n'est pas efficace pour trouver la solution globale. Le lecteur est invité à lire [13], [16] et [18] pour plus de détails.

La méthode *Dog Leg*

L'algorithme *Dog Leg* fait partie des méthodes de la région de confiance (*trust region*) et suppose que le modèle linéaire $L(\mathbf{h})$ (équation 4.9) représente avec suffisamment de précision la fonction objective à l'intérieur d'une sphère de rayon Δ , centrée sur \mathbf{x} . Chaque déplacement est alors calculé comme suit :

$$\mathbf{h}_{dl} = \arg \min_{\|\mathbf{h}\| \leq \Delta} \{L(\mathbf{h})\}. \quad (4.12)$$

Le problème consiste alors à minimiser $L(\mathbf{h})$ selon la contrainte $\mathbf{h}^T \mathbf{h} \leq \Delta^2$. Powell a proposé une combinaison linéaire des directions données par les méthodes du gradient et de Gauss-Newton contrôlée par le rayon de la région de confiance. Le pas \mathbf{h}_{gd} devient alors :

$$\mathbf{h}_{gd} = \alpha \mathbf{d}_{gd}, \quad (4.13)$$

où le modèle $L(\mathbf{h})$ est minimal pour $\alpha = \frac{\|\mathbf{J}^T \mathbf{f}\|^2}{\|\mathbf{J} \mathbf{J}^T \mathbf{f}\|^2}$. Tandis que le pas \mathbf{h}_{gn} est obtenu par l'équation 4.11 avec $\alpha = 1$:

$$\mathbf{h}_{gn} = \mathbf{d}_{gn}. \quad (4.14)$$

Le pas \mathbf{h}_{dl} est ensuite choisi selon la stratégie décrite à l'algorithme 4.1. Si le pas de la méthode de Gauss-Newton est à l'intérieur de la région de confiance, ce pas est choisi. Si ce n'est pas le cas, mais que le pas de la méthode du gradient est à l'extérieur de la région de confiance, la direction du gradient est choisie avec une norme de Δ , soit le rayon de la région de confiance. Cependant, si le pas de Gauss-Newton est à l'extérieur et que celui du gradient est à l'intérieur, une combinaison linéaire des deux pas est choisie de sorte que le pas soit à l'intersection de la région de confiance et du segment formé par les deux pas. La figure 4.1 représente ce dernier cas.

Algorithme 4.1 : Stratégie pour le choix du pas \mathbf{h}_{dl}

```

si  $\|\mathbf{h}_{gn}\| \leq \Delta$ 
   $\mathbf{h}_{dl} = \mathbf{h}_{gn}$ 
sinon si  $\|\mathbf{h}_{gd}\| \geq \Delta$ 
   $\mathbf{h}_{dl} = \frac{\Delta}{\|\mathbf{h}_{gd}\|} \mathbf{h}_{gd}$ 
sinon
   $\mathbf{h}_{dl} = \mathbf{h}_{gd} + \beta(\mathbf{h}_{gn} - \mathbf{h}_{gd})$ 
  où  $\beta$  est choisi pour que  $\|\mathbf{h}_{dl}\| = \Delta$ 
  voir [17] et [13] pour plus de détail sur  $\beta$ 
fin
```

Une fois le pas choisi, le modèle linéaire $L(\mathbf{h}_{dl})$ est alors testé afin de valider le rayon de la région de confiance. Cette décision est prise à partir du ratio ϱ :

$$\varrho = \frac{F(\mathbf{x}) - F(\mathbf{x} + \mathbf{h}_{dl})}{L(\mathbf{0}) - L(\mathbf{h}_{dl})}. \quad (4.15)$$

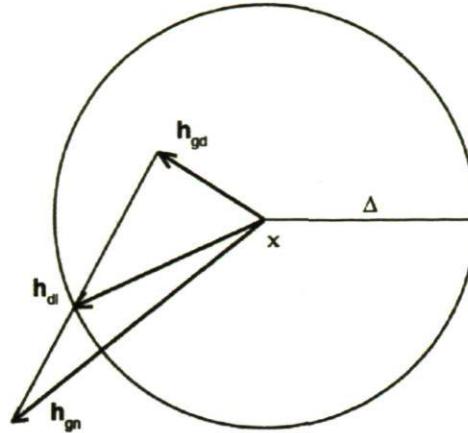


Figure 4.1 – Le pas \mathbf{h}_{dl} dans le cas où le pas \mathbf{h}_{gn} est à l'extérieur de la région de confiance et le pas \mathbf{h}_{gd} est à l'intérieur de celle-ci.

Ce ratio représente le rapport entre la variation de la fonction F et le modèle L centré sur \mathbf{x} pour le pas \mathbf{h}_{dl} . Si ce ratio est grand, cela signifie que le modèle représente bien $F(\mathbf{x})$ pour le rayon Δ . Le rayon est alors augmenté et un pas plus grand pourra être choisi, donc plus près du pas de Gauss-Newton. Par contre, si le ratio est petit ou même négatif, le rayon sera diminué et un pas plus petit devra être choisi. Le pas sera alors plus près du pas du gradient.

L'algorithme 4.2 résume la méthode complète à partir de \mathbf{x}_0 , une estimation de la solution, et d'une valeur pour Δ_0 (une valeur de 1 est proposée par [11]). Pour chaque itération, le pas \mathbf{h}_{dl} est calculé selon l'algorithme 4.1. Par la suite, le ratio ρ est calculé à partir de l'équation 4.15. Si ce ratio est plus grand que 0, le pas est alors considéré valide et la valeur de \mathbf{x} est augmentée par le pas \mathbf{h}_{dl} . Si la valeur de ρ est entre 0 et 0,25, Δ est réduit de moitié et si ρ se situe au dessus de 0,75, la valeur de Δ est augmentée à la valeur maximale entre Δ et trois fois la longueur du pas \mathbf{h}_{dl} . Les itérations se terminent lorsque le nombre maximal d'itérations (k_{max}) est atteint ou qu'une solution est trouvée. Une solution est trouvée lorsque $\|\mathbf{f}\|$ est inférieure à un seuil prédéterminé ϵ_1 , $\|\mathbf{g}\|$ est inférieure à ϵ_2 ou que soit $\|\mathbf{h}_{dl}\|$ ou Δ est inférieur au seuil ϵ_3 .

L'optimisation non linéaire permet donc de retrouver autant les positions des DEL que les positions du HiBall en minimisant une fonction objective à partir d'une approximation du vecteur d'état.

Algorithme 4.2 : La méthode Dog Leg

Entrées : $k = 0$
 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$
 $\Delta = \Delta_0$
 $\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}$
fini = ($\|\mathbf{f}\| \leq \epsilon_1$) ou ($\|\mathbf{g}\| \leq \epsilon_2$)

Sorties : $\mathbf{x}^+ = \mathbf{x}$

tant que (non *fini*) et ($k < k_{max}$)
 $k = k + 1$
 Calculer \mathbf{h}_{dl} selon l'algorithme 4.1
si $\|\mathbf{h}_{dl}\| \leq \epsilon_3$
fini = vrai
sinon
 Calculer ρ selon l'équation 4.15
si $\rho > 0$
 $\mathbf{x} = \mathbf{x} + \mathbf{h}_{dl}$
 $\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}$
fini = ($\|\mathbf{f}\| \leq \epsilon_1$) ou ($\|\mathbf{g}\| \leq \epsilon_2$)
fin
si $\rho > 0,75$
 $\Delta = \max\{\Delta, 3 * \|\mathbf{h}_{dl}\|\}$
sinon si $\rho < 0,25$
 $\Delta = \Delta/2$
fini = $\Delta \leq \epsilon_3$
fin
fin
fin

La fonction objective

La fonction objective $F(\mathbf{x})$ permet de quantifier la qualité des paramètres (inconnues) en cours de recherche. La fonction utilisée est la somme des erreurs de reprojection au carré :

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in D} \|\mathbf{u}_i - \mathbf{z}(\mathbf{x}_i)\|^2, \quad (4.16)$$

où \mathbf{x} est l'ensemble des inconnues, D représente l'ensemble des mesures des DEL et $\mathbf{z}(\bullet)$ est le modèle de projection (équation 3.19). La fonction objective permet donc de transformer les poses du HiBall et les positions des DEL en une seule valeur d'erreur.

Le vecteur d'état

Le vecteur d'état contient l'ensemble des inconnues de la fonction objective. Il est composé des positions des DEL et des poses du HiBall.

Les positions des DEL sont ajoutées telles quelles au vecteur d'état, puisque, pour chaque position, les éléments x , y et z sont indépendants. Cependant, pour les poses, il n'est pas possible d'inclure l'ensemble des éléments de chacune des matrices dans le vecteur d'état. Ces matrices doivent respecter la contrainte de la conservation des distances relatives. Cette contrainte signifie que pour un nuage de points, les distances entre chacun des points doivent être les mêmes après la transformation. Ces matrices doivent donc être paramétrées et, idéalement, le nombre de paramètres doit être égal au nombre de degrés de liberté que possèdent ces matrices, soit six paramètres. Comme il est mentionné à la section 3.1, une matrice de transformation peut être décomposée en une translation et une rotation pour un total de six degrés de liberté. La translation est ajoutée directement au vecteur d'état, tandis que la rotation est ajoutée sous la forme axe et angle. Cette forme n'utilise que trois paramètres des neuf valeurs de la matrice de rotation et elle offre l'avantage de n'avoir qu'une seule singularité, à 2π , qui peut être facilement contournée [12][7]. La forme axe et angle consiste en un axe \mathbf{e} (vecteur de norme unitaire) autour duquel est effectuée la rotation et d'un angle ϕ correspondant à l'amplitude de la rotation. L'équation suivante est la représentation vectorielle de cette forme :

$$\mathbf{r} = \phi \mathbf{e}. \quad (4.17)$$

La forme axe et angle est obtenue à partir de la matrice de rotation, \mathbf{R} , comme suit :

$$\phi = \arccos \frac{\text{tr}(\mathbf{R}) - 1}{2} \text{ et} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{e} = \frac{\text{vect}(\mathbf{R})}{\sin \phi}. \quad (4.19)$$

Les fonctions $\text{tr}(\mathbf{R})$ et $\text{vect}(\mathbf{R})$ sont respectivement la trace et le vecteur de \mathbf{R} qui sont définis par :

$$\text{tr}(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^3 r_{ii} \text{ et} \quad (4.20)$$

$$\text{vect}(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

où r_{ij} est l'élément ij de \mathbf{R} . À l'inverse, la forme matricielle est obtenue à partir de la

forme axe et angle comme suit :

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \frac{\sin\|\mathbf{r}\|}{\|\mathbf{r}\|} [\mathbf{r}]_x + \frac{(1 - \cos\|\mathbf{r}\|)}{\|\mathbf{r}\|^2} [\mathbf{r}]_x^2, \quad (4.22)$$

où $[\mathbf{r}]_x$ est la matrice antisymétrique de \mathbf{r} qui est définie par :

$$[\mathbf{r}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -r_x & r_y \\ r_x & 0 & -r_z \\ -r_y & r_z & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Finalement, afin que l'ensemble des poses du HiBall et des positions des DEL soient fixes par rapport à un repère dans l'espace, l'origine et les axes doivent être fixés. Ceci est fait en choisissant la première pose du HiBall à sa valeur estimée comme repère global de référence.

Le vecteur d'état est donc composé comme suit :

$$\mathbf{x} = [\mathbf{t}_{P_2}^T \ \mathbf{r}_{P_2}^T \ \dots \ \mathbf{t}_{P_m}^T \ \mathbf{r}_{P_m}^T \ \mathbf{d}_1^T \ \dots \ \mathbf{d}_n^T]^T, \quad (4.24)$$

où \mathbf{t}_{P_i} et \mathbf{r}_{P_i} correspondent à la translation et à la rotation paramétrée de la pose i respectivement, m correspond au nombre de poses et n correspond au nombre de DEL.

Comme il est mentionné précédemment, l'optimisation non linéaire exige de connaître une solution initiale au problème, \mathbf{x}_0 . Pour les positions des DEL, il s'agit simplement du plafond uniforme qui est obtenu avec le logiciel du fabricant à partir des caractéristiques mécaniques et des consignes d'installation. Tandis que pour les poses du HiBall, comme il sera mentionné ultérieurement, il s'agit de la moyenne des poses obtenues par l'algorithme SCAAT.

Les problèmes de grande dimension

L'utilisation de l'optimisation non linéaire fonctionne pour des problèmes de toutes tailles, mais lorsqu'elle est utilisée sur des problèmes de grande dimension il est nécessaire de faire usage de quelques astuces. En premier lieu, la fonction objective utilisée pour ce problème est trop complexe pour trouver la matrice jacobienne analytiquement, cette dernière doit donc être calculée numériquement comme suit :

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_i}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{x}_{+\delta}) - \mathbf{f}(\mathbf{x}_{-\delta})}{2\delta}, \quad (4.25)$$

où δ est un léger déplacement et $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{+\delta})$ est la fonction $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ évaluée en \mathbf{x} à l'exception de x_i qui prend la valeur $x_i + \delta$ et similairement pour $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{-\delta})$, avec $x_i = x_i - \delta$.

En second lieu, la fonction objective comporte un grand nombre d'inconnues, ce qui cause un problème au niveau du temps de calcul et de l'espace mémoire surtout lors du calcul de la matrice jacobienne. Pour ce problème, cette matrice comporte près d'un milliard d'éléments, ce qui veut dire tout près de 2 milliards de fois l'évaluation de la fonction objective et de 8 Go de mémoire (double précision). Cependant, cette matrice ne comporte essentiellement que des 0 (> 99%). Cette particularité provient du fait que pour chaque pose, seulement un petit groupe de DEL est vu et le déplacement d'une DEL qui n'est pas dans le champ de vue du HiBall n'aura aucun impact sur le calcul de la pose à cet endroit. La figure 4.2 montre un exemple de la répartition des différentes valeurs non nulles de la matrice jacobienne. Les deux bandes à gauche représentent respectivement les translations et les rotations pour chacune des poses, tandis que l'ensemble de points à droite représente les DEL qui sont vues pour chacune des poses. L'utilisation d'un patron pour le calcul de la matrice jacobienne permet donc de diminuer le temps de calcul en ne calculant seulement que les valeurs non nulles. De plus, l'utilisation d'une matrice éparsée (*sparse matrix*) pour contenir la matrice jacobienne permet de diminuer grandement l'espace mémoire, car les valeurs nulles ne seront pas contenues en mémoire.

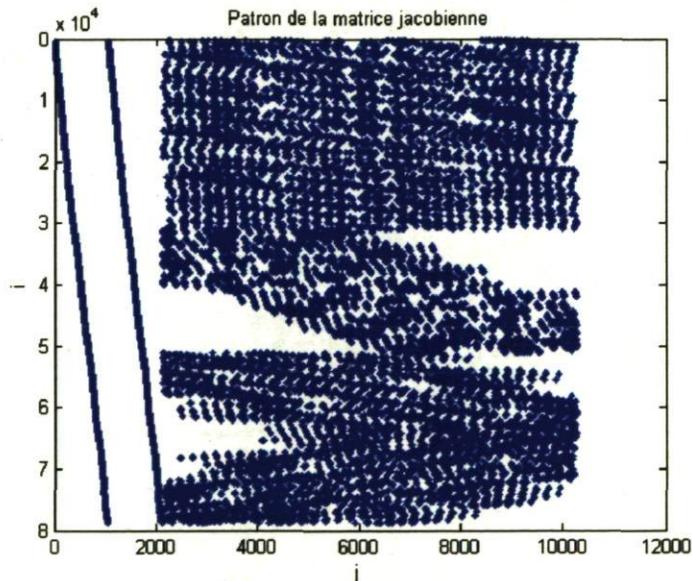


Figure 4.2 – Un exemple de la répartition des différentes valeurs non nulles de la matrice jacobienne. Chacune des lignes représente une mesure. La partie à gauche représente les translations et les rotations pour chacune des poses et la partie à droite représente les positions des DEL.

4.2 La méthodologie

4.2.1 La barre de calibrage

Dans le but de diminuer le nombre d'inconnues et d'ajouter davantage de contraintes, une barre, appelée *barre de calibrage*, a été fabriquée et utilisée. La barre est positionnée à plusieurs endroits sous le plafond et des mesures sont prises avec le HiBall aux différentes stations de la barre. Cette barre permet de connaître la norme du déplacement entre les poses du HiBall des différentes stations. Selon [28] l'utilisation de contraintes supplémentaires permet d'obtenir de meilleurs résultats lors de la reconstruction d'une structure 3D. De plus, cette barre permettra de valider le calibrage.

La barre de calibrage est composée de trois parties, un plateau sur lequel est fixé le HiBall, une barre possédant quatre stations (figure 4.3) et un trépied sur lequel est fixée la barre. Le plateau a deux tiges, une au centre et une en périphérie, ce qui permet de le fixer à une station sans qu'il ne puisse pivoter. Chacune des stations de la barre est percée de cinq trous, un au centre et quatre en périphérie, ce qui permet de positionner le plateau selon quatre orientations différentes, soit 0, 90, 180 et 270 °. Les quatre stations et orientations permettent, par conséquent, de positionner le HiBall selon 16 poses distinctes. De plus, la barre de calibrage a été conçue de manière à ce que la transformation entre chacune des stations, pour une même orientation, soit une translation pure de norme connue, ce qui permettra de contraindre les poses lors de l'étalonnage des positions des DEL. Puisque la norme est connue, il sera aussi possible de valider l'étalonnage des positions des DEL en comparant la distance entre les poses du HiBall sur la barre et la norme connue.

Étant donné qu'entre chaque station de la barre, pour une même orientation, la transformation est une translation pure de norme connue, il est possible de connaître, pour une même orientation, les positions du HiBall aux stations deux, trois et quatre à partir de la pose du HiBall à la première station. De plus, il est possible de contraindre l'optimisation pour que la distance entre les poses de chacune des stations soit égale à la norme connue. Il est donc possible d'exprimer les 16 poses du HiBall à partir des quatre poses à la première station et des 12 transformations reliant chacune des stations à la première station ayant la même orientation.

Donc, pour les n positions de barre utilisées et les m DEL au plafond, les paramètres à optimiser sont :

- les m positions des DEL, $[x \ y \ z]^T$, soit $3m$ paramètres ;
- les $4n - 1$ poses du HiBall aux premières stations pour les quatre orientations (à

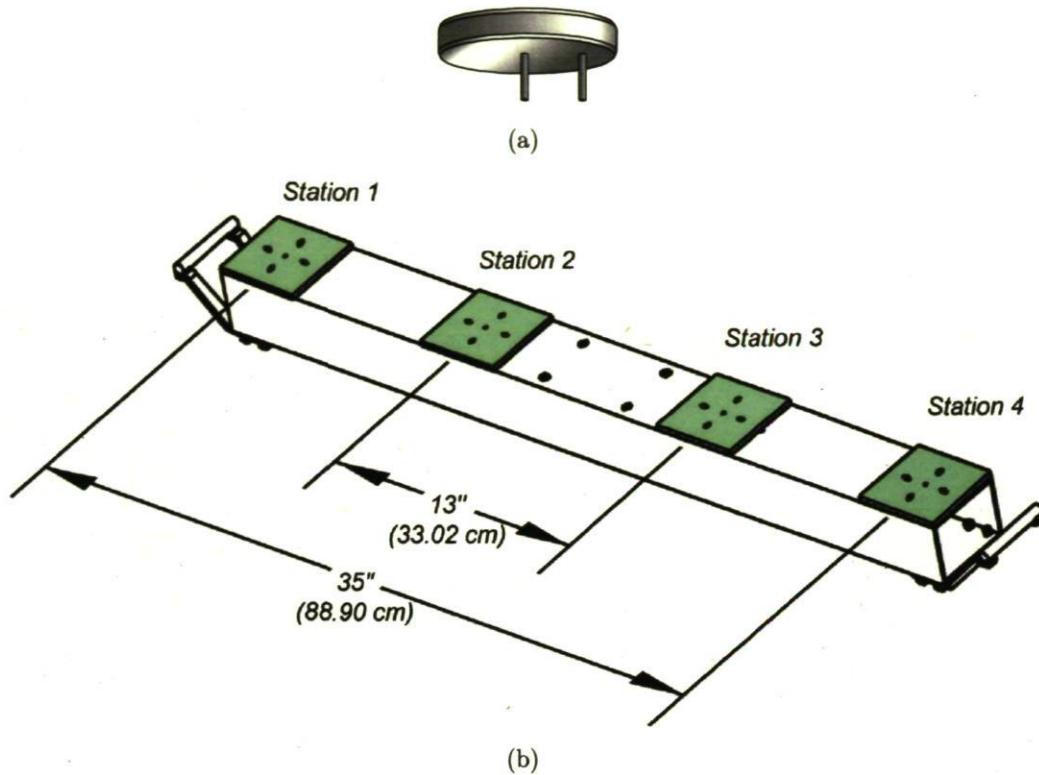


Figure 4.3 – Les figures sont tirées de [14]. (a) Le HiBall est fixé sur le dessus d'un plateau comme celui-ci. Le plateau comporte deux tiges, ce qui permet de le bloquer selon l'orientation voulue. (b) La barre, fixée sur un trépied, est percée de cinq trous à chaque station. Le trou du centre permet de positionner le plateau et les quatre trous en périphérie permettent de positionner selon quatre orientations différentes.

l'exception de la première pose), où chacune des poses est représentée par une translation, \mathbf{t}_P , et une rotation paramétrée, \mathbf{r}_P ;

- les 12 translations, $[x \ y \ z]^T$, reliant chacune des stations à la première station pour chacune des orientations, donc 36 paramètres. Ces derniers sont indépendants du nombre de positions de barre, puisqu'ils sont les mêmes peu importe la position de la barre.

Pour un total de $3m + (4n - 1) + 36$ paramètres.

Le vecteur d'état devient alors :

$$\mathbf{x} = [\mathbf{t}_{T(2,0)}^T \ \mathbf{t}_{T(2,90)}^T \ \mathbf{t}_{T(2,180)}^T \ \mathbf{t}_{T(2,270)}^T \ \dots \ \mathbf{t}_{T(4,270)}^T \ \mathbf{r}_{P_2}^T \ \mathbf{r}_{P_2}^T \ \dots \ \mathbf{r}_{P_n}^T \ \mathbf{r}_{P_n}^T \ \mathbf{d}_1^T \ \dots \ \mathbf{d}_m^T]^T, \quad (4.26)$$

où $\mathbf{t}_{T(i,j)}^T$ est la translation associée à la station i pour l'orientation j , \mathbf{t}_{P_i} et \mathbf{r}_{P_i} sont respectivement la translation et la rotation paramétrée désignant la pose de la barre à

la position i et \mathbf{d}_i correspond à la position de la $i^{\text{ème}}$ DEL.

Le calcul des transformations

Les estimations initiales des 12 translations sont calculées à partir des poses données par l'algorithme SCAAT. Pour ce faire, il suffit de trouver les transformations $\mathbf{T}_{(1,j) \rightarrow (i,j)}^k$ entre les stations 1 et i pour l'orientation j à la position de barre k :

$$\mathbf{T}_{(1,j) \rightarrow (i,j)}^k = [\mathbf{T}_{(i,j)}^k]^{-1} \mathbf{T}_{(1,j)}^k,$$

où $\mathbf{T}_{(i,j)}^k$ est la transformation rigide correspondant à la pose du HiBall dans le repère global à la station i pour l'orientation j pour la position de barre k . Ensuite, la norme de la translation entre les stations 1 et i est obtenue en calculant la moyenne des translations entre les stations 1 et i pour toutes les positions de barre k et l'ensemble des translations sont multipliées par le facteur d'échelle, η , entre la moyenne des normes entre les stations 1 et i , $\eta_{solution}$, et la valeur connue grâce aux caractéristiques de la barre de calibrage, η_{connue} :

$$\eta = \frac{\eta_{solution}}{\eta_{connue}}.$$

De plus, puisque la transformation est une translation pure, la rotation correspond à la matrice identité.

4.2.2 Le choix des positions de la barre

Les positions de la barre ont été choisies afin d'observer au minimum deux fois chacune des DEL, puisqu'il s'agit du minimum requis pour pouvoir optimiser la position d'une DEL. Le choix des positions de la barre a été développé par un autre étudiant, Yoakim Martin, et l'ensemble des positions retenues représente une forme de croix composée de 14 positions de barre, ce qui correspond à 224 positions de HiBall. La figure 4.4 montre la disposition des emplacements de la barre et du HiBall.

4.2.3 Les observations

La prise de mesures a été effectuée à partir d'une modification du logiciel du HiBall et de la création d'une interface de visualisation que j'ai développées. La figure 4.5 montre l'interface. Cette dernière permet de connaître la position du HiBall, son champ de vue et le nombre de fois que chacune des DEL a été observée.

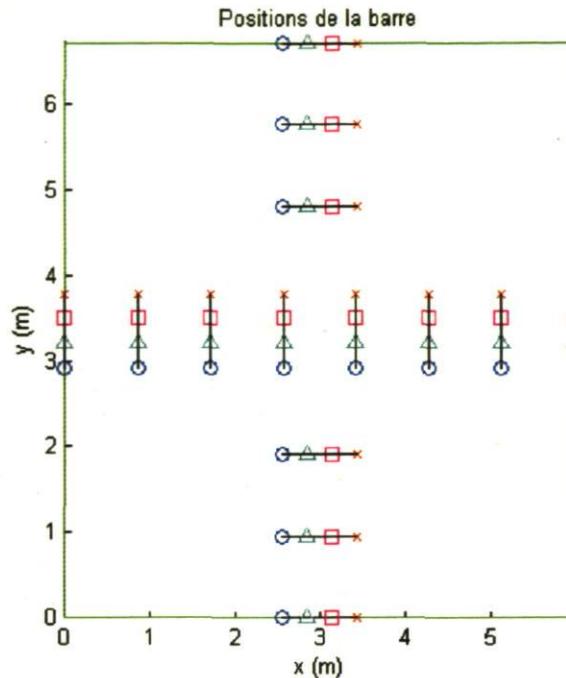


Figure 4.4 – Disposition des 14 positions de la barre. Le rectangle vert délimite l'ensemble des DEL. Les cercles bleus, les triangles cyan, les carrés magenta et les « x » rouges représentent les stations 1, 2, 3 et 4 respectivement.

Pour chacune des positions de la barre, le HiBall est positionné à la station 1 et à l'orientation 0° . En premier lieu, une estimation de la pose du HiBall est calculée en moyennant 1000 poses obtenues avec l'algorithme SCAAT. Le nombre de positions est arbitraire et, puisque le système produit jusqu'à 2000 poses à la seconde, 1000 positions est un compromis entre le temps et le nombre de positions. À partir de l'estimation de la position du HiBall, le logiciel recherche toutes les DEL qui sont dans son champ de vue et moyenne 100 mesures pour chacune des DEL, ce qui permet de diminuer l'incertitude sur la mesure et cette valeur correspond aussi au nombre de mesures utilisées lors du calibrage des paramètres intrinsèques. En moyenne, à chaque position, environ 150 DEL sont observées. Une fois la mesure terminée, le HiBall est déplacé à la station 2, toujours avec l'orientation 0° . Une estimation de la position est à nouveau calculée et la prise de mesures est effectuée pour l'ensemble des DEL qui se trouvent à l'intérieur du champ de vue du HiBall. Ensuite, la même procédure est appliquée pour les stations 3 et 4. Une fois la prise de mesures à la station 4 terminée, la prise de mesures recommence aux quatre stations à l'orientation 90° , 180° et, finalement, 270° . Une fois la prise de mesures terminée pour les 16 positions de HiBall sur la barre, la barre est déplacée à la position suivante et la séquence recommence jusqu'à ce que toutes les positions de la barre aient été complétées. De plus, l'ensemble de la prise de mesures est effectuée

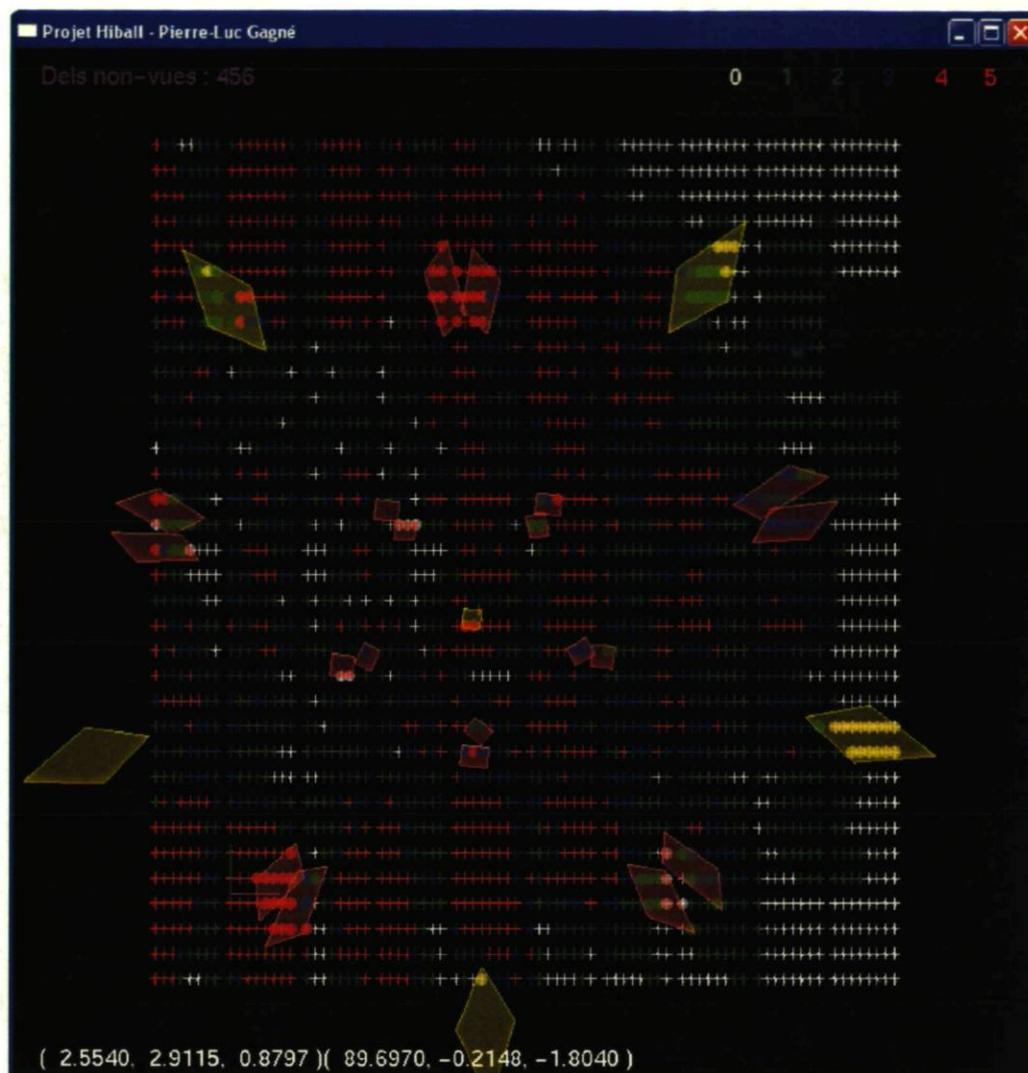


Figure 4.5 – Le logiciel de visualisation permet de voir la position du HiBall, son champ de vue et le nombre de fois que chacune des DEL ont été observées.

dans le noir afin d'éliminer le bruit associé à la lumière ambiante, même si la méthode DLD est utilisée (voir la section 2.3).

4.2.4 La validation des résultats expérimentaux

Une fois les positions des DEL étalonnées, il est nécessaire de valider les résultats obtenus. Puisque seule la barre de calibration possède des références connues, il est possible de valider l'étalonnage des DEL selon deux critères, soit l'erreur de translation et l'erreur d'orientation pour chacune des positions de barre. L'erreur de translation

est calculée à partir de la différence entre la distance connue entre deux stations et la distance entre les poses du HiBall à ces stations. Cette erreur est calculée pour toutes les distances interstations pour chacune des orientations et positions de la barre. Cependant, seule l'erreur maximale est retenue, puisqu'il s'agit de l'erreur voulue. L'erreur d'orientation quant à elle est séparée en trois, soit la différence de rotation entre les stations selon les axes x , y et z respectivement. Encore une fois, seule l'erreur maximale est retenue.

Lors de la validation, le jeu de mesures consiste en un ensemble de 15 positions de barre situées à l'intérieur d'un mètre des bords. Cette restriction permet de s'assurer que le nombre d'observations à chaque position est suffisant pour positionner le HiBall. La figure 4.6 montre un exemple de jeu de validation. La prise de mesure est effectuée de la même manière que pour le jeu d'étalonnage. La méthode utilisée pour trouver la pose du HiBall consiste tout d'abord à calculer la pose en contraignant les DEL dans un plan [7], donc une homographie « *plafond-capteur* » et, par la suite, en utilisant l'optimisation non linéaire à partir des poses précalculées et des positions des DEL étalonnées. Cette méthode est plus stable que de calculer directement la pose à partir des positions des DEL, car, étant donné que les DEL sont pratiquement sur un plan, la matrice \mathbf{A} (équation 3.9) est presque singulière, donc mal conditionnée et numériquement instable.

En considérant les DEL sur un plan, $z = 0$, la troisième colonne de la matrice de transformation \mathbf{M} de l'équation 3.3 et les composantes en z des DEL peuvent être retirées pour former l'équation suivante :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{H}\mathbf{d}', \quad (4.27)$$

où $\mathbf{d}' = [d_x \ d_y \ 1]$ et \mathbf{H} est une matrice 3×3 d'homographie :

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}\mathbf{T}',$$

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & t_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

À partir de la matrice d'homographie, un système $\mathbf{B}\mathbf{h} = \mathbf{0}$ est formé comme à l'équation 3.9, à l'exception des composantes z des positions des DEL qui sont omises et le système est résolu de la même manière. Une fois les valeurs de \mathbf{H} connues, la matrice de transformation \mathbf{T}' est récupérée comme suit :

$$\mathbf{T}' = \mathbf{K}^I \mathbf{H}, \quad (4.28)$$

où \mathbf{K}^I est la matrice pseudo-inverse de \mathbf{K} [27]. Finalement, \mathbf{T} est récupérée grâce aux propriétés des matrices de rotation. Puisqu'une matrice de rotation est orthonormale,

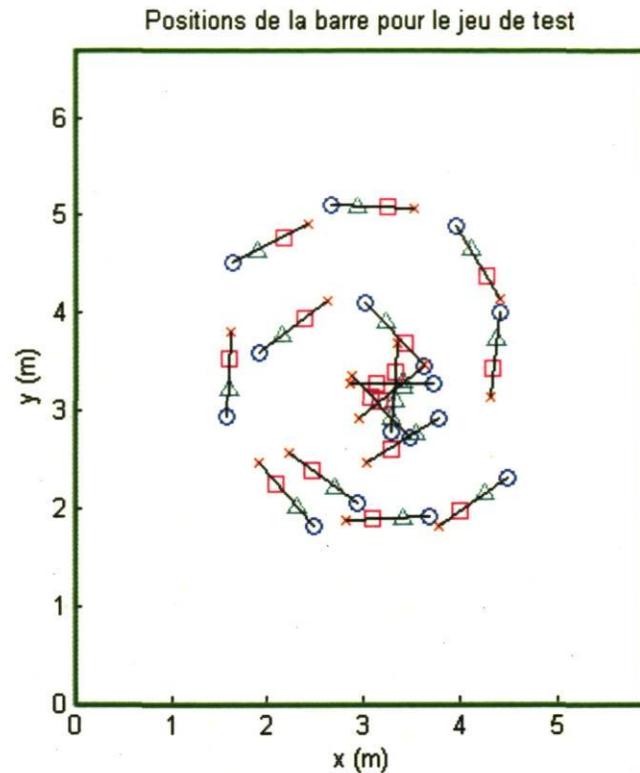


Figure 4.6 – Exemple d’un jeu de mesures pour la validation. Les symboles représentent les différentes stations sur la barre.

la dernière colonne est obtenue par :

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \wedge \mathbf{r}_2, \quad (4.29)$$

où

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 \end{bmatrix}.$$

Finalement, la pose obtenue par homographie est optimisée avec les positions étalonnées des DEL.

4.3 Le simulateur

Un simulateur a été développé afin de vérifier la méthode d’étalonnage dans un environnement contrôlé. Le simulateur permet, entre autres, d’évaluer différentes méthodes et d’observer la qualité des résultats. Au départ, le simulateur construit un plafond connu et un plafond réel. Le plafond connu est composé des positions initiales des DEL,

où les DEL sont distribuées uniformément sur un plan. Le plafond réel permet d'obtenir les mesures des DEL, ainsi que l'erreur sur le plafond étalonné. Ce dernier est construit à partir du plafond connu auquel est ajouté un déplacement aléatoire uniforme ; pour chacun des rails, la première et la dernière DEL sont déplacées à l'intérieur d'une sphère de rayon de 10 mm. Ensuite, les six autres DEL sont disposées uniformément sur la droite reliant la première et la dernière DEL et la distance entre chacune des DEL est ramenée à la valeur nominale d'espacement intra-DEL. Par la suite, toutes les DEL sont déplacées aléatoirement à l'intérieur d'une sphère de rayon de 1 mm. Ces déplacements permettent de représenter de manière réaliste les positions des DEL en déplaçant l'ensemble des DEL contenues sur le rail et ensuite les DEL séparément.

Par la suite, la prise simulée de mesures est effectuée pour l'ensemble des positions de la barre et du HiBall. La pose du HiBall n'est pas obtenue en moyennant 1000 poses comme en expérimentation, mais plutôt en ajoutant aux positions désirées un bruit de mesure gaussien avec un écart-type équivalent aux valeurs obtenues en expérimentation. Ensuite, les DEL se trouvant à l'intérieur du champ de vue du HiBall sont récupérées.

Comme il est mentionné à la section 2.4.2, les capteurs peuvent être projetés sur le plan $z = 0$ pour chacune des vues et, à partir de ces quadrilatères, il est possible de connaître les DEL qui sont à l'intérieur de ceux-ci sans vérifier explicitement chacune des DEL. Cette méthode utilise le fait que l'ensemble des DEL est sensiblement distribué uniformément sur un plan, ce qui permet de ramener le problème en deux dimensions. Puisque l'espacement entre les DEL est sensiblement le même pour l'ensemble du plafond, il est possible d'obtenir un index du type *rangée-colonne* et de pouvoir définir une boîte englobante minimisant l'espace de recherche. La figure 4.7 représente un exemple de boîte englobante pour un quadrilatère.

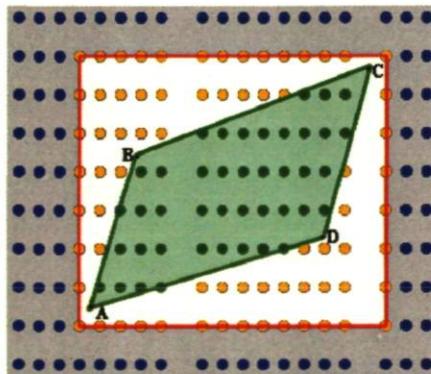


Figure 4.7 – Le quadrilatère ABCD en vert et la boîte englobante correspondante en rouge. L'ensemble des DEL qui seront testées est composé des cercles orange et verts. Les cercles verts correspondent aux DEL qui sont à l'intérieur du quadrilatère.

Par la suite, ce sous-ensemble est testé pour s'assurer que la DEL est bel et bien vue. Pour ce faire, l'algorithme décrit par P. Bourque [3] est utilisé, car les points obtenus par la projection des coins du capteur sont ordonnés, c.-à-d. si ces quatre points sont reliés un à la suite de l'autre, ils formeront un polygone convexe. Pour chacun des sommets du polygone, cet algorithme consiste à vérifier le signe de l'angle entre deux vecteurs, dont le premier est formé par le sommet courant du polygone et le point à test et le second est formé par le même sommet et le sommet précédent. Ce test s'effectue selon l'équation suivante pour chacun des sommets :

$$z_i = \begin{vmatrix} (r_p - r_i) & (r_j - r_i) \\ (c_p - c_i) & (c_j - c_i) \end{vmatrix}, \quad (4.30)$$

où z_i représente la valeur pour le côté i , r_p et c_p représentent respectivement les indices rangée et colonne du point à tester, r_i et c_i représentent respectivement les indices rangée et colonne du sommet i et r_j et c_j représentent respectivement les indices rangée et colonne du sommet j , qui est le sommet précédent le sommet i . L'équation 4.30 est équivalente au produit vectoriel des vecteurs $\mathbf{v}_{rc} = [(r_j - r_i) \ (c_j - c_i) \ 0]^T$ et $\mathbf{p}_{rc} = [(r_p - r_i) \ (c_p - c_i) \ 0]^T$. Puisque les deux vecteurs sont dans le plan $z = 0$, le vecteur résultant n'aura qu'une composante en z et le signe de z dépend de l'ordre des vecteurs \mathbf{v}_{rc} et \mathbf{p}_{rc} . Donc, si le vecteur \mathbf{p}_{rc} se situe à gauche de \mathbf{v}_{rc} , le signe de z sera négatif, si il se situe à droite, le signe de z sera positif et si \mathbf{p}_{rc} possède la même orientation que \mathbf{v}_{rc} , z sera égal à 0. Lorsque toutes les valeurs de z sont calculées, ces dernières sont testées et si tous les z_i sont du même signe ou zéro ($z_i \geq 0 \ \forall i$ ou $z_i \leq 0 \ \forall i$) le point se trouve alors à l'intérieur du quadrilatère. La figure 4.8 montre un exemple d'un point à l'intérieur et d'un point à l'extérieur.

Une fois que les DEL à l'intérieur du champ de vue sont connues, une mesure est prise pour chacune d'entre elles à partir des positions du plafond réel. Encore une fois, au lieu de calculer la moyenne sur plusieurs mesures, un bruit normal avec un écart-type équivalent aux valeurs obtenues en expérimentation est ajouté à chaque mesure. Les paramètres intrinsèques utilisés pour connaître les valeurs des observations sont ceux obtenus avec le calibrage du HiBall et ils sont considérés parfaits. Lorsque toutes les mesures sont obtenues, le calibrage du plafond est effectué et le résultat est validé à l'aide d'un jeu de mesures simulées.

4.3.1 La validation des résultats en simulation

Le jeu de validation consiste en l'ensemble des observations du HiBall placé à 1000 positions aléatoires disposées à environs 1,5 m sous le plafond et à au moins 1 m des bords et l'orientation est limitée à 30 ° par rapport à la normale au plafond. Cette

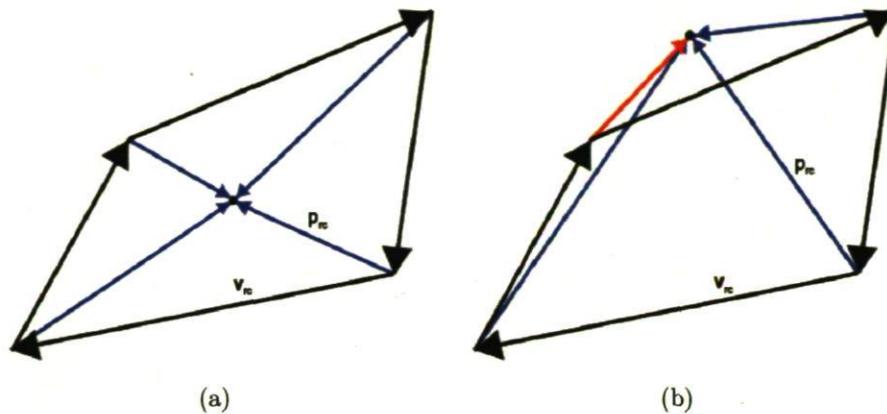


Figure 4.8 – Représentation des vecteurs v_{rc} , en noir, et des vecteurs p_{rc} , en bleu lorsqu'ils sont à droite de v_{rc} et en rouge lorsqu'ils sont à gauche de v_{rc} . La figure (a) montre les vecteurs p_{rc} lorsque le point est à l'intérieur du polygone et la figure (b) montre les vecteurs p_{rc} lorsque le point est à l'extérieur.

dernière limitation permet de représenter de manière réaliste l'utilisation du HiBall. Les observations sont obtenues de la même manière qu'avec le jeu utilisé pour l'étalonnage. Les poses du HiBall sont retrouvées à partir des observations et du plafond étalonné et elles sont comparées aux poses réelles. La méthode de calcul de la pose du HiBall est la même que celle qui est utilisée en simulation.

4.4 Les résultats

Les résultats présentés dans le tableau 4.1 montrent qu'en simulation autant l'erreur en translation que l'erreur d'orientation atteignent les caractéristiques voulues. Cependant, les résultats obtenus en expérimentation ne sont pas aussi satisfaisants comme le montre le tableau 4.2. L'erreur en translation diminue de 32 % en expérimentation contrairement à 91 % en simulation. De plus, l'erreur maximale de 6,437 mm est largement au-dessus des caractéristiques recherchées. Pour ce qui est de l'erreur d'orientation, encore une fois, l'erreur est fortement plus grande qu'en simulation.

Tableau 4.1 – Résultats obtenus en simulation.

Erreur maximale		Avant le calibrage	Après le calibrage
en translation (mm)		4,247	0,376
en orientation (°)	selon x	0,002003	0,000183
	selon y	0,001745	0,000138
	selon z	0,000555	0,000077

Tableau 4.2 – Résultats obtenus en expérimentation.

Erreur maximale		Avant le calibrage	Après le calibrage
En translation (mm)		9,502	6,437
En orientation (°)	selon x	0,078	0,045
	selon y	0,098	0,081
	selon z	0,177	0,168

4.5 Conclusion

En résumé, la méthode d'étalonnage proposée consiste à recueillir plusieurs mesures pour chacune des DEL à partir de plusieurs points de vue d'où plusieurs DEL sont vues. Par la suite, l'ensemble de ces mesures est traité avec une méthode appelée « bundle adjustment ». L'algorithme *Dog Leg* est utilisé pour résoudre le problème d'optimisation non linéaire de moindres carrés, qui est de minimiser le carré de l'erreur de projection des DEL sur les capteurs. Cette méthode itérative effectue une combinaison linéaire des solutions obtenues avec la méthode du gradient et de Gauss-Newton, ce qui permet d'obtenir une solution plus précise et plus rapidement. De plus, une barre de calibrage a été utilisée afin de diminuer le nombre d'inconnues et elle permet aussi de valider les résultats, puisqu'elle permet de déplacer le HiBall selon une translation pure de norme connue.

La prise de mesures est effectuée à l'aide d'un logiciel créé spécifiquement pour ce projet. Ce logiciel permet de voir la pose et le champ de vue du HiBall en temps réel

ainsi que le nombre d'observations pour chacune des DEL. De plus, dans le but de vérifier les résultats attendus, un simulateur a aussi été créé.

Les résultats obtenus montrent une amélioration par rapport à l'autocalibrage avec SCAAT. Cependant, la méthode proposée ne rencontre pas les caractéristiques voulues et puisque les résultats expérimentaux sont très éloignés des résultats de simulation, il est fort probable que les modèles utilisés en simulation ne soient pas valides en expérimentation. Il est donc nécessaire de revoir la méthode d'étalonnage afin de raffiner les modèles utilisés et de mieux comprendre les causes d'erreur.

Chapitre 5

Révision de l'étalonnage des DEL

La différence importante entre les résultats obtenus en simulation et ceux obtenus en expérimentation démontre que la méthode d'étalonnage utilisée ne fonctionne pas bien expérimentalement et que les modèles utilisés dans le simulateur ne correspondent pas à la réalité. Une étude plus approfondie du problème a donc été réalisée.

À partir de la méthode initiale, plusieurs points ont été repensés et testés. Parmi ceux-ci, trois modifications ont été retenues. Premièrement, la méthode choisie pour sélectionner les positions de barre, basée sur le nombre de fois qu'une DEL a été observée, cause un problème, car la position de la DEL sera mal évaluée si le point de vue est similaire pour toutes les observations et cela peu importe le nombre d'observations. Deuxièmement, la précision de la barre de calibrage a été étudiée, ce qui a permis de réaliser l'impact des imperfections de fabrication. Ces imperfections ont imposé un changement quant à l'utilisation de la barre de calibrage. Finalement, un nouveau modèle des paramètres intrinsèques sera décrit et remplacera le modèle courant.

5.1 Le critère du choix des positions de la barre

L'idée de départ dans le choix des positions de barre était de voir le plus de fois possible une DEL afin que sa position soit la plus contrainte possible. Une contrainte sur la position d'une DEL est effectivement ajoutée au système à chaque fois qu'une DEL est observée et plus une DEL est contrainte meilleure sa position devrait être. Cependant, si une DEL est vue d'un seul point de vue plusieurs fois, il s'agira de la même contrainte ajoutée plusieurs fois au système. Par exemple, si une DEL est vue

directement en dessous plusieurs fois, sa position selon z ne pourra tout simplement pas être connue et elle possèdera une incertitude selon z équivalente à l'infini. Cette méthode a donc été modifiée pour tenir compte des différentes positions du HiBall à partir desquelles les DEL sont vues. Le nouveau critère est l'incertitude selon z des positions des DEL. Cette incertitude est calculée comme suit :

$$\delta z = \frac{z^2}{fB} \delta d, \quad (5.1)$$

où δz est l'incertitude selon z , f est la longueur focale, B est la base de triangulation, soit la distance entre deux positions du HiBall et δd est l'erreur sur la mesure, soit l'écart-type des mesures des observations. Cette équation provient de la figure 5.1 d'où deux triangles semblables peuvent être extraits. À partir de ces deux triangles, il est possible d'obtenir l'équation suivante :

$$\frac{B-d}{z-f} = \frac{B}{z}, \quad (5.2)$$

où $d = x_d - x_g$. En isolant z , l'équation devient :

$$z = \frac{Bf}{d}. \quad (5.3)$$

Cette équation peut alors être dérivée par rapport à d afin d'obtenir le déplacement de z en fonction d'une variation sur d :

$$\frac{\delta z}{\delta d} = \frac{fB}{d^2}. \quad (5.4)$$

En isolant d de l'équation 5.3 le résultat peut être substitué dans l'équation 5.4. L'équation résultante peut alors être réorganisée pour obtenir l'équation 5.1.

Pour chaque DEL, le critère est calculé pour toutes les paires de positions du HiBall d'où une mesure de la DEL a été prise et parmi toutes ces incertitudes, seule la plus petite est associée à la DEL. Le nouveau critère pour le choix des positions de la barre est donc que l'incertitude pour chacune des DEL doit être inférieure à un certain seuil.

5.1.1 La prise de mesures

La prise de mesures débute par les 14 positions prédéterminées auxquelles sont ajoutées quatre positions pour chacune des diagonales pour un total de 22 positions. La figure 5.2 représente l'ensemble de ces positions. En simulation, la presque totalité des incertitudes des DEL est inférieure au seuil fixé à 0,05 mm. Cependant, en expérimentation, cet ajout de positions ne permet pas de diminuer l'incertitude de toutes

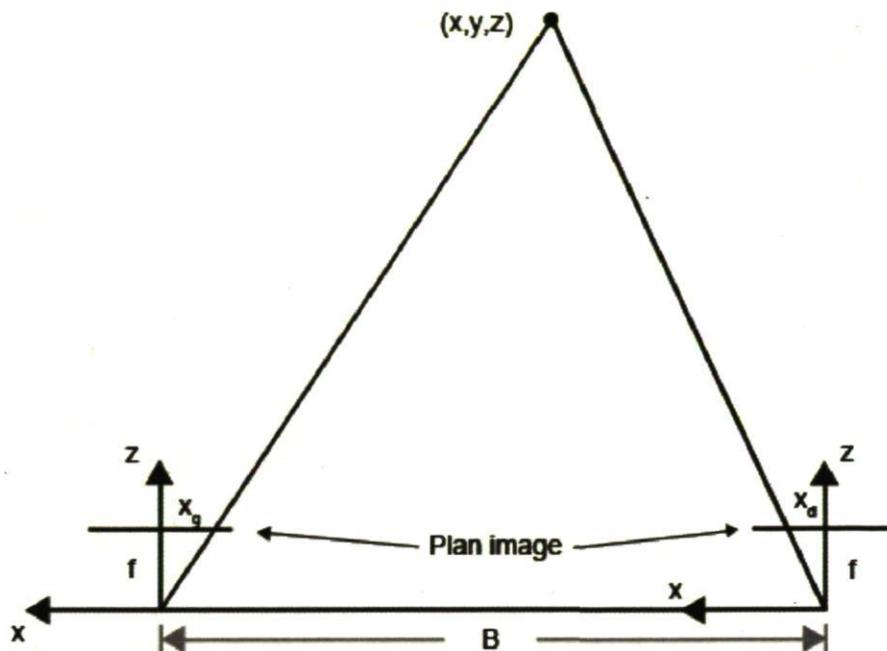


Figure 5.1 – Exemple d’une configuration stéréoscopique alignée. Les valeurs de x_g et x_d correspondent aux valeurs sur les plans images de gauche et de droite en mm.

les DEL en dessous du seuil voulu, puisqu’il est difficile de positionner parfaitement la barre, donc les DEL qui sont vues ne sont pas exactement les mêmes qu’en simulation. Il est nécessaire d’ajouter d’autres positions de barre par la suite. Le logiciel conçu pour la prise de mesure a été modifié afin de pouvoir analyser et visualiser directement l’incertitude des DEL et une fois que l’ensemble des mesures des 22 positions a été pris, de nouvelles mesures sont prises d’un point de vue différent pour les DEL dont l’incertitude est supérieure au seuil fixé. Cette dernière étape est répétée jusqu’à l’obtention d’un résultat satisfaisant.

L’incertitude maximale est fixée arbitrairement à 0,05 mm, puisqu’en simulation la moyenne des incertitudes selon z après les 14 positions est de 0,04 mm et que seulement 12 % des DEL possèdent une incertitude plus élevée que la valeur fixée. L’ajout des huit positions additionnelles permet de diminuer la moyenne à 0,03 mm et le pourcentage de DEL ayant une valeur supérieure à 0,05 mm à 5 %. La figure 5.3 représente l’histogramme des incertitudes selon z sur les positions des DEL après les 22 positions de barre. Il est à noter que l’incertitude des DEL ne descend guère en deçà de 0,02 mm, même si d’autres positions sont ajoutées.

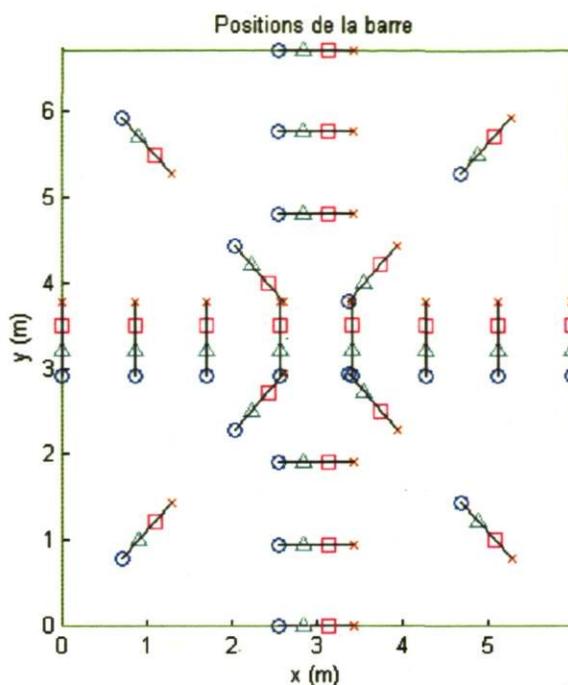


Figure 5.2 – Disposition des 14 positions prédéterminées ainsi que des quatre positions additionnelles sur les diagonales. Le rectangle vert délimite l'ensemble des DEL.

5.1.2 Les résultats

Le tableau 5.1 montre les résultats obtenus en simulation. Une légère amélioration peut être remarquée en translation. Cependant, l'incertitude des DEL selon z était déjà faible avant l'ajout des positions de barre additionnelles, contrairement aux mesures expérimentales.

L'expérimentation a été refaite avec un nouvel ensemble de mesures correspondant au nouveau critère. Le nouveau jeu d'entraînement comprend 27 positions de barre¹. Le tableau 5.2 présente les résultats obtenus. Avec les positions de barre supplémentaires, l'erreur en translation diminue de près de 1,5 mm, soit un gain de plus de 40 % sur la valeur obtenue avec les 14 positions de barre. Pour ce qui est de l'orientation, l'erreur diminue de moitié selon x et y , mais reste pratiquement la même selon z , ce qui laisse croire que la transformation entre chacune des stations de la barre de calibrage ne correspond pas à une translation pure.

1. Un nouveau jeu de test a été repris et un nouvel étalonnage avec la méthode du fabricant a été effectué, puisque l'on suppose que les DEL peuvent s'être déplacées légèrement depuis la dernière expérimentation.

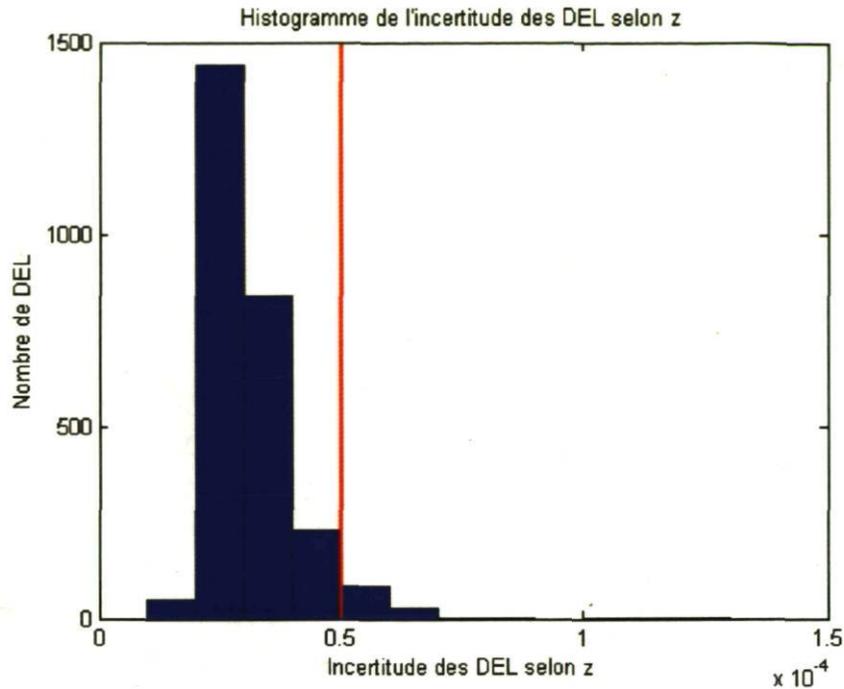


Figure 5.3 – Histogramme de l'incertitude selon z des positions des DEL pour l'ensemble des 22 positions de barre en simulation. La ligne rouge représente l'incertitude maximale fixée.

Tableau 5.1 – Résultats obtenus en simulation avec le nouveau critère de sélection des positions de barre.

		Avant le calibrage	Après le calibrage	
Erreur maximale			14 positions	22 positions
En translation (mm)		4,247	0,376	0,323
En orientation (°)	selon x	0,002006	0,000183	0,000126
	selon y	0,001739	0,000138	0,000116
	selon z	0,000546	0,000077	0,000097

Tableau 5.2 – Résultats obtenus avec le nouveau critère de sélection des positions de barre.

		Avant le calibrage	Après le calibrage	
Erreur maximale			14 positions	27 positions
En translation (mm)		4,328	3,553	2,073
En orientation (°)	selon x	0,027	0,034	0,017
	selon y	0,031	0,033	0,019
	selon z	0,158	0,167	0,161

5.2 Le traitement des mesures

À la suite des résultats obtenus à la section précédente, la barre de calibrage a donc été mesurée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). L'analyse des mesures de la barre a permis de découvrir un jeu sur la translation à chacune des stations d'environ 0,03 mm. Ce jeu ne cause pas de problème pour l'instant, puisqu'il est faible par rapport à l'erreur recherchée.

Cette analyse a aussi permis de découvrir non seulement des écarts d'orientation entre les stations atteignant presque 0,5 °, mais aussi un jeu sur l'orientation à chacune des stations d'environ 0,2 °. Les tableaux 5.3 et 5.4 montrent respectivement les jeux sur l'orientation selon l'axe z du HiBall et les erreurs d'orientation maximales entre les stations. De plus, l'erreur de planéité entre les stations est d'environ 0,03 °. Ces écarts produisent des erreurs pouvant atteindre plus de 30 mm sur le positionnement des DEL, puisque la méthode utilisée suppose qu'il n'y a aucune rotation entre les stations. La méthode utilisée a donc dû être modifiée afin de tenir compte des écarts d'orientation entre les stations. D'autre part, puisque les écarts en orientation entre les stations dépassent les caractéristiques demandées de 0,1 °, il n'est donc pas possible d'évaluer l'erreur sur l'orientation avec la barre de calibrage.

Tableau 5.3 – Jeu sur l'orientation pour chacune des stations. Le jeu est calculé autour de l'axe z du HiBall pour chaque station.

	Jeu (°)			
Station	0	90	180	270
1	0,210	0,200	0,220	0,205
2	0,195	0,192	0,211	0,200
3	0,211	0,234	0,200	0,200
4	0,208	0,211	0,197	0,205
<i>max</i>	<i>0,211</i>	<i>0,234</i>	<i>0,220</i>	<i>0,205</i>

Tableau 5.4 – Écarts d'orientation maximaux entre les stations selon l'axe z .

	Écart (°)			
Station	0	90	180	270
1-2	0,333	0,260	0,366	0,249
1-3	0,311	0,470	0,354	0,366
1-4	0,366	0,219	0,437	0,261
2-3	0,232	0,403	0,212	0,317
2-4	0,228	0,252	0,282	0,306
3-4	0,265	0,463	0,283	0,423
<i>max</i>	<i>0,366</i>	<i>0,470</i>	<i>0,437</i>	<i>0,423</i>

5.2.1 Le vecteur d'état

Puisque les jeux sur l'orientation ne permettent pas l'utilisation d'une transformation constante entre les stations, la nouvelle méthode n'exploite donc pas les caractéristiques de la barre pour l'étalonnage des positions des DEL. Cependant, la barre servira à quantifier l'erreur de positionnement, ainsi que le facteur d'échelle final.

Au lieu de contenir uniquement les positions et les orientations des premières stations ainsi que les transformations correspondantes pour trouver les poses aux autres stations, le nouveau vecteur d'état est composé des positions et des orientations pour toutes les poses du HiBall :

$$\mathbf{x} = [\mathbf{t}_2^T \ \mathbf{r}_2^T \ \dots \ \mathbf{t}_n^T \ \mathbf{r}_n^T \ \mathbf{d}_1^T \ \dots \ \mathbf{d}_m^T]^T, \quad (5.5)$$

où \mathbf{t}_i^T et \mathbf{r}_i^T sont respectivement la $i^{\text{ième}}$ position et orientation du HiBall, n est le

nombre de positions du HiBall, d_i^T est la position de la DEL i et n est le nombre de DEL. Il est à noter que le vecteur d'état demeure inchangé pour les positions des DEL, soit, seulement les positions de celles-ci. Le vecteur d'état contient maintenant $6n + 3m$ éléments, soit environs trois fois plus d'éléments pour les poses du HiBall. Cependant, ce nombre reste relativement faible considérant le nombre de DEL.

5.2.2 Les résultats

Le tableau 5.5 montre une comparaison entre l'ancienne et la nouvelle méthode d'étalonnage en simulation. L'erreur diminue de presque deux fois pour la translation. Cette nouvelle méthode est donc très prometteuse pour l'expérimentation, car l'erreur diminue même dans une situation où la barre est considérée comme parfaite.

Tableau 5.5 – Résultats obtenus en simulation avec la nouvelle méthode de traitement des mesures.

Erreur maximale	Avant le calibrage	Après le calibrage	
		Ancienne	Nouvelle
Méthode			
En translation (mm)	4,247	0,323	0,170

Cette amélioration s'explique par les contraintes de la barre qui forcent les poses des stations 2, 3 et 4 à être parfaitement alignées sur la première. Comme il est mentionné précédemment, une petite erreur en orientation peut causer un grand déplacement sur une DEL. Étant donné que les poses aux premières stations ne peuvent pas être trouvées parfaitement, puisque les mesures contiennent du bruit, les autres stations seront, par conséquent, mal positionnées et les positions des DEL vues par ces stations seront entachées d'une erreur encore plus grande.

Tout comme les résultats en simulation, les résultats expérimentaux montrent un gain pour l'erreur en translation. Le tableau 5.6 montre une comparaison entre l'ancienne et la nouvelle méthode d'étalonnage en expérimentation. L'erreur en translation diminue de 32 % pour atteindre 1,4 mm. Comme il est mentionné précédemment, l'erreur en orientation n'est pas considérée puisque la barre de calibrage possède un jeu sur l'orientation plus grand que l'erreur recherchée.

Tableau 5.6 – Résultats obtenus en expérimentation avec la nouvelle méthode de traitement des mesures.

Erreur maximale	Avant le calibrage	Après le calibrage	
		Ancienne	Nouvelle
Méthode			
En translation (mm)	4,328	2,073	1,368

5.3 Les paramètres intrinsèques

Afin d'améliorer le modèle développé par l'UNC, il est normal de mettre en doute les valeurs imposées par la géométrie du HiBall. Les différentes valeurs imposées qui sont discutées comprennent les positions des centres de projection des lentilles, l'orientation des capteurs, la perpendicularité des axes du capteur et l'égalité de l'échelle selon u et selon v des capteurs. Le modèle sera évalué pour chacune des modifications dans le but de vérifier l'amélioration apportée par chacune d'entre elles. L'évaluation est calculée à partir des données prises lors de la calibration des paramètres intrinsèques :

$$\epsilon = \sum_{c \in C} \sum_{i \in D} \|(\mathbf{u}_i - \mathbf{z}_c(\mathbf{x}, \mathbf{d}_i))\|^2, \quad (5.6)$$

où $z(\bullet)$ est le modèle évalué, C est l'ensemble des vues et D correspond à l'ensemble des DEL, qui sont au nombre de 16695 pour cette évaluation. L'évaluation du modèle initial donne une erreur par pixel de 0,098 pixels.

5.3.1 Les centres de projection

Les emplacements des centres de projection sont déterminés par une translation suivie de deux rotations autour du repère HiBall. La translation, fixée à -18,1 mm selon l'axe optique de lentille, soit la valeur idéale d'une lentille. Cependant, ces dernières ne sont pas parfaites et il est normal que chaque lentille ait sa propre longueur focale. Il en est de même pour les rotations, car les axes optiques des lentilles ne se croisent probablement pas en un seul point et il est fort probable que l'intersection des axes des moteurs ne soit pas exactement au centre du dodécaèdre. Pour le modèle suggéré, la

translation \mathbf{T}_{cp} est remplacée par une translation complètement inconnue :

$$\mathbf{T}'_{cp} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{t}_{cp} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

où \mathbf{t}_{cp} est la translation entre l'origine du repère HiBall et le centre de projection représentée dans le repère HiBall. Comme pour le modèle initial, cette translation est unique pour chaque lentille. Le modèle devient donc :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{K}\mathbf{R}_\theta\mathbf{R}_{cap}\mathbf{T}'_{cp}\mathbf{d}. \quad (5.8)$$

L'évaluation avec ce modèle réduit l'erreur de 0,085 pixels, soit un gain d'environ 13 % sur l'erreur initiale.

5.3.2 L'orientation des capteurs

Pour ce qui est de l'orientation des capteurs, les rotations ϕ et ψ ne correspondent probablement pas à l'orientation réelle des capteurs, car les valeurs de 72° et de $-63,4^\circ$ proviennent des caractéristiques mécaniques du HiBall. De plus, la valeur de θ devrait être la même pour un même capteur et non différente pour chacune des vues. Pour le modèle suggéré, les rotations \mathbf{R}_θ et \mathbf{R}_{cap} forment une seule rotation \mathbf{R}'_{cap} , unique pour chacun des capteurs, dont les paramètres sont inconnus et le modèle devient donc :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{K}\mathbf{R}'_{cap}\mathbf{T}'_{cp}\mathbf{d}. \quad (5.9)$$

L'évaluation avec ce modèle réduit l'erreur à 0,064 pixels, ce qui procure un gain supplémentaire de 25 % pour une diminution totale de 35 % de l'erreur initiale.

5.3.3 La perpendicularité et l'égalité de l'échelle selon u et v

La perpendicularité des axes u et v est un aspect du modèle qui n'a pas été mentionné jusqu'ici. Ce paramètre joue un rôle important si les axes du capteur ne sont pas parfaitement perpendiculaires. L'équation 5.10 montre comment ce paramètre, qui est représenté par l'angle γ , est ajouté à la matrice des paramètres intrinsèques. Dans le modèle initial, ce paramètre est fixé à 90° et il est considéré inconnu pour le modèle suggéré et unique pour chacun des capteurs. De plus, le modèle du HiBall considère le paramètre β (équation 3.2) égal à α , mais il est possible que les échelles selon u et selon v ne soient pas égales. La nouvelle matrice des paramètres intrinsèques \mathbf{K} devient

donc :

$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \cot \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin \gamma} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

et le nouveau modèle :

$$\mathbf{u}' = \mathbf{K}' \mathbf{R}'_{cap} \mathbf{T}'_{cp} \mathbf{d}. \quad (5.11)$$

L'évaluation de ce modèle donne une erreur de 0,063 pixels, malgré que ce gain soit mineur, il permet un gain final de 36 % par rapport au modèle initial.

5.3.4 Estimation des paramètres du modèle suggéré

L'ajout des différentes variables au système ne le rend pas plus difficile à résoudre, même avec l'ajout de l'angle γ [29]. Cependant, les contraintes provenant du centre de projection qui doit être le même pour une lentille et l'orientation du capteur qui doit être la même pour un capteur rendent le système difficile à résoudre. Toutefois, le modèle initial représente une bonne estimation de la solution du modèle suggéré et, c'est pourquoi la méthode choisie pour résoudre le système est l'optimisation non linéaire.

Comme il est dit précédemment, cette méthode permet de minimiser une fonction objective à partir d'une estimation initiale des états du système. Pour ce problème, la fonction objective choisie est la somme des erreurs de reprojection au carré :

$$\min_{\mathbf{x} \in R^n} \sum_{c \in C} \sum_{i \in D} \|(\mathbf{u}_i - \mathbf{z}_c(\mathbf{x}, \mathbf{d}_i))\|^2, \quad (5.12)$$

où

$$\mathbf{z}_c(\mathbf{x}, \mathbf{d}_i) = \begin{bmatrix} u'/w' \\ v'/w' \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \mathbf{K}'_c \mathbf{R}'_{cap_c} \mathbf{T}'_{cp_c} \mathbf{d}_i.$$

Pour le modèle final, \mathbf{x} est le vecteur comprenant tous les paramètres du modèle, que l'on appellera le vecteur d'état et n est le nombre d'états. Les états sont, pour chacune des lentilles, les composantes de la translation entre le centre de projection et l'origine du repère HiBall, pour chacun des capteurs, les composantes de la rotation de la matrice \mathbf{R}'_{cap} et, pour chacune des vues, les cinq paramètres de \mathbf{K}' (α , β , γ , u_0 et v_0). Le système contient donc un total de 166 inconnues pour le modèle final.

Le tableau 5.7 résume l'évaluation des différents modèles. Pour chacun des modèles, une nouvelle table d'interpolation est créée. Ce tableau montre que le modèle améliore effectivement l'erreur de reprojection, mais aussi que la table d'interpolation comble

une majeure partie des lacunes des modèles. En effet, l'erreur est diminuée d'environ neuf fois avec l'utilisation de la table pour le modèle initial et de presque six fois pour le modèle final. Néanmoins, le gain total, incluant la table d'interpolation, est de 37 % pour le modèle final.

Tableau 5.7 – Évaluation des modèles avec la somme des erreurs de reprojection au carré comme critère d'évaluation.

Modèles	$KR_{\theta}R_{cap}T_{cp}$	$KR_{\theta}R_{cap}T'_{cp}$	$KR'_{cap}T'_{cp}$	$K'R'_{cap}T'_{cp}$
Erreur <i>sans</i> la table d'interpolation (pixels)	0,098	0,085	0,064	0,063
Erreur <i>avec</i> la table d'interpolation (pixels)	0,033	0,027	0,026	0,026

5.3.5 Les résultats

La dernière modification apportée au système est donc l'ajout des nouveaux paramètres intrinsèques. Le tableau 5.8 présente les résultats de l'expérimentation. Cette fois, le gain est de 11 %, ce qui permet de diminuer l'erreur à 1,2 mm. Conséquemment, ce gain démontre que le nouveau modèle des paramètres intrinsèques diminue non seulement l'erreur 2D obtenue avec le jeu de calibration des paramètres intrinsèques, mais aussi l'erreur de mesure 3D.

Tableau 5.8 – Résultats obtenus en expérimentation avec les nouveaux paramètres intrinsèques.

Erreur maximale	Avant le calibrage	Après le calibrage	
		Anciens	Nouveaux
Paramètres intrinsèques			
En translation (mm)	4,328	1,368	1,214

5.4 Conclusion

En résumé, la méthode d'étalonnage proposée au chapitre précédent n'ayant pas donné de résultats satisfaisants, la méthode d'étalonnage a été améliorée. La première modification fut de changer le critère de sélection des positions de la barre qui était de simplement voir chacune des DEL au moins deux fois. Ce critère a été changé par un seuil maximum sur l'incertitude selon l'axe z . Afin de respecter ce nouveau critère, des positions de barre ont été ajoutées ; ce qui a permis de réduire l'erreur de positionnement à environ 2 mm, soit un gain de plus de 40 %. L'erreur d'orientation α , quant à elle, diminué selon les axes x et y , mais n'a pratiquement pas bougé selon l'axe z . Cette observation a laissé croire que les transformations entre les stations de la barre de calibrage n'étaient pas des translations pures.

La barre de calibrage a alors été mesurée, ce qui a permis de confirmer que les transformations interstations n'étaient pas des translations pures. La deuxième modification fut donc de n'utiliser la barre de calibrage que pour valider l'étalonnage et ajuster le facteur d'échelle final. De plus, puisque la barre de calibrage possède un jeu sur l'orientation plus grand que l'erreur recherchée, il n'est pas possible de valider l'erreur d'orientation. Cette modification a permis de réduire l'erreur maximale de positionnement à environ 1,4 mm, pour un gain supplémentaire de 32 %.

Finalement, le modèle des paramètres intrinsèques a été remplacé par un nouveau modèle qui ne suppose plus que les caractéristiques mécaniques sont parfaites. Cette dernière modification a permis d'atteindre une erreur maximale de 1,2 mm pour un gain total de 72 % sur la méthode initiale. Le tableau 5.9 récapitule les résultats obtenus en expérimentation.

Tableau 5.9 – Résultats obtenus en expérimentation.

Erreur maximale	Départ	14 positions	27 positions	Sans barre	Nouveaux intrinsèques
En translation (mm)	4,328	3,553	2,073	1,368	1,214

Afin de vérifier les résultats obtenus d'autres jeux d'étalonnage et de test ont été pris et analysés. L'analyse a démontré que les résultats obtenus sont répétables. De plus, les erreurs maximales ne sont pas aux mêmes endroits d'un jeu à l'autre ce qui indique qu'il n'y a pas de zone problématique ou de zone systématiquement mauvaise.

Chapitre 6

Conclusion

L'objectif de ce mémoire était d'améliorer l'exactitude du système HiBall de la compagnie 3rdTech par une nouvelle méthode d'étalonnage des DEL afin d'obtenir un système de positionnement respectant des caractéristiques prédéterminées. Suite aux tests réalisés par Y. Martin [14], l'erreur d'exactitude maximale en position du système HiBall dépassait 7 mm, alors que la valeur voulue est de 500 μm . De plus, l'erreur maximale en orientation voulue est de 0,1 $^\circ$.

Le principal défi de ce projet était de diminuer l'erreur maximale en position de plus de 92 %. Parmi les autres défis, il y avait le fait de travailler avec des photodiodes à effet latéral. Celle-ci ont un bruit élevé et elles ne donnent que le centroïde de l'image de la lumière perçue. L'information obtenue par les capteurs est donc très limitée. Un autre défi fut le nombre de positions de DEL à étalonner, environ 2700 DEL, par rapport au champ de vue du HiBall qui est très restreint. Étant donné la configuration matérielle du hiBall, le champ de vue ne permet que de voir des petits groupes isolés de DEL et un maximum d'environ 150 DEL pour l'ensemble du champ de vue.

L'étalonnage de l'ensemble des positions des DEL comporte une dualité entre l'estimation des poses du HiBall et les positions des DEL. Pour obtenir les positions des DEL, il est nécessaire de connaître les poses du HiBall et pour obtenir les poses du HiBall, il est nécessaire de connaître les positions des DEL. La méthode développée est basée sur le *Bundle Adjustment*, soit l'optimisation non linéaire de moindres carrés. Cette méthode permet d'estimer à la fois les poses du HiBall et les positions des DEL, soit un problème optimisation complexe. Afin d'ajouter davantage de contraintes à l'optimisation non linéaire, une barre, appelée *barre de calibrage*, a été utilisée. Cette barre permet de déplacer le HiBall selon une translation pure de norme connue entre chacune des stations. Lors du traitement des données, les poses, à une même position

de barre, sont donc contraintes en distance et en rotation. Les positions de barre ont été choisies de manière à ce que le nombre d'observations pour chacune des DEL soit d'au moins deux, soit le nombre minimum d'observations pour calculer sa position. Donc, pour l'ensemble des positions de barre présélectionnées, des mesures sont prises pour chacune des DEL qui se trouvent dans le champ de vue du HiBall pour chacune des stations sur la barre. Une fois toutes les mesures obtenues, celles-ci sont traitées à l'aide de l'optimisation non linéaire. La première méthode développée a permis de réduire l'erreur maximal en position à 4 mm. Afin de réduire davantage cette erreur, plusieurs améliorations ont donc été apportées.

La première amélioration fut de modifier le critère pour le choix des positions de barre. Le critère a donc été modifié pour l'incertitude des positions des DEL selon l'axe z . La seconde amélioration fut le retrait des contraintes de la barre de calibrage lors du traitement des données, car les imperfections de la barre causent des erreurs de positions sur les DEL pouvant atteindre plus de 30 mm. La dernière amélioration fut de modifier le modèle des paramètres intrinsèques. L'ensemble des améliorations a permis de réduire l'erreur d'orientation à presque 1 mm, ce qui n'est toutefois pas suffisant par rapport à l'erreur voulue.

6.1 Travaux futurs

Deux autres éléments ont été identifiés comme les causes d'inexactitude du système. Le premier est le montage utilisé pour le calibrage des paramètres intrinsèques. Le positionnement de la DEL dans la méthode utilisée repose sur le fait que les axes des deux moteurs se croisent en un point. Cependant, rien n'indique que les deux axes se croisent réellement. Si les positions des DEL sont effectivement mauvaises, les paramètres intrinsèques s'en trouveront aussi biaisés. Une nouvelle méthode de calibrage des intrinsèques devrait donc être créée. Le second élément est la qualité de l'observation des DEL. Une expérience devrait être réalisée afin de s'assurer que les observations sont bel et bien ponctuelles, c'est-à-dire que peu importe le point de vue, la DEL devrait être vue au même endroit. Cependant, il est possible que selon le point de vue, la DEL ne soit pas vue au même endroit. La figure 6.1 montre un exemple d'une observation ponctuelle et une non ponctuelle. Ce problème pourrait être corrigé en modifiant les supports des DEL afin que la lumière n'en sorte qu'en un seul point. Ces deux améliorations requièrent des changements matériels importants qui pourront être réalisées dans la suite du projet.

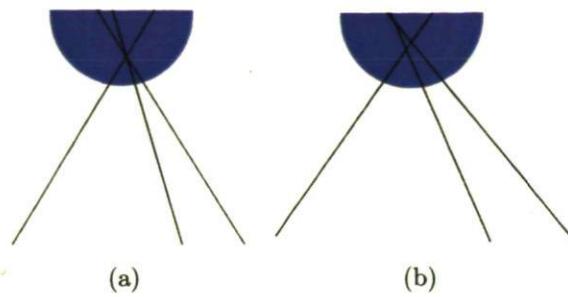


Figure 6.1 – (a) Exemple d'une observation ponctuelle. Toutes les observations se croisent en un seul point. (b) Exemple d'une observation non ponctuelle. Les observations ne passent pas par un seul point.

Bibliographie

- [1] 3rdTech, *Hiball-3000/3100 Wide-Area Tracker* manuel de l'utilisateur, novembre 2003.
- [2] 3rdTech, *HiBall-3100 Wide-Area, High-Precision Tracker and 3D Digitizer*, en ligne, <http://www.3rdtech.com/HiBall.htm>, consulté en avril 2008.
- [3] Bourque, P., *Determining If A Point Lies On The Interior Of A Polygon*, en ligne, <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry/insidepoly/>, consulté en juin 2008.
- [4] Brown, R.G., Hwang, P.Y.C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, 2nd Edition*, Wiley, New York, 1992, 502 pages.
- [5] Chi, V.L., *Noise Model and Performance Analysis Of Outward-looking Optical Trackers Using Lateral Effect Photo Diodes*, rapport technique, University of North Carolina at Chapel Hill, avril 1995.
- [6] Golub, G.H., Van Loan, C.F., *Matrix Computation, 3rd edition*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1996, 728 pages.
- [7] Hartley, R., Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd edition*, Cambridge University Press, New York, 2006, 672 pages.
- [8] Horaud, R., Monga, O., *Vision par ordinateur : outils fondamentaux*, Hermès, Paris, 1993, 427 pages.
- [9] Kanatani, K., *Geometric Computation for Machine Vision*, Clarendon, Oxford, 1993, 476 pages.
- [10] Lay, D.C., *Linear Algebra and Its Applications, 2nd Edition*, Addison Wesley, Massachusetts, 2000, 486 pages.
- [11] Lourakis, M.I.A., Argyros, A.A., *Is Levenberg-Marquardt the Most Efficient Optimization Algorithm for Implementing Bundle Adjustment ?*, Actes de IEEE International Conference on Computer Vision, vol. 2, pp. 1526-1531, Beijing, Chine, Octobre 2005.
- [12] Ma, Y., Soatto, S., Kosecká, J., Sastry, S., *An Invitation to 3-D Vision : From Images to Geometric Models*, Springer-Verlag, New York, 2004, 552 pages.

- [13] Madsen, K., Nielsen, H.B., Tingleff, O., *Methods for Non-linear Least Squares Problems, 2nd Edition*, note de cours, Technical University of Denmark, Danemark, avril 2004.
- [14] Martin, Y., *Système de positionnement pour un numériseur 3D : Mise en oeuvre et analyse de la qualité*, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 2008.
- [15] Maybeck, P.S., *Stochastic Models, Estimation, and Control, vol. 1*, Academic Press, New York, 1979, 442 pages.
- [16] Nocedal, J., Wright, S.J., *Numerical Optimization, 2nd Edition*, Springer, New York, 2006, 664 pages.
- [17] Powell, M., *A Hybrid Method for Nonlinear Equations*, tirée de Rabinowitz, P., *Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations*, pages 87-144, Gordon and Breach Science, Londres, 1970.
- [18] Ruszczynski, A.P., *Nonlinear Optimization*, Princeton University Press, Princeton, 2006, 464 pages.
- [19] Slama, C.C., *Manual of Photogrammetry, 4th Edition*, Asprs Pubns, Falls Church, 1980, 1056 pages.
- [20] Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., Fitzgibbon A., *Bundle Adjustment - A Modern Synthesis*, actes de l'International Workshop on Vision Algorithms : Theory and Practice, pp. 864-884, septembre 1999.
- [21] UNC-CH Tracker Research Group Homepage, *The UNC Tracker Project*, en ligne, <http://www.cs.unc.edu/~tracker/>, consulté en mai 2008.
- [22] Welch, G., *SCAAT : Incremental Tracking with Incomplete Information*, thèse de doctorat, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, 1996.
- [23] Welch, G., Bishop, G., *SCAAT : Incremental Tracking with Incomplete Information*, Actes du 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, p. 333-344, août 1997.
- [24] Welch, G., Bishop, G., Vicci, L, Brumback, S., Keller, K., Colucci, D., *The HiBall Tracker : High-Performance Wide-Area Optical Tracking for Virtual and Augmented Environments*, Symposium on Virtual Reality Software and Technology, p. 1-11, décembre 1999.
- [25] Welch, G., Bishop, G., Vicci, L, Brumback, S., Keller, K., Colucci, D., *High-Performance Wide-Area Optical Tracking : The Hiball Tracking System*, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, volume 10, numéro 1, p. 1-21, février 2001.
- [26] Welch, G., Bishop, G., *An Introduction to the Kalman Filter*, rapport technique, TR-95-041, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, juillet 2006.
- [27] Wikipedia, *Pseudo-inverse*, en ligne, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pseudo-inverse>, consulté en avril 2009.

- [28] Wong, K.H., Ming, M., Chang, Y., *3D Model Reconstruction by Constrained Bundle Adjustment*, Actes du 17th International Conference on Pattern Recognition, p. 902-905, août 2004.
- [29] Zhang, Z., *A Flexible New Technique for Camera Calibration*, rapport technique, MSR-TR-98-71, Microsoft Research, Redmond, août 1998.