

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO

INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO E DA ORIENTAÇÃO DE UMA CÂMERA
SOBRE A PRECISÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Autora:

Claudia França do Vale

Orientador:

Prof. José Gabriel Rodríguez Carneiro Gomes, Ph.D.

Examinadora:

Prof^a. Mariane Rembold Petraglia, Ph.D.

Examinador:

Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc.

DEL
JANEIRO DE 2008

Agradecimentos

Ao meu orientador, José Gabriel Rodríguez Carneiro Gomes, que me ajudou na realização deste trabalho do início ao fim.

À minha família, que sempre me apoiou em todas as etapas de minha vida. Sem ela, eu não teria tido a oportunidade de estar me formando na melhor universidade do país.

Aos amigos que conquistei nestes cinco anos de estudos, pessoas com quem aprendi muito, dentro e fora da universidade, e espero continuar aprendendo.

Aos meus chefes e orientadores de estágio na IBM, que sempre me deram totais condições de trabalhar neste projeto, devido à flexibilidade que me permitiam nos horários de trabalho.

Resumo

Este projeto apresenta um procedimento a ser aplicado em um sistema de visão monocular para determinar o melhor posicionamento e orientação de uma câmera fotográfica em relação a uma grade de referência externa (*grid*), a fim de se obter maior precisão na sua calibração.

O procedimento utilizado consiste em fotografar o *grid* de diversas posições e orientações distintas a fim de se determinar uma posição considerada ótima, ou seja, aquela cujo erro na calibração é o menor possível.

Os testes foram divididos em três partes. Em cada parte, a câmera foi colocada em um plano vertical diferente: um plano próximo ao *grid*, de forma a enquadrá-lo bem; um plano um pouco afastado do *grid*, de forma que ainda se possa ver o *grid* perfeitamente; e um plano bem afastado do *grid*, a uma distância em que os pontos do *grid* já começam a perder definição. Em cada um destes três planos verticais foram escolhidas nove posições para a câmera, a fim de aumentar o número de dados para avaliação dos resultados.

Com o algoritmo de calibração foram gerados parâmetros de posição e orientação para comparação com os parâmetros medidos manualmente. Estes parâmetros são as coordenadas de posição da câmera em relação ao *grid* e os ângulos de rotação da câmera em torno dos eixos do *grid*. Para a criação de modelos dos erros, foi utilizado o método dos mínimos quadrados.

Este trabalho será de grande utilidade em inspeções visuais, onde aparelhos de fotografia e filmagem monitoram dutos e equipamentos em ambientes inóspitos, aumentando a eficiência das operações de intervenção remota.

Palavras-chave

1. Calibração de câmeras
2. Análise de erros
3. Geometria projetiva
4. Visão computacional
5. Fotogrametria

Índice

1. Introdução	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Organização.....	3
2. Teoria	4
2.1 Fotogrametria.....	4
2.2 Calibração.....	6
2.3 Transformação Linear.....	6
3. Métodos	9
3.1 Escolha das Posições da Câmera para os testes.....	11
3.2 Procedimentos no Computador.....	18
3.3 Fator de Correção.....	20
3.4 Erros Relativos Percentuais.....	22
3.5 Método dos Mínimos Quadrados.....	22
4. Resultados	24
4.1 Precisão da calibração (erros nos seis parâmetros extrínsecos) com a câmera na posição 1.....	24
4.2 Precisão da calibração nas demais 26 posições de teste.....	28
4.3 Erros Médios.....	55
4.4 Modelo Linear.....	56
5. Conclusões	59
A- Rotina de Calibração	62
B- Exemplo do arquivo texto de entrada para a rotina de calibração	70
C- Exemplo de parte do arquivo texto de entrada para a função <i>fator_correcao</i>	71

D- Exemplo do arquivo texto de entrada para a função <i>minimos_quadrados</i>..	72
E- Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos de calibração antes de se aplicar o fator de correção nos ângulos α e β.....	73
F- Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos de calibração após se aplicar o fator de correção nos ângulos α e β.....	79
Referências Bibliográficas	85

Índice de Figuras

Figura 2.1: Câmera alinhada à bissetriz interna do <i>grid</i>	5
Figura 3.1 (a): Posições da câmera.....	9
Figura 3.1 (b): Esquema principal do projeto.....	10
Figura 3.2: Esquema com três planos verticais (N).....	12
Figura 3.3: Esquema com sub-planos L para o plano N_0	14
Figura 3.4: Esquema com sub-planos K para o plano N_0	15
Figura 3.5: Gráfico do fator de correção para os ângulos α e β	21
Figura 3.6: Gráfico da média do fator de correção ampliado na região de interesse	21
Figura 4.1: Gráfico comparativo: Erro Previsto x Erro Real	57

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Miniaturas das imagens do <i>grid</i> nas nove fotos tiradas em cada uma das 27 posições do espaço (posições definidas por Figuras 3.2 até 3.4)	17
Tabela 4.1: Parâmetros medidos manualmente para a posição 1	25
Tabela 4.2: Resultados obtidos com o algoritmo de calibração para a posição 1	26
Tabela 4.3: Resultados obtidos após aplicação do fator de correção para a posição 1	27
Tabela 4.4: Erros relativos percentuais dos parâmetros calculados para a posição 1	27
Tabela 4.5: Parâmetros e resultados para a posição 2	29
Tabela 4.6: Parâmetros e resultados para a posição 3	30
Tabela 4.7: Parâmetros e resultados para a posição 4	31
Tabela 4.8: Parâmetros e resultados para a posição 5	32
Tabela 4.9: Parâmetros e resultados para a posição 6	33
Tabela 4.10: Parâmetros e resultados para a posição 7	34
Tabela 4.11: Parâmetros e resultados para a posição 8	35
Tabela 4.12: Parâmetros e resultados para a posição 9	36
Tabela 4.13: Parâmetros e resultados para a posição 10	37
Tabela 4.14: Parâmetros e resultados para a posição 11	38
Tabela 4.15: Parâmetros e resultados para a posição 12	39
Tabela 4.16: Parâmetros e resultados para a posição 13	40
Tabela 4.17: Parâmetros e resultados para a posição 14	41
Tabela 4.18: Parâmetros e resultados para a posição 15	42
Tabela 4.19: Parâmetros e resultados para a posição 16	43
Tabela 4.20: Parâmetros e resultados para a posição 17	44
Tabela 4.21: Parâmetros e resultados para a posição 18	45
Tabela 4.22: Parâmetros e resultados para a posição 19	46
Tabela 4.23: Parâmetros e resultados para a posição 20	47
Tabela 4.24: Parâmetros e resultados para a posição 21	48
Tabela 4.25: Parâmetros e resultados para a posição 22	49
Tabela 4.26: Parâmetros e resultados para a posição 23	50
Tabela 4.27: Parâmetros e resultados para a posição 24	51

Tabela 4.28: Parâmetros e resultados para a posição 25	52
Tabela 4.29: Parâmetros e resultados para a posição 26	53
Tabela 4.30: Parâmetros e resultados para a posição 27	54
Tabela 4.31: Erros relativos percentuais médios dos parâmetros para todas as posições	56
Tabela 4.32: Comparação entre o erro real obtido na calibração e o erro previsto pelo modelo linear	58
Tabela A.1: Rotina de calibração para os parâmetros extrínsecos da câmera	62
Tabela A.2: Código-fonte de parte do procedimento de execução dos passos 1 até 4.2	64
Tabela A.3: Código-fonte da função <i>MatrizR.m</i> feita no pacote matemático	66
Tabela A.4: Código-fonte da função <i>angulos.m</i> feita no pacote matemático	67
Tabela A.5: Código-fonte da função <i>fator_correcao.m</i> feita no pacote matemático	68
Tabela A.6: Código-fonte da função <i>minimos_quadrados.m</i> feita no pacote matemático	69
Tabela B.1: Arquivo <i>cal000_1A.txt</i> como exemplo	70
Tabela C.1: Fragmento do arquivo texto de entrada para a função <i>fator_correcao</i> referente aos dados das fotos 000_1A até 000_4C (Vide Tabelas 4.1 e 4.2)	71
Tabela D.1: Arquivo texto de entrada para a função <i>minimos_quadrados</i>	72
Tabela E.1: Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção	73
Tabela F.1: Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção	79

Glossário, Abreviaturas, Siglas, Símbolos e Sinais

- *JPEG: Joint Photographic Experts Group*. Formato de compressão de dados amplamente utilizado em processamento de imagens.
- *BMP*: abreviação de *bitmap*. Mapa de bits para representar uma imagem sem compressão de dados.
- *Grid*: objeto de referência utilizado neste trabalho; consiste em uma grade de calibração com alvos cujas coordenadas espaciais dos seus pontos são conhecidas com alta precisão.
- Algoritmo de calibração: rotina computacional que calcula os valores para os parâmetros extrínsecos e intrínsecos de uma câmera fotográfica, permitindo estimar sua posição em relação a uma referência a partir de uma imagem tirada da referência por ela.
- Parâmetros extrínsecos: parâmetros de calibração que indicam o posicionamento da câmera fotográfica em relação ao objeto de referência.
- Parâmetros intrínsecos: parâmetros de calibração relacionados à lente e à construção da câmera fotográfica.
- *CalMF.dll*: biblioteca dinâmica que contém as funções utilizadas na calibração de uma câmera fotográfica [1].

Capítulo 1

Introdução

A fotogrametria é uma técnica para a aquisição de medidas tridimensionais sem contato físico com o objeto de estudo, a partir de fotografias ou imagens. Esta técnica vem sendo utilizada em diversas áreas, tais como: cartografia, topografia, sensoriamento remoto, geologia, robótica, construção naval, etc.

A calibração de câmeras é uma etapa importante do processo de reconstrução tridimensional a partir de imagens. O procedimento de calibração consiste de duas tarefas principais: a estimação dos parâmetros extrínsecos da câmera (ou parâmetros de orientação exterior), que determinam o seu posicionamento em relação ao objeto de estudo, e a estimação dos parâmetros intrínsecos da câmera (ou parâmetros de orientação interior), que são parâmetros internos relacionados à sua lente e à sua construção.

O procedimento de orientação exterior constitui-se na estimação da rotação e da translação desconhecidas que relacionam o sistema de coordenadas da câmera com o sistema de coordenadas global (do objeto de estudo). A rotação e a translação podem ser determinadas por um conjunto de seis parâmetros: três parâmetros de rotação e três parâmetros de translação.

O procedimento de orientação interior, que não é o foco do nosso estudo, por sua vez, constitui-se na estimação de um conjunto de quatro parâmetros internos que controlam a projeção de um ponto do espaço no plano da imagem e que independem da posição e da orientação do objeto observado. Os parâmetros a estimar são as coordenadas do ponto principal (a interseção do eixo óptico com o plano imagem) e os parâmetros relacionados à distância focal. Os parâmetros que modelam a distorção geométrica introduzida pelo sistema óptico das câmeras utilizadas também podem ser considerados como parâmetros internos.

O algoritmo de calibração nos permite estimar todos estes parâmetros. É sabido que o posicionamento da câmera em relação ao objeto de referência afeta estes resultados. Neste trabalho determinaremos em qual posição da câmera se obtém uma calibração mais precisa.

1.1 Objetivo

O presente estudo apresenta uma análise da influência da posição e da orientação de uma câmera fotográfica na precisão dos parâmetros de calibração. O trabalho se baseia na utilização de um algoritmo desenvolvido no PADS (Laboratório de Processamento Analógico e Digital de Sinais), para atividades de inspeção tridimensional de imagens, na calibração de câmeras fotográficas em um sistema de visão monocular (apenas uma câmera).

Não é nosso objetivo centralizar o estudo no algoritmo de calibração, e sim na estimativa da precisão dos seis parâmetros extrínsecos de calibração retornados pelo mesmo. A precisão destes parâmetros de calibração está associada, em hipótese, à posição e à orientação da câmera em relação ao nosso objeto de estudo (o *grid*). É preciso realizarmos um estudo do comportamento dos parâmetros de calibração capturando fotografias com a câmera posicionada e orientada em diversos pontos do espaço, para validação da hipótese proposta.

A coleta destas imagens será feita utilizando uma câmera fotográfica digital (Canon EOS Digital Rebel XTi 10.1 megapixels), de propriedade do PADS e destinada a este e a outros estudos semelhantes. Será utilizado também um *grid*, que servirá como nosso objeto de estudo, ou seja, a nossa referência para a calibração. Serão obtidas diversas fotografias, de diversas posições do espaço, a fim de obtermos um conjunto de imagens significativas para uma análise mais rigorosa do problema proposto.

Após a análise dos resultados obtidos com o algoritmo de calibração, serão apresentadas tabelas contendo os erros de precisão da calibração para todos os testes.

Para que se possa visualizar a precisão da calibração em todos os pontos, será construído um gráfico, destacando aquelas posições onde se obtêm os melhores resultados.

A construção de um modelo linear para o erro em função da posição permitirá determinar os erros dos parâmetros extrínsecos de calibração da câmera a priori, em uma dada posição no espaço tridimensional em relação ao *grid*.

1.2 Organização

Este projeto está dividido em cinco capítulos, sendo que no Capítulo 1 tem-se uma breve introdução sobre o trabalho e seus objetivos.

O Capítulo 2 aborda a teoria envolvida na fotogrametria, bem como na sua aplicação para calibração de uma câmera fotográfica e seu posicionamento no espaço em relação ao objeto de estudo.

A metodologia utilizada para a realização dos testes é descrita no Capítulo 3.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos diversos testes realizados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões feitas acerca deste trabalho, com base nos resultados do capítulo anterior, sugerindo melhorias para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Teoria

Uma abordagem mais profunda necessária ao entendimento dos algoritmos de calibração utilizados neste estudo pode ser encontrada em [1]. Como não é o foco do nosso trabalho, iremos fazer apenas uma breve dissertação acerca dos algoritmos e seus tópicos relacionados neste capítulo.

2.1 Fotogrametria

O termo fotogrametria refere-se ao processo de realizar medições a partir de fotografias ou imagens. A fotogrametria analítica consiste no uso de modelos matemáticos para a obtenção de coordenadas tridimensionais de objetos.

A fotogrametria analítica possui um conjunto de técnicas pelas quais pode-se determinar a posição tridimensional, orientação e dimensão de partes do objeto observado em um referencial global a partir de coordenadas das projeções. Para que isto seja possível, deve-se analisar um conjunto suficientemente grande de pontos das imagens bidimensionais.

É possível fazer uma associação entre as coordenadas bidimensionais das imagens obtidas e as coordenadas tridimensionais do objeto de estudo. As coordenadas da câmera podem ser obtidas através de translações e rotações aplicadas sobre os eixos do *grid*. A posição da câmera em relação ao referencial global (no caso, o referencial do *grid*) é dada pelas coordenadas X, Y e Z e a sua orientação, em relação ao mesmo referencial, é dada pelos ângulos de rotação ω , ϕ e κ . A Figura 2.1 mostra uma das imagens utilizadas neste trabalho, na qual a câmera está alinhada à bissetriz interna do *grid*, para que se possa visualizar o sistema de coordenadas 3D do *grid*.

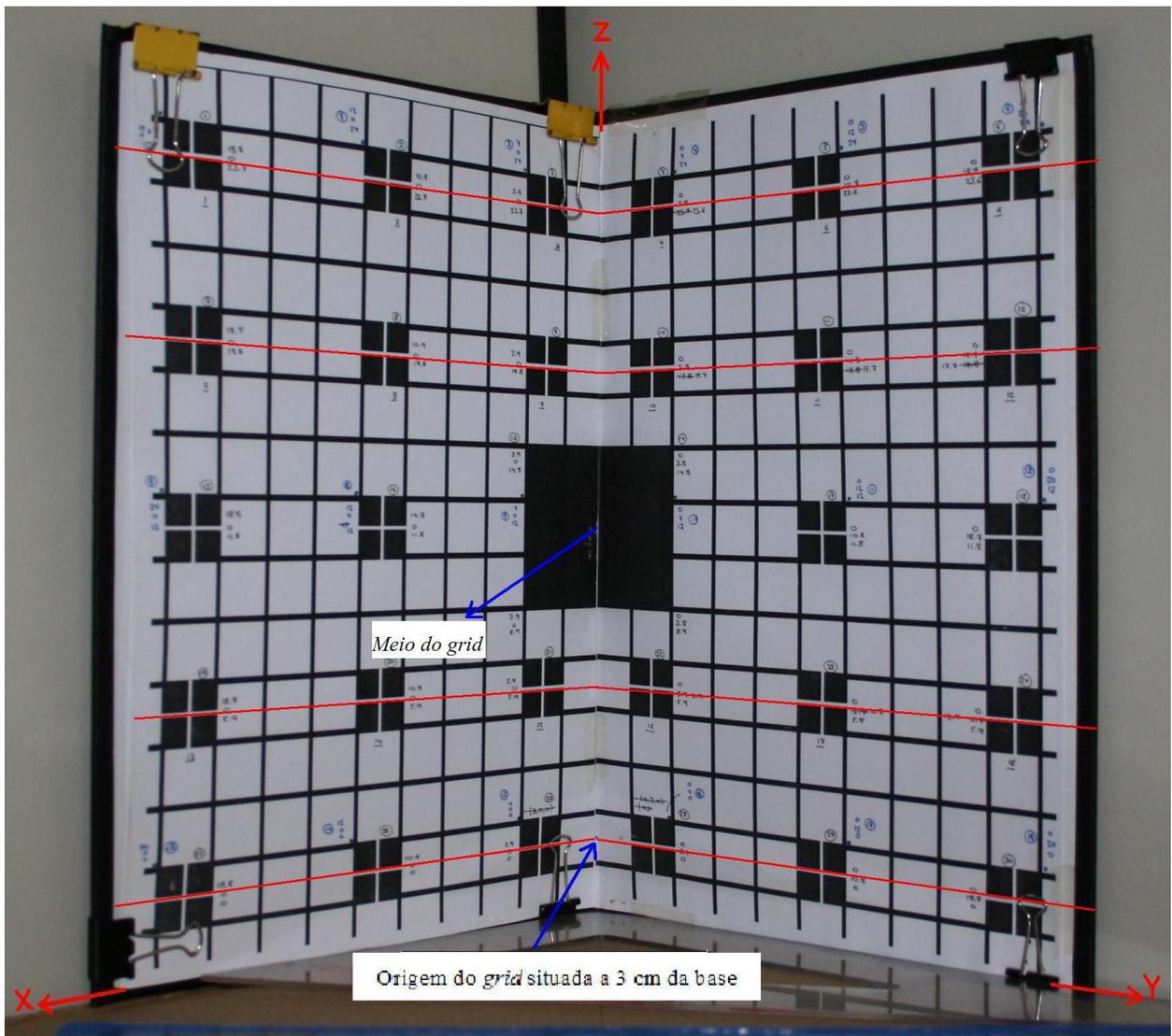


Figura 2.1: Câmera alinhada à bissetriz interna do *grid*

A origem do *grid* é o nosso referencial global. As coordenadas do centro óptico da câmera (considerado neste trabalho como sendo o centro geométrico da lente da câmera) serão sempre calculadas a partir deste ponto, que está situado a 3 cm de altura em relação à base do *grid*. Ou seja, a coordenada Z da câmera terá que ser subtraída de 3 cm, se a sua altura Z for medida em relação ao chão.

Para determinar as coordenadas da câmera basta calcular o vetor de sua translação em relação à origem do *grid*, que pode ser medido com o auxílio de régua, trena, esquadros e transferidores.

Para determinar a orientação da câmera em relação à origem do *grid*, precisamos analisar a rotação do eixo óptico da câmera em relação ao referencial global. Isto será descrito na Seção 2.3.

2.2 Calibração

No presente trabalho, a calibração das câmeras visa apenas determinar seus parâmetros extrínsecos. A determinação desses parâmetros é feita através de uma biblioteca dinâmica (CalMF.dll), aplicada sobre as coordenadas 3D e 2D do objeto e da imagem, respectivamente.

A rotina de calibração (Apêndice A) utiliza um conjunto de coordenadas 2D da imagem (*grid* projetado no plano, isto é, a foto do *grid* propriamente dito) e 3D de pontos conhecidos do *grid* como entrada. As coordenadas 2D são denominadas u e v e podem ser determinadas através de um programa editor de imagens. As coordenadas 3D são denominadas X , Y e Z e podem ser vistas, no nosso caso de estudo, diretamente anotadas no *grid*. Como elas foram determinadas não é o foco deste trabalho.

A rotina de calibração gera como saída os seis parâmetros extrínsecos da câmera e os quatro parâmetros intrínsecos. Os parâmetros extrínsecos são dados no referencial global. Os parâmetros extrínsecos referentes à translação da câmera (X , Y e Z) são de fácil análise, visto que são diretamente relacionados às medidas feitas manualmente com as réguas. Porém, para que possamos analisar os parâmetros extrínsecos de orientação da câmera (ω , ϕ e κ), é necessário utilizar um algoritmo de transformação linear, uma vez que os valores de ω , ϕ e κ usados na realização dos testes são medidos no referencial local (isto é, da própria câmera), e não no referencial global.

2.3 Transformação Linear

A relação entre o referencial da câmera e o referencial global (no caso, do *grid*) é dada por uma translação e uma rotação. Como as direções dos eixos da câmera X_{cam} , Y_{cam} e Z_{cam} diferem das direções do referencial global X , Y e Z , representa-se a rotação do referencial global

em relação ao referencial da câmera como uma seqüência de três rotações simultâneas em torno de cada um dos eixos:

$$R = R_1(\kappa)R_2(\phi)R_3(\omega) \quad (2.1)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Podemos representar, então, a matriz de rotação por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Para simplificar, utilizaremos a notação:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Os ângulos de rotação podem ser obtidos a partir de R aplicando-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \omega &= -a \tan 2(r_{32}, r_{33}) \\ \phi &= a \tan 2(r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \\ \kappa &= -a \tan 2(r_{21}, r_{11}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sendo assim, após executarmos o algoritmo de calibração, passamos os ângulos ω , ϕ e κ obtidos no sistema de coordenadas global como parâmetros para a Equação (2.3), chamando esta matriz de R_1 .

Após girarmos a câmera em torno de seu eixo desejado, executa-se novamente o algoritmo de calibração e obtêm-se novos ângulos ω , ϕ e κ . Assim como foi feito para a posição

original, estes ângulos serão passados como parâmetros para a Equação (2.3) e obteremos uma nova matriz, que chamaremos de R_3 .

Esta matriz de rotação R_3 representa duas transformações sucessivas: (i) do sistema de coordenadas do *grid* para o sistema de coordenadas da câmera (a rotação R_1 já calculada); e (ii) desta posição original para uma rotação em um dos eixos da câmera (que chamaremos de R_2). Portanto, podemos representar R_3 como sendo:

$$R_3 = R_2 \cdot R_1 \quad (2.6)$$

Logo, a matriz de rotação R_2 que queremos descobrir é dada por:

$$R_2 = R_3 \cdot R_1^{-1} \quad (2.7)$$

Tendo a matriz R_2 calculada, podemos extrair os ângulos, agora já no sistema de coordenadas da câmera, utilizando o conjunto de equações dado pela Equação (2.5). Estes são nossos chamados ângulos α , β e γ . Agora estes ângulos estão prontos para serem comparados com os ângulos segundo os quais se pretende girar a câmera.

Capítulo 3

Métodos

Este capítulo descreve os procedimentos utilizados nos testes realizados neste projeto. Todos os testes foram realizados a fim de verificar os erros na posição e na rotação da câmera relativos aos eixos X, Y e Z e aos ângulos ω , ϕ e κ do *grid*, respectivamente.

O material utilizado nestes testes foi um *grid* de pontos, uma câmera fotográfica digital, uma mesa grande, réguas e trena para medições e alguns acessórios para auxiliar no posicionamento do *grid*.

A Figura 3.1 ilustra todas as posições da câmera e o esquema principal do projeto.

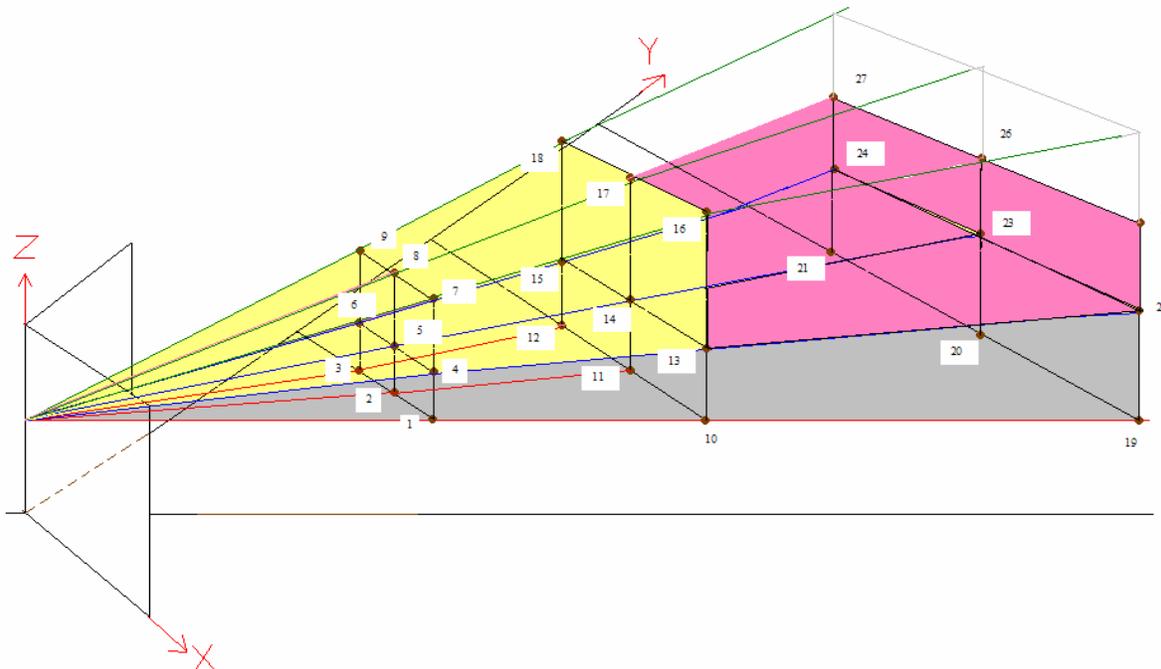


Figura 3.1 (a): Posições da câmera

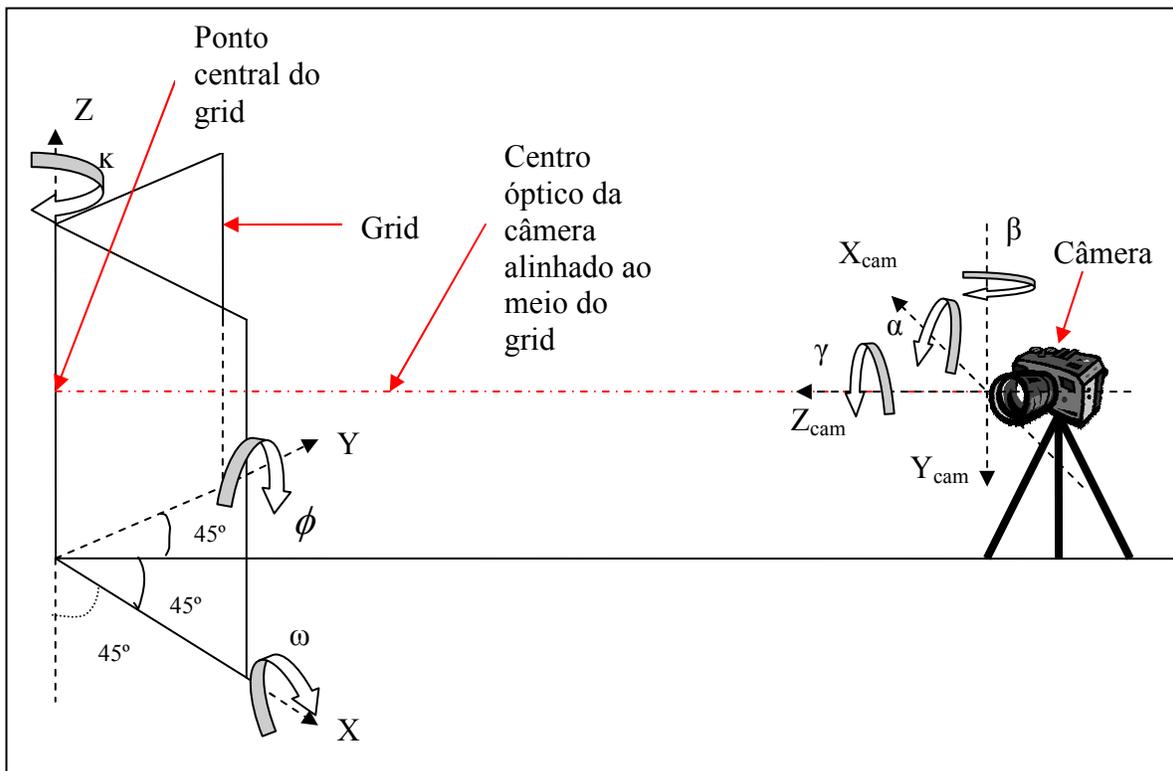


Figura 3.2 (b): Esquema principal do projeto

Para uma melhor compreensão do esquema, segue a legenda:

X: eixo ordenado X no sistema de coordenadas do *grid*;

Y: eixo ordenado Y no sistema de coordenadas do *grid*;

Z: eixo ordenado Z no sistema de coordenadas do *grid*;

ω : ângulo de rotação em torno do eixo X do *grid*;

ϕ : ângulo de rotação em torno do eixo Y do *grid*;

κ : ângulo de rotação em torno do eixo Z do *grid*;

X_{cam} : eixo ordenado X no sistema de coordenadas da câmera ou eixo horizontal da imagem formada;

Y_{cam} : eixo ordenado Y no sistema de coordenadas da câmera ou eixo vertical da imagem formada;

Z_{cam} : eixo ordenado Z no sistema de coordenadas da câmera ou profundidade da imagem formada;

α : ângulo de rotação em torno do eixo X_{cam} ;

β : ângulo de rotação em torno do eixo Y_{cam} ;

γ : ângulo de rotação em torno do eixo Z_{cam} .

O sistema de coordenadas da câmera foi criado através de uma transformação linear do sistema de coordenadas do *grid*, conforme foi apresentado na Seção 2.3.

3.1 Escolha das Posições da Câmera para os testes

Dividiremos este projeto em três testes. Em cada um deles, a câmera é posicionada a uma distância diferente do *grid*. Isto define três planos verticais, que chamaremos de planos de distância N_i (sendo i igual a 0, 1 ou 2). A notação utilizada na Figura 3.2 será totalmente compreendida em breve.

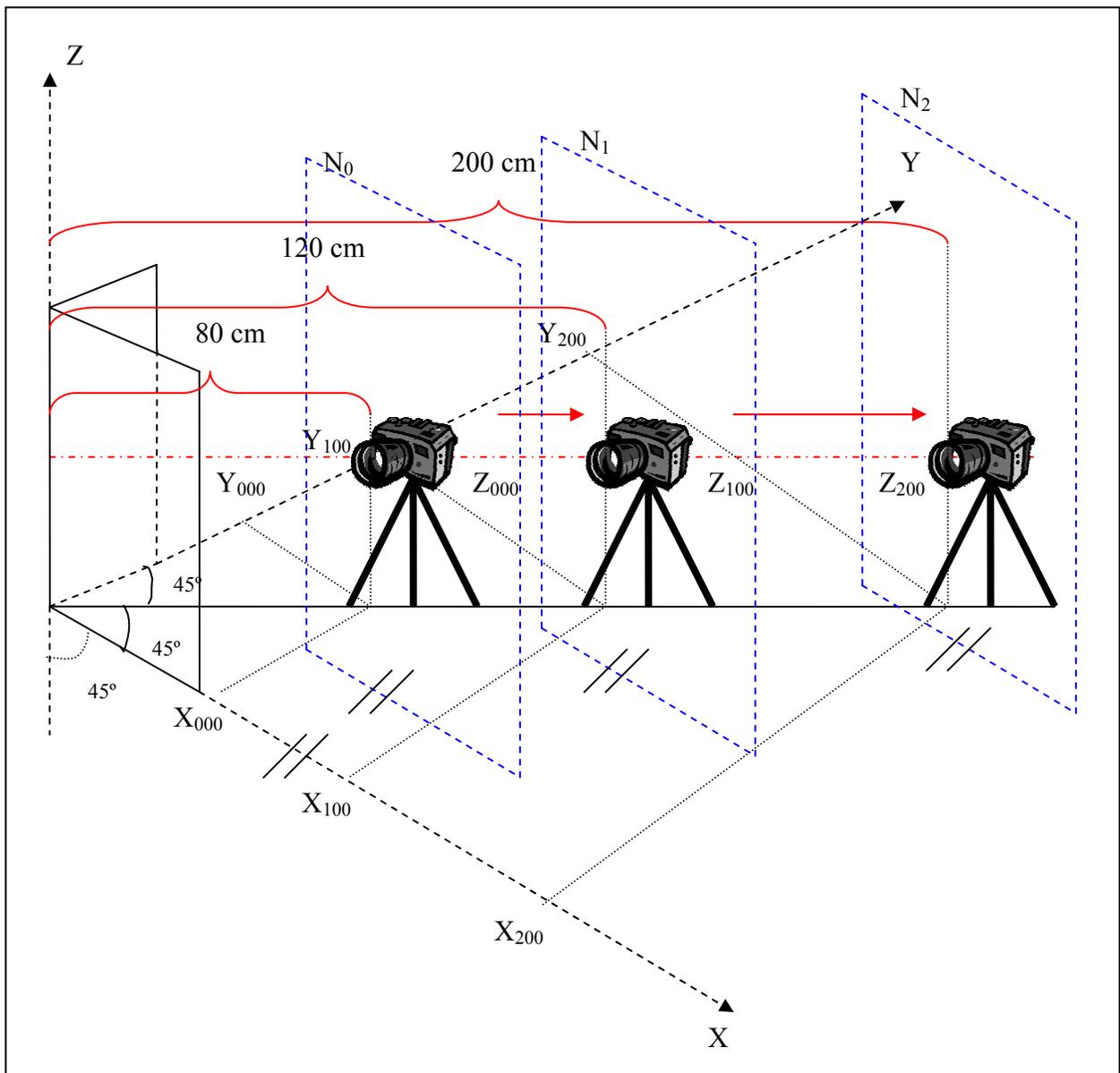


Figura 3.3: Esquema com três planos verticais (N)

Para cada um destes planos verticais N_i , iremos transladar a câmera para diversas outras posições: mais duas posições deslocando a câmera paralelamente ao eixo X do *grid* (isto forma planos que chamaremos de planos L_i) e mais duas posições deslocando a câmera paralelamente ao eixo Z do *grid* (planos K_i). Isto nos dá um total de 27 posições para a câmera.

Para simplificar, utilizaremos a seguinte notação:

N: plano vertical ortogonal ao eixo Y do *grid*:

N₀: câmera distante 80 cm do *grid*;

N₁: câmera distante 120 cm do *grid*;

N₂: câmera distante 200 cm do *grid*.

K: plano horizontal ortogonal ao eixo Z do *grid*:

K₀: câmera alinhada ao meio do *grid*;

K₁: câmera elevada 10° em relação ao meio do *grid*;

K₂: câmera elevada 30° em relação ao meio do *grid* para N₀ e N₁ e elevada 20° para N₂.

L: plano ortogonal ao eixo X do *grid*:

L₀: câmera alinhada à bissetriz interna do *grid*;

L₁: câmera deslocada de $\frac{1}{4}$ de X (X medido sobre a bissetriz do quadrante XY) em direção ao plano YZ;

L₂: câmera deslocada de $\frac{1}{2}$ de X (X medido sobre a bissetriz do quadrante XY) em direção ao plano YZ.

Seguindo esta notação, as coordenadas de uma posição específica da câmera são X_{NKL} , Y_{NKL} e Z_{NKL} .

Com isto podemos compreender o esquema da Figura 3.2 e os que se seguem nas demais figuras deste capítulo.

Para transladar a câmera paralelamente ao eixo X do *grid* (sobre um plano L_i), foram escolhidas duas distâncias de forma tal que o *grid* ainda pudesse ser enquadrado inteiramente na imagem. A primeira distância foi a $\frac{1}{4}$ (um quarto) da distância original (X_{000}) e a segunda distância foi a metade da distância original. Este esquema pode ser visto na Figura 3.3.

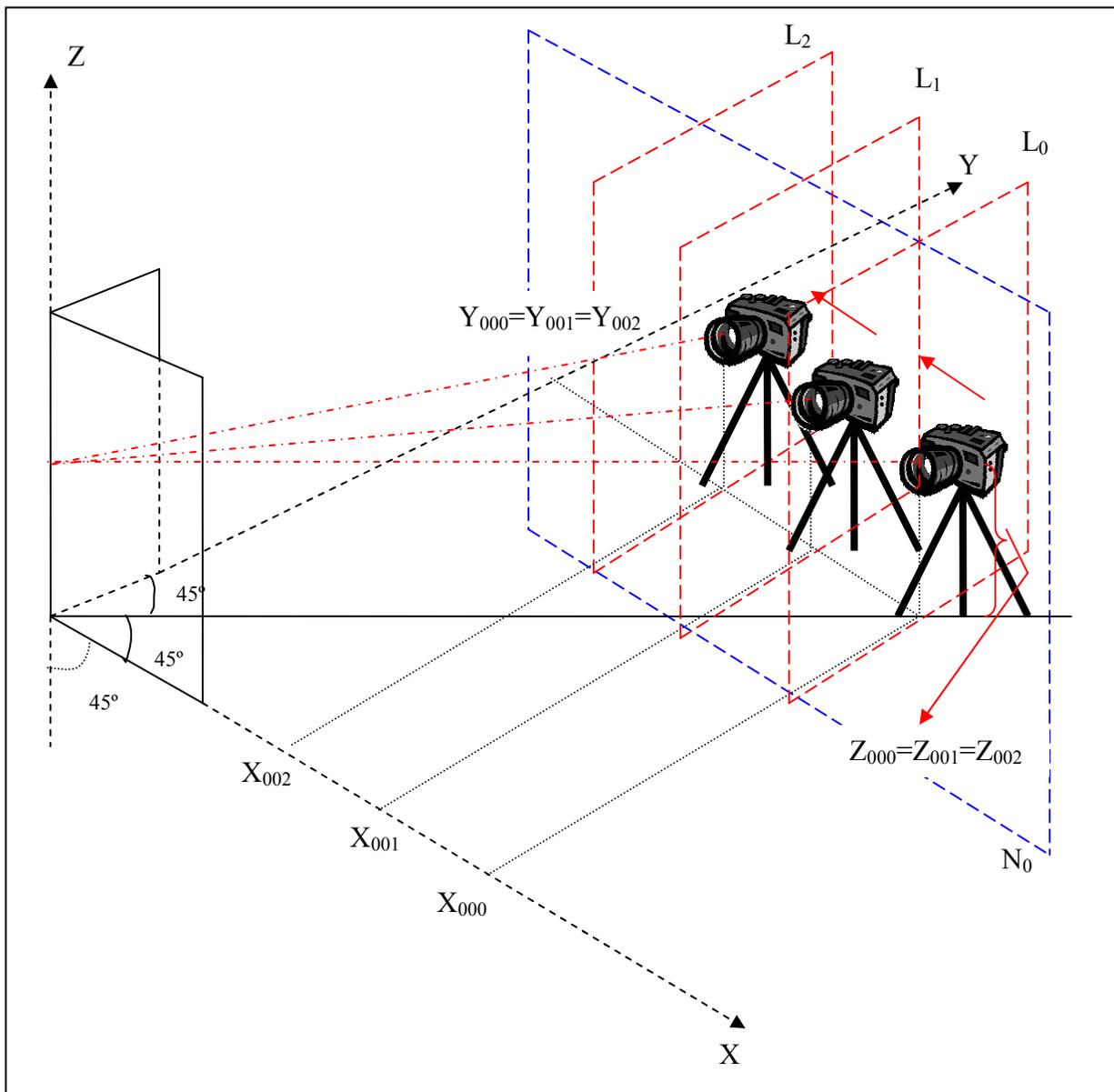


Figura 3.4: Esquema com sub-planos L para o plano N_0

Para transladar a câmera paralelamente ao eixo Z do *grid*, foram escolhidas duas distâncias de forma tal que na máxima altura ainda fosse possível fotografar o *grid* e enquadrá-lo inteiramente na imagem. Então, escolhemos ângulos de 10° e 30° para elevar a câmera no caso dos dois primeiros planos verticais (N_0 e N_1) e ângulos de 10° e 20° para o caso do terceiro plano vertical (N_2), visto que, a uma distância de 200 cm, a altura resultante ao elevarmos a câmera em 30° seria superior ao teto do ambiente em que as fotos foram tiradas. Este esquema é mostrado na Figura 3.4.

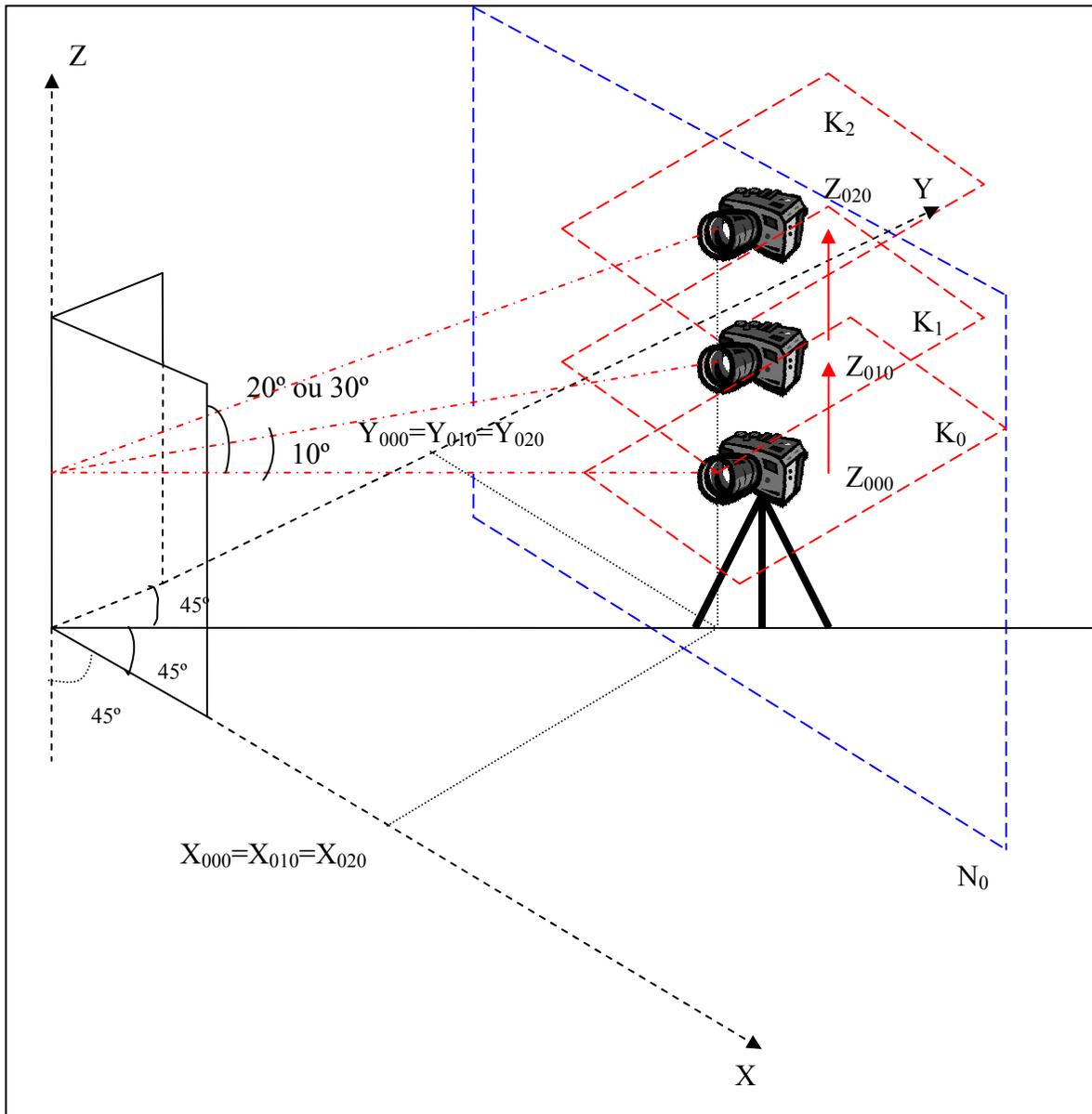


Figura 3.5: Esquema com sub-planos K para o plano N_0

Note que para as translações no mesmo plano vertical o valor da coordenada Y da câmera em relação ao *grid* não varia, uma vez que só estamos transladando a câmera em torno dos eixos X e Z do *grid*. Portanto, dado um plano N_i , qualquer que seja K_i e L_i o valor de Y não varia.

Também para cada posição da câmera, a mesma foi rotacionada em torno de seus próprios eixos (X_{cam} , Y_{cam} e Z_{cam}) a fim de que pudéssemos testar os outros parâmetros extrínsecos: ω , φ e κ . As rotações foram feitas conforme a orientação esquematizada na Figura 3.1: rotação para baixo em torno do eixo X_{cam} (o que nos retorna um ângulo negativo $-\alpha$); rotação para a direita em torno do eixo Y_{cam} (o que nos retorna um ângulo positivo β); e rotação no sentido anti-horário em

torno do eixo Z_{cam} (o que nos retorna um ângulo negativo $-\gamma$). Foi feita também uma rotação de -90° em torno do eixo Z_{cam} para observar o comportamento do algoritmo de calibração numa situação em que fosse obtida uma imagem do *grid* em uma posição não-horizontal. Como, em testes anteriores, foi comprovado que o algoritmo retornava valores de X , Y e Z com erro aparentemente fixo, foi capturada também uma outra foto afastando o *grid* da câmera de um vetor $(X,Y,Z) = (1,1,1)$ cm, para que se pudesse verificar com que precisão esse desvio de 1 cm em cada coordenada se refletia nos nossos resultados.

Portanto, para cada posição da câmera foram tiradas nove fotos: (i) três fotos (1B, 2B, 3B) rotacionando a câmera de um ângulo pequeno nos seus 3 eixos (X_{cam} , Y_{cam} , e Z_{cam}); (ii) uma foto (4C) rotacionando a câmera de -90° em torno de Z_{cam} ; (iii) uma foto (4B) deslocando o *grid* de um vetor $(X,Y,Z) = (1,1,1)$ cm; e (iv) quatro fotos frontais (1A, 2A, 3A, 4A) antes de cada rotação, pois assim podemos garantir a análise dos ângulos de saída do algoritmo fazendo a comparação com a foto original, conforme explicado na Seção 2.3, visto que seria muito difícil retornar a câmera à sua posição frontal após rotacioná-la em diversos eixos.

Segue abaixo a notação utilizada:

1A: foto frontal 1;

1B: foto girando a câmera de $-8,5^\circ$ em torno do eixo X_{cam} ;

2A: foto frontal 2;

2B: foto girando a câmera de $8,5^\circ$ em torno do eixo Y_{cam} ;

3A: foto frontal 3;

3B: foto girando a câmera de -20° em torno do eixo Z_{cam} ;

4A: foto frontal 4;

4B: foto deslocando o *grid* de um vetor $(X,Y,Z) = (1,1,1)$ cm em relação à sua origem $(0,0,0)$;

4C: foto girando a câmera de -90° em torno do eixo Z_{cam} .

Estes valores de ângulos de rotação foram previamente estudados para avaliar a viabilidade do quanto se poderia girar a câmera em torno dos seus três eixos, levando-se em conta todos os casos (todas as posições em todos os planos N, K e L).

Com 27 posições distintas para a câmera e nove fotos distintas para cada uma destas posições, obtivemos um total de 243 fotos.

Segue abaixo a Tabela 3.1 contendo as miniaturas de todas as fotos, para se ter uma idéia do posicionamento da câmera.

Tabela 3.1: Miniaturas das imagens do *grid* nas nove fotos tiradas em cada uma das 27 posições do espaço (posições definidas por Figuras 3.2 até 3.4)

Fotos	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
1 000									
2 001									
3 002									
4 010									
5 011									
6 012									
7 020									
8 021									
9 022									
10 100									
11 101									
12 102									
13 110									
14 111									
15 112									

Tabela 3.2 (continuação): Miniaturas das imagens do *grid* nas nove fotos tiradas em cada uma das 27 posições do espaço (posições definidas por Figuras 3.2 até 3.4)

Fotos	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
16 120									
17 121									
18 122									
19 200									
20 201									
21 202									
22 210									
23 211									
24 212									
25 220									
26 221									
27 222									

3.2 Procedimentos no Computador

Após a tomada de fotografias, passamos à etapa de aquisição dos dados de entrada do algoritmo de calibração. Precisamos de um programa editor de imagens para convertermos os

arquivos de imagem da câmera de JPEG para BMP e também para marcarmos os pontos de calibração, conforme será explicado a seguir.

Utilizamos 24 pontos do *grid* como dados de entrada do algoritmo de calibração (as duas linhas superiores e as duas inferiores, ignorando a linha do meio, conforme indicado na Figura 2.1). Então, ao abrir cada uma das 243 fotos no editor de imagens, marcamos o *pixel* que melhor representa o centro de cada dos 24 alvos. As coordenadas u e v destes *pixels* serão usadas pelo algoritmo de calibração.

Para executarmos o algoritmo de calibração precisamos construir um arquivo texto, padrão ASCII. Para cada uma das 243 fotos, este arquivo possuirá 24 linhas contendo cinco coordenadas de cada ponto marcado: as três coordenadas espaciais do ponto no *grid* (em metros), que podem ser vistas no próprio *grid*, e as duas coordenadas do ponto na imagem (em *pixels*), que podem ser vistas no programa editor de imagens. Com isso, teremos um arquivo na forma de uma matriz 24 X 5. Um exemplo deste arquivo pode ser visto no Apêndice B.

Para cada um dos 243 arquivos de calibração 24 X 5, o algoritmo de calibração retorna um vetor com 10 componentes. Os três primeiros valores definem a posição espacial da câmera no sistema de coordenadas do *grid* (coordenadas X, Y e Z). Os três valores seguintes são os ângulos de rotação da câmera no sistema de coordenadas do *grid* (ω , ϕ e κ). Os quatro últimos valores são os parâmetros intrínsecos da câmera, que não são objetos de estudo deste projeto.

As coordenadas X, Y e Z podem ser comparadas de imediato com os valores que medimos manualmente no início dos testes na tomada das fotos. Já para a análise dos ângulos α , β e γ (definidos em referência aos eixos X_{cam} , Y_{cam} e Z_{cam}), precisamos aplicar o método de análise indireta apresentado no Capítulo 2. Podemos comparar os valores destes ângulos, no sistema de coordenadas da câmera (α , β e γ), com os ângulos segundo os quais giramos a câmera manualmente na tomada das fotos.

Tendo todos os dados necessários para o nosso estudo, isto é, as medidas reais e as medidas estimadas pela calibração da câmera, podemos analisar os erros. Primeiramente, é válido verificar superficialmente os resultados encontrados e nos certificarmos se é preciso ou não aplicar algum fator de correção a algum parâmetro (ou mais). Caso um ou mais parâmetros apresentem erros elevados e fixos, faz-se necessária a aplicação de um fator de correção, visando minimizar este(s) erro(s). Detalhes sobre como aplicar este método podem ser vistos a seguir. Caso contrário, podemos partir para o cálculo dos erros relativos percentuais.

3.3 Fator de Correção

Nos testes iniciais de familiarização com o algoritmo de calibração, notamos que os valores retornados para os ângulos de rotação da câmera nos seus eixos X_{cam} e Y_{cam} , α e β (ou seja, fazendo a transformação linear depois de executar o algoritmo), estavam bem distantes dos valores medidos manualmente na tomada das fotos (cerca de 50% de erro). Porém, foi constatado que estes erros eram provenientes do algoritmo de calibração e eram sempre constantes. Por isso, verificamos a necessidade de aplicar um fator de correção a estes parâmetros. Para este caso específico, foi observado nos testes iniciais que o fator corretivo era uma constante multiplicativa.

O fator de correção é um fator multiplicador que visa minimizar a distância entre o resultado encontrado e o resultado esperado. No Apêndice A (Tabela A.4) pode ser visto um código fonte feito no pacote matemático que gera um gráfico do fator de correção para os ângulos α e β . Encontramos um fator de correção para cada um desses ângulos, sendo eles muito próximos um do outro. Portanto, para facilitar, resolvemos utilizar apenas um fator de correção para ambos. Sendo assim, neste gráfico plotamos três curvas: duas do fator de correção para cada ângulo e uma do fator médio para ambos os ângulos.

O gráfico da Figura 3.5 ilustra o que foi dito acima.

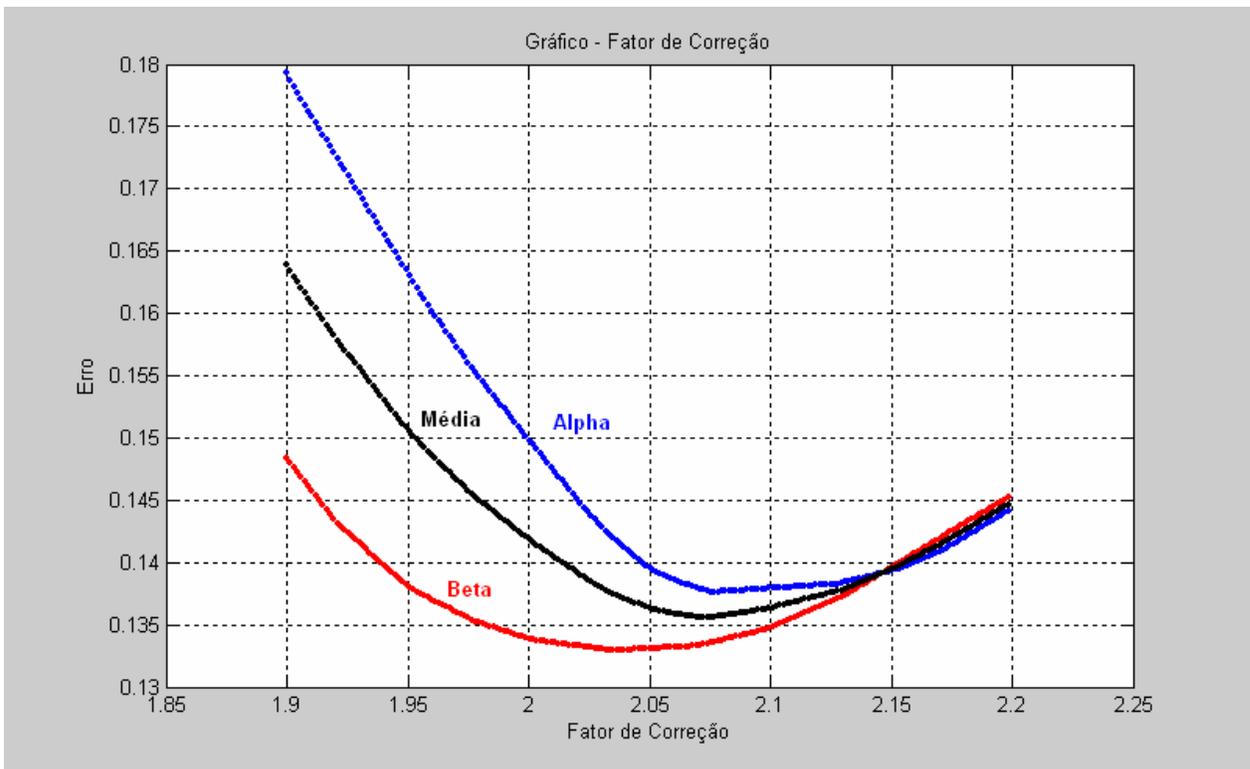


Figura 3.6: Gráfico do fator de correção para os ângulos α e β

Ampliando o gráfico da Figura 3.5, percebemos, conforme exibido na Figura 3.6, que o fator de correção que minimiza o erro é em torno de 2,07.

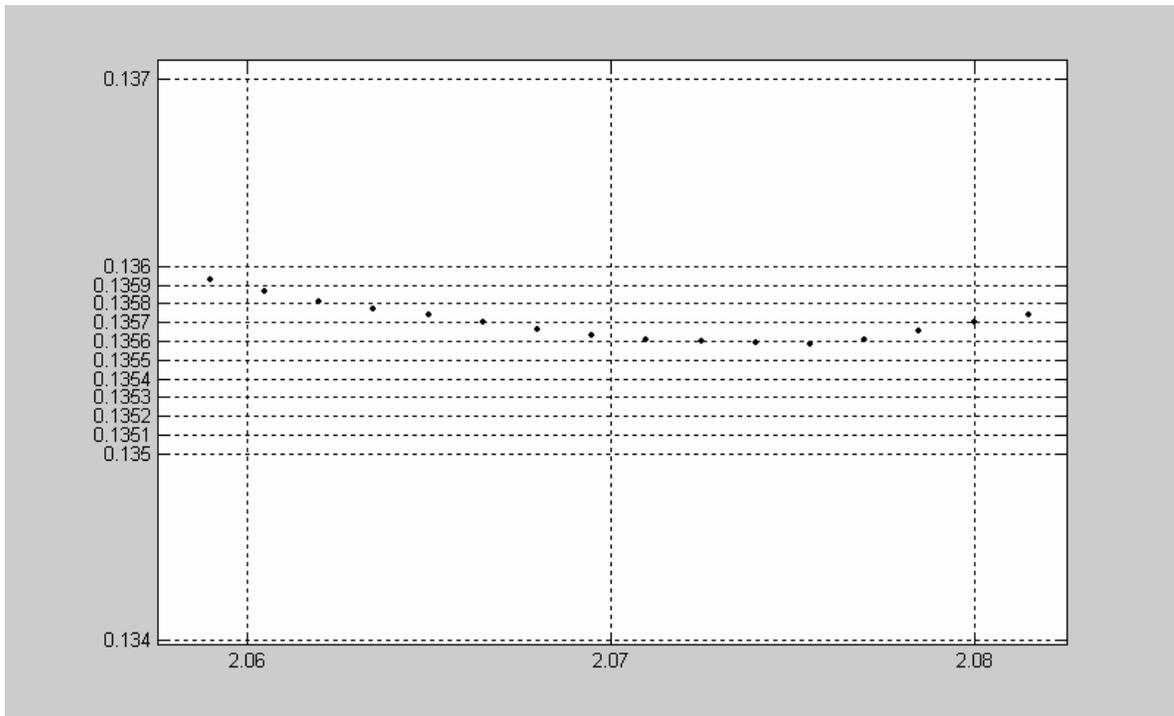


Figura 3.7: Gráfico da média do fator de correção ampliado na região de interesse

3.4 Erros Relativos Percentuais

Os erros relativos percentuais são calculados pela diferença relativa entre a medida real e a medida estimada pela rotina de calibração, multiplicado por 100 (para termos o percentual).

Matematicamente, o erro relativo é dado pelo quociente entre o erro absoluto e o módulo do valor real da variável em questão:

$$\xi_{relativo} = \frac{X_{real} - X_{medido}}{|X_{real}|} \quad (3.1)$$

Calculados todos os erros de todos os parâmetros em todas as posições da câmera, passamos à etapa final do trabalho que é o Método dos Mínimos Quadrados, descrito a seguir.

3.5 Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados é uma técnica de otimização matemática amplamente utilizada no ajuste de curvas, sejam elas lineares, parabólicas, cúbicas, quárticas ou exponenciais. O método consiste em ajustar um conjunto de dados a uma curva em função da minimização da soma dos quadrados dos erros entre a curva e os dados.

Uma das aplicações do Método dos Mínimos Quadrados é a avaliação de opções que dependem de múltiplos fatores. No nosso caso de estudo, os mínimos quadrados são lineares e podemos resolver as equações normais usando álgebra linear. Uma explicação mais aprofundada sobre este método pode ser vista em [2].

Suponha o sistema linear descrito pela equação abaixo, sendo $A_{N \times 4}$ e $b_{N \times 1}$ matrizes com coeficientes reais:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & a_{N4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A Equação (3.2) pode ser representada por:

$$A \cdot x_{LS} = b \quad (3.3)$$

Deseja-se descobrir a solução para a Equação (3.3), porém sabe-se que pode não existir solução exata para a mesma. Sendo assim, deseja-se minimizar o erro dado por:

$$e = b - A \cdot x \quad (3.4)$$

Para isto, faz-se:

$$J = \|e\|^2 = e^T \cdot e, \quad (3.5)$$

sendo e^T a transposta do vetor e .

Desenvolvendo a Equação (3.5), tem-se:

$$J = (b - A \cdot x)^T \cdot (b - A \cdot x) \quad (3.6)$$

Aplicando a propriedade distributiva na Equação (3.6):

$$J = b^T \cdot b - b^T \cdot A \cdot x - x^T \cdot A^T \cdot b + x^T \cdot A^T \cdot A \cdot x \quad (3.7)$$

Para minimizar a soma dos quadrados dos erros, faz-se:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -2A^T \cdot b + 2A^T \cdot A \cdot x_{LS} = 0 \quad (3.8)$$

Derivando a Equação (3.8), tem-se a expressão na variável x :

$$A^T \cdot A \cdot x_{LS} = A^T \cdot b \quad (3.9)$$

A Equação (3.9) nos leva à solução desejada, o ajuste dos coeficientes com o Método dos Mínimos Quadrados:

$$x_{LS} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot b \quad (3.10)$$

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo descreve os resultados obtidos em todos os testes deste trabalho. Foram calculados os erros relativos percentuais para os parâmetros extrínsecos de calibração X , Y , Z e para os ângulos no sistema de coordenadas da câmera α , β , e γ , que correspondem aos parâmetros extrínsecos de calibração ω , ϕ , e κ após aplicação de uma transformação linear do sistema de coordenadas do *grid* para o sistema de coordenadas da câmera, conforme explicado no Capítulo 3.

Com a obtenção destes erros, através do Método dos Mínimos Quadrados, foi possível chegar a um modelo linear do erro relativo, referente a cada um dos seis parâmetros extrínsecos de calibração, como função da posição da câmera em relação ao *grid* (ou seja, em função dos parâmetros X , Y e Z).

Os valores dos parâmetros medidos manualmente (“ground-truth”), dos resultados obtidos para estes parâmetros com o algoritmo de calibração e dos erros relativos dos mesmos podem ser vistos nas Tabelas 4.1 a 4.30.

4.1 Precisão da calibração (erros nos seis parâmetros extrínsecos) com a câmera na posição 1

Este foi o primeiro teste a ser realizado por ser o mais simples. É também o teste para o qual se espera obter maior precisão na calibração da câmera. É a posição em que a câmera enquadra o *grid* mais perfeitamente, pois ela está a uma pequena distância e a imagem está bem centralizada.

Neste teste a câmera se encontra na posição 1 (vide Figura 3.1 (a)), isto é, ela está situada a 80 cm do centro do *grid*, mantida à mesma altura do meio do *grid* e alinhada frontalmente à origem do *grid* (fotos 000).

A partir da primeira foto, chamada de 1A, é possível extrair as coordenadas X, Y e Z da câmera no sistema de referência do *grid* utilizando um algoritmo de calibração executado em um pacote matemático. As outras fotos, chamadas de 1B até 4C, servem para análise dos ângulos ω , ϕ e κ da câmera no sistema de coordenadas do *grid* (α , β e γ no sistema de coordenadas da câmera).

Para melhor entendimento da simbologia utilizada, é útil lembrar as definições do Capítulo 3 (página 24):

N: plano vertical ortogonal ao eixo Y do *grid*;

K: plano horizontal ortogonal ao eixo Z do *grid*;

L: plano ortogonal ao eixo X do *grid*.

Mais detalhes da nomenclatura das fotos, do sistema de coordenadas do *grid* (XYZ ω ϕ κ) e do sistema de coordenadas da câmera ($X_{cam}Y_{cam}Z_{cam}\alpha$ β γ) podem ser vistos no Capítulo 3 (páginas 27 e 22, respectivamente).

Vale notar que, após cada rotação, foi obtida uma nova foto frontal, pois seria muito difícil retornar a câmera exatamente à sua posição original, aquela em que foi tirada a foto 1A. Portanto, tendo uma foto frontal como base para cada nova rotação, pode-se evitar erros sistemáticos.

Para este primeiro teste, os valores medidos manualmente encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros medidos manualmente para a posição 1

N_0	K_0	L_0	X	Y	Z
80,0 cm	0,0 cm	0,0 cm	56,6 cm	56,6 cm	12,0 cm

A Tabela 4.2 contém os resultados deste teste destacando-se os valores que nos interessam, ou seja, das coordenadas X, Y, Z (sistema de coordenadas do *grid*) e dos ângulos α , β e γ (sistema de coordenadas da câmera). Nestes últimos só vale destacar aqueles nos quais era de se esperar um valor diferente de zero, isto é, o ângulo cujo eixo planejamos a rotação (por exemplo, na foto 1B rotacionamos a câmera em torno do seu eixo X_{cam} . Logo, observa-se um valor não nulo no ângulo α e espera-se valores nulos nos ângulos β e γ).

Tabela 4.2: Resultados obtidos com o algoritmo de calibração para a posição 1

	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,154	57,966	58,513	57,482	57,986	59,604	58,621	58,179	58,141
Y (cm)	56,337	56,253	56,530	56,503	56,123	55,212	56,726	56,687	55,717
Z (cm)	12,626	11,924	12,600	12,650	12,643	12,335	12,629	10,534	12,404
ω (rad)	1,523	1,631	1,530	1,521	1,527	1,516	1,521	1,523	1,524
ϕ (rad)	-0,799	-0,793	-0,800	-0,873	-0,800	-0,826	-0,801	-0,787	-0,785
κ (rad)	3,101	-3,076	3,100	3,095	3,100	2,746	3,094	3,128	1,522
α (°)	0,000	-4,339	0,000	0,163	0,000	0,369	0,000	0,000	-0,095
β (°)	0,000	-0,363	0,000	4,177	0,000	1,492	0,000	0,000	-0,962
γ (°)	0,000	1,610	0,000	0,090	0,000	-19,843	0,000	0,000	-90,203

Os ângulos α , β e γ observados em cada foto frontal são iguais a zero, uma vez que a câmera não estava rotacionada.

Como pode ser visto na Tabela 4.2, os valores dos ângulos α e β foram muito distantes dos esperados. Este erro fixo se propagou em todos os testes. Como foi explicado no Capítulo 3, aplicamos um fator de correção para diminuir este erro. A Tabela 4.3 contém os novos valores de α e β .

Tabela 4.3: Resultados obtidos após aplicação do fator de correção para a posição 1

	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,154	57,966	58,513	57,482	57,986	59,604	58,621	58,179	58,141
Y (cm)	56,337	56,253	56,530	56,503	56,123	55,212	56,726	56,687	55,717
Z (cm)	12,626	11,924	12,600	12,650	12,643	12,335	12,629	10,534	12,404
ω (rad)	1,523	1,631	1,530	1,521	1,527	1,516	1,521	1,523	1,524
ϕ (rad)	-0,799	-0,793	-0,800	-0,873	-0,800	-0,826	-0,801	-0,787	-0,785
κ (rad)	3,101	-3,076	3,100	3,095	3,100	2,746	3,094	3,128	1,522
α (°)	0,000	-8,982	0,000	0,337	0,000	0,764	0,000	0,000	-0,197
β (°)	0,000	-0,751	0,000	8,646	0,000	3,088	0,000	0,000	-1,991
γ (°)	0,000	1,610	0,000	0,090	0,000	-19,843	0,000	0,000	-90,203

A tabela com os erros relativos percentuais para todas as posições obtidos antes de se aplicar o fator de correção nos ângulos α e β pode ser vista no Apêndice E.

A seguir temos a Tabela 4.4 com os erros relativos percentuais de cada parâmetro, após aplicarmos o fator de correção nos ângulos α e β . Estes erros foram calculados conforme foi explicado no Capítulo 3 (Seção 3.4).

Lembramos que só é razoável calcular erros para o ângulo que se deseja analisar após girar a câmera na respectiva foto. Isto é, nas fotos frontais não faz sentido calcular erro para os ângulos, pois se espera que os mesmos sejam nulos. Na foto 1B, a câmera foi girada somente em torno de seu eixo X_{cam} , então só é calculado o erro do ângulo α .

Tabela 4.4: Erros relativos percentuais dos parâmetros calculados para a posição 1

%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
$E_{relativo,x}$	2,746	2,413	3,380	1,558	2,449	5,307	3,571	-55,800	2,723
$E_{relativo,y}$	-0,465	-0,613	-0,124	-0,171	-0,843	-2,452	0,223	-96,100	-1,560
$E_{relativo,z}$	5,217	-0,633	5,000	5,417	5,358	2,792	5,242	109,500	3,367
$E_{relativo,\alpha}$	-	5,667	-	-	-	-	-	-	-
$E_{relativo,\beta}$	-	-	-	1,722	-	-	-	-	-
$E_{relativo,\gamma}$	-	-	-	-	-	-0,785	-	-	0,226

Destaca-se também que o erro das fotos 4B são calculados em relação à variação de 1 cm em cada coordenada X, Y e Z, e não em relação aos valores absolutos destas mesmas coordenadas. Isto é, calcula-se a diferença entre os resultados das coordenadas espaciais da foto 4B para a foto 4A e em seguida o erro deste resultado em relação a 1 cm. Por serem valores de naturezas diferentes, apresentaram valores elevados neste e em outros testes.

4.2 Precisão da calibração nas demais 26 posições de teste

O mesmo procedimento descrito acima foi feito para as demais 26 posições da câmera. Para facilitar a visualização dos resultados, para cada posição, os mesmos serão exibidos em uma única tabela, destacando-se os valores que nos são de maior interesse.

As Tabelas 4.5 a 4.30 exibem, em seqüência, os valores dos parâmetros medidos manualmente (“ground-truth”), dos resultados obtidos para estes parâmetros com o algoritmo de calibração antes e depois da aplicação do fator de correção e dos erros relativos dos mesmos.

Tabela 4.5: Parâmetros e resultados para a posição 2

Foto 001		N₀	K₀	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		80,0 cm	0,0 cm	14,2 cm	42,4 cm	56,6 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	46,723	46,066	46,175	45,313	45,326	46,562	45,119	45,544	43,743
Y (cm)	61,192	60,337	60,570	60,587	59,504	58,149	59,111	58,216	60,581
Z (cm)	13,350	12,620	13,322	13,342	13,362	13,022	13,318	10,370	12,219
ω (rad)	1,577	1,663	1,576	1,579	1,581	1,570	1,579	1,524	1,536
φ (rad)	-0,637	-0,636	-0,638	-0,716	-0,637	-0,668	-0,638	-0,658	-0,617
κ (rad)	-3,105	-3,065	-3,098	-3,094	-3,097	2,826	-3,114	3,134	1,614
α (°)	0,000	-3,950	0,000	0,059	0,000	0,562	0,000	0,000	1,968
β (°)	0,000	0,204	0,000	4,477	0,000	1,784	0,000	0,000	-1,230
γ (°)	0,000	-0,628	0,000	0,131	0,000	-20,246	0,000	0,000	-87,687
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3^a	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,154	57,966	58,513	57,482	57,986	59,604	58,621	58,179	58,141
Y (cm)	56,337	56,253	56,530	56,503	56,123	55,212	56,726	56,687	55,717
Z (cm)	12,626	11,924	12,600	12,650	12,643	12,335	12,629	10,534	12,404
ω (rad)	1,523	1,631	1,530	1,521	1,527	1,516	1,521	1,523	1,524
φ (rad)	-0,799	-0,793	-0,800	-0,873	-0,800	-0,826	-0,801	-0,787	-0,785
κ (rad)	3,101	-3,076	3,100	3,095	3,100	2,746	3,094	3,128	1,522
α (°)	0,000	-8,176	0,000	0,122	0,000	1,163	0,000	0,000	4,074
β (°)	0,000	0,422	0,000	9,267	0,000	3,693	0,000	0,000	-2,546
γ (°)	0,000	-0,628	0,000	0,131	0,000	-20,246	0,000	0,000	-87,687
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	10,196	8,646	8,903	6,870	6,901	9,816	6,413	-57,500	3,167
Erelativo,y	8,113	6,602	7,014	7,044	5,131	2,737	4,436	-10,500	7,034
Erelativo,z	11,250	5,167	11,017	11,183	11,350	8,517	10,983	194,800	1,825
Erelativo,α	-	-3,806	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	9,028	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	1,230	-	-	-2,570

Tabela 4.6: Parâmetros e resultados para a posição 3

Foto 002				N₀	K₀	L₂	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 				80,0 cm	0,0 cm	28,4 cm	28,2 cm	56,6 cm	12,0 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	29,813	29,587	29,707	28,878	29,612	30,444	29,333	30,935	29,603
Y (cm)	59,490	58,886	59,122	59,245	59,060	58,482	59,194	59,448	59,041
Z (cm)	12,200	11,379	12,185	12,202	12,182	11,763	12,172	11,212	11,985
ω (rad)	1,558	1,630	1,561	1,564	1,562	1,546	1,568	1,538	1,533
φ (rad)	-0,460	-0,470	-0,464	-0,538	-0,462	-0,480	-0,462	-0,490	-0,454
κ (rad)	-3,130	-3,111	3,126	3,130	3,128	2,854	-3,113	-3,124	1,557
α (°)	0,000	-3,655	0,000	-0,178	0,000	0,759	0,000	0,000	1,780
β (°)	0,000	0,693	0,000	4,246	0,000	1,092	0,000	0,000	-0,483
γ (°)	0,000	-0,723	0,000	0,155	0,000	-15,285	0,000	0,000	-91,576
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,154	57,966	58,513	57,482	57,986	59,604	58,621	58,179	58,141
Y (cm)	56,337	56,253	56,530	56,503	56,123	55,212	56,726	56,687	55,717
Z (cm)	12,626	11,924	12,600	12,650	12,643	12,335	12,629	10,534	12,404
ω (rad)	1,523	1,631	1,530	1,521	1,527	1,516	1,521	1,523	1,524
φ (rad)	-0,799	-0,793	-0,800	-0,873	-0,800	-0,826	-0,801	-0,787	-0,785
κ (rad)	3,101	-3,076	3,100	3,095	3,100	2,746	3,094	3,128	1,522
α (°)	0,000	-7,566	0,000	-0,368	0,000	1,571	0,000	0,000	3,685
β (°)	0,000	1,434	0,000	8,789	0,000	2,260	0,000	0,000	-1,000
γ (°)	0,000	-0,723	0,000	0,155	0,000	-15,285	0,000	0,000	-91,576
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	5,720	4,918	5,344	2,404	5,007	7,957	4,018	60,200	4,975
Erelativo,y	5,106	4,039	4,456	4,673	4,346	3,325	4,583	-74,600	4,313
Erelativo,z	1,667	-5,175	1,542	1,683	1,517	-1,975	1,433	-4,000	-0,125
Erelativo,α	-	-10,990	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	3,403	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-23,575	-	-	1,751

Tabela 4.7: Parâmetros e resultados para a posição 4

Foto 010				N_0	K_1	L_0	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 				80,0 cm	14,1 cm	0,0 cm	56,6 cm	56,6 cm	26,1 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	57,990	57,607	58,359	57,367	58,006	59,503	58,053	58,744	59,688
Y (cm)	59,462	59,281	59,885	59,996	59,642	58,162	59,645	60,573	61,978
Z (cm)	24,270	23,422	24,306	24,199	24,213	23,982	24,227	22,985	27,747
ω (rad)	1,767	1,868	1,760	1,774	1,756	1,743	1,759	1,764	1,853
ϕ (rad)	-0,762	-0,757	-0,762	-0,842	-0,766	-0,805	-0,759	-0,756	-0,743
κ (rad)	-3,002	-2,914	-3,003	-2,989	-3,002	2,897	-3,006	-3,008	1,771
α (°)	0,000	-4,199	0,000	0,131	0,000	0,813	0,000	0,000	-4,028
β (°)	0,000	0,451	0,000	4,594	0,000	2,115	0,000	0,000	-0,204
γ (°)	0,000	1,057	0,000	0,267	0,000	-21,505	0,000	0,000	-89,963
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,154	57,966	58,513	57,482	57,986	59,604	58,621	58,179	58,141
Y (cm)	56,337	56,253	56,530	56,503	56,123	55,212	56,726	56,687	55,717
Z (cm)	12,626	11,924	12,600	12,650	12,643	12,335	12,629	10,534	12,404
ω (rad)	1,523	1,631	1,530	1,521	1,527	1,516	1,521	1,523	1,524
ϕ (rad)	-0,799	-0,793	-0,800	-0,873	-0,800	-0,826	-0,801	-0,787	-0,785
κ (rad)	3,101	-3,076	3,100	3,095	3,100	2,746	3,094	3,128	1,522
α (°)	0,000	-8,692	0,000	0,271	0,000	1,683	0,000	0,000	-8,338
β (°)	0,000	0,934	0,000	9,510	0,000	4,378	0,000	0,000	-0,422
γ (°)	0,000	1,057	0,000	0,267	0,000	-21,505	0,000	0,000	-89,963
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	2,456	1,779	3,108	1,355	2,484	5,129	2,567	-30,900	5,456
Erelativo,y	5,057	4,737	5,804	6,000	5,375	2,760	5,380	-7,200	9,502
Erelativo,z	-7,011	-10,261	-6,874	-7,284	-7,230	-8,115	-7,176	24,200	-6,310
Erelativo, α	-	2,258	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo, β	-	-	-	11,877	-	-	-	-	-
Erelativo, γ	-	-	-	-	-	7,525	-	-	-0,041

Tabela 4.8: Parâmetros e resultados para a posição 5

Foto 011				N₀	K₁	L₁	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 				80,0 cm	14,1 cm	14,2 cm	42,4 cm	56,6 cm	26,1 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	45,885	45,240	45,819	44,986	45,856	47,128	45,377	45,947	45,745
Y (cm)	59,040	58,328	58,993	59,072	58,700	57,051	57,813	59,449	58,557
Z (cm)	25,627	24,803	25,576	25,498	25,370	24,882	25,301	22,613	26,431
ω (rad)	1,810	1,883	1,805	1,815	1,807	1,796	1,807	1,769	1,842
φ (rad)	-0,635	-0,629	-0,641	-0,718	-0,640	-0,667	-0,642	-0,627	-0,627
κ (rad)	-2,982	-2,921	-2,974	-2,962	-3,000	2,911	-3,019	-3,057	1,726
α (°)	0,000	-3,375	0,000	0,309	0,000	0,684	0,000	0,000	-1,701
β (°)	0,000	0,262	0,000	4,426	0,000	1,432	0,000	0,000	-0,643
γ (°)	0,000	1,053	0,000	0,321	0,000	-20,960	0,000	0,000	-89,289
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	45,885	45,240	45,819	44,986	45,856	47,128	45,377	45,947	45,745
Y (cm)	59,040	58,328	58,993	59,072	58,700	57,051	57,813	59,449	58,557
Z (cm)	25,627	24,803	25,576	25,498	25,370	24,882	25,301	22,613	26,431
ω (rad)	1,810	1,883	1,805	1,815	1,807	1,796	1,807	1,769	1,842
φ (rad)	-0,635	-0,629	-0,641	-0,718	-0,640	-0,667	-0,642	-0,627	-0,627
κ (rad)	-2,982	-2,921	-2,974	-2,962	-3,000	2,911	-3,019	-3,057	1,726
α (°)	0,000	-6,986	0,000	0,640	0,000	1,416	0,000	0,000	-3,521
β (°)	0,000	0,542	0,000	9,162	0,000	2,964	0,000	0,000	-1,331
γ (°)	0,000	1,053	0,000	0,321	0,000	-20,960	0,000	0,000	-89,289
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	8,219	6,698	8,064	6,099	8,151	11,151	7,021	-43,000	7,889
Erelativo,y	4,311	3,053	4,228	4,367	3,710	0,797	2,143	63,600	3,458
Erelativo,z	-1,812	-4,969	-2,008	-2,307	-2,797	-4,667	-3,061	168,800	-1,268
Erelativo,α	-	-17,809	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	7,786	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	4,800	-	-	-0,790

Tabela 4.9: Parâmetros e resultados para a posição 6

Foto 012				N₀	K₁	L₂	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 				80,0 cm	14,1 cm	28,4 cm	28,2 cm	56,6 cm	26,1 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	32,422	32,183	32,343	31,695	32,493	33,675	32,419	32,895	35,439
Y (cm)	58,452	58,050	58,054	58,347	58,134	57,504	57,928	58,537	55,161
Z (cm)	24,400	23,638	24,401	24,418	24,372	24,099	24,336	22,715	23,606
ω (rad)	1,768	1,821	1,760	1,762	1,760	1,745	1,757	1,761	1,761
φ (rad)	-0,490	-0,487	-0,490	-0,567	-0,497	-0,541	-0,496	-0,488	-0,517
κ (rad)	-3,045	-3,008	-3,056	-3,058	-3,063	2,935	-3,062	-3,045	1,701
α (°)	0,000	-2,668	0,000	0,267	0,000	0,918	0,000	0,000	-0,086
β (°)	0,000	0,105	0,000	4,426	0,000	2,508	0,000	0,000	1,236
γ (°)	0,000	0,719	0,000	-0,174	0,000	-15,954	0,000	0,000	-87,187
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	32,422	32,183	32,343	31,695	32,493	33,675	32,419	32,895	35,439
Y (cm)	58,452	58,050	58,054	58,347	58,134	57,504	57,928	58,537	55,161
Z (cm)	24,400	23,638	24,401	24,418	24,372	24,099	24,336	22,715	23,606
ω (rad)	1,768	1,821	1,760	1,762	1,760	1,745	1,757	1,761	1,761
φ (rad)	-0,490	-0,487	-0,490	-0,567	-0,497	-0,541	-0,496	-0,488	-0,517
κ (rad)	-3,045	-3,008	-3,056	-3,058	-3,063	2,935	-3,062	-3,045	1,701
α (°)	0,000	-5,523	0,000	0,553	0,000	1,900	0,000	0,000	-0,178
β (°)	0,000	0,217	0,000	9,162	0,000	5,192	0,000	0,000	2,558
γ (°)	0,000	0,719	0,000	-0,174	0,000	-15,954	0,000	0,000	-87,187
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	14,972	14,124	14,691	12,394	15,223	19,415	14,961	-52,400	25,670
Erelativo,y	3,272	2,562	2,569	3,087	2,710	1,597	2,346	-39,100	-2,542
Erelativo,z	-6,513	-9,433	-6,510	-6,444	-6,621	-7,667	-6,759	62,100	-9,556
Erelativo,α	-	-35,063	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	7,786	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-20,230	-	-	-3,126

Tabela 4.10: Parâmetros e resultados para a posição 7

Foto 020				N_0	K_2	L_0	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 				80,0 cm	46,2 cm	0,0 cm	56,6 cm	56,6 cm	58,2 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,407	58,353	58,570	57,808	58,704	60,000	58,164	59,983	58,886
Y (cm)	59,370	59,280	59,469	59,627	59,391	58,296	59,545	61,658	63,708
Z (cm)	50,647	49,916	50,683	50,511	50,716	50,340	50,696	50,132	52,299
ω (rad)	2,158	2,244	2,160	2,203	2,163	2,159	2,158	2,152	2,139
ϕ (rad)	-0,695	-0,667	-0,691	-0,769	-0,695	-0,718	-0,692	-0,685	-0,678
κ (rad)	-2,743	-2,691	2,741	-2,710	-2,742	-3,078	-2,734	-2,731	1,960
α (°)	0,000	-4,144	0,000	0,148	0,000	0,650	0,000	0,000	0,499
β (°)	0,000	0,126	0,000	4,830	0,000	1,123	0,000	0,000	-1,048
γ (°)	0,000	-0,110	0,000	0,172	0,000	-19,100	0,000	0,000	-90,277
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	58,407	58,353	58,570	57,808	58,704	60,000	58,164	59,983	58,886
Y (cm)	59,370	59,280	59,469	59,627	59,391	58,296	59,545	61,658	63,708
Z (cm)	50,647	49,916	50,683	50,511	50,716	50,340	50,696	50,132	52,299
ω (rad)	2,158	2,244	2,160	2,203	2,163	2,159	2,158	2,152	2,139
ϕ (rad)	-0,695	-0,667	-0,691	-0,769	-0,695	-0,718	-0,692	-0,685	-0,678
κ (rad)	-2,743	-2,691	2,741	-2,710	-2,742	-3,078	-2,734	-2,731	1,960
α (°)	0,000	-8,578	0,000	0,306	0,000	1,346	0,000	0,000	1,033
β (°)	0,000	0,261	0,000	9,998	0,000	2,325	0,000	0,000	-2,169
γ (°)	0,000	-0,110	0,000	0,172	0,000	-19,100	0,000	0,000	-90,277
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	3,193	3,097	3,481	2,134	3,717	6,007	2,763	81,900	4,039
Erelativo,y	4,894	4,735	5,069	5,348	4,931	2,996	5,203	111,300	12,558
Erelativo,z	-12,978	-14,234	-12,916	-13,211	-12,859	-13,505	-12,893	-43,600	-10,139
Erelativo, α	-	0,919	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo, β	-	-	-	17,625	-	-	-	-	-
Erelativo, γ	-	-	-	-	-	-4,500	-	-	0,308

Tabela 4.11: Parâmetros e resultados para a posição 8

Foto 021				N₀	K₂	L₁	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 				80,0 cm	46,2 cm	14,2 cm	42,4 cm	56,6 cm	58,2 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	42,829	42,691	42,187	42,238	42,568	44,654	43,184	43,225	43,647
Y (cm)	62,238	62,239	62,878	63,662	62,799	63,187	62,509	62,568	63,732
Z (cm)	52,978	51,986	52,969	53,360	53,068	53,303	53,002	50,608	51,528
ω (rad)	2,156	2,236	2,144	2,172	2,144	2,144	2,154	2,167	2,160
φ (rad)	-0,541	-0,511	-0,536	-0,610	-0,541	-0,576	-0,539	-0,529	-0,517
κ (rad)	-2,834	-2,790	-2,811	-2,790	-2,804	3,143	-2,871	-2,858	1,776
α (°)	0,000	-4,296	0,000	0,124	0,000	0,710	0,000	0,000	-0,635
β (°)	0,000	-0,366	0,000	4,487	0,000	1,878	0,000	0,000	-1,188
γ (°)	0,000	0,230	0,000	0,333	0,000	-19,221	0,000	0,000	-93,925
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	42,829	42,691	42,187	42,238	42,568	44,654	43,184	43,225	43,647
Y (cm)	62,238	62,239	62,878	63,662	62,799	63,187	62,509	62,568	63,732
Z (cm)	52,978	51,986	52,969	53,360	53,068	53,303	53,002	50,608	51,528
ω (rad)	2,156	2,236	2,144	2,172	2,144	2,144	2,154	2,167	2,160
φ (rad)	-0,541	-0,511	-0,536	-0,610	-0,541	-0,576	-0,539	-0,529	-0,517
κ (rad)	-2,834	-2,790	-2,811	-2,790	-2,804	3,143	-2,871	-2,858	1,776
α (°)	0,000	-8,893	0,000	0,257	0,000	1,470	0,000	0,000	-1,314
β (°)	0,000	-0,758	0,000	9,288	0,000	3,887	0,000	0,000	-2,459
γ (°)	0,000	0,230	0,000	0,333	0,000	-19,221	0,000	0,000	-93,925
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	1,012	0,686	-0,502	-0,382	0,396	5,316	1,849	-95,900	2,941
Erelativo,y	9,961	9,963	11,092	12,477	10,952	11,638	10,440	-94,100	12,601
Erelativo,z	-8,973	-10,677	-8,988	-8,316	-8,818	-8,414	-8,931	139,400	-11,464
Erelativo,α	-	4,620	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	9,272	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-3,895	-	-	4,361

Tabela 4.12: Parâmetros e resultados para a posição 9

Foto 022				N₀	K₂	L₂	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 80 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 				80,0 cm	46,2 cm	28,4 cm	28,2 cm	56,6 cm	58,2 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	28,438	28,189	28,215	27,549	28,215	30,087	28,279	30,043	31,304
Y (cm)	59,452	58,989	59,112	59,541	58,972	58,762	59,003	62,544	66,712
Z (cm)	53,098	52,055	53,008	53,228	53,066	52,761	53,194	53,231	52,246
ω (rad)	2,172	2,247	2,176	2,200	2,177	2,194	2,182	2,173	2,105
φ (rad)	-0,381	-0,360	-0,377	-0,444	-0,377	-0,434	-0,379	-0,393	-0,386
κ (rad)	-2,946	-2,899	-2,906	-2,890	-2,906	3,022	-2,865	-2,872	1,726
α (°)	0,000	-4,150	0,000	-0,321	0,000	-0,094	0,000	0,000	4,043
β (°)	0,000	-0,347	0,000	3,990	0,000	3,398	0,000	0,000	-0,660
γ (°)	0,000	1,116	0,000	0,340	0,000	-20,682	0,000	0,000	-95,283
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	28,438	28,189	28,215	27,549	28,215	30,087	28,279	30,043	31,304
Y (cm)	59,452	58,989	59,112	59,541	58,972	58,762	59,003	62,544	66,712
Z (cm)	53,098	52,055	53,008	53,228	53,066	52,761	53,194	53,231	52,246
ω (rad)	2,172	2,247	2,176	2,200	2,177	2,194	2,182	2,173	2,105
φ (rad)	-0,381	-0,360	-0,377	-0,444	-0,377	-0,434	-0,379	-0,393	-0,386
κ (rad)	-2,946	-2,899	-2,906	-2,890	-2,906	3,022	-2,865	-2,872	1,726
α (°)	0,000	-8,590	0,000	-0,664	0,000	-0,194	0,000	0,000	8,369
β (°)	0,000	-0,718	0,000	8,259	0,000	7,034	0,000	0,000	-1,366
γ (°)	0,000	1,116	0,000	0,340	0,000	-20,682	0,000	0,000	-95,283
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	0,844	-0,039	0,053	-2,309	0,053	6,691	0,280	76,400	11,007
Erelativo,y	5,039	4,221	4,438	5,196	4,191	3,820	4,246	254,100	17,866
Erelativo,z	-8,766	-10,558	-8,921	-8,543	-8,821	-9,345	-8,601	-96,300	-10,230
Erelativo,α	-	1,065	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-2,832	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	3,410	-	-	5,870

Tabela 4.13: Parâmetros e resultados para a posição 10

Foto 100		N₁	K₀	L₀	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 		120,0 cm	0,0 cm	0,0 cm	84,8 cm	84,8 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	78,576	79,453	81,156	80,646	81,044	81,271	79,270	80,249	78,108
Y (cm)	82,412	83,339	85,045	85,530	85,053	82,793	83,148	84,394	84,037
Z (cm)	12,182	11,657	12,216	12,349	12,384	11,947	12,253	11,204	13,824
ω (rad)	1,524	1,622	1,520	1,510	1,517	1,518	1,523	1,508	1,539
φ (rad)	-0,754	-0,750	-0,757	-0,832	-0,755	-0,777	-0,757	-0,756	-0,746
κ (rad)	3,107	-3,105	3,113	3,105	3,114	2,767	3,114	3,100	1,531
α (°)	0,000	-4,123	0,000	0,260	0,000	-0,046	0,000	0,000	-0,652
β (°)	0,000	-0,267	0,000	4,300	0,000	1,258	0,000	0,000	-0,669
γ (°)	0,000	0,206	0,000	-0,052	0,000	-19,887	0,000	0,000	-91,321
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	78,576	79,453	81,156	80,646	81,044	81,271	79,270	80,249	78,108
Y (cm)	82,412	83,339	85,045	85,530	85,053	82,793	83,148	84,394	84,037
Z (cm)	12,182	11,657	12,216	12,349	12,384	11,947	12,253	11,204	13,824
ω (rad)	1,524	1,622	1,520	1,510	1,517	1,518	1,523	1,508	1,539
φ (rad)	-0,754	-0,750	-0,757	-0,832	-0,755	-0,777	-0,757	-0,756	-0,746
κ (rad)	3,107	-3,105	3,113	3,105	3,114	2,767	3,114	3,100	1,531
α (°)	0,000	-8,535	0,000	0,538	0,000	-0,095	0,000	0,000	-1,350
β (°)	0,000	-0,553	0,000	8,901	0,000	2,604	0,000	0,000	-1,385
γ (°)	0,000	0,206	0,000	-0,052	0,000	-19,887	0,000	0,000	-91,321
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-7,340	-6,305	-4,297	-4,899	-4,429	-4,162	-6,521	-2,100	-7,892
Erelativo,y	-2,816	-1,723	0,289	0,861	0,298	-2,367	-1,948	24,600	-0,900
Erelativo,z	1,517	-2,858	1,800	2,908	3,200	-0,442	2,108	4,900	15,200
Erelativo,α	-	0,407	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	4,718	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-0,565	-	-	1,468

Tabela 4.14: Parâmetros e resultados para a posição 11

Foto 101		N₁	K₀	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		120,0 cm	0,0 cm	21,2 cm	63,6 cm	84,8 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	63,106	62,984	63,168	62,878	64,250	65,311	63,841	64,598	61,369
Y (cm)	85,784	85,338	86,012	86,562	86,730	84,912	86,076	87,599	88,775
Z (cm)	12,562	11,895	12,578	12,658	12,606	12,093	12,544	11,535	15,710
ω (rad)	1,526	1,615	1,524	1,523	1,525	1,519	1,524	1,524	1,590
φ (rad)	-0,629	-0,636	-0,631	-0,707	-0,630	-0,653	-0,632	-0,629	-0,586
κ (rad)	3,119	-3,106	3,142	3,145	3,096	2,748	3,120	3,124	1,548
α (°)	0,000	-4,094	0,000	0,064	0,000	0,222	0,000	0,000	-3,076
β (°)	0,000	0,407	0,000	4,352	0,000	1,348	0,000	0,000	-2,674
γ (°)	0,000	0,333	0,000	0,233	0,000	-19,730	0,000	0,000	-92,276
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	63,106	62,984	63,168	62,878	64,250	65,311	63,841	64,598	61,369
Y (cm)	85,784	85,338	86,012	86,562	86,730	84,912	86,076	87,599	88,775
Z (cm)	12,562	11,895	12,578	12,658	12,606	12,093	12,544	11,535	15,710
ω (rad)	1,526	1,615	1,524	1,523	1,525	1,519	1,524	1,524	1,590
φ (rad)	-0,629	-0,636	-0,631	-0,707	-0,630	-0,653	-0,632	-0,629	-0,586
κ (rad)	3,119	-3,106	3,142	3,145	3,096	2,748	3,120	3,124	1,548
α (°)	0,000	-8,474	0,000	0,132	0,000	0,460	0,000	0,000	-6,367
β (°)	0,000	0,843	0,000	9,009	0,000	2,790	0,000	0,000	-5,535
γ (°)	0,000	0,333	0,000	0,233	0,000	-19,730	0,000	0,000	-92,276
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-0,777	-0,969	-0,679	-1,135	1,022	2,690	0,379	-24,300	-3,508
Erelativo,y	1,160	0,634	1,547	2,078	2,276	0,132	1,505	52,300	4,688
Erelativo,z	4,683	-0,875	4,817	5,483	5,050	0,775	4,533	0,900	30,917
Erelativo,α	-	-0,299	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	5,984	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-1,350	-	-	2,529

Tabela 4.15: Parâmetros e resultados para a posição 12

Foto 102		N₁	K₀	L₂	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 		120,0 cm	0,0 cm	42,4 cm	42,4 cm	84,8 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	44,857	44,833	44,739	43,628	43,971	45,000	43,272	43,902	38,939
Y (cm)	85,815	85,477	85,389	84,857	83,511	82,358	82,595	84,563	78,109
Z (cm)	13,115	12,316	13,223	13,245	13,044	12,542	13,071	11,233	13,540
ω (rad)	1,537	1,619	1,540	1,546	1,538	1,530	1,536	1,538	1,584
φ (rad)	-0,473	-0,471	-0,470	-0,546	-0,482	-0,496	-0,480	-0,470	-0,486
κ (rad)	3,133	-3,112	3,140	3,144	3,123	2,797	3,125	3,144	1,556
α (°)	0,000	-4,183	0,000	-0,298	0,000	0,392	0,000	0,000	-2,442
β (°)	0,000	-0,057	0,000	4,365	0,000	0,848	0,000	0,000	0,284
γ (°)	0,000	0,082	0,000	0,053	0,000	-18,446	0,000	0,000	-91,183
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	44,857	44,833	44,739	43,628	43,971	45,000	43,272	43,902	38,939
Y (cm)	85,815	85,477	85,389	84,857	83,511	82,358	82,595	84,563	78,109
Z (cm)	13,115	12,316	13,223	13,245	13,044	12,542	13,071	11,233	13,540
ω (rad)	1,537	1,619	1,540	1,546	1,538	1,530	1,536	1,538	1,584
φ (rad)	-0,473	-0,471	-0,470	-0,546	-0,482	-0,496	-0,480	-0,470	-0,486
κ (rad)	3,133	-3,112	3,140	3,144	3,123	2,797	3,125	3,144	1,556
α (°)	0,000	-8,659	0,000	-0,617	0,000	0,811	0,000	0,000	-5,055
β (°)	0,000	-0,118	0,000	9,036	0,000	1,755	0,000	0,000	0,588
γ (°)	0,000	0,082	0,000	0,053	0,000	-18,446	0,000	0,000	-91,183
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	5,795	5,738	5,517	2,896	3,705	6,132	2,057	-37,000	-8,163
Erelativo,y	1,197	0,798	0,695	0,067	-1,520	-2,880	-2,600	96,800	-7,890
Erelativo,z	9,292	2,633	10,192	10,375	8,700	4,517	8,925	83,800	12,833
Erelativo,α	-	1,868	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	6,301	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-7,770	-	-	1,314

Tabela 4.16: Parâmetros e resultados para a posição 13

Foto 110				N₁	K₁	L₀	X	Y	Z
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 				120,0 cm	21,2 cm	0,0 cm	84,8 cm	84,8 cm	34,2 cm
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	84,813	85,787	84,723	84,830	84,917	86,093	85,238	82,991	81,996
Y (cm)	87,588	89,442	87,864	89,046	88,024	86,899	88,587	87,236	87,488
Z (cm)	31,837	31,534	31,826	32,000	31,841	31,484	32,059	28,890	30,465
ω (rad)	1,797	1,879	1,794	1,802	1,795	1,803	1,790	1,730	1,736
φ (rad)	-0,755	-0,739	-0,748	-0,833	-0,756	-0,774	-0,750	-0,747	-0,752
κ (rad)	-2,994	-2,944	-3,010	-2,988	-3,004	2,920	-3,008	-3,058	1,676
α (°)	0,000	-3,541	0,000	0,341	0,000	-0,210	0,000	0,000	2,259
β (°)	0,000	-0,278	0,000	4,915	0,000	1,086	0,000	0,000	-0,144
γ (°)	0,000	-0,298	0,000	0,843	0,000	-20,871	0,000	0,000	-89,525
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	84,813	85,787	84,723	84,830	84,917	86,093	85,238	82,991	81,996
Y (cm)	87,588	89,442	87,864	89,046	88,024	86,899	88,587	87,236	87,488
Z (cm)	31,837	31,534	31,826	32,000	31,841	31,484	32,059	28,890	30,465
ω (rad)	1,797	1,879	1,794	1,802	1,795	1,803	1,790	1,730	1,736
φ (rad)	-0,755	-0,739	-0,748	-0,833	-0,756	-0,774	-0,750	-0,747	-0,752
κ (rad)	-2,994	-2,944	-3,010	-2,988	-3,004	2,920	-3,008	-3,058	1,676
α (°)	0,000	-7,330	0,000	0,706	0,000	-0,435	0,000	0,000	4,676
β (°)	0,000	-0,575	0,000	10,174	0,000	2,248	0,000	0,000	-0,298
γ (°)	0,000	-0,298	0,000	0,843	0,000	-20,871	0,000	0,000	-89,525
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	0,015	1,164	-0,091	0,035	0,138	1,525	0,517	124,700	-3,307
Erelativo,y	3,288	5,474	3,613	5,007	3,802	2,475	4,466	35,100	3,170
Erelativo,z	-6,909	-7,795	-6,942	-6,433	-6,898	-7,942	-6,260	216,900	-10,921
Erelativo,α	-	-13,766	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	19,695	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	4,355	-	-	-0,528

Tabela 4.17: Parâmetros e resultados para a posição 14

Foto 111		N₁	K₁	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		120,0 cm	21,2 cm	21,2 cm	63,6 cm	84,8 cm	33,2 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	66,152	65,524	65,470	64,766	65,680	67,269	65,166	66,768	65,384
Y (cm)	87,392	86,203	86,365	86,606	86,483	84,807	85,699	87,864	88,139
Z (cm)	32,064	31,096	31,804	31,806	31,894	31,221	31,604	31,672	34,401
ω (rad)	1,776	1,842	1,763	1,757	1,761	1,764	1,763	1,790	1,827
φ (rad)	-0,637	-0,642	-0,644	-0,712	-0,646	-0,667	-0,648	-0,626	-0,608
κ (rad)	-3,015	-2,979	-3,028	-3,027	-3,028	2,879	-3,031	-2,996	1,713
α (°)	0,000	-2,971	0,000	0,697	0,000	0,014	0,000	0,000	-3,236
β (°)	0,000	0,682	0,000	3,810	0,000	1,208	0,000	0,000	-1,843
γ (°)	0,000	-0,164	0,000	0,211	0,000	-21,620	0,000	0,000	-90,387
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	66,152	65,524	65,470	64,766	65,680	67,269	65,166	66,768	65,384
Y (cm)	87,392	86,203	86,365	86,606	86,483	84,807	85,699	87,864	88,139
Z (cm)	32,064	31,096	31,804	31,806	31,894	31,221	31,604	31,672	34,401
ω (rad)	1,776	1,842	1,763	1,757	1,761	1,764	1,763	1,790	1,827
φ (rad)	-0,637	-0,642	-0,644	-0,712	-0,646	-0,667	-0,648	-0,626	-0,608
κ (rad)	-3,015	-2,979	-3,028	-3,027	-3,028	2,879	-3,031	-2,996	1,713
α (°)	0,000	-6,150	0,000	1,443	0,000	0,029	0,000	0,000	-6,698
β (°)	0,000	1,412	0,000	7,887	0,000	2,500	0,000	0,000	-3,815
γ (°)	0,000	-0,164	0,000	0,211	0,000	-21,620	0,000	0,000	-90,387
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	4,013	3,025	2,940	1,833	3,270	5,769	2,462	60,200	2,805
Erelativo,y	3,057	1,654	1,846	2,130	1,985	0,008	1,060	116,500	3,938
Erelativo,z	-3,422	-6,337	-4,205	-4,199	-3,934	-5,961	-4,807	-93,200	3,617
Erelativo,α	-	-27,647	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-7,215	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	8,100	-	-	0,430

Tabela 4.18: Parâmetros e resultados para a posição 15

Foto 112		N₁	K₁	L₂	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 		120,0 cm	21,2 cm	42,4 cm	42,4 cm	84,8 cm	33,2 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	41,281	41,091	41,267	40,801	41,606	43,294	43,004	44,151	23,985
Y (cm)	84,453	84,257	84,974	85,166	85,420	84,747	84,188	86,501	45,778
Z (cm)	31,792	30,915	32,062	32,107	32,040	31,617	31,471	31,117	17,223
ω (rad)	1,765	1,834	1,761	1,763	1,764	1,748	1,780	1,810	1,737
φ (rad)	-0,448	-0,452	-0,448	-0,508	-0,447	-0,465	-0,456	-0,436	-0,592
κ (rad)	-3,088	-3,075	-3,063	-3,062	-3,062	2,874	-3,016	-2,981	1,626
α (°)	0,000	-3,533	0,000	0,162	0,000	0,896	0,000	0,000	3,032
β (°)	0,000	0,518	0,000	3,452	0,000	0,971	0,000	0,000	7,450
γ (°)	0,000	-0,969	0,000	-0,011	0,000	-19,513	0,000	0,000	-92,950
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	41,281	41,091	41,267	40,801	41,606	43,294	43,004	44,151	23,985
Y (cm)	84,453	84,257	84,974	85,166	85,420	84,747	84,188	86,501	45,778
Z (cm)	31,792	30,915	32,062	32,107	32,040	31,617	31,471	31,117	17,223
ω (rad)	1,765	1,834	1,761	1,763	1,764	1,748	1,780	1,810	1,737
φ (rad)	-0,448	-0,452	-0,448	-0,508	-0,447	-0,465	-0,456	-0,436	-0,592
κ (rad)	-3,088	-3,075	-3,063	-3,062	-3,062	2,874	-3,016	-2,981	1,626
α (°)	0,000	-7,313	0,000	0,335	0,000	1,855	0,000	0,000	6,276
β (°)	0,000	1,072	0,000	7,146	0,000	2,010	0,000	0,000	15,421
γ (°)	0,000	-0,969	0,000	-0,011	0,000	-19,513	0,000	0,000	-92,950
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-2,639	-3,087	-2,672	-3,771	-1,873	2,108	1,425	14,700	-43,432
Erelativo,y	-0,409	-0,640	0,205	0,432	0,731	-0,062	-0,722	131,300	-46,017
Erelativo,z	-4,241	-6,883	-3,428	-3,292	-3,494	-4,768	-5,208	-64,600	-48,123
Erelativo,α	-	-13,961	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-15,934	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-2,435	-	-	3,278

Tabela 4.19: Parâmetros e resultados para a posição 16

Foto 120		N₁	K₂	L₀	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 		120,0 cm	69,3 cm	0,0 cm	84,8 cm	84,8 cm	81,3 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	70,560	71,131	70,436	69,762	70,482	72,792	76,077	76,038	78,191
Y (cm)	70,116	70,060	69,843	71,014	69,980	69,338	74,329	75,428	76,159
Z (cm)	63,888	63,417	63,580	63,764	63,730	63,463	65,296	63,701	65,958
ω (rad)	2,130	2,195	2,138	2,184	2,139	2,151	2,088	2,124	2,124
φ (rad)	-0,691	-0,681	-0,701	-0,739	-0,696	-0,713	-0,757	-0,704	-0,704
κ (rad)	-2,791	-2,752	-2,741	-2,702	-2,755	-3,087	-2,823	-2,745	1,927
α (°)	0,000	-2,875	0,000	-0,920	0,000	-0,096	0,000	0,000	-2,414
β (°)	0,000	0,517	0,000	2,827	0,000	1,118	0,000	0,000	-2,334
γ (°)	0,000	-0,099	0,000	0,489	0,000	-19,482	0,000	0,000	-89,284
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	70,560	71,131	70,436	69,762	70,482	72,792	76,077	76,038	78,191
Y (cm)	70,116	70,060	69,843	71,014	69,980	69,338	74,329	75,428	76,159
Z (cm)	63,888	63,417	63,580	63,764	63,730	63,463	65,296	63,701	65,958
ω (rad)	2,130	2,195	2,138	2,184	2,139	2,151	2,088	2,124	2,124
φ (rad)	-0,691	-0,681	-0,701	-0,739	-0,696	-0,713	-0,757	-0,704	-0,704
κ (rad)	-2,791	-2,752	-2,741	-2,702	-2,755	-3,087	-2,823	-2,745	1,927
α (°)	0,000	-5,951	0,000	-1,904	0,000	-0,198	0,000	0,000	-4,997
β (°)	0,000	1,070	0,000	5,852	0,000	2,314	0,000	0,000	-4,831
γ (°)	0,000	-0,099	0,000	0,489	0,000	-19,482	0,000	0,000	-89,284
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-16,792	-16,119	-16,939	-17,733	-16,884	-14,160	-10,287	-96,100	-7,794
Erelativo,y	-17,316	-17,382	-17,638	-16,257	-17,476	-18,233	-12,348	9,900	-10,190
Erelativo,z	-21,417	-21,996	-21,796	-21,569	-21,611	-21,940	-19,685	59,500	-18,871
Erelativo,α	-	-29,985	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-31,154	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-2,590	-	-	-0,796

Tabela 4.20: Parâmetros e resultados para a posição 17

Foto 121		N₁	K₂	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		120,0 cm	69,3 cm	21,2 cm	63,6 cm	84,8 cm	81,3 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	56,331	56,259	56,305	55,836	56,562	59,292	57,563	58,848	58,965
Y (cm)	74,156	73,654	73,769	74,635	73,907	74,772	75,686	79,219	79,221
Z (cm)	67,732	66,768	67,661	68,058	67,902	68,358	69,234	68,077	69,138
ω (rad)	2,168	2,244	2,169	2,192	2,169	2,174	2,180	2,144	2,152
φ (rad)	-0,577	-0,554	-0,573	-0,632	-0,577	-0,598	-0,575	-0,580	-0,578
κ (rad)	-2,798	-2,750	-2,792	-2,778	-2,797	-3,093	-2,755	-2,773	1,884
α (°)	0,000	-3,912	0,000	0,159	0,000	0,224	0,000	0,000	1,298
β (°)	0,000	0,112	0,000	3,505	0,000	1,211	0,000	0,000	-0,316
γ (°)	0,000	0,401	0,000	0,084	0,000	-17,117	0,000	0,000	-93,363
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	56,331	56,259	56,305	55,836	56,562	59,292	57,563	58,848	58,965
Y (cm)	74,156	73,654	73,769	74,635	73,907	74,772	75,686	79,219	79,221
Z (cm)	67,732	66,768	67,661	68,058	67,902	68,358	69,234	68,077	69,138
ω (rad)	2,168	2,244	2,169	2,192	2,169	2,174	2,180	2,144	2,152
φ (rad)	-0,577	-0,554	-0,573	-0,632	-0,577	-0,598	-0,575	-0,580	-0,578
κ (rad)	-2,798	-2,750	-2,792	-2,778	-2,797	-3,093	-2,755	-2,773	1,884
α (°)	0,000	-8,098	0,000	0,329	0,000	0,464	0,000	0,000	2,687
β (°)	0,000	0,232	0,000	7,255	0,000	2,507	0,000	0,000	-0,654
γ (°)	0,000	0,401	0,000	0,084	0,000	-17,117	0,000	0,000	-93,363
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-11,429	-11,542	-11,470	-12,208	-11,066	-6,774	-9,492	28,500	-7,288
Erelativo,y	-12,552	-13,144	-13,008	-11,987	-12,846	-11,825	-10,748	253,300	-6,579
Erelativo,z	-16,689	-17,875	-16,776	-16,288	-16,480	-15,919	-14,841	15,700	-14,959
Erelativo,α	-	-4,731	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-14,643	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-14,415	-	-	3,737

Tabela 4.21: Parâmetros e resultados para a posição 18

Foto 122		N₁	K₂	L₂	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 120 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 		120,0 cm	69,3 cm	42,4 cm	42,4 cm	84,8 cm	81,3 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	43,578	44,451	44,452	44,337	44,808	46,605	45,345	45,020	45,060
Y (cm)	83,450	84,782	86,551	88,540	87,387	86,996	88,334	88,634	89,320
Z (cm)	74,331	74,787	75,832	77,222	76,587	75,437	76,939	74,191	74,296
ω (rad)	2,190	2,249	2,175	2,196	2,177	2,172	2,186	2,186	2,172
φ (rad)	-0,457	-0,459	-0,443	-0,500	-0,435	-0,456	-0,434	-0,401	-0,407
κ (rad)	-2,694	-2,682	-2,882	-2,872	-2,885	2,987	-2,923	-2,901	1,808
α (°)	0,000	-2,672	0,000	-0,176	0,000	0,516	0,000	0,000	0,394
β (°)	0,000	1,507	0,000	3,411	0,000	1,072	0,000	0,000	-1,659
γ (°)	0,000	-0,746	0,000	0,020	0,000	-23,442	0,000	0,000	-88,593
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	43,578	44,451	44,452	44,337	44,808	46,605	45,345	45,020	45,060
Y (cm)	83,450	84,782	86,551	88,540	87,387	86,996	88,334	88,634	89,320
Z (cm)	74,331	74,787	75,832	77,222	76,587	75,437	76,939	74,191	74,296
ω (rad)	2,190	2,249	2,175	2,196	2,177	2,172	2,186	2,186	2,172
φ (rad)	-0,457	-0,459	-0,443	-0,500	-0,435	-0,456	-0,434	-0,401	-0,407
κ (rad)	-2,694	-2,682	-2,882	-2,872	-2,885	2,987	-2,923	-2,901	1,808
α (°)	0,000	-5,531	0,000	-0,364	0,000	1,068	0,000	0,000	0,816
β (°)	0,000	3,119	0,000	7,061	0,000	2,219	0,000	0,000	-3,434
γ (°)	0,000	-0,746	0,000	0,020	0,000	-23,442	0,000	0,000	-88,593
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	2,778	4,837	4,840	4,568	5,679	9,917	6,946	-67,500	6,274
Erelativo,y	-1,592	-0,021	2,065	4,410	3,051	2,590	4,167	-70,000	5,330
Erelativo,z	-8,572	-8,011	-6,726	-5,016	-5,797	-7,212	-5,364	174,800	-8,615
Erelativo,α	-	-34,929	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-16,932	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	17,210	-	-	-1,563

Tabela 4.22: Parâmetros e resultados para a posição 19

Foto 200		N₂	K₀	L₀	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 		200,0 cm	0,0 cm	0,0 cm	141,4 cm	141,4 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	104,224	23,868	102,637	99,440	100,835	99,553	98,202	102,654	98,607
Y (cm)	104,532	22,450	103,320	100,958	101,350	98,371	99,254	104,020	100,638
Z (cm)	11,382	11,749	11,567	11,578	11,475	11,229	11,483	10,551	11,924
ω (rad)	1,496	1,575	1,497	1,496	1,496	1,501	1,492	1,498	1,496
φ (rad)	-0,763	-0,778	-0,769	-0,809	-0,765	-0,776	-0,752	-0,757	-0,766
κ (rad)	3,056	3,117	3,087	3,088	3,086	2,737	3,080	3,088	1,523
α (°)	0,000	-3,256	0,000	-0,116	0,000	-0,264	0,000	0,000	-0,192
β (°)	0,000	0,666	0,000	2,306	0,000	0,617	0,000	0,000	0,806
γ (°)	0,000	0,396	0,000	0,073	0,000	-20,235	0,000	0,000	-89,345
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	104,224	23,868	102,637	99,440	100,835	99,553	98,202	102,654	98,607
Y (cm)	104,532	22,450	103,320	100,958	101,350	98,371	99,254	104,020	100,638
Z (cm)	11,382	11,749	11,567	11,578	11,475	11,229	11,483	10,551	11,924
ω (rad)	1,496	1,575	1,497	1,496	1,496	1,501	1,492	1,498	1,496
φ (rad)	-0,763	-0,778	-0,769	-0,809	-0,765	-0,776	-0,752	-0,757	-0,766
κ (rad)	3,056	3,117	3,087	3,088	3,086	2,737	3,080	3,088	1,523
α (°)	0,000	-6,740	0,000	-0,240	0,000	-0,546	0,000	0,000	-0,397
β (°)	0,000	1,379	0,000	4,773	0,000	1,277	0,000	0,000	1,668
γ (°)	0,000	0,396	0,000	0,073	0,000	-20,235	0,000	0,000	-89,345
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-26,291	-83,120	-27,414	-29,675	-28,688	-29,595	-30,550	345,200	-30,264
Erelativo,y	-26,074	-84,123	-26,931	-28,601	-28,324	-30,431	-29,806	376,600	-28,827
Erelativo,z	-5,150	-2,092	-3,608	-3,517	-4,375	-6,425	-4,308	-6,800	-0,633
Erelativo,α	-	-20,707	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-43,842	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	1,175	-	-	-0,728

Tabela 4.23: Parâmetros e resultados para a posição 20

Foto 201		N₂	K₀	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		200,0 cm	0,0 cm	35,4 cm	106 cm	141,4 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	77,575	77,231	77,998	76,307	78,510	78,140	77,265	78,762	78,131
Y (cm)	103,310	103,066	103,953	102,851	104,711	102,532	102,765	105,434	105,835
Z (cm)	12,209	11,435	12,102	12,195	12,016	11,426	11,880	10,922	12,371
ω (rad)	1,513	1,579	1,512	1,508	1,501	1,495	1,498	1,478	1,486
φ (rad)	-0,660	-0,684	-0,656	-0,709	-0,657	-0,666	-0,669	-0,656	-0,644
κ (rad)	3,106	-3,132	3,092	3,096	3,091	2,749	3,084	3,077	1,541
α (°)	0,000	-2,981	0,000	0,006	0,000	0,272	0,000	0,000	0,623
β (°)	0,000	1,335	0,000	3,041	0,000	0,518	0,000	0,000	-1,364
γ (°)	0,000	0,212	0,000	0,326	0,000	-19,357	0,000	0,000	-88,000
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	77,575	77,231	77,998	76,307	78,510	78,140	77,265	78,762	78,131
Y (cm)	103,310	103,066	103,953	102,851	104,711	102,532	102,765	105,434	105,835
Z (cm)	12,209	11,435	12,102	12,195	12,016	11,426	11,880	10,922	12,371
ω (rad)	1,513	1,579	1,512	1,508	1,501	1,495	1,498	1,478	1,486
φ (rad)	-0,660	-0,684	-0,656	-0,709	-0,657	-0,666	-0,669	-0,656	-0,644
κ (rad)	3,106	-3,132	3,092	3,096	3,091	2,749	3,084	3,077	1,541
α (°)	0,000	-6,171	0,000	0,012	0,000	0,563	0,000	0,000	1,290
β (°)	0,000	2,763	0,000	6,295	0,000	1,072	0,000	0,000	-2,823
γ (°)	0,000	0,212	0,000	0,326	0,000	-19,357	0,000	0,000	-88,000
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-26,816	-27,141	-26,417	-28,012	-25,934	-26,283	-27,108	49,700	-26,292
Erelativo,y	-26,938	-27,110	-26,483	-27,262	-25,947	-27,488	-27,323	166,900	-25,152
Erelativo,z	1,742	-4,708	0,850	1,625	0,133	-4,783	-1,000	-4,200	3,092
Erelativo,α	-	-27,404	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-25,943	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-3,215	-	-	-2,222

Tabela 4.24: Parâmetros e resultados para a posição 21

Foto 202		N₂	K₀	L₂	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Mesma altura do meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 		200,0 cm	0,0 cm	70,7 cm	70,7 cm	141,4 cm	12,0 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	54,841	54,040	55,230	54,286	54,819	55,223	54,024	55,686	54,728
Y (cm)	110,430	107,942	110,622	110,220	110,189	108,577	108,428	110,827	110,714
Z (cm)	12,828	12,096	12,747	12,807	12,731	11,529	12,684	11,977	13,162
ω (rad)	1,509	1,566	1,518	1,507	1,516	1,496	1,510	1,503	1,492
φ (rad)	-0,512	-0,531	-0,516	-0,578	-0,513	-0,527	-0,517	-0,512	-0,515
κ (rad)	3,107	3,130	3,106	3,101	3,106	2,767	3,091	3,078	1,542
α (°)	0,000	-2,886	0,000	0,412	0,000	0,987	0,000	0,000	0,868
β (°)	0,000	1,063	0,000	3,589	0,000	0,852	0,000	0,000	-0,031
γ (°)	0,000	-0,324	0,000	0,050	0,000	-18,863	0,000	0,000	-88,221
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	54,841	54,040	55,230	54,286	54,819	55,223	54,024	55,686	54,728
Y (cm)	110,430	107,942	110,622	110,220	110,189	108,577	108,428	110,827	110,714
Z (cm)	12,828	12,096	12,747	12,807	12,731	11,529	12,684	11,977	13,162
ω (rad)	1,509	1,566	1,518	1,507	1,516	1,496	1,510	1,503	1,492
φ (rad)	-0,512	-0,531	-0,516	-0,578	-0,513	-0,527	-0,517	-0,512	-0,515
κ (rad)	3,107	3,130	3,106	3,101	3,106	2,767	3,091	3,078	1,542
α (°)	0,000	-5,974	0,000	0,853	0,000	2,043	0,000	0,000	1,797
β (°)	0,000	2,200	0,000	7,429	0,000	1,764	0,000	0,000	-0,064
γ (°)	0,000	-0,324	0,000	0,050	0,000	-18,863	0,000	0,000	-88,221
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-22,431	-23,564	-21,881	-23,216	-22,463	-21,891	-23,587	66,200	-22,591
Erelativo,y	-21,902	-23,662	-21,767	-22,051	-22,073	-23,213	-23,318	139,900	-21,702
Erelativo,z	6,900	0,800	6,225	6,725	6,092	-3,925	5,700	-29,300	9,683
Erelativo,α	-	-29,717	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-12,597	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-5,685	-	-	-1,977

Tabela 4.25: Parâmetros e resultados para a posição 22

Foto 210		N_2	K_1	L_0	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 		200,0 cm	35,3 cm	0,0 cm	141,4 cm	141,4 cm	47,3 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	114,839	111,243	112,539	112,267	110,639	111,718	108,413	108,378	109,382
Y (cm)	110,791	108,789	109,103	109,801	107,629	106,640	105,402	104,608	108,490
Z (cm)	38,313	37,324	37,527	37,922	37,375	37,358	36,755	35,706	38,818
ω (rad)	1,702	1,795	1,707	1,711	1,708	1,701	1,704	1,685	1,666
ϕ (rad)	-0,782	-0,753	-0,786	-0,839	-0,776	-0,793	-0,773	-0,791	-0,779
κ (rad)	-3,052	-2,983	-3,078	-3,073	-3,074	2,988	-3,068	-3,082	1,638
α (°)	0,000	-3,994	0,000	0,048	0,000	0,341	0,000	0,000	1,565
β (°)	0,000	-1,168	0,000	3,067	0,000	0,932	0,000	0,000	0,245
γ (°)	0,000	0,216	0,000	0,162	0,000	-12,386	0,000	0,000	-88,896
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	114,839	111,243	112,539	112,267	110,639	111,718	108,413	108,378	109,382
Y (cm)	110,791	108,789	109,103	109,801	107,629	106,640	105,402	104,608	108,490
Z (cm)	38,313	37,324	37,527	37,922	37,375	37,358	36,755	35,706	38,818
ω (rad)	1,702	1,795	1,707	1,711	1,708	1,701	1,704	1,685	1,666
ϕ (rad)	-0,782	-0,753	-0,786	-0,839	-0,776	-0,793	-0,773	-0,791	-0,779
κ (rad)	-3,052	-2,983	-3,078	-3,073	-3,074	2,988	-3,068	-3,082	1,638
α (°)	0,000	-8,268	0,000	0,099	0,000	0,706	0,000	0,000	3,240
β (°)	0,000	-2,418	0,000	6,349	0,000	1,929	0,000	0,000	0,507
γ (°)	0,000	0,216	0,000	0,162	0,000	-12,386	0,000	0,000	-88,896
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-18,784	-21,327	-20,411	-20,603	-21,755	-20,992	-23,329	-96,500	-22,644
Erelativo,y	-21,647	-23,063	-22,841	-22,347	-23,883	-24,583	-25,458	-20,600	-23,274
Erelativo,z	-19,000	-21,091	-20,662	-19,827	-20,983	-21,019	-22,294	4,900	-17,932
Erelativo, α	-	-2,734	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo, β	-	-	-	-25,310	-	-	-	-	-
Erelativo, γ	-	-	-	-	-	-38,070	-	-	-1,227

Tabela 4.26: Parâmetros e resultados para a posição 23

Foto 211		N₂	K₁	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		200,0 cm	35,3 cm	35,4 cm	106,0 cm	141,4 cm	48,3 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	104,209	108,649	105,719	105,250	105,879	105,981	102,245	101,070	99,312
Y (cm)	132,330	137,610	134,780	135,588	134,637	132,970	130,913	129,369	130,655
Z (cm)	45,531	43,028	42,941	43,213	43,286	42,376	41,957	40,609	42,370
ω (rad)	1,700	1,824	1,718	1,714	1,723	1,713	1,720	1,690	1,691
φ (rad)	-0,663	-0,677	-0,657	-0,728	-0,670	-0,681	-0,672	-0,683	-0,674
κ (rad)	-3,095	-3,014	-3,056	-3,055	-3,054	2,960	-3,067	-3,087	1,644
α (°)	0,000	-5,461	0,000	0,547	0,000	0,483	0,000	0,000	1,304
β (°)	0,000	1,267	0,000	4,053	0,000	0,608	0,000	0,000	0,038
γ (°)	0,000	0,277	0,000	0,222	0,000	-15,067	0,000	0,000	-89,050
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	104,209	108,649	105,719	105,250	105,879	105,981	102,245	101,070	99,312
Y (cm)	132,330	137,610	134,780	135,588	134,637	132,970	130,913	129,369	130,655
Z (cm)	45,531	43,028	42,941	43,213	43,286	42,376	41,957	40,609	42,370
ω (rad)	1,700	1,824	1,718	1,714	1,723	1,713	1,720	1,690	1,691
φ (rad)	-0,663	-0,677	-0,657	-0,728	-0,670	-0,681	-0,672	-0,683	-0,674
κ (rad)	-3,095	-3,014	-3,056	-3,055	-3,054	2,960	-3,067	-3,087	1,644
α (°)	0,000	-11,304	0,000	1,132	0,000	1,000	0,000	0,000	2,699
β (°)	0,000	2,623	0,000	8,390	0,000	1,258	0,000	0,000	0,079
γ (°)	0,000	0,277	0,000	0,222	0,000	-15,067	0,000	0,000	-89,050
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-1,690	2,499	-0,265	-0,708	-0,114	-0,018	-3,542	17,500	-6,309
Erelativo,y	-6,414	-2,680	-4,682	-4,110	-4,783	-5,962	-7,417	54,400	-7,599
Erelativo,z	-3,740	-9,032	-9,216	-8,641	-8,486	-10,410	-11,296	34,800	-10,423
Erelativo,α	-	32,991	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-1,298	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-24,665	-	-	-1,056

Tabela 4.27: Parâmetros e resultados para a posição 24

Foto 212		N₂	K₁	L₂	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 10° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 		200,0 cm	35,3 cm	70,7 cm	70,7 cm	141,4 cm	47,3 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	71,830	70,808	71,729	69,755	70,602	72,899	73,375	73,035	74,576
Y (cm)	135,983	133,971	135,806	134,279	133,793	134,620	136,257	135,716	137,886
Z (cm)	45,884	44,405	46,045	45,846	45,484	44,887	45,482	43,790	46,430
ω (rad)	1,747	1,835	1,757	1,759	1,745	-0,499	1,750	1,736	1,747
φ (rad)	-0,492	-0,484	-0,490	-0,562	-0,492	2,893	-0,503	-0,499	-0,498
κ (rad)	-3,084	-3,039	-3,068	-3,067	-3,075	2,893	-3,071	-3,070	1,690
α (°)	0,000	-4,462	0,000	0,208	0,000	0,489	0,000	0,000	0,150
β (°)	0,000	-0,090	0,000	4,106	0,000	0,385	0,000	0,000	-0,305
γ (°)	0,000	0,218	0,000	0,008	0,000	-17,829	0,000	0,000	-87,129
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	71,830	70,808	71,729	69,755	70,602	72,899	73,375	73,035	74,576
Y (cm)	135,983	133,971	135,806	134,279	133,793	134,620	136,257	135,716	137,886
Z (cm)	45,884	44,405	46,045	45,846	45,484	44,887	45,482	43,790	46,430
ω (rad)	1,747	1,835	1,757	1,759	1,745	-0,499	1,750	1,736	1,747
φ (rad)	-0,492	-0,484	-0,490	-0,562	-0,492	2,893	-0,503	-0,499	-0,498
κ (rad)	-3,084	-3,039	-3,068	-3,067	-3,075	2,893	-3,071	-3,070	1,690
α (°)	0,000	-9,236	0,000	0,430	0,000	1,012	0,000	0,000	0,310
β (°)	0,000	-0,186	0,000	8,499	0,000	0,797	0,000	0,000	-0,631
γ (°)	0,000	0,218	0,000	0,008	0,000	-17,829	0,000	0,000	-87,129
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	1,598	0,153	1,455	-1,337	-0,139	3,110	3,784	-66,000	5,482
Erelativo,y	-3,831	-5,254	-3,956	-5,036	-5,380	-4,795	-3,637	-45,900	-2,485
Erelativo,z	-2,994	-6,121	-2,653	-3,074	-3,839	-5,101	-3,844	69,200	-1,839
Erelativo,α	-	8,663	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-0,007	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-10,855	-	-	-3,190

Tabela 4.28: Parâmetros e resultados para a posição 25

Foto 220		N ₂	K ₂	L ₀	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Alinhada à origem do <i>grid</i> 		200,0 cm	72,8 cm	0,0 cm	141,4 cm	141,4 cm	84,8 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	127,797	129,844	127,076	126,112	126,234	128,365	128,299	125,208	126,721
Y (cm)	129,924	132,136	129,529	130,204	129,000	126,294	130,819	130,074	130,443
Z (cm)	76,954	77,146	76,652	76,573	76,224	75,323	77,429	71,377	75,515
ω (rad)	1,981	2,072	1,992	2,008	1,989	2,002	1,980	1,973	1,962
ϕ (rad)	-0,744	-0,722	-0,734	-0,799	-0,735	-0,775	-0,731	-0,750	-0,724
κ (rad)	-2,912	-2,842	-2,882	-2,862	-2,874	2,976	-2,895	-2,890	1,818
α (°)	0,000	-4,095	0,000	0,328	0,000	0,121	0,000	0,000	0,658
β (°)	0,000	-0,212	0,000	3,772	0,000	2,329	0,000	0,000	-0,556
γ (°)	0,000	0,493	0,000	0,495	0,000	-25,340	0,000	0,000	-89,273
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	127,797	129,844	127,076	126,112	126,234	128,365	128,299	125,208	126,721
Y (cm)	129,924	132,136	129,529	130,204	129,000	126,294	130,819	130,074	130,443
Z (cm)	76,954	77,146	76,652	76,573	76,224	75,323	77,429	71,377	75,515
ω (rad)	1,981	2,072	1,992	2,008	1,989	2,002	1,980	1,973	1,962
ϕ (rad)	-0,744	-0,722	-0,734	-0,799	-0,735	-0,775	-0,731	-0,750	-0,724
κ (rad)	-2,912	-2,842	-2,882	-2,862	-2,874	2,976	-2,895	-2,890	1,818
α (°)	0,000	-8,477	0,000	0,679	0,000	0,250	0,000	0,000	1,362
β (°)	0,000	-0,439	0,000	7,808	0,000	4,821	0,000	0,000	-1,151
γ (°)	0,000	0,493	0,000	0,495	0,000	-25,340	0,000	0,000	-89,273
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-9,620	-8,173	-10,130	-10,812	-10,726	-9,219	-9,265	209,100	-10,381
Erelativo,y	-8,116	-6,552	-8,395	-7,918	-8,769	-10,683	-7,483	-25,500	-7,749
Erelativo,z	-9,252	-9,026	-9,608	-9,702	-10,113	-11,176	-8,692	505,200	-10,949
Erelativo, α	-	-0,275	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo, β	-	-	-	-8,141	-	-	-	-	-
Erelativo, γ	-	-	-	-	-	26,700	-	-	-0,808

Tabela 4.29: Parâmetros e resultados para a posição 26

Foto 221		N₂	K₂	L₁	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ¼ de X 		200,0 cm	72,8 cm	35,4 cm	106,0 cm	141,4 cm	84,8 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	101,835	101,716	100,468	100,742	102,190	102,808	102,068	107,157	104,098
Y (cm)	129,949	129,725	128,247	130,103	130,291	129,662	131,416	135,664	133,186
Z (cm)	74,164	73,484	73,443	74,398	74,779	73,220	74,518	75,434	76,162
ω (rad)	1,983	2,089	1,983	2,021	1,981	1,974	1,992	1,955	1,950
φ (rad)	-0,642	-0,621	-0,648	-0,695	-0,635	-0,638	-0,640	-0,657	-0,652
κ (rad)	-2,930	-2,854	-2,907	-2,879	-2,902	3,038	-2,911	-2,932	1,774
α (°)	0,000	-5,043	0,000	-1,010	0,000	0,344	0,000	0,000	2,017
β (°)	0,000	-0,005	0,000	2,998	0,000	0,121	0,000	0,000	0,285
γ (°)	0,000	0,729	0,000	0,285	0,000	-19,422	0,000	0,000	-90,134
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	101,835	101,716	100,468	100,742	102,190	102,808	102,068	107,157	104,098
Y (cm)	129,949	129,725	128,247	130,103	130,291	129,662	131,416	135,664	133,186
Z (cm)	74,164	73,484	73,443	74,398	74,779	73,220	74,518	75,434	76,162
ω (rad)	1,983	2,089	1,983	2,021	1,981	1,974	1,992	1,955	1,950
φ (rad)	-0,642	-0,621	-0,648	-0,695	-0,635	-0,638	-0,640	-0,657	-0,652
κ (rad)	-2,930	-2,854	-2,907	-2,879	-2,902	3,038	-2,911	-2,932	1,774
α (°)	0,000	-10,439	0,000	-2,091	0,000	0,712	0,000	0,000	4,175
β (°)	0,000	-0,010	0,000	6,206	0,000	0,250	0,000	0,000	0,590
γ (°)	0,000	0,729	0,000	0,285	0,000	-19,422	0,000	0,000	-90,134
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	-3,929	-4,042	-5,219	-4,960	-3,594	-3,011	-3,709	408,900	-1,794
Erelativo,y	-8,098	-8,257	-9,302	-7,989	-7,856	-8,301	-7,061	324,800	-5,809
Erelativo,z	-12,542	-13,344	-13,393	-12,267	-11,817	-13,656	-12,125	-8,400	-10,186
Erelativo,α	-	22,812	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-26,990	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	-2,890	-	-	0,149

Tabela 4.30: Parâmetros e resultados para a posição 27

Foto 222		N₂	K₂	L₂	X	Y	Z		
<ul style="list-style-type: none"> • 200 cm do centro do <i>grid</i> • Elevada 30° em relação ao meio do <i>grid</i> • Deslocada de ½ de X 		200,0 cm	72,8 cm	70,7 cm	70,7 cm	141,4 cm	84,8 cm		
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (sem fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	74,221	74,489	74,952	74,996	71,921	76,872	72,579	75,300	76,014
Y (cm)	132,088	133,206	135,041	137,488	129,268	135,300	132,816	138,539	138,081
Z (cm)	75,897	75,100	76,834	78,064	73,833	76,688	75,759	77,044	78,695
ω (rad)	1,964	2,031	1,959	1,978	1,962	1,964	1,951	1,922	1,931
φ (rad)	-0,506	-0,496	-0,495	-0,549	-0,503	-0,498	-0,497	-0,523	-0,527
κ (rad)	-3,024	-2,964	-2,966	-2,954	-2,973	2,935	-2,986	-3,009	1,722
α (°)	0,000	-3,392	0,000	-0,354	0,000	-0,174	0,000	0,000	1,259
β (°)	0,000	-0,128	0,000	3,209	0,000	-0,301	0,000	0,000	1,551
γ (°)	0,000	1,582	0,000	0,143	0,000	-21,576	0,000	0,000	-89,723
Resultados obtidos com o algoritmo de calibração (com fator de correção)									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
X (cm)	74,221	74,489	74,952	74,996	71,921	76,872	72,579	75,300	76,014
Y (cm)	132,088	133,206	135,041	137,488	129,268	135,300	132,816	138,539	138,081
Z (cm)	75,897	75,100	76,834	78,064	73,833	76,688	75,759	77,044	78,695
ω (rad)	1,964	2,031	1,959	1,978	1,962	1,964	1,951	1,922	1,931
φ (rad)	-0,506	-0,496	-0,495	-0,549	-0,503	-0,498	-0,497	-0,523	-0,527
κ (rad)	-3,024	-2,964	-2,966	-2,954	-2,973	2,935	-2,986	-3,009	1,722
α (°)	0,000	-7,021	0,000	-0,733	0,000	-0,360	0,000	0,000	2,606
β (°)	0,000	-0,265	0,000	6,643	0,000	-0,623	0,000	0,000	3,210
γ (°)	0,000	1,582	0,000	0,143	0,000	-21,576	0,000	0,000	-89,723
Erros relativos percentuais dos parâmetros de calibração									
%	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C
Erelativo,x	4,980	5,359	6,014	6,076	1,727	8,730	2,658	172,100	7,516
Erelativo,y	-6,586	-5,795	-4,497	-2,767	-8,580	-4,314	-6,071	472,300	-2,347
Erelativo,z	-10,499	-11,439	-9,394	-7,943	-12,933	-9,566	-10,662	28,500	-7,199
Erelativo,α	-	-17,395	-	-	-	-	-	-	-
Erelativo,β	-	-	-	-21,851	-	-	-	-	-
Erelativo,γ	-	-	-	-	-	7,880	-	-	-0,308

4.3 Erros Médios

Após executar todo o procedimento descrito acima para todos os testes, temos os dados necessários para calcular o erro médio de cada posição da câmera. Basta fazermos a média de todos os erros relativos percentuais de cada parâmetro em todas as posições (exceto para as fotos 4B, cujo motivo será explicado a seguir). Ou seja, fazer a média dos erros relativos percentuais de cada variável X , Y , Z , α , β e γ das fotos 000_1A até a 000_4C para a posição 1, das fotos 001_1A até a 001_4C* para a posição 2, das fotos 002_1A até a 002_4C para a posição 3 e assim sucessivamente, até a posição 27.

Os erros das fotos 4B não entram neste cálculo de erro médio global pois possuem natureza diferente dos demais. Seus erros são calculados em cima de um valor relativo, e não em cima do valor absoluto das coordenadas espaciais da câmera.

As médias dos erros relativos percentuais foram calculadas individualmente para os parâmetros X , Y , Z e γ e em conjunto para os parâmetros α e β . Para este cálculo usamos os módulos destes erros, pois para saber o erro global não importa se o erro em cada variável foi positivo ou negativo, e sim o quanto essa variável se afastou do valor esperado.

A partir da média dos erros relativos percentuais (em módulo) de cada parâmetro, foi feita uma média global para se ter um único erro médio para cada posição da câmera. A Tabela 4.31 mostra os erros relativos percentuais individuais e em conjunto dos parâmetros e o erro relativo percentual geral médio para cada posição.

*Exceto para as fotos 4B.

Tabela 4.31: Erros relativos percentuais médios dos parâmetros para todas as posições

Posições	$E_{\text{médio},X}$	$E_{\text{médio},Y}$	$E_{\text{médio},Z}$	$E_{\text{médio},XYZ}$	$E_{\text{médio},(\alpha\beta)}$	$E_{\text{médio},\gamma}$	$E_{\text{médio},XYZ\gamma(\alpha\beta)}$
1	3,018	0,806	4,128	2,651	3,695	0,505	2,284
2	7,614	6,014	8,911	7,513	6,417	1,900	5,277
3	5,043	4,355	1,890	3,763	7,196	12,663	7,874
4	3,042	5,577	7,533	5,384	7,068	3,783	5,411
5	7,912	3,258	2,861	4,677	12,797	2,795	6,756
6	16,431	2,586	7,438	8,818	21,406	11,678	13,967
7	3,554	5,717	15,738	8,336	9,272	2,404	6,671
8	1,636	11,140	10,854	7,877	6,946	4,128	6,317
9	2,660	6,127	9,223	6,003	1,948	4,640	4,197
10	5,731	1,400	3,754	3,628	2,562	1,016	2,402
11	1,395	1,753	7,142	3,430	3,142	1,939	2,837
12	5,000	2,206	8,433	5,213	4,084	4,542	4,613
13	0,849	3,912	7,512	4,091	16,730	2,441	7,754
14	3,265	1,960	4,560	3,262	17,431	4,265	8,319
15	7,626	6,152	9,930	7,903	14,947	2,856	8,569
16	14,589	15,855	21,111	17,185	30,570	1,693	16,482
17	10,159	11,586	16,228	12,658	9,687	9,076	10,474
18	5,730	2,903	6,914	5,182	25,931	9,387	13,500
19	35,700	35,390	3,764	24,951	32,274	0,951	19,392
20	26,750	26,713	2,242	18,568	26,673	2,719	15,987
21	22,703	22,461	5,756	16,973	21,157	3,831	13,987
22	21,231	23,387	20,351	21,656	14,022	19,648	18,442
23	1,893	5,456	10,791	6,047	17,144	12,860	12,017
24	2,132	4,297	3,683	3,371	4,335	7,023	4,909
25	9,791	8,208	9,815	9,271	4,208	13,754	9,078
26	3,782	7,834	12,416	8,011	24,901	1,519	11,477
27	5,383	5,120	11,004	7,169	19,623	4,094	10,295

Nota-se que a posição 1 apresentou o menor erro médio global, como era esperado, e a posição 19 apresentou o maior erro médio global.

4.4 Modelo Linear

Tendo os valores da Tabela 4.31, podemos agora encontrar um modelo linear para estimar o erro de calibração de uma dada posição. Isto é possível aplicando-se os conceitos do Método dos Mínimos Quadrados, visto no Capítulo 3 (Seção 3.5). Para facilitar, o código-fonte feito no pacote matemático pode ser visto no Apêndice A (Tabela A.6).

Para o presente estudo, foi encontrado o seguinte modelo linear:

$$e = 0.0403X + 0.0416Y + 0.0193Z + 1.6758 \quad (4.1)$$

Para saber que erro de calibração irá encontrar ao posicionar a câmera diante do objeto de referência, basta medir o vetor que representa o posicionamento da câmera em relação ao mesmo e substituir os valores de X, Y e Z na Equação (4.1).

A Figura 4.1 mostra o gráfico obtido na comparação entre o erro encontrado após executar a rotina de calibração (Erro Real, Tabela 4.31) e o erro encontrado através do modelo linear da Equação (4.1) (Erro Previsto).

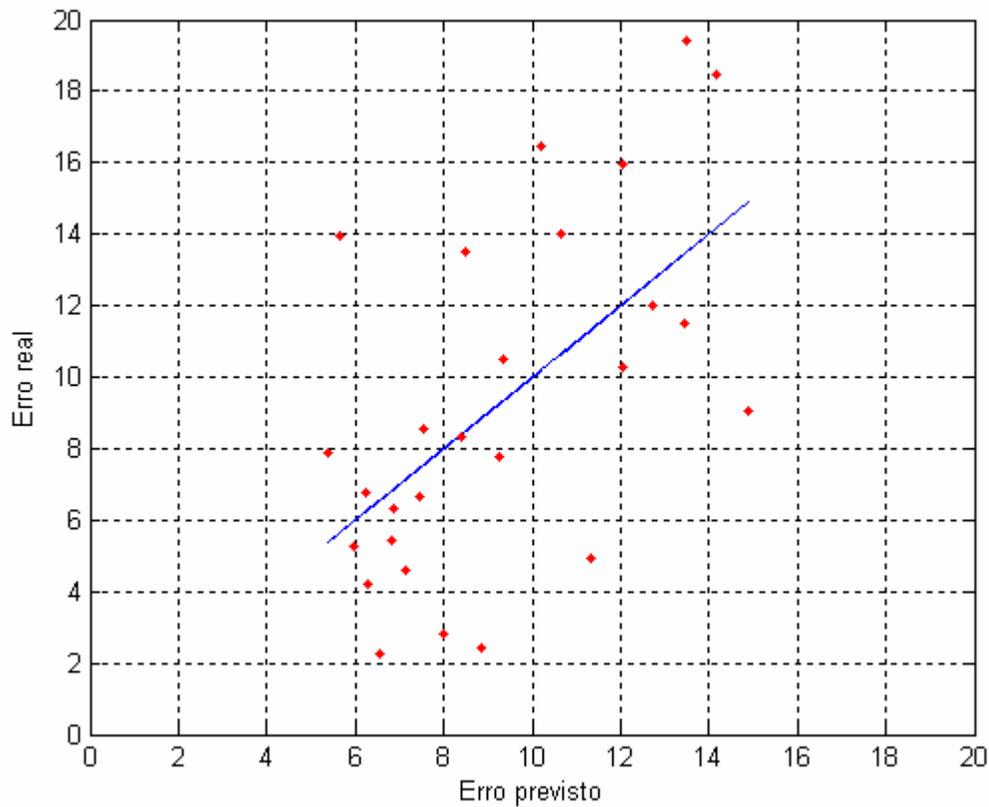


Figura 4.1: Gráfico comparativo: Erro Previsto x Erro Real

Nota-se uma maior correlação na região cujos erros são mais baixos. Conforme o erro aumenta, a correlação entre o erro real e o erro previsto diminui.

A Tabela 4.32 representa o gráfico da Figura 4.1 em números:

Tabela 4.32: Comparação entre o erro real obtido na calibração e o erro previsto pelo modelo linear

Posições	Erro Real	Erro Previsto
1	2.2840	6.5428
2	5.2770	5.9705
3	7.8740	5.3982
4	5.4110	6.8155
5	6.7560	6.2432
6	13.9670	5.6709
7	6.6710	7.4362
8	6.3170	6.8639
9	4.1970	6.2916
10	2.4020	8.8521
11	2.8370	7.9977
12	4.6130	7.1432
13	7.7540	9.2621
14	8.3190	8.4076
15	8.5690	7.5532
16	16.4820	10.1922
17	10.4740	9.3378
18	13.5000	8.4834
19	19.3920	13.4870
20	15.9870	12.0603
21	13.9870	10.6376
22	18.4420	14.1697
23	12.0170	12.7429
24	4.9090	11.3202
25	9.0780	14.8948
26	11.4770	13.4681
27	10.2950	12.0454

Capítulo 5

Conclusões

Este estudo propôs uma análise do comportamento dos erros das estimativas do algoritmo de calibração para os parâmetros extrínsecos em função do posicionamento e da orientação da câmera fotográfica em relação ao *grid*.

Os testes e rotinas aplicados neste trabalho foram eficientes para a verificação de tais erros. Foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados para a modelagem estatística dos dados em questão.

Os erros das estimativas destes parâmetros foi observado em porcentagem.

Foram realizados 27 testes de posicionamento da câmera e, dentro de cada um destes testes, mais 9 testes de orientação da câmera.

Os testes de posicionamento objetivaram analisar o comportamento das estimativas de posição da câmera, isto é, dos parâmetros X, Y e Z. A escolha destas posições foi feita de forma que a câmera se encontrasse em posições diversas, desde aquela em que se esperava encontrar os menores erros até aquela em que o erro encontrado deveria ser o mais elevado.

Os testes de orientação tinham como objetivo analisar o comportamento das estimativas dos parâmetros de rotação da câmera, ou seja, dos parâmetros ω , ϕ e κ , e, conseqüentemente, dos ângulos de rotação da câmera no seu próprio sistema de coordenadas α , β e γ .

A posição cujo erro de calibração foi menor foi a posição 1 (vide Tabela 4.31). Nesta posição o erro médio foi de 2,284%.

A posição cujo erro de calibração foi maior foi a posição 19 (vide Tabela 4.31). Nesta posição o erro médio foi de 19,932%.

Analisando a Tabela 4.31 observa-se erros muito elevados nas variáveis X e Y nas posições 19, 20, 21 e 22. Uma das causas para estes resultados é o fato de as fotos terem sido capturadas em dias diferentes, o que pode ter acarretado numa variação nas medições da posição da câmera devido a falhas humanas.

No Apêndice F pode ser vista a Tabela F.1 contendo os erros absolutos para todas as fotos em todas as posições da câmera. Estes resultados são mais apropriados para a análise das fotos 4B. Observou-se que, ao transladar o *grid* de um vetor $(X,Y,Z) = (1,1,1)$ em relação à sua origem $(0,0,0)$, os parâmetros retornados com o algoritmo de calibração comportam-se segundo um erro absoluto que varia entre 0 e 2 cm. Sugere-se um estudo mais aprofundado acerca desta variação, utilizando métodos mais eficazes na translação do *grid*.

Os testes foram realizados em um ambiente iluminado, porém não muito espaçoso. O foco da câmera não foi alterado em nenhuma foto capturada para que isto não fosse mais uma variável de estudo e mais uma possível fonte de erros.

Vale lembrar que alguns erros obtidos se devem a imprecisões nas medições com réguas, trenas e transferidores e no manuseamento da câmera ao transladá-la e, principalmente, ao rotacioná-la. Isto pode ter provocado uma perturbação maior em determinadas posições, devido a falhas humanas, o que, conseqüentemente, fez com que a posição na qual se esperava obter um maior erro de calibração (posição 27) apresentou um erro não tão alto.

As maiores dificuldades de execução dos testes foram encontradas nas posições em que a câmera se encontrava em uma altura considerável, como por exemplo as posições 25, 26 e 27. A sala onde foram realizados os testes não apresentava uma estrutura adequada. O teto era baixo e não havia muito espaço ao redor para que a pessoa responsável por manusear a câmera o fizesse precisamente.

Outra grande dificuldade encontrada foi observada no momento em que se girava a câmera em torno de seus eixos X_{cam} , Y_{cam} e Z_{cam} . O uso de transferidores não garante a precisão adequada. Sugere-se, para trabalhos futuros, o estudo de novos instrumentos de medição angular 3D para facilitar e melhorar os resultados.

A escolha dos *pixels* dos centros dos alvos marcados no *grid* não foi precisa o suficiente. Sugere-se coletar essas coordenadas utilizando antes um método de pré-processamento de imagens, auxiliando na identificação destes pontos exatos. Isto também minimizaria erros causados por falha humana tanto na hora de escolher o ponto quanto na hora de anotar as coordenadas do *pixel*.

Um trabalho futuro poderia abranger outras posições da câmera, como por exemplo em um quadrante mais abaixo do nível do *grid*. Como análise dos resultados, sugere-se também obter uma outra foto em uma posição diferente das posições envolvidas no teste, entrar com as medidas

do posicionamento da câmera no modelo linear obtido no projeto e conferir o erro dado pelo modelo com o erro obtido fazendo toda a rotina de calibração até o passo 7 do Apêndice A, Tabela A.1.

Conclui-se que a posição e orientação de uma câmera fotográfica em relação a um objeto de estudo realmente influi nos seus parâmetros extrínsecos de calibração e que, se em condições ótimas, os menores erros de calibração serão encontrados em posições que enquadram o objeto mais perfeitamente, à menor distância possível e com a menor rotação possível.

Apêndice A

Rotina de Calibração

Tabela A.1: Rotina de calibração para os parâmetros extrínsecos da câmera

1. Carregar em memória o arquivo texto contendo as coordenadas 3D dos pontos marcados no *grid* e as coordenadas 2D destes pontos obtidas na imagem frontal;
2. Executar a biblioteca *CalMF.dll* passando como parâmetro o arquivo texto carregado em memória do passo 1, gerando estimativas dos parâmetros de calibração no sistema de coordenadas global;
3. Destacar as estimativas dos parâmetros extrínsecos de calibração (seis primeiras linhas retornadas);
4. Para os parâmetros de rotação (linhas 4 a 6), executar procedimento de transformação linear:
 - 4.1 Encontrar a matriz R_1 (Capítulo 2), passando os ângulos ω , ϕ e κ como parâmetros para a função *MatrizR*;
 - 4.2 Carregar em memória o arquivo texto semelhante ao do passo 1, só que este contendo as coordenadas dos pontos da imagem girada em um dos eixos da câmera;
 - 4.3 Executar novamente a biblioteca *CalMF.dll* passando como parâmetro o arquivo texto carregado em memória do passo 4.2;
 - 4.4 Encontrar a matriz R_3 , de acordo com a Equação (2.3) apresentada no Capítulo 2, passando os ângulos ω , ϕ e κ gerados no passo 4.3 como parâmetros para a função *MatrizR*;
 - 4.5 Fazer a conversão entre o sistema de coordenadas global e o sistema de coordenadas local, encontrando a matriz R_2 , de acordo com a Equação (2.7) apresentada no Capítulo 2;
 - 4.6 Extrair os ângulos α , β e γ a partir da matriz R_2 , como mostrado no Capítulo 2 com o conjunto de equações representado por (2.5), com a função *angulos*;
5. Aplicar o fator de correção para os ângulos α e β , executando a função *fator_correcao*;
6. Calcular erros das estimativas dos parâmetros extrínsecos;
7. Calcular o erro médio global de todos os parâmetros extrínsecos de cada posição;

8. Obter modelo linear através do Método dos Mínimos Quadrados, executando a função *minimos_quadradados*.

* Os códigos-fonte de parte de um procedimento que executa os passos 1 até 4.6 e outros que executam os demais passos podem ser visto na Tabela A.2 até A.6.

Tabela A.2: Código-fonte de parte do procedimento de execução dos passos 1 até 4.2

```

% Título: procedimento_N0.m
% Descrição: obtenção das estimativas dos parâmetros de calibração da camera
echo on;
%=====
% FOTOS 000
%=====
%=====
% ROTAÇÃO DA CÂMERA EM X
%=====
echo off;
% Camera situada a 80 cm do grid
    % Camera na mesma altura do centro do grid
    % Camera alinhada à origem do grid
        % Par de fotos - frontal e girando a câmera em torno de seu eixo Xcam
p000_1A = load('cal000_1A.txt');
p000_1B = load('cal000_1B.txt');
%
format long;
%
% Ângulos no sistema de coordenadas do grid com a câmera na posição frontal:
n000_1A = CalMF(p000_1A);
x000_1A = n000_1A(1,1)      % coordenada X
y000_1A = n000_1A(2,1)      % coordenada Y
z000_1A = n000_1A(3,1)      % coordenada Z
w000_1A = n000_1A(4,1)      % ângulo  $\omega$ 
f000_1A = n000_1A(5,1)      % ângulo  $\phi$ 
k000_1A = n000_1A(6,1)      % ângulo  $\kappa$ 
%
pause;
%
% Matriz na posição frontal:
R000_1A = MatrizR(w000_1A,f000_1A,k000_1A);
%
% Variando a câmera em torno de seu eixo Xcam de 10°:
n000_1B = CalMF(p000_1B);

```

```

x000_1B = n000_1B(1,1)
y000_1B = n000_1B(2,1)
z000_1B = n000_1B(3,1)
w000_1B = n000_1B(4,1)
f000_1B = n000_1B(5,1)
k000_1B = n000_1B(6,1)
%
pause;
%
% Matriz na posição com a câmera girada:
R000_1B = MatrizR(w000_1B,f000_1B,k000_1B);
% Fazendo a conversao de sistemas:
Rf000_1 = R000_1B*inv(R000_1A);
%
echo on;
% coordenada X da câmera
x000_1B
% coordenada Y da câmera
y000_1B
% coordenada Z da câmera
z000_1B
% ângulos da câmera em radianos:
A000_1 = angulos(Rf000_1);
% ângulo  $\alpha$  da câmera em graus
x000_1 = A000_1(1,1)*180/pi
% ângulo  $\beta$  da câmera em graus
y000_1 = A000_1(1,2)*180/pi
% ângulo  $\gamma$  da câmera em graus
z000_1 = A000_1(1,3)*180/pi
%
pause;
%
%=====
% FIM DA ROTAÇÃO DA CÂMERA EM X
%=====

```

Tabela A.3: Código-fonte da função *MatrizR.m* feita no pacote matemático

```
% Título: MatrizR.m
% Descrição: Obtenção da matriz de rotação
%
function R=MatrizR(w, f, k);

R = [cos(f)*cos(k)      (cos(w)*sin(k) + (sin(w)*sin(f)*cos(k)))  (sin(w)*sin(k) - cos(w)*sin(f)*cos(k));
     -cos(f)*sin(k)    (cos(w)*cos(k) - sin(w)*sin(f)*sin(k))  (sin(w)*cos(k) + cos(w)*sin(f)*sin(k));
     sin(f)            -sin(w)*cos(f)                            cos(w)*cos(f)      ];
```

Tabela A.4: Código-fonte da função `angulos.m` feita no pacote matemático

```
% Título: angulos.m
% Descrição: obtenção dos ângulos de rotação da câmera a partir da matriz R
%
function A=angulos(R);
w = -atan2(R(3,2),R(3,3))
f = atan2(R(3,1),sqrt(R(1,1)^2 + R(2,1)^2))
k = -atan2(R(2,1),R(1,1))
```

Tabela A.5: Código-fonte da função *fator_correcao.m* feita no pacote matemático

```

% Título: fator_correcao.m
% Descrição: determinação de um fator de correção para os ângulos de rotação da câmera  $\alpha$  e  $\beta$ 
clear all;
% Carrega arquivo texto no formato de uma matriz 243 x 12 que contém os resultados obtidos com o algoritmo de
%calibração e os valores reais medidos manualmente para X, Y, Z  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  em todas as posições e fotos:
X = load('Resultados_Estimados_Esperados.txt');
a = 1.9;
b = 2.2;
pts = 200;
stp = (b-a)/pts;
f = a:stp:(b-stp);
%
Ealpha = zeros(length(f),1);
Ebeta = Ealpha;
%
for i = 1:length(f),
    Ea = 0; Eb = 0;
    for k = 1:27,
        Inicio = 1 + 9*(k-1); Fim = 9*k;
        Posicao(k).T = X(Inicio:Fim,7:9);
        Posicao(k).TH = X(Inicio:Fim,1:3);
        Posicao(k).TE = mean(abs(Posicao(k).TH - Posicao(k).T) ./abs(Posicao(k).T));
        Posicao(k).R = X(Inicio:Fim,10:12);
        Posicao(k).RH = X(Inicio:Fim,4:6);
        Posicao(k).RE = [ abs(f(i)*Posicao(k).RH(2,1) - Posicao(k).R(2,1))/ abs(Posicao(k).R(2,1)) ; % alpha
            abs(f(i)*Posicao(k).RH(4,2) - Posicao(k).R(4,2))/ abs(Posicao(k).R(4,2)) ; % beta
            0.5 * (abs(Posicao(k).RH(6,3) - Posicao(k).R(6,3)) / abs(Posicao(k).R(6,3)) + abs(Posicao(k).RH(9,3) -
            Posicao(k).R(9,3)) / abs(Posicao(k).R(9,3))) ]'; % gamma

        Ea = Ea + Posicao(k).RE(1,1); Eb = Eb + Posicao(k).RE(1,2);
    end;
    Ealpha(i) = Ea/27; Ebeta(i) = Eb/27;
end;
plot(f,Ealpha,'b.',f,Ebeta,'r.',f,0.5*(Ealpha+Ebeta),'k.');
```

grid on;

Tabela A.6: Código-fonte da função *minimos_quadrados.m* feita no pacote matemático

```
% Título: minimos_quadrados.m
% Descrição: obtém modelo linear para estimativas de erros dos parâmetros extrínsecos de calibração da câmera e
%plota gráfico que compara erros estimados com erros previstos por tal modelo.
%
% carrega arquivo texto no formato de uma matriz 27 x 4 que contém os valores das coordenadas X, Y e Z medidos
%manualmente e os erros médios globais estimados para toda as posições:
b = load('Valores_Reais_Erros_Medios_Globais.txt');
A = b(:,1:3);
b = b(:,4);
A = [A ones(size(A,1),1)];
% obtém coeficientes a, b, c e d do modelo linear:
xLS = inv(A'*A)*A'*b;
%
% calcula erros através do modelo linear obtido:
for i=1:27;
e(i) = xLS(1) * A(i,1) + xLS(2) * A(i,2) + xLS(3) * A(i,3) + xLS(4) * A(i,4);
end;
%
% comparar com erros estimados:
M = [A b e']
%
plot(M(:,6),M(:,5),'k');
```

Apêndice B

Exemplo do arquivo texto de entrada para a rotina de calibração

Tabela B.1: Arquivo cal000_1A.txt como exemplo

18.8	0.0	23.7	1310	741
10.9	0.0	23.7	1605	780
2.9	0.0	23.7	1845	818
0.0	2.9	23.6	2002	820
0.0	10.8	23.6	2249	790
0.0	18.7	23.6	2542	759
18.8	0.0	17.8	1314	1020
10.9	0.0	17.8	1601	1041
2.9	0.0	17.8	1844	1059
0.0	2.9	17.7	2002	1062
0.0	10.8	17.7	2252	1050
0.0	18.7	17.7	2544	1037
18.8	0.0	5.9	1307	1583
10.9	0.0	5.9	1593	1562
2.9	0.0	5.9	1838	1543
0.0	2.9	5.9	2001	1543
0.0	10.8	5.9	2258	1566
0.0	18.7	5.9	2547	1593
18.8	0.0	0.0	1299	1858
10.9	0.0	0.0	1589	1819
2.9	0.0	0.0	1833	1782
0.0	2.9	0.0	2004	1781
0.0	10.8	0.0	2257	1821
0.0	18.7	0.0	2546	1865

Apêndice C

Exemplo de parte do arquivo texto de entrada para a função *fator_correcao*

Tabela C.1: Fragmento do arquivo texto de entrada para a função *fator_correcao* referente aos dados das fotos 000_1A até 000_4C (Vide Tabelas 4.1 e 4.2).

58.154	56.337	12.626	0.000	0.000	0.000	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	0.000
57.966	56.253	11.924	-4.339	-0.363	1.610	56.600	56.600	12.000	-8.500	0.000	0.000
58.513	56.530	12.600	0.000	0.000	0.000	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	0.000
57.482	56.503	12.650	0.163	4.177	0.090	56.600	56.600	12.000	0.000	8.500	0.000
57.986	56.123	12.643	0.000	0.000	0.000	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	0.000
59.604	55.212	12.335	0.369	1.492	-19.843	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	-20.000
58.621	56.726	12.629	0.000	0.000	0.000	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	0.000
58.179	56.687	10.534	0.000	0.000	0.000	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	0.000
58.141	55.717	12.404	-0.095	-0.962	-90.203	56.600	56.600	12.000	0.000	0.000	-90.000
.
.
.

Apêndice D

Exemplo do arquivo texto de entrada para a função *minimos_quadradados*

Tabela D.1: Arquivo texto de entrada para a função *minimos_quadradados*.

56.6	56.6	12.0	2.284
42.4	56.6	12.0	5.277
28.2	56.6	12.0	7.874
56.6	56.6	26.1	5.411
42.4	56.6	26.1	6.756
28.2	56.6	26.1	13.967
56.6	56.6	58.2	6.671
42.4	56.6	58.2	6.317
28.2	56.6	58.2	4.197
84.8	84.8	12.0	2.402
63.6	84.8	12.0	2.837
42.4	84.8	12.0	4.613
84.8	84.8	33.2	7.754
63.6	84.8	33.2	8.319
42.4	84.8	33.2	8.569
84.8	84.8	81.3	16.482
63.6	84.8	81.3	10.474
42.4	84.8	81.3	13.500
141.4	141.4	12.0	19.392
106.0	141.4	12.0	15.987
70.7	141.4	12.0	13.987
141.4	141.4	47.3	18.442
106.0	141.4	47.3	12.017
70.7	141.4	47.3	4.909
141.4	141.4	84.8	9.078
106.0	141.4	84.8	11.477
70.7	141.4	84.8	10.295

Apêndice E

Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos de calibração antes de se aplicar o fator de correção nos ângulos α e β

Tabela E.1: Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção

Fotos	$E_{\text{relativo},X}$	$E_{\text{relativo},Y}$	$E_{\text{relativo},Z}$	$E_{\text{relativo},\alpha}$	$E_{\text{relativo},\beta}$	$E_{\text{relativo},\gamma}$
000_1A	2,746	-0,465	5,217			
000_1B	2,413	-0,613	-0,633	-48,953		
000_2A	3,380	-0,124	5,000			
000_2B	1,558	-0,171	5,417		-50,859	
000_3A	2,449	-0,843	5,358			
000_3B	5,307	-2,452	2,792			-0,785
000_4A	3,571	0,223	5,242			
000_4B	-55,800	-96,100	109,500			
000_4C	2,723	-1,560	3,367			0,226
001_1A	10,196	8,113	11,250			
001_1B	8,646	6,602	5,167	-53,529		
001_2A	8,903	7,014	11,017			
001_2B	6,870	7,044	11,183		-47,329	
001_3A	6,901	5,131	11,350			
001_3B	9,816	2,737	8,517			1,230
001_4A	6,413	4,436	10,983			
001_4B	-57,500	-10,500	194,800			
001_4C	3,167	7,034	1,825			-2,570
002_1A	5,720	5,106	1,667			
002_1B	4,918	4,039	-5,175	-57,000		
002_2A	5,344	4,456	1,542			
002_2B	2,404	4,673	1,683		-50,047	
002_3A	5,007	4,346	1,517			
002_3B	7,957	3,325	-1,975			-23,575
002_4A	4,018	4,583	1,433			
002_4B	60,200	-74,600	-4,000			
002_4C	4,975	4,313	-0,125			1,751
010_1A	2,456	5,057	-7,011			
010_1B	1,779	4,737	-10,261	-50,600		
010_2A	3,108	5,804	-6,874			
010_2B	1,355	6,000	-7,284		-45,953	
010_3A	2,484	5,375	-7,230			
010_3B	5,129	2,760	-8,115			7,525
010_4A	2,567	5,380	-7,176			

Tabela E.1 (continuação): Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,α}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
010_4B	-30,900	-7,200	24,200			
010_4C	5,456	9,502	6,310			-0,041
011_1A	8,219	4,311	-1,812			
011_1B	6,698	3,053	-4,969	-60,294		
011_2A	8,064	4,228	-2,008			
011_2B	6,099	4,367	-2,307		-47,929	
011_3A	8,151	3,710	-2,797			
011_3B	11,151	0,797	-4,667			4,800
011_4A	7,021	2,143	-3,061			
011_4B	-43,000	63,600	168,800			
011_4C	7,889	3,458	1,268			-0,790
012_1A	14,972	3,272	-6,513			
012_1B	14,124	2,562	-9,433	-68,612		
012_2A	14,691	2,569	-6,510			
012_2B	12,394	3,087	-6,444		-47,929	
012_3A	15,223	2,710	-6,621			
012_3B	19,415	1,597	-7,667			-20,230
012_4A	14,961	2,346	-6,759			
012_4B	-52,400	-39,100	62,100			
012_4C	25,670	-2,542	-9,556			-3,126
020_1A	3,193	4,894	-15,869			
020_1B	3,097	4,735	-17,083	-51,247		
020_2A	3,481	5,069	-15,809			
020_2B	2,134	5,348	-16,095		-43,176	
020_3A	3,717	4,931	-15,754			
020_3B	6,007	2,996	-16,379			-4,500
020_4A	2,763	5,203	-15,787			
020_4B	81,900	111,300	-43,600			
020_4C	4,039	12,558	-13,125			0,308
021_1A	1,012	9,961	-10,510			
021_1B	0,686	9,963	-12,186	-49,459		
021_2A	-0,502	11,092	-10,525			
021_2B	-0,382	12,477	-9,865		-47,212	
021_3A	0,396	10,952	-10,358			
021_3B	5,316	11,638	-9,961			-3,895
021_4A	1,849	10,440	-10,470			
021_4B	-95,900	-94,100	139,400			
021_4C	2,941	12,601	-12,959			4,361
022_1A	0,844	5,039	-8,766			
022_1B	-0,039	4,221	-10,558	-51,176		
022_2A	0,053	4,438	-8,921			
022_2B	-2,309	5,196	-8,543		-53,059	
022_3A	0,053	4,191	-8,821			
022_3B	6,691	3,820	-9,345			3,410

Tabela E.1 (continuação): Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,α}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
022_4A	0,280	4,246	-8,601			
022_4B	76,400	254,100	-96,300			
022_4C	11,007	17,866	-10,230			5,870
100_1A	-7,340	-2,816	1,517			
100_1B	-6,305	-1,723	-2,858	-51,494		
100_2A	-4,297	0,289	1,800			
100_2B	-4,899	0,861	2,908		-49,412	
100_3A	-4,429	0,298	3,200			
100_3B	-4,162	-2,367	-0,442			-0,565
100_4A	-6,521	-1,948	2,108			
100_4B	-2,100	24,600	4,900			
100_4C	-7,892	-0,900	15,200			1,468
101_1A	-0,777	1,160	4,683			
101_1B	-0,969	0,634	-0,875	-51,835		
101_2A	-0,679	1,547	4,817			
101_2B	-1,135	2,078	5,483		-48,800	
101_3A	1,022	2,276	5,050			
101_3B	2,690	0,132	0,775			-1,350
101_4A	0,379	1,505	4,533			
101_4B	-24,300	52,300	0,900			
101_4C	-3,508	4,688	30,917			2,529
102_1A	5,795	1,197	9,292			
102_1B	5,738	0,798	2,633	-50,788		
102_2A	5,517	0,695	10,192			
102_2B	2,896	0,067	10,375		-48,647	
102_3A	3,705	-1,520	8,700			
102_3B	6,132	-2,880	4,517			-7,770
102_4A	2,057	-2,600	8,925			
102_4B	-37,000	96,800	83,800			
102_4C	-8,163	-7,890	12,833			1,314
110_1A	0,015	3,288	-6,909			
110_1B	1,164	5,474	-7,795	-58,341		
110_2A	-0,091	3,613	-6,942			
110_2B	0,035	5,007	-6,433		-42,176	
110_3A	0,138	3,802	-6,898			
110_3B	1,525	2,475	-7,942			4,355
110_4A	0,517	4,466	-6,260			
110_4B	124,700	35,100	216,900			
110_4C	-3,307	3,170	-10,921			-0,528
111_1A	4,013	3,057	-3,422			
111_1B	3,025	1,654	-6,337	-65,047		
111_2A	2,940	1,846	-4,205			
111_2B	1,833	2,130	-4,199		-55,176	
111_3A	3,270	1,985	-3,934			

Tabela E.1 (continuação): Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,α}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
111_3B	5,769	0,008	-5,961			8,100
111_4A	2,462	1,060	-4,807			
111_4B	60,200	116,500	-93,200			
111_4C	2,805	3,938	3,617			0,430
112_1A	-2,639	-0,409	-4,241			
112_1B	-3,087	-0,640	-6,883	-58,435		
112_2A	-2,672	0,205	-3,428			
112_2B	-3,771	0,432	-3,292		-59,388	
112_3A	-1,873	0,731	-3,494			
112_3B	2,108	-0,062	-4,768			-2,435
112_4A	1,425	-0,722	-5,208			
112_4B	14,700	131,300	-64,600			
112_4C	-43,432	-46,017	-48,123			3,278
120_1A	-16,792	-17,316	-21,417			
120_1B	-16,119	-17,382	-21,996	-66,176		
120_2A	-16,939	-17,638	-21,796			
120_2B	-17,733	-16,257	-21,569		-66,741	
120_3A	-16,884	-17,476	-21,611			
120_3B	-14,160	-18,233	-21,940			-2,590
120_4A	-10,287	-12,348	-19,685			
120_4B	-96,100	9,900	59,500			
120_4C	-7,794	-10,190	-18,871			-0,796
121_1A	-11,429	-12,552	-16,689			
121_1B	-11,542	-13,144	-17,875	-53,976		
121_2A	-11,470	-13,008	-16,776			
121_2B	-12,208	-11,987	-16,288		-58,765	
121_3A	-11,066	-12,846	-16,480			
121_3B	-6,774	-11,825	-15,919			-14,415
121_4A	-9,492	-10,748	-14,841			
121_4B	28,500	253,300	15,700			
121_4C	-7,288	-6,579	-14,959			3,737
122_1A	2,778	-1,592	-8,572			
122_1B	4,837	-0,021	-8,011	-68,565		
122_2A	4,840	2,065	-6,726			
122_2B	4,568	4,410	-5,016		-59,871	
122_3A	5,679	3,051	-5,797			
122_3B	9,917	2,590	-7,212			17,210
122_4A	6,946	4,167	-5,364			
122_4B	-67,500	-70,000	174,800			
122_4C	6,274	5,330	-8,615			-1,563
200_1A	-26,291	-26,074	-5,150			
200_1B	-83,120	-84,123	-2,092	-61,694		
200_2A	-27,414	-26,931	-3,608			
200_2B	-29,675	-28,601	-3,517		-72,871	

Tabela E.1 (continuação): Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,α}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
200_3A	-28,688	-28,324	-4,375			
200_3B	-29,595	-30,431	-6,425			1,175
200_4A	-30,550	-29,806	-4,308			
200_4B	345,200	376,600	-6,800			
200_4C	-30,264	-28,827	-0,633			-0,728
201_1A	-26,816	-26,938	1,742			
201_1B	-27,141	-27,110	-4,708	-64,929		
201_2A	-26,417	-26,483	0,850			
201_2B	-28,012	-27,262	1,625		-64,224	
201_3A	-25,934	-25,947	0,133			
201_3B	-26,283	-27,488	-4,783			-3,215
201_4A	-27,108	-27,323	-1,000			
201_4B	49,700	166,900	-4,200			
201_4C	-26,292	-25,152	3,092			-2,222
202_1A	-22,431	-21,902	6,900			
202_1B	-23,564	-23,662	0,800	-66,047		
202_2A	-21,881	-21,767	6,225			
202_2B	-23,216	-22,051	6,725		-57,776	
202_3A	-22,463	-22,073	6,092			
202_3B	-21,891	-23,213	-3,925			-5,685
202_4A	-23,587	-23,318	5,700			
202_4B	66,200	139,900	-29,300			
202_4C	-22,591	-21,702	9,683			-1,977
210_1A	-18,784	-21,647	-19,000			
210_1B	-21,327	-23,063	-21,091	-53,012		
210_2A	-20,411	-22,841	-20,662			
210_2B	-20,603	-22,347	-19,827		-63,918	
210_3A	-21,755	-23,883	-20,983			
210_3B	-20,992	-24,583	-21,019			-38,070
210_4A	-23,329	-25,458	-22,294			
210_4B	-96,500	-20,600	4,900			
210_4C	-22,644	-23,274	-17,932			-1,227
211_1A	-1,690	-6,414	-5,733			
211_1B	2,499	-2,680	-10,915	-35,753		
211_2A	-0,265	-4,682	-11,095			
211_2B	-0,708	-4,110	-10,532		-52,318	
211_3A	-0,114	-4,783	-10,381			
211_3B	-0,018	-5,962	-12,265			-24,665
211_4A	-3,542	-7,417	-13,133			
211_4B	17,500	54,400	34,800			
211_4C	-6,309	-7,599	-12,277			-1,056
212_1A	1,598	-3,831	-2,994			
212_1B	0,153	-5,254	-6,121	-47,506		
212_2A	1,455	-3,956	-2,653			

Tabela E.1 (continuação): Erros relativos percentuais dos parâmetros extrínsecos antes da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,α}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
212_2B	-1,337	-5,036	-3,074		-51,694	
212_3A	-0,139	-5,380	-3,839			
212_3B	3,110	-4,795	-5,101			-10,855
212_4A	3,784	-3,637	-3,844			
212_4B	-66,000	-45,900	69,200			
212_4C	5,482	-2,485	-1,839			-3,190
220_1A	-9,620	-8,116	-9,252			
220_1B	-8,173	-6,552	-9,026	-51,824		
220_2A	-10,130	-8,395	-9,608			
220_2B	-10,812	-7,918	-9,702		-55,624	
220_3A	-10,726	-8,769	-10,113			
220_3B	-9,219	-10,683	-11,176			26,700
220_4A	-9,265	-7,483	-8,692			
220_4B	209,100	-25,500	505,200			
220_4C	-10,381	-7,749	-10,949			-0,808
221_1A	-3,929	-8,098	-12,542			
221_1B	-4,042	-8,257	-13,344	-40,671		
221_2A	-5,219	-9,302	-13,393			
221_2B	-4,960	-7,989	-12,267		-64,729	
221_3A	-3,594	-7,856	-11,817			
221_3B	-3,011	-8,301	-13,656			-2,890
221_4A	-3,709	-7,061	-12,125			
221_4B	408,900	324,800	-8,400			
221_4C	-1,794	-5,809	-10,186			0,149
222_1A	4,980	-6,586	-11,542			
222_1B	5,359	-5,795	-12,471	-60,094		
222_2A	6,014	-4,497	-10,450			
222_2B	6,076	-2,767	-9,016		-62,247	
222_3A	1,727	-8,580	-13,948			
222_3B	8,730	-4,314	-10,620			7,880
222_4A	2,658	-6,071	-11,703			
222_4B	172,100	472,300	28,500			
222_4C	7,516	-2,347	-8,281			-0,308

Apêndice F

Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos de calibração após se aplicar o fator de correção nos ângulos α e β

Tabela F.1: Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,α}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
000_1A	1,554	-0,263	0,626			
000_1B	1,366	-0,347	-0,076	0,482		
000_2A	1,913	-0,07	0,6			
000_2B	0,882	-0,097	0,65		0,146	
000_3A	1,386	-0,477	0,643			
000_3B	3,004	-1,388	0,335			0,157
000_4A	2,021	0,126	0,629			
000_4B	-0,558	-0,961	1,095			
000_4C	1,541	-0,883	0,404			0,203
001_1A	4,323	4,592	1,35			
001_1B	3,666	3,737	0,62	-0,324		
001_2A	3,775	3,97	1,322			
001_2B	2,913	3,987	1,342		0,767	
001_3A	2,926	2,904	1,362			
001_3B	4,162	1,549	1,022			0,246
001_4A	2,719	2,511	1,318			
001_4B	-0,575	-0,105	1,948			
001_4C	1,343	3,981	0,219			2,313
002_1A	1,613	2,89	0,2			
002_1B	1,387	2,286	-0,621	-0,934		0,723
002_2A	1,507	2,522	0,185			
002_2B	0,678	2,645	0,202		0,289	
002_3A	1,412	2,46	0,182			
002_3B	2,244	1,882	-0,237			4,715
002_4A	1,133	2,594	0,172			
002_4B	0,602	-0,746	-0,04			
002_4C	1,403	2,441	-0,015			1,576
010_1A	1,39	2,862	-1,83			
010_1B	1,007	2,681	-2,678	0,192		
010_2A	1,759	3,285	-1,794			
010_2B	0,767	3,396	-1,901		1,010	
010_3A	1,406	3,042	-1,887			
010_3B	2,903	1,562	-2,118			1,505
010_4A	1,453	3,045	-1,873			
010_4B	-0,309	-0,072	0,242			
010_4C	3,088	5,378	1,647			0,037

Tabela F.1 (continuação): Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,a}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
011_1A	3,485	2,44	-0,473			
011_1B	2,84	1,728	-1,297	-1,514		
011_2A	3,419	2,393	-0,524			
011_2B	2,586	2,472	-0,602		0,662	
011_3A	3,456	2,1	-0,73			
011_3B	4,728	0,451	-1,218			0,960
011_4A	2,977	1,213	-0,799			
011_4B	-0,43	0,636	1,688			
011_4C	3,345	1,957	0,331			0,711
012_1A	4,222	1,852	-1,7			
012_1B	3,983	1,45	-2,462	-2,977		
012_2A	4,143	1,454	-1,699			
012_2B	3,495	1,747	-1,682		0,662	
012_3A	4,293	1,534	-1,728			
012_3B	5,475	0,904	-2,001			4,046
012_4A	4,219	1,328	-1,764			
012_4B	-0,524	-0,391	0,621			
012_4C	7,239	-1,439	-2,494			2,813
020_1A	1,807	2,77	-7,553			
020_1B	1,753	2,68	-8,284	0,078		
020_2A	1,97	2,869	-7,517			
020_2B	1,208	3,027	-7,689		1,498	
020_3A	2,104	2,791	-7,484			
020_3B	3,4	1,696	-7,86			0,900
020_4A	1,564	2,945	-7,504			
020_4B	0,819	1,113	-0,436			
020_4C	2,286	7,108	-5,901			0,277
021_1A	0,429	5,638	-5,222			
021_1B	0,291	5,639	-6,214	0,393		
021_2A	-0,213	6,278	-5,231			
021_2B	-0,162	7,062	-4,84		0,788	
021_3A	0,168	6,199	-5,132			
021_3B	2,254	6,587	-4,897			0,779
021_4A	0,784	5,909	-5,198			
021_4B	-0,959	-0,941	1,394			
021_4C	1,247	7,132	-6,672			3,925
022_1A	0,238	2,852	-5,102			
022_1B	-0,011	2,389	-6,145	0,090		
022_2A	0,015	2,512	-5,192			
022_2B	-0,651	2,941	-4,972		-0,241	
022_3A	0,015	2,372	-5,134			
022_3B	1,887	2,162	-5,439			0,682
022_4A	0,079	2,403	-5,006			
022_4B	0,764	2,541	-0,963			
022_4C	3,104	10,112	-5,954			5,283
100_1A	6,224	2,388	0,182			

Tabela F.1 (continuação): Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,a}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
100_1B	5,347	1,461	0,343	0,035		
100_2A	3,644	0,245	0,216			
100_2B	4,154	0,73	0,349		0,401	
100_3A	3,756	0,253	0,384			
100_3B	3,529	2,007	0,053			0,113
100_4A	5,53	1,652	0,253			
100_4B	-0,021	0,246	0,049			
100_4C	6,692	0,763	1,824			1,321
101_1A	0,494	0,984	0,562			
101_1B	0,616	0,538	0,105	0,025		
101_2A	0,432	1,312	0,578			
101_2B	0,722	1,762	0,658		0,509	
101_3A	0,65	1,93	0,606			
101_3B	1,711	0,112	0,093			0,270
101_4A	0,241	1,276	0,544			
101_4B	-0,243	0,523	0,009			
101_4C	2,231	3,975	3,71			2,276
102_1A	2,457	1,015	1,115			
102_1B	2,433	0,677	0,316	0,159		
102_2A	2,339	0,589	1,223			
102_2B	1,228	0,057	1,245		0,536	
102_3A	1,571	1,289	1,044			
102_3B	2,6	2,442	0,542			1,554
102_4A	0,872	2,205	1,071			
102_4B	-0,37	0,968	0,838			
102_4C	3,461	6,691	1,54			1,183
110_1A	0,013	2,788	2,363			
110_1B	0,987	4,642	2,666	1,170		
110_2A	0,077	3,064	2,374			
110_2B	0,03	4,246	2,2		1,674	
110_3A	0,117	3,224	2,359			
110_3B	1,293	2,099	2,716			0,871
110_4A	0,438	3,787	2,141			
110_4B	1,247	0,351	2,169			
110_4C	2,804	2,688	3,735			0,475
111_1A	2,552	2,592	1,136			
111_1B	1,924	1,403	2,104	2,350		
111_2A	1,87	1,565	1,396			
111_2B	1,166	1,806	1,394		0,613	
111_3A	2,08	1,683	1,306			
111_3B	3,669	0,007	1,979			1,62
111_4A	1,566	0,899	1,596			
111_4B	0,602	1,165	-0,932			
111_4C	1,784	3,339	1,201			0,387
112_1A	1,119	0,347	1,408			
112_1B	1,309	0,543	2,285	1,187		

Tabela F.1 (continuação): Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,a}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
112_2A	1,133	0,174	1,138			
112_2B	1,599	0,366	1,093		1,354	
112_3A	0,794	0,62	1,16			
112_3B	0,894	0,053	1,583			0,487
112_4A	0,604	0,612	1,729			
112_4B	0,147	1,313	-0,646			
112_4C	18,415	39,022	15,977			2,950
120_1A	14,24	14,684	17,412			
120_1B	13,669	14,74	17,883	2,549		
120_2A	14,364	14,957	17,72			
120_2B	15,038	13,786	17,536		2,648	
120_3A	14,318	14,82	17,57			
120_3B	12,008	15,462	17,837			0,518
120_4A	8,723	10,471	16,004			
120_4B	-0,961	0,099	0,595			
120_4C	6,609	8,641	15,342			0,716
121_1A	7,269	10,644	13,568			
121_1B	7,341	11,146	14,532	0,402		
121_2A	7,295	11,031	13,639			
121_2B	7,764	10,165	13,242		1,245	
121_3A	7,038	10,893	13,398			
121_3B	4,308	10,028	12,942			2,883
121_4A	6,037	9,114	12,066			
121_4B	0,285	2,533	0,157			
121_4C	4,635	5,579	12,162			3,363
122_1A	1,178	1,35	6,969			
122_1B	2,051	0,018	6,513	2,969		
122_2A	2,052	1,751	5,468			
122_2B	1,937	3,74	4,078		1,439	
122_3A	2,408	2,587	4,713			
122_3B	4,205	2,196	5,863			3,442
122_4A	2,945	3,534	4,361			
122_4B	-0,675	-0,7	1,748			
122_4C	2,66	4,52	7,004			1,407
200_1A	37,176	36,868	0,618			
200_1B	117,532	118,95	0,251	1,760		
200_2A	38,763	38,08	0,433			
200_2B	41,96	40,442	0,422		3,726	
200_3A	40,565	40,05	0,525			
200_3B	41,847	43,029	0,771			0,235
200_4A	43,198	42,146	0,517			
200_4B	3,452	3,766	-0,068			
200_4C	42,793	40,762	0,076			0,655
201_1A	28,425	38,09	0,209			
201_1B	28,769	38,334	0,565	2,329		
201_2A	28,002	37,447	0,102			

Tabela F.1 (continuação): Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,a}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
201_2B	29,693	38,549	0,195		2,20513	
201_3A	27,49	36,689	0,016			
201_3B	27,86	38,868	0,574			0,643
201_4A	28,735	38,635	0,12			
201_4B	0,497	1,669	-0,042			
201_4C	27,869	35,565	0,371			2,000
202_1A	15,859	30,97	0,828			
202_1B	16,66	33,458	0,096	2,52598		
202_2A	15,47	30,778	0,747			
202_2B	16,414	31,18	0,807		1,071	
202_3A	15,881	31,211	0,731			
202_3B	15,477	32,823	0,471			1,137
202_4A	16,676	32,972	0,684			
202_4B	0,662	1,399	-0,293			
202_4C	15,972	30,686	1,162			1,779
210_1A	26,561	30,609	8,987			
210_1B	30,157	32,611	9,976	0,23242		
210_2A	28,861	32,297	9,773			
210_2B	29,133	31,599	9,378		2,151	
210_3A	30,761	33,771	9,925			
210_3B	29,682	34,76	9,942			7,614
210_4A	32,987	35,998	10,545			
210_4B	-0,965	-0,206	0,049			
210_4C	32,018	32,91	8,482			1,104
211_1A	1,791	9,07	2,769			
211_1B	2,649	3,79	5,272	2,804		
211_2A	0,281	6,62	5,359			
211_2B	0,75	5,812	5,087		0,110	
211_3A	0,121	6,763	5,014			
211_3B	0,019	8,43	5,924			4,933
211_4A	3,755	10,487	6,343			
211_4B	0,175	0,544	0,348			
211_4C	6,688	10,745	5,93			0,95
212_1A	1,13	5,417	1,416			
212_1B	0,108	7,429	2,895	0,736		
212_2A	1,029	5,594	1,255			
212_2B	0,945	7,121	1,454		0,001	
212_3A	0,098	7,607	1,816			
212_3B	2,199	6,78	2,413			2,171
212_4A	2,675	5,143	1,818			
212_4B	-0,66	-0,459	0,692			
212_4C	3,876	3,514	0,87			2,871
220_1A	13,603	11,476	7,846			
220_1B	11,556	9,264	7,654	0,023		
220_2A	14,324	11,871	8,148			
220_2B	15,288	11,196	8,227		0,692	

Tabela F.1 (continuação): Erros absolutos dos parâmetros extrínsecos depois da aplicação do fator de correção

Fotos	E_{relativo,X}	E_{relativo,Y}	E_{relativo,Z}	E_{relativo,a}	E_{relativo,β}	E_{relativo,γ}
220_3A	15,166	12,4	8,576			
220_3B	13,035	15,106	9,477			5,340
220_4A	13,101	10,581	7,371			
220_4B	2,091	-0,255	5,052			
220_4C	14,679	10,957	9,285			0,727
221_1A	4,165	11,451	10,636			
221_1B	4,284	11,675	11,316	1,939		
221_2A	5,532	13,153	11,357			
221_2B	5,258	11,297	10,402		2,29414	
221_3A	3,81	11,109	10,021			
221_3B	3,192	11,738	11,58			0,578
221_4A	3,932	9,984	10,282			
221_4B	4,089	3,248	-0,084			
221_4C	1,902	8,214	8,638			0,134
222_1A	3,521	9,312	9,903			
222_1B	3,789	8,194	10,7	1,478		
222_2A	4,252	6,359	8,966			
222_2B	4,296	3,912	7,736		1,857	
222_3A	1,221	12,132	11,967			
222_3B	6,172	6,1	9,112			1,576
222_4A	1,879	8,584	10,041			
222_4B	1,721	4,723	0,285			
222_4C	5,314	3,319	7,105			0,277

Referências Bibliográficas

[1] Silva, L. C. “Método Robusto para a Calibração de Câmeras em Estereofotogrametria”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2003.

[2] Strang, Gilbert. “Linear Algebra and Its Applications”, 3ª Edição, Ed. Harcourt, Brace, Jovanovich, 1988.