

5 Resultados

Neste capítulo apresentaremos os resultados de testes realizados usando o método de múltipla calibração de câmeras proposto neste trabalho, aplicado na calibração de dois sistemas formados por quatro câmeras. O objetivo desses testes é mostrar as contribuições que nosso método pode oferecer em comparação a outros trabalhos, como os citados no capítulo 3, aproveitando especialmente as características implícitas do novo padrão invariante proposto como componente importante do nosso método. Nossas contribuições tentam provar que:

- A característica de colinearidade que nossos padrões invariantes possuem contribui na obtenção de melhores resultados quando usada especificamente para aprimorar os resultados da otimização dos parâmetros das câmeras. Para isso, essa característica é modelada como mais duas funções de controle que serão inseridas na definição da função de erro global, componente chave do algoritmo de otimização. Nós compararemos os resultados obtidos incluindo ou não essas funções derivadas da colinearidade do padrão.
- A precisão alcançada na tarefa de recuperação de medidas 3D, após realizar a calibração das câmeras com nosso método, é melhor em comparação aos resultados obtidos com outros métodos de múltipla calibração de câmeras, como os apresentados academicamente em [4][28][32] e [37] e suas versões comerciais [1] e [13], que serão citados como referência para comparação com nosso método.

Para fazer a descrição dos nossos testes e dos resultados alcançados dividiremos este capítulo nas seguintes seções:

- Equipamento e ambiente de teste.
- Metodologia dos testes.
- Descrição dos resultados.

5.1. Equipamento e ambiente de teste

Para testar nosso método de múltipla calibração num sistema real de múltiplas câmeras montamos dois sistemas compostos por quatro câmeras cada um. A diferença entre os dois sistemas é o tipo de câmera que os compõem. Tanto as câmeras como seus acessórios adicionais são detalhados a seguir:

- 2 câmeras web, da marca Logitech, modelo QuickCam Pro 4000, com conexão USB 2.0, com taxa de captura de 30 fps. (Figura 32a).
- 4 câmeras monocromáticas, da marca Unibrain, modelo Fire-i, com conexão firewire, com taxa de captura de 30 fps. (Figura 32b e 32c)
- 3 cabos de 4.5m e 1 cabo de 1m para conexão firewire.
- O tipo de lente das câmeras tem distância focal de 4.3mm e ângulo de visão de 42° Horizontal, e 32° Vertical.

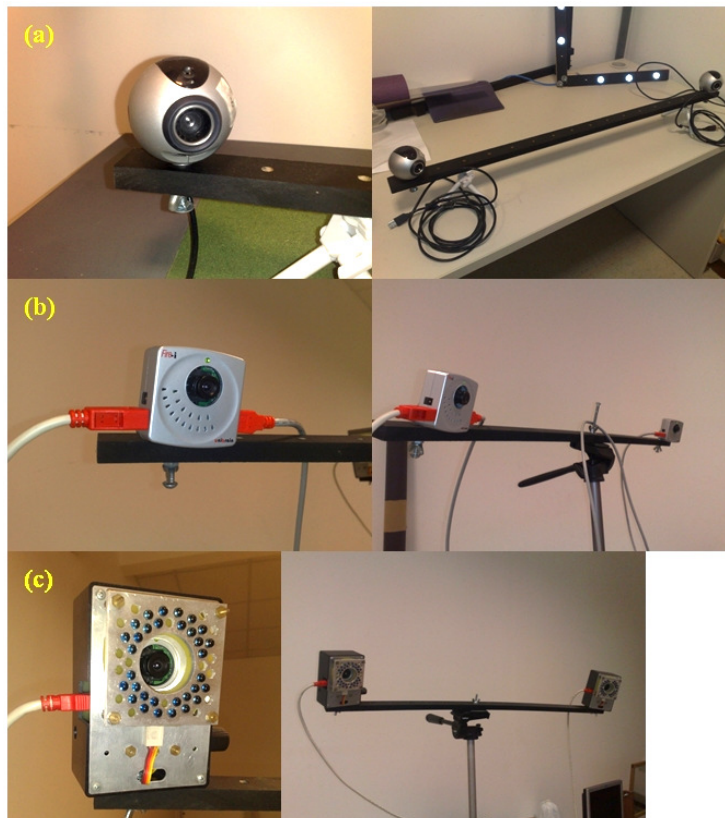


Figura 32: (a) Câmeras web Logitech, (b) e (c) Câmeras Fire-I

- Dois tripés sobre os quais foram construídas e posicionadas três varas de madeira para suporte das câmeras, o primeiro e segundo suporte (Figura 32b e 32c) permite colocar as câmeras a distância de 80, e o terceiro a 85 cm.

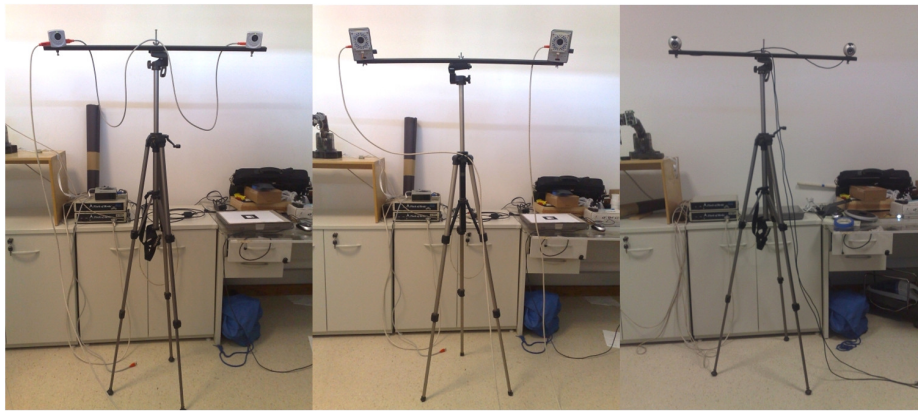


Figura 33: Três sistemas estéreo de câmeras formados pelas seis câmeras usadas para os testes.

Com o hardware descrito acima, foi possível montar dois sistemas de quatro câmeras, baseados em três sistemas estéreo de câmeras (Figura 33). Os sistemas de quatro câmeras são descritos a seguir:

- **Sistema X:** composto pelas quatro câmeras firewire (Figura 34a).
- **Sistema Y:** composto por duas câmeras firewire e as duas câmeras web (Figura 34b).

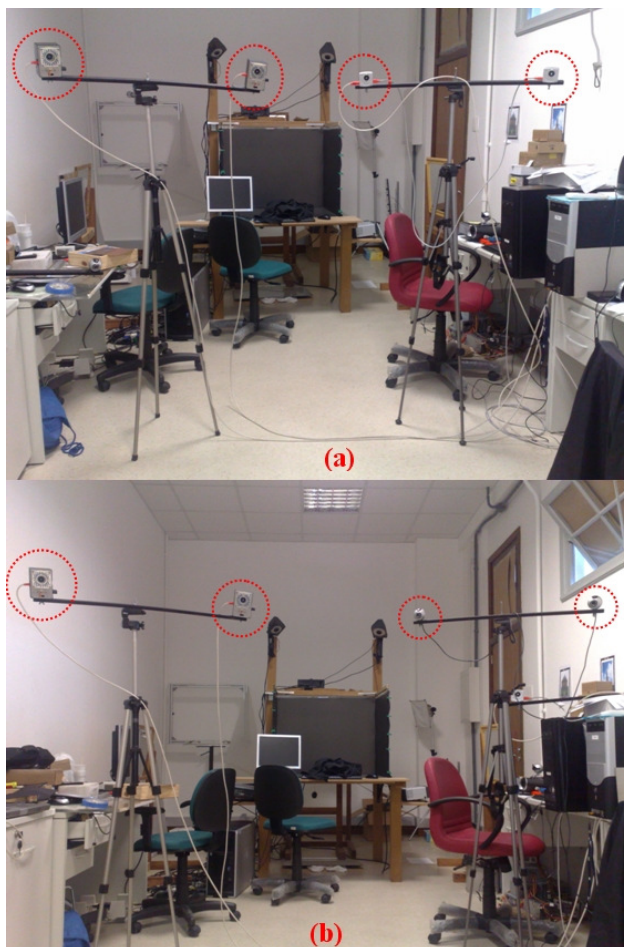


Figura 34: (a) Sistema X e (b) sistema Y de quatro câmeras.

Além das câmeras, foi necessário montar e construir nossos padrões invariantes formados por duas varas de madeira onde foram colocadas 4 lâmpadas pequenas alinhadas colinearmente (Figura 35). Também foi necessário criar um padrão planar, já mostrado na Figura 21, para a calibração fotogramétrica inicial de cada câmera.

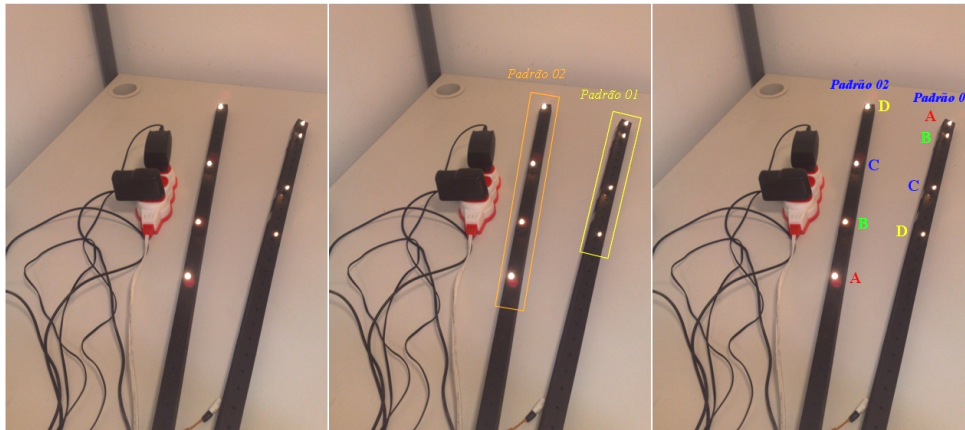


Figura 35: Dois padrões invariantes usados nos testes.

As distâncias a que foram colocadas as lâmpadas em cada padrão são:

- **Padrão 01:** AB (39.01 mm) , BC (140.196 mm), CD (99.156 mm).
- **Padrão 02:** AB (99.65 mm) , BC (139.505 mm), CD (180.565 mm).

Para executar os testes foi usado um computador composto por um processador Intel Core 2 Duo de 2.3Ghz, com 2GB de memória e foi necessária uma placa PCI de extensão de portas firewire para prover mais duas entradas firewire e assim poder conectar nossas quatro câmeras num só computador. Portanto, as câmeras foram conectadas ao computador por três saídas firewire, uma saída própria da placa mãe e duas fornecidas pela placa PCI de extensão utilizada. As duas saídas firewire da placa PCI foram conectadas individualmente a uma câmera Fire-i (Figura 32c), já a porta firewire da placa mãe serviu para conectar duas câmeras firewire em série (Figura 36). Isso foi possível porque esse modelo de câmera tem duas portas firewire que permitem sua conexão em série.

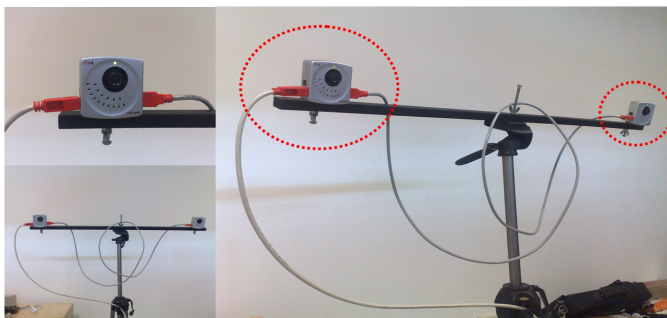


Figura 36: Duas câmeras firewire conectadas em série.

Porém, esse tipo de conexão em série não garante que as câmeras estejam sincronizadas por hardware nem software, tampouco a arquitetura usada para ligar as quatro câmeras a um só computador garante algum tipo de sincronismo.

Todo o processo de captura, processamento das imagens e execução do algoritmo de múltipla calibração de câmeras proposto neste trabalho foi feito num só computador, ressaltando principalmente que os processos de captura de vídeo e processamento das imagens vindas das quatro câmeras do sistema rodaram numa resolução de imagem de 640×480 pixels mantendo uma taxa de captura constante de ~30fps em todas as câmeras.

Na Figura 34, mostramos os dois sistemas de quatro câmeras utilizados, os quais enxergam uma área de rastreamento com as seguintes dimensões 2 m × 2 m × 1.8 m que é um volume padrão similar a outros testes realizados em trabalhos como [4][7][8][28][37] e [29].

5.2. Metodologia dos testes

O principal teste a ser realizado neste trabalho é aquele que consiste em calibrar cada sistema de quatro câmeras, e em seguida analisar qual é o grau de precisão que alcançamos após calibrados os sistemas usando o método de múltipla calibração de câmeras proposto nesta tese.

Com essa ideia de teste foi escolhida uma estratégia dividida em duas etapas:

- A primeira etapa consiste em calibrar cada sistema de câmeras usando uma amostra *A* de vistas capturadas com dois padrões invariantes criados para os testes. Com essa amostra inicial realizaremos o cálculo dos parâmetros das câmeras aplicando o método de múltipla calibração de câmeras proposto neste trabalho.
- A segunda etapa é na captura de uma segunda amostra *B*, muito mais numerosa e melhor distribuída que a amostra *A*, com a qual avaliaremos a precisão alcançada com os parâmetros da calibração realizada na primeira etapa.

Este tipo de estratégia de teste que usa duas amostras é adotado com o objetivo de medir de forma imparcial os resultados obtidos a partir da calibração feita com nosso método. Por esse motivo, os resultados para comparação só serão

conseguidos a partir de uma amostra diferente da utilizada na etapa de calibração das câmeras.

Uma vez feita a captura das nossas amostras para teste A e B , podemos continuar nossa metodologia de teste concentrando-nos agora em definir uma forma de provar que a característica de colinearidade que nosso método tenta explorar gera melhores resultados em comparação com o uso de outras características convencionais, comumente modeladas usando os diversos tipos de padrões de calibração descritos no capítulo 2.

Nós percebemos que cada método de múltipla calibração descrito no capítulo 3 possui uma relação direta entre as características implícitas do padrão de calibração utilizado e a definição da função de erro global usada pelo algoritmo de otimização. Como era de esperar, a função de erro global é composta por um conjunto de funções objetivo definidas exatamente com base nas características implícitas que o padrão de calibração usado oferece. Daí surge nossa ideia de comparação; nós modelaremos as mesmas funções de erro globais definidas pelos trabalhos descritos no capítulo 3 e faremos uma primeira calibração das câmeras usando apenas essa função de erro que chamaremos de *convencional*. Depois, aproveitando a característica de colinearidade de nossos padrões invariantes, faremos uma segunda calibração das câmeras modelando uma nova função de erro composta pela função de erro *convencional* e pelas funções de controle derivadas da característica de colinearidade do nosso padrão invariante. Ambas as calibrações serão feitas usando as mesmas informações fornecidas pela amostra de teste A .

Com essas duas calibrações realizadas, o próximo passo será testar a precisão dos parâmetros das câmeras que cada calibração gera quando testados sobre uma segunda amostra B , de vistas dos nossos padrões. Compararemos o erro médio obtido ao avaliar cada uma das funções de controle comumente usadas nas funções de erro *convencionais*, e mostraremos que a inclusão da característica de colinearidade permitiu obter parâmetros de calibração que geram melhores resultados que os alcançados usando só as funções objetivo *convencionais*.

Essa metodologia de teste permite criar um ambiente de teste geral onde poderemos simular, especialmente na etapa de otimização, os mesmos processos de calibração de câmeras realizados em outros métodos propostos no capítulo 3.

A seguir descreveremos os oito tipos de funções de erro que foram modeladas para a comparação:

- **Função de erro 1:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 2D-2D} + \mathcal{E}_{dist. 3D})$$

Esta função tenta simular o ambiente de calibração definido pelos métodos de Borghese et al. [4] , Kurillo et al. [14] e Uematsu et al. [37], onde todos os parâmetros das câmeras são otimizados usando as duas funções objetivo de reprojeção 2D-2D e da distância entre os marcadores esféricos montados nos extremos de uma vara usada no padrão unidimensional de calibração.

- **Função de erro 2:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 2D-2D} + \mathcal{E}_{dist. 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 2D})$$

É a nossa versão da função 1 inserindo as funções de controle derivadas da colinearidade do nosso padrão.

- **Função de erro 3:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 3D-2D} + \mathcal{E}_{dist. 3D})$$

Esta função tenta simular o ambiente de calibração definido pelo método descrito por Bouguet [5], onde todos os parâmetros das câmeras são otimizados tendo como referência as funções de reprojeção 3D-2D e as distâncias entre os marcadores definidos pelo padrão.

- **Função de erro 4:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 3D-2D} + \mathcal{E}_{dist. 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 2D})$$

É nossa versão da função 3 na qual são inseridas as funções de controle derivadas da colinearidade do nosso padrão.

- **Função de erro 5:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 3D-2D} + \mathcal{E}_{Reproj. 2D-2D} + \mathcal{E}_{dist. 3D})$$

Esta função tenta simular um ambiente de calibração onde todas as funções de controle como: reprojeção 3D-2D, reprojeção 2D-2D e

distância entre marcadores podem ser utilizadas, definindo uma função de erro global convencional robusta.

- **Função de erro 6:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 3D-2D} + \mathcal{E}_{Reproj. 2D-2D} + \mathcal{E}_{dist. 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 2D})$$

É a nossa versão da função 5, adicionando as funções de controle derivadas da colinearidade do nosso padrão.

- **Função de erro 7:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 3D-2D})$$

Esta função tenta simular o ambiente de calibração definido pelos métodos descritos por Svoboda et al. [32] e Pintaric et al. [28], onde só os parâmetros extrínsecos das câmeras são otimizados tendo como função de erro a função de reprojeção 3D-2D. Uma única função de controle é modelada como função de erro global devido às poucas informações fornecidas pelo tipo de padrão de calibração adimensional usada nesse método.

- **Função de erro 8:**

$$\mathcal{E}_{Global} = (\mathcal{E}_{Reproj. 3D-2D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 3D} + \mathcal{E}_{Colinearidade 2D})$$

É nossa versão da função 7, inserindo as funções de controle derivadas da colinearidade do nosso padrão.

Nas funções 1 – 6, serão comparados os erros obtidos em relação às funções de controle: reprojeção 3D-2D, reprojeção 2D-2D e distância entre marcadores, já entre as funções 7 – 8 só podem ser comparados os erros da função de reprojeção 3D-2D.

O número de vistas capturadas de nossos padrões invariantes para a amostra *A*, é de 250 vistas ($250 \times 4 = 1000$ pontos de referência) entre os três pares de câmeras que podem ser definidos em cada sistema de quatro câmeras. Para a amostra *B* usada para a comparação final dos resultados, foram capturadas 1000 vistas ($1000 \times 4 = 4000$ pontos de referência) tanto para o sistema **X** quanto para o sistema **Y**, compostos por quatro câmeras cada um, montados para nossos testes.

Na seção seguinte, serão apresentadas algumas tabelas mostrando os resultados obtidos com os valores dos parâmetros das câmeras após serem

calibrados com a amostra A , assim como o erro alcançado quando a amostra B foi analisada com esses parâmetros.

5.3. Descrição dos resultados

O primeiro resultado que desejamos expor são os valores dos identificadores dos padrões invariantes ($ProjInvID_i$) após treinados em cada uma das seis câmeras usadas em nossos testes. A tabela 1 mostra esses valores.

	Padrão 01	Padrão 02
Câmera 1 - Firewire	[2.0257, 2.0275]	[2.2137, 2.2204]
Câmera 2- Firewire	[2.0258, 2.0271]	[2.2131, 2.2197]
Câmera 3- Firewire	[2.0258, 2.027]	[2.2125, 2.2192]
Câmera 4- Firewire	[2.0265, 2.0272]	[2.2123, 2.2189]
Câmera 1 - USB	[2.0259, 2.0278]	[2.2159, 2.2222]
Câmera 2 - USB	[2.026, 2.0279]	[2.2153, 2.2217]

Tabela 1: Valores dos identificadores para cada padrão invariante usado nos testes.

Como podemos observar os valores de nossos identificadores $ProjInvID_i$ são definidos por intervalos nos quais a diferença entre o valor mínimo e máximo é ínfima. Porém, mesmo assim é importante que essa diferença seja levada em conta para conseguir uma correta identificação dos nossos padrões.

Conforme exposto na seção anterior, para testar se as funções de colinearidade definidas a partir do formato dos nossos padrões invariantes trazem algum tipo de contribuição ao cálculo dos parâmetros das câmeras, propomos testar nosso método de calibração usando oito possíveis funções de erro global modeladas com base em funções de controle *convencionais* nas quais foram inseridas as funções de controle derivadas da colinearidade de nossos padrões invariantes. Nós calibramos os dois sistemas de quatro câmeras X e Y com cada uma das oito funções de erro global previamente definidas usando uma amostra A de 250 vistas de nossos padrões colineares, que foi capturada independentemente em cada sistema de câmeras. Em seguida, com os valores dos parâmetros das câmeras obtidos com as calibrações realizadas em cada um dos sistemas, realizamos um teste para medir a precisão alcançada ao avaliar uma segunda amostra B de vistas dos nossos padrões invariantes. O teste de precisão consistiu em avaliar os erros médios obtidos nas funções de controle *convencionais* descritas na seção 2.1.3.1, que são:

- Erro médio da reprojeção 3D-2D avaliada para toda a amostra B de 1000 vistas dos nossos padrões invariantes. Cada vista contém 4

marcadores, isso representa a reconstrução 3D de $(1000 \times 4 =)$ 4000 marcadores que serão reprojados em cada plano da imagem tanto da câmera da esquerda como da câmera da direita, o que representa 8000 pontos analisados. Este erro é expresso em pixels.

- Erro médio da medição da distância 3D entre os marcadores do padrão colinear reconstruídos em 3D. Como temos 4 marcadores no padrão então há um total de três distâncias a serem medidas por padrão, que na amostra *B* representará um total de $(1000 \times 3 =)$ 3000 medidas de distâncias entre marcadores analisadas, este erro médio é expresso em milímetros.
- Erro médio da reprojeção 2D-2D definido como a distância de cada linha epipolar ao ponto correspondente. Como uma linha epipolar pode ser gerada para cada marcador presente na amostra *B*, então temos 4000 marcadores que geram 4000 linhas epipolares, mas isso só no sentido câmera da esquerda para câmera da direita. Adicionando os casos no sentido inverso temos um total de 8000 distâncias avaliadas. Este erro é expresso em pixels.

Nas tabelas 2 e 3 mostraremos o erro médio alcançado ao avaliar a amostra *B* de 1000 vistas de nossos padrões invariantes capturadas e analisadas em cada um de nossos sistemas de quatro câmeras *X* e *Y*:

Câmeras 1 e 2	Função 01	Função 02	Função 03	Função 04	Função 05	Função 06	Função 07	Função 08
Reprojeção 3D-2D (pixels)	0,403	0,391	0,444	0,422	0,402	0,391	0,369	0,371
Distância 3D (mm)	1,499	1,472	1,392	1,455	1,501	1,478		
Reprojeção 2D-2D (pixels)	0,806	0,781	0,889	0,844	0,805	0,782	0,738	0,7411
Câmeras 2 e 3								
Reprojeção 3D-2D (pixels)	0,426	0,422	0,439	0,4372	0,421	0,424	0,397	0,394
Distância 3D (mm)	1,691	1,664	1,719	1,713	1,677	1,666		
Reprojeção 2D-2D (pixels)	0,852	0,844	0,877	0,874	0,842	0,847	0,793	0,788
Câmeras 3 e 4								
Reprojeção 3D-2D (pixels)	0,133	0,132	0,182	0,177	0,128	0,127	0,14	0,135
Distância 3D (mm)	0,794	0,791	0,785	0,772	0,801	0,794		
Reprojeção 2D-2D (pixels)	0,267	0,264	0,364	0,355	0,256	0,254	0,28	0,27

Tabela 2: Resultados do erro médio medidos na amostra *B*, 1000 vistas, capturada para teste da calibração realizada do sistema *X* de quatro câmeras *firewire*.

Nas tabelas 2 e 3, os resultados da calibração realizada com as funções de erro *convencionais* (funções de número ímpar) são, na maioria das vezes, piores

em comparação com as obtidas pela calibração usando as funções modeladas com as funções de controle derivadas da colinearidade (funções de número par).

Câmeras 1 e 2	Função 01	Função 02	Função 03	Função 04	Função 05	Função 06	Função 07	Função 08
Reprojeção 3D-2D (pixels)	0,716	0,691	0,632	0,599	0,765	0,762	0,581	0,575
Distância 3D (mm)	1,914	1,694	1,262	1,174	2,164	2,162		
Reprojeção 2D-2D (pixels)	1,432	1,382	1,263	1,199	1,529	1,524	1,16	1,15
Câmeras 2 e 3								
Reprojeção 3D-2D (pixels)	1,5514	1,5506	1,556	1,559	1,557	1,556	1,552	1,551
Distância 3D (mm)	1,816	1,809	1,833	1,83	1,795	1,787		
Reprojeção 2D-2D (pixels)	3,099	3,098	3,111	3,114	3,112	3,109	3,098	3,097
Câmeras 3 e 4								
Reprojeção 3D-2D (pixels)	0,5195	0,5194	0,557	0,546	0,518	0,517	0,513	0,512
Distância 3D (mm)	1,095	1,093	1,115	1,068	1,116	1,092		
Reprojeção 2D-2D (pixels)	1,0389	1,0387	1,114	1,093	1,035	1,034	1,025	1,024

Tabela 3: Resultados do erro médio medidos na amostra B , 1000 vistas, capturada para teste da calibração realizada do sistema Y de quatro câmeras, duas firewire e duas usb.

Nas seguintes tabelas mostramos em resumo o ganho ou perda calculados percentualmente ao comparar os resultados mostrados nas tabelas 2 e 3.

Câmeras 1 e 2	Ganho % função 02 para 01	Ganho % função 04 para 03	Ganho % função 06 para 05	Ganho % função 08 para 07
Reprojeção 3D-2D (%)	2,98	4,95	2,74	-0,54
Distância 3D (%)	1,8	-4,53	1,53	
Reprojeção 2D-2D (%)	3,1	5,06	2,86	-0,42
Total acumulado (%)	7,88	5,48	7,13	-0,96
Câmeras 2 e 3				
Reprojeção 3D-2D (%)	0,92	0,41	-0,71	0,76
Distância 3D (%)	1,59	0,35	0,66	
Reprojeção 2D-2D (%)	0,94	0,34	-0,59	0,63
Total acumulado (%)	3,45	1,1	-0,64	1,39
Câmeras 3 e 4				
Reprojeção 3D-2D (%)	0,75	2,74	0,78	3,57
Distância 3D (%)	0,38	1,66	0,87	
Reprojeção 2D-2D (%)	1,12	2,47	0,78	3,57
Total acumulado (%)	2,25	6,87	2,43	7,14

Tabela 4: Ganho percentual ao analisar os resultados apresentados na tabela 1.

Nas tabelas 4 e 5, analisamos se a calibração realizada usando as funções de erro global que levaram em conta a colinearidade dos nosso padrões (funções pares) obtiveram menor erro médio em comparação com os resultados gerados pela calibração realizada com as funções de erro global *convencionais*. (funções ímpares). Quando a função par teve um menor erro nas funções objetivo analisadas, o ganho percentual é positivo, no caso de perda, ou seja, quando a função par não gerou ganho, o valor percentual é negativo.

Câmeras 1 e 2	Ganho % função 02 para 01	Ganho % função 04 para 03	Ganho % função 06 para 05	Ganho % função 08 para 07
Reprojeção 3D-2D (%)	3,49	5,19	0,39	1,03
Distância 3D (%)	11,49	6,97	0,09	
Reprojeção 2D-2D (%)	3,49	5,07	0,33	0,86
Total acumulado (%)	18,47	17,23	0,81	1,89
Câmeras 2 e 3				
Reprojeção 3D-2D (%)	0,05	-0,19	0,07	0,06
Distância 3D (%)	0,39	0,16	0,45	
Reprojeção 2D-2D (%)	0,03	-0,09	0,09	0,03
Total acumulado (%)	0,47	-0,12	0,61	0,09
Câmeras 3 e 4				
Reprojeção 3D-2D (%)	0,02	1,97	0,19	0,02
Distância 3D (%)	0,18	4,22	2,15	
Reprojeção 2D-2D (%)	0,02	1,89	0,09	0,09
Total acumulado (%)	0,22	8,08	2,43	0,11

Tabela 5: Ganho percentual ao analisar os resultados apresentados na tabela 2.

Como pode ser observado nas tabelas 4 e 5, na maioria das vezes conseguimos obter um erro médio menor gerado pelas funções pares em relação às ímpares. Tivemos casos em que conseguimos alcançar um ganho de 18%. Porém, o ganho percentual médio ficou em 3,9 %, o que representa uma melhoria dos resultados obtidos quando usados os parâmetros das câmeras obtidos da calibração com funções pares, que internamente levaram em conta as funções objetivo derivadas da colinearidade do nosso padrão. É importante ressaltar também que nosso método não é infalível e, como também se observa em nossas tabelas, houve alguns casos em que nossas funções pares não tiveram ganho. A perda no pior caso não nunca foi maior a 0,96%.

Com os resultados mostrados nas tabelas acima podemos afirmar que realmente a característica de colinearidade de nossos padrões ajudou a melhorar calibração dos parâmetros de nossas câmeras, provando a contribuição que nosso método propõe com o uso dos novos padrões invariantes.

Outra observação importante a ser feita é ressaltar qual foi o erro médio alcançado em relação à recuperação das distâncias 3D entre os marcadores de nossos padrões invariantes. Esse tipo de medida de erro é muito utilizada quando são comparados diversos sistemas de rastreamento óptico, nos quais quanto menor for o erro maior será a precisão alcançada no processo de reconstrução 3D da posição dos nossos marcadores. A precisão neste tipo de medida é tão importante, que nos sistemas comerciais não é admitido um erro maior do que 5 mm para áreas de rastreamento semelhantes às usadas em nossos testes (2 m × 2 m × 2 m). Como é de se esperar, uma reconstrução 3D com nível de precisão milimétrica,

está diretamente relacionada a uma calibração precisa dos parâmetros das nossas câmeras. Com base nos valores obtidos e mostrados para este tipo de erro em nossas tabelas 2 e 3, podemos afirmar que o maior erro obtido foi de 2,162 mm e o menor foi de 0,772mm. O erro médio geral analisando tanto os sistemas **X** e **Y** foi de $1.43 \pm 0,7\text{mm}$. Esse valor é muito menor que o máximo permitido de 5 mm.

A seguir mostraremos uma tabela de comparação da precisão do erro alcançado e descrito por outros métodos de calibração proposto em artigos acadêmicos, como os citados no capítulo 3 desta tese, assim como por especificações técnicas recolhidas de alguns produtos comerciais (Tabela 6).

Método apresentado por	Valor do erro médio em (mm)
Acadêmicos	
Borghese et al. [4] (2000)	2
Pintaric et al. [28] (2007)	5,3
Uematsu et al. [37] (2007)	2
Obtido com o método proposto neste trabalho	1,5
Produtos comerciais	
A.R.T. GmbH [1] (2009)	2
IOTracker [13] (2009)	5
VICON [39] (2009)	0,1

Tabela 6: Comparação valor do erro médio referente da medição da distância entre marcadores definidos em métodos acadêmicos e produtos comerciais.

A comparação acima pode ser um pouco superficial, devido aos diferentes equipamentos que podem ter sido utilizados para obter essas medidas. Porém, é importante ressaltar que em todos os trabalhos citados na tabela 6, os autores afirmam que usam hardware composto por câmeras de uso semi-industrial que permite usá-las junto a algum equipamento de sincronismo eletrônico que garante uma correta captura de imagens simultaneamente entre todas as câmeras. Segundo eles, isso ajuda a obter uma maior precisão na recuperação de medidas. Em nosso caso, é bom lembrar que nossos resultados foram obtidos usando câmeras sem sincronismo nenhum, e no caso das câmeras web utilizadas, elas estariam classificadas como câmeras de baixa qualidade, mas mesmo assim foi possível alcançar uma boa precisão milimétrica com as mesmas.

Finalmente, neste capítulo de resultados é importante ressaltar a importância e a contribuição do novo tipo de padrão de calibração usado como componente chave do método de múltipla calibração de câmeras descrito nesta tese. Este padrão de calibração trouxe robustez ao processo de aquisição de dados e nova

informação explorada pelo processo de otimização dos parâmetros das câmeras. A sua estrutura simples e compacta ofereceu novas vantagens em relação a outros padrões semelhantes, mas a técnica desenvolvida para sua correta e acertada identificação, validada em trabalhos acadêmicos como [15] e [33], faz dele uma opção mais robusta para a modelagem de um padrão de calibração. Algumas vantagens de nosso padrão invariante em relação aos padrões unidimensional e adimensional podem ser resumidas da seguinte forma:

- Maior número de marcadores por vista do padrão capturado, 4 pontos de referência em comparação com 2, no caso do padrão unidimensional, e 1, no caso do adimensional.
- Capacidade de usar mais de um padrão invariante simultaneamente para a captura de amostras de pontos referenciais.
- Maior robustez em relação à identificação grupal e individual dos padrões e os marcadores que o compõem, com base na técnica de reconhecimento desenvolvida para este tipo de padrão [15].

A principal desvantagem de nosso padrão invariante é derivada de problemas de oclusão, isso quer dizer que se algum marcador do padrão é ocluído, o resto dos marcadores não poderá ser identificado. Porém, esta desvantagem está presente também nos outros tipos de padrões: unidimensional e adimensional.

No capítulo seguinte, serão apresentadas nossas conclusões e propostas de trabalhos futuros.