

### 3 Trabalhos relacionados

Neste capítulo, serão apresentados e descritos alguns métodos propostos na última década para realizar a tarefa de múltipla calibração de câmeras. Esses métodos, que têm o objetivo de calcular tanto os parâmetros intrínsecos para cada câmera como a posição e a orientação delas no espaço de rastreamento, vêm aprimorando suas estratégias em duas frentes distintas:

- A primeira é a simplificação do processo de aquisição e captura dos pontos de referência, de tal forma que seja executado por um usuário qualquer. Como prova disso, podemos citar a evolução e a proposta, nos últimos anos, dos diferentes tipos de padrões descritos na seção 2.1.1.
- A segunda é a proposta de novos métodos que internamente misturam um método fotogramétrico e um de auto-calibração. Esses métodos considerados híbridos tentam aproveitar a robustez do cálculo dos métodos fotogramétricos e a flexibilidade dos de auto-calibração para calibrar sistemas compostos por múltiplas câmeras.

Dentre as diversas pesquisas relacionadas ao tema de múltipla calibração, escolhemos os seguintes trabalhos, que tipificam bem aspectos em comum que o processo de múltipla calibração de câmeras deve levar em conta, assim como as estratégias antes mencionadas:

- Calibração de câmeras em estéreo, apresentado por Bouguet [5] e Borghese et al. [4].
- Múltipla calibração de câmeras centralizada, apresentado por Uematsu et al. [37], Svoboda et al. [32] e Pintaric et al. [28].
- Múltipla calibração de câmeras descentralizada, apresentado por Kurillo et al. [14].

Considerando os trabalhos acima mencionados, podemos ressaltar que a proposta dos diferentes métodos de múltipla calibração começou com testes num sistema estéreo de câmeras. A partir desse sistema básico, deu-se início ao desenvolvimento de outro tipo de sistema mais complexo composto por mais de duas câmeras, mas com o mesmo problema: a calibração simultânea das mesmas.

Na seções seguintes, descreveremos alguns detalhes referentes aos trabalhos de Bouguet [5], Borghese et al. [4], Svoboda et al. [32] e Kurillo et al. [14], que inseriram inovações importantes na evolução dos métodos de múltipla calibração de câmeras. Os detalhes descritos servirão de guia para a posterior descrição das contribuições do método proposto neste trabalho.

### 3.1. Método proposto por Jean-Yves Bouguet

O método de calibração de câmeras em estéreo apresentado por Jean-Yves Bouguet [5] é um trabalho muito interessante porque serve como exemplo para entender e mostrar como o uso de um método de calibração individual pode ser estendido para um cenário onde são calibradas mais de uma câmera.

Este método contém os mesmos elementos usados numa calibração fotogramétrica, descrita na seção 2.2.1.3; porém, os resultados do processo da calibração inicial são correlacionados de tal forma que permitem posicionar as câmeras em relação a um mesmo ponto de referência, que é reconhecido como centro de coordenadas do mundo. Por causa dessa característica, pode-se dizer que o método dá suporte a um tipo de distribuição e posicionamento de câmera centralizado (Figura 15).

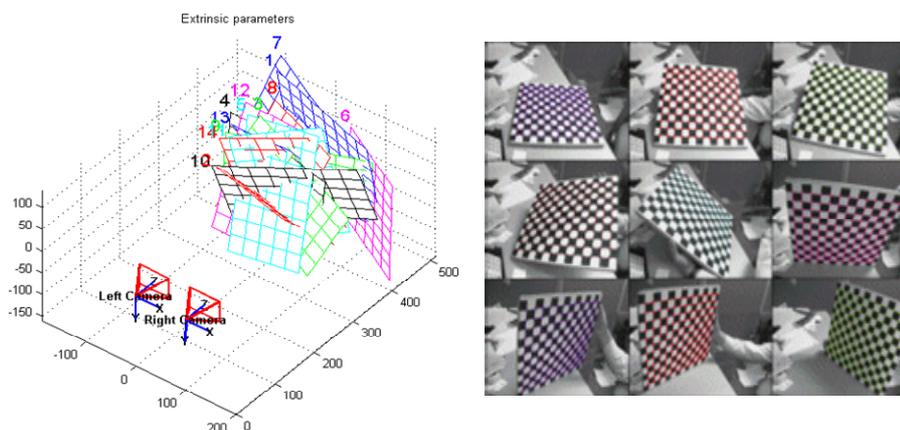


Figura 15: Calibração de um sistema estéreo de câmeras feita por Bouguet [5].

O modelo de calibração estéreo de câmeras apresentado por Jean-Yves Bouguet [5] será definido usando as etapas de nosso framework conceitual a seguir:

- **Aquisição de dados:** este método usa um único padrão de calibração que é o clássico padrão planar, semelhante a um tabuleiro de xadrez . Usando esse padrão, são capturadas simultaneamente  $n$

vistas corretamente identificadas. A amostra de  $n$  vistas fornecerá informações suficientes para realizar tanto a calibração inicial individual de cada câmera como a posterior otimização dessa calibração. Por causa das restrições derivadas da captura e reconhecimento desse tipo de padrão, o posicionamento das câmeras é restrito de tal forma que todas elas possam enxergar corretamente o padrão planar. Esse tipo de restrição no posicionamento comumente exige que as câmeras sejam posicionadas formando ângulos de  $\sim 135^\circ$  a  $180^\circ$  entre elas. Definimos  $\sim 135^\circ$  por causa da limitação que os padrões planares têm quando vistos em ângulos menores que  $45^\circ$  ( $180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$ ).

- **Calibração inicial:** este método realiza uma calibração fotogramétrica com o conjunto de vistas capturadas individualmente em cada câmera. Como resultado, temos uma solução inicial única para o valor dos parâmetros intrínsecos e o coeficientes de distorção da lente em cada câmera, e múltiplas soluções para os parâmetros extrínsecos, definidas para cada vista do padrão planar. Para relacionar as duas câmeras, deve-se posicionar uma em relação a outra, o que é representado pelo cálculo de uma matriz de rotação  $R$  e um vetor de translação  $T$  que leve o SCC à esquerda para ficar paralelo ao SCC à direita. Isso é possível compondo os parâmetros extrínsecos ( $R_l, T_l$  e  $R_r, T_r$ ) calculados nas duas câmeras em relação a uma mesma vista específica do padrão [17] (Equações 46 e 47). Dessa forma, ocorre também a calibração inicial dos parâmetros extrínsecos que relacionam nossas câmeras.

$$R = R_r R_l^T \quad (46)$$

$$T = T_r - RT_l \quad (47)$$

- **Otimização da calibração:** este método realiza duas otimizações. A primeira é feita com a amostra de calibração capturada individualmente em cada câmera, onde são aprimorados principalmente os valores dos parâmetros intrínsecos e os coeficientes de distorção da lente nas câmeras. A segunda etapa utiliza a mesma amostra de calibração, porém, usando-a em conjunto

para aprimorar os valores dos novos parâmetros extrínsecos definidos pelas equações 46 e 47. A função de erro usada para a otimização é baseada principalmente na reprojeção 3D-2D, descrita na seção 2.3.1.1.

A principal vantagem deste método é a robustez em relação ao cálculo dos parâmetros intrínsecos e dos coeficientes de distorção da lente. Este tipo de método também permite que câmeras cujos parâmetros são desconhecidos possam ser calibrados e usados pelo sistema.

As desvantagens podem ser resumidas como:

- Difícil captura de uma amostra de calibração usando um padrão planar, o que traz muitas complicações por causa das restrições de movimento.
- Precisa de um intervalo de tempo grande para poder capturar uma amostra válida para calibração.
- Apesar de ter muita informação implícita no formato do padrão, o método de otimização só modela a função de erro principal baseado na função que mede a reprojeção 2D dos pontos da amostragem para cada vista do padrão.
- A mais importante desvantagem é a dificuldade para estender este método para uso em sistemas de múltipla calibração, principalmente pelas restrições relacionadas às possíveis distribuições e posicionamentos das câmeras no espaço de rastreamento – derivadas das restrições de captura e reconhecimento do padrão planar usado pelo método.

### **3.2. Método proposto por Borghese**

O trabalho apresentado por Borghese et al. [4] é definido como um método de auto-calibração. Na época em que foi apresentado, mostrou-se como uma evolução no processo de calibração de sistemas estéreo de câmeras. As contribuições desse trabalho são a proposta de um novo tipo de padrão de calibração e a possibilidade de calcular tanto os parâmetros intrínsecos como os extrínsecos. Esse novo padrão usado é um tipo de padrão unidimensional, como o descrito na seção 2.1.3. (Figura 16), o que tornou o método muito atraente pela

facilidade de manipulação por parte do usuário na captura da amostra de calibração.

Este método foi também muito bem recebido pelas empresas comerciais que produzem soluções relacionadas a sistemas de rastreamento óptico, como A.R.T. GmbH[1] e VICON[39], que adotaram o método para realizar a calibração dos seus sistemas.



Figura 16: Padrões de calibração usados em [1][4][39]

Para descrever as suas principais características usaremos as etapas de nosso framework conceitual:

- **Aquisição de dados:** este método usa um padrão de unidimensional com o qual captura simultaneamente uma amostra grande de  $n$  vistas corretamente identificadas nas diferentes câmeras do sistema estéreo. Por causa do formato do padrão, foi necessário implementar algumas estratégias para evitar a captura de marcadores errados, como o uso de um algoritmo de predição para rastrear na imagem a movimentação dos marcadores e garantir a identificação individual deles nas diferentes imagens capturadas pelo sistema estéreo de câmeras. Uma outra restrição para garantir isso foi a necessidade de manter a vara com os marcadores paralela à vertical do SCI, a fim de evitar oclusão entre os marcadores.
- **Calibração inicial:** este método utiliza o mesmo processo do método de auto-calibração descrito na seção 2.2.2.4, porém, adiciona a característica de também recuperar uma estimativa inicial para

alguns parâmetros intrínsecos como:  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $u_0$ ,  $v_0$ ,  $s$  (Apêndice A). Para extrair esses valores, o método faz algumas suposições e restrições, como:  $u_0$  e  $v_0$  serão iguais à metade da dimensão da resolução da imagem capturada pela câmera,  $s = 0$ , só um valor para os componentes da distância focal  $f$  será extraído ( $f = f_x = f_y$ ) e se assume que a distorção da lente é desprezível e não é levada em conta.

- **Otimização da calibração:** este método realiza uma única otimização, que leva em conta todos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos e define a função de erro baseada nas funções de controle de reprojeção 2D-2D e distância 3D entre os pontos de referência reconstruídos a partir das imagens dos marcadores do padrão, semelhantes ao descrito nas seções 2.3.1.2 e 2.3.1.3. A novidade do método foi explorar as medidas de distância entre os marcadores como mais uma função de controle inserida no processo de otimização.

As principais vantagens que este método traz podem ser descritas como:

- A possibilidade de extrair tanto a distância focal como os parâmetros extrínsecos a partir da análise e decomposição da matriz fundamental.
- Proposta de uma nova forma de captura rápida, numerosa e simples de executar de uma amostra para calibração graças à simplicidade do padrão.
- Capacidade de estender este método para seu uso em sistemas de múltiplas câmeras, como o demonstrado na evolução e uso deste método em produtos comerciais como [1] e [39].

As principais desvantagens são:

- A simplicidade do padrão, que pode gerar fácil contaminação da amostra com falsos marcadores.
- Falta de robustez no cálculo dos parâmetros intrínsecos, o que pode provocar erros no processo de rastreamento.

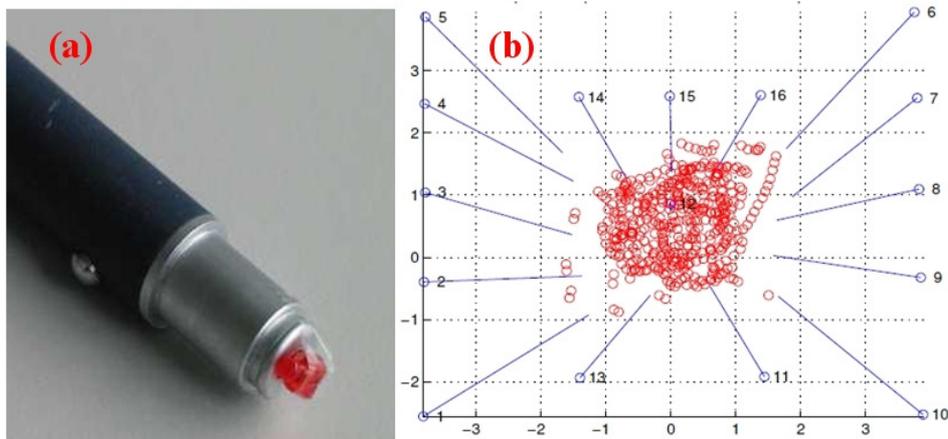
- Impossibilidade de usar câmeras com grau de distorção de lente alto porque o método não recupera os valores dos coeficientes de distorção da lente.

### 3.3. Método proposto por Svoboda

O trabalho apresentado por Svoboda et al. [32] também é definido como um método de auto-calibração, cuja característica mais ressaltante é o fato de ter sido desenhado para calibrar sistemas com mais de duas câmeras, saindo do convencional sistema estéreo de câmeras. Outra característica é a distribuição centralizada das câmeras, que deve ser garantida por causa de restrições impostas na concepção do método.

Uma das novidades que este método ofereceu foi proposta de um novo tipo de padrão de calibração, o que é definido como adimensional (seção 2.1.4). Esse novo padrão, assim como o padrão unidimensional, traz como característica muito atraente a facilidade de manipulação por parte do usuário na captura da amostra de calibração.

Este tipo de método foi também muito bem recebido pelas empresas comerciais que trabalham com soluções relacionadas a sistemas de rastreamento óptico, como IOTracker [13] e OptiTrack [26], que adotaram este método para calibrar seus sistemas.



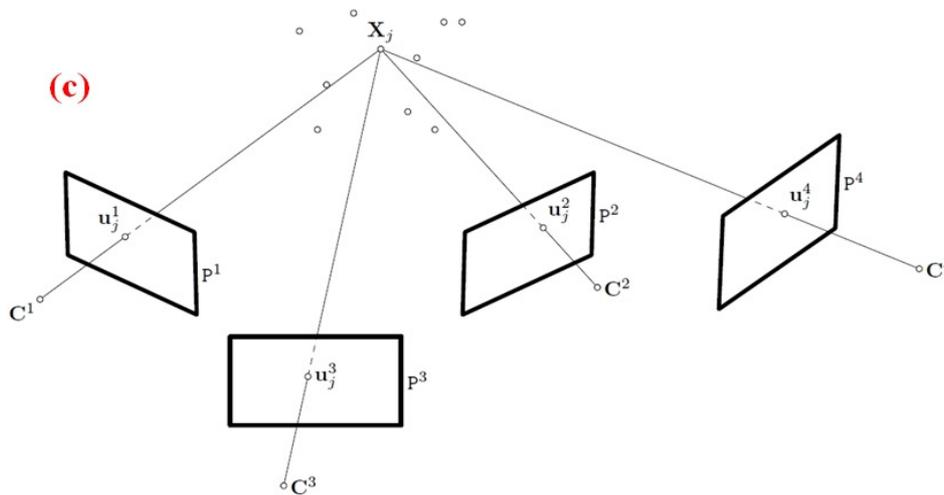


Figura 17: O ponteiro (a), distribuição de 16 câmeras (b) e esquema da múltipla calibração de câmeras definido por Svoboda et al.[32].

Seguindo as etapas de nosso framework conceitual, descreveremos a seguir as principais características deste método:

- **Aquisição de dados:** este método usa um padrão adimensional e captura simultaneamente uma amostra de  $n$  vistas do mesmo. Por causa do formato do padrão, foram implementadas algumas estratégias para a captura do mesmo, como: um algoritmo de predição para rastrear na imagem a movimentação do marcador e garantir a identificação individual nas imagens capturadas pelas múltiplas câmeras, e o cenário de captura teve que ser adaptado para ressaltar o padrão do resto de objetos.

- **Calibração inicial:** é proposto um novo método de calibração inicial baseado em dois conceitos chamados de “Rank – 4 factorization” e “Euclidean stratification”, mais detalhes dessas técnicas podem ser encontrados em [32]. Para calcular os coeficientes de distorção da lente, este método propõe o uso de algum método fotogramétrico, o que o caracteriza como um método híbrido. Algumas variações do método, como a apresentada por Pintaric et al.[28], adicionam a possibilidade de usá-lo ainda num sistema estéreo de câmeras, mas para conseguir isso, é necessário diminuir o número de parâmetros intrínsecos que serão recuperados, assumindo algumas restrições como:  $u_0$  e  $v_0$  serão iguais à metade da dimensão da resolução da imagem capturada pela câmera,  $s = 0$ , só um valor para os componentes da distância focal  $f$  será extraído ( $f = f_x = f_y$ ) e essa distância é assumida como igual para todas as câmeras.

• **Otimização da calibração:** este método realiza uma única otimização a que leva em conta todos os parâmetros intrínsecos e principalmente os extrínsecos. A função de erro é baseada na função de controle de reprojeção 3D-2D, devido às poucas informações que podem ser extraída do formato do padrão adimensional.

As principais vantagens que este método propõe podem ser descritas como:

- Propor um padrão de captura muito simples que permite uma captura numerosa de pontos de referência.
- Suportar sistemas de múltiplas câmeras formados por  $n \geq 3$  câmeras.

As principais desvantagens são descritas abaixo:

- Mais uma vez, a simplicidade do padrão pode gerar a fácil contaminação da amostra com falsos marcadores que podem ser considerados válidos.
- O cálculo dos parâmetros intrínsecos não é robusto, o que pode gerar erro no processo de rastreamento.
- Não é possível usar câmeras com grau de distorção de lente alto porque o método não recupera os valores dos coeficientes de distorção da lente.

### 3.4. Método proposto por Kurillo

O trabalho apresentado por Kurillo et al. [14] também é definido como um método híbrido, isto é, mistura o uso de um método de calibração fotogramétrica e um de auto-calibração para calcular os valores para dos parâmetros intrínsecos, extrínsecos e distorção da lente. A sua característica mais ressaltante é a possibilidade de calibrar de sistemas de câmeras descentralizados, nos quais a área de cobertura das câmeras deve ser maior. Esse tipo de sistema vem ganhando espaço nos últimos anos, especialmente em aplicações destinadas a segurança, robótica e captura de movimento.

Para descrever as suas principais características usaremos as etapas de nosso framework conceitual:

- **Aquisição de dados:** por ser um método híbrido, ele faz uso de dois tipos de padrão: o planar (calibração fotogramétrica) e unidimensional (auto-calibração).

- **Calibração inicial:** aplica-se o método de calibração fotogramétrica para a recuperação dos parâmetros intrínsecos e coeficientes de distorção das lentes como foi descrito na seção 2.2.1.4, a fim de recuperar os parâmetros extrínsecos, utiliza-se uma estratégia semelhante à descrita na seção 2.2.1.3
- **Otimização da calibração:** este método realiza uma otimização em duas partes. A primeira é feita com o objetivo de otimizar o valor de todos os parâmetros das câmeras usando uma função de erro global baseada nas funções de controle: reprojeção 2D-2D (seção 2.1.3.1.2) e distância 3D entre pontos de referência reconstruídos (seção 2.1.3.1.3). A segunda parte é baseada no uso da teoria de grafos; com o objetivo de encontrar a melhor correlação de duas a duas câmeras que permita relacionar todas as câmeras do sistema. Kurillo et al. [14] provaram que nem todas as calibrações de duas a duas câmeras entre todas as câmeras do sistema geram bons resultados, só aquelas que compartilham um campo de visão comum amplo.

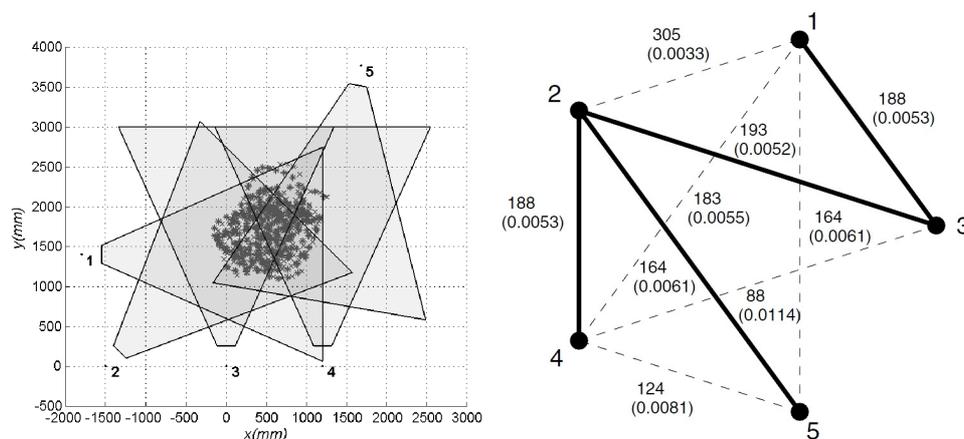


Figura 18: Análise da correlação de um sistema composto por cinco câmeras usando teoria de grafos definida em [14].

A maior contribuição do trabalho apresentado por Kurillo et al. [14] foi modelar a múltipla calibração de câmeras distribuídas em forma descentralizada como um problema da teoria de grafos (Figura 18), no qual as câmeras são os nós e as arestas definem a vizinhança de uma câmera em relação a outra. O objetivo ao analisar o grafo é encontrar quais arestas, que correlacionam duas câmeras, geram menor valor na função de erro global definida na primeira parte da etapa de otimização. Com o valor da função de erro define-se um peso para cada aresta do grafo, e o problema de escolher a melhor correlação de câmeras fica resumido a

encontrar o caminho com valor de erro menor que una todos os nós de nosso grafo. Esse caminho não precisa ser cíclico, só deve permitir que todos os nós estejam correlacionados. Maiores detalhes podem ser encontrados no artigo proposto por Kurillo et al. [14] .

A principal vantagem deste método é a capacidade de dar suporte à calibração de sistemas de múltiplas câmeras distribuídas em forma descentralizada, e as desvantagens que pode ter este método são poucas, especialmente por sua natureza híbrida, mas podemos citar problemas na captura da amostra de vistas do padrão unidimensional semelhantes às descritas no método proposto por Borghese et al. [4] na seção 3.2.

Neste capítulo, apresentamos a descrição de quatro métodos muito importantes na evolução da múltipla calibração de câmeras. Como podemos observar, as propostas de múltipla calibração começaram analisando sistemas estéreo de câmeras, e evoluíram até dar suporte a sistemas formados por múltiplas câmeras que podem ser posicionadas de tal forma que todas elas não enxerguem o mesmo campo de visão simultaneamente.

Uma observação importante a ser ressaltada é a tendência de os métodos serem concebidos cada vez mais como híbridos, isto é, misturar na etapa de calibração inicial o uso de um método fotogramétrico e um de auto-calibração para definir os diferentes parâmetros das câmeras. Essa tendência na concepção dos métodos parece prover flexibilidade e, ao mesmo tempo, robustez ao processo de calibração.

Finalmente, todos os métodos descritos neste capítulo compartilharam mais uma característica tecnológica: a sincronização eletrônica que existe entre todas as câmeras do sistema. Isso significa que as câmeras conseguem garantir que as imagens sejam capturadas exatamente no tempo “ $t$ ” em todas as câmeras. Segundo a bibliografia sobre o tema, essa característica ajuda a melhorar a precisão do sistema. Porém, mostraremos na implementação do método proposto nesta tese, que conseguimos resultados semelhantes aos descritos em especificações de sistemas comerciais, sem garantir uma sincronização muito precisa.

A seguir será descrita a concepção e a implementação do método de múltipla calibração de câmeras proposto nesta tese de doutorado.