

Um Sistema de Calibração de Câmera

Clarissa Codá Marques

Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, Dept. Name,
Rio de Janeiro, Brasil, 22460-320
clarissa@impa.br

e

Adelailson Peixoto

Universidade Federal de Alagoas, Departamento de Matemática,
Maceió, Brasil, 57072-970
adelailson@pos.mat.ufal.br

e

Luis Rivera

Universidade Estadual do Norte Fluminense, LCMAT-CCT,
Rio de Janeiro, Brasil, 28015-620
rivera@uenf.br

e

Luis Velho

Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, Dept. Name,
Rio de Janeiro, Brasil, 22460-320
lvelho@impa.br

Resumo

Um processo de calibração de câmera consiste no problema de determinar as características geométricas digitais e ópticas da câmera a partir de um conjunto de dados iniciais. Este problema pode ser dividido em três possíveis etapas: aquisição de dados iniciais, o processo de calibração em si e otimização. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de calibração baseada em uma arquitetura genérica para qualquer processo de calibração. Para este propósito, o sistema apresentado neste trabalho permite a personalização de cada etapa da calibração. A inclusão de novos métodos de calibração é realizada de forma dinâmica, permitindo assim maior integração e flexibilidade entre os módulos do sistema.

Keywords: Calibração de Câmera, Geometria Projetiva, Fotografia 3D.

Abstract

A camera calibration procedure corresponds to determine the digital geometric and optical characteristics of the camera from a known initial data set. This problem can be divided into three steps: a) acquisition of initial data; b) calibration process itself; and c) optimization. This work presents the development of a calibration tool based on a generic architecture for any calibration approach. For this aim, the presented system allows the personalization of each calibration step. In the proposed tool new calibration procedures are introduced dynamically, allowing a better integration between the modules of the system.

Palabras clave: Camera Calibration, Geometry Projective, 3D Photography.

1 Introdução

Os métodos de calibração de câmera consistem em determinar as características geométricas e ópticas internas da câmera assim como sua orientação e posição em relação a um certo sistema de coordenadas do mundo. Este processo geralmente é dado pela resolução de um problema de otimização não-linear supondo ser conhecido um conjunto de pares de pontos P_i no sistema de coordenadas da câmera e sua projeção p_i no sistema de coordenadas em pixels.

Existem diversos trabalhos e sistemas de calibração disponíveis que geram bons resultados para calibrações. Grande parte destes sistemas disponíveis realizam a calibração utilizando padrões e suas respectivas imagens, com os métodos usuais do Tsai e Zhang. Porém, nota-se a ausência de um sistema de calibração que permita calibrar vários equipamentos, com a possibilidade de utilizar métodos diferentes para cada um, e realizar uma análise comparativa entre os mesmos com o resultado de cada calibração. A não existência destes sistemas de calibração adaptativos deu o impulso inicial para a proposta de uma estrutura generalizada e realização deste trabalho.

2 Calibração de Câmera

A calibração de câmera consiste no processo de determinar dados geométricos digitais e ópticos da câmera, admitindo que sejam conhecidos pares de conjuntos de pontos bidimensionais em uma imagem e seus respectivos pontos tridimensionais. Estes dados podem ser classificados em dois grupos: extrínsecos e intrínsecos. Os parâmetros extrínsecos fornecem informações da posição e orientação da câmera em relação a um certo sistema de coordenadas global (ou do mundo). Os parâmetros intrínsecos nos dão características ópticas e geométricas internas da câmera, que correspondem a distância focal, fatores de escala, posição em pixels da projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção e as distorções proporcionadas pelas lentes.

Desta forma, fica evidente a necessidade de definir relações entre as coordenadas de pontos 3D com as coordenadas 2D de imagens dos mesmos. Existe uma transformação que relaciona estes pontos tridimensionais com os respectivos bidimensionais, exceto por distorções e erros mínimos. Equacionando estas relações com o uso de equações lineares na variável de posição de um objeto, os coeficientes destas equações serão exatamente funções dos dados que a calibração determina. O processo de calibração de câmera pode se resumir a encontrar tais valores a partir de um conjunto de pontos 3D e 2D correspondentes.

Podemos identificar 4 sistemas de coordenadas, de modo que a correspondência entre esses pontos possa ser expressa como uma composição de transformações que associe os pontos 3D aos 2D correspondentes. Os sistemas de coordenadas considerados são:

Sistema de Coordenadas do Mundo (SCM) trata-se de um sistema de coordenadas tridimensionais escolhidos de forma conveniente a definir as coordenadas de cada ponto da cena. As coordenadas de um ponto P_w neste sistema serão denotadas como (x_w, y_w, z_w) , como ilustra a figura 1.

Sistema de Coordenadas da Câmera (SCC) consiste em um sistema de coordenadas com origem no centro óptico da câmera. Os eixos x e y são escolhidos de forma que sejam paralelos ao plano da imagem, e o eixo z sendo o mesmo do eixo óptico. Denotaremos como f a distância entre a origem deste sistema, e o plano de projeção, usualmente denominada distância focal, e (x, y, z) como as coordenadas do ponto P neste sistema. Assim definindo, vemos que a equação do plano de projeção é dada por $z = f$.

Sistema de Coordenadas da Imagem (SCI) é um sistema de coordenadas bidimensional situado no plano de projeção. A origem deste sistema corresponde à projeção ortogonal do centro óptico no plano de projeção. Iremos denotar as coordenadas de um ponto neste referencial por (X, Y) . Denotaremos também (X_u, Y_u) como as coordenadas da imagem, quando usamos uma câmera do tipo pinhole, isto é, sem as distorções da lente, e (X_d, Y_d) como as coordenadas da imagem com as distorções existentes.

Sistema de Coordenadas em Pixels (SCP) também consiste de um sistema de coordenadas bidimensional. As coordenadas de um ponto da imagem neste sistema são expressas em pixel. Usualmente, toma-se como centro deste sistema o canto superior esquerdo da imagem. As coordenadas de um ponto neste referencial será denotada por (X_f, Y_f) .

A transformação que associa um ponto do sistema de coordenadas do mundo ao sistema de coordenadas em pixels pode ser representado fazendo uma composição das transformações descritas entre os sistemas de coordenadas citados acima. O resultado final obtido encontra-se abaixo:

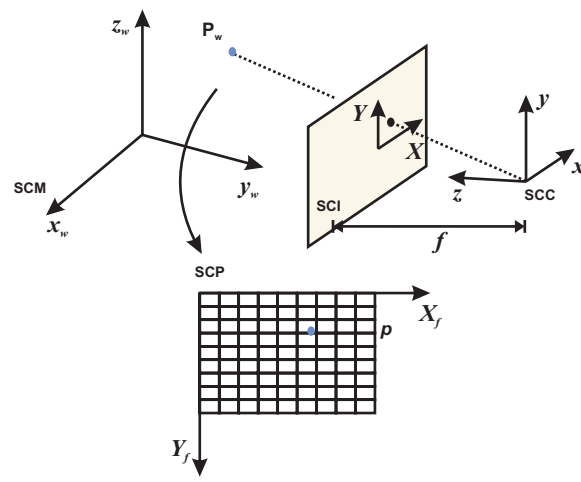


Figura 1: Sistemas de Coordenadas na calibração.

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} s_x & \tau & C_x \\ 0 & s_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix}$$

$$[p] \simeq \begin{bmatrix} fs_x & f\tau & C_x \\ 0 & fs_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \ T][P]. \quad (1)$$

A matriz $K = \begin{bmatrix} fs_x & f\tau & C_x \\ 0 & fs_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ é chamada de *matriz intrínseca de calibração* e agrupa todos os parâmetros intrínsecos da câmera. A equação 1 não é inversível. Ora,

$$\bar{p} = K^{-1}[p] \simeq [R \ T][P].$$

O ponto $\bar{p} = (\bar{x}, \bar{y}, 1)$ corresponde à imagem do ponto P tomando a matriz de calibração como a identidade. Os pontos que possuem p como projeção seriam da forma $\lambda(\bar{x}, \bar{y}, 1)$, onde $\lambda \in \mathbb{R}$. As coordenadas de \bar{p} são conhecidas como *coordenadas normalizadas do ponto p* da imagem.

De um modo geral o processo de calibração pode ser descrito da seguinte forma:

1. Determinar um conjunto de pontos no sistema de coordenadas do mundo e suas respectivas projeções nas imagens;
2. Resolver as equações lineares;
3. Otimizar os dados obtidos, utilizando o resultado da etapa anterior como solução inicial.

3 Arquitetura Proposta

Uma das dificuldades de se projetar um sistema genérico de calibração de câmera está na variedade dos dados de entrada que cada método requer, principalmente na especificação e na correspondência entre estes dados. Outro obstáculo reside na forma como estes dados são transformados durante o processo de calibração. Este capítulo apresenta a modelagem de um sistema genérico de calibração. Para tal é necessário analisar o problema de uma forma global e identificar quais etapas estão envolvidas num processo de calibração, identificando os elementos necessários em cada etapa.

3.1 Etapas Envolvidas

Um processo padrão de calibração de câmera, como vimos no capítulo anterior, pode ser estruturado da seguinte forma:

1. Aquisição dos dados (especificação e correspondência);
2. Calibração (resolução de equações lineares);
3. Otimização dos dados obtidos, utilizando o resultado da etapa anterior como solução inicial.

Pelas etapas acima, podemos dizer que a calibração de uma câmera se resume no processo de obter os seus parâmetros, a partir de um conjunto de dados iniciais, conforme mostra a figura 2.

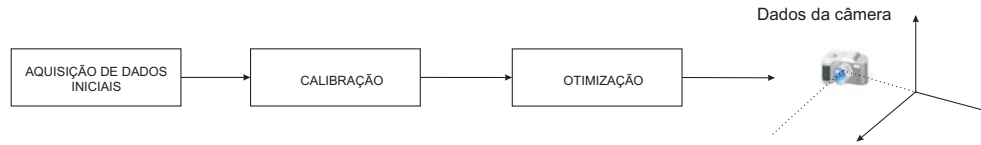


Figura 2: Etapas da Calibração de Câmera.

3.1.1 Etapa de Aquisição de Dados Iniciais

Esta etapa está altamente relacionada com a especificação do usuário, a partir da qual o conjunto de dados de entrada será definido. Esses dados, em geral, são composto por um conjunto de pares de pontos 2D e 3D.

Usualmente o conjunto de pontos 3D correspondem a pontos de um padrão de calibração. Diversos métodos utilizam padrões cujas coordenadas de seus pontos sejam relativamente fáceis de se calcular. São vários os padrões utilizados para calibração de câmera, por exemplo o padrão xadrez (3), o mais popularmente conhecido e utilizado, devido à simplicidade de obter as coordenadas de seus pontos. Outro exemplo clássico é o de retângulos encaixados [1], [2] que se interceptam como mostra a figura 4. A figura 5 mostra um padrão tridimensional.



Figura 3: Padrão Xadrez.

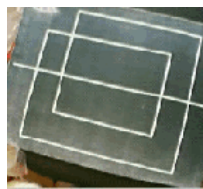


Figura 4: Retângulos Encaixados.



Figura 5: Padrão tridimensional.

O conjunto de pontos 2D é extraído de uma imagem do padrão adquirida pelo equipamento a ser calibrado. As imagens são utilizadas para fazer a correspondência entre os pares de pontos 2D e 3D, e dependendo do método podem ser utilizadas várias imagens tiradas de ângulos diferentes ou mesmo apenas uma. A partir do padrão e das imagens precisamos de algum método para obter a correspondência entre os pontos adquiridos que serão utilizados na calibração. Nesta etapa de aquisição de dados iniciais definimos os seguintes elementos:

- equipamento: corresponde ao equipamento que será calibrado (câmera ou projetor);
- padrão: corresponde ao padrão a partir do qual os pontos 3D serão obtidos;
- imagem: corresponde às imagens do padrão a partir das quais os pontos 2D serão obtidos;
- métodos de correspondência: indicam como os pontos 2D e 3D serão especificados e como eles se relacionam.

3.1.2 Etapa de Calibração

Dados um conjunto de pontos 2D e o correspondente conjunto de pontos 3D esta etapa tem como finalidade resolver um sistema de equações lineares que apontam uma solução inicial para os resultados intrínsecos e extrínsecos do equipamento a ser calibrado.

Existem várias heurísticas para resolver esta etapa, que define diferentes métodos como o Tsai, Zhang, etc. Assim o elemento a ser definido é o método de calibração.

3.1.3 Etapa de Otimização

Todos os elementos citados anteriormente possuem alta influência na precisão do resultado obtido pelo método de calibração. Isto implica que nem sempre os resultados são satisfatórios. Uma solução para este problema consiste em utilizar uma otimização para melhorar o resultado obtido. O método de otimização mais utilizado é o algoritmo de Levenberg-Marquardt [?], [?], que provê uma solução numérica para o problema de minimização de uma função, esta geralmente não linear. Com isto, definimos o último elemento que pode fazer parte de um sistema de calibração.

A figura 6 mostra as etapas de calibração detalhando os elementos envolvidos.

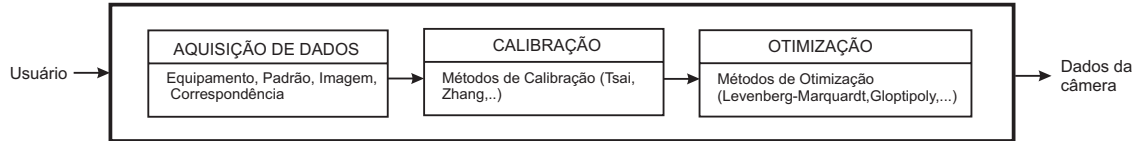


Figura 6: Processo de Calibração de Câmera.

3.2 Arquitetura

Para desenvolver um sistema adaptável a diferentes métodos de calibração, foi proposta uma arquitetura com todos os elementos possivelmente necessários a um pipeline padrão de calibração. A modelagem desta arquitetura encontra-se na figura 7.

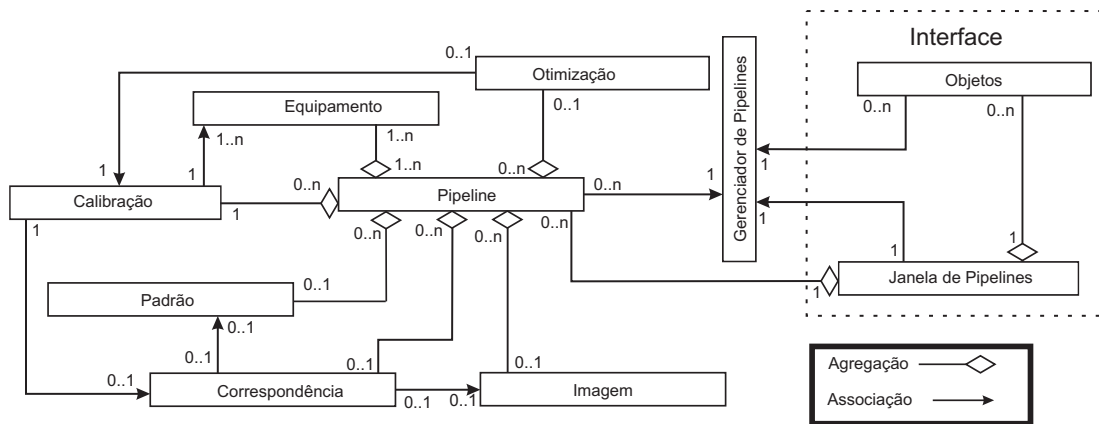


Figura 7: Modelagem do Sistema.

Cada elemento das etapas envolvidas corresponde a um módulo do sistema. Os relacionamentos envolvidos são basicamente de *associação*, que mostra o fluxo de dados entre os elementos, e *agregação*, que mostra a relação de pertinência entre os elementos.

O elemento *padrão* e o elemento *imagem*, por exemplo, estão associados ao elemento *correspondência*, uma vez que os métodos de correspondência utiliza os dados do padrão e da imagem para obter os pontos 2D e 3D. O elemento *correspondência*, por sua vez, fornece os pontos 2D e 3D ao elemento *calibração*. Todos estes elementos estão agregados ao elemento *pipeline*.

Portanto a relação entre o elemento pipeline e os elementos que determinam um pipeline, conforme figura 7, pode ser definido como uma relação de agregação, ou seja todos estes elementos fazem parte do elemento pipeline.

O Gerenciador de Pipelines têm como principal finalidade adicionar (ou editar) a um pipeline os elementos que serão agregados a ele. A interface gráfica do sistema pode ser definida a partir dos elementos *objeto* e *janela de pipelines*. O elemento *objeto* são retângulos que serão exibidos na janela de pipelines e representam quaisquer elementos (equipamento, padrão, imagem, etc.). O elemento *janela de pipelines* é a janela principal onde os pipelines serão exibidos.

3.3 Extensão da Arquitetura

A arquitetura proposta na seção anterior foi modelada para as etapas básicas de calibração. Atualmente, esta arquitetura foi estendida para integrar ao sistema pipelines mais complexos, onde talvez contenham operações que não sejam necessariamente de calibração. Esta nova modelagem permite então a execução de pipelines muito mais genéricos, com as mais diversas funcionalidades possíveis.

Para isto a arquitetura foi alterada de forma que cada elemento que compõe o pipeline seja uma subclasse da classe abstrata Objects. Para integrar os métodos correspondentes a cada objeto esta subclasse deverá ser implementada em uma biblioteca dinâmica, a qual deverá ser chamada ao pipeline ser executado.

A classe *Objetos*, já existente na arquitetura anterior foi modificada de forma que armazene todas as informações necessárias do objeto, ou seja as informações necessárias para executar o método, e os dados para a sua visualização na janela. Os dados necessários para a execução do objeto são por exemplo os tipos e dados de entrada e saída, e sua quantidade, e o diretório da dll correspondente. E os dados para sua visualização na janela corresponde as dimensões e posição do objeto na janela.

Conhecendo os tipos de dados de entrada e saída, o sistema poderá fazer restrições impossibilitando a conexão entre elementos com dados incompatíveis.

A figura 8 abaixo ilustra a nova arquitetura implementada.

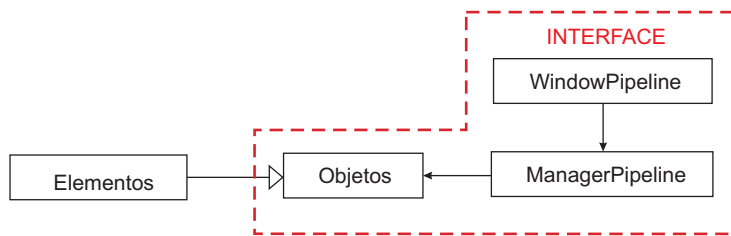


Figura 8: Arquitetura estendida.

Os *Elementos* correspondem aos novos objetos que serão integrados ao sistema. Como mostra a figura 8 todos esses objetos devem ser subclasses da classe mãe *Objetos*. A classe *ManagerPipeline* tem por finalidade administrar a inclusão, edição e exclusão de objetos no pipeline. Devido a isto ela se relaciona com a classe *WindowPipeline* que representa a janela de visualização dos pipelines. Para um processo usual de calibração, a arquitetura anterior pode se adaptar a esta como ilustra na figura 9 abaixo.

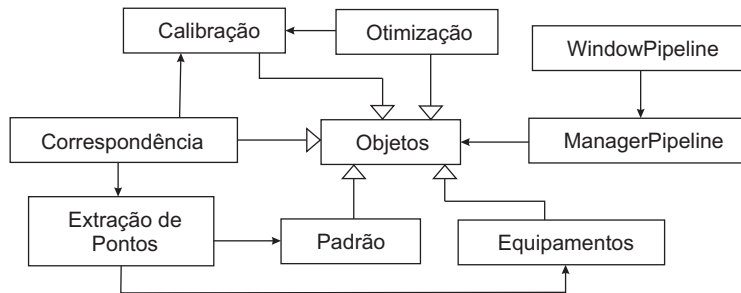


Figura 9: Arquitetura estendida para a calibração.

A classe *Imagem* existente na arquitetura deixou de existir e tornou-se um dado de entrada da classe

Equipamentos. A execução dos pipelines é realizada de forma sequencial, e implementada no formato “data-pull”. Isto é, os dados de entrada de um objeto são “solicitados” para o seu antecessor, e o objeto apenas será executado se tiver recebido todos os seus dados de entradas.

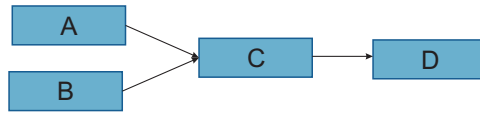


Figura 10: Processo Data-Push.

Ao executar o pipeline ilustrado na figura 10, o objeto D deverá pedir seus dados de entrada para o objeto C. Porém, o C só poderá ser executado com os dados de entrada recebidos do objeto A e B. Então, C deverá chamar o objeto A que por não ter anterior deverá ser executado e passará seu resultado ao objeto C. Em seguida, o mesmo acontecerá com o objeto B. Por não ter antecessor, deverá ser executado e retornará seu resultado para o objeto C. Como o objeto C já contém todos seus dados de entrada, poderá ser executado e por sua vez, dará os resultados para o objeto D que enfim será executado.

4 Resultados

Para a implementação desta ferramenta para a arquitetura básica, foram desenvolvidos dois módulos denominados EditCalib e ExecCalib. O módulo EditCalib é responsável pela edição dos pipelines de calibração. Este módulo permite a personalização de cada etapa do processo de calibração, com a possibilidade de incluir novos métodos de correspondência, calibração e otimização.

O módulo ExecCalib tem como funcionalidade executar os pipelines gerados no módulo anterior, com a possibilidade de alterar os dados de cada elemento do pipeline. As figuras 11 e 12 abaixo ilustram os dois módulos.

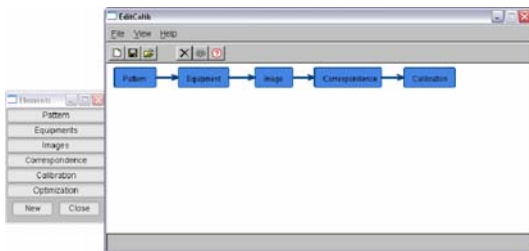


Figura 11: EditCalib.

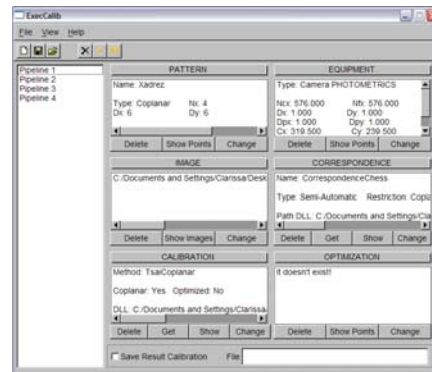


Figura 12: ExecCalib.

4.1 Arquitetura

A arquitetura básica proposta permite que quaisquer elementos sejam combinados em um pipeline e seu resultado seja os parâmetros extrínsecos e intrínsecos do equipamento calibrado. A coerência entre os elementos combinados deve ser mantida pelo usuário de forma que o resultado seja o esperado. Como exemplo podemos citar que um pipeline apenas composto por uma otimização e uma imagem não terá como resultado os parâmetros do equipamento calibrado.

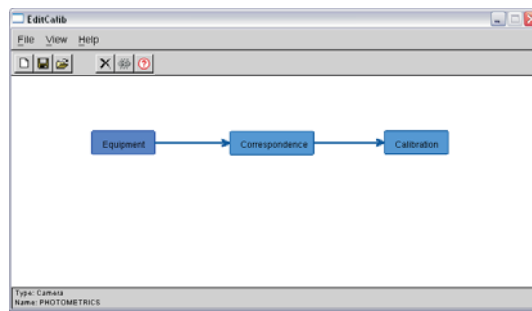


Figura 13: Calibração não-convençional.

O pipeline construído na figura 13 pode obter os resultados desejados, desde que ou o elemento de calibração ou o de correspondência tome seus dados de entrada em um arquivo. O método de calibração definido no pipeline acima é o Tsai Coplanar, que apenas precisa do conjunto de pares de pontos 2D e 3D, e algumas especificações do equipamento. Assim, a semântica do pipeline da figura 13 está correta.

É possível ainda a combinação entre elementos de pipelines diferentes. Neste caso, os pipelines antigos deverão ser reformulados de forma que a coerência nos mesmos permaneça. Para exemplificar considere os pipelines da figura 14. Este resultado da figura 14 é interpretado como os dois pipelines em destaque na figura 15.

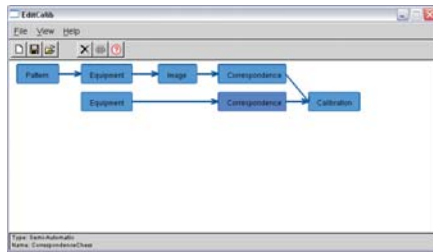


Figura 14: Combinação entre pipelines diferentes.

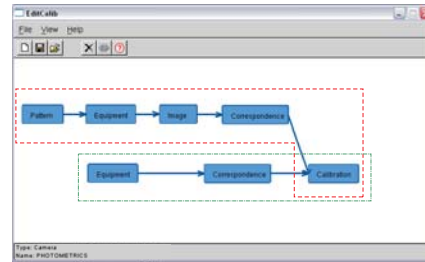


Figura 15: Novos pipelines.

Ao selecionar um elemento suas informações serão exibidas na barra da janela como mostra a figura 15.

4.2 Módulo EditCalib

O foco deste módulo consiste na personalização de cada elemento presente em um pipeline.

Inclusão de Elementos

A inclusão de novos padrões, equipamentos e imagens é feita naturalmente apenas informando dados necessários para a identificação dos mesmos. Porém, a integração de novos métodos de correspondência, calibração e otimização não ocorre de forma tão natural, visto que seria necessária a inclusão do código do método no sistema. Vimos que este problema foi solucionado com o uso de bibliotecas dinâmicas (dll's), visando proteger o sistema e torná-lo mais fácil e flexível para o usuário.

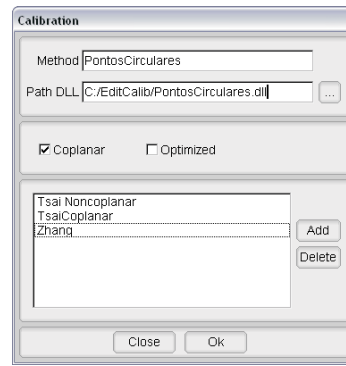
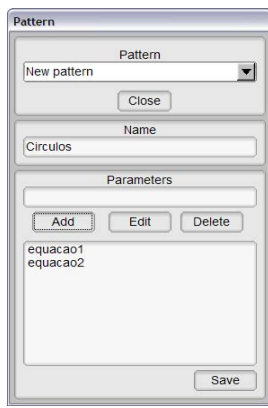


Figura 16: Inclusão de elementos estáticos. Figura 17: Inclusão de um novo método de calibração.

A figura 16 ilustra a inclusão de um novo tipo de padrão. Enquanto que a figura 17 ilustra a inclusão de um novo método de calibração.

Edição de Elementos

Outra funcionalidade disponível é a alteração de elementos contidos em um pipeline, e das relações entre os mesmos. Para alterar as informações de um elemento, basta dar um clique duplo sobre o elemento para que seja exibida a janela com as informações do mesmo. Após a alteração dos dados clica-se em salvar para confirmar as alterações realizadas. Um exemplo desta operação encontra-se na figura 18.

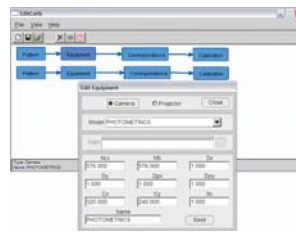


Figura 18: Alterar um elemento.

4.3 Módulo EditCalib

Um dos testes realizados no sistema foi a calibração de uma câmera Cyber-Shot modelo DSC-P93A, utilizando o método de Tsai-Coplanar e um padrão Xadrez construído no laboratório de Pós-graduação da Universidade Federal de Alagoas. As figuras 19 e 20 mostram a etapa do método de correspondência durante a execução da calibração no sistema.



Figura 19: Pontos selecionados pelo usuário.

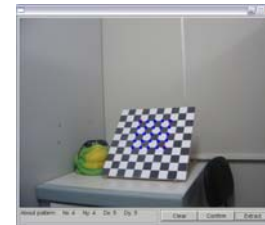


Figura 20: Pontos obtidos pela correspondência.

Com os pontos obtidos na correspondência, é realizado a calibração e seu resultado pode ser visto na figura 21.

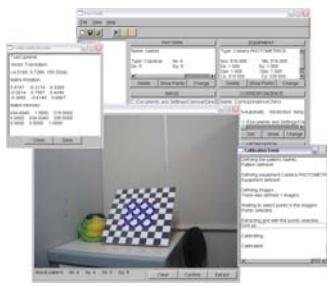


Figura 21: Calibração de uma câmera.

Também calibramos um projetor utilizando os dados da calibração da câmera citada acima. As imagens 22 e 23 abaixo ilustram a correspondência entre os pontos durante a calibração do projetor.

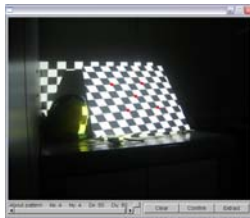


Figura 22: Pontos selecionados pelo usuário.

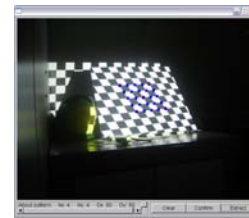


Figura 23: Pontos obtidos pela correspondência.

O resultado da calibração do projetor encontra-se na imagem 24 abaixo.

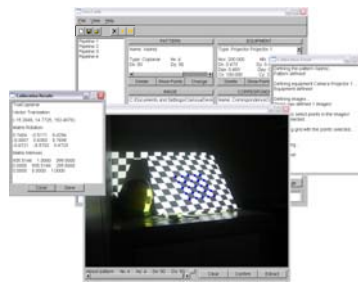


Figura 24: Calibração do projetor.

Para testar a escalabilidade da ferramenta, construímos pipelines não-usuais para um processo de calibração.

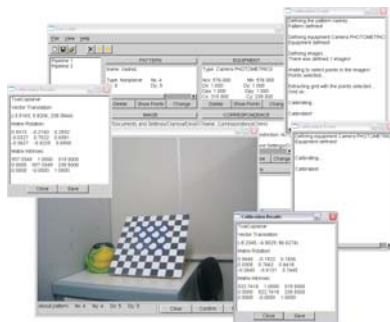


Figura 25: Execução de pipelines não-convencionais.

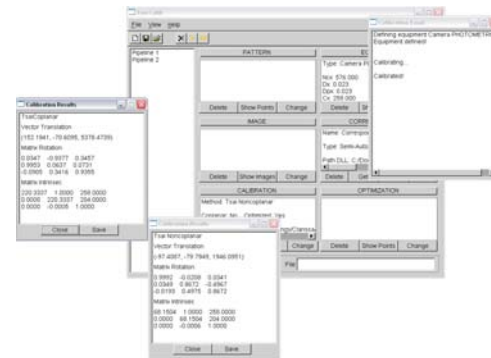


Figura 26: Execução de vários pipelines.

A figura 25 mostra testes realizados com combinações entre elementos de diferentes pipelines. A figura 26 mostra o resultado da execução de dois pipelines que tomam os dados de entrada da etapa de calibração em um arquivo. O método de calibração usado no pipeline 1 foi o Tsai Coplanar, e no pipeline 2 o Tsai Não-Coplanar.

4.4 Arquitetura Extendida

Modificamos o módulo EditCalib para que se torna-se responsável também pela execução dos pipelines, além da criação e edição dos mesmos. O método de incorporar novos objetos ao sistema é idêntica aos módulos implementados para a arquitetura básica. A cada subclasse a ser integrada ao sistema deve-se informar o nome e o diretório da dll em que foi implementada. A imagem ?? mostra a inserção de novos objetos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho propôs uma arquitetura genérica onde fosse possível implementar diversos métodos de calibração de câmera, criando assim a possibilidade de analisar e comparar os resultados de calibração dos diversos métodos.

O sistema desenvolvido teve como principal objetivo dar maior flexibilidade ao usuário para criar diferentes formas de calibração e assim analisar e comparar os resultados. Ele consiste em dois módulos para a edição e execução de pipelines de calibração na arquitetura básica.

A ferramenta EditCalib permite ao usuário a criação de diversos pipelines de calibração, cujos elementos podem ser totalmente personalizados para cada método. O módulo ExecCalib executa os pipelines através da leitura de arquivos dos mesmos, gerados pela ferramenta EditCalib. Ainda é possível realizar possíveis trocas de dados da calibração, antes de sua execução, agilizando o processo de testes com novas informações.

A adição de novos métodos de calibração, correspondência e otimização através de bibliotecas dinâmicas (Dynamically Linked Library) de suas subclasses tornou o sistema mais compacto, simples e flexível. A diversidade de elementos e de métodos que podem ser aplicados à ferramenta tornam o sistema mais versátil e útil para as aplicações que necessitem de calibração de seus equipamentos.

Como trabalhos futuros propostos para este trabalho podemos citar:

- Inclusão de novos métodos de calibração, como Zhang e método dos pontos circulares.
- Realização de testes comparando numericamente as matrizes dos diversos métodos de calibração.
- Inclusão de novos métodos de otimização, como o Gloptipoly, permitindo assim uma análise numérica e a comparação da convergência com outros métodos como o Levenberg-Marquardt.
- Implementar um ambiente 3D que simule a reconstrução dos equipamentos calibrados.
- Implementar testes de projeção dos pontos 3D do padrão virtual, utilizando uma câmera virtual com os mesmos dados da câmera real calibrada. Em seguida, comparar estas projeções com as fotografias originais dos padrões que foram tiradas com a câmera real.

Referências

- [1] SZENBERG, F. *Acompanhamento de Cenas com Calibração Automática de Câmeras*. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.
- [2] SZENBERG, F., CARVALHO, P., AND GATTASS, M. Automatic camera calibration for image sequences of a football match. *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Pattern Recognition* (2001), 301–311.