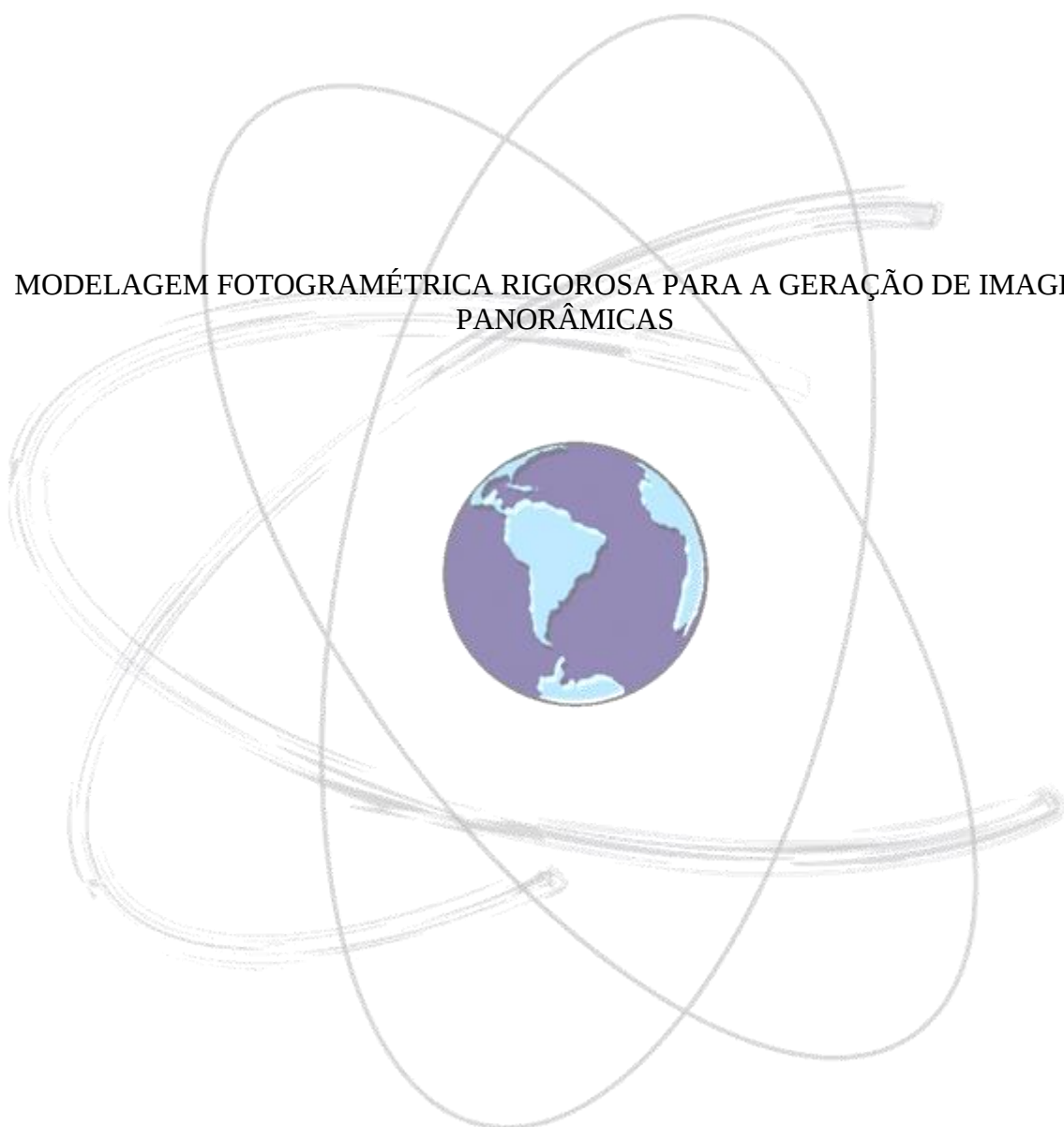




JOSÉ MARCELO PACHECO

MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA RIGOROSA PARA A GERAÇÃO DE IMAGENS
PANORÂMICAS





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Presidente Prudente

JOSÉ MARCELO PACHECO

MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA RIGOROSA PARA A GERAÇÃO DE IMAGENS
PANORÂMICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Presidente Prudente SP, para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

P116m	Pacheco, José Marcelo Modelagem fotogramétrica rigorosa para a geração de imagens panorâmicas / José Marcelo Pacheco. -- Presidente Prudente, 2024 88 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli 1. Imagens panorâmicas. 2. Calibração de sistema multicâmaras. 3. Mapeamento móvel terrestre. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto esperado na sociedade

Este projeto de mestrado visa a geração de imagens panorâmicas de um sistema terrestre de mapeamento móvel com múltiplas câmaras. O método estudado permite a melhoria na precisão dos produtos gerados, os quais podem ser aplicados no gerenciamento de rodovias, ferrovias, em cadastro urbano e em agricultura.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA RIGOROSA PARA A GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS

AUTOR: JOSÉ MARCELO PACHECO

ORIENTADOR: ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS (Participação Virtual)
Seção de Engenharia Cartográfica / Instituto Militar de Engenharia

Prof. Dr. MAURICIO GALO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 31 de março de 2023

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Começando pelo Professor Antonio Maria Garcia Tommaselli, agradeço pelos seus ensinamentos, orientação acadêmica, paciência, respeito e confiança. Seus conselhos foram inestimáveis. Sou profundamente grato por ter tido a oportunidade de trabalhar com uma pessoa tão experiente e dedicada, e por ter aprendido tanto com suas orientações ao longo do processo.

Também não posso deixar de agradecer aos professores do Departamento de Cartografia da UNESP de Presidente Prudente, em especial ao Mauricio Galo por suas valiosas contribuições ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos Thiago Tiedtke do Reis e Thaisa Aline Correia Garcia, agradeço por suas ideias e contribuições na coleta de dados, além de suas amizades que enriquecem minha vida pessoal. Sou grato por tê-los ao meu lado e por poder contar com a amizade e suporte durante todo o processo.

Aos amigos do Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), agradeço pelas ideias compartilhadas e pelas conversas e confraternizações que enriqueceram nossos trabalhos e nossas vidas pessoais e profissionais.

Também gostaria de agradecer à instituição UNESP pelo curso e à Sensormap pela disponibilidade dos dados e todo apoio durante a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Aos funcionários da UNESP de Presidente Prudente, minha gratidão pelas ajudas prestadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que financiou os equipamentos utilizados neste trabalho e ofereceu suporte ao projeto T-Map desenvolvido pela empresa Sensormap.

Resumo

As imagens panorâmicas são cada vez mais utilizadas em diversas áreas, como cadastro urbano, realidade virtual, exploração planetária e robótica. Para gerar essas imagens, existem diferentes sistemas de aquisição, sendo os sistemas com múltiplas câmaras capazes de fornecer imagens com maior resolução e qualidade em relação a outros sistemas omnidirecionais. Para gerar imagens panorâmicas, é possível utilizar a técnica de *stitching* ou modelos matemáticos mais complexos, como as equações de colinearidade. Enquanto a técnica de *stitching* é adequada para aplicações não métricas, em que a aparência da imagem é mais importante que a precisão geométrica, modelos matemáticos mais complexos e rigorosos proporcionam maior precisão. Neste trabalho, foi utilizada a modelagem rigorosa com a calibração por feixes de raios usando as equações de colinearidade. Um dos principais desafios ao utilizar esse modelo em sistemas com múltiplas câmaras é o deslocamento dos centros de projeção das imagens que compõem o panorama, o que pode afetar a precisão das medições nas imagens resultantes. Uma técnica comum para minimizar o erro de deslocamento dos centros de projeção é adotar um valor de raio para as superfícies de projeção do panorama (esfera ou cilindro), o mais próximo possível da distância para o objeto sendo capturado. A escolha do raio da esfera ou cilindro tem um impacto crucial na precisão das medições realizadas a partir dos panoramas gerados. Por esse motivo, este trabalho teve como objetivo aplicar o modelo rigoroso para a geração dos panoramas, a fim de garantir uma maior precisão das medições e desenvolver uma técnica que preserva os parâmetros de formação da imagem e do panorama, permitindo a aplicação de intersecções entre panoramas independentemente do raio escolhido para a geração dos panoramas. Os resultados do trabalho demonstraram a eficácia da técnica de modelagem fotogramétrica rigorosa na geração de imagens panorâmicas variando o raio.

Palavras-chave: Imagens panorâmicas, calibração de sistema multicâmaras, mapeamento móvel terrestre.

Abstract

Panoramic images are increasingly used in various fields, such as urban mapping, virtual reality, planetary exploration, and robotics. Different acquisition systems exist to generate these images, with multi-camera systems capable of providing higher resolution and quality compared to other omnidirectional systems. Techniques for generating panoramic images include stitching and more complex mathematical models, such as collinearity equations. While stitching is suitable for non-metric applications where image appearance is more important than geometric accuracy, more complex and rigorous mathematical models offer greater precision. In this work, rigorous modeling with self-calibration bundle adjustment using collinearity equations was employed. One of the main challenges when using this model in multi-camera systems is the displacement of the projection centers of the images composing the panorama, which can affect the accuracy of measurements in the resulting images. A common technique to minimize the error in the displacement of projection centers is to adopt a radius value for the panorama's projection surfaces (sphere or cylinder) as close as possible to the distance to the captured object. The choice of the sphere or cylinder radius has a crucial impact on the accuracy of measurements made from the generated panoramas. For this reason, this work aimed to apply the rigorous model for panorama generation to ensure greater measurement accuracy and to develop a technique that preserves image and panorama formation parameters, allowing the intersection from panoramas regardless of the chosen radius for panorama generation. The results of the study demonstrated the effectiveness of rigorous photogrammetric modeling in generating panoramic images while varying the radius.

Key word: Panoramic images, multi-camera system calibration, terrestrial mobile mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Câmara de varredura por rotação. (a) EYESCAN, SpheroCam (b) (Adaptado de (Parian; Gruen, 2004) e (c) câmara digital Kodak DCS 645M (Luhmann; Tecklenburg, 2004). _____	16
Figura 2 – RoboCup robô com um sistema catadióptrico. Adaptado de Maas (2008). _____	17
Figura 3 - Ricoh Theta S (a) câmara dupla, (b) vista superior, (c) conjunto de lentes e o caminho dos raios de luz para os sensores. Adaptado de Campos (2018). _____	18
Figura 4 – Ladybug5+ da empresa FLIR (Ladybug, 2022) e (b) Mosaic 51 da empresa Mosaic (Mosaic, 2022) _____	19
Figura 5 – Exemplo de registro de imagens usando correspondência de imagens. Adaptado de Wang e Yang (2020). _____	24
Figura 6 - Centros de projeção em uma câmara panorâmica real (a) e em uma câmara panorâmica ideal (b). Adaptado de (Kwiatk; Tokarczyk, 2015). _____	34
Figura 7 – Vista superior de um panorama. (a) Distância $OP = R$. (b) Erro de paralaxe quando $OP > R$. _____	35
Figura 8 - Seis imagens de cores primárias fundidas usando três técnicas comuns: (Superior) centro da imagem mais próxima, (Meio) média simples, (Inferior) <i>feathering</i> . Adaptado de Capel (2004). _____	37
Figura 9 – Alvo ARUCO presente no campo de calibração. _____	41
Figura 10 - Representação dos parâmetros e sistemas contidos no georreferenciamento direto (Rau <i>et al.</i> , 2016). _____	42
Figura 11 – (a) Posição das câmaras na plataforma do sistema T-Map. (b) Disposição das câmaras e do INS na montagem do sistema T-Map. _____	43
Figura 12– Alvos utilizados para realizar a calibração das câmaras - FCT/UNESP – Presidente Prudente – SP _____	45
Figura 13– Origem do sistema local de coordenadas do campo de calibração. _____	45
Figura 14 – Captura de uma estação com a câmara 1. _____	46
Figura 15 – Relação entre os pixels da imagem panorâmica e os ângulos no cilindro: w corresponde à largura da imagem e h à altura. _____	48
Figura 16– Sistemas de coordenadas da imagem (a) e do cilindro (b). _____	49
Figura 17 – Divisão das câmaras em relação ao ângulo do panorama (cilindro). _____	49
Figura 18 – Panorama em formação: (a) Vista isométrica, (b) vista superior. _____	52
Figura 19 - Cálculo dos utilizados para determinar o objeto identificado na interseção. _____	54

Figura 20 – Posição dos panoramas: (a) panorama da esquerda (i), (b) panorama da direita (j), (c) vista superior e (d) vista frontal. _____	56
Figura 21 – Valores mais acentuados das correlações entre focal e POE. _____	63
Figura 22 – Valores mais acentuados das correlações entre x_0 e OE. _____	64
Figura 23 – Valores mais acentuados das correlações entre y_0 e OE. _____	65
Figura 24 – Média dos desvios padrão, em metros, dos parâmetros de posição (X_0 , Y_0 e Z_0) e as média dos desvios padrão em graus decimais dos parâmetros de atitude (ω , ϕ e κ) calculados entre todos os pares de câmaras: (a) e (b) valores do par 1 e 2, (c) e (d) valores do par 1 e 3, (e) e (f) valores do par 1 e 4 e (g) e (h) valores do par 1 e 5. _____	66
Figura 25 – A esquerda, as imagens originais, a direita, as imagens projetadas em uma superfície cilíndrica. _____	69
Figura 26 – Panoramas gerados: (a) sem <i>feathering</i> , (b) com <i>feathering</i> . _____	70
Figura 27 – Exemplo de transição dos panoramas gerados. _____	71
Figura 28 – Alvos Aruco identificados em uma imagem panorâmica. _____	72
Figura 29 – Posição das estações em relação ao campo de calibração: (a) Vista superior e (b) vista isométrica do campo. _____	72
Figura 30 - Posição dos alvos Aruco no campo de calibração: (a) Vista frontal (b) vista isométrica e (c) vista superior. _____	73
Figura 31 - Exemplos de imagens panorâmicas geradas com o recurso de <i>feathering</i> . _____	84
Figura 32 – Exemplos de imagens panorâmicas geradas sem <i>feathering</i> . _____	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distância entre as câmaras e a câmara mestre (C1) e separação angular das câmaras em relação ao sistema Inercial. _____	44
Tabela 2– Características das câmaras utilizadas no T-Map da empresa Sensormap. _____	44
Tabela 3 – Coordenadas dos pontos utilizados para definir o sistema de coordenadas do espaço objeto. _____	46
Tabela 4 - Correspondência entre o ângulo (φ) e a respectiva câmara que será utilizada nos cálculos. _____	50
Tabela 5 - Dados do processo de calibração simultânea de 4 pares de câmaras. _____	57
Tabela 6 – Parâmetros de OI da C1 e C2 estimados no processo relativo entre elas. _____	58
Tabela 7 – Parâmetros de OI da C1 e C3 no processo relativo entre elas. _____	58
Tabela 8 – Parâmetros de OI da C1 e C4 no processo relativo entre elas. _____	59
Tabela 9 – Parâmetros de OI da C1 e C5 no processo relativo entre elas. _____	59
Tabela 10 – Parâmetros estimados para a câmara 1 em todas a calibrações. _____	59
Tabela 11 – Diferença dos desvios-padrão entre a média das calibrações e da calibração entre câmara 1 e câmara 3. _____	60
Tabela 12 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior C1. _____	61
Tabela 13 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C2. _____	61
Tabela 14 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C3. _____	61
Tabela 15 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C4. _____	62
Tabela 16 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C5. _____	62
Tabela 17 - Elementos de Orientação Relativa _____	67
Tabela 18 – Diferenças entre relativas distâncias entre os CPs da câmara mestre (C1) e das câmaras <i>Slave</i> e os valores obtidos durante a montagem pelo fabricante. _____	68
Tabela 19 – Valores utilizados para geração do panorama. _____	68
Tabela 20 – Média e RMSE dos erros de medidas das intersecções fotogramétricas. _____	73
Tabela 21 – Comparação das discrepâncias resultantes das intersecções com diferentes valores de raios (R) na geração dos panoramas. _____	74
Tabela 22 - Média das discrepâncias resultantes de todas as intersecções realizadas, com diferentes valores de raios (R) na geração dos panoramas. _____	75

Sumário

<u>1. INTRODUÇÃO.....</u>	<u>13</u>
1.1. OBJETIVOS.....	15
<u>2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA</u>	<u>15</u>
2.1. SENSORES.....	15
2.1.1. VARREDURA POR ROTAÇÃO	16
2.1.2. SISTEMA CATADIÓPTRICO	16
2.1.3. CAMARAS COM LENTE OLHO DE PEIXE	17
2.1.4. SISTEMAS COM MÚLTIPLAS CÂMARAS.....	18
2.2. CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS	19
2.2.1. CALIBRAÇÃO MULTICÂMARAS	22
2.3. GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS POR MEIO DO REGISTRO E FUSÃO	24
2.3.1. REGISTRO BASEADO EM REGIÕES	24
2.3.2. REGISTRO BASEADO EM ATRIBUTOS.....	25
2.3.3. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NO REGISTRO DE IMAGENS	28
2.4. GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS COM MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA	29
2.4.1. PROCESSO DIRETO E INDIRETO DE RETIFICAÇÃO DE IMAGENS	30
2.4.2. IMAGENS CAPTURADAS POR UMA ÚNICA CÂMARA	32
2.4.3. IMAGENS CAPTURADAS POR UM SISTEMA MULTICÂMARAS	32
2.4.4. A PARALAXE NA GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS	33
2.5. SUPERFÍCIES DE PROJEÇÃO	35
2.6. SUAVIZAÇÃO (<i>FEATHERING</i>) E MESCLAGEM (<i>BLENDING</i>).....	36
2.7. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA.....	37
2.8. ALVOS CODIFICADOS	40
2.9. GEORREFERENCIAMENTO DIRETO	41
<u>3. MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>43</u>
3.1 SISTEMA DE COLETA T-MAP.....	43
3.2 CAMPO DE CALIBRAÇÃO	44

3.3. COLETA DE DADOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO.....	46
3.4. GERAÇÃO DE IMAGEM PANORÂMICA EM PROJEÇÃO CILÍNDRICA	47
3.5. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA USANDO UM PAR DE PANORAMAS CILÍNDRICOS.....	52
<u>4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS</u>	<u>56</u>
4.1. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA MULTICÂMARAS	56
4.1.1. ORIENTAÇÃO INTERIOR.....	57
4.1.2. ORIENTAÇÃO EXTERIOR	65
4.2. GERAÇÃO DO PANORAMA.....	68
4.3. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA	71
4.3.1. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA UTILIZANDO OS PANORAMAS GERADOS	71
<u>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u>	<u>75</u>
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>77</u>
<u>APÊNDICE A</u>	<u>83</u>
A.1 PANORAMAS GERADOS	83
A.2 INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA - EXEMPLO NUMÉRICO.....	85

1. INTRODUÇÃO

Uma imagem panorâmica é uma representação visual de um amplo campo de visão, que abrange uma área maior do que a que seria possível capturar em uma única imagem convencional (Huang *et al.*, 2008). Para ser considerada uma imagem panorâmica ela deve abranger um campo de visão aproximado ou superior ao olho humano, ou seja, cerca de 160° por 75°. A palavra panorama é a combinação de dois termos Gregos, *pan* significa “todo” e *horama* “visão”. Um termo mais técnico, usado como sinônimo é "omnidirecional" (Benosman; Kang, 2001). Em uma única imagem panorâmica a impressão de imersão e a qualidade foto realista de um “mundo virtual” pode ser alcançada mais naturalmente em comparação com abordagens convencionais com campos de visão mais restritos.

Algumas aplicações para imagens panorâmicas são o cadastro urbano, realidade virtual, exploração extraplanetária, robótica dentre outras (Irani *et al.*, 1995; Kumar *et al.*, 1995; Shum; Szeliski, 2001).

As imagens panorâmicas podem ser coletadas por diversos sistemas de aquisição, tais como: sistemas catadióptricos, câmara com lentes olho de peixe (*fish-eye*), câmaras com varredura por rotação e sistemas com múltiplas câmaras (conjuntos de câmaras perpectivas com eixos ópticos divergentes). Nos sensores catóptricos a estrutura da câmara é complementada com espelhos (Richter *et al.*, 2013).

As câmaras com lente olho de peixe usam lentes com um ângulo de cobertura de aproximadamente 180°. Uma desvantagem desse tipo de sensor é a menor resolução da imagem nos extremos do campo de visão (Schneider *et al.*, 2009).

As câmaras com varredura por rotação também são utilizadas para fins fotogramétricos. O sensor é baseado em uma linha CCD (*Charge-Coupled Device*), que é montada em uma mesa giratória paralela ao eixo de rotação (Scheibe *et al.*, 2001).

Um sistema com múltiplas câmaras possibilita a aquisição de imagens com resolução maior que os sistemas descritos anteriormente, mantendo a qualidade geométrica e radiométrica. Entretanto, para a formação do panorama é necessário realizar o mosaico dessas imagens. O mosaico de imagens é a união de várias imagens em composições maiores que representam partes de uma cena 3D (Capel, 2004). No entanto, há uma diferença no ponto de vista em que as imagens são coletadas, causando a presença de paralaxe, o que pode gerar uma descontinuidade no mosaico realizado com as imagens, principalmente quando os objetos estão próximos à câmara. Ainda assim,

segundo Khoramshahi (2019), este modelo garante precisões geométricas desejáveis para muitas tarefas, como mapeamento e levantamento 3D, visualização 3D e texturização.

Os sistemas de aquisição de imagens panorâmicas podem ser embarcados em diferentes plataformas, estáticas ou em movimento. Um sistema com múltiplas câmaras tem potencial para ser empregado em aplicações que precisam de taxas rápidas de captura de dados, como mapeamento móvel. A plataforma de aquisição selecionada para este trabalho é um veículo, tendo, como consequência, a impossibilidade de usar as câmaras com varredura por rotação. Como o objetivo é ter uma maior resolução possível, o sistema de múltiplas câmaras foi escolhido para o presente trabalho, devido ao fato de se obter imagens com maior resolução e melhor qualidade, comparado aos sistemas com câmaras olho de peixe e catadióptrico.

De acordo com Khoramshahi (2019) um aspecto importante no emprego de um sistema de multicâmaras para plataformas em movimento, está relacionado ao problema do georreferenciamento direto. A determinação precisa da orientação e posição de cada panorama é exigida para cálculos de coordenadas de pontos no espaço objeto. A orientação exterior pode ser determinada por técnicas indiretas ou diretas, ou combinando ambas. O georreferenciamento direto é o processo para encontrar a posição e orientação (Parâmetros de Orientação Exterior - POEs) das imagens capturadas, em um referencial global, sem empregar nenhum ponto de controle, o que requer a integração de sensores adicionais, como receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e sensores IMU (*Inertial Measurement Unit*).

Para se obter uma imagem panorâmica com um sistema multicâmaras são adquiridas várias imagens, logo é necessária a aplicação de processos que realizem a junção das imagens, possibilitando apresentar toda a área de interesse em uma única imagem. Na literatura, esse processo é denominado de mosaicagem de imagens (Wang; Yang, 2020). Para realizar a junção das imagens é necessária a existência de sobreposição entre elas. Segundo Capel (2004) existem muitas técnicas para a construção de um mosaico de imagens, sendo que os passos básicos são: registro, reprojeção, costura (*stitching*) e a fusão (*blending*). Para Wang e Yang (2020), os principais passos para o processo de geração do mosaico de imagens são: correspondência de imagens (*image matching*), registro e a fusão. Para realizar o processo de registro das imagens pode-se usar transformações no espaço 2D, como por exemplo, a transformação projetiva, transformação afim, ou então, adotar modelos matemáticos mais complexos, como por exemplo, as equações de colinearidade com a prévia correção de erros sistemáticos envolvidos na formação das imagens (Rau *et al.*, 2016). Este modelo matemático mais complexo é conhecido como um modelo rigoroso, uma vez que a formação

da imagem é descrita em função dos parâmetros físicos envolvidos no processo da geração desta imagem.

Panoramas gerados com a técnica de *stitching* são usados principalmente para aplicações não métricas onde a aparência da imagem panorâmica é mais importante que a precisão geométrica, portanto, essa classe está fora do foco de uma categorização de métrica (Khoramshahi *et al.*, 2019).

1.1. OBJETIVOS

Este projeto de mestrado visa estudar, implementar e testar uma técnica de geração de panoramas que utiliza a projeção de imagens a partir de parâmetros de montagem e orientação interior rigorosamente calibrados, sem recorrer a métodos de *stitching*, os quais utilizam transformação por homografia planar. Os objetivos específicos são:

- Calibrar as câmaras com métodos rigorosos de fotogrametria.
- Implementar a geração de panoramas projetando as imagens em um cilindro "virtual", preservando a geometria de projeção do espaço imagem para o espaço objeto.
- Realizar intersecções fotogramétricas e avaliar experimentalmente a acurácia do método utilizado na geração de imagens panorâmicas.
- Avaliar o efeito de variação do raio de projeção do cilindro ou esfera para geração das imagens panorâmicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1. SENSORES

Os sensores de aquisição de imagens panorâmicas têm como objetivo capturar imagens que abrangem um amplo campo de visão, permitindo que o usuário obtenha uma visão completa e contínua de uma cena ou objeto de interesse. Existem vários tipos de sensores de aquisição de imagens panorâmicas disponíveis, cada um com suas próprias características e vantagens. Alguns dos sistemas mais comuns incluem sistemas com varredura por rotação, sistemas catadióptricos câmaras com lentes olho de peixe e sistemas com múltiplas câmaras. A escolha do sistema de aquisição de imagens panorâmicas mais adequado dependerá da aplicação específica, das restrições orçamentárias e técnicas envolvidas

2.1.1. VARREDURA POR ROTAÇÃO

A câmara de varredura por rotação baseia-se em um sensor de imageamento linear, que é montado em uma plataforma giratória perpendicular ao eixo de rotação. O sensor linear captura as imagens com um conjunto de linhas de varreduras verticais. A Figura 1 mostra dois exemplos de câmaras de varredura por rotação.



(a)



(b)



(c)

Figura 1 – Câmera de varredura por rotação. (a) EYESCAN, SpheroCam (b) (Adaptado de (Parian; Gruen, 2004) e (c) câmara digital Kodak DCS 645M (Luhmann; Tecklenburg, 2004).

As câmaras de varredura por rotação foram utilizadas em diversas aplicações fotogramétricas (Luhmann; Tecklenburg, 2004; Parian; Gruen, 2004, 2006). Para o recobrimento de uma cena em 360° é necessário capturar imagens em diferentes instantes limitando a utilização dessas câmaras apenas para o modo estático.

2.1.2. SISTEMA CATADIÓPTRICO

Os sistemas catadióptricos usam combinações de lentes e espelhos organizados para capturar imagens panorâmicas. Um aspecto importante do projeto de sistema catadióptricos é escolher as formas dos espelhos de forma a garantir que o sistema catadióptrico tenha um ponto de vista único (Baker; Nayar, 1999).

Uma vantagem do sistema catadióptrico é o fato de que a aquisição da imagem panorâmica é instantânea. O principal problema destes sistemas é que os detalhes da imagem podem ter uma resolução relativamente baixa. O problema de resolução é agravado por espelhos cujas formas têm

seções transversais curvas, como por exemplo, os espelhos elípticos, hiperbólicos e parabólicos de superfície quádrlica, para atingir a propriedade de ter um único ponto de vista (Spacek, 2003). Um sistema catadióptrico para uso na robótica pode ser visto na Figura 2.

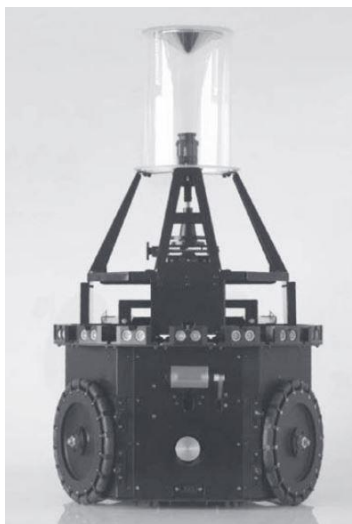


Figura 2 –RoboCup robô com um sistema catadióptrico. Adaptado de Maas (2008).

2.1.3. CAMARAS COM LENTE OLHO DE PEIXE

As lentes olho de peixe possuem uma distância focal extremamente curta em relação as lentes convencionais e um campo de visão muito amplo. Imagens tiradas com uma lente olho de peixe permitem um campo de visão de 180° ou maior. A geometria desta lente não pode ser descrita com a geometria de projeção de perspectiva, logo, é necessário aplicar um modelo geométrico específico para o uso destas imagens em aplicações fotogramétricas. Uma das desvantagens destas câmaras é a menor resolução nos extremos da imagem em relação ao centro. Outra peculiaridade é a forte aberração cromática, que tem um efeito negativo na qualidade da imagem (Schneider *et al.*, 2009).

A Figura 3 mostra a câmara Ricoh Theta S, um exemplo de câmara com lente olho de peixe. É um sistema composto por duas câmaras com lentes olho de peixe, dispostas de modo que permita uma cobertura de 360° (Campos *et al.*, 2018).

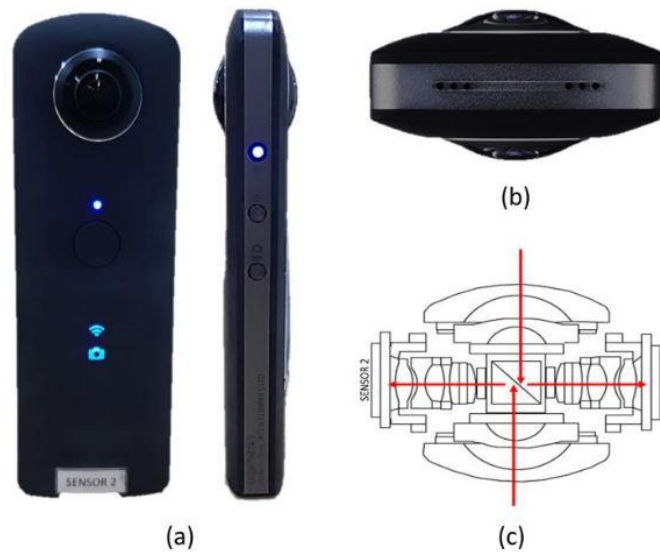


Figura 3 - Ricoh Theta S (a) câmara dupla, (b) vista superior, (c) conjunto de lentes e o caminho dos raios de luz para os sensores. Adaptado de Campos (2018).

2.1.4. SISTEMAS COM MÚLTIPLAS CÂMARAS

Os sistemas com múltiplas câmaras consistem em montagens com várias câmaras dispostas de forma a cobrir um campo de visão completo de 360°. Uma imagem esférica, cobrindo todo o campo de 360°, pode, por exemplo, ser obtida por uma configuração de duas câmaras olho de peixe, como mostrado na seção 2.1.3. Usando câmaras e lentes perspectivas (*pin hole*), a cobertura do campo de visão de 360° requer um número maior de câmaras (Maas, 2008). Uma vantagem desse tipo de sistema é a possibilidade de obter imagens panorâmicas com uma maior resolução em comparação com os demais sistemas. No entanto, é praticamente impossível obter um ponto de vista efetivo único, logo a presença de paralaxe é inevitável, gerando descontinuidade na sobreposição das imagens quando o panorama é gerado. A Figura 4 ilustra dois sistemas com múltiplas câmaras.



(a)



(b)

Figura 4 – Ladybug5+ da empresa FLIR (Ladybug, 2022) e (b) Mosaic 51 da empresa Mosaic (Mosaic, 2022)

2.2. CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

A calibração de câmaras é um procedimento para determinação de um conjunto de parâmetros referentes à geometria interna da câmara (Parâmetros de Orientação Interior - POI), que permitem a reconstrução do feixe perspectivo que originou a imagem (Galo, 1993). Para câmaras digitais, geralmente, os POI considerados são a distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e coeficientes de distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3) e descentrada (P_1, P_2).

Há vários métodos de calibração de câmaras descritos na literatura, tais como: métodos de laboratório (Multicolimador e do Goniômetro) (Andrade, 1998; Clarke; Fryer, 1998; Cramer, 2009; Mikhail *et al.*, 2001), métodos de campo (métodos dos campos mistos e das câmaras convergentes) (Andrade, 1998). Os métodos de campo são os mais usados em Fotogrametria, já que permitem minimizar a correlação entre parâmetros de orientação interior e a posição do centro perspectivo, além de permitir a calibração nas mesmas condições de operação do sistema.

O modelo matemático fundamental da Fotogrametria é baseado nas equações de colinearidade. Esse modelo tem o objetivo de relacionar as coordenadas do ponto no espaço imagem e objeto baseando-se na condição de colinearidade (Lugnani, 1987). Na sua forma direta das equações, o ponto no espaço a imagem é obtido a partir do seu correspondente no espaço objeto:

$$\begin{aligned}
 x &= -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
 y &= -f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Nas quais

r_{ij} , são os elementos da matriz de rotação R em função dos ângulos de rotação ω , φ , κ , os quais estão relacionados aos eixos x , y , z , respectivamente;

x e y correspondem às coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico, cuja origem é o centro perspectivo;

f é a distância focal calibrada da câmara;

X , Y , Z refere-se as coordenadas do ponto no sistema de coordenadas do espaço objeto;

X_0 , Y_0 , Z_0 são as coordenadas do centro perspectivo, no sistema de coordenadas do espaço objeto.

A matriz R pode ser representada pela Equação 2.2 considerando os ângulos de rotação ω , φ , κ , nesta mesma sequência:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}.
 \tag{2.2}$$

Assumindo-se conhecidos os POIs, o modelo matemático da Equação 2.1 possui 6 parâmetros incógnitos (ω , φ , κ , X_0 , Y_0 , Z_0), os quais são denominados de Parâmetros de Orientação Exterior (POE) e estão relacionados à posição e orientação da câmara no momento de tomada das imagens. No processo de calibração, podem ser incluídos como parâmetros incógnitos, os POIs: a distância focal da câmara, as coordenadas do ponto principal e os coeficientes de distorção das lentes.

Os modelos matemáticos de correção dos erros sistemáticos foram desenvolvidos para corrigir os erros relacionados a fenômenos determinísticos, como as distorções das lentes. Logo, no processo de calibração de câmaras utiliza-se o modelo de colinearidade (Equação 2.1) considerando parâmetros de orientação adicionais (POI), como apresentado na Equação 2.3 (Mikhail *et al.*, 2001).

$$\begin{aligned}
x' &= x_0 + \Delta x - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
y' &= y_0 + \Delta y - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

nas quais:

x', y' referem-se a um sistema cartesiano (sistema central da imagem), cuja origem é o centro geométrico da imagem, com o eixo x paralelo às linhas do sensor, enquanto o eixo y é paralelo às colunas, formando um ângulo de $+90^\circ$. Estas coordenadas podem estar ainda em pixels, desde que a distância focal e os demais coeficientes também estejam nesta unidade. Para a conversão para as dimensões do sensor, em mm, basta multiplicar pelo tamanho do pixel.

x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal em relação ao sistema cartesiano com origem no centro da imagem;

X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas do centro perspectivo, num sistema de coordenadas do espaço objeto;

Δx e Δy são as componentes de distorção das lentes (Equação 2.4);

Na Equação 2.4, é apresentado o modelo dos componentes de distorção das lentes:

$$\begin{aligned}
\Delta x &= x''(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) + P_1(r_d^2 + 2x^2) + 2P_2 x'' y'' \\
\Delta y &= y''(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) + P_2(r_d^2 + 2y^2) + 2P_1 x'' y''
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

nas quais:

$$x'' = x' - x_0;$$

$$y'' = y' - y_0;$$

k_1, k_2, k_3 são os coeficientes do modelo distorção radial simétrica;

P_1 e P_2 são os coeficientes do modelo de distorção descentrada;

r_d é distância radial em relação ao ponto principal ($r_d = \sqrt{x''^2 + y''^2}$).

Alguns autores ainda consideram os parâmetros de afinidade, no entanto, no contexto atual, eles não possuem relevância significativa. Para maiores detalhes, consultar (Fraser, 1997a; Habib *et al.*, 2002).

Dessa forma, as coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico podem ser obtidas pela equação: $x = x - \Delta x$ e $y = y - \Delta y$; x'' e y'' representam as coordenadas do ponto no sistema de coordenadas fotogramétrico e Δx e Δy representam as correções dos efeitos das distorções das lentes.

2.2.1. CALIBRAÇÃO MULTICÂMARAS

A calibração de um sistema multicâmaras visa determinar dois grupos de parâmetros: os POI de todas as câmaras que compõem o sistema e as posições e orientações de cada uma das câmaras em relação a uma câmara de referência, ou seja, os parâmetros de orientação relativa (POR) também denominados de parâmetros de montagem. Durante o processo de calibração são utilizados pontos de passagem e pontos de apoio para estimar indiretamente os parâmetros de orientação exterior e interior de cada câmara envolvida. Os pontos de passagem são pontos comuns identificados em pelo menos duas imagens diferentes, permitindo a estimativa dos parâmetros de orientação relativa (POR) entre as câmaras. Já os pontos de apoio são pontos comuns identificados nas imagens e com coordenadas conhecidas no referencial do espaço objeto, permitindo a definição de um referencial e o refinamento dos POEs e POIs iniciais, em conjunto com as coordenadas dos pontos de passagem.

Usualmente, para estimar os POIs utiliza-se o método de auto calibração por feixes de raios (Fraser, 1997a). Segundo Detchev (2018), em se tratando de um sistema físico de câmaras que contenha duas ou mais câmaras o processo de calibração pode ser realizado individualmente para cada câmara, ou conjuntamente. No entanto, se há mais de quatro câmaras, por exemplo, o ideal seria calibrar *in situ*, já que a calibração individual para cada câmara pode se tornar muito trabalhosa e não permitir determinar o relacionamento com as demais câmaras. Além disso, a calibração *in situ* permite levar em consideração as condições reais de operação do sistema.

Um ambiente adequado para essa calibração deve conter pontos de controle que estejam dispostos de maneira que cada câmara do sistema multicâmaras registre alguns destes pontos. Também, imagens convergentes de várias posições com uma relação de base - profundidade adequadas devem ser adquiridas (Detchev *et al.*, 2018). Devem ser evitadas estações de exposição muito próximas, sendo que relação ideal de base-profundidade seria 1 (Kraus; Kopliku, 2010)

Os POR são os parâmetros de orientação relativa de uma determinada câmara (c_k) em relação a uma câmara de referência (c_{ref}), sendo compostos pelas translações (*lever-arm*) e rotações (*boresight*). De acordo com Detchev (2018), existem métodos compostos de somente uma ou duas etapas para estimar os POR.

No método de duas etapas, primeiramente estimam-se os parâmetros de orientação exterior (POE), utilizando um ajustamento em bloco por feixes de raios. Os POR são então calculados a partir dos POE, utilizando as equações (2.5) (Datchev *et al.*, 2018):

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{c_k}^{c_{ref}}(t) &= (R_{c_{ref}}^m(t))^{-1} \cdot (\mathbf{r}_{c_k}^m(t) - \mathbf{r}_{c_{ref}}^m(t)) \\ R_{c_k}^{c_{ref}}(t) &= (R_{c_{ref}}^m(t))^{-1} \cdot R_{c_k}^m(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

nas quais:

$\mathbf{r}_{c_k}^{c_{ref}}(t)$ são as translações (*lever-arm*) entre a câmara c_k e a câmara de referência c_{ref} , que são consideradas estáveis entre duas calibrações;

$R_{c_k}^{c_{ref}}(t)$ é a matriz de rotação, em função das rotações (*boresight*), entre a câmara c_k e a câmara de referência c_{ref} , e que também são consideradas estáveis entre duas calibrações;

$\mathbf{r}_{c_{ref}}^m(t)$ e $R_{c_{ref}}^m(t)$ são os POE, dependentes do tempo, da câmara de referência em relação ao sistema do mapeamento, ou referencial do espaço objeto (m);

$\mathbf{r}_{c_k}^m(t)$ e $R_{c_k}^m(t)$ são os POE, dependentes do tempo, da câmara c_k ;

Após a determinação dos POR para cada instante são calculados os valores médios e desvios padrão. O método de uma etapa não será descrito neste trabalho, e mais informações podem ser encontradas em Datchev *et al.* (2018).

Durante a aquisição de imagens, as câmaras mantêm uma posição e orientação relativas estáveis, o que faz com que possam ser estabelecidas restrições de estabilidade aos Parâmetros de Orientação Relativa (PORs). Assim, as restrições de estabilidade da orientação relativa foram empregadas para a calibração de câmaras múltiplas (Bazan *et al.*, 2009; Tommaselli *et al.*, 2013).

Bazan *et al.* (2008; 2009) utilizaram restrições de estabilidade na matriz de rotação relativa e na distância entre centros de perspectiva para calibrar um sistema com duas câmaras. Posteriormente, Tommaselli *et al.* (2009) expandiram esse conceito utilizando restrições nos elementos de base para calibrar duas câmaras de perspectiva oblíqua.

O método em duas etapas pode ser aprimorado por meio da utilização de restrições de estabilidade na orientação relativa e nos elementos de base, como descrito em Bazan (2008) e Tommaselli et al. (2009).

2.3. GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS POR MEIO DO REGISTRO E FUSÃO

O processo de registro tem o objetivo de combinar imagens capturadas de um objeto ou de uma superfície. As imagens podem ser obtidas em diferentes momentos, a partir de pontos de vista diferentes e/ou utilizando diferentes sensores. O processo de registro é composto por duas etapas principais (Wang; Yang, 2020). Na primeira etapa, os pontos correspondentes ou as áreas comuns são determinadas nas imagens. Esses pontos ou pares são localizados na região de sobreposição das imagens e podem ser selecionados manualmente ou de maneira automática, utilizando técnicas de análise de imagens. Na segunda etapa são estimados os parâmetros de transformação que permitem relacionar as duas imagens, ou seja, a transformação que permite mapear ambas as imagens para o mesmo sistema de referência. Um procedimento usualmente usado é adotar o sistema de coordenadas de uma das imagens como referência. A Figura 5 ilustra o processo de registro de imagens.

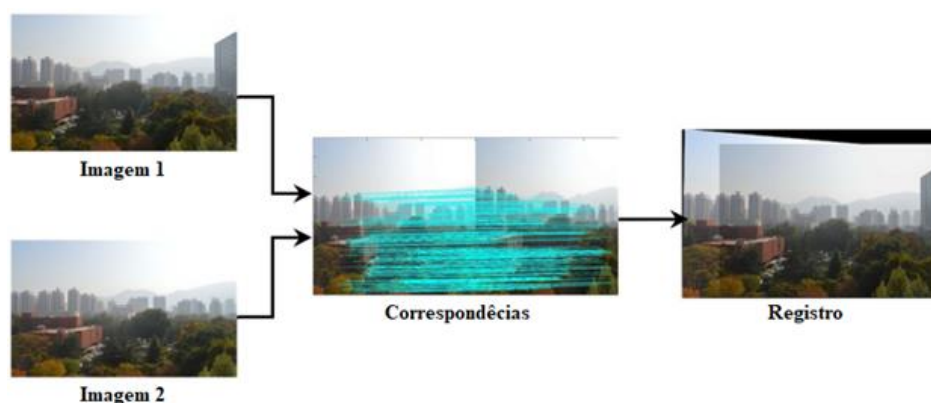


Figura 5 – Exemplo de registro de imagens usando correspondência de imagens. Adaptado de Wang e Yang (2020).

2.3.1. REGISTRO BASEADO EM REGIÕES

De acordo com Wang e Yang (2020), os métodos baseados em regiões utilizam a informação da intensidade dos pixels em uma janela como informação de entrada para o processo de correspondência. Neste caso calcula-se a diferença de intensidade (ou outras métricas, como a

correlação) entre janelas na imagem a ser registrada e na imagem de referência, procurando-se determinar as áreas correspondentes. Em geral, este método tem uma grande quantidade de cálculos e baixa precisão de registro (Wang; Yang, 2020), devido às mudanças nas janelas pela mudança de escala, rotação e intensidades, resultantes da mudança do ponto de vista.

No artigo de Wang e Yang (2020) são apresentados quatro diferentes métodos de registro baseados em área, os quais são: registro baseado no algoritmo de correspondência por pixel (área), registro baseado em informação mútua, registro baseado na pirâmide de Laplacianas e o registro no domínio do espaço. Devido à alta demanda de cálculos e baixa qualidade, os métodos baseados em área não são frequentemente aplicados na geração de imagens panorâmicas em aplicação cartográficas. Logo esse tipo de método será abordado de forma superficial, sendo apresentada apenas uma noção básica do registro baseado na correspondência de áreas. Para uma descrição mais detalhada sugere-se consultar o artigo de revisão publicado por Wang e Yang (2020).

No algoritmo baseado na correspondência por área, uma imagem é selecionada como base (referência) e a área de sobreposição na outra imagem é utilizada para determinar as regiões correspondentes. Alguns métodos utilizam uma imagem como referência e movimentam a área de superposição sobre a imagem de referência. Para cada movimento de um pixel, uma métrica denominada similaridade é estimada (Wang; Yang, 2020). Supondo que I_1 seja a imagem de referência, e I_2 a segunda imagem, as áreas de sobreposição são representadas por Ω_1 e Ω_2 , sendo as dimensões das imagens são dadas por $M \times N$. A medida da similaridade é estimada pela expressão:

$$R = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |\Omega_1(x, y) - \Omega_2(x, y)| \quad (2.6)$$

A linha com menor valor de similaridade é selecionada para realizar o registro. Como o método exige inúmeras combinações, a quantidade de cálculos é elevada. Além disso esse método é variante à rotação e escala. Este é o mesmo usado frequentemente para o cálculo de correspondência em Fotogrametria (Kraus; Kopliku, 2010).

2.3.2. REGISTRO BASEADO EM ATRIBUTOS

O registro baseado em atributos realiza a identificação de pontos de interesse, seguido de um processo de correspondência. Os pontos de interesse são usualmente selecionados sobre uma região de quina por meio da análise dos valores da intensidade, enquanto a correspondência é

estabelecida analisando a similaridade dos atributos dos pontos de interesse. Na sequência serão apresentadas algumas técnicas empregadas na detecção de pontos de interesse visando o registro das imagens.

2.3.2.1. Algoritmos de detecção de quinas

Uma quina é usualmente gerada a partir da intersecção de linhas. No caso de imagens, a quina é um ponto com alta variação de brilho bidirecional ou que possui curvatura acentuada (Trajković; Hedley, 1998; Xing *et al.*, 2016). Segundo Wang e Yang (2020), as quinas são invariantes à escala, no entanto, podem ser influenciadas pela iluminação. Na literatura existem inúmeros operadores de detecção de quinas, dentre os quais pode-se destacar: Förstner, Moravec e Harris.

Em 1980, Moravec (1980) propôs um operador que seleciona o ponto com menor variação de intensidade, considerando quatro direções principais. Para maiores detalhes do método e acesso à formulação envolvida sugere-se consultar (Moravec, 1980) e (Galo; Tozzi, 2002).

O operador de Förstner foi proposto por Förstner e Gülch (1987). Outro operador de detecção de quinas muito utilizado é o de Harris, o qual foi proposto por Harris e Stephens (1988). A proposta do algoritmo foi baseada no método de Moravec, sendo que o operador de Harris é invariante à rotação e translação.

De acordo com Wang e Yang (2020), existem inúmeras aplicações que têm utilizado os algoritmos de detecção de quinas no processo de registro de imagens, como pode ser visto também em Jiang e Liu (2015); Li e Guo (2016); Pan *et al.* (2014).

A maioria dos operadores de detecção de quinas fornece a localização com precisão posicional de um pixel. O operador de Förstner, entretanto, atinge precisão subpixel. Para obter uma localização com maior qualidade é possível realizar um procedimento de ajustamento por mínimos quadrados considerando os pontos vizinhos ao ponto inicial determinado pelo operador de detecção de quina. No ajustamento são consideradas as posições dos vizinhos e do vetor gradiente. Para maiores detalhes do processo de obtenção com qualidade subpixel sugere-se consultar (Galo; Tozzi, 2002).

A correspondência entre os pontos de interesse, identificados nas imagens adjacentes, pode ser realizada calculando-se a distância euclidiana no espaço dos atributos entre os candidatos. Outra maneira é aplicar o conceito de *template matching*, também conhecido como correlação de regiões, já descrito na Seção 2.3.1, e que também pode ser visto em (Galo, 2003).

2.3.2.2. Algoritmo SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)

O algoritmo SIFT foi proposto por David G. Lowe em 1999 e inicialmente empregado para a detecção de atributos (Brown; Lowe, 2002; Lowe, 1999). Esse algoritmo tem sido muito utilizado no registro de imagens, como pode ser visto em (Gonçalves *et al.*, 2011; Ni *et al.*, 2012; Wang; Hayes, 2017). O algoritmo SIFT é executado em quatro etapas principais: detecção de extremos, localização de pontos de interesse (também conhecidos como pontos chave), cálculo da orientação dos gradientes e, então, dos descritores dos pontos chave. As primeiras etapas descrevem a parte do detector e as duas seguintes descrevem a formação do descritor.

O primeiro passo é detectar extremos (máximos e mínimos) em uma pirâmide da imagem com a função Diferença de Gaussianas. Os pontos chave correspondem a estes extremos no espaço-escala.

A convolução de uma função $f(x,y)$ com uma função $h(x,y)$ é dada por:

$$f(x,y) * h(x,y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) h(x-m, y-n) \quad (2.7)$$

onde, x varia de 1 a M e y varia de 1 a N .

Um filtro Gaussiano passa baixa é dado pela convolução de uma imagem I com a função G .

$$L(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) * I(x,y) \quad (2.8)$$

onde,

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(x^2+y^2\right)/2\sigma^2} \quad (2.9)$$

Neste filtro a escala é variável através da modificação do parâmetro σ .

A função *DoG* (“*Difference of Gaussian*”) é dada pela diferença das imagens filtradas em escalas próximas, separadas por uma constante k . A função *DoG* é definida por:

$$\text{DoG} = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (2.10)$$

ou seja, é a diferença entre imagens borradas por um filtro gaussiano em escalas σ e $k\sigma$.

Para todo $L(x, y, \sigma)$, a amplitude e direção do ponto chave são estimados considerando uma janela 8x8 centrada sobre o ponto chave. O algoritmo SIFT permite estimar um vetor contendo 128 atributos. Os atributos são utilizados para estabelecer a correspondência entre os pontos de interesse das imagens. Na etapa de estimativa de correspondência entre os pontos de interesse pode-se empregar diferentes estratégias. Lowe (2004) menciona que o melhor candidato à correspondência de um ponto de interesse é o vizinho mais próximo em outra imagem, ou seja, busca-se estabelecer a correspondência entre os candidatos que possuam vetores de descritores com a menor distância euclidiana entre eles. Para a eliminação das falsas correspondências pode-se utilizar o método RANSAC (*RANdom Sample Consensus*) (Fischler; Bolles, 1981; Mills; Dudek, 2009). Para maiores detalhes sobre o algoritmo SIFT sugere-se consultar (Lowe, 1999, 2004; Younes, 2014).

Além do SIFT, existem outros métodos de detecção de pontos de interesse, que têm sido empregados no registro de imagens, como por exemplo o SURF e KAZE. Para uma descrição detalhada desses métodos sugere-se consultar (Alcantarilla *et al.*, 2012; Bay *et al.*, 2006; Wang; Yang, 2020).

2.3.3. MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NO REGISTRO DE IMAGENS

Uma vez extraídos os pontos de interesse e estabelecidas as correspondências entre eles, o próximo passo consiste em determinar os parâmetros da transformação que permite fundir as imagens adjacentes em um mesmo referencial. Segundo Ghosh *et al.* (2016), a transformação mais usada para o registro de imagens é a homografia planar com 8 graus de liberdade, também conhecida como transformação projetiva (Lugnani, 1987). Na transformação projetiva as coordenadas x' e y' podem ser relacionadas a x e y pela expressão (2.11):

$$\begin{cases} x' = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1} \\ y' = \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1} \end{cases} \quad (2.11)$$

O modelo matemático apresentado é do tipo não linear e é composto por 8 incógnitas ($a_1, \dots, a_8$). Para cada ponto de interesse é possível escrever duas equações. Sendo assim necessário medir no mínimo quatro pontos sobre a região de sobreposição, para estimar os parâmetros da transformação. No caso em que mais de quatro pontos são medidos, tem-se um sistema de equações com redundância. Logo, é possível aplicar o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) no processo de estimação.

Para a aplicação do MMQ usando as Equações 2.11, torna-se necessária a linearização por série de Taylor e com isso o processo de estimação requer iterações a partir de valores iniciais para os parâmetros. Uma alternativa visando simplificar o processo de estimação, consiste em tornar o modelo matemático apresentado na Equação 2.11 em um modelo linear. Essa simplificação é usualmente utilizada em aplicações na área de Visão Computacional. Na Equação 2.12 é apresentado o modelo matemático na forma linearizada (Hartley; Zisserman, 2004).

$$\begin{aligned} x' &= a_1x + a_2y + a_3 - a_7xx' - a_8yx' \\ y' &= a_4x + a_5y + a_6 - a_7xy' - a_8yy' \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ambos os modelos matemáticos possuem a mesma quantidade de incógnitas. No entanto o sistema de equações passa a ser do tipo linear nos parâmetros, não sendo necessárias iterações e nem valores iniciais. Para utilizar o método paramétrico de ajustamento pelo MMQ é necessário considerar que os elementos x' e y' no lado direito da equação não têm erros randômicos.

2.4. GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS COM MODELAGEM FOTOGRAFÉTRICA

Nesta seção serão apresentadas as etapas envolvidas na geração de imagens panorâmicas considerando as equações de colinearidade e modelos de correções dos erros sistemáticos relacionados ao processo de formação da imagem. No caso das equações de colinearidade, o modelo representa o conceito básico de formação da imagem, em que o ponto na imagem, o centro

perspectivo da câmara e o ponto no terreno pertencem à mesma reta, isto é, são colineares. Os modelos matemáticos de correção dos erros sistemáticos foram desenvolvidos para corrigir os erros relacionados às distorções das lentes e à refração atmosférica, que pode ser negligenciada no caso de curta distância.

No contexto de geração de imagens panorâmicas usando o modelo rigoroso, podem ser utilizados dois tipos de processo: direto ou indireto (Almeida, 1989), de modo similar ao processo de geração de ortoimagens. Além disso, as imagens podem ser referenciadas em relação aos sistemas de terreno ou a um sistema arbitrário, como por exemplo, o sistema de coordenadas da foto da esquerda. A cena pode ser adquirida utilizando apenas uma câmara ou um sistema de múltiplas câmaras (Lin *et al.*, 2015). No caso do uso de uma única câmara, os parâmetros de correção dos erros sistemáticos correspondem aos parâmetros de orientação interior (POIs), os quais são determinados por meio da calibração de câmaras. No caso de multicâmaras, além dos POIs são necessários os parâmetros de translação (*lever-arm*) e rotação (*boresight*) entre os sistemas de coordenadas das câmaras. Esse segundo grupo de parâmetros também são conhecidos como parâmetros de montagem. A câmara ou o sistema de multicâmaras podem ser integrados a um sistema de posicionamento e orientação, possibilitando efetuar o referenciamento direto.

2.4.1. PROCESSO DIRETO E INDIRETO DE RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

O processo de geração de imagens panorâmicas por processos fotogramétricos assemelha-se ao processo de retificação e ortoretificação de imagens. No caso da retificação convencional é usado um plano, ou seja, todos os valores para a coordenada Z são iguais. Na geração de imagens panorâmicas usa-se uma superfície, no caso um cilindro, e calcula-se a profundidade para cada pixel, usando o modelo paramétrico de um cilindro ou de uma esfera.

Para a obtenção da imagem panorâmica os valores de brilho da imagem digital são transferidos para uma grade regular, que representa um sistema de coordenadas 3D com as coordenadas do eixo Z constante (Arruda Júnior, 2002). Como mencionado anteriormente, a geração da imagem panorâmica pode ser realizada por meio dos métodos direto ou indireto.

No método direto, os pixels da imagem de entrada são projetados para uma grade da imagem final utilizando as equações de colinearidade na forma inversa, sendo previamente corrigidos os erros sistemáticos. O modelo matemático no método direto é dado por:

$$\begin{aligned}
 X &= X_0 - \frac{r_{11}x + r_{21}y - r_{31}f}{r_{13}x + r_{23}y - r_{33}f} (Z - Z_0) \\
 Y &= Y_0 - \frac{r_{12}x + r_{22}y - r_{32}f}{r_{13}x + r_{23}y - r_{33}f} (Z - Z_0)
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Os elementos da Equação 2.13 são os mesmos já definidos na Equação 2.1.

No caso da retificação para um plano, para realizar esta projeção adota-se um valor de Z constante, usualmente $Z = -f$. Nesse caso, deve-se conhecer a priori os parâmetros de orientação exterior (POE) ou então os parâmetros de orientação relativa (POR) entre as imagens. As coordenadas fotogramétricas (x, y) devem ser corrigidas dos erros sistemáticos usando os POIs.

O método direto é composto pelas seguintes etapas:

- 1- Transformação do sistema de coordenadas da imagem para o sistema fotogramétrico;
- 2- Correção dos erros sistemáticos usando os POIs;
- 3- Projeção do referencial fotogramétrico para o referencial da imagem usando as equações de colinearidade na forma inversa (Equação 2.13);
- 4- Reamostragem dos valores projetados para uma malha regular correspondente à imagem panorâmica.

Como as coordenadas obtidas na Etapa 3 não necessariamente coincidem com a malha regular da imagem panorâmica é necessário um processo de reamostragem. Dentre os métodos de reamostragem estão: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e a convolução cúbica.

No método indireto, inicialmente, os pixels da imagem panorâmica são projetados para o sistema fotogramétrico por meio da equação da colinearidade direta. Após esta projeção, um processo inverso de correção dos erros sistemáticos é aplicado. Nesse caso, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar na imagem original a posição correta do ponto projetado e assim encontrar o valor da cor do pixel correspondente. A seguir são apresentadas as etapas envolvidas no método indireto:

1 - Transformação do referencial da imagem panorâmica para o referencial fotogramétrico utilizando as equações de colinearidade na forma direta (Equação 2.1). As coordenadas X e Y são obtidas a partir da imagem panorâmica, enquanto a coordenada Z é obtida a partir da equação do cilindro;

2 - Introdução dos erros sistemáticos às coordenadas fotogramétricas;

3 - Transformações das coordenadas obtidas na Etapa 2 para o sistema de imagem (c, l);

4 - Reamostragem do valor de intensidade de cada banda (RBG) do pixel a partir dos vizinhos.

Como os valores resultantes da Etapa 3 não coincidem necessariamente com a posição inteira da matriz da imagem original é necessário reamostrar o valor das cores dos pixels.

2.4.2. IMAGENS CAPTURADAS POR UMA ÚNICA CÂMARA

As imagens usadas para a geração da imagem panorâmica podem ser adquiridas por uma única câmara. Neste caso, a câmara é apontada para diferentes direções, adquirindo imagens em diferentes instantes (Lin *et al.*, 2015; Rau *et al.*, 2016). Para a geração da imagem panorâmica é necessário o conhecimento *a priori* dos parâmetros de orientação interior, dos parâmetros de orientação exterior ou dos parâmetros de orientação relativa. Como apenas uma câmara é utilizada, todas as imagens possuem o mesmo conjunto de POIs. Na sequência são descritas as etapas envolvidas na geração de uma imagem panorâmica considerando apenas uma câmara pelo método direto de formação:

- 1 - As coordenadas da imagem original são transformadas para o sistema fotogramétrico;
- 2 - Os parâmetros de orientação interior são aplicados para corrigir os erros sistemáticos envolvidos no processo informação da imagem;
- 3 - As equações de colinearidade na forma inversa são utilizadas para transformar as coordenadas fotogramétricas para o referencial da imagem panorâmica. Devem ser considerados os POE e a componente Z é calculada usando a equação do cilindro;
- 4 - Reamostragem da malha da imagem panorâmica por meio de um método de interpolação.

O conjunto de etapas descrito anteriormente deve ser aplicado a todas as imagens de entrada, gerando como resultado a imagem panorâmica contendo a representação total da área mapeada.

2.4.3. IMAGENS CAPTURADAS POR UM SISTEMA MULTICÂMARAS

O sistema de multicâmaras tem sido amplamente empregado em levantamentos terrestres com automóveis. Nesse tipo de aquisição, usualmente a posição e orientação relativa entre as câmaras são conhecidas *a priori*, medidas essas que são estabelecidas no momento de montagem do sistema. Como o sistema é composto por diferentes câmaras, cada uma possui um conjunto de POIs.

Entre os sistemas de multicamaras, a Ladybug da Flir Integrated Imaging é amplamente usando. O processo de geração de panorama para esta câmara consiste em três estágios (Point Grey Research Inc., 2022):

- 1 - Retificação de cada imagem para compensar a influência da distorção da lente;
- 2 - Transformação das coordenadas de imagem da imagem retificada para o sistema de coordenadas 3D de cada câmara individualmente;
- 3 - Transformação das coordenadas no sistema de coordenadas 3D de cada câmara para o sistema de coordenadas da esfera ou cilindro; o raio da esfera (R) é então definido.

O processo de geração das imagens panorâmicas se assemelha ao descrito na Seção 2.4.1. Na sequência serão apresentadas as etapas envolvidas na geração da imagem panorâmica:

- 1 - As coordenadas da imagem original são transformadas para o sistema fotogramétrico;
- 2 - Os parâmetros de orientação interior são aplicados para corrigir os erros sistemáticos envolvidos no processo de formação da imagem. Para cada câmara é utilizado um conjunto de POIs diferente;
- 3 - As equações de colinearidade na forma inversa são utilizadas para transformar as coordenadas fotogramétricas para o referencial da imagem panorâmica. Os parâmetros de orientação relativa entre as câmaras são utilizados. O sistema de coordenadas de uma câmara é utilizado como referência;
- 4 - Reamostragem da malha da imagem panorâmica por meio de um método de interpolação.

2.4.4. A PARALAXE NA GERAÇÃO DE IMAGENS PANORÂMICAS

Os panoramas gerados por múltiplos sensores levam a uma imagem panorâmica esférica ou cilíndrica "imperfeita" devido ao deslocamento dos centros de projeção das imagens individuais (Kwiattek; Tokarczyk, 2015). Segundo Kwiatek e Tokarczyk (2015) o principal desafio de obter alta precisão nas medições por meio de panoramas está relacionado ao deslocamento dos centros de projeção das imagens que compõem o panorama. Numa câmara panorâmica real com múltiplas lentes (Figura 6a), os centros de projeção não coincidem, dificultando a junção das imagens. Já numa câmara panorâmica ideal (Figura 6b), todos os centros de projeção estão localizados

exatamente em um ponto que é o centro da esfera (Ji *et al.*, 2014). Contudo, na prática, é impossível alcançar essa situação ideal.

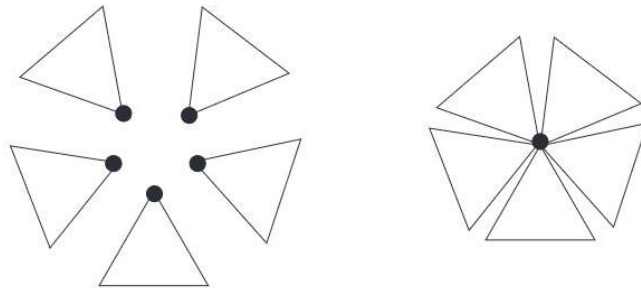


Figura 6 - Centros de projeção em uma câmara panorâmica real (a) e em uma câmara panorâmica ideal (b). Adaptado de (Kwiatek; Tokarczyk, 2015).

Existem diversas abordagens relacionadas aos erros presentes em imagens panorâmicas (Fangi; Nardinocchi, 2013; Ji *et al.*, 2014; Parian, 2007; Schmeing *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2012). Uma das abordagens para a geração de panoramas consiste em ignorar a excentricidade dos centros de projeção das câmaras individuais. No entanto, esse tipo de imagem é raramente utilizado em projetos fotogramétricos, sendo seu principal objetivo apenas a visualização. A segunda abordagem pressupõe que esse erro deve ser minimizado por meio da aplicação de um algoritmo que requer a configuração de um valor de raio para a esfera (R) (ou cilindro), que deve ser tão próximo quanto possível da distância para o objeto sendo capturado (Kwiatek; Tokarczyk, 2018). A escolha do raio da esfera ou cilindro tem um impacto crucial na precisão.

Na Figura 7a, o raio (R) do cilindro é igual à distância $\overline{OP}$. Portanto, não há paralaxe. No entanto, na Figura 7b, a distância $\overline{OP}$ é maior do que o raio do cilindro, gerando assim um efeito de paralaxe (Δx).

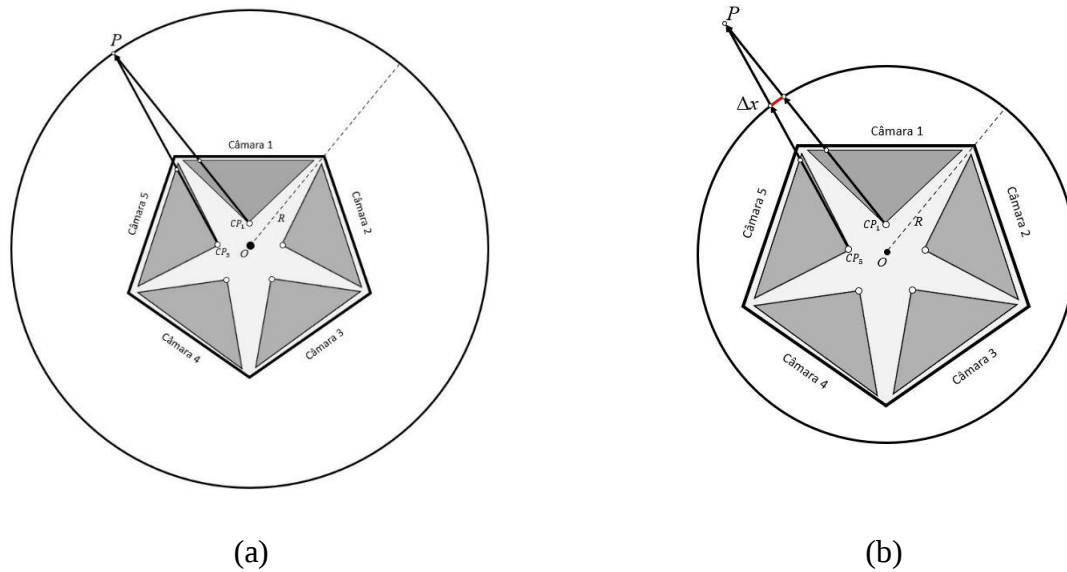


Figura 7 – Vista superior de um panorama. (a) Distância $\overline{OP} = R$. (b) Erro de paralaxe quando $\overline{OP} > R$.

2.5. SUPERFÍCIES DE PROJEÇÃO

Há várias superfícies de projeção sobre as quais um panorama pode ser produzido. Segundo Patel et al. (2012), alguns tipos incluem a Retilínea, a Cilíndrica, a Esférica e a Estereográfica.

- A Projeção Retilínea é um tipo de projeção em que a imagem montada é vista em um plano bidimensional. Vistas amplas - em torno de 120° ou mais - começam a exibir distorção severa perto das bordas da imagem. Um exemplo de Projeção Retilínea é o uso de faces de cubo com mapeamento cúbico para visualização de panorama, onde cada face do cubo mostra uma área de 90 por 90 graus do panorama.
- A Projeção Cilíndrica é um tipo de projeção em que a imagem montada mostra um campo de visão horizontal de 360° e um campo de visão vertical limitado. Os panoramas nesta projeção devem ser visualizados como se a imagem estivesse envolvida em um cilindro e vista de dentro, e isso causa distorção nas linhas horizontais que parecem curvas, enquanto as verticais permanecem retas. Existem outros formatos cilíndricos, como o cilíndrico de Mercator e Miller, que apresentam menos distorção perto dos polos.
- A Projeção Esférica é outro tipo de projeção cilíndrica em que a imagem montada mostra um campo de visão de 360 graus horizontal e 180 graus vertical, ou seja, a esfera inteira. Os panoramas nesta projeção devem ser vistos como se a imagem estivesse envolvida em uma esfera e vista de dentro, sendo que o centro de projeção é o centro da esfera. As linhas

horizontais parecem curvas quando vistas em um plano 2D, assim como em uma projeção cilíndrica, enquanto as linhas verticais permanecem verticais.

- A Projeção Estereográfica ou a Projeção *Fisheye* podem ser utilizadas para criar panoramas de “pequeno planeta”, que parecem mostrar o ambiente inteiro em torno do ponto de vista do observador. A projeção é criada apontando a câmara virtual para baixo e configurando um campo de visão suficientemente amplo para mostrar todo o chão e algumas das áreas acima dele (Patel et al. 2012).

2.6. SUAVIZAÇÃO (*FEATHERING*) E MESCLAGEM (*BLENDING*)

A suavização (*feathering*) e a mesclagem (*blending*) são técnicas de processamento de imagens utilizadas para suavizar as transições entre duas áreas de uma imagem, ou para combinar duas imagens em uma única imagem.

Existem duas formas comumente utilizadas para mesclar imagens. Uma delas é chamada de mesclagem alfa (*feathering*), que calcula a média ponderada das duas imagens. Essa ponderação geralmente segue uma função em forma de rampa. Na linha de junção, o peso é igualmente dividido entre as imagens, enquanto afastando-se dessa linha, uma das imagens recebe mais peso que a outra. Os casos em que o *feathering* funciona extremamente bem aqueles em que os pixels da imagem estão bem alinhados uns com os outros e a única diferença entre as duas imagens é a mudança geral na intensidade. No entanto, se as imagens não estiverem bem alinhadas, as discrepâncias serão mostradas na imagem mesclada (Deng; Zhang, 2003). O termo "alinhado", conforme empregado pelo autor, denota a condição em que os pixels se encontram em perfeita correspondência. Essa congruência somente se concretiza mediante o correto alinhamento das imagens, o que, por sua vez, demanda a precisa calibração dos parâmetros de orientação interior e exterior, aliada à ausência de paralaxe.

Existem outras técnicas descritas por Capel (2004), tais como:

- A média: O valor do pixel de saída é obtido simplesmente pela média dos valores extraídos das imagens de entrada, nas áreas de superposição, mas aparecerão imagens duplicadas nos casos em que há paralaxe residual.
- *Feathered blending* consiste na associação de uma função de ponderação a cada imagem de entrada, a qual é graduada desde um valor máximo no centro da imagem até zero na borda. Essa função é utilizada para ponderar os valores extraídos das

imagens ao calcular sua média. Uma possível função de ponderação é a função quadrática.

- Centro de imagem mais próximo - Ao extrair valores das imagens de entrada, a distância da localização de amostragem ao centro da imagem também é calculada. O conjunto de valores é classificado de acordo com essa distância e o candidato mais próximo ao centro da imagem é escolhido como valor de pixel de saída.

A Figura 8 ilustra as três técnicas de fusão descritas.

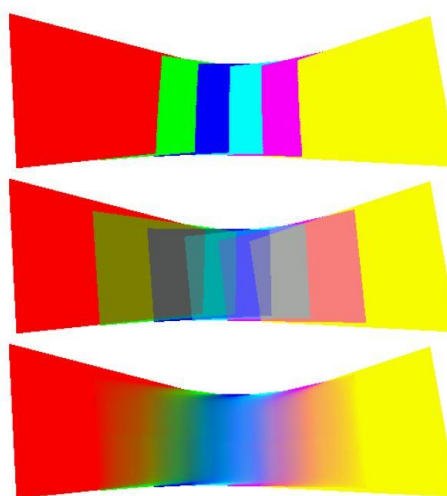


Figura 8 - Seis imagens de cores primárias fundidas usando três técnicas comuns: (Superior) centro da imagem mais próxima, (Meio) média simples, (Inferior) *feathering*. Adaptado de Capel (2004).

Considerando esses pontos, a opção pelo *feathered blendin*, com a aplicação de uma função de ponderação graduada, proporciona uma transição suave entre as imagens, minimizando possíveis efeitos negativos de paralaxe residual e assegurando uma saída esteticamente aceitável.

2.7. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

A intersecção fotogramétrica consiste na determinação das coordenadas tridimensionais de pontos na superfície terrestre a partir de imagens fotográficas ou digitais. Para isso, é realizado um processo de medição das coordenadas imagem de pontos homólogos presentes em duas ou mais imagens e, em seguida, é feito o cálculo das coordenadas tridimensionais desses pontos no espaço objeto por intersecção (Wong, 1980).

Para realizar a intersecção fotogramétrica deve-se conhecer os parâmetros de orientação exterior e interior e as coordenadas imagem de um ponto nas duas imagens. Dessa forma pode-se calcular as coordenadas de um ponto no espaço objeto por intersecção.

Os parâmetros de orientação exterior da fotografia da esquerda são representados por X_0' , Y_0' , Z_0' , ω' , φ' e κ' . Da mesma forma, os parâmetros de orientação exterior da fotografia da direita são representados por X_0'' , Y_0'' , Z_0'' , ω'' , φ'' e κ'' . Para determinar as coordenadas X_A , Y_A e Z_A de um ponto A no espaço-objeto, utilizam-se as equações de colinearidade na forma inversa da imagem da fotografia esquerda:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda' R^{T'} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f_c' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0' \\ Y_0' \\ Z_0' \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

e da direita:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda'' R^{T''} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ -f_c'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0'' \\ Y_0'' \\ Z_0'' \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde:

x' e y' são fotocoordenadas do ponto-imagem da imagem da esquerda;

x'' e y'' são fotocoordenadas do ponto-imagem da imagem da direita;

λ' , λ'' são os fatores de escala correspondente à imagem do ponto A na foto da esquerda e da direita respectivamente;

f_c' e f_c'' são as distancias focais calibradas da imagem da esquerda e da direita respectivamente.

As matrizes de rotação R' e R'' são obtidas da matriz de rotação R :

$$R = \begin{bmatrix} \cos\omega\cos\kappa & -\cos\omega\sin\kappa & \sin\omega \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\varphi & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\varphi & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Efetuando o produto das matrizes de rotação com o vetor das observações presentes nas Equações 2.14 e 2.15, obtém-se:

$$\begin{aligned} u' &= r_{11}'(x' - x_0') + r_{21}'(y' - y_0') - r_{31}'f_c' \\ v' &= r_{12}'(x' - x_0') + r_{22}'(y' - y_0') - r_{32}'f_c' \\ w' &= r_{13}'(x' - x_0') + r_{23}'(y' - y_0') - r_{33}'f_c' \end{aligned} \quad (2.17)$$

e

$$\begin{aligned} u'' &= r_{11}''(x'' - x_0'') + r_{21}''(y'' - y_0'') - r_{31}''f_c'' \\ v'' &= r_{12}''(x'' - x_0'') + r_{22}''(y'' - y_0'') - r_{32}''f_c'' \\ w'' &= r_{13}''(x'' - x_0'') + r_{23}''(y'' - y_0'') - r_{33}''f_c'' \end{aligned} \quad (2.18)$$

onde:

r'_{ij} e r''_{ij} : são os elementos das matrizes de rotação das imagens esquerda e direita respectivamente.

Para o cálculo das coordenadas objeto é necessário calcular antes o termo λ (fator de escala). Substituindo as Equações 2.17 e 2.18 nas Equações 2.14 e 2.15, respectivamente e igualando-as:

$$\begin{aligned} \lambda' \cdot u' + X'_0 &= \lambda'' \cdot u'' + X''_0 \\ \lambda' \cdot v' + X'_0 &= \lambda'' \cdot v'' + X''_0 \\ \lambda' \cdot w' + X'_0 &= \lambda'' \cdot w'' + X''_0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Rearranjando-as:

$$\begin{bmatrix} X''_0 - X'_0 \\ Y''_0 - Y'_0 \\ Z''_0 - Z'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda' \cdot u' - \lambda'' \cdot u'' \\ \lambda' \cdot v' - \lambda'' \cdot v'' \\ \lambda' \cdot w' - \lambda'' \cdot w'' \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

As equações de observação são:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u' & -u'' \\ v' & -v'' \\ w' & -w'' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda' \\ \lambda'' \end{bmatrix} = Lb = A \cdot X \quad (2.21)$$

$$Lb = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Sendo Lb pseudoobservações.

As incógnitas:

$$X = \begin{bmatrix} \lambda' \\ \lambda'' \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

A solução pelo método dos Mínimos Quadrados:

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot L_b) \quad (2.24)$$

As coordenadas do objeto podem ser calculadas aplicando os fatores de escala encontrados:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda' \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0' \\ Y_0' \\ Z_0' \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

ou ainda utilizando o outro fator de escala λ'' :

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \lambda'' \begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0'' \\ Y_0'' \\ Z_0'' \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Para a obtenção de um valor mais confiável pode-se tirar a média das coordenadas geradas pelos dois tipos de equações.

2.8. ALVOS CODIFICADOS

Um alvo codificado contém informações inseridas dentro de sua própria imagem, devido às suas dimensões físicas e formatos serem predefinidos e padronizados. Devido à sua aplicação frequente em contextos de Realidade Virtual e Aumentada, surgiram várias variantes de alvos codificados, abrangendo formatos como alvos circulares ou retangulares: QR CODE, ARToolkit, ARTag, ALVAR e ARUCO (Silva *et al.*, 2014).

Na literatura, diversos estudos abordam a utilização de alvos codificados no contexto da calibração de câmeras (Fraser, 1997b, 1998; Reiss; Tommaselli, 2011).

Nesta dissertação, a escolha recaiu sobre o alvo ARUCO devido às suas características, que englobam a detecção de placas de Realidade Aumentada (AR) por meio de múltiplos marcadores com a possibilidade de criar até 1024 marcadores distintos e a sua perfeita integração com a biblioteca OpenCV, gerando uma solução de alta velocidade, confiabilidade e versatilidade. A biblioteca ARUCO foi concebida na Universidade de Córdoba, Espanha, em 2010. Sua implementação em C++ foi especialmente planejada para potencializar a realidade aumentada. Para uma descrição mais detalhada sugere-se consultar Silva *et al.* (2014). Vale ressaltar que o campo selecionado para a calibração já incorpora esses alvos, os quais estão estrategicamente posicionados para esse propósito. A Figura 9 ilustra um exemplo de quatro alvos ARUCO identificados no campo de calibração.



Figura 9 – Alvo ARUCO presente no campo de calibração.

2.9. GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

No georreferenciamento direto a medida da posição e orientação da câmara é realizada de maneira direta por meio da integração de sensores GNSS e o sistema inercial (Rau *et al.*, 2016). O receptor GNSS é responsável por estimar a posição do centro perspectivo, enquanto o sistema inercial possibilita estimar a orientação do sistema no instante t da tomada da imagem. O modelo matemático que relaciona o ponto do terreno e sua representação na imagem deve incluir os parâmetros de montagem do sistema, também conhecidos como *lever arm* e *boresight*. A Figura 10 ilustra os sistemas de coordenadas envolvidas no georreferenciamento direto.

Na Figura 10, $r(t)_{GPS}^m$ representa o centro de fase da antena do receptor GNSS em um dado instante t , em um sistema de referência de mapeamento (*mapping frame*), ou do espaço objeto. A matriz $R(t)_b^m$ é função das rotações entre o sistema da unidade de medida inercial (IMU) (*body frame*) e o sistema de mapeamento no instante t . O vetor a_{GPS}^b é a translação entre a antena do receptor GNSS e a IMU, no sistema da IMU (*body frame*). A posição da IMU no sistema de mapeamento no instante t é dada por $r(t)_b^m$, a qual é obtida combinando $r(t)_{GPS}^m$ e a_{GPS}^b . O vetor r_c^m é a posição da câmara no sistema de mapeamento a_c^b corresponde à componente de translação (*lever arm*) e R_c^b corresponde à matriz de rotação contendo os ângulos de *boresight*.

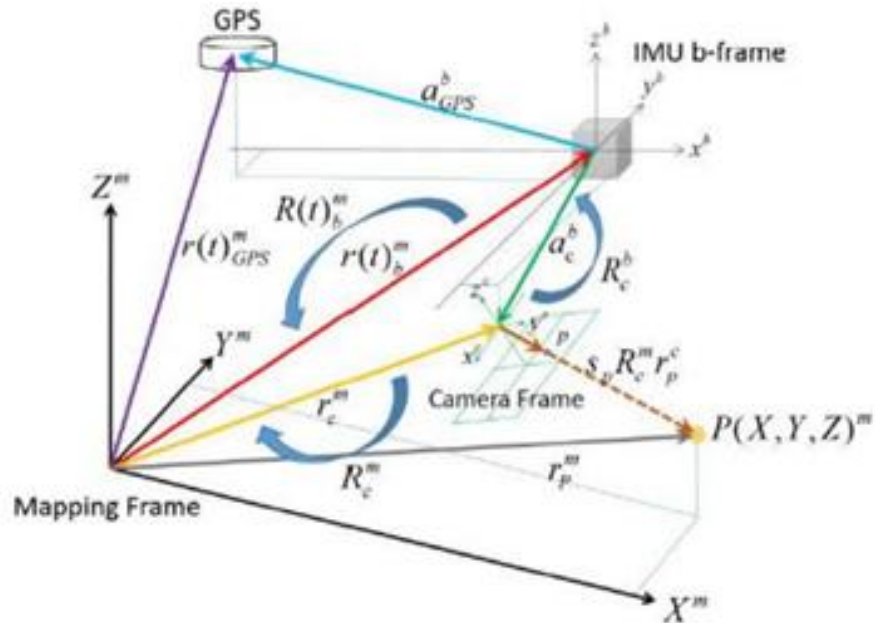


Figura 10 - Representação dos parâmetros e sistemas contidos no georreferenciamento direto (Rau *et al.*, 2016).

A integração dos sistemas GNSS, IMU e câmaras permite a determinação dos POEs sem a necessidade de pontos de controle em um processo de triangulação. No entanto, deve-se ressaltar que alguns efeitos sistemáticos podem afetar a qualidade dos POEs obtidos diretamente. Logo, é necessária a medição de pontos de controle e a realização do processo de fototriangulação integrada com o intuito de obter para ambos, maior qualidade. Este processo tem sido denominado de Orientação Integrada de Sensores.

Esta informação de posição e atitude é usada para posicionar o panorama gerado no sistema de coordenadas do espaço objeto, permitindo a geração das coordenadas por intersecção neste referencial.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SISTEMA DE COLETA T-MAP

O sistema de mapeamento terrestre T-Map foi desenvolvido com o apoio da FAPESP, através do programa PIPE (processo: 2016/07930-1). Desenvolvido pela empresa Sensormap, o sistema é composto de 5 câmaras e um sistema Inercial (INS – *Inertial Navigation System*). Após a montagem mecânica da unidade de aquisição, são conhecidas as rotações entre cada uma das câmaras em relação ao INS. A Figura 11a apresenta a disposição das câmaras dentro da plataforma de coleta e a Figura 11b os sistemas de coordenadas envolvidos na montagem.

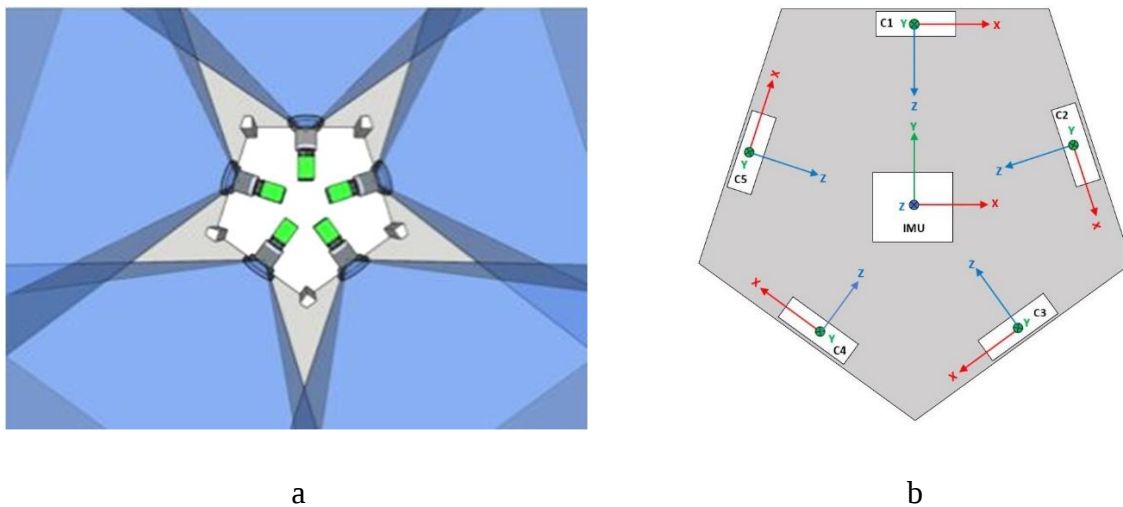


Figura 11 – (a) Posição das câmaras na plataforma do sistema T-Map. (b) Disposição das câmaras e do INS na montagem do sistema T-Map.

A plataforma de coleta é posicionada sobre o veículo e contém sensores e eletrônica para a coleta dos dados. O suporte é projetado com alta precisão, tendo em vista que as câmaras são dispostas em posições e separações angulares previamente definidas, no projeto da plataforma, para que seja viável a cobertura completa da cena em 360°. De acordo com o projeto da plataforma, as distâncias entre cada câmara com a câmara escolhida como ‘mestre’ (câmera 1 – C1) e as rotações das câmaras no plano horizontal, em relação ao INS são mostradas na Tabela 1. Esses valores são considerados como valores iniciais e serão refinados durante o processo de calibração das câmaras.

Tabela 1 - Distância entre as câmaras e a câmara mestre (C1) e separação angular das câmaras em relação ao sistema Inercial.

	Distância em relação a C1 (cm)	Rotação no plano horizontal em relação ao INS (°)
C1	0	0
C2	0,16	-72°
C3	0,26	-144°
C4	0,26	144°
C5	0,16	72°

O sistema T-Map possui cinco câmaras da fabricante JAI, modelo JAI GO-5000C-PGE. Na Tabela 2 são descritos os valores dos parâmetros desse modelo de câmara.

Tabela 2– Características das câmaras utilizadas no T-Map da empresa Sensormap.

Modelo da câmara	Largura do sensor (mm)	Altura do sensor (mm)	Distância focal (mm)	Tamanho de cada fotodetector no sensor (mm)
JAI GO-5000C-PGE	12,8	10,24	6,2	0,005

3.2 CAMPO DE CALIBRAÇÃO

Foi realizado um levantamento em um campo de calibração com alvos em todas as direções no terraço da central de laboratórios do Departamento de Cartografia, da FCT/UNESP campus de Presidente Prudente - SP, gerando os dados necessários para serem usados neste trabalho, como pode ser visto na Figura 12.



Figura 12– Alvos utilizados para realizar a calibração das câmaras - FCT/UNESP – Presidente Prudente – SP

Para definir o referencial do espaço objeto, foram medidas distâncias entre três pontos (alvos) utilizando um paquímetro e um dos pontos foi considerado como a origem do sistema local de coordenadas do campo de calibração. A Figura 13 ilustra os alvos e os pontos que foram medidos com o paquímetro.



Figura 13– Origem do sistema local de coordenadas do campo de calibração.

As coordenadas dos três pontos e seus desvios padrão considerados para definição do sistema local são mostradas na Tabela 3. São necessárias 7 injunções mínimas que foram aplicadas sobre as coordenadas em destaque na Tabela 3.

Tabela 3 – Coordenadas dos pontos utilizados para definir o sistema de coordenadas do espaço objeto.

ALVO	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ_X (m)	σ_Y (m)	σ_Z (m)
6630	0	1,161	0	0,03	0,03	1e-13
6522	1,155	0	0	1e-13	1e-13	1e-13
6623	0	0	0	1e-13	1e-13	1e-13

3.3. COLETA DE DADOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO

Em cada estação foram capturadas quatro imagens de cada câmara, com diferentes rotações, para quebrar a correlação entre os parâmetros de orientação interior e exterior. Por exemplo, para uma mesma estação foi adquirida uma imagem na horizontal, a segunda imagem rotacionada 90° graus, a terceira imagem rotacionada 180° e por fim uma quarta imagem rotacionada 270°. Todas as rotações são em relação ao eixo Z da câmara, como mostra a Figura 14.



Figura 14 – Captura de uma estação com a câmara 1.

Com estas configurações, foram selecionadas 10 estações, sendo capturadas 118 imagens de cada câmara, totalizando 590 imagens, no total.

As imagens são armazenadas no formato *raw* e para conversão para o formato JPG utilizou-se o software SMMPP. Este software foi desenvolvido pela empresa Sensormap e utiliza o SDK (JAI SDK) fornecido pela fabricante das câmaras. Essas imagens foram inseridas no software de fototriangulação (Metashape) para determinar pontos fotogramétricos e valores aproximadas

para os POEs. Um script foi desenvolvido, utilizando a linguagem Python, para exportar as coordenadas imagem dos pontos fotogramétricos e os parâmetros gerados pelo Metashape.

Após estimados os POEs, exportadas as observações e pontos de controle pelo plugin desenvolvido para o Metashape, utilizou-se para o processamento da calibração o software denominado CMC (Bazan, 2008; Ruy, 2008) que permite a calibração simultânea de câmaras considerando restrições de orientação relativa.

A calibração é realizada para determinar os parâmetros de orientação interior, os parâmetros de orientação exterior e a orientação relativa entre as câmaras na plataforma de coleta, bem como as coordenadas dos pontos fotogramétricos no sistema do espaço objeto. A câmara 1 (C1) foi eleita como a câmara de referência (mestre) sendo usada em todas as calibrações relativas com as demais câmaras (C2, C3, C4, C5).

3.4. GERAÇÃO DE IMAGEM PANORÂMICA EM PROJEÇÃO CILÍNDRICA

Dentre as técnicas descritas para geração da imagem panorâmica optou-se por utilizar o processo rigoroso, uma vez que não se deseja alterar a geometria física de formação da imagem. Um programa foi desenvolvido utilizando o Framework QT juntamente com a linguagem C++ para a implementação.

Para criar uma imagem panorâmica a partir de imagens perspectivas individuais, primeiramente é necessário calcular o tamanho da imagem final, que depende do tamanho do pixel na imagem original e da geometria da cena capturada.

Para calcular o tamanho da imagem panorâmica, é necessário seguir os seguintes passos:

1. Dividir o raio do cilindro pelo valor da distância focal calibrada da câmara mestre para obter o denominador da escala. A escala é a relação entre o tamanho da cena no mundo real e o tamanho da imagem capturada. O raio do cilindro é definido arbitrariamente, normalmente como a distância média entre a câmara e os objetos a serem imageados;
2. Multiplicar o tamanho do pixel da imagem original pelo valor do denominador da escala obtida para obter o tamanho do pixel no cilindro (px_c);
3. Dividir o tamanho do pixel no cilindro pelo raio do cilindro para obter o valor do *IFOV* (*Instantaneous Field of View*) do pixel no cilindro em radianos. Isso é necessário porque a imagem panorâmica é uma projeção cilíndrica da cena original.

4. Dividir 360° pelo IFOV do pixel no cilindro em radianos para obter a largura da imagem final em pixels.
5. A altura da imagem final será a mesma das imagens originais, mas, posteriormente sofrerá um recorte para melhorar a apresentação da imagem.

A Figura 15 ilustra a as colunas e linhas da imagem panorâmica final e os ângulos correspondentes no cilindro.

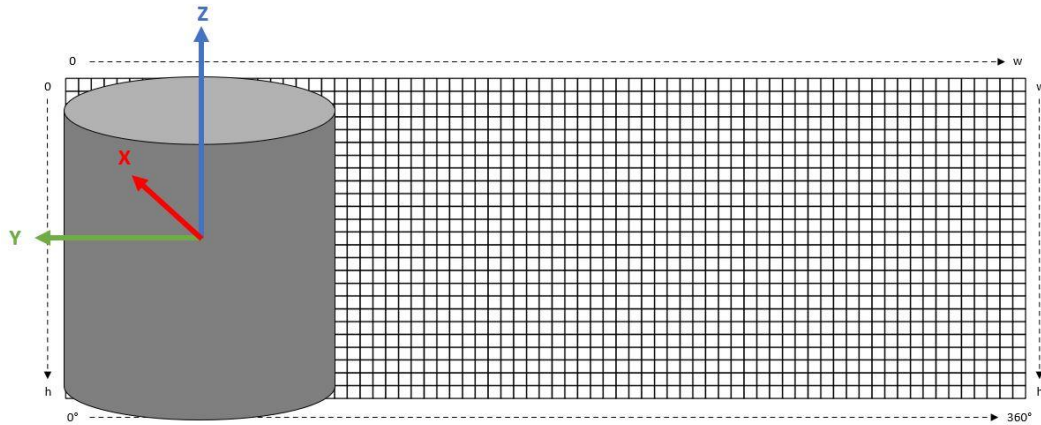


Figura 15 – Relação entre os pixels da imagem panorâmica e os ângulos no cilindro: w corresponde à largura da imagem e h à altura.

Após definir as dimensões da imagem panorâmica, elege-se uma das câmaras que compõem o sistema de captura das imagens como a câmara de referência (C_{ref}), que será denominada mestre. O centro do cilindro será a posição do centro de perspectiva (CP) desta câmara, assim como sua distância focal, que será utilizada para os cálculos.

É de fundamental importância entender a relação entre os sistemas de coordenadas envolvidos no processo. Há o sistema de coordenadas fotogramétricas das câmaras, que é dextrogiro com o eixo Y para cima, o eixo X para a direita (paralelo às linhas do sensor) e o eixo Z ortogonal aos dois eixos com origem no ponto nodal anterior das lentes e perpendicular ao sensor. Por outro lado, temos o sistema de coordenadas do cilindro, que é dextrogiro, com o eixo Z para cima, o eixo X para a direita (coincidente com o eixo X da câmara de referência) e o eixo Y ortogonal aos dois eixos. Na Figura 16 são mostrados esses dois sistemas.

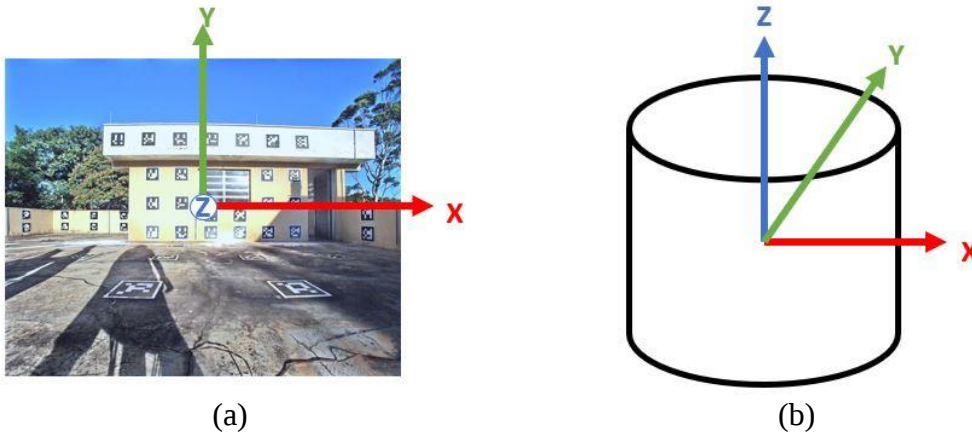


Figura 16– Sistemas de coordenadas da imagem (a) e do cilindro (b).

Para alinhar os sistemas de coordenadas, é importante considerar as rotações relativas entre as câmaras, que são obtidas durante o processo de calibração. Como há cinco câmaras, é necessário determinar qual câmara será a mestre, utilizada nos cálculos (c_k). Essa determinação é feita estabelecendo um limiar de ângulo (φ), o qual define a câmara correspondente. No caso deste trabalho, como há cinco câmaras, a divisão de 360° por 5 resulta em 72° para cada câmara. A Tabela 4 apresenta a correspondência entre o ângulo e a respectiva câmara que será utilizada nos cálculos. Além disso, a Figura 17 exemplifica a divisão de cada câmara em relação ao ângulo φ , possibilitando uma melhor visualização da distribuição das câmaras em torno do panorama gerado.

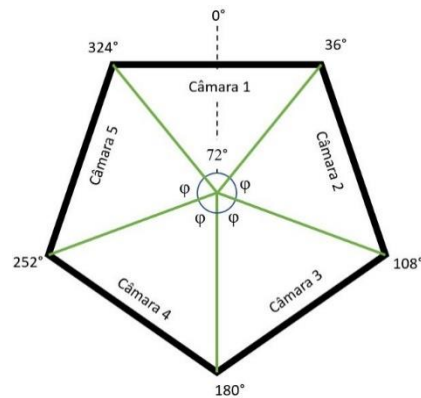


Figura 17 – Divisão das câmaras em relação ao ângulo do panorama (cilindro).

Tabela 4 - Correspondência entre o ângulo (φ) e a respectiva câmara que será utilizada nos cálculos.

Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4	Câmara 5
$\varphi > 324^\circ$	$\varphi > 36^\circ$	$\varphi > 108^\circ$	$\varphi > 180^\circ$	$\varphi > 252^\circ$
ou	e	e	e	e
$\varphi \leq 36^\circ$	$\varphi \leq 108^\circ$	$\varphi \leq 180^\circ$	$\varphi \leq 252$	$\varphi \leq 324$

A Equação 3.1 mostra as matrizes de rotações utilizadas para a orientação dos sistemas envolvidos:

$$R_{cil}^{c_k} = (R_{c_k}^{c_{ref}})^{-1} \cdot R_{cil}^{c_{ref}} \quad (3.1)$$

onde:

$R_{cil}^{c_{ref}}$ é a matriz de rotação do cilindro em relação à câmara de referência (mestre);

$R_{c_k}^{c_{ref}}$ é a matriz de rotação entre a câmara c_k e a câmara de referência (mestre);

$R_{cil}^{c_k}$ é a matriz de rotação entre o sistema do cilindro (cil) e a câmara c_k .

Após definir as rotações necessárias para compor uma imagem panorâmica, cria-se uma imagem vazia e utiliza-se um *loop* aninhado que percorre cada coluna e linha da imagem panorâmica, para atribuir as cores, a partir da projeção e interpolação nas imagens originais. São calculadas as coordenadas 3D do pixel no cilindro e, então, projetadas estas coordenadas nas imagens originais.

Para cada coluna, é necessário multiplicá-la pelo tamanho do pixel, em radianos, no cilindro, resultando no ângulo em radianos (φ) da coluna em questão. Para determinar as coordenadas no sistema 3D do cilindro, utilizam-se as Equações 3.2 a 3.7.

$$px_c = px * \frac{R}{f_{cr}} \quad (3.2)$$

$$px_{rad}(IFOV) = \frac{px}{f_{cr}} \quad (3.3)$$

$$\varphi = col * px_{rad} \quad (3.4)$$

$$x = R * \sin(\varphi) \quad (3.5)$$

$$y = R * \cos(\varphi) \quad (3.6)$$

$$z = -(lin - cy) * px_c \quad (3.7)$$

onde:

f_{cr} é a distância focal da câmara de referência;

R é o raio do cilindro, que pode ser arbitrado como a distância da câmara aos objetos a serem mapeados;

px é o tamanho do pixel do sensor das câmaras;

px_c é o tamanho do pixel no cilindro;

px_{rad} é o *IFOV* do pixel em radianos;

col é a n -éssima coluna da imagem panorâmica;

lin é a n -éssima linha da imagem panorâmica;

cy é o centro das imagens verticalmente, ou seja, metade da altura (h) das imagens originais ($cy = \frac{h-1}{2}$);

ϕ ângulo em radianos resultante da multiplicação entre $pxRad$ e a col ;

x, y e z são as coordenadas no sistema do cilindro.

Com as coordenadas 3D do cilindro calculadas, no referencial do cilindro, é necessário aplicar as equações de colinearidade na forma direta para projetá-las para o sistema de coordenadas fotogramétricas das imagens originais. Para tanto é necessário conhecer os POEs de cada imagem em relação ao sistema do cilindro. Para a imagem da câmara de referência, que é a origem do cilindro, esses valores são nulos. Para as demais câmaras, os valores de *leverarm* e *boresight* entre as câmaras são considerados os POEs tendo como referência o cilindro e aplicados nas equações de colinearidade, levando em consideração qual câmara está sendo utilizada para gerar a parte correspondente do panorama. Em seguida, é preciso introduzir os erros sistemáticos nas coordenadas fotogramétricas (POIs), considerando também qual câmara está sendo utilizada, e então transformar as coordenadas obtidas para o sistema de imagem (coluna, linha). Por fim, deve-se reamostrar o valor de intensidade de cada banda (RGB) do pixel, utilizando algum método de reamostragem tais como: vizinho mais próximo, interpolação bilinear ou convolução cúbica.

Na Figura 18, é apresentado um exemplo da formação de um panorama a partir dos raios colineares que conectam os parâmetros de orientação exterior (POE) e as coordenadas cilíndricas.

O ponto rosa simboliza o centro perspectivo (CP) da câmara de referência, enquanto o ponto branco representa o CP da câmara 2. É importante destacar que, à medida que o ângulo (φ) é alterado, os parâmetros de POE e POI utilizados nas equações de colinearidade também se modificam, assim como a imagem utilizada para a busca da cor do pixel. Essa alteração ocorre de acordo com a Tabela 4, que determina qual câmara será utilizada nos cálculos de acordo com o ângulo correspondente.

Com isso são geradas cinco imagens independentes, que podem ser fusionadas por várias técnicas.

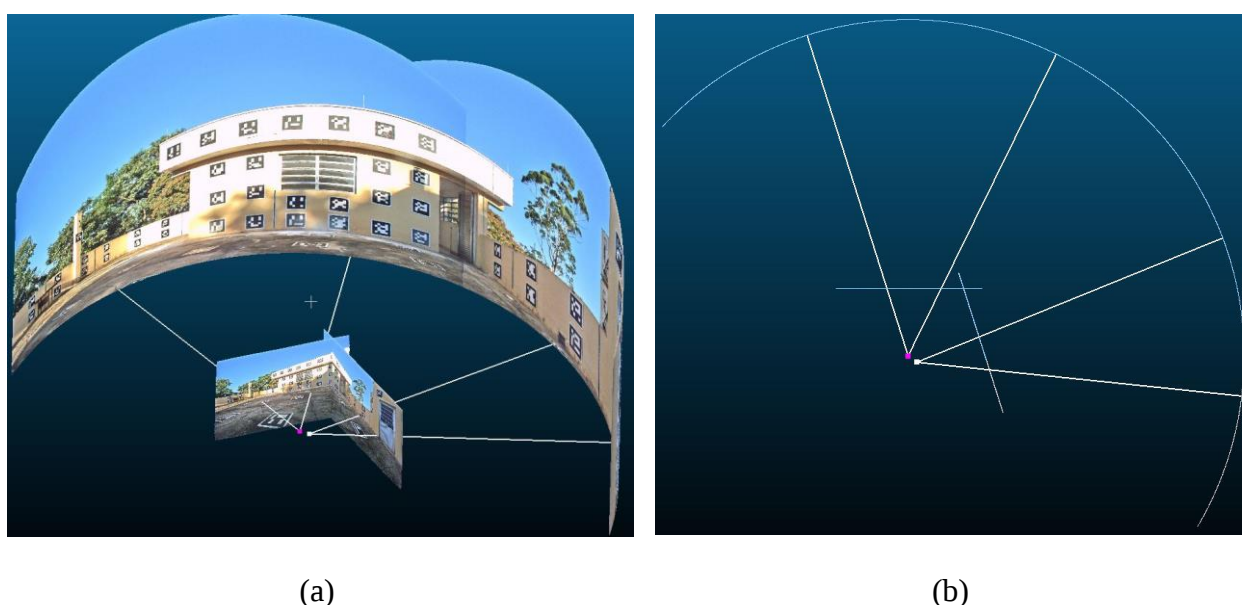


Figura 18 – Panorama em formação: (a) Vista isométrica, (b) vista superior.

3.5. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA USANDO UM PAR DE PANORAMAS CILÍNDRICOS

Para realizar a intersecção fotogramétrica utilizando os panoramas adaptou-se o método demonstrado na Seção 2.7.

Na intersecção fotogramétrica com os panoramas cilíndricos, são utilizados três sistemas: o sistema de referência do terreno (m), o sistema de referência da câmara mestre (c_{ref}) e o sistema de referência do cilindro (cil). É fundamental conhecer as orientações relativas e as translações (*leverams* ou *offsets*), entre a câmara de referência e as demais câmaras do sistema, além dos parâmetros de orientação exterior do panorama no sistema de referência do terreno.

Levando em consideração que o cilindro foi gerado com seu centro na câmara de referência, para determinar com precisão a intersecção fotogramétrica, é necessário considerar não

apenas as coordenadas do ponto no sistema de referência do cilindro, mas também o valor dos *leverarms*. Esses valores são obtidos durante a calibração da câmara e estão originalmente no sistema de referência da câmara mestre (referência). Portanto, é preciso transformá-los para o sistema de referência do cilindro para que possam ser subtraídos das coordenadas medidas no referencial do cilindro dando origem ao vetor $r_{c_k}^{cil}$. Estes vetores correspondem às coordenadas de cada câmara no sistema da câmara mestre. Essa transformação é realizada utilizando a inversa da matriz de rotação entre o cilindro e a câmara de referência ($R_{cil}^{c_{ref}}$) (ou sua transposta).

$$r_{c_k}^{cil} = r_{c_{ref}}^{cil} - ((R_{cil}^{c_{ref}})^{-1} \cdot r_{c_{ref}}^{c_k}) \quad (3.8)$$

onde:

$r_{c_{ref}}^{c_k}$ é a translação (*leverarm*) entre a câmara mestre e a câmara c_k no referencial da câmara mestre (obtidas na calibração ou por medição direta);

$R_{cil}^{c_{ref}}$ é a matriz de rotação do cilindro em relação à câmara de referência (mestre);

$r_{c_{ref}}^{cil}$ é o vetor das coordenadas (x, y, z) obtido pela transformação da coluna/linha, medido na imagem, no referencial do cilindro;

$r_{c_k}^{cil}$ é o vetor das coordenadas calculadas do objeto medido em relação a câmara c_k no referencial do cilindro.

Na Figura 19, estão representados os vetores que são utilizados para determinar o vetor $r_{c_k}^{cil}$. Esse vetor é fundamental para identificar o objeto projetado no cilindro, representando pelo ponto P_{cil} . A coordenada desse objeto é calculada com base na sua coluna/linha na imagem, e é transformada para o sistema de coordenadas do cilindro $([x \ y \ z]^T)$ utilizando as Equações 3.2 a 3.7. O resultado dessa transformação é o vetor $r_{c_{ref}}^{cil}$. Os valores de *leverarm* ($r_{c_{ref}}^{c_k}$) são obtidos na Tabela 4 a partir do ângulo φ calculado na Equação 3.4.

O centro do cilindro é representado pelo ponto C , que coincide com a posição da câmara de referência (c_{ref}).

Para obter uma identificação precisa do objeto no cilindro, é essencial calcular o vetor $r_{c_k}^{cil}$ ao invés de usar diretamente a projeção do vetor $r_{c_{ref}}^{cil}$, caso contrário, haveria um erro no vetor de

visada do objeto, devido à posição da câmara. O vetor $r_{c_k}^{cil}$ é calculado da mesma maneira que foi usado na geração do panorama para o ponto específico desejado. Portanto, é fundamental realizar esse cálculo para garantir a precisão na identificação do objeto medindo no panorama.

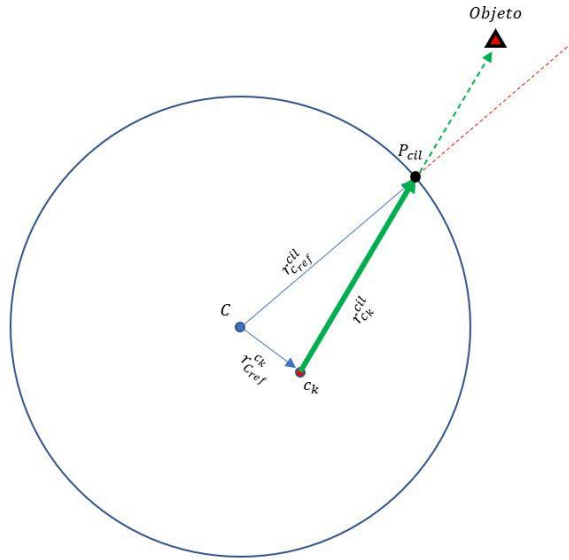


Figura 19 - Cálculo dos utilizados para determinar o objeto identificado na interseção.

Após a obtenção do vetor $r_{c_k}^{cil}$ no referencial do cilindro, ele precisa ser transformado para o sistema de referência do terreno, o que pode ser feito através de uma sequência de transformações que envolve a conversão para o sistema da câmara de referência e, em seguida, a conversão para o sistema de referência do terreno.

$$r_{c_k}^m = (R_m^{c_{ref}})^{-1} \cdot R_{cil}^{c_{ref}} \cdot r_{c_k}^{cil} \quad (3.9)$$

na qual:

$r_{c_k}^{cil}$ é o vetor das coordenadas medidas em relação a câmara c_k ;

$R_{cil}^{c_{ref}}$ é a matriz de rotação do cilindro em relação à câmara de referência (mestre);

$R_m^{c_{ref}}$ é a matriz de rotação do sistema de coordenadas do terreno em relação a câmara mestre;

$r_{c_k}^m$ é o vetor das coordenadas medidas no referencial do terreno;

O vetor medido no panorama e convertido para o referencial do terreno ($r_{c_k}^m$) pode ser descrito da seguinte maneira: $[u \ v \ w]^T$.

Para calcular a posição da câmara k no referencial do terreno é necessário utilizar os valores dos *leverarms* relativos entre as câmaras e a câmara de referência. Os valores de *leverarms* são obtidos na calibração da câmara e estão originalmente no sistema de referência da câmara master $r_{c_{ref}}^{c_k}$. Logo, é preciso transformá-los para o sistema de referência do terreno. Essa conversão é realizada utilizando as rotações inversas (matrizes transpostas) do sistema de coordenadas do terreno em relação a câmara de referência, como é mostrado na Equação 3.10.

$$CP_k = CP + (R_m^{c_{ref}})^{-1} \cdot r_{c_{ref}}^{c_k} \quad (3.10)$$

onde:

CP_k é a posição da câmara k no referencial do terreno;

CP é a posição no referencial do terreno da camada mestre (centro do panorama);

$R_m^{c_{ref}}$ são as rotações do sistema de coordenadas do terreno em relação a câmara mestre;

$r_{c_{ref}}^{c_k}$ é a translação entre a câmara mestre e a câmara c_k no referencial da câmara de referência (*leverarm*).

Uma vez calculadas todas as conversões descritas para os dois panoramas, pode-se aplicar a interseção por mínimos quadrados. A Figura 20 ilustra a relação entre o ponto P_A , a posição das câmaras e os vetores de visada dos panoramas utilizados para realizar a interseção.

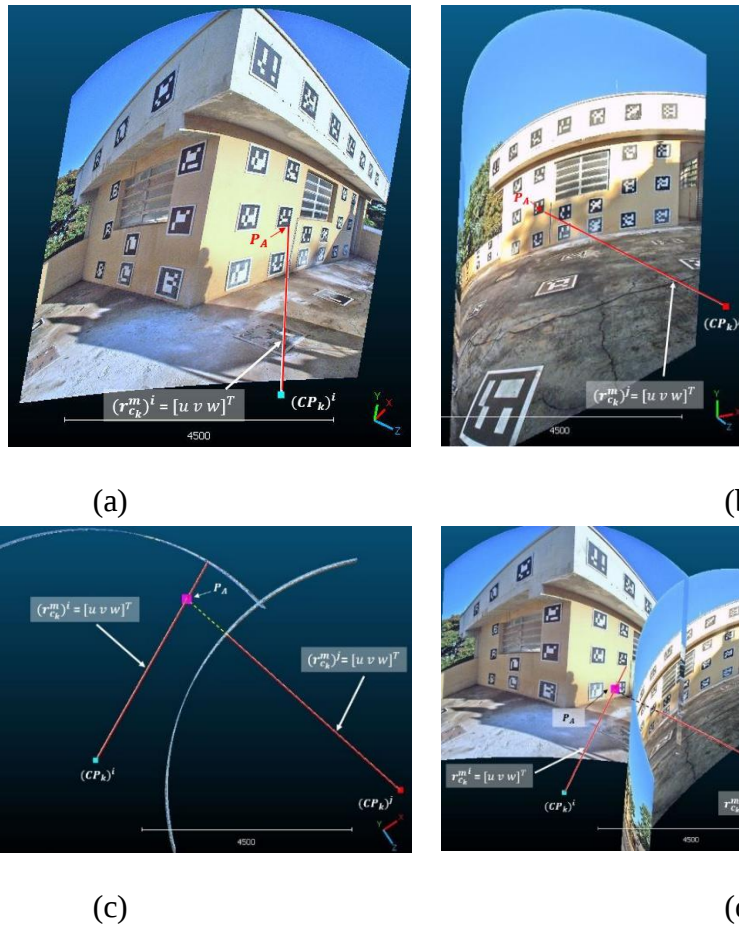


Figura 20 – Posição dos panoramas: (a) panorama da esquerda (*i*), (b) panorama da direita (*j*), (c) vista superior e (d) vista frontal.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA MULTICÂMARAS

A calibração do sistema multicâmaras foi realizada conforme descrito na Seção 2.2.1. A Tabela 5 mostra os dados do processo de calibração relativa das câmaras retirados do relatório de pós processamento do software CMC.

Tabela 5 - Dados do processo de calibração simultânea de 4 pares de câmaras.

	C1/C2	C1/C3	C1/C4	C1/C5
Número de imagens	127	105	128	124
Número de pontos medidos nas imagens	27029	22899	25566	27321
Número de pontos de apoio	3	3	3	3
Número de pontos fotogramétricos	3231	2971	3254	3353
Número de pontos de verificação	3231	2971	3254	3353
Número total de pontos no espaço objeto	6465	5945	6511	6709
Número de observações	54058	45798	51132	54642
Número de equações	54058	45798	51132	54642
Número de parâmetros	10480	9568	10555	10828
Número de injunções	10628	9620	10707	10968
Graus de Liberdade	54206	45850	51284	54782
Variância da unidade de peso <i>a priori</i>	1	1	1	1
Variância da unidade de peso <i>a posteriori</i>	0,738	0,542	0,447	0,578

Como primeira análise, pode-se observar que a variância da observação de peso unitário (sigma *a posteriori*) sempre se manteve menor do que a variância *a priori* em todas as calibrações relativas, o que significa que os desvios padrões atribuídos às observações (0,5 pixel), foram consideradas maiores do que as estimadas, caracterizando um bom resultado. A medição das coordenadas dos pontos fotogramétricos foi realizada com precisão subpixel pelo software Metashape.

Nas próximas seções serão mostrados e discutidos os resultados referentes aos parâmetros de orientação interior, os parâmetros de orientação exterior das câmaras e os parâmetros de orientação relativa entre as câmaras.

4.1.1. ORIENTAÇÃO INTERIOR

Os parâmetros de orientação interior da câmara 1 (C1) foram estimados quatro vezes, já que ela foi usada como câmara mestre em todas as calibrações relativas. As Tabelas 6, 7, 8 e 9 apresentam os parâmetros de orientação interior estimados para cada par de processamento.

Tabela 6 – Parâmetros de OI da C1 e C2 estimados no processo relativo entre elas.

	C1		C2	
	Valores estimados	Desvios Padrão estimados	Valores estimados	Desvios Padrão estimados
f (mm)	6,2424	0,0005 (0,1 pixel)	6,2272	0,0004 (0,1 pixel)
x_0 (mm)	-0,06569	0,0005 (0,1 pixel)	-0,089887	0,00044 (0,09 pixel)
y_0 (mm)	-0,01080	0,00032 (0,07 pixel)	-0,00693	0,00030 (0,06 pixel)
k_1 (mm ⁻²)	-3,303E-03	7,405E-06	-3,446E-03	6,826E-06
k_2 (mm ⁻⁴)	5,384E-05	3,456E-07	5,546E-05	3,167E-07
k_3 (mm ⁻⁶)	-2,393E-07	4,900E-09	-2,491E-07	4,600E-09
p_1 (mm ⁻¹)	-1,041E-04	4,261E-06	-3,921E-05	3,789E-06
p_2 (mm ⁻¹)	1,937E-05	2,937E-06	6,272E-05	2,601E-06

Tabela 7 – Parâmetros de OI da C1 e C3 no processo relativo entre elas.

	C1		C3	
	Valores estimados	Desvios Padrão estimados	Valores estimados	Desvios Padrão estimados
f (mm)	6,24216	0,00047 (0,09 pixel)	6,26250	0,00051 (0,1 pixel)
x_0 (mm)	-0,06685	0,00044 (0,09 pixel)	0,064499	0,0004 (0,09 pixel)
y_0 (mm)	-0,01001	0,00043 (0,06 pixel)	0,021203	0,00034 (0,07 pixel)
k_1 (mm ⁻²)	-3,301E-03	6,426E-06	-3,169E-03	7,790E-06
k_2 (mm ⁻⁴)	5,376E-05	2,992E-07	4,898E-05	4,051E-07
k_3 (mm ⁻⁶)	-2,383E-07	4,300E-09	-1,816E-07	6,400E-09
p_1 (mm ⁻¹)	-1,144E-04	3,691E-06	6,570E-05	3,705E-06
p_2 (mm ⁻¹)	2,385E-05	2,536E-06	-2,577E-05	2,940E-06

Tabela 8 – Parâmetros de OI da C1 e C4 no processo relativo entre elas.

	C1		C4	
	Valores estimados	Desvios Padrão estimados	Valores estimados	Desvios Padrão estimados
f (mm)	6,24286	0,00040 (0,08 pixel)	6,23782	0,00038 (0,08pixel)
x_0 (mm)	-0,06670	0,00039 (0,08 pixel)	0,00841	0,00037 (0,08 pixel)
y_0 (mm)	-0,01058	0,00025 (0,05 pixel)	0,04737	0,00026 (0,05 pixel)
k_1 (mm ⁻²)	-3,301E-03	5,731E-06	-3,204E-03	5,604E-06
k_2 (mm ⁻⁴)	5,378E-05	2,661E-07	4,969E-05	2,653E-07
k_3 (mm ⁻⁶)	-2,386E-07	3,800E-09	-1,942E-07	3,900E-09
p_1 (mm ⁻¹)	-1,121E-04	3,309E-06	-5,718E-05	3,141E-06
p_2 (mm ⁻¹)	2,034E-05	2,266E-06	-3,308E-06	2,321E-06

Tabela 9 – Parâmetros de OI da C1 e C5 no processo relativo entre elas.

	C1		C5	
	Valores estimados	Desvios Padrão estimados	Valores estimados	Desvios Padrão estimados
f (mm)	6,24281	0,00044 (0,09 pixel)	6,22583	0,00044 (0,09 pixel)
x_0 (mm)	-0,06580	0,00044 (0,09 pixel)	0,03505	0,00043 (0,09 pixel)
y_0 (mm)	-0,00999	0,00028 (0,06 pixel)	-0,06985	0,00031 (0,06 pixel)
k_1 (mm ⁻²)	-3,296E-03	6,531E-06	-3,367E-03	6,510E-06
k_2 (mm ⁻⁴)	5,356E-05	3,052E-07	5,283E-05	3,207E-07
k_3 (mm ⁻⁶)	-2,349E-07	4,300E-09	-2,189E-07	4,900E-09
p_1 (mm ⁻¹)	-1,064E-04	3,771E-06	-1,948E-05	3,953E-06
p_2 (mm ⁻¹)	2,419E-05	2,566E-06	-2,982E-05	2,609E-06

Analisando as Tabelas 6, 7, 8 e 9 nota-se que não há desvio padrão maior do que os valores de cada parâmetro, e seus efeitos são menores que os erros de medida, logo todos os parâmetros devem ser considerados significativos. Ainda sobre os valores de distância focal, x_0 e y_0 , observa-se que os desvios-padrão em pixel foram menores do que o erro de medida (0,5 pixel).

Em virtude da câmara 1 ter sido calibrada quatro vezes, a Tabela 10 apresenta os parâmetros médios e suas variações das quatro calibrações para investigar se há alguma calibração com parâmetros muito discrepantes das demais.

Tabela 10 – Parâmetros estimados para a câmara 1 em todas a calibrações.

Câmara 1						
Valores Calculados	Com C2	Com C3	Com C4	Com C5	Média	Desvio Padrão da média
f (mm)	6,24241	6,24216	6,24286	6,24281	6,24256	0,00028
x_0 (mm)	-0,06569	-0,06685	-0,06670	-0,06580	-0,06626	0,00052
y_0 (mm)	-0,01080	-0,01001	-0,01058	-0,00999	-0,01035	0,00035
k_1 (mm ⁻²)	-3,303E-03	-3,301E-03	-3,301E-03	-3,296E-03	-3,303E-03	-3,301E-03
k_2 (mm ⁻⁴)	5,384E-05	5,376E-05	5,378E-05	5,356E-05	5,384E-05	5,376E-05
k_3 (mm ⁻⁶)	-2,393E-07	-2,383E-07	-2,386E-07	-2,349E-07	-2,393E-07	-2,383E-07
p_1 (mm ⁻¹)	-1,040E-04	-1,140E-04	-1,120E-04	-1,060E-04	-1,040E-04	-1,140E-04
p_2 (mm ⁻¹)	1,900E-05	2,400E-05	2,000E-05	2,400E-05	1,900E-05	2,400E-05

Observa-se que os parâmetros foram similares nas quatro calibrações. Neste contexto, para determinar qual grupo de parâmetros será usado para a câmara 1, foram analisados os desvios-padrão dos parâmetros médios (Tabela 10) e comparados com os desvios-padrão da calibração que obteve o menor valor desses desvios-padrão, no caso, os valores do par de calibração da câmara 1 com câmara 3.

Tabela 11 – Diferença dos desvios-padrão entre a média das calibrações e da calibração entre câmara 1 e câmara 3.

Parâmetros	Desvios das médias das calibrações	Desvios da calibração entre C1 e C3	Diferença absoluta
f (mm)	0,00028	0,00040	0,00011
x_0 (mm)	0,00052	0,00039	0,00013
y_0 (mm)	0,00035	0,00025	9,904E-05
k_1 (mm ⁻²)	2,509E-06	5,731E-06	3,222E-06
k_2 (mm ⁻⁴)	1,050E-07	2,660E-07	1,609E-07
k_3 (mm ⁻⁶)	2,000E-09	4,000E-09	2,101E-09
p_1 (mm ⁻¹)	4,178E-06	3,309E-06	8,697E-07
p_2 (mm ⁻¹)	2,112E-06	2,266E-06	1,541E-07

Analisando a Tabela 11, conclui-se que os valores são compatíveis, podendo-se utilizar qualquer grupo de parâmetros estimados dos pares para a câmara 1. Porém, opta-se por empregar os parâmetros provenientes da calibração do par câmara 1 e câmara 3, já que são os valores com menor desvio-padrão estimado.

As correlações entre os parâmetros de orientação interior das câmaras calibradas são mostradas nas Tabelas 12, 13, 14, 15 e 16.

Tabela 12 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior C1.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
f	1	0	-0,06	-0,34	0,38	-0,33	-0,03	-0,05
x_0		1	0,01	-0,03	0,03	-0,01	0,86	0,04
y_0			1	0,03	-0,03	0,03	0,01	0,58
k_1				1	-0,94	0,87	-0,04	-0,07
k_2					1	-0,98	0,03	0,04
k_3						1	-0,02	-0,03
p_1							1	0,03
p_2								1

Tabela 13 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C2.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
f	1	0	0,04	-0,35	0,37	-0,31	-0,05	0,01
x_0		1	0,08	-0,01	-0,02	0,04	0,87	0,05
y_0			1	0,03	-0,03	0,04	0,09	0,57
k_1				1	-0,94	0,87	-0,02	-0,03
k_2					1	-0,98	-0,01	0,03
k_3						1	0,02	-0,04
p_1							1	0,05
p_2								1

Tabela 14 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C3.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
f	1	0	-0,03	-0,4	0,41	-0,36	-0,01	-0,02
x_0		1	0,04	0	0,01	0	0,85	0,05
y_0			1	-0,01	0	0,01	0,03	0,7
k_1				1	-0,95	0,88	-0,03	-0,06
k_2					1	-0,98	0,02	0,04
k_3						1	-0,01	-0,04
p_1							1	0,04
p_2								1

Tabela 15 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C4.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
f	1	0,05	-0,06	-0,35	0,35	-0,27	0,01	0,01
x_0		1	0,03	0,02	0,01	-0,02	0,86	0,06
y_0			1	0	0	0,01	0,03	0,63
k_1				1	-0,94	0,86	0	-0,07
k_2					1	-0,97	0,02	0,05
k_3						1	-0,02	-0,05
p_1							1	0,04
p_2								1

Tabela 16 - Coeficientes de correlação para os parâmetros de orientação interior da C5.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
f	1	-0,03	-0,06	-0,35	0,37	-0,31	-0,03	-0,01
x_0		1	0,05	-0,02	0,03	-0,04	0,89	0,03
y_0			1	0,01	-0,01	0	0,04	0,54
k_1				1	-0,94	0,87	-0,04	-0,05
k_2					1	-0,98	0,03	0,03
k_3						1	-0,03	-0,03
p_1							1	0,02
p_2								1

Nas Tabelas 12, 13, 14, 15 e 16 foram realçadas em amarelo as correlações que excedem 70%. De modo particular, os resultados da calibração revelaram que a maioria das correlações entre os parâmetros de orientação interior não atingiu esse limite, situando-se abaixo de 70%, com exceção da correlação entre p_1 com x_0 que ficaram entre 0,85 e 0,89. A correlação entre os parâmetros de distorção radial k_1 com k_2 foram em média de -0,94, k_1 com k_3 em média 0,86 e k_2 com k_3 foi em média de -0,98, o que é comum em todos os processos de calibração.

As correlações entre os parâmetros de orientação interior e exterior foram baixas em virtude da variação da distância das estações de coleta para os alvos do campo de calibração em conjunto com a alteração da rotação entre as imagens de uma mesma câmara, como ilustrado na Seção 3.3. As Figuras 21, 22 e 23 apresentam os dez valores mais acentuados das correlações para

cada câmara. A Figura 21 mostra as correlações entre a distância focal e os POEs para cada câmara. As correlações entre o parâmetro x_0 e os POEs são ilustrados na Figura 22. A Figura 23 representa os valores das correlações entre o parâmetro y_0 e os POEs.

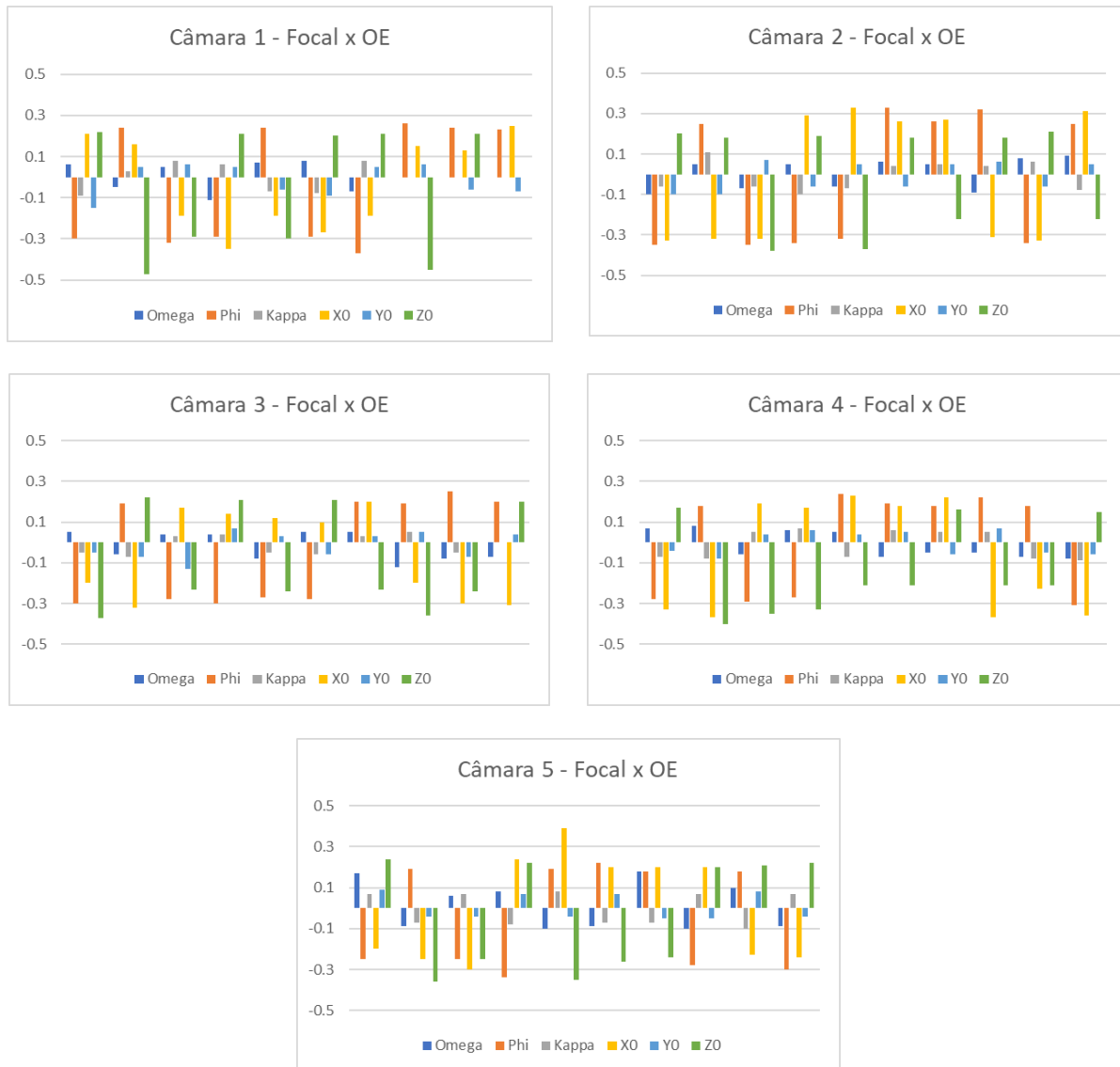


Figura 21 – Valores mais acentuados das correlações entre focal e POE.

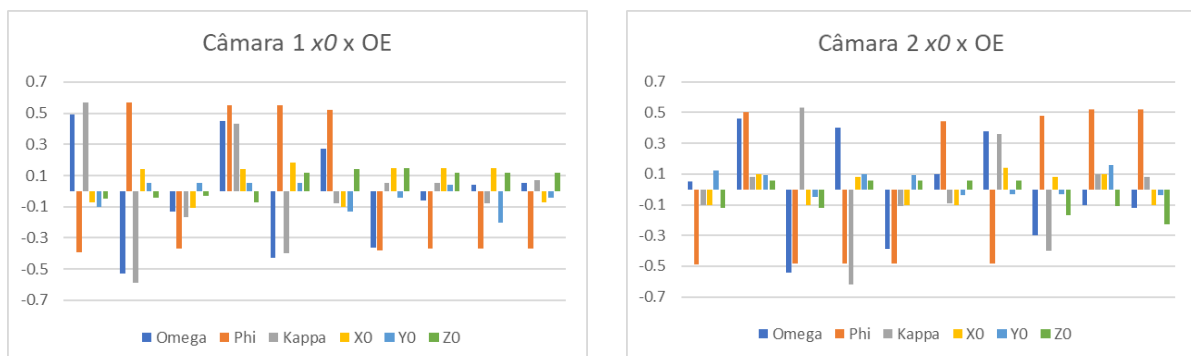
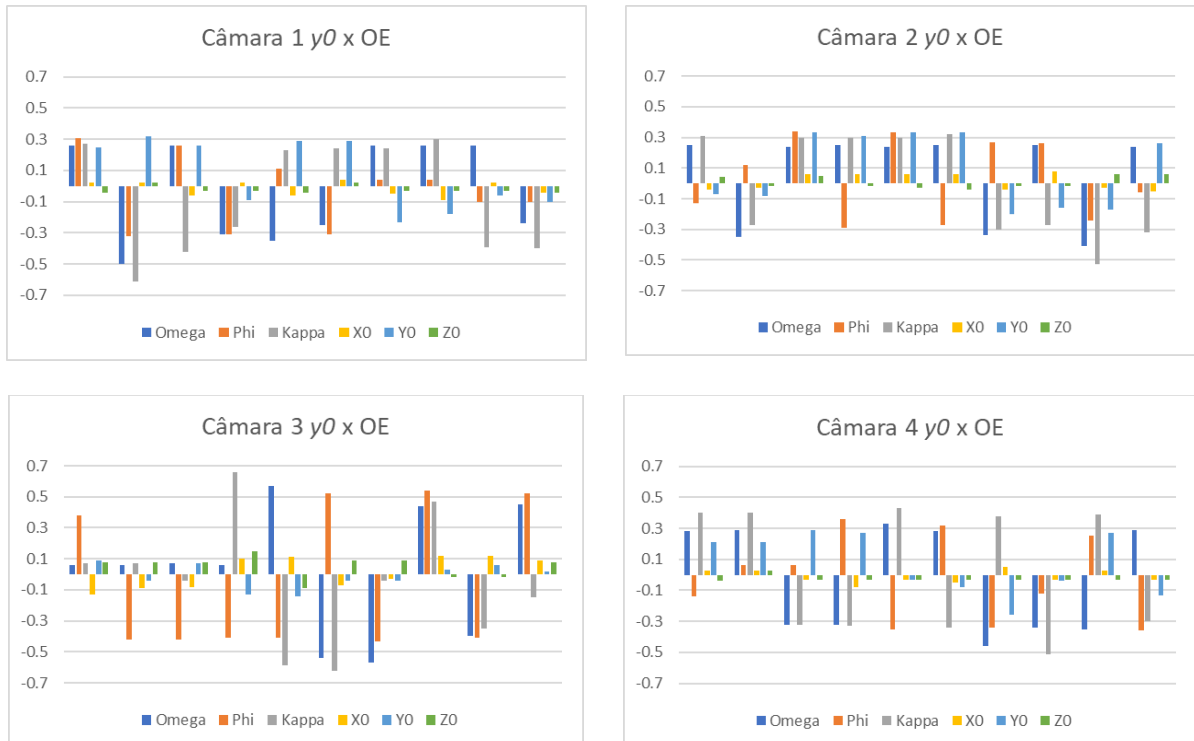




Figura 22 – Valores mais acentuados das correlações entre x_0 e OE.



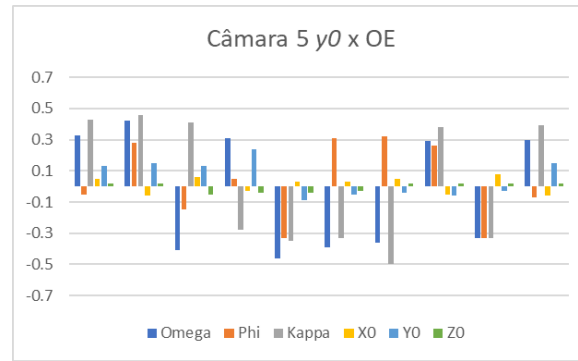
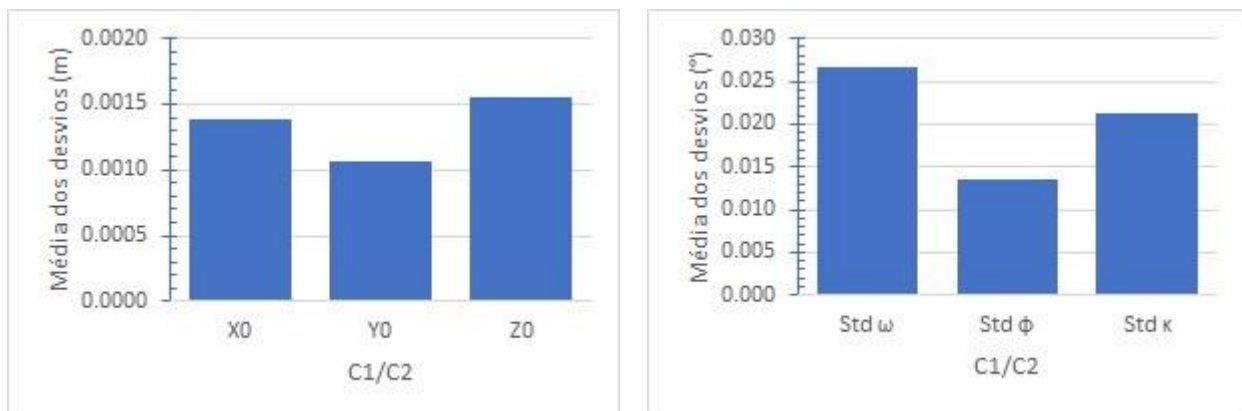


Figura 23 – Valores mais acentuados das correlações entre y_0 e OE.

Os valores de correlação entre a distância focal e os parâmetros de orientação exterior de todas as câmaras ficaram abaixo de 0,5 e acima de -0,5 confirmando a baixa correlação entre os parâmetros. Os valores de correlação entre o parâmetro x_0 e os parâmetros de orientação exterior para todas as câmaras ficaram abaixo de 0,65 e acima de -0,65. Para todas as câmaras a correlação máxima entre y_0 e os parâmetros de orientação exterior ficaram abaixo de 0,67 e a mínima acima de -0,63.

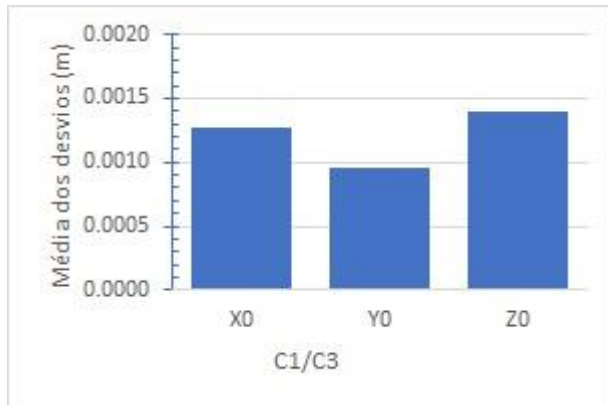
4.1.2. ORIENTAÇÃO EXTERIOR

Os desvios padrão dos parâmetros de orientação exterior estimados são mostrados na Figura 24.

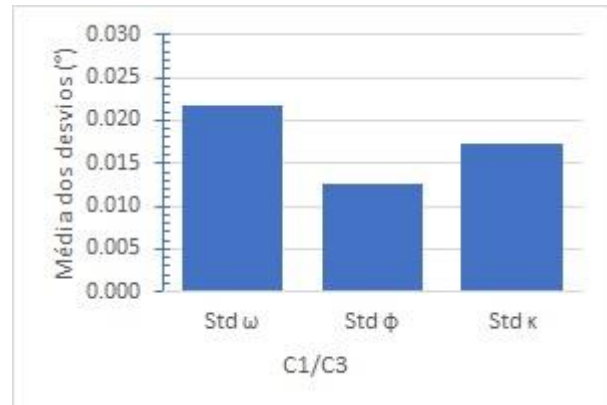


(a)

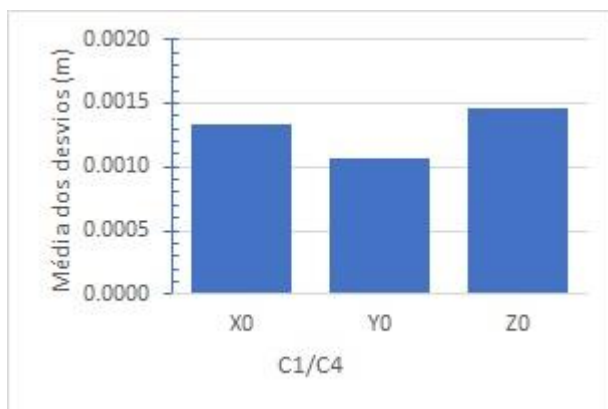
(b)



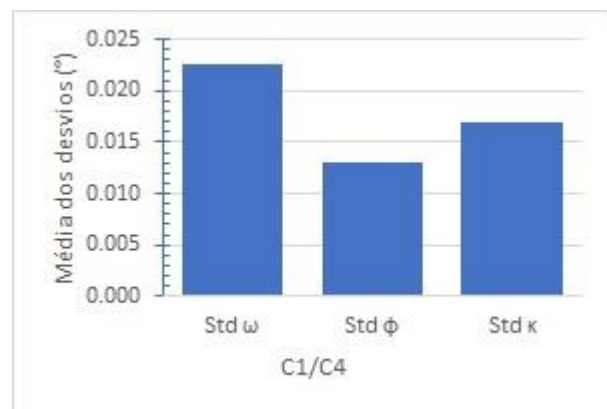
(c)



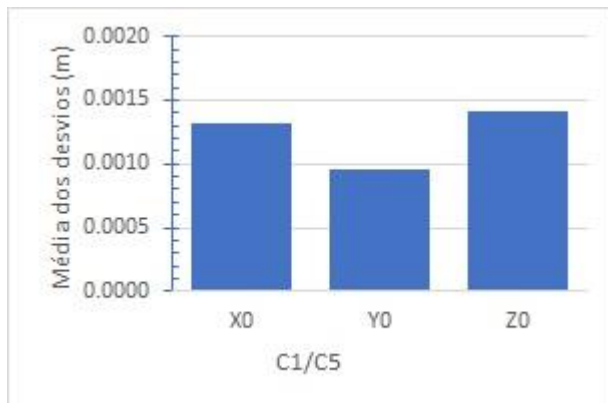
(d)



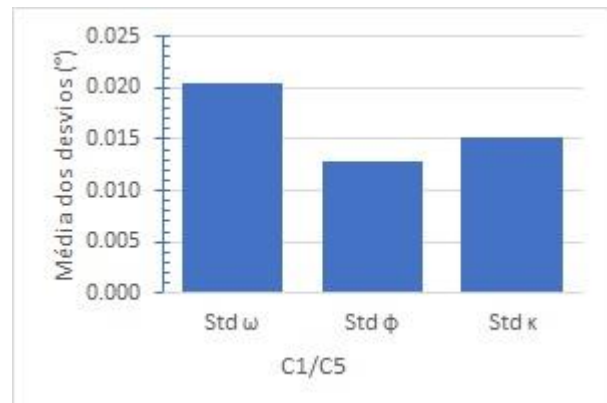
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 24 – Média dos desvios padrão, em metros, dos parâmetros de posição (X_0 , Y_0 e Z_0) e as média dos desvios padrão em graus decimais dos parâmetros de atitude (ω , ϕ e κ) calculados entre todos os pares de câmaras: (a) e (b) valores do par 1 e 2, (c) e (d) valores do par 1 e 3, (e) e (f) valores do par 1 e 4 e (g) e (h) valores do par 1 e 5.

Como pode-se observar na Figura 24 os desvios padrão das coordenadas estimadas dos centros perspectivos ficaram abaixo de 1,6 mm. A dimensão do pixel na unidade no espaço objeto

das imagens foi, em média, de 2,5 mm. Nesse contexto, os desvios padrão das coordenadas dos CPs foram menores que 1 pixel para todas as calibrações realizadas, caracterizando um resultado satisfatório.

Os elementos de orientação relativa médios, calculados com base na orientação exterior das imagens são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Elementos de Orientação Relativa

Par de Imagem (C1 e C2)	$\Delta\omega$ (°)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta\kappa$ (°)	Distância entre CPs (m)
Média	-0,1988	72,3516	0,0605	0,1616
Desvio Padrão	0,1969	0,0729	0,1917	0,0053

Par de Imagem (C1 e C3)	$\Delta\omega$ (°)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta\kappa$ (°)	Distância entre CPs (m)
Média	-179,789	35,761	179,599	0,2617
Desvio Padrão	0,0207	0,0171	0,01474	0,0016

Par de Imagem (C1 e C4)	$\Delta\omega$ (°)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta\kappa$ (°)	Distância entre CPs (m)
Média	180,007	-35,960	180,007	0,2588
Desvio Padrão	0,0154	0,0092	0,0154	0,0007

Par de Imagem (C1 e C5)	$\Delta\omega$ (°)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta\kappa$ (°)	Distância entre CPs (m)
Média	-0,469	-71,978	-0,536	0,1588
Desvio Padrão	0,0249	0,0086	0,0270	0,0006

Para um controle externo da acurácia das calibrações relativas foram comparados os valores das distâncias entre os CPs calibrados com os valores *a priori* obtidos do projeto de montagem das câmaras na estrutura do sistema T-Map (Tabela 2). A Tabela 18 apresenta as diferenças:

Tabela 18 – Diferenças entre relativas distâncias entre os CPs da câmara mestre (C1) e das câmaras *Slave* e os valores obtidos durante a montagem pelo fabricante.

Câmaras	Diferença entre valores calibrados e nominais (de projeto) (m)
C1/C2	0,0016
C1/C3	0,0018
C1/C4	0,0011
C1/C5	0,0011

Analisando a Tabela 18, a maior diferença foi do par C1/C3 com 0,0018 m e a menor foi entre o par C1/C4 e C1/C5 com 0,0011 m. Observa-se que a diferença média foi de 0,0014 m, logo pode-se concluir que as calibrações relativas entre as câmaras estão adequadas.

Não foi possível realizar o controle de qualidade externo com pontos de verificação devido às dificuldades de determinar suas coordenadas por processos topográficos.

4.2. GERAÇÃO DO PANORAMA

Para gerar os panoramas, foram utilizados dados de calibração das câmaras, incluindo os Parâmetros de Orientação Relativa entre as câmaras e os Parâmetros de Orientação Exterior e Interior de cada câmara. A determinação de qual câmara será usada para os cálculos é feita de acordo com a Tabela 4. Também é definida a câmara mestra (no caso deste trabalho, a câmara 1). A Tabela 19 mostra os valores utilizados para gerar o panorama. Os valores de largura e altura da imagem panorâmica foram calculados de acordo com a Seção 3.4.

Tabela 19 – Valores utilizados para geração do panorama.

Raio (mm)	Focal (mm)	Largura (pixel)	Altura (pixel)
5000	6,2433	7845	2048

Para cada uma das imagens que farão parte do panorama, é criada uma imagem vazia do tamanho da imagem final. Após todas as transformações e cálculos descritos na Seção 3.4, são obtidas cinco imagens correspondentes a uma parte do panorama pertencente à câmara correspondente. A Figura 25 ilustra um exemplo dessas imagens.



Figura 25 – A esquerda, as imagens originais, a direita, as imagens projetadas em uma superfície cilíndrica.

As imagens são unidas no panorama final de duas maneiras: cortando verticalmente (corte linear) cada imagem de acordo com o limiar definido na Tabela 4 ou mesclando-as com um efeito de *feathering* na sobreposição. A Figura 26 ilustra um exemplo das duas modalidades. Além disso, um recorte é realizado para melhorar a apresentação da imagem, removendo as áreas que não contêm informações relevantes.



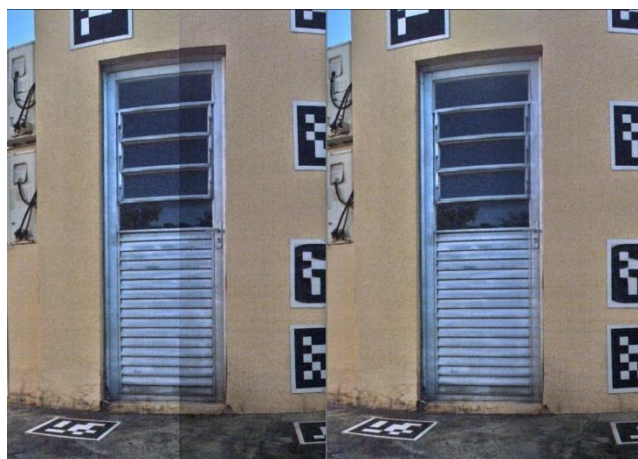
(a)



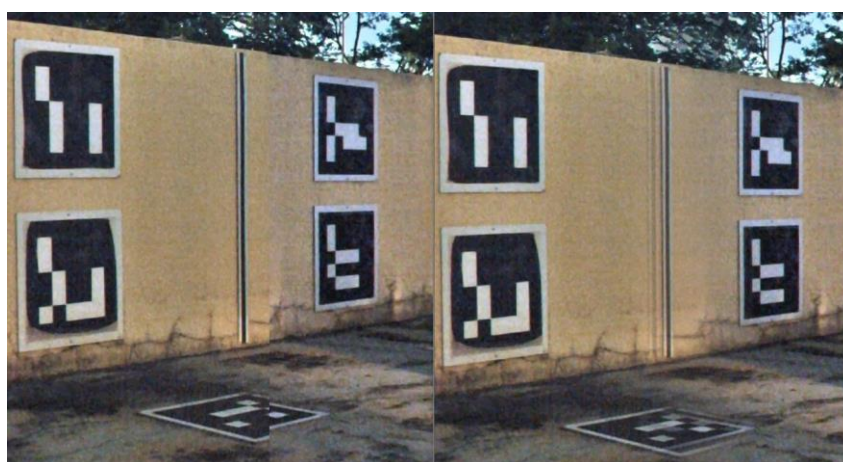
(b)

Figura 26 – Panoramas gerados: (a) sem *feathering*, (b) com *feathering*.

Embora o *feathering* possa criar uma transição suave que é mais agradável aos olhos, há desafios na região de sobreposição. A paralaxe pode tornar difícil a escolha do pixel correto para representar o objeto selecionado para medição. Por outro lado, o panorama criado com o método sem *feathering* (corte linear) não apresenta a mesma qualidade visual, mas fornece informações precisas sobre qual câmara usar ao fazer intersecções fotogramétricas. A Figura 27 ilustra detalhes que demonstram esses dois casos mencionados.



(a)



(b)

Figura 27 – Exemplo de transição dos panoramas gerados.

Na Figura 27a, observa-se que, na região da porta, o panorama gerado sem *feathering* não apresenta continuidade nas linhas da porta, e é possível perceber exatamente onde está a emenda do panorama. Por outro lado, no caso do panorama gerado com *feathering*, a transição de uma imagem para outra não é perceptível, produzindo um efeito mais agradável. Na Figura 27b, a mesma situação se repete. No entanto, se fosse necessário identificar a posição da barra vertical preta no panorama gerado utilizando o método de *feathering*, seria difícil definir qual o pixel ou coluna deveria ser usado para realizar a medição. Em contrapartida, no panorama gerado sem *feathering*, o objeto está bem definido e facilmente identificável.

4.3. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

4.3.1. INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA UTILIZANDO OS PANORAMAS GERADOS

Para testar a precisão da interseção fotogramétrica usando os panoramas gerados, foram utilizados dados de calibração das câmaras, como a orientação relativa entre as câmaras e informações de orientação exterior dos panoramas. Esses dados coincidem com a orientação exterior

da câmara de referência escolhida. Os pontos de verificação do campo de calibração incluem pontos de alvos Aruco. Depois de gerar a imagem panorâmica, um algoritmo foi usado para identificar os alvos e extrair as coordenadas coluna-linha com precisão subpixel de todos os alvos nas imagens panorâmicas. A Figura 28 mostra a identificação dos alvos Aruco nas imagens panorâmicas.



Figura 28 – Alvos Aruco identificados em uma imagem panorâmica.

Foram geradas várias imagens panorâmicas, cada uma representando uma estação no campo de calibração. Um algoritmo foi desenvolvido para calcular automaticamente as interseções. Esse algoritmo varre todos os pontos (alvos Arucos) e verifica em quantos pares de imagens panorâmicas ele aparece realizando a intersecção fotogramétrica.

Na Figura 29, é possível observar a posição das estações em relação ao campo de calibração. Como algumas estações estão muito próximas umas das outras, foi necessário implementar um filtro de distância mínima entre elas. No caso a distância de base mínima utilizada foi de 0.5 metros, além de um ângulo paralático mínimo (20°) entre os feixes de raios (vetores) para realizar a intersecção. Esses dois filtros evitam o cálculo de interseções de raios quase paralelos, que podem comprometer a precisão do processo. Dessa forma, é possível garantir que as interseções realizadas tenham geometria confiável.



(a)



(b)

Figura 29 – Posição das estações em relação ao campo de calibração: (a) Vista superior e (b) vista isométrica do campo.

A localização dos alvos Arucos utilizados para o experimento são mostrados na Figura 30. É importante destacar que esses alvos estão distribuídos em torno do campo e variam de posição nas três coordenadas.

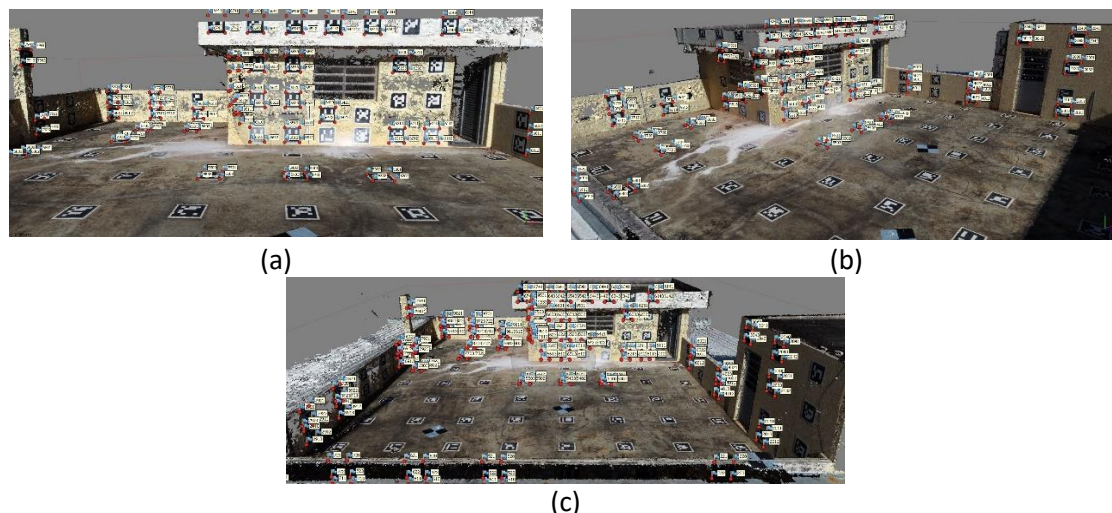


Figura 30 - Posição dos alvos Aruco no campo de calibração: (a) Vista frontal (b) vista isométrica e (c) vista superior.

A fim de avaliar a acurácia das interseções realizadas, foi comparado o resultado do cálculo das interseções com o valor estimado do ponto Aruco correspondente obtido no processo de calibração das câmaras. Essa comparação também permite identificar possíveis erros grosseiros nas interseções.

O experimento utilizou um conjunto de 33 imagens panorâmicas, geradas com um raio de 5 metros, e 217 pontos Aruco, sendo realizadas 20945 medições. Ao final do processo, foram calculadas as discrepâncias entre as coordenadas obtidas da intersecção e as coordenadas de referência dos alvos Aruco (obtidas na calibração original) (ΔX , ΔY e ΔZ). Após a obtenção das discrepâncias, foi calculada a média desses valores para avaliar o erro médio de medição em cada coordenada. Além disso, foi calculado o RMSE (*Root Mean Square Error*), que é uma medida da acurácia das medições em relação às posições reais dos alvos.

Tabela 20 – Média e RMSE dos erros de medidas das intersecções fotogramétricas.

Média ΔX (m)	Média ΔY (m)	Média ΔZ (m)	$RMSE_X$ (m)	$RMSE_Y$ (m)	$RMSE_Z$ (m)
-0,002	-0,001	0,001	0,012	0,003	0,011

A média dos erros na coordenada X foi de -0,002 m e a média dos erros na coordenada Y foi de -0,001 m, enquanto a média dos erros na coordenada Z foi de 0,001 m. Isso sugere que não há uma tendência clara nos erros em nenhuma das coordenadas, pois estas médias estão próximas de zero. O erro médio quadrático indica que, em geral, os erros são muito pequenos em todas as

coordenadas (12 mm em X, 3 mm em Y e 11 mm em Z). Ao examinar os resultados obtidos, é relevante destacar que o RMSE da coordenada Y apresentou uma menor taxa de erro em relação às outras coordenadas. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a componente Y não sofre a influência da paralaxe nem dos *leverarms* determinados na calibração, tornando-se assim menos suscetível a erros que possam ter ocorrido durante a produção do panorama.

Com o objetivo de avaliar a influência do raio escolhido para a geração do panorama, foram geradas as mesmas 33 imagens panorâmicas utilizando dois diferentes valores de raio: 7,5 e 10 m. Em seguida, as mesmas intersecções descritas anteriormente foram realizadas para ambas as configurações. Essa análise é importante para avaliar a sensibilidade dos resultados obtidos em relação ao raio utilizado na geração dos panoramas.

Um exemplo de dez medições realizadas utilizando o alvo 6621, com os mesmos pares de panoramas, com configurações de raios diferentes ($R = 5$, $R = 7,5$ e $R = 10$ m) é mostrado na Tabela 21.

Tabela 21 – Comparação das discrepâncias resultantes das intersecções com diferentes valores de raios (R) na geração dos panoramas.

Alvo	Panorama 1	Panorama 2	Discrepâncias (m)			Diferenças (m)		
			(1) $R=5$	(2) $R=7,5$	(3) $R=10$	(1)-(2)	(1)-(3)	(2)-(3)
6621	pano_75	pano_44	0,012	0,012	0,013	0,000	0,001	0,001
6621	pano_78	pano_05	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000
6621	pano_79	pano_05	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000
6621	pano_83	pano_68	0,008	0,008	0,008	0,000	0,001	0,000
6621	pano_90	pano_79	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000
6621	pano_94	pano_44	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000
6621	pano_105	pano_68	0,008	0,008	0,008	0,000	0,000	0,000
6621	pano_107	pano_73	0,003	0,004	0,003	0,001	0,000	0,000
6621	pano_109	pano_81	0,008	0,008	0,007	0,000	0,001	0,001
6621	pano_112	pano_94	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000

Pode-se notar que a diferença não é significativa nas discrepâncias mesmo variando o raio de geração dos panoramas. As últimas três colunas são as diferenças entre as discrepâncias dos panoramas gerados com raio de 5 para 7,5 (1), 5 para 10 (2) e 7,5 para 10 (3).

A Tabela 22 apresenta uma comparação geral, utilizando as 20945 medições (intersecções), entre as discrepâncias obtidas para as três configurações de raio utilizadas na geração dos panoramas, $R=5$ m, $R=7.5$ m e $R=10$ m.

Tabela 22 - Média das discrepâncias resultantes de todas as intersecções realizadas, com diferentes valores de raios (R) na geração dos panoramas.

Média das discrepâncias (m)		
R = 5 m	R = 7,5 m	R = 10 m
0,011	0,012	0,012

Ao analisar a média das discrepâncias para cada configuração de raio (Tabela 22), nota-se que as diferenças entre elas são pequenas. A média para a configuração de R=5 foi de 0,011 m, para a configuração de R=7.5 foi de 0,012 m e para a configuração de R=10 foi de 0,012 m. De forma geral, os resultados obtidos indicam que a escolha do raio utilizado na geração do panorama não é um fator crítico para a precisão das intersecções, corroborando com o rigor metodológico empregado neste trabalho.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver, implementar e avaliar a geração de imagens panorâmicas por meio de um sistema de múltiplas câmaras, sem a necessidade de aplicação do processo de *stitching*, a fim de preservar a geometria original das imagens. Para atingir este objetivo, foram estudadas técnicas de geração de panoramas, e decidiu-se implementar o método de geração de panorama por meio da modelagem fotogramétrica rigorosa. Para isso, pares de câmaras foram calibrados para estimar as orientações relativas entre uma câmara mestre e as demais câmaras do sistema, bem como os parâmetros de orientação interior e exterior de todas as câmaras. Com os resultados obtidos, pode-se afirmar que os parâmetros de orientação interior de cada câmara, assim como os parâmetros de orientação exterior, foram estimados e podem ser utilizados para finalidades métricas, em particular, para a produção de imagens panorâmicas, que é um dos objetivos deste trabalho. Além disso, a técnica de intersecção fotogramétrica foi aplicada para avaliar a acurácia do método proposto. Os resultados obtidos foram satisfatórios, demonstrando a viabilidade do método proposto para geração de imagens panorâmicas por modelagem fotogramétrica rigorosa.

Ao utilizar a técnica de geração de imagens panorâmicas rigorosa e manter os *leverarms* estimados na calibração das câmaras, é possível preservar a precisão dos dados como se fossem os originais. Para isso, é necessário personalizar o software de medida, utilizando a técnica de intersecção, de forma a identificar a câmara e o *leverarm* que será utilizado para cada parte da imagem panorâmica.

Embora este trabalho tenha apresentado resultados promissores, há possibilidades de aprimoramento em trabalhos futuros. Recomenda-se:

- Gerar os panoramas projetando em uma superfície esférica e avaliar a qualidade das imagens obtidas;
- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com a técnica de stitching;
- Avaliar a precisão das medidas de interseção sem o uso dos *leverarms*, considerando o centro de massa das câmaras como o centro do cilindro;
- Verificar a precisão das medições em panoramas utilizando o sistema de câmaras em condições de trabalho, com georreferenciamento direto;
- Desenvolver um software de GIS e cadastro multifinalitário aplicando a técnica descrita neste trabalho, visando aprimorar a precisão das medições, independentemente do raio escolhido para o panorama ou da distância do objeto a ser identificado.

REFERÊNCIAS

- ALCANTARILLA, P. F.; BARTOLI, A.; DAVISON, A. J. KAZE Features. *In: FITZGIBBON, A.; LAZEBNIK, S.; PERONA, P.; SATO, Y.; SCHMID, C. (org.). Computer Vision – ECCV 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. (Lecture Notes in Computer Science). v. 7577, p. 214–227. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33783-3_16.
- ALMEIDA, J. F. **Ortofoto Digital**. 1989. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.
- ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.
- ARRUDA JÚNIOR, E. R. **Mosaicagem de imagens digitais**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Presidente Prudente, São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2002.
- BAKER, S.; NAYAR, S. K. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. **International journal of computer vision**, v. 35, p. 175–196, 1999.
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; VAN GOOL, L. SURF: Speeded Up Robust Features. *In: LEONARDIS, A.; BISCHOF, H.; PINZ, A. (org.). Computer Vision – ECCV 2006*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. (Lecture Notes in Computer Science). v. 3951, p. 404–417. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/11744023_32.
- BAZAN, W. S. **Calibração de um Sistema Dual de Câmaras Digitais**. 2008. Dissertação - Presidente Prudente, São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2008.
- BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; RUY, R. S. A influência das injunções de orientação relativa na calibração de um sistema dual de câmaras digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 444–466, 2009.
- BENOSMAN, R.; KANG, S. B. (org.). **Panoramic Vision**. New York, NY: Springer New York, 2001. (Monographs in Computer Science). Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-3482-9>. Acesso em: 20 set. 2022.
- BROWN, M.; LOWE, D. Invariant Features from Interest Point Groups. *In: BRITISH MACHINE VISION CONFERENCE 2002*, 2002, Cardiff. **Proceedings of the British Machine Vision Conference 2002**. Cardiff: British Machine Vision Association, 2002. p. 23.1-23.10. Disponível em: <http://www.bmva.org/bmvc/2002/papers/92/index.html>.
- CAMPOS, M.; TOMMASELLI, A.; JUNIOR, J.; HONKAVAARA, E. Geometric model and assessment of a dual-fisheye imaging system. **The Photogrammetric Record**, v. 33, 2018.
- CAPEL, D. **Image Mosaicing and Super-resolution**. London: Springer London, 2004. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-384-8>.
- CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The Development of Camera Calibration Methods and Models. **The Photogrammetric Record**, v. 16, n. 91, p. 51–66, 1998.
- CRAMER, M. **Digital camera calibration: EuroSDR Network digital camera calibration final report**. Frankfurt, Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2009. (Official publication, v. 55).

DENG, Y.; ZHANG, T. Generating panorama photos. *In: ITCOM 2003, 2003, Orlando, FL. (J. R. Smith, S. Panchanathan, & T. Zhang, Org.)Internet Multimedia Management Systems IV.* Orlando, FL: SPIE, 2003. p. 270–279. Disponível em: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=831295>.

DETCHEV, I.; HABIB, A.; MAZAHARI, M.; LICHTI, D. Practical In Situ Implementation of a Multicamera Multisystem Calibration. **Journal of Sensors**, v. 2018, p. 1–12, 2018.

FANGI, G.; NARDINOCCHI, C. Photogrammetric Processing of Spherical Panoramas. **The Photogrammetric Record**, v. 28, n. 143, p. 293–311, 2013.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381–395, 1981.

FÖRSTNER, W.; GÜLCH, E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. **Proc. ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data**, v. 6, p. 281–305, 1987.

FRASER, C. S. Automated Processes in Digital Photogrammetric Calibration, Orientation, and Triangulation. **Digital Signal Processing**, v. 8, n. 4, p. 277–283, 1998.

FRASER, C. S. Digital camera self-calibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 4, p. 149–159, 1997a.

FRASER, C. S. Innovations in automation for vision metrology systems. **The Photogrammetric Record**, v. 15, n. 90, p. 901–911, 1997b.

GALO, M. **Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo**. 2003. 282 f. PhD Thesis - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2003.

GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. 1993. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

GALO, M.; TOZZI, C. L. Extração de pontos com acurácia subpixel em imagens digitais. **Série em Ciências Geodésicas-Pesquisa em Ciências Geodésicas. Curitiba**, v. 2, p. 289–313, 2002.

GHOSH, D.; KAABOUC, N. A survey on image mosaicing techniques. **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v. 34, p. 1–11, 2016.

GONÇALVES, H.; CORTE-REAL, L.; GONÇALVES, J. A. Automatic Image Registration Through Image Segmentation and SIFT. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 7, p. 2589–2600, 2011.

HABIB, A. F.; SHIN, S.; MORGAN, M. New approach for calibrating off-the-shelf digital cameras. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3/A, p. 144–149, 2002.

HARRIS, C.; STEPHENS, M. A Combined Corner and Edge Detector. *In: ALVEY VISION CONFERENCE 1988, 1988, Manchester. Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988.*

Manchester: Alvey Vision Club, 1988. p. 23.1-23.6. Disponível em: <http://www.bmva.org/bmvc/1988/avc-88-023.html>.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. Multiple View Geometry in Computer Vision, Second Edition. p. 673, 2004.

HUANG, F.; KLETTE, R.; SCHEIBE, K. **Panoramic Imaging: Sensor-Line Cameras and Laser Range-Finders**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470998267>.

IRANI, M.; ANANDAN, P.; HSU, S. Mosaic based representations of video sequences and their applications. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 1995, Cambridge, MA, USA. **Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision**. Cambridge, MA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1995. p. 605–611. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/466883/>.

JI, S.; SHI, Y.; SHI, Z.; BAO, A.; LI, J.; YUAN, X.; DUAN, Y.; SHIBASAKI, R. Comparison of Two Panoramic Sensor Models for Precise 3D Measurements. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 80, n. 3, p. 229–238, 2014.

JIANG, Z.; LIU, M. Fast image mosaic algorithm based on the improved Harris-SIFT algorithm. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOTONICS AND OPTICS, 2015, Shanghai, China. **Anais [...]**. Shanghai, China: SPIE, 2015. p. 86–92. Disponível em: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2195450>.

KHORAMSHAHI, E.; CAMPOS, M.; TOMMASELLI, A.; VILIJANEN, N.; MIELONEN, T.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A.; HONKAVAARA, E. Accurate Calibration Scheme for a Multi-Camera Mobile Mapping System. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, p. 2778, 2019.

KRAUS, K.; KOPLIKU, N. **Fotogrametria**. : Albpaper, 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=EDHEzQEACAAJ>.

KUMAR, R.; ANANDAN, P.; IRANI, M.; BERGEN, J.; HANNA, K. Representation of scenes from collections of images. In: IEEE WORKSHOP ON REPRESENTATION OF VISUAL SCENES (IN CONJUNCTION WITH ICCV'95), 1995, Cambridge, MA, USA. **Anais [...]**. Cambridge, MA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1995. p. 10–17. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/476847/>.

KWIATEK, K.; TOKARCZYK, R. Immersive photogrammetry in 3D modelling: Fotogrametria immersyjna w modelowaniu 3D. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 9, n. 2, p. 51, 2015.

KWIATEK, K.; TOKARCZYK, R. Photogrammetric 3D Measurements Based on Immersive Panoramas. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 12, n. 4, p. 55, 2018.

LADYBUG. **Ladybug5+**. 2022. Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/ladybug5plus/?vertical=machine+vision&segment=iis>. Acesso em: 20 out. 2022.

LI, B.; GUO, C. Application of Image Stitching in the Scene Investigation of Traffic Accident. **DEStech Transactions on Engineering and Technology Research**, 2016.

LIN, M.; XU, G.; REN, X.; XU, K. Cylindrical panoramic image stitching method based on multi-cameras. *In: 2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBER TECHNOLOGY IN AUTOMATION, CONTROL, AND INTELLIGENT SYSTEMS (CYBER)*, 2015, Shenyang, China. **Anais [...]**. Shenyang, China: IEEE, 2015. p. 1091–1096. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7288097/>.

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.

LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. *In: PROCEEDINGS OF THE SEVENTH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION*, 1999, Kerkyra, Greece. **Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision**. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999. p. 1150–1157 v.2. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/790410/>.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 1987.

LUHMANN, T.; TECKLENBURG, W. 3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. **ISPRS Archives**, v. 34, p. 5, 2004.

MAAS, H.-G. Close-range photogrammetry sensors. *In: ADVANCES IN PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 2008. **Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science: 2008 ISPRS Congress Book**. : CRC Press Boca Raton, FL, USA, 2008. p. 63–72.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

MILLS, A.; DUDEK, G. Image stitching with dynamic elements. **Image and Vision Computing**, v. 27, n. 10, p. 1593–1602, 2009.

MORAVEC, H. P. **Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover**. : Stanford University, 1980.

MOSAIC. **Mosaic51**. 2022. Disponível em: <https://www.mosaic51.com/cameras/mosaic-51/?playlist=5759db8&video=9546e06>. Acesso em: 20 out. 2022.

NI, X. *et al.* A fully automatic registration approach based on contour and SIFT for HJ-1 images. **Science China Earth Sciences**, v. 55, n. 10, p. 1679–1687, 2012.

PAN, H.; ZHANG, Y.; LI, C.; WANG, H. An adaptive harris corner detection algorithm for image mosaic. **Chinese Conference on Pattern Recognition**, p. 53–62, 2014.

PARIAN, J. A. **Sensor modeling, calibration and point positioning with terrestrial panoramic cameras**. 2007. PhD Thesis - ETH Zurich, 2007.

PARIAN, J. A.; GRUEN, A. A refined sensor model for panoramic cameras. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 2, p. 1–12, 2004.

PARIAN, J. A.; GRUEN, A. Self-Calibrating Network Analysis for Panoramic Cameras by Heuristic Simulation. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5, p. 230–235, 2006.

PATEL, H. M.; PATEL, P. J.; PATEL, S. G. Comprehensive Study And Review Of Image Mosaicing Methods. **International Journal of Engineering Research**, v. 1, n. 9, 2012.

POINT GREY RESEARCH INC. **Overview of the Ladybug Image Stitching Process**. 2022. Disponível em: <https://www.flir.com/support-center/iis/machine-vision/application-note/overview-of-the-ladybug-image-stitching-process/>. Acesso em: 15 dez. 2022.

RAU, J. Y.; SU, B. W.; HSIAO, K. W.; JHAN, J. P. Systematic calibration for a backpacked spherical photogrammetry imaging system. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 41, p. 695–702, 2016.

REISS, M. L.; TOMMASELLI, A. M. A low-cost 3D reconstruction system using a single-shot projection of a pattern matrix. **The Photogrammetric Record**, v. 26, n. 133, p. 91–110, 2011.

RICHTER, K.; MADER, D.; SEIDL, K.; MAAS, H.-G. Development of a geometric model for an all-reflective camera system. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 86, p. 41–51, 2013.

RUY, R. S. **Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmaras digitais de médio formato**. 2008. 229 f. - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

SCHEIBE, K.; KORSITZKY, H.; REULKE, R.; SCHEELE, M.; SOLBRIG, M. EYESCAN - A High Resolution Digital Panoramic Camera. In: KLETTE, R.; PELEG, S.; SOMMER, G. (org.). **Robot Vision**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. (Lecture Notes in Computer Science). v. 1998, p. 77–83. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/3-540-44690-7_10. Acesso em: 21 set. 2022.

SCHMEING, B.; LÄBE, T.; FÖRSTNER, W. Trajectory Reconstruction Using Long Sequences of Digital Images From an Omnidirectional Camera. **DGPF Tagungsband**, v. 20, 2011.

SCHNEIDER, D.; SCHWALBE, E.; MAAS, H.-G. Validation of geometric models for fisheye lenses. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 3, p. 259–266, 2009.

SHI, Y.; JI, S.; SHI, Z.; DUAN, Y.; SHIBASAKI, R. GPS-supported visual SLAM with a rigorous sensor model for a panoramic camera in outdoor environments. **Sensors**, v. 13, n. 1, p. 119–136, 2012.

SHUM, H.-Y.; SZELISKI, R. Construction of Panoramic Image Mosaics with Global and Local Alignment. In: BENOSMAN, R.; KANG, S. B. (org.). **Panoramic Vision**. New York, NY: Springer New York, 2001. (Monographs in Computer Science). p. 227–268. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-3482-9_13.

SILVA, S. L. A. D.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados do tipo aruco na automação do processo de calibração de câmaras. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 3, p. 626–646, 2014.

SPACEK, L. **Omnidirectional perspective and stereopsis with conical mirrors.** : Research Report CTU–CMP–2003–12, Center for Machine Perception, K13133 FEE Czech Technical University, Prague, Czech Republic, 2003.

TOMMASELLI, A.; GALO, M.; BAZAN, W.; RUY, R.; JUNIOR, J. M. Simultaneous calibration of multiple camera heads with fixed base constraint. **Proceedings of the 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology**, 2009.

TOMMASELLI, A.; GALO, M.; DE MORAES, M.; MARCATO, J.; CALDEIRA, C.; LOPES, R. Generating Virtual Images from Oblique Frames. **Remote Sensing**, v. 5, n. 4, p. 1875–1893, 2013.

TRAJKOVIĆ, M.; HEDLEY, M. Fast corner detection. **Image and Vision Computing**, v. 16, n. 2, p. 75–87, 1998.

WANG, V. T.; HAYES, M. P. Synthetic Aperture Sonar Track Registration Using SIFT Image Correspondences. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 42, n. 4, p. 901–913, 2017.

WANG, Z.; YANG, Z. Review on image-stitching techniques. **Multimedia Systems**, v. 26, n. 4, p. 413–430, 2020.

WONG, K. W. Basic Mathematics of Photogrammetry. *In*: SLAMA, C. C.; THEURER, C.; HENRIKSEN, S. W. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 4. ed. Falls Church, Va: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1980. p. 37–69.

XING, Y.; ZHANG, D.; ZHAO, J.; SUN, M.; JIA, W. Robust fast corner detector based on filled circle and outer ring mask. **IET Image Processing**, v. 10, n. 4, p. 314–324, 2016.

YOUNES, R. Improving SIFT Matching by Interest Points Filtering. *In*: Advanced Topics in Computer Vision: [s. n.], 2014. p. 4. Disponível em: <https://filebox.ece.vt.edu/~S14ECE5984/>.

APÊNDICE A

A.1 PANORAMAS GERADOS

Na Figura 31 são mostrados seis exemplos de imagens panorâmicas geradas com o recurso de *feathering*, utilizando um raio de 5 metros.



Figura 31 - Exemplos de imagens panorâmicas geradas com o recurso de *feathering*.
As mesmas imagens sem aplicação do *feathering* são mostradas na Figura 32.



Figura 32 – Exemplos de imagens panorâmicas geradas sem *feathering*.

A.2 INTERSECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA - EXEMPLO NUMÉRICO

Um exemplo numérico utilizando o método descrito na Seção 3.5 é mostrado para uma melhor compreensão dos cálculos das coordenadas de um ponto no espaço objeto usando a interseção entre dois panoramas:

Ponto no espaço objeto obtido no processo de calibração das câmaras:

Ponto	X (mm)	Y(mm)	Z (mm)
6522	1155	0	0

Dados comuns entre os panoramas para geração:

Raio do cilindro (mm)	Tamanho pixel Imagem (mm)	Altura das imagens (pixel)	Distância focal da câmara de referência (mm)
5000	0,005	2048	6,2433

Dados do panorama i :

Valor medido		Parâmetros de Orientação Exterior do panorama i					
Col ^{i}	Lin ^{i}	X_0^i (mm)	Y_0^i (mm)	Z_0^i (mm)	ω^i (°)	ϕ^i (°)	κ^i (°)
1967,32	1229,88	-2535,56	401,27	1766,45	-0,24748	26,0954	0,708788

Parâmetros de orientação exterior do panorama

$$CP^i = (X_0^i \ Y_0^i \ Z_0^i)^T = (-2535,56 \ 401,27 \ 1766,45)^T$$

$$(R_m^{c_{ref}})^i = R(\omega^i) \cdot R(\phi^i) \cdot R(\kappa^i) = R(-0,247489) \cdot R(26,0954) \cdot R(0,708788)$$

Aplicando-se as Equações 3.2 a 3.7 para calcular o vetor $(r_{c_{ref}}^{cil})^i$ no referencial do cilindro:

$$cy = \frac{2048 - 1}{2} = 1023,5 \text{ pixel}$$

$$pxRad = \frac{0.005}{6,2433} = 0,000800856 \text{ rad}$$

$$px_c = 0,005 * \frac{5000}{6,24332039} = 4,00428 \text{ mm}$$

$$\varphi^i = 1967,32 * 0,000800856 = 1,57554 \text{ rad}$$

$$x^i = 5000 * \sin(1,57554) = 4999,94 \text{ mm}$$

$$y^i = 5000 * \cos(1,57554) = -23,7036 \text{ mm}$$

$$z^i = -(1229,88 - 1023,5) * 4,00428 = -546,084 \text{ mm}$$

$$(r_{c_{ref}}^{cil})^i = [x^i \quad y^i \quad z^i]^T = [4999,94 \quad -23,7036 \quad -546,084]^T$$

$$(r_{c_{ref}}^{c_k})^i = [128,07 \quad 0,52 \quad 95,21]^T$$

Substituindo os valores dos *leverarm* $(r_{c_{ref}}^{c_k})^i$ na Equação 3.8 calcula-se o vetor $(r_{c_k}^{cil})^i$.

$$(r_{c_k}^{cil})^i = \begin{bmatrix} 4999,94 \\ -23,7036 \\ -546,084 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 128,07 \\ 0,52 \\ 95,21 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4871,87 \\ 71,5064 \\ -546,604 \end{bmatrix}$$

A matriz de rotação $(R_m^{c_{ref}})^i$ é formada pelos ângulos da Orientação Exterior do panorama i .

$$(R_m^{c_{ref}^{-1}})^i = \begin{bmatrix} 0,8980 & -0,0111 & 0,4399 \\ 0,01050 & 0,9999 & 0,0039 \\ -0,4399 & 0,0011 & 0,8981 \end{bmatrix}$$

Com os valores do ponto medido no cilindro em relação a câmara c_k , aplica-se na Equação 3.9 para calcular o vetor $r_{c_k}^{m^i}$, que será usado na interseção fotogramétrica.

$$r_{c_k}^{m^i} = \begin{bmatrix} 0,8980 & -0,0111 & 0,4399 \\ 0,01050 & 0,9999 & 0,0039 \\ -0,4399 & 0,0011 & 0,8981 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4871,87 \\ 71,5064 \\ -546,604 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4349,53 \\ -495,837 \\ -2207,88 \end{bmatrix}$$

$$r_{c_k}^{m^i} = [u^i \quad v^i \quad w^i]^T = (4349,53 \quad -495,837 \quad -2207,88)^T$$

Para calcular a posição da câmara CP_k^i no referencial do terreno, utiliza-se a Equação 3.10:

$$CP_k^i = \begin{bmatrix} -2535,56 \\ 401,27 \\ 1766,45 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,8980 & -0,0111 & 0,4399 \\ 0,01050 & 0,9999 & 0,0039 \\ -0,4399 & 0,0011 & 0,8981 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 128,07 \\ -95,21 \\ 0,52 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2378,68 \\ 403,5 \\ 1795,62 \end{bmatrix}$$

Dados do panorama j :

Valor medido		Parâmetros de Orientação Exterior do panorama j					
Col ^j	Lin ^j	$X_0^j(\text{mm})$	$Y_0^j(\text{mm})$	$Z_0^j(\text{mm})$	$\omega^j(^{\circ})$	$\phi^j(^{\circ})$	$\kappa^j(^{\circ})$
224,712	1039,09	2688,12	-293,58	5925,65	0,39834	24,8315	-0,83359

Parâmetros de orientação exterior:

$$CP^j = (X_0^j \ Y_0^j \ Z_0^j)^T = (2688,12 \ -293,58 \ 5925,65)^T$$

$$(R_m^{c_{ref}})^j = R(\omega^j) \cdot R(\phi^j) \cdot R(\kappa^j) = R(0,39834) \cdot R(24,8315) \cdot R(-0,83359)$$

Os valores de cy , $pxRad$ e px_c , são calculados apenas uma vez, pois são comuns para os dois panoramas.

Aplicando nas Equações 3.2 a 3.7 encontramos o vetor $(r_{c_{ref}}^{cil})^j$:

$$\varphi^j = 224,712 * 0,000800856 = 0,179962 \text{ rad}$$

$$x^j = 5000 * \sin(0,179962) = 894,961 \text{ mm}$$

$$y^j = 5000 * \cos(0,179962) = 4919,25 \text{ mm}$$

$$z^j = -(1039,09 - 1023,5) * 4,00428 = 217,869 \text{ mm}$$

$$(r_{c_{ref}}^{cil})^j = [x^j \ y^j \ z^j]^T = [894,961 \ 4919,25 \ 217,869]^T$$

$$(r_{c_{ref}}^{c_k})^j = [0 \ 0 \ 0]^T$$

Substituindo os valores dos *leverarm* $(r_{c_{ref}}^{c_k})^j$ na Equação 3.8 calcula-se o vetor $(r_{c_k}^{cil})^j$.

$$(r_{c_k}^{cil})^j = \begin{bmatrix} 894,961 \\ 4919,25 \\ 217,869 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 894,961 \\ 4919,25 \\ 217,869 \end{bmatrix}$$

A matriz de rotação $(R_m^{c_{ref}})^j$ é formada pelos ângulos da Orientação Exterior do panorama j .

$$(R_m^{c_{ref}-1})^j = \begin{bmatrix} 0,9075 & 0,0132 & 0,4200 \\ -0,0116 & 0,9999 & -0,0063 \\ -0,4200 & 0,0008 & 0,9075 \end{bmatrix}$$

Com os valores do ponto medido no cilindro em relação a câmara c_k , aplica-se na Equação 3.9 para calcular o vetor $r_{c_k}^{mj}$ que será usado na interseção fotogramétrica.

$$r_{c_k}^{mj} = \begin{bmatrix} 0,9075 & 0,0132 & 0,4200 \\ -0,0116 & 0,9999 & -0,0063 \\ -0,4200 & 0,0008 & 0,9075 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 894,961 \\ 4919,25 \\ 217,869 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1250,84 \\ 238,481 \\ -4840,04 \end{bmatrix}$$

$$r_{c_k}^{mj} = [u^j \ v^j \ w^j]^T = (-1250,84 \ 238,481 \ -4840,04)^T$$

Para calcular a posição da câmara CP_k^j no referencial do terreno, utiliza-se a Equação 3.10:

$$CP_k^j = \begin{bmatrix} 2688,12 \\ -293,58 \\ 5925,65 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,9075 & 0,0132 & 0,4200 \\ -0,0116 & 0,9999 & -0,0063 \\ -0,4200 & 0,0008 & 0,9075 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2688,12 \\ -293,58 \\ 5925,65 \end{bmatrix}$$

Feitos os cálculos tem-se os valores de posição e orientação do feixe no referencial do terreno para realizar interseção fotogramétrica utilizando mínimos quadrado para cálculo dos fatores de escala λ^i e λ^j .

$$L_b = \begin{bmatrix} X_{0_k}^j - X_{0_k}^i \\ Y_{0_k}^j - Y_{0_k}^i \\ Z_{0_k}^j - Z_{0_k}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2688,12 - (-2378,6) \\ -293,58 - 403,5 \\ 5925,65 - 1795,62 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5066,80 \\ 697,080 \\ -4130,03 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} u^i & -u^j \\ v^i & -v^j \\ w^i & -w^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4349,53 & 1250,84 \\ -495,837 & -238,481 \\ -2207,88 & 4840,04 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \lambda^i \\ \lambda^j \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot L_b) = \begin{bmatrix} 0,8129 \\ 1,2241 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores nas Equações 2.26 e 2.27 e calculando a média, temos:

$$\begin{aligned} X_A &= \frac{(\lambda^i \cdot u^i + X_0^i) + (\lambda^j \cdot u^j + X_0^j)}{2} \\ &= \frac{(0,8129 * 4349,53 + (-2378,6)) + (1,2241 * (-1250,84) + 2688,12)}{2} \\ &= 1157,05 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_A &= \frac{(\lambda^i \cdot v^i + Y_0^i) + (\lambda^j \cdot v^j + Y_0^j)}{2} \\
 &= \frac{(0,8129 * (-495,837) + 403,5) + (1,2241 * 238,481 + (-293,58))}{2} \\
 &= -0,61065 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_A &= \frac{(\lambda^i \cdot w^i + Z_0^i) + (\lambda^j \cdot w^j + Z_0^j)}{2} \\
 &= \frac{(0,8129 * (-2207,8) + 1795,62) + (1,2241 * (-4840,04) + 5925,65)}{2} \\
 &= 0,9282 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1157,05 \\ -0,61 \\ 0,92 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Para avaliar a acurácia da intersecção calcula-se as discrepâncias entre as coordenadas obtidas, pelas coordenadas estimadas na calibração das câmaras para o ponto 6522.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1157,05 \\ -0,61065 \\ 0,9282 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1155 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,05 \\ -0,61 \\ 0,92 \end{bmatrix} \text{ m}$$

O erro resultante das três componentes foi de 2,33 mm.