UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Integração de Visão Computacional e Fotogrametria para Medição Automática de Anéis de Pistão

Vinicius Veloso Eleutério Nogueira

Itajubá, 20 de novembro de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Vinicius Veloso Eleutério Nogueira

Integração de Visão Computacional e Fotogrametria para Medição Automática de Anéis de Pistão

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Tales Cleber Pimenta

20 de novembro de 2023 Itajubá Vinicius Veloso Eleutério Nogueira

Integração de Visão Computacional e Fotogrametria para Medição Automática de Anéis de Pistão

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Itajubá, 01 de Novembro de 2023:

Prof. Dr. Tales Cleber Pimenta Orientador

Prof. Dr. Gabriel Antonio Fanelli de Souza

Prof. Dr. Luis Henrique de Carvalho Ferreira

Prof. Dr. Alexandre Baratella Lugli

Prof. Dr. Lester de Abreu Faria

Itajubá 20 de novembro de 2023

Agradecimentos

A trajetória até aqui foi árdua mas pôde ser suave e entusiasmada graças às pessoas que tive comigo. Por isso, agradeço imensamente a Deus, que me deu direcionamento, suporte e sempre me abençoou. Agradeço aos meus pais, que, com imenso amor, me guiaram pelo caminho do mérito e do esforço, sendo meu porto seguro e exemplo.

Minha gratidão a Leonardo e Dannilo, meus amigos de sempre, que estiveram comigo me dando força por toda caminhada, me incentivando a encarar cada desafio. Com agradecimento especial a Dannilo, meu companheiro acadêmico, que me incentivou a participar dos programas de doutorado e mestrado. Agradeço às minhas irmãs, minhas maiores cúmplices, as quais me deram suporte durante a caminhada. Agradeço aos meus amigos do IFNMG, que me acolheram desde o início e seguiram me apoiando de longe. Por fim, meus agradecimentos aos meus tios, avós, primos e cunhadas, por acreditarem em mim sempre.

Gratidão mais que especial pela minha esposa Marina, por sua parceria e cumplicidade em todos os momentos. Além de seu apoio e suporte, que me fizeram sempre seguir em frente, ela também me ajudou na revisão dos textos deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Dr. Tales Pimenta pela compreensão, ensinamentos e suporte, que, sempre sereno, se dispôs a me auxiliar no trabalho e na vida. Aos membros da banca examinadora que se propuseram a se dedicar para avaliar e contribuir.

À Unifei, onde cursei toda minha trajetória acadêmica, desde a graduação ao doutorado. Na Unifei pude ter contato com diversos profissionais competentes e empenhados em entregar um ensino de excelência.

Ao laboratório de Metrologia da Unifei pela disponibilização de equipamentos, espaço e pessoal. Em especial, ao professor Luiz Fernando Barca, cujo auxílio foi fundamental para a validação do protótipo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante boa parte do curso, o que viabilizou minha dedicação integral e, por consequência, possibilitou que eu chegasse no ponto em que me encontro. Gostaria de agradecer também ao CNPq por desenvolver o programa de Doutorado em Inovação, e à Unifei, que se dedicou a participar do programa oferecido. O programa captou meu interesse, o que trouxe aplicação direta aos trabalhos desenvolvidos.

À empresa Mahle Metal Leve S/A, pela apresentação do problema, pela disponibilização das amostras e pela colaboração oferecida.

Ao IFPR, por me conceder afastamento durante seis meses do doutorado para que eu pudesse me dedicar exclusivamente ao programa e finalizá-lo com êxito.

"Somos o que repetidamente fazemos. Portanto, a excelência não é um feito, é um hábito". (Aristóteles)

Resumo

O anel de pistão é uma peça crucial nos motores a combustão, que desempenha um papel vital ao vedar a lacuna entre os pistões e as paredes do cilindro. Essa vedação é imprescindível para evitar vazamentos de gases da câmara de combustão e regular a distribuição adequada do lubrificante. Com a evolução dos motores, operando com cada vez maior taxa de compressão e cada vez menos viscosidade dos lubrificantes, a precisão na fabricação dos anéis tornou-se imperativa. Deste modo, a manufatura destes elementos consiste na concepção de anéis que satisfaçam as complexidades do sistema de combustão, fabricados com precisão dimensional rigorosa. No processo de fabricação, a conformidade dos anéis às margens de erro do projeto é vital para evitar rejeições na análise de qualidade e o subsequente retrabalho. Isso requer, aliada à qualificação dos processos de fabricação, um sistema de medição confiável para otimizar a produção e garantir produtos de alta qualidade. Nesse contexto, este estudo examina o método de medição manual atualmente empregado e propõe uma abordagem automatizada distinta, visando aprimorar a consistência das medições e reduzir desperdícios. A proposta central é o desenvolvimento de um método alternativo de medição baseado em processamento de imagens. Esta abordagem oferece várias vantagens, incluindo automação otimizada, agilidade no processo e ausência de contato direto com as peças medidas. A pesquisa explora a criação de um dispositivo equipado com um sistema de visão de máquina que mede anéis de pistão por meio de imagens, garantindo a precisão requerida. O estudo integra técnicas estabelecidas de visão computacional com contribuições inéditas, incluindo modificações na detecção de bordas em subpixel, a estimação dos ângulos do contorno através de filtros de fase nula e ajustes no fluxo de execução do sistema. Além disso, empregando técnicas de fotogrametria, o sistema mapeia pontos da imagem no espaço tridimensional, corrigindo distorções, inclinações e distâncias entre o plano de medição e a câmera, onde também há a implementação de uma proposta de compensação de altura. O protótipo desenvolvido é validado através de testes de rastreamento com blocos padrão e comparações com equipamentos convencionais. Os resultados atestam a capacidade do protótipo em manter o rastreamento diante de diversas variações de tamanho, altura, posição e inclinação. Notavelmente, o método automatizado proposto se destaca em relação às medições manuais, especialmente na avaliação da abertura do anel. Em última análise, a implementação do método proposto neste trabalho é capaz de otimizar substancialmente o processo de fabricação de anéis de pistão, aprimorando a consistência e agilidade para atender aos requisitos de qualidade essenciais para esses componentes vitais nos motores a combustão.

Palavras-chaves: Anel de Pistão. Fotogrametria Terrestre de Curto Alcance. Visão Computacional. Visão de Máquina.

Abstract

The piston ring is a critical component in internal combustion engines whichs plays a vital role by sealing the gap between pistons and cylinder walls. This sealing is indispensable to prevent gas leakage from the combustion chamber and to adequately control lubricant distribution. With the evolution of engines, operating with increasingly compression ratios and lower lubricant viscosities to maximize performance and effiency, precision in piston ring manufacturing has become imperative. Thus, the manufacturing of these elements entails designing rings that meet the complexities of the combustion system, manufactured with rigorous dimensional accuracy. In this manufacturing process, ensuring that the rings conform to the project's error margins is essential to avoid rejections during quality analysis and subsequent rework. This necessitates, in conjunction with process qualification, a reliable measurement system to optimize production and guarantee highquality products. In this context, this study examines the presently employed manual measurement method and proposes a distinct automated approach aimed at enhancing measurement consistency and reducing waste. The central proposition is the development of an alternative measurement method based on image processing. This approach offers several advantages, including optimized automation, process agility, and the absence of direct contact with the measured components. The research explores the design of a machine vision system that measures piston rings through images, ensuring the required precision. The study integrates established computer vision techniques with novel contributions, including modifications in subpixel edge detection, estimation of contour angles using zero phase filters, and adjustments in the system's execution flow. Additionally, the method employs photogrammetry techniques to map image points to the real world, correcting image distortions, inclinations, and relative distances between measurement points and the camera, as well as accounting for part height, throught the implementation of a proposed height compensation method. The developed prototype is validated through tracking tests using standard blocks and comparisons with conventional equipment. The results attest to the prototype's ability to maintain tracking across various size, height, position, and inclination variations. Remarkably, the proposed automated method stands out compared to manual measurements, particularly in assessing ring opening. Ultimately, the implementation of this innovative method has the potential to substantially optimize the piston ring manufacturing process, enhancing consistency and agility to meet the essential quality requirements for these vital components in internal combustion engines.

Key-words: Close Range Terrestrial Photogrammetry. Computer vision. Machine Vision. Piston Ring.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Figura 2 –	Nomenclatura do Anel de Pistão. Adaptado de (NEOGY et al., 2020) . Parâmetros utilizados para avaliar as dimensões do anel de pistão no	19
Figura 3 –	formato livre	21
Figura 4 –	captura (c) a imagem capturada	29 30
Figura 5 –	Modelo <i>Pinhole</i> , variáveis de interesse. Imagem adaptada de (COR- REIA et al. 2022)	21
Figura 6 –	Imagem capturada de um objeto tridimensional centralizado na ima- gem de diferentes distâncias focais (a) menor distância focal e maior proximidade da câmera (b) maior distância focal e maior afastamento	51
Figura 7 –	da câmera	32 33
Figura 8 –	Modelo de Lentes finas Adaptado de (LU: CAL 2020)	34
Figura 9 –	Sistema de Coordenadas Homogêneas. Adaptado de (AN et al., 2018)	40
Figura 10 –	Coordenadas do sensor (x, y) , coordenadas da imagem (x_{cam}, y_{cam}) e ponto principal p nas coordenadas (x_0, y_0) . Retirado de (HARTLEY; ZISSERMAN 2003)	<i>A</i> 1
Figura 11 –	Representação dos efeitos da distorção radial (a) imagem sem distorções	11
Figura 12 –	(b) efeito tipo almofada (c) efeito tipo barrii	40
Figura 13 –	gencial no sentido horizontal e vertical simultaneamente Padrões de calibração planares mais populares. (a) xadrez (b) círculo	47
Figura 14 –	assimétrico (c) Charuco	50
	lho.	51
Figura 15 –	Esquema de Visão Estereoscópica. Retirado de (FUA et al., 2022)	54

Figura 16 –	Configuração da Técnica de Projeção de Padrões utilizando luz estru- turada Adaptado de (WI et al. 2020)	55
Figura 17 –	Medição de um peça mecânica utilizando visão monocular. Adaptado	00
i iguia i i	de (DUAN et al., 2018).	56
Figura 18 –	Filtro Gaussiano 1D (5x1), aplicado em uma região de borda da ima-	59
Figura 19 –	Variação da intensidade de luminosidade nas bordas. (a) Imagem do anel de pistão (b) curva invertida da luminosidade em um pixel pelas	60
Figura 20 –	Comparação dos desvios de ângulo entre o filtro Sobel e Kroon (a) Ima- gem de Teste (b) Mapa de erro em radianos entre o ângulo amostrado e esperado utilizando filtro de Sobel (c) Mapa de erro de ângulo para	00
Figura 21 –	o filtro de Kroon. Imagens retidas de 3.10	62
	fase zero.	63
Figura 22 –	Processo de determinação da posição de uma borda, adaptado de (FA- BIJAŃSKA, 2012) (a) borda ideal contínua, (b) borda amostrada na imagem, (c) borda com intensidade quantizadas, (d) posição da borda a nível de pixel, detecção de borda a nível de subpixel utilizando primeira	
Figura 23 –	derivada e (e) segunda derivada	65
0	gaussiano (b) com filtro gaussiano ($\sigma=0.9$)	66
Figura 24 –	Ajuste de uma determinada curva aos pontos reais amostrados. Com os parâmetros estimados $t = 254.9015$ $i = 89.0183$ e $C = 4.5248$	67
Figura 25 –	Regressão adicional realizada no contorno da imagem para refinar a posições encontradas na regressão do pixel. (a) contorno encontrado utilizando analise individual (b) correção dos pontos encontrados a uma	01
	reta obtida por meio de regressão. Retirado de (GIOI; RANDALL, 2017)	67
Figura 26 –	: Projeção da borda à linha normal, adaptado de (SUN et al., 2013). $\ $.	68
Figura 27 –	Corte do anel de pistão, evidenciando a altura Δz	72
Figura 28 –	Compensação de altura em relação a um plano de referência	73
Figura 29 –	Influência do deslocamento do eixo ótico em relação a peça. \ldots .	74
Figura 30 –	Influência da rotação da peça em relação a câmera, na captura das	75
Figura 31 –	Oclusão do perfil da borda (face externa) em relação ao comprimento focal. Análise da peça amostrada utilizando lentes regulares de (a) baixo comprimento focal, (b) alto comprimento focal e (c) lentes tele- cêntricas	77

Figura 32 $-$	Detecção de borda em subpixel aplicada a uma borda com orienta-	
	ção normal de -29,88°, discretizada na direção de 135°. O método de	
	ajuste resultou em $p_1 = 169, 76, p_2 = 5, 21, p_3 = 4, 58$ e $p_4 = 0, 65$. A	
	posição ajustada é posteriormente rotacionada na direção normal. (a)	
	Representação do processo de estimativa em subpixel em uma seção do	
	contorno. (b) Curva de borda ajustada nos dados amostrados	. 81
Figura 33 –	Esquema de filtragem de fase nula a partir de um filtro convencional	
0	H(z).	. 82
Figura 34 –	Comparação das Respostas de Frequência: Filtro Butterworth Passa-	
	Baixa de Ordem 1 $H(z)$ versus correspondente de Fase-Nula	. 83
Figura 35 –	Vista Isométrica do design da estrutura do protótipo com dimensões	
	em mm	. 84
Figura 36 –	Estrutura do protótipo desenvolvido. (a) Visão Geral, (b) vista lateral,	
	(\mathbf{c}) imagem focada na amostra e (\mathbf{d}) vista superior	. 85
Figura 37 –	Iluminação do tipo Luz de Fundo	. 86
Figura 38 –	Comparação entre iluminação direta (a) e iluminação de fundo (ou	
	retroiluminação) em peças metálicas (b)	. 87
Figura 39 –	Padrões de calibração empregados no trabalho.	. 89
Figura 40 –	Fluxograma de Medição.	. 92
Figura 41 –	Aplicação do Filtro Butterworth de Fase Zero nos ângulos da borda do	
	anel. (a) Ângulo ao longo da borda do anel em determinada pose (b)	
	ampliação da região destacada.	. 94
Figura 42 –	Regressão dos pontos da borda OSD. (a) Determinação dos pontos	
	OLD com base no ângulo (b) ampliação da região destacada	. 95
Figura 43 –	Regressão dos pontos da borda OLD. (a) Determinação dos pontos	
	OLD com base no ângulo (b) ampliação da região destacada	. 96
Figura 44 –	Interface de entrada de imagem	. 97
Figura 45 –	Ambiente de Operação Principal do Sistema	. 97
Figura 46 –	Ambiente de Diagnóstico de Contornos e Bordas.	. 98
Figura 47 –	Ambiente de análise de regressão na borda externa	. 99
Figura 48 –	Ambiente de definição de parâmetros intrínsecos.	. 100
Figura 49 –	Ambiente de calibração extrínseca.	. 100
Figura 50 –	Ambiente de conferência da calibração	. 101
Figura 51 –	Poses do padrão de calibração em relação à câmera utilizadas para	
	calibração intrínseca.	. 103
Figura 52 –	Erro de reprojeção médio dos pontos de controle na imagem (em pixels)	
	das amostras para o modelo ajustado.	. 104

Figura 53 –	Blocos-padrão utilizados no teste de rastreabilidade. (\mathbf{a}) Conjunto de
	Blocos-Padrão de classe A. (b) Imagem capturada pelo equipamento,
	destacando os pontos utilizados para determinar a medida da face de
	precisão
Figura 54 –	Procedimento de medição empregado para aferir a dimensão em as faces
	retas do bloco
Figura 55 –	Amostra circular utilizada para teste de comparação. (\mathbf{a}) Detalhes tri-
	dimensionais do objeto (b) Image do objeto na área de medição 112
Figura 56 –	Amostras de Anéis de Pistão
Figura 57 –	Identificadores das Amostras
Figura 58 –	Máximo desvio padrão observado de acordo com o número de imagens
	empilhadas
Figura 59 –	Medições experimentais do anel de modelo A3

Lista de tabelas

Tabela 1 –	Parâmetros intrínsecos otimizados pela calibração intrínseca	104
Tabela 2 –	Medições realizadas em um padrão de calibração em diferentes posições	
	e rotações z para validação do modelo	105
Tabela 3 –	Medições realizadas em um padrão de calibração em diversas poses,	
	avaliado em diferentes alturas para validar a efetividade da compensa-	
	ção proposta.	106
Tabela 4 –	Desvio Padrão das medidas amostradas com o bloco estático após em-	
	pilhamento de nove imagens	109
Tabela 5 –	Aferição do Bloco-Padrão em poses aleatórias pelo protótipo. \ldots .	110
Tabela 6 –	Comparação do desvio médio e desvio padrão em trabalhos que em-	
	pregam visão computacional para medição de dimensões de objetos	111
Tabela 7 –	Comparação entre valores de raio medidos em mm utilizando o protó-	
	tipo e a máquina de medição por coordenadas.	113
Tabela 8 –	Desvio padrão de medição de diferentes amostras com a posição do	
	anel fixa com o empilhamento de nove imagens.	116
Tabela 9 –	Desvio padrão global comparando o método empregado atualmente	
	com o método proposto realizada com base os dados da tabela	117
Tabela 10 –	Comparação entre os valores amostrados de OLD, obtidos pelo método	
	de medição empregado atualmente, e o método proposto, avaliado em	
	diversas posições e rotação da peça dentro da área capturada pela	
	imagem	131
Tabela 11 –	Comparação entre os valores amostrados de OSD, obtidos pelo método	
	de medição empregado atualmente, e o método proposto, avaliado em	
	diversas posições e rotação da peça dentro da área capturada pela	
	imagem	132
Tabela 12 –	Comparação entre os valores amostrados de Abertura Livre, obtidos	
	pelo método de medição empregado atualmente, e o método proposto,	
	avaliado em diversas posições e rotação da peça dentro da área captu-	
	rada pela imagem.	133

Lista de abreviaturas e siglas

- CCD Charge Coupled Devic
- CMOS Complementary Metal Oxide Semicondutor
- CMM Coordinate Measuring Machine
- CRP Close-Range Photogrammetry
- DOG Difference of Gaussian
- LOG Laplacian of Gaussian
- MVS Multiple View Stereo
- OLD Outer Largest Diameter
- OSD Outer Smallest Diameter
- PCA Análise de Componentes Principais
- PnP Perspective-n-Point Camera Pose Determination
- UNIFEI Universidade Federal de Itajubá

Lista de símbolos

x_i	Coordenadas de um ponto no eixo x da imagem, sem distorção da lente
y_i	Coordenadas de um ponto no eixo y da imagem, sem distorção da lente
f	Distância focal
X	Coordenadas do objeto no eixo x do mundo
Y	Coordenadas do objeto no eixo y do mundo
Ζ	Coordenadas do objeto no eixo z do mundo
F/#	Abertura da lente expressa no referido formato
D	Diâmetro da abertura da lente
U	Distância do ponto em foco até a lente
d	Diâmetro do círculo de confusão
λ	Escalar das equações homogêneas
p_x	Coordenadas do ponto principal no eixo x do sensor
p_y	Coordenadas do ponto principal no eixo y do sensor
K	Matriz da Câmera
С	Distância focal digital
R	Matriz de rotação
t	Vetor de translação
R t	Matriz de pose
x_d	Coordenadas de um ponto no eixo x da imagem, com distorção da lente
y_d	Coordenadas de um ponto no eixo x da imagem, com distorção da lente
k_1, k_2	Parâmetros do modelo de distorção radial da lente
p_1, p_2	Parâmetros do modelo de distorção tangencial da lente
Н	<i>Kernel</i> de um filtro
G	Gradiente de variação
W	Janela filtrada

Sumário

1	INTRODUÇÃO
1.1	Visão Geral
1.2	Descrição do problema
1.3	Justificativa
1.4	Objetivos
1.5	Metodologia
1.6	Contribuições
1.7	Estrutura do Trabalho
1.8	Publicação
2	FOTOGRAMETRIA
2.1	Formação da imagem
2.2	Mapeamento da Imagem
2.3	Lentes
2.3.1	Ajuste Focal
2.3.2	Ajuste de Abertura
2.4	Sensor Digital
2.4.1	Controle na captação de luz pelo sensor
2.5	Coordenadas homogêneas
2.5.1	Modelagem da Captura em Coordenadas Homogêneas
2.6	Distorções Causas pela Lente
2.7	Processo de Calibração
2.7.1	Padrão de Calibração
2.7.2	Calibração Intrínseca
2.7.3	Calibração Extrínseca
2.8	Técnicas Relacionadas
3	VISÃO COMPUTACIONAL
3.1	Filtragem Linear
3.2	Filtro Gaussiano
3.3	Detecção de Bordas
3.3.1	Método Kroon
3.3.2	Método Canny
3.3.3	Localização de Bordas a nível Subpixel
3.4	Método Harris para Localização de Quinas
3.5	OpenCV

4	ABORDAGEM DO PROBLEMA	71
4.1	Técnica Utilizada	71
4.2	Pré-Requisitos do sistema	72
4.3	Projeção de Perspectiva Inversa com Compensação de Altura	75
4.4	Considerações sobre Perfil de Borda	77
4.5	Modelo de Borda Subpixel	78
4.6	Filtros de Fase-Nula para Filtragem de Ângulos	82
4.7	Configuração Física e Equipamentos	83
4.7.1	Estrutura	83
4.7.2	Esquema de Iluminação	86
4.7.3	Conjunto de Captura	87
4.7.4	Padrões de Calibração	89
4.8	Fluxograma do sistema	90
4.8.1	Procedimento de Ajuste e Calibração	90
4.8.2	Procedimento de Medição	92
4.9	Interface gráfica	96
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	03
5 5.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES	LO3
5 5.1 5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1	LO3 LO3 L05
5 5.1 5.2 5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1	103 103 105
5 5.1 5.2 5.3 5.3 1	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1	L 03 L 03 L 05 L 06
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1	LO3 LO3 LO5 LO6 L10
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1	L03 L03 L05 L06 L10 L12
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1	L03 L03 L05 L06 L10 L12 L14
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5 6	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 1	103 103 105 106 110 112 114
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5 6 6.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 1 Trabalhos Futuros 1	103 103 105 106 110 112 114
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5 6 6.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 1 Trabalhos Futuros 1	103 105 106 110 112 114 121
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5 6 6.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 1 Trabalhos Futuros 1 REFERÊNCIAS 1	103 103 105 106 110 112 114 121 122
5 5.1 5.2 5.3 5.3.1 5.4 5.5 6 6.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES 1 Calibração Extrínseca 1 Teste de Fotogrametria 1 Teste de Rastreabilidade 1 Comparação com Trabalhos Relacionados 1 Teste Comparativo 1 Teste com Anéis de Pistão 1 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 1 Trabalhos Futuros 1 REFERÊNCIAS 1	103 105 106 110 112 114 121 122

APÊNDICES

129

APÊNDICE A – TABELAS COMPLETAS DE DADOS EXPERI-MENTAIS DE OSD, OLD E ABERTURA LIVRE . 130

1 Introdução

Nesta tese de doutorado é apresentada a proposta de um sistema de medição de anéis de pistão na forma livre, por meio de imagens. O procedimento combina técnicas de visão computacional e fotogrametria para a aplicação em um problema do ambiente industrial. Inicialmente, neste capítulo, são discutidas as áreas relacionadas para, posteriormente, apresentar as condições que ocasionaram a seleção do problema e da abordagem empregada. Dentre elas são descritas as dificuldades encontradas no método atual e as vantagens do procedimento proposto. A metodologia de pesquisa, os objetivos, a estrutura do trabalho e as principais contribuições são apresentadas em seguida.

1.1 Visão Geral

A capacidade de enxergar é fundamental para que o ser humano execute diversas tarefas. A visão computacional busca reproduzir esta habilidade em máquinas, por meio da extração de informações de imagens (WILEY; LUCAS, 2018).

Ainda, a visão computacional é capaz de fornecer métricas objetivas para o sistema de tomada de decisão e aferição. O uso desta ferramenta se mostra pertinente, uma vez que, apesar de o ser humano ser naturalmente hábil para tarefas de reconhecimento (JÚNIOR, 2018) e para desprezar informações desnecessárias (HORNBERG, 2006), a análise computadorizada é capaz de examinar a imagem e extrair informações de maneira mais rápida e precisa (HORNBERG, 2006), ao mesmo tempo que minimiza desvios na medição que podem ser ocasionados por erros humanos (DANG; HSU; TRUONG, 2021). Desta forma, o emprego de métodos relacionados confere repetibilidade e confiabilidade em tarefas que requerem alta precisão.

A aplicação de visão computacional é uma das abordagens que mais se desenvolve na engenharia elétrica, como em áreas de automação de processos e robótica (OKARMA, 2020). Através da utilização da visão em máquinas é possível empregar equipamentos em tarefas que apresentam o nível de complexidade elevado, aumentando assim a gama de aplicações (KAKANI et al., 2020).

A Fotogrametria, por sua vez, é a determinação da geometria tridimensional por meio de imagens fotográficas (JIANG; JÁUREGUI; WHITE, 2008) (PERCOCO; LAVEC-CHIA; SALMERÓN, 2015). Existem diversas aplicações de fotogrametria bem sucedidas, como o mapeamento por meio de veículos aéreos não tripulados (ELKHRACHY, 2021) e satélites, monitoramento de pontes (KARSZNIA; OSADA, 2022), reconstrução tridimensional, medição precisa de objetos como em (SUN et al., 2013) e etc. A referida área de estudo pode ser empregada em diversos meios, tal como na indústria, geologia, arquitetura, topografia, engenharia automotiva, aeroespacial, dentre outras. (PERCOCO; LAVECCHIA; SALMERÓN, 2015)

A área da fotogrametria, tradicionalmente, é dividida entre a fotogrametria aérea e terrestre, sendo que a fotogrametria aérea, normalmente, tem como principais objetivos o mapeamento e levantamento topográfico de uma região, enquanto a terrestre almeja as aquisições de dimensões de um objeto (JIANG; JÁUREGUI; WHITE, 2008) (ISTENIČ et al., 2019). Na fotogrametria terrestre, delimita-se, ainda, a classificação em fotogrametria de curta distância, ou *Close-Range Photogrammetry* (CRP), quando a distância entre a câmera e o objeto não ultrapassa 100 metros, que inclui desde edifícios até pequenos elementos industriais (KARSZNIA; OSADA, 2022).

Houve um avanço significativo no campo da fotogrametria nos últimos anos. Tal avanço decorre do desenvolvimento da tecnologia de equipamentos de captura de imagens digitais, o que possibilitou uma redução nos custos e o aumento da resolução desses equipamentos. Além disso, o desenvolvimento de outros âmbitos também favoreceu o avanço no campo da fotogrametria, tais como: o aumento da capacidade de processamento pelas máquinas e desenvolvimento de *softwares* relacionados. Esse cenário reduziu as limitações prévias da técnica e trouxe interesse na área, que apresenta agilidade, versatilidade e precisão melhorada. (ALEIXO et al., 2020) (ELKHRACHY, 2021).

Dentre as características deste campo, destaca-se o fato de a câmera não interagir diretamente com a amostra analisada por meio de contato, além da capacidade de obtenção de diferentes dimensões da peça em análise em apenas uma captura, mesmo em objetos que apresentam forma complexa. (GUERRA et al., 2021)

Diante das diversas vantagens apresentadas e relevância do tema, foram aplicada a fotogrametria e visão computacional para solucionar um desafio real. O presente trabalho refere-se a uma situação apresentada por uma fabricante de peças mecânicas que consiste em aferir automaticamente as dimensões de amostras com precisão, por meio das referidas ferramentas.

1.2 Descrição do problema

O anel de pistão é um elemento incorporado ao pistão, com o objetivo de auxiliar na selagem da lacuna entre o mesmo e as paredes da câmara de combustão do motor. O anel de pistão é fundamental para o funcionamento de motores a combustão modernos. As principais funções deste anel são as de reduzir a saída de gases e lubrificantes da câmara de combustão, além de regular a quantidade de lubrificante nas paredes do cilindro(NEOGY et al., 2020). Por esta razão, os anéis são otimizados no sentido de conferir alta vedação, com baixa fricção e desgaste mecânico (ANDERSSON; TAMMINEN; SANDSTRÖM, 2002). Os anéis de pistão modernos são caracterizados pela composição metálica e pela abertura, como mostra a figura 1.



Figura 1 – Nomenclatura do Anel de Pistão. Adaptado de (NEOGY et al., 2020)

Quando o anel é incorporado ao pistão e introduzido no cilindro, ocorre uma compressão no anel, que ocasiona o estreitamento da abertura. Assim, a força de mola resultante auxilia na vedação com as paredes do cilindro, por meio de contato radial (NEOGY et al., 2020). Esta força é crítica, principalmente, nos momentos em que o anel está sobre baixa pressão, como durante a exaustão, que depende da sua pressão de expansão (TOMANIK, 1996).

Deste modo, a geometria do anel fora do cilindro, denominado forma livre, determina as características do anel dentro do cilindro. Consequentemente, o formato do anel é crucial para a eficiência, consumo de lubrificante e desgaste em máquina de combustão (SENATORE; ALEKSENDRIC, 2013). Assim sendo, nos processos produtivos, o projeto da geometria do anel é realizado calculando a forma livre com base nas especificações do anel dentro do cilindro.

Um detalhe importante para o trabalho é o fato de que os anéis não apresentam formato circular, ou seja, o raio do anel não é constante e sua forma é axialmente assimétrica. A utilização deste formato se dá em razão de que um anel, com forma livre perfeitamente circular, acarreta em um desgaste desigual ao longo de seu contorno, além de exercer uma pressão irregular nas paredes do cilindro, sendo que estes são potencializados por fatores, como a pressão e elasticidade do anel e pressão dos gases na câmara(SENATORE; ALEKSENDRIC, 2013).

Desta maneira, o projeto do anel deve determinar como será a variação do seu raio na forma livre para que, quando inserido dentro da camada de combustão, possa apresentar o formato que distribua igualmente as forças desejadas entre o entorno do anel e as paredes da câmara.

Como observado durante uma visita em campo, o anel é produzido a partir do

corte e conformação de tiras de aço de largura e profundidade conhecidas. O processo inicial consiste em alimentar uma máquina com rolos de tiras metálicas e produzir peças precisas, conforme a configuração da máquina. Após a confecção inicial da peça, o modelo já possui o formato de um anel de pistão, porém a peça bruta necessita de alguns processos adicionais, como alívio de tensões internas, para conceder ao anel as características mecânicas desejadas.

Os processos adicionais variam de modelo para modelo, conforme a finalidade da peça e características desejadas. Depois da execução de cada processo, há uma modificação sutil nas dimensões da peça. Assim, a peça produzida na confecção inicial possui dimensões diferentes da peça final.

Apesar de o processo de produção inicial ser preciso, o anel produzido pela máquina não remete a peça nas dimensões projetadas, mas necessita antecipar as deformações causadas pelos processos adicionais necessários.

A metodologia de *setup* do processo consiste em, inicialmente, produzir peças brutas com os parâmetros das dimensões almejadas, posteriormente, beneficiar o anel com os processos necessários e, por fim, medir a peça produzida e, com base nas variações observadas, ajustar os parâmetros do anel bruto até que as medidas do anel final atendam ao projeto.

Assim, é crucial que a mensuração do anel seja realizada de forma rápida e precisa, para diminuir o tempo de setup e refinar o ajuste das máquinas.

Para determinar se a geometria do anel produzido corresponde ao anel projetado, três medidas são utilizadas como parâmetros: a abertura livre, do inglês *Free Gap*, maior diâmetro externo, do inglês *Outter Largest Diameter* (OLD) e menor diâmetro externo, do inglês *Outter Smalest Diameter* (OSD). Desta maneira, a abertura livre é a distância média de abertura; o OSD é a distância entre o centro da linha imaginária que conecta as quinas externas e o lado oposto do anel, enquanto o OLD é o diâmetro amostrados a noventa graus do OSD. Estas medidas utilizadas como parâmetros estão dispostas na figura 2.



Figura 2 – Parâmetros utilizados para avaliar as dimensões do anel de pistão no formato livre.

Durante o processo de fabricação, é fundamental assegurar que o anel de pistão produzido apresente as dimensões dentro da margem de erro do projeto, para assegurar a qualidade do produto atendendo às expectativas do projeto. Esta verificação exige a medição da peça com repetitividade e exatidão.

Conforme constatado em campo, o procedimento empregado para mensuração in loco das peças é a aferição manual, sendo utilizadas, principalmente, ferramentas de fixação, posicionamento e de medição por meio de paquímetros. Tal procedimento é aplicado na calibração dos processos de fabricação. Existem, ainda, processos adicionais para garantir o controle de qualidade, que avaliam o anel confinado e que estão além do escopo deste trabalho.

Um dos desafios envolvidos no procedimento é a precisão exigida na fabricação, sendo que há uma tolerância máxima de 100 µm entre as dimensões projetadas e a dimensões reais do anel final. Desta forma, para garantir as especificações e realizar os ajustes adequados nos equipamentos, a medição dever ter a margem de erro de no máximo 40µm em anéis de até 100mm de diâmetro.

1.3 Justificativa

Há alguns principais fatores que dificultam a medição manual. Primeiramente, a fim de que o anel de pistão possa cumprir seu papel, ele deve ser flexível, para possuir um comportamento elástico. Desta forma, suas dimensões podem variar durante a medição com o paquímetro, ou seja, caso o operador exceda a força que aplica no instrumento, haverá uma compressão indesejada do anel, e as medições realizadas pelo aparelho não representarão as medições reais do objeto.

O segundo problema é quanto ao posicionamento correto do anel e do paquímetro para realizar as medições, uma vez que as tolerâncias exigidas vão além da capacidade da percepção humana. O processo atual possui equipamento de fixação para medição manual, que já conta com implementações procedimentais, para mitigar estes efeitos inerentes do processo de medição adotado. No entanto, mesmo com as estratégias já implementadas, não se deve negligenciar o impacto do posicionamento e da fixação, uma vez que eles têm o potencial de influenciar na medição.

Um terceiro problema é inerente à medição manual e a eventualidade de imprecisão e transtornos devido a erros humanos (DANG; HSU; TRUONG, 2021). As técnicas meticulosas de medição manual requerem atenção e precisão por parte do operador. Além disso, é necessário que as amostras sejam aleatorizadas para evitar qualquer viés sistemático que possa impactar os resultados. Esses fatores contribuem para um processo de medição mais demorado e menos eficiente.

Um processo alternativo de medição promissor é a inspeção por meio de processamento de imagens, pois aumenta a possibilidade de automação do procedimento e não tem contato direto com o componente, ao mesmo tempo em que reduz discrepâncias de medição que podem ser causados por erros humanos (NALWA; BINFORD, 1986).

Uma medição mais completa e mais rápida dos anéis viabilizaria a aferição da peça em processos intermediários, facilitaria o diagnóstico de problemas e diminuiria o tempo de setup dos processos de produção de novos tipos de anéis.

O problema da medição manual para a aferir as dimensões de anéis de pistao já foi identificado e abordado anteriormente no processo. Nesta abordagem anterior foi desenvolvida uma solução na qual também era utilizado o método do processamento de imagem. Porém, naquela época não se obteve êxito na solução do problema. Contudo, a abordagem utilizada na época havia apresentado problemas quanto à repetibilidade das medidas. Assim, a implementação do processo de medição por meio de processamento de imagem de forma simplificada não foi capaz de obter resultados satisfatórios, e uma implementação robusta e minuciosa seria necessária.

Estudos prévios têm abordado a mensuração de dimensões de objetos através de técnicas de Visão Monocular, em que empregam apenas uma câmera, em diversas aplicações, como a avaliação de dimensões críticas em displays de LCDs (LEE; LEE; PAHK, 2018), a análise das bordas de metais emissores de calor (FABIJAŃSKA, 2012), a medição de engrenagens (DUAN et al., 2018), a avaliação de elementos nos contornos de objetos em formato de anel (DANG; HSU; TRUONG, 2021) e a mensuração de eixos (SUN et al., 2013)(LI, 2018)(TAN et al., 2021).

A técnica monocular ainda se destaca no quesito quanto a relação de custo-

benefício (LI et al., 2019), uma vez que requer menos equipamentos, sem comprometer a precisão (SUN et al., 2013). Assim, o objetivo do trabalho é desenvolver um equipamento específico para medições de anéis de pistão, de forma que possam ser consideradas algumas premissas para a aquisição de medidas precisas.

Desta maneira, neste trabalho é implementada uma técnica de visão monocular com contribuições desenvolvidas ao longo das atividades de pesquisa, por almejar um custo-benificio, que justifique sua adoção, e que emprega uma configuração de equipamento acessível para facilitar a manutenção. Nesse contexto, a aplicação da visão monocular demonstra ser uma escolha favorável devido à simplicidade do formato do anel de pistão e à viabilidade de inserir o anel no dispositivo para fins de aferição.

1.4 Objetivos

O objetivo do trabalho proposto é desenvolver um método de medição de anéis de pistão na forma livre, baseado em processamento de imagens, com exatidão e repetibilidade próximas ou superiores ao procedimento manual. Para isso, determinou-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver algoritmo capaz de localizar, filtrar e refinar os pontos de interesse na imagem, para determinar as medidas desejadas utilizando-se de técnicas de visão computacional;
- Desenvolver interface gráfica capaz de avaliar o processo de medição e interagir com o programa, melhorando sua aplicabilidade na indústria;
- Comparar a precisão e repetibilidade do processo por visão computacional com processo de medição convencional;
- Identificar equipamentos e técnicas adequados ao desenvolvimento da pesquisa;
- Definir estratégia de captação de imagem e disposição dos componentes físicos.
- Realizar a aferição sem o auxílio de estruturas de fixação do anel.

1.5 Metodologia

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica acerca de medição de objetos com base em imagens digitais. Esta pesquisa se apoiou no referencial teórico sobre técnicas de modelagem do problema, captação de imagem, processamento de imagem, visão computacional e fotogrametria. Com base nos resultados e análises reportados na literatura, foram selecionadas as técnicas mais promissoras para cada parte do processo e, assim, também foram determinados os equipamentos mais adequados disponíveis e a abordagem ao problema.

Para realizar os testes empíricos foi montado um sistema básico de captação de imagens para fornecer amostras aos testes. Assim, foram elaborados protótipos de programas desenvolvidos em MATLAB® para realizar a análise de dados. Estes programas tiveram como objetivos comparar a aplicação de diferentes ferramentas, com base em teste empíricos, análises quantitativas e avaliação crítica. Após a aquisição dos conhecimentos necessários, os *softwares* foram adaptados para uma linguagem especializada em desempenho de processamento, utilizando uma biblioteca de visão computacional padrão na indústria, o OpenCV, em combinação com a linguagem C++.

O programa principal foi, por fim, desenvolvido associando os diferentes protótipos de programas de forma modular em uma solução central com interface gráfica, utilizando o *framework* Qt, para a análise de dados, ajuste de parâmetros e controle de execução.

As medições realizadas pela visão computacional foram comparadas, de forma quantitativa, com as medições pelo método convencional utilizando análises estatísticas. Após a avaliação dos resultados, se iniciou a melhoria contínua de processos buscando corrigir fontes de erro e melhorar os resultados com base em técnicas disponíveis na literatura.

O protótipo foi avaliado no Laboratório de Metrologia da UNIFEI. O objetivo da avaliação foi verificar o processo de calibração do protótipo e sua rastreabilidade em relação aos blocos padrões de calibração de dimensões variadas em condições controladas. Além disso, o protótipo foi comparado a uma Máquina de Medição por Coordenadas (CMM), que possui uma exatidão superior à desejada para a verificação de medições de peças circulares.

1.6 Contribuições

O sistema de medição de anéis de pistão proposto por meio de fotogrametria, utiliza um sistema de visão com uma câmera monocromática, iluminação de fundo e lentes convencionais. O projeto apresenta potencial de concorrer com o sistema de medição empregado atualmente no ramo, oferecendo agilidade, precisão adequada e constância ao procedimento.

Para extrair as medidas, o trabalho explora particularidades da geometria do anel de pistão na forma livre, similares a outras diversas peças mecânicas. O trabalho aplica, ainda, os conceitos já utilizados no processo de medição atual para extração dos parâmetros, possibilitando, também, um aprimoramento.

Além disso, o protótipo apresenta outras vantagens em relação à medição manual.

Ele possibilita a aquisição de atributos adicionais do anel que poderiam não ser viáveis na abordagem tradicional. Por exemplo, o protótipo permite a medição da curvatura do anel amostrando milhares de pontos ao longo de sua borda. Essa capacidade avançada de medição fornece informações detalhadas sobre a geometria do anel, permitindo uma análise mais precisa e abrangente.

Outra vantagem do protótipo é a análise automatizada dos dados obtidos. Por meio dessa análise, é possível extrair informações estatísticas em lotes de peças, identificando inconformidades e pontos de melhoria de forma mais eficiente. Com a automatização desse processo, é possível obter resultados mais rápidos, intuitivos e precisos, economizando tempo e recursos.

Adicionalmente, o aumento da velocidade de medição proporcionado pelo protótipo oferece a possibilidade de avaliar um maior conjunto de amostras em um período de tempo menor. Isso possibilita uma análise mais abrangente e uma tomada de decisões mais assertiva, permitindo uma melhor compreensão do processo de fabricação e a identificação de oportunidades de aprimoramento.

No contexto de métodos reportados no meio científico, a proposta realiza ainda uma seleção e modificação de técnicas da literatura para formar o algoritmo de extração, de forma a considerar diferentes aspectos para maximizar a exatidão e repetibilidade do processo.

Assim, uma das maiores contribuições é a formulação de um método alternativo para detecção precisa de bordas subpixel e de mapeamento da imagem para pontos no espaço. A técnica proposta se aprimora quanto a localização dos pontos, por meio de regressão e estimativas precisas de ângulo. A abordagem propõe o emprego de um modelo de borda unidimensional alternativo, para realizar a regressão na direção das bordas discretizadas. Durante a exposição do modelo proposto, o trabalho apresenta detalhadamente a descrição dos parâmetros do modelo e das condições iniciais apropriadas, fundamentais para conduzir a regressão do modelo não-linear aos resultados desejados.

Outra contribuição, é o método de ajuste da borda unidimensional à direção real da borda. Este processo é realizado pela rotação da posição encontrada à direção normal da borda na imagem. Para isto, estimativas precisas da direção normal do pixel de borda analisado são essenciais nesse processo. Em trabalhos como (SUN et al., 2013) se realiza uma regressão entre vizinhos para estimar o ângulo. Em contraste, para solucionar esse desafio, o trabalho sugere a utilização de um filtro de bordas menos convencional e mais preciso, obtido por meio de referências na literatura, em conjunto com um filtro de alta frequência de fase zero. Ainda, ao contrário de outros trabalhos que realizam a segunda regressão com base em pontos vizinhos na imagem, o trabalho efetua essa operação no espaço para evitar distorções. Ainda, o esquema proposto também realiza a estimativa entre bordas vizinhas, objetivando a otimizar a localização das bordas. Contudo, esta operação é realizada apenas após a remoção dos desvios ocasionados pelas distorções da lente para os pontos de interesse e o mapeamento dos pontos da imagem para as coordenadas do mundo real, reduzindo o esforço computacional e o impacto das distorções causadas pelo emprego de lentes na localização do ponto de interesse.

Além disso, o presente trabalho descreve detalhadamente o fluxo de trabalho do método de localização subpixel, fornecendo uma visão abrangente das técnicas empregadas. Uma outra contribuição relevante deste trabalho é a apresentação de um protótipo funcional. A descrição do dispositivo desenvolvido inclui informações sobre a seleção dos componentes, a estratégia adotada e as condições operacionais. Em relação ao funcionamento do protótipo, o trabalho discute a implementação de técnicas de visão computacional e fotogrametria, a formulação do problema, as limitações da técnica de medição monocular com lentes convencionais, fornecendo um fluxograma operacional para facilitar o entendimento do processo.

1.7 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é dividido em seis capítulos. Sendo o primeiro capítulo responsável por descrever o problema e sua relevância científica, bem como, descrever os objetivos e contribuições do mesmo.

O segundo capítulo detalha a teoria clássica de fotogrametria e suas aplicações, desde os processos físicos da formação da imagem, até sua formulação matemática. O texto se inicia com a descrição da fotogrametria e discute a importância de se considerar certos aspectos na imagem, para que possa ser extrapolada para o mundo real com fidelidade. Em seguida, é abordado o processo de formação da imagem no modelo *pinhole* e da introdução de lentes, com o detalhamento das variáveis envolvidas no processo e como elas afetam a imagem capturada. Posteriormente, são realizadas considerações acerca dos sensores digitais utilizados para capturar a imagem.

Ainda no capítulo 2, é realizado o desenvolvimento matemático, em coordenadas homogêneas, do processo de projeção da imagem pelo modelo *pinhole*, rastreando as coordenadas de um ponto de um objeto no ambiente até onde este ponto é capturado pelo sensor. Logo em seguida, o processo anterior é invertido, resultando na projeção reversa de um ponto na imagem, a uma reta de pontos prováveis no ambiente. Em sequência, o modelo *pinhole* é adequado à captura de imagem com uso de lentes, por meio da consideração da distorção das mesmas. Por fim, são realizadas considerações sobre o processo de estimação dos parâmetros, modelados com desenvolvimento matemático e consequências práticas. No terceiro capítulo, são apresentadas técnicas de visão computacional, desde técnicas clássicas até técnicas utilizadas em trabalhos mais atuais. Inicialmente, são apresentados os conceitos no que se refere a operações com imagens, descrevendo o processo de suavização, detecção de bordas e detecção de quinas. Posteriormente, são destacados e contextualizados os princípios e principais métodos de detecção de borda, com precisão a nível subpixel, em imagens digitais. Finalmente, a biblioteca de visão computacional aplicada neste trabalho, OpenCV, é apresentada.

No quarto capítulo, a abordagem do problema é retratada, se iniciando com a descrição da configuração física empregada, as condições em que o sistema se propõe a operar, as estratégias, os modelos e parâmetros. Adicionalmente, é apresentado um fluxograma de funcionamento do sistema, descrevendo os procedimentos necessários para parametrização do sistema e passos do algoritmo executados para obtenção das medidas desejadas. Por fim, o capítulo traz a interface gráfica e as funcionalidades envolvidas, utilizadas para análise, calibração e obtenção dos resultados.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados obtidos trabalho. O protótipo é avaliado em diferentes aspectos para levantamento da exatidão e precisão das medidas.

O sexto, e último, capítulo sintetiza o trabalho desenvolvido e as principais análises e conclusões. Ainda neste último capítulo, são apresentadas possibilidades de melhorias observadas que podem ser abordadas em trabalhos futuros.

O apêndice A expõe, de forma mais detalhada, os resultados obtidos na medição da amostra, por meio do método proposto, comparado ao sistema atual.

1.8 Publicação

O conhecimento desenvolvido neste trabalho foi publicado, em forma de artigo, na revista Sensors (ISSN 1424-8220) com classificação A2, conforme a última avaliação da CAPES. O artigo, intitulado "A Cost-Effective Method for Automatically Measuring Mechanical Parts Using Monocular Machine Vision", descreve as técnicas utilizadas e apresenta o fluxograma do sistema, desde a captura até a medição de dimensões planares. O artigo está disponível para acesso aberto e gratuito no seguinte link: https://doi.org/10.3390/s23135994.

2 Fotogrametria

A fotogrametria é a ciência que estuda técnicas para extrapolar informações quanto às dimensões, o formato e a posição de objetos, por meio de imagens (PERCOCO; LAVEC-CHIA; SALMERÓN, 2015). O desafio da fotogrametria é inferir informações do mundo real, que é um espaço tridimensional (3D), por meio de imagens que são bidimensionais (2D) (ISTENIČ et al., 2019).

A primeira intuição para realizar medições, por meio de imagens, é comparar o objeto de interesse com objetos de dimensões conhecidas. Uma estratégia simples, frequente em projetos com margens tolerantes, consiste em estabelecer uma relação de escala em relação ao pixel (por exemplo, mm/pixel), usando uma medida conhecida na imagem. Essa abordagem, conhecida como fator de escala, é usada em estudos como o de (LI, 2018). Ela permite converter medidas extraídas da imagem em pixels para medidas no mundo real. Por sua simplicidade e conveniência de aplicação, este método é amplamente empregado em medidas aproximadas, podendo ser encontradas em programas como (ALEIXO et al., 2020) e aplicativos de smartphones.

A técnica que utiliza um fator de escala possui precisão limitada, pois ignora que na imagem as medições de referência e as medições desejadas estão sujeitas ao efeito da diferença de profundidades, da rotação e das distorções pelas lentes.

A figura 3 representa, de forma simplificada, alguns efeitos do processo de captura da imagem de um objeto tridimensional. A profundidade está presente nas imagens, pois porções do objeto em profundidade diferentes são exibidos na imagem de acordo com a posição da câmera.

Como será abordado em detalhes adiante neste capítulo, a profundidade influencia na escala entre as dimensões reais e as dimensões na imagem, bem como na perpectiva, modificando como um objeto é visto na imagem.

Desta forma, é necessário utilizar técnicas a fim de mapear os pontos de interesse na imagem para o espaço tridimensional, para então realizar as medidas desejadas. Assim, é necessário identificar os fenômenos por de trás da formação da imagem para então elaborar estratégias e, por consequência, reconhecer e estimar as informações necessárias para a reconstrução do espaço tridimensional, conforme a abordagem do problema. Este processo permite para extrair medidas da imagem com uma maior fidelidade.

Neste capítulo serão discutidos, primeiramente, o processo de formação da imagem, os parâmetros dos sistemas de captura de imagem, as distorções causadas pelas lentes, o mapeamento entre as coordenadas da imagem, o processo de calibração do conjunto e,



Figura 3 – Representação didática do processo de captura de imagens. (a) vista frontal do modelo, (d) representação tridimensional do modelo utilizada. Captura de uma imagem com o objeto centralizado: (e) vista superior do processo de captura (b) imagem capturada. Captura de um objeto deslocado para a direita: (f) a vista superior do processo de captura (c) a imagem capturada.

por último, as técnicas relacionadas.

2.1 Formação da imagem

Em um ambiente iluminado, os fótons são emitidos por fontes luminosas, que interagem com os materiais do ambiente e, parte deles, é refletida em diversas direções a depender do tipo de material e do formato do mesmo (GONZALEZ, 2009). Em um mesmo meio, os fótons se deslocam em linha reta, tanto advindo da fonte luminosa, quanto refletido por um objeto.(HORNBERG, 2006). Sem o uso de nenhum dispositivo, os raios de luz são refletidos em diversas direções indeterminadas, espalhando-se pelo ambiente.

Desta forma, caso um material fotossensível seja posicionado em uma parede em frente a um ambiente iluminado, ele não seria capaz de capturar uma imagem, pois um mesmo ponto desse material seria atingindo por fótons refletidos de diversos objetos diferentes. Assim sendo, é necessário utilizar uma técnica que viabilize que apenas os raios de luz de um ponto do ambiente atinjam somente um ponto na imagem e, por consequência, possibilite a captura de uma representação visual do ambiente(FORSYTH; PONCE, 2011).

Uma técnica utilizada desde os tempos antigos é a chamada de "buraco de alfinete" ou *pinhole*, que é representada na figura 4. Nesta técnica, o material fotossensível é posicionado dentro de um ambiente escuro e permite a entrada de luz apenas por um pequeno buraco.



Figura 4 – Esquema *Pinhole* para formação de imagem. Imagem adaptada de (FORSYTH; PONCE, 2011)

A técnica funciona da seguinte maneira: apenas o raio de luz refletido, emitido por um ponto do objeto com determinada direção, atravessa o buraco e atinge o material fotossensível no fundo do local escuro, enquanto todos os outros raios que possuem direções diferentes são refletidos pela parede externa de volta para o ambiente iluminado.

Assim, o local onde todos os raios da imagem se encontram é denominado *ponto focal*. O centro da imagem formada é determinado com base na posição do buraco da parede, assim, o centro desta projeção é definido como *ponto principal*. A distância entre o ponto focal e o ponto principal é definida como *distância focal*(FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

Como pode ser observado na figura 5, a imagem resultante é invertida em ambos os eixos. Por semelhança de triângulos, é possível deduzir as relações das equações 2.1 e 2.2 (CORREIA et al., 2022) (FORSYTH; PONCE, 2011).

$$x_i = -\frac{f}{Z}X_c \tag{2.1}$$

$$y_i = -\frac{f}{Z}Y_c \tag{2.2}$$



Figura 5 – Modelo *Pinhole*, variáveis de interesse. Imagem adaptada de (CORREIA et al., 2022)

Nestas equações 2.1 e 2.2, as variáveis x_i e y_i representam as coordenadas da imagem, as variáveis X_c , Y_c , Z_c representam as coordenadas tridimensionais do ponto captado do objeto tangencial e, por fim, a variável f refere-se à distância focal.

As equações possuem algumas implicações práticas quanto à distância focal e à distância do objeto. A distância focal é diretamente proporcional ao tamanho do objeto na imagem, enquanto que a distância do objeto ao foco possui uma relação inversa.

Estas equações também expressam o fato de que, sem conhecimento da distância de um objeto na imagem, não é possível determinar o tamanho do referido objeto, devido à presença de ambiguidade, onde o objeto pode ser grande e estar distante ou ser pequeno e estar próximo à câmera.

Considerando que a imagem possui tamanho finito, outra conclusão que se pode tirar das equações é que, para a mesma distância no eixo z, quanto maiores os valores de distância focal, mais ampliado fica o objeto na imagem e mais limitado é o tamanho do objeto que pode ser capturado na imagem.

As equações 2.3 e 2.4 (SZELISKI, 2010) também podem ser inferidas do esquema mostrado na figura 5, relacionando a tangente do ângulo do raio com as equações 2.1 e

2.2.

$$\theta_{xi} = \tan^{-1}\left(-\frac{xi}{f}\right) \tag{2.3}$$

$$\theta_{yi} = \tan^{-1}\left(-\frac{yi}{f}\right) \tag{2.4}$$

Estas equações demonstram que o ângulo θ do raio de luz, que atinge um determinado ponto na imagem, é relacionado à distância focal da configuração e com a posição do ponto na imagem. Portanto, quanto maior a distância focal, menor é o ângulo de visão e menos inclinados são os raios refletidos pelo objeto, que serão capturados na imagem. O centro da imagem, onde o ângulo do raio é nulo (ponto principal), é o ponto em que menos será possível perceber a profundidade do objeto.

Para enquadrar um objeto com a mesma escala na imagem, com diferentes valores de distância focal, a proporção $\frac{f}{Z_c}$ deve ser mantida constante. Por exemplo, um objeto capturado em uma escala na imagem, utilizando uma distância focal de 16mm e a uma distância de 1 metro, será obtido na mesma proporção, caso seja utilizada uma lente de 32mm a 2 metros de distância. Sendo o objeto plano e alinhado com os eixos x e y, as imagens obtidas serão simples amplificações ou reduções umas das outras.

No entanto, quando objetos tridimensionais são analisados, como mostrado na figura 6, esta escala não significa que as duas imagens sejam idênticas, pois, quando se modifica a distância focal, o ângulo dos raios capturados se altera, podendo variar o ponto do objeto que é capturado, a depender do formato e relevo da peça.



Figura 6 – Imagem capturada de um objeto tridimensional centralizado na imagem de diferentes distâncias focais (a) menor distância focal e maior proximidade da câmera (b) maior distância focal e maior afastamento da câmera.

2.2 Mapeamento da Imagem

A relação entre um ponto da imagem e ponto do mundo também pode ser representada por meio de uma analogia da formação da imagem, que realiza o caminho inverso. Nesta representação, os raios são rastreados por meio de uma reta, desde um determinado ponto da imagem na direção do ponto focal da câmera, até atingir um ponto do objeto (SZELISKI, 2010). A posição em que o raio atinge o objeto representa o ponto registrado na imagem. Essa conexão facilita a visualização, pois considera apenas os raios de luz que atingem a imagem, dentre os inúmeros raios presentes no ambiente.

Um grau maior de abstração que é frequentemente aplicado a esse processo é o conceito de imagem virtual. Esta imagem virtual se posiciona entre o objeto e o ponto focal, exatamente na distância focal, conforme ilustrado na figura 7. Nessa representação, um ponto específico do objeto cruza a imagem em uma localização determinada, ao longo da reta que conecta o referido ponto do objeto ao ponto focal (FORSYTH; PONCE, 2011). Essa representação é amplamente empregada tanto na fotogrametria quanto na computação gráfica. A imagem resultante é uma representação idêntica à imagem real formada no sensor, exceto por estar rotacionada em 180 graus.



Figura 7 – Representação da captura de um elemento em uma imagem virtual. Adaptado de (BRADSKI, 2000).

O processo de formação da imagem relaciona um ponto do mundo real com um ponto na imagem, e é conhecido como projeção da imagem. Já o processo reverso, que busca as origens no mundo real de um ponto da imagem, pode ser denominado como projeção de perspectiva inversa (LAMOSA; HU; UCHIMURA, 2008) ou ainda reconstrução 3D(MOONS et al., 2010).

2.3 Lentes

Antes das lentes, o modelo *pinhole* descrevia com precisão a formação de imagens, mas sua limitação estava na passagem restrita de luz pelo pequeno buraco, levando a tempos prolongados de exposição. A introdução de lentes superou essa limitação ao concentrar a luz, acelerando a formação de imagens ao permitir a passagem de mais luz em menos tempo. A função da lente é direcionar diferentes raios produzidos por um mesmo ponto do objeto, com diferentes ângulos, para o mesmo ponto da imagem (LU; CAI, 2020), conforme mostrado na figura 8.



Figura 8 – Modelo de Lentes finas. Adaptado de (LU; CAI, 2020).

Tanto a lente, quanto o *pinhole*, são capazes de produzir imagens, porém, por meio de mecanismos diferentes. Apesar das diferenças, o modelo com lentes pode ser comparado ao modelo *pinhole*, utilizando modelos como a aproximação de lentes finas.

A lente de uma câmera, na prática, é composta por um conjunto de lentes, que se propõe a gerar os resultados desejados como, por exemplo, uma determinada distância focal equivalente. As lentes comerciais podem possuir distância focal fixa ou ajustável, além disso, possuem diversas geometrias diferentes, a depender do resultado desejado (FÖRSTNER; WROBEL, 2016). As lentes também apresentam outros parâmetros importantes que serão discutidos a seguir.

2.3.1 Ajuste Focal

Uma característica do uso de lentes é que, enquanto o esquema *pinhole* é capaz de capturar uma imagem nítida independente da distância, nas lentes o foco da imagem varia de acordo com a distância. Deste modo, o conjunto de lentes exige um mecanismo adicional para ajustar a *distância em foco* com a nitidez máxima. Depois de definido uma distância de máxima nitidez, quanto mais distante um objeto se encontra deste local, menos nítida fica a imagem do elemento.

Enquanto a referida característica muitas vezes é indesejada, ela possui suas aplicações. Muitas vezes, este atributo é explorado artisticamente, principalmente quando a intenção é destacar os elementos desejados em uma cena. Existem ainda aplicações na engenharia, que utiliza o ajuste de zoom para criar um mapa de profundidade (XIONG; SHAFER, 1993), para, por exemplo, realizar a reconstrução 3D do objeto.

2.3.2 Ajuste de Abertura

O ajuste do foco define a distância com nitidez máxima. Ao se afastar deste plano, tanto no sentido de se afastar ou se aproximar da câmera, a nitidez é atenuada. Assim, é possível determinar a distância máxima entre um objeto e o ponto de nitidez máxima, que atendam aos critérios de nitidez mínima, para que sejam consideradas em foco.

O conceito de *profundidade de campo* refere-se a soma entre distância do ponto mais perto e mais longe da câmera com a nitidez mínima desejada. Este critério é definido com base no diâmetro de um círculo, onde é esperado que os raios de um ponto se espalhem. Geralmente, este tamanho deve ser, no mínimo, do tamanho de um pixel.

A profundidade de campo é alternada com base no diâmetro da abertura que possibilita a passagem de luz pela lente. Este valor, geralmente, é exposto em lente comerciais no formato F/# (SZELISKI, 2010), com valores variando desde F/1.4 até F/22. A determinação deste valor é definida por meio da distância focal f e pelo diâmetro da abertura D, conforme a equação 2.5.

$$F/\# = \frac{f}{D} \tag{2.5}$$

Após a definição da abertura, é possível entender a profundidade de campo por meio da aproximação da equação 2.6, a partir da abertura F/#, da distância do ponto em foco até a lente U, da distância focal f e do diâmetro do círculo de confusão máxima permitido d (HORNBERG, 2006).

$$P_{campo} \approx \frac{2d(F/\#)U^2}{f^2} \tag{2.6}$$

Deste modo, a abertura é o principal mecanismo para ajustar a profundidade de campo, uma vez que, ao se reduzir a abertura, ou seja, aumentar o F/#, permite-se uma maior distância do ponto focado, onde os objetos se apresentam nítidos. Porém, a diminuição da abertura também possui suas desvantagens, como a redução da entrada de luz e o aumento da difração. Sendo que, a difração é um efeito causado pela interação dos fótons com as bordas da abertura, que limitam a resolução efetiva da imagem.(CHANG et al., 2016)

De forma geral, quanto mais fechada a abertura, mais o modelo que utiliza lentes se aproxima do modelo *pinhole*. O mercado possui lentes tanto com abertura fixa, quanto com ajuste variável. Algumas câmeras, com o ajuste motorizado de abertura, possuem função de limitar a abertura mínima, para não comprometer a qualidade da imagem, devido ao fato de que a regulagem do diâmetro de abertura causa o efeito da difração quando se encontra muito fechada (HORNBERG, 2006).

2.4 Sensor Digital

Em câmeras digitais as imagens são capturadas em matrizes de células eletrônicas, com elementos fotossensíveis, capazes de converter a quantidade de fótons capturados em cargas proporcionais à intensidade de luz que as atingem. Estes sinais das diversas células presentes no sensor, posteriormente, são condicionados e convertidos para valores digitais, para então serem tratados digitalmente e, por fim, as informações são disponibilizadas através da sua interface.

Dessa forma, uma imagem digital é representada por uma função bidimensional I(x,y), onde cada ponto quantificado da imagem é representado por um elemento denominado *Picture Element* (pixel)(JÚNIOR, 2018). Um pixel representa, neste modo, a intensidade luminosa que atingiu a área fotossensível durante o processo de captura. Nos padrões atuais, estes valores são habitualmente amostrados utilizando um conversor analógico-digital de 8 bits, com 256 valores possíveis, também sendo possível encontrar sensores com 10 ou 12 bits. Ainda, por se tratar de um elemento sensor, a informação de um pixel é suscetível a ruídos provenientes, tanto do ambiente externo, quanto do próprio processo de condicionamento e conversão do sinal.

As tecnologias dominantes, atualmente, são a *Charge Coupled Device* (CCD) e *Complementary Metal Oxide Semicondutor* (CMOS). Os dois processos realizam a captura dos fótons e conversão analógica digital, porém, enquanto o CCD realiza a conversão externa às células, o CMOS utiliza da tecnologia de circuitos integrados para realizar o processamento na própria célula. Em razão do menor custo e consumo de energia de sensores com a tecnologia CMOS, a técnica domina mercado de consumidores finais. (RADHAKRISHNA; GOVINDH; VENI, 2021) (ZURICH, 2001)
Historicamente, a tecnologia CCD foi sempre cobiçada pelo mercado industrial por conta dos seus sensores apresentarem uma maior linearidade, melhor sensibilidade à luz e baixos níveis de ruído (ZURICH, 2001). Com o aprimorado da tecnologia, é possível encontrar no mercado modelos CMOS com resolução e qualidade geral comparáveis ao CCD (RADHAKRISHNA; GOVINDH; VENI, 2021). Assim, a indústria possui diversos equipamentos com esta tecnologia, que funcionam adequadamente, mas a tendência é que a tecnologia CMOS supere e substitua estes sensores no futuro.

No contexto de sensores capazes de captar diferentes cores, segundo a teoria das cores, as cores emitidas podem ser expressas por meio da combinação de três cores primárias: vermelho, verde e azul (SZELISKI, 2010). Desta maneira, é necessário determinar apenas a intensidade de cada cor primária para especificar a cor de um ponto. A captura de cores é alcançada pela câmera digital, por meio da aplicação de um filtro junto ao elemento sensor, que permite a passagem de apenas uma determinada cor (LOSSON; MACAIRE; YANG, 2010).

Por consequência, são necessários pelo menos três elementos sensores para definir a cor de um pixel colorido, sendo cada um responsável por captar a intensidade luminosa de uma das cores primárias. Por fim, ao combinar as informações dos elementos sensores presentes próximos a um pixel, é possível reproduzir a cor do ponto que aquele pixel representa.

Comparando o sensor colorido com o sensor monocromático, o qual não possui filtro de cores, é possível observar que o sensor monocromático não é capaz de distinguir as cores, mas apenas a luminosidade da região que ele captura. As imagens de sensores monocromáticos são representadas, visualmente, em escala de cinza, variando do preto ao branco, com o preto representando o mínimo de iluminação e o branco o máximo.

O sensor monocromático apresenta uma sensibilidade muito maior à luz por pixel. Já em sensores coloridos, o filtro de cor permite apenas a passagem de ondas com o espectro de luz associada a cor específica do filtro para a célula, impedindo os demais espectros luminem o sensor (JEON et al., 2016). Deste modo, mesmo considerando um filtro ideal de uma das três cores primárias, apenas uma parte da luminosidade total é capaz de atravessar o filtro. Ao permitir a passagem de toda luminosidade, o sensor monocromático apresenta sensibilidade à luz e assim uma melhor performance em ambientes com baixa iluminação (JEON et al., 2016).

Outra vantagem do sensor monocromático é que este dispositivo necessita apenas de uma célula para determinar sua informação, enquanto que o colorido necessita de ao menos três. Para não precisar do triplo de elementos sensores por pixel, cada pixel possui apenas um filtro de cor, cuja cor é determinada conforme padrões de organização, como o padrão de Bayer(SZELISKI, 2010)(FÖRSTNER; WROBEL, 2016). Desta forma, cada pixel capta apenas uma cor e as outras duas cores são inferidas realizando interpolação dos

pixels próximos, utilizando técnicas conhecidas como *Demosaicing* (LOSSON; MACAIRE; YANG, 2010). Estas técnicas geralmente são implementadas em baixo nível e não podem ser alteradas, podendo apresentar componentes artificiais indesejados. Desta maneira, em aplicações onde a cor não é necessária, é interessante utilizar câmeras monocromáticas.

2.4.1 Controle na captação de luz pelo sensor

Um dos parâmetros que determina o número de fótons recebidos pelo sensor é o tempo em que a célula é exposta. O tempo de exposição é dado em unidades de tempo e tem um grande impacto no tempo total de captura da imagem digital, variando de grandezas de milissegundos até horas de exposição. Quanto mais tempo o sensor fica exposto, mais fótons se acumulam nas células e mais clara fica a imagem.

Outro ajuste relevante é a sensibilidade, que é um parâmetro, normalmente, representado utilizando a padronização internacional de valores ISO. Este parâmetro se refere ao ajuste de ganho do amplificador de sinal no sensor, sendo que, quanto maior a sensibilidade, menos tempo de exposição é requerido para se atingir os mesmos níveis de luminância, com a mesma iluminação ambiente (IGUAL, 2019).

O tempo de exposição tem importantes implicações em ambientes dinâmicos, que apresentam movimentação na cena. Dado que a configuração utilizada neste trabalho apresenta um ambiente estático, o efeito do tempo de exposição impacta, principalmente, no tempo de captura.

É possível ajustar a sensibilidade para diminuir o tempo de exposição, porém, ao utilizar a sensibilidade para compensar a iluminação, ocorre uma elevação no nível de ruído da imagem (IGUAL, 2019) (SZELISKI, 2010) (FARRELL; XIAO; KAVUSI, 2006). É mais prudente, para evitar ruídos na imagem, caso seja possível, aumentar a iluminação do ambiente, lidar com um tempo de exposição maior ou, ainda, comprometer a profundidade de campo por meio do aumento da abertura da lente.

Uma forma alternativa de aumentar a captação de luz pelo sensor e, por consequência, diminuir o nível de ruído na imagem, é utilizar um sensor com maiores dimensões físicas dos pixels, para, assim, aumentar a sensibilidade do sensor sem comprometer a qualidade das informações.

Um sensor com tamanhos físicos de pixels maiores é, por consequência, maior, o que aumenta o custo de produção e, por fim, o preço final destes sensores. Os sensores maiores necessitam, ainda, de lentes com diâmetros compatíveis para garantir que todo o sensor seja suficientemente iluminado, a fim de evitar o efeito de *Vignetting*, aumentando o custo do conjunto de captura como um todo.

2.5 Coordenadas homogêneas

O sistema de coordenadas homogêneas é utilizado em geometria projetiva. A conversão das coordenadas cartesianas para as coordenadas homogêneas possibilita uma simplificação na representação do fenômeno da projeção do mundo real na imagem, por meio de operações com matrizes, que compactam e simplificam a ilustração dos processos.

Na representação por meio de coordenadas homogêneas, um ponto p1 de coordenadas (a, b, c) é equivalente a outro ponto p2 com coordenadas escaladas pelo fator λ ao seu resultando, dessa forma, $p1 \in p2$ não são diferentes, mas representam o mesmo ponto p, como mostra a equação 2.7 (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda a \\ \lambda b \\ \lambda c \end{bmatrix}$$
(2.7)

As coordenadas euclidianas (a, b) de um ponto podem ser convertidas em coordenadas homogêneas, por meio da adição de uma dimensão extra de valor unitário, conforme mostra a equação 2.8. Para realizar a operação inversa, basta dividir as demais dimensões pela escala da última dimensão e removê-la, como mostrado na equação 2.9. Lembrando que, ao realizar a transformação em coordenadas homogêneas por propriedade, os pontos são equivalentes a seus escalares, conforme a equação 2.10. A partir da variação da escala λ , presente na última dimensão, forma-se uma reta de pontos equivalentes, conforme representado na figura 9 (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

г ¬

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.8)

$$\begin{bmatrix} \frac{a}{\lambda} \\ \frac{b}{\lambda} \\ \frac{c}{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$
(2.9)

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda a \\ \lambda b \\ \lambda \end{bmatrix}$$
(2.10)

A conveniência da utilização desta formalização vem do fato de que um ponto na imagem não representa apenas um ponto específico no mundo real, mas um conjunto de possibilidades representado pela reta, que se origina no ponto focal e passa pela imagem.



Figura 9 – Sistema de Coordenadas Homogêneas. Adaptado de (AN et al., 2018)

Apenas ao se determinar a distância do objeto pode se estabelecer qual ponto desta reta corresponde às coordenadas do ponto no mundo real. Esta ambiguidade é expressa pela equação 2.1 e 2.2, como abordado anteriormente e, também, pode ser visualizada na figura 7.

2.5.1 Modelagem da Captura em Coordenadas Homogêneas

O objetivo da fotogrametria é realizar a projeção reversa dos pontos da imagem para o mundo real, porém é mais oportuno modelar o processo inverso de projeção da imagem, para, posteriormente, invertê-lo. A referida conveniência poder ser observada no fato de que, enquanto o processo de projeção reversa da imagem é ambíguo, uma vez que um ponto na imagem pode representar vários pontos no espaço, o processo de formação da imagem não é, pois um ponto no mundo real é mapeado a apenas um pixel.

Comparando a projeção da imagem com o sistema de coordenadas homogêneas, é possível inferir que a profundidade pode ser tratada como um fator de escala λ . Dessa forma, as coordenadas de um ponto na imagem (x_i, y_i) podem ser determinadas por meio das equações 2.11 e 2.12 (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003) (SZELISKI, 2010), do modelo *pinhole*, utilizando à propriedade de conversão das coordenadas homogêneas para as coordenas cartesianas, conforme apresentada a equação 2.14. Nota-se que há inversão do sinal das equações, pois o modelo utilizado representa a imagem virtual, que é representado pelo esquema da figura 7.

$$x_{h} = \frac{fX}{Z}$$

$$y_{h} = \frac{fY}{Z}$$

$$z_{h} = Z$$
(2.11)

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_h}{z_h} \\ \frac{y_h}{z_h} \\ \frac{z_h}{z_h} \end{bmatrix}$$
(2.12)

$$x = \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.13)

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.14)

As câmeras digitais captam as imagens e as representa em quantidade discretizadas de espaço, por meio de pixels, e não em unidades de medidas do mundo real. Assim, a equação de projeção para imagens digitais deve relacionar a imagem em pixels com as coordenadas no mundo real.



Figura 10 – Coordenadas do sensor (x, y), coordenadas da imagem (x_{cam}, y_{cam}) e ponto principal p nas coordenadas (x_0, y_0) . Retirado de (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003)

Assim como apresentado em (AN et al., 2018) e (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003), o modelo de representação da equação 2.14 pode ser adaptado para o contexto de aplicação em imagens digitais, inserindo informações que relacionam os pixels com seu tamanho físico e a localização do ponto principal, como mostra a figura 10. Esta adaptação resulta na operação de projeção da equação 2.15. A distância focal em pixels é o produto da distância focal f com o tamanho físico do pixel. Devido às imperfeições ou limitações no processo de fabricação, a distância focal e o tamanho do pixel podem variar entre os eixos no eixo x e y e, assim, um fator de escala α também é inserido na representação para incrementar o modelo, no entanto, para os padrões atuais de fabricação este valor é muito próximo da unidade. A posição onde o centro focal atravessa a imagem é denominada como ponto principal, sua localização (p_x, p_y) depende da pose da lente em relação ao sensor e da posição de origem dos pixels.

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 & p_x & | & 0 \\ 0 & c & \alpha & p_y & | & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.15)

$$x^{h} = [K|0] \ X^{h} \tag{2.16}$$

г п

$$\begin{bmatrix} x_h/z_h\\ y_h/z_h\\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h\\ y_h\\ z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x & 0 & p_x\\ 0 & c_y & p_y\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_1\\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_2\\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\ Y\\ Z\\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.17)

A equação 2.16 representa as matrizes da equação 2.14 por meio de variáveis. A matriz K é denominada matriz da câmera, enquanto que o vetor x representa os pontos projetados em coordenadas homogêneas e o vetor X representa as coordenadas cartesianas dos pontos no mundo.

Nesta equação, as coordenadas dos pontos do objeto estão representadas conforme o eixo da câmera, o que é indesejado por alguns motivos. Um destes motivos deve-se ao fato de que não é viável, ou conveniente, alinhar perfeitamente na prática o plano de interesse com os eixos da câmera. Outro motivo é o caso de um objeto captado por múltiplas imagens, onde é interessante que o objeto seja expresso por meio de um eixo de coordenadas comum. Assim, se faz necessário a definição de dois eixos de coordenadas: o eixo das coordenadas da câmera e o eixo das coordenadas do mundo.

Estes eixos se encontram deslocados e rotacionados entre si, por isso, se faz necessário representar o processo de rotação e translação entre estes eixos. A rotação em torno dos eixos, conforme os ângulos de Euler, pode ser representada pela equação 2.21 (FÖRSTNER; WROBEL, 2016). Já a matriz de rotação R é a combinação de rotações em torno dos eixos, executadas sequencialmente, em uma ordem pré-determinada.

No caso do ângulo de Euler, primeiramente, rotaciona-se o eixo z por γ , depois rotaciona-se no eixo y por β e, por último, rotaciona-se x por α . Nota-se que a rotação por $\theta = 0$, resulta na matriz identidade.

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$
(2.18)

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$
(2.19)

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.20)

$$R = R_x(\alpha) \ R_y(\beta) \ R_z(\gamma) \tag{2.21}$$

Uma forma conveniente de retratar a transformação de corpo rígido é não expressar, explicitamente, a translação t como as coordenadas tridimensionais do eixo da câmera, em coordenadas do mundo C. Adequando o vetor de translação t, conforme a equação 2.22, é possível representar a transformação utilizando 2.23 por meio da equação 2.24. Nestas equações, X_w^c e X_c^c são as coordenadas cartesianas de um ponto nas coordenadas do mundo e da câmera, respectivamente, enquanto $X_w^h e X_c^h$ são as respectivas coordenadas homogêneas.(HARTLEY; ZISSERMAN, 2003)

$$t = -RC \tag{2.22}$$

$$R|t = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$
(2.23)

$$X_c^c = R(X_w^c - C)$$

$$X_c^c = RX_w^c + t$$

$$X_c^h = [R|t]X_w^h$$

(2.24)

Dessa forma, as coordenadas cartesianas são rotacionadas e transladadas das coordenadas do objeto para as coordenadas da câmera, antes de realizar a projeção. A modificação da equação 2.16, para realizar a mudança de eixo de coordenadas, é representada pela equação 2.25.

$$x^{h} = [K|0] [R|t] X^{h}$$
(2.25)

Depois de finalizado o mapeamento de um ponto no eixo de coordenadas do objeto para um ponto da imagem, o processo inverso de projeção de um ponto da imagem pode ser obtido por meio da inversão das matrizes(SZELISKI, 2010). Assim, obtem-se a equação 2.26.

$$X^{h} = [R|t]^{-1} [K|0]^{-1} x^{h}$$
(2.26)

Importa ressaltar que a equação 2.26 somente retornará o resultado considerando o escalar unitário. Isso ocorre devido ao fato de que o vetor x é proveniente da conversão dos pontos da imagem em coordenadas homogênea que é adequado para a equação de forma $x^{h} = \begin{bmatrix} x_{i} & y_{i} & 1 \end{bmatrix}^{T}$. Para realizar a projeção deste ponto, é necessário considerar, por propriedade, que ele é equivalente aos pontos $x^{h} = \begin{bmatrix} \lambda x_{i} & \lambda y_{i} & \lambda \end{bmatrix}^{T}$. Inserindo este escalar na equação 2.26 obtem-se na equação 2.27.

$$x^{h} = \lambda x^{h}$$

$$X^{h}_{w} = [R|t]^{-1} [K|0]^{-1} \lambda x^{h}$$
(2.27)

Em (IMATEST, 2018) foi demonstrado que, a partir de uma propriedade da matriz de pose [R|t], representada em 2.28, algumas manipulações matemáticas podem ser realizadas para adaptar a equação 2.27 para a forma da equação 2.29.

$$R^{-1} = R^{T}$$

$$[R|t]^{-1} = \left[\frac{R}{0^{T}} \left| \frac{t}{1} \right]^{-1} = \left[\frac{R^{T}}{0^{T}} \left| \frac{-R^{T}t}{1} \right]$$

$$X_{w}^{h} = R^{T} K^{-1} \lambda x^{h} - R^{T}t$$
(2.29)

De forma análoga, (MOONS et al., 2010) emprega uma abordagem semelhante para realizar a dedução, utilizando notação direta na qual t = C, e a matriz de rotação é derivada da rotação da imagem para o mundo, sendo assim a inversa da notação utilizada neste trabalho. Ao alinhar a notação de (MOONS et al., 2010) com a conveniente notação adotada pelo OpenCV e realizar as substituições $R = R^T$ e $C = -R^T t$, é possível obter resultados idênticos, confirmando ainda a consistência entre diferentes autores e notações.

Na equação 2.29, pode-se confirmar que as coordenadas do mundo real, referentes a um ponto, são representadas por uma reta, que varia em relação a profundidade λ . Nesta reta, o termo independente $-R^T t$ representa o deslocamento do eixo da câmera em relação ao eixo de coordenadas do mundo C, já a porção $R^T K^{-1} x^h$ caracteriza a inclinação da reta.

Por fim, é necessário ressaltar que o modelo de projeção de imagens discutido nesta seção tem como base o esquema *pinhole*. Dessa forma, é possível considerar que o esquema é válido para mapear imagens após a remoção das distorções ocasionadas pela introdução de lentes. A distorção será discutida na próxima sessão, sendo um efeito estimado durante o processo de calibração da câmera, que é mitigado antes da aplicação no modelo *pinhole*.

2.6 Distorções Causas pela Lente

Um fator importante que distancia o uso de lentes do modelo *pinhole* é a distorção causada pela lente, por conta da sua geometria ou posição em relação ao sensor. Esta distorção não causa perda de nitidez, mas desloca os raios de luz para outras posições da imagem. Estas distorções devem ser levadas em conta em reconstruções de alta precisão (SZELISKI, 2010).

A distorção é um fenômeno que desloca a informação de um ponto na imagem de acordo com sua localização (SZELISKI, 2010). A equação 2.30 (FÖRSTNER; WROBEL, 2016) mostra este efeito, onde um ponto, que atingiria a imagem nas coordenadas (x_i, y_i) no modelo *pinhole*, ao passar pela lente é desviado em Δx e Δy e atinge as coordenadas (x_d, y_d) . Este comportamento varia de acordo com as coordenadas do ponto na imagem que este ponto atingiria, e pode ser expresso pelas funções não lineares: $D_x(x_i, y_i)$ e $D_y(x_i, y_i)$. Após estimados os parâmetros destas funções, a aberração causada pela lente pode ser mitigada invertendo o processo de forma iterativa.

$$x_{d} = x_{i} + \Delta x$$

$$y_{d} = y_{i} + \Delta y$$

$$x_{d} = D_{x}(x_{i}, y_{i})$$

$$y_{d} = D_{y}(x_{i}, y_{i})$$
(2.30)

Assim sendo, esta característica da lente deve ser estimada e compensada, para que o raio de luz do objeto até a imagem tenha a trajetória retilínea e o modelo *pinhole* possa ser utilizado. Estas distorções existem em todas as lentes e podem ser positivas e negativas. Deste modo, é possível atenuá-la por meio de um conjunto de lentes. É possível encontrar lentes otimizadas para baixa distorção, que são vastamente empregadas em visão de máquina. As lentes com baixa distorção geralmente são lentes de distância focal fixa, enquanto que as lentes de distância focal variável alteram sua distorção de acordo com a distância focal, possuindo um ponto ótimo. As lentes de baixa distorção reduzem o trabalho e o efeito deste comportamento, porém, em aplicações de precisão, é sempre importante estimar este parâmetro.

Ao invés de abordar os diversos fenômenos que ocorrem na lente e que causam distorções na imagem, a fotogrametria é focada nos efeitos desta aberração e, assim, realiza a estimação de parâmetros de modelos caixa preta que expressem seu comportamento. Os efeitos da distorção são compostos principalmente por duas categorias: a distorção radial e distorção tangencial. Os dois tipos de aberrações são mínimos no ponto principal da imagem, variando conforme se distancia deste ponto, com tendência de maximização nas bordas da imagem.

A distorção radial é causada por aberrações esféricas, que fazem com que as linhas retas do espaço se apresentem arredondadas na imagem. A figura 11 exibe as consequências da distorção radial em uma imagem.



Figura 11 – Representação dos efeitos da distorção radial (a) imagem sem distorções (b) efeito tipo almofada (c) efeito tipo barril.

A distorção radial, habitualmente, é modelada conforme a equação 2.31 descrita por (FÖRSTNER; WROBEL, 2016) (SZELISKI, 2010) (OPENCV, 2023). Nesta modelagem, a variável r representa a distância do ponto ideal ao ponto principal. As variáveis $x_i \, e \, y_i$ representam as coordenadas da imagem sem distorção, já as variáveis $x_{dr} \, e \, y_{dr}$ representam as coordenadas da imagem com distorção radial e as variáveis $[k_1, k_2, k_3]$ são parâmetros a serem estimados.

$$r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$x_{dr} = x_i (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$y_{dr} = y_i (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$
(2.31)

Conforme representado na figura 11, esta distorção pode ser do tipo almofada ou do tipo barril. Este formato da distorção radial dependerá do parâmetro k_1 , o qual é do tipo barril para valores negativos e do tipo almofada no caso contrário.

O número de parâmetros utilizados pelo modelo da distorção radial varia de acordo com a aplicação, porém, para grande parte das aplicações, dois parâmetros, $k_1 e k_2$, são suficientes para expressar este efeito. Desta forma, vários *softwares* de calibração utilizam por padrão dois parâmetros e, também, permitem a alteração para mais parâmetros.

Outra forma de distorção é a distorção tangencial, a qual é causada pelo desalinhamento entre a lente e o sensor, tanto no eixo vertical, quanto no eixo horizontal, durante o processo de montagem ou fabricação. O distúrbio causado por este desalinhamento é a amplificação desigual de diferentes pontos da imagem, transmitindo um aspecto trapezoidal à imagem, que sugere uma inclinação do objeto, assim como mostra a figura 12.



Figura 12 – Representação dos efeitos da distorção tangencial pura (a) imagem sem distorções (b) distorção tangencial no sentido vertical (c) distorção tangencial no sentido horizontal e vertical simultaneamente.

A distorção tangencial pode ser modelada de acordo com a equação 2.32, conforme (FÖRSTNER; WROBEL, 2016) (OPENCV, 2023). Nesta representação, a variável r também representa a distância do ponto ideal ao ponto principal, retratada na equação 2.31, já as variáveis $x_i \, e \, y_i$ representam as coordenadas da imagem sem distorção, por fim, as variáveis $x_{dt} \, e \, y_{dt}$ representam as coordenadas da imagem com distorção tangencial e as variáveis $[p_1, p_2]$ são os parâmetros a serem estimados.

$$x_{dt} = x_i + [2p_1 x_i y_i + p_2 (r^2 + 2x_i^2)]$$

$$y_{dt} = y_i + [2p_2 x_i y_i + p_1 (r^2 + 2y_i^2)]$$
(2.32)

A estimação dos parâmetros destes efeitos da distorção radial e tangencial é capaz de modelar grande parte dos efeitos causados pela distorção da lente, para que estes sejam mitigados e, assim, seja possível utilizar o modelo *pinhole*. Assim, conforme a equação 2.33, a distorção da lente pode ser aproximada pela combinação da distorção radial e a tangencial (FÖRSTNER; WROBEL, 2016) (OPENCV, 2023).

$$D_x(x_i, y_i) \approx x_i(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + [2p_1x_iy_i + p_2(r^2 + 2x_i^2)]$$

$$D_y(x_i, y_i) \approx y_i(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + [2p_2x_iy_i + p_1(r^2 + 2y_i^2)]$$
(2.33)

2.7 Processo de Calibração

Segundo (OPENCV, 2023), o processo de calibração consiste em computar os valores dos parâmetros de K, $R \in t$, além dos parâmetros de distorção da lente. Os parâmetros da matriz K e os parâmetros de distorção são específicos das características do conjunto de captura (câmera e lente). Já os parâmetros da matriz R e o do vetor t, dependem da disposição do referido conjunto de captura em relação ao objeto de interesse. Como descrito anteriormente, estes valores são essenciais para realizar a projeção dos pontos da imagem.

A matriz K possui 4 graus de liberdade: os parâmetros $[c, \alpha, p_x, p_y]$ que, alternativamente, também podem ser expressos como $[c_x, c_y, p_x, p_y]$, com o parâmetro α implícito em c_y . Os graus de liberdade da distorção da lente variam de acordo com o modelo e número de parâmetros utilizados. Na aplicação mais comum, com 2 parâmetros de distorção radial $[k_1, k_2]$ e tangencial $[p_1, p_2]$, a distorção possui 4 graus de liberdade.

Uma vez inserida a lente na câmera e regulados os ajustes da lente, como a distância em foco, abertura da lente e distância focal, os parâmetros da matriz K e da distorção da lente se manterão, praticamente, constantes até serem regulados novamente. Desta forma, para uma câmera devidamente regulada para a aplicação, é esperado que ela não modifique, significantemente, seus parâmetros de captura, independentemente de como é posicionada. Dito isso, esses parâmetros se referem às características internas do conjunto de captura, sendo assim chamados de parâmetros intrínsecos da câmera.

A matriz R possui 3 graus de liberdade, referentes às rotações em $[\alpha, \beta, \gamma]$ nos eixos x, y e z. Ainda, o vetor t também possui 3 graus de liberdade, correspondente a translação $[t_x, t_y, t_z]$ nos três eixos.

Conforme o posicionamento da câmera em relação à cena de interesse, os parâmetros da matriz R e o do vetor t se modificam de acordo com os eixos definidos para o objeto. Desta maneira, estes parâmetros são externos à câmera, representando como a câmera está disposta no mundo, sendo nomeados parâmetros extrínsecos.

Assim sendo, a calibração intrínseca possui 8 graus de liberdade e a calibração extrínseca possui 6 graus de liberdade, ou seja, para projetar um ponto do mundo na imagem, são necessários 14 parâmetros. O processo de calibração utiliza amostras de valores conhecidos no mundo real e suas respectivas posições na imagem, para realizar o mapeamento e determinar os parâmetros necessários.

Existem diversas técnicas para calibração de câmeras. O método descrito neste trabalho é baseado no procedimento definido por (ZHANG, 1999). Esta técnica é amplamente utilizada, junto com suas variações. A biblioteca de visão computacional OpenCV, empregada neste trabalho, também se baseia nesta técnica.

2.7.1 Padrão de Calibração

Os métodos convencionais de calibração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos realizam amostragem por meio de um padrão de calibração. Este padrão é uma peça física, cujas dimensões são conhecidas com precisão. Desta maneira, a precisão na confecção e conservação deste padrão influi, diretamente, na qualidade da calibração realizada e, por consequência, na precisão das medidas realizadas por meio de imagens.

No método Zhang (ZHANG, 1999), o padrão utilizado é perfeitamente plano e os pontos de referência são posicionados em forma de matriz, com uma distância uniforme entre si. Desta maneira, um ponto de referência na matriz de pontos tem suas coordenadas definidas conforme a equação 2.35.

$$P_{n,m} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,m} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \cdots & p_{n,m} \end{bmatrix}$$
(2.34)

$$p_{i,j} = (i \ \Delta d, j \ \Delta d, 0) \tag{2.35}$$

O ponto de referência p_{ij} é encontrado na posição (i, j) de uma matriz P_{nm} de pontos de referência, que possui n linhas e m colunas. O eixo de coordenadas do objeto é posicionado de forma que o eixo z está alinhado com a face plana da amostra. Desta forma, qualquer ponto do padrão de calibragem está localizado em um plano de coordenadas cartesianas do mundo real dentro o plano z = 0. A distância entre linhas e colunas Δd é uma medida constante e conhecida, o que facilita a localização física de um ponto na matriz.

Para evitar ambiguidades, com o propósito de possibilitar a diferenciação entre os eixos, é recomendado que a amostra possua uma matriz de pontos de referência com um número de linhas diferente do número de colunas. Ainda, é oportuno que o padrão tenha assimetria nos eixos x e y, que permitam determinar uma posição de origem dos pontos. A técnica mais utilizada para conferir assimetria, refere-se a demandar que as linhas sejam pares enquanto as colunas são ímpares, ou o contrário.

Os tipos de padrão de calibração mais comuns estão dispostos na figura 13. O padrão do tipo xadrez é um formato simples, que utiliza as quinas internas para determinar



Figura 13 – Padrões de calibração planares mais populares. (a) xadrez (b) círculo assimétrico (c) Charuco.

a localização dos pontos de referência na imagem. Como será abordado no capítulo de visão computacional, as quinas, principalmente as quinas internas, são pontos característicos de um objeto, que podem identificados e localizados com precisão.

O padrão do tipo círculo assimétrico é outro formato, que utiliza o centro dos círculos para definir a localização dos pontos de referência. Existem trabalhos como (LIU; SU, 2008), que também utilizam o formato do círculo na imagem para realizar a calibração.

Finalmente, o padrão do tipo Charuco (AN et al., 2018) combina o padrão xadrez com marcadores no padrão Aruco (GARRIDO-JURADO et al., 2014), que possuem codificação única. Ele alia a localização das quinas internas do xadrez com o sistema de localização e identificação, próprios dos marcadores Aruco. O principal objetivo desta configuração é possibilitar a localização dos pontos sobre cenários em que possam acontecer a oclusão parcial do padrão de calibração.

Os três tipos de padrão podem ser gerados pela biblioteca do OpenCV. Estes padrões podem ser impressos e utilizados para calibrar a câmera. Entretanto, existem algumas implicações práticas na fabricação de padrões de calibração. Primeiramente, a precisão da marcação dos pontos é um fator importante, que limita a precisão da localização. Outro ponto a ser observado é que o padrão deve possuir dimensões compatíveis, para cobrir diferentes porções da imagem na distância de trabalho pretendida. A densidade dos pontos de referência é importante, porém é limitada pela resolução do sensor utilizado pois necessita de uma localização precisa dos pontos de referência. Por último, o padrão deve ser o mais plano factível, pois a premissa de muitas técnicas que utilizam este método se baseia no fato que o referido é perfeitamente plano.

2.7.2 Calibração Intrínseca

Em técnicas convencionais, que utilizam um padrão plano para realizar a calibração intrínseca, como (ZHANG, 1999), amostra-se um conjunto de imagens do padrão, para se realizar uma otimização dos parâmetros da distorção da lente e a matriz da câmera K. Estas imagens contém o padrão a uma distância da câmera próxima a distância de trabalho pretendida.

As imagens amostradas, conforme apresentado na figura 14, apresentam o exemplar em diferentes rotações e translações, características extrínsecas, em relação à câmera. De outro modo, este conjunto apresenta em comum as mesmas coordenadas no mundo e as mesmas características intrínsecas do conjunto da câmera.



Figura 14 – Padrão de calibração capturado pela câmera em diferentes poses. Capturados para calibração dos parâmetros da câmera utilizada no trabalho.

Antes da calibração, é necessário extrair, com precisão, os pontos de referência na imagem $x_{i,j} = (x_{(i,j)}, y_{(i,j)})$, em todas as imagens j do conjunto de amostra, utilizando técnicas de visão computacional. Posteriormente, os pontos extraídos são mapeados às suas respectivas coordenadas do mundo $X_i = (X_{(i,j)}, Y_{(i,j)}, 0)$, conforme as características do padrão de calibração.

O processo de calibração, utilizando um padrão plano, pode ser expresso em linhas gerais, segundo (BURGER, 2016), pelos seguintes passos:

 Estimar a matriz de homografia H, que relaciona as coordenadas dos pontos de referência no mundo e na imagem, em coordenadas homogêneas, para cada uma das imagens j, separadamente, conforme a equação 2.36(BURGER, 2016).

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{x}_{i,j} \\ \overline{y}_{i,j} \\ \overline{w}_{i,j} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_{i,j} \\ Y_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.36)

2. Estimar matriz da câmera K_j , com base em H_j , para cada imagem.

- 3. Estimar os parâmetros extrínsecos de R_j e t_j , com base em H_j , para cada imagem.
- 4. Modelar a distorção das lentes, utilizando mínimos quadrados, com o objetivo de minimizar o erro entre os pontos projetados, utilizando $K_j, R_j \in t_j$, e os amostrados na imagem.
- 5. Refinar todos os parâmetros, agregando as amostras de todas as imagens em um sistema não linear de equações único.

Os passos e dedução deste algoritmo de calibração não são triviais, (BURGER, 2016) e (ZHANG, 1999) dispõem de mais detalhes. Como visto na equação 2.36, este processo explora a planicidade do padrão de calibração. Além disso, a técnica explora propriedades do problema para que a matriz H_j possa ser decomposta em K_j, R_j e t_j . Posteriormente, os resíduos da projeção são modelados como distorções na lente. Por fim, uma otimização que considera todas as diferentes imagens é realizada, propiciando generalização da modelagem de cada imagem. Para realizar esta otimização, utiliza-se um método não linear (Levenberg-Marquart) para estimar os valores de K e da distorção, comum a todas as vistas. Para isto, a estimação requer ainda determinar os valores extrínsecos, $R_j \in t_j$, que são as rotações e translações ótimas de cada vista. Desta forma, os valores extrínsecos estimados variam a cada vista mas devem remeter os parâmetros intrínsecos comum a todos. Deste modo, esta estimação deve retornar os parâmetros que minimizem a soma de erros de projeção do conjunto de amostra . Os valores de K_i, R_j e t_j , dos passos anteriores, são utilizados como estimativas iniciais para a otimização conjunta. Este método está disponível na biblioteca de visão computacional utilizada neste trabalho: a OpenCV(BRADSKI, 2000).

Após a realização do procedimento, é possível avaliar os resultados com base no erro de projeção médio. Deste modo, imagens com desempenho destoante do conjunto podem ser descartadas e o processo pode ser refeito. Dada a importância de avaliar a regressão de parâmetros e descartas os *outliers*, os softwares de calibração geralmente retornam o erro de projeção geral e por imagem.

Algumas recomendações apresentadas por (WILM, 2018) e confirmadas na práticas são importantes para atingir melhores resultados. Primeiramente, em relação ao conjunto de imagens, recomenda-se uma amostragem mínima 12 imagens e as amostras devem ser representativas. Ou seja, as poses do padrão devem ser substancialmente diferentes entre imagens, tanto nas rotações, quanto nas translações, e os pontos de referência, do conjunto, devem cobrir, uniformemente distribuídos, todo o espaço da imagem.

Existem, ainda, recomendações para viabilizar uma extração precisa dos pontos de referência pela visão computacional. A distinção entre os pontos de referência deve ser clara, assim deve se evitar rotações demasiadas. Também é importante utilizar uma iluminação adequada, que seja uniforme e difusa. Outro fator importante, é que a câmera e o padrão devem se manter estáticos durante o processo de captura.

2.7.3 Calibração Extrínseca

Enquanto a calibração intrínseca pode ser realizada fora do local da aplicação, a calibração extrínseca é feita com a câmera na posição pretendida para utilização. O objetivo desta calibração para este trabalho é definir um plano de referência no ambiente de trabalho da câmera. Para este propósito, um padrão de calibração, normalmente plano, é posicionado na cena para determinar os eixos tridimensionais do mundo.

Para realizar esta estimação segundo cite2023opencv, necessita-se, primeiramente, estimar os parâmetros da câmera em K e as distorções da lente, adquiridos previamente por meio da calibração intrínseca. Primeiramente, as distorções da lente são removidas da imagem, enquadrando a imagem no modelo *pinhole*.

A formulação do problema envolve a adaptação da equação 2.25 para o contexto de regressão, com o objetivo final de estimar a matriz [R|t]. Para alcançar esse objetivo, as coordenadas da câmera são deduzidas com base na equação 2.37, resultando na expressão final ilustrada na equação 2.38 (OPENCV, 2023). Nesta representação, X_w, Y_w, Z_w são coordenadas do mundo, x_i e y_i são coordenadas da imagem e X_c, Y_c, Z_c são coordenadas da câmera.

$$[K|0]^{-1} \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix} = [R|t] \begin{vmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{vmatrix}$$
(2.37)

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R|t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2.38)

O problema que busca determinar a pose da câmera, com base em amostras do mundo real, é denominado *Perspective-n-Point Camera Pose Determination* (PnP). Este algoritmo calcula efetivamente os parâmetros extrínsecos ($R \ e \ t$) com base nos pontos mapeados (SZELISKI, 2010). O principal método empregado pelo OpenCV, utiliza uma estimação não linear baseada no método Levenberg-Marquardt para determinar os parâmetros extrínsecos. O critério de avaliação utilizado é a minimização da soma dos erros de projeção dos pontos amostrados.

2.8 Técnicas Relacionadas

Existem diversas formas de solução para extrair as medidas de um elemento por meio de imagens, desde técnicas que se baseiam, exclusivamente, em visão monocular, até técnicas que utilizam triangulação de múltiplos elementos, como Visão Estereoscópica (KARSZNIA; OSADA, 2022) e Projeção de Padrões (SUN et al., 2022).

Um ponto em comum dentre a maioria das técnicas de fotogrametria é a utilização de câmeras calibradas, ou seja, quando os parâmetros fundamentais das câmeras empregadas são conhecidos ou previamente estimados.

A maior vantagem das técnicas que utilizam triangulação de informações é a versatilidade na aquisição de dimensões em objetos complexos ou em ambientes pouco controlados, uma vez que é capaz de prover informações de profundidade diretamente pelo processamento de imagens (DING et al., 2011).

A visão estereoscópica (*stereo vison*) é uma técnica baseada na visão humana, na qual o cérebro percebe a profundidade no ambiente por meio da combinação das imagens dos dois olhos (HORNBERG, 2006). Deste modo, nesta técnica utiliza-se duas ou mais câmeras, normalmente, com posição e rotação referenciais conhecidas. Um esquemático da técnica é apresentado na figura 15.



Figura 15 – Esquema de Visão Estereoscópica. Retirado de (FUA et al., 2022).

O algoritmo da visão estereoscópica inicia-se com a identificação e localização dos pontos de interesse comuns às imagens das câmeras e, na sequência, relaciona a pose das câmeras com a posição do elemento em cada imagem(HORNBERG, 2006). Por fim, o algoritmo estima a profundidade daquele ponto. O desafio desta técnica é realizar a correspondência com precisão entre os pontos comuns às imagens, o que demanda muito processamento (DING et al., 2011), e lidar com situações onde a posição entre as câmeras

não é conhecida. Alternativamente, as imagens podem ser capturadas em diferentes posições pela mesma câmera, em um tipo de problema conhecido como *Multiple View Stereo* (MVS) (FURUKAWA; HERNÁNDEZ et al., 2015).

Na técnica com projeção de padrões, projeta-se um padrão luminoso, luz estruturada, em um objeto que sofrerá deformações na imagem capturada, conforme o formato da peça (XU; ZHANG, 2020). Um padrão empregado é a linha de laser (SUN et al., 2022), que se distancia da linha projetada esperada, de acordo a profundidade do exemplar.

A projeção de padrões é comumente utilizada em *scanners* 3D pela sua versatilidade variando, desde padrões simples como o laser, até padrões mais complexos, como a projeção de franjas, mostrado na figura 16. Esta técnica possibilita o levantamento de modelos 3D de objetos com formas complexas, porém exige que as medições sejam realizadas em ambientes controlados, onde a luz estruturada projetada possa se destacar.



Figura 16 – Configuração da Técnica de Projeção de Padrões utilizando luz estruturada. Adaptado de (WI et al., 2020).

Estas técnicas, que utilizam triangulação, dependem da qualidade da identificação dos pontos de interesse e dos equipamentos utilizados, para atingirem elevados níveis de fidelidade.

As técnicas que utilizam apenas geometria monocular, como a utilizada neste trabalho, apresentam *setup* semelhante ao mostrado na figura 17.

Esta classe de técnicas de reconstrução tridimensional necessitam de ambientes controlados e de informações adicionais da cena e/ou do exemplar, onde as medidas são realizadas com base em informações de referência e, assim, tendem a ser mais específicas para a aplicação (LI et al., 2019), (PUECH; CHASSERY, 1996) (XU; LIU, 2013),(NOO-



Figura 17 – Medição de um peça mecânica utilizando visão monocular. Adaptado de (DUAN et al., 2018).

NAN et al., 2019) (LI et al., 2020).

Contudo, considerando que a técnica de visão monocular possui um elevado custobenefício, conforme apontado por (LI et al., 2019), e é capaz de realizar medições precisas, como citado em (SUN et al., 2013), se torna atraente sua aplicação em diversos processos industriais.

3 Visão Computacional

Embora a fotogrametria auxilie na projeção de um ponto da imagem em coordenadas do mundo, para realizar medições, é necessário, primeiramente, definir quais pontos devem ser projetados. O interesse neste estudo não é realizar a projeção de todos os pontos, para realizar a reconstrução da imagem em 3D, mas analisar certos pontos específicos, que proporcionam a medição dos parâmetros de interesse no anel. A localização destes pontos é realizada por meio de operações e técnicas de processamento de imagens, aplicados na imagem.

Para o computador a imagem é apenas uma matriz de inúmeros pixels, com variados valores, como uma variável qualquer. É possível utilizá-la de forma crua apenas em dispositivos de reprodução de imagens, como um monitor ou uma impressora, cabendo ao receptor humano interpretar as imagens. Caso seja necessário que uma máquina seja capaz de interpretar estas imagens, é preciso que processamentos adicionais sejam realizados, utilizando técnicas apropriadas.

Uma imagem é composta por uma grande quantidade de dados. Por exemplo, uma imagem no formato padrão denominado 1080p (1920x1080) contém informações de intensidade de luz para mais de 1 milhão de pontos distintos. Consequentemente, o processamento de uma imagem requer um número considerável de operações, e a complexidade do algoritmo desempenha um papel crucial no tempo de processamento. Desta maneira, a estratégia empregada foi utilizar algoritmos com menor complexidade computacional, que envolve a aplicação de operações simples, a um grande volume de dados, enquanto operações que exigem uma maior volume de computações foram reservadas para um conjunto selecionado de dados.

Neste capítulo serão abordadas as técnicas de visão computacional utilizadas neste trabalho.

3.1 Filtragem Linear

As operações lineares utilizam cálculos, como soma ponderada, que consideram as informações da vizinhança de um pixel para determinar o valor final. Estes filtros são operadores locais, que são utilizados para suavizar imagens, aumentar a nitidez de detalhes, detecção bordas e a remoção de ruído (GONZALEZ, 2009).

No processo descrito por (FORSYTH; PONCE, 2011), uma máscara H, chamada de *kernel*, é convoluída com amostras de porções da imagem W, dita janela, de mesmas dimensões. O pixel a ser filtrado é posicionado no centro da janela, cercado de seus

respectivos vizinhos. Para proporcionar esse posicionamento central, o *kernel* apresenta dimensões ímpares.

A filtragem é realizada utilizando a operação de convolução. No caso do *kernel* unidimensional, a convolução pode ser definida conforme mostra a equação 3.1 (FORSYTH; PONCE, 2011), onde $H \in W$ possuem dimensões n por 1, para determinar o valor do elemento na posição x.

$$F(x) = W(x) * H(x) = \sum_{i=-n/2}^{i=n/2} W(i)H(x-i)$$
(3.1)

Já no caso do *kernel* bidimensional, a convolução entre janela e *kernel* de tamanho n por n, que determina o valor do elemento da posição x,y, ocorre conforme a equação 3.2 (GONZALEZ, 2009).

$$F(x,y) = W(x,y) * K(x,y) = \sum_{i=-n/2}^{i=n/2} \sum_{j=-n/2}^{j=n/2} W(i,j)K(x-i,y-i)$$
(3.2)

Uma importante propriedade da convolução é a invariação ao deslocamento, o que garante que essa ferramenta apresente as mesmas operações, independentemente do local da imagem em que é aplicada.

Sintetizando a operação, para evidenciar determinadas características em pixel da imagem, uma janela de amostras, que inclui um pixel em análise e seus vizinhos, é convoluída com um determinado *kernel*, de mesmas dimensões. O resultado desta operação é o valor filtrado do pixel.

3.2 Filtro Gaussiano

Um primeiro passo, comum em algoritmos de visão computacional, é o tratamento de ruído na imagem. Esta operação se faz necessária, uma vez que procedimentos como a detecção de bordas, amplificam componentes de alta frequência e, assim, são sensíveis ruídos. Uma forma recorrente, e simples, de se tratar o ruído é por meio da suavização da imagem, por meio de filtros lineares, partido do princípio que um pixel possui características próximas a de seus vizinhos (FORSYTH; PONCE, 2011).

O filtro gaussiano é um filtro linear, capaz de suavizar a imagem enquanto preserva, dentro das suas limitações, a posição das bordas na imagem. Seu principal objetivo é atenuar o ruído gaussiano na imagem. Para isto, se faz o uso de um *kernel*, com base em uma curva gaussiana, conforme a equação 3.3 (HORNBERG, 2006) (FORSYTH; PONCE, 2011).

$$\overline{H(x,y,\sigma)} = (\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}) \exp{-\frac{(x-\mu)^2 + (y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$
(3.3)

$$H(x, y, \sigma) = \frac{\overline{H(x, y, \sigma)}}{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} \overline{H(x, y, \sigma)}}$$
(3.4)

A curva gaussiana é amostrada para criar um kernel \overline{H} , com desvio σ , dimensões n por n e elemento central na posição (μ , μ). Posteriormente, o kernel é normalizado, para que a soma de seus elementos seja unitária, como em 3.4. Nota-se que o escalar, entre parêntese na equação 3.3, pode ser omitido, uma vez que o kernel será normalizado (HORNBERG, 2006).



Figura 18 – Filtro Gaussiano 1D (5x1), aplicado em uma região de borda da imagem..

A figura 18 exibe a aplicação de um filtro gaussiano unidimensional em uma borda da imagem. O primeiro aspecto a ser observado é o fato de que o filtro é capaz de atenuar o ruído, enquanto a posição central da borda é preservada. Este filtro possui um parâmetro ajustável σ , que regula a intensidade do filtro. Desta maneira, quanto maior o valor de σ , uma maior suavização será aplicada na região da borda. Enquanto a suavização atenua o ruído, este processo também reduz o gradiente de variação na parcela da borda filtrada, o que pode dificultar a caracterização.

A suavização ocorre por meio da ponderação entre o pixel analisado no resultado final e seus pixels vizinhos, conforme σ . No caso de bordas próximas, é necessário ter cautela quanto ao grau de suavização aplicada, uma vez que o filtro tem potencial de unir regiões de borda, ocasionado pelo alargamento da região, e dificultar a detecção das mesmas (GIOI; RANDALL, 2017).

3.3 Detecção de Bordas

As bordas delimitam porções de uma imagem e, assim, são importantes estruturas utilizadas para segmentar elementos em uma imagem. As bordas causam variações bruscas de cor, luminosidade ou direção das superfícies (FORSYTH; PONCE, 2011) (GONZA-LEZ, 2009). A figura 19 mostra como o objeto pode ser delimitado, avaliando as variações de luminosidade.



Figura 19 – Variação da intensidade de luminosidade nas bordas. (a) Imagem do anel de pistão (b) curva invertida da luminosidade em um pixel pelas suas coordenadas.

Desta forma, a ferramenta matemática utilizada para avaliar bordas é a mudança no gradiente da imagem nas direções vertical e horizontal. No contexto de imagem digitais, este gradiente é avaliado por meio de diferenças finitas entre pixels vizinhos (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

O filtro linear mais simples utilizado para detecção de bordas é o filtro Sobel. Este filtro combina o *kernel*, das diferenças entre o ponto anterior e posterior, com a suavização do resultado de vizinhos próximos, conforme apresentado nas equações 3.5 e 3.6 (GONZALEZ, 2009). A filtragem é realizada pela convolução dos *kernels*.

$$H_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.5)

$$H_y = H_x^T \tag{3.6}$$

$$G_x = W * H_x$$

$$G_y = W * H_y$$
(3.7)

Desta maneira, ao convoluir os kernels do filtro de Sobel, $H_x \in H_y$, com uma janela da imagem, executa-se a filtragem, como mostra a equação 3.7. Como consequência desta operação, obtêm-se dois resultados para um mesmo pixel, $G_x \in G_y$, representando os gradientes nos eixos $x \in y$, respectivamente. Por meio destas variáveis, é possível quantificar, tanto a magnitude da borda A, quanto o ângulo θ , normal à borda, conforme a equação 3.8 (KITTLER, 1983). Enfim, é possível determinar se um pixel representa uma borda com base em um limiar de magnitude.

$$A = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{G_y}{G_x})$$
(3.8)

O filtro Sobel é capaz de capturar as bordas na imagem, porém apresenta deficiências quanto à escolha do limiar e desvios no ângulo calculado da borda. Durante a classificação das bordas, a escolha do limiar é determinante, porém o seu valor ótimo dependente de características da imagem, como a escala, dificultando a escolha automática deste parâmetro. Deste modo, algumas técnicas utilizam *kernels*, baseados na segunda derivada, acompanhada por a detecção de zeros, como a *Laplacian of Gaussian* (LOG)(GONZALEZ, 2009).

3.3.1 Método Kroon

O kernel Kroon (KROON, 2009) tem como objetivo tratar um deficiência do filtro Sobel que é o desvio nos ângulos amostrados, sofridos conforme se distancia das quatro direções discretizadas. Com o objetivo de melhorar a precisão dos ângulos amostrados pelo filtro Sobel, outras técnicas de detecção de bordas com kernels alternativos foram propostas.

O *kernel Kroon* é uma configuração obtida por métodos de otimização numérica do MATLAB®, que minimizam o erro absoluto de ângulo. Para isto, foi utilizada uma imagem de teste, que representa os valores das equações analíticas 3.9.

$$I(x, y) = \sin (x^{2} + y^{2})$$

$$G_{x}(x, y) = 2x \cos (x^{2} + y^{2})$$

$$G_{y}(x, y) = 2y \cos (x^{2} + y^{2})$$
(3.9)

Desta forma, a imagem foi preenchida com amostras de valores da equação e, posteriormente, foi comparada à equação original. O critério utilizado foi a minimização do erro entre as orientações obtidas pela aplicação do *kernel* 5x5 estimado e o valor esperado. A máscara resultante do processo de otimização está disposta na equação 3.10.

$$H_x = \begin{bmatrix} 0.0007 & 0.0052 & 0.037 & 0.0052 & 0.0007 \\ 0.0037 & 0.1187 & 0.2589 & 0.1187 & 0.0037 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0037 & -0.1187 & -0.2589 & -0.1187 & -0.0037 \\ -0.0007 & -0.0052 & -0.037 & -0.0052 & -0.0007 \end{bmatrix}$$
(3.10)

A figura 20 mostra os resultados obtidos pela aplicação do *kernel* em uma imagem teste. Em comparação ao *kernel* filtro Sobel, o *kernel* obtido por Kroon apresenta menores desvios de ângulo. Desta forma, o ângulo da borda pode ser estimado com maior precisão utilizando este método.



Figura 20 – Comparação dos desvios de ângulo entre o filtro Sobel e Kroon (a) Imagem de Teste (b) Mapa de erro em radianos entre o ângulo amostrado e esperado utilizando filtro de Sobel (c) Mapa de erro de ângulo para o filtro de Kroon. Imagens retidas de 3.10.

Para verificar a efetividade da aplicação deste filtros, foram realizados experimentos comparando-o ao filtro de Sobel, para avaliar os ângulos ao longo de uma seção da borda externa de uma amostra circular. Com o objetivo de aumentar ainda mais a precisão, aplicou-se um filtro passa-baixa de fase zero (secção 4.6) ao contorno, com o propósito de reduzir o ruído de amostragem nas bordas. Os resultados são apresentados na figura 21.

Ao analisar a figura, observa-se que, conforme a orientação se afasta das orientações discretizadas da imagem, os resultados do filtro de Sobel e do filtro de Kroon se distanciam, corroborando com as descobertas reportadas. Além disso, destaca-se a eficácia do filtro passa-baixa de fase zero na melhoria da estabilidade e precisão dos ângulos amostrados ao longo de seções da borda.



Comparação entre Kroon e Sobel para Estimação de Ângulo de Borda

Figura 21 – Comparação entre os filtros de Sobel e Kroon para estimar a orientação da borda em uma seção de uma amostra circular com e sem o filtro de fase zero.

3.3.2 Método Canny

O método Canny (CANNY, 1986) para detecção de borda realiza processamento adicional nas informações das bordas, com intuito de melhorar o processo de caracterização das bordas. Ao invés de defini-la conforme apenas um único limiar, o método propõe, ainda, explorar os pixels próximos ao pixel analisado. Os objetivos deste procedimento são: diminuir os índices de falso positivo e representar um ponto de borda por apenas um pixel de borda, o mais próximo ao centro real (GONZALEZ, 2009).

O algoritmo tem como entrada a magnitude do gradiente e ângulo de todos pontos da imagem, que são pré-processadas por outros algoritmos de detecção de bordas, como o Sobel e Kroon. O algoritmo retorna como saída uma imagem binária, com a posição das bordas destacadas. As etapas deste processo são descritas por (HORNBERG, 2006) (GONZALEZ, 2009) (CANNY, 1986).

A primeira etapa, denominada *Non-Maximum Supression*, consiste em reduzir o número de bordas redundantes. A estratégia adotada é visitar os pixels e compará-los com seus vizinhos imediatos na direção do ângulo de gradiente, em ambos os sentidos. Como o espaço da imagem é discreta, o ambiente com o pixel e seus oito vizinhos próximos são discretizados em quatro direções diferentes.

Esta comparação utiliza o valor de magnitude dos pixels analisados, para determinar se aquele pixel em análise é o mais representativo do fragmento da borda, ou seja, de maior magnitude. Desta maneira, caso seja verificada a representatividade do elemento, a magnitude é mantida, caso contrário, a mesma é anulada. A análise é realizada em todos os pixels da imagem, sendo responsável, principalmente, por estreitar as bordas ao redor de um segmento.

A segunda etapa consiste em executar um procedimento, conhecido como limiar de histerese. Neste procedimento, as bordas filtradas pelo passo anterior são analisadas conforme dois limiares, superior e inferior, e pela conectividade com demais bordas. Esta etapa auxilia na conectividade das bordas, sem precisar diminuir o limiar a ponto de incluir falsos positivos, como no caso de limiar único. Os pixels com magnitude acima do limiar superior são considerados como bordas verdadeiras, enquanto os pixels abaixo do limiar inferior são tidos como bordas falsas.

Os pixels com magnitude entre os dois limiares são avaliados conforme sua conectividade. Caso o dado pixel possua algum vizinho próximo considerado como uma borda verdadeira, o mesmo é considerado uma borda.

3.3.3 Localização de Bordas a nível Subpixel

As localizações em nível de pixel apresentadas anteriormente não atingem a precisão exigida pelo sistema. Portanto, é necessário empregar técnicas de subpixel para aprimorar essa precisão (HORNBERG, 2006). A localização de uma borda pode ser determinada com precisão, que permite detectar sua posição no interior da região de um pixel. A técnica consiste em realizar a extrapolação do perfil de pontos da borda, conforme modelos matemáticos. Desta maneira, os pixels são considerados valores amostrados de modelo, cujo objetivo é estimar a posição da borda.

A maioria dos métodos podem ser divididos em três categoria: os baseados em momentos, os que utilizam interpolação e os que realizam regressão de parâmetros. Os modelos baseados em momentos são eficazes em baixos níveis de ruído, porém, como utilizam diferenciação numérica, são mais suscetíveis a ruído (SUN et al., 2013). Os métodos que utilizam interpolação se mostram menos suscetíveis a ruído que os modelos por momento, porém resultados encontrados são menos precisos. Os métodos que utilizam regressão, também chamados de reconstrutivos, utilizam algoritmos de otimização, que calculam os parâmetros ótimos de um modelo, por meio de minimização de erro. Desta forma, este método atenua a influência do ruído. Porém, enquanto os outros dois métodos são eficientes, computacionalmente, o método de regressão realiza um uso mais intensivo de recursos (YE; FU; POUDEL, 2005).

Dado que as imagens são bidimensionais, os modelos unidimensionais utilizam amostras da direção da orientação da borda, pois, neste sentido, ocorre a variação mais representativa do gradiente. O modelo de uma borda ideal pode ser definido como uma função degrau, com uma variação abrupta entre os valores antes e depois da borda. Outra representação mais realista considera o efeito do embaçamento nas bordas, causado por questões óticas, no processo de formação da imagem, como na figura 22(YE; FU; POU-



Figura 22 – Processo de determinação da posição de uma borda, adaptado de (FABI-JAŃSKA, 2012) (a) borda ideal contínua, (b) borda amostrada na imagem, (c) borda com intensidade quantizadas, (d) posição da borda a nível de pi-xel, detecção de borda a nível de subpixel utilizando primeira derivada e (e) segunda derivada.

DEL, 2005). Este embaçamento também pode ser intensificado pela suavização realizada durante o pré-processamento da imagem para remoção de ruído, como na aplicação de um filtro gaussiano.

Como visto na figura 23, as bordas sobre efeito do embaçamento possuem um formato de uma sigmoide. Existem vários modelos para descrever a borda na sua forma sigmoidal, como a função tangente hiperbólica (NALWA; BINFORD, 1986), arco tangente (SUN et al., 2013), função integral de uma gaussiana (YE; FU; POUDEL, 2005) (DUAN et al., 2018), ou, ainda, função logística (LEE; LEE; PAHK, 2018). No mesmo sentido, (FABIJAŃSKA, 2012) realiza a regressão na primeira derivada da borda, modelando-a conforme a função gaussiana. No entanto, esta última técnica possui como desvantagem a utilização da primeira derivada, que amplifica a influência o ruído. As técnicas que realizam a regressão, diretamente nos valores amostrados, possuem em comum o formato



Figura 23 – Amostras reais da borda do anelno sentido da orientação (a) sem filtro gaussiano (b) com filtro gaussiano ($\sigma=0.9$)

mostrado na equação 3.11.

$$B(k) = (t - i)f(C, \alpha, k) + i$$
(3.11)

O valor B da posição k é representado por uma função f, centrada na posição C com parâmetro de ajuste α (que normalmente remete à inclinação), que varia com a posição k partindo do valor inicial i até o valor terminal t. Deste modo, a posição central C da curva regredida representa a posição estimada da borda na direção amostrada. A figura 24 mostra esta relação. É válido salientar que o valor final pode ser inferior ao inicial, no caso de uma curva descendente. Enquanto os parâmetros $i \in t$ referem-se à intensidade, o parâmetro C refere-se à posição. Na maioria das modelagens, o termo (t-i) é representado apenas por uma única variável.

A posição encontrada por um modelo unidimensional remete apenas à posição da borda do sentido analisado. Como a imagem é discretizada em 4 posições, quanto mais próxima a direção da borda for destas direções, menor será o erro cometido por esta estimação. Ainda, as análises que utilizam as diagonais apresentam desvios em seu resultado, pois, neste sentido, o pixel tem formato losangular. Para corrigir este erro, (YE; FU; POUDEL, 2005) propõe um estimador bidimensional com base no formato da borda, enquanto (SUN et al., 2013) realiza a correção com base no ângulo estimado e (FABIJAŃSKA, 2012) e (GIOI; RANDALL, 2017) realizam a regressão em diversos pontos, percorrendo a borda para, posteriormente, utilizar os pontos encontrados em outro processo de regressão, com modelo baseado no formato da borda, conforme mostra a figura 25.

Outro procedimento descrito por (SUN et al., 2013), consiste em rotacionar a posição encontrada na regressão da borda, alinhando a direção amostrada com a direção



Figura 24 – Ajuste de uma determinada curva aos pontos reais amostrados. Com os parâmetros estimados, t = 254.9015, i = 89.0183 e C = 4.5248



Figura 25 – Regressão adicional realizada no contorno da imagem para refinar a posições encontradas na regressão do pixel. (a) contorno encontrado utilizando analise individual (b) correção dos pontos encontrados a uma reta obtida por meio de regressão. Retirado de (GIOI; RANDALL, 2017)

da linha normal da borda, conforme a figura 26. Segundo o autor, esta projeção da borda depende de uma estimação confiável do ângulo da borda.

3.4 Método Harris para Localização de Quinas

As bordas são importantes para delimitar segmentos de uma imagem. Já as quinas são posições onde ocorrem o encontro de bordas de direções significativamente distintas e, por consequência, apresenta-se uma variação abrupta de orientação nos contornos.

As quinas possuem uma quantidade limitada em uma imagem, sendo representativas e destoantes dos demais pontos, desta forma, são considerados pontos chave (ou



Figura 26 – : Projeção da borda à linha normal, adaptado de (SUN et al., 2013).

característicos) em uma imagem. Esta estrutura é utilizada, direta ou indiretamente, em várias técnicas para realizar localização e correspondência entre imagem.

Existem dois tipos de técnicas para localizar as quinas, no que se refere aos mecanismos utilizados: as baseadas em contornos da imagem e as baseadas na intensidade dos pixels. As técnicas baseadas em contorno necessitam de um pré-processamento para identificação dos contornos, o que acaba resultando em um tempo computacional mais alto (DUTTA; KAR; CHATTERJI, 2008).

A técnica clássica para realizar a localização de quinas, por meio da comparação direta utilizando a intensidade dos pixels em uma região, é o método Harris (HARRIS; STEPHENS et al., 1988). Esta técnica se fundamenta no fato de que uma quina é caracterizada por uma mudança de intensidade considerável em dois sentidos perpendiculares, causada pelo encontro de duas bordas, com considerável diferença de orientação (SZE-LISKI, 2010).

No entanto, estes sentidos dificilmente se encontram alinhados com os eixos da imagem, desta maneira, se faz necessário determinar os eixos de maior variação e avaliar essa variação nestes eixos. O algoritmo Harris é capaz de detectar quinas desalinhadas com a imagem, assim, é considerado invariante à rotação. Porém, como a variação depende da escala da imagem, o algoritmo Harris não pode ser considerado invariante à escala. Ainda, é possível obter invariância na escala em técnicas relacionadas, que utilizam a diferença gaussiana (DOG), como o SIFT (LOWE, 2004).

No método de Harris, a avaliação das quinas ocorre de forma similar a técnica de Análise de Componentes Principais (PCA) (JOLLIFFE; CADIMA, 2016). A ideia é estimar as derivadas de pixels em uma janela, nos sentidos x e y, para calcular a covariância entre as derivadas, encontrar os autovalores da matriz de covariância e, com base nestes autovalores, avaliar a janela quanto ao aspecto de quina. No algoritmo, para determinar se um pixel I(x, y) é uma quina, primeiramente, deve se determinar a matriz de covariâncias entre as derivadas M, conforme a equação 3.12.

$$M = \sum w(x,y) \begin{bmatrix} G_x G_x & G_x G_y \\ G_x G_y & G_y G_y \end{bmatrix}$$
(3.12)

onde G_x e G_y são as derivadas na direção x e y, respectivamente. Estes valores podem ser determinados por meio da filtragem utilizando um *kernel* como Sobel ou Kroon. Ainda, w(x, y) é um *kernel* de suavização, como o filtro gaussiano. O somatório representa a soma de todos os elementos de uma janela de tamanho $2n + 1 \ge 2n + 1$, realizada para cada elemento da matriz. Nota-se que o tamanho da janela tem como base um parâmetro ajustável n.

Os autovalores $\lambda_1 e \lambda_2$ da matriz M ilustram a intensidade das variações, quando os eixos da imagem são rotacionados para a direção de maior variação. Baseado na avaliação dos autovalores, é possível determinar três casos distintos: uma variação significativa em apenas um eixo, que caracteriza uma borda; nenhuma variação significativa em nenhum eixo, que representa uma região plana e, finalmente, uma variação significativa nos dois eixos, que identifica uma região de quina.

Os valores dos autovalores podem ser utilizados diretamente para comparar quinas, porém Harris (HARRIS; STEPHENS et al., 1988), por conveniência, propõe uma fórmula que utiliza de forma implícita os autovalores para classificar uma quina. A partir das propriedades da equação 3.13, o método quantifica diretamente a partir de M, e indiretamente dos autovalores, a similardade da janela amostrada com quinas por meio da equação 3.14, onde k é um parâmetro ajustável.

$$Det(M) = \lambda_1 \lambda_2$$

$$Traço(M) = \lambda_1 + \lambda_2$$
(3.13)

$$R = \operatorname{Det}(M) - k(\operatorname{Traco}(M))^2$$
(3.14)

Foram propostas na literatura diversas formas de avaliar as quinas, seja usando diretamente os autovalores ou indiretamente. Ainda, foram propostos procedimentos adicionais para prover robustez à identificação, como a invariância à escala (LOWE, 2004) e à iluminação, para viabilizar a utilização de pontos chave na imagem, para realizar correspondência entre imagens. Contudo, (HARRIS; STEPHENS et al., 1988) se mantêm relevante, tanto como base para outras técnicas de correspondência, quanto para a localização de quinas.

3.5 OpenCV

O software OpenCV (BRADSKI, 2000) é uma biblioteca de visão computacional de código aberto, que contém mais de 2500 algoritmos otimizados (CULJAK et al., 2012). Trata-se de uma das principais fontes de algoritmos de visão computacional (SZE-LISKI, 2010). Os algoritmos são implementados na biblioteca por meio de contribuições da comunidade, criando uma ponte entre desenvolvimento e aplicação.

A concepção do OpenCV ocorreu em 1999, por meio de uma iniciativa da empresa Intel, dentro de um programa que buscava incentivar aplicações com uso intensivo de processamento(BRADSKI; KAEHLER, 2008). Atualmente, o projeto é mantido e estendido pelo Willow Garage. (SZELISKI, 2010)

A biblioteca, atualmente, se encontra na versão 4, mantendo a compatibilidade com diversos algoritmos implementados em versões anteriores(OPENCV, 2023). A política de contribuições da OpenCV restringe a adição de novas dependências ao projeto, o que auxilia na compatibilidade de longo prazo dos algoritmos. O tipo de licença mais utilizada no OpenCV é a BSD, na qual o código é aberto e permite a utilização, inclusive comercial, do *software*, exigindo apenas: reconhecimento da utilização da biblioteca, declaração de modificação na biblioteca, caso o tenha feito, e a proteção legal dos autores. Desta forma, sua licença colabora para a sua aplicação prática. O principal interesse em contribuir com o OpenCV é, essencialmente, incentivar o emprego de técnicas ou produtos e colaborar com a comunidade.

A OpenCV foi desenvolvida almejando eficiência computacional e aplicações em tempo real. Aspirando a redução do tempo de execução, este projeto é escrito, principalmente, em C e C++, no entanto, é capaz de ser empregado em outras linguagens, como Python, Java, MATLAB e C#, por meio de interfaces(BRADSKI; KAEHLER, 2008).

Fundamentado na credibilidade e relevância da biblioteca, a OpenCV foi selecionada para auxiliar a implementação do algoritmo deste trabalho. Por consequência, o *software* desenvolvido usufrui da estrutura da biblioteca e dos algoritmos já implementados e otimizados.

4 Abordagem do Problema

O sistema de medição automática de anéis de pistão proposto tem como objetivo mensurar as medidas utilizadas como parâmetros, para determinar a geometria do anel na sua forma livre. Como a intenção do projeto é a aplicação na prática em um ambiente industrial, é interessante considerar questões que viabilizem sua aplicação prática. Assim, o sistema desenvolvido deve ter, primeiramente, uma precisão e repetibilidade adequadas, apresentar um bom custo benefício, possibilitar uma interação com o operador, por meio de uma interface intuitiva e com baixa complexidade de operação, demandar uma manutenção simples e bem definida e utilizar componentes disponíveis no mercado.

O trabalho pode ser separado em três partes: o arranjo físico utilizado, a visão computacional e a fotogrametria. O arranjo físico se refere ao tipo de iluminação, escolha da lente, escolha da câmera e a configuração do problema. Já a visão computacional trata da localização dos pontos de interesse da imagem. Por fim, a fotogrametria aborda a reprojeção dos pontos da imagem para o mundo, para realizar a medição dos parâmetros do anel. Este capítulo descreve a abordagem proposta neste trabalho, desde a descrição do problema até a medição das especificações.

4.1 Técnica Utilizada

A técnica de fotogrametria utilizada neste trabalho é a geometria monocular. Como tratado anteriormente, esta abordagem apresenta como diferencial um melhor custobenefício em relação a outras técnicas da área, porém é baseada em conhecimentos sobre o problema. Desta forma, algumas premissas do problema devem ser levantadas ou impostas, para estabelecer a convergência das soluções possíveis em um único resultado.

A escolha desta abordagem se deu, principalmente, pelo fato de que a altura da peça pode ser mensurada com precisão. Enquanto as abordagens que utilizam triangulação realizam a estimação da altura, a técnica deste trabalho utiliza a informação medida como informações de referência ground truth. A triangulação depende da resolução da câmera e/ou do padrão luminoso, cujas incertezas deveriam ser avaliadas, já a medição manual possui incertezas conhecidas, dadas pelo instrumento de medição.

Ainda no caso da visão estereoscópica, o processo de correspondência entre pontos se torna mais complexo pelo fato de que a peça não apresenta muitos pontos característicos, fora as quinas da abertura livre.

O emprego de uma técnica monocular neste sentido não só simplifica o problema, como também o delimita, facilitando a resolução de possíveis problemas e execução do

projeto. Ainda, em trabalhos futuros, implementações como utilizar uma linha de laser para estimar automaticamente a altura da peça podem ser realizadas avaliando seus efeitos separadamente.

4.2 Pré-Requisitos do sistema

Na estratégia de geometria monocular todas as medidas são realizadas em relação a um plano de referência, cujas características de translação e rotação, em relação a câmera, são obtidas na calibração extrínseca. Assim, todas as compensações são realizadas com base no plano calibrado.

A primeira premissa é que o anel possui faces planas, e que sua altura Δz , entre as faces, é conhecida. A figura 27 evidencia a altura do anel.



Figura 27 – Corte do anel de pistão,
evidenciando a altura Δz

Ao considerar que este anel é plano, simplifica-se o problema em uma medição planar. Desta maneira, a face superior do anel é apenas um plano paralelo ao plano de referência, o qual o sistema foi calibrado. Os dois planos possuem a mesma rotação e mesma translação nos eixos $x \, e \, y$, se distinguindo apenas por um deslocamento Δz no eixo z. Este deslocamento no eixo z do plano de medição é informado pelo operador baseado no conhecimento da altura da peça.

A compensação de altura no eixo x da peça é mostrada pela figura 28, sendo que a mesma situação ocorre no eixo y. A borda do anel, na coordenada (X, Y, Z), é capturada
em um determinado pixel da imagem por raios com orientação θ_x . Com o plano calibrado em relação ao plano de referência, sem a devida correção, a posição desta borda será registrada como $(X + \Delta x, Y + \Delta y, Z + \Delta z)$. Desta forma, se faz necessário compensar a altura da peça Δz nas estimativas, para neutralizar Δx e Δy , e assim possibilitar a realização das medições com mais precisão.



Figura 28 – Compensação de altura em relação a um plano de referência.

O erro cometido caso a altura da peça não fosse levada em consideração, ou ocasionado por imprecisão na estimava desta altura, pode ser expresso conforme mostra a equação 4.1.

$$\Delta x = \frac{X\Delta z}{Z} \tag{4.1}$$
$$\Delta x = \Delta z \, tan\theta_x$$

Deste modo, quanto mais distante a peça, menor o efeito da altura da peça Δz na medição. Ainda, a mesma análise pode ser feita para a distância focal. O procedimento para a compensação da altura da peça nas medições, será abordado em detalhes na secção 4.3.

A segunda premissa dita que as faces laterais externas não devem compor a imagem. Este fundamento com o propósito de mitigar os efeitos da perspectiva na medição na imagem.

A adversidade causada pela perspectiva, no sentido da identificação das bordas, é fazer com que as paredes laterais da peça possam ser medidas como se fossem a borda do anel. Principalmente pelo fato de que a peça apresenta um aspecto uniforme em todo o seu revestimento, é mais conveniente localizar a borda entre a imagem e o plano de fundo do que entre as faces da peça.

Pela natureza de formação da imagem, a perspectiva, inevitavelmente, estará presente na mesma. Desta maneira, a estratégia utilizada se baseia, primeiramente, em evitar que estes efeitos atinjam as regiões onde serão realizadas as medições e, caso não seja possível, compensar os efeitos deste fenômeno. A dita estratégia se baseia na direção dos raios capturados pela câmera.

Baseado no fato de que todas as medições de interesse são realizadas na borda externa, foi constatado que é possível prevenir que as faces laterais da peça se apresentem na imagem. A primeira restrição imposta estabelece que a amostra sempre deve ser posicionada de forma que o eixo ótico esteja no interior do anel. A figura 29, representa como o deslocamento do eixo ótico da imagem, em relação à amostra, influencia na captura das faces laterais.



Figura 29 – Influência do deslocamento do eixo ótico em relação a peça.

Além disso, outra circunstância que poderia ocasionar a presença das faces externas na imagem também foi identificada no trabalho. É importante, para evitar que as paredes laterais apareçam, garantir que a rotação do plano de referência α , e por consequência da peça, não seja mais inclinada do que a trajetória do raio de luz que atinge a borda externa mais próxima do centro, conforme equação 4.2. O efeito dessa inclinação na captura das faces laterais está presente na figura 30. A rotação no eixo z, ao menos a princípio, não apresenta efeitos negativos.

$$\begin{aligned} \theta_x &\leq \alpha_x \\ \theta_y &< \alpha_y \end{aligned} \tag{4.2}$$



Figura 30 – Influência da rotação da peça em relação a câmera, na captura das paredes laterais da peça.

Salienta-se que, pelos motivos explicados anteriormente, é preferível que a orientação do plano de referência esteja alinhada com os eixos da câmera. Diante de um alinhamento perfeito dos eixos x e y, nenhum valor de ângulo do raio causaria o aparecimento das bordas externas. Foi observado que para inclinações sutis, estes efeitos poderiam ser desprezados. Porém, quando não se pode garantir precisão na inclinação do plano, pode se tratar este efeito principalmente afastando as bordas externas da peça do ponto principal da imagem.

Importa salientar que a estimação extrínseca é capaz de estimar a rotação do plano, cuja informação é considerada durante a projeção de perspectiva reversa do ponto da imagem para o mundo. O cuidado se faz necessário para evitar uma possível fonte de erro.

4.3 Projeção de Perspectiva Inversa com Compensação de Altura

Após a calibração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, é possível obter uma localização precisa dos pontos na superfície do padrão de calibração. Na formulação apresentada, a origem da superfície calibrada é referenciada no mundo real como (0, 0, 0), assim como a rotação do plano nos três eixos (0, 0, 0). No entanto, para realizar medições em alturas diferentes, são necessárias algumas modificações adicionais.

Durante o processo de medição, espera-se que, ao colocar uma peça na área de medição, ela apresente a mesma inclinação calibrada observada no padrão de calibração. Considerando que o protótipo realiza medições planares, é possível inferir a mesma lógica para a superfície da amostra. No entanto, ocorre uma diferença de profundidade entre a peça e o plano calibrado, que precisa ser tratada. Utilizando a equação (2.29) da projeção de perspectiva inversa, se forem inseridas as posições da imagem $(x_i, y_i, 1)$ como entrada, a saída seriam as posições no mundo real (X, Y, 0), como se estivessem no plano calibrado. No entanto, é necessário ajustar os resultados para diferentes alturas do objeto, de modo que, dada as posições na imagem o sistema retorne coordenadas no mundo real considerando a profundidade de medição (X', Y', Z).

Deste modo, para alcançar esse ajuste, é necessário adaptar a saída da equação de projeção de perspectiva inversa. É almejado que seja possível a determinação das coordenadas (X', Y', Z) no mundo real, levando em consideração a diferença de altura entre a peça e o plano calibrado. Isso implica em modificar o componente Z da saída para corresponder à profundidade de medição, em vez de ser igual a zero.

O método proposto por este trabalho, consiste no ajuste do fator de escala λ de acordo com a diferença entre a profundidade do plano de referência e a superfície da amostra. Essa abordagem fornece uma solução analítica para o problema, que envolve rastrear o raio de luz que atinge um pixel até a profundidade do objeto. Como resultado, essa compensação permite ajustar a escala das medições do objeto de acordo com a sua altura.

Desta maneira, esta técnica se baseia na equação de projeção de perspectiva inversa para determinar a localização espacial de um ponto com base na espessura (como altura) Δz do objeto e na espessura Δh do padrão de calibração planar, que serve como referência.

O método envolve, primeiramente, determinar o valor do fator de escala e, em seguida, calcular as coordenadas no mundo $X_w^h = [X \ Y \ Z]^T$.

De acordo com a modelagem do modelo pinhole realizada em coordenadas homogêneas, onde $x^h = [x_i \ y_i \ 1]^T$ representa as coordenadas do ponto na imagem após correção de distorção da lente, os componentes $R^T K^{-1} x \in R^T t$ são vetores (3×1) e seus formatos podem ser representados pela Equação (4.3):

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = R^T K^{-1} x \qquad \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = R^T t \qquad (4.3)$$

Assim, a Equação (2.29) pode ser reescrita como a Equação (4.4).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1\lambda - b_1 \\ a_2\lambda - b_2 \\ a_3\lambda - b_3 \end{bmatrix}$$
(4.4)

Utilizando a Equação (4.5), o valor do escalar λ pode ser determinado com base no conhecimento prévio de Z, onde Z corresponde à altura do ponto medido em relação ao plano de referência, definido como $Z = -(\Delta z - \Delta h)$.

$$\lambda = \frac{b_3 + Z}{a_3} \tag{4.5}$$

Por fim, segundo a análise realizada, as coordenadas tridimensionais no espaço podem ser calculadas utilizando a Equação (4.4). A precisão das coordenadas obtidas depende da precisão da calibração da câmera, da localização do ponto na imagem e de vários fatores, como as características da câmera, qualidade da lente, condições de iluminação, padrões de calibração e o algoritmo de visão computacional utilizado para localizar os pontos na imagem.

4.4 Considerações sobre Perfil de Borda

A abordagem empregada assume que os lados do objeto devam estar visíveis e na altura diferente fornecida como parâmetro de entrada. Essa limitação é derivada de lentes focais, podendo resultar em distorções causadas por imperfeições no acabamento do objeto, conicidade ou chanfros.



Figura 31 – Oclusão do perfil da borda (face externa) em relação ao comprimento focal. Análise da peça amostrada utilizando lentes regulares de (a) baixo comprimento focal, (b) alto comprimento focal e (c) lentes telecêntricas.

Na Figura 31, são mostrados exemplos de oclusão do perfil da borda relacionada ao comprimento focal da câmera. Na Figura 31a, a região oculta é indicada, onde o lado do objeto não é visível na imagem. O tamanho dessa região oculta depende da inclinação dos raios de luz capturados, que está associada ao comprimento focal da câmera e à posição do objeto na imagem. Quanto mais paralelos forem os raios de luz, menor será a oclusão e melhor será a precisão da observação e medição dos aspectos da borda.

No entanto, mesmo quando uma característica do objeto é visível para a câmera, a posição da borda pode se desviar de sua localização real devido a diferenças entre a profundidade assumida (Δz) e a profundidade de medição real. Isso é ilustrado na Figura 31b, onde a borda aparece deslocada em relação à sua posição verdadeira. A divergência entre a posição assumida e a posição real da borda pode afetar a precisão da medição. Conforme análises realizadas, aumentar o comprimento focal da câmera pode ajudar a reduzir a divergência, uma vez que raios de luz menos inclinados são capturados. Isso significa que as variações na profundidade do objeto terão menos impacto na posição estimada da borda. No entanto, um comprimento focal maior também resulta em maiores distâncias de trabalho para o mesmo campo de visão e requerimentos mais rigorosos de alinhamento entre o plano de medição e a câmera. Assim, é importante selecionar o comprimento focal adequado para garantir medições precisas, levando em consideração as características do objeto, as condições de medição e os requisitos de precisão. A seleção adequada das lentes e a compreensão dos compromissos e limitações associados às lentes regulares são essenciais ao considerar seu uso em aplicações de medição.

É importante ressaltar que a precisão da medição pode ser aprimorada por meio da aplicação de correções específicas, especialmente ao lidar com peças que possuem características semelhantes. Essa constatação foi comprovada experimentalmente ao avaliar peças semelhantes, mostrando que é possível melhorar a correspondência entre o perfil das peças ao calibrar o sistema com uma peça que possui dimensões conhecidas. Dessa forma, o sistema pode levar em consideração as particularidades do perfil da peça ao realizar medições em outras peças.

No entanto, é importante notar que as imperfeições específicas de uma peça, ocluídas na imagem da câmera, não poderão ser observadas nas medições. Isso significa que se houver irregularidades ou imperfeições ocultas nas peças, essas características não serão detectadas pelo sistema de medição, mesmo com as correções aplicadas. É fundamental ter consciência desse restrição e estar ciente de que a precisão das medições pode ser influenciada por fatores não visíveis ou ocluídos na imagem capturada pela câmera.

4.5 Modelo de Borda Subpixel

Um modelo de borda embaçada alternativo, para a detecção a nível de subpixel, foi empregada no trabalho para detectar com precisão as bordas do contorno externo. O objetivo desta detecção é suplantar as restrições inerentes à resolução do sensor. O modelo proposto é unidirecional, desta maneira, é empregado utilizando os pixels que compõem a direção de maior variação de um ponto da borda borda, assim como detalhado na Seção 3.3.3. Desta maneira a localização da borda não fica limitada pela resolução do sensor, mas é estendida ainda mais. A equação deste modelo é uma função logística modificada e está disposta na equação 4.6.

$$T(x) = \frac{p_2 - p_1}{1 + 10^{(p_3 - x)p_4}} + p_1 \tag{4.6}$$

Na função sigmoidal em questão, cada um dos parâmetros desempenha um papel específico relacionado às características da curva. Esses parâmetros são essenciais para modelar a forma e o comportamento da curva, permitindo a análise precisa dos dados. A seguir será explanado o significado de cada um desses parâmetros:

- p_1 representa a assíntota que limita o valor inicial do ponto na curva. Essa assíntota define o limite superior ou inferior que a curva pode alcançar no início do seu crescimento ou declínio. O valor atribuído a p_1 afeta diretamente a posição vertical da curva em relação ao eixo.
- p_2 está relacionada à assíntota que limita o valor final do ponto na curva. Assim como p_1 , p_2 define um limite superior ou inferior para a curva, mas nesse caso se aplica ao final do crescimento ou declínio. O valor de p_2 influencia a posição vertical da curva em relação ao eixo na extremidade oposta e a relação $(p_2 - p_1)$ representa o alongamento da curva no sentido vertical.
- p_3 determina a posição central da curva. Ela indica onde ocorre o ponto de inflexão ou ponto de virada na curva sigmoidal. Esse ponto central é crucial para definir o ponto de transição entre o crescimento e o declínio da curva. Ao ajustar o valor de p3, é possível mover a curva ao longo do eixo horizontal.
- p_4 desempenha um papel importante na inclinação da curva. O valor de p_4 , que é maior que zero (p4 > 0), controla a taxa de variação ou inclinação da curva sigmoidal. Ele afeta a taxa de variação com que a curva se aproxima ou se afasta das assíntotas em relação à posição central definida por p_3 . Este parâmetro também pode ser entendido como o fator de espalhamento da borda, ou seja, o quanto a transição se alastra ao longo da janela no sentido horizontal.

Assim, utilizando esses parâmetros da função sigmoidal, é possível determinar com precisão a posição da borda. Após o ajuste da curva aos dados amostrados, o valor atribuído à variável p3 será o indicador direto dessa posição, permitindo uma análise mais detalhada e confiável em relação à localização da borda na curva.

O método aplicado no sistema apresentado para realizar o ajuste da curva aos dados foi a regressão *Levenberg-Marquart* (LEVENBERG, 1944) (MARQUARDT, 1963), descrito também por (RANGANATHAN, 2004), uma vez que se trata de uma equação não linear. Esse método é adequado para otimizar os parâmetros do modelo sigmoidal Tutilizado no estudo. Para realizar a otimização, o método de Levenberg-Marquardt requer os dados amostrados, o modelo sigmoidal T e suas respectivas derivadas parciais, que são usadas para estimar a matriz jacobiana de forma aritmética. Essas derivadas parciais estão presentes na equação 4.7.

No procedimento utilizado, a fim de simplificar a representação e agilizar os cálculos, foram introduzidas as variáveis intermediárias num e den, que são termos comuns entre as derivadas parciais. Essas variáveis ajudaram a reduzir a complexidade das expressões e a tornar os cálculos mais eficientes durante a estimativa dos parâmetros do modelo, além de representar o sistema de forma mais clara.

$$den = 1 + 10^{(p_3 - x)p_4}$$

$$num = \ln 10 \ (p_1 - p_2) \ 10^{(p_3 - x)p_4}$$

$$\frac{dT(x)}{dp_1} = 1 - \frac{1}{den}$$

$$\frac{dT(x)}{dp_2} = \frac{1}{den}$$

$$\frac{dT(x)}{dp_3} = \frac{num \ p_4}{den^2}$$

$$\frac{dT(x)}{dp_4} = \frac{num \ (p_3 - x)}{den^2}$$
(4.7)

Ao lidar com regressão não linear, é importante considerar os desafios relacionados à presença de mínimos locais, que podem dificultar a obtenção da solução ideal. Por essa razão, os parâmetros iniciais de estimativa foram escolhidos de maneira estratégica para mitigar esse problema.

A obtenção de uma solução inicial próxima à solução ajustada desempenha um papel crucial no sucesso da localização em nível de subpixel. Ao partir de uma solução inicial próxima à solução ajustada, o algoritmo tem uma base sólida para começar o refinamento dos parâmetros. Isso ajuda a evitar problemas como convergência para mínimos locais ou soluções imprecisas. Além disso, uma solução inicial precisa também reduzir o tempo de processamento, uma vez que menos iterações são requeridas para a convergência.

Os parâmetros iniciais estabelecidos foram:

- O valor inicial de p_1 foi escolhido com base no primeiro ponto amostrado, o que permite que o ajuste da curva comece próximo aos dados reais e evita desvios significativos. De maneira similar, o valor de p_2 foi determinado a partir do último ponto amostrado, fornecendo uma referência confiável para o ajuste final da curva.
- A estimativa inicial da posição da borda, representada por p_3 , foi selecionada de forma estratégica para convergir próximo ao elemento central da janela. Isso é especialmente relevante quando se considera que a posição central da janela deve corresponder à borda obtida por meio de técnicas de detecção de borda convencionais, como o Canny. Espera-se que o valor de p_3 , ao convergir, se aproxime da posição do elemento central.
- Além disso, foi atribuído o valor de 0.5 ao parâmetro p_4 para estabelecer uma inclinação moderada para a curva inicial. Essa escolha foi feita considerando a escala

de grandeza dos valores observados experimentalmente e evitando convergência prematura para mínimos locais indesejados.

Esses parâmetros iniciais foram selecionados de forma criteriosa, levando em conta as características da curva específica, com intenção de promover uma convergência eficiente e eficaz durante o processo de regressão e aprimorando a qualidade do ajuste da curva aos dados amostrados.

A figura 32 ilustra o processo de ajuste de um ponto da borda ao modelo para a localização em nível de subpixel. Nesse procedimento, inicialmente, é determinada a localização em nível de pixel e o ângulo de um ponto da borda no contorno. Com base no ângulo da borda, a direção discreta de máxima variação é caracterizada entre 0°, 45°, 90° e 135°. Em seguida, é realizada a extração da janela de amostragem da imagem e, por meio de regressão, são ajustados os pontos da janela.



Figura 32 – Detecção de borda em subpixel aplicada a uma borda com orientação normal de -29,88°, discretizada na direção de 135°. O método de ajuste resultou em $p_1 = 169,76$, $p_2 = 5,21$, $p_3 = 4,58$ e $p_4 = 0,65$. A posição ajustada é posteriormente rotacionada na direção normal. (a) Representação do processo de estimativa em subpixel em uma seção do contorno. (b) Curva de borda ajustada nos dados amostrados.

Assim como descrito na seção 3.3.3, após encontrar a posição na curva unidimensional da borda, por meio do ajuste da curva, é necessário realizar uma rotação para alinhar a direção discretizada com a direção real da borda. Essa rotação é ilustrada na figura 32 (a), onde a localização do pixel antes da rotação é representada em laranja e a localização após a rotação é representada em vermelho, juntamente com as posições das bordas vizinhas.

Esse procedimento de rotação é responsável por ajustes sutis na localização da borda, mas é essencial para garantir a consistência e repetibilidade dos dados obtidos. Ao alinhar corretamente a direção discretizada com a direção real da borda, é possível obter resultados mais confiáveis e precisos.

4.6 Filtros de Fase-Nula para Filtragem de Ângulos

O filtro de fase-zero, também conhecido como filtro de fase-nula ou *backward-forward filter*, tem como objetivo filtrar um sinal, utilizandos em processamento digital de sinais, sem causar desvios de fase observados em filtros de fase linear (OPPENHEIM, 2010). Essa técnica consiste em aplicar uma filtragem bidirecional, ou seja, tanto na direção normal (para frente) quanto na direção reversa (para trás) nos dados do sinal, conhecida como abordagem de duas passagens (GUSTAFSSON, 1996).

Ao contrário dos filtros de fase linear, a técnica de filtragem bidirecional é não causal (OPPENHEIM, 2010), o que significa que ela depende da disponibilidade de todos os dados de antemão e não pode ser aplicada a cada amostra. Essa característica limita sua aplicação em situações na qual a filtragem precisa ser realizada em tempo real, devido à necessidade de acesso prévio a todos os dados.

No entanto, essa limitação não representa um problema no contexto empregado do trabalho para filtragem de ângulos ao longo do contorno de um objeto. Nesse cenário, o filtro é aplicado em amostras que variam com o espaço (posição) e não com o tempo. Dessa forma, todos os dados necessários podem ser adquiridos pelo processamento de uma única imagem.

Assim como apresentado por (OPPENHEIM, 2010) e representado na figura 33, o procedimento de filtragem bidirecional começa aplicando o filtro qualquer de maneira convencional, da esquerda para a direita, nos dados do sinal. Em seguida, os dados filtrados são invertidos (ou refletidos) e o filtro é aplicado novamente. Por fim, os dados resultantes são novamente invertidos para obter o resultado final.



Figura 33 – Esquema de filtragem de fase nula a partir de um filtro convencional H(z).

A principal vantagem da filtragem bidirecional no sistema de visão computacional é otimizar os dados enquanto não insere distorções de fase e preserva o mapeamento entre posição do pixel e ângulo original. A fase nula é atingida pois a fase inserida no sinal na filtragem de avanço é compensada durante a passagem de retorno do filtro, corrigindo de quaisquer distorções de fase que possam ocorrer ao aplicar o filtro em apenas uma direção.

O filtro utilizado neste trabalho é um filtro Butterworth de primeira ordem do tipo passa-baixas, com uma frequência de corte normalizada de 0,025. Os parâmetros do filtro foram determinados experimentalmente, levando em consideração a simplicidade, efetividade e tempo de resposta transitória quando empregado no esquema de fase nula. A função de transferência do filtro empregado é representada pela Equação (4.8).

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.0378 + 0.0378z^{-1}}{1 - 0.9244z^{-1}}$$
(4.8)

Em comparação ao filtro H(z), a resposta em frequência do correspondente de fase nula possui módulo $|H(z)|^2$ e fase nula para todas as frequências. A figura 34 exibe a resposta em frequência do filtro H(z) empregado e a resposta em frequência após a aplicação em fase nula.



Figura 34 – Comparação das Respostas de Frequência: Filtro Butterworth Passa-Baixa de Ordem 1 H(z) versus correspondente de Fase-Nula.

Este método foi empregado no trabalho para otimização dos ângulos obtidos a partir do filtro de Kroon. Este filtro permite melhorar a precisão e a estabilidade dos dados para alcançar melhores estimativas de ângulos.

4.7 Configuração Física e Equipamentos

No arranjo adotado, a câmera desempenha um papel fundamental ao ser posicionada estrategicamente acima da peça a ser analisada. Essa configuração permite que a câmera capture imagens da superfície da amostra com facilidade e precisão. Para garantir uma iluminação adequada durante a captura das imagens, uma fonte de luz de alta intensidade é posicionada abaixo da amostra.

4.7.1 Estrutura

A fim de assegurar a estabilidade e a precisão do arranjo, foi desenvolvida uma estrutura especialmente projetada. Essa estrutura é construída utilizando um perfil estru-

tural de alumínio com uma espessura de 30 mm. O perfil estrutural de alumínio é uma escolha comum devido à sua resistência, durabilidade e leveza, o que o torna adequado para suportar a câmera e a fonte de luz de forma estável.

O projeto da estrutura foi elaborado almejando uma montagem simples, ajustável, robusta e eficiente. Utilizando software de desenho assistido por computador (CAD), a estrutura em perfil estrutural de alumínio foi projetada levando em consideração os requisitos específicos do arranjo, como o posicionamento da câmera em relação à peça e da fonte de luz.

A figura 35 ilustra o projeto detalhado da estrutura em perfil estrutural de alumínio de 30 mm. Esse projeto foi executado como um guia para a construção física da estrutura, fornecendo medidas e dimensões precisas para garantir a montagem correta. Com base nesse projeto, a estrutura pode ser fabricada com precisão, proporcionando uma base sólida para a configuração do arranjo de câmera e iluminação.



Figura 35 – Vista Isométrica do design da estrutura do protótipo com dimensões em mm.

A figura 36 ilustra o protótipo desenvolvido, cuja estrutura apresenta uma configuração bem definida.



Figura 36 – Estrutura do protótipo desenvolvido. (a) Visão Geral, (b) vista lateral, (c) imagem focada na amostra e (d) vista superior.

Na parte inferior, o equipamento de iluminação é fixado, e acima dele, uma chapa de vidro temperado de 3mm é posicionada para acomodar a peça a ser inspecionada. Esse

vidro é incolor e translúcido, permitindo a passagem da luz da fonte luminosa para a peça. A utilização do vidro traz vantagens, pois sua planicidade garante o alinhamento adequado da peça e sua textura facilita a limpeza do conjunto. Além disso, a câmera é posicionada na parte superior da estrutura, e os dados indicam que a distância efetiva entre o ponto focal da câmera e a peça é de 77cm.

Para garantir a estabilidade da estrutura, foram adicionados suportes de aço abaixo dela. Esses suportes possuem uma massa significativa, o que contribui para a estabilidade geral do protótipo. A fixação desses suportes na estrutura permite ajustes, possibilitando o nivelamento adequado. Além disso, o aparelho oferece a opção de fixar a estrutura por meio de parafusos, caso seja necessário.

4.7.2 Esquema de Iluminação

A estratégia de iluminação utilizada é conhecida como luz de fundo, ou *backlighting*, na qual a amostra é posicionada entre a fonte luminosa e a câmera (HORNBERG, 2006). O princípio de funcionamento trata-se de que um objeto opaco não permite a passagem de luz em seu interior, impedindo que os raios de luz, que passariam pelo objeto, atinjam a câmera. Desta forma, a imagem formada apresenta o objeto com baixa luminosidade, enquanto o plano de fundo é representado em alta luminosidade, conforme disposto na figura 37.



Figura 37 – Iluminação do tipo Luz de Fundo.

Uma vantagem deste tipo de iluminação é a criação de um contraste significativo entre a peça e o fundo, realçando suas bordas (HORNBERG, 2006). Por essa razão, essa técnica é empregada na medição de furos e contornos de objetos (MARTIN, 2007) como em (TAN et al., 2021) e (DUAN et al., 2018). Além disso, outra vantagem do uso desta técnica é que, ao se medir um anel de propriedades metálicas, quando exposto o objeto à luz direta poderia haver ofuscamento (*glare*), caracterizado pela presença de pontos de luz intensa ao refletir a fonte luminosa, como ilustrado na figura 38. Como pode ser observado na imagem não ocorre no caso da luz de fundo.



Figura 38 – Comparação entre iluminação direta (a) e iluminação de fundo (ou retroiluminação) em peças metálicas (b).

É fundamental destacar ainda que foi constatado que o esquema de iluminação do tipo *backlight* proporciona uma notável imunidade à luz ambiente, devido ao predomínio do fluxo luminoso capturado pela câmera proveniente da fonte luminosa específica do equipamento. Essa eficácia ocorre devido à concentração direta dos raios luminosos em direção à câmera, em contraste com a iluminação ambiente, que tende a se espalhar pelo ambiente sem direcionamento específico.

Como luz de fundo, está sendo utilizado um painel de LED 20x20 cm de 18W, com matrizes de led e luz difusa. Este equipamento é capaz de providenciar um alto fluxo luminoso, com características difusas e com uma abertura de 120°. O nível de contraste obtido nas bordas da peça, por meio da iluminação de fundo, possibilita a determinação da posição a nível subpixel, conforme evidenciado na figura 32. Contudo, conforme mostra a figura 38, a iluminação fornecida por este equipamento não é uniforme e ainda apresenta uma textura sutil na superfície. Também foi observado que a regressão do modelo de borda utilizado foi capaz de compensar esta adversidade.

4.7.3 Conjunto de Captura

O sistema utiliza o sensor IMX178 da SONY (SONY, 2018), que está integrado na câmera MV-SUA630M. Este sensor possui uma resolução efetiva de 6,44 milhões de pixels (3096 x 2080) e cada pixel tem uma dimensão física de 2,4 µm x 2,4 µm. Ele foi projetado principalmente para aplicações industriais que demandam uma maior captura de luz. Uma característica importante do sensor IMX178 é a sua tecnologia proprietária de estrutura retroiluminada, denominado STARVIS/EXMOR R®. Essa tecnologia permite que o elemento fotosensível seja exposto diretamente à luz incidente, otimizando a captura de fótons e ampliando a faixa dinâmica em sensores CMOS.

Além disso, o sensor IMX178 também utiliza sensores monocromáticos, o que possibilita uma captura de luz ainda mais precisa e eficiente. Essa combinação de retroiluminação e sensores monocromáticos resulta em uma maior sensibilidade à luz e contribui para a obtenção de imagens de alta qualidade.

Quando se compara sensores de câmera, em geral, dimensões de pixel maiores resultam em uma maior capacidade de captação de luz, o que consequentemente leva a uma melhor qualidade de imagem (FARRELL; XIAO; KAVUSI, 2006). Isso ocorre porque o aumento do ganho do sensor afeta negativamente a relação sinal-ruído, sendo assim crucial operar com amplificação mínima para obter melhores resultados.

Embora este dispositivo sensor possua pixels de dimensões modestas em comparação com outros sensores industriais mais sofisticados, a iluminação de fundo fornece um alto fluxo luminoso, o que possibilita a captura de imagens com baixo nível de amplificação e baixo tempo de exposição simultaneamente.

Nesta câmera é utilizada a lente específica para visão de máquina com baixa distorção. Os principais atributos desta lente são: distância focal fixa de 16mm, distância em foco e abertura ajustáveis. Antes da calibração instrínseca, a distância em foco é regulada para a distância de interesse e abertura da lente para F/5.6. Esta abertura de lente possibilita uma maior profundidade de campo sem causar difração da imagem.

Com base nas dimensões máximas do anel em estudo, de 10 cm de diâmetro, optou-se por limitar a resolução da câmera em 972x 972. Apesar de não utilizar o máximo de recursos da câmera, os estudos realizados por (SUN et al., 2013) constataram que a calibração realizada utilizando apenas os pixels mais próximos do centro da câmera apresentava melhores resultados. A esta distância, o campo de visão é de, aproximadamente, $111,87 \ge 111,87$ mm e ângulo de visão de 4.16° .

A escolha dos equipamentos e sua disposição foi baseada em decisões estratégicas com o objetivo de otimizar a captura representativa do anel em equipamentos comerciais. Um exemplo disso foi a determinação da distância focal da lente e da distância de trabalho, que teve como propósito minimizar a perspectiva, conforme descrito na equação 4.1, ao mesmo tempo em que possibilitava uma profundidade de campo adequada, mantendo o equipamento com dimensões praticáveis.

Um dispositivo que seria capaz de facilitar o processo de medição seria as lentes telecêntrica utilizadas em (DUAN et al., 2018). Estas lentes utilizam de artifícios óticos para capturar raios perpendiculares a imagem. O efeito causado é a perda de perspectiva,

desta forma, a profundidade z não afeta consideravelmente as dimensões na imagem. Uma limitação na aplicação desta técnica é que, como os raios não são inclinados, a lente tem que possui, no mínimo, a dimensão do anel. Analisando a aplicação no projeto, aplicar esta lente em um ambiente sem movimentação da câmera, que exigiria todo o anel fosse capturado em apenas uma imagem. Esta restrição demandaria uma lente de pelo menos 10 cm de diâmetro, associada às rigorosas especificações exigidas na fabricação, concluiu-se que a aquisição deste tipo de lente adicionaria um custo que inviabilizaria o projeto. Contudo, é um ponto a se considerar em outros projetos, pois o uso desta lente simplificaria o problema, quanto a fotogrametria.

4.7.4 Padrões de Calibração

Por último, foram adquiridos 4 padrões de calibração simples do tipo xadrez, mostrados na figura 39. Nestes padrões, os quadrados são organizados em uma matriz 12x9 e com quadrados variando a depender do modelo.



Figura 39 – Padrões de calibração empregados no trabalho.

Conforme ilustrado na figura 39, os padrões disponíveis possuíam quadrados de 5, 6 e 10mm, todos com incerteza de 0,01mm. Essa figura demonstra que os padrões opacos são impressos em um filme antirreflexo, enquanto o padrão translúcido é suscetível ao ofuscamento diante da emissão direta de luz. Além disso, é importante destacar que esse padrão translúcido é flexível, o que exigiu sua fixação em uma placa de vidro, porém, os testes demonstraram que isso não afetou seu uso.

Embora os padrões opacos tenham se mostrado melhores para a calibração dos parâmetros intrínsecos, o padrão translúcido foi conveniente para a calibração extrínseca. Durante a calibração intrínseca, os padrões não reflexivos foram essenciais para obter

conjuntos de imagens com luz direta difusa com maior fidelidade e qualidade. No entanto, para realizar a calibração dos parâmetros extrínsecos no equipamento, foi necessário alterar manualmente o tempo de exposição no *software* proprietário da câmera, o que também tornou o processo mais suscetível à iluminação ambiente.

Por outro lado, o padrão translúcido não exigiu a alteração do tempo de exposição, e a calibração com esse padrão apresentou resultados similares. É válido ressaltar que o padrão translúcido não sofre ofuscamento quando submetido a luz de fundo.

4.8 Fluxograma do sistema

O algoritmo desenvolvido tem como objetivo extrair com precisão os pontos de interesse da imagem, realizar as conversões para mundo real, para, enfim, realizar a medição em dimensões físicas. Este processo se inicia com técnicas de visão computacional, refina as estimativas utilizando modelos não-lineares e finaliza com fotogrametria, mapeando os pontos da imagem para o mundo real.

4.8.1 Procedimento de Ajuste e Calibração

A calibração e realização de ajustes precisos em um sistema de visão computacional desempenham um papel fundamental na obtenção de resultados precisos e confiáveis. Um sistema bem calibrado garante que as medições e análises realizadas estejam alinhadas corretamente com o mundo real, reduzindo erros e incertezas. A calibração envolve determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, como distância focal, distorções e posição relativa em relação ao objeto. Além disso, é necessário ajustar os parâmetros do sistema para adequa-lo às condições de operação.

Alguns passos necessários são fundamentais antes de posicionar a câmera no local de operação:

- 1. Ajuste da câmera para operação: Ajustar a distância em foco, distância focal e abertura desejada, a ser utilizada na aplicação. Posteriormente, regula-se o tempo de exposição para permitir uma captura de fótons pelo sensor apropriada, almejando manter a sensibilidade no mínimo. A resolução também deve estar no formato de interesse, pois interfere nos parâmetros de calibração. Ainda, no que se refere à resolução, é necessário observar que algumas câmeras realizam o processo de *pixel binning*, o que varia o tamanho efetivo do pixel. É desejável, ainda, utilizar a câmera no formato de transferência de vídeo com o mínimo de compressão, para evitar a presença de artifícios.
- 2. Calibração Intrínseca da câmera: Este passo é realizado esporadicamente para um determinado conjunto de lente e câmera, pois tem como objetivo retratar suas

características constantes. A qualidade do processo de calibração depende das amostras fornecidas, desta forma devem ser experimentados diversos conjuntos de amostras diferentes e selecionada a mais apropriada.

3. Posicionamento da câmera no local de operação: Como mostra a figura 36, a câmera deve ser posicionada acima da peça. A orientação da câmera deve possuir um mecanismo de ajuste que permita alinhá-la conforme desejado.

Recorrentemente, alguns ajustes podem ser necessários antes de se iniciar a operação do equipamento, para propiciar a captura adequada da imagem e possibilitar a compensação adequada de distância e inclinação durante a projeção reversa da imagem.

- 1. Ajuste Eletrônico na Câmera: Os parâmetros físicos da câmera de distância em foco, distância focal e abertura, além de resolução nativa, não devem ser modificados em relação aos utilizados na calibração intrínseca. No entanto, parâmetros como tempo de exposição, sensibilidade, contraste e brilho não alteram os valores calibrados. Uma vez que a aplicação faz uso da iluminação do tipo luz de fundo que tem como característica um fluxo luminoso maior, o tempo de exposição, a iluminação direta irá saturar os pixels do sensor e prejudicar a imagem. É importante manter a sensibilidade (ganho) mínima pois a amplificação insere ruídos na imagem. A estratégia utilizada para ajustar tempo de exposição consistiu em utilizar a sensibilidade mínima e incrementar o tempo de exposição até que a imagem atingisse o valor máximo de 200 de intensidade.
- 2. Calibração da Pose da Câmera em relação à peça (Extrínseca): Para se realizar a reconstrução tridimensional, é necessário saber a pose relativa entre a amostra e a câmera. Este processo é realizado colocando um padrão de calibração no local onde será posicionado a peça. As informações referenciais fornecida pelo padrão e pela calibração intrínseca possibilitam a execução do algoritmo PnP, cujo objetivo é determinar a rotação e translação da câmera em relação ao plano de referência. Para melhorar o resultado é interessante descartar os pontos de referência considerados fora da curva, que podem representar imperfeições no padrão de calibração da câmera, por meio de temetos é realizada por meio da técnica RANSAC (OPENCV, 2023). É proveitoso utilizar este procedimento para realizar o ajuste na rotação da câmera, por meio de um mecanismo de ajuste, para alinhar a câmera com os eixos do plano de medição. A altura do padrão do plano de medição deve ser medida com precisão, para compensa-la na medição da peça.

4.8.2 Procedimento de Medição

Com a câmera ajustada adequadamente, com os parâmetros intrínsecos e extrínsecos calibrados e a altura de medição predeterminada, é possível se realizarem medições planares na imagem. O fluxograma geral do programa de medição está disposto na figura 40



Figura 40 – Fluxograma de Medição.

No caso específico da medição de anéis de pistão, o algoritmo desenvolvido ocorre na sequência:

- 1. Captura da Imagem: Capturar múltiplas imagens sequenciais da câmera, extrair da região de interesses (ROI) e converter as imagens coloridas em escala de cinza, caso a câmera não seja monocromática.
- 2. Empilhamento de imagens: Combinar de diversas imagens estáticas para formar uma única imagem com menor interferência de ruído. Dada a ausência de movimento entre as imagens, não é necessário realizar o alinhamento, simplificando assim o procedimento. O resultado empilhado é obtido por meio do cálculo da média das imagens.
- 3. Aplicação do Filtro Gaussiano: Aplicar filtro Gaussiano para reduzir ruídos e facilitar a detecção da borda, pela técnica de ajuste da curva de borda. Os parâmetros utilizados foram: tamanho de janela 9x9 e desvio padrão 0.9 em ambos os eixos.

- 4. Detecção de borda à nível de pixel: Aplicar a detecção de bordas a nível de pixel na imagem para filtrar as informações, por meio de técnicas com menor complexidade computacional. A detecção de bordas permite ainda a extração de estruturas da imagem, como o contorno. A técnica empregada é a Detecção de Bordas Canny associada ao filtro Sobel 3x3 por meio da biblioteca OpenCV.
- 5. Detecção de Contorno do Anel: Detectar caminhos fechados por bordas. Posteriormente, os contornos são filtrados com base em sua área e ocorre a detecção do contorno, que engloba o anel. Normalmente, o contorno é de fácil detecção, o filtro auxilia na filtragem do contorno entorno dos limites da luz de fundo, a borda da parede do anel e ruídos na imagem. A detecção do contorno da amostra tem utilidade, não só para extrair a borda externa do anel, mas também para delimitar a área do anel. Ao se delimitar o processamento a área do anel, o número de pixels a serem analisados não reduzidos, reduzindo o número de computações necessárias, agilizando o processamento da imagem e direcionando as análises realizadas nos próximos passos.
- 6. Detecção de Quinas: Localizar as quinas da abertura livre. As quinas do anel, são quinas características, desta forma, são representativas e se distinguem dos demais pontos. Após a localização das quinas pelo método Harris, as quinas são refinadas à nível de subpixel utilizando método do OpenCV. Após a localização, as quinas são classificadas como quinas internas ou externas. Esta classificação ocorre com base na distância da quina ao centro da região que contorna do anel. Em geral, a identificação incorreta das quinas sugere a presença de resíduos indesejáveis nos anel que devem ser removidos.
- 7. Detecção de Borda Externa: Identificar a borda externa do anel em meio a seu contorno. No algoritmo, a borda externa é determinada pela porção do contorno que conecta as quinas externas. Considerando a falha na detecção, permite-se uma margem de erro, de um ponto da borda até a quina, de até dois pixels.
- 8. Refinamento nos Ângulos da Borda: Convoluir a área do anel, determinada pelo contorno, com o *kernel* Kroon 5x5. Em seguida, utilizar o resultado para estimar o ângulo dos pixels localizados na borda externa. Por último, filtrar destes ângulos por meio de o filtro *Butterworth* de Fase Zero do tipo Passa Baixa apresentado. Este filtro permite suavizar os valores de ângulo na borda, sem desviar os devidos ângulos de posição, conforme expõe a figura 41. A estimação deste parâmetro é crucial, pois serve como base para os próximos passos.



Figura 41 – Aplicação do Filtro Butterworth de Fase Zero nos ângulos da borda do anel. (a) Ângulo ao longo da borda do anel em determinada pose (b) ampliação da região destacada.

- 9. Determinar Pontos de análise de OSD e OLD: Percorrer a borda externa, discriminando os pontos de OSD e OLD com base em seu ângulo.Primeiramente, é definido como valor de referência o ângulo da linha imaginária que conecta as duas quinas externas. Conforme exibe a figura 2, que descreve os parâmetros OSD, OLD e abertura livre, os pontos OSD possuem a mesma orientação da reta de referência, enquanto os pontos OLD são perpendiculares a ela. Para posteriores refinamentos, foram amostrados todos os pontos da borda com ângulos próximos aos ângulos de interesse, tanto para o OSD, quanto o OLD.
- 10. Detecção de borda à nível de subpixel: Aperfeiçoar a localização dos pontos OLD e OSD por meio da regressão um modelo de borda embaçada. O método de regressão utilizado é *Levenberg-Marquart*, a partir do modelo sigmoidal T, empregado no trabalho, e suas respectivas derivadas parciais, para estimação da matriz jacobiana de forma aritmética, que estão é descrito em detalhes na secção 4.5;

Adicionalmente, ocorre uma correção da localização pela projeção da borda à linha normal, como na figura 26. Porém, ao invés de usar uma regressão nos pontos da borda, como (SUN et al., 2013), o algoritmo utiliza os ângulos obtidos no passo 8.

É válido salientar que o passo 9 corrige a posição, não só dentro do pixel localizado nos passos anteriores, mas permite realocar o ponto da borda ao longo da janela amostrada, caso identificado pela regressão.

11. **Projeção de Perspectiva Inversa:** Projetar os pontos de interesse OLD e OSD, refinados no passo 9, juntamente com as quinas externas, da imagem para o mundo real. Esta projeção reversa utiliza a calibração intrínseca e extrínseca previamente

estimadas, desta forma, a qualidade desta projeção dependerá da fidelidade dos parâmetros estimados. O procedimento de projeção de perspectiva inversa com correção da altura da peça está detalhado na seção 4.3. Esta tarefa consiste em determinar o escalar λ , que intercepta a profundidade Z e estabelece a posição (X, Y, Z) para o ponto da imagem x, com a distorção removida.

12. Regressão dos pontos OLD e OSD: Realizar regressão entre vizinhos no conjunto de pontos OLD, incluindo as duas laterais da peça, devidamente projetado para o mundo real. Como a borda é circular, o modelo utilizado é a equação característica do círculo no método Levenberg-Marquart, na qual a posição de todos os pontos OLD são inseridos como entrada, conforme representa a figura 42. O mesmo processo é repetido para os pontos de OSD, disposto na figura 43. Como todos os pontos pertencem a mesma coordenada Δz , a posição dos pontos é simplificada a uma modelagem bidimensional. Vale ressaltar que a regressão é realizada com os pontos projetados no mundo real e que as figuras são apenas representativas.



Figura 42 – Regressão dos pontos da borda OSD. (a) Determinação dos pontos OLD com base no ângulo (b) ampliação da região destacada.

13. Medição dos pontos de interesse: Estabelecer os valores de OSD, OLD e abertura livre. Com a região da borda dos pontos de OLD modelada por um círculo definido pela localização do centro e raio, a dimensão do OLD é aferida como sendo o diâmetro do círculo estimado. O OSD, por sua vez, é avaliado como a maior distância entre o círculo, formado por seus pontos, e o ponto central entre as duas quinas externas. Finalizando, a abertura livre é mensurada como a distância entre as duas quinas externas.



Figura 43 – Regressão dos pontos da borda OLD. (a) Determinação dos pontos OLD com base no ângulo (b) ampliação da região destacada.

4.9 Interface gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida em Qt, por meio da linguagem C++. O *framework* foi escolhido pela sua licença permissiva, similar à do OpenCV, pela sua praticidade no desenvolvimento de interfaces gráficas e pela compatibilidade da plataforma com o OpenCV.

O sistema desenvolvido tem como objetivo possibilitar o diagnóstico de problemas e possuir telas intuitivas para interação com o usuário. O intuito, neste sentido, não é explicitamente servir a um usuário final, mas possibilitar um equilíbrio entre a apresentação do trabalho de forma clara e possibilitar ferramentas de ajuste e controle por parte do desenvolvedor. Contudo, o modelo apresentado servirá como base para a implementação da interface para o operador.

O programa permite a entrada de imagem, por meio de dispositivos conectados ao computador capturar imagens para serem analisadas em tempo real, ou alternativamente, abrir imagens salvas em arquivos. A imagem utilizada como entrada do problema pode ser visualizada por meio de uma miniatura, conforme mostra a figura 44. Esta área de interação está sempre disponível para o usuário na porção esquerda da tela do programa.

A aba principal é a tela de operação, mostrada na figura 45. A tela tem como objetivo capturar a imagem, quando o usuário selecionar o botão "Realizar Medições" e aferir as medidas de maior diâmetro externo, "OLD", menor diâmetro externo, "OSD", e abertura livre, "GAP". Esta aferição depende da visão computacional empregada na imagem, mas também das calibrações anteriormente realizadas, e a altura da peça, providenciada



Figura 44 – Interface de entrada de imagem.

pelo usuário.

O ambiente de operação permite, ainda, visualizar a amostra cortada da imagem capturada e pontos característicos, identificados pela visão computacional. Esta visualização tem como certificar a correta extração dos parâmetro e identificar erros. Estes pontos são: o centro da imagem do anel; os pontos de bordas laterais utilizadas para o OLD; os pontos de borda inferiores utilizadas para o OSD; as quinas; a reta que representa a medição do OSD; a reta que representa a medição do OLD e a reta que representa a medição da abertura livre. Os botões posicionados na lateral esquerda da imagem permitem a seleção, por parte do usuário, de qualquer destes pontos ele deseja visualizar.



Figura 45 – Ambiente de Operação Principal do Sistema

A segunda aba é o ambiente de diagnóstico para identificação do anel, pelo seu

contorno, e da borda externa, disponível na figura 46. Nesta tela são definidas a área máxima e mínima do anel, em relação a área total da imagem. Estes parâmetros, embora configuráveis pelo usuário, devem ser permissivos, excluindo apenas as regiões muito discrepantes em relação à área esperada do anel. Como exemplo de elementos que devem ser filtrados, incluem-se pequenos segmentos podem ser resultantes de falhas na segmentação das bordas, e grandes segmentos referentes às bordas da luz de fundo, que não são de interesse para a análise do anel. Desta forma, esta configuração deve atender a todos os anéis simultaneamente.

Outra funcionalidade este painel é realizar uma representação visual do procedimento identificação de componentes da borda anel. Sendo o componente de maior interesse a borda externa, que programa determina com base nas quinas externas e no contorno do anel. Deste modo, este ambiente exibe o contorno do anel identificado, bem como: ponto principal; limites do anel; a remoção das quinas; e a borda externa. Assim como na tela anterior, permite a escolha do usuário.



Figura 46 – Ambiente de Diagnóstico de Contornos e Bordas.

A terceira tela é o ambiente de investigação da localização da borda em subpixel, disposto na figura 47. Este ambiente é interativo, onde o usuário seleciona na imagem, por meio do mouse, a borda que deseja analisar. O programa encontra a borda externa mais próxima do local selecionado e realiza a operação de regressão naquele ponto.

É válido observar que a imagem visualizada pelo usuário é espelhada no eixo y, em relação à imagem do anel. Esta figura é representada desta maneira para não confundir o usuário quanto aos ângulos da borda externa, uma vez que a origem dos eixos se encontra no canto superior esquerdo da imagem, onde o eixo y é orientado de cima para baixo.



Figura 47 – Ambiente de análise de regressão na borda externa.

Esta interface pode ser separada em quatro porções: seleção e visualização da borda (superior esquerdo); parâmetros de amostragem e da curva ajustada (superior direito); representação visual da localização da borda selecionada e seus vizinhos (inferior esquerdo); gráfico dos pontos amostrados e curva ajustada (inferior direito).

Ao selecionar um ponto na imagem, o programa destaca a borda analisada na imagem, mostra o ângulo desta borda e a direção mais próxima disponível, para realizar a amostragem. Os pontos são amostrados nesta direção, conforme mostra a porção inferior esquerda, onde é feita a regressão que retorna os parâmetros disponíveis na porção superior direita. Os pontos amostrados são comparados à curva ajustada no gráfico, onde se destaca o ponto central da curva encontrada. A visualização do ponto da borda de interesse se encontra localizada na porção inferior esquerda, onde o ponto laranja representa a posição no pixel, antes do alinhamento com a linha normal, e o vermelho, depois do alinhamento.

A quarta aba é responsável pela inserção dos parâmetros intrínsecos no sistema de medição, conforme mostra a figura 48. Esta aba não é responsável por realizar a calibração, mas por introduzir os parâmetros computados por um programa externo. O próprio OpenCV possui algoritmos de calibração e pode ser utilizado para calibrar a câmera. Contudo, desenvolver um sistema de calibração está fora do escopo do trabalho. Ao modificar os valores e pressionar o botão "Modificar", os parâmetros são alterados no sistema, sendo comum à todas as abas.

A quinta aba é a calibração extrínseca, onde são estimados os parâmetros de rotação e translação da câmera, em relação ao plano de referência definido pelo padrão

Distância Focal	Centro Ótico
FX: 6793.40	X: 779.39
FY: 6790.80	Y: 565 .96
Distorção Radial	Distorção Tangencial
K1: -0.001600	P1: 0.002600
K2: -0.534700	P2: 0.006000
Γ	Iodificar

Figura 48 – Ambiente de definição de parâmetros intrínsecos.

de calibração, disponível na figura 49.



Figura 49 – Ambiente de calibração extrínseca.

Neste ambiente o usuário insere o número de linhas "L", colunas "C" e dimensão de cada quadrado "D", conforme representa a figura da tela. Estas informações são empregadas como parâmetros de entrada do algoritmo. O usuário posiciona o padrão de calibração, com as características informadas, no local em que será posicionado o anel de amostra, e pressiona o botão "Estimar Pose". O algoritmo extrai os pontos de referência



Figura 50 – Ambiente de conferência da calibração.

da imagem e executa técnicas PnP, retornando as matrizes de rotação e translação da câmera. Como a matriz não explicita a rotação de forma direta, são computados os ângulos de rotação, que são disponibilizados para o usuário juntamente com os demais resultados.

A calibração extrínseca realizada automaticamente é sincronizada em todo o programa. Porém, no estado atual, o programa não permite a modificação manual destes parâmetros. Deve se considerar, ainda, a diferença de altura do plano calibrado e o plano que o anel esteja posicionado, caso possua diferença. Esta diferença deverá ser acrescida na altura do anel.

A sexta, e última, aba é responsável pela conferência da calibração preliminarmente realizada. A interface desta aba esta disposta na figura 50. O objetivo desta interface é estimar, utilizando os parâmetros calibrados, a distância entre os pontos de referência, para diferentes posições e alturas do padrão de calibração no plano calibrado. A variação da posição é obtida por meio da movimentação do padrão de calibração pela cena, já a diferença de altura é alcançada por meio da inserção de chapas de vidro de altura conhecida embaixo da peça.

Desta forma, o usuário insere a altura do plano de calibração "Z", o número de linha "L" e de colunas "C" do padrão, com isso, o algoritmo retorna a distância estimada entre o ponto à direita e à baixo de cada ponto de referência. O tamanho do quadrado "D" ainda não é utilizado no estado atual do sistema, porém em versão posterior deverá ser utilizado para comparar o resultado esperado com o resultado obtido e realizar análises estatísticas. Vale ressaltar que o padrão utilizado para conferência não precisa ser o mesmo do utilizado para calibração, o que pode trazer vantagens para a conferência.

Como exposto, a interface, que é organizada em abas, divide o sistema em funcionalidades que são: a visualização da operação e ajuste de parâmetros para aferição do formato do anel, por meio de fotogrametria. Ainda, o sistema permite salvar os parâmetros ajustados, recuperar estados e exportar os dados.

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo são abordados o programa desenvolvido e os resultados experimentais. O objetivo é demonstrar a operação e diagnóstico realizados por meio do sistema, uma vez que os detalhes do algoritmo foram apresentados no capítulo anterior. Após a demonstração do sistema, os resultados obtidos são analisados e comparados ao processo atual de medição das amostras adquiridas.

5.1 Calibração Extrínseca

Conforme descrito na sessão 2.7.2, a otimização dos parâmetros intrínsecos foi realizada empregando um conjunto de amostras em diversas posições e rotações, seguindo as melhores práticas mencionadas. As fotografias foram tiradas com a câmera montada em um tripé, enquanto o padrão de calibração permaneceu em uma posição fixa. Durante a captura das amostras, realizou-se a variação da posição da câmera, equivalendo à variação da posição do padrão de calibração. Para obter cada amostra de imagem com o mínimo de ruído, utilizou-se um empilhamento que consistiu na média de 20 imagens. No total, foram capturadas 28 imagens de 1296x972, embora duas delas tenham sido desconsideradas por serem consideradas *outliers*. A figura 51 ilustra algumas das amostras de imagens capturadas da câmera em diferentes poses.



Figura 51 – Poses do padrão de calibração em relação à câmera utilizadas para calibração intrínseca.

A tabela 1 apresenta os valores determinados a partir da calibração intrínseca. Os resultados demonstram que, a princípio, o erro obtido parece adequado à precisão desejada.

Parâmetro	Valor Ajustado
f_x	6803,733
f_y	6800,749
p_x	603,262
p_y	509,863
p_1	0,001489
p_2	-0,003696
k_1	0,000268
k_2	-1,569898

Tabela 1 – Parâmetros intrínsecos otimizados pela calibração intrínseca.

A eficácia do ajuste de parâmetros para descrever o conjunto de amostras é avaliada pelo erro de reprojeção. Essa métrica é de fundamental importância em técnicas de calibração de câmeras e sistemas de visão computacional, pois quantifica a diferença entre os pontos 3D do mundo real, projetados no plano da imagem (2D), e os pontos reais correspondentes capturados pela câmera. Além de verificar a fidelidade do modelo, esta métrica também pode ser utilizada para identificar *outliers*.

A Figura 52 apresenta o erro de reprojeção média para cada amostra utilizada no ajuste do modelo.



Figura 52 – Erro de reprojeção médio dos pontos de controle na imagem (em pixels) das amostras para o modelo ajustado.

5.2 Teste de Fotogrametria

O processo inicial de validação envolveu uma investigação sobre a eficácia do protótipo em modelar precisamente o problema. Para alcançar isso, foi seguido um procedimento de duas etapas. Primeiramente, o padrão de calibração de tabuleiro de xadrez opaco com quadrados de 6 mm de tamanho, organizados em uma matriz de 12 por 9, foi utilizado para calibrar os parâmetros do sistema. Posteriormente, um padrão de calibração diferente de outro fornecedor, com as mesmas especificações, mas translúcido, foi usado para validar as medições.

Antes de conduzir o teste, os parâmetros extrínsecos do sistema foram calibrados posicionando o padrão de calibração do tabuleiro de xadrez na área de medição. O sistema foi calibrado uma única vez para todos os testes de fotogrametria.

Após a conclusão da calibração, a amostra foi posicionada na área de medição designada. Os parâmetros avaliados incluíram as dimensões dos quadrados nas direções x e y, bem como as distâncias entre os cantos internos mais extremos de cada linha e coluna dentro do padrão. Essas dimensões foram avaliadas em diversas rotações e posições do padrão para garantir testes abrangentes. Para cada medição, a média e o desvio padrão foram calculados. Os resultados detalhados podem ser encontrados na Tabela 2.

Detecão no	Quadrado na		Quadrado na		Linha do Xadrez		Coluna do	
eixo Z(rad)	direção X (mm)		direção Y (mm)		(mm)		Xadrez (mm)	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1.54	5,999	0.005	6,000	0.007	59,990	0.006	42,000	0.004
1.56	5,999	0.005	6,000	0.007	59,995	0.006	41,999	0.002
1.31	5,999	0.003	6,000	0.006	59,990	0.004	41,999	0.002
1	6,000	0.004	6,000	0.006	59,997	0.003	42,003	0.002
-0.03	5,999	0.005	6,000	0.007	59,991	0.004	42,003	0.006
-0.98	5,999	0.003	6,000	0.006	59,994	0.004	42,002	0.003
-1.55	6,000	0.005	6,000	0.008	60,000	0.003	42,003	0.001

Tabela 2 – Medições realizadas em um padrão de calibração em diferentes posições e rotações z para validação do modelo.

O protótipo demonstrou uma repetibilidade consistente nas medições, independentemente da orientação das amostras. A precisão foi considerada adequada, uma vez que as dimensões medidas estavam dentro da faixa de tolerância informada pelos fornecedores dos padrões de calibração, que era de $\pm 0,01$ mm. Como resultado, ao avaliar dimensões maiores, como linhas e colunas, os dados obtidos estavam dentro de uma tolerância de $\pm 0,01$ mm. Além disso, o uso de padrões de calibração com tolerâncias mais rigorosas poderia ser de grande valor.

Com o objetivo de testar a compensação de altura de medição, o padrão de calibração foi avaliado em diferentes alturas. Para isso, foram adicionadas chapas de vidro gradualmente abaixo da amostra. A altura das chapas foram previamente determinadas por meio de um paquímetro, resultando em alturas de 2,90 mm, 2,92 mm e 2,98 mm. O padrão foi posicionado em diversas rotações e posições para os testes, que avaliaram as dimensões sem a compensação de altura, ou seja, no plano calibrado, e com as alturas das chapas inseridas para a compensação de altura. Esse experimento apresentou os dados da tabela 3. Nesta tabela foram avaliados os valores médios de linha e coluna, por terem valores compatíveis com os esperados de amostras de anéis.

	2,90 mm		5,82 mm		8,80 mm	
	Linha	Coluna	Linha	Coluna	Linha	Coluna
	60,214	42,161	60,448	42,319	60,681	42,488
Sem Compensação de Altura	60,213	42,162	60,446	42,322	60,679	42,484
	60,221	42,162	$60,\!435$	42,319	60,681	42,482
	60,223	42,161	60,441	42,321	60,682	42,482
	59,990	42,005	59,997	42,002	59,993	42,006
Com Compensação	59,987	42,005	$59,\!995$	42,008	59,991	42,003
de Altura	59,996	42,005	59,985	42,004	59,993	42,000
	59,999	42,003	$59,\!99$	42,004	59,995	42,002

Tabela 3 – Medições realizadas em um padrão de calibração em diversas poses, avaliado em diferentes alturas para validar a efetividade da compensação proposta.

Os testes revelaram que o erro resultante da falta de compensação de altura é considerável. No entanto, a rotina desenvolvida demonstrou efetivamente sua capacidade de realizar correções de escala nas medições, levando em conta a altura de medição em relação ao plano calibrado.

A validação desse procedimento é fundamental, considerando que a rotina de visão computacional usada para extrair os pontos de medição de padrões do tipo xadrez é amplamente estabelecida e é um componente interno do OpenCV, enquanto o algoritmo de fotogrametria foi desenvolvido neste trabalho. Essa validação independente da extração de pontos de interesse desenvolvida é essencial para confirmar a eficácia tanto da calibração quanto dos métodos de modelagem de projeção de perspectiva inversa, implementados neste procedimento.

5.3 Teste de Rastreabilidade

Este teste compreende a análise do protótipo com base na medição de objetos de dimensão conhecida. Neste sentido, a rastreabilidade permite estabelecer uma conexão entre os resultados da medição e seu valor real. Assim, a validação da rastreabilidade foi realizada por meio da medição dos blocos-padrão no laboratório de metrologia sob condições controladas, com o intuito de avaliar a exatidão do sistema proposto. Esses blocos, mostrados na figura 53, possuem classificação A. Esta classificação certifica que as tolerâncias dimensionais de um bloco-padrão estão na margem de $+0.15\mu$ m a -0.05μ em suas faces de medição, quando medida sobre as condições padronizadas. Estas tolerâncias certificadas são mais rigorosas do que as esperadas do protótipo e desta maneira possibilitam rastrear a medida e desta maneira realizar comparação entre o valor real e o valor medido.



Figura 53 – Blocos-padrão utilizados no teste de rastreabilidade. (a) Conjunto de Blocos-Padrão de classe A. (b) Imagem capturada pelo equipamento, destacando os pontos utilizados para determinar a medida da face de precisão.

Uma fonte de incerteza que blocos-padrão introduzem no sistema é sobre a altura do bloco pois, embora as faces de medição dos blocos-padrão sejam altamente precisas, o mesmo não pode ser afirmado para as outras faces. As dimensões das faces, que serviram como referências de altura no programa de medição, foram determinadas por meio de um paquímetro. Nesta medição, foi constatada uma incerteza nessas faces de $\pm 0,02$ mm, contudo não foi observado um impacto significativo nas medições realizadas.

O procedimento de medição desses blocos pelo protótipo consiste em avaliar a distância entre os pontos centrais das bordas correspondentes às faces de medição dos blocos-padrão, conforme ilustrado na figura 53b. A localização dos pontos de medição é refinada pelo uso da técnica proposta de detecção de bordas de subpixel, utilizando o modelo de borda descrito anteriormente. Durante o processo de ajuste entre vizinhos, é realizada a otimização de uma reta em cada uma das faces do bloco-padrão. Em seguida, o ponto mais central de uma das faces é relacionado ao ponto correspondente mais próximo da reta ajustada. Por fim, a distância entre as faces é estabelecida a partir da menor distância entre o ponto correspondente mais central de uma das faces e a reta formada pela outra face. Esse procedimento é visualmente representado na figura 54.



Figura 54 – Procedimento de medição empregado para aferir a dimensão em as faces retas do bloco.

Antes de realizar os testes de rastreabilidade, a calibração extrínseca foi efetuada uma vez, e utilizada na medição de todos os blocos-padrão.

Durante a primeira etapa do teste, foi realizada uma análise detalhada para avaliar o impacto do ruído aleatório nos resultados finais das medições. Para isso, um blocopadrão foi posicionado em uma posição estática, ou seja, sem que houvesse movimentação do mesmo. Em seguida uma sequência de medições foi conduzida para obter uma série de resultados que idealmente deveriam apresentar o mesmo valor.

Esses resultados foram então analisados para avaliar a variação presente nas medições, utilizando o desvio padrão como métrica para quantificar a dispersão dos dados. O objetivo era compreender como o ruído presente nas imagens capturadas poderia afetar a precisão e a consistência das medidas realizadas pelo protótipo.

Após isso, foram empilhadas imagens sequenciais do mesmo bloco-padrão com a finalidade de reduzir a variação nos resultados. Ao empilhar as imagens, observou-se, de fato, uma diminuição na variação dos resultados, indicando que o empilhamento foi eficaz para reduzir parte do ruído aleatório presente nas medições.

Entretanto, à medida que o número de imagens empilhadas foi aumentando, não se verificou, após um certo limite, uma redução adicional significativa na variância dos resultados. Esse limite foi identificado após empilhar nove imagens, sugerindo que, a partir desse ponto, não foi possível identificar uma melhora na precisão das medidas com o aumento do número de imagens empilhadas.

A variação aleatória observada no sistema, após o empilhamento de nove imagens, está apresentada na Tabela 4.
Tabela 4 – Desvio Padrão das medidas amostradas com o bloco estático após empilhamento de nove imagens

Bloco-padrão	3σ (mm)
$70 \mathrm{mm}$	0.004

Na segunda etapa de testes, realizou-se a amostragem das dimensões entre as faces de medição dos blocos-padrão metálicos, abrangendo tamanhos de 40, 50, 60, 70 e 80 mm. A fim de obter uma avaliação abrangente da exatidão e precisão do método, cada objeto foi submetido a medições em dez poses diferentes, proporcionando uma variedade de configurações para análise. Com base nessas medições, foram calculadas as médias e desvios padrão para cada conjunto de dados, permitindo uma avaliação quantitativa da consistência e acurácia do processo de medição.

Para testar a capacidade do método de lidar com alturas variáveis, foram conduzidas duas sequências adicionais de testes. Nesses testes, foram inseridas lâminas de vidro de espessura conhecida entre os planos de referência calibrados e as peças em avaliação. O objetivo era simular variações nas alturas das peças em relação aos planos de referência e avaliar a precisão do método em compensar essas variações.

Na primeira sequência, os testes foram conduzidos diretamente sobre a superfície em que o plano de calibração foi calibrado, compensando apenas o tamanho da peça e a espessura do padrão.

Já na segunda sequência uma lâmina de vidro com espessura de $2,9 \pm 0,03$ mm foi adicionada entre a superfície de medição e a peça. Essa alteração permitiu verificar como o método de projeção de perspectiva inversa se comportava diante de uma variação conhecida na altura das peças, avaliando sua capacidade de fornecer medidas corrigidas e precisas mesmo quando há uma diferença significativa na distância em relação ao plano de calibração.

Por fim, na terceira sequência, foi adicionada uma lâmina de vidro adicional, entre a lâmina da segunda sequência e a peça, agora com espessura de $2,92 \pm 0,03$ mm. Essa segunda alteração permitiu verificar a consistência e confiabilidade do método ao enfrentar duas variações distintas de altura nas medições.

Os resultados desses testes foram compilados e detalhados na Tabela 5. Esse conjunto de experimentos adicionais possibilitou que o método de projeção de perspectiva inversa fosse validado de forma mais abrangente, demonstrando sua capacidade de formecer medições consistentes e confiáveis em condições reais de aplicação, mesmo diante de variações conhecidas na altura das peças em relação aos planos de referência.

Os resultados indicam que o sistema de medição apresentou uma precisão mínima de ± 0.008 mm e uma repetibilidade (3 σ) de ± 0.019 mm ao realizar medições em blocos-

Bloco Padrão		Altura	Sequência 1		Sequência 2		Sequência 3	
Bloco Padrao		(mm)	(mm)		(mm)		(mm)	
tipo	incerteza	Δz	μ	3σ	μ	3σ	μ	3σ
40 mm	$0,15~\mu{\rm m}$	$8,98 \pm 0,02$	39,998	0,01	39,995	0,005	40,005	0,008
$50 \mathrm{mm}$	$0{,}15~\mu\mathrm{m}$	$8,96 \pm 0,02$	49,997	0,009	49,995	0,009	50,004	0,009
60 mm	$0,15~\mu{ m m}$	$8,88 \pm 0,02$	59,992	0,006	59,997	0,006	60,000	0,008
70 mm	$0,15~\mu{ m m}$	$8,98 \pm 0,02$	69,998	0,019	70,000	0,006	70,002	0,009
80 mm	$0{,}15~\mu\mathrm{m}$	$8,92 \pm 0,02$	80,000	0,012	80,006	0,008	80,007	0,009

Tabela 5 – Aferição do Bloco-Padrão em poses aleatórias pelo protótipo.

padrão com diferentes poses e alturas. Durante a análise das sequências de teste, observouse uma tendência de aumento nas medições; no entanto, essa diferença é insignificante quando comparada ao resultado obtido ao compensar os comprimentos pela espessura das placas adicionadas. Essa diminuição na precisão das medições pode ser atribuída à maior incerteza na profundidade causada pelas placas adicionais.

Ao executar o procedimento de medição de blocos-padrão em um computador com processador i5-8300H e 16 GB de RAM, o sistema apresentou um tempo médio de processamento de 43,08 ms. Além disso, para a captura e empilhamento de nove imagens, o sistema demandou um tempo adicional de 250 ms.

5.3.1 Comparação com Trabalhos Relacionados

Com base no teste de rastreabilidade, que avaliou a distância entre as faces do bloco padrão, o método proposto alcançou uma exatidão representada pelo erro médio máximo de 0,008 mm e um desvio padrão de 0,0063 mm. Estas métricas foram relacionadas ao resultados publicados de outros trabalhos que também utilizam visão monocular para determinar as dimensões de objetos. Desta maneira, foram selecionados 4 trabalhos recentes:

- (GUO; FU, 2020): introduz um esquema de visão monocular que adota uma estratégia de análise geométrica simplificada para realizar a correção da altura. No entanto, a abordagem não possui a capacidade de efetuar ajustes para a inclinação da câmera em relação ao objeto.
- (LI, 2018): descreve uma abordagem baseada em visão monocular que emprega regressão de subpixel para a medição do diâmetro e altura de cilindros. Uma vez que o valor real não está disponível para efeito de comparação, não se apresenta a média dos desvios nesta análise. Além disso, não são abordados métodos de correção de inclinação.
- (TAN et al., 2021): projeta uma linha de laser em um eixo e captura a imagem resultante com uma câmera. Utilizando a pose do laser em relação à câmera, o

trabalho realiza uma estimativa da localização das bordas e, a partir disso, calcula o diâmetro. Este sistema possui a sua capacidade de efetuar a estimativa e correção da inclinação e altura da peça.

 (SUN et al., 2022): executa uma rotação da peça e projeta três linhas a laser, as quais são capturadas por uma câmera, permitindo a realização da reconstrução tridimensional da peça. Este trabalho descreve técnicas para estimar e corrigir a inclinação e a altura da peça.

A comparação entre os resultados apresentados está organizada na tabela 6.

Trabalho	Parâmetro	Dimensão	Desvio Médio	Deguio Padrão	
IIabaillo	Avaliado	(mm)	(mm)	Desvio i adrao	
Proposto	Desvio Máximo	40.80	0.008	0.0063	
Toposto	Bloco-Padrão	40-00	0,000	0,0003	
	Diâmetro Moeda	25	0,028	-	
(GUO; FU, 2020)	Largura Parte	35	0.075		
	Mecânica 1	- 55	0,075	-	
	Largura Parte	81	0.106	-	
	Mecânica 2	01	0,190		
(II 2018)	Raio Cilindro	20,802	-	0,01	
(11, 2010)	Altura Cilindro	27,928	-	0,009	
	Diâmetro Eixo 1	34,686	0,013	0,015	
(TAN et al., 2021)	Diâmetro Eixo 2	36,162	0,011	0,006	
	Diâmetro Eixo 3	34,012	0,015	0,005	
	Bloco-Padrão 1	40	0,025	0,085	
(SUN et al., 2022)	Bloco-Padrão 2	50	0,006	0,1007	
	Bloco-Padrão 3	60	0,006	0,1056	
	Bloco-Padrão 4	70	0,03	0,1099	

Tabela 6 – Comparação do desvio médio e desvio padrão em trabalhos que empregam visão computacional para medição de dimensões de objetos.

Desta forma, quando comparado a trabalhos similares, o protótipo demonstrou características satisfatórias durante a avaliação de blocos-padrão. Em comparação com (SUN et al., 2022), que também avaliou seu trabalho por meio de blocos-padrão, o sistema proposto apresentou melhor repetibilidade, assim, a utilização de linhas de laser proporciona flexibilidade na estimativa de profundidade, porém insere uma outra fonte de erro ao sistema. Portanto, a introdução de linhas de laser para automatizar a medição da altura da peça é vantajosa, mas deve ser realizada com cautela, uma vez que o erro introduzido pode inviabilizar algumas aplicações práticas.

5.4 Teste Comparativo

O teste comparativo consistiu em avaliar o desempenho do protótipo em relação a outro equipamento de alta precisão já validado e disponível no mercado. Para essa avaliação, foi utilizado uma Máquina de Medição por Coordenadas (CMM), especificamente o modelo Mitutoyo B251. Quando calibrada, essa máquina é capaz de fornecer pontos em coordenadas espaciais do mundo real, com uma tolerância declarada de 5 + L/100micrômetros, onde L representa a distância percorrida em milímetros.

Nesse teste, foi empregada a CMM para realizar medições do contorno externo de uma amostra, mostrada na Figura 55. Essas medições serviram como referência para comparação com as medições obtidas pelo protótipo.



Figura 55 – Amostra circular utilizada para teste de comparação. (**a**) Detalhes tridimensionais do objeto (**b**) Image do objeto na área de medição.

Inicialmente neste teste, a principio buscou-se realizar a avaliação dos diâmetros aferidos da amostra pelos dois equipamentos, assim como seria em um paquímetro. No entanto, uma limitação observada nos dados experimentais adquiridos pela CMM foi que a resolução da borda dos pontos adquiridos não permitia uma comparação direta entre os pontos de bordas opostas, nem uma regressão eficaz para inferir esse valor. Diante dessa limitação, optou-se pela análise do raio dos pontos amostrados da borda do objeto até o centro global da peça, obtido pela regressão de todos os pontos.

Desta maneira, para se obter os raios a partir das coordenadas obtidas pela CMM, foram amostrados 60 pontos do contorno externo da peça. Uma regressão não linear desses pontos foi realizada em forma circular para calcular a distância de cada ponto em relação ao centro, compensando ainda o tamanho da sonda utilizada. Este experimento foi replicado três vezes, e os valores máximos, mínimos e médios dos raios foram determinados para cada iteração.

Em seguida, a amostra foi inserida no protótipo, permitindo a extração de 1000 pixels de borda da imagem do perfil externo. Esses pontos foram otimizados e projetados no mundo real, considerando uma altura medida da amostra de 14,41 mm e utilizando os mesmos parâmetros e condições de calibração dos blocos-padrão. Posteriormente, realizouse uma regressão com todos os pontos do contorno, para encontrar os parâmetros do círculo ótimo global, que serviu como estimativa inicial para as bordas vizinhas no processo de ajuste de círculo local. Por fim, de maneira semelhante ao que foi realizado com a CMM, computou-se a distância dos pontos otimizados até o centro do círculo global para determinar o raio da amostra para cada ângulo de 0 a 360°.

Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 7.

Conjunto	Mitutoyo B251			Protótipo		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
1	18.025	18.021	18.028	18.015	18.011	18.019
2	18.025	18.020	18.029	18.017	18.012	18.021
3	18.025	18.022	18.029	18.017	18.012	18.022
4	-	-	-	18.017	18.012	18.024
5	-	-	-	18.015	18.011	18.020
\bar{X}	18.025	18.021	18.029	18.016	18.012	18.021

Tabela 7 – Comparação entre valores de raio medidos em m
m utilizando o protótipo e a máquina de medição por coordenadas.

A comparação das medidas obtidas pelos dois dispositivos mostra que o método proposto apresentou dimensões semelhantes de raios, sendo ligeiramente menores que o equipamento de referência. Alguns fatores conhecidos podem ter causado a discrepância observada. Primeiramente, a presença de chanfros pode induzir a desvios de medição ao realizar a medição em uma altura diferente da fornecida ao programa. Outro fator importante é a presença de protuberâncias na parte ocluída do perfil da borda. É possível mitigar esses fatores ao se utilizar lentes de maior distância focal e se afastar, proporcionalmente, a câmera da peça medida. No entanto, é importante observar que não é esperado precisão da ordem de milésimos de milímetro desse dispositivo.

Um fator importante de se observar é que dentre os pontos amostrados pela CMM, os valores máximos e mínimos estão dentro da tolerância de erro da máquina em relação à média. Da mesma maneira, o mesmo ocorre com o protótipo. Por este motivo a comparação gráfica entre os pontos amostrados das duas máquinas não é favorável e a melhor métrica para esta comparação é a média. Embora os valores máximos, mínimos e médios do protótipo tenham sido muito semelhantes em diferentes medições, o aspecto de variação da borda em cada medição não apresentou correlação aparente entre as medições.

Contrastando os dois equipamentos, o protótipo se destacou pela capacidade de realizar medições sem entrar em contato direto com a peça sem necessidade de fixação da mesma. Este fator evita perturbações e agiliza as medições. Outro ponto de relevância do equipamento desenvolvido é a diminuição do tempo de medição oportunizado, principalmente, pela capacidade de capturar simultâneamente diversos pontos do objeto com apenas uma imagem e processá-los em um tempo de computação satisfatório. Deste modo, enquanto foi necessário 145,70 ms (400 ms considerando o tempo de captura) para se obter os resultados a partir de 1000 pontos pelo protótipo, a CMM demandou alguns minutos para a obtenção manual cautelosa de 60 medições precisas. Contudo, a CMM apresenta uma tolerância de erro certifida mais restrita e flexibilidade para medir em alturas variadas e em regiões ocluídas de um objeto. provocadas pelo perfil do lado externo.

5.5 Teste com Anéis de Pistão

Algumas amostras foram adquiridas para o teste e validação do equipamento desenvolvido, que estão dispostas na figura 56. Os exemplares foram fabricados e mensurados utilizando o processo atual de medição, que utiliza fixadores e paquímetros. Foram avaliadas um total de 5 exemplares de 8 modelos diferentes de anel de pistão, totalizando 40 amostras, de espessura de $1,24 \pm 0,01$ mm.



Figura 56 – Amostras de Anéis de Pistão.

Para manter a consistência na análise das amostras, cada uma delas passou por um processo de identificação permanente com o modelo e número do exemplar. Nesta identificação a letra representa o modelo e o número a amostra correspondente. A figura 57 mostra a identificação presente nas amostras do modelo D. A marcação com o modelo e número do exemplar garante que, ao longo de todo o processo de teste e validação, seja possível rastrear individualmente cada amostra, evitando equívocos e garantindo a precisão dos resultados. Isso também permite que, caso algum problema seja encontrado em uma determinada amostra, seja possível localizar rapidamente o modelo específico para correções e ajustes.



Figura 57 – Identificadores das Amostras.

Em seguida, foram realizadas medições sequenciais com a amostra B1 em posição estática. Do mesmo modo como foi realizada a avaliação do bloco-padrão, essas medições pretedem avaliar o erro aleatório do método proposto causado pelo ruído na imagem, visto que imagens idênticas geram as mesmas medidas. Enquanto a única medição do bloco-padrão era a distância entre as faces, o anel apresenta 3 parâmetros (OLD, OSD e Abertura Livre). Desta maneira, definiu-se a métrica utilizada com base no valor mais elevado de desvio padrão entre esses parâmetros, computado a partir de 10 imagens da peça estática.

Com o intuito de avaliar o empilhamento, o experimento foi repetido com empilhamentos de 0 a 11 imagens, o que resultou na Figura 58. Essa análise permitiu verificar a influência do empilhamento de imagens na redução do erro aleatório e na melhoria da precisão das medições.



Figura 58 – Máximo desvio padrão observado de acordo com o número de imagens empilhadas.

A figura 58 demonstra que mesmo sem o empilhamento, o ruído aleatório nas

medições se manteve em níveis aceitáveis, uma vez que a precisão almejada é de 0.03 mm. Essa imagem também mostra que o empilhamento se apresentou eficaz em reduzir ainda mais esse tipo de ruído. No entanto, após um certo número de imagens empilhadas, a influência do empilhamento não pôde ser observada.

É importante enfatizar que o trabalho emprega um alto fluxo de luz ao sensor para reduzir o ruído e adota diversas técnicas para suprimi-lo, como regressão das bordas e entre vizinhos, filtro gaussiano e filtro de ângulos. Essas estratégias têm se mostrado eficazes em melhorar a qualidade das medições e reduzir o impacto do ruído nas imagens capturadas.

Com relação ao empilhamento de imagens, os resultados indicam que o ganho em precisão parece se estabilizar após empilhar 6 imagens. No entanto, como precaução adicional e para garantir uma maior confiabilidade nas medições, neste trabalho optouse por empilhar 9 imagens. Esse número foi escolhido como uma margem de segurança, permitindo obter medições mais robustas e consistentes.

A Tabela 8 apresenta os desvios padrões observados com a peça estática utilizando o empilhamento de 9 imagens.

Tabela 8 – Desvio padrão de medição de diferentes amostras com a posição do anel fixa com o empilhamento de nove imagens.

OLD	OSD	Abertura Livre
$0{,}0010~\mathrm{mm}$	$0{,}0012~\mathrm{mm}$	$0{,}0007~\mathrm{mm}$

Um fator importante sobre os anéis de pistão é que estes dispositivos passam pelo processo de retificação durante as etapas finais de sua fabricação. Este é um processo de alta precisão capaz de reduzir a rugosidade e elevar a precisão dimensional e geométrica nas peças produzidas, melhorando as superfícies de acabamento (EMILIANO et al., 2022). Este conhecimento é favorável uma vez que concebe à peça um perfil de borda retificado que propicia uma medição precisa e confiável pelo equipamento.

Outra característica específica de anéis de pistão que deve ser considerada é a presença de chanfros em borda externa, o que impacta na altura efetiva de medição. As correções possíveis para esta condição requer conhecimento da geometria do perfil para determinar a altura de medição ou, alternativamente, a calibração da altura utilizando um anel de pistão de dimensões conhecidas.

Feitas estas considerações, foram efetuadas as medições em diferentes poses na peça, almejando a avaliar os erros sistêmicos do processo e comparar com as medições do processo praticado atualmente. Nas aferições realizadas em campo, para cada amostra de anel, foram medidos cinco vezes os parâmetros OLD, OSD e Abertura Livre, e destes valores foram calculados a média e o desvio padrão.

O método desenvolvido foi avaliado em diversas disposições, variando tanto a translação, quanto a rotação da peça dentro da área de captura. A figura 59 exemplifica este processo de medição.



Figura 59 – Medições experimentais do anel de modelo A3.

O apêndice A expõe a tabela que possui a comparação dos dados de valores, aferidos pelo processo de medição atual, com fixadores e paquímetro, e pelo método desenvolvido, que emprega visão de máquina. Como as amostras foram avaliadas em diversas posicionamentos, os resultados estão representados em função da sua média e desvio padrão. Os testes com o protótipo foram repetidos em diversas vezes mostrando resultados similares aos mostrados na tabela. Desta forma os resultados se mostraram consistentes.

Os resultados detalhados das medições, incluindo os desvios padrões mínimo, médio e máximo observados em diferentes ensaios, foram compilados na tabela 9. Esses valores fornecem informações para a avaliação da repetibilidade dos diferentes métodos.

Tabela 9 – Desvio padrão global comparando o método empregado atualmente com o método proposto realizada com base os dados da tabela.

	OLD		OSD		Abertura	
Método					Livre	
	Média	Máx	Média	Máx	Média	Máx
Atual	0.006	0.011	0.007	0.010	0.041	0.066
Proposto	0.005	0.008	0.005	0.010	0.007	0.012

A método proposto se destacou quanto a repetibilidade na medida de abertura livre, mostrando uma maior consistência nos dados obtidos em comparação ao método atual. Isso é esperado, uma vez que o processo atual de fixação para medição do parâmetro de abertura livre do anel não auxilia no posicionamento preciso do paquímetro, ao contrário dos outros dois parâmetros.

Quanto à repetibilidade dos parâmetros OSD e OLD, o método proposto também apresentou melhorias significativas em termos percentuais, tanto na média quanto nos valores máximos. Isso sugere que o método proposto é mais adequado em termos de repetibilidade do que o método atualmente empregado.

Outro aspecto importante da medida é a exatidão. Esta característica, também conhecida como acurácia, é uma característica importante das medições. Ela se refere à diferença entre o valor médio obtido experimentalmente e o valor verdadeiro da grandeza. Determinar a exatidão é mais complexo do que avaliar a repetibilidade, pois envolve conhecer o valor verdadeiro da amostra. Alguns procedimentos de se avaliar a exatidão incluem testes de rastreabilidade ou comparando com um outro equipamento certificado que possui exatidão superior. Ainda, comparar diretamente os resultados do método proposto com o método atual em termos de exatidão pode não ser apropriado, especialmente quando o método atual não teve sua exatidão avaliada.

O trabalho já demonstrou a rastreabilidade do protótipo usando o bloco padrão, que possui valores precisos entre suas faces de medição. Embora o protótipo tenha mostrado exatidão mínima de 0,008 em vários tamanhos de blocos durante os testes com o bloco padrão, acredita-se que os erros na medição dos parâmetros OLD, OSD e abertura livre sejam um pouco superiores devido a erros sistemáticos na localização desses pontos e na borda do anel. Contudo, é esperado que a exatidão se mantenha dentro no limite desejado de 0,02.

Outras considerações sobre a precisão podem ser feitas com base em testes comparativos anteriores. No entanto, é importante notar que os testes de comparação anteriores, que usaram a Máquina de Medição por Coordenadas, avaliaram uma amostra circular com altura de 14,41 mm que poderia ser medida tanto pelo protótipo quanto pela máquina. No entanto, essa máquina não se mostrou adequada para medir anéis de pistão devido ao diâmetro da ponta de medição de 2,994 mm e à dificuldade em posicionar a ponta de prova com precisão nos pontos de interesse.

Uma abordagem indireta para avaliar a precisão entre o método de medição proposto e o método atualmente utilizado com paquímetros envolve a calibração com um anel de pistão de amostra e a avaliação das medições em outras amostras, tanto de mesmo modelo quanto de outros modelos. O protótipo demonstrou consistência nos resultados durante os testes de rastreabilidade, independentemente do tamanho do objeto medido. Além disso, se houver algum viés nas medições, entende-se que esse viés seja consistente para anéis do mesmo modelo, uma vez que devem ter o mesmo perfil de borda. Ao analisar o método atual que utiliza paquímetros, é prudente considerar não apenas a exatidão declarada pelo fabricante, mas também possíveis viéses introduzidos pela fixação inadequada, deformações causadas pela fixação ou erro humano. Além disso, ao lidar com um processo de medição manual, é recomendável randomizar as amostras para evitar vieses com base nos resultados desejados.

Comparando os resultados dos métodos conforme detalhado no apêndice A, observouse um desvio médio entre as medidas do protótipo e do método atual de -0,05; 0,023 e -0,1698 para os parâmetros OLD, OSD e abertura livre. Como apontado previamente, este desvio é esperado da abertura livre, uma vez que o método com paquímetros não se mostra hábil para medir este parâmetro com precisão. Também é possível verificar que o desvio observado na medição de OLD possui diferença considerável em relação a medida de OSD.

Ao comparar amostras do mesmo modelo, verifica-se que o desvio entre os métodos apresenta variações consideráveis, principalmente para a medição de OLD. A análise dos métodos foi realizada com base em algumas considerações. Primeiramente, que a consistência já foi demonstrada pelo protótipo no teste de rastreabilidade. Além do fato que amostras de mesmo modelo apresentam o mesmo perfil na face externa. Ainda, que as amostras são avaliadas pelos mesmos procedimentos automatizados, o que evita um viés humano. Deste modo, com base nestas considerações, era previsto que não houvessem desvios intensos e, caso houvessem, estariam presentes com mesma intensidade em todas as amostras de mesmo modelo. Esta análise indica para duas conclusões: ou que o sistema proposto superou a exatidão do processo manual, ou que as peças tiveram sua forma alterada no decurso de tempo, por fatores externos, entre as medições realizadas pelos dois métodos.

No geral, o método proposto exibiu avanços em relação à repetibilidade quando contrastado com o método atual. Quanto à exatidão, resultados indicam para uma melhoria ao substituir a medição por paquímetros pelo sistema apresentado. Contudo, o caso ideal para avaliar a exatidão seria se houvesse um anel que pudesse ser utilizado como padrão de referência, cujas medidas, determinadas com alto grau de precisão, pudessem ser utilizadas como padrão ouro para avaliar ambos os métodos.

Quanto à velocidade de medição, o método proposto traz consigo vantagens notáveis. O programa desenvolvido foi minuciosamente avaliado em um computador portátil equipado com um processador i5-8300H e 16 GB de RAM. O tempo de execução completo do processo de medição, desde a captura da imagem até a apresentação dos resultados finais, registrou-se em 56,87 ms, exibindo um desvio padrão de 1,9 ms. Somado ao tempo necessário para a captura e empilhamento de imagens, o intervalo total decorrido desde a aquisição até a obtenção dos resultados totalizou menos de 300 ms, evidenciando uma adequação para a aplicação em questão. Considerando os requisitos fundamentais do processo, o intervalo total de medição, que engloba tanto a captura da imagem pela câmera quanto a execução do processamento, destaca-se como um período satisfatório, notavelmente, quando contrastado com o protótipo inicial desenvolvido em MATLAB, que demandava 6,67 s apenas para o processamento.

Desse modo, o sistema demonstrou uma eficiência em termos de processamento, mesmo empregando técnicas mais demandantes, o que o torna susceptível a melhorias com a adição de recursos suplementares ou à execução em hardware com capacidade de processamento mais modesta, sem resultar em impacto considerável sobre o tempo total de execução. Além disso, o algoritmo exibiu uma otimização dos recursos computacionais, resultado direto de sua implementação em C++.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

O trabalho realizado teve como principal objetivo desenvolver um método inédito de medição dos principais parâmetros de anéis de pistão, em sua forma livre. A técnica apresentada faz uso de Visão Computacional aliada à Fotogrametria, para mensurar a peça por meio de imagem, dentro de uma configuração proposta. Para isto, se aliaram conhecimentos específicos do anel, técnicas propostas relevantes à literatura e ao problema, e aprimoramentos desenvolvidos para avaliar pontos de interesse, com uma resolução adequada.

Com esta finalidade, se desenvolveu um programa, utilizando a liguagem C++ com interface gráfica, por meio do *framework* do Qt 5, e processamento de imagem, com auxílio do OpenCV 3. O programa é um protótipo capaz de expor as operações de medição para o usuário e de extrair informações pertinentes para validação, teste e desenvolvimento. O programa é apto para medir um anel de pistão, com base na entrada da altura de medição do anel e das características extrínsecas e intrínsecas do conjunto da câmera. Para isto, o programa emprega técnicas de Visão Computacional para extrair, com precisão, os pontos de interesse na imagem, para as medições e, posteriormente, os relacionar com o mundo, por meio da Fotogrametria.

Os resultados dos experimentos indicaram que o trabalho é capaz de superar, em diversos aspectos, o processo de medição manual que utiliza fixadores e paquímetros. Os testes com o padrão de calibração em xadrez demonstraram a efetividade dos processos de fotogrametria empregados. Os experimentos com o bloco-padrão validaram a capacidade do protótipo de manter uma rastreabilidade adequada, mesmo com as amostras em diferentes posições e alturas. Os ensaios comparativos constrataram o método proposto com outro já bem estabelecido e certificado, reafirmando a capacidade do protótipo. Por fim, os resultados provenientes da aferição dos parâmetros de interesse em amostras de anéis de pistão apresentaram uma repetiblidade compatível com a proposta e uma exatidão promissora.

Considerando o tempo exigido pelo processo de medição manual minucioso e pela fixação do anel para fins de medição, o protótipo em análise demonstra notável capacidade de acelerar esse processo, tornando possível a medição abrangente dos anéis. Além disso, ele elimina a necessidade de um posicionamento extremamente preciso do anel, oferecendo procedimentos automáticos que reduzem erros humanos e melhoram a consistência dos resultados.

Quanto às oportunidades fomentadas por este sistema, se detaca a possibilidade de integrar sua operação em conjunto com outros sistemas computadorizados, como registro, análise de dados e tomada de decisões, ampliando as possibilidades de exploração e aproveitamento dos resultados obtidos. Outra oportunidade proporcionada pelo método proposto em aprimoramentos futuros é a automação do processo de medição em larga escala, uma vez que há menor complexidade na inserção e remoção das amostras para avaliação. Isso faz com que o método seja uma opção viável para a medição automatizada de um grande número de amostras, sem comprometer a qualidade e a precisão das medições realizadas.

6.1 Trabalhos Futuros

A respeito das características do arranjo físico empregado, há várias melhorias que poderiam beneficiar a operação do protótipo. Primeiramente, a utilização de padrões de calibração com tolerâncias menores aprimoraria a estimativa dos parâmetros de calibração, como a distorção da lente, rotação e distância do plano de medição. Isso resultaria em uma calibração mais precisa e confiável.

Outra melhoria vantajosa seria a substituição da lente atual por uma lente de maior distância focal, como 16mm para 32mm ou 50mm. Além disso, aumentar a altura de medição de 77cm para 160cm seria benéfico. Embora isso aumente o tamanho da máquina, reduziria a oclusão nas bordas das peças, melhorando a captura de detalhes, como chanfros ou características na face externa das peças.

Introduzir mecanismos para ajustes finos na orientação da câmera também seria uma adição valiosa. Embora o sistema seja capaz de corrigir diferenças de orientação entre a câmera e o sistema de medição, existem ângulos limites que podem afetar a visualização da face externa da peça. Realizar operações com a menor angulação relativa possível aumentaria a robustez do procedimento, e um mecanismo manual simples poderia ser implementado para alcançar esse ajuste fino. Isso poderia ser feito com base nos valores de calibração extrínseca, sem a necessidade de equipamentos adicionais para nivelamento.

Em relação aos testes, embora o protótipo tenha demonstrado competência na medição em diversos experimentos, a inclusão de um anel de pistão padrão para calibração com medidas certificadas por um órgão autorizado, utilizando um método de baixas tolerâncias, seria de extrema importância. Mesmo que o método utilizado para a certificação não tenha a agilidade requerida pelo processo, as medidas precisas do anel de calibração forneceriam um padrão de referência para avaliar a exatidão do processo atual e do protótipo. Dessa forma, as estatísticas específicas da metrologia para a medição dos anéis de pistão seriam aplicadas, comprovando a efetividade da substituição do método atual pelo novo.

Referências

ALEIXO, F. et al. Aragoj: A free, open-source software to aid single camera photogrammetry studies. *Methods in Ecology and Evolution*, Wiley Online Library, v. 11, n. 5, p. 670–677, 2020. 18, 28

AN, G. H. et al. Charuco board-based omnidirectional camera calibration method. *Electronics*, MDPI, v. 7, n. 12, p. 421, 2018. 8, 40, 41, 50

ANDERSSON, P.; TAMMINEN, J.; SANDSTRÖM, C.-E. *Piston ring tribology: A literature survey.* [S.l.]: VTT Technical Research Centre of Finland, 2002. 19

BRADSKI, G. The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000. 8, 33, 52, 70

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2008. 70

BURGER, W. Zhang's camera calibration algorithm: in-depth tutorial and implementation. *HGB16-05*, p. 1–6, 2016. 51, 52

CANNY, J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Ieee, n. 6, p. 679–698, 1986. 63

CHANG, J. et al. Variable aperture light field photography: overcoming the diffractionlimited spatio-angular resolution tradeoff. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3737–3745. 36

CORREIA, C. A. et al. Comprehensive direct georeferencing of aerial images for unmanned aerial systems applications. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 2, p. 604, 2022. 8, 30, 31

CULJAK, I. et al. A brief introduction to opency. In: IEEE. 2012 proceedings of the 35th international convention MIPRO. [S.I.], 2012. p. 1725–1730. 70

DANG, A.-T.; HSU, Q.-C.; TRUONG, T.-T. A simple method for dimensional measurement of ring-shaped objects using image processing technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 115, n. 11-12, p. 3657–3678, 2021. 17, 22

DING, J. et al. Real-time stereo vision system using adaptive weight cost aggregation approach. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Springer, v. 2011, n. 1, p. 1–19, 2011. 54

DUAN, Z. et al. High precision edge detection algorithm for mechanical parts. *Measure*ment Science Review, v. 18, n. 2, p. 65–71, 2018. 9, 22, 56, 65, 86, 88

DUTTA, A.; KAR, A.; CHATTERJI, B. Corner detection algorithms for digital images in last three decades. *IETE Technical Review*, Taylor & Francis, v. 25, n. 3, p. 123–133, 2008. 68

ELKHRACHY, I. Accuracy assessment of low-cost unmanned aerial vehicle (uav) photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, Elsevier, v. 60, n. 6, p. 5579–5590, 2021. 17, 18

EMILIANO, L. R. et al. Otimização da retificação das pontas dos anéis de pistão de aço inoxidável martensítico com cobertura de nitreto de cromo. Dissertação (Mestrado), 2022. 116

FABIJAŃSKA, A. A survey of subpixel edge detection methods for images of heatemitting metal specimens. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, v. 22, n. 3, p. 695–710, 2012. 9, 22, 65, 66

FARRELL, J.; XIAO, F.; KAVUSI, S. Resolution and light sensitivity tradeoff with pixel size. In: SPIE. *Digital Photography II.* [S.l.], 2006. v. 6069, p. 211–218. 38, 88

FÖRSTNER, W.; WROBEL, B. P. *Photogrammetric computer vision*. [S.I.]: Springer, 2016. 30, 34, 37, 39, 43, 45, 46, 47, 60

FORSYTH, D.; PONCE, J. Computer vision: A modern approach. [S.l.]: Prentice hall, 2011. 8, 30, 33, 57, 58, 60

FUA, J. et al. A hand-eye calibration algorithm of binocular stereo vision based on multipixel 3d geometric centroid relocalization. *Journal of Advanced Manufacturing Science* and *Technology*, v. 2, n. 1, p. 2022005, 2022. 8, 54

FURUKAWA, Y.; HERNÁNDEZ, C. et al. Multi-view stereo: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, Now Publishers, Inc., v. 9, n. 1-2, p. 1–148, 2015. 55

GARRIDO-JURADO, S. et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, Elsevier, v. 47, n. 6, p. 2280–2292, 2014. 50

GIOI, R. Grompone von; RANDALL, G. A sub-pixel edge detector: an implementation of the canny/devernay algorithm. *IPOL Journal-Image Processing On Line, 2017, vol. 7, pp. 347-372*, Udelar. FI-IIE, 2017. 9, 59, 66, 67

GONZALEZ, R. C. *Digital image processing*. [S.1.]: Pearson education india, 2009. 29, 57, 58, 60, 61, 63

GUERRA, M. G. et al. Reconstruction of small components using photogrammetry: a quantitative analysis of the depth of field influence using a miniature step gauge. *Metrology and Measurement Systems*, Polska Akademia Nauk, v. 28, n. 2, 2021. 18

GUO, Q.; FU, W. An improved measurement method of size of mechanical parts based on monocular vision. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series.* [S.l.], 2020. v. 1453, n. 1, p. 012053. 110, 111

GUSTAFSSON, F. Determining the initial states in forward-backward filtering. *IEEE Transactions on signal processing*, IEEE, v. 44, n. 4, p. 988–992, 1996. 82

HARRIS, C.; STEPHENS, M. et al. A combined corner and edge detector. In: CITESEER. Alvey vision conference. [S.l.], 1988. v. 15, n. 50, p. 10–5244. 68, 69

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. Multiple view geometry in computer vision. [S.l.]: Cambridge university press, 2003. 8, 40, 41, 43

HORNBERG, A. *Handbook of machine vision*. [S.1.]: John Wiley & Sons, 2006. 17, 29, 35, 36, 54, 58, 59, 63, 64, 86

IGUAL, J. Photographic noise performance measures based on raw files analysis of consumer cameras. *Electronics*, MDPI, v. 8, n. 11, p. 1284, 2019. 38

IMATEST. *Projective Camera Model.* 2018. Disponível em: https://www.imatest.com/support/docs/pre-5-2/geometric-calibration-deprecated/projective-camera/. 44

ISTENIČ, K. et al. Scale accuracy evaluation of image-based 3d reconstruction strategies using laser photogrammetry. *Remote Sensing*, MDPI, v. 11, n. 18, p. 2093, 2019. 18, 28

JEON, H.-G. et al. Stereo matching with color and monochrome cameras in low-light conditions. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 4086–4094. 37

JIANG, R.; JÁUREGUI, D. V.; WHITE, K. R. Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement*, Elsevier, v. 41, n. 8, p. 823–834, 2008. 17, 18

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society Publishing, v. 374, n. 2065, p. 20150202, 2016. 68

JÚNIOR, E. I. Proposta de um sistema de tomada de decisão para detecção de veículos em movimento para fpga. 2018. 17, 36

KAKANI, V. et al. A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, Elsevier, v. 2, p. 100033, 2020. 17

KARSZNIA, K.; OSADA, E. Photogrammetric precise surveying based on the adjusted 3d control linear network deployed on a measured object. *Applied Sciences*, MDPI, v. 12, n. 9, p. 4571, 2022. 17, 18, 54

KITTLER, J. On the accuracy of the sobel edge detector. *Image and Vision Computing*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 37–42, 1983. 61

KROON, D. Numerical optimization of kernel based image derivatives. *Short Paper University Twente*, v. 3, 2009. 61

LAMOSA, F.; HU, Z.; UCHIMURA, K. Vehicle detection using multi-level probability fusion maps generated by a multi-camera system. In: IEEE. 2008 IEEE Fifth International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. [S.l.], 2008. p. 10–17. 34

LEE, S. W.; LEE, S. Y.; PAHK, H. J. Precise edge detection method using sigmoid function in blurry and noisy image for tft-lcd 2d critical dimension measurement. *Current Optics and Photonics*, Optical Society of Korea, v. 2, n. 1, p. 69–78, 2018. 22, 65

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, v. 2, n. 2, p. 164–168, 1944. 79

LI, B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Springer, v. 2018, p. 1–9, 2018. 22, 28, 110, 111

LI, X. et al. A knowledge-driven approach for 3d high temporal-spatial measurement of an arbitrary contouring error of cnc machine tools using monocular vision. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 3, p. 744, 2019. 23, 55, 56

LI, Y. et al. Orientation measurement for objects with planar surface based on monocular microscopic vision. *International Journal of Automation and Computing*, Springer, v. 17, n. 2, p. 247–256, 2020. 56

LIU, Q.; SU, H. Correction of the asymmetrical circular projection in dlt camera calibration. In: IEEE. 2008 Congress on Image and Signal Processing. [S.l.], 2008. v. 2, p. 344–348. 50

LOSSON, O.; MACAIRE, L.; YANG, Y. Comparison of color demosaicing methods. In: Advances in Imaging and electron Physics. [S.l.]: Elsevier, 2010. v. 162, p. 173–265. 37, 38

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, Springer, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004. 68, 69

LU, Z.; CAI, L. Camera calibration method with focus-related intrinsic parameters based on the thin-lens model. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 28, n. 14, p. 20858–20878, 2020. 8, 34

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963. 79

MARTIN, D. A practical guide to machine vision lighting. *Midwest Sales and Support Manager, Adv Illum2007*, p. 1–3, 2007. 86

MOONS, T. et al. 3d reconstruction from multiple images part 1: Principles. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, Now Publishers, Inc., v. 4, n. 4, p. 287–404, 2010. 34, 44

NALWA, V. S.; BINFORD, T. O. On detecting edges. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, IEEE, n. 6, p. 699–714, 1986. 22, 65

NEOGY, S. et al. Piston and rings for diesel engines. In: Design and Development of Heavy Duty Diesel Engines. [S.l.]: Springer, 2020. p. 731–761. 8, 18, 19

NOONAN, J. et al. Global monocular indoor positioning of a robotic vehicle with a floorplan. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 3, p. 634, 2019. 56

OKARMA, K. Applications of computer vision in automation and robotics. [S.l.]: MDPI, 2020. 6783 p. 17

OPENCV. The OpenCV Reference Manual. 3.4.20. ed. [S.l.], 2023. 46, 47, 48, 53, 70, 91

OPPENHEIM, A. V. Sinais e sistemas. [S.l.]: Prentice-Hall, 2010. 82

PERCOCO, G.; LAVECCHIA, F.; SALMERÓN, A. J. S. Preliminary study on the 3d digitization of millimeter scale products by means of photogrammetry. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 33, p. 257–262, 2015. 17, 18, 28

PUECH, W.; CHASSERY, J.-M. Curved surface reconstruction using monocular vision. In: IEEE. 1996 8th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1996). [S.I.], 1996. p. 1–4. 55

RADHAKRISHNA, M.; GOVINDH, M. V.; VENI, P. K. A review on image processing sensor. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2021. v. 1714, n. 1, p. 012055. 36, 37

RANGANATHAN, A. The levenberg-marquardt algorithm. *Tutoral on LM algorithm*, v. 11, n. 1, p. 101–110, 2004. 79

SENATORE, A.; ALEKSENDRIC, D. Advances in piston rings modelling and design. *Recent Patents on Engineering*, Bentham Science Publishers, v. 7, n. 1, p. 51–67, 2013. 19

SONY. Diagonal 8.92 mm (Type 1/1.8) Approx. 6.44M-Effective Pixel Monochrome CMOS Image Sensor. [S.l.], 2018. 87

SUN, Q. et al. A planar-dimensions machine vision measurement method based on lens distortion correction. *The scientific world journal*, Hindawi, v. 2013, 2013. 9, 17, 22, 23, 25, 56, 64, 65, 66, 68, 88, 94

SUN, Q. et al. A three-dimensional structured light vision system by using a combination of single-line and three-line lasers. *Sensors*, MDPI, v. 23, n. 1, p. 13, 2022. 54, 55, 111

SZELISKI, R. Computer vision: algorithms and applications. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. 31, 33, 35, 37, 38, 40, 44, 45, 46, 53, 68, 70

TAN, Q. et al. A model of diameter measurement based on the machine vision. *Symmetry*, MDPI, v. 13, n. 2, p. 187, 2021. 22, 86, 110, 111

TOMANIK, E. Piston ring conformability in a distorted bore. *SAE transactions*, JSTOR, p. 394–405, 1996. 19

WI, K. et al. Quantifying quality of 3d printed clay objects using a 3d structured light scanning system. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 32, p. 100987, 2020. 9, 55

WILEY, V.; LUCAS, T. Computer vision and image processing: a paper review. *International Journal of Artificial Intelligence Research*, v. 2, n. 1, p. 29–36, 2018. 17

WILM, J. Calibration Best Practices. 2018. Disponível em: https://calib.io/blogs/knowledge-base/calibration-best-practices>. 52

XIONG, Y.; SHAFER, S. A. Depth from focusing and defocusing. In: IEEE. *Proceedings* of *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. [S.I.], 1993. p. 68–73. 35

XU, J.; ZHANG, S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, v. 135, p. 106193, 2020. 55

XU, S.; LIU, M. Feature selection and pose estimation from known planar objects using monocular vision. In: IEEE. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). [S.l.], 2013. p. 922–927. 55

YE, J.; FU, G.; POUDEL, U. P. High-accuracy edge detection with blurred edge model. Image and Vision Computing, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 453–467, 2005. 64, 65, 66

ZHANG, Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: IEEE. *Proceedings of the seventh ieee international conference on computer vision*. [S.l.], 1999. v. 1, p. 666–673. 49, 50, 52

ZURICH, N. B. Ccd versus cmos-has ccd imaging come to an end? Citeseer, 2001. 36, 37

Apêndices

APÊNDICE A – Tabelas Completas de Dados Experimentais de OSD, OLD e Abertura Livre

	Método Atual		Método Proposto		
Amostras	(Paquí	metro)	(Visão de	Máquina)	
	Média	σ	Média	σ	
A1	84,168	0,004	84,178	0,003	
A2	84,168	0,004	84,187	0,002	
A3	84,164	0,005	84,179	0,003	
A4	84,15	0,000	84,174	0,005	
A5	84,13	0,007	84,070	0,004	
B1	71,57	0,000	74,553	0,004	
B2	71,556	0,005	74,561	0,003	
B3	71,578	0,004	74,541	0,003	
B4	71,542	0,008	74,348	0,002	
B5	71,56	0,000	74,371	0,003	
C1	74,6	0,007	74,553	0,002	
C2	74,592	0,010	74,561	0,008	
C3	74,598	0,008	74,541	0,008	
C4	74,598	0,004	74,348	0,003	
C5	74,56	0,007	74,371	0,003	
D1	69,752	0,004	69,685	0,001	
D2	69,782	0,008	69,791	0,002	
D3	69,842	0,008	69,781	0,005	
D4	69,852	0,004	69,807	0,003	
D5	69,802	0,008	69,757	0,006	
E1	79,81	0,010	79,653	0,005	
E2	79,944	0,005	79,755	0,003	
E3	79,85	0,000	79,781	0,004	
E4	79,908	0,004	79,781	0,004	
E5	79,812	$0,\!008$	79,765	0,006	
F1	98,082	0,011	98,122	0,006	
F2	98,112	0,008	98,157	0,005	
F3	98,122	0,004	98,087	0,005	
F4	98,138	0,004	98,118	0,006	
F5	98,12	0,007	98,080	0,006	
G1	79,362	0,011	79,353	0,006	
G2	79,372	0,008	79,390	0,004	
G3	79,38	0,007	79,397	0,005	
G4	79,358	0,008	79,381	0,005	
G5	79,372	0,008	79,364	0,004	
H1	75,942	0,008	75,653	0,008	
H2	75,648	0,008	75,676	0,007	
H3	75,71	0,007	75,668	0,008	
H4	75,736	0,005	75,654	0,004	
H5	75,738	0,008	$75,\!662$	0,006	

Tabela 10 – Comparação entre os valores amostrados de OLD, obtidos pelo método de medição empregado atualmente, e o método proposto, avaliado em diversas posições e rotação da peça dentro da área capturada pela imagem.

	Método Atual		Método Proposto		
Amostras	(Paquí	metro)	(Visão de	Máquina)	
	Média	σ	Média	σ	
A1	81,302	0,004	81,306	0,005	
A2	81,268	0,004	81,338	0,006	
A3	81,216	0,005	81,303	0,004	
A4	81,296	0,005	81,326	0,005	
A5	81,308	0,004	81,355	0,005	
B1	70,088	0,004	70,103	0,005	
B2	70,114	0,005	70,108	0,005	
B3	70,094	0,005	70,090	0,002	
B4	70,106	0,005	70,138	0,004	
B5	70,09	0,000	70,100	0,003	
C1	72,908	0,000	72,916	0,005	
C2	72,93	0,004	72,931	0,004	
C3	72,928	0,010	72,934	0,005	
C4	72,928	0,008	72,930	0,006	
C5	72,904	0,009	72,899	0,003	
D1	68,344	0,009	68,368	0,003	
D2	68,462	0,008	68,384	0,005	
D3	68,442	0,008	68,369	0,004	
D4	68,46	0,007	68,383	0,007	
D5	68,342	0,008	68,373	0,006	
E1	78,128	0,008	78,153	0,005	
E2	78,134	0,005	78,164	0,006	
E3	78,11	0,010	78,166	0,004	
E4	78,152	0,008	78,166	0,004	
E5	78,14	0,010	78,171	0,004	
F1	96,174	0,009	96,195	0,006	
F2	96,172	0,008	96,214	0,007	
F3	96,184	0,005	96,207	0,005	
F4	96,202	0,008	96,202	0,006	
F5	96,174	0,005	96,185	0,003	
G1	77,402	0,008	77,496	0,007	
G2	77,432	0,008	77,487	0,005	
G3	77,406	0,005	77,479	0,005	
G4	77,412	0,008	77,469	0,005	
G5	77,4	0,000	77,463	0,004	
H1	73,828	0,004	73,888	0,008	
H2	73,858	0,008	73,886	0,006	
H3	73,852	0,008	73,891	0,010	
H4	73,804	0,005	73,894	0,006	
H5	$73,\!98$	0,007	$73,\!888$	0,004	

Tabela 11 – Comparação entre os valores amostrados de OSD, obtidos pelo método de medição empregado atualmente, e o método proposto, avaliado em diversas posições e rotação da peça dentro da área capturada pela imagem.

	Método Atual		Método Proposto		
Amostras	(Paquí	metro)	(Visão de	Máquina)	
	Média	σ	Média	σ	
A1	19,438	0,033	18,874	0,006	
A2	18,876	0,053	18,958	0,011	
A3	19,178	0,049	18,948	0,003	
A4	18,934	0,029	18,870	0,010	
A5	19,152	0,059	18,684	0,009	
B1	7,468	0,033	7,438	0,005	
B2	7,43	0,036	7,116	0,011	
B3	7,534	0,027	7,274	0,007	
B4	7,502	0,030	7,359	0,010	
B5	7,43	0,032	7,291	0,009	
C1	9,432	0,044	9,431	0,004	
C2	9,472	0,056	9,363	0,008	
C3	9,406	0,063	9,468	0,007	
C4	9,406	0,042	9,032	0,009	
C5	9,394	0,053	9,104	0,007	
D1	6,652	0,039	6,566	0,005	
D2	6,922	0,008	6,846	0,009	
D3	6,928	0,059	6,714	0,007	
D4	7,064	0,063	6,930	0,009	
D5	7,17	0,066	6,715	0,008	
E1	8,638	0,051	8,372	0,005	
E2	8,954	0,005	8,603	0,005	
E3	8,614	0,047	8,605	0,008	
E4	8,828	0,029	8,605	0,008	
E5	8,624	0,055	8,630	0,007	
F1	10,326	0,043	10,230	0,004	
F2	10,442	0,008	10,323	0,010	
F3	10,342	0,066	10,160	0,006	
F4	10,314	0,038	10,216	0,004	
F5	10,388	0,030	10,173	0,003	
G1	15,372	0,062	15,185	0,008	
G2	14,972	$0,\!008$	15,126	0,007	
G3	14,934	0,036	15,116	0,011	
G4	14,998	0,043	15,093	0,012	
G5	15,13	0,045	15,126	0,009	
H1	16,506	0,043	15,838	0,003	
H2	16,198	0,008	15,895	0,006	
H3	15,84	0,057	15,770	0,008	
H4	16,07	0,037	15,816	0,006	
H5	16,182	0,053	15,892	0,005	

Tabela 12 – Comparação entre os valores amostrados de Abertura Livre, obtidos pelo método de medição empregado atualmente, e o método proposto, avaliado em diversas posições e rotação da peça dentro da área capturada pela imagem.