

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Metodologias de calibração de projetores para
aplicações robóticas de *projection mapping***

Marta Ventura e Costa

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Pedro Luís Cerqueira Gomes da Costa (Professor Doutor)
Coorientador: Germano Manuel Correia dos Santos Veiga (Doutor)

29 de julho de 2016

© Marta Costa, 2016

Resumo

Em ambiente industrial, quando se utilizam projetores em aplicações que exigem medições de alta precisão em objetos tridimensionais, a sua calibração é um procedimento obrigatório. A calibração de projetores é o processo de estimar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos desses dispositivos. Conseqüentemente, o erro resultante dos parâmetros estimados determina a precisão que lhes está associada e pode condicionar os resultados de testes e medições feitos posteriormente, nomeadamente medidas de profundidade de foco e funções teste para focagem automática do projetor.

No contexto específico do projeto onde este trabalho está inserido, os objetos tridimensionais em causa são vigas de construção metálicas, onde são efetuadas tarefas de soldadura por um manipulador industrial e por um operador humano. O manipulador, equipado com um projetor baseado em técnicas de *projection mapping*, projeta informações relevantes sobre as vigas metálicas e na restante área de trabalho do operador. Desta forma, o trabalhador não tem a necessidade de recorrer a informação que se encontre fora do espaço de trabalho, evitando frequentes deslocações, para efetuar as suas tarefas. Assim sendo, e antes de mais, é importante analisar qual a melhor localização para acoplar o projetor no manipulador, atendendo a fatores relevantes inerentes às características do projeto. Além disso, dada a natureza do *projection mapping*, surgem as questões de profundidade de foco, que permitem perceber que variação de distâncias é possível aplicar ao projetor, em relação a um plano, para uma determinada distância focal, sem se perder qualidade de foco significativa na informação projetada. Ademais, a criação de funções matemáticas para focar automaticamente o projetor independentemente da distância a que este se encontra da viga metálica é crucial, na medida em que evita a intervenção humana na focagem da lente ou um ajuste da distância do projetor à viga metálica, pelo robô, para a posição em que a lente se encontra focada.

Abstract

Several industrial applications use projectors. Projector calibration is a necessary work in the application of high precision measurement in three-dimensional objects. It is the process of estimating the intrinsic and extrinsic parameters of those devices. The accuracy of the estimated parameters determines the measurement results in the later experiments, such as focus measure and autofocus functions.

The three-dimensional objects are metal beams. Welding tasks are performed over them by an industrial manipulator and a human operator, working together. A projector attached at the manipulator projects relevant information on metal beams and at the work remaining area, based on techniques of projection mapping. Thus, the worker doesn't need to look for information outside his workspace. Therefore, and above all, it is important to analyse the best location to attach the projector on a robot. Bearing in mind the nature of projection mapping, depth estimation is an interesting study in order to project efficiently without significant lost of focus quality. Moreover, the creation of mathematical functions to automatically focus the projector is quite important.

Agradecimentos

Quero aproveitar para agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Costa, e ao meu coorientador, Doutor Germano Veiga, pela oportunidade que me deram para participar neste projeto e, sobretudo, por todo o apoio e dedicação disponibilizados.

Também aos investigadores e técnicos dos laboratórios de robótica, nomeadamente Andry Pinto, Carlos Costa, Fernando Guedes, Jorge Barbosa e Luís Rocha, um sincero obrigada pelo auxílio dado. Destaco, no entanto, o papel desempenhado pelo investigador Carlos Costa. Sei que fui persistente em algumas situações. Porém, a sua espontaneidade em ajudar foi, sem dúvida, uma mais-valia para recordar.

Aqui, é também importante agradecer aos meus colegas dos laboratórios de robótica, com quem tive o prazer de partilhar momentos de trabalho e de lazer, nomeadamente Cláudia Rocha, Fernando Sá, Héber Sobreira, Hugo Costa, Ivo Sousa, Nuno Rodrigues, Patrick Sousa, Ricardo Borges e Ricardo Silva. Afinal, fazer uma dissertação não é de todo um trabalho solitário, pelo menos quando se tem a companhia certa no dia-a-dia.

À Catarina Simões, à Liliana Antão e à Rita Rodrigues, um obrigada de coração pela vossa amizade. O meu percurso académico pela FEUP foi, sem dúvida, bem mais leve, feliz e divertido graças a elas.

À Rita Gaspar, por toda a ajuda, amizade e companheirismo, um grande obrigada.

Aos amigos da minha terra natal, toda a gratidão por estarem comigo todos estes anos. Há conexões que ultrapassam tudo.

Um especial obrigada ao meu namorado, Bernardo Rodrigues, por estar sempre comigo. Pela paciência, preocupação, carinho e atenção demonstrados, mesmo quando revelo o meu lado mais lunar. E também pelo apoio e motivação dados nos momentos menos bons que atravessei ao longo deste percurso.

Num aspeto mais íntimo, agradeço aos meus pais, que sempre fizeram os possíveis para que me sentisse estável e permitiram que esta conquista acontecesse. Um obrigada também aos meus avós, por todo o conforto dado.

Marta Costa

“Focus. Otherwise, you will find life becomes a blur.”

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvi
Abreviaturas	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estrutura do documento	4
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1 Calibração de Projetores	5
2.1.1 Funcionamento de um projetor	6
2.1.2 Métodos de Calibração	8
2.2 <i>Projection Mapping</i>	12
2.2.1 <i>Projection mapping</i> na indústria	15
2.2.2 Métodos de <i>projection mapping</i>	16
2.3 Conclusões	20
Capítulo 3	21
Localização do projetor <i>laser</i>	21
3.1 Sistema de <i>scaneamento</i> galvanométrico	21
3.2 Fatores a considerar para a localização	23
3.3 Cenário de simulação	24
3.4 Análise da localização do projetor.....	25
3.5 Projeções ortogonal e oblíqua	26
3.6 Conclusões	27
Capítulo 4	28
Precisão, profundidade de foco e autofocus de um projetor DLP	28
4.1 <i>Setup</i> do sistema câmara-projetor	29
4.2 Calibração da câmara	31
4.3 Calibração do projetor	39
4.3.1 Aplicação de operações geométricas a um padrão de xadrez	40
4.3.2 Alteração da posição de um dos dispositivos	41
4.3.3 Software de calibração de luz estruturada.....	42
4.4 Profundidade de foco	46

4.4.1	Percepção visual humana de profundidade	48
4.4.2	Métodos de estimação de profundidade	50
4.4.3	Testes efetuados e Resultados	54
4.5	Autofocus.....	59
4.6	Conclusões	65
Capítulo 5	66
Conclusões e trabalho futuro		66
5.1	Conclusões	66
5.2	Trabalho futuro	67
Referências	69

Lista de figuras

Figura 1.1 - Sequência de operação (da esquerda para a direita, de cima para baixo): Localização da viga pelo sensor de <i>projected stereo</i> ; Aplicação de realidade aumentada para auxílio na montagem; Validação da montagem pelo operador.	3
Figura 2.1 - Esquema representativo do modelo pinhole [69].	6
Figura 2.2 - Sistemas de coordenadas da câmara e do mundo [41].	7
Figura 2.3 - Esquema representativo de uma homografia [53].	8
Figura 2.4 - Calibração do sistema de luz estruturada usando homografias [8].	9
Figura 2.5 - Diagrama de blocos do sistema [70].	10
Figura 2.6 - Software de calibração de luz estruturada desenvolvido pela <i>Brown University School of Engineering</i> [70].	10
Figura 2.7 - Visão geral da configuração: uma câmara virtual visualiza um padrão virtual projetado pelo projetor [10].	11
Figura 2.8 - Projetor montado na ferramenta do robô e câmara colada no ambiente [11]. ...	11
Figura 2.9 - Projetor montado na ferramenta do robô e câmara colocada no ambiente ou fixa na plataforma do robô [11].	11
Figura 2.10 - Ilustração do “The Office of the Future” [19].	12
Figura 2.11 - Projection mapping rotativo na obra “Displacements” [55].	13
Figura 2.12 - Aplicação de texturas e pinturas virtuais a objetos [56].	14
Figura 2.13 - Projecção sobre uma superfície com papel de parede [25].	15
Figura 2.14 - Barreiras de luz com formas distintas [27].	15
Figura 2.15 - Espaço de segurança representado a branco e violação de segurança representado a vermelho [27].	16
Figura 2.16 - Tipos de superfície: plana e não plana [31].	17
Figura 2.17 - Relação geométrica entre componentes [31].	17
Figura 2.18 - Esquema representativo da primeira etapa do processo de renderização [31]. .	18
Figura 2.19 - Esquema representativo da segunda etapa do processo de renderização [31]. ...	18
Figura 2.20 - (a) Projetor colocado ortogonalmente à superfície cria imagens retangulares; (b) Projetor colocado obliquamente à superfície cria imagens com efeito keystone [31].	19
Figura 3.1 - Esquema representativo de um sistema de <i>scaneamento</i> galvanométrico [32]. ..	22

Figura 3.2 - Projeção de luz do projetor em forma de pirâmide [58].	22
Figura 3.3 - Construção da pirâmide de projeção de luz através do valor do ângulo de deflexão.	23
Figura 3.4 - Célula de trabalho da simulação.	24
Figura 3.5 - Imagem representativa das diferenças entre projeções de perspectiva e ortográfica [59].	25
Figura 3.6 - Projeções vertical e lateral sobre a viga metálica.	27
Figura 4.1 - <i>Setup</i> câmara-projetor visto de uma perspectiva dianteira.	30
Figura 4.2 - <i>Setup</i> câmara-projetor visto de uma perspectiva traseira.	30
Figura 4.3 - Exemplos de padrões de calibração [61].	31
Figura 4.4 - Esquerda: padrão de xadrez 2D. Direita: equipamento de calibração portátil [41].	31
Figura 4.5 - Da esquerda para a direita: distorção radial negativa, ausência de distorção, distorção radial positiva [41].	32
Figura 4.6 - Imagem representativa do conceito de distorção tangencial [62].	32
Figura 4.7 - Imagens utilizadas para a calibração da câmara.	34
Figura 4.8 - Esquema representativo do procedimento referente à calibração de uma câmara.	34
Figura 4.9 - Identificação dos cantos do padrão de xadrez no Matlab.	35
Figura 4.10 - Identificação dos cantos do padrão de xadrez no OpenCV.	35
Figura 4.11 - Sistema de coordenadas da câmara.	37
Figura 4.12 - Visualização dos parâmetros extrínsecos.	37
Figura 4.13 - Sistema de coordenadas do mundo arbitrariamente escolhido.	38
Figura 4.14 - Esquema representativo do procedimento referente à calibração de uma câmara.	39
Figura 4.15 - Transformações geométricas (Adaptado de [63]).	40
Figura 4.16 - Conjunto de imagens utilizado na primeira abordagem de calibração do projetor.	41
Figura 4.17 - Conjunto de imagens utilizado na segunda abordagem de calibração do projetor.	42
Figura 4.18 - O projetor projeta um plano de luz que faz varrimento em objetos de interesse [41].	43
Figura 4.19 - Plano de luz definido por colunas consecutivas de padrões binários [41].	43
Figura 4.20 - Projeção de luz estruturada sobre um padrão de xadrez.	44

Figura 4.21 - Parâmetros extrínsecos da câmara em relação ao projetor.	45
Figura 4.22 - Cenário 3D projetado num plano [42].	46
Figura 4.23 - Três exemplos de operadores de processamento de imagem: Sobel, Laplace e Prewitt [42].	47
Figura 4.24 - Esquema de focagem e de desfocagem [42].	48
Figura 4.25 - Geometria epipolar de um sistema de visão <i>stereo</i> numa configuração frente-paralela [68].	49
Figura 4.26 - Perceção de profundidade devido a diferenças de brilho [42].	49
Figura 4.27 - Deformação visual de tamanhos devido à perceção de estrutura de profundidade [42].	50
Figura 4.28 - Esquerda: Configuração da câmara e do projetor em relação ao objeto; Direita: Projeção dos padrões de luz estruturada [67].	50
Figura 4.29 - Primeira derivada da intensidade de uma imagem [48].	53
Figura 4.30 - Segunda derivada da intensidade de uma imagem [48].	53
Figura 4.31 - <i>Setup</i> de projeção de imagens com variações do plano de projeção em 100 mm.	55
Figura 4.32 - Exemplo de linhas de soldadura.	56
Figura 4.33 - Imagem <i>standard</i>	56
Figura 4.34 - Variação do contraste das imagens.	57
Figura 4.35 - Aplicação do algoritmo de medida de foco Tenengrad às imagens <i>standard</i>	58
Figura 4.36 - Aplicação do algoritmo de medida de foco Tenengrad às imagens com linhas de soldadura.	58
Figura 4.37 - Imagem ilustrativa de instalação do projetor [65].	60
Figura 4.38 - Imagem de um ponto no infinito, mostrando a distância focal da lente [65]. ...	60
Figura 4.39 - Dimensões de uma imagem determinadas pela distância focal da lente [64]. ...	61
Figura 4.40 - Esquema do procedimento adotado para criação das funções de autofocus.	62
Figura 4.41 - Funções que permitem ajustar C_x em função da distância a que o projetor se encontra do plano de projeção.	63
Figura 4.42 - Funções que permitem ajustar C_y em função da distância a que o projetor se encontra do plano de projeção.	63
Figura 4.43 - Função que permite ajustar F_x em função da distância a que o projetor está do plano de projeção.	64
Figura 4.44 - Função que permite ajustar F_y em função da distância a que o projetor está do plano de projeção.	64

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Análise da localização do projetor para cada junta do manipulador	26
Tabela 4.1 - Parâmetros intrínsecos da calibração da câmara com o OpenCV.	36
Tabela 4.2 - Parâmetros intrínsecos da calibração da câmara com o Matlab.	36
Tabela 4.3 - Parâmetros intrínsecos da calibração da câmara com o <i>software</i> de luz estruturada.	44
Tabela 4.4 - Parâmetros intrínsecos da calibração do projetor com o <i>software</i> de luz estruturada.	44

Abreviaturas

ABB	<i>ASEA Brown Beveri</i>
AF	<i>Autofocus</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
FOV	<i>Field of View</i>
IRB	<i>Industrial Robots - Robotics</i>
PME	<i>Pequenas e Médias Empresas</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SFF	<i>Shape-from-focus</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

A diversidade de processos empregues na indústria associada à soldadura é cada vez maior, pelo que um soldador, geralmente, não tem experiência suficiente em todas as áreas. Para além disso, como a tarefa de soldadura requer muita concentração e precisão, mesmo os soldadores mais qualificados deparam-se com algumas dificuldades. Assim, com o objetivo de aumentar a qualidade de produção e a eficiência económica das PME, surgiram algumas alternativas à soldagem clássica manual. Dessas alternativas, destacam-se a utilização de máscaras de realidade aumentada e a aplicação de robôs programados para realizar soldagem sem intervenção humana.

As máscaras de realidade aumentada consistem numa interface homem-máquina que possibilitam ao soldador a perceção do ambiente em que está a trabalhar, com informação digital adicional externa, no mesmo espaço e em tempo real, contribuindo para um melhor desempenho na soldagem. No entanto, os trabalhadores não se sentem confortáveis ao usar estas máscaras durante longos períodos de tempo, pelo que este dispositivo está longe de ser aceite pela indústria [1]. Para eliminar a necessidade de o utilizador recorrer a *head-mounted displays* e a outros tipos de dispositivos portáteis baseados em realidade aumentada, surge uma nova abordagem de projeção designada *projection mapping*. Através desta técnica, é possível projetar informações relevantes para auxiliar o operador com informações detalhadas sobre o elemento de construção correspondente e tarefas a realizar. Atualmente, em contexto industrial, a utilização de modelos digitais de conceção, especificamente CAD, são transversais aos diversos setores produtivos e são repositórios ideais de informação de construção/soldadura que combinam informação geométrica (modelos 3D) com informação semântica. No entanto, a utilização destes ficheiros nas operações de fabricação é ainda reduzida a alguns processos tecnológicos, tais como a maquinaria. Noutros processos, como na soldadura de construção metalomecânica, a existência de modelos digitais do produto a fabricar é também escassa, o que não aumenta a produtividade da fabricação. Então, o *projection mapping* apresenta-se como uma ponte entre o espaço digital e a fabricação, assegurando a flexibilidade da fabricação manual. Esta técnica é utilizada no *design* e fabricação em diferentes indústrias, e pode fornecer aos utilizadores instruções gráficas ou escritas para realizar determinadas tarefas.

Assim, os ficheiros CAD permitem a passagem e gestão da informação necessária ao processo de fabrico desde a fase de preparação, em gabinete, até à realização na fábrica.

Também na indústria, nomeadamente na construção metalomecânica, são utilizados robôs manipuladores totalmente automatizados. A construção de estruturas metálicas é, essencialmente, composta por operações de corte e soldadura de sub-estruturas que são, posteriormente, montadas em estaleiro. De entre as operações de pré-produção das vigas metálicas, as tarefas de corte e entalhe, furação e marcação, apresentam um nível de automação considerável, tanto pela utilização de ferramentas mecânicas como em processos térmicos (plasma, oxicorte). No entanto, é rara a automação das tarefas de soldadura. E, quando existe, é executada por maquinaria de elevado impacto, que dificilmente está acessível às PME, por diversos condicionalismos, designadamente pela complexidade de implementação e operação, custos e requisitos de espaço. Além disso, é preciso ter em conta a complexidade e diversidade das tarefas de soldadura, pois alguns produtos podem mudar frequentemente de perfil, e isso impõe que o trabalho de soldagem tenha de ser flexível e adaptável [2]. Posto isto, a tomada de decisão humana é imprescindível nesta área de aplicação e, conseqüentemente, a utilização de manipuladores totalmente automatizados não é a solução mais adequada.

Mais recentemente, surge outra realidade na robótica, designada por interação homem-robô. É uma área em constante investigação e cujo objetivo consiste em avaliar e compreender sistemas robóticos em cooperação com seres humanos [3]. Os robôs podem interagir trabalhando em colaboração com os seres humanos, desde que todas as condições de segurança estejam asseguradas.

1.2 Motivação

As tarefas inerentes à soldagem manual requerem muita perícia e atenção. Os trabalhadores precisam de soldar em posições específicas e de se adaptar rapidamente a mudanças de contexto. Assim, existe uma grande probabilidade de um soldador cometer falhas, o que compromete as características dos produtos e aumenta os custos das empresas. Posto isto, a cooperação entre manipuladores robóticos e seres humanos é uma mais valia em tarefas de soldagem e melhora a eficiência do trabalho produzido.

Um manipulador industrial equipado com um projetor e um sensor de *projected stereo* auxilia significativamente as tarefas de soldagem manual. Primeiro, o manipulador posiciona a peça e efetua pingagem sobre ela, e, depois, o operador faz o cordão de soldadura completo. O sensor de *projected stereo* permite reconhecer o posicionamento de um elemento a soldar e, posteriormente, o projetor, baseado em técnicas de *projection mapping*, projeta a informação necessária ao soldador na sua área de trabalho. A informação a projetar consiste essencialmente em ficheiros do tipo CAD. Desta forma, o trabalhador não tem a necessidade de recorrer a informação que se encontra fora do espaço de trabalho, evitando frequentes deslocamentos. Aliado a este sistema, é conveniente a existência de um *software* de monitorização do mesmo. Se um ficheiro CAD não estiver correto ou se a sua projeção não for a pretendida no elemento a soldar, o utilizador pode facilmente proceder às alterações que achar adequadas (Figura 1.1).

O projetor pode ser de tecnologia *laser* ou DLP. Face a um projetor DLP, um projetor *laser* tem a vantagem de projetar devidamente independentemente das condições de luminosidade

existentes, enquanto o DLP é vulnerável à presença de luminosidade (natural ou artificial). No entanto, o projetor DLP tem custos significativamente menores, é aproximadamente oito vezes menos dispendioso. Além disso, tem a vantagem de projetar informação a cores, o que pode tornar mais intuitiva a informação projetada na área de trabalho do operador.

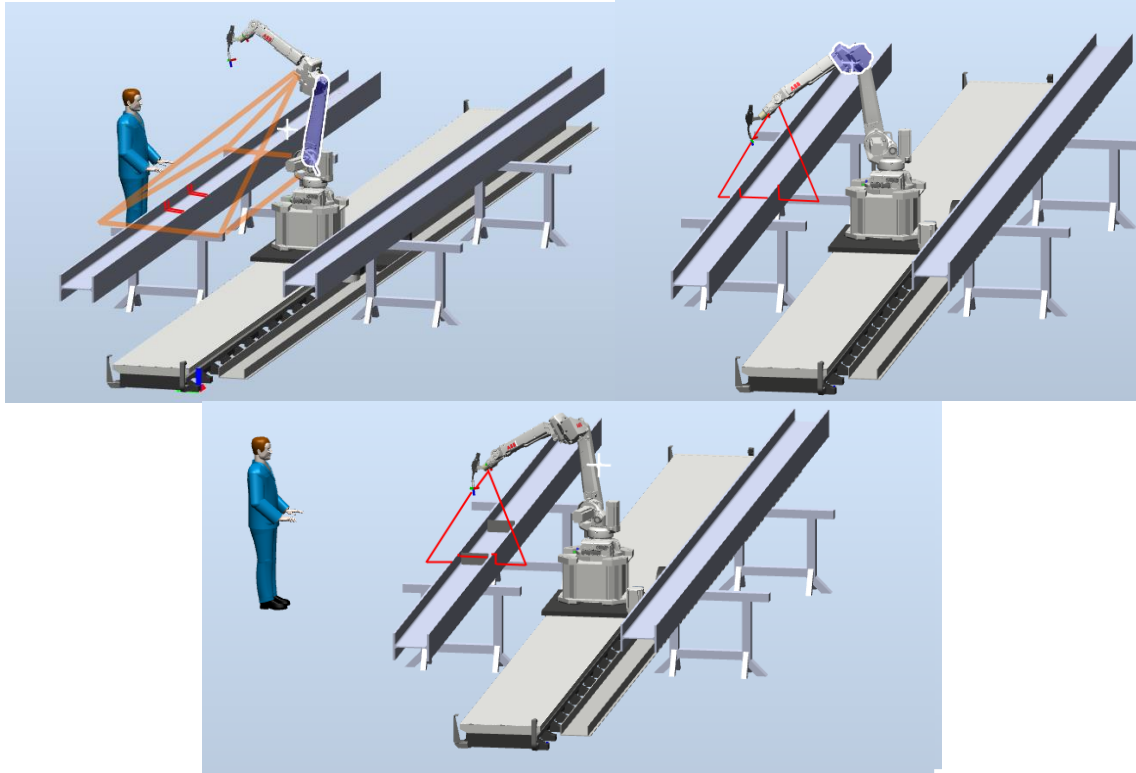


Figura 1.1 - Sequência de operação (da esquerda para a direita, de cima para baixo): Localização da viga pelo sensor de *projected stereo*; Aplicação de realidade aumentada para auxílio na montagem; Validação da montagem pelo operador.

1.3 Objetivos

O objetivo inerente a esta dissertação consiste no desenvolvimento de técnicas de integração de projetor num sistema de *projection mapping* baseado em manipulador industrial.

O sistema em que este trabalho se insere deve ser capaz de projetar imagens a três dimensões em vigas de construção metálicas, utilizando um projetor *laser* ou DLP, e aplicando técnicas de *projection mapping*, para uma projeção correta da informação do ponto de vista do operador. Para obter essa finalidade, é necessário aplicar algoritmos para calibrar eficientemente o projetor. Dada a natureza do *projection mapping*, em que se efetuam projeções em superfícies tridimensionais, as questões de profundidade de foco são essenciais para a eficiência do sistema. A focagem automática do projetor é também uma característica importante, tendo em conta as distâncias a que o dispositivo se pode encontrar das vigas metálicas onde são efetuadas projeções. Aliado a isto, é crucial avaliar pormenorizadamente em ambiente de simulação robótica a melhor localização para acoplar o projetor no manipulador industrial.

Por fim, o trabalho será integrado no projeto CoopWeld.

1.4 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se estruturado em mais quatro capítulos. No capítulo 2, é exposto o Estado da Arte referente a *projection mapping* e a calibração de projetores, em que são apresentados conceitos base, definições e metodologias. Na secção seguinte (Localização do projetor *laser*), é apresentada uma análise da melhor junta para acoplar o projetor *laser* ao manipulador industrial. Seguidamente, no capítulo 4 (Precisão, profundidade de foco e autofocus de um projetor DLP), é explicado o procedimento inerente à determinação da precisão do projetor DLP, analisada a sua profundidade de foco para uma determinada distância focal e apresentadas funções para focagem automática do projetor. Por fim, no capítulo 5 (Precisão, profundidade de foco e autofocus de um projetor DLP), são apresentadas as conclusões retiradas desta dissertação e propostas algumas soluções que podem ser implementadas para desenvolvimento futuro da mesma.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo, é apresentado o estado da arte relativo a calibração de projetores e *projection mapping*.

A calibração de projetores é abordada na secção 2.1, onde é apresentado o funcionamento de um projetor e metodologias para a sua calibração.

A seguir, na secção 2.2, é exposto o conceito de *projection mapping*, as suas aplicações, e métodos de projeção em superfícies planas e não-planas.

2.1 Calibração de Projetores

A visão é uma capacidade própria do Homem e dos animais. O seu conceito está relacionado com a habilidade de conhecer o mundo. Através dos olhos, a percepção do mundo forma-se na mente em forma de imagens. Depois, o cérebro interpreta essas imagens e executa diversas tarefas.

O mesmo acontece em visão computacional. A visão computacional é a ciência responsável pela visão de uma máquina, ou seja, é o conjunto de técnicas computacionais que estimam ou explicitam as propriedades geométricas e dinâmicas do mundo a partir de imagens. Sobre essas imagens, são aplicadas técnicas computacionais para extrair informações do mundo tridimensional. Assim, a máquina consegue executar tarefas inteligentes, aproximando-se da inteligência humana [4].

A visão computacional tem utilizações em diferentes áreas. No que diz respeito à robótica, sempre foi um tema sujeito a grande pesquisa, tendo evoluído significativamente ao longo do tempo, desde a década de 70. Atualmente, as áreas de aplicação vão desde reconhecimento de padrões até visão *stereo*. Sobretudo nas aplicações mais recentes, um dos principais problemas que lhe está inerente é a calibração de câmaras e de projetores.

A calibração é um procedimento necessário em áreas onde se aplicam medidas tridimensionais e consiste em determinar todos os parâmetros que caracterizam o ambiente em que uma câmara e/ou um projetor se inserem, bem como o modo como vão ser utilizados.

2.1.1 Funcionamento de um projetor

Uma câmara tem como função capturar imagens do mundo real. Contrariamente, um projetor tem por objetivo projetar imagens num cenário. Assim, um projetor pode ser visto como o inverso de uma câmara. Posto isto, ambos são descritos pelo mesmo modelo, o modelo *pinhole*.

O modelo *pinhole* descreve uma relação matemática entre as coordenadas de um ponto tridimensional e a projeção desse ponto no plano da imagem, onde a abertura da câmara é descrita como um ponto e não se considera a existência de lente (Figura 2.1). Este modelo serve como base para determinar os parâmetros intrínsecos de câmaras e projetores.

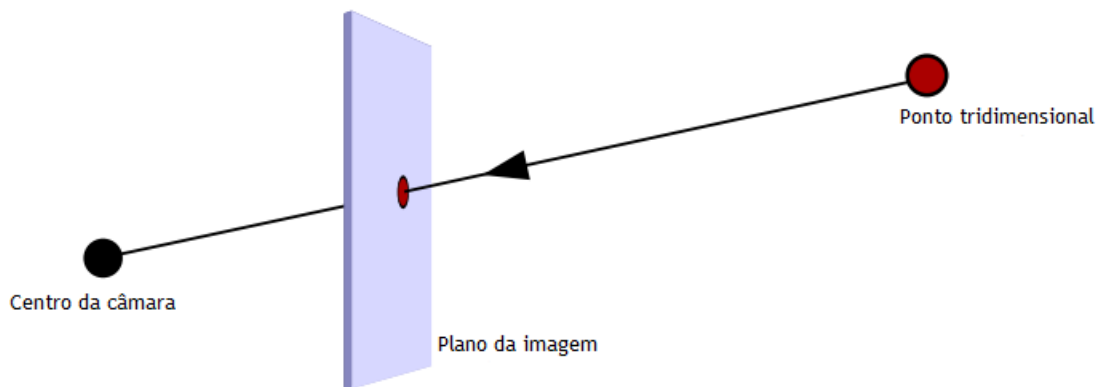


Figura 2.1 - Esquema representativo do modelo pinhole [69].

Parâmetros intrínsecos e extrínsecos

A calibração de uma câmara ou de um projetor compreende duas fases. Primeiro, determinam-se os seus parâmetros intrínsecos e, depois, os seus parâmetros extrínsecos.

Os parâmetros intrínsecos dependem apenas das características físicas da câmara, particularmente da geometria interna da lente e do tipo de lente [5]. Esses parâmetros são a distância focal, o centro da imagem, o fator de escala e os coeficientes de distorção da lente [6]. O resultado da calibração dos parâmetros intrínsecos é representado por uma matriz A e serve para relacionar o referencial da imagem com o referencial da câmara. As variáveis f_x e f_y representam as distâncias focais e c_x e c_y as coordenadas do centro ótico.

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Por sua vez, os parâmetros extrínsecos relacionam o referencial da câmara com o mundo (Figura 2.2), tendo por base a matriz de transformação homogénea dos dois referenciais. A matriz de transformação homogénea relaciona a rotação e translação entre os dois referenciais. Assim, é necessário definir a matriz de rotação R (2.2) e o vetor de translação T (2.3).

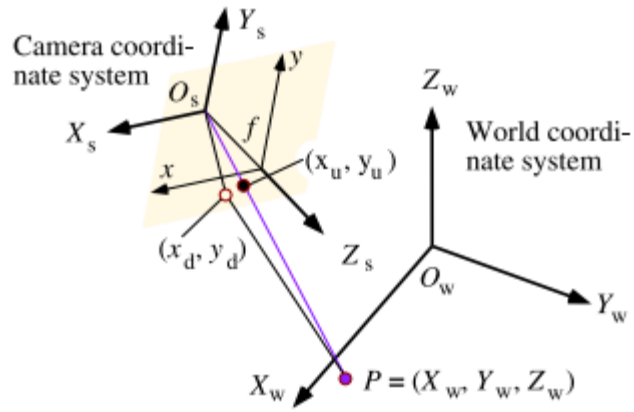


Figura 2.2 - Sistemas de coordenadas da câmara e do mundo [41].

$$R = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r32 & r32 & r33 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$T = [t1 \quad t2 \quad t3]^T \quad (2.3)$$

Designando um *pixel* bidimensional por m e um ponto tridimensional por M , os pontos correspondentes em coordenadas homogêneas são representados, respetivamente, por m_H e M_H .

$$m = [x \quad y]^T \quad (2.4)$$

$$m_H = [x \quad y \quad 1]^T \quad (2.5)$$

$$M = [X \quad Y \quad Z]^T \quad (2.6)$$

$$M_H = [X \quad Y \quad Z \quad 1]^T \quad (2.7)$$

Assim, os parâmetros intrínsecos e extrínsecos podem ser calculados resolvendo o seguinte sistema de equações, em que w é um fator de escala arbitrário (2.8):

$$w \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

→ Parâmetros extrínsecos

→ Parâmetros intrínsecos

Homografia

Uma homografia é uma transformação projetiva bidimensional que pretende alinhar duas imagens do mesmo plano, obtidas de pontos de vista distintos (Figura 2.3). Assim, a transformação homográfica consiste no mapeamento de uma superfície plana noutra, estando as coordenadas dos dois planos relacionadas. Desde que as posições dos pontos de vista e do plano se preservem, a matriz de homografia mantém-se inalterável.

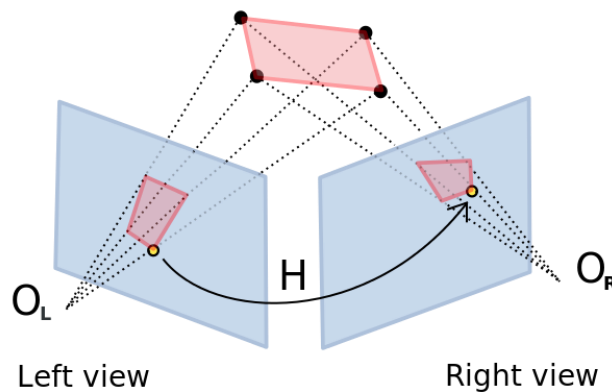


Figura 2.3 - Esquema representativo de uma homografia [53].

2.1.2 Métodos de Calibração

Em robótica, um projetor pode ser usado com uma câmara ou mais câmaras e/ou também em conjunto com outros projetores. Tratam-se de equipamentos capazes de interagir com o mundo. Porém, têm problemas associados, que estão relacionados com as suas calibrações. Assim, estes sistemas devem ser calibrados antes de serem usados, de forma a garantirem a melhor precisão possível aquando da sua utilização. Quando devidamente calibrados, são dispositivos muito exatos. Independentemente de uma determinada aplicação apenas necessitar de um projetor, a sua calibração vai sempre necessitar de uma câmara auxiliar para “ver” as projeções efetuadas e, assim, ter as imagens capturadas pela câmara para análise.

Os métodos de calibração de projetores podem ser divididos em três grupos:

- **Dependem da calibração da câmara:** numa primeira instância, calibra-se a câmara e, depois, a câmara é usada para encontrar as coordenadas tridimensionais no mundo do padrão projetado [7]. No entanto, este método tem uma grande desvantagem associada, que se prende com o facto de as imprecisões resultantes da calibração da câmara transportarem erros para a calibração do projetor;
- **São difíceis de executar:** necessitam de equipamentos de calibração ou requerem calibração de cor;
- **Encontram correspondências no projetor usando homografias entre planos:** apesar de as câmaras e de os projetores serem descritos pelo mesmo modelo matemático, não é óbvio como adaptar os métodos de calibração das câmaras para projetores. Consequentemente, utiliza-se um modelo simplificado que ignora a distorção das lentes do projetor, o que compromete a precisão de calibração.

Tendo em conta estes últimos pontos, e sobretudo o ultimo, Daniel Moreno e Gabriel Taubin [8] introduziram, em 2012, um novo método para calibrar sistemas câmara-projetor, simples de implementar e mais exato do que métodos anteriores, na medida em que utilizam um modelo *pinhole* completo para descrever os comportamentos da câmara e do projetor. Este método estima as coordenadas de pontos de calibração no plano de imagem do projetor usando homografias locais. Assim sendo, são projetadas e capturadas sequências de luz estruturada sobre um padrão de xadrão que tem de ser posicionado em diferentes pontos de vista. A descodificação da luz estruturada depende apenas do padrão projetado e usa um algoritmo de classificação de pixéis [9]. A seguir, é feito um mapeamento entre os píxeis da câmara e do projetor, recorrendo a homografias locais (Figura 2.4).

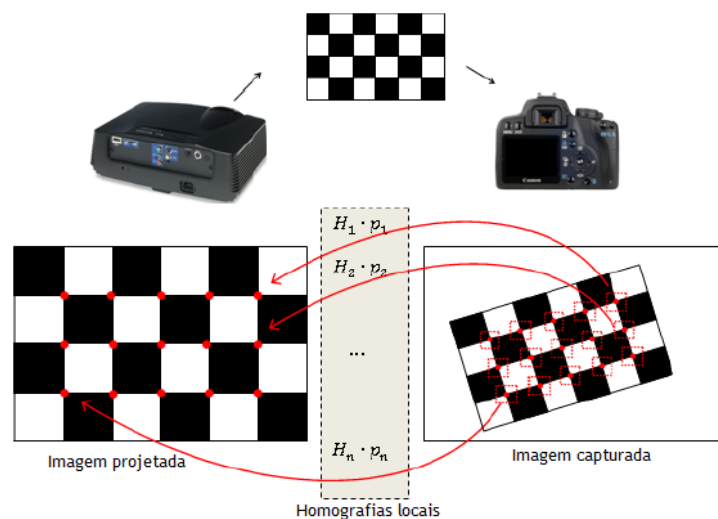


Figura 2.4 - Calibração do sistema de luz estruturada usando homografias [8].

Seguidamente, calculam-se os parâmetros intrínsecos do projetor. Paralelamente, usando a localização dos cantos nas coordenadas da imagem e nas coordenadas tridimensionais do

mundo, calibra-se a câmara. Por fim, determinam-se os parâmetros extrínsecos do projetor (Figura 2.5).

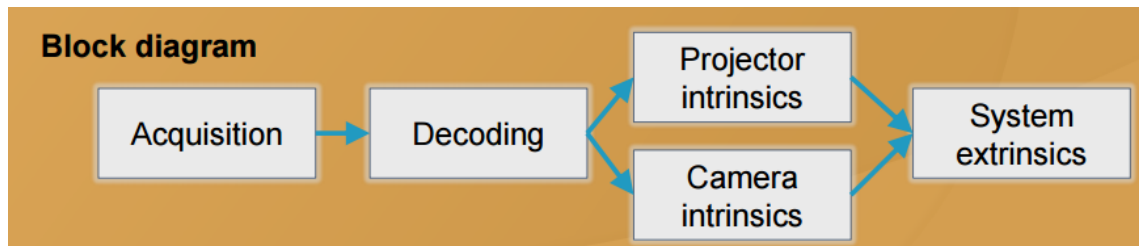


Figura 2.5 - Diagrama de blocos do sistema [70].

O erro de reprojeção associado a este método de calibração é, de facto, muito baixo, sobretudo para o projetor. Esta metodologia resultou na criação de um *software* de calibração (Figura 2.6). De todas as ferramentas existentes de calibração de projetores, esta é a que permite calibrar de forma mais eficiente este dispositivo de projeção.



Figura 2.6 - Software de calibração de luz estruturada desenvolvido pela Brown University School of Engineering [70].

Em 2013, Francois Berry, Omar Ait Aider e Jeremie Mosnier apresentaram um novo método de calibração para sistemas projetor-câmara que utiliza o mesmo conjunto de pontos tridimensionais para as calibrações tanto da câmara como do projetor, simplificando, assim, as tarefas de calibração. Esta técnica consiste em projetar um padrão de calibração e sobrepô-lo automaticamente num padrão de calibração impresso conhecido. O padrão projetado é fornecido por uma câmara virtual que observa um padrão virtual, e cabe ao projetor exibir o que essa câmara virtual visualiza (Figura 2.7). Posto isto, o padrão projetado pode ser controlado e sobreposto no padrão imprimido seguindo uma abordagem de servovisão [10].

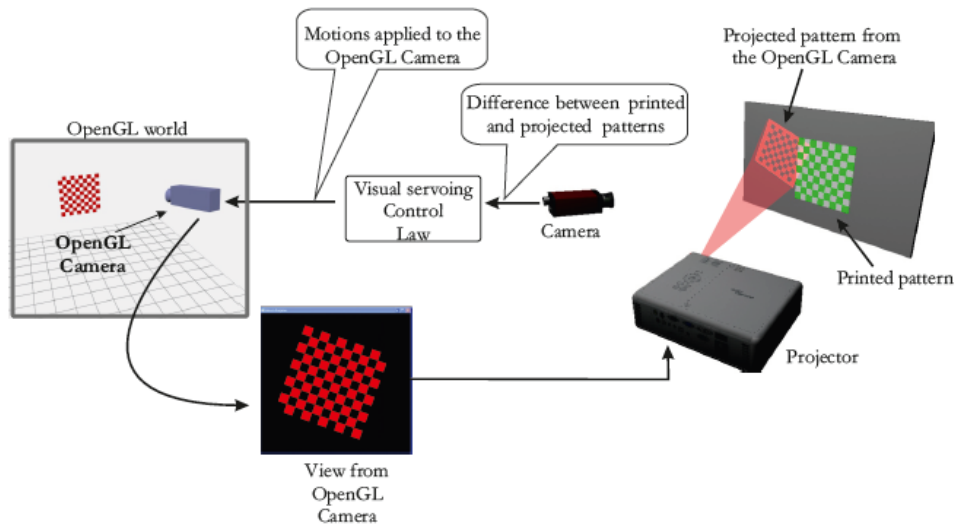


Figura 2.7 - Visão geral da configuração: uma câmera virtual visualiza um padrão virtual projetado pelo projetor [10].

Mais tarde, em 2014, Christian Wieghardt e Bernardo Wagner [11] desenvolveram dois métodos de auto-calibração para determinar os parâmetros extrínsecos de um projetor que se encontra na ferramenta de um robô (Figura 2.8), um dos quais inclui simultaneamente calibração câmera-robô (Figura 2.9), considerando fatores de escala únicos e incógnitos para cada posição.

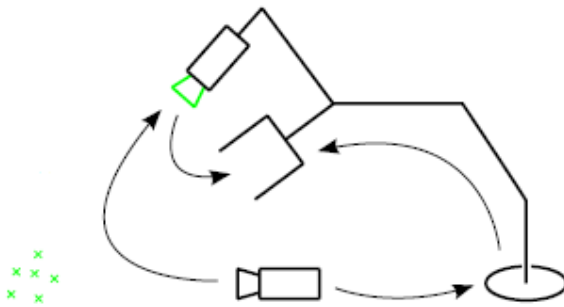


Figura 2.8 - Projetor montado na ferramenta do robô e câmera colada no ambiente [11].

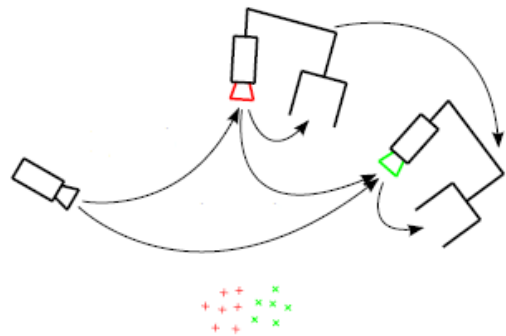


Figura 2.9 - Projetor montado na ferramenta do robô e câmera colocada no ambiente ou fixa na plataforma do robô [11].

O termo auto-calibração indica que estas soluções não precisam de qualquer equipamento adicional de calibração, e assume-se que os parâmetros intrínsecos são determinados previamente por um dos métodos de calibração de luz estruturada [12] [8]. Este desafio baseia-se no trabalho desenvolvido por [13] que envolve uma fórmula linear de calibração mão-olho com fatores de escala desconhecidos no movimento da câmera. Ficou comprovado que os erros resultantes de fatores de escala desconhecidos convergem com o aumento do número de

posições da câmara e da ferramenta do robô. Para além disso, o erro adicional que resulta de se estimar, em simultâneo, a posição da câmara é insignificante.

2.2 *Projection Mapping*

Projection mapping, também conhecido como realidade espacial aumentada, é uma técnica que permite projetar vídeos e imagens tridimensionais de alta definição em superfícies de objetos, com o intuito de torná-los numa exibição dinâmica interativa, alterando visualmente a sua forma no decorrer do tempo. Esta técnica de vídeo pode ser interpretada como algo ilusório, na medida em que, ao criar ambientes imersivos, transmite a sensação de que os objetos se movem e se alteram para algo diferente.

Nos dias de hoje, esta técnica é utilizada em diversas situações, causando impactos positivos para promover diferentes temas. É largamente usada para fins comerciais, em eventos históricos [14], em *design* de moda [15], no teatro [16], em espetáculos visuais em edifícios, em concertos e, mais recentemente, na indústria automóvel, educação [17] e medicina [18].

O *Projection mapping* é visto como uma nova abordagem de projeção. A primeira vez que este conceito foi investigado foi no final da década de 90, onde investigadores da Universidade da Carolina do Norte trabalharam num projeto chamado “*The Office of the Future*” com o objetivo de interligar os escritórios de diferentes sítios através da projeção de imagens de pessoas no mesmo espaço, usando qualquer superfície como ecrã (Figura 2.10). Esta investigação permitiria a existência de reuniões virtuais interativas em tempo real [19].



Figura 2.10 - Ilustração do “*The Office of the Future*” [19].

No entanto, este conceito é primitivo, data da década de 60, quando, em 1957, Morton Helig criou uma máquina chamada Sensorama. Foi concebida como uma experiência cinematográfica, capaz de exibir imagens tridimensionais estereoscópicas juntamente com som *stereo*, e possibilitava a sensação de vento [20].

Mais tarde, em 1969, a *Disneyland* inaugurou a *Haunted Mansion*, um percurso escuro que continha um conjunto de ilusões óticas, incluindo cinco bustos cantores, em que os rostos dos cantores originais da música do percurso eram neles projetados, tornando a cena mais assustadora e realista. Esta foi a primeira aplicação de projeção sobre ecrãs não planos. Também pertence à Disney a patente mais antiga, de 1991, relacionada com *projection mapping*. Intitulada de “*Apparatus and method for projection upon a three-dimensional object*”, descreve um sistema de pintura digital de imagens sobre um objeto tridimensional com contornos [21].

Michael Naimark introduziu o conceito de *projection mapping* rotativo em 1980, apresentando uma instalação cinematográfica imersiva, chamada *Displacements*. Com uma câmara rotativa, montada no centro de uma sala, filmou-se a interação entre duas personagens. Depois, a sala foi pintada de branco e a câmara substituída por um projetor (Figura 2.11) [22].



Figura 2.11 - Projection mapping rotativo na obra “*Displacements*” [55].

Em 2001, Ramesh Raskar et al [23] apresentaram um sistema em tempo real e usado em ambiente fechado para aplicar pinturas e texturas virtuais a objetos reais, através da manipulação do objeto e do uso de um pincel (Figura 2.12).

O sistema trabalha com objetos rastreados cuja geometria é previamente adquirida e com modelos criados manualmente. No entanto, com o uso de câmaras, é possível determinar a geometria do objeto automaticamente e fazer um rastreamento baseado em visão do objeto e do pincel. Esta abordagem baseia-se numa anterior, denominada “*Shader Lamps*”, desenvolvida em 1998 por alguns dos mesmos autores, em que se alterou a aparência de objetos, fixos e em movimento, iluminando-os com texturas estáticas e animadas.

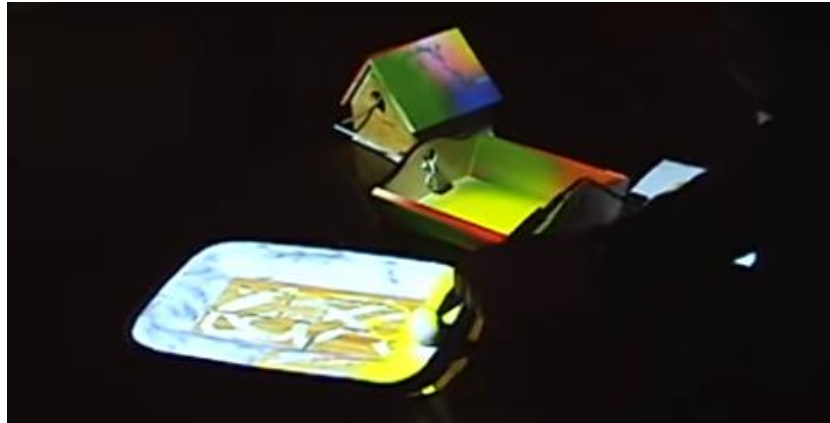


Figura 2.12 - Aplicação de texturas e pinturas virtuais a objetos [56].

Em 2004, Ramesh Rasker et al desenvolveram um sistema que estende o conceito de realidade aumentada para uma nova técnica de projeção interativa, tendo por objetivo auxiliar na inventariação e manutenção de um armazém. Os utilizadores, fazendo uso de um projetor apontador portátil, identificam os objetos pretendidos, que possuem uma *tag wireless* identificadora. Logo, é possível encontrar os objetos de forma rápida e fácil, bem como atualizar a sua informação quando necessário [24].

Cerca de dois anos depois, Oliver Bimber e Ramesh Rasker implementaram métodos de correção de distorções geométricas e de cores em imagens, causadas pela ausência de uma tela branca, permitindo, assim, uma projeção adequada em qualquer superfície, como paredes forradas a papel (Figura 2.13), cortinas coloridas, paredes de pedra e tampos de mesas texturizadas [25].



(a) Superfície de projeção.



(b) Projeção sem correção de cor.



(c) Projeção com correção de cor sobre uma folha de papel branca.

(d) Projeção final com correção de cor.

Figura 2.13 - Projeção sobre uma superfície com papel de parede [25].

Existem também utilizações de *projection mapping* em conjunto com *tablets*. Esta junção permite que se alterem as imagens projetadas através da detecção de gestos das pessoas [26].

2.2.1 *Projection mapping* na indústria

Christian Vogel et al [27] desenvolveram um sistema de segurança para trabalho cooperativo homem-robô, usando equipamentos óticos: um projetor e duas câmaras. O sistema proposto é capaz de projetar uma barreira de luz no espaço de trabalho do robô, que é considerado como interdito. A barreira de luz é dinâmica, isto é, adapta-se a cada movimento do robô (Figura 2.14). Assim, as violações do espaço de segurança são detetados por interrupção desses padrões (Figura 2.15). Desta forma, conseguem-se garantir condições de segurança para cenários de coexistência entre seres humanos e robôs.

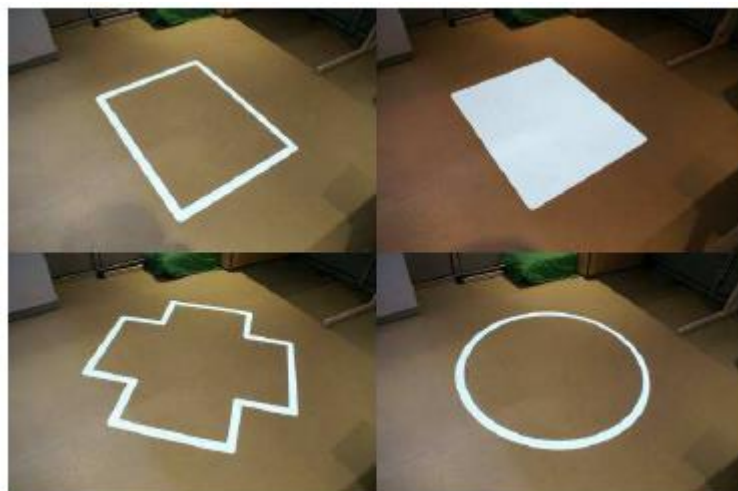


Figura 2.14 - Barreiras de luz com formas distintas [27].

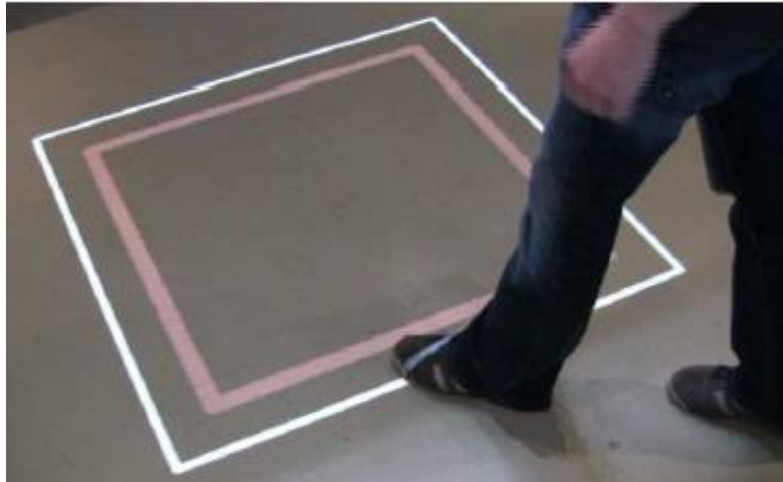


Figura 2.15 - Espaço de segurança representado a branco e violação de segurança representado a vermelho [27].

Existem outras soluções de *projection mapping* aplicadas na indústria. Essencialmente, têm por objetivo diminuir custos de trabalho e aumentar a eficiência das tarefas em que determinada empresa se envolve [28] [29] [30].

2.2.2 Métodos de *projection mapping*

Antes de aplicar qualquer técnica de *projection mapping* é preciso compreender como funcionam os projetores e quais os seus procedimentos de calibração para ajustar a projeção de imagens aos objetos de destino. Tais especificidades foram já expostas no capítulo anterior.

A aplicação de *projection mapping* requer o uso de um ou mais projetores e assenta em três etapas fundamentais:

1. Escolher a superfície onde se vai projetar;
2. Escolher as imagens e/ou vídeos a projetar;
3. Fazer uma modelação 3D através de *software* especializado.

De facto, a técnica de projeção *projection mapping* consegue transformar qualquer superfície, plana ou não plana, numa exibição de vídeo (Figura 2.16).

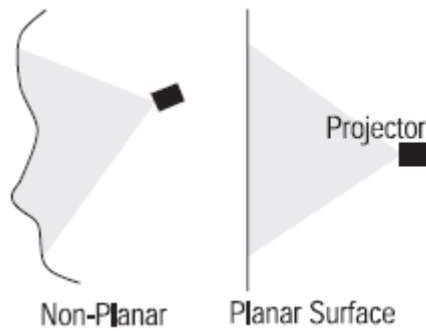


Figura 2.16 - Tipos de superfície: plana e não plana [31].

A projeção numa superfície plana é relativamente simples, pois os projetores são normalmente posicionados em frente e ortogonalmente à tela de exibição, evitando distorções na imagem.

No entanto, quando o projetor não está ortogonal à superfície plana a projeção torna-se bem mais complexa, bem como no caso de a superfície ser não plana. Nestas circunstâncias, é necessário calcular a transformação geométrica entre o ponto de vista do utilizador (T) e o projetor para qualquer ponto do espaço (V). Caso contrário, a imagem apenas vai estar correta do ponto de vista da posição do projetor (P) e distorcida de todos os outros [31].

Na Figura 2.17 pode-se analisar a transformação geométrica referida anteriormente, em que P_c é o centro de projeção do projetor, P_R é o seu plano de imagem, e o *pixel* m_p resulta da interseção entre o vetor P_cM com o plano da imagem P_R , sendo M o resultado da interseção TV com a tela de exibição D.

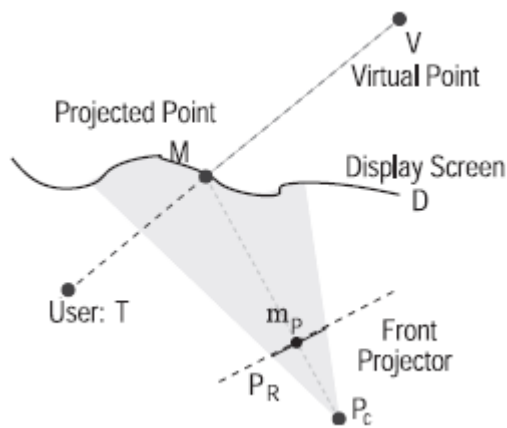


Figura 2.17 - Relação geométrica entre componentes [31].

Esta transformação geométrica permite converter o ponto de vista do utilizador para o ponto de vista do projetor, através de um processo de *renderização*, que consiste em duas etapas:

1. Realizar a conversão tridimensional das coordenadas do mundo para bidimensional do ponto de vista do utilizador, pela interseção do vetor TV com o plano de imagem m_T (Figura 2.18);

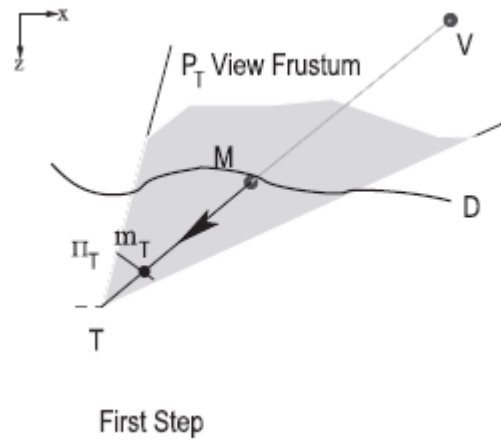


Figura 2.18 - Esquema representativo da primeira etapa do processo de renderização [31].

2. Fazer o mapeamento inverso da imagem para o ponto de vista do projetor, através da matriz de transformação homogênea entre o utilizador e o projetor. Os píxeis do plano de imagem m_T são convertidos para o plano de imagem m_P (Figura 2.19).

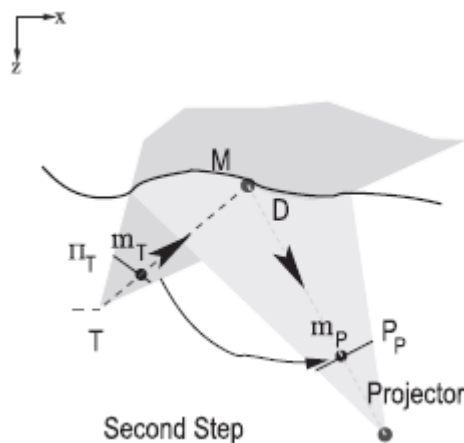


Figura 2.19 - Esquema representativo da segunda etapa do processo de renderização [31].

Este algoritmo de *renderização* é eficiente em qualquer uma das seguintes circunstâncias:

- O utilizador pode mover-se ou estar parado;
- O objeto virtual exibido pode estar à frente, atrás ou na superfície do ecrã;
- A configuração da projeção pode ser frontal ou traseira;
- A superfície do ecrã pode ser plana ou não plana.

Projeção em superfícies planas

A projeção numa superfície plana é relativamente simples, pois os projetores são posicionados perpendicularmente à tela de exibição, evitando distorções na imagem. Nesta situação, a imagem projetada encontra-se representada corretamente, no entanto, pode haver a necessidade de a deslocar para coincidir com o ponto de vista do utilizador.

Quando o projetor não está perpendicular ao ecrã diz-se que está oblíquo, e a imagem resultante aparece distorcida e com efeito *keystone* (Figura 2.20).

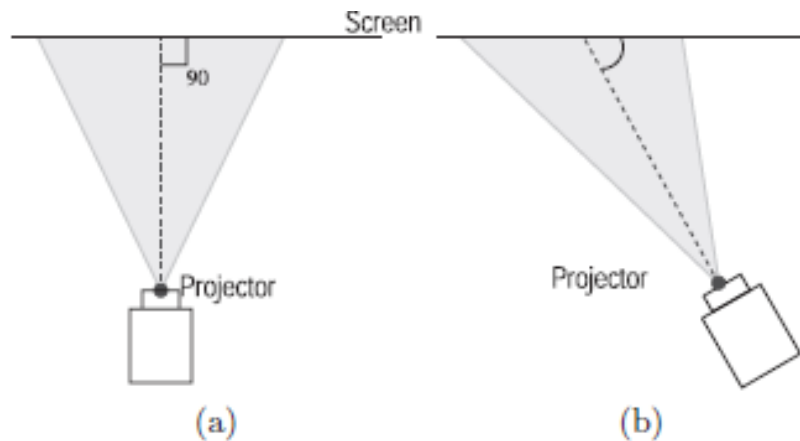


Figura 2.20 - (a) Projetor colocado ortogonalmente à superfície cria imagens retangulares; (b) Projetor colocado obliquamente à superfície cria imagens com efeito keystone [31].

Atualmente, a maioria dos projetores possui sensores que lhes permite saber a sua posição e, dessa forma, corrigir a deformação. No entanto, nem sempre a correção efetuada pelo projetor é suficiente. Quando isto acontece e/ou quando se pretende visualizar objetos tridimensionais do ponto de vista do utilizador, torna-se imprescindível aplicar técnicas de *projection mapping*, nomeadamente o método de transformação geométrica abordado anteriormente. Mas, antes de o aplicar, é necessário adquirir uma conceção tridimensional do ambiente. A forma mais utilizada de o fazer consiste em representar um conjunto de vértices tridimensionais interligados entre si.

A imagem resultante depois de aplicado o processo de *renderização* é relacionada por uma homografia entre o ponto de vista do utilizador e o ponto de vista do projetor, do plano da imagem, que relaciona os pixéis m_T e m_p .

$$m_p \cong H_{3 \times 3} m_T \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} m_{Px} \\ m_{Py} \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{Tx} \\ m_{Ty} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Projeção em superfícies não-planas

A projeção em superfícies não planas requer procedimentos de calibração no projetor e um mapeamento preciso das imagens no objeto alvo.

Para além disso, e tal como referido anteriormente, quando a superfície de exibição não é plana, utiliza-se o método de transformação geométrica apresentado. Na primeira fase, a imagem desejada é computadorizada e armazenada como um traçado de textura. Na segunda fase, essa textura é projetada na superfície do ponto de vista do utilizador. Depois, a imagem mapeada sobre a superfície é *renderizada* para o ponto de vista do projetor. Quando a imagem *renderizada* é projetada, o utilizador visualiza o objeto virtual de uma perspetiva correta. Assim, é feito um alinhamento entre os objetos alvo e as imagens a serem projetadas, tendo em conta as posições do utilizador e do projetor. Este método é muito eficiente para objetos e projetores estáticos, havendo apenas alteração na posição do utilizador.

Pesquisas mais recentes tentam fazer projeção em objetos dinâmicos com alinhamento automático, mas esta abordagem é aplicável a apenas algumas formas e movimentos de objetos e requerem uma grande computação para o alinhamento de imagem. Isto causa latência até que as imagens sejam alinhadas com os objetos tridimensionais. Quanto maior for a latência, mais lento é o movimento da imagem projetada a seguir o movimento do objeto. Consequentemente, isso gera erros visuais, o que reduz a imersão das audiências [16].

2.3 Conclusões

Neste capítulo, foram abordados o modelo *pin-hole* para modelação de dispositivos óticos (câmara e projetores) e os parâmetros intrínsecos e extrínsecos a obter da sua calibração. Foi também apresentado o conceito de homografia inerente ao processo de calibração. Além disso, foram descritas as metodologias de calibração de projetores mais relevantes e recentemente desenvolvidas, uma das quais aborda calibração robô-projetor.

Depois, foi exposto o conceito *projection mapping*, as suas aplicações na atualidade e técnicas de projeção em superfícies planas e não-planas.

Estes temas são cruciais para compreender o objetivo desta dissertação. No entanto, a calibração de projetores apresentou um maior destaque no trabalho desenvolvido.

Capítulo 3

Localização do projetor *laser*

No início do desenvolvimento do trabalho da dissertação, o projeto CoopWeld já se encontrava em fase de desenvolvimento.

Assim, por forma a integrar no projeto em causa, fez-se, numa primeira instância, uma análise crítica da melhor posição para anexar o projetor *laser* no manipulador do projeto CoopWeld. Para isso, tornou-se necessário conhecer as características e o funcionamento do projetor *laser* a ser utilizado e definir quais os aspetos a ter em conta para a melhor localização do projetor. Essa análise foi feita em ambiente de simulação RobotStudio.

Essencialmente, a localização do projetor deve ser tal que possibilite projetar informação em toda a largura de uma viga metálica, tanto na parte interior como exterior. No entanto, é importante definir outros elementos a que se deve ter atenção, tendo em conta as características e os objetivos do projeto CoopWeld. Porém, antes de se avaliar a localização do projetor *laser*, é crucial perceber os princípios básicos do seu funcionamento e as características que possui.

3.1 Sistema de *scaneamento* galvanométrico

Um sistema de *scaneamento* galvanométrico a duas dimensões é constituído por dois espelhos acionados por uma rotação limitada nos seus motores (Figura 3.1). O feixe *laser* entra no sistema e atinge o primeiro espelho, no *scanner* X. Depois de sofrer reflexão nesse espelho, o raio atinge o segundo espelho, em Y. A rotação do espelho X permite controlar o ângulo de reflexão bem como a coordenada horizontal do raio *laser*. Por sua vez, a coordenada no eixo vertical é controlada pelo *scanner* Y [32].

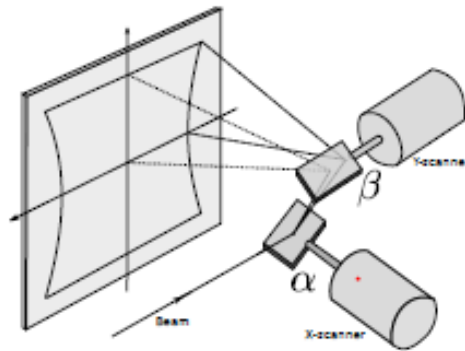


Figura 3.1 - Esquema representativo de um sistema de *scaneamento* galvanométrico [32].

Projektor Medialas ILP 622

O projetor Medialas ILP 622 trata-se de um sistema de *scaneamento* galvanométrico e é um dos projetores em teste para o projeto CoopWeld.

De entre todas as características deste projetor [33], destacam-se as que têm relevância para a análise da sua posição no manipulador robótico:

- Ângulo de deflexão: $\theta = 8^\circ$;
- Dimensões: 240 mm x 160 mm x 110 mm.

O ângulo de deflexão, θ , é o ângulo entre o feixe *laser* de entrada e o sistema de eixos dos espelhos.

A projeção da fonte de luz proveniente do projetor tem a forma aproximada de uma pirâmide (Figura 3.2).

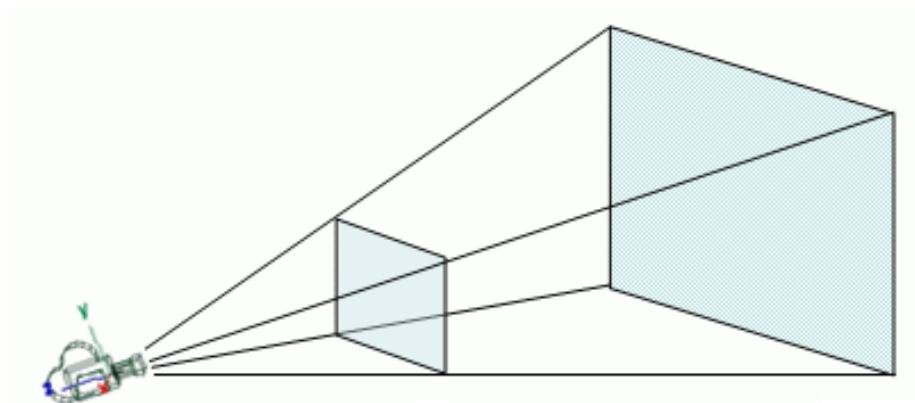


Figura 3.2 - Projeção de luz do projetor em forma de pirâmide [58].

Para a construção dessa pirâmide, tem-se em conta o ângulo de deflexão, θ . Através do valor desse ângulo e arbitrando uma medida para um dos catetos do triângulo, é possível determinar o valor do outro cateto e, assim, dimensionar a projeção de luz *laser* (Figura 3.3).

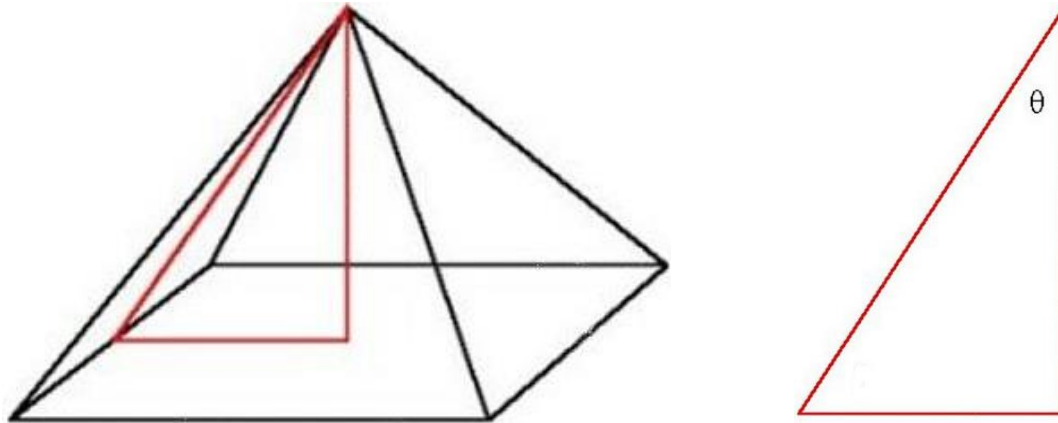


Figura 3.3 - Construção da pirâmide de projeção de luz através do valor do ângulo de deflexão.

3.2 Fatores a considerar para a localização

Os aspectos tidos em conta para avaliar qual a melhor posição para anexar o projetor *laser* ao manipulador robótico foram os seguintes:

- **Área de segurança do operador:** o manipulador não deve interferir na área de segurança do operador. O operador encontrar-se-á do lado da viga oposto ao do manipulador;
- **Área de projeção:** a altura do projetor está diretamente relacionada com o alcance de projeção. Assim, o projetor deve estar localizado a uma altura que permita projetar informação alcançando toda a viga metálica em largura. No entanto, essa altura tem de ser limitada para que a área de projeção não exceda as dimensões da viga;
- **Oclusões:** quanto mais vertical for a projeção, menores serão os problemas de oclusão;
- **Movimentos do manipulador:** as deslocções do robô entre as 2 operações - de projeção e de soldagem - devem ser mínimas, ou, se possível, nulas.
- **Ponto de vista do operador:** a informação projetada deve estar correta do ponto de vista do operador, sendo isso possível implementando técnicas de *projection mapping*. Além disso, para que o operador possa proceder às alterações que achar adequadas, é mandatório recorrer a uma projeção dinâmica, em vez de projeção estática;

- **Estabilidade na fixação do projetor:** o projetor deve ser acoplado ao manipulador industrial numa posição que permita estabilidade na sua fixação, de forma a evitar acidentes resultantes do seu desprendimento ou movimentos no projetor que se reflitam em projeções indesejadas sobre as vigas metálicas. Assim, as dimensões e, sobretudo, o peso do projetor *laser* são características que podem condicionar a estabilidade na fixação do projetor. Como estas características têm valores relativamente baixos, face ao tamanho do manipulador a ser utilizado, a sua fixação no robô, em qualquer uma das juntas, se feita devidamente e com os materiais adequados, não apresentará qualquer problema.

3.3 Cenário de simulação

Para analisar qual a melhor posição para anexar o projetor *laser* no manipulador, utilizou-se o RobotStudio, *software* de simulação robótica proprietário da ABB.

A célula de trabalho utilizada contém, como elementos principais, uma viga metálica, um manipulador robótico com 6 graus de liberdade, de referência IRB 2600 12Kg 1.65m, um sólido em forma de paralelepípedo com as dimensões do projetor a ser utilizado anexado ao manipulador e uma pirâmide, anexada ao projetor, que simula a projeção da fonte de luz *laser* dele proveniente (Figura 3.4).

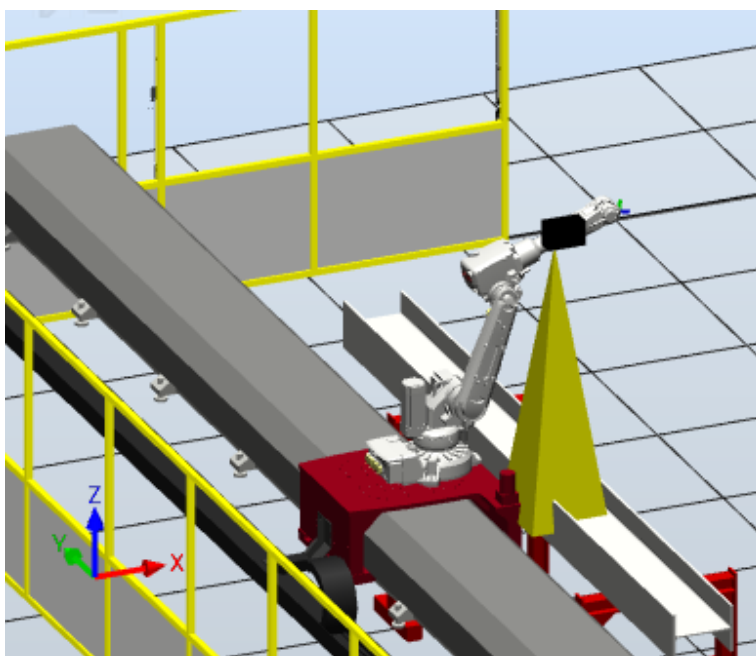


Figura 3.4 - Célula de trabalho da simulação.

Como se pode ver na figura anterior, o robô encontra-se sobre um carril que o permite deslocar-se ao longo do eixo dos yy, de forma a que consiga percorrer toda a viga metálica em comprimento. Assim, para a análise efetuada apenas se teve em conta o alcance de projeção na largura da viga, ao longo do eixo dos xx.

Transformação de projeção

Uma transformação de projeção determina como os objetos são projetados num ecrã. O RobotStudio fornece dois tipos de projeção (Figura 3.5):

- **Projeção de perspetiva:** simula a projeção feita pelo olho humano quando este capta a imagem de um objeto. Faz com que os objetos mais distantes pareçam menores;
- **Projeção ortográfica:** não tem em conta o tamanho relativo dos objetos.

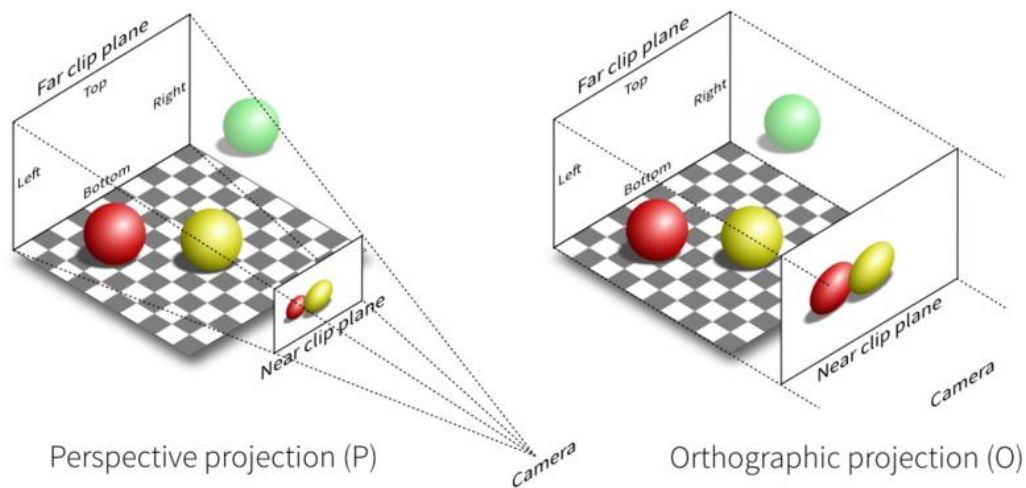


Figura 3.5 - Imagem representativa das diferenças entre projeções de perspetiva e ortográfica [59].

Nesta simulação, apenas foram utilizadas projeções de perspetiva. O volume de visualização de uma projeção de perspetiva é uma pirâmide truncada, cuja parte superior é cortada por um plano paralelo à sua base. Assim sendo, os objetos que se encontram dentro do volume de visualização são projetados para o vértice da pirâmide.

3.4 Análise da localização do projetor

Para avaliar qual a melhor localização do projetor no manipulador, anexou-se o projetor nas diferentes juntas e em posições distintas em cada junta. Através da análise da Tabela 3.1, é possível concluir que a junta que possui mais vantagens e menos desvantagens para anexar o projetor é o *end-effector*.

Junta	Vantagens	Desvantagens
Juntas 0, 1, 2 e 3	-	<ul style="list-style-type: none"> - A fonte de luz proveniente do projetor não permite uma projeção em toda a largura da viga, independentemente da orientação do robô e da posição e orientação do projetor. - Não permite projeção na lateral exterior da viga adjacente ao operador sem que o manipulador interfira na área de segurança do operador.
Junta 4	<ul style="list-style-type: none"> - Projeção dinâmica; - Projeção ortogonal; - Projeção a uma altura que permite um alcance em toda a largura da viga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer movimentos entre as operações de projeção e de soldagem; - Não permite projeção na lateral exterior da viga adjacente ao operador sem que o manipulador interfira na área de segurança do operador.
Junta 5	<ul style="list-style-type: none"> - Projeção dinâmica; - Projeção ortogonal; - Projeção a uma altura que permite um alcance em toda a largura da viga. - Permite projeção na lateral exterior na viga adjacente ao operador, de forma a que o manipulador não interfira na área de segurança do operador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pode condicionar a operação de soldagem, tendo em conta as dimensões do projetor; - Requer movimentos entre as operações de projeção e de soldagem.
<i>End-effector</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Projeção dinâmica; - Projeção ortogonal; - Projeção a uma altura que permite alcançar toda a viga em largura. - Permite projeção na lateral exterior da viga adjacente ao operador, de forma a que o manipulador não interfira na área de segurança do operador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer uma troca constante da ferramenta entre as operações de projeção e de soldagem, aumentando o tempo entre as duas operações.

Tabela 3.1 - Análise da localização do projetor para cada junta do manipulador

3.5 Projeções ortogonal e oblíqua

Para que seja possível uma projeção ortogonal na viga a uma altura capaz de alcançar toda a largura da viga bem como uma projeção oblíqua no exterior da viga adjacente ao operador sem que o par robô-projetor interfira na área de segurança do operador, as diferenças de distâncias, em X e em Z, entre o manipulador e a viga metálica deve ser bastante pequena.

É de realçar que a soldadura no exterior da viga adjacente ao robô é inviável, pois trata-se de uma área que, respeitando a zona de segurança do operador, se encontra fora do seu alcance visual.

Na página seguinte, são apresentadas imagens de simulações de projeções vertical e lateral (Figura 3.6) em que se estabeleceu uma distância entre a viga e o manipulador de aproximadamente 222 mm em Z e 383 mm em X.

As diferenças de distâncias, em X e em Z, entre o robô e a viga usadas na simulação não têm de ser exatamente os valores utilizados. Estas diferenças podem variar, ainda que pouco. No entanto, a variação das distâncias reflete-se numa variação da orientação das juntas do manipulador para que as projeções se mantenham adequadas.

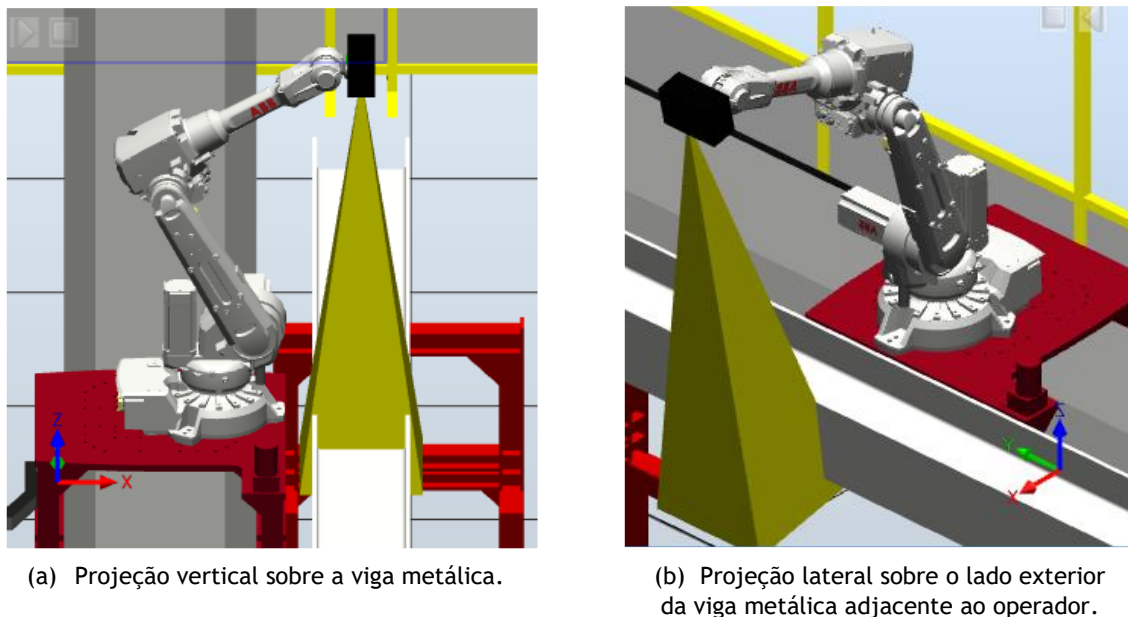


Figura 3.6 - Projeções vertical e lateral sobre a viga metálica.

3.6 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentado um estudo em ambiente de simulação robótica da melhor localização para acoplar um projetor *laser* num manipulador industrial, atendendo a fatores relevantes inerentes aos requisitos do projeto em que esta dissertação se insere, bem como às características do projetor a ser utilizado.

De facto, em projetos industriais que envolvam cooperação homem-robô, é necessário criar todas as condições de segurança para salvaguardar a integridade do operador humano, bem como garantir que as próprias configurações dos sistemas são adequadas à presença do operador e a todas as tarefas a serem por ele realizadas.

Capítulo 4

Precisão, profundidade de foco e autofocus de um projetor DLP

Posteriormente, surgiu a necessidade de avaliar a precisão de calibração de um projetor DLP e analisar a profundidade de foco quando se varia o plano de projeção, mantendo a distância focal do projetor. No seguimento das questões de profundidade de foco, é interessante a criação de funções matemáticas para focagem automática do projetor.

A precisão de um projetor permite conhecer os erros geométricos associados à lente do dispositivo para, assim, ser possível corrigi-los quando se efetuam projeções. No entanto, a precisão de um projetor depende da qualidade da calibração efetuada. Quanto menor for o erro inerente à calibração do projetor, mais preciso este será.

Para se avaliar a precisão do projetor, é necessário utilizar uma câmara auxiliar que capte as imagens projetadas. A câmara funciona como *Ground Truth*, cujo termo significa que o conjunto de medidas que lhe está associado é muito mais preciso do que as medições do sistema que se está a testar, neste caso, o projetor.

Posto isto, a abordagem a tomar para avaliar a precisão do projetor foi a seguinte:

1. Criação do *setup* do sistema câmara-projetor;
2. Calibração da câmara:
 - 2.1. Cálculo dos parâmetros intrínsecos;
 - 2.2. Cálculo dos parâmetros extrínsecos.
3. Com o projetor perpendicular a um plano Z, focou-se-o para esse plano;
4. Calibração do projetor:
 - 4.1. Cálculo dos parâmetros intrínsecos;

4.2. Cálculo dos parâmetros extrínsecos.

5. Variação do Z do projetor, sem mexer no seu foco, e aplicação de algoritmos de profundidade de foco, de forma a avaliar qual a diferença de distância em Z aceitável para efetuar projeção sem que se perca qualidade significativa na focagem;
6. Criação de funções para focagem automática do projetor.

4.1 *Setup* do sistema câmara-projetor

As posições onde a câmara e o projetor se situaram foram determinadas tendo em conta a distância focal e a resolução das lentes da câmara e do projetor. A distância focal de uma lente é determinada quando a lente é focada no infinito. Através da distância focal, é possível calcular o ângulo de visão, ou seja, quanto do cenário será capturado, e a ampliação, isto é, quão grandes os elementos serão. Quanto maior for o valor da distância focal, mais pequeno é o ângulo de visão e maior é a ampliação [34].

Utilizou-se uma câmara Mako G-503B de resolução 2592x1944 píxeis (5 megapíxeis) com uma lente com distância focal fixa de 6 mm, e um projetor BenQ W1070 de resolução 1920x1080 píxeis que possui uma lente com distância focal variável entre 16.88 mm e 21.88 mm. Foi necessário focar o projetor e a câmara para o plano onde se projetaram e capturaram imagens. Para isso, ajustaram-se as distâncias focais da câmara e do projetor, de modo a encontrar o ponto de focagem mais adequado para cada dispositivo, em função da distância a que se encontravam do plano. De notar que uma lente com distância focal fixa é diferente de uma lente com foco fixo. É possível focar uma lente com distância focal fixa para diferentes distâncias, enquanto que uma lente com foco fixo destina-se a usar a uma única e específica distância de trabalho [35].

Além disso, a câmara e o projetor foram posicionados de forma a que permitissem, simultaneamente, que os padrões de xadrez físico e projetados, para calibrações da câmara e do projetor, respetivamente, ocupassem, pelo menos, 80% do tamanho da imagem. Este requisito é crucial, na medida em que influencia significativamente a qualidade das calibrações, como será explicado mais à frente. No entanto, deu-se prioridade aos padrões de xadrez projetados relativamente ao padrão de xadrez físico, uma vez que este último pôde ser impresso nas dimensões mais adequadas para cumprir o requisito imposto.

Assim, colocou-se o projetor perpendicular a uma parede, a cerca de 1720 mm distanciada da parede e a uma altura do chão de 80 cm. Por sua vez, a câmara foi assente num tripé e a sua lente encontrou-se a uma distância da parede de aproximadamente 1325 mm e a uma altura do chão de 1235 mm. Para capturar toda a projeção de luz proveniente do projetor, a câmara encontra-se orientada com um certo ângulo relativamente ao projetor (Figura 4.1, Figura 4.2).



Figura 4.1 - Setup câmara-projetor visto de uma perspetiva dianteira.

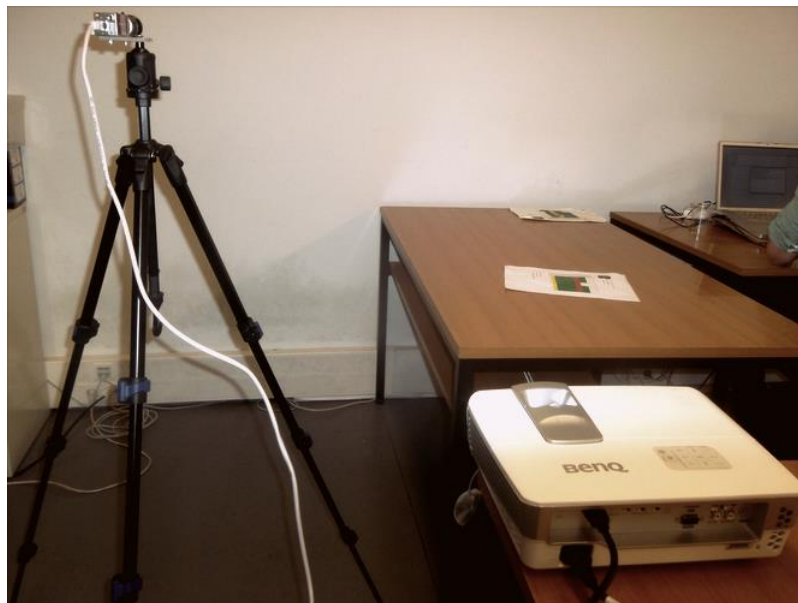


Figura 4.2 - Setup câmara-projetor visto de uma perspetiva traseira.

Durante toda a fase de testes que se seguiu, foram mantidas condições de iluminação artificial de tal forma que houvesse um bom contraste na projeção e aquisição de imagens e, assim, contribuir para melhores resultados. Além disso, configurou-se a câmara de modo a diminuir o máximo possível o ruído durante as aquisições de imagens. Já o projetor, foi configurado nos níveis de luminosidade e contraste.

4.2 Calibração da câmara

Apesar de serem descritas pelo modelo *pinhole*, as câmaras não são dispositivos perfeitos, pois possuem lentes com distorções associadas. Assim, é mandatário efetuar procedimentos de calibração para que se aproximem o mais fielmente possível de uma câmara *pinhole* verdadeira.

Neste caso em concreto, a calibração da câmara permite que, posteriormente, o projetor seja devidamente calibrado, nas duas primeiras metodologias de calibração de projetores aplicadas, com vista a calcular a precisão que lhe está associada.

A calibração de uma câmara consiste em adquirir várias imagens de um padrão de calibração (Figura 4.3), em diferentes posições e perspetivas. Para isso, o padrão pode estar fixo ou a mover-se dinamicamente em frente à câmara (Figura 4.4).

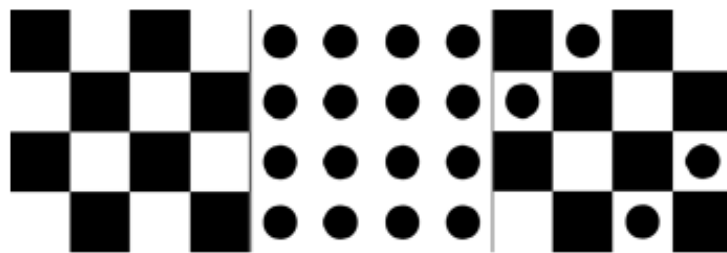


Figura 4.3 - Exemplos de padrões de calibração [61].



Figura 4.4 - Esquerda: padrão de xadrez 2D. Direita: equipamento de calibração portátil [41].

O padrão de calibração mais frequentemente usado é o padrão de xadrez, pelo que se utilizou esse padrão para a calibração, de forma dinâmica.

Parâmetros intrínsecos

A calibração dos parâmetros intrínsecos tem por finalidade determinar as características internas da câmara, nomeadamente as distâncias focais (f_x , f_y), o skew (ângulo entre os eixos x e y da câmara) e o píxel central da imagem (C_x , C_y).

O píxel central corresponde ao centro ótico da câmara, ou seja, é o ponto onde o eixo ótico interseja o plano da imagem. Idealmente, o píxel central seria exatamente metade da resolução das imagens nas duas componentes (x, y) e as distâncias focais seriam iguais, visto

que o referencial da câmara seria paralelo ao plano da imagem, e calculadas através da equação 4.1. Para o cálculo das distâncias focais, tem-se em conta o *field of view* (fov) da lente.

$$f_x = f_y = \frac{C_x}{\tan \frac{fov}{2}} \quad (4.1)$$

Além disso, através do cálculo dos parâmetros intrínsecos, é possível determinar a distorção introduzida pela lente usada na câmara. Os coeficientes de distorção compreendem fatores radiais e tangenciais. A distorção radial ocorre quando os raios de luz curvam mais nos cantos da lente do que no seu centro ótico (Figura 4.5). Quanto menor for a lente, maior será a distorção radial que lhe está inerente. A distorção tangencial ocorre quando as lentes e o plano da imagem não são paralelos (Figura 4.6). Assim, os coeficientes de distorção tangencial modelam este tipo de distorção.

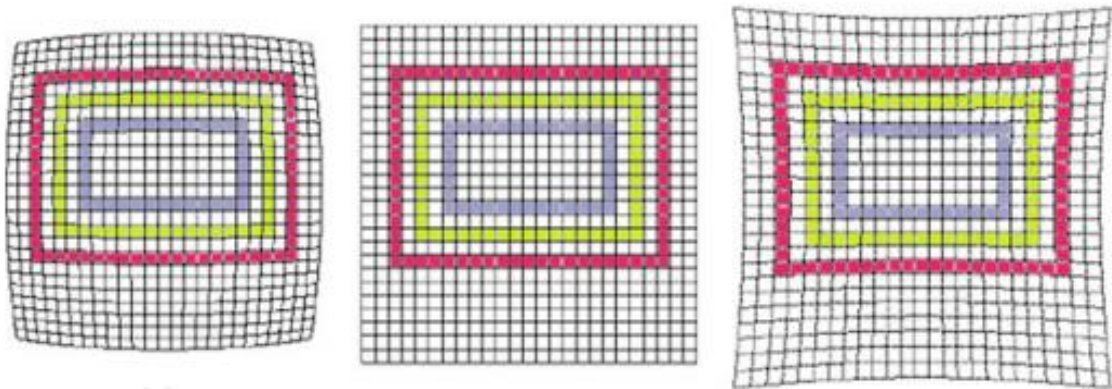


Figura 4.5 - Da esquerda para a direita: distorção radial negativa, ausência de distorção, distorção radial positiva [41].

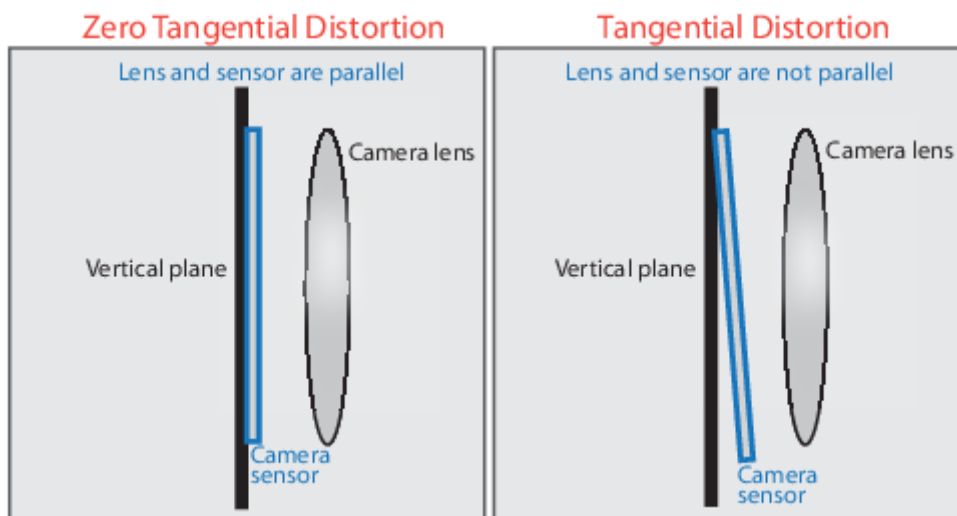


Figura 4.6 - Imagem representativa do conceito de distorção tangencial [62].

Após se determinarem os coeficientes de distorção, as imagens podem e devem ser corrigidas para, assim, a câmara ser interpretada como uma implementação do modelo *pinhole*. As equações 4.2 e 4.3 permitem corrigir a distorção radial e as equações 4.4 e 4.5 possibilitam retificar a distorção tangencial introduzida na lente.

$$x_{\text{corrigido}} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \quad (4.2)$$

$$y_{\text{corrigido}} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \quad (4.3)$$

$$x_{\text{corrigido}} = x + [2 * p_1 * x * y + p_2 * (r^2 + 2 * x^2)] \quad (4.4)$$

$$y_{\text{corrigido}} = y + [p_1 * (r^2 + 2 * y^2) + 2 * p_2 * x * y] \quad (4.5)$$

Nas equações anteriores, os x e y correspondem às localizações dos pixels com distorção, os k 's e p 's aos coeficientes de distorção radial e tangencial, respetivamente. As equações referentes à correção da distorção radial apresentam apenas 3 coeficientes, no entanto, é possível calcular até 5 coeficientes e adaptar essas equações consoante o número de coeficientes que se pretende determinar. Por fim, o r é calculado através da equação 4.6.

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (4.6)$$

A calibração da câmara foi feita recorrendo à *toolbox* de calibração de câmaras do Matlab 2015 e também a um código implementado em C++ que utiliza a biblioteca de visão computacional OpenCV, com o objetivo de, após comparar os resultados obtidos em ambos, utilizar os valores mais fidedignos.

Tendo por finalidade obter a melhor precisão de calibração possível, procedeu-se da seguinte forma:

1. Utilizou-se um padrão de xadrez, assente numa superfície plana para um correto reconhecimento dos seus cantos;
2. Capturaram-se imagens do padrão de xadrez estando este em orientações tridimensionais diferentes. O padrão de xadrez foi posicionado de forma a que se tenham pontos em todo o campo de visão e próximos das bordas e dos cantos da imagem, a fim de se obter uma melhor estimativa dos coeficientes de distorção. No entanto, evitaram-se ângulos superiores a 45°, pois, a partir desse valor, o reconhecimento dos cantos não é tão rigoroso. Também com vista a calcular corretamente os coeficientes de distorção, utilizou-se um padrão de xadrez suficientemente grande, em tamanho A1, para ocupar, pelo menos, 80% da imagem capturada;

3. Determinou-se o máximo de coeficientes de distorção radial possível (3 com o Matlab e 6 com o OpenCV), os coeficientes de distorção tangencial e o skew [36]. Quanto mais coeficientes de distorção foram calculados, mais correto é o modelo da distorção associada à lente e, conseqüentemente, melhor se corrige a distorção que a lente possui;
4. Na presença de imagens com um erro de reprojeção elevado, eliminaram-se essas imagens e procedeu-se a uma recalibração [36];

Inicialmente, de modo a ter uma amostra significativa de imagens, capturaram-se cerca de 100 imagens do padrão de xadrez, de dimensões 6x9. Depois, o ponto 4 referido anteriormente foi repetido inúmeras vezes até que se alcançassem bons resultados de calibração, tendo-se utilizado um conjunto de 15 imagens de padrões de xadrez, com diferentes posições e perspectivas (Figura 4.7).

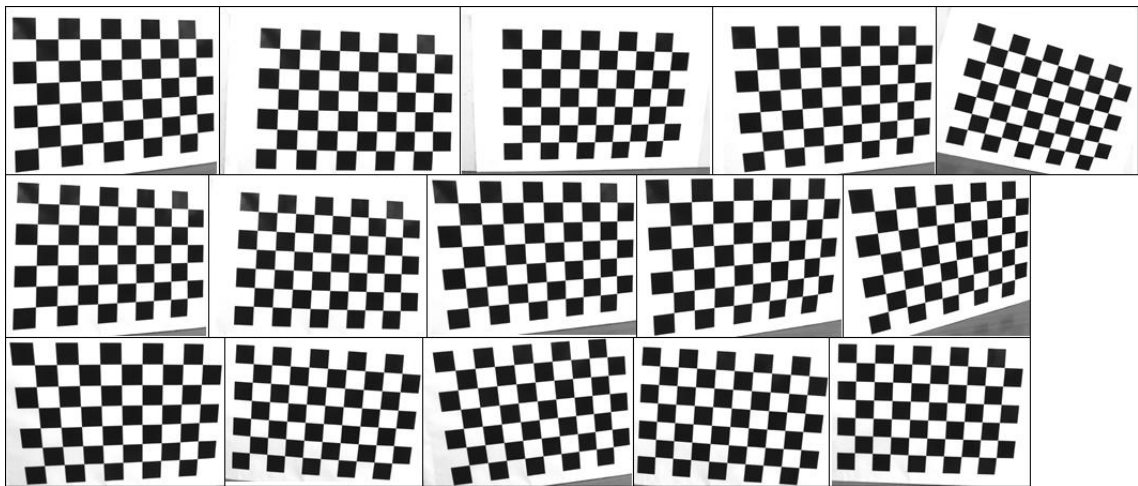


Figura 4.7 - Imagens utilizadas para a calibração da câmara.

Com este conjunto de imagens, identificaram-se e extraíram-se os cantos do padrão de xadrez para se obter um conjunto de pontos de correspondências entre as coordenadas da imagem e as coordenadas no mundo. Depois de se adquirirem essas correspondências, determinaram-se, primeiro, as características intrínsecas da câmara e, depois, os parâmetros extrínsecos (Figura 4.8).

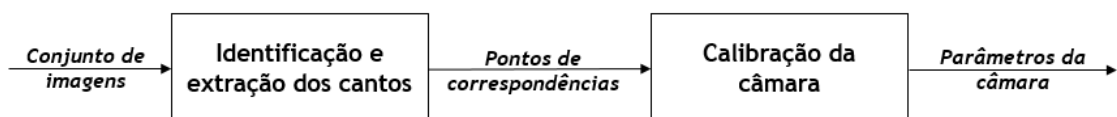


Figura 4.8 - Esquema representativo do procedimento referente à calibração de uma câmara.

O erro de reprojeção, RMS , associado a estas medidas corresponde às diferenças entre os pontos projetados/calculados e os pontos observados/medidos. É com base neste erro que se mede a qualidade da calibração efetuada.

$$RMS = \sum \sqrt{\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{N}} \quad (4.7)$$

Para o mesmo conjunto de imagens, quanto mais próximo de zero for o erro de reprojeção, mais exata é a calibração.

Apesar de tanto o OpenCV como o Matlab aplicarem o algoritmo de Bouguet [37] para calibração, existem algumas diferenças no que diz respeito à deteção do padrão de xadrez. Para a deteção do padrão de xadrez, o Matlab analisa os padrões dos cantos detetados (Figura 4.9). Já o OpenCV baseia-se num gráfico com quadrados conectados entre si (Figura 4.10). Para otimização da calibração, o Matlab utiliza o algoritmo dos mínimos quadrados não linear de Levenber-Marquardt [38], enquanto com o OpenCV é possível utilizar três métodos [39], em que um dos quais é também o método iterativo de Levenber-Marquardt. O método de Levenber-Marquardt tem como objetivo encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias entre os pontos calculados e os pontos medidos seja a menor possível.

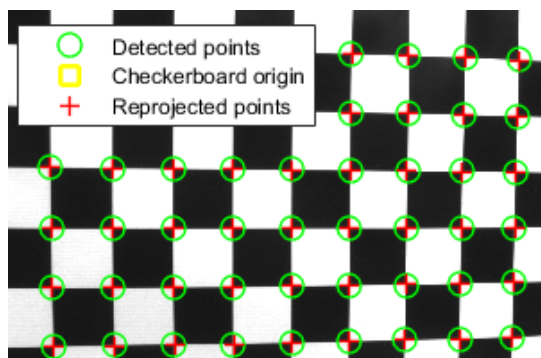


Figura 4.9 - Identificação dos cantos do padrão de xadrez no Matlab.

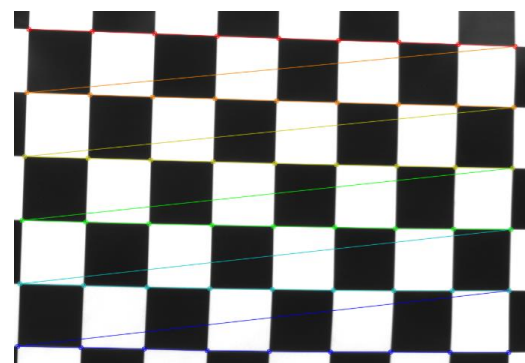


Figura 4.10 - Identificação dos cantos do padrão de xadrez no OpenCV.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados dos parâmetros intrínsecos obtidos no Matlab e no OpenCV.

Na Tabela 4.1 apenas são apresentados os valores dos parâmetros intrínsecos quando se utiliza o método de Levenber-Marquardt, dado que ao utilizar os outros dois métodos alcançaram-se erros de reprojeção mais elevados.

	Valores
Distância focal (f_x, f_y)	[2716.207554, 2712.703097] px
Coefficientes de distorção ($k_1 k_2 p_1 p_2 k_3$)	[-0.095690, 0.344213, 0.000087, 0.000740, -5.521365, 0.084326, 0.160419, -5.783139]
Ponto Central (C_x, C_y)	[1343.424174, 975.149678] px
Skew	[0.0000] → 90.0°
Erro de reprojeção	0.086514 px

Tabela 4.1 - Parâmetros intrínsecos da calibração da câmara com o OpenCV.

	Valores	Erro associado
Distância focal (f_x, f_y)	[2719.5, 2716.3] px	[4.1192, 4.2499] px
Coefficientes de distorção ($k_1 k_2 p_1 p_2 k_3$)	[- 0.1837, 0.2421, 0.00011094, 0.00051466, -0.0482]	[0.00089568, 0.0073, 0.000032245, 0.00011883, 0.0202]
Ponto Central (C_x, C_y)	[1344.6, 973.4243] px	[1.0140, 0.5491] px
Skew	[0.0000] → 90.0°	[0.0000] → 0.0°
Erro de reprojeção	0.0759 px	-

Tabela 4.2 - Parâmetros intrínsecos da calibração da câmara com o Matlab.

Para o mesmo conjunto de imagens, quanto mais próximo de zero for o erro de reprojeção, mais exata é a calibração. Como o Matlab devolve um erro de reprojeção menor, optou-se por utilizar os parâmetros por ele calculados. Para além disso, o Matlab tem a vantagem de calcular os erros de estimativa associado a cada valor que calcula, como se pôde verificar na Tabela 4.2. Os erros de estimativa representam a incerteza de cada parâmetro estimado. Esse cálculo é vantajoso na medida em que auxilia a validação ou não da calibração feita. Isto, porque, mesmo que se obtenha um erro de reprojeção baixo, se o erro associado ao ponto central e/ou à distância focal não for relativamente baixo, deve-se proceder a uma nova calibração.

Parâmetros extrínsecos

Por sua vez, os parâmetros extrínsecos permitem relacionar o referencial da câmara com o referencial do mundo, através de uma rotação e uma translação. Isto é equivalente a calcular a transformação homogénea entre a câmara e o padrão de calibração.

A origem do sistema de coordenadas da câmara coincide com o seu eixo ótico, e o x e o y definem o plano da imagem (Figura 4.11).

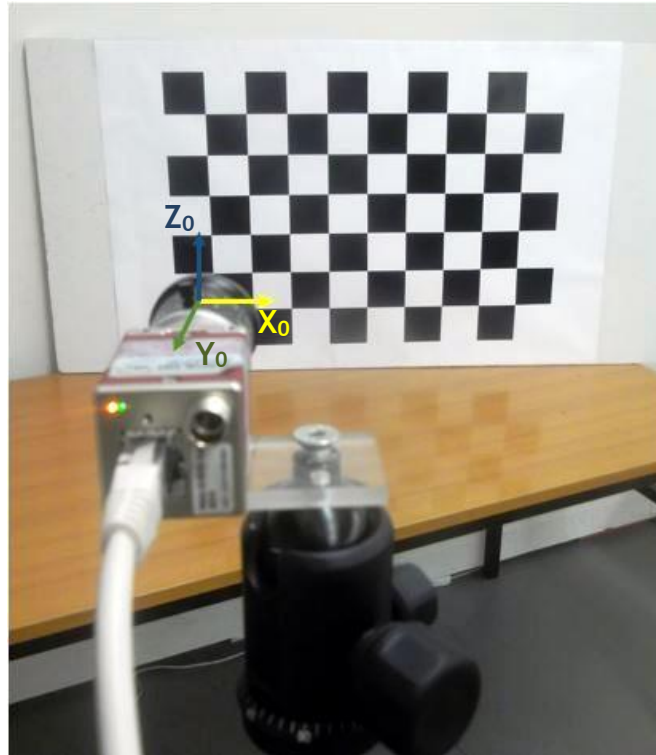


Figura 4.11 - Sistema de coordenadas da câmara.

Cada localização do padrão de calibração num cenário 3D distinto corresponde a um sistema de coordenadas no mundo diferente (Figura 4.12).

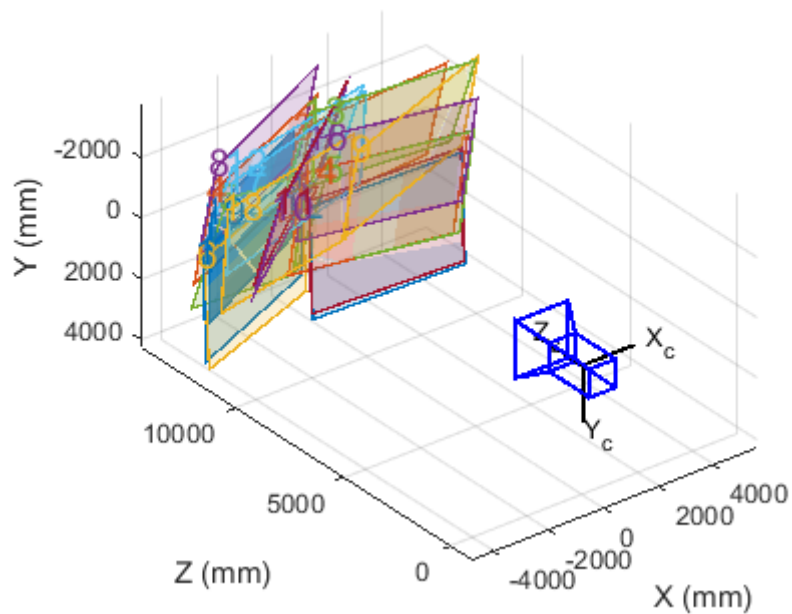


Figura 4.12 - Visualização dos parâmetros extrínsecos.

Assim, para definir o referencial do mundo, selecionou-se uma das imagens usadas durante o processo de calibração da câmara (Figura 4.13).

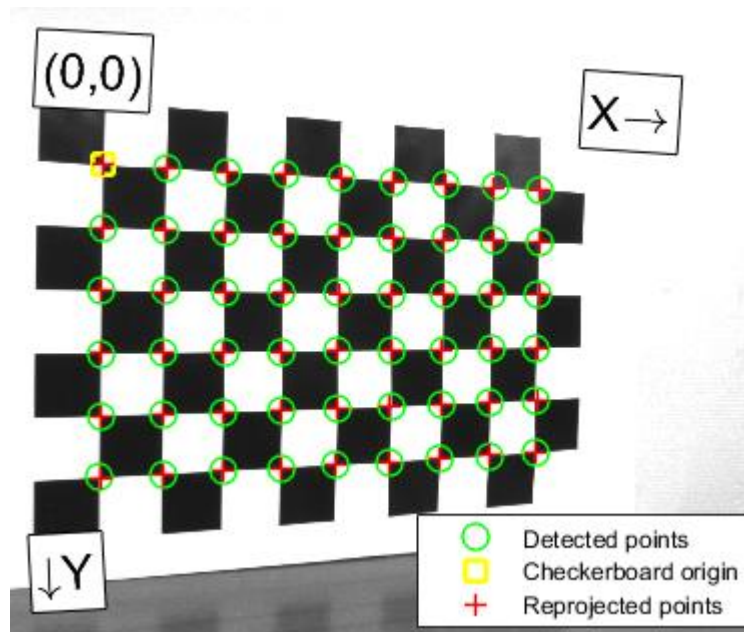


Figura 4.13 - Sistema de coordenadas do mundo arbitrariamente escolhido.

Este processo foi realizado com recurso à *toolbox* de calibração do Matlab R2015a, após se calcularem os parâmetros intrínsecos da câmara. Seguidamente, apresentam-se as matrizes obtidas referentes à rotação e translação entre a câmara e o padrão de xadrez escolhido para representar o referencial do mundo.

$$H_{Mundo}^{Câmara} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$R = \begin{bmatrix} -0.9610 & -0.0332 & -0.2746 \\ 0.0440 & -0.9985 & -0.0332 \\ -0.2731 & -0.0440 & 0.9610 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$T = \begin{bmatrix} 341 \\ 824.8838 \\ 1675 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

À semelhança dos parâmetros intrínsecos, também é possível ter conhecimento dos erros associados aos valores de rotação e de translação calculados.

$$R_{erro} = \begin{bmatrix} 0.00086590 \\ 0.00035523 \\ 0.00015176 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$T_{erro} = \begin{bmatrix} 10.0495 \\ 2.7240 \\ 26.1380 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Os valores destes erros podem ser considerados bons, uma vez que são relativamente baixos face aos valores das matrizes 4.9 e 4.10.

4.3 Calibração do projetor

O processo inerente à calibração de um projetor é em tudo semelhante ao procedimento adotado para calibrar a câmara e baseia-se no mesmo algoritmo. No entanto, como a calibração do projetor é feita com imagens capturadas pela câmara anteriormente calibrada, é necessário remover nessas imagens a distorção introduzida pela lente da câmara, tendo em conta os parâmetros intrínsecos da câmara (Figura 4.14). Desta forma, as imagens projetadas apenas terão a distorção proveniente da lente do projetor, conduzindo a resultados verídicos no que diz respeito ao cálculo dos parâmetros do projetor.

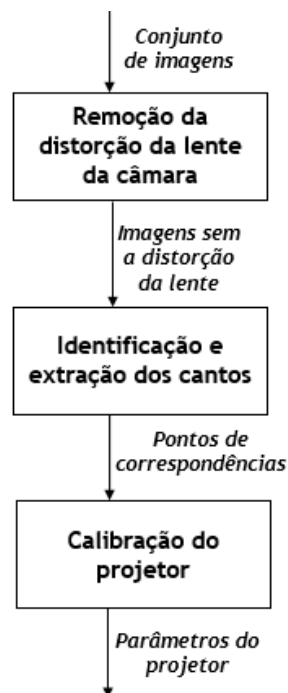


Figura 4.14 - Esquema representativo do procedimento referente à calibração de uma câmara.

A calibração do projetor fez-se aplicando 3 metodologias distintas, de forma a comparar os resultados obtidos e determinar qual a que permite uma maior fiabilidade. Numa primeira fase,

aplicaram-se operações geométricas a um padrão de xadrez, que foram posteriormente projetados. Depois, alteraram-se as posições de um dos dispositivos aquando das projeções. Por último, utilizou-se o *software* de calibração de luz estruturada desenvolvido pela *Brown University School of Engineering* [40].

Nas duas primeiras metodologias, obteve-se uma amostra significativa de padrões de xadrez. Esses padrões de xadrez foram projetados e capturados pela câmara. Depois, procedeu-se à calibração do projetor usando como *input* as imagens da câmara. Na presença de imagens com um grande erro de reprojeção, descartaram-se essas imagens e realizou-se uma nova calibração, nunca esquecendo que é crucial utilizar um conjunto de imagens com orientações tridimensionais diferentes. O processo de recalibração foi repetido várias vezes, até se alcançar um erro de reprojeção razoável. Estas duas metodologias foram aplicadas através de um código implementado em C++ com funções do OpenCV e de um outro código desenvolvido em Matlab, com vista a comparar os resultados obtidos.

4.3.1 Aplicação de operações geométricas a um padrão de xadrez

Depois, mantendo fixas as posições da câmara e do projetor, aplicaram-se diferentes operações geométricas a uma imagem de padrão de xadrez (Figura 4.15). As operações geométricas aplicadas basearam-se em combinações de transformações de perspectiva, transformações afim, fatores de escala e transformações euclidianas. Desta forma, obteve-se um conjunto de imagens de padrões de xadrez em orientações tridimensionais diferentes. Estas transformações ao padrão de xadrez original foram realizadas com recurso à biblioteca Opencv.





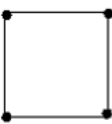


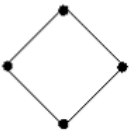
Transformação	Antes	Depois
Perspetiva		
Afim		
Escalonamento		
Euclidiana		

Figura 4.15 - Transformações geométricas (Adaptado de [63]).

Após o processo repetitivo de recalibração, utilizou-se o conjunto de imagens da Figura 4.16.

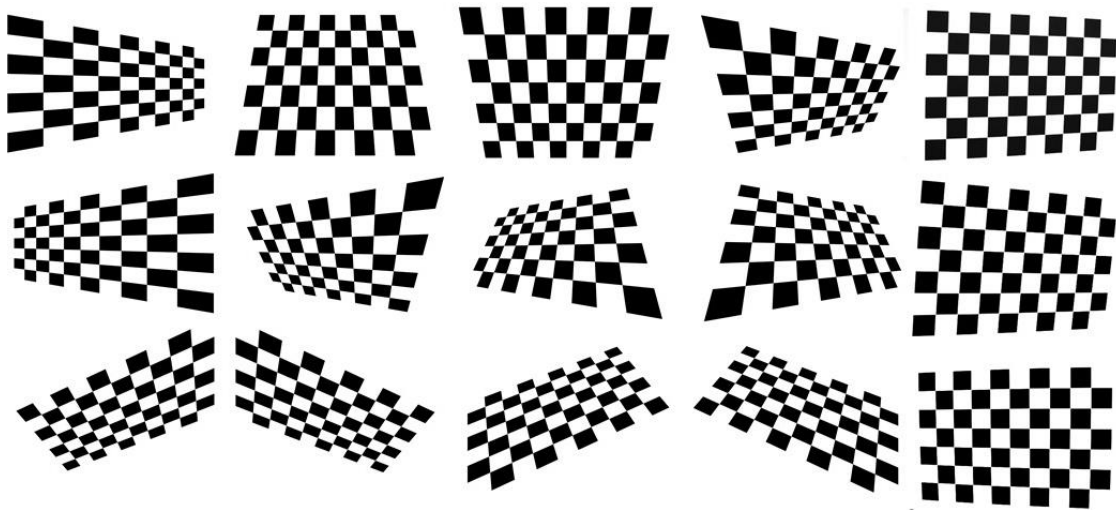


Figura 4.16 - Conjunto de imagens utilizado na primeira abordagem de calibração do projetor.

Obteve-se um erro de reprojeção de **0.502311** píxeis na calibração com o OpenCV e um erro de **0.4299** píxeis na calibração com o Matlab.

4.3.2 Alteração da posição de um dos dispositivos

Visto que a calibração de câmaras e projetores consiste em utilizar uma amostra de padrões de xadrez de várias perspectivas, alterou-se, repetidamente, a posição e orientação de um dos dispositivos, mantendo o outro fixo, de modo a obter um conjunto de imagens com orientações tridimensionais diferentes. Assim, optou-se por manter o projetor fixo e movimentar a câmara, pelo simples motivo de que a câmara se encontrava assente num tripé, facilitando o seu deslocamento e variação de alturas e orientações.

Após o repetitivo processo de recalibração, utilizou-se o conjunto de imagens da Figura 4.17.

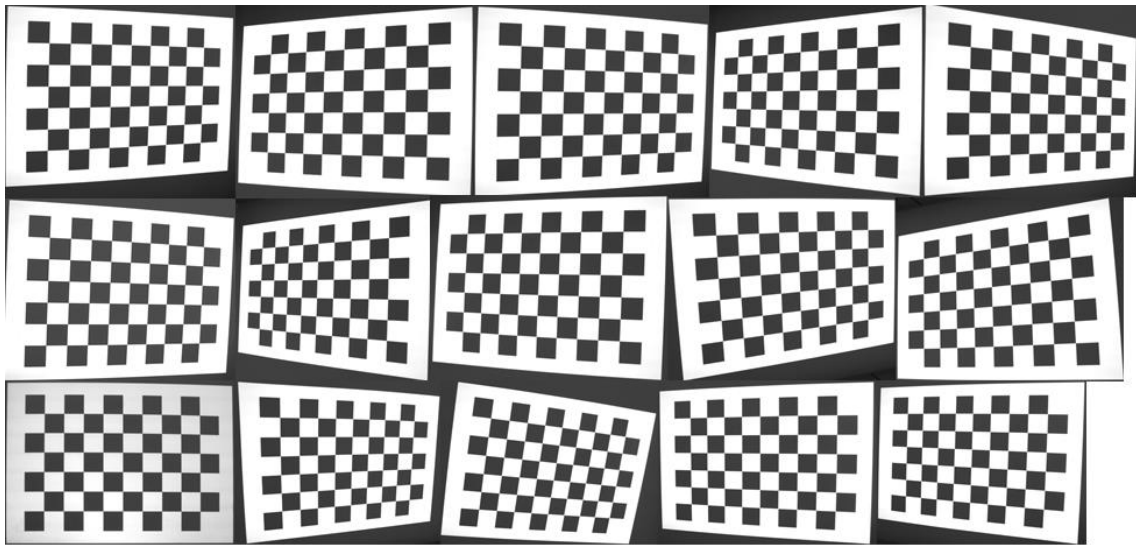


Figura 4.17 - Conjunto de imagens utilizado na segunda abordagem de calibração do projetor.

Obteve-se um erro de reprojeção de **0.227659** píxeis na calibração com o OpenCV e um erro de **0.2105** píxeis na calibração com o Matlab.

Nestas 2 metodologias, e à semelhança do que se concluiu com os resultados da calibração da câmara, obteve-se um erro de reprojeção inferior com o Matlab, para o mesmo conjunto de imagens de padrões de xadrez.

4.3.3 Software de calibração de luz estruturada

Por último, recorreu-se ao *software* de calibração de luz estruturada desenvolvido pela *Brown University School of Engineering* [40].

A luz estruturada consiste na projeção de padrões de luz sobre objetos cuja forma se pretende recuperar (Figura 4.18). Usualmente, utiliza-se uma câmara e um projetor, e através da calibração é possível saber a posição da fonte de luz em relação à câmara. Além disso, é possível calcular os parâmetros intrínsecos de ambos os dispositivos, quando o objeto sobre o qual se faz projeção é um padrão de calibração [41].

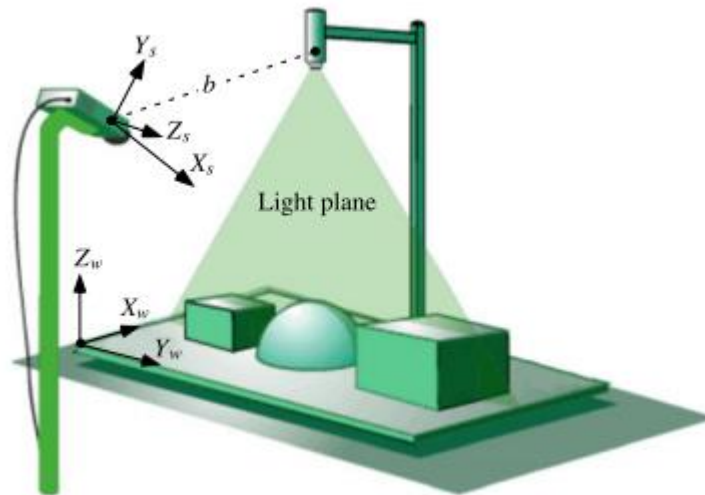


Figura 4.18 - O projetor projeta um plano de luz que faz varrimento em objetos de interesse [41].

São projetados vários padrões binários, que consistem em colunas ou linhas brancas e pretas (Figura 4.19). É projetado um padrão de cada vez, iluminando diferentes pontos da superfície, alternadamente, através das colunas ou linhas brancas, sendo a luz bloqueada pelas colunas ou linhas pretas (1 = iluminado, 0 = não iluminado). A metodologia aplicada utiliza homografias locais, em vez de globais, para medir com precisão subpíxel os níveis de cinzento e, assim, localizar o plano de luz projetado.

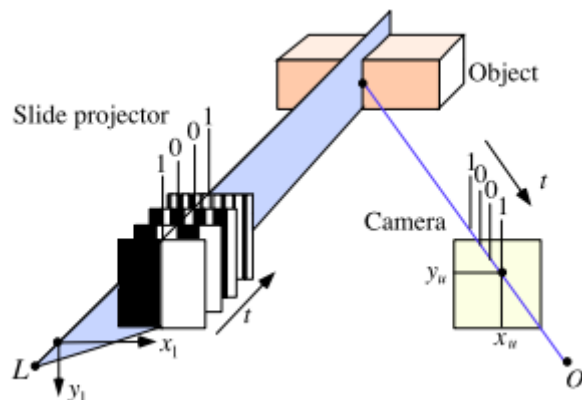


Figura 4.19 - Plano de luz definido por colunas consecutivas de padrões binários [41].

Ao contrário das duas abordagens anteriores, esta não necessita que a câmara utilizada seja previamente calibrada. Aqui, a câmara e o projetor são calibrados em simultâneo.

Assim, utilizou-se este sistema para projetar padrões de luz estruturada, com o projetor, sobre um padrão de calibração, e a câmara para adquirir as imagens (Figura 4.20). Este processo foi repetido para diferentes orientações tridimensionais do padrão de xadrez.

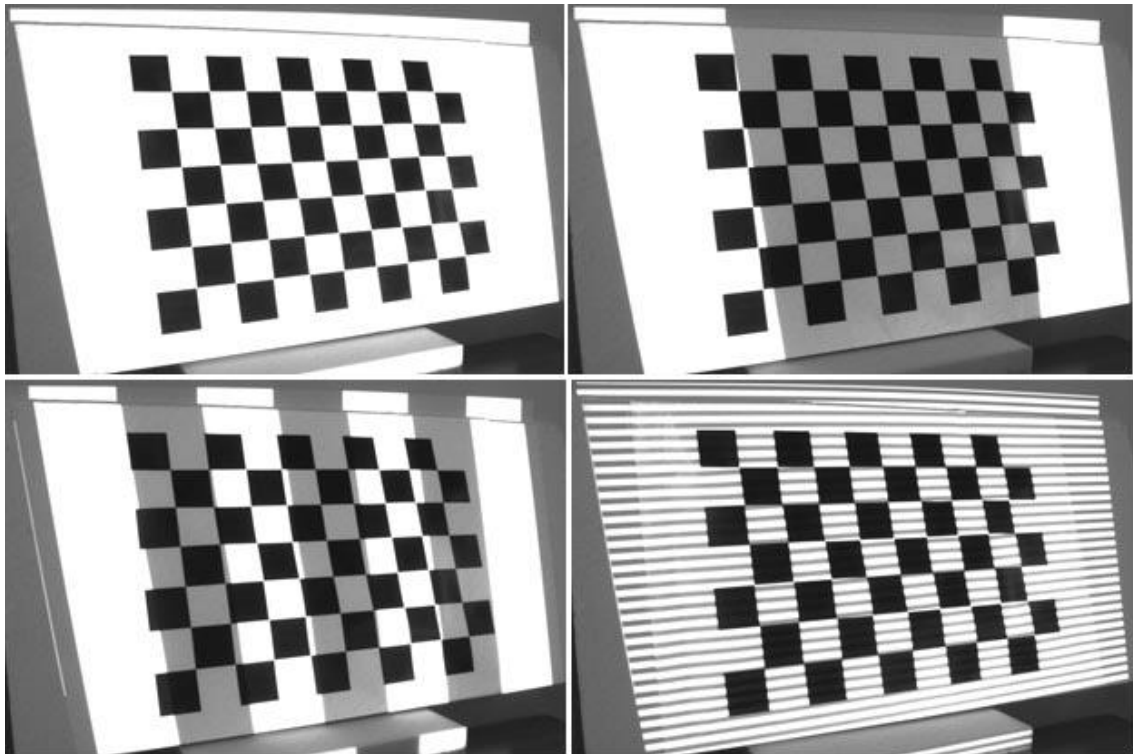


Figura 4.20 - Projeção de luz estruturada sobre um padrão de xadrez.

Seguidamente, procedeu-se à calibração, obtendo-se como saídas os parâmetros intrínsecos do projetor e da câmara, e os parâmetros extrínsecos da câmara em relação ao projetor.

Na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados da calibração intrínseca da câmara e do projetor, respetivamente.

	Valores
Distância focal (f_x, f_y)	[2922.549501, 2937.560084] px
Coefficientes de distorção ($k_1 k_2 p_1 p_2 k_3$)	[-0.169437, 0.182838, -0.004016, -0.000852, 0]
Ponto Central (C_x, C_y)	[1477.980705, 887.518994] px
Skew	[0.0000] → 90.0°
Erro de reprojeção	0.159113 px

Tabela 4.3 - Parâmetros intrínsecos da calibração da câmara com o *software* de luz estruturada.

	Valores
Distância focal (f_x, f_y)	[1446.672352, 1442.638680] px
Coefficientes de distorção ($k_1 k_2 p_1 p_2 k_3$)	[0.070810, -0.356433, -0.011533, -0.000016076, 0]
Ponto Central (C_x, C_y)	[959.9896, 540.1452] px
Skew	[0.0000] → 90.0°
Erro de reprojeção	0.069916 px

Tabela 4.4 - Parâmetros intrínsecos da calibração do projetor com o *software* de luz estruturada.

Analisando os resultados apresentados, conclui-se que seguindo esta metodologia se obtém um erro de reprojeção inferior para a calibração do projetor, face às duas metodologias apresentadas anteriormente. No entanto, no que diz respeito à calibração da câmara, o erro de reprojeção é mais elevado, comparativamente aos resultados apresentados na secção de calibração da câmara.

Parâmetros extrínsecos

No que diz respeito à transformação entre a câmara e o projetor (Figura 4.21), obtiveram-se os seguintes valores de rotação e translação, com um **erro de reprojeção** associado de **0.299892** píxeis. Este erro é aceitável, uma vez que, idealmente, deve ser inferior a 1 píxel.

$$H_{Proj\acute{e}tor}^{C\acute{a}mara} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.935619 & 0.009922 & 0.352871 \\ -0.013036 & 0.999894 & 0.0064450 \\ -0.352770 & -0.010635 & 0.935650 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$T = \begin{bmatrix} -312.759504 \\ -229.450774 \\ 211.403982 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

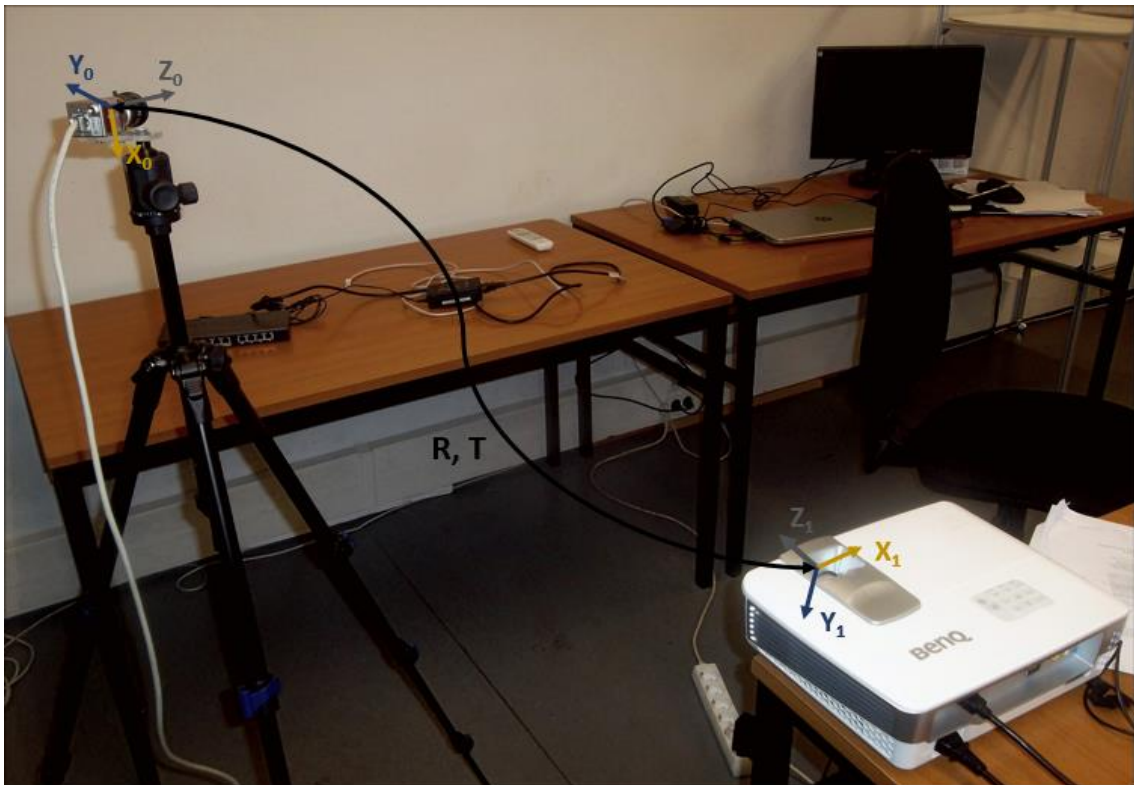


Figura 4.21 - Parâmetros extrínsecos da câmara em relação ao projetor.

Tendo a transformação entre a câmara e o projetor, e a relação entre os sistemas de coordenadas da câmara e do mundo, é possível calcular a transformação entre os referenciais do projetor e do mundo através da equação 4.16.

$$H_{Mundo}^{Projetor} = (H_{Projetor}^{Câmara})^{-1} * H_{Mundo}^{Câmara} \quad (4.16)$$

4.4 Profundidade de foco

A estimação ou extração de profundidade refere-se ao conjunto de técnicas e algoritmos que tem por objetivo obter uma representação da estrutura espacial de um cenário. Por outras palavras, consiste em obter a medida de distância de cada ponto de um cenário.

No contexto deste trabalho, em que uma das finalidades é fazer projeção num objeto tridimensional do espaço, em vigas metálicas, o cenário em causa é 3D. Um cenário é sempre visto de um ponto específico, e a imagem que é vista de um determinado ponto denomina-se projeção do cenário. Essa projeção é formada por um conjunto de raios que cruzam uma abertura limitada alcançando, assim, o plano de projeção (Figura 4.22).

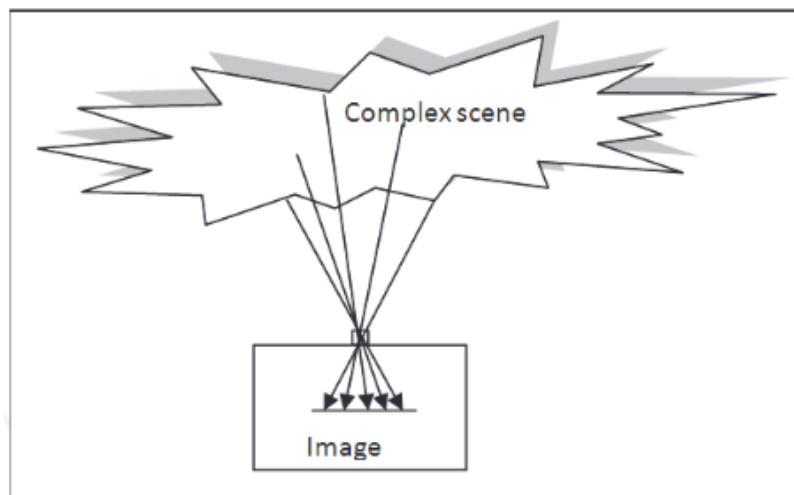


Figura 4.22 - Cenário 3D projetado num plano [42].

Este tipo de projeção possui algumas características relevantes [42]:

- A consequência mais evidente resultante de um projeção é a perda de uma dimensão. Dado que em cada pixel apenas um ponto da cena real é projetada, a informação de profundidade é matematicamente eliminada durante o processo de projeção;

- No entanto, a projeção de um cenário tem também vantagens. Por um lado, a carga computacional é reduzida: lidar com imagens 2D é muito mais simples do que gerir dados 3D. Por outro lado, é possível fazer projeção por dispositivos bem conhecidos e desenvolvidos.

De facto, a estimação de profundidade é um campo de pesquisa bastante complexo, onde muitas técnicas e configurações têm sido propostas. O conjunto de algoritmos existentes capaz de resolver problemas de estimação de profundidade engloba uma variedade de conceitos matemáticos. De entre esses conceitos, e no âmbito do trabalho desenvolvido, destacam-se a extração de pontos e contornos (*edges*), a medida de foco e a segmentação de região.

Extração de pontos e *edges*

Pontos e *edges* são fatores importantes numa imagem, e são frequentemente usados como descritores. Assim, devem ser extraídos ou identificados numa imagem. Tanto os *edges* como os pontos podem ser obtidos através de diferentes operadores espaciais. A Figura 4.23 mostra alguns operadores típicos usados para extração de características.

Os algoritmos de medida de foco, apresentados mais à frente, baseiam-se na extração de pontos e *edges*.

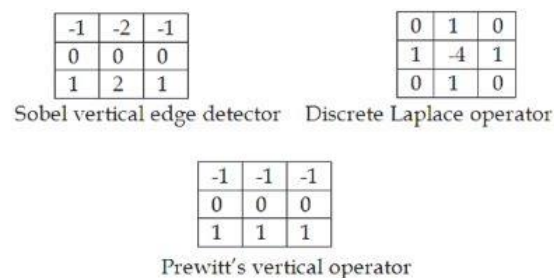


Figura 4.23 - Três exemplos de operadores de processamento de imagem: Sobel, Laplace e Prewitt [42].

Medida de foco

No que diz respeito à medida de foco, é de realçar que nem todos os pontos numa projeção estão focados, uma vez que a abertura do sensor é finita. Este efeito, aplicável tanto a sistemas visuais sintéticos como humanos, produz um ruído gaussiano na imagem projetada, proporcional à distância de um determinado ponto em relação ao plano focado (Figura 4.24).

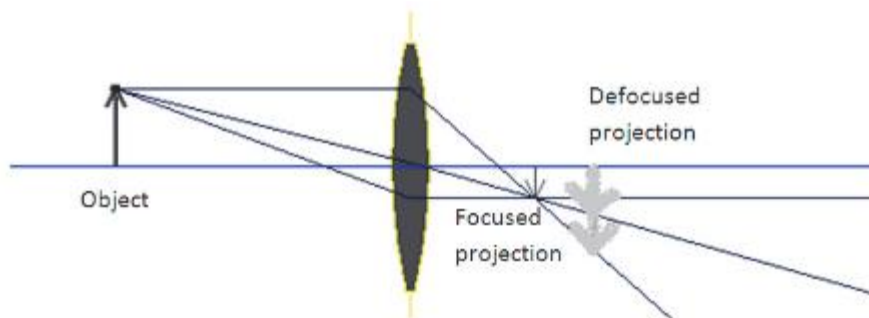


Figura 4.24 - Esquema de focagem e de desfocagem [42].

Segmentação da região

A segmentação de uma região é uma abordagem conceitual baseada em semelhanças nos pixels adjacentes. A imagem é cortada em regiões homogêneas que não se sobrepõem e que se baseiam numa característica específica [42].

Em termos matemáticos, seja Ω o domínio da imagem. As regiões segmentadas podem-se representar como se vê na equação 4.17, em que S_k é a região k-ésima e $S_k \cap S_j = 0$ para $k \neq j$.

$$\Omega = \sum_{k=1}^K S_k \quad (4.17)$$

Assim, para uma maior robustez, os algoritmos de medida de foco são aplicados a uma janela local, Ω [43].

4.4.1 Percepção visual humana de profundidade

Em visão computacional, o sistema visual humano representa uma importante fonte de inspiração. Assim, os algoritmos existentes tentam assemelhar-se a algumas predisposições humanas. No âmbito deste trabalho, destaca-se a capacidade de estimação de profundidade.

O sistema visual humano pode considerar-se como um conjunto de funções ou dispositivos capazes de perceber, dinâmica e adequadamente, profundidade. Esta percepção é possível graças à combinação de diferentes e complementares estruturas e funções fisiológicas e psicológicas [42]:

1. **Dois olhos:** a fonte mais importante de percepção de profundidade são os dois olhos, pois partilham a mesma área de visão. No entanto, este fator só é válido quando se olha para algo colocado no infinito (Figura 4.25).

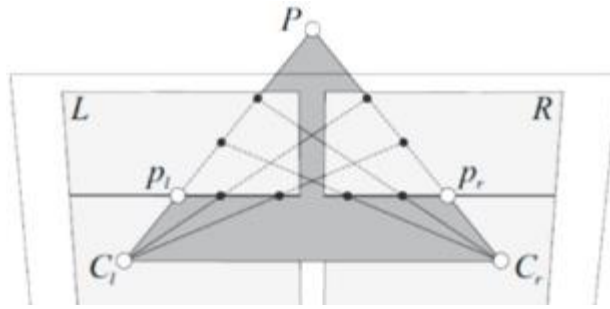


Figura 4.25 - Geometria epipolar de um sistema de visão *stereo* numa configuração frente-paralela [68].

C_l e C_r correspondem aos centros focais dos olhos esquerdo e direito, sendo L e R os planos da imagem esquerdo e direito. Por último, P é o ponto físico do cenário, e p_l e p_r são as projeções de P sobre L e R, respetivamente. Aqui, os epipólos são localizados no infinito e a linha epipolar é horizontal.

As consequências mais importantes desta geometria são:

- $Y_L = Y_R$: a altura de um ponto físico é o mesmo em ambas as imagens;
 - Um ponto localizado no infinito tem abcissas iguais em ambos os planos da imagem.
2. **Foco:** o cristalino é um tecido elástico que permite variar a distância focal do olho e, assim, focar para uma vasta gama de distâncias. Esta informação ajuda o cérebro a calcular a distância a que se está do plano focado.
 3. **Diferenças de brilho:** na presença de uma iluminação constante, a profundidade pode ser percebida em termos de brilho (Figura 4.26). Este método é aplicado para ajudar o cérebro a ter percepção de distâncias.



Figura 4.26 - Percepção de profundidade devido a diferenças de brilho [42].

4. Por último, a **estrutura da imagem percebida** pode providenciar alguma informação de profundidade. No entanto, o cérebro pode cometer alguns erros quando estima distâncias através deste método (Figura 4.27).



Figura 4.27 - Deformação visual de tamanhos devido à percepção de estrutura de profundidade [42].

4.4.2 Métodos de estimação de profundidade

Os métodos de estimação de profundidade existentes podem-se dividir em métodos ativos e métodos passivos.

Os métodos ativos colocam energia no cenário, projetando raios de luz com o objetivo de iluminar o espaço e processar a energia refletida. Um exemplo de um método ativo é a projeção de padrões de luz estruturada (Figura 4.28) explicado no subcapítulo anterior. Comparativamente aos métodos passivos, têm a desvantagem de precisarem de mais energia e de necessitarem de interação física com o cenário [43].



Figura 4.28 - Esquerda: Configuração da câmera e do projetor em relação ao objeto; Direita: Projeção dos padrões de luz estruturada [67].

Já os métodos passivos são aqueles que se aplicam na presença de luz natural no ambiente e utilizam informação ótica da imagem capturada. Ou seja, a reflexão dos raios de luz é capturada sem qualquer projeção adicional. Aqui, existem diversos algoritmos, que se podem dividir em soluções monoculares e *stereo*.

No trabalho realizado, apenas se deu ênfase aos métodos passivos, dadas as desvantagens dos métodos ativos, numa abordagem monocular. Uma solução monocular usa apenas uma imagem para obter um mapa de profundidade. A principal característica desta abordagem é a perda de características de profundidade durante a projeção da cena no plano da imagem, e

uma vantagem que usualmente lhe está associada consiste nas poucas operações necessárias para processar apenas uma imagem, em vez de duas ou mais.

A única análise que fornece uma medida absoluta da distância com informação monocular baseia-se nas propriedades de foco da imagem. Esta análise estima a distância de cada ponto na imagem pelo cálculo do nível de desfocagem dos pontos, seguindo o sistema de focagem visual humano. Quando as propriedades óticas do dispositivo são bem conhecidas, os píxeis focados fornecem uma medida exata da distância entre o alvo de projeção e o dispositivo [45].

Métodos Passivos

Os algoritmos usados para medir o nível de foco dos píxeis de uma imagem são usualmente conhecidos como operadores de medida de foco, do inglês *focus measure operators*. Uma medida de foco é uma quantidade utilizada para calcular localmente a nitidez dos píxeis. Por outras palavras, é aplicada para calcular o valor de foco de todos os píxeis numa sequência de imagens, alcançando, assim, um volume de foco. De entre estes operadores, destacam-se os algoritmos de autofocus (AF) e de forma de foco (SFF), do inglês *shape-from-focus*.

Os algoritmos de AF avaliam o grau de desfocagem de imagens capturadas com diferentes configurações nos parâmetros do equipamento (câmara ou projetor). A imagem com valor mínimo de focagem define os parâmetros para a focagem automática do dispositivo, neste caso, o projetor.

Por outro lado, SFF é a técnica utilizada para recuperar informações espaciais a partir de uma sequência de imagens com diferentes planos de foco. Ou seja, as aplicações de SFF permitem selecionar a imagem mais focada de uma sequência de imagens com diferentes configurações de foco, do mesmo cenário. A técnica de SFF pode ser aplicada através da mudança de um dos seguintes parâmetros do dispositivo ótico - distância focal, f , profundidade do objeto, u , e distância entre a lente e o plano da imagem, v - ou por uma combinação de mudança dos três [46].

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (4.18)$$

No contexto dos algoritmos de SFF, existem os mapas de profundidade. Estes, são cálculos de distâncias entre pontos no plano de foco e a lente dos dispositivos óticos. O objetivo de calcular um mapa de profundidade consiste em determinar a profundidade de, no caso do dispositivo ser um projetor, cada ponto da projeção a partir da lente do dispositivo. Posto isto, o mapa de profundidade de uma cena é estimado de forma precisa usando posições relativas de vários planos de foco. As projeções de imagens feitas com o projetor devidamente focado representam altas variações de intensidade [47].

Operadores de medida de foco

Nos testes de profundidade de foco efetuados e descritos mais à frente, recorreram-se a algoritmos de SFF, uma vez que o objetivo inerente a estas experimentações consiste em definir

um intervalo de distâncias aceitável em que o projetor consegue projetar sem perda significativa de qualidade de foco, para uma determinada distância focal que foi mantida fixa.

Aqui, é importante referir que o desempenho do método de SFF depende da precisão dos algoritmos de medida de foco utilizados. Uma boa técnica de focagem usa uma medida de foco que apresenta um valor máximo para a imagem melhor focada. Estas técnicas são geralmente baseadas em observações: as imagens melhor focadas parecem ter contornos mais nítidos e mais informação. Assim, após uma revisão da literatura, optou-se por utilizar os algoritmos mais usualmente empregues em diferentes áreas de aplicação. Posto isto, os algoritmos de SFF aplicados foram o **Laplaciano Modificado**, o **Tenengrad**, a **Variância dos Níveis de Cinzento Normalizado**. No entanto, aplicou-se também um algoritmo modificado de AF aplicável a SFF, a **Variância do Laplaciano**.

Os quatro algoritmos mencionados anteriormente podem inserir-se em três grupos de operadores de medida de foco:

1. **Operadores baseados em estatísticas:** têm em conta várias estatísticas da imagem, como descritores de textura, para calcular o nível de foco.

O algoritmo **Variância dos Níveis de Cinzento Normalizado** enquadra-se nesta família de operadores. A variância dos níveis de cinzento de uma imagem é um dos métodos mais conhecidos para calcular a medida de foco de uma imagem. Uma variação alta do nível de cinzento está associada a uma imagem nítida, enquanto que uma variação baixa está relacionada com desfocagem. Este método é aplicado tanto em aplicações de AF como de SFF. A equação 4.19 mostra o cálculo associado ao nível de foco para a Variância dos Níveis de Cinzento, em que μ é a media do nível de cinzento para píxeis dentro da janela $\Omega(x,y)$.

A variância do nível de cinzento pode ser compensada por diferenças no brilho médio da imagem (I), entre imagens diferentes, através da normalização do valor de ϕ , na equação 4.19, pelo valor médio do nível de cinzento [40].

$$\Phi_{x,y} = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} (I(i,j) - \mu)^2 \quad (4.19)$$

2. **Operadores baseados em gradiente:** todos os operadores pretencentes a este grupo baseiam-se no gradiente ou primeira derivada da intensidade de uma imagem. Estes operadores assentam no pressuposto de que as imagens focadas apresentam arestas (*edges*) mais nítidas do que as imagens desfocadas. Assim, o gradiente é usado para medir o grau de focagem com base nos pontos máximos da primeira derivada, que correspondem a *edges* (Figura 4.29).

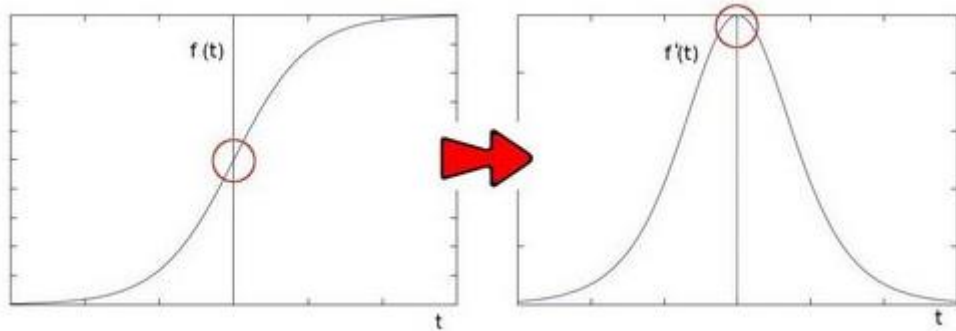


Figura 4.29 - Primeira derivada da intensidade de uma imagem [48].

O **Tenengrad** insere-se neste grupo. Trata-se de um algoritmo bastante utilizado em questões de profundidade de foco, que se baseia na maximização da magnitude do gradiente de imagens. A equação 4.20 mostra o cálculo associado ao nível de foco pelo Tenengrad, em que G_x e G_y são os gradientes da imagem em X e em Y, calculados pela convolução da imagem dada com operadores de Sobel. Assim, este método mede a soma dos quadrados das respostas das máscaras Sobel horizontal e vertical [47].

$$\Phi_{x,y} = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} (G_x(i,j)^2 + G_y(i,j)^2) \quad (4.20)$$

3. **Operadores baseados em laplaciano:** são semelhantes ao grupo anterior. O objetivo destes operadores é também medir a quantidade de contornos (*edges*) presentes nas imagens, no entanto, através da segunda derivada ou Laplaciano [42]. A segunda derivada corresponde a zeros (Figura 4.30). No entanto, é importante realçar que os zeros não aparecem apenas em *edges*. Há a possibilidade de surgirem também em locais sem significado. Esta situação indesejada pode ser resolvida mediante a aplicação de filtros, quando necessário [48].

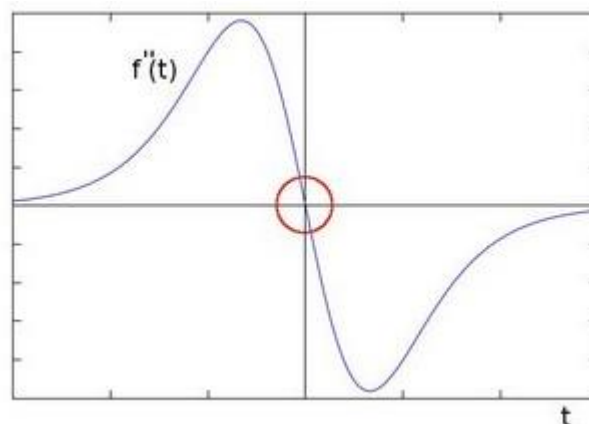


Figura 4.30 - Segunda derivada da intensidade de uma imagem [48].

Os algoritmos **Laplaciano Modificado** e **Variância do Laplaciano** pertencem a este grupo.

O Laplaciano Modificado é um operador de medida de foco baseado numa definição alternativa do Laplaciano. Na presença de imagens com texturas pouco salientes, as componentes X e Y do Laplaciano podem anular-se e, conseqüentemente, não produzirem qualquer resposta. A equação 4.21 mostra o cálculo associado ao nível de foco deste operador, em que $\Delta_m I$ é o Laplaciano modificado da imagem I , que, por sua vez, é calculado através da equação 4.22 [48].

$$\Phi_{x,y} = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} (\Delta_m I(i,j)) \quad (4.21)$$

$$\Delta_m I = |I * L_x| + |I * L_y| \quad (4.22)$$

As máscaras de convolução usadas para calcular o Laplaciano modificado são as das equações 4.23 e 4.24.

$$L_x = [-1 \ 2 \ -1] \quad (4.23)$$

$$L_y = L_x^T \quad (4.24)$$

A Variância do Laplaciano utiliza, como o próprio nome indica, a variância do Laplaciano da imagem. Foi criada originalmente como um operador de medida de foco para AF (ref). Porém, para aplicações de SFF o algoritmo pode ser definido pela equação 4.25, em que $\overline{\Delta I}$ é o valor médio do Laplaciano da imagem na janela $\Omega(x,y)$ [48].

$$\Phi_{i,j} = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} (\Delta I(i,j) - \overline{\Delta I})^2 \quad (4.25)$$

4.4.3 Testes efetuados e Resultados

Neste trabalho, aplicou-se a técnica de SFF através da mudança da distância entre a lente do projetor e o plano de projeção. Na Figura 4.31 pode ver-se uma imagem ilustrativa em que o projetor, estando fixo, tem a sua lente focada para um determinado plano de projeção. Porém, a posição desse plano de projeção é variável, não se encontra fixo, em intervalos de 100 mm entre cada posição. Esta abordagem é equivalente a alterar a distância entre a lente do projetor e um único plano de projeção, que foi o que, de facto, foi feito em termos experimentais.

Assim, projetou-se uma sequência de imagens em diferentes posições do projetor, em que apenas uma posição do projetor se encontra com a sua lente idealmente focada, com o objetivo de definir um intervalo de distâncias aceitável em que o projetor consegue projetar sem perda significativa de qualidade de foco, para uma determinada distância focal mantida fixa.

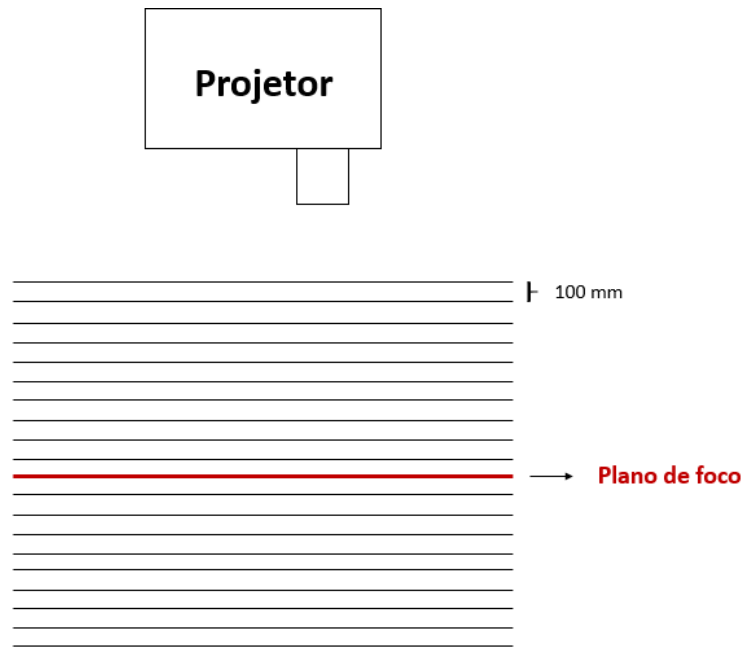


Figura 4.31 - Setup de projeção de imagens com variações do plano de projeção em 100 mm.

Testes efetuados

Variou-se a posição do projetor em aproximadamente 2000 mm, desde 720 mm até 2720 mm do plano de projeção, com intervalos de 100 mm entre cada posição, estando o projetor focado para 1720 mm. A cada posição do projetor, fizeram-se duas projeções: a de uma imagem *standard* usualmente utilizada em questões inerentes à calibração de um dispositivo ótico (Figura 4.33), tal como já foi mostrado em subcapítulos anteriores, e uma imagem que representa algumas linhas de soldaduras que serão efetivamente projetadas sobre as vigas de construção metálicas (Figura 4.32). Desta forma, é possível comparar diferenças entre imagens quando ambas estão nas mesmas condições.

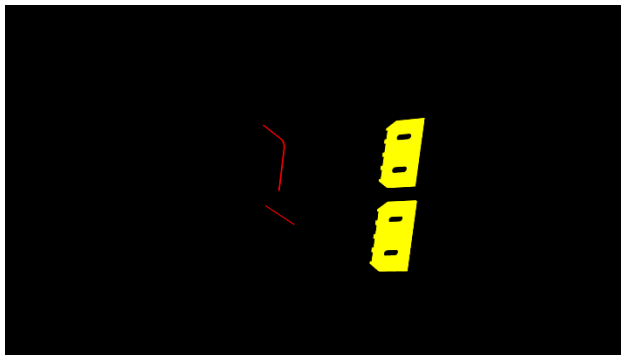


Figura 4.32 - Exemplo de linhas de soldadura.

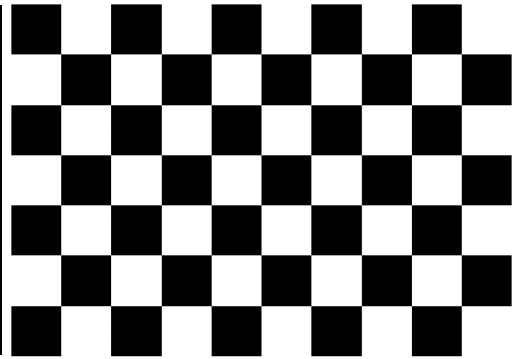


Figura 4.33 - Imagem *standard*.

Além disso, optou-se por controlar as condições de luminosidade artificial, de forma a que seja a mínima possível e seja notório um contraste significativo. Mais ainda, foram realizados testes na ausência e na presença de luz natural. Isto, porque mesmo em ambiente industrial, ao usar um projetor DLP, é crucial fazer esse controle, tanto de luz natural como artificial, para que as projeções efetuadas não sejam afetadas, em termos de brilho, contraste e luminosidade, por condições externas.

A câmara que fez a captação das imagens projetadas também sofreu algumas condicionantes. Numa primeira abordagem, a câmara manteve-se estática numa posição que permitisse capturar todo o tamanho das imagens projetadas, no intervalo de posições referido. Depois, à medida que se aproximava ou afastava o projetor do plano de projeção, movimentou-se também a câmara, de forma a que as imagens projetadas ocupassem a mesma área nas imagens capturadas. Para isso, teve-se em conta o FOV de cada dispositivo. Aliado a isto, foi necessário ajustar a distância focal da câmara para cada nova posição em que foi posicionada.

Assim sendo, capturou-se uma imagem de cada projeção, para as 21 posições aplicadas, com o sistema de visão monocular, para cada uma das abordagens referidas anteriormente. As imagens capturadas apresentam diferentes níveis de foco, pois à medida que o projetor se afasta da posição para a qual a sua lente se encontra focada, a desfocagem aumenta.

Resultados

Por fim, aplicaram-se às imagens os quatro algoritmos referidos anteriormente.

Qualquer algoritmo de medida de foco deve produzir uma resposta alta a variações de alta frequência da intensidade das imagens. Isto, porque a imagem mais focada possui componentes de frequência mais elevadas. Assim, deve existir uma resposta máxima para imagens perfeitamente focadas.

O desempenho e robustez dos algoritmos é avaliado tendo em conta quatro características [47]: contraste da imagem, ruído da imagem, saturação da imagem e o tamanho da janela $\Omega(i,j)$ utilizada para aplicar cada operador. O contraste é a diferença entre as regiões escuras e claras de uma imagem, e a saturação refere-se à percepção que se tem da cor de uma imagem.

No que diz respeito ao ruído da imagem, as configurações da câmara e do projetor foram mantidas constantes, pelo que o ruído presente nas imagens também. Além disso, a câmara foi configurada de forma a reduzir o máximo possível o ruído durante as aquisições de imagens. O

tamanho da janela $\Omega(i,j)$ e a saturação da imagem também foram mantidos constantes para todas as imagens onde se aplicaram os operadores de medida de foco. Relativamente a esta última característica, todas as imagens foram adquiridas na ausência de cor, isto é, a preto e branco. No entanto, o contraste da imagem variou significativamente. Na Figura 4.34, é possível ter percepção dessa variação de contraste. Quanto mais afastado estiver o projetor do plano de projeção, menor é o contraste nas imagens. Imagens com baixo contraste, geralmente, contém contornos mais suaves, aumentando, assim, a dificuldade em determinar o grau relativo de foco. Na Figura 4.34 é também notória uma maior desfocagem nas primeiras imagens, em que o projetor se encontra mais próximo do plano de projeção, pois a lente encontra-se focada para uma posição mais distante (1720 mm).

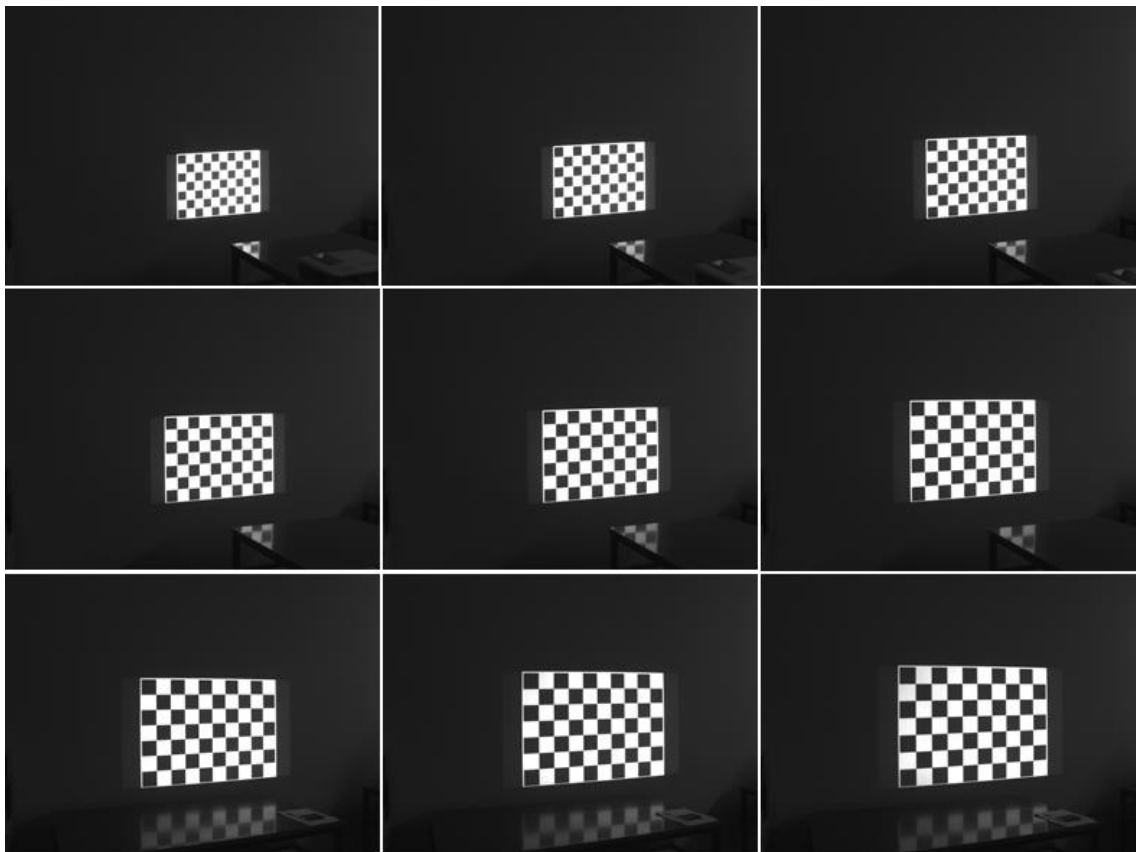


Figura 4.34 - Variação do contraste das imagens.

Perante os resultados obtidos, apenas o algoritmo Tenengrad apresenta a resposta máximo para as imagens mais focadas, o que revela a sua robustez face às variações de contraste. Na Figura 4.35 e na Figura 4.36 é apresentado o comportamento deste algoritmo e os valores de saída de medida de foco estando a câmara fixa e estando-se na presença de luz artificial e natural. Quando se alteram a posição da câmara e as condições de iluminação (natural e artificial) o algoritmo apresenta um comportamento igual, no entanto os valores de medida de foco diferem um pouco. Quanto menor for a iluminação existente, mais elevados são os valores de medidas de foco. Os restantes operadores de medida de foco são afetados pelo contraste de imagem. O valor máximo de medida de foco deveria ocorrer para a imagem que se encontra melhor focada. No entanto, isso não acontece. Esses algoritmos apresentam valores incoerentes e um comportamento variável, sobre os quais não é possível retirar conclusões, para as duas condicionantes que a câmara sofreu em termos de posição.

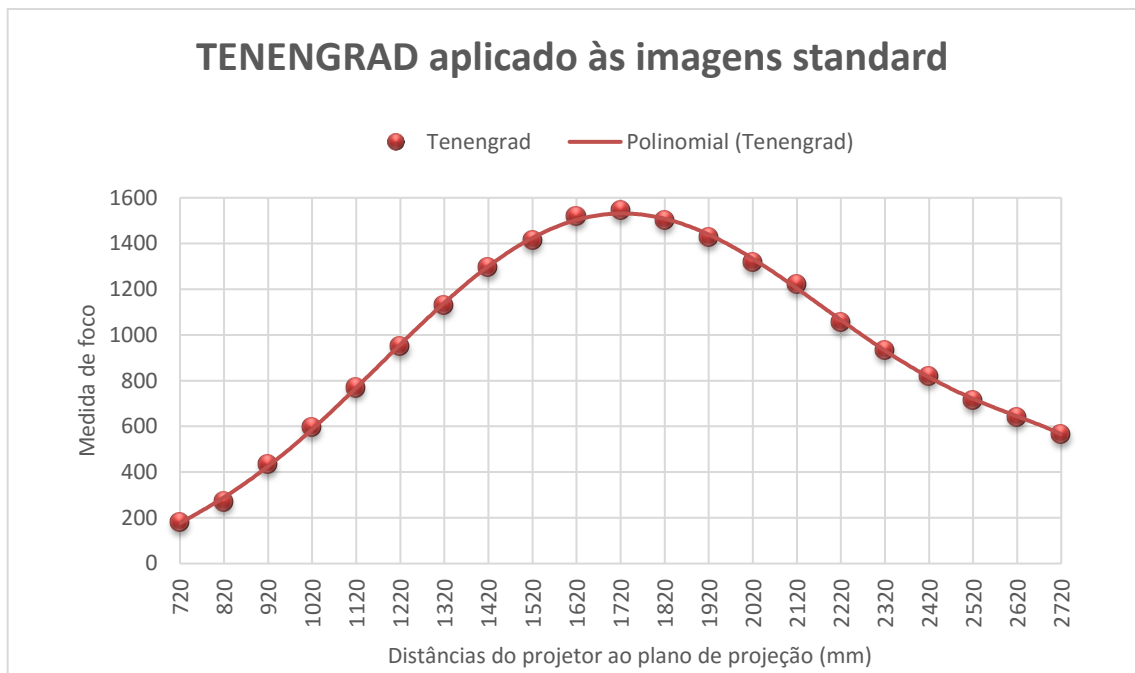


Figura 4.35 - Aplicação do algoritmo de medida de foco Tenengrad às imagens *standard*.

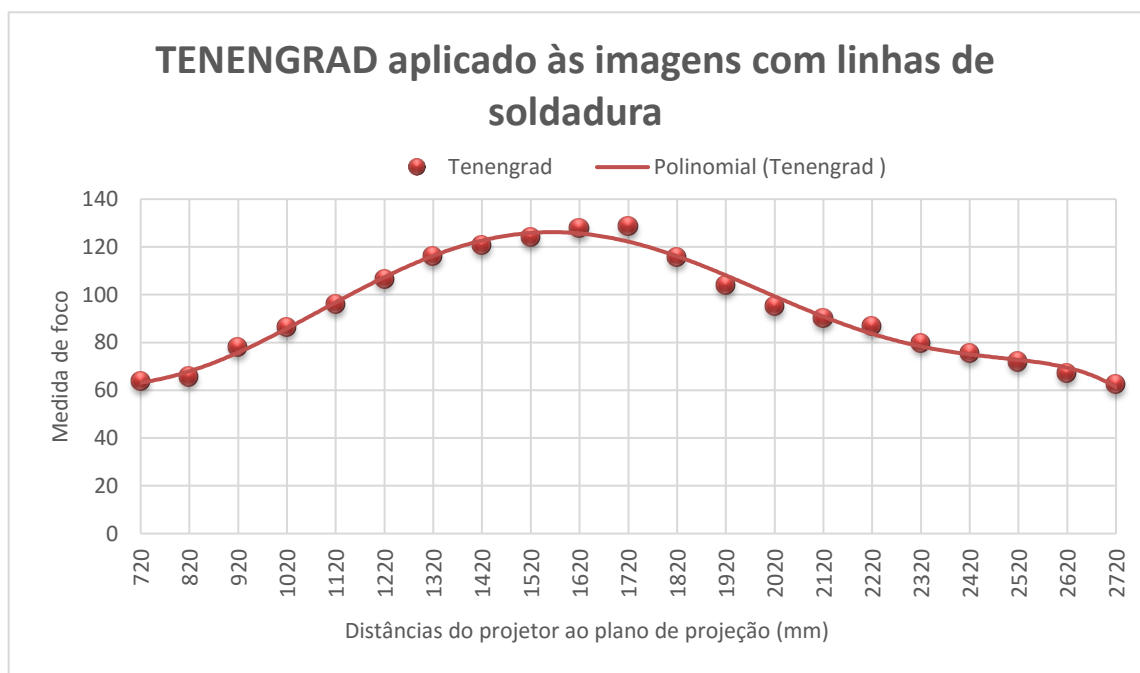


Figura 4.36 - Aplicação do algoritmo de medida de foco Tenengrad às imagens com linhas de soldadura.

Tendo em conta a sensibilidade dos algoritmos face às variações de contraste, utilizou-se apenas o algoritmo Tenengrad para auxiliar na determinação de um intervalo de distâncias aceitável em que o projetor consegue projetar sem perda significativa de qualidade de foco, para uma determinada distância focal que foi mantida fixa. Um dos fatores mais importante para definir esse intervalo de distâncias consiste na observação visual humana. Trata-se de um

dos sistemas mais precisos quando se trata de definir se uma imagem está focada ou não, sobretudo porque, no âmbito deste trabalho, as projeções efetuadas têm de ser percecionadas por um operador humano.

No decorrer das experimentações, verificou-se que as imagens aparecem nítidas nas projeções feitas no plano de foco. Verificou-se também que a desfocagem das imagens aumenta à medida que as projeções se afastam do plano de foco. Para a distância focal utilizada, a lente do projetor mostrou-se capaz de projetar sem perder qualidade de foco num intervalo de 1000 mm, desde 1220 mm até 2220 mm, estando a lente focada a meio desse intervalo, em 1720 mm. Isto significa que a profundidade de foco para a distância focal aplicada é de 1000 mm.

Usando uma vez mais o Tenengrad, compararam-se as imagens capturadas da projeção com as imagens computadorizadas, que servem como referência (Figura 4.32, Figura 4.33). As imagens de referência apresentam um valor de medida de foco significativamente mais elevado (13338.4 e 625.548, respetivamente) em relação às imagens projetadas a 1720 mm do plano de projeção (distância para a qual a lente do projetor está focada), o que revela que a própria projeção em si faz com que se perca alguma qualidade de foco.

Comparando ambos os gráficos (Figura 4.35, Figura 4.36), verifica-se que a aplicação do algoritmo de medida de foco Tenengrad à imagem *standard* revela um comportamento de tendência mais uniforme entre os diferentes pontos, comparativamente à imagem com linhas de soldadura. Tendo em conta que os testes foram realizados nas mesmas condições, esta pequena diferença de comportamento pode dever-se ao facto da imagem *standard* possuir mais contornos.

4.5 Autofocus

A focagem é um desafio importante em sistemas de captura ou projeção de imagens. Para se obter uma imagem bem focada, muitas vezes tem de se ajustar repetidamente os parâmetros do dispositivo ótico, como, por exemplo, a sua posição e a distância focal da sua lente [49].

Autofocus ou autofocagem é uma característica de alguns sistemas óticos que permite obter o foco correto para um determinado objeto ou plano, em vez de se ajustar o foco manualmente. Neste caso em particular, o sistema ótico é um projetor DLP.

No âmbito do projeto CoopWeld, a característica de autofocus é interessante, na medida em que permitiria ao projetor DLP focar-se de forma automática, independentemente da distância a que este se encontrasse da viga metálica. Assim, evitar-se-ia a intervenção humana na focagem da lente ou um ajuste da distância do projetor à viga, para a posição em que a lente está focada, pelo manipulador industrial. Desta forma, os movimentos do manipulador entre as tarefas de projeção e de soldagem seriam otimizados, bem como a operação de projeção, que seria mais rápida e eficiente.

Assim sendo, é crucial compreender alguns conceitos inerentes à projeção de uma imagem através de um projetor.

Na Figura 4.37 apresenta-se uma imagem ilustrativa de instalação do projetor, em que G corresponde ao centro da lente e F ao ecrã de projeção. B e C são as dimensões da imagem projetada para uma determinada distância de projeção (D).

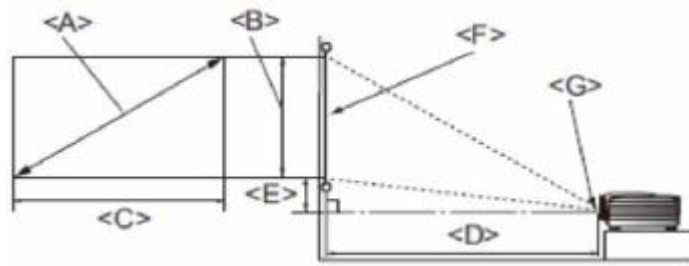


Figura 4.37 - Imagem ilustrativa de instalação do projetor [65].

O ponto central (C_x, C_y) corresponde ao centro óptico do projetor (G), ou seja, é o ponto onde o eixo óptico intersecciona o plano da imagem, e é, idealmente, metade da resolução das imagens nas duas componentes (x,y). Por sua vez, a resolução da imagem projetada depende da distância a que o projetor se encontra do plano de projeção (D), relacionando-se de forma direta, ou seja, quanto mais longe se situar o projetor do ecrã de projeção, maior é a resolução da imagem projetada (B, C).

Já a distância focal de uma lente é a distância à qual a lente foca um ponto situado a uma distância infinita. É considerada uma característica fundamental para cada lente. A distância focal é o limite para d_1 enquanto d_2 tende para infinito (Figura 4.38), usando a equação 4.26. Ou seja, à medida que d_2 tende para infinito, d_1 aproxima-se da distância focal.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \quad (4.26)$$

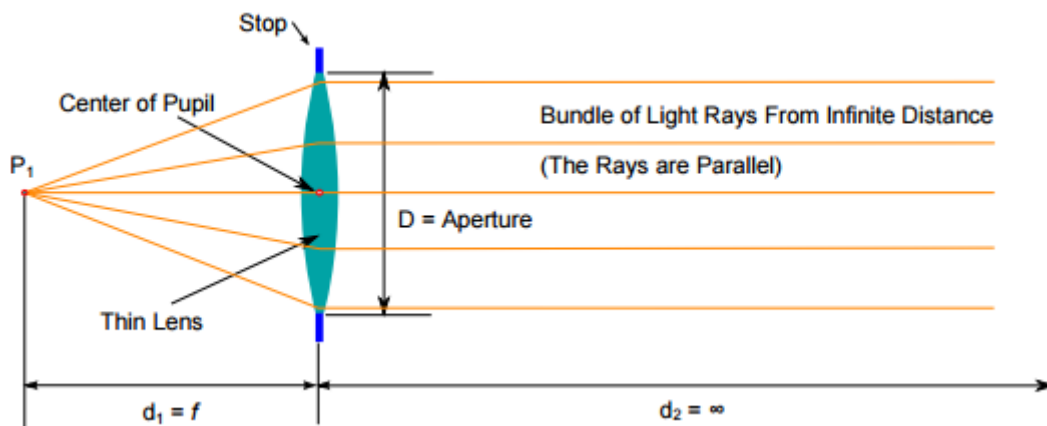


Figura 4.38 - Imagem de um ponto no infinito, mostrando a distância focal da lente [65].

A distância focal também determina o tamanho da imagem formado pela lente (Figura 4.39).

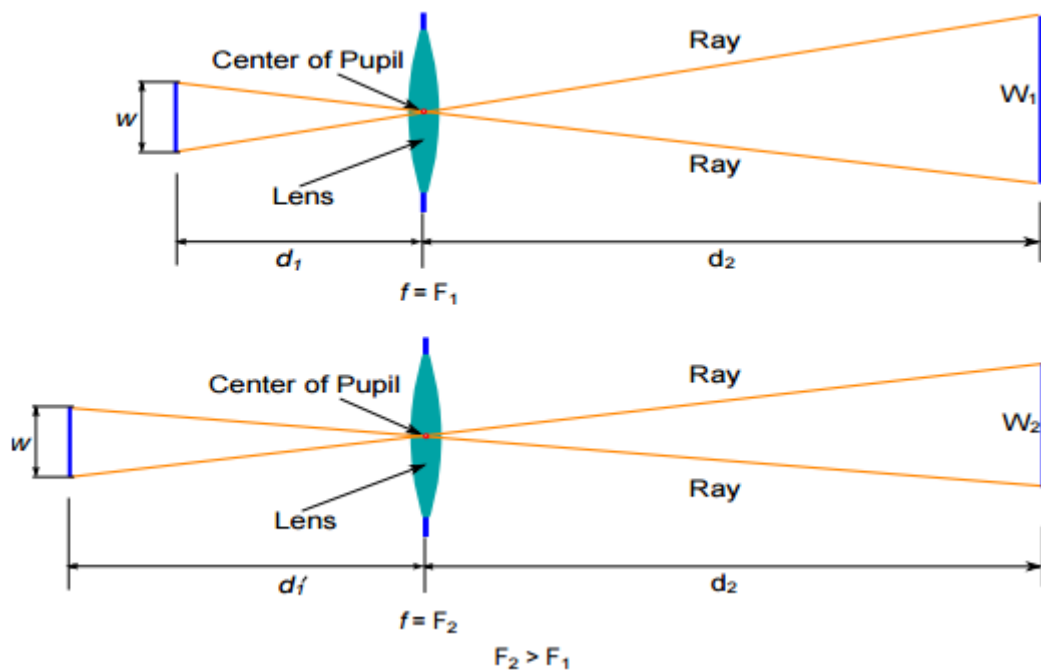


Figura 4.39 - Dimensões de uma imagem determinadas pela distância focal da lente [64].

Assim, criaram-se funções matemáticas que permitissem ajustar automaticamente a distância focal e o ponto central da lente do projetor, ambos em (x,y). Assim sendo, variou-se a distância do projetor a um plano com respectivo ajuste do foco da lente, desde 1020 mm até 4020 mm, com intervalos de 100 mm de distância entre cada posição. Para esta finalidade, utilizou-se o *software* de calibração de luz estruturada desenvolvido pela *Brown University School of Engineering* [40], e o procedimento adotado para cada posição em que se focou o projetor foi o seguinte:

1. Aplicação de 5 orientações tridimensionais diferentes no padrão de xadrez e respectiva calibração:
 - 1.1 Obtenção dos parâmetros intrínsecos do projetor e do erro de reprojeção associado ao cálculo desses valores;
 - 1.2 Na presença de um erro de reprojeção superior a ≈ 0.11 , repetição do ponto 1;
 - 1.3 Caso o erro de reprojeção seja ≥ 0.07 e ≤ 0.11 , armazenamento dos valores para criação das funções matemáticas.

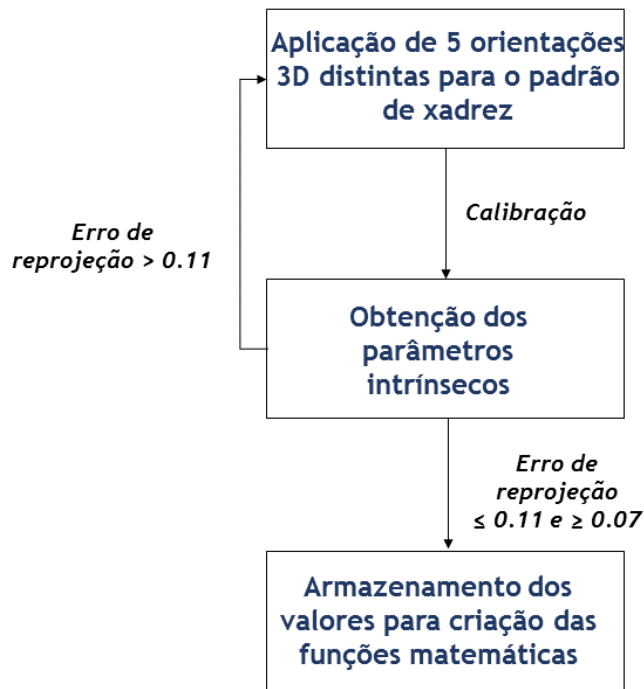


Figura 4.40 - Esquema do procedimento adotado para criação das funções de autofocus.

O procedimento da Figura 4.40 foi repetido 4 vezes, e os valores utilizados para criar as funções consistem numa média dos valores obtidos nas diversas experimentações.

Os erros de reprojeção de referência foram escolhidos após algumas calibrações do projetor efetuadas a diferentes distâncias do plano de projeção, tendo-se usado como referência um intervalo de valores de erros reprojeção mais frequentemente obtidos. Além disso, é importante que o erro de reprojeção entre as diferentes calibrações não varie muito, para se obter uma relação credível entre os pontos que permitem criar as funções.

Além dos cálculos computacionais efetuados pelo *software* de calibração de luz estruturada desenvolvido pela *Brown University School of Engineering*, procedeu-se também a medições do tamanho do ecrã de projeção com uma fita métrica, tendo-se calculado o ponto central com base nessas medidas. Assim, é possível obter uma comparação para valores do ponto central (C_x , C_y) adquiridos por meios diferentes.

Nas figuras das páginas seguintes, encontram-se os gráficos e respetivas funções para controlo automático do ponto central (Figura 4.41, Figura 4.42) e da distância focal (Figura 4.43, Figura 4.44).

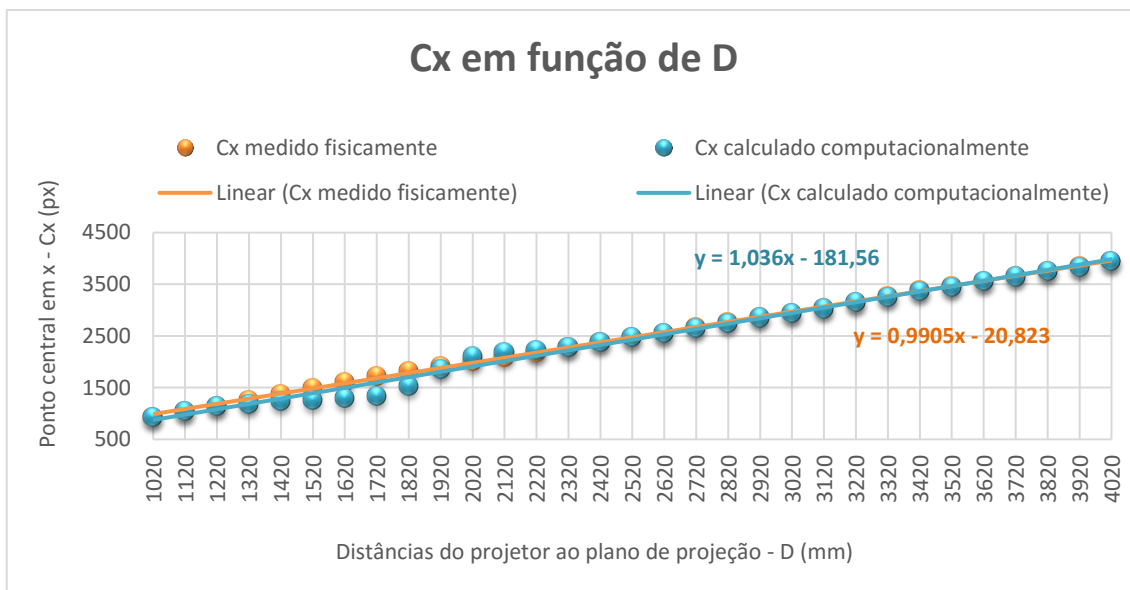


Figura 4.41 - Funções que permitem ajustar Cx em função da distância a que o projetor se encontra do plano de projeção.

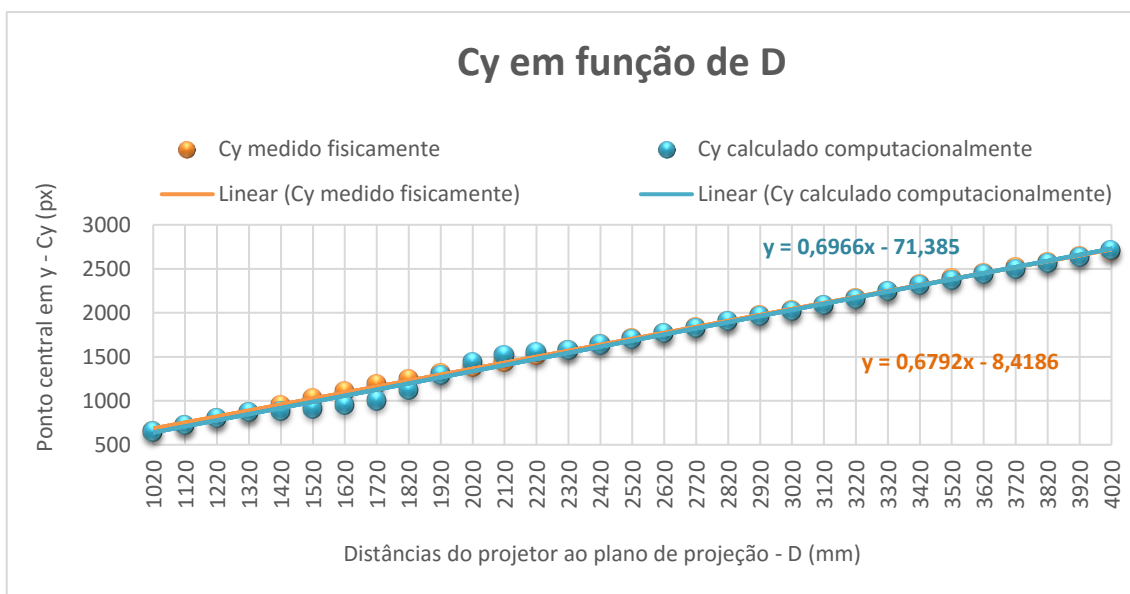


Figura 4.42 - Funções que permitem ajustar Cy em função da distância a que o projetor se encontra do plano de projeção.

As funções que permitem ajustar o ponto central (C_x , C_y) apresentam um comportamento aproximadamente linear. Contudo, comparando a função obtida por medições físicas com a função criada por valores calculados computacionalmente, conclui-se que a última diverge um pouco mais da linearidade referida. Apesar de as medições efetuadas com a fita métrica também não serem 100% precisas, esta divergência pode dever-se à existência de um erro de reprojeção associado aos cálculos computacionais, que não é sempre o mesmo para cada distância, varia entre 0.07 e 0.11 píxeis nos testes realizados.

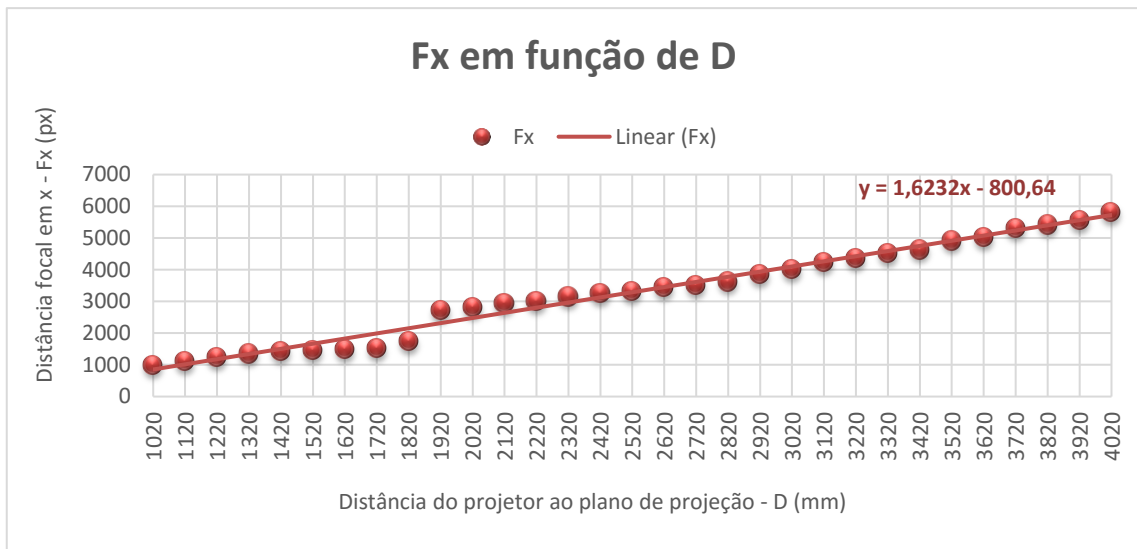


Figura 4.43 - Função que permite ajustar Fx em função da distância a que o projetor está do plano de projeção.

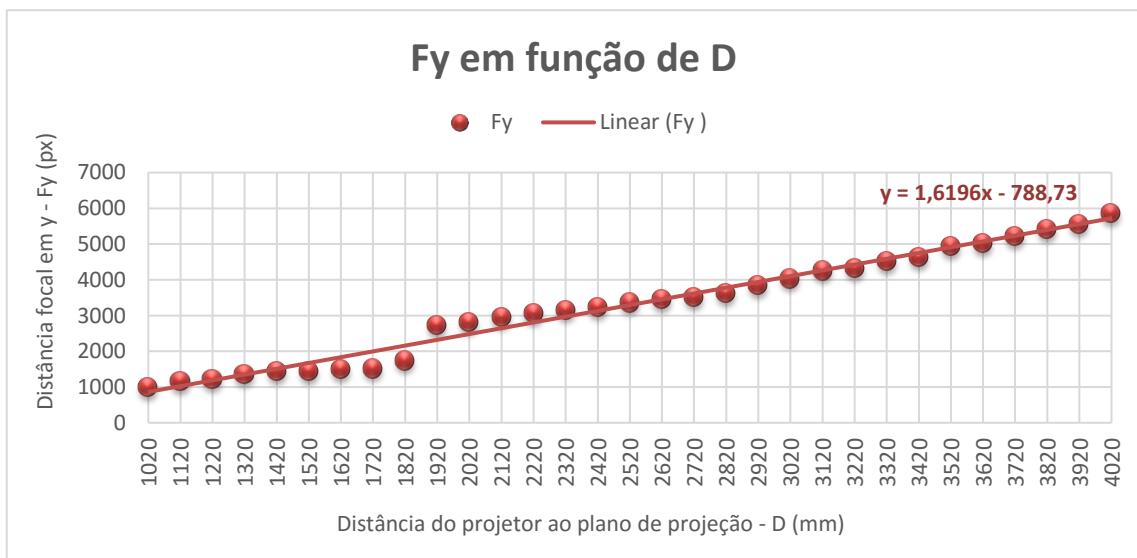


Figura 4.44 - Função que permite ajustar Fy em função da distância a que o projetor está do plano de projeção.

As funções que permitem ajustar a distância focal (F_x , F_y) também apresentam um comportamento aproximadamente linear, apresentando, no entanto, algumas oscilações não expectáveis. Tal pode-se dever à existência de um erro de reprojeção associado aos cálculos computacionais, que não é sempre o mesmo para cada distância, variando aproximadamente 0.04 píxeis, ou até mesmo às características da lente do projetor.

4.6 Conclusões

Neste capítulo foram abordadas características importantes inerentes ao projetor DLP, nomeadamente a sua precisão, profundidade de foco e comportamento perante a capacidade de focagem automática.

No que diz respeito à sua precisão, foi possível obter o valor de erro de reprojeção mais baixo recorrendo ao *software* de calibração de luz estruturada desenvolvido pela *Brown University School of Engineering* [40]. A precisão de um projetor permite conhecer os erros geométricos associados ao dispositivo para, assim, ser possível corrigi-los quando se efetuam projeções.

Posteriormente, através da perceção de profundidade de foco, definiu-se um intervalo de distâncias em que o projetor consegue projetar sem perder qualidade na informação projetada para uma determinada distância focal mantida fixa.

Por fim, criaram-se funções matemáticas que permitem ajustar automaticamente a distância focal (F_x , F_y) e o ponto central (C_x , C_y). A característica de focagem automática é importante, na medida em que evita a intervenção humana na focagem da lente ou um ajuste da distância do projetor à viga, para a posição em que a lente está focada, pelo manipulador industrial.

Em suma, o estudo e análise de todas estas questões permite a utilização do projetor DLP em causa de forma correta no âmbito do projeto em que este trabalho se insere.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Os sistemas de visão computacional, nomeadamente câmaras e projetores, são cada vez mais usados em aplicações robóticas, com manipuladores industriais. Desta forma, o robô consegue executar tarefas inteligentes, aproximando-se das capacidades do Homem. Sobretudo nas aplicações mais recentes, um dos principais desafios que lhes está inerente é a calibração desses dispositivos.

No projeto em que esta dissertação se insere, é utilizado um projetor, *laser* ou DLP, acoplado a um robô manipulador, que projeta informação sobre vigas de construção metálicas, recorrendo a técnicas de *projection mapping*. Assim, é importante determinar qual a melhor junta do manipulador para anexar o projetor *laser*. Seguidamente, é crucial determinar a precisão que está associada ao projetor, desta vez, o DLP. Isso apenas é possível através de procedimentos de calibração, dos quais resultam erros de reprojeção. Erros, esses, que condicionam testes e medições realizados posteriormente. No âmbito deste trabalho, os testes e medições efetuados relacionam-se com questões de profundidade de foco e funções de focagem automática do projetor.

No que diz respeito à localização do projetor *laser* no manipulador, conclui-se que a melhor junta para o acoplar é no *end-effector*. Para chegar a essa conclusão, pesaram-se os prós e contras de anexar o projetor em cada uma das juntas do robô, tendo em conta a finalidade do projeto e também algumas características do projetor.

A calibração do projetor DLP foi realizada seguindo três metodologias, utilizando uma câmara auxiliar devidamente calibrada. Assim, numa primeira instância, procedeu-se à calibração da câmara, que foi realizada cuidadosamente, de forma a obter o menor erro de reprojeção possível, para não comprometer, posteriormente, a calibração do projetor. Na calibração do projetor, salientou-se o método de luz estruturada. Da sua aplicação resultou o menor erro de reprojeção, comparativamente às outras duas metodologias. As calibrações da câmara e do projetor tiveram associadas um erro de reprojeção baixo, o que evidencia a elevada precisão de ambos os dispositivos.

Outro aspeto a considerar quando se efetuam projeções, recorrendo a técnicas de *projection mapping*, é a profundidade de foco. A aplicação de algoritmos de profundidade de foco ajuda a validar a variação de distâncias que é possível aplicar ao projetor para uma determinada distância focal mantida fixa, sem se perder qualidade de foco significativa na informação projetada. No entanto, nestas questões, a visão humana é indispensável e sobrepõe-se a qualquer algoritmo aplicado. A aplicação dos algoritmos serve apenas para comprovar computacionalmente aquilo que o olho humano interpreta como sendo uma imagem nítida ou desfocada. Conclui-se que, para a distância focal usada, é possível variar o projetor até 500 mm da posição para que a sua lente se encontra focada, sem haver perda significativa da qualidade de foco.

No seguimento dos testes anteriores, torna-se interessante a criação de funções matemáticas para focar automaticamente o projetor, independentemente da posição a que este se encontra da viga metálica. As funções criadas permitem ajustar tanto a distância focal como o ponto central. Assim, evita-se a intervenção humana na focagem da lente ou um ajuste da distância do projetor à viga, para a posição em que a lente está focada, pelo manipulador industrial. Desta forma, os movimentos do manipulador entre as tarefas de projeção e de soldagem são otimizados, bem como a operação de projeção, que se torna mais rápida e eficiente.

Em conclusão, o trabalho apresentado reúne características importantes para aplicações em que se utilizam dispositivos óticos, câmaras ou projetores. No âmbito desta dissertação, trata-se de uma aplicação robótica em específica. No entanto, as abordagens estudadas e implementadas são transversais a qualquer aplicação que envolva câmaras ou projetores, seja ela robótica ou não. Apesar de se ter abordado os aspetos anteriores para o uso de um projetor, no caso de o dispositivo ser uma câmara as abordagens seriam semelhantes. Porém, de forma mais trivial, pois os projetores são equipamentos mais complexos e que necessitam sempre de uma câmara auxiliar para os testes efetuados.

5.2 Trabalho futuro

Relativamente a trabalho futuro, numa primeira fase, é importante efetuar projeções, baseadas em *projection mapping*, sobre as vigas tridimensionais, tendo em conta a precisão que está associada ao projetor DLP e a distorção introduzida na lente do dispositivo. Como da calibração do projetor resultou um erro de reprojeção baixo, é provável que as correções geométricas efetuadas sobre as imagens a projetar estejam, de facto, apropriadas.

A seguir, é também crucial validar os testes de profundidade de foco realizados, efetuando projeções, uma vez mais, recorrendo a técnicas de *projection mapping*, sobre vigas de contração metálicas. Além disso, e também no âmbito da profundidade de foco, é importante fazer os testes efetuados para distâncias focais diferentes, e perceber o comportamento da profundidade de foco em função da distância focal. Isto, porque, possivelmente haverão outros valores de distância focal em que será possível projetar informação sem perder qualidade de foco num intervalo de distâncias superior ao definido para a distância focal aplicada.

Mais ainda, é interessante controlar devidamente, e preferencialmente de forma automática, os níveis de contraste do projetor em função da distância a que este se encontra da viga metálica. Desta forma, o operador e o manipulador reconhecerão melhor a informação

projetada e, conseqüentemente, o seu trabalho é mais eficiente. O ideal será que o contraste seja sempre o mesmo em todas as projeções para, assim, as condições de iluminação artificial se puderem manter constantes. A redução ou aumento do contraste das imagens, é possível através de operações de processamento ou pré-processamento realizadas sobre as imagens a projetar.

Referências

- [1] M. F. A. E. U. M. G. Michele Di Donato, “Text legibility for projected Augmented Reality on industrial workbenches,” *Elsevier*, p. 9, 2015.
- [2] B. M. Mustafa Suphi Erden, “Assisting manual welding with robot,” *Elsevier*, p. 11, 2011.
- [3] A. C. S. Michael A. Goodrich, “Human-Robot Interaction: A Survey,” *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, vol. 1, nº 3, pp. 203-275, 2007.
- [4] L. B. H. Danilo de Milano, “Visão Computacional”.
- [5] F. W. M. Lopes, “Sistema de visão e laser para percepção em ambientes subaquáticos”.
- [6] M. B. Nogueira, “Posicionamento e Movimentação de um Robô Humanóide Utilizando Imagens de uma Câmara Móvel Externa,” 2005.
- [7] M. Kimura, M. Mochimaru e T. Kanade, “Projector Calibration using Arbitrary Planes and Calibrated Camera,” p. 2, 2007.
- [8] D. Moreno e G. Taubin, “Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration,” 2012.
- [9] Y. Xu e D. G. Aliaga, “Robust Pixel Classification for 3D Modeling with Structured Light,” pp. 233-240, 2007.
- [10] F. Berry, O. A. Aider e J. Mosnier, “A Visual Servoing-Based Method for ProCam Systems Calibration,” pp. 13319-13333, 2014.
- [11] C. S. Wiegardt e B. Wagner, “Hand-projector Self-calibration Using Structured Light,” 2014.
- [12] S. Zhang e P. Huang, “Novel method for structured light system calibration,” 2006.
- [13] N. Andreff, R. Hourad e B. Espiau, “Robot Hand-Eye Calibration using Structure-from-Motion,” 2001.
- [14] M. Khosravi e P. L. Yang, “Projection Mapping For Tourism City of Esfahan,” em *International Conference on Informatics and Creative Multimedia*, 2013.
- [15] E. Lee, Y. K. Lim, H. C. Jung e J. W. Park, “Fashion Projection Mapping Using Basic Modeling Form,” *Springer International Publishing Switzerland*, pp. 421-426, 2015.
- [16] J. Lee, Y. Kim, D. Kim e B.-S. Shin, “Real-Time Projection-Based Augmented Reality System for Dynamic Objects in the Performing Arts,” *Symmetry*, pp. 182-192, 2015.
- [17] M. Kesim e Y. Ozarlan, “Augmented reality in education: current technologies and the potential for education,” *Elsevier*, pp. 297-302, 2012.

- [18] A. Osorio, J.-A. Galan, J. Nauroy e P. Donars, “Real time planning, guidance and validation of surgical acts using 3D segmentations, augmented reality projections and surgical tools video tracking,” *Medical Imaging 2010: Visualization, Image-Guided Procedures, and Modeling*, vol. 7652, 2010.
- [19] R. Raskar, G. Welch, M. Cuts, A. Lake e L. Stesin, “The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays,” em *SIGGRAPH 98*, Orlando , 1998.
- [20] J. Turi, Engadget, [Online]. Available: <http://www.engadget.com/2014/02/16/morton-heiligs-sensorama-simulator/>. [Acedido em 24 janeiro 2016].
- [21] B. Jones, “Projection Mapping Central,” [Online]. Available: <http://projection-mapping.org/the-history-of-projection-mapping/>. [Acedido em 24 janeiro 2016].
- [22] “Michael Naimark,” [Online]. Available: <http://www.naimark.net/projects/displacements.html>. [Acedido em 24 janeiro 2016].
- [23] R. Raskar, H. Fuchs e D. Bandyopadhyay, “Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects,” em *IEEE and ACM International Symposium on Aumented Reality*, 2001.
- [24] R. Raskar, P. Beardsley, J. Baar, Y. Wang, P. Dietz e J. Lee, “RFIG Lamps: Interacting with a Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors,” *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2004*, pp. 406-415, 2004.
- [25] “Phys.org,” [Online]. Available: <http://phys.org/news/2005-01-smart-projectors-require-artificial-canvas.html>. [Acedido em 25 janeiro 2016].
- [26] S. Murayama, N. Ishii e I. Torii, “Development of Projection Mapping with Utility of Digital Signage,” em *IJAI 3rd International Conference on Advanced Applied Informatics* , 2014.
- [27] C. Vogel, M. Poggendorf, C. Walter e N. Elkmann, “Towards Safe Physical Human-Robot Collaboration: A Projection-based Safety System,” em *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco , 2011.
- [28] “Magestic Systems,” [Online]. Available: <http://s405481842.initial-website.com/solutions/laser-projection-solutions/>. [Acedido em 8 fevereiro 2016].
- [29] “ProFitter,” [Online]. Available: <http://www.prodevcoind.com/en/profitter>. [Acedido em 8 fevereiro 2016].
- [30] “Siemens,” [Online]. Available: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/fibersim/laser-projection.shtml. [Acedido em 8 fevereiro 2016].

- [31] O. Bimber e R. Raskar, *Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds*, 2005.
- [32] A. Manakov, H. Seidel e I. Ihrke, "A Mathematical Model and Calibration Procedure for Galvanometric Laser Scanning Systems," em *The Eurographics Association 2011*, 2011.
- [33] "Medialas-Industrial," [Online]. Available: <http://www.medialas-industrial.de/ilp622-laserprojektor.html>. [Acedido em 1 março 2016].
- [34] "Nikon," [Online]. Available: <http://www.nikonusa.com/en/learn-and-explore/article/g3cu6o2o/understanding-focal-length.html>. [Acedido em 22 maio 2016].
- [35] "Edmund," [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/understanding-focal-length-and-field-of-view/>. [Acedido em 7 junho 2016].
- [36] "MathWorks," [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/vision/examples/evaluating-the-accuracy-of-single-camera-calibration.html>. [Acedido em 11 maio 2016].
- [37] J.-Y. Bouguet, "Camera Calibration Toolbox for Matlab," [Online]. Available: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. [Acedido em 1 junho 2016].
- [38] "MathWorks," [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/vision/ref/estimatecameraparameters.html>. [Acedido em 1 junho 2016].
- [39] "OpenCV," [Online]. Available: [http://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html#bool_solvePnP\(InputArray objectPoints, InputArray imagePoints, InputArray cameraMatrix, InputArray distCoeffs, OutputArray rvec, OutputArray tvec, bool useExtrins\)](http://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html#bool_solvePnP(InputArray objectPoints, InputArray imagePoints, InputArray cameraMatrix, InputArray distCoeffs, OutputArray rvec, OutputArray tvec, bool useExtrins)). [Acedido em 2 junho 2016].
- [40] "Projector-Camera Calibration / 3D Scanning Software," [Online]. Available: <http://mesh.brown.edu/calibration/>. [Acedido em 13 maio 2016].
- [41] R. Klette, *Concise Computer Vision - An Introduction into Theory and Algorithms*, Auckland : Springer, 2014.
- [42] P. R. Sanz, B. R. Mezcua e J. M. S. Pena, "INTECH," [Online]. Available: <http://www.intechopen.com/books/current-advancements-in-stereo-vision/depth-estimation-an-introduction>. [Acedido em 7 junho 2016].
- [43] M. T. Mahmood, S. Shim, T. Choi e I. Lee, "Optimizing image focus for 3D shape recovery through genetic algorithm," *Springer* , pp. 247-262, 2013.
- [44] Y. Yao, B. Abidi, N. Doggaz e M. Abidi, "Evaluation of Sharpness Measures and Search Algorithms for the Auto-Focusing of High Magnification Images," *Tenesi*.

- [45] F. Memon, M. A. Unar e S. Memon, "Image Quality Assessment for Performance Evaluation of Focus Measure Operators," *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, vol. 34, pp. 379-386, 2015.
- [46] R. Minhas, A. A. Mohammed, Q. Wu e M. Sid-Ahmed, "3D Shape from Focus and Depth Map Computation Using Steerable Filters," *Springer*, pp. 573-583, 2009.
- [47] S. Pertuz, D. Puig e M. A. Garcia, "Analysis of focus measure operators for shape-from-focus," *ELSEVIER*, pp. 1415-1432, 2012.
- [48] "OpenCV," [Online]. Available: http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/laplace_operator/laplace_operator.html. [Acedido em 6 junho 2016].
- [49] R. Yu, A. Allen e J. Watson, "Focus measure for speckle noisy images based on wavelet multiresolution analysis".
- [50] "Industrial Safety Solutions," 27 novembro 2015. [Online]. Available: http://www.industrialsafetysolution.com/labeling/industrial_environments.php.
- [51] D. Moreno, "Brown," [Online]. Available: <http://mesh.brown.edu/calibration/files/Projector%20Calibration%20Presentation.pdf>. [Acedido em 25 janeiro 2016].
- [52] M. Spong, S. Hutchinson e M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, Inc.
- [53] P. Moulon, "Imagine," [Online]. Available: <http://imagine.enpc.fr/~moulonp/openMVG/coreFeatures.html>. [Acedido em 5 fevereiro 2016].
- [54] "Youtube," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=bMDr_CFFgWE. [Acedido em 28 janeiro 2016].
- [55] [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=qfWdMZIo4Cg>. [Acedido em 28 janeiro 2016].
- [56] R. M. R. Wharton, "Special Optics," [Online]. Available: <http://www.specialoptics.com>. [Acedido em 1 março 2016].
- [57] S. Sinha, "Lighthouse3d," [Online]. Available: <http://www.lighthouse3d.com/tutorials/view-frustum-culling/>. [Acedido em 2 março 2016].
- [58] "Script Tutorials," [Online]. Available: <https://www.script-tutorials.com/webgl-with-three-js-lesson-9/>. [Acedido em 2 março 2016].
- [59] M. Muhlich e T. Aach, "High Accuracy Feature Detection for Camera Calibration: A Multi-Steerable Approach," em *29th Annual Symposium of the German Association for Pattern Recognition*, Aachen, 2007.

- [60] J. Suriansky e M. Cmarada, "Analysis of methods for camera calibration in 3D scanning systems," em *Annals & Proceedings of DAAAM International* , Vienna, 2012 .
- [61] "Mathworks," [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>. [Acedido em 1 junho 2016].
- [62] [Online]. Available: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/affine.htm>. [Acedido em 20 maio 2016].
- [63] "SchoolPhysics," [Online]. Available: <http://www.schoolphysics.co.uk/age11-14/Light/text/Projector/index.html>. [Acedido em 20 junho 2016].
- [64] "Texas Instruments," [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/dlpa044/dlpa044.pdf>. [Acedido em 20 junho 2016].
- [65] "BenQ Corp," [Online]. Available: <http://www.BenQ.us>. [Acedido em 15 junho 2016].
- [66] D. Scharstein e R. Szeliski, "High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light," em *In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* , Madison, 2003.
- [67] M. Bleyer, "Segmentation-based Stereo and Motion with Occlusions," 2006.
- [68] T. Tuytelaars e L. V. Gool, "Matching Widely Separated Views Based on Affine Invariant Regions," *International Journal of Computer Vision*, pp. 61-85, 2004.
- [69] B. Poling, "A Tutorial On Camera Models".
- [70] "Projector-Camera Calibration / 3D Scanning Software," [Online]. Available: <http://mesh.brown.edu/calibration/files/Projector%20Calibration%20Presentation.pdf> . [Acedido em fevereiro 2016].