



Sistema de visão e laser para perceção em ambientes subaquáticos

Flávio Wilson Moreira Lopes,
N^o 1080561

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

24 de Novembro de 2014



Dissertação, para satisfação parcial dos requisitos do Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Flávio Wilson Moreira Lopes,
N^o 1080561

Orientador: José Miguel Soares De Almeida

Co-Orientador: Hugo Miguel Gomes Da Silva

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Aos meus pais, irmão e namorada...

Agradecimentos

Gostaria de utilizar esta secção para, em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador Eng.^o José Almeida por me ter proporcionado esta oportunidade e pela ajuda disponibilizada ao longo deste projeto.

Quero agradecer ao Eng.^o Hugo Silva pelo constante acompanhamento, preocupação e suporte disponibilizado durante todo este ciclo.

A toda a "família" do laboratório de sistemas autónomos (LSA) que me acompanhou durante estes últimos dois anos.

A todos os meus amigos e colegas de curso que participaram nesta caminhada comigo, especialmente ao André Faria, João Ribeiro, Renato Ribeiro, José Araújo e André Neves. Um enorme agradecimento aos meus amigos de longa data Daniel Duarte e HÉlvio Osmar por toda amizade e companheirismo.

Aos meus pais, pela educação que me proporcionaram e pelos esforços efetuados na minha formação académica.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha namorada, Sara Santos, pela paciência, amizade, apoio e incentivo durante a elaboração desta dissertação.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

A exploração do meio subaquático utilizando visão computacional é ainda um processo complexo. Geralmente são utilizados sistemas de visão baseados em visão *stereo*, no entanto, esta abordagem apresenta limitações, é pouco precisa e é exigente em termos computacionais quando o meio de operação é o subaquático. Estas limitações surgem principalmente em dois cenários de aplicação: quando existe escassez de iluminação e em operações junto a infraestruturas subaquáticas. Conseqüentemente, a solução reside na utilização de fontes de informação sensorial alternativas ou complementares ao sistema de visão computacional. Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um sistema de percepção subaquático que combina uma câmara e um projetor laser de um feixe em linha, onde o projetor de luz estruturada é utilizado como fonte de informação.

Em qualquer sistema de visão computacional, e ainda mais relevante em sistemas baseados em triangulação, a sua correta calibração toma um papel fulcral para a qualidade das medidas obtidas com o sistema. A calibração do sistema de visão laser foi dividida em duas etapas. A primeira etapa diz respeito à calibração da câmara, onde são definidos os parâmetros intrínsecos e os parâmetros extrínsecos relativos a este sensor. A segunda etapa define a relação entre a câmara e o laser, sendo esta etapa necessária para a obtenção de imagens tridimensionais.

Assim, um dos principais desafios desta dissertação passou por resolver o problema da calibração inerente a este sistema. Desse modo, foi desenvolvida uma ferramenta que requer, pelo menos duas fotos do padrão de xadrez, com perspectivas diferentes. O método proposto foi caracterizado e validado em ambientes secos e subaquáticos. Os resultados obtidos mostram que o sistema é preciso e os valores de profundidade obtidos apresentam um erro significativamente baixo (inferiores a 1 mm), mesmo com uma *base-*

line (distância entre a centro óptico da câmara e o plano de incidência do laser) reduzida.

Palavras-Chave:

Laser, visão subaquática, visão laser, linha laser, câmara, imagens tridimensionais, sistemas de visão.

Abstract

The process of exploring underwater environment using computer vision is still a complex problem. Most common, vision systems are usually based on stereo vision approaches. However, these approaches suffer from limitations that are increased in underwater operation environments, where there is poor illumination and water disturbances. Therefore, the solution lies on using alternative or complementary sources of sensory information to the vision system. This work proposes the development of a laser vision system by using a camera and a laser with a line beam, where the structured light projector is used as information source.

In a vision system, one important step is always related with the system calibration. Our calibration solution is divided into two steps. The first step concerns the camera calibration, where the intrinsic and extrinsic parameters for the camera are computed. The second step defines the relation between the camera and the laser.

One of the main challenges of this the thesis was to address the overall system calibration. Therefore, a calibration method that requires at least two frames of a chessboard in different perspectives was developed. The proposed method was characterized and validated in dry and underwater environments. The obtained results show that the system is accurate and the depth error is significantly small (<1 mm) even in the presence of a small stereo baseline.

Keywords:

Laser, Underwater vision, laser vision, line laser, camera, three-dimensional images, vision systems.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iv
Abstract	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xviii
1 Introdução	1
1.1 Âmbito da dissertação	1
1.2 Enquadramento e motivação	2
1.3 Cenários de operação	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Estrutura do documento	4
2 Estado da Arte	7
2.1 Tecnologias existentes	7
2.1.1 Emissores laser	7
2.2 Sistemas existentes	9
2.2.1 Aplicações subaquáticas	11
2.3 Métodos de calibração para sistemas de visão computacional	14
2.4 Resumo do capítulo	18

3	Fundamentos teóricos	19
3.1	Introdução à visão computacional	19
3.2	Formação da imagem	21
3.3	Calibração da câmara	24
3.3.1	Parâmetros intrínsecos	24
3.3.2	Parâmetros extrínsecos	26
3.4	Visão <i>stereo</i>	29
3.5	Triangulação <i>Stereo</i>	30
3.6	Homografia	31
3.7	<i>Cross Ratio</i>	33
3.8	Obtenção de imagens subaquáticas	34
3.8.1	Refração da luz	34
3.8.2	Efeito da distância focal	35
3.8.3	<i>Backscattering</i>	35
3.9	Resumo do capítulo	36
4	Abordagem conceptual	37
4.1	Arquitetura funcional do sistema de visão laser	37
4.2	Descrição dos componentes físicos do sistema de visão laser	41
4.2.1	Sistema de aquisição de imagem	41
4.2.2	Emissores de luz estruturada	42
4.3	Resumo do capítulo	45
5	Implementação	47
5.1	Processo de calibração	47
5.1.1	Leitura das imagens	47
5.1.2	Deteção dos cantos do xadrez	48
5.1.3	Deteção da linha laser	50
5.1.4	Calibração dos parâmetros intrínsecos	52
5.1.5	Obtenção dos parâmetros extrínsecos	54
5.1.6	Obtenção de pontos de controlo	57
5.1.7	Calibração do laser	61
5.2	Obtenção de imagens tridimensionais	61
5.2.1	Modelo do projetor	61

<i>CONTEÚDO</i>	ix
5.2.2 Triangulação	62
5.3 <i>Setup</i> experimental	63
5.4 Resumo do capítulo	65
6 Resultados	67
6.1 Validação do processo de calibração	68
6.1.1 Validação dos parâmetros extrínsecos	68
6.1.2 Validação da calibração do sistema de visão laser	72
6.2 Caracterização da performance do processo de calibração	75
6.3 Obtenção de imagens tridimensionais	79
6.4 Testes em ambientes subaquáticos	82
6.5 Resumo do capítulo	86
7 Conclusão e Trabalho Futuro	87
Bibliografia	91

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

1.1	Alguns dos robôs do Laboratório de Sistemas Autônomos.	2
2.1	Ilustração de sistema baseado em triangulação laser, utilizando um projetor laser em linha e uma câmara.	8
2.2	Emissor de luz estruturada com feixe em linha.	8
2.3	Exemplos de <i>Laser Range Finder</i>	9
2.4	Reconstrução 3D utilizando o princípio da triangulação.	10
2.5	Ilustração do trabalho desenvolvido por Costa et al. utilizando LiDAR e MBES.	11
2.6	ROV Video Ray Pro 4.	12
2.7	Imagens do padrão utilizadas na calibração da câmara.	15
2.8	Esquema do método de calibração utilizado com uma câmara e um LRF.	15
2.9	Esquema do sistema utilizado com uma câmara e um laser em linha.	17
2.10	<i>Camera Calibration Toolbox</i> para Matlab.	18
3.1	Anatomia do olho humano.	20
3.2	Representação típica do modelo de <i>pinhole</i>	21
3.3	Representação tridimensional contendo os referenciais da câmara, da imagem e do mundo.	22
3.4	Modelo de <i>pinhole</i>	23
3.5	Ilustração do efeito da distorção radial na imagem.	25
3.6	Projeção das coordenadas do objeto para as coordenadas da câmara.	27
3.7	Representação ângulos de Euler no referencial da câmara.	28
3.8	Modelo da geometria epipolar de um sistema com 2 câmaras	29
3.9	Ilustração da triangulação <i>stereo</i>	31

3.10	Visualização do plano do objecto descrito pela homografia.	32
3.11	Quatro conjuntos de pontos que apresentam o mesmo <i>cross ratio</i>	33
3.12	Exemplo de refração da luz com $n_2 > n_1$	34
3.13	Comparação entre diferentes disposições da fonte de luz num sistema ótico	36
4.1	Arquitetura funcional do sistema desenvolvido.	38
4.2	Arquitetura do sistema de visão.	39
4.3	Processo de calibração - diagrama de blocos.	40
4.4	Câmara utilizada: Basler acA 1300-30gc.	41
4.5	Exemplos de vários tipos de feixe laser.	42
4.6	Laser de gama superior.	44
5.1	Comparação entre uma imagem real e uma imagem sem distorção.	48
5.2	Processo de deteção dos cantos.	49
5.3	Organização dos pontos detetados.	49
5.4	Processo de deteção da linha do laser.	50
5.5	Deteção da linha do laser : segmentação de cor e binarização.	50
5.6	Deteção da linha do laser - Deteção do ponto de maior intensidade e otimização da linha.	51
5.7	Padrão de xadrez.	52
5.8	Imagens utilizadas para a calibração dos parâmetros intrínsecos.	52
5.9	Processo de leitura das imagens - Calibração dos parâmetros intrínsecos.	53
5.10	Processo de marcação dos cantos - Calibração dos parâmetros intrínsecos.	53
5.11	Erro da projecção em píxies - Calibração dos parâmetros intrínsecos.	54
5.12	Referencial definido em coordenadas mundo.	55
5.13	Obtenção dos pontos de controlo utilizando <i>cross-ratio</i>	58
5.14	Processo de seleção dos pontos a utilizar no <i>cross-ratio</i>	59
5.15	Modelo geométrico do sistema de visão laser.	62
5.16	Plataforma utilizada para acoplar a câmara e o laser.	64
5.17	Ilustração do tanque de testes.	64
6.1	Projecção dos cantos do padrão utilizando os dois métodos enunciados.	69
6.2	Projecção dos cantos do padrão utilizando os dois métodos enunciados.	69
6.3	Erro médio de reprojecção, em X e Y.	72
6.4	Planos do laser.	73

6.5	Processo de validação da performance do sistema.	75
6.6	Referencial definido em coordenadas mundo.	76
6.7	Imagem utilizada para validação da performance do sistema.	77
6.8	Histograma da dispersão dos pontos.	78
6.9	Objeto utilizado para testes.	79
6.10	Cenário de teste.	80
6.11	Coordenadas em Z da linha laser.	80
6.12	Pontos tridimensionais da linha laser.	81
6.13	Nuvem de pontos tridimensional.	82
6.14	Imagem do cenário de teste em ambiente subaquático.	83
6.15	Coordenadas em Z da linha laser.	84
6.16	Pontos tridimensionais da linha laser.	84

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Tabelas

4.1	Características dos lasers de gama inferior.	43
4.2	Características do laser de gama superior.	44
6.1	Pontos de controlo no referencial da câmara.	70
6.2	Parâmetros que definem o plano do <i>laser</i> para as dez experiências realizadas.	73
6.3	Parâmetros que definem o plano do <i>laser</i>	74
6.4	Comparação entre os pontos obtidos pelo o modelo do sistema e os pontos calculados através do <i>cross ratio</i>	76
6.5	Caracterização do erro dos pontos da linha laser	77
6.6	Dispersão tridimensional do sistema.	78
6.7	Estimação das propriedades físicas do objeto.	81
6.8	Estimação das propriedades físicas do objeto em ambiente subaquático.	85

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Siglas e Acrónimos

AUV Autonomous Underwater Vehicles

CCD Charge-Coupled Device

CMOS Complementary Metal-Oxide Semiconductor

FOV Field of View

GigE Gigabit Ethernet

LDS Laser Distance Sensor

LiDAR Light Detection and Ranging

LRF Laser Range Finder

LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LSA Laboratório de Sistemas Autónomos

MBES Multibeam Echo Sounders

MLE Maximum Likelihood Estimation

PPM Perspective Projection Matrix

RGB Red-Green-Blue

ROV Remotely Operated Vehicles

ROS Robot Operating System

SVD Singular Value Decomposition

ToF Time-of-Flight

UWMPIV Underwater Miniature Particle Image Velocimetry

Capítulo 1

Introdução

1.1 Âmbito da dissertação

A importância da exploração de ambientes subaquáticos tem aumentado significativamente, particularmente em atividades que envolvam operações de manutenção de infraestruturas subaquáticas ou o mapeamento de ambientes marinhos e exploração de áreas submersas. Este tipo de atividade, utilizando robôs, necessita de sistemas de visão computacional com capacidade de recolha de imagens tridimensionais. Deste modo, uma das formas encontradas para aumentar este tipo de exploração com robôs, foi dotar estes veículos de meios de perceção sensorial visual. A informação visual é também utilizada com o intuito de facilitar a navegação tripulada ou autónoma deste tipo de veículos.

Uma das abordagens existentes em visão computacional, que permite a obtenção de informação tridimensional, é a visão *stereo*. Porém, em ambientes subaquáticos, sobretudo em ambientes hostis onde a iluminação é escassa, esta abordagem apresenta limitações principalmente ao nível da correspondência entre pontos de diferentes imagens, o que torna muitas vezes, inviável a obtenção de informação tridimensional.

Com a constatação da importância da exploração de meios subaquáticos, recorrendo a sistemas de visão computacional e para suprir limitações visuais (iluminação), surgiu a necessidade de integrar, juntamente com os sensores óticos, novas fontes de informação. Nesse âmbito é comum recorrer à utilização de feixes de luz estruturada (lasers).

Nesta dissertação, desenvolvida no âmbito do mestrado de engenharia eletrotécnica e de computadores ramo de especialização de sistemas autónomos, são abordadas técnicas

de visão computacional para a obtenção de imagens tridimensionais através de um sistema de visão e laser.

1.2 Enquadramento e motivação

O LSA (Laboratório de Sistemas Autónomos)¹ tem vindo a desenvolver ao longo dos últimos anos, inúmeros projetos relativos à robótica marinha, com veículos de superfície e veículos subaquáticos, tal como ilustrado na Figura 1.1. No caso dos veículos subaquáticos o problema relativo à navegação e perceção é complexo, visto que o meio aquático é hostil e podem haver múltiplas fontes de interferência com os sistemas de visão computacional.



Figura 1.1: Alguns dos robôs do Laboratório de Sistemas Autónomos.

Como tal, o problema adjacente a esta dissertação surgiu da necessidade de obtenção de imagens tridimensionais em ambientes subaquáticos, para aplicação a multiplataformas, podendo ser acoplado a qualquer robô ou integrar um sistema de visão computacional.

A calibração de um sistema de visão computacional é a base para a obtenção de resultados coerentes e fidedignos. Devido a este facto, apesar desta temática apresentar múltiplos desafios, o tópico principal deste projeto reside na calibração do sistema. Desse modo, um dos principais objetivos deste trabalho consistiu na resolução e otimização do processo de calibração do sistema de visão laser, desenvolvendo uma ferramenta que permitisse calibrar este tipo de sistema de forma simples e precisa.

¹www.lsa.isep.ipp.pt

1.3 Cenários de operação

O sistema proposto para implementação possuirá determinadas características, que fazem com que o sistema seja aplicável em diversos cenários e ambientes.

Este sistema foi idealizado com o objetivo de implementação em meios subaquáticos, onde o recurso a sistemas de visão nem sempre é fácil, devido às características próprias deste meio. A utilização de luz estruturada como fonte de informação é benéfica principalmente para aplicações onde a profundidade de operação é baixa, obrigando a uma *baseline* curta, e também onde existe escassez de iluminação.

O leque de operações é alargado e carece de exploração. Algumas das aplicações possíveis para este tipo de sistema são:

- Inspeção de cascos de navios;
- Inspeção de estruturas em zonas portuárias;
- Inspeção de plataformas de extração de petróleo ou gás natural;
- Inspeção de diques e barragens;
- Mapeamento de minas inundadas;
- Medição de biomassa;
- Pesquisas oceanográfica.

Para além de aplicações em ambientes subaquáticos, este tipo de sistema pode ser útil em ambientes secos. Nesse meio, os sistemas de visão laser, podem desempenhar tarefas de medição e inspeção para curtas distâncias, essencialmente em inspeção de ambientes industriais.

1.4 Objetivos

Nesta dissertação é abordada a problemática do desenvolvimento de um sistema de visão laser. Assim sendo os objetivos que se pretendem alcançar com o desenvolvimento deste projeto podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- Projeto de um sistema de visão e laser;
- Desenvolvimento de um procedimento de calibração para o sistema de visão e laser;
- Desenvolvimento de uma *toolbox* para calibração do sistema visão e laser;
- Optimização do processo para permitir ao utilizador uma calibração acessível e rápida;
- Obtenção de imagens com informação tridimensional;
- Validação da utilização do sistema em ambientes interiores e em ambientes sub-aquáticos;
- Caracterização da performance do sistema;

1.5 Estrutura do documento

O segundo capítulo diz respeito ao estudo preliminar sobre a temática em questão, onde serão descritas as tecnologias existentes e analisados alguns trabalhos desenvolvidos que estão diretamente relacionados com o tópico desta dissertação.

No terceiro capítulo, são apresentados conceitos e fundamentos necessários à compreensão do funcionamento de um sistema de visão computacional.

A abordagem conceptual do sistema, onde é detalhada a arquitetura funcional do sistema e as etapas referentes ao processamento de imagem, é detalhada no capítulo quatro.

No quinto capítulo é descrita a implementação do projeto, onde são detalhados todos os blocos de *software* implementados e descrito o *setup* experimental desenvolvido para testes.

A validação do processo de calibração do sistema é apresentada no sexto capítulo. Neste capítulo são também apresentados os testes efetuados e os respectivos resultados.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas algumas conclusões bem como respectivas linhas de trabalho futuro, tendo em vista a continuidade do trabalho.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado da Arte

O estudo preliminar sobre a temática em questão é essencial para uma melhor compreensão da mesma, sendo preponderante para a tomada de decisões no decorrer do projeto. Desse modo, foram estudadas tecnologias existentes e analisados alguns trabalhos desenvolvidos que estão diretamente relacionados com o tópico desta dissertação.

2.1 Tecnologias existentes

De forma a entender quais as tecnologias existentes na área dos projetores de luz, foi efetuado um pequeno estudo de modo a conhecer o que existe no mercado e quais as aplicações onde estas são utilizadas.

2.1.1 Emissores laser

Através de emissores de luz estruturada, também denominados como lasers, é possível obter dados para a reconstrução tridimensional. Este tipo de sensores são classificados como ativos e algumas das possíveis aplicações serão explicadas de seguida.

Baseados em triangulação

Este método tem por base a projeção de luz estruturada com a forma de uma linha, de uma cruz ou de uma matriz de pontos. Esta luz, ao incidir numa estrutura 3D,

aparece distorcida em qualquer perspectiva que não seja a do projetor, sendo desse modo recorrente utilizar câmaras para observar e processar a distorção do feixe, tal como se pode observar na Figura 2.1. Analisando a distorção dos feixes de luz pode-se extrair a geometria do objeto visado, sendo este tipo de sistemas adequados para curtas distâncias (tipicamente menores que 5 metros).

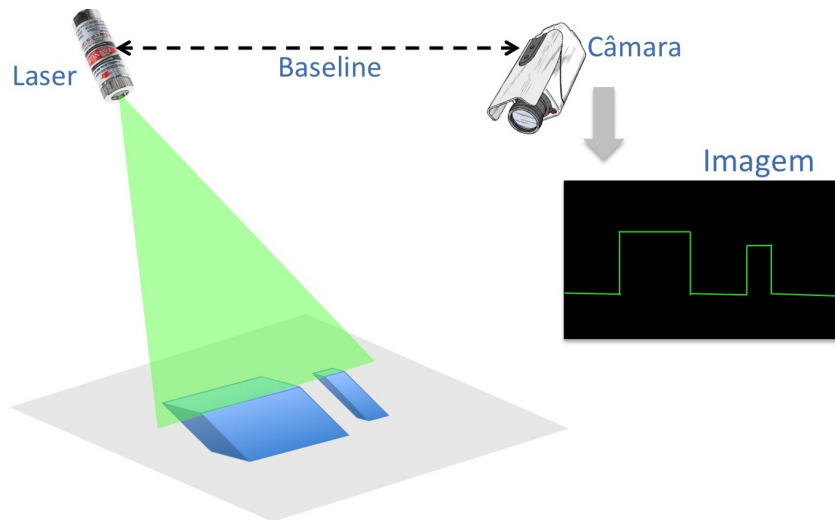


Figura 2.1: Ilustração de sistema baseado em triangulação laser, utilizando um projetor laser em linha e uma câmara.

Atualmente, existem múltiplos tipos de feixe laser, sendo que os mais comuns projetam pontos, linhas ou conjunto de pontos. Na Figura 2.2 pode-se observar um emissor de luz estruturada com feixe em linha e a respetiva distorção da linha aquando da incidência em objetos com relevo.

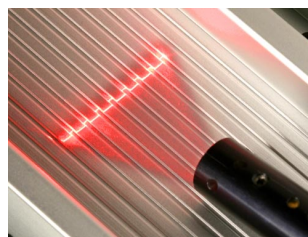


Figura 2.2: Emissor de luz estruturada com feixe em linha, adaptado de ².

²<http://www.lasercomponents.com>, acedido em 02/07/2014.

Laser Range Finder (LRF)

Este tipo de sensores emite um impulso laser para determinar a distância a que se encontra um objeto. Tipicamente, a operação destes sensores baseia-se no tempo que um impulso de luz demora desde a sua emissão até à respectiva reflexão no objeto e retorno ao emissor. A distância é calculada através da medição correta do tempo e do valor da velocidade da luz. Um outro tipo de operação destes sensores baseia-se na diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido. Os alcances obtidos por estes sistemas dependem da potência do feixe, podendo atingir longas distâncias. Na Figura 2.3 é possível visualizar alguns exemplos de tecnologias LRF disponíveis no mercado, dos fabricantes Sick, Faro e Hokuyo.



Figura 2.3: Exemplos de *Laser Range Finder*.

2.2 Sistemas existentes

Atualmente, estão disponíveis no mercado diversos sistemas para varrimento 3D, possibilitando aplicações na área de mapeamento e exploração. Contudo, na maior parte dos casos, apresentam algumas limitações como o preço elevado, a falta de portabilidade do sistema e a necessidade de utilização de processos altamente complexos e morosos para calibração do sistema.

De acordo com essas limitações, nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidos vários projetos nesta área. A nível da investigação existem diversos laboratórios que desenvolvem soluções para reconstrução 3D. Este tema já foi discutido em alguns artigos comparativos sobre as várias formas de obter imagens tridimensionais, utilizando sistemas *stereo* ou monoculares juntamente com fontes de projeção de luz estruturada [1, 2].

Strat & Oliveira [3] desenvolveram um sistema de câmaras portáteis para a obtenção de imagens tridimensionais. Neste trabalho, os autores utilizaram uma câmara a cores e um conjunto de linhas laser projetados no objecto. Recorrendo à técnica de triangulação e desenvolvendo um algoritmo de processamento apropriado, foram obtidas imagens 3D, tal como é possível visualizar através da Figura 2.4.



Figura 2.4: Reconstrução 3D utilizando o princípio da triangulação [3].

Num outro projeto, desenvolvido por Wang et al. [4], aplicou-se a técnica de dupla triangulação laser utilizando uma única câmara. Para tal, foram adicionados dois espelhos nos caminhos óticos. Com esta técnica, segundo os autores, foi possível melhorar a precisão das medidas, reduzir o custo do projeto e ainda aumentar a portabilidade do sistema, uma vez que se reduziu o tamanho e o peso do sistema de forma significativa.

Uma técnica alternativa para obtenção de imagens tridimensionais é a utilização de sensores baseados no "tempo de voo" (*time-of-flight*), fundamentando-se no envio de um impulso laser e na consequente medição do sinal "eco" retornado pelo objeto. No trabalho desenvolvido por Yan Cui et al. [5], foi proposta uma nova abordagem para digitalização 3D utilizando uma câmara ToF (*time-of-flight*). Neste trabalho, os autores utilizaram um sensor que mede o tempo de voo de luz infra-vermelha.

Noutro trabalho, Konolige et al. [6] foi desenvolvida uma alternativa de baixo custo para efetuar o mapeamento do mundo envolvente, através da utilização de um laser e um sensor ótico. Com o desenvolvimento deste LDS (*laser distance sensor*), os autores obtiveram resultados satisfatórios ao nível da medição de distâncias e também de localização, sendo que o custo de *hardware* do projeto não ultrapassou os trinta dólares.

Utilizando as técnicas anteriormente descritas ou outras similares, foram desenvolvidos projetos de maior dimensão e complexidade. No projeto desenvolvido por Costa et al. [7], foi elaborada uma solução para o mapeamento de corais. Uma vasta área de ambientes marinhos do mundo continuam por caracterizar/mapear sem a devida precisão. Neste trabalho, os autores efetuaram uma comparação de duas tecnologias para realizar o mapeamento: LiDAR (*Light Detection and Ranging*) instalados em aviões e MBES (*Multibeam Echo Sounders*) instalados em navios, tal como se verifica na Figura 2.5. Comprovou-se que as duas tecnologias eram igualmente capazes de efetuar o *scanning* do fundo do mar, apesar do MBES obter resultados mais satisfatórios comparativamente com LiDAR, no que diz respeito a profundidades mais acentuadas.

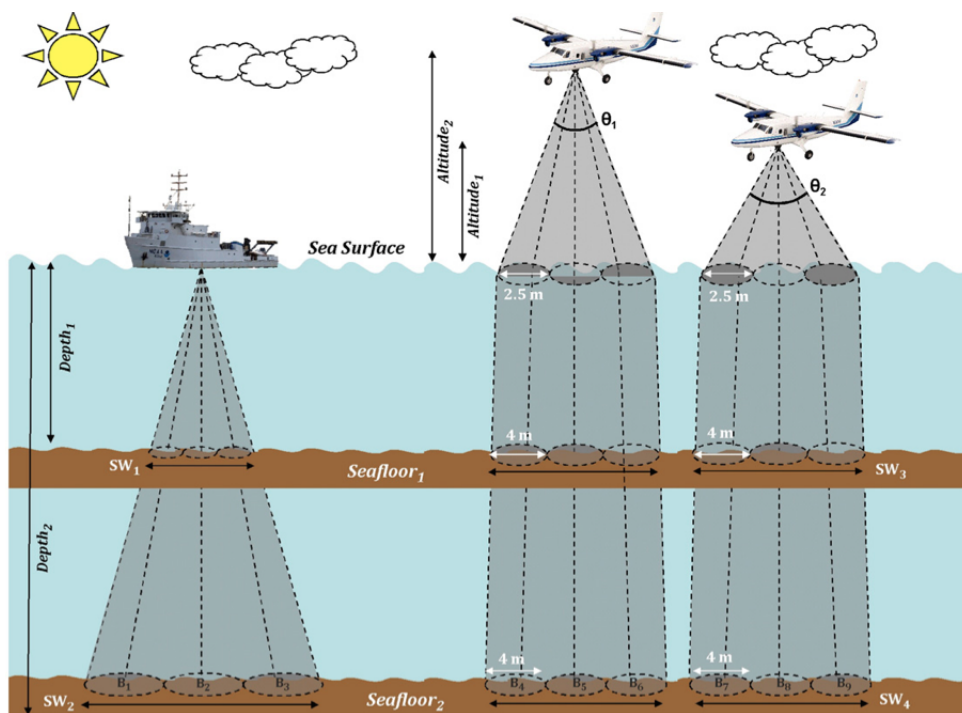


Figura 2.5: Ilustração do trabalho desenvolvido por Costa et al. utilizando LiDAR e MBES [7].

2.2.1 Aplicações subaquáticas

Os recentes avanços tecnológicos, permitiram uma maior acessibilidade ao mundo subaquático no que respeita à exploração, pesquisa científica e atividades industriais. Quando as tarefas envolvidas são repetitivas, perigosas ou demasiado longas para serem

realizadas por mergulhadores ou veículos tele-operados, o uso de veículos não tripulados torna-se mais adequado.

Um dos veículos mais utilizados em ambiente subaquático é o ROV (*remotely operated vehicles*). Este veículo é utilizado para a realização de múltiplas tarefas como por exemplo: exploração biológica, trabalhos a nível arqueológico e geológico, operações de resgate ou de inspeção e manutenção de infra-estruturas. Para inspeção subaquática, o mais comum é a utilização de veículos do tipo ROV como, por exemplo, o Video Ray Pro 4³, Figura 2.6. Estes veículos apresentam algumas limitações como a autonomia ou a necessidade de existência um veículo de apoio. Por força destas desvantagens, estes veículos estão a ser substituídos de forma progressiva por veículos do tipo AUV (*autonomous underwater vehicles*). Nos últimos anos, as melhorias ao nível das capacidades sensoriais destes veículos, possibilitou o aumento do leque de aplicações bem como a viabilidade das missões realizadas pelos mesmos.



Figura 2.6: ROV Video Ray Pro 4, adaptado de ³.

Uma das aplicações com maior impacto é a inspeção ótica autónoma. Neste tipo de aplicação, as imagens tridimensionais têm-se tornado muito importantes nos campos científicos e industriais, para tarefas de medição e controlo de qualidade. A utilização destes sistemas num veículo subaquático obriga a uma concepção cuidada, uma vez que a formação de imagem nestas condições apresenta características específicas.

³<http://www.videoray.com>, acedido em 21/07/2014.

Os sistemas óticos fornecem informações densas e com uma taxa de atualização elevada, sendo utilizados em diversas aplicações robóticas em ambientes terrestres, aéreos e subaquáticos. No entanto, o uso de câmaras em ambientes com água obriga a uma concepção prudente, de forma a minimizar os efeitos característicos deste tipo de ambiente.

As imagens submarinas possuem características próprias, que devem ser levadas em consideração aquando da aquisição das mesmas. Alguns efeitos que podem perturbar as imagens subaquáticas são, por exemplo: a atenuação ou dispersão da luz, inconformidades resultantes de iluminação ou sombras, a movimentação de partículas ou resíduos e a abundância de vida marinha. De forma a contornar tais efeitos são implementadas soluções como: a utilização de sistemas de iluminação artificial, a aplicação de filtros, a utilização de câmaras com amplitude espectral elevada ou o uso de sistemas com múltiplas câmaras.

Os sistemas para aplicações de medições e mapeamento subaquático recorrem a arquiteturas baseadas nas seguintes tecnologias: sonar, câmaras e laser.

Durante as últimas décadas, o uso de luz estruturada para fins subaquáticos foi alvo de intensa investigação. Os primeiros estudos sobre a utilização de lasers em ambientes submarinos remontam ao ano de 1966, quando Angelbeck desenvolveu o trabalho [8] ”*Application of a Laser Scanning and Imaging System to Underwater Viewing*”. A partir desse momento, e com maior ênfase nos últimos 20 anos, têm surgido múltiplos trabalhos que utilizam luz estruturada para aplicações subaquáticas.

Karl D. Moore et al. [9], fazendo uso de um laser e uma câmara acoplados num veículo subaquático, desenvolveram um sistema para fins de batimetria do fundo do mar. Este sistema utiliza, para a obtenção de informações visuais, o princípio da triangulação. Este trabalho foi também importante para estudar os princípios bem como as limitações da aquisição de imagens em ambientes subaquáticos.

Binbin Wang et al. [10] desenvolveu o sistema UWMPPIV (*Underwater Miniature Particle Image Velocimetry*) no qual utilizou uma arquitetura com dois lasers de diferentes comprimentos de onda (vermelho e verde) e duas câmaras. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de colmatar as limitações da primeira versão tendo em conta que esta não utilizava lasers. Os autores, comparando a performance dos dois métodos, concluíram que a segunda versão apresentava melhores resultados no mapeamento.

Chau-Chang Wang et al. [11] desenvolveu um projeto para efetuar o varrimento de objetos submersos. Os autores utilizaram um feixe laser, em linha, a incidir sobre objetos, de forma a capturar as imagens através de um sensor ótico. Este trabalho contempla o projeto do sistema, toda a parte necessária para a calibração dos sensores e ainda a própria aplicação em ambientes subaquáticos. Christer Norstrom [12] concebeu um trabalho similar, porém, aprofundou os efeitos que podem ocorrer na aquisição de imagens subaquáticas.

Em práticas de exploração aplicando luz estruturada utilizam-se diferentes tipos de estruturas, que recorrem à manipulação de um ou mais lasers e a abordagens com visão monocular ou *stereo*. [10, 11, 12, 13, 14] Conforme descrito, estes sistemas fornecem uma medida única de distância efetuando um varrimento laser e, com auxílio de uma câmara, conseguem recolher o perfil de cada ponto. Todos estes sistemas utilizam dois invólucros separados e independentes. Por esse motivo, sempre que ocorre o processo de montagem ou alguma alteração ao sistema, existe a necessidade de realizar uma nova calibração.

2.3 Métodos de calibração para sistemas de visão computacional

O processo de calibração de um sistema de visão computacional é um passo fulcral e a sua exatidão influencia diretamente os resultados obtidos na execução de tarefas como a deteção de objetos e medição ótica. Devido à importância aferida a este tópico, nas últimas décadas, os progressos têm sido notórios no que respeita a melhoria da eficiência e qualidade dos processos de calibração. De seguida, serão apresentados alguns trabalhos cujo objetivo se prende com o aperfeiçoar do processo de calibração do sistema ótico.

No trabalho apresentado por Zhengyou Zhang [15] é proposto um método mais flexível para a calibração de câmaras. Este apenas requer por parte do sistema de visão, a observação de um padrão de calibração em, pelo menos, duas orientações diferentes e completamente desconhecidas. O princípio deste método consiste no uso de uma solução de fórmula fechada seguido de uma otimização não linear baseada no algoritmo de *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) [16].

Com a obtenção das imagens do padrão de várias perspectivas, como exposto na Figura 2.7, são detetados os pontos de interesse, os cantos do padrão. Esses pontos são utilizados no cálculo dos parâmetros intrínsecos, parâmetros esses que dependem exclusivamente das características intrínsecas ao conjunto câmara e lente.



Figura 2.7: Imagens do padrão utilizadas na calibração da câmara [15].

O autor apresenta resultados satisfatórios na obtenção dos parâmetros intrínsecos, comparativamente a outras técnicas. Este método proporcionou o aumento da facilidade de expansão da visão computacional a um grande leque de aplicações, devido à sua simplicidade e flexibilidade.

Qilong Zhang e Robett Pless [17] desenvolveram um novo método de calibração para plataformas que incluam uma câmara e um LRF 2D. Este método consiste na observação de um padrão de calibração em forma de xadrez de modo a relacionar a imagem obtida pela câmara e o varrimento efetuado pelo laser, Figura 2.8.

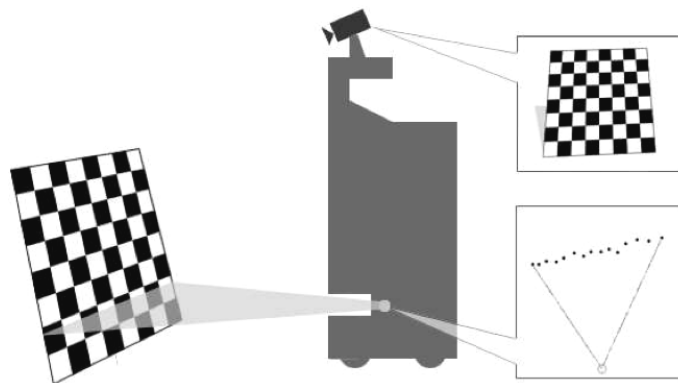


Figura 2.8: Esquema do método de calibração utilizado com uma câmara e um LRF [17].

Para que seja possível efetuar a relação entre os dados recolhidos pelo LRF e as imagens capturadas pela câmara, é necessário que a posição de cada sensor seja conhecida. Este método assume que os parâmetros intrínsecos são conhecidos e debruça-se sobre o cálculo dos parâmetros extrínsecos. Um dos requisitos deste trabalho é o fato do padrão de xadrez, durante o processo de calibração, ter de ser observado em simultâneo pelos dois sensores.

Em suma, o procedimento de calibração deste método segue os seguintes passos:

- Colocação do padrão de xadrez numa posição visível pelos dois sensores, em diferentes perspectivas;
- Para cada posição do padrão, efetuar a leitura dos pontos do laser e relacioná-los com as imagens detetadas com a câmara;
- Estimação da posição da câmara em relação ao alvo (rotação e translação);
- Estimação da orientação e posição relativa da câmara relativamente ao laser;
- Optimização dos parâmetros obtidos;

Os autores apresentaram resultados satisfatórios, com melhorias na ordem dos trinta por cento no que diz respeito à estimação dos parâmetros de calibração do sistema.

Fuqiang Zhou e Guangjun Zhang [18] desenvolveram um método de calibração para um sistema de visão ótico que inclui uma câmara e um laser que emite um feixe em linha, tal como é possível observar na Figura 2.9. Neste processo de calibração são requeridas, pelo menos, duas perspetivas do alvo.

Os autores efetuam a calibração do sistema em duas etapas distintas. Os procedimentos de calibração deste método seguem a seguinte sequência:

- Calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara;
- Aquisição de imagens, pelo menos duas, onde a linha do laser atravesse o padrão de xadrez;
- Detecção dos cantos do padrão de xadrez (através do algoritmo de *Harris Corner* [19]) e da linha laser;

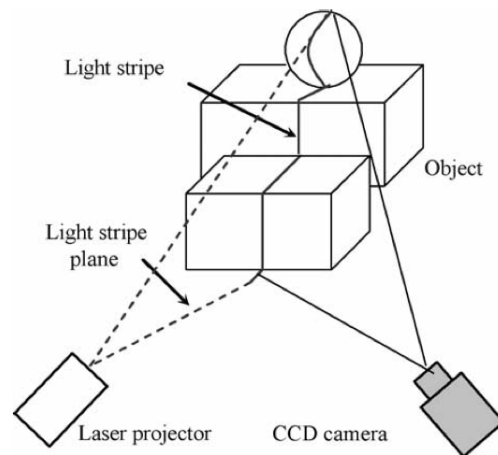


Figura 2.9: Esquema do sistema utilizado com uma câmara e um laser em linha [18].

- Cálculo do *cross-ratio* entre quatro pontos colineares de forma a detetar o ponto laser, no plano da imagem;
- Através do cálculo do *cross-ratio*, deteção desse ponto em coordenadas mundo;
- Cálculo dos parâmetros extrínsecos através de homografia [20];
- Através do método de mínimos quadrados [21]), deteção do plano do laser;
- Obtenção de coordenadas tridimensionais através de triangulação.

Sumariando, com este trabalho, os autores apresentam uma solução para a calibração deste tipo de sistema utilizando observações em orientações desconhecidas, onde o movimento do padrão de calibração não necessita de ser conhecido. Aplicando técnicas de triangulação, torna-se então possível a obtenção de coordenadas tridimensionais, utilizando apenas um sensor ótico.

De forma a resolver a calibração de sensores óticos, atualmente é possível recorrer a *software* já existente, que auxília neste processo. Para a obtenção dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos de um sistema monocular foi disponibilizada uma ferramenta denominada *Camera Calibration Toolbox*. [22] Esta ferramenta está disponível para o *software* Matlab e também em OpenCV.

Através destas ferramentas é possível obter os parâmetros intrínsecos de uma câmara bem como os parâmetros extrínsecos face a um referencial definido no mundo. Na Figura 2.10 é possível observar o ambiente gráfico desse *software* e identificar algumas das suas funcionalidades.



Figura 2.10: *Camera Calibration Toolbox* para Matlab [22].

2.4 Resumo do capítulo

Com o desenvolvimento deste capítulo foi possível entender quais as tecnologias que existem na área dos lasers, sendo que a mais adequada a este projeto é, claramente, a projeção de luz estruturada.

Consequentemente, foi necessário efetuar um estudo sobre os trabalhos que foram desenvolvidos na área. Nesta fase, as aplicações subaquáticas mereceram especial atenção, de forma a entender quais as tecnologias que são aplicadas neste meio para a obtenção de imagem.

Foi ainda necessário compreender o modo como é efetuada a calibração de um sistema que possua uma câmara e um laser, sendo este um dos maiores desafios da presente dissertação.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

No capítulo anterior foram abordados trabalhos relacionados com a temática desta dissertação, que incide na obtenção de informação tridimensionais recorrendo à utilização de um conjunto de câmaras e sistemas de luz estruturada. Neste capítulo serão apresentados alguns dos conceitos e fundamentos necessários à compreensão do funcionamento de um sistema de visão computacional.

3.1 Introdução à visão computacional

Em robótica, uma das temáticas sujeita a intensos esforços de desenvolvimento pela comunidade científica é a percepção sensorial. O modo como os robôs conseguem "perceber" ou "entender" o seu meio envolvente é de extrema importância para o desempenho das tarefas que se propõem a realizar.

Por esse motivo, existe atualmente uma grande diversidade de sensores que são utilizados de forma a permitir ao sistema conhecer o mundo que o rodeia. A título exemplificativo, é possível considerar os sensores de distância, os sonares e os sensores óticos. Os sensores óticos aparecem com maior regularidade em sistemas autónomos, devido à grande quantidade de informação que obtêm comparativamente com o seu preço de aquisição. De seguida, será apresentada uma pequena comparação entre o olho humano e estes sensores.

Um dos principais objetivos dos cientistas da cognição é a compreensão de como o cérebro humano converte os dados de cada olho numa interpretação coerente e significativa do mundo exterior, tendo em conta formas, relevos e profundidade. As semelhanças

entre o olho humano e uma câmara são consideráveis e serão expressas de seguida.

No olho humano, a córnea consiste no revestimento transparente que envolve o olho, enquanto a pupila, define a abertura da íris de forma a regular a quantidade de luz que incide na retina. A retina desempenha a função do sensor de ótico. O cristalino representa o papel de uma lente, permitindo focar a imagem na retina. Na Figura 3.1 são ilustrados alguns dos constituintes do olho humano de forma a facilitar a identificação dos mesmos.

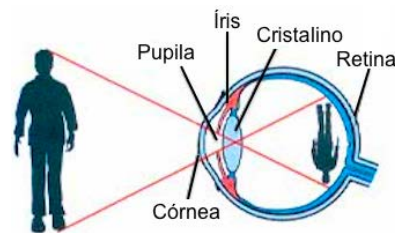


Figura 3.1: Anatomia do olho humano, adaptado de ⁴.

Relativamente às câmaras, estas possuem um sensor ótico do tipo CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) ou CCD (*charge-coupled device*) que, comparativamente com o olho humano, desempenha o papel da retina. Estes sistemas possuem ainda um mecanismo para controlar a quantidade de luz que incide na retina, o chamado obturador, que atua de forma semelhante à pupila do olho humano.

Contudo, a acrescentar às semelhanças acima descritas entre os sensores biológicos e as câmaras, encontram-se subjacentes algumas diferenças. Uma dessas diferenças é o facto da retina humana ser côncava contrariamente à dos sensores óticos que são planos. A nível do foco, as lentes comuns são focadas para visualizar ao longe ou ao perto, o mesmo não acontece com o olho humano, pois este consegue mudar a forma do cristalino para focar objetos a diferentes distâncias.

Tradicionalmente, as comunidades de visão e inteligência artificial tentam a todo custo reproduzir a capacidade que os seres humanos têm para ver, recorrendo a algoritmos computacionais. Os temas abordados pela comunidade de visão computacional são variados e podem ser divididos de forma hierárquica, consoante a sua complexidade e o nível de abstração da informação. Deste modo, existem as tarefas de alto nível, as tare-

⁴www.drvisao.com.br/conheca/O-Olho, acedido em 10/09/2014.

fas de nível médio e as tarefas de baixo nível. O reconhecimento de objetos e extração de características enquadram-se em tarefas de alto nível, enquanto que, por exemplo, a obtenção de imagens 3D remontam a tarefas de nível médio. Por fim, a deteção de pontos ou contornos apresentam-se como tarefas de baixo nível.

3.2 Formação da imagem

O processo que permite mapear os pontos do mundo na imagem da câmara é designado por projeção perspetiva. O cálculo dessa projeção é efetuado através da modelização do sensor de imagem.

Neste tipo de sistemas é frequente utilizar o modelo de *pinhole*. Este modelo descreve a relação matemática entre as coordenadas de um ponto 3D e a projeção desse ponto no plano da imagem. Este método não inclui distorções geométricas ou objetos desfocados pela lente. Os erros do método dependem da qualidade do sensor, sendo que o erro se propaga do centro da imagem até às margens.

Em termos de funcionamento, este modelo consiste na colocação de todos os raios de luz emitidos e refletidos a atravessarem um pequeno orifício, o *pinhole* da câmara, formando uma imagem invertida do objeto observado no plano da imagem, como se pode verificar através da Figura 3.2 [23].

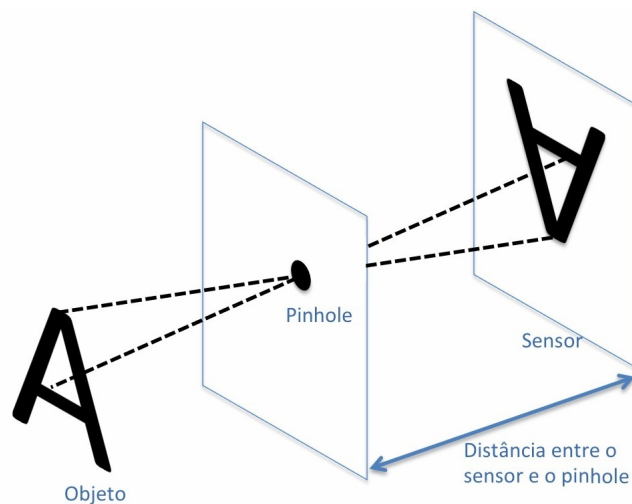


Figura 3.2: Representação típica do modelo de *pinhole*.

A acrescentar ao modelo apresentado anteriormente, é possível observar na Figura 3.3, a projeção de um ponto, p^w , no plano da imagem P^i , através da passagem pelo centro ótico, que se encontra no plano da câmara P^c . A distância que separa os dois planos é denominada por distância focal.

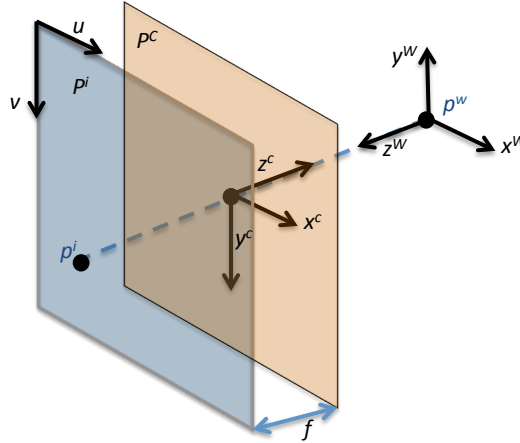


Figura 3.3: Representação tridimensional contendo os referenciais da câmara, da imagem e do mundo.

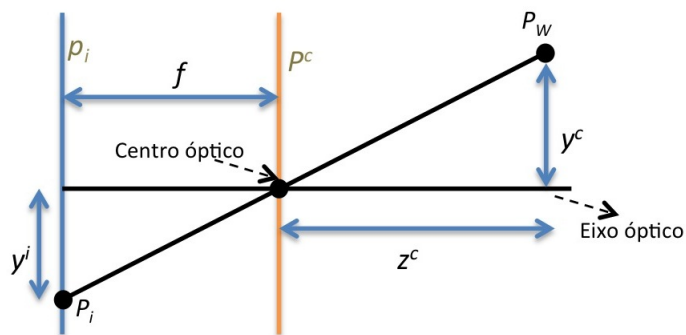
Num sistema visual monocular que se rege pelo modelo *pinhole* a coordenada de cada ponto pode ser deduzida através da geometria dos triângulos semelhantes, tal como definido na equação 3.1:

$$\frac{-y^I}{f} = \frac{y^C}{z^C} \Leftrightarrow -y^I = f \cdot \frac{y^C}{z^C} \quad (3.1)$$

Na equação anterior f representa distância focal, z^c a distância entre a câmara e o objeto, y^c é o comprimento do objeto e y^i representa o comprimento do objeto no plano de imagem. Através da Figura 3.4 é possível observar cada um desses elementos.

Com a existência de uma relação geométrica simples entre os dois planos, P^i e P^c , a projeção perspectiva pode ser descrita através de uma equação linear 3.2.

$$\begin{bmatrix} x^I \\ y^I \end{bmatrix} = \frac{f}{z^C} \begin{bmatrix} x^C \\ y^C \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Figura 3.4: Modelo de *pinhole*.

A relação entre os pontos no mundo (x^W, y^W, z^W) e os pontos no referencial da câmara (x^C, y^C, z^C) pode ser obtida através de uma transformação composta por uma rotação e uma translação, em coordenadas homogêneas:

$$\begin{bmatrix} x^C \\ y^C \\ z^C \end{bmatrix} = [R|\mathbf{t}] \begin{bmatrix} x^W \\ y^W \\ z^W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A matriz R e o vetor \mathbf{t} representam as componentes de rotação e translação, resultantes do cálculo dos parâmetros extrínsecos, que serão abordados na secção 3.3.2. Combinando as equações 3.2 e 3.3, pode-se relacionar um ponto no mundo com o referencial normalizado da câmara, através da matriz de projeção perspectiva (PPM):

$$z^C \begin{bmatrix} x^I \\ y^I \\ 1 \end{bmatrix} = PPM \begin{bmatrix} x^W \\ y^W \\ z^W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

A matriz PPM contém informação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, sendo representada por:

$$PPM = A[R|\mathbf{t}] \quad (3.5)$$

Os parâmetros intrínsecos são representados pela matriz A e serão abordados em maior pormenor na secção 3.3.1.

Com o cálculo da matriz PPM torna-se possível mapear pontos do mundo no referencial 2D da imagem, através da relação 3.6, onde m^I representa um ponto da imagem e m^W representa esse mesmo ponto em coordenadas no mundo.

$$m^I \approx (PPM)m^W \quad (3.6)$$

3.3 Calibração da câmara

Geralmente com a utilização de um sistema de visão, é necessário obter transformações entre os pontos do espaço tridimensional do mundo para pontos no plano da imagem e vice-versa. Dessa forma, é necessário determinar os parâmetros que possibilitam efetuar essas transformações e que definem o modelo da câmara, os parâmetros intrínsecos e os parâmetros extrínsecos, que serão abordados nos sub-capítulos 3.3.1 e 3.3.2, respectivamente. Com esses parâmetros, é possível definir propriedades intrínsecas da câmara e também a sua posição no mundo face a um sistema de coordenadas previamente definido. Para se obter estes parâmetros é necessário um procedimento de calibração. Um desses procedimentos é baseado no algoritmo de Tsai [24].

O algoritmo de Tsai calcula a informação de calibração utilizando o modelo de câmara *pinhole* e projeção perspectiva, porém, é adicionado um parâmetro k que é o coeficiente de distorção radial da lente. Utilizando este método, a informação de calibração é calculada partindo de pontos no mundo com coordenadas conhecidas. Para cada ponto deve, também, ser conhecida a posição da sua projeção no sistema de coordenadas da imagem. Este algoritmo utiliza uma particularidade física do sistema de visão, denominada por alinhamento radial, que é definida em função da rotação e translação relativa, entre a câmara e os pontos de calibração [25].

3.3.1 Parâmetros intrínsecos

Os parâmetros intrínsecos de uma câmara dependem exclusivamente das suas características físicas, nomeadamente a geometria interna da câmara e do tipo de lente. Estes parâmetros incluem informações relativas à resolução da imagem, alinhamento do sensor e coeficientes associados à distorção da imagem.

O resultado da calibração dos parâmetros intrínsecos é representado pela matriz A e pelo vetor \mathbf{k} . As variáveis f_x e f_y representam as distâncias focais, c_x e c_y as coordenadas do centro ótico enquanto que, o vetor k contém os coeficientes associados à distorção da imagem.

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3, k_4, k_5) \quad (3.8)$$

A matriz A serve, desta forma, para relacionar as coordenadas do plano da imagem com o plano da câmara, ou seja, relacionar o referencial da imagem (coordenadas *píxeis*) com o referencial da câmara (coordenadas normalizadas).

A distorção da lente pode ser descrita segundo duas componentes: tangencial e radial. A distorção radial é facilmente perceptível na imagem, uma vez que ocorrer uma distorção geométrica dos píxeis das margens da imagem, como se pode observar através da análise da Figura 3.5. Este fenómeno é habitualmente denominado por efeito "barril" ou "olho de peixe". O valor desta distorção é igual a zero no centro ótico da imagem, propagando-se à medida que se afasta do centro [26]. Este efeito acentua-se quando são utilizadas lentes com grande abertura angular.

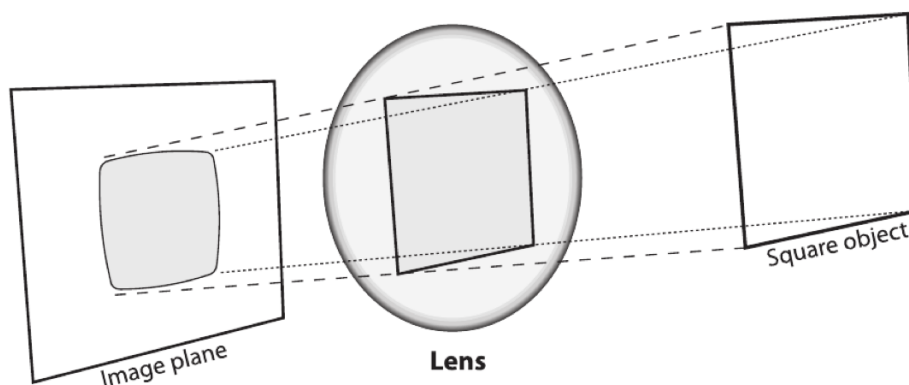


Figura 3.5: Ilustração do efeito da distorção radial na imagem [26].

Em relação à distorção tangencial, esta é originada pelo desalinhamento físico dos vários elementos que constituem a lente. A perturbação induzida por esta componente é mínima, sobretudo nos sensores modernos com distância focal fixa, pelo que, nesses casos, pode ser desprezada [20].

O modelo de correção das distorções radial e tangencial, é dado pelas equações 3.9 e 3.10 para o caso da distorção radial e 3.11 e 3.12 para a distorção tangencial. Nas seguintes equações, x e y correspondem à localização do ponto em píxeis com distorção e x_u e y_u corresponde à posição do ponto sem distorção. Os parâmetros k_1 , k_2 , k_3 dizem respeito aos parâmetros da distorção radial enquanto que, k_4 e k_5 representam os parâmetros da distorção tangencial. A variável r representa a distância ao centro ótico [26].

$$x_{u(\text{radial})} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.9)$$

$$y_{u(\text{radial})} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.10)$$

$$x_{u(\text{tangencial})} = x + [2k_4y + k_5(r^2 + 2x_2)] \quad (3.11)$$

$$y_{u(\text{tangencial})} = y + [k_4(r^2 + 2y_2) + 2k_5x] \quad (3.12)$$

3.3.2 Parâmetros extrínsecos

Os parâmetros extrínsecos são utilizados para converter coordenadas tridimensionais no referencial do mundo para o referencial da câmara [27]. Para obter as coordenadas de um ponto 3D de um referencial para outro, é necessário obter as relações de rotação e translação entre os referenciais. Desta forma é necessário definir a matriz de rotação R , assim como o vetor de translação t . Na Figura 3.6 ilustra-se a rotação e translação de um ponto Q no referencial do objeto para o referencial da câmara.

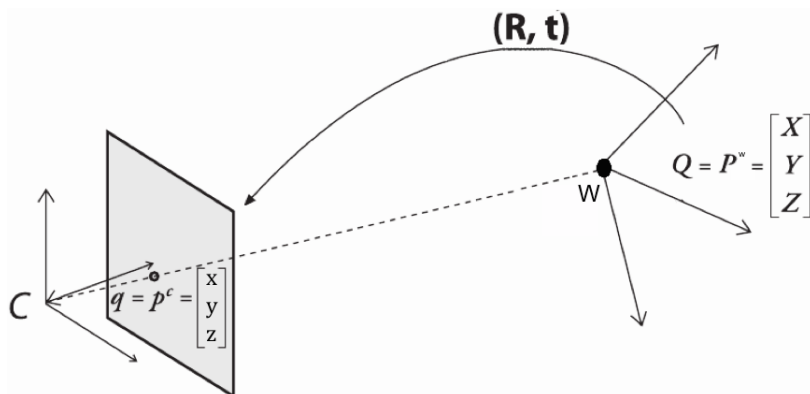


Figura 3.6: Projeção das coordenadas do objeto para as coordenadas da câmara.

A matriz de rotação pode ser representada em função dos ângulos de Euler (ϕ , θ e ψ), da seguinte forma:

$$R = R_{(x,\phi)}^T R_{(y,\theta)}^T R_{(x,\psi)}^T \tag{3.13}$$

Os três ângulos de Euler, *roll* (ϕ), *pitch* (θ) e *yaw* (ψ), são obtidos através do processo de rotação pura. Um rotação pura denota que ocorre rotação em apenas um eixo, ficando os restantes fixos. Nas equações 3.14, 3.15 e 3.16 estão descritas algebricamente as rotações em *roll* (em torno do eixo X), em *pitch* (em torno do eixo Y) e em *yaw* (em torno do eixo Z), respetivamente [28].

$$R_{(x,\phi)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

$$R_{(y,\theta)} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

$$R_{(z,\psi)}^T = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Na Figura 3.7 encontram-se ilustrado os ângulos de Euler no referencial de uma câmara.

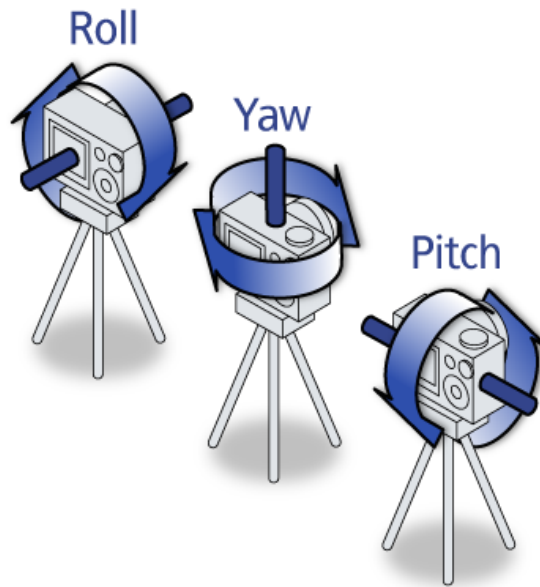


Figura 3.7: Representação ângulos de Euler no referencial da câmara, adaptado de ⁵

A matriz de rotação R , descrita na equação 3.13, em função dos ângulos de Euler é representada por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \phi \sin \theta - \cos \theta \sin \psi & \sin \psi \sin \phi \sin \theta + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \sin \psi \sin \theta \cos \theta & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

⁵<https://developers.google.com/maps/documentation/flash/3d-maps>, acessado em 20/08/2014.

A translação do ponto da origem do referencial do mundo no referencial da câmara é representada pelo vetor \mathbf{t} :

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.4 Visão stereo

As técnicas de visão *stereo* são uma das formas mais utilizadas para a reconstrução dos pontos tridimensionais de uma estrutura. A obtenção da reconstrução, utilizando apenas sensores óticos, requer a utilização de pelo menos duas imagens com perspectivas diferentes.

Um sistema composto por duas ou mais fontes de imagens 2D, que representa projeções tridimensionais do mundo, pode ser descrito pela geometria epipolar, ilustrada na Figura 3.8.

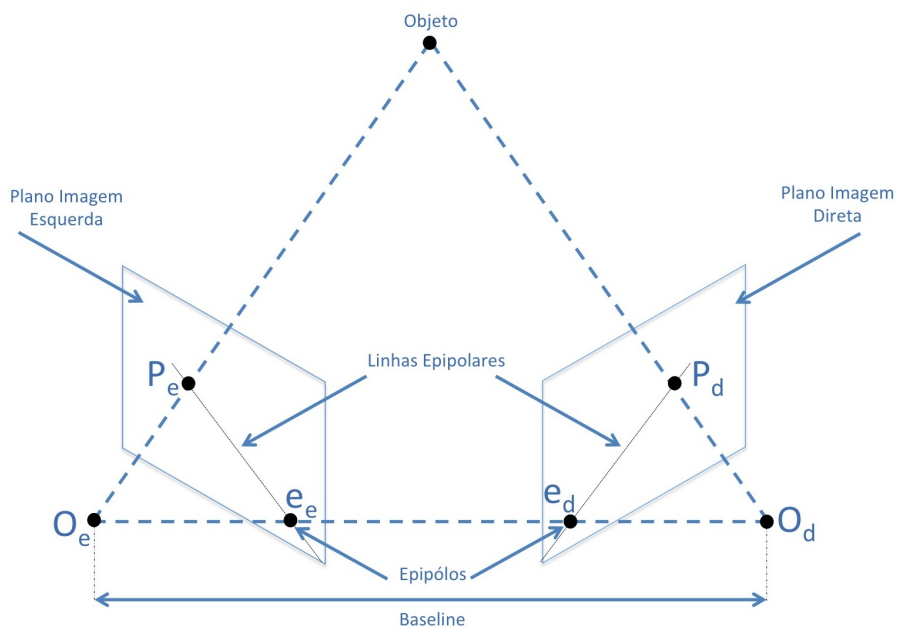


Figura 3.8: Modelo da geometria epipolar de um sistema com 2 câmaras

Através da análise da figura, pode-se observar a representação dos planos das duas câmaras que capturam um ponto/objeto 3D. Os pontos e_e e e_d são denominados de epíolos. O segmento que une os dois centros óticos O_e e O_d representa a *baseline*. A intercepção do plano epipolar com as imagens do plano gera, para cada câmara, a intitulada linha epipolar. O objeto visto por cada uma das câmaras é representado por P_e e P_d .

A geometria epipolar pode ser representada algebricamente de duas formas distintas: pela matriz essencial ou através da matriz fundamental [29].

A matriz essencial E é expressa da seguinte forma:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} R \quad (3.19)$$

A matriz fundamental F , possui os mesmos parâmetros que a matriz E e em simultâneo os valores dos parâmetros extrínsecos de cada uma das câmaras. De modo a determinar a matriz fundamental F , podemos relacionar a mesma com a matriz essencial E , equação 3.19.

$$F = K_r^{-1} \times E \times K_l^{-1} \quad (3.20)$$

Na equação 3.20, K_r e K_l correspondem aos parâmetros de calibração obtidos pelo o método de Tsai [25].

3.5 Triangulação Stereo

Para se proceder a este cálculo é necessário conhecer os parâmetros extrínsecos do sistema de visão *stereo*, já abordados anteriormente no subcapítulo 3.3.2.

Aquando do conhecimento da matriz de rotação (R) e do vetor de translação (\mathbf{t}) bem como os pontos de projeção das duas câmaras (p_l e p_r) é possível determinar o valor escalar de a , b e c .

$$ap_l - bR^T p_r + c(p_l \times R^T p_r) = \mathbf{t} \quad (3.21)$$

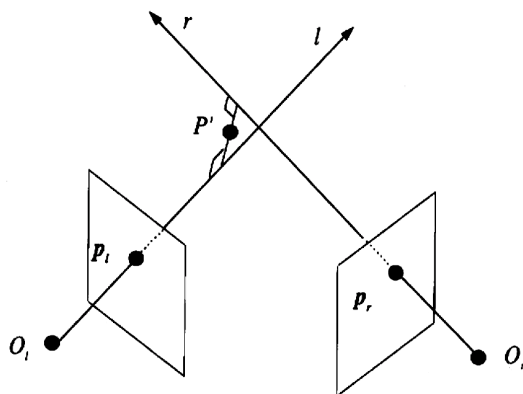


Figura 3.9: Ilustração da triangulação *stereo* [29].

Na expressão 3.22, a representa a distância segundo p_l , enquanto que b representa a distância segundo p_l rodado para o referencial da câmara esquerda. O escalar c retrata a distância segundo a direção perpendicular às retas p_l e p_r [29].

O cálculo do ponto P' , que representa o ponto de interseção das retas das duas câmaras é dado por:

$$P' = ap_l + \frac{c}{2}(p_l \times R^T p_r) \quad (3.22)$$

3.6 Homografia

A homografia estabelece a correspondência de pontos de duas imagens com orientações distintas, capturadas no mesmo instante. A matriz de homografia, H , é constituída por duas partes distintas: pela parte relacionada com a transformação física e também pelos parâmetros intrínsecos da câmara (matriz A) [25].

O ponto Q representa um ponto em coordenadas mundo e q esse mesmo ponto no plano da imagem, como ilustrado no exemplo da Figura 3.10.

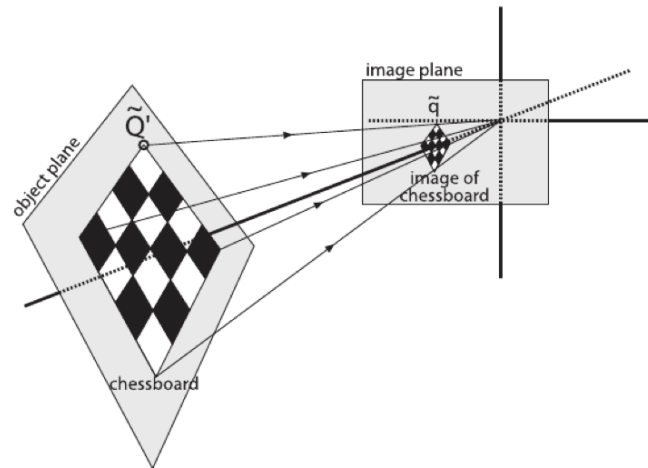


Figura 3.10: Visualização do plano do objecto descrito pela homografia.

Utilizando coordenadas homogêneas para descrever os pontos referidos, obtêm-se:

$$\hat{Q} = [X \ Y \ Z \ 1]^T \quad (3.23)$$

$$\hat{q} = [x \ y \ 1]^T \quad (3.24)$$

O ponto q através da matriz de homografia H é obtido com a expressão 3.25, onde s representa um fator de escala arbitrário.

$$\hat{q} = s \times H \times \hat{Q} \quad (3.25)$$

A matriz H , que relaciona as coordenadas do objeto com o plano da imagem, no que diz respeito à transformação física, corresponde à soma de uma rotação R e translação \mathbf{t} . A transformação física referida anteriormente é representada pela matriz W .

$$W = \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Desta forma, a matriz H é apresentada pela equação 3.27, onde a matriz A representa a matriz dos parâmetros intrínsecos da câmara, definida pela equação 3.7.

$$H = A \times W \quad (3.27)$$

Assim sendo, substituindo a matriz de homografia H na equação 3.25, é possível obter o ponto Q no plano da imagem através de:

$$q = s \times A \times W \times Q \quad (3.28)$$

3.7 Cross Ratio

O *cross ratio* permite calcular a relação entre pontos colineares, pertencentes à mesma reta. Uma das propriedades do *cross ratio* é a invariância, isto é, o valor do *cross ratio* para um determinado conjunto de pontos mantém-se inalterado independentemente do referencial considerado.

Na Figura 3.11 são apresentados quatro conjuntos, de vistas diferentes, de quatro pontos colineares. O valor do *cross ratio* é invariante sob qualquer projeção, sendo que todos os conjuntos apresentados têm o mesmo valor de *cross ratio* [20].

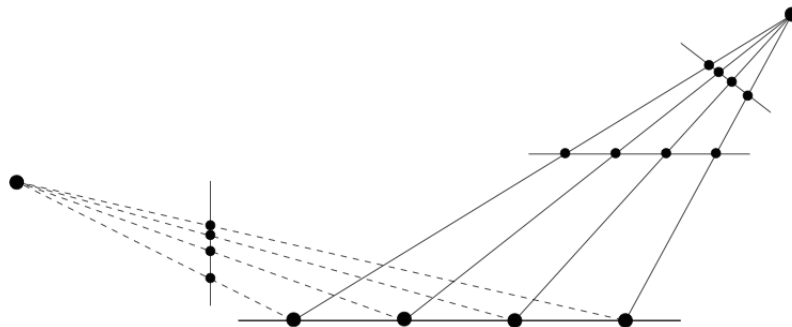


Figura 3.11: Quatro conjuntos de pontos que apresentam o mesmo *cross ratio* [19].

Consideram-se então, quatro pontos colineares p_1, p_2, p_3 e p_4 no espaço bidimensional. O valor do *cross ratio*, CR , para esses quatro pontos é dado por:

$$CR(p_1, p_2, p_3, p_4) = \frac{(p_1 - p_3)(p_2 - p_4)}{(p_1 - p_4)(p_2 - p_3)} \quad (3.29)$$

3.8 Obtenção de imagens subaquáticas

Visto ser objetivo deste trabalho a aquisição de imagens em ambientes subaquáticos, foi necessário entender e listar alguns dos efeitos que ocorrem na aquisição de imagens nestas condições, sendo estes fenômenos abordados nas seções seguintes.

3.8.1 Refração da luz

Na aquisição de imagens subaquáticas poderão ocorrer distorções devido à interface ar-água que resulta no aparecimento de uma parte da imagem ampliada. Quando um raio de luz atravessa dois meios com índices de refração diferentes ocorre um desvio angular. A lei de refração, ou Lei de Snell-Descartes, é dada pela expressão 3.30, em que n_1 e n_2 são os índices de refração dos dois meios envolvidos e θ_i e θ_r são os ângulos de incidência e refração, respectivamente.

$$n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \theta_r \quad (3.30)$$

Na Figura 3.12 é possível visualizar o que acontece a um feixe de luz quando atravessa dois meios com índices de refração diferentes, neste caso com $n_2 > n_1$, visto que $\theta_1 > \theta_2$.

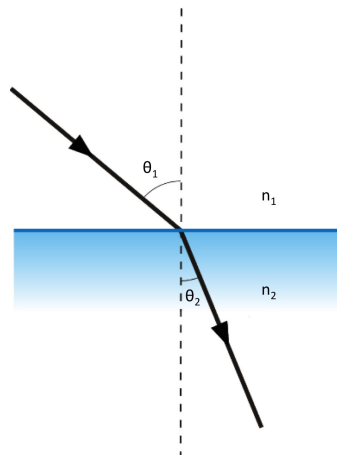


Figura 3.12: Exemplo de refração da luz com $n_2 > n_1$

3.8.2 Efeito da distância focal

Na aquisição de fotos submarinas a câmara é, frequentemente, colocada num ambiente seco, dentro de um recipiente que garanta estanquidade.

Nestas condições, os objetos aparentam estar mais próximos do que se encontram na realidade, sendo que a câmara deve focar a posição aparente do objeto, tendo em conta o índice de refração da água ($n_{\text{água}}=1,34$).

Atualmente, a maioria das câmaras digitais possui foco automático que produz a compensação automática.

3.8.3 *Backscattering*

O fenómeno do *backscattering* aparece quando a luz é refletida de volta pelas partículas flutuantes, o que pode tornar a imagem mais obscura. Por muito límpida que a água aparente se encontrar, é frequente que contenha uma enorme quantidade de partículas a flutuar, invisíveis ao olho humano.

A utilização de luz artificial para a aquisição de imagens subaquáticas é quase indispensável, nomeadamente a baixas profundidades ou em túneis onde a iluminação é bastante reduzida.

Para minimizar estes efeitos, é necessário ter especial cuidado na concepção do sistema, para as luzes iluminarem apenas a área captada pelo sensor ótico, aumentando o volume comum entre o *field of view* (FOV) da câmara e o FOV da fonte de luz [15, 17].

Na Figura 3.13 observa-se uma comparação entre um sistema com volume comum mais baixo e mais elevado, alterando somente a posição da fonte de luz externa.

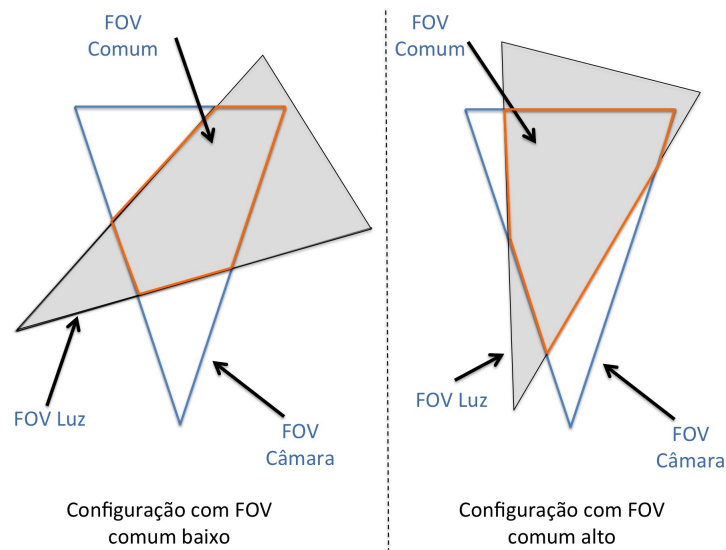


Figura 3.13: Comparação entre diferentes disposições da fonte de luz num sistema óptico

3.9 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram enunciados conceitos importantes, tais como: a formação de imagem, os parâmetros de calibração de uma câmera, os sistemas de visão *stereo*, a homografia, o *cross-ratio* e as particularidades da obtenção de imagem dentro de água.

Estes conceitos são fundamentais para o desenvolvimento do sistema de visão tridimensional utilizando luz estruturada.

Capítulo 4

Abordagem conceptual

Anteriormente, caracterizou-se a problemática adjacente à utilização de sistemas de visão laser em ambientes subaquáticos. Verificou-se que o sistema têm de cumprir requisitos específicos tais como: proceder à seleção do *hardware* adequado, desenvolver uma ferramenta que permite efetuar a calibração do sistema de forma otimizada e que permita a obtenção de imagens tridimensionais em ambientes secos e subaquáticos com uma precisão elevada. Através da definição dos requisitos do sistema definiu-se a arquitetura a nível de *hardware* e *software*, que será apresentada nos sub-capítulos seguintes.

4.1 Arquitetura funcional do sistema de visão laser

Durante este subcapítulo é apresentada a arquitetura do sistema ao nível do *hardware* utilizado e em relação ao *software* desenvolvido. A arquitetura funcional do sistema é constituída por três módulos essenciais:

- Sistema computacional - Plataforma responsável pela aquisição de imagens e processamento da informação;
- Sistema de aquisição de imagem - Pode ser constituído por uma ou mais câmaras, dependendo da aplicação e do FOV pretendido;
- Sistema laser - Módulo que emite luz estruturada nos objetos. Pode ser constituído por um ou mais lasers dependendo da área de cobertura desejada ou da aplicação do sistema.

Na Figura 4.1 é apresentada a configuração base do sistema de visão laser. Esta configuração pode ser alterada consoante a aplicação do sistema, sendo possível a integração

de mais câmaras e/ou de mais projetores de luz estruturada.

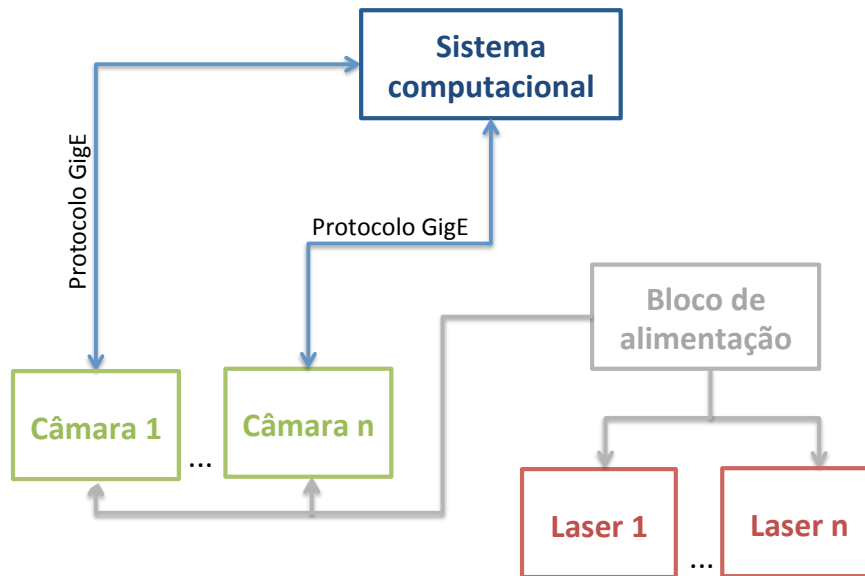


Figura 4.1: Arquitetura funcional do sistema desenvolvido.

Na arquitetura apresentada, o sistema computacional é responsável pela recepção e processamento das imagens. As imagens são rececionadas através do protocolo *Gigabit Ethernet* em formato *raw* sendo necessário proceder à conversão da imagem para o formato *bmp* ou *jpg*. Posteriormente é efetuado o processamento das imagens realizando tarefas como a leitura das imagens, a segmentação de cor, a binarização ou a obtenção de imagens com informação tridimensional.

Para a obtenção de imagens é utilizado uma câmara que envia as imagens para o sistema computacional através do protocolo *Gigabit Ethernet*. As câmaras devem ser posicionados de forma estratégica em relação ao sistema laser, consoante a aplicação, de modo a visualizar grande parte da linha laser. A integração de mais câmaras pode ser a solução para sistemas que tenham como requisito um FOV elevado.

O sistema laser é responsável pela projeção de luz estrutura nos objetos. Este componente é utilizado com o objetivo de fornecer informações sobre as características físicas dos objetos visados. Consoante a aplicação do sistema, pode ser interessante a adição de mais emissores lasers de forma a aumentar a área iluminada.

Os três blocos descritos anteriormente descrevem a arquitetura funcional do sistema, a nível de *hardware*. No que diz respeito ao processamento da imagem, este encontra-se caracterizado segundo uma abordagem de *pipeline*, na Figura 4.2.

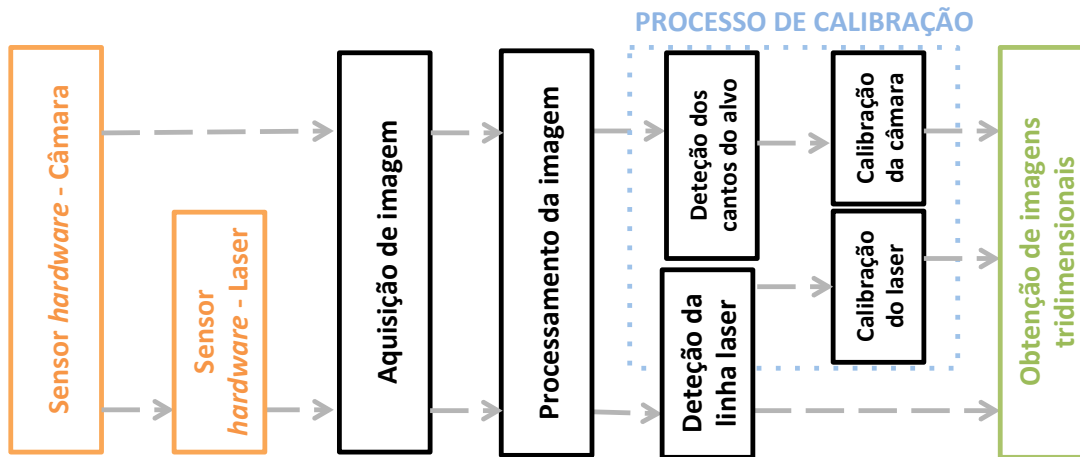


Figura 4.2: Arquitetura do sistema de visão.

Neste diagrama, algumas das etapas são referentes a blocos de *hardware* e outras ao *software* implementado. Como é possível observar na figura anterior, o sistema possui dois modos de funcionamento: o modo de calibração e o modo de perceção tridimensional. Inicialmente, de forma a calibrar o sistema, são detetados os cantos do padrão de xadrez e a linha do laser. Este processo é efetuado apenas uma vez, ou quando existe alguma alteração ao sistema físico, de forma *offline*.

Após a conclusão do processo de calibração, onde são definidos os parâmetros relativos à calibração da câmara e do laser, o sistema pode operar em modo de perceção tridimensional. Para tal, é necessário efetuar a leitura das imagens, segmentar as imagem consoante a cor do feixe laser e proceder à binarização da imagem onde são detetados os pontos onde existe a linha laser. Com essa informação é possível efetuar a reconstrução tridimensional do objeto visado, através de triangulação.

Tal como já referido, uma das etapas primordiais neste trabalho é a calibração dos sistema de visão laser. Para uma melhor compreensão do processo de calibração da câmara e do laser, este foi dividido em três fases distintas, tal como é possível observar na Figura 4.3.

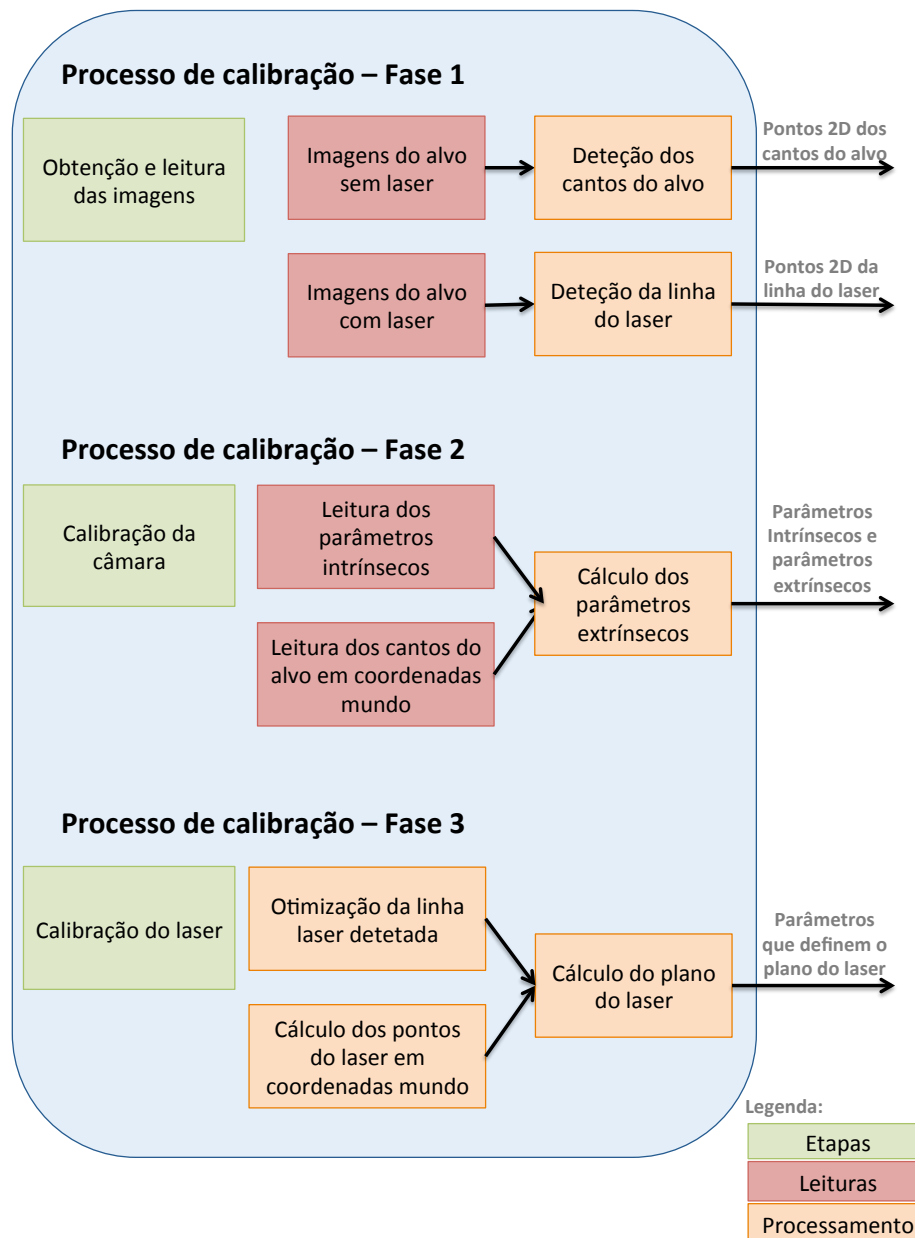


Figura 4.3: Processo de calibração - diagrama de blocos.

Numa primeira fase são obtidas e, conseqüentemente, guardadas imagens do padrão de xadrez, com e sem a incidência do laser. Esta fase é fulcral para a obtenção dos pontos 2D relativos aos cantos do padrão de xadrez (alvo) e à linha do laser, utilizados nas fases posteriores. Aquando da leitura das imagens foi removida a distorção provocada pela

lente, sendo que nesta primeira fase, o problema relativo à calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara já se encontra resolvido. A segunda fase diz respeito à calibração da câmara, de forma a obter os parâmetros intrínsecos e extrínsecos relativos à mesma. Na última fase deste processo é efetuada a calibração do laser, de onde resultam os parâmetros que definem o plano de incidência do laser.

4.2 Descrição dos componentes físicos do sistema de visão laser

Nas secções seguintes são descritos os componentes físicos utilizados no desenvolvimento deste projeto e elucidados os motivos que determinaram a sua escolha.

4.2.1 Sistema de aquisição de imagem

No seguimento da análise de requisitos efetuada, surge a necessidade de selecionar um dispositivo de aquisição de imagem (câmara), que seja capaz de cumprir os seguintes requisitos:

- Capacidade de disparo por *trigger* externo;
- Protocolo de comunicação USB3.0 ou GigE (*Gigabit Ethernet*);
- *Frame-rate* superior a 30 *fps*;
- Tipo de disparo - *Global shutter*.

Desse modo, a câmara selecionada para o desenvolvimento deste projeto foi uma câmara do fabricante Basler, cujo o modelo é Basler acA 1300-30gc ⁵. Na figura 4.4 é ilustrada a câmara em questão.



Figura 4.4: Câmara utilizada: Basler acA 1300-30gc ⁵.

⁵<http://www.baslerweb.com/products/ace.html?model=167>, acedido em 18/09/2014.

Para se proceder à aquisição de imagens utilizando esta câmara é necessário a instalação de um *software* do fabricante *Pylon*. O sistema de visão laser pode funcionar em tempo-real ou em *offline*, sendo necessário desenvolver ferramentas que permitam os dois modos de funcionamento. Para a recolha de imagem em tempo-real recorre-se à ferramenta ROS (Robot Operating System) por forma a guardar as imagens num formato previamente designado (*bmp* e *jpg*) para posteriormente efetuar a extração da informação relevante.

4.2.2 Emissores de luz estruturada

Tal como apresentado no capítulo relativo ao estado da arte (capítulo 2) existem inúmeros tipos de emissores de luz estruturada. Nesta fase, e depois de compreender quais os requisitos do sistema, foi necessário escolher qual o laser mais apropriado para este projeto, tendo em conta a necessidade de desenvolver um sistema que funcione baseado no princípio da triangulação entre um laser e uma câmara. Deste modo, é comum encontrar soluções com a projeção em forma de linha, matriz de pontos, em cruz, entre outros tipos, tal como exemplifica a Figura 4.5.

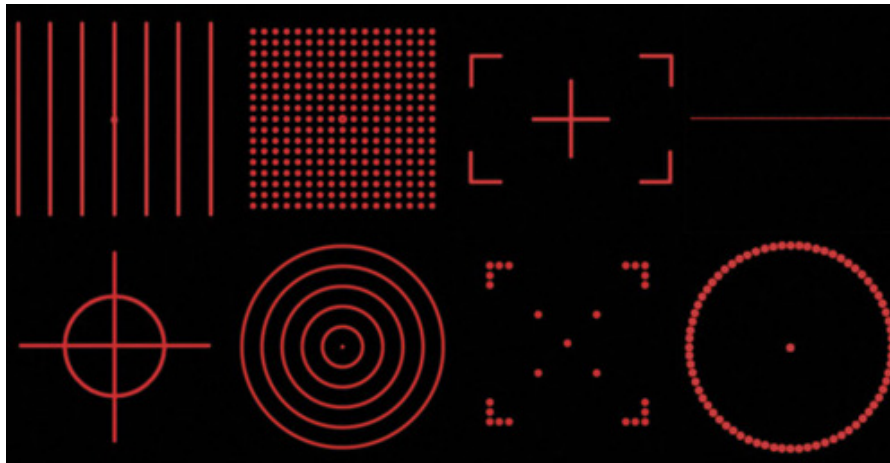


Figura 4.5: Exemplos de vários tipos de feixe laser, adaptado de [?].

As formas laser mais emergentes no mercado são do tipo linha ou matriz de pontos. O tipo de feixe em matriz de pontos poderia ser passível de problemas a dois níveis: na calibração, devido a não existir um grande número de referências e também ao nível da utilização, visto que, o ambiente subaquático é hostil e podem acontecer oclusões do feixe

laser, o que não facilitaria a obtenção de dados coerentes. Assim sendo, foi determinado que seriam utilizados lasers com feixe do tipo linha.

Dado que o sistema de visão laser tem de funcionar em ambiente subaquático, onde por vezes existem questões como a baixa profundidade que impõe restrições ao nível do tamanho da *baseline* entre a câmara e o laser, sendo também importante que a linha do laser seja visível em todo o FOV da câmara. Desse modo foi necessário a utilização de um laser que cumpra certos requisitos:

- Abertura angular superior a 90° ;
- Comprimento de onda correspondente à cor verde (532 nm) ou cor vermelha (635 nm).
- Possível modelação o sinal de saída;
- Potência de saída entre 5 mW e 10 mW.

Analisando todos os tópicos supracitados optou-se pela seleção de três lasers, nomeadamente, dois de gama mais baixa e um de gama intermédia. Os lasers de gama inferior foram adquiridos principalmente para utilizar numa fase experimental.

Tabela 4.1: Características dos lasers de gama inferior.

	Red Laser Line	Green Laser Line
Preço	$\approx 50 \text{ €}$	$\approx 60 \text{ €}$
Comprimento de onda	635 nm	532 nm
Potência de saída	5 mW	5 mW
Tipo de feixe	Linha	Linha
Tipo de laser	Laser visível de cor vermelha	Laser visível de cor verde

Tal como descrito na Tabela 4.1, foram selecionados lasers com feixe de cores distintas de modo a entender o efeito que esta característica teria no sistema. Assim, foi desenvolvido um método que funciona independentemente da cor da laser, sendo possível a utilização de feixes lasers com diferentes comprimentos de onda.

Por outro lado, o laser de gama mais elevada, fabricado pela FLEXPOINT ⁶, apresenta as seguintes características:

Tabela 4.2: Características do laser de gama superior.

Comprimento de onda	635 nm (cor vermelha)
Potência de saída	5 mW
Tipo de feixe	Linha
Abertura angular	Regulável até 110 ^o
Tipo de sinal	Passível de modelação

Na Figura 4.6 é possível visualizar o laser selecionado. O tipo de sinal deste laser é passível de modelação o que permite controlar a potência de saída. Este laser apresenta também como características o fato da abertura angular e da espessura da linha do laser serem reguláveis.



Figura 4.6: Laser de gama superior.

⁶<http://www.lasercomponents.com>, acedido em 18/08/2014.

4.3 Resumo do capítulo

Posteriormente à caracterização da problemática adjacente à utilização de sistemas de visão em ambientes subaquáticos, foi necessário projetar uma abordagem que permitisse resolver esta temática. Assim, foi desenvolvida a arquitetura funcional do sistema de visão laser descrevendo todos os módulos existentes no sistema e também o papel a desempenhar por cada um desses módulos. Foram também, listadas as camadas relativas ao processo de aquisição e processamento de imagem, efetuando a decomposição de cada camada.

Finalizando o capítulo, foram descritos os componentes físicos relativos ao sistema de aquisição de imagem (câmara) e aos emissores de luz estruturada.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 5

Implementação

Após o desenvolvimento conceptual do sistemas passou-se à fase de implementação do *setup* experimental e desenvolvimento do *software* do sistema, que foi implementado em Matlab.

5.1 Processo de calibração

Nesta secção são detalhados todos as etapas, relativas à calibração do sistema câmara e laser, apresentadas na Figura 4.3. O processo de calibração é uma etapa importante em qualquer sistema de visão computacional, sendo que quanto mais precisa for a calibração, melhor será o desempenho do sistema (maior exatidão e menor erro de leitura).

5.1.1 Leitura das imagens

Nesta fase da calibração é necessário, quer a aquisição de imagens do alvo com a incidência do feixe, quer sem a incidência do feixe laser, sem alterar a localização da câmara nem do alvo.

A leitura das imagens é um processo simples onde serão guardadas todas as imagens com formato suportado pelo *Matlab*, sendo que neste trabalho foram utilizadas imagens do tipo *bmp*. Inicialmente, as imagens são lidas e guardadas de forma temporária para proceder à remoção da distorção da imagem. Na Figura 5.1 pode-se visualizar à esquerda a imagem original com distorção e à direita a mesma imagem sem distorção.



Figura 5.1: Comparação entre uma imagem real e uma imagem sem distorção.

Com as imagens sem distorção, procede-se à deteção dos cantos do xadrez no caso das imagens sem laser e à deteção da linha laser no caso das imagens com laser.

5.1.2 Deteção dos cantos do xadrez

Este modelo recebe uma matriz com a imagem, em tons de cinzento, e o número de cantos do xadrez existentes em X e Y , n e m , respetivamente.

Através da aplicação da função *findCorners* é possível encontrar $n*m$ cantos, setenta no caso do alvo utilizado. Esta ferramenta procura pontos de interseção entre a cor branca e a cor preta, sendo apenas necessário definir um valor de *threshold* que irá depender da luminosidade da imagem. O método utilizado é baseado no detetor de *Harris Corner* [19].

Na Figura 5.2 pode-se observar os setenta cantos detetados numa imagem, com realce de um desses cantos para demonstrar a validação do método.

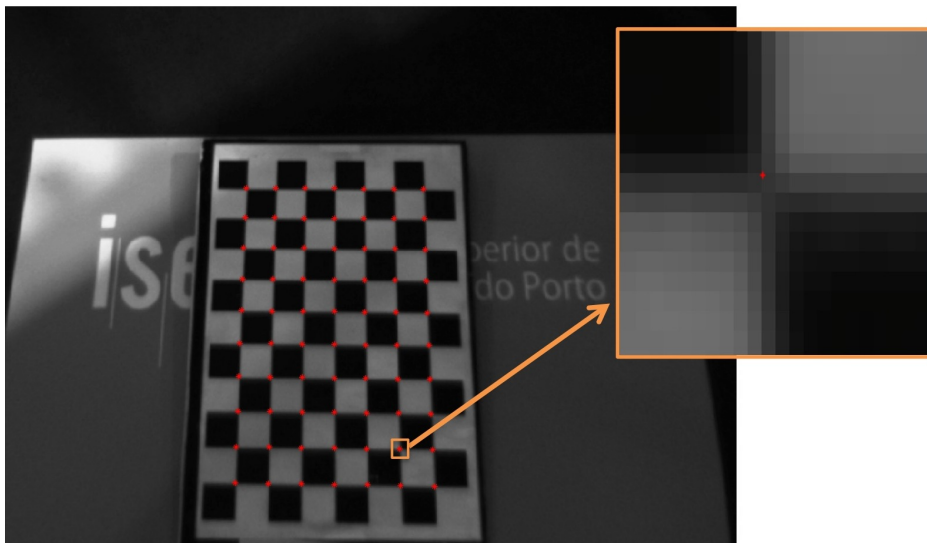


Figura 5.2: Processo de detecção dos cantos.

A função *read_and_save_corners* retorna, para cada imagem, os cantos organizados tal como ilustrado na Figura 5.3. Na imagem, o primeiro canto e o último canto estão assinalados a amarelo e verde, respetivamente.

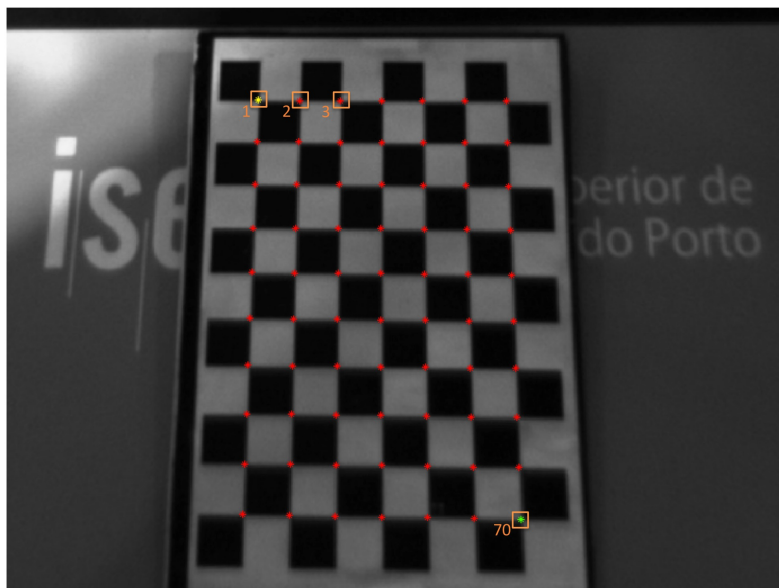


Figura 5.3: Organização dos pontos detetados.

5.1.3 Detecção da linha laser

Esta função recebe a imagem do alvo com a linha laser no formato RGB, sendo efetuada uma segmentação de cor, para cada imagem, de forma a detetar apenas a cor desejada. Visto que se utilizou lasers com cores distintas, a cor a segmentar é recebida na função por parâmetro. Na Figura 5.4 está descrito o processo de detecção da linha laser.

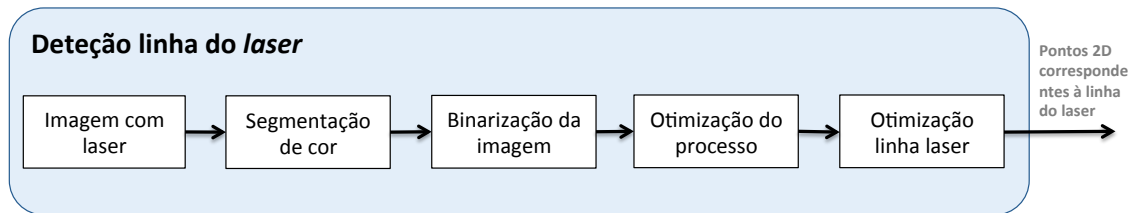


Figura 5.4: Processo de detecção da linha do laser.

Através da imagem segmentada é efetuada a binarização da imagem de modo a obter apenas os píxeis onde existe a incidência da linha laser. Tendo em vista a otimização do processo foram guardados apenas os pontos que estão incorporados no padrão de xadrez, sendo assim possível diminuir significativamente o tamanho do vetor que contém os pontos 2D da linha laser. Na Figura 5.5 pode-se observar a etapa de segmentação de cor e binarização da linha laser.



Figura 5.5: Detecção da linha do laser : segmentação de cor e binarização.

Com os pontos resultantes da binarização da imagem é efetuada uma seleção do ponto com maior intensidade para cada linha horizontal da imagem. A largura da linha laser, para o laser testado, pode atingir até 12 píxeis em casos extremos, sendo que desta forma

consegue-se obter apenas um pixel por cada linha horizontal da imagem.

Por fim é otimizada a linha laser aplicando o método de mínimos quadrados [21], obtendo uma linha mais linear. Na Figura 5.6 pode-se observar as etapas referentes à detecção do ponto com maior intensidade e à aplicação do método de mínimos quadrados à linha laser. Na referida figura os pontos 2D detetados são apresentados com a cor amarelo.

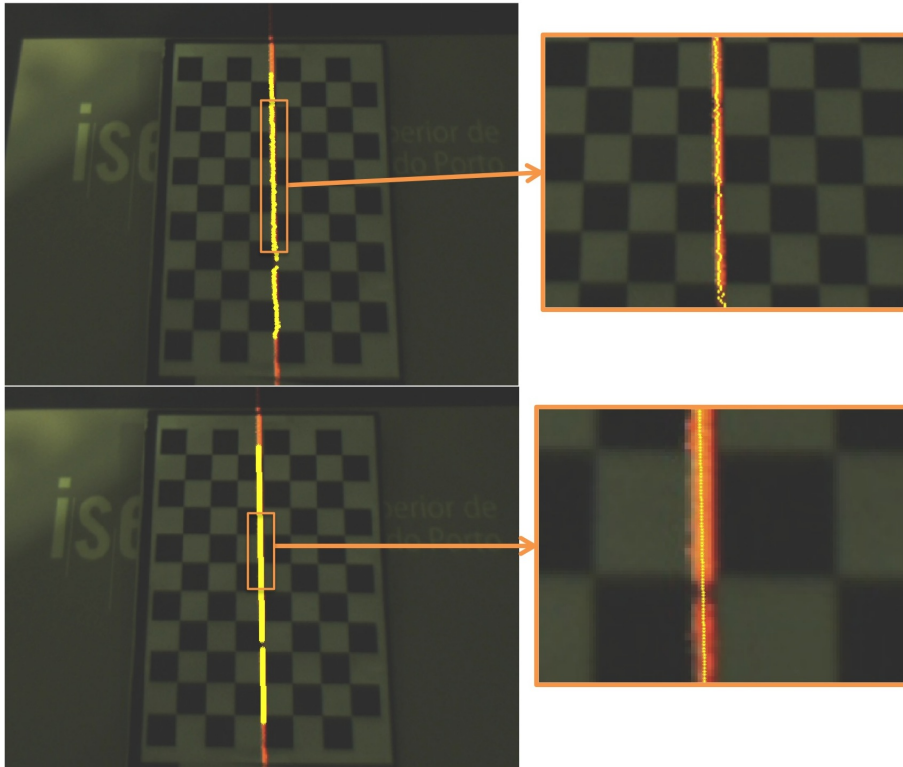


Figura 5.6: Detecção da linha do laser - Em cima: detecção do ponto de maior intensidade; Em baixo: Otimização da linha.

Com a detecção dos pontos 2D referentes à linha laser e dos pontos 2D referentes aos cantos do padrão de xadrez, completa-se a primeira fase do processo de calibração, tal como ilustrado na Figura 4.3. A fase seguinte diz respeito à calibração da câmara, sendo explicada nas secções seguintes.

5.1.4 Calibração dos parâmetros intrínsecos

Para a calibração dos parâmetros intrínsecos da câmara, enunciados no sub-capítulo 3.3.1, recorreu-se à ferramenta *Camera Calibration Toolbox* [22]. Para a calibração da câmara, é necessário a utilização de um padrão de xadrez, denominado por alvo, com dimensões conhecidas. Na Figura 5.7 pode-se visualizar um padrão de xadrez similar ao utilizado.

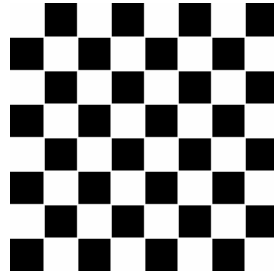


Figura 5.7: Padrão de xadrez.

Inicialmente, são adquiridas imagens do padrão de xadrez, com diferentes orientações, sendo que neste caso foram adquiridas sessenta imagens. Na Figura 5.8 é possível visualizar algumas dessas imagens.

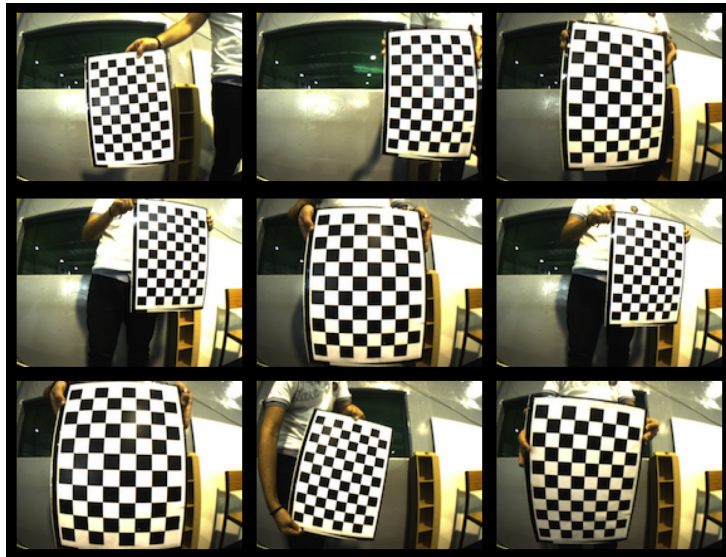


Figura 5.8: Imagens utilizadas para a calibração dos parâmetros intrínsecos.

Este procedimento começa por efetuar a leitura de todas as imagens, tal como se pode observar na Figura 5.9. Ao pressionar o botão "Read Images", serão lidas todas as imagens contidas na pasta definida no *Matlab*, sendo que no final irá aparecer uma mensagem indicativa de conclusão do processo.

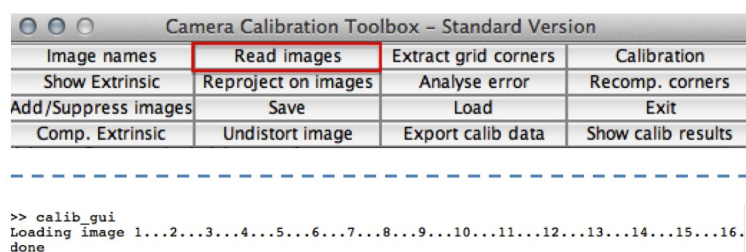


Figura 5.9: Processo de leitura das imagens - Calibração dos parâmetros intrínsecos.

Posteriormente, é necessário efetuar a marcação dos extremos do padrão de xadrez. Nesta etapa são ainda definidos o número de quadrados existentes no padrão (em X e Y) e ainda a dimensão das quadriculas. Na Figura 5.10 é possível visualizar, à esquerda, o processo de marcação dos extremos do alvo. Na mesma figura, à direita, é possível visualizar a marcação de todos os cantos do padrão de xadrez, gerados pela *toolbox*. Este processo terá de ser repetido para todas as imagens capturadas.

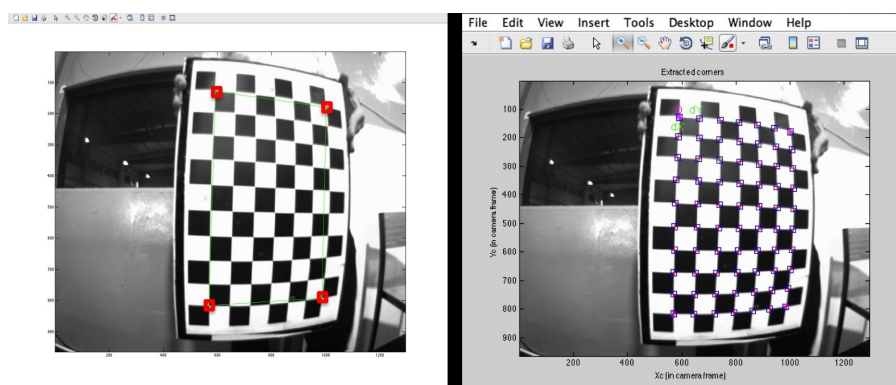


Figura 5.10: Processo de marcação dos cantos - Calibração dos parâmetros intrínsecos.

Essas imagens são analisadas pela *toolbox* que, recorrendo a processos de otimização, determina o conjunto de parâmetros que otimizam quer o erro entre a projeção do ponto tridimensional do alvo nas imagens, quer os pontos detetados pela *toolbox*. Para diminuir o erro de projeção é possível remover as imagens que induzem maior ruído na calibração.

Na Figura 5.11 pode-se visualizar o erro da projeção, em píxies, obtido depois de efetuar a seleção das imagens com menor ruído.

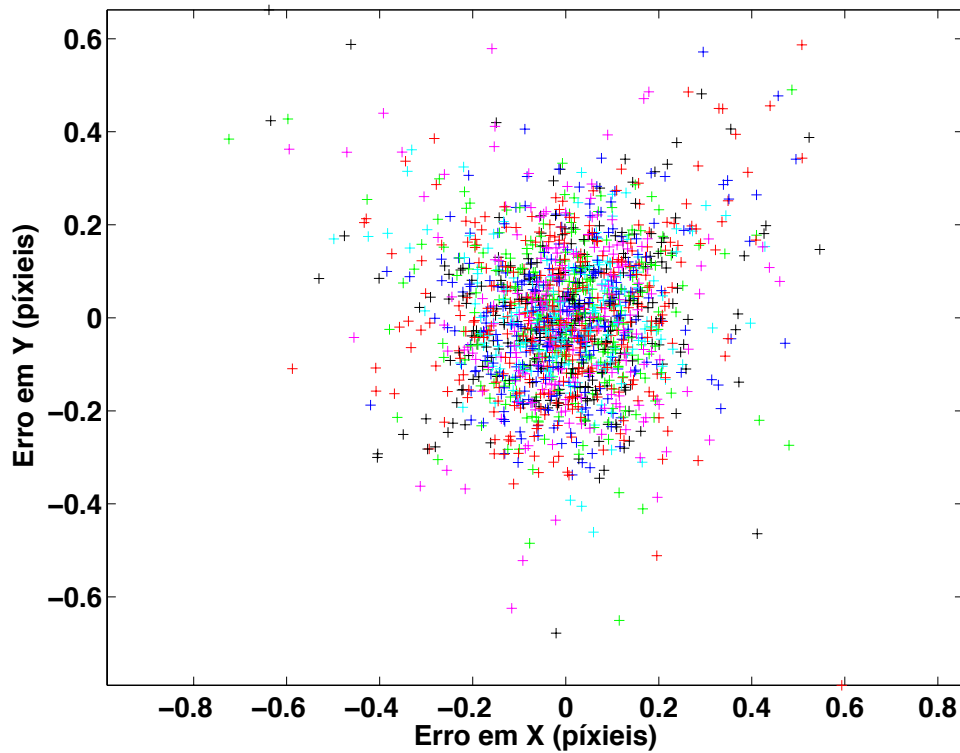


Figura 5.11: Erro da projeção em píxies - Calibração dos parâmetros intrínsecos.

Nesta fase determinam-se as variáveis que definem os parâmetros intrínsecos da câmara, definindo-se, deste modo, matriz A , equação 3.7.

5.1.5 Obtenção dos parâmetros extrínsecos

Previamente, procedeu-se à definição de um referencial fixo no mundo e à marcação de pontos conhecidos nesse mesmo referencial. Os pontos considerados foram todos os cantos do padrão de xadrez, considerando o canto número um como a origem do referencial. Os quadrados do alvo utilizado apresentam uma lateral fixa de 35 mm, sendo, deste modo, simples proceder à marcação de n pontos no referencial do mundo.

Na Figura 5.12 é possível visualizar o referencial considerado. Este referencial é utilizado com o intuito de relacionar as coordenadas dos pontos no mundo com as coordenadas dos pontos 2D, detetados na secção 5.1.2.

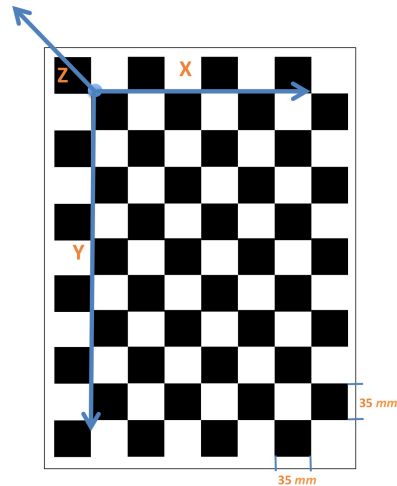


Figura 5.12: Referencial definido em coordenadas mundo.

O cálculo dos parâmetros de rotação e translação da câmara em relação ao referencial definido no mundo, foi implementado utilizando a técnica de homografia, enunciada na secção 3.6, estabelecendo assim a correspondência dos pontos no plano do mundo e os pontos no plano da imagem.

Os pontos 3D considerados no plano do mundo não possuem componente no eixo Z , isto é, para todos os pontos selecionados o valor de z^w é igual a zero. Deste modo, os pontos de calibração podem ser representados em coordenadas homogêneas da seguinte forma:

$$\hat{P}^w = \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Em semelhança com os pontos 3D, os pontos 2D, no plano da imagem e sem distorção, podem ser representados em coordenadas homogêneas por:

$$\hat{P}^u = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Para a definição do conjunto de pontos \hat{P}^u e \hat{P}^w foram utilizados todos os cantos do padrão de xadrez, ou seja, um total de setenta pontos.

Como enunciado anteriormente, na equação 3.28, um ponto no plano da imagem pode ser relacionado no plano do mundo. Na equação 5.3, a variável λ representa um fator de escala.

$$\lambda \hat{P}^u = H \hat{P}^w \quad (5.3)$$

De forma a calcular os valores relativos à rotação e translação é necessário efetuar a decomposição da homografia. Assim, a matriz H pode ser representada por [18]:

$$H = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Sendo a matriz dos parâmetros intrínsecos (matriz A) conhecida, a transformação das coordenadas mundo para as coordenadas 3D da câmara, pode ser obtida da seguinte forma:

$$\begin{cases} r_1 = \lambda_1 A^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda_2 A^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ \mathbf{t} = \lambda_3 A^{-1} h_3 \end{cases} \quad (5.5)$$

Sendo que, o valor de cada fator de escala, λ , é dado por:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{\|A^{-1} h_1\|} \\ \lambda_2 = \frac{1}{\|A^{-1} h_2\|} \\ \lambda_3 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \end{cases} \quad (5.6)$$

Deste modo, a matriz de rotação que relaciona o sistema de coordenados mundo com o sistema de coordenadas da câmara descreve-se por:

$$R_{\text{temp}} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A matriz R_{temp} pode não satisfazer os critérios de ortonormalização da matriz de rotação convencional. Assim, é necessário normalizar e ortonormalizar a mesma, utilizando o método de SVD (Singular Value Decomposition) [30].

A matriz rotação ortonormalizada é calculada por:

$$R = UW'V^T \quad (5.8)$$

Onde a matriz W' é obtida da seguinte forma:

$$W' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \|UV'\| \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Com o cálculo da matriz R e o vetor \mathbf{t} é possível definir a posição do centro ótico da câmara em relação ao ponto zero do referencial do mundo, ficando assim concluído o processo de calibração dos parâmetros extrínsecos da câmara.

Completa-se então a segunda fase do processo de calibração, tal como ilustrado na Figura 4.3. A última etapa é referente à calibração do projetor de luz estruturada, que será explanada nas secções seguintes.

5.1.6 Obtenção de pontos de controlo

De modo a efetuar a calibração do laser é necessário traçar o plano de incidência da linha laser. Assim, é fundamental a obtenção de n pontos de controlo da linha laser em coordenadas 3D da câmara e, para tal, foram utilizados no mínimo seis pontos de controlo para cada imagem.

Como enunciado no sub-capítulo 3.7, o *cross-ratio* permite calcular a relação entre um conjunto de pontos colineares pertencentes à mesma reta.

Escolhendo quatro pontos colineares no plano da imagem e calculando o respetivo *cross-ratio*, sabe-se que a relação entre esses pontos irá manter-se inalterada em qualquer referencial.

Na Figura 5.13 observa-se a relação entre quatro pontos no plano da câmara (π_c) e esses mesmos pontos no plano do mundo π_w . O plano do laser é representado por π_l .

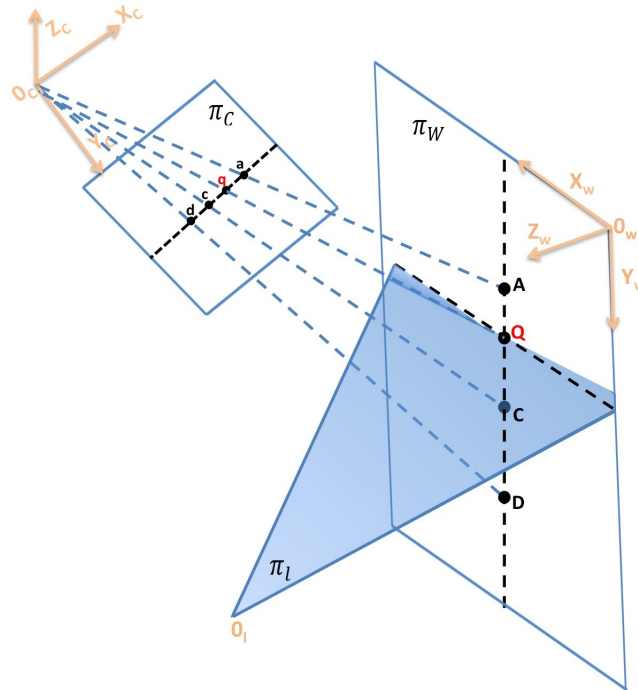


Figura 5.13: Obtenção dos pontos de controle utilizando *cross-ratio*.

Para o cálculo do *cross-ratio* foi utilizado o seguinte conjunto de pontos, para uma determinada linha horizontal do alvo:

- Ponto a_i - canto do extremo esquerdo (plano da imagem) do padrão de xadrez;
- Ponto q_i - ponto de interseção entre a linha laser e a linha horizontal do padrão de xadrez;
- Ponto c_i ou b_i - canto intermédio do padrão de xadrez (a definição deste ponto dependerá da posição do ponto q_i);
- Ponto d_i - canto do extremo direito (plano da imagem) do padrão de xadrez.

Na Figura 5.14 pode-se visualizar a escolha dos pontos acima transcritos, para diversas linhas horizontais do alvo. Foram considerados dois casos para a linha laser, ou seja,

incidir na metade direita ou na metade esquerda do alvo alternando dessa forma o ponto intermédio, tal como apresentado. Este procedimento é necessário porque o cálculo do CR (cross-ratio) obriga a uma ordem específica dos pontos.



Figura 5.14: Processo de seleção dos pontos a utilizar no *cross-ratio*.

Consequentemente, é possível efetuar o cálculo do *cross-ratio*, para um conjunto de pontos no plano da imagem, utilizando a expressão:

$$CR(p_1, p_2, p_3, p_4) = \frac{(p_1 - p_3)(p_2 - p_4)}{(p_1 - p_4)(p_2 - p_3)} \quad (5.10)$$

Como já enunciado, todos os cantos do alvo são conhecidos no plano da imagem e também em coordenadas mundo. Assim, manipulando a expressão 5.10 em ordem a um dos pontos, é possível obter a coordenada do mesmo noutro referencial, sendo apenas necessário executar o seguinte processo:

- Selecionar 4 pontos colineares no plano da imagem, tal como ilustrado na Figura 5.14. Um desses pontos terá de ser o ponto de incidência do laser.
- Calcular o valor do *cross-ratio* para esses pontos, utilizando uma das seguintes expressões:

Para o caso do laser incidir do lado esquerdo do alvo:

$$CR_i = \frac{(a_i - c_i)(q_i - d_i)}{(a_i - d_i)(q_i - c_i)} \quad (5.11)$$

Para o caso do laser incidir do lado direito do alvo:

$$CR_i = \frac{(a_i - q_i)(b_i - d_i)}{(a_i - d_i)(b_i - q_i)} \quad (5.12)$$

- Sendo A_i , C_i (ou B_i) e D_i os pontos em coordenadas mundo correspondentes aos pontos a_i , c_i (ou b_i) e d_i no plano da imagem. Resolvendo a equação do *cross-ratio* em ordem ao ponto Q obtém-se:

Para o caso do laser incidir do lado esquerdo do alvo:

$$CR_i = \frac{(A_i - C_i)(Q_i - D_i)}{(A_i - D_i)(Q_i - C_i)} \iff Q_i = \frac{-A_i D_i + C_i D_i + A_i C_i CR_i - C_i D_i CR_i}{A_i CR_i - D_i CR_i - A_i + C_i} \quad (5.13)$$

Para o caso do laser incidir do lado direito do alvo:

$$CR_i = \frac{(A_i - Q_i)(B_i - D_i)}{(A_i - D_i)(B_i - Q_i)} \iff Q_i = \frac{-A_i B_i CR_i + D_i B_i CR_i + A_i B_i - A_i D_i}{-A_i CR_i + D_i CR_i + B_i - D_i} \quad (5.14)$$

Com o cálculo do ponto Q_i obtêm-se as coordenadas no referencial do mundo, do ponto q_i no plano da imagem. Este procedimento, para cada imagem, é efetuado para pelo menos seis das linhas horizontais do alvo, obtendo assim seis pontos de controle, referentes à linha do laser.

A conversão de coordenadas mundo para o referencial da câmara pode ser efetuada, uma vez que os parâmetros extrínsecos já são conhecidos, utilizando a seguinte expressão:

$$P^C = \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix} \times P^W \quad (5.15)$$

De forma a traçar o plano do laser é necessário efetuar o procedimento descrito anteriormente com, pelo menos, duas imagens com orientações distintas.

5.1.7 Calibração do laser

O processo de calibração do plano do laser requer a utilização do método dos mínimos quadrados não linear [21], de modo a otimizar a equação do plano. Este método foi implementado recorrendo à *toolbox* de otimização não linear do *Matlab*.

A função objeto que define o plano do laser, pode ser calculada através da expressão 5.16. Nesta expressão x_i^c , y_i^c e z_i^c representam as coordenadas de todos os pontos de controlo (de pelo menos duas imagens) no referencial da câmara.

$$d_i = \frac{|ax_i^c + by_i^c + cz_i^c + d|}{(a^2 + b^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.16)$$

Assim, pode-se calcular o valor das componentes a , b , c e d que definem o plano do laser.

5.2 Obtenção de imagens tridimensionais

A obtenção de imagens tridimensionais através do sistema apresentado é similar a um sistema passivo de visão *stereo*. Através da calibração da câmara e da definição do plano do laser é possível efetuar triangulação para obter imagens com informação tridimensional, sendo para isso necessário definir o modelo do projetor de luz estruturada e aplicar as equações que permitem calcular a triangulação.

5.2.1 Modelo do projetor

Para determinar o modelo do projetor é necessário calcular os coeficientes que definem o seu plano, sendo que os mesmos foram determinados na sub-secção 5.1.7. No referencial da câmara, o feixe laser pode ser descrito por:

$$ax^c + by^c + cz^c + d = 0 \quad (5.17)$$

Consequentemente, é possível definir a *baseline* do sistema, que representa a distância entre o centro ótico da câmara e o feixe laser, através da seguinte expressão:

$$l = \frac{d}{a} \quad (5.18)$$

Na definição do modelo do projetor é ainda necessário definir os desvios angulares entre o plano do laser e o centro ótico da câmara. O ângulo θ representa o ângulo entre o eixo Z^c e feixe do laser. Por outro lado, ϕ representa o ângulo entre o eixo Y^c e o feixe do laser. Tais desvios angulares podem ser calculados por:

$$\theta = \arctan\left(-\frac{c}{a}\right) \quad (5.19)$$

$$\phi = \arctan\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (5.20)$$

Na Figura 5.15 pode-se observar o modelo geométrico do sistema de visão laser, onde são ilustrados os ângulos θ e ϕ .

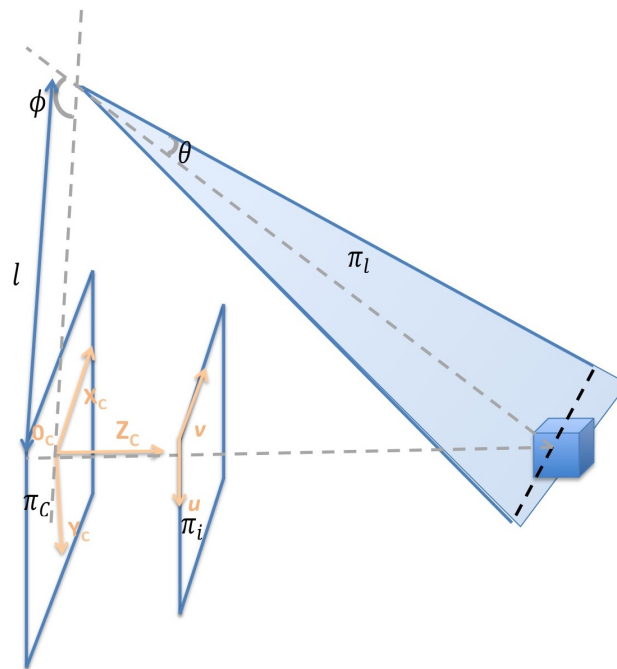


Figura 5.15: Modelo geométrico do sistema de visão laser.

5.2.2 Triangulação

Devido à definição do modelo do projetor e da calibração da câmara torna-se possível aplicar o princípio da triangulação, sendo esta etapa indispensável na obtenção de ima-

gens tridimensionais. Desse modo é necessário obter as coordenadas 3D, no plano da câmara, referentes ao plano do laser, definido pela equação 5.17.

Através da utilização das equações que definem o modelo da câmara, equações 3.7 e 3.28, e ainda a equação do plano do laser 5.17, é possível definir a expressão que relaciona a interseção de um ponto do plano do laser em coordenadas da câmara. Dessa forma é possível definir a seguinte expressão [31]:

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ a & b & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_c}{z_c} \\ \frac{y_c}{z_c} \\ \frac{1}{z_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - c_x \\ v - c_y \\ -c \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

O processo de obtenção de imagens tridimensionais é repetido para todos os pontos do plano do laser, isto é, na zona da imagem que sofre a iluminação pelo feixe de luz. Assim, é necessário calcular as coordenadas de cada ponto no referencial da câmara. Através da equação 5.21, as coordenadas tridimensionais no plano da câmara de um ponto (u, v) no plano da imagem, são calculadas por:

$$x_c = \frac{u - c_x}{f_x} z_c \quad (5.22)$$

$$y_c = \frac{v - c_y}{f_y} z_c \quad (5.23)$$

$$z_c = \frac{l}{\tan \theta - \frac{u - c_x}{f_x} - \tan \phi \frac{v - c_y}{f_y}} \quad (5.24)$$

5.3 Setup experimental

De modo a proceder ao desenvolvimento deste sistema foi necessário desenvolver uma plataforma que permitisse acoplar a câmara e o laser. Sendo um dos objetivos desta dissertação o teste do sistema em meios aquáticos, foram desenvolvidos invólucros estanques que permitam a utilização, nesse meio, dos referidos blocos de *hardware*. Estes invólucros possuem uma parte frontal de vidro, de forma a não prejudicar quer as imagens obtidas pela câmara, quer a projeção da linha do laser.

Na Figura 5.16 pode-se observar a plataforma desenvolvida de diversas perspetivas. Deve-se salientar que a *baseline* (cerca de 12 cm) apresentada nas fotos está ajustada para observações de baixa profundidade, uma vez que o sistema foi testado num tanque com profundidade reduzida.

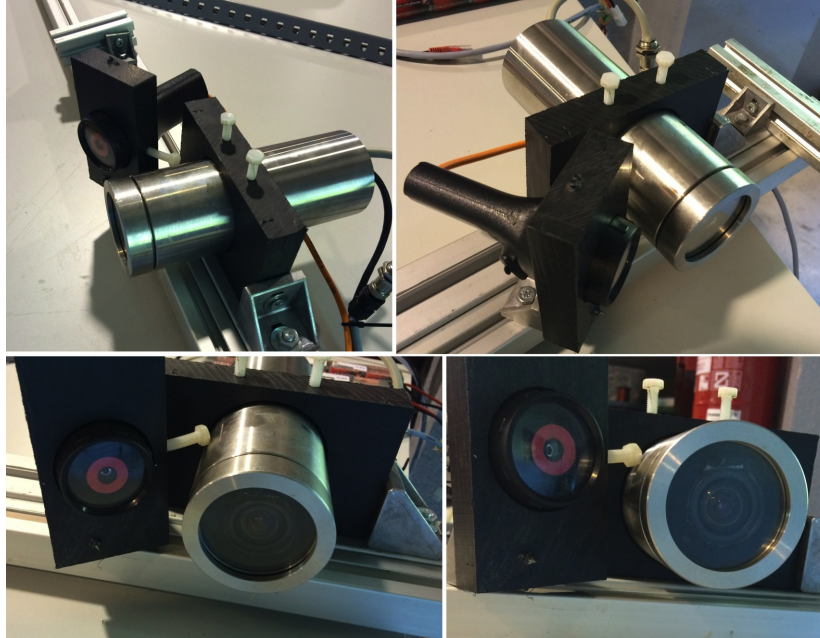


Figura 5.16: Plataforma utilizada para acoplar a câmara e o laser.

Tal como é possível observar na figura anterior, os invólucros utilizados garantem estanquidade apenas na zona frontal, sendo impossível a sua imersão total na água.

O sistema foi desenvolvido e testado, numa fase inicial, em ambiente não aquático. Numa fase mais avançada procedeu-se aos testes em ambientes subaquáticos. Através da Figura 5.17 pode-se visualizar as medidas do tanque utilizado para as simulações, em ambiente subaquático.

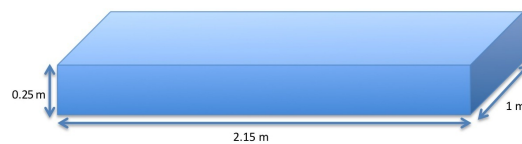


Figura 5.17: Ilustração do tanque de testes.

5.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi detalhada a implementação do sistema referente ao conjunto câmara e projetor de luz estruturada.

O grande desafio desta dissertação, que concerne na calibração deste tipo de sistema, foi ultrapassado. Em suma, os parâmetros extrínsecos da câmara foram calculados através da aplicação do método de homografia. Por outro lado, para a calibração do projetor foi necessário calcular pontos de controlo obtidos através da aplicação do método de *cross-ratio*, tal como demonstrado. Com esses pontos, foi possível calcular os parâmetros que definem o plano do projetor de luz estruturada.

O processo de calibração é o mais autónomo possível, uma vez que o utilizador apenas terá de organizar as imagens, definir o número de quadrados do alvo e o tamanho das quadrículas. O restante processo de calibração é efetuado de forma automática.

Com a calibração de cada um dos elementos do sistema, foi possível obter imagens tridimensionais aplicando técnicas de triangulação. Assim, foram efetuados alguns testes em laboratório que serão descritos no capítulo seguinte.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das múltiplas experiências efetuadas para a validação do trabalho desenvolvido nos capítulos precedentes, sendo que para tal, foram efetuados dois tipos de procedimentos experimentais: validação da calibração e obtenção de imagens tridimensionais.

A validação dos parâmetros extrínsecos da câmara, requer um método de referência de forma a comparar os resultados obtidos. Assim, para validar o processo de calibração foi efetuada uma comparação entre os resultados obtidos pelo método implementado e os valores obtidos utilizando a ferramenta de calibração *Camera Calibration Toolbox* [22].

Com a validação da calibração da câmara foi necessário validar a calibração geral do sistema de visão laser. De modo a verificar os resultados que descrevem o plano do laser, repetiu-se o processo de calibração múltiplas vezes, inalterando a posição da câmara e do *laser*, com o intuito de quantificar os erros associados à calibração. Adicionalmente efetuou-se experiências de calibração com um número de imagens superior, de modo a perceber qual o impacto dessa ação.

Posteriormente à verificação do processo de calibração foram efetuados alguns testes para validar a obtenção de imagens tridimensionais, utilizando objetos com dimensões conhecidas. Por fim, efetuaram-se experiências em ambiente subaquático.

6.1 Validação do processo de calibração

A primeira etapa é referente à validação do processo de calibração, consistiu na aquisição de múltiplas imagens, com o sistema de visão estático, alterando a posição do alvo. Assim, foram adquiridas cerca de trinta imagens do alvo com posições e orientações distintas. Neste *setup*, o alvo encontrava-se a distâncias que variaram entre 400 mm e 600 mm.

Para aquisição e processamento das imagens foi utilizado um computador portátil *MacBook Pro* com um processador *Intel Core i7* e sistema operativo *Ubuntu 12.04 LTS*. A aquisição de imagens foi efetuada através de uma aplicação desenvolvida para ROS. O processamento das imagens foi efetuado de forma *offline* através da *toolbox* desenvolvida em *Matlab*.

A configuração referida é válida para todas as experiências explicadas na presente secção.

6.1.1 Validação dos parâmetros extrínsecos

Como enunciado na secção 5.1.5 a obtenção dos parâmetros extrínsecos da câmara, em relação a um referencial no mundo, foi obtida com base na aplicação de homografia a um conjunto de pontos no plano da imagem e no plano do mundo.

Com o intuito de obter uma referência comparativa entre a calibração obtida utilizando o método do *cross-ratio*, utilizou-se a ferramenta de calibração *Camera Calibration Toolbox* [22] para a obtenção da matriz R e do vetor \mathbf{t} .

Utilizando os parâmetros extrínsecos obtidos através dos dois métodos enunciados anteriormente e aplicando a relação 3.6, efetuou-se a projeção dos cantos do padrão de xadrez em coordenadas mundo para o plano da imagem. Na Figura 6.1 pode-se observar a projeção dos pontos no plano da imagem utilizando o método implementado baseado no *cross-ratio* (pontos representados a verde) e o método de referência (pontos representados a vermelho). Os cantos do alvo, representados na figura seguinte, obtidos através dos dois métodos, encontra-se praticamente sobrepostos uma vez que, a diferença entre os pontos a verde e a vermelho é mínima (inferiores a um píxel).

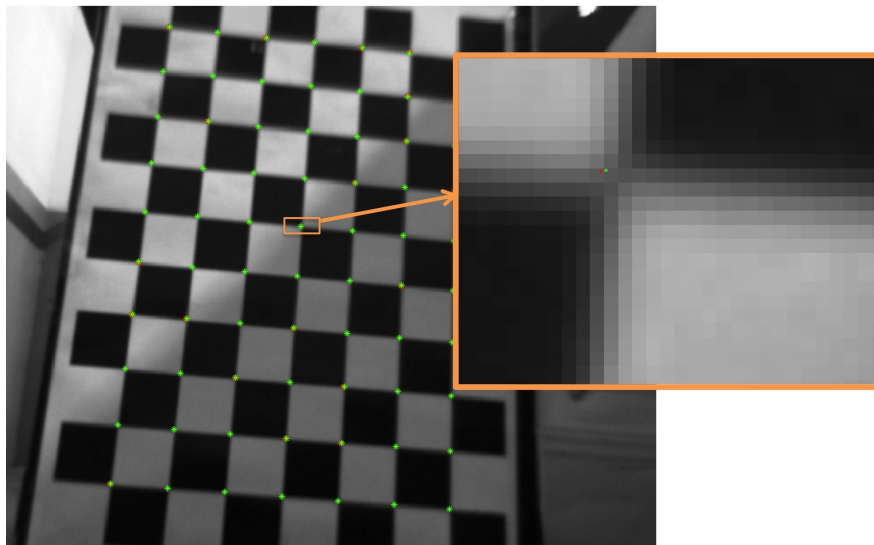


Figura 6.1: Projeção dos cantos do padrão utilizando os dois métodos enunciados.

Por forma a quantificar o erro relativo à projeção calculou-se a diferença entre cada canto do padrão de xadrez, utilizando os dois métodos, sendo esta discrepância representada na Figura 6.2.

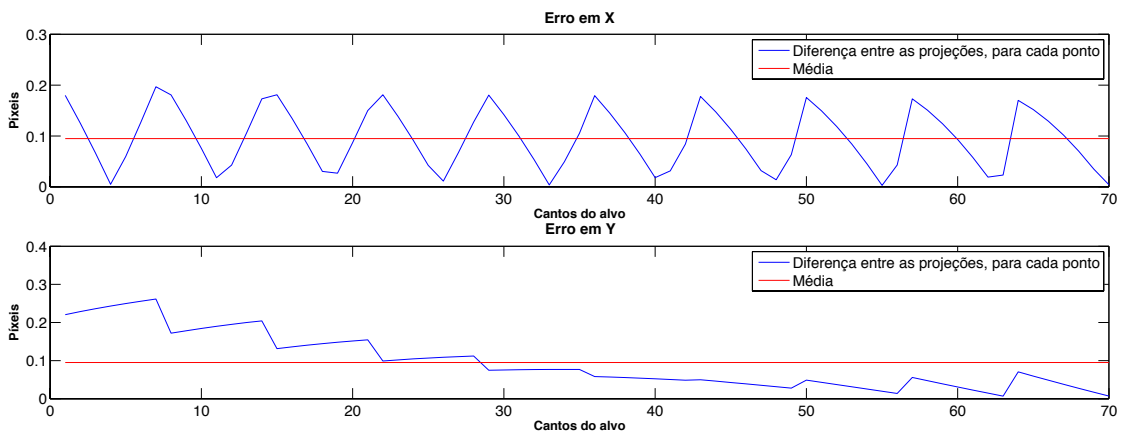


Figura 6.2: Projeção dos cantos do padrão utilizando os dois métodos enunciados.

A média aritmética da diferença relativa à projeção foi representada, na figura anterior, a vermelho. Essa diferença no eixo dos X , para esta imagem, é de -0.0675 píxeis. No eixo do Y essa diferença é de 0.184 píxeis.

Na Tabela 6.1, o primeiro método corresponde à utilização dos parâmetros extrínsecos calculados baseados no cálculo do *cross-ratio*, enquanto que, no segundo método são utilizados os parâmetros extrínsecos obtidos através da ferramenta *Camera Calibration Toolbox*. Desse modo, foram calculadas as coordenadas dos pontos de controlo (pontos de interseção da linha laser com as linhas horizontais do alvo, introduzidos no sub-capítulo 5.1.6) de modo a perceber quais as diferenças na projeção desses pontos utilizando os dois métodos referidos. Nesta comparação foram utilizados seis pontos de controlo ilustrados na Figura 5.14.

Tabela 6.1: Pontos de controlo no referencial da câmara.

		Método 1			Método 2		
		x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Imagem 1	1	43.69	97.60	738.81	43.73	93.84	738.69
	2	43.69	62.57	737.80	43.71	62.80	737.83
	3	43.79	27.54	736.83	43.78	27.78	737.01
	4	43.61	-7.50	735.76	43.59	-7.26	736.20
	5	43.64	-42.53	734.75	43.59	-42.30	735.26
	6	43.65	-77.56	733.76	43.57	-77.33	734.40
Imagem 2	1	54.14	94.65	708.35	54.21	94.88	708.39
	2	54.19	59.62	706.69	54.25	59.74	706.90
	3	54.53	24.60	705.20	54.58	24.72	705.39
	4	54.65	-10.44	703.64	54.70	-10.32	703.94
	5	54.95	-45.47	702.11	54.98	-45.34	702.54
	6	55.17	-80.50	701.57	55.02	-80.37	701.13

O erro médio quadrático relativo à projeção das duas imagens, pode ser determinado utilizando a equação 6.1, onde $x1$ representa a coordenada de um ponto utilizando o primeiro método e, conseqüentemente, $x2$ representa a coordenada do ponto utilizando o segundo método.

$$d_x = \sqrt{(x1_i - x2_i)^2 + \dots (x1_n - x2_n)^2} \quad (6.1)$$

Conseqüentemente o erro médio quadrático de projeção, para este par de imagens, em milímetros é de:

$$d_x = 0.0485 \text{ mm}; \quad d_y = 0.1877 \text{ mm}; \quad d_z = 0.3609 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Com o intuito de perceber quais os fatores que podem influenciar de forma benéfica a calibração foram efetuadas algumas experiências adicionais. A calibração deste sistema de visão *laser* requer a utilização de pelo menos duas imagens, de modo a definir o plano de incidência do *laser*, no entanto, a adição de mais imagens diminui o erro de projeção e aumenta a fiabilidade da calibração. Assim adicionando uma imagem, ao processo descrito anteriormente, obteve-se os seguintes erros de projeção:

$$d_x = 0.0398 \text{ mm}; \quad d_y = 0.1682 \text{ mm}; \quad d_z = 0.3155 \text{ mm} \quad (6.3)$$

De forma experimental foram adicionados mais pontos de controlo a cada uma das três imagens, sendo usado no total oito pontos de controlo em cada, sendo que o resultado obtido a nível dos erros de projeção foi:

$$d_x = 0.0418 \text{ mm}; \quad d_y = 0.1381 \text{ mm}; \quad d_z = 0.3091 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Através da análise dos erros de projeção, descrita anteriormente, é perceptível que o aumento do número de imagens influencia de forma positiva na calibração do sistema de visão *laser*.

Adicionalmente, para quantificar os erros associados ao processo de calibração da câmara foram efetuadas várias experiências para perceber quais os fatores que afetam positivamente este processo, obtendo assim um sistema mais preciso. Com os parâmetros de calibração da câmara (R e \mathbf{t}), foi efetuada a reprojeção dos pontos definidos no mundo (cantos do alvo) para o plano da imagem, utilizando a expressão 5.3. Na Figura 6.3 é possível observar o erro médio de reprojeção, em X e Y, para trinta imagens.

Na expressão 6.5 é apresentado o erro médio de reprojeção calculado, para uma amostra de trinta imagens, em píxeis:

$$e_x = 0.4077 \text{ píxeis}; \quad e_y = 0.1632 \text{ píxeis} \quad (6.5)$$

O erro de reprojeção, tal como apresentado, foi relativamente baixo, permitindo validar a calibração da câmara.

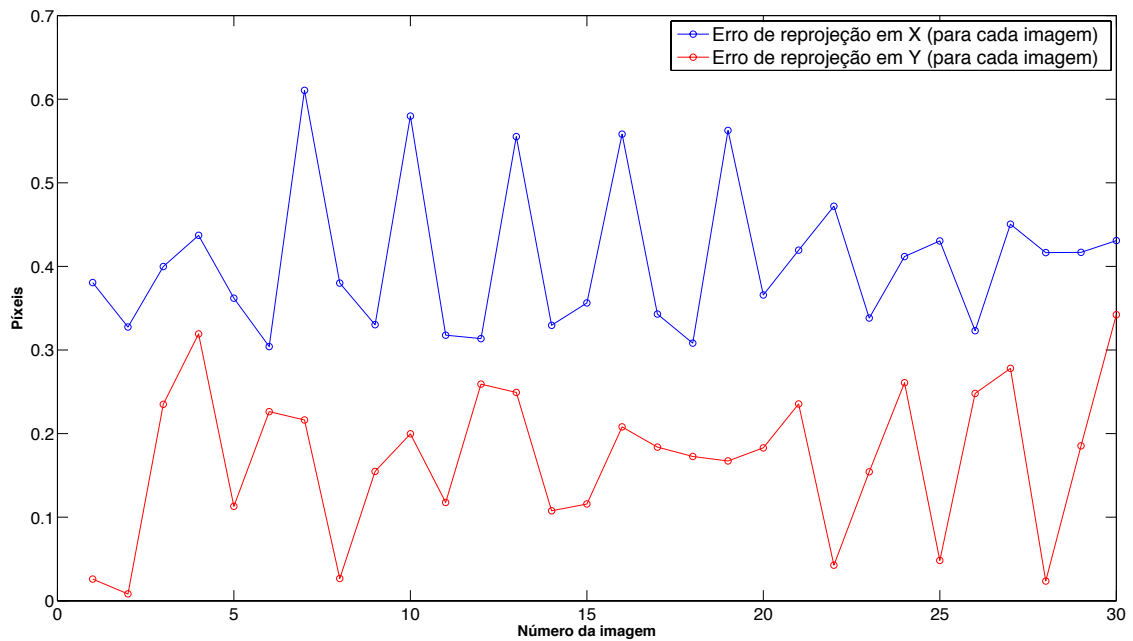


Figura 6.3: Erro médio de reprojeção, em X e Y.

6.1.2 Validação da calibração do sistema de visão laser

Na secção anterior foi verificada a calibração dos parâmetros extrínsecos do sensor de imagem. Consequentemente, é necessário validar o restante processo de calibração do sistema, isto é, validar a obtenção do plano do laser.

Repetindo o processo de calibração dez vezes, utilizando três imagens para cada calibração, foi possível apurar a performance de calibração do sistema de visão laser e entender se existe coerência e estabilidade nos resultados obtidos.

Com a repetição do processo de calibração (dez repetições), mantendo sempre a configuração do sistema, foram obtidos dez planos para a linha laser. Na Figura 6.4 pode-se visualizar os dez planos calculados e tal como expectável, os planos ficam sobrepostos, uma vez que definem o plano do laser para as dez calibrações efetuadas.

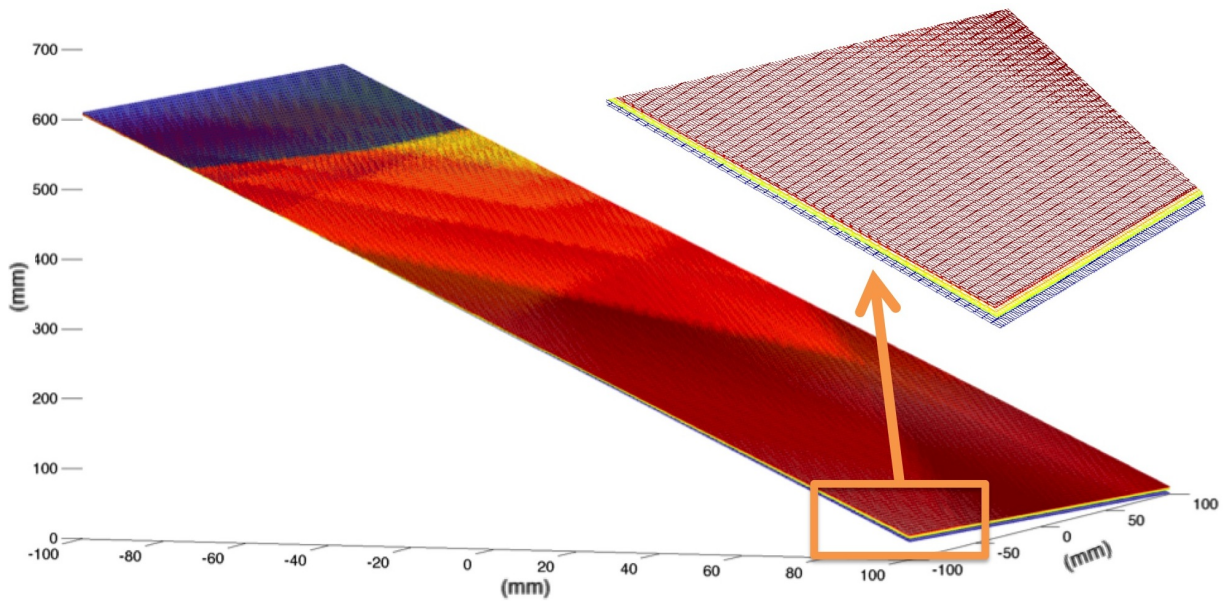


Figura 6.4: Planos do laser.

Idealmente os parâmetros que definem os planos determinados seriam os mesmos, no entanto, apresentam ligeiras variações, como é perceptível na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Parâmetros que definem o plano do *laser* para as dez experiências realizadas.

a	b	c	d
0,9443	0,0391	0,3267	-100,3416
0,9439	0,0395	0,3279	-101,0796
0,9435	0,0405	0,3288	-101,4635
0,9441	0,0394	0,3273	-100,6583
0,9441	0,0390	0,3274	-100,8247
0,9442	0,0388	0,3271	-100,7170
0,9431	0,0420	0,3298	-102,0159
0,9454	0,0392	0,3236	-98,8910
0,9433	0,0392	0,3297	-101,9339
0,9442	0,0383	0,3271	-100,7399

Com os valores apresentados anteriormente, calculou-se o valor médio para cada parâmetro que define o plano. Assim, foi possível obter um plano do laser com menor erro e maior exatidão, através de:

Tabela 6.3: Parâmetros que definem o plano do *laser*.

a	b	c	d
0.9440	0.0395	0.3275	-100.8665

Os parâmetros de calibração da câmara são determinantes na obtenção do plano do laser e conseqüentemente na calibração do sistema de visão laser. Como já demonstrado anteriormente o erro de reprojeção utilizando os parâmetros extrínsecos, calculados na secção 5.1.5, são reduzidos, no entanto existem. Tal facto pode provocar uma perturbação no sistema, sendo que dessa forma foi efetuada uma experiência para demonstrar que o cálculo dos parâmetros extrínsecos está bem definido e não interfere com o funcionamento deste sistema. Assim, da mesma forma que foram obtidos os parâmetros que definem o plano do laser utilizando os parâmetros extrínsecos determinados, foram também calculados os dez planos do laser utilizando os parâmetros extrínsecos do método de referência (*Camera Calibration Toolbox*). Desse modo, é possível calcular a diferença angular entre os planos referentes aos dois métodos.

Para as dez experiências efetuadas o desvio angular médio, entre os planos obtidos pelos dois métodos, foi de:

$$Err_{\alpha} = 0.079^{\circ} \quad (6.6)$$

6.2 Caracterização da performance do processo de calibração

Posteriormente à validação da calibração do sistema de visão, procedeu-se à caracterização da performance do sistema. Esta caracterização passou pela obtenção das coordenadas tridimensionais no plano do mundo, dos pontos relativos à linha laser no plano da imagem. O processo detalhado na Figura 6.5, requer o conhecimento dos seguintes parâmetros:

- Pontos 2D da linha laser no plano da imagem;
- Parâmetros extrínsecos;
- Parâmetros que definem o plano do laser;
- Pontos 3D calculados pelo método do *cross-ratio*.

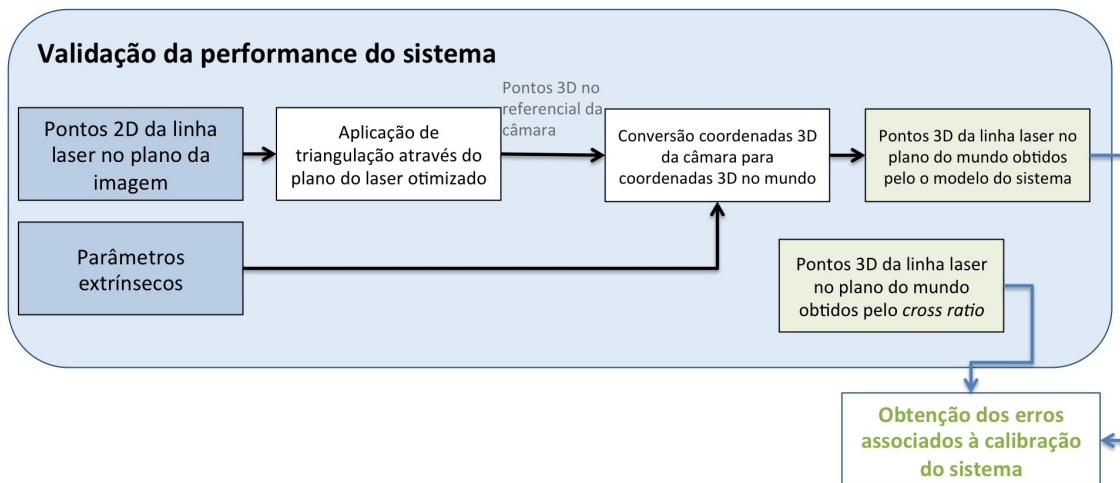


Figura 6.5: Processo de validação da performance do sistema.

Aplicando o princípio da triangulação aos pontos 2D, utilizando o plano do laser (definido na Tabela 6.3), são obtidos esses mesmos pontos em coordenadas tridimensionais no referencial da câmara. Para converter as coordenadas 3D no plano da câmara para coordenadas 3D do mundo, foi utilizado a expressão 6.7. Assim, são calculados os pontos tridimensionais através do modelo de calibração implementado, sendo possível efetuar

uma comparação com os pontos 3D obtidos pelo *cross-ratio*.

$$P^C = \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix} \times P^W \iff P^W = \begin{bmatrix} R^T & -R^T \mathbf{t} \end{bmatrix} \times P^C \quad (6.7)$$

Através do processo detalhado é possível quantificar os erros associados aos sistema. Utilizando um padrão de visualização localizado a cerca de 60 cm do sistema de visão e o referencial no mundo demonstrado na Figura 6.6, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 6.4.

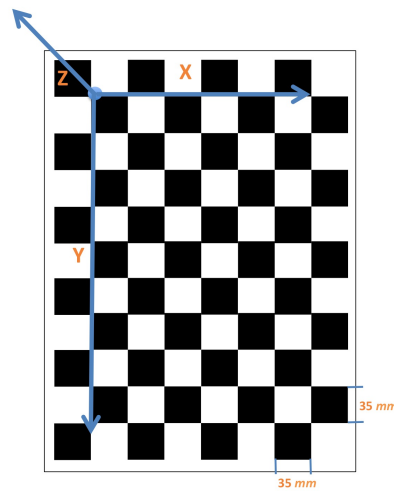


Figura 6.6: Referencial definido em coordenadas mundo.

Tabela 6.4: Comparação entre os pontos obtidos pelo o modelo do sistema e os pontos calculados através do *cross ratio*.

	Pontos obtidos			Pontos de referência		
	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
P1	37,7771	174,7589	1,5026	38,2134	175,0000	0,0000
P2	33,6418	139,5321	1,3665	34,1018	140,0000	0,0000
P3	29,5668	104,8194	1,2323	29,8206	105,0000	0,0000
P4	25,4408	69,6719	1,0965	25,7109	70,0000	0,0000
P5	21,3290	34,6461	0,9612	21,4039	35,0000	0,0000
P6	17,1935	-0,5820	0,8250	17,2106	0,0000	0,0000

Estes pontos correspondem aos pontos da linha laser assinalados na Figura 6.7.

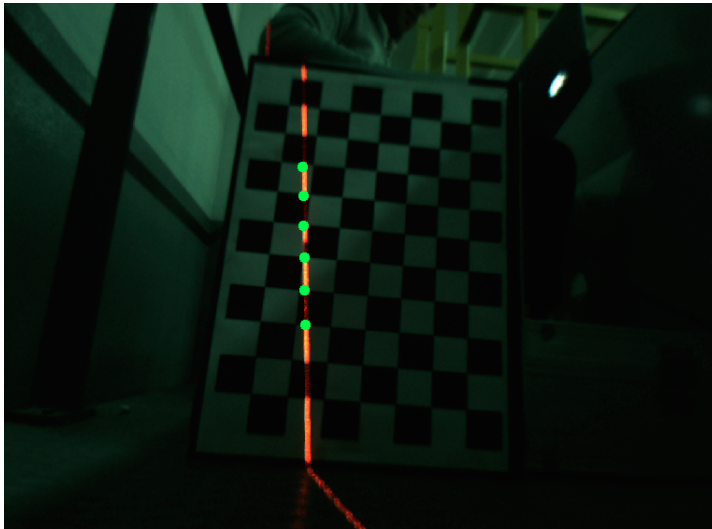


Figura 6.7: Imagem utilizada para validação da performance do sistema.

O erro associado ao conjunto de pontos apresentado é dado por:

Tabela 6.5: Caracterização do erro dos pontos da linha laser .

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
P1	-0,4362	-0,2411	1,5026
P2	-0,4600	-0,4679	1,3665
P3	-0,2538	-0,1806	1,2323
P4	-0,2701	-0,3281	1,0965
P5	-0,0749	-0,3539	0,9612
P6	-0,0170	-0,5820	0,8250
Erro médio	-0.2520	-0.3589	1.1640
Desvio Padrão	0.1812	0.1472	0.2534

Para a imagem apresentada, o erro máximo de reprojeção do sistema foi de 1,5 mm, sendo este um valor reduzido, que traduz a precisão da calibração implementada. De forma a caracterizar a dispersão tridimensional dos pontos com maior exatidão, foi repetido o processo descrito anteriormente para trinta imagens.

A caracterização da dispersão tridimensional do sistema, através da experiência utilizando as trinta imagens é dada por:

Tabela 6.6: Dispersão tridimensional do sistema.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Erro médio	-0.3491	-0.3162	0.5604
Desvio Padrão	0.2514	0.4862	1.4416

Na Figura 6.8 pode-se observar a dispersão associada aos seis pontos das trinta imagens em X , Y e Z .

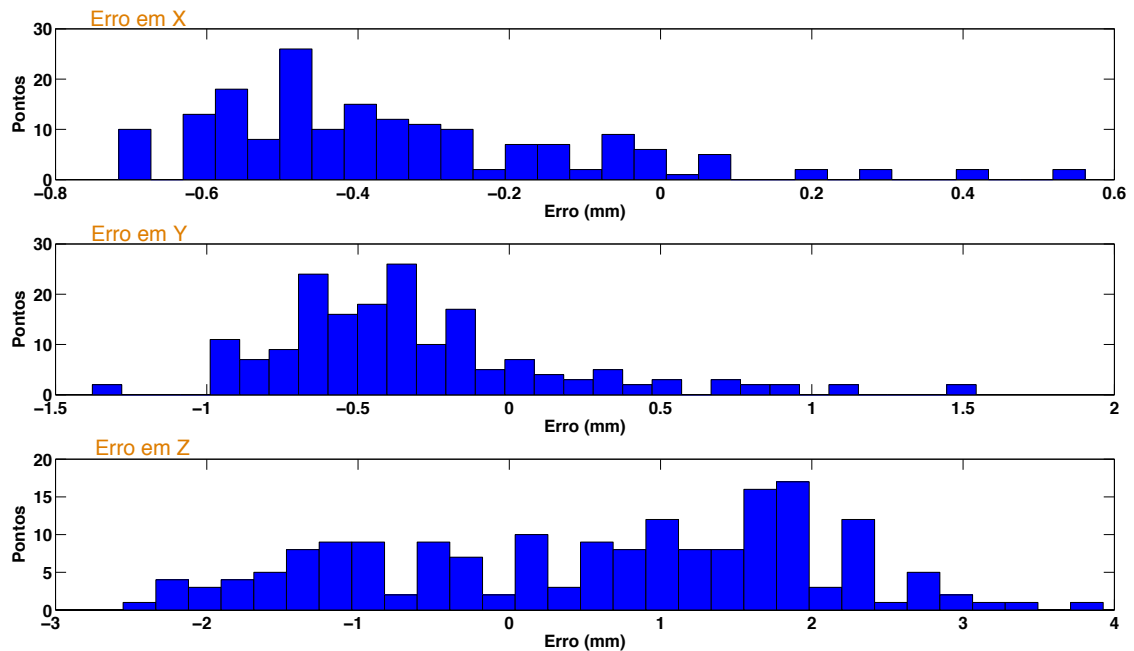


Figura 6.8: Histograma da dispersão dos pontos.

Desta forma foi caracterizada a performance do sistema, para uma amostra superior, sendo que os erros associados ao sistema mantiveram-se reduzidos, o que reflete o esforço efetuado para obter uma calibração otimizada.

6.3 Obtenção de imagens tridimensionais

De modo a validar a calibração do sistema foram efetuados alguns testes para a obtenção de imagens com informação tridimensional, sendo que o objetivo principal destes testes residiu na medição de profundidade de alguns objetos.

Para os testes realizados foi utilizado um objeto, apresentado na Figura 6.9, onde são também especificadas as dimensões físicas desse objeto. O objeto escolhido apresenta características interessantes para os testes efetuados, um vez que, ostentam formas com padrões bem definidos e de fácil identificação.

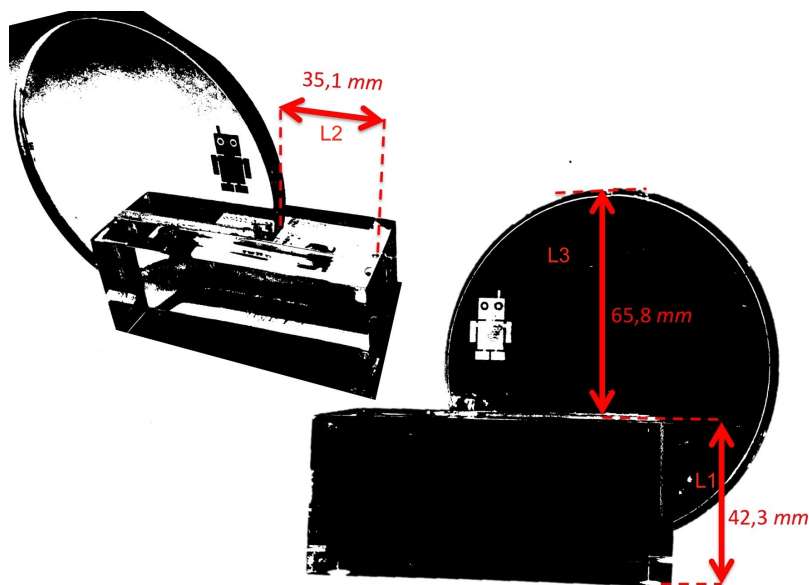


Figura 6.9: Objeto utilizado para testes.

As etapas necessárias para a obtenção de informação tridimensional do objeto apresentado são:

- Aquisição e leitura das imagens;
- Obtenção dos pontos 2D relativos à linha do laser;
- Aplicação do princípio da triangulação, apresentado na secção 5.2.2, de modo a calcular das coordenadas tridimensionais da linha do laser, no referencial da câmara.

Com o intuito de simular ambientes subaquáticos, os testes foram elaborados em ambientes com pouca luz. Na Figura 6.10 é apresentado o cenário de teste, com pouca iluminação e com a linha laser a incidir no objeto, sendo amplamente perceptível a deformação da linha. Nos testes efetuados em ambiente seco, os objetos visados encontravam-se a distâncias que variaram entre 300 mm e 600 mm.

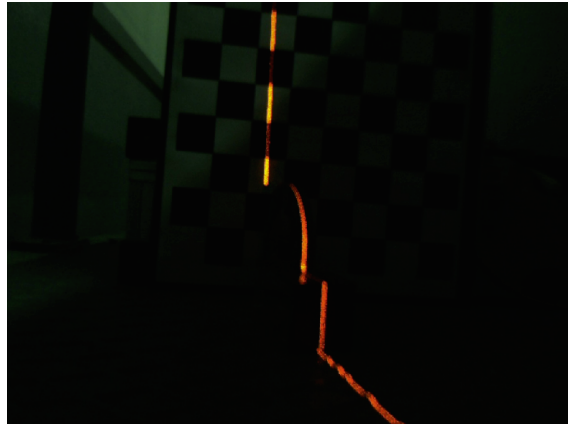


Figura 6.10: Cenário de teste.

Através do processamento da imagem apresentada, foram selecionados os pontos da linha laser para a aplicação do princípio da triangulação, sendo conseqüentemente obtida a informação de profundidade do objeto visado. Na Figura 6.11 é apresentada o vetor obtido no eixo Z para a linha do laser, onde facilmente é identificado o objeto visado.

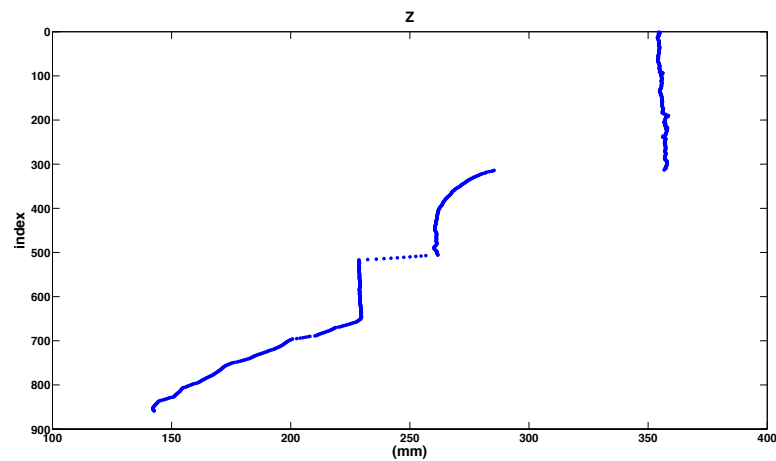


Figura 6.11: Coordenadas em Z da linha laser.

De forma a obter medidas do objeto visado, foram selecionados pontos de interesse, apresentados na Figura 6.12. Através desses pontos foram efetuadas algumas medições, apresentadas na Tabela 6.7.

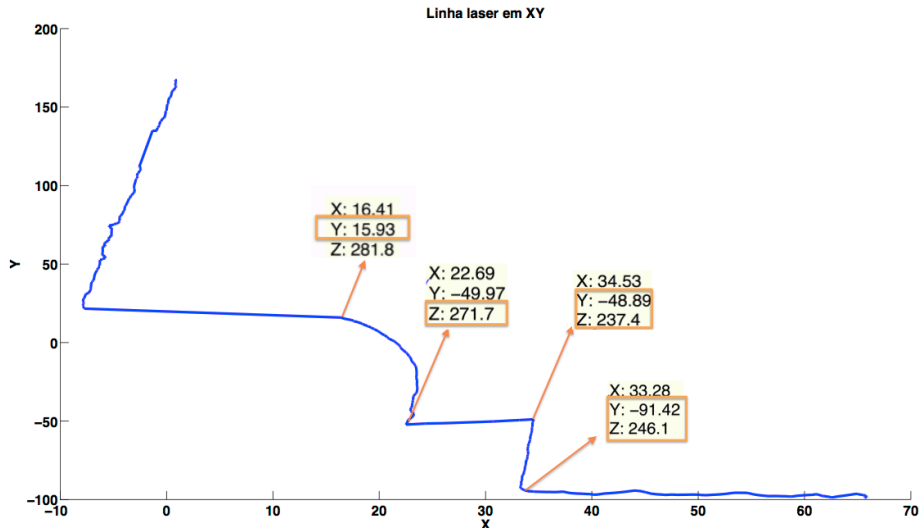


Figura 6.12: Pontos tridimensionais da linha laser.

Tabela 6.7: Estimação das propriedades físicas do objeto.

	Valor medido (mm)	Valor estimado (mm)	Erro de estimação (mm)
L1	42,30	42,53	0,23
L2	35,10	34,30	0,80
L3	65,80	65,90	0,10

Os erros obtidos na estimação das propriedades físicas são relativamente reduzidos, e tal como espectável, esta estimação apresenta erros menores no eixo dos Y, comparativamente com Z, tal como foi caracterizado na Tabela 6.6.

Adicionalmente, com o objetivo de formar uma nuvem de pontos do objeto, foi efetuado um varrimento do objeto através da linha laser. Este varrimento foi efetuado de forma manual, uma vez que o sistema não inclui qualquer sistema de locomoção ou com sensores hodométricos. A nuvem de pontos associada a essa experiência é apresentada na Figura 6.13.

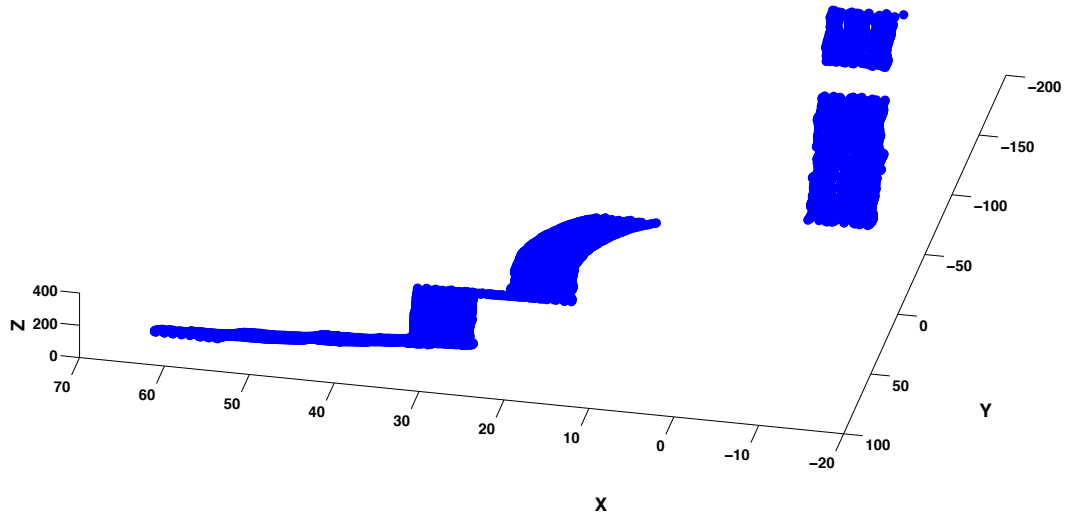


Figura 6.13: Nuvem de pontos tridimensional.

6.4 Testes em ambientes subaquáticos

De forma a validar o sistema em ambiente subaquático, foram efetuadas algumas experiências utilizando o objeto apresentado anteriormente, num tanque com água. Nas experiências efetuadas o objeto ficou no fundo do tanque e um suporte com a câmara e o laser foi pousado nas beiras do tanque, implicando que o sistema de visão observe o objeto com perspectiva vista de cima. A profundidade do tanque utilizado é de cerca de 250 mm.

Na Figura 6.14 pode-se visualizar uma imagem do objeto no fundo do tanque, com incidência da linha do laser. Nessa figura a linha do laser foi detetada e os pontos estão representados a verde.

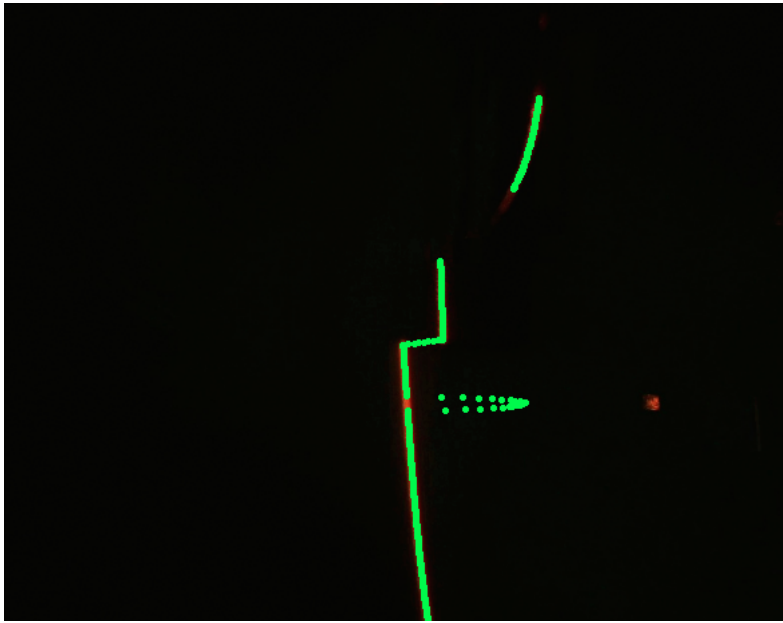


Figura 6.14: Imagem do cenário de teste em ambiente subaquático.

Na figura anterior é possível visualizar algum ruído presente na imagem, uma mancha vermelha presente na zona direita da imagem, que não sendo previsível, pode resultar de possíveis efeitos de *backscattering*, por resíduos existentes no vidro do invólucro onde se encontra o laser ou por partículas existentes na água. Esse ruído vai refletir-se no modelo tridimensional do objeto. A nível do processamento final este ruído foi descartado, através do algoritmo de deteção da linha laser.

Na Figura 6.15 é apresentado o vetor obtido no eixo Z para a linha do laser, onde é possível identificar o objeto e visualizar a zona de ruído da imagem.

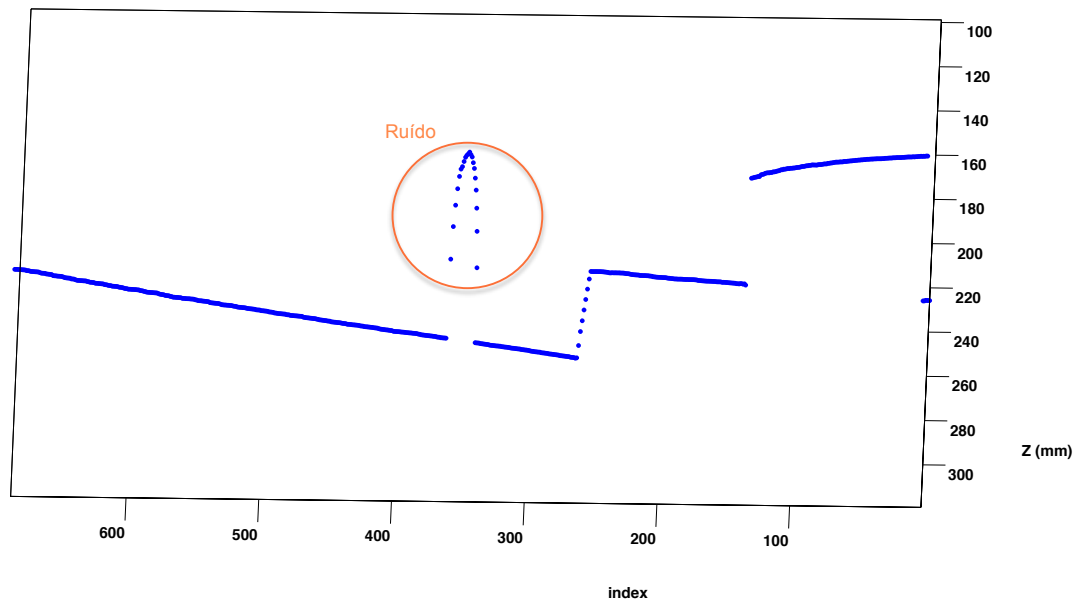


Figura 6.15: Coordenadas em Z da linha laser.

De modo a verificar os erros de estimação associados ao sistema visão laser em ambiente subaquático, foram selecionados pontos de interesse na imagem para efetuar o cálculo de alguma das propriedades físicas do objeto.

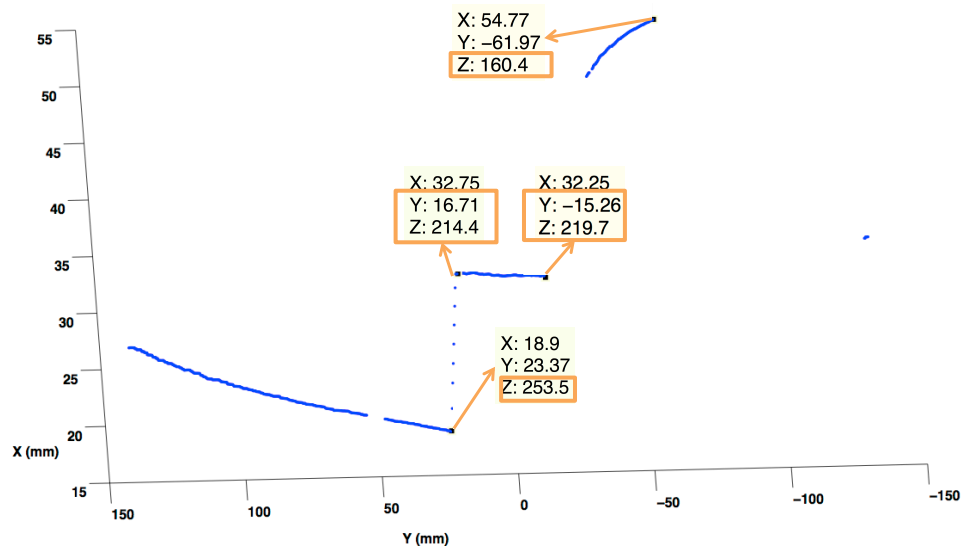


Figura 6.16: Pontos tridimensionais da linha laser.

Através dos pontos de interesse, apresentados na Figura 6.16 foram efetuadas algumas medições, apresentadas na Tabela 6.8.

Tabela 6.8: Estimação das propriedades físicas do objeto em ambiente subaquático.

	Valor medido (mm)	Valor estimado (mm)	Erro de estimação (mm)
L1	42,30	39,10	3,20
L2	35,10	31,26	3,84
L3	65,80	59,30	6,50

O erro de estimação em ambiente subaquático é superior ao erro em ambiente seco. Este erro pode ser provocado por múltiplos fatores, inclusive a calibração. A utilização de um sistema de visão em ambiente aquoso, idealmente, requer a calibração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos referentes à câmara, nesse mesmo meio. No entanto, no âmbito desta dissertação, não foi possível calibrar o sistema em ambiente subaquático, uma vez que os invólucros da câmara e do laser não são totalmente estanques, tal como é possível observar na Figura 5.16.

6.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram efetuados algumas experiências de modo a validar o sistema de visão laser desenvolvido.

O tema com maior destaque nesta dissertação é a calibração deste tipo sistema, e desse modo, neste capítulo procedeu-se à validação do processo de calibração do sistema. No processo de calibração foi possível determinar que o aumento do número de imagens influencia de forma positiva o resultado da calibração.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que, através da caracterização da performance do sistema conclui-se que o sistema apresenta erros inferiores a 1 mm.

A nível da obtenção de informação tridimensional, verificou-se que o sistema apresenta resultados positivos. Através da caracterização das dimensões físicas de um objeto, foi possível obter imagens tridimensionais e medir a profundidade desse mesmo objeto. Em ambiente subaquático, tal como era expectável, o sistema apresentou maiores erros, no entanto, foi também possível extrair informação tridimensional do objeto visado.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

Esta dissertação abordou o desenvolvimento de um sistema de visão laser para percepção em ambientes subaquáticos. A existência de inúmeras atividades possíveis em ambientes subaquáticos na área da robótica, encaminhou os centros de investigação para exploração deste meio. Essa exploração é conseguida, na maioria dos casos, recorrendo a sistema de visão, no entanto este meio apresenta adversidades que, por vezes, comprometem a exatidão desses sistemas. Desse modo, é frequente a integração, em conjunto com os sensores óticos, de feixes de luz estruturada (lasers). Este tipo de sistemas é fulcral para a obtenção de valores precisos em ambientes onde existe escassez de iluminação e a profundidade de operação é diminuída.

Previamente, efetuou-se um estudo com o objetivo de entender quais as tecnologias existentes e quais os projetos desenvolvidos neste âmbito. Esta análise foi útil para perceber qual a melhor abordagem, podendo assim proceder-se à definição da arquitetura do sistema de visão laser, cumprindo assim o primeiro objetivo delineado.

O processo de calibração é uma etapa importante em qualquer sistema de visão computacional, sendo que quanto mais precisa for a calibração, melhor será o desempenho do sistema. Desse modo, a calibração do sistema de visão laser apresenta um papel fulcral no desenvolvimento deste trabalho.

A calibração do sistema, teve por referência a abordagem de artigo científico [18] onde é efetuada a calibração do sistema com base no *cross-ratio*. Em comparação com essa referência, o trabalho desenvolvido nesta dissertação, apresenta melhorias significativas ao nível da deteção da linha do laser e da deteção dos cantos do alvo. Por outro lado,

a abordagem de calibração implementada neste trabalho utiliza mais imagens, o que aumenta a qualidade do método.

Para desambiguar o processo de calibração, foi desenvolvida uma *toolbox* em Matlab que simplifica esse processo, resolvendo-o de forma simples e precisa. Com a ferramenta desenvolvida é então possível calibrar um sistema de visão e laser, onde o utilizador não necessita de conhecimento de visão computacional. Esta ferramenta pode ainda ser aplicada a lasers de diferentes espectros de cor.

O processo de calibração foi validado com sucesso, uma vez que os erros associados ao método apresentam a ordem de grandeza das décimas de milímetro.

A obtenção de informação tridimensional de objetos, foi também efetuada com sucesso. Para as experiências realizadas, obtiveram-se erros de estimação reduzidos, inferiores a um milímetro. Este processo foi também validado em ambientes subaquáticos, no entanto, neste meio, o sistema apresentou erros de estimação superiores. A utilização de sistemas de visão ambientes subaquáticos pode ser melhorada, efetuando a calibração do sistema dentro de água. No âmbito desta dissertação, não foi possível calibrar o sistema em ambiente subaquático, uma vez que os invólucros da câmara e do laser não são totalmente estanques.

Esta dissertação deu origem a um artigo científico, cujo o título é "*Light Based Visual System for Underwater Environments*", submetido à conferência "*IbPRIA 2015: 7th Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*".

Em suma, os objetivos propostos para esta dissertação foram completados com sucesso.

No que diz respeito ao trabalho futuro existem várias abordagens que podem melhorar a performance do sistema. Em termos da calibração, esta poderia ser melhorada com a implementação de outro método para a obtenção dos pontos de controlo, substituindo o *cross-ratio*, aumentando assim o número de pontos de controlo e consequentemente baixando o erro de calibração do sistema.

Para a utilização do sistema em ambientes subaquáticos é essencial efetuar a calibração do sistema nesse mesmo meio, sendo isso apenas possível com a existência de

invólucros que garantam total estanquidade. Este aspeto pode ser resolvido no futuro, aumentando a qualidade de medição do sistema em ambientes subaquáticos.

A introdução de mais lasers no sistema seria também uma mais valia, pois para uma dada imagem passaria a existir mais do que uma linha laser, aumentando desta forma a área de cobertura.

Para atestar a qualidade do sistema, seria ideal efetuar simulações em ambiente industrial e subaquático.

A integração deste sistema em sistemas autónomos, como em veículos do tipo ROV, é viável, sendo que para tal a solução deveria executar em tempo real.

Com a integração de uma estrutura móvel, com motores e sensores hodométricos (*encoders*), será possível efetuar o varrimento em X, obtendo assim uma informação tridimensional completa dos objetos visados.

Com a implementação destas melhorias, será conseqüentemente obtido um sistema mais completo e com melhor performance.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Bibliografia

- [1] Da, A. & Woodward, A. & Delmas, P. & Gimelfarb, G. & Morris, J.,
"Comparison of active structure lighting mono and stereo camera systems: Application to 3d face acquisition",
In Seventh Mexican International Conference on Computer Science, 2006. [8][9]
- [2] Chan, M. & Delmas P. & Gimel'farb, G. & Leclercq, P. & Liu, J. & Woodward, A.,
"Comparative study of stereo algorithms for 3d face reconstruction ",
The University of Auckland, Dept. of Computer Science [9]
- [3] Start, Askold V. & Oliveira, Manuel M.,
"A Point-and-Shoot Color 3D Camera",
2003 [10]
- [4] Wang, Lei & Bo, Mei & Gao, Jun & Ou, ChungSheng,
"A Novel Double Triangulation 3D Camera Design",
Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition August 20 - 23, 2006, Weihai, Shandong, China [10]
- [5] Cui, Y. & Schuon, S. & Chan, D. & Thrun, S. & Theobalt, C.,
"3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera",
Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on San Francisco, CA, June 2010, p. 1173 - 1180 [10]
- [6] Konolige, K. & Augenbraun, J. & Donaldson, N. & Fiebig, C. & Shah, P.,
"A Low-Cost Laser Distance Sensor",
2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA
May 2008, p. 3002 - 3008 [10]
- [7] Costa, B.M. & Battista, T.A. & Pittman, S.J.,
"Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR

- bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems”,
Remote Sensing of Environment 113, 2009, p. 1082–1100 [11]
- [8] Angelbeck, Albert W.,
”Application of a Laser Scanning and Imaging System to Underwater Viewing”,
Underwater Photo Optics, SPIE Proceedings Vol. 7. Bellingham, WA: Society for
Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1966., p.8 [13]
- [9] Moore, Karl D. & Jaffe, Jules S. & Ochoa, Benjamin L.
”Development of a New Underwater Bathymetric Laser Imaging System: L-Bath”,
Journal of atmospheric and oceanic technology, 2000, p. 1106 - 1117 [13]
- [10] Wang, B. & Liao, Q. & Bootsma, Harvey A.
”A dual-beam dual-camera method for a battery-powered underwater miniature PIV
(UWMPIV) system”
Springer, 2012, p. 1401 - 1414 [13][14]
- [11] Wang, C. & Tang, D. & Hefner, T.
”Design, Calibration and Application of a Seafloor Laser Scanner”
”Laser Scanning, Theory and Applications- ISBN 978-953-307-205-0 - p. 495 - 522
[14]
- [12] Norstrom, C.
”Underwater 3-D imaging with laser triangulation”
2006 [14]
- [13] Wang, C.C.& Lee, J.M.
”A 2D rough surface to be used to calibrate underwater laser scanner”
Nov. 2004, OCEANS '04. MTTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04 , vol.3, p.1235-1239
[14]
- [14] Kondo, H. & Ura, T.
”Underwater structure observation by the AUV with laser pointing device”
2002, Underwater Technology, 2002. Proceedings of the 2002 International Symposi-
um, p. 178-183 [14]
- [15] Zhang, Z.
”Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations”
Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399, USA [14]

- [16] Fischer, G. H.
"On the existence and uniqueness of maximum-likelihood estimates in the Rasch model"
University of Vienna, 1981 [14]
- [17] Zhang, Q. & Pless, R.
"Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration)"
Department of Computer Science and Engineering Washington University in St. Louis, USA [15]
- [18] Zhou, F. & Zhang, G.
"Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations"
School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China
2004 [16][56][88]
- [19] Harris, C. & Stephens, M.
"A combined corner and edge detector"
1988 [16][52]
- [20] Hartley, R. I. & Zisserman, A.
"Multiple View Geometry in Computer Vision.- C.7
Cambridge University Press, second edition, 2004. [17][26][33]
- [21] Marquardt, D.W.
"An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters"
1963. [17][51][61]
- [22] Bouguet, J.
"Camera Calibration Toolbox"[18][52][67]
- [23] Ma, Y. & Kosecka, J. & Soatto, S. & Sastry, S.
"An Invitation to 3-D Vision - From Images to Models"
2001 [21]

- [24] Tsai, R.
"A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses"
1987 [24]
- [25] Gonçalves, P.
"Sistema de detecção e localização de veículos subaquáticos"
Instituto Superior de Engenharia do Porto - 2012 [24][30]
- [26] Brown, D. C.
"In Decentering Distortion of Lenses- p. 444–462
1966 [25][26]
- [27] Ribeiro, J.
"Sistema de auto calibração visual para robots do ISePorto, baseado em EKF"
Instituto Superior de Engenharia do Porto - 2013 [27]
- [28] Slabaugh, G. G.
"Computing Euler angles from a rotation matrix" [27]
- [29] Serra, R.
"Sistema de Visão Stereo Ativo aplicado aos Robôs do ISePorto"
Instituto Superior de Engenharia do Porto - 2012 [30][30][31]
- [30] Golub, G. H. & Reinsch C.
Handbook Series Linear Algebra - "Singular Value Decomposition and Least Squares Solutions"
1970 [57]
- [31] Yamauchi, K. & Saito, H. & Sato, Y.
"Calibration of a structured light system using planar objects"
Keio University - Japan [63]