

Sistema de Perceção 3D Subaquático com Projektor Laser rotativo: Calibração e Reconstrução Tridimensional

EDUARDO JOSÉ PINTO SOARES
novembro de 2018



Sistema de Perceção 3D Subaquático com Projektor Laser rotativo: Calibração e Reconstrução Tridimensional

Eduardo José Pinto Soares
Nº 1110536

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

15 de Novembro de 2018



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

Candidato: Eduardo José Pinto Soares

Nº 1110536

Orientador: Eng. José Miguel Almeida.

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

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.

A toda a “família” do laboratório de sistemas autónomos (LSA) que me acompanhou durante estes últimos dois anos, em especial a todos os elementos da equipa de desenvolvimento do SLS, Tiago Pereira, Caio Lomba, Henrique Silva, Ricardo Pereira, Denys Sytnyk e Carlos Almeida.

Um enorme agradecimento aos meus amigos da “*La Família*” 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, Liliana Silva, pelo carinho, apoio e dedicação durante a elaboração desta dissertação.

Eduardo Soares

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

Atualmente, a exploração do oceano é um dos principais focos da investigação científica. Contudo, sabemos que o ser humano possui algumas limitações, como por exemplo quando pretende navegar no meio subaquático, levando ao desenvolvimento de veículos para auxiliar o homem na sua missão de explorador.

Estes veículos, como em qualquer sistema robótico móvel, possuem um leque de sensores que irão permitir a percepção do meio que os envolve. Dentro desta gama de sensores, os sistemas de visão computacional são os mais aliciantes, tendo em conta que permitem obter grandes quantidades de informação. Contudo, no meio aquático, a turbidez das águas ou a falta de luz, tornam estes sensores ineficazes, levando ao desenvolvimento de sistemas mais complexos para ultrapassar estes fenómenos do oceano.

Neste âmbito, esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sensor de percepção subaquática, utilizando métodos de visão computacional, o qual utilizará para além do sensor ótico, projetores laser em forma de linha, que permitirão a obtenção de informação tridimensional quando captados pela câmara. Além disso, pretende-se ainda a utilização de um projetor móvel que irá aumentar a quantidade de informação tridimensional.

Como em qualquer sistema de visão computacional, o processo de calibração é uma das partes mais relevantes para o bom funcionamento do mesmo. Deste modo, para o sistema a desenvolver, a calibração do sensor ótico não é suficiente, sendo necessário a estimação do plano do projetor laser e do seu eixo de rotação (parâmetros extrínsecos do projetor laser rotativo). Assim, ao longo da dissertação, foi necessário resolver a problemática adjacente à modelização do projetor laser rotativo, desenvolvendo-se assim

um método para a calibração do sistema. O sistema e o método de calibração foram validados num ambiente subaquático, mostrando resultados para o cálculo da profundidade com erros inferiores a 4 mm.

Palavras-Chave:

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

Abstract

Nowadays, understanding and exploring the deep sea is one of the main focuses of the scientific research community. However, the human being has several limitations when trying to navigate in underwater environments, leading to the creation of vehicles to assist the Man in his mission as an explorer.

These vehicles, like any mobile robotic system, have a range of sensors that will allow the perception of the surrounding environment. Within this range of sensors, computer vision systems are one of the most attractive because they allow for a larger amount of information. However, in the aquatic environment, water turbidity or lack of light make these sensors less effective, leading to the development of more complex systems to counteract these oceanic phenomena.

In this context, this dissertation aims to develop an underwater perception sensor using computer vision methods. It uses, in addition to the optical sensor, line-type laser projectors, that will allow the acquisition of three-dimensional information when captured by the camera. Besides that, it is intended to use a mobile projector to increase the amount of three-dimensional information.

As in any computer vision system, the calibration process is one of the most relevant parts for the proper functioning of the system. Thus, for the developed system, the optical sensor calibration is not enough. It is necessary to estimate the laser projector plane and its axis of rotation (laser parameters). Along this dissertation, it was necessary to solve the problem of estimating the laser parameters, developing a method to calibrate the system. The calibration method was validated in underwater environments, showing promising results for the depth computation, with errors below 4 mm.

Keywords:

Laser, underwater vision, laser vision, laser line, camera, three-dimensional images, vision systems, structured light system.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Âmbito da dissertação	1
1.2 Enquadramento e motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estrutura do documento	3
2 Estado da Arte	5
2.1 <i>Laser Scanners</i>	5
2.1.1 Tipos de <i>Laser Scanners</i> e Aplicações	6
2.2 <i>Laser scanners</i> subaquáticos	8
2.2.1 Aplicações com LBSLS	9
2.2.2 Calibração do sensor ótico	14
2.2.3 Calibração do Sistema	15
2.3 Resumo do Capítulo	18

3	Fundamentos teóricos	19
3.1	Visão subaquática	19
3.1.1	Refração da Luz	21
3.1.2	Câmaras	21
3.1.3	Parâmetros intrínsecos	27
3.1.4	Parâmetros Extrínsecos	27
3.2	Métodos Matemáticos	29
3.2.1	Homografia	29
3.2.2	Filtro Gaussiano	30
3.2.3	Centro de Massa	31
3.3	Resumo do Capítulo	31
4	Arquitetura do Sistema	33
4.1	Arquitetura de <i>Hardware</i>	33
4.1.1	Sistema de Visão	34
4.1.2	Sistema de Luz	35
4.2	Arquitetura de Software	38
4.2.1	Calibração	38
4.2.2	Reconstrução 3D	39
5	<i>Hardware</i>	41
5.1	<i>Hardware</i>	41
5.1.1	Sensor Ótico	41
5.1.2	Unidade de Processamento	42
5.1.3	Componentes Auxíliars	43
5.2	Resumo do Capítulo	45
6	Implementação	47
6.1	Parâmetros Intrínsecos	47
6.2	Calibração	48
6.2.1	Imagens e Distorção da lente	48
6.2.2	Parâmetros extrínsecos	51
6.2.3	Segmentação e Projeção	53
6.2.4	Plano do Laser e Eixo de rotação	59

6.3	Reconstrução	61
6.3.1	Processamento da Imagem	61
6.3.2	Segmentação do laser e Equação do plano	62
6.3.3	Reconstrução Tridimensional	64
6.4	Resumo do Capítulo	64
7	Resultados	65
7.1	<i>Setup</i> Experimental	65
7.2	Calibração	66
7.3	Reconstrução	70
7.4	Caracterização do sistema	76
7.4.1	Análise do erro	76
7.4.2	Erro em x e y	83
7.4.3	Passo	86
7.4.4	Paralelismo	88
7.4.5	Tempo de Exposição e Ganho do sensor ótico	90
7.5	Resumo do Capítulo	93
8	Conclusão e Trabalho Futuro	95
	Bibliografia	99

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

1.1	EVA e UX1. Veículos dos projetos VAMOS e Unexmin.	2
2.1	Nuvem de pontos de um <i>Quarry</i> em Lee Moore, primeira demonstração do projeto VAMOS	6
2.2	Faro <i>Laser Scanner</i> [1]	7
2.3	Aplicação do Faro <i>Freestyle 3D Scanner</i> [2].	7
2.4	<i>Structured lighth system</i> com projector [3]	9
2.5	Hercules ROV [4].	10
2.6	Braço robótico com projetor laser [5].	11
2.7	Padrão laser com 25 linhas, e reconstrução tridimensional [6].	12
2.8	Resultados da reconstrução tridimensional [7].	12
2.9	Resultados da reconstrução tridimensional [7].	13
2.10	Padrão utilizado na calibração pelo método de Zhang [8].	14
2.11	Sistema LBSLS desenvolvido no LSA [9].	15
2.12	Eixo de rotação do servomotor [10].	16
2.13	Processo de segmentação da linha do laser [10].	17
2.14	Cubo utilizado para a calibração do sistema [11].	17
3.1	Correção da cor em imagens capturadas <i>underwater</i>	19
3.2	Ilustração da absorção da luz no meio subaquático [12].	20
3.3	Ilusão ótica criada pela refração da luz.	21
3.4	Feixe de luz em meios diferentes.	21
3.5	Diagrama dos componentes de uma câmara.	22
3.6	Exemplo da matriz de uma imagem com 3 dimensões, em formato RGB. .	23

3.7	Exemplo de um padrão Bayer com as intensidades de verde, vermelho e azul (G,R e B).	23
3.8	Ilustração do modelo <i>pinhole</i> [13].	23
3.9	Sistemas de coordenadas do modelo <i>pinhole</i>	24
3.10	Em (a) imagem sem distorção, (b) <i>barrel distortion</i> , (c) <i>pincushion distortion</i>	25
3.11	Ilustração representativa do campo de visão.	26
3.12	Imagem de um padrão de xadrez, com lente <i>fish-eye</i>	26
3.13	FoV e Refração da luz entre o ar e água.	26
3.14	Representação da rotação e translação entre referenciais.	28
3.15	Ilustração da aplicação de um <i>kernel</i>	30
3.16	Ilustração da utilização do método [14].	31
4.1	Esquema ilustrativo da arquitetura do Sistema.	34
4.2	Esquema da arquitetura do sistema de visão.	34
4.3	Dois sistema de Luz, aberto e fechado.	36
4.4	Esquema da arquitetura do sistema de luz.	36
4.5	Sequência exemplo para o sistema de luz.	37
4.6	Diagrama do software de calibração.	39
4.7	Diagrama do software de reconstrução.	39
5.1	Teledyne Dalsa Nano C-2020	42
5.2	Intel Joule 570x	43
5.3	Intel Joule 570x <i>developer kit</i>	43
5.4	HUB e placa Gumstix.	44
5.5	Sistema de visão.	44
5.6	Componentes do sistema de visão.	45
6.1	Aplicação do MATLAB - <i>Camera Calibrator</i>	48
6.2	Diagrama do processo de calibração.	49
6.3	Conjunto de imagens adquiridas.	50
6.4	Imagem com distorção.	50
6.5	Imagem sem distorção.	50
6.6	Cantos detectados na imagem de Luz.	51
6.7	Referencial do Mundo definido no alvo de xadrez.	52
6.8	Imagem <i>RGB</i>	53

6.9	Imagem em escala de cinza.	53
6.10	Segmentação pelos limites do alvo.	54
6.11	Imagens após aplicação do Filtro Gaussiano.	54
6.12	Intensidade raw e após aplicação do filtro gaussiano.	54
6.13	Imagem binarizada	56
6.14	Pontos do laser segmentados.	57
6.15	Pontos dos alvos no referencial da câmara.	58
6.16	Pontos do laser segmentados no referencial da câmara.	59
6.17	Diagrama do processo de reconstrução tridimensional.	61
6.18	Imagens referentes ao antes e depois da aplicação do filtro gaussiano em torno dos pixels do laser.	62
7.1	Sistema utilizado para obtenção de resultados.	65
7.2	Sistema utilizado para obtenção de resultados.	66
7.3	Erro médio de reprojeção em cada imagem.	67
7.4	Parâmetros extrínsecos de cada imagem no referencial da câmara.	67
7.5	Resultados da Calibração.	68
7.6	Sistema SLS utilizado para validação de resultados em ambiente subaquático.	70
7.7	Imagem de leds do alvo de calibração.	71
7.8	<i>Point Cloud</i> do alvo de calibração.	71
7.9	<i>Point Cloud</i> do alvo de calibração com cor, perspectiva 1.	72
7.10	<i>Point Cloud</i> do alvo de calibração com cor, perspectiva 2.	73
7.11	Imagens de luz de outros objetos reconstruídos.	74
7.12	<i>Point Cloud</i> das âncoras.	74
7.13	<i>Point Cloud</i> do tubo.	75
7.14	Imagem de Led do padrão utilizado para a análise do erro.	76
7.15	Alvo de calibração segmentado na nuvem de pontos.	77
7.16	Projeção dos pontos segmentados no referencial do padrão.	77
7.17	Z^2 dos pontos segmentados.	78
7.18	Retas de intersecção selecionadas para possível eixo de rotação.	79
7.19	<i>Point Cloud</i> obtida com o novo eixo.	80
7.20	Projeção dos pontos segmentados no referencial do padrão e erro quadrado em z.	81
7.21	<i>Point Cloud</i> do alvo com cor.	82

7.22	Pontos segmentados da <i>Point Cloud</i> do alvo.	83
7.23	Sobreposição dos dois conjuntos de pontos.	84
7.24	Erro em x e y das arestas calculadas.	84
7.25	<i>Point Cloud</i> com passo de 0.44°	86
7.26	<i>Point Cloud</i> com passo de 1.32°	87
7.27	Retas horizontais do alvo de calibração.	88
7.28	Imagens de laser em cada um dos <i>scans</i> , 2, 4, 10 e 15 ms, respetivamente.	90
7.29	Nuvens de Pontos obtidas nos diferentes varrimentos.	91
7.30	Imagens de laser com os diferentes ganhos.	92
7.31	Nuvens de pontos obtidas nos diferentes varrimentos.	92

Lista de Tabelas

7.1	Componentes das equações dos planos calculados.	69
7.2	Vetor de direção e ponto do eixo estimado.	69
7.3	Equações dos eixos, em 1 eixo estimado pela calibração, e em 2 pelo método de análise.	79
7.4	Tabela do Erro médio e desvio padrão em x e y.	85
7.5	Dados das duas <i>Point Clouds</i>	87
7.6	Equações das retas segmentadas.	89
7.7	Ângulo entre duas retas.	89
7.8	Numero de pontos em cada <i>scan</i>	91
7.9	Numero de pontos em cada <i>scan</i>	92

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Siglas e Acrónimos

AUV Autonomous Underwater Vehicles

CMOS Complementary Metal-Oxide Semiconductor

DOE Diffractive Optical Element

FoV Field of View

FPS Frames per Second

GigE Gigabit Ethernet

LiDAR Light Detection and Ranging

LSA Laboratório de Sistemas Autónomos

LBSLS Laser-Based Structured Light Systems

OpenCV Open Computer Vision

PPM Perspective Projection Matrix

RGB Red-Green-Blue

ROV Remotely Operated Vehicles

ROS Robot Operating System

SLS Structured Ligth System

ToF Time-of-Flight

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Âmbito da dissertação

A frase “*Deep Ocean Exploration is the 21st Century ‘Space Race’*” [15], descreve na sua plenitude o foco ao nível da investigação nos dias de hoje. Com a escassez dos recursos naturais a aumentar, e com um enorme oceano por explorar, é de facto natural que surja uma corrida à exploração do fundo do oceano, criando uma grande impulsão na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias para o auxílio do homem.

Desta forma, ROVs (*Remotely Operated Vehicle*) e AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*) são dois tipos de veículos que foram desenvolvidos para colmatar as dificuldades do Homem em explorar o meio subaquático. Como sistemas robóticos que são, estes veículos, contem um aglomerado de sensores, os quais permitem obter informação do meio que os rodeia. Do mesmo modo, e com o intuito de munir estes veículos com o melhor que a tecnologia disponibiliza, o desenvolvimento de sensores subaquáticos é um setor de grande interesse em todas as suas vertentes, como por exemplo navegação, localização, perceção, mapeamento, entre outras.

Sensores óticos, normalmente câmaras, são bastante comuns neste aglomerado de sensores, pois permitem obter uma inúmera quantidade de informação numa só imagem. Para além disso, permitem ao operador obter a perspetiva de atuação dos seus veículos. Contudo, na maioria das câmaras existe uma ambiguidade relativa à profundidade, uma vez que toda a informação se encontra disponível em duas dimensões (2D) no plano da imagem, sendo por isso difícil obter medidas exatas num sistema a três dimensões (3D).

Com o objetivo da utilização destes sensores óticos para a obtenção de informação tridimensional, surgem novos tipos de sensores que se caracterizam pela utilização de emissores de luz, denominados de “Sistema de Luz Estruturada”, devido ao facto de

nestes ambientes a falta de luminosidade ser notória. Tipicamente, nestes sensores subaquáticos utilizam-se projetores laser, pelo facto de a potência luminosa ser bastante mais concentrada, ao contrário de outras fontes luminosas.

Nesse sentido, o âmbito desta dissertação assenta na problemática adjacente á obtenção de informação tridimensional de um Sistema de Luz Estruturada.

1.2 Enquadramento e motivação

Nos últimos anos o LSA (Laboratório de Sistemas Autónomos)¹ tem vindo a participar em diversos projetos relacionados com o meio marinho, tais como projeto e desenvolvimento de veículos autónomos, sistemas de perceção subaquática, sistemas de localização, navegação e mapeamento, os quais deram uma ampla visão ao laboratório entre entidades que desenvolvem a sua atividade na mesma área. Consequentemente, surgiram dois projetos de grande dimensão (UNEXMIN [16] e iVamos! [17]), dos quais o LSA é parte integrante, no âmbito da exploração e mineração subaquática.



Figura 1.1: EVA e UX1. Veículos dos projetos VAMOS e Unexmin.

¹www.lsa.isep.ipp.pt

Assim, tornou-se imperativo uma evolução nas novas tecnologias de percepção subaquática, dando início ao desenvolvimento de um sistema de luz estruturada para reconstrução tridimensional e aquisição de imagem em simultâneo, o qual tem como objetivo ser utilizado pelos veículos dos projetos.

Assim, esta dissertação assenta no desenvolvimento de um método de calibração para um sistema de luz estruturada e na obtenção informação tridimensional em tempo real, para mapeamento de meios subaquáticos.

1.3 Objetivos

No âmbito dos sensores de luz estruturada, pretende-se com esta dissertação desenvolver um método de calibração e reconstrução tridimensional. Deste modo, os objetivos deste projeto assentam em:

- Projetar a componente de ótica do sistema de luz estruturada e seleção do hardware adequado;
- Desenvolvimento de um método de calibração para modelizar o sistema de luz estruturada com laser rotativo;
- Desenvolvimento de um processo de reconstrução tridimensional, para ser executado em tempo real;
- Obtenção de nuvens de pontos e de imagens, em simultâneo;
- Estudos sobre a resolução, precisão e FPS (*Frames per Second*) do sistema. Para este objetivo deverão ser realizados um conjunto de testes que permitam validar os dois processos, avaliar o erro nos três eixos (x, y e z), e por fim realizar uma caracterização do sistema.

1.4 Estrutura do documento

O documento está organizado em 7 capítulos, sendo este o primeiro e tendo como objetivo apresentar uma breve introdução ao tema da dissertação. De seguida, no segundo capítulo é feita uma análise preliminar sobre o tema, assim como, os tipos de sensores que são comercializados e as metodologias aplicadas em ambientes secos e *underwater*.

Posteriormente, no capítulo 3 é efetuada uma exposição de alguns dos conceitos fundamentais para a compreensão dos temas desenvolvidos ao longo da dissertação. O

capítulo 4 apresenta a arquitetura de todas as componentes do sistema (luz e de ótica), e apresentando ainda a arquitetura de software dos métodos a implementar. No capítulo seguinte é apresentada a seleção dos componentes para o desenvolvimento do sistema de visão e apresentado o resultado final desta componente do sistema.

No capítulo seguinte, é detalhada a implementação com todos os passos dos processos de calibração e reconstrução. No capítulo sete são apresentados as experiências realizados para validar os dois processos, bem como os resultados obtidos.

Por último, são apresentadas as conclusões e uma análise relativamente aos possíveis trabalhos futuros, nos quais a dissertação abriu portas para o seu desenvolvimento.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 *Laser Scanners*

Scanners a Laser são sensores que permitem efetuar o levantamento tridimensional ou bidimensional e são utilizados maioritariamente para mapeamento e medição precisa da forma física de determinados objetos.

Na sua maioria, são sensores ativos, pois utilizam fontes de radiação para efetuar as suas medições, pertencendo assim ao grupo de sensores ativos, uma vez que emitem radiação para poderem receber a radiação emitida. Estes baseiam-se, normalmente, no tempo de voo ou do inglês *Time of Fligth* (ToF), que corresponde ao tempo em que a radiação emitida demora a ser recebida, para determinarem a distância a que se realizou a reflexão da mesma.

A denominação “*scanner*” provem do facto de estes sensores, na sua maioria, contemrem uma componente física móvel, normalmente rotativa, que lhes possibilita efetuar o varrimento de uma superfície ou objeto. No âmbito da reconstrução a três dimensões e mapeamento é muito comum ouvir-se falar em “*Point Cloud*” ou em português nuvem de pontos. Nuvem de pontos é o formato mais comum dos dados obtidos por este tipo de sensores, onde cada ponto da nuvem contém duas ou três coordenadas (x,y e/ou z), além disso alguns sensores disponibilizam também outras características dos seus resultados, como cor, intensidade, entre outras.

2.1.1 Tipos de *Laser Scanners* e Aplicações

Atualmente podemos encontrar *scanners* laser principalmente em dois formatos, com um laser móvel ou estático e em diversas aplicações. Desta forma, são apresentados abaixo estes dois tipos de *laser scanners* existentes no mercado e algumas das suas aplicações.

O facto de o projetor laser possuir ou não uma componente móvel, faz com que o sensor seja usado em diferentes aplicações. Na Figura 2.2, é possível observar um *laser scanner* com laser rotativo (Faro 3D *scanner* [1]). Neste, para além de o laser ser rotativo o próprio sensor roda em torno de si mesmo, permitindo a realização de varrimentos de 360°. Este tipo de sensores são normalmente utilizados para realizar o mapeamento em grandes ambientes, exteriores ou interiores.

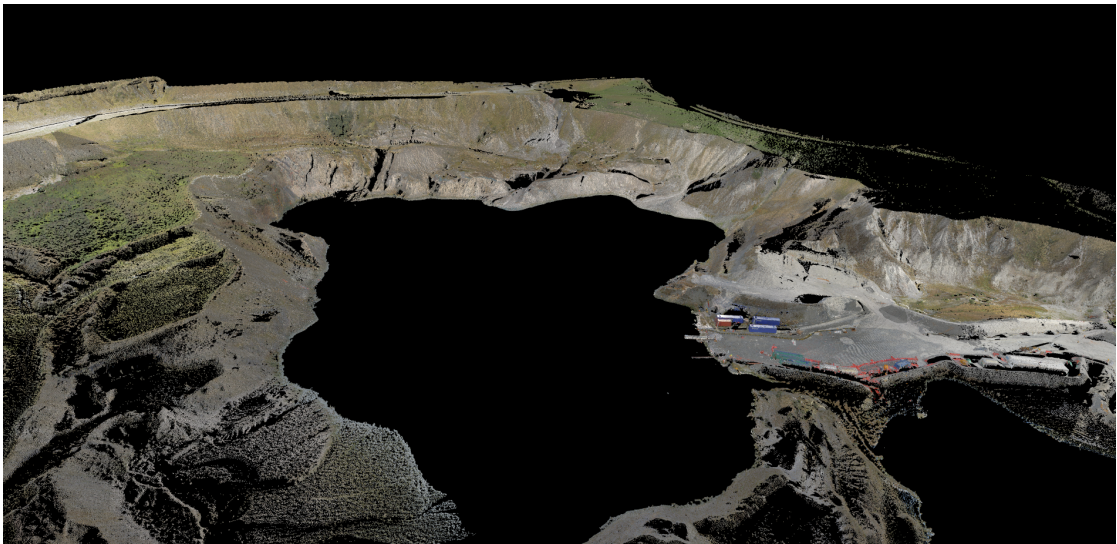


Figura 2.1: Nuvem de pontos de um *Quarry* em Lee Moore, primeira demonstração do projeto VAMOS .

Na Figura 2.1 é apresentada o mapeamento realizado com um *laser scanner* 3D, no decorrer da primeira demonstração do projeto VAMOS. O processo de reconstrução consistiu em realizar *scans* em diferentes posições da pedreira, e posteriormente processar os dados de modo a obter apenas um único mapa, utilizando as coordenadas GPS em que cada um dos scans foi realizado, de modo a alinhar todos os dados.

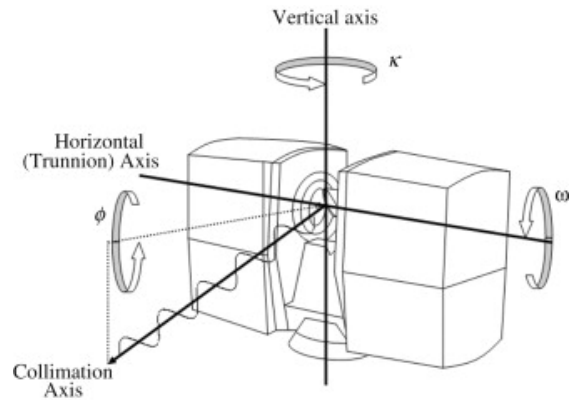


Figura 2.2: Faro Laser Scanner [1]

A outra vertente destes sensores, com um padrão laser estático, é normalmente mais pequena e de fácil manuseamento, pois são por "regra geral" utilizados para a reconstrução precisa de pequenos objetos. Na Figura 2.3 podemos observar a utilização de um sensor deste tipo (Faro *freestyle* 3D scanner [2]), sendo os seus resultados obtidos num formato semelhantes aos *scanners* com laser rotativo. Nestes, a movimentação do sensor em torno do objeto é que possibilita a reconstrução tridimensional do mesmo.



Figura 2.3: Aplicação do Faro Freestyle 3D Scanner [2].

Apesar de estes sensores serem muito diferentes, o conceito para a obtenção das nuvens de pontos é muito semelhante, contudo no meio aquático não revelam resultados convincentes.

2.2 *Laser scanners* subaquáticos

As profundezas dos oceanos são ainda um mistério para o ser humano, embora já existam inúmeros sensores de mapeamento e reconstrução em ambientes secos, os scanners laser apresentados na secção anterior, não apresentam bons resultados no meio aquático, pelo facto de a água atenuar a radiação emitida pelos mesmos. Deste modo, existe um grande foco na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias para o meio subaquático, sendo abaixo apresentados alguns dos trabalhos e sensores desenvolvidos nesta área de atuação.

Antes de iniciar uma exposição destas tecnologias é importante referir que embora o objetivo deste sensor seja o mesmo, o contexto da sua aplicação é um pouco diferente, pois na sua maioria são desenvolvidos para serem usados em veículos subaquáticos capazes de navegar nestes meios.

Ao contrário dos sensores para ambiente seco, no meio subaquático existe uma grande lacuna no mercado, contudo o número de trabalhos elaborados nesta área, com o objetivo de combater esta lacuna, é de todo notório.

Em 2015, Miquel Campos e Gabriel Codina, realizaram um estudo sobre os métodos mais recentes para reconstrução tridimensional em ambientes subaquáticos [18], no qual citam trabalhos realizados por outros autores. Neste artigo os autores, apresentam vários métodos utilizados para a obtenção de informação tridimensional, e entre eles encontram-se os sistemas de luz estruturada:

- *Structured Light*: O método consiste em usar uma câmara e um projetor, para iluminar um padrão conhecido no cenário. Este padrão contém uma codificação conhecida que irá permitir identificar o mesmo na imagem. Conhecendo os dois modelos, da câmara e do projetor, é então possível realizar triangulação para obter a profundidade dos pixels na imagem. Porém este método necessita de um algoritmo de codificação para resolver a decodificação do padrão, como se pode observar na Figura 2.4.
- *Laser-Based Structured Light Systems* (LBSLS): Este método é semelhante ao anterior, com a diferença de que o projetor utilizado é normalmente um projetor laser, pois consegue emitir feixes de luz concentrados num *range* alargado de potências. O formato mais comum para este projetor, é a utilização de laser em forma de linha, permitindo assim obter um maior número de *features* evidentes na imagem,

e evitando a problemática da codificação e decodificação do padrão.

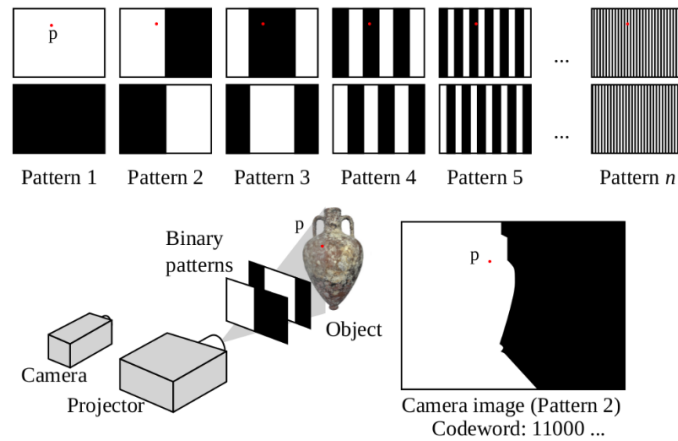


Figura 2.4: *Structured light system* com projetor [3]

Ambos os métodos apresentam resultados positivos e com boa precisão. No entanto, os métodos baseados em projetores laser são os mais utilizados devido à sua eficácia, que na maioria dos casos é diretamente influenciada pela dispersão da luz na água e turbidez da mesma.

2.2.1 Aplicações com LBSLS

No contexto dos LBSLS, existem ainda diferentes técnicas e metodologias, que podem variar desde o formato do padrão laser até à movimentação do mesmo.

Chris Roman, Gabriell Inglis e James Rutter em [19] utilizaram um método de *structured light* para o mapeamento de alta resolução de locais arqueológicos. Para fazer o mapeamento utilizaram o Hercules ROV (Figura 2.5) [4] com um sensor *multibeam*, uma câmara *stereo* e um projetor laser em forma de linha, todos posicionados para baixo. Os autores, optaram por utilizar um laser com uma posição fixa, sendo o varrimento do cenário feito com a deslocação do veículo, que facilitou o processo de comparação de resultados entre o LBSLS e o *multibeam*.

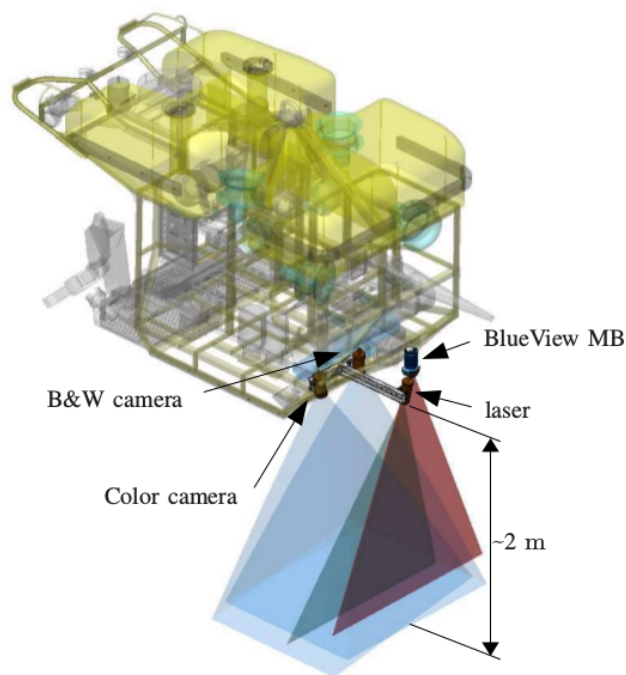


Figura 2.5: Hercules ROV [4].

A calibração de um sistema de luz estruturada tem como objetivo determinar a relação entre o posicionamento da câmara e do projetor laser, dando origem a uma rotação e uma translação entre os referenciais do projetor e do sensor ótico. Além disso, neste caso, existe ainda a calibração do sistema com o referencial do robô, dando origem novamente a uma translação e rotação entre o referencial da câmara e o referencial do veículo.

Muito semelhante ao trabalho anterior, Mario Prats, José Fernández e Pedro J. Sanz desenvolveram um sistema de mapeamento também para um ROV [5]. Porém, a abordagem dos autores é um pouco diferente, mantendo a câmara numa posição fixa, igualmente virada para baixo, sendo que o projetor laser encontra-se localizado sobre um braço robótico. Deste modo, o projetor laser pode ser direcionado através da atuação do braço, permitindo realizar os *scans* de uma determinada área com o veículo parado, ao contrário da abordagem anterior onde era necessário movimentar o veículo para cobrir uma determinada região. Esta abordagem permitiu aos autores realizar *scans* de grande resolução de objetos arqueológicos depositados no fundo do mar (Figura 2.6).

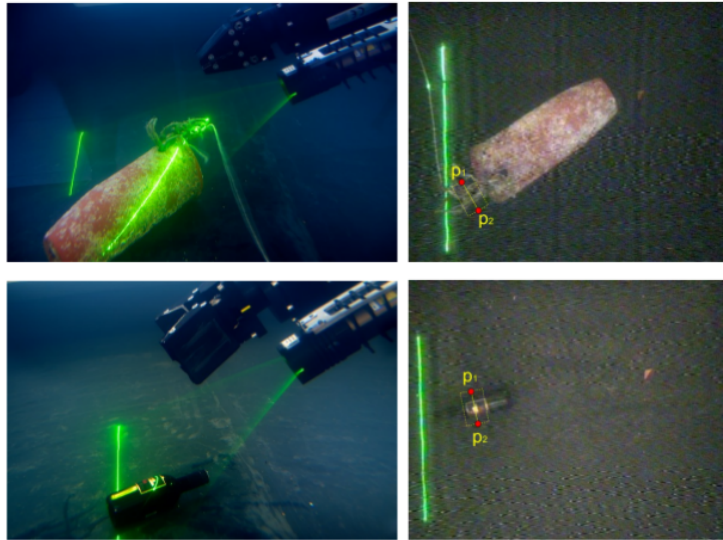


Figura 2.6: Braço robotico com projetor laser [5].

Embora os dois estudos anteriormente referidos, utilizarem métodos semelhantes, a diferença principal assenta sobre a calibração do sistema. No primeiro, o projetor laser apenas terá um único modelo, enquanto que no segundo para modelizar o plano do laser foi necessário também modelizar o braço robotico, para determinar a posição e orientação do projetor. Em ambos, os trabalhos o sensor ótico foi calibrado separadamente do laser, e posteriormente realizada a calibração do sistema (câmara e laser).

Fazendo novamente referência ao estudo de Miguel Campos e Gabriel Codina [6], os autores desenvolveram um sistema de reconstrução 3D para ambientes subaquáticos utilizando apenas uma imagem. Com este objetivo utilizaram um laser e um sensor ótico, como anteriormente, além disso utilizaram ainda um *Diffraction Optical Element* (DOE) à saída do feixe de luz, que permitira difratar o *beam* em 25 linhas verticais, como se pode observar na Figura 2.7. A utilização deste DOE, permitiu assim obter informação tridimensional com apenas uma imagem, contudo neste método existe novamente problemática da interpretação e decodificação da linha de laser, como em alguns métodos apresentados anteriormente. Os autores apresentam ainda um estudo desenvolvido para a escolha do comprimento de onda da fonte luminosa, analisando a absorção e dispersão da luz, para justificar a escolha da cor verde para o feixe laser.

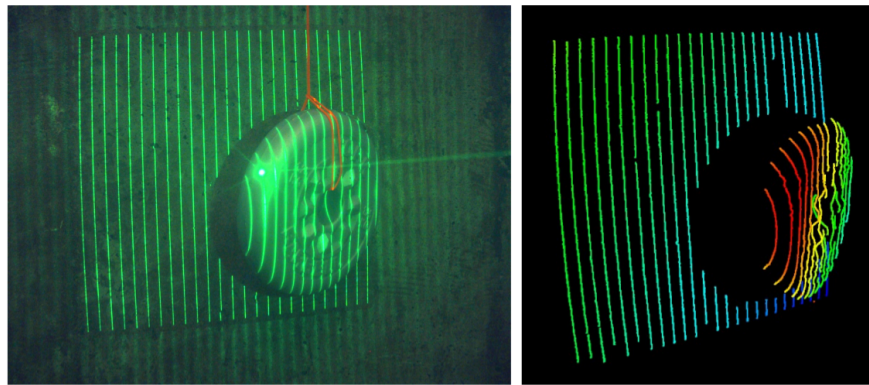


Figura 2.7: Padrão laser com 25 linhas, e reconstrução tridimensional [6].

Karl Moore em [7], utilizando uma câmara e um projetor laser acoplados num veículo subaquático, desenvolveram um sistema de luz estruturada para reconstrução tridimensional. Como anteriormente, a linha do projetor laser é segmentada na imagem e posteriormente realizada triangulação para a obtenção da profundidade dos objetos. Na Figura 2.9 são apresentados alguns resultados obtidos por este sistema.

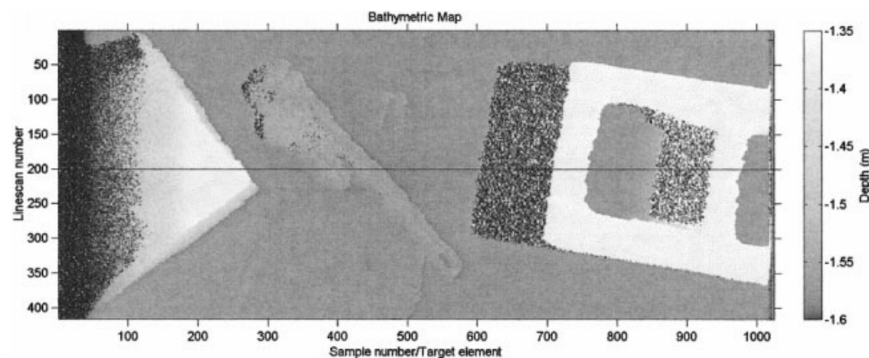


Figura 2.8: Resultados da reconstrução tridimensional [7].

Albert Palomer [20], no Centro de Robótica da Universidade de Girona, desenvolveu um sistema de luz estruturada com laser rotativo, para ser utilizado em conjunto com manipuladores. Para este sistema foram utilizados uma câmara e um projetor laser na forma de linha, contudo para movimentar a linha no meio foi utilizado um espelho sobre um galvanometro, permitindo assim mapeamentos de alta resolução. Embora apresentem bons resultados, os autores não fazem referencia ao método de calibração utilizado.

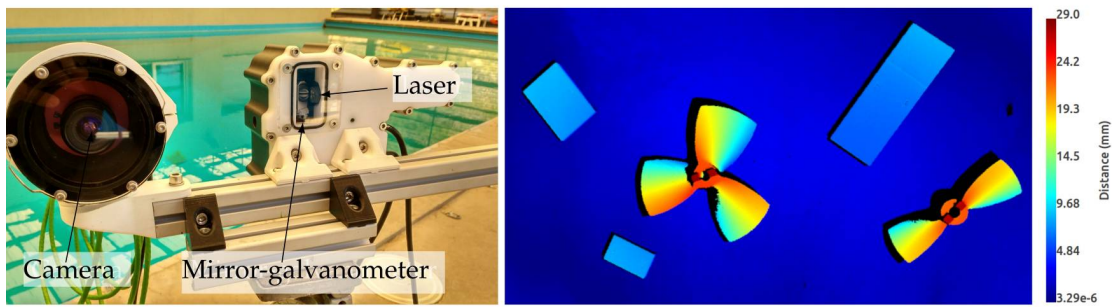


Figura 2.9: Resultados da reconstrução tridimensional [7].

Nos trabalhos apresentados, a calibração da câmara é feita sempre em primeiro lugar, e posteriormente a calibração do sistema. Assim é relevante apresentar alguns métodos utilizados para realizar a calibração do sensor ótico.

2.2.2 Calibração do sensor ótico

Em qualquer sistema de visão computacional é necessário efetuar a estimação das características físicas da câmara, existindo assim várias metodologias, desenvolvidas nas últimas décadas.

Em 1996 Tsai [21], desenvolveu um método para calibração de câmaras, assumindo que alguns dos parâmetros da câmara são fornecidos pelo fabricante, para reduzir o número de parâmetros estimados pelo algoritmo. Este utiliza n pontos de controlo na imagem, sendo no mínimo necessários 8, e resolve a problemática da calibração utilizando um conjunto de n equações lineares baseadas no alinhamento radial dos pontos em imagens consecutivas. Um segundo modelo de distorção radial é usado, não sendo considerado erros no alinhamento físico da lente com o sensor, neste modelo.

O método de calibração de Zhang [8], requer um padrão de xadrez planar, Figura 2.10, para ser colocado em diferentes orientações, no mínimo de duas, em frente ao sensor ótico. O algoritmo desenvolvido usa um método para identificar todos os cantos do padrão de xadrez e assim estimar um modelo de transformação entre os pontos das diferentes imagens.



Figura 2.10: Padrão utilizado na calibração pelo método de Zhang [8].

Para além dos métodos anteriormente referidos, existem muitos outros, contudo atualmente para a calibração do sensor ótico já existem diversas aplicações com resultados bastante positivos, onde estas utilizam na sua maioria o método de Zang.

2.2.3 Calibração do Sistema

Como foi apresentado anteriormente já existem alguns trabalhos realizados com sistemas de luz estruturada em ambientes subaquáticos. No entanto, na sua maioria, os autores apenas descrevem sucintamente os métodos aplicados nos processos de calibração do sistema, sendo muito reduzido o número de trabalhos onde o foco reside na calibração do sistema. Abaixo são apresentados alguns trabalhos cujo objetivo passou por desenvolver um método de calibração para LBSLS.

No LSA foi desenvolvido um sistema de visão subaquática utilizando *structured light* [9] [22] [23]. Flavio Lopes, o autor da dissertação, utilizou uma câmara e um laser, com uma *baseline* (distância entre a câmara e o projetor) definida. A dissertação focou-se principalmente em ultrapassar as dificuldade de calibração e, para tal, foram efetuadas duas calibrações. A primeira, com objetivo de calibrar a câmara e, a segunda para obter a relação espacial entre os componentes do sistema. Assim, para calibrar a câmara e calcular os parâmetros intrínsecos, foi utilizada uma *toolbox* em *MatLab* e um conjunto de imagens, capturadas pela câmara, de um padrão de xadrez em diversas posições. Para calibrar o sistema, foi necessário capturar algumas imagens do laser a incidir no mesmo padrão, de forma a selecionar determinados pontos de controlo e assim estimar a equação do plano do laser.

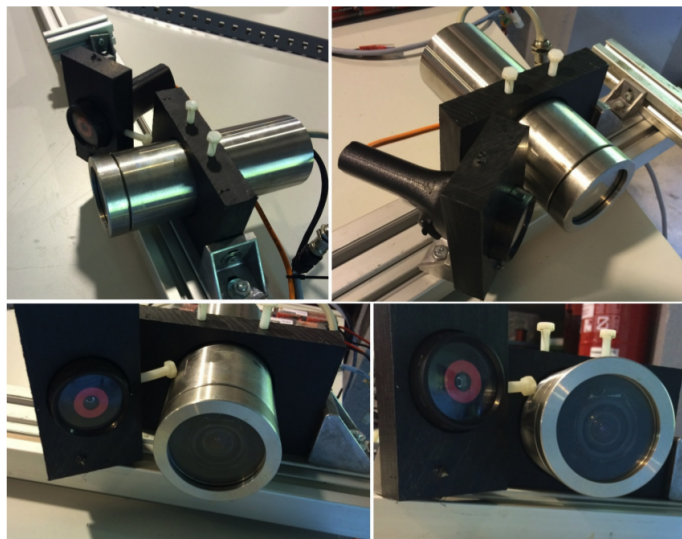


Figura 2.11: Sistema LBSLS desenvolvido no LSA [9].

Shun Wan em 2013, desenvolveu um método para calibração de um sistema de luz estruturada com um laser rotativo [10], onde a técnica utilizada pelos autores tem como objetivo estimar a equação do eixo de rotação do projetor. À semelhança dos projetos apresentados anteriormente, foi utilizado uma câmara e um projetor laser com um padrão de linha, contudo nesta implementação o projetor é suportado por um servomotor que faz girar o mesmo. Durante a implementação, os autores tomaram a iniciativa de estimar várias equações do plano do laser em diferentes posições, obtendo assim diferentes planos do laser no referencial da câmara (Figura 2.12). Após se obter 3 ou mais planos do laser é então possível calcular a interseção entre eles, a qual representará o eixo de rotação.

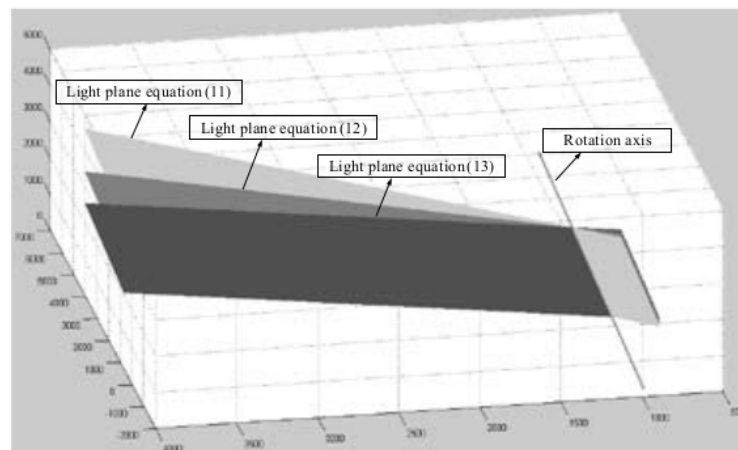


Figura 2.12: Eixo de rotação do servomotor [10].

Nos últimos dois métodos de calibração apresentados, embora os sistemas sejam diferentes pelo modelo do projetor laser, o método de estimação do plano do projetor, é semelhante. Para a estimação do plano do laser os autores utilizam um padrão de xadrez onde projetaram a linha de laser (Figura 2.13). Posteriormente, com a captura de imagens e a aplicação de métodos de segmentação, são capazes de projetar a linha do laser no referencial da câmara. Contudo, uma imagem não é suficiente para determinar a equação do plano, sendo no mínimo necessário duas imagens do laser sobre o alvo, mencionando ainda, o último, que para melhorar os resultados obtidos foram utilizadas mais de 10 imagens.

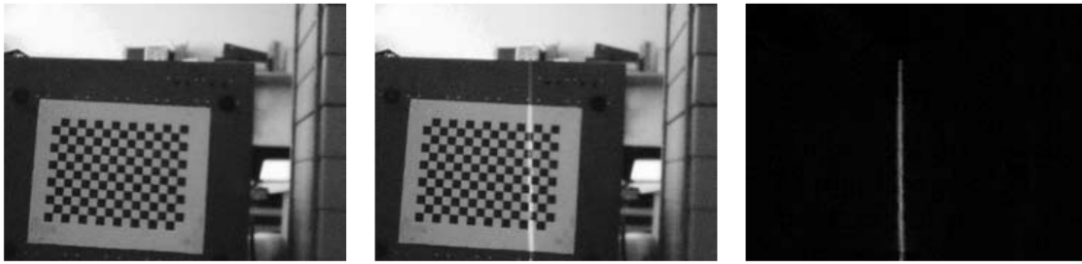


Figura 2.13: Processo de segmentação da linha do laser [10].

Alan Ivor [11], utilizou uma técnica muito perspicaz para combater as dificuldades dos autores anteriores, onde estes necessitam de várias imagens do projetor para poder estimar os modelos dos seus sistemas. Assim Alan Ivor utilizou um cubo, onde o padrão se encontra desenhado em cada uma das faces do cubo, como se pode observar na Figura 2.14. Colocando o cubo apoiado num vértice, e garantindo que o sensor ótico observa o projetor a incidir em duas faces, conseguiu modelizar o sistema apenas com uma imagem, minimizando assim o erro de segmentação em múltiplas imagens e tornado o método mais eficiente.

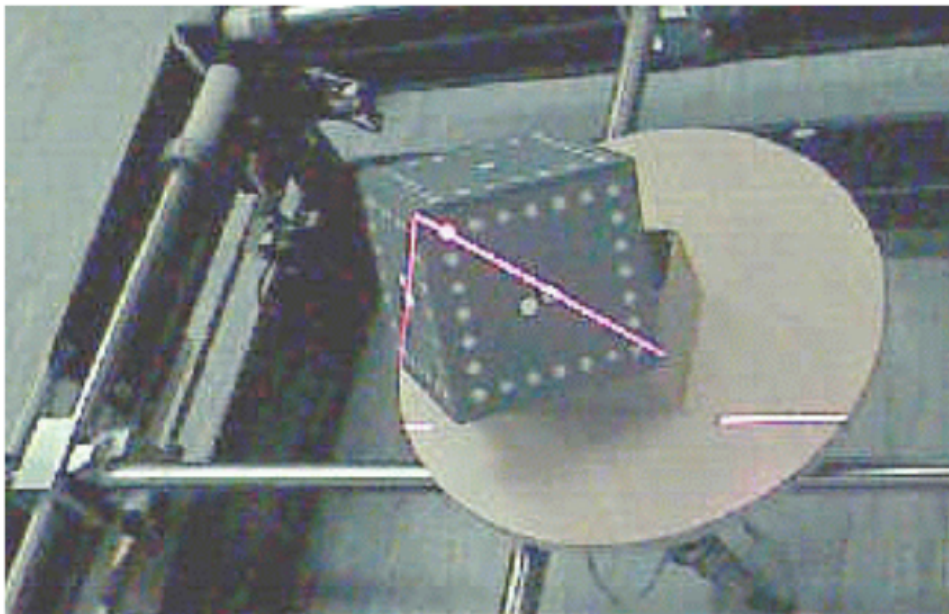


Figura 2.14: Cubo utilizado para a calibração do sistema [11].

2.3 Resumo do Capítulo

Com o desenvolvimento deste capítulo foi possível compreender as problemáticas adjacentes ao desenvolvimento de um sistema de luz estruturada para ambientes subaquáticos. Além disso e após um estudo sobre calibração do mesmo, destacaram-se as técnicas mais comuns entre eles e as dificuldades destes processos.

Foi também possível compreender os fatores que influenciam diretamente a complexidade e flexibilidade do sistema, das quais destaco:

- Posicionamento dos componentes: Em alguns sistemas apresentados a câmara e o projetor laser não estavam acopladas na mesma estrutura, fazendo com que a calibração tivesse de ser realizada no veículo. Este fator é determinante para a calibração, sendo os métodos de calibração apresentados complexos e com necessidade de condições específicas.
- Projetor laser: O projetor laser é sem dúvida uma escolha importante, sendo o formato de linha o mais comum. Contudo, a opção de múltiplas linhas, quer de laser estático como laser móvel, é uma escolha que influenciará diretamente o custo computacional e a rapidez com que é realizado um *scan*, mencionado pelos autores.

Deste modo, para o desenvolvimento do sistema, a câmara e o projetor deverão estar numa estrutura independentemente de qual seja a sua utilização. Para além disso a opção mais comum, é a utilização de um projetor fixo, que torna o sistema um pouco limitado, necessitando assim de uma ação externa para realizar os *scans*. Por outro lado, a utilização de múltiplas linhas levanta a problemática da descodificação das mesmas, aumentando o custo computacional. Por isso mesmo, a utilização de um laser rotativo será uma opção para o desenvolvimento do sensor. Para a calibração do sistema, o método a desenvolver deverá estimar o modelo dinâmico do projetor, utilizando padrões tridimensionais para reduzir o número de imagens necessárias.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

Após a apresentação e análise dos trabalhos desenvolvidos no âmbito desta dissertação, neste capítulo são agora apresentados todos os conceitos relevantes para a compreensão e análise da mesma.

3.1 Visão subaquática

No meio subaquático, tudo é menos visível devido à falta de luz e à rápida atenuação da mesma ao percorrer a água, quer seja do tipo natural ou artificial. Além disso, as imagens obtidas em ambientes subaquáticos tendem normalmente a ser túrbidas e com pouco contraste, devido à dispersão da luz neste meio e às partículas em suspensão [24].



Figura 3.1: Correção da cor em imagens capturadas *underwater*.

Quando se pretende projetar um sistema de luz estruturada, para ambientes subaquáticos, utilizando um projetor laser, é importante conhecer os efeitos que a água e a sua absorção da luz têm sobre a cor [25] [26] [27]. Tendo em conta este fator, já foram realizados diversos trabalhos e é de facto evidente que absorção da luz não acontece de igual modo para todos os comprimentos de onda da luz, como podemos observar na Figura 3.1. Contudo é importante perceber atenuação da luz para todos diferentes comprimentos de onda.

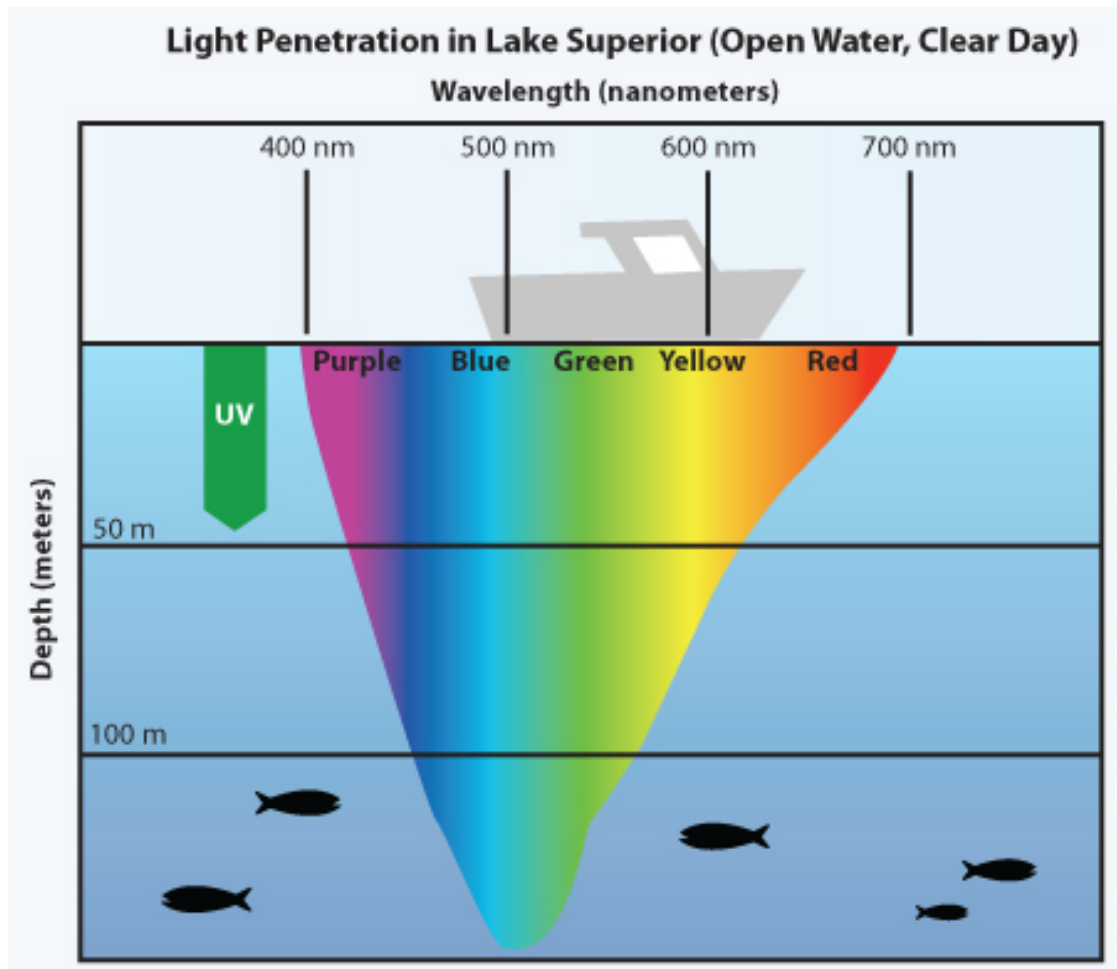


Figura 3.2: Ilustração da absorção da luz no meio subaquático [12].

Na ilustração 3.2, apresentada num estudo desenvolvido pela Universidade de Minnesota [12], é possível observar a que profundidade cada comprimento de onda da luz é totalmente absorvido, sendo as cores menos absorvidas pela água são o azul e o verde.

3.1.1 Refração da Luz

Outro dos fenómenos importantes quando falamos de visão subaquática ou de aquisição de imagem debaixo de água, é a refração da luz. Este consiste na mudança de direção de um feixe de luz, ao atravessar dois meios com densidades diferentes. Na Figura 3.3 é possível observar a ilusão ótica, quando colocadas duas palhinhas num copo com água.



Figura 3.3: Ilusão ótica criada pela refração da luz.

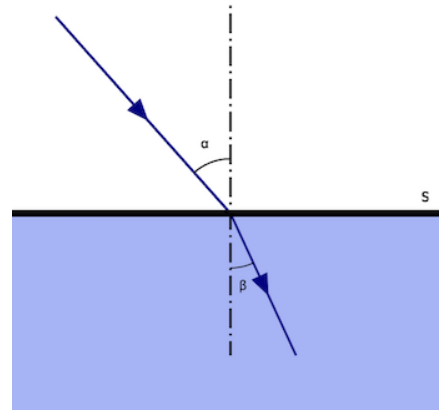


Figura 3.4: Feixe de luz em meios diferentes.

A lei de Snell-Descartes que representa a refração da luz entre meios é dada pela equação 3.1 e ilustrada na Figura 3.4, onde α e β representam os ângulos de incidência e refração, respetivamente, e n_1 e n_2 representam os índices de refração do meio.

$$n_1 \times \sin \alpha = n_2 \times \sin \beta \quad (3.1)$$

3.1.2 Câmaras

Atualmente, quando falamos em Visão Computacional é comum pensarmos em câmaras, embora existam diversos tipos de sensores óticos e até diversos tipos de câmaras. Isto deve-se ao facto de associarmos a palavra computacional ao mundo digital ou de computadores, e associarmos a visão a imagens ou fotografias. Contudo não estamos de todo errados, sendo o processamento de imagem uma área de grande foco, devido á quantidade de informação que é possível extrair de uma só imagem capturada pela câmara.

De um modo simplificado, uma câmara pode ser dividida em três componentes principais, e cada um com funções diferentes, sendo eles: o sensor ótico, a lente e o obturador ou *shutter*. A lente é responsável por fazer convergir os feixes de luz de modo a que

estes incidam sobre o sensor ótico (semicondutor), sendo que este tem como objetivo converter a intensidade dos feixes de luz recebidos em pulsos elétricos. Por último, o *shutter* que existe entre os dois tem a função de regular a quantidade de luz que chegara ao semicondutor. Na Figura 3.5, é possível observar como os diferentes componentes interagem entre si.

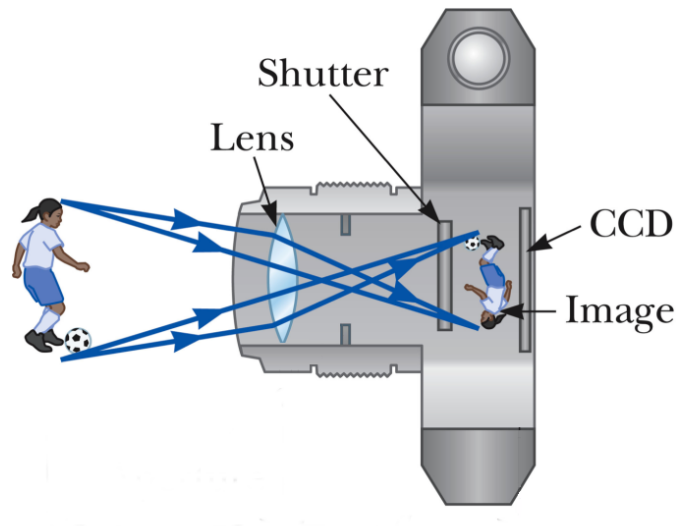


Figura 3.5: Diagrama dos componentes de uma câmara.

Modelo Pinhole

As imagens digitais, capturadas por estes sensor, são normalmente representadas em matrizes, sendo cada posição da matriz denominado de *pixel*. Estes sensores permitem a aquisição em inúmeros formatos para a organização do pixel, sendo os mais comuns, o monocromático, onde a matriz contém apenas um nível de intensidade por pixel, resultando normalmente em imagens na escala de cinzas, RGB, onde cada conjunto de coordenadas da imagem contém informação relativa á cor vermelha , verde e azul (Figura 3.6), e talvez a mais utilizada o formato *Bayer*, semelhante á monocromática cada pixel contém apenas um valor de intensidade, contudo estes seguem um padrão (padrão de Bayer), como é possível observar na Figura 3.7, que permitirá posteriormente obter a cor corrigida de cada *pixel*.

		165	187	209	58	7
	14	125	233	201	98	159
253	144	120	251	41	147	204
67	100	32	241	23	165	30
209	118	124	27	59	201	79
210	236	105	169	19	218	156
35	178	199	197	4	14	218
115	104	34	111	19	196	
32	69	231	203	74		

Figura 3.6: Exemplo da matriz de uma imagem com 3 dimensões, em formato RGB.

G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G

Figura 3.7: Exemplo de um padrão Bayer com as intensidades de verde, vermelho e azul (G,R e B).

Com o objetivo de mapear os pontos no mundo no plano da imagem, tipicamente é utilizado o modelo *pinhole*. Esta modelização do sensor, representa a relação entre um ponto no referencial do mundo, com três dimensões, e a sua projeção no plano da imagem. O modelo *pinhole*, apresentado nas Figuras 3.8 e 3.9, segue o conceito mais simples de uma câmara, onde a mesma tem o formato de uma caixa, e a luz refletida por um objeto entra por uma abertura muito pequena na parte da frente, formando uma imagem na parte traseira da caixa [13]. Deste modo, é possível assumir que um pixel na imagem, com coordenadas u e v , terá apenas uma representação no mundo, com coordenadas X, Y e Z .

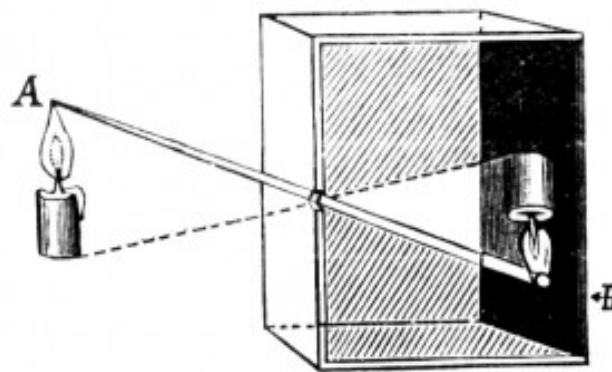


Figura 3.8: Ilustração do modelo *pinhole* [13].

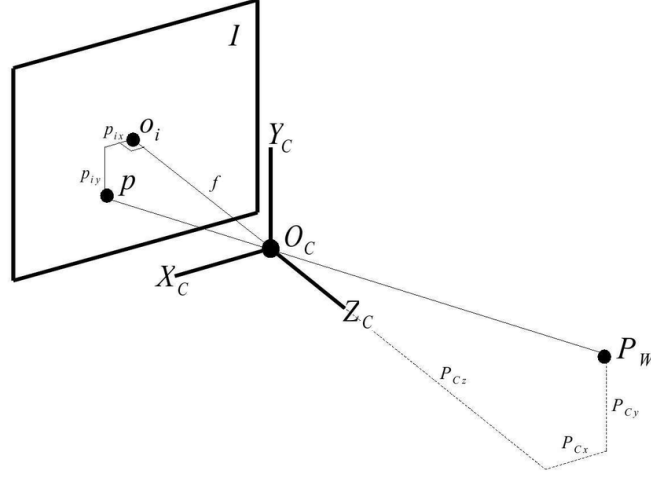


Figura 3.9: Sistemas de coordenadas do modelo *pinhole*.

Para a compreensão matemática do modelo, segundo a Figura 3.9, consideramos o referencial da câmara (X_C, Y_C, Z_C) com centro em O_C , e f a distância focal, que representa a distância entre O_C e O_I , o centro do plano da imagem, definido por I . Assim, utilizando o método da semelhança de triângulos, é possível definir as equações 3.2 e 3.3, considerando o ponto P_w com coordenadas (P_{Cx}, P_{Cy}, P_{Cz}) , e a sua projeção no plano da imagem com (p_{ix}, p_{iy}) .

$$-p_{iy} = f \times \frac{P_{Cy}}{P_{Cz}} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \end{bmatrix} = \frac{f}{P_{Cz}} \begin{bmatrix} P_{Cx} \\ P_{Cy} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Lente, Distorção e *Field of view*

O modelo *pinhole* representa as equações matemáticas para uma imagem perfeita. Contudo, existem outras condicionantes que não são tidas em conta por este modelo, como a compressão da imagem, que afeta normalmente a sua qualidade, a distorção da lente, a nitidez dos objetos imposta pela distância focal, entre outras. Embora já existam métodos para remover estas componentes da imagem, e assim melhorar a sua qualidade, é importante referir que numa imagem existem dois tipos de distorção, a distorção radial e tangencial [28]. Distorção tangencial representa o erro no alinhamento físico, em orientação e posição, entre o centro do semicondutor e o centro da lente. A distorção radial consiste na deformação de um objeto no plano da imagem, devido às características

físicas da lente, e propaga-se do centro da imagem para as extremidades. Na Figura 3.10 são apresentados dois exemplos de distorção radial [29].

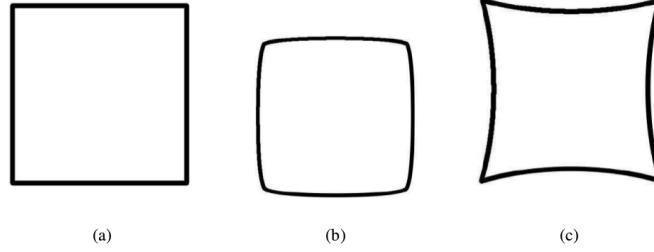


Figura 3.10: Em (a) imagem sem distorção, (b) *barrel distortion*, (c) *pincushion distortion*

Com o uso de modelos de estimação é possível obter um conjunto de coeficientes, os quais chamamos de coeficientes de distorção, que permitem corrigir a imagem segundo as equações 3.5 e 3.6 para a distorção radial, e 3.7 e 3.8 para a distorção tangencial. Estes parâmetros são tipicamente representados por $\mathbf{k}$ (equação 3.4), onde os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 são referentes à distorção radial e os restantes, k_4 e k_5 , à distorção tangencial.

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & k_4 & k_5 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$x_{radial} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (3.5)$$

$$y_{radial} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (3.6)$$

$$x_{tangencial} = x + (2k_4 y + k_5(r^2 + 2x)) \quad (3.7)$$

$$y_{tangencial} = y + (k_4(r^2 + 2y) + 2k_5 x) \quad (3.8)$$

Campo de visão ou *Field of View* (FoV), é a área que uma determinada câmara consegue abranger, como se apresenta na Figura 3.11, sendo que esta característica está diretamente relacionada com a lente escolhida para o sensor ótico. Tipicamente, lentes com maior amplitude tendem a ter uma maior distorção radial, como se pode ver na Figura 3.12, e são chamadas de lentes *fish-eye*.

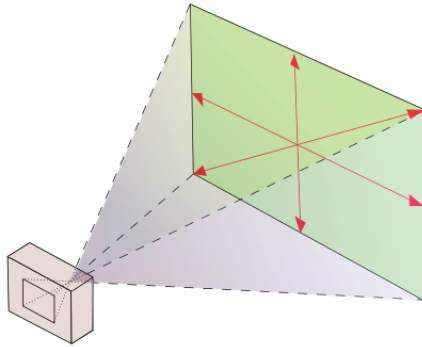


Figura 3.11: Ilustração representativa do campo de visão.

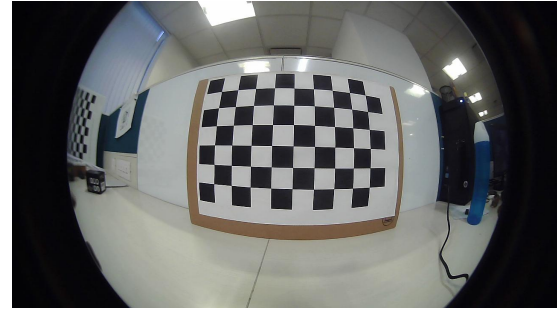


Figura 3.12: Imagem de um padrão de xadrez, com lente *fish-eye*.

Na aquisição de imagens em ambientes subaquáticos, estes sensores são normalmente colocados em compartimentos secos, pois não são resistentes aos líquidos. Deste modo, os feixes de luz, na sua maioria, atravessam três meios diferentes (água, vidro e ar), criando efeitos de refração, como foi referido em 3.1.1. Assim, o somatório destes efeitos de refração, tende a fazer com que o FoV do sensor diminua, como apresenta o esquema da Figura 3.13. Além disso, outros parâmetros como a distância focal são igualmente afetados.

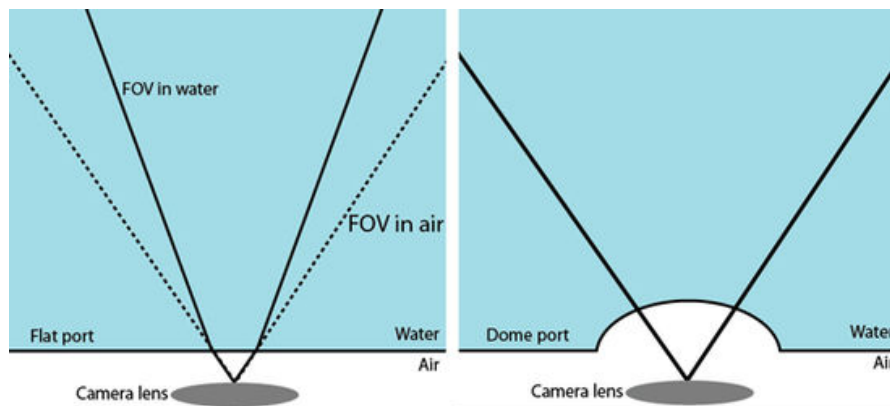


Figura 3.13: FoV e Refração da luz entre o ar e água.

Para combater estes efeitos, os sistemas de aquisição *underwater*, tendem a utilizar um vidro em forma de cúpula (*dome*), que fará com que os feixes de luz tenha um ângulo de incidência próximo de 90° diminuindo os efeitos de refração, Figura 3.13.

3.1.3 Parâmetros intrínsecos

Com a apresentação do sensor e do seu funcionamento, bem como o modelo matemático que o descreve, somos agora capazes de definir os parâmetros intrínsecos. Os parâmetros intrínsecos de uma câmara são normalmente representados por A (equação 3.9), onde as componentes f representam a distância focal em x e y , e as componentes c_x e c_y as coordenadas do centro ótico.

$$A = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Nesse sentido, é possível compreender que a matriz de parâmetros intrínsecos de uma câmara, representa as características físicas do sensor ótico, que permitem relacionar um ponto no referencial da câmara, com a sua projeção no plano da imagem, como foi referido anteriormente.

3.1.4 Parâmetros Extrínsecos

Após compreender os parâmetros matemáticos que representam uma câmara, segundo o modelo *pinhole*, são agora apresentados um conjunto de parâmetros (extrínsecos), cujo objetivo reside em relacionar a posição do sensor com o referencial do mundo. Os parâmetros extrínsecos entre dois referenciais podem ser divididos em duas componentes, uma componente de rotação e outra de translação.

Rotação e Translação

A rotação e a translação entre os dois referenciais, como se pode observar na Figura 3.14, pode ser representada por R e t respetivamente. Sendo a translação representada pelo vetor t , equação 3.10, referente à translação da origem do referencial do mundo para o referencial da câmara.

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A rotação é tipicamente definida por uma matriz, sendo o seu cálculo definido pela equação 3.11, onde ϕ , θ e ψ representam os três ângulos de Euler *Roll*, *Pitch* e *Yaw*.

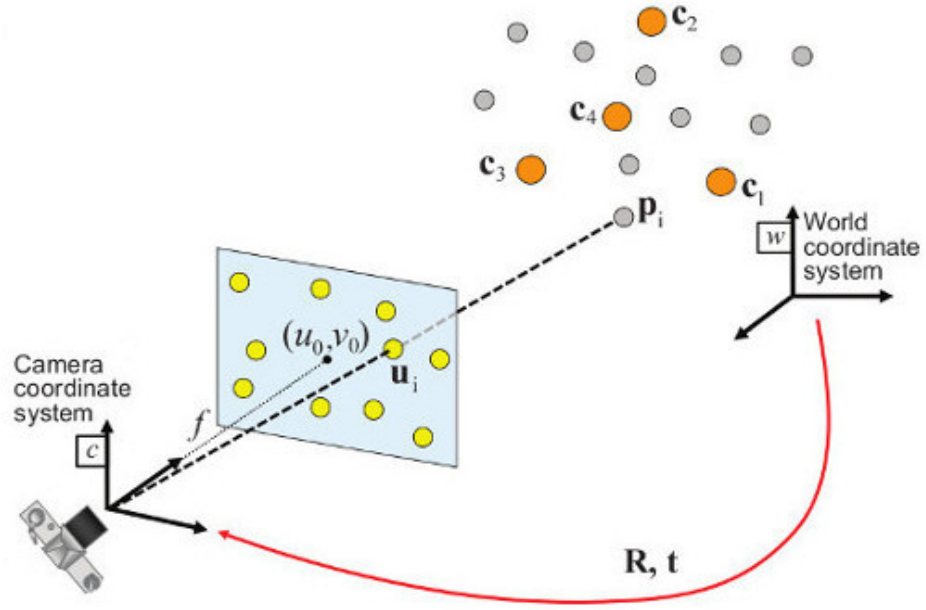


Figura 3.14: Representação da rotação e translação entre referenciais.

$$R_{zyx} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \phi \sin \theta - \cos \theta \sin \psi & \sin \psi \sin \phi \sin \theta + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \theta & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.2 Métodos Matemáticos

Neste capítulo, foram apresentados os conceitos matemáticos relativos ao sensor ótico e, à aquisição de imagens num ambiente subaquático. Deste modo nesta secção são agora apresentados alguns métodos matemático que foram utilizados no desenvolvimento da dissertação, sendo então relevante a exposição dos mesmos.

3.2.1 Homografia

O método de homografia consiste na transformação linear entre um conjunto de pontos pertencentes a um plano, permitindo assim estabelecer a correspondência entre um plano no mundo com a sua projecção no plano da imagem [30]. Esta transformação é normalmente representada por uma matriz H , à qual pertencem duas componentes, parâmetros intrínsecos do sensor ótico e a componente de transformação física (parâmetros extrínsecos).

Em coordenada homogéneas, e considerando $\mathbf{P}$ um ponto no referencial do mundo, e $\mathbf{p}$ a sua projecção no plano da imagem, a relação entre os dois pode ser obtida por:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}' \quad (3.12)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}' \quad (3.13)$$

$$\mathbf{p} = s \times H \times \mathbf{P} \quad (3.14)$$

Onde s representa um fator de escala e H a matriz de homografia que pode ser obtida por:

$$H = A \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

sendo que, R e $\mathbf{t}$ representam a rotação e translação entre um plano no referencial do mundo e no plano da imagem, como foi mencionado na secção anterior.

3.2.2 Filtro Gaussiano

Tipicamente, no processamento de imagem, é realizado um tratamento da mesma antes de se iniciar qualquer tipo de segmentação ou detecção. Um dos métodos utilizados para o tratamento da imagem, no âmbito da segmentação da linha gerada por um projetor laser, é o filtro gaussiano.

A utilização deste filtro consiste em realizar a convolução entre a imagem e pela matriz de convolução (*kernel*) [31]. Para tal, é necessário percorrer toda a imagem com a matriz de convolução, como se apresenta na Figura 3.15. Na equação 3.16 considera-se K e k a matriz de convulsão e o número linhas da mesma, respetivamente, I a imagem original e O como a imagem resultante. Por fim, x e y as coordenadas na imagem, e l e c as coordenadas na matriz de convolução.

$$O(x, y) = \sum_{l=1}^k \sum_{c=1}^k I(x - \frac{k}{2} + l, y - \frac{k}{2} + c) K(l, c) = 1 \quad (3.16)$$

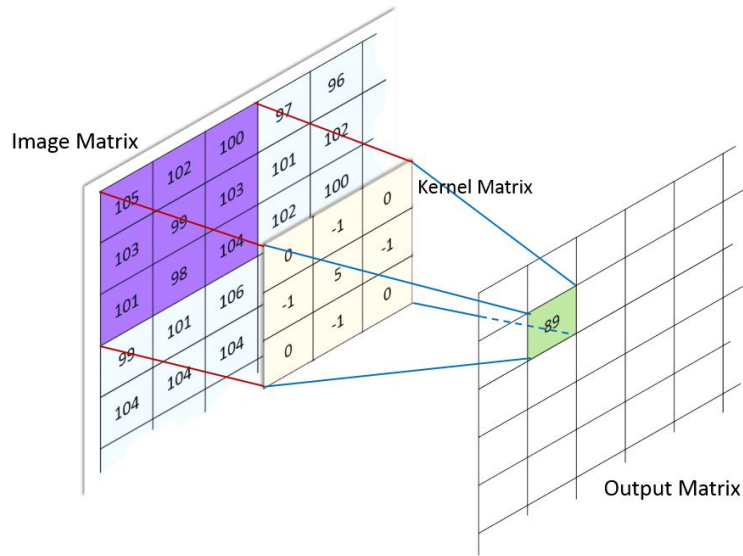


Figura 3.15: Ilustração da aplicação de um *kernel*.

A aplicação de um *kernel* gaussiano dá origem a uma imagem desfocada (*blur*), não sendo ideal para todos os métodos de segmentação. Para além disso, este método exige algum poder computacional, sendo que este está diretamente relacionado com as dimensões da matriz de convolução.

3.2.3 Centro de Massa

Fisher e Naidu, em [14] e [32], realizaram uma comparação dos métodos mais utilizados para segmentação, ao nível do sub-pixel, sendo o cálculo do centro de massa um dos métodos apresentados. No processamento de imagem este método é utilizado nas componentes de segmentação, permitindo uma reavaliação dos pixels segmentados e introduzindo a influência dos pixels vizinhos (Figura 3.16).

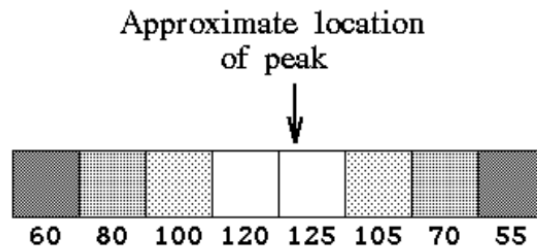


Figura 3.16: Ilustração da utilização do método [14].

A equação que descreve este método está presente em 3.17, onde $\hat{X}$ representa x estimado, e a, b e c as intensidades dos pixels em $x - 1$, x e $x + 1$, respetivamente.

$$\hat{X} = \frac{a(x - 1) + bx + c(x + 1)}{a + b + c} \quad (3.17)$$

3.3 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados todos os conceitos de maior relevância para a compreensão da dissertação, tais como: a aquisição de imagem em ambientes subaquáticos, refração da luz, conceitos sobre imagem computacional (*field of view*, parâmetros intrínsecos e extrínsecos, distorção da imagem, modelo *pinhole*), e por fim os alguns dos métodos matemáticos utilizados no desenvolvimento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 4

Arquitetura do Sistema

Nos capítulos anteriores foram caracterizados os vários tipos de *laser scanners* para ambientes secos ou subaquáticos, bem como a problemática relativa à calibração de um sistema de luz estruturada. Nas secções que se seguem serão apresentadas as arquiteturas de hardware e software do sistema a desenvolver, que permitirá validar os método de calibração e de reconstrução tridimensional.

4.1 Arquitetura de *Hardware*

No seguimento dos objetivos propostos, definiu-se a seguinte arquitetura de alto nível do sistema, a qual será dividida em dois subsistemas, nomeadamente de Visão e de Luz.

- O Sistema de Visão será responsável pela aquisição, processamento e transmissão de dados, bem como a comunicação e controlo do sistema de Luz.
- O Sistema de Luz será responsável por comutar os emissores de luz segundo as instruções do sistema de Visão. Este é também responsável pelo controlo da movimentação dos emissores laser, e pela leitura precisa da sua posição.

A Figura 4.1 apresenta uma pequena ilustração da interação entre os dois módulos do sistema. Nas secções abaixo serão apresentadas as suas arquiteturas internas e realizada a descrição do seu funcionamento.

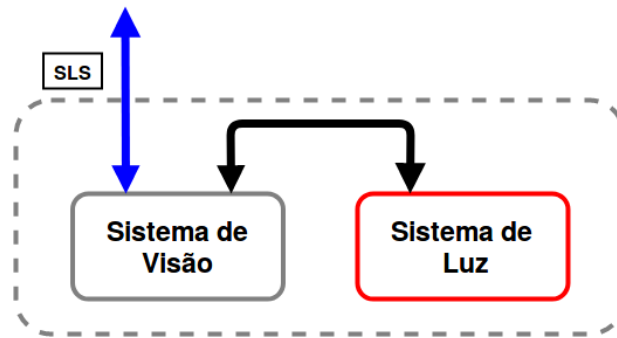


Figura 4.1: Esquema ilustrativo da arquitetura do Sistema.

4.1.1 Sistema de Visão

A arquitetura funcional do sistema de Visão está representada na Figura 4.2. Este é composto por uma unidade de processamento que será responsável por receber e processar as imagens vindas da câmara, utilizando o protocolo de comunicação *Gigabit Ethernet*. Além disso, existirá uma comunicação série segundo o protocolo RS 485, entre a unidade de processamento e o sistema embestado que se encontra no sistema de Luz. Esta comunicação terá como objetivo configurar o funcionamento da unidade de luz, e também o envio e recepção de tramas de dados com informação relevante para os dois sistemas.

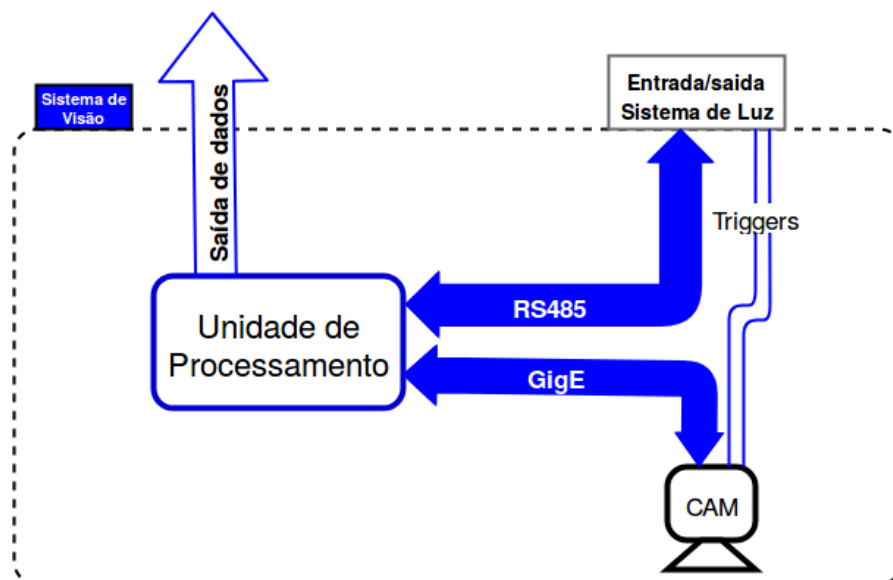


Figura 4.2: Esquema da arquitetura do sistema de visão.

Na Figura 4.2 são ainda ilustradas 2 linhas de *trigger*, as quais provêm do sistema de Luz e atuam diretamente na câmara. Um dos sinais será responsável por indicar à câmara o início da aquisição de cada *frame* bem como o tempo de exposição, por outro lado o segundo *trigger* tem como objetivo alterar o modo de funcionamento da câmara, onde os possíveis modos, já terem sido configurados pela unidade de processamento.

Por fim, a saída de dados, que utilizará um protocolo de comunicação *Ethernet*, sendo os dados a enviar imagens e pontos tridimensionais.

4.1.2 Sistema de Luz

O Sistema de Luz consiste num módulo em desenvolvimento no laboratório, e sendo o foco da dissertação o método de calibração e processamento de imagens para obtenção de informação tridimensional, não é de todo relevante descrever extensivamente este sistema. Desta forma, relativamente a este sistema, é importante reter o seguinte:

- O sistema contém 2 ou mais tipos de emissores de luz, em que um deles é sempre um emissor laser em linha;
- O projetor laser roda sobre um eixo, e a sua posição absoluta é sempre conhecida através da leitura do encoder, possibilitando assim realizar o varrimento;
- Este sistema é responsável por gerar os *triggers* dos emissores de luz, e/ou *triggers* externos segundo sequências de 1 segundo programáveis;
- Existe uma comunicação RS485 para o exterior, para receção e envio de dados, entre eles configurações de funcionamento, comandos de controlo, informação relativa ao posicionamento do emissor laser, entre outros.

Na Figura 4.3 são apresentados dois sistema de luz desenvolvidos no LSA, um totalmente montado e um parcialmente. Do lado direito, o sistema completo, é possível observar os emissores luz (leds e o projetor laser), bem como o conector para a entrada e saída de dados. No outro sistema, é possível observar todos os restantes componentes, as *boards* de controlo, o servomotor responsável por movimentar o projetor laser e por cima deste um encoder de alta resolução. Para além destes componentes, existem duas tampas em alumínio e um vidro cilíndrico para se poder fechar o sistemas e, assim, permitir o funcionamento dentro de água.



Figura 4.3: Dois sistema de Luz, aberto e fechado.

Na Figura 4.4 é apresentada uma ilustração da arquitetura de hardware deste sistema, para compreender como estes componentes estão ligados entre si.

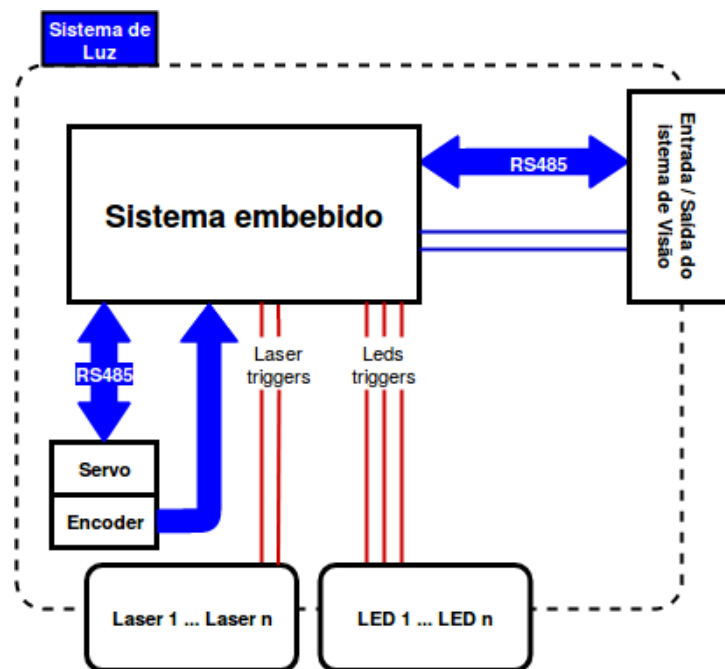


Figura 4.4: Esquema da arquitetura do sistema de luz.

Após apresentação das duas arquiteturas de hardware, é então possível descrever a interação entre os dois sistemas, para clarificar a ideia do leitor. O sistema de luz receberá uma sequência de funcionamento de um segundo (Figura 4.5), que será repetida pelo mesmo até uma ordem de paragem. Esta sequência indica ao mesmo quando realizar a rotação do servomotor, a leitura do encoder e os *triggers* dos emissores de luz (laser e LEDs) e da câmara.

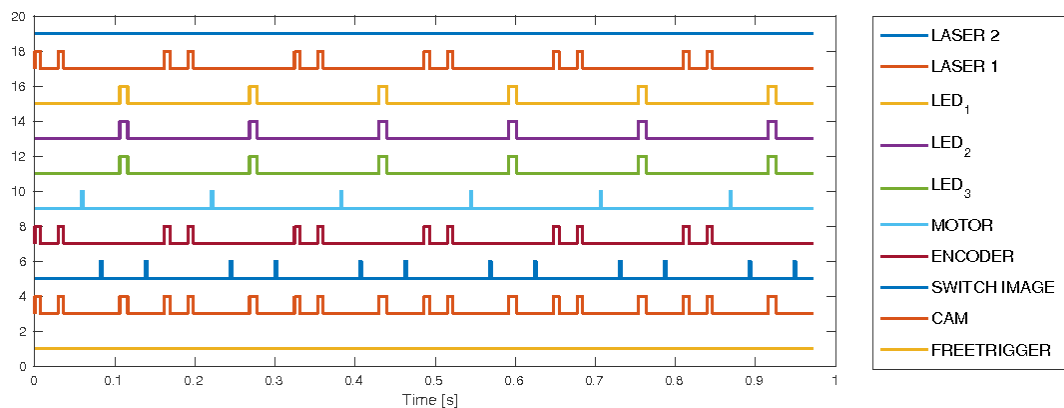


Figura 4.5: Sequência exemplo para o sistema de luz.

Para que o sistema funcione corretamente, os *triggers* dos emissores de luz não poderão atuar em simultâneo e, por outro lado, serem coincidentes com o *trigger* da câmara. Isto irá permitir que a câmara, isto irá permitir que a câmara capture dois tipos de imagem, uma imagem com laser e outra com luz emitida pelos leds. No exemplo apresentado na Figura 4.5, podemos verificar que num segundo existem 12 imagens de laser e 6 imagens de led, num total de 18 imagens por segundo (18 FPS), contudo estas sequências são configuráveis permitindo controlar o número de *frames* por segundo, o tempo de exposição de cada *frame*, o número de imagens de cada modo, entre outros parâmetros.

Além do controlo dos *triggers*, o sistema de luz será responsável por enviar ao sistema de visão a informação que este necessite, dentro das suas capacidades, com maior relevância, a posição do projetor laser com a identificação do *trigger* do mesmo.

4.2 Arquitetura de Software

Após a apresentação da arquitetura de hardware, o foco agora será ao nível de *software*, o qual poderá ser dividido em duas partes: Calibração e Reconstrução tridimensional.

4.2.1 Calibração

Para a calibração do sistema será utilizado um método semelhante aos apresentados na seção 2.2.3, onde os autores apresentam métodos de calibração de um sistema de luz estruturada com e sem laser rotativo. Assim, o método a implementar consiste nos seguintes passos:

- Cálculo dos parâmetros intrínsecos;
- Aquisição de imagens de um padrão de xadrez, para o cálculo dos parâmetros extrínsecos;
- Aquisição de imagem com laser projetado sobre o padrão de xadrez;
- Segmentação da linha de laser e projeção dos pontos para o referencial da câmara;
- Repetição do processo para várias posições do padrão;
- Cálculo da equação do plano com as linhas de laser segmentadas;
- Calcular vários planos para diferentes posições do laser;
- Calcular eixo de rotação do laser pela interseção dos diversos planos.

Na Figura 4.6 é apresentado um diagrama com o funcionamento simplificado do processo de calibração a desenvolver.

Este processo recebe como entrada os parâmetros intrínsecos da câmara, os quais foram previamente calculados, assim como os dados do encoder, relativos à posição do laser, e um conjunto de imagens. As imagens recebidas podem ser de dois tipos: imagem com laser ou com leds. No caso de a ser uma imagem de leds será usada para calcular os parâmetros extrínsecos, por outro lado se for uma imagem com laser será usada para segmentar a linha de laser. Como foi mencionado anteriormente, ambas as imagens contêm um padrão de xadrez, o qual deve manter a mesma posição nas duas imagens, para que seja possível segmentar a linha de laser na imagem de laser, e calcular os parâmetros extrínsecos na imagem de leds. A equação que representa o plano do laser no referencial da câmara, é calculada realizando o *fit* aos pontos segmentados. Após se

obter esta equação, é feito o mesmo processo com imagens de laser onde este se encontra numa posição diferente. Por fim, é calculada a reta de interseção entre todos os planos, a qual representará o eixo de rotação do laser.

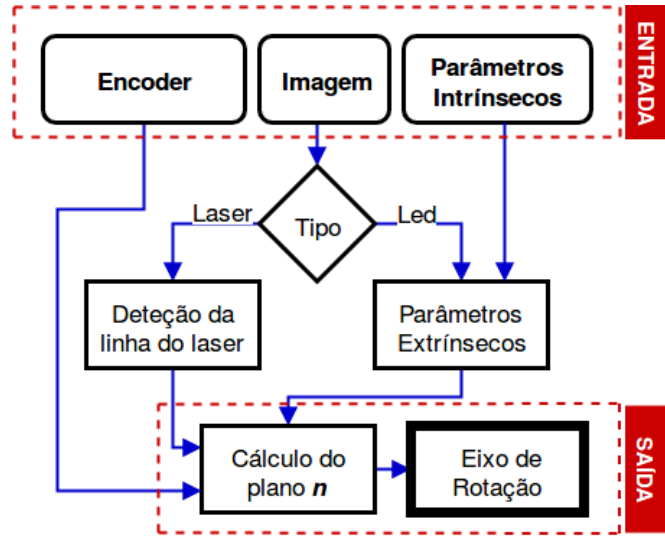


Figura 4.6: Diagrama do software de calibração.

4.2.2 Reconstrução 3D

Após a calibração estar concluída, e existir uma equação que represente o eixo de rotação do laser, é então possível utilizar essa informação para realizar a reconstrução tridimensional, utilizando o sistema. Deste modo, na Figura 4.7 é apresentado o diagrama de funcionamento do processo de reconstrução.

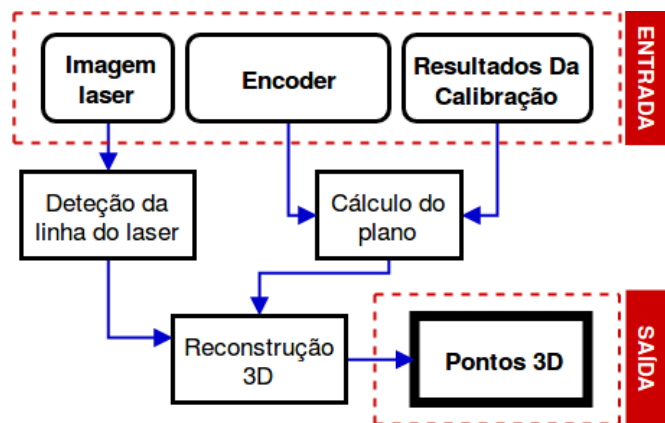


Figura 4.7: Diagrama do software de reconstrução.

Ao contrário do processo de calibração, para o processo de reconstrução apenas são relevantes as imagens com laser, que serão utilizadas para o mesmo objetivo: identificar e segmentar a linha do laser. É ainda possível observar na Figura, que para além da imagem de laser, este processo recebe os dados de encoder, e os resultados da calibração anterior. Esta informação irá permitir calcular a equação do plano para o valor de encoder recebidos. Por fim, e após se obter os pontos do laser, na imagem, e equação do plano do laser atual, é então possível realizar a reconstrução tridimensional, e assim calcular a profundidade dos pontos segmentados relativamente ao referencial da câmara.

Capítulo 5

Hardware

5.1 *Hardware*

Na secção anterior foram apresentadas as arquiteturas do sistema relativas ao *hardware* e *software*, onde foi possível perceber que o sistema a desenvolver, está dividido em dois módulos, sendo que o módulo de luz já se encontra em desenvolvimento. Assim, nesta secção, pretende-se apresentar os componentes que serão parte integrante do sistema de visão, o qual será desenvolvido no decorrer desta dissertação.

5.1.1 Sensor Ótico

Para a escolha do sensor ótico (câmara), este terá de cumprir determinados requisitos, tais como:

- *Frama Rate* superior a 30 fps.
- Vários modos de configuração.
- Capacidade de receção de *trigger* externo.
- Utilização do protocolo GigE.

Deste modo, a câmara selecionada para o projeto foi o modelo Dalsa Nano C-2020, da Teledyne. Este modelo permite até 4 modos de configuração diferentes, bem como a parametrização de cada um deles. Permite ainda a configuração de vários parâmetros relativos à imagem, como ganhos, *offsets*, dimensões da imagem, entre outras. Além disso, o modelo C-2020 contém dois pinos de *input*, para a receção de *trigger* externo, e

utiliza o protocolo GigE para a transmissão de imagem, sendo assim capaz de adquirir até 32 FPS. Contudo, o fabricante disponibiliza um modo denominado *turbo drive*, que faz com que o sensor seja capaz realizar aquisição de imagem até 52 FPS. Na Figura 5.1 podemos observar o sensor ótico em questão.



Figura 5.1: Teledyne Dalsa Nano C-2020

O fabricante da câmara dispõe de um *software* de aquisição de imagem, no entanto, foi desenvolvida uma classe em C++, denominada de Dalsa Class para efeitos de relatório, para permitir uma maior abstração das configurações da câmara ao longo da implementação do *software* de reconstrução. Foi também desenvolvido um nó de aquisição de imagem, em ROS (Robot Operating System), para se poder obter as imagens necessárias para a calibração e, posteriormente, o nó de reconstrução, onde ambos utilizam a classe desenvolvida.

5.1.2 Unidade de Processamento

O computador responsável pelo processamento e aquisição das imagens teve também uma pequena lista de requisitos, dos quais:

- Dimensões reduzidas;
- Duas portas GigE;
- Uma porta para comunicação série;
- Pinos de entrada e/ou saída;

- Capaz de suportar arquiteturas linux de 32 ou 64 bits;
- CPU (*Central Processing Unit*) que cumprisse os requisitos do algoritmo de processamento.

Para além dos requisitos, um dos objetivos no desenvolvimento do sistema de visão, consistia em que a unidade de processamento estivesse no mesmo compartimento físico da câmara. Para que isto fosse possível foi então necessário eliminar alguns requisitos da escolha da unidade de processamento. Nesse sentido, o computador selecionado foi um Intel Joule 570X, com 16 GB (Gigabytes) de memória e 4 GB de memória RAM. Como se pode ver na Figura 5.2, este CPU tem dimensões muito reduzidas, quando comparado com outros computadores, sendo as suas dimensões de 48 mm de comprimento, 24 de largura e 4 mm de altura.



Figura 5.2: Intel Joule 570x

Figura 5.3: Intel Joule 570x *developer kit*

5.1.3 Componentes Auxiliares

Para combater as restrições eliminadas na escolha do CPU, houve a necessidade de complementar o mesmo com outros componentes. Deste modo, utilizou-se uma *docking board* (Gumstix HTPC) para o Intel Joule 570X, esta PCB (*Printed Circuit Board*) possibilita uma alimentação de 24 V, e uma saída USB *type-C*. Esta é utilizada para conetar um HUB que disponibiliza 2 portas *Ethernet* e uma USB *type-A*, que serão utilizadas segundo a arquitetura apresentada na Figura 4.2, como ligação GigE para a câmara e a outra como saída de dados, a porta USB será utilizada para realizar comunicações 485, através de um conversor USB para RS485.

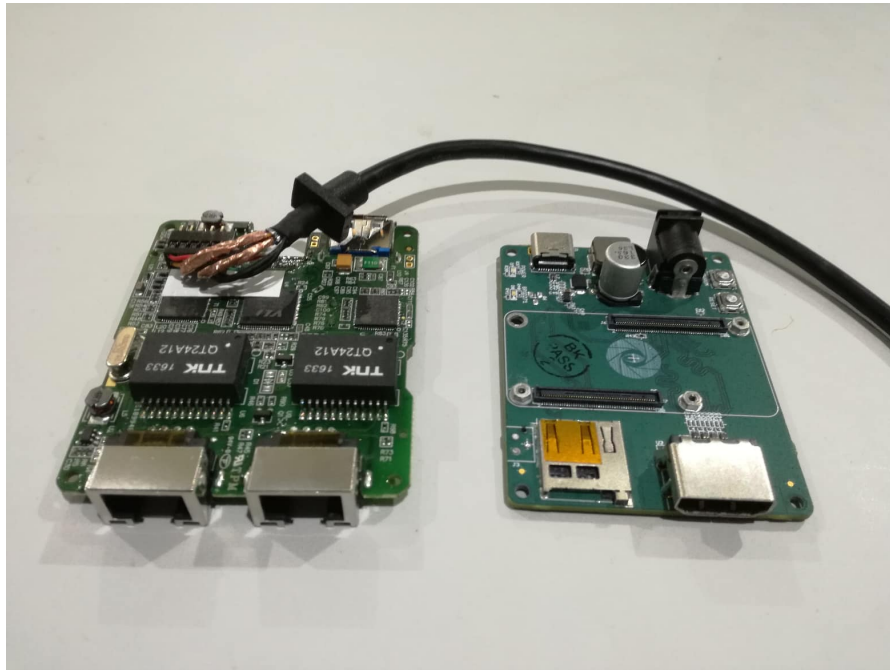


Figura 5.4: HUB e placa Gumstix.

Na Figura 5.6 é possível observar a placa que suporta o CPU e o HUB e na Figura 5.5 é possível observar o sistema de visão completo.

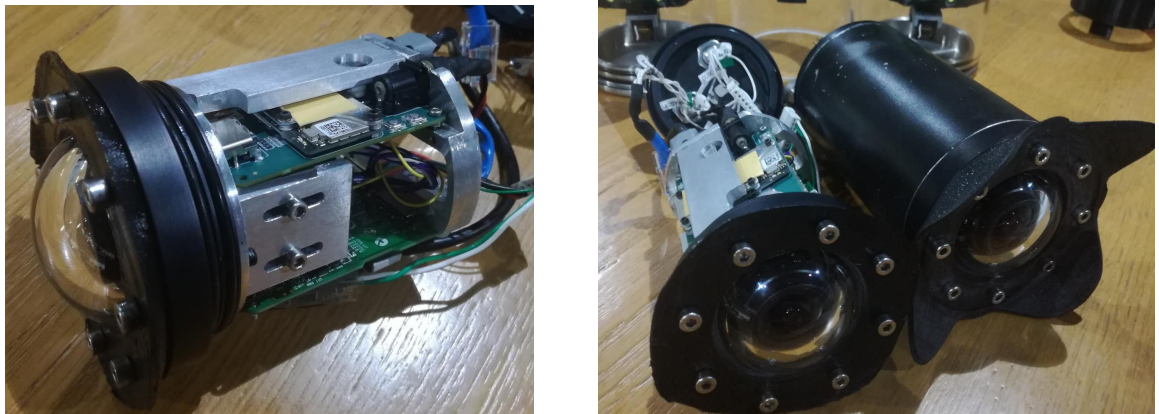


Figura 5.5: Sistema de visão.

Para além destes componentes, o sistema contém uma estrutura em alumínio para permitir o funcionamento dentro de água, bem como uma *dome* para combater a diminuição do *field of view* dentro de água, como foi referido na secção 3.1.2. Na mesma Figura é ainda possível observar o sistema completo.

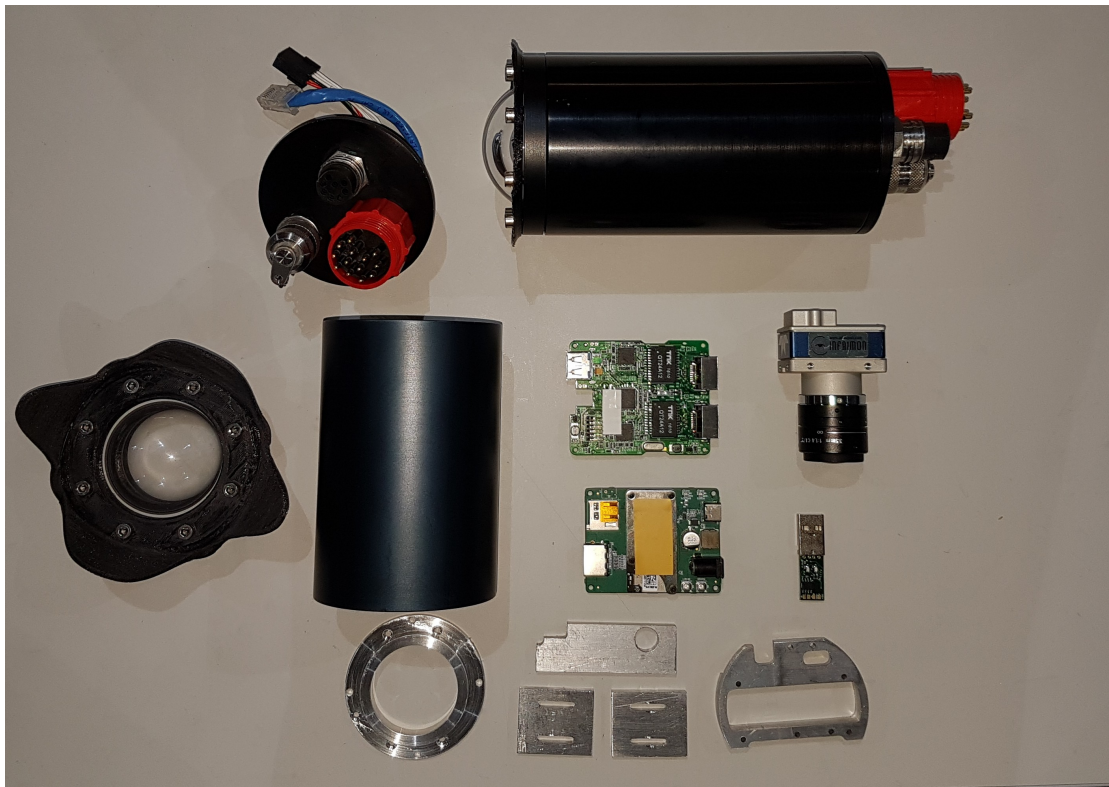


Figura 5.6: Componentes do sistema de visão.

5.2 Resumo do Capítulo

Ao longo do capítulo foram apresentadas as arquiteturas de *hardware* e *software* do sistema, sendo inicialmente apresentado o sistema de luz o qual já se encontra desenvolvimento no laboratório. Posteriormente foi apresentada a arquitetura de *software* a implementar, descrevendo sucintamente os passos do processo de calibração e reconstrução tridimensional. Por fim foram apresentados os componentes escolhidos para desenvolver o sistema de visão, bem como a estrutura física desenvolvida no laboratório.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 6

Implementação

A implementação desta dissertação está dividida em três partes distintas, nomeadamente: a calibração da câmara, estimação dos parâmetros extrínsecos e, por último, a reconstrução tridimensional. Os dois primeiros, foram desenvolvidos utilizando MATLAB¹, enquanto que o software de reconstrução foi desenvolvido em C++, utilizando a *framework* ROS e a biblioteca de imagem computacional OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*)².

6.1 Parâmetros Intrínsecos

Como já foi mencionado anteriormente o cálculo dos parâmetros intrínsecos é fundamental para qualquer método ou processo que utilize processamento de imagem. Nesse sentido, para calcular a matriz A , apresentada em 6.1, que representa os coeficientes físicos da câmara utilizada no sistema, foi utilizada a aplicação *Camera Calibrator* do MATLAB.

$$A = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

A aplicação apresentada na Figura 6.1, recebe um conjunto de imagens com um padrão de xadrez e o comprimento da aresta dos quadrados, deteta os cantos entre quadrados e, posteriormente, estima o valor dos parâmetros intrínsecos da câmara, sendo ainda possível observar o erro de reprojeção dos cantos em cada imagem. Isto permite ao utilizador remover as imagens com maior erro e, recalcular, com o objetivo de obter o

¹<https://www.mathworks.com/>

²<https://opencv.org/>

melhor resultado possível.

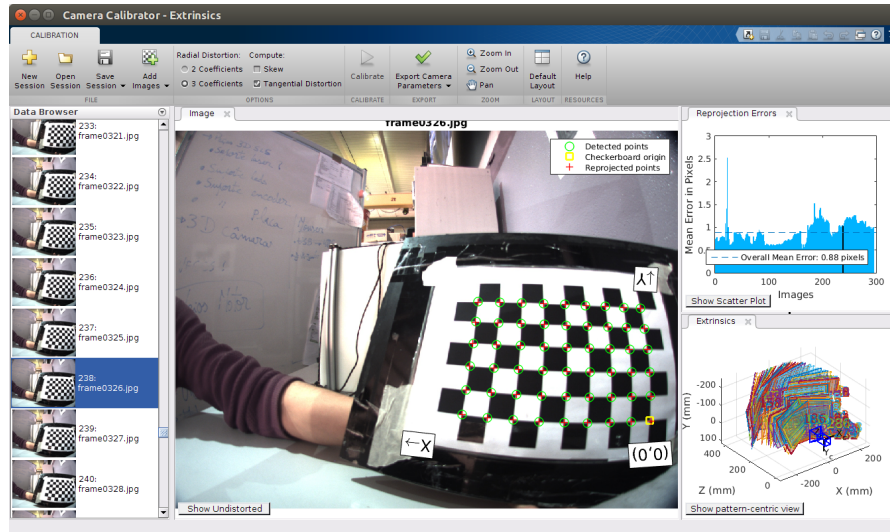


Figura 6.1: Aplicação do MATLAB - *Camera Calibrator*.

6.2 Calibração

Após se obter os parâmetros intrínsecos, passamos então à calibração dos parâmetros extrínsecos do sistema, os quais representam o eixo de rotação do projetor laser. Este processo consiste em calcular n equações do plano do laser em diferentes posições e, calcular a interseção entre eles. Desta forma, abaixo são apresentadas as diferentes etapas deste processo.

6.2.1 Imagens e Distorção da lente

Anteriormente apresentou-se um diagrama funcional do processo de calibração (Figura 4.6), contudo antes de iniciar a explicação detalhada de cada passo deste processo, é apresentada na Figura 6.2 um diagrama com todos os passos do mesmo, com intuito de facilitar a compreensão do leitor.

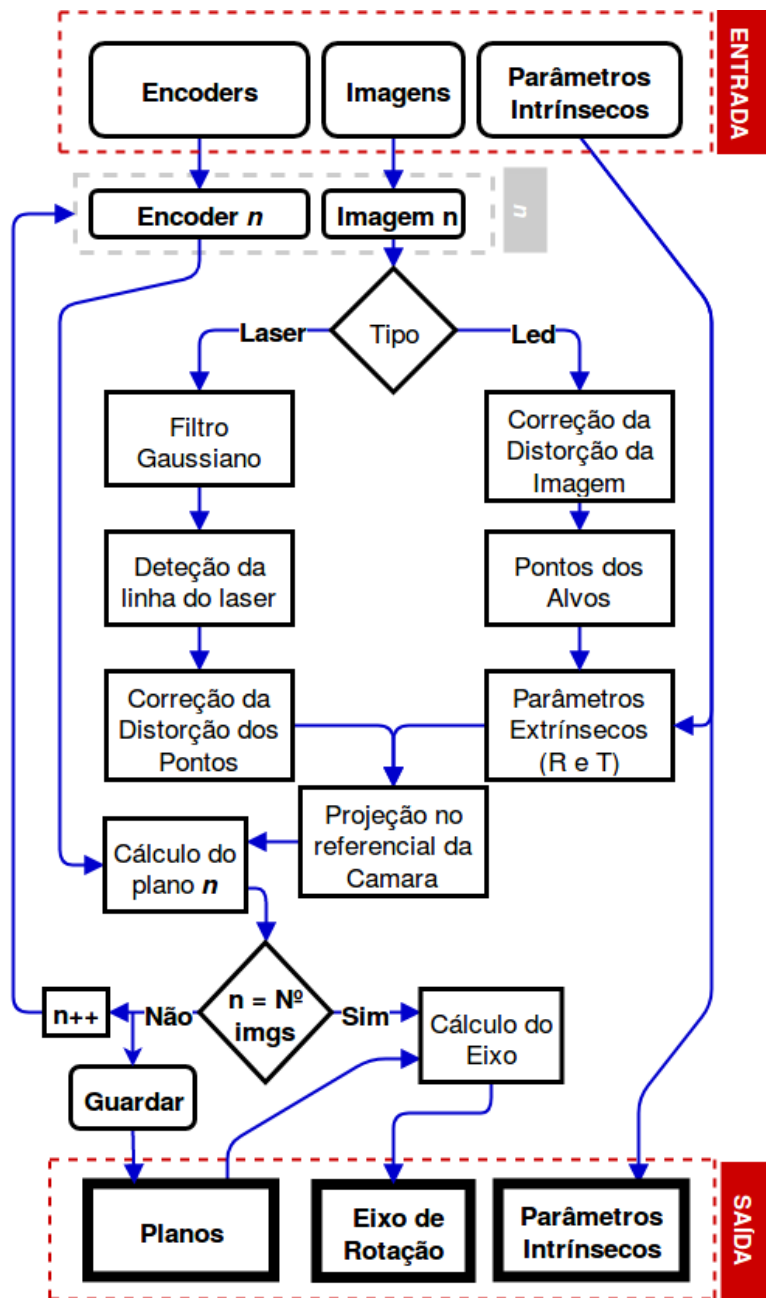


Figura 6.2: Diagrama do processo de calibração.

O processo de calibração não foi desenvolvido para ser executado em *real time* e, como tal, existe a necessidade de se realizar previamente uma aquisição de dados. Estes dados consistem em imagens, leituras do valor de encoder e nos parâmetros intrínsecos da câmara, onde cada leitura de encoder deverá corresponder a uma imagem de la-

ser, e as restantes imagens (imagens de leds) serão usadas para calcular os parâmetros extrínsecos. Na Figura 6.3 é possível observar um exemplo de um conjunto de imagens adquiridas para o processo de calcular os parâmetros extrínsecos do sistema.

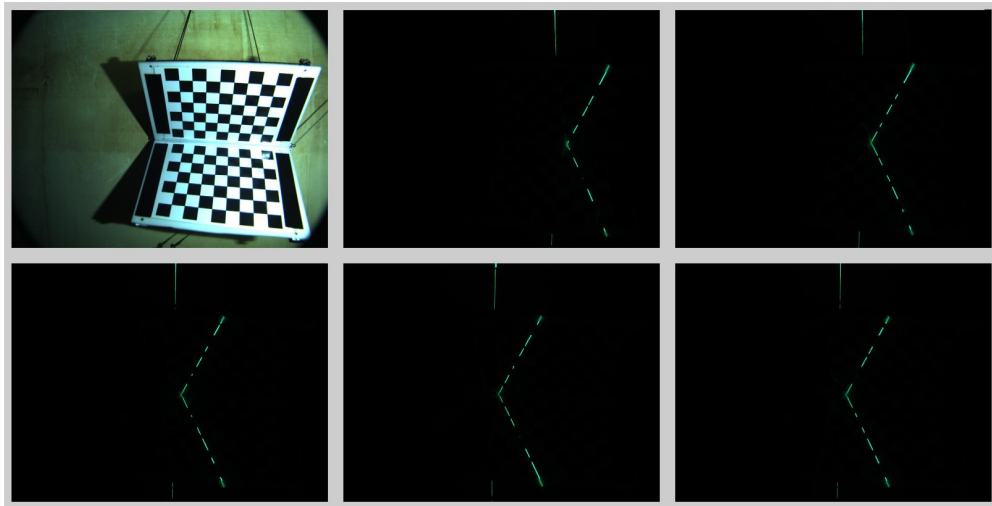


Figura 6.3: Conjunto de imagens adquiridas.

A primeira fase do processo consiste em corrigir a distorção imposta nas imagens pela lente, sendo a sua correção realizada pela função *undistortImage*. A mesma, recebe os parâmetros da câmara e a imagem a corrigir. É possível observar a imagem com e sem distorção, nas Figuras 6.4 e 6.5, respetivamente.

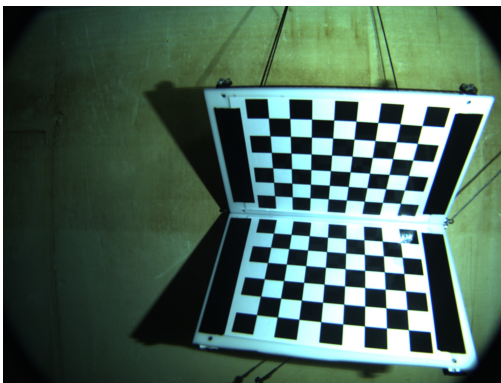


Figura 6.4: Imagem com distorção.

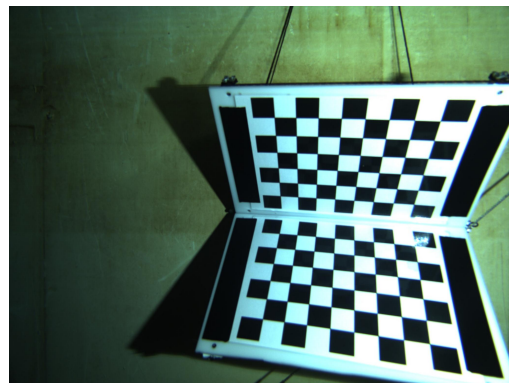


Figura 6.5: Imagem sem distorção.

Embora o processo de calibração não tenha grandes limitações temporais, é sempre

bom otimizar o processo, e com este objetivo as imagens de laser, as quais serão utilizadas para segmentar a linha de laser apenas se ira corrigir a distorção aos pixels segmentados.

6.2.2 Parâmetros extrínsecos

Após a correção da distorção da lente sobre as imagens de Led, é então possível calcular os parâmetros extrínsecos, que representarão a rotação e translação dos padrões de xadrez para o referencial da câmara. Primeiramente, é necessário detetar os cantos de cada um dos padrões de xadrez na imagem, através da função *detectCheckerboardPoints* que retorna as cordeadas u e v dos cantos de cada um dos padrões, conforme é apresentado na Figura 6.6.

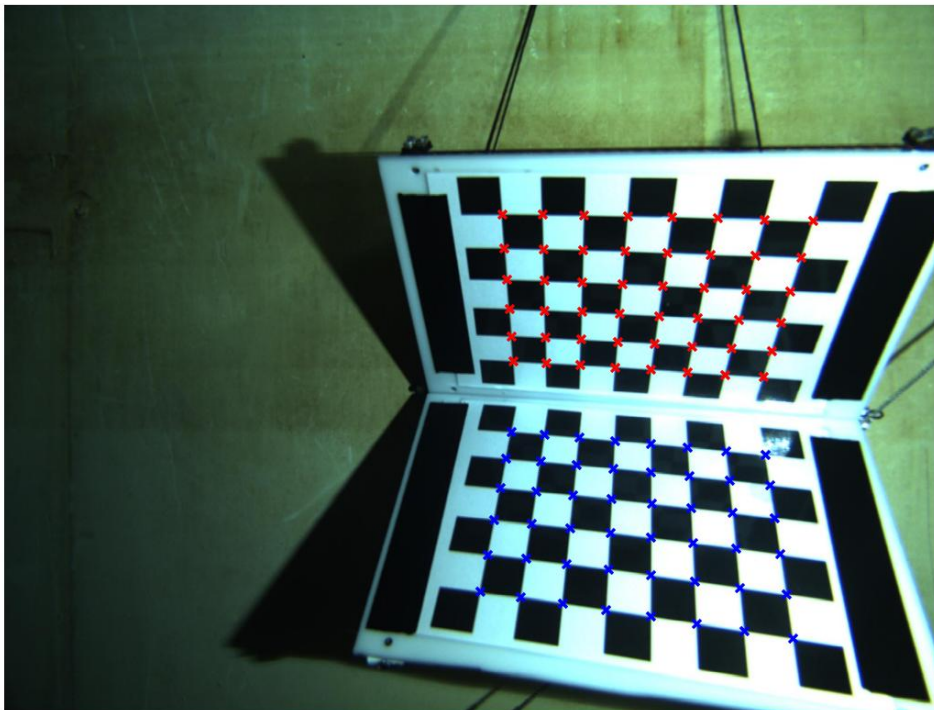


Figura 6.6: Cantos detectados na imagem de Luz.

Os resultados desta função são influenciados pelas condições da imagem, a quantidade de luz, o meio envolvente, bolhas ou poeiras na água, entre outros fatores. Assim, com o objetivo de garantir resultados fidedignos, os cantos do padrão detetados só serão aceites se o número de cantos detetados coincidir com o real. Isto é, se o padrão contém 48

cantos entre quadrados, por exemplo, o processo apenas continuará se a função retornar 48 posições na imagem.

Posteriormente à obtenção dos cantos do alvo de calibração na imagem e, sabendo que a distorção da lente já foi corrigida, passamos então à obtenção das matrizes de rotação (equação 3.11) e dos vetores de translação (equação 3.10) dos respectivos padrões de xadrez. Isto pode ser feito através da função *extrinsics*, a qual recebe um conjunto de pontos 2D na imagem, um conjunto de pontos 3D no mundo, e os parâmetros da câmara, retornando os parâmetros extrínsecos que relacionam os dois conjuntos de pontos.

Os pontos 2D na imagem, serão os cantos detetados pela função *detectCheckerboardPoints*, as coordenadas dos cantos dos padrões de xadrez no mundo terão de ser dimensionadas. Para definir as coordenadas 3D, definimos o referencial do mundo situado num dos cantos do padrão de xadrez, normalmente o mais à esquerda e acima (na imagem), como é apresentado na Figura 6.7. Deste modo, a coordenada em z dos pontos será igual a zero, e as coordenadas em x e y serão uma grelha com aresta igual ao tamanho real da aresta de um quadrado.

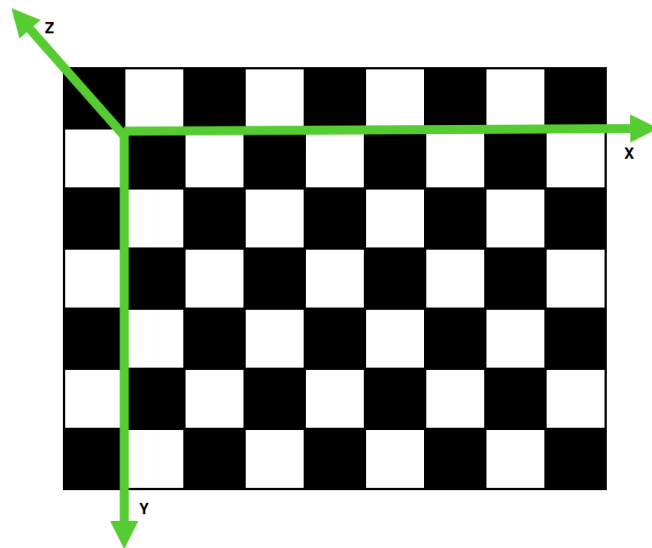


Figura 6.7: Referencial do Mundo definido no alvo de xadrez.

Por fim, os parâmetros extrínsecos referentes aos dois alvos serão armazenados e a imagem de Led libertada, passando-se a segmentação da linha do laser.

6.2.3 Segmentação e Projeção

A imagem com o laser projetado sobre os dois padrões de xadrez, é agora utilizada para se extrair os pixels do mesmo. O processo de segmentação começa por converter a imagem de RGB para tons de cinza, como se pode observar nas Figuras 6.8 e 6.9 respectivamente, e de seguida por aplicar um filtro gaussiano à imagem de modo a realizar um *smooth* da mesma e garantir apenas um máximo de intensidade por linha.

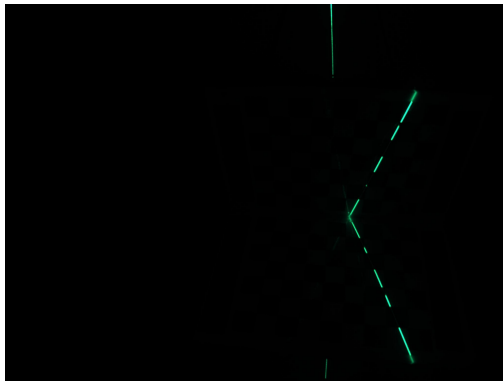


Figura 6.8: Imagem *RGB*.



Figura 6.9: Imagem em escala de cinza.

Contudo, uma grande parte da informação presente na imagem de laser é irrelevante para o processo, assim optou-se por aplicar o *kernel* (equação 6.2) gaussiano, sendo esta uma operação de elevado custo computacional, apenas às partes relevantes da imagem, que serão a área interna dos dois padrões de xadrez. Nas Figuras 6.10 e 6.11 apresenta-se as imagens resultantes do recorte realizado à imagem original, pelos limites dos respectivos alvos de xadrez, e aplicação do filtro gaussiano às mesmas.

$$K = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 2 & 8 & 12 & 8 & 2 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 2 & 8 & 12 & 8 & 2 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

A utilização do filtro gaussiano pode não parecer relevante a olho nu. No entanto, na Figura 6.12 é apresentada a intensidade dos pixels de uma linha da imagem aleatória, antes e depois da aplicação do mesmo, com o intuito de demonstrar a importância do método no processo de segmentação.



Figura 6.10: Segmentação pelos limites do alvo.



Figura 6.11: Imagens após aplicação do Filtro Gaussiano.

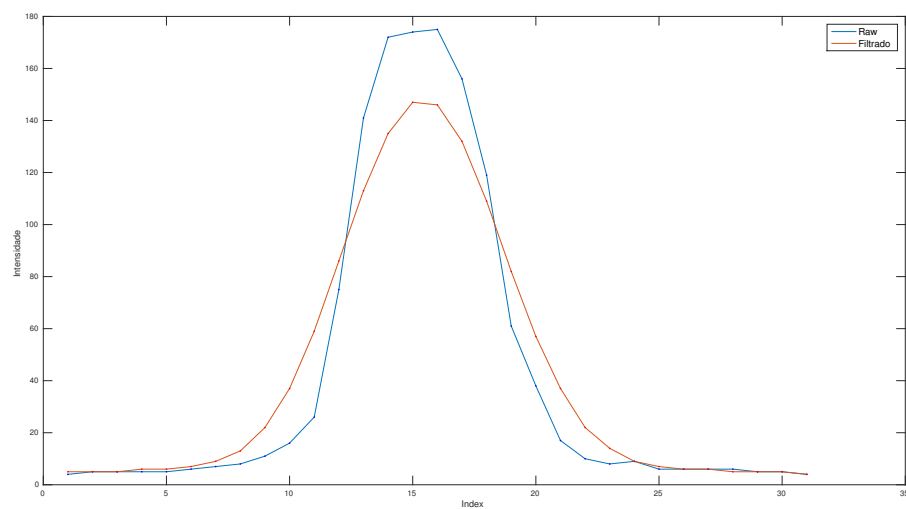


Figura 6.12: Intensidade raw e após aplicação do filtro gaussiano.

Como é possível observar, os pixels filtrados representam uma curva gaussiana quase perfeita com um máximo de intensidade bem definido. Além de realçar um máximo em cada linha da matriz, este método permite, para cada linha da imagem, identificar com mais certeza as coordenadas correspondentes do ponto médio da linha do laser, devido ao facto de a intensidade de cada pixel ser calculada segundo as intensidade vizinhas, como foi apresentado na secção 3.2.3.

Após se obter a imagem filtrada, podemos dar início ao processo de segmentação, que se divide em vários passos, nomeadamente:

- Detecção de pico;
- Aplicação do método do Centro de Massa;
- Aplicação do método de *Least square* para obtenção das equações de cada uma das retas;
- Distribuição equitativa do número pontos segmentados.

A detecção de pico consiste em obter as coordenadas dos pixels com maior intensidade, após aplicar o filtro gaussiano. Para tal, a imagem é percorrida verticalmente (linha a linha), guardando as coordenadas x e y do pixel de maior intensidade, para cada linha.

O método do centro de massa é depois aplicado a estes pixels, com o objetivo de resolver a discretização dos pixels do laser, tendo em conta que a linha de laser não ocupa apenas um pixel por linha na imagem, ocupando uma média de 12 pixels. Assim, este método ajudará a obter melhores resultados ao nível da segmentação do laser. Nas Figuras 6.13 e 6.14 é possível observar os resultados destes dois métodos, a imagem binarizada e o gráfico com as coordenadas na imagens dos pontos segmentados.

Por fim, são calculadas as equações das retas que representam cada uma das linhas do laser nos respetivos padrões, utilizando o método de *least square*.

Durante a fase de implementação foram utilizados vários métodos para o próximo passo, nomeadamente: calcular as equações dos planos e, na sua grande maioria estas eram sensíveis à distribuição dos pixels segmentados pelas duas retas. Deste modo, tornou-se necessário realizar uma distribuição equitativa sobre as duas retas segmentadas, a qual é realizada calculando N pontos para cada uma das retas, garantido assim o mesmo número de pontos para os dois segmentos do laser.

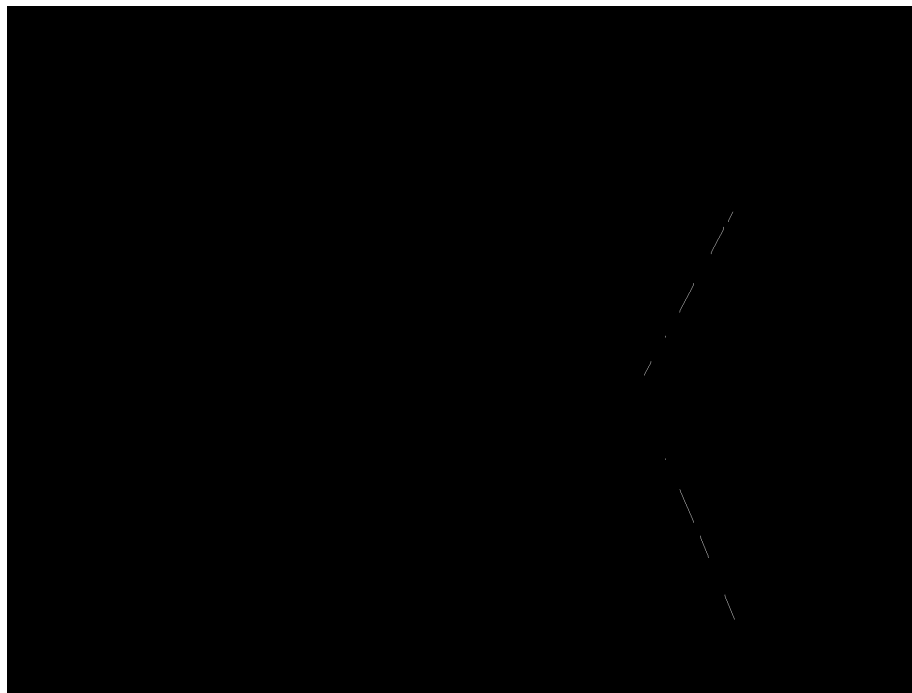


Figura 6.13: Imagem binarizada

Após se obter os N pontos 2D de cada uma das retas do laser, é então possível rodar e transladar estes pontos para o referencial da câmara, com o objetivo de calcular a terceira dimensão dos mesmos. Isto é feito utilizando os parâmetros extrínsecos calculados anteriormente, bem como os parâmetros intrínsecos do sensor ótico.

Foi então utilizada a técnica de homografia, apresentada na sub-seção 3.2.1. Para tal consideramos a representação dos pontos 2D segmentados pela equação 6.3, e os pontos 3D no referencial da câmara e do mundo pelas equações 6.4 e 6.5, respetivamente.

$$P_u = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$P_c = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$P_w = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Relembrando o leitor que nesta fase considera-se o padrão de xadrez com referencial do Mundo, começamos então por projetar os pontos segmentados neste referencial. Com este objetivo foi utilizada a função do MatLab *pointsToWorld*, que recebe os parâmetros

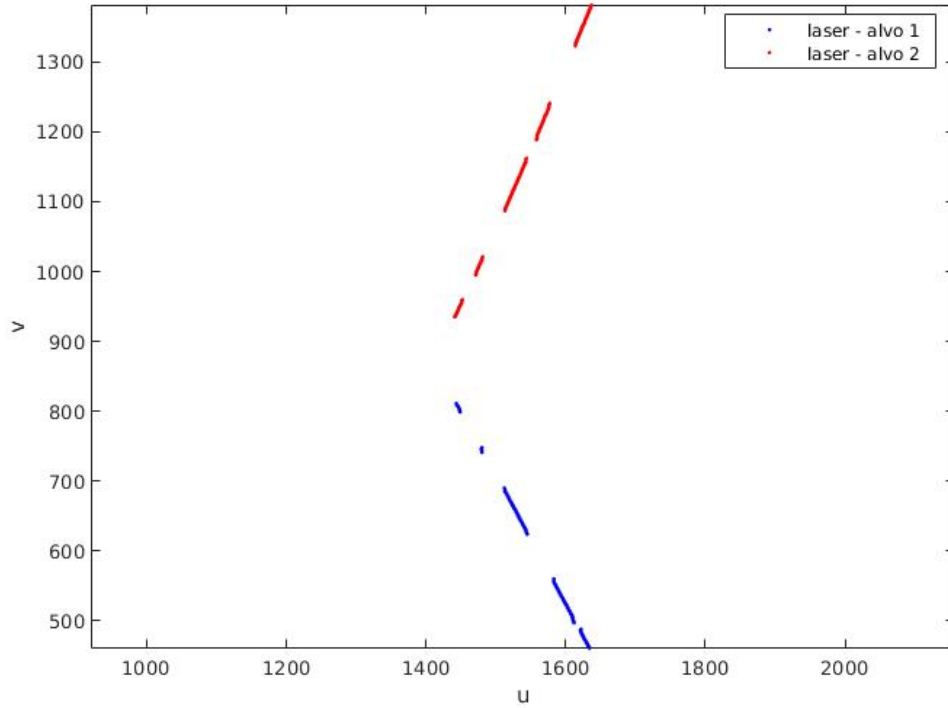


Figura 6.14: Pontos do laser segmentados.

da câmara, os pontos alvo, e os parâmetros extrínsecos, retornando as coordenadas 3D no referencial do mundo (Padrão de xadrez).

$$P_u = AP_c = A \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} P_w \quad (6.6)$$

A equação 6.6 representa a operação feita por esta função, onde R e T representam a rotação e translação, respetivamente, de cada um dos padrões de xadrez, e A os parâmetros intrínsecos da câmara. Deste modo, é possível manipular a equação de modo a obtermos as coordenadas no referencial do mundo, equação 6.7.

$$P_w = \left[A \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \right]^{-1} P_u \quad (6.7)$$

Como foi mencionado anteriormente os pontos segmentados da linha de laser, têm a terceira coordenada (z) igual a zero, pois encontram-se sobre o padrão de xadrez. Manipulando novamente a equação 6.6 e utilizando o resultado da função *pointsToWorld*,

podemos obter a equação 6.8, e assim estimar as coordenadas dos pontos segmentados no referencial da câmara (P_c). Na equação 6.8 considera-se r_i como a coluna i da matriz de rotação, obtida anteriormente.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 & r2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Neste ponto do processo, temos os pontos 3D do laser, referentes a uma imagem, no referencial da câmara. Contudo, este processo é repetido para todas as imagens guardando os pontos resultantes e identificados com a posição de encoder correspondente.

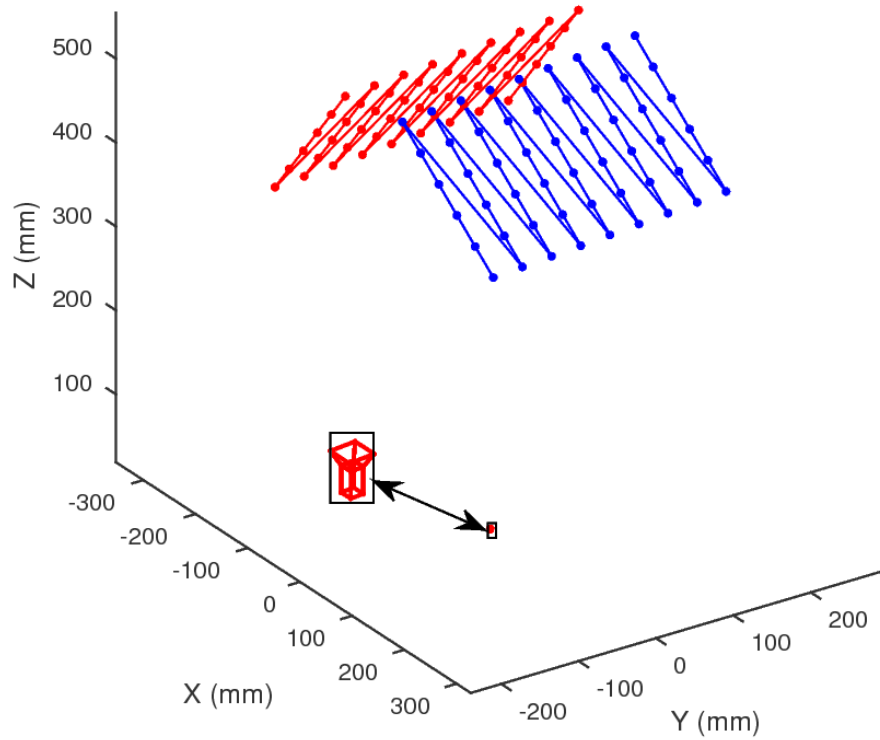


Figura 6.15: Pontos dos alvos no referencial da câmara.

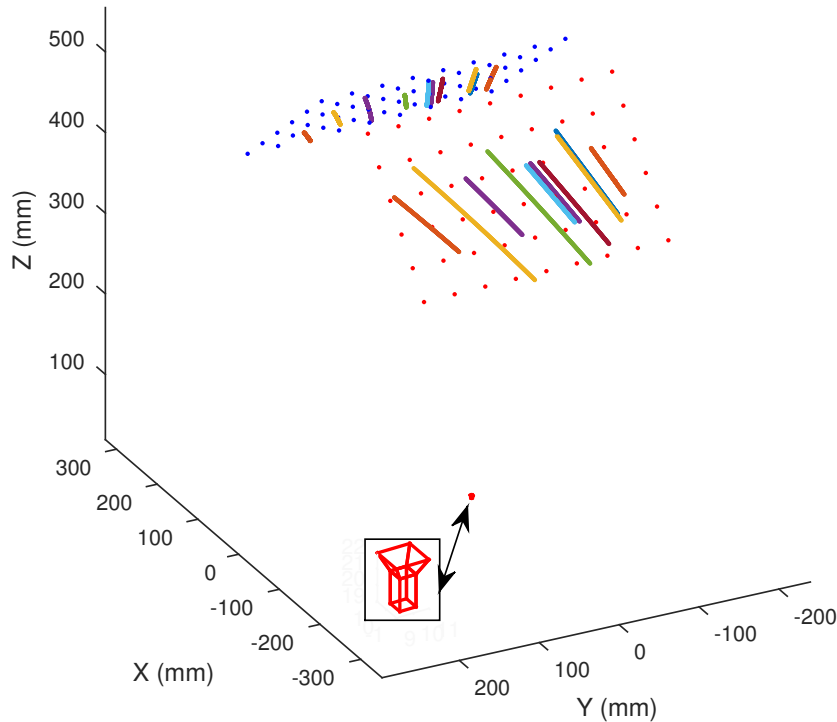


Figura 6.16: Pontos do laser segmentados no referencial da câmara.

Na Figura 6.15 é possível observar os cantos dos padrões de xadrez representados a azul e vermelho, no referencial da câmara. Por ultimo na Figura 6.16 é apresentado o exemplo de um conjunto de linhas do laser segmentadas, no referencial da câmara.

6.2.4 Plano do Laser e Eixo de rotação

Depois de se obter todos os pontos do laser, das diferentes imagens adquiridas, e corretamente identificados pela posição do encoder, somos então capazes de calcular as equações do plano do laser para cada uma das diferentes posições do projetor. Consideramos $\mathbf{n}$ o vetor normal ao plano (6.9), $\mathbf{p}$ um ponto pertencente ao plano (6.10), e a equação do plano definida em 6.11, onde a constante D pode ser calculada pelo produto interno entre $\mathbf{n}$ e $\mathbf{p}$ (equação 6.12).

$$n = \begin{bmatrix} A & B & C \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$p = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (6.11)$$

$$D = -n \cdot p' \quad (6.12)$$

Utilizou-se novamente o método *least square* para determinar a equação do plano que melhor represente os pontos 3D segmentados anteriormente.

Após se obter as equações dos planos, passamos ao último passo da calibração que consiste em determinar a equação da reta, que representa o eixo de rotação do laser. Deste modo, são calculadas as retas de interseção entre todos os planos dois a dois, e posteriormente realizada a média de todos os vetores direção das retas.

Para o cálculo da reta de interseção entre dois planos foi utilizado o método do *cross product* ou produto de vetores, entre as normais aos dois planos, representadas por $\mathbf{n}_1$ e $\mathbf{n}_2$ na equação 6.13, e $\mathbf{v}_{axis}$ o vetor resultante.

$$\mathbf{v}_{axis} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2 \quad (6.13)$$

Sendo uma reta definida por um vetor e um ponto, é ainda necessário encontrar o ponto pertencente á reta, definido na equação 6.14, sabendo que este pertence aos dois planos. Para tal resolvemos o sistema de duas equações (equação 6.15), atribuindo um valor (ex: 0) para uma das coordenadas (x, y ou z) e calculando as restantes.

$$p_{axis} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \end{cases} \quad (6.15)$$

Por fim, todos os parâmetros são armazenados num ficheiro de texto, para serem utilizados pelo processo de reconstrução. Este ficheiro contem os parâmetros intrínsecos da câmara, as equações dos planos do laser calculadas com o respetivo valor de encoder e, por último, a equação do eixo de rotação do projetor.

6.3 Reconstrução

A validação do método de calibração necessita de um processo de reconstrução, sendo que nesta seção são apresentados os passos relevantes do algoritmo de reconstrução implementado.

6.3.1 Processamento da Imagem

Como é possível observar no diagrama da Figura 6.17, os métodos aplicados são muito semelhantes aos utilizados na calibração, deste modo o primeiro passo consiste em realizar a conversão da imagem de *rgb* para *gray scale* e, posteriormente, a aplicação do filtro gaussiano.

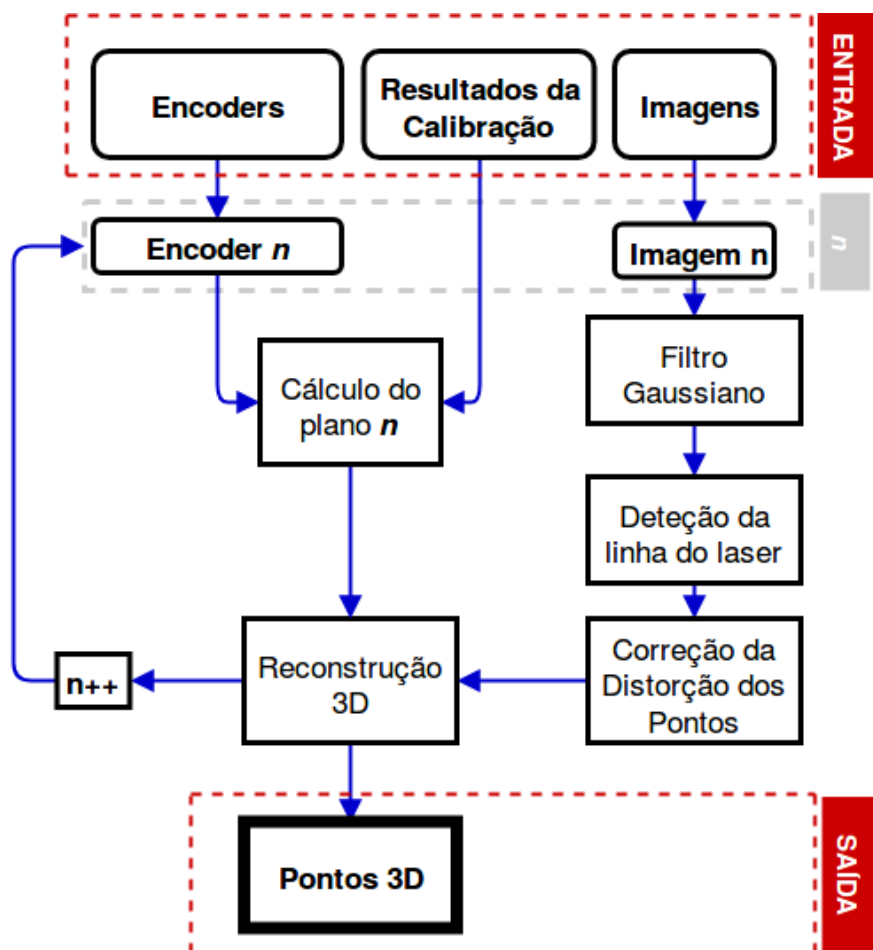


Figura 6.17: Diagrama do processo de reconstrução tridimensional.

Embora os processos utilizados sejam semelhantes, o algoritmo de reconstrução tem como objetivo ser executado a uma elevada frequência, com o objetivo de se obter o maior número de imagens processadas por segundo, assim a otimização do software é fundamental. Com este objetivo o filtro gaussiano aplicado anteriormente, tem agora um kernel (equação 6.2) de menor dimensão e apenas é aplicado em torno dos pixels em que se verifique uma intensidade superior a um determinado nível (*threshold*), normalmente um pouco inferior ao valor médio de intensidade dos pixels da linha do laser. Além disso, é ainda adicionado um *offset* em torno dos pixels, na aplicação do filtro, para minimizar a perda de informação (Figura 7.11).



Figura 6.18: Imagens referentes ao antes e depois da aplicação do filtro gaussiano em torno dos pixels do laser.

Na Figura 7.11 são apresentadas as imagens sobre este método, à esquerda a imagem em tons de cinza antes da aplicação da matriz de convolução, e à direita a imagem depois da aplicação, sendo que nesta toda a área a cinza não é processada, conseguindo assim reduzir ao mínimo o custo temporal da utilização do filtro gaussiano.

6.3.2 Segmentação do laser e Equação do plano

Após o tratamento de imagem, podemos então iniciar o processo de segmentação do laser, que como foi mencionado anteriormente consiste em percorrer a imagem guardando as coordenadas u e v , dos pixels de maior intensidade. Além do método de detecção de pico pelo valor máximo de intensidade, é aplicado o método do centro de massa como anteriormente.

Após se segmentar a linha de laser na imagem, é realizada a correção da distorção nos mesmos. Para tal, são utilizados os resultados da calibração da câmara (Parâmetros

Intrínsecos) e a função *UndistortPoints*.

Com o objetivo de calcular as coordenadas dos pixels do laser no referencial da câmara, é necessário ainda obter a equação do plano do projetor laser, referente à imagem em questão. Os resultados da calibração são armazenados num ficheiro, os quais serão agora utilizados para se calcular a equação do plano atual.

Utilizando a informação do encoder correspondente a esta imagem (definida por *Enc*), e selecionando uma das equações dos planos existentes no ficheiro de calibração, a qual será denominada de plano de referência, é então possível quantificar a rotação angular entre os dois planos, o plano de referência e o plano a calcular (equação 6.17). Considerando θ como o ângulo entre os dois planos, o número total de posições de encoder como *Total_Enc_Tick*, *Tick_rad* como o valor em radianos de uma posição do encoder e *Enc_ref* como o valor de encoder do plano de referência.

$$Tick_rad = \frac{2 \times \pi}{Total_Enc_Tick} \quad (6.16)$$

$$\theta = Tick_rad(Enc - Enc_ref) \quad (6.17)$$

Depois de se calcular θ , procedemos então à rotação do plano de referência em torno do eixo de rotação estimado na calibração, com objetivo de se obter a equação do plano laser correspondente à imagem atual. Como tal, utilizou-se a função *Rodrigues* do OpenCV para gerar a matriz de rotação em torno deste eixo. Esta função recebe um vetor e retorna uma matriz de rotação (*R*) 3 x 3, sendo o vetor de entrada da função o vetor direção do eixo de rotação multiplicado pelo θ calculado na equação 6.17.

$$R = Rodrigues(\theta \times v_{axis}) \quad (6.18)$$

Por fim, podemos então obter a equação do plano atual, definida em 6.9, 6.10 e 6.11, rodando o plano de referência por *R*, considerando $\mathbf{n}_{ref}$ como o vetor normal do plano de referência e $\mathbf{p}_{ref}$ o ponto do plano de referência (equações 6.19 e 6.20).

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_{ref}R \quad (6.19)$$

$$\mathbf{p} = (\mathbf{p}_{ref} - \mathbf{p}_{axis})R + \mathbf{p}_{axis} \quad (6.20)$$

Por fim, com o vetor normal e o ponto do plano, podemos então calcular a constante D

(6.12), e representar a equação do plano na forma apresentada anteriormente em 6.11.

6.3.3 Reconstrução Tridimensional

Com os pontos segmentados da linha do laser e equação do plano de laser calculado, existem então todas as condições para calcular as coordenadas dos pixels segmentados anteriormente no referencial da câmara, segundo as equações abaixo.

$$x = \frac{u - c_x}{f_x} z \quad (6.21)$$

$$y = \frac{u - c_y}{f_y} z \quad (6.22)$$

$$z = \frac{-D}{A \frac{u-c_x}{f_x} + B \frac{u-c_y}{f_y} + C} \quad (6.23)$$

6.4 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi detalhada todas as componentes do processo de calibração do sistema, bem como as métodos ou aplicações utilizados em cada um deles. A calibração foi dividida em duas partes, a calibração do sensor ótico, com objetivo de estimar os parâmetros intrínsecos do mesmo, e a calibração do sistema, que tem o objetivo a estimação do eixo de rotação do projetor laser.

Foi ainda feita a descrição detalhada do algoritmo de reconstrução, apresentando todos os passos em comum com o processo de calibração, mas também todas as equações e métodos que permitiram obter informação tridimensional do sistema de visão.

No capítulo seguinte serão apresentadas as experiências realizadas e os respectivos resultados, com o objetivo de validar o método de calibração e caracterizar o erro do sistema.

Capítulo 7

Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da dissertação, sendo primeiro apresentados os resultados relativos à calibração e, posteriormente resultados relativos à reconstrução tridimensional utilizando o sistema desenvolvido.

7.1 *Setup* Experimental

Para a validação dos resultados de calibração utilizou-se um sistema desenvolvido para o veículo EVA, o qual é apresentado na Figura 7.1.



Figura 7.1: Sistema utilizado para obtenção de resultados.

Além deste sistema, foram utilizados um conjunto de objetos de dimensões conhecidas (Figura 7.2), com objetivo de validar os resultados obtidos.



Figura 7.2: Sistema utilizado para obtenção de resultados.

7.2 Calibração

A calibração do sistema é um processo com várias fases, como foi mencionado na secção anterior, sendo alguns deles possíveis fontes de introdução de erro, como iremos ver mais à frente neste capítulo.

Relembro que a primeira fase de calibração de um sistema de visão computacional, consiste na estimação dos parâmetros intrínsecos do sensor ótico. Para tal foi utilizada a aplicação do Matlab *Camera Calibrator*, referida anteriormente na secção 6.1. Além da estimação dos parâmetros intrínsecos e coeficientes de distorção, a aplicação apresenta o erro de reprojeção de cada canto do padrão de xadrez e o erro de reprojeção médio de cada imagem, permitindo assim a remoção de imagens com um elevado erro e a validação imediata dos parâmetros estimados.

Nas figuras 7.3 e 7.4 são apresentados os gráficos com o erro de reprojeção de um conjunto de imagens utilizadas para a calibração do sensor ótico, e a posição tridimensional do alvo face à câmara, estimada pela aplicação.

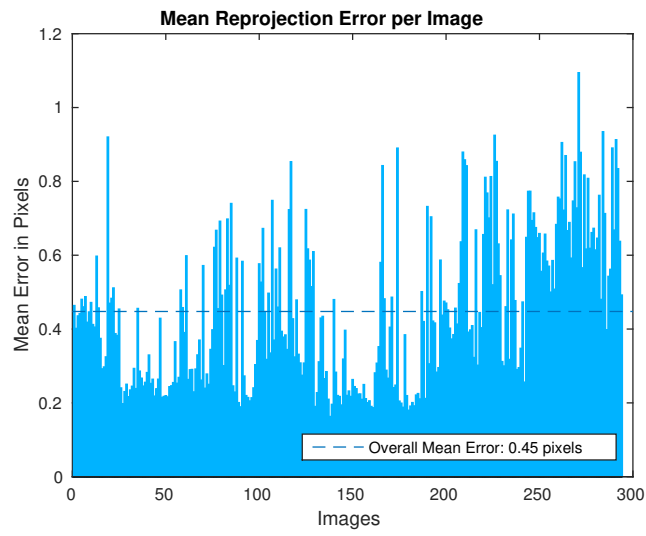


Figura 7.3: Erro médio de reprojeção em cada imagem.

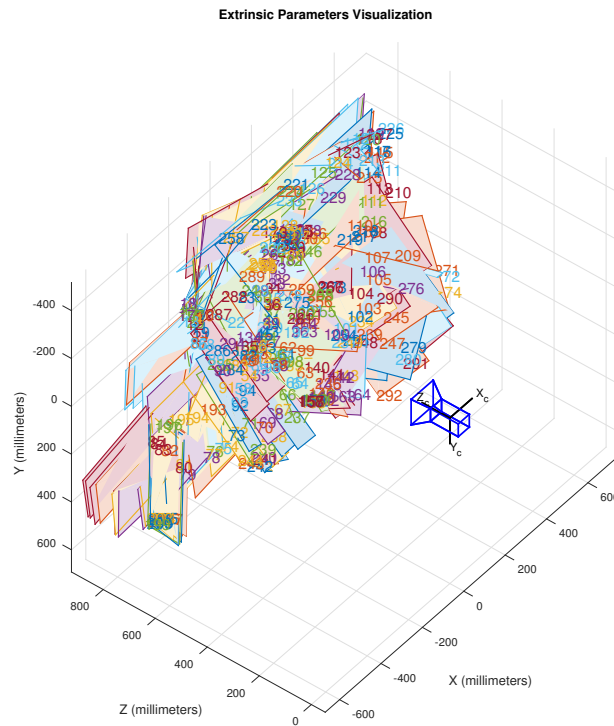


Figura 7.4: Parâmetros extrínsecos de cada imagem no referencial da câmara.

Após a obtenção dos parâmetros intrínsecos, damos então início ao processo de calibração apresentado na secção 6.2. Na Figura 7.5 são apresentados todos os planos calculados no referencial da câmara, permitindo assim estimar a equação do eixo de rotação do projetor laser, a qual é também na Figura.

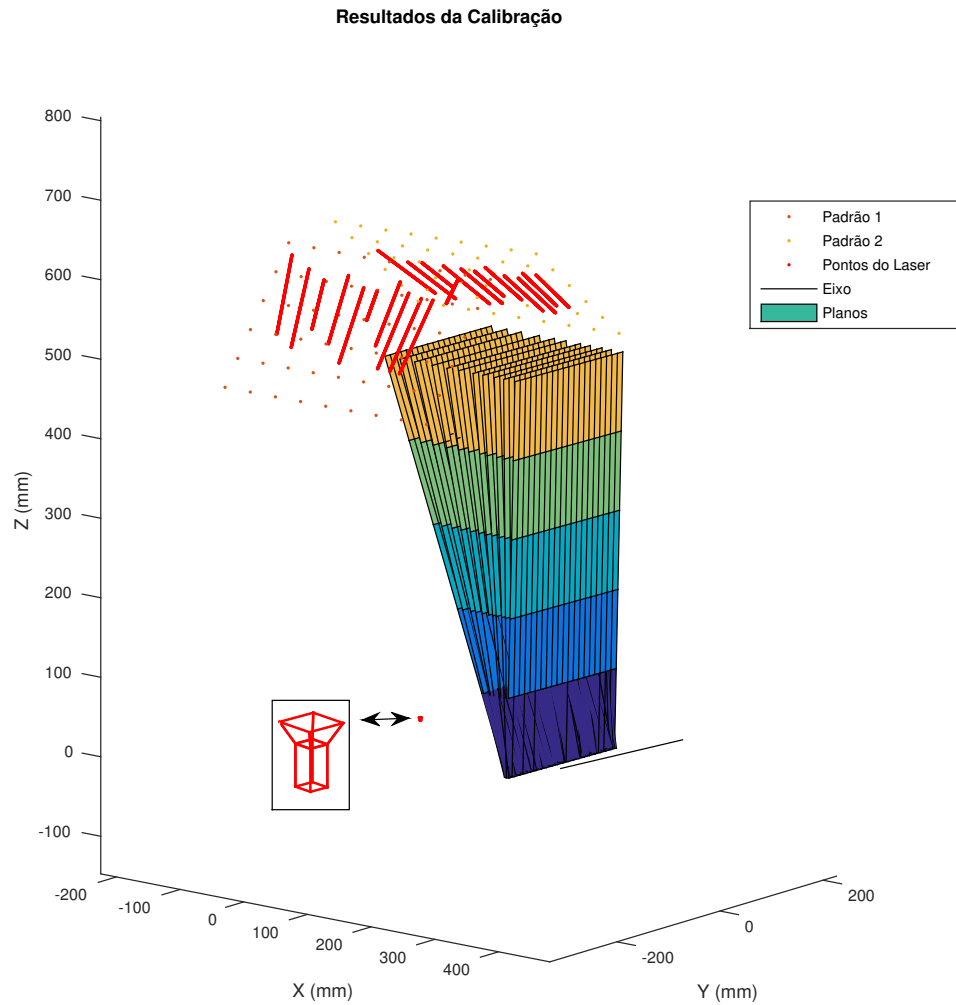


Figura 7.5: Resultados da Calibração.

As equações dos planos calculados e do eixo de rotação, são apresentadas nas tabelas 7.1 e 7.2, respetivamente. Contudo, para se proceder à validação dos resultados obtidos na fase de calibração é necessário utilizar o processo seguinte de reconstrução

tridimensional.

Plano	A	B	C	D	Encoder
1	0.93438	-0.024121	0.35545	-213.16	36961
2	0.94988	-0.026408	0.3115	-214.58	37234
3	0.95914	-0.025869	0.28175	-222.16	37486
4	0.97451	-0.030531	0.22225	-220.95	37827
5	0.98293	-0.032491	0.18111	-224.35	38108
6	0.98719	-0.03247	0.15624	-230.65	38325
7	0.99419	-0.033528	0.10231	-227.34	38620
8	0.99692	-0.034952	0.07023	-227.04	38809
9	0.99861	-0.036188	0.0383	-229.63	39037
10	0.9993	-0.036104	0.00976	-230.15	39225
11	0.99897	-0.03742	-0.02585	-230.13	39453

Tabela 7.1: Componentes das equações dos planos calculados.

Vetor Direção			Ponto do eixo (<i>mm</i>)		
x	y	z	x	y	z
-0.037107	-0.99893	0.027645	230.47	0	-7.2743

Tabela 7.2: Vetor de direção e ponto do eixo estimado.

7.3 Reconstrução

Após a obtenção das equações dos planos e do eixo de rotação do sistema apresentado na Figura 7.1, foram realizados diversos *scans* dos objetos apresentados anteriormente, segundo o método desenvolvido. Os *scans* realizados foram efetuados num ambiente subaquático, utilizando a piscina do LSA, como se pode observar na Figura 7.6.

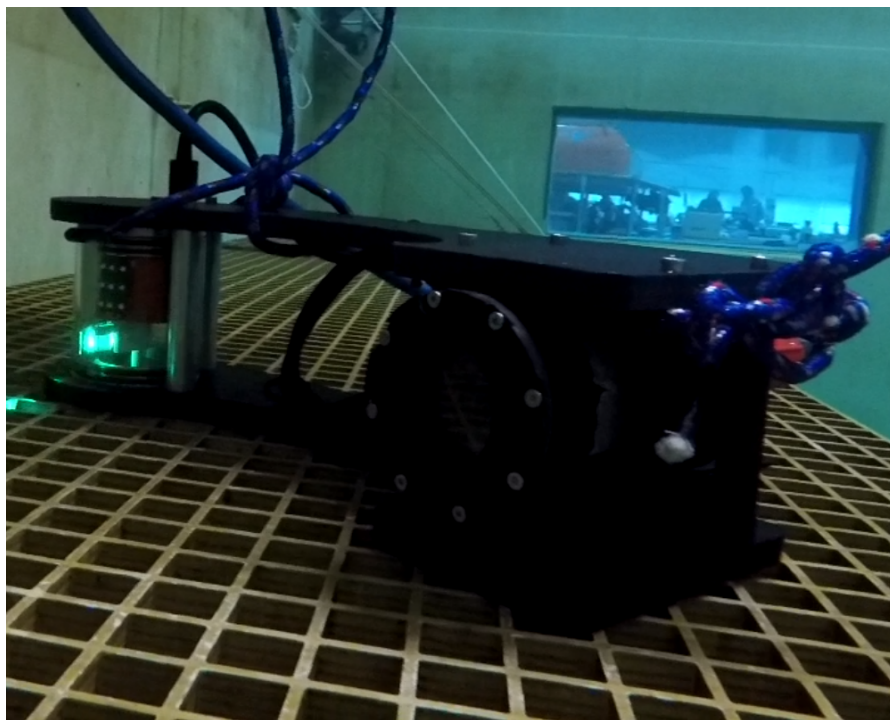


Figura 7.6: Sistema SLS utilizado para validação de resultados em ambiente subaquático.

O primeiro objeto utilizado para validar o processo de reconstrução tridimensional foi o alvo de calibração, uma vez que já se encontrava corretamente posicionado.

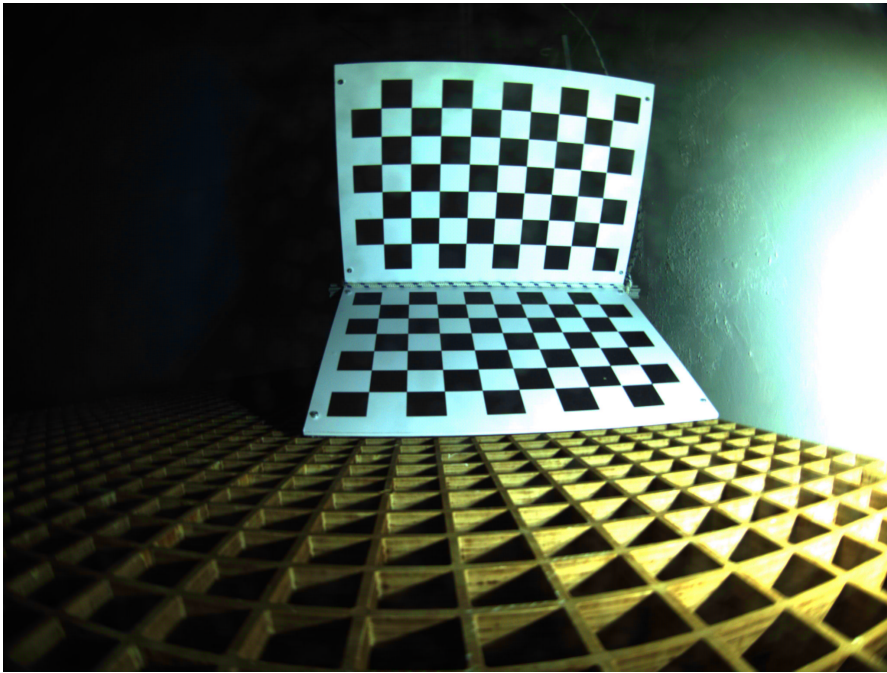


Figura 7.7: Imagem de leds do alvo de calibração.

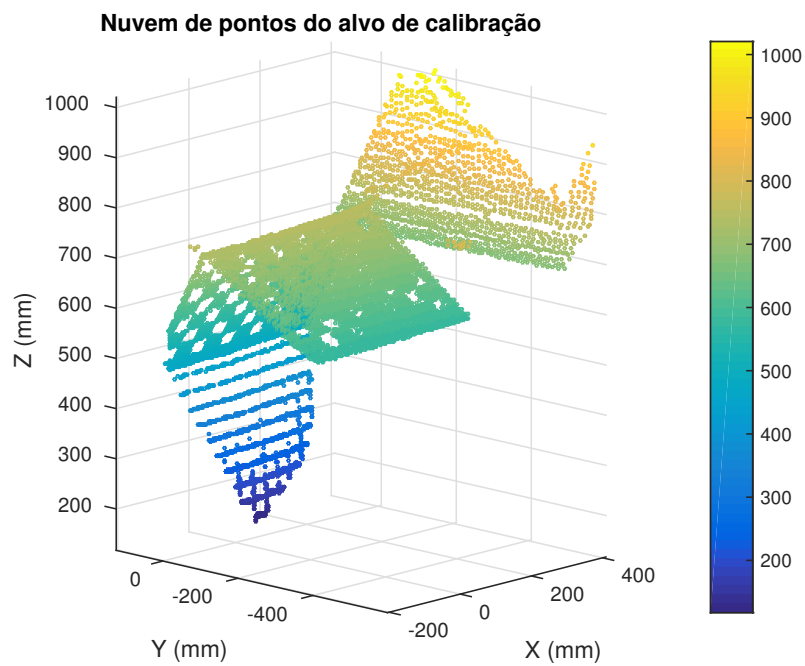


Figura 7.8: *Point Cloud* do alvo de calibração.

Embora seja fácil identificar o objeto na nuvem de pontos, apresentado na Figura 7.8, foi desenvolvido um método para atribuição de cor a cada um dos pontos da nuvem. Devido ao facto de estes testes serem realizados com o sistema estacionário, torna-se possível obter a cor de cada ponto da nuvem utilizando a imagem de luz e, assim atribuir a cor observada aos pixels segmentados na imagem de laser. Para além da atribuição de cor à *Point Cloud*, foi utilizada uma ferramenta de ROS, Rviz, que nos permite observar a nuvem de pontos em *real time*, sendo as imagens seguintes capturadas utilizando esta aplicação.

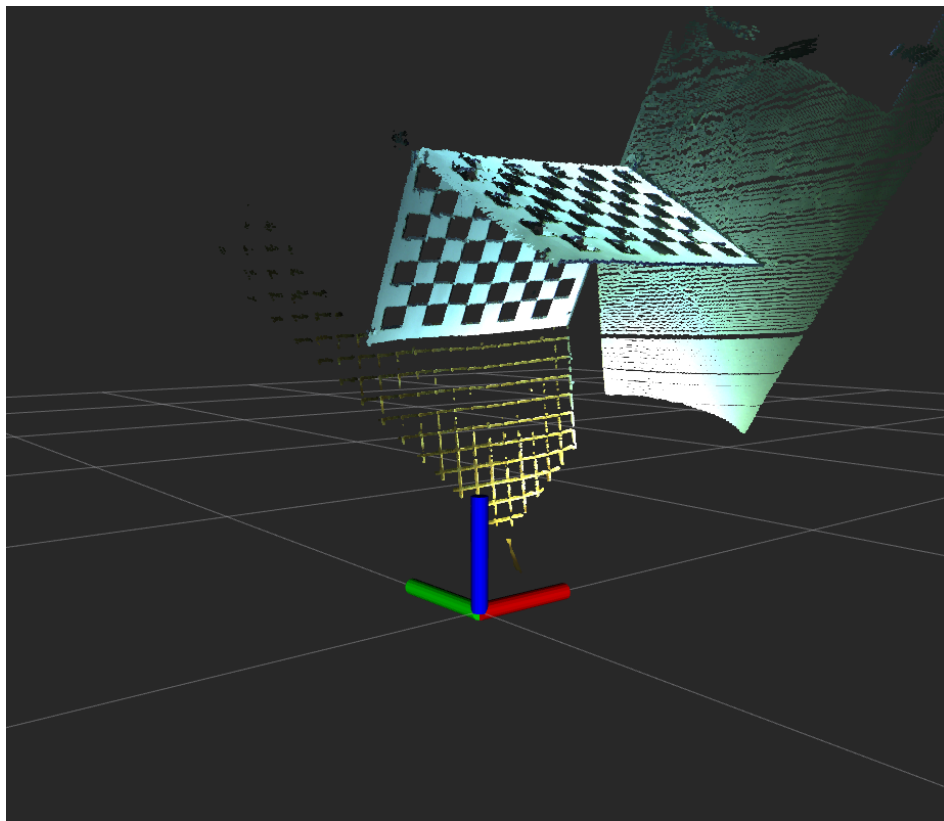


Figura 7.9: *Point Cloud* do alvo de calibração com cor, perspectiva 1.

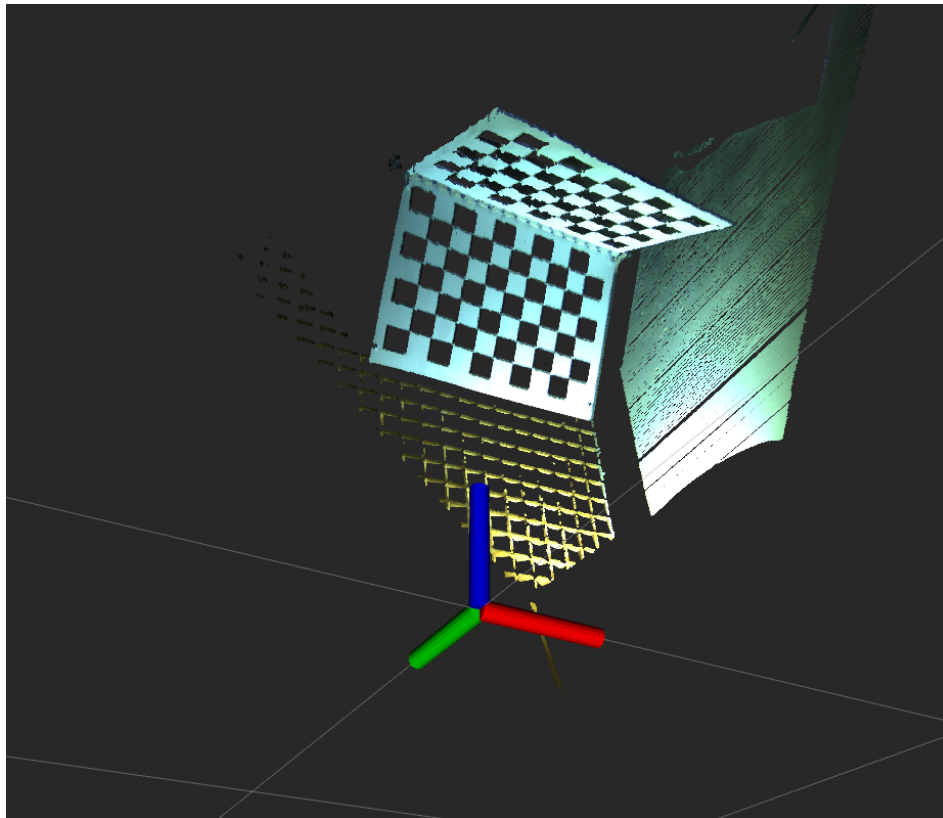


Figura 7.10: *Point Cloud* do alvo de calibração com cor, perspectiva 2.

Nas Figuras 7.9 e 7.10 são apresentadas duas perspectivas da nuvem de pontos do alvo de calibração, sendo a cor de cada ponto obtida através da imagem em 7.7. Embora as Figuras apresentem o resultado final, é importante mencionar que a atribuição de cor é um processo realizado em *real time* e em simultâneo com a segmentação das linhas de laser.

Outros objetos foram reconstruídos, e os resultados obtidos são agora apresentados nas Figuras abaixo.

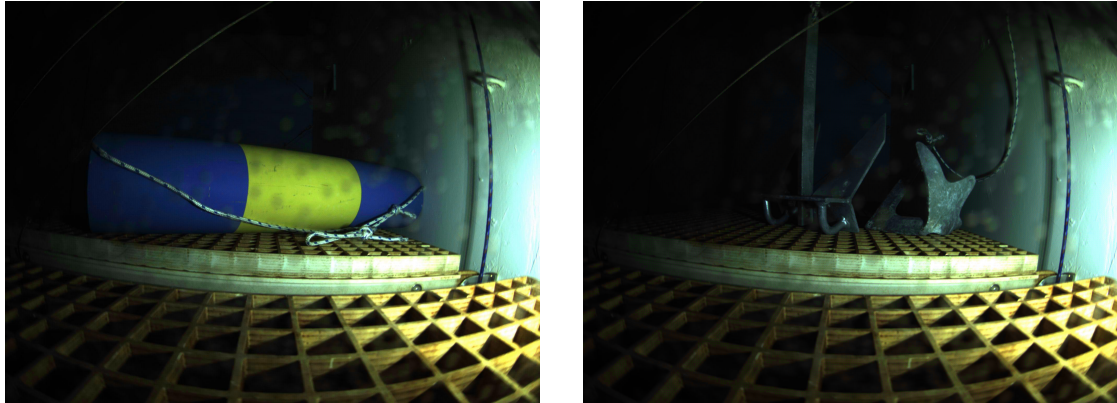


Figura 7.11: Imagens de luz de outros objetos reconstruídos.

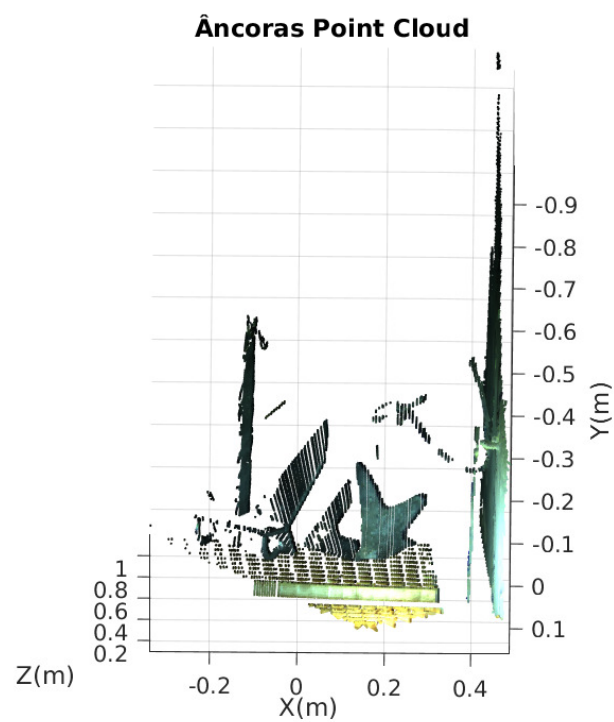


Figura 7.12: *Point Cloud* das âncoras.

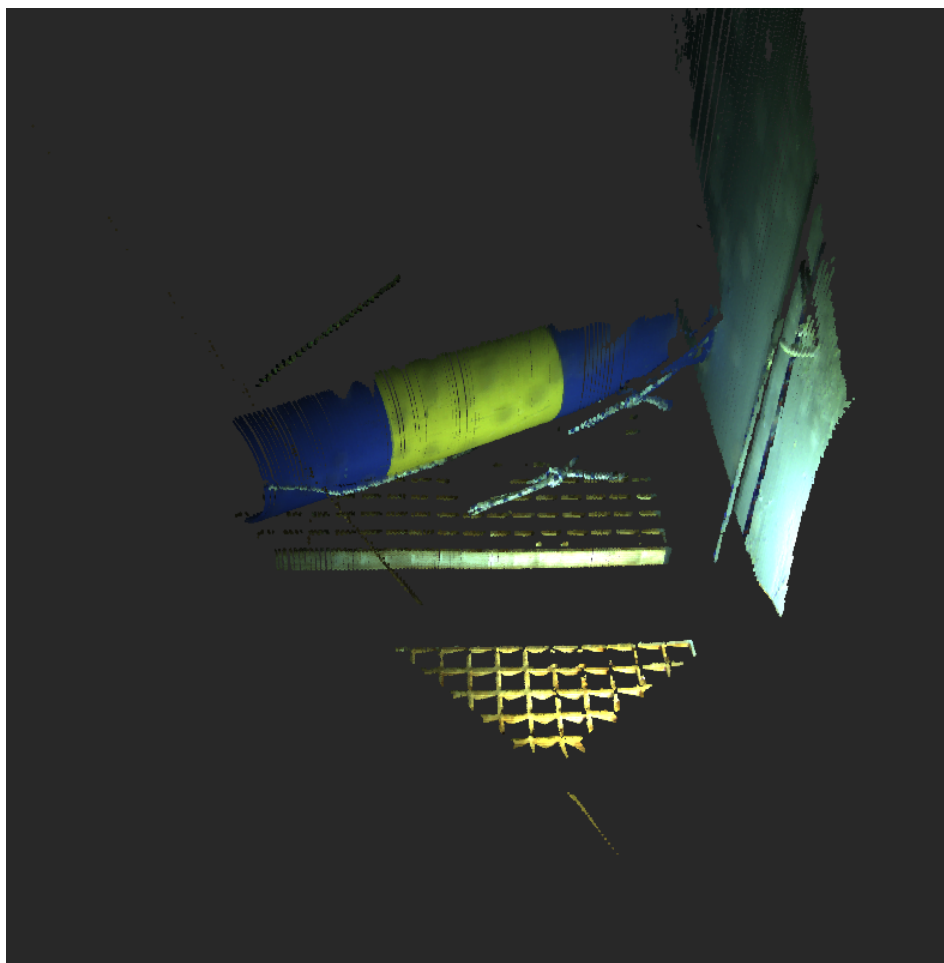


Figura 7.13: *Point Cloud* do tubo.

7.4 Caracterização do sistema

Ao longo desta secção serão apresentados os resultados dos testes obtidos para caracterizar o erro do sistema nos seus três eixos (x , y e z). Desta forma, foram ainda realizadas experiências para compreender como alguns dos parâmetros do sistemas afetam a resolução e a quantidade de pontos obtidos.

7.4.1 Análise do erro

Com o objetivo de avaliar o erro obtido no processo de reconstrução, efetuou-se o varrimento de um dos padrões utilizados para a calibração, pois estes permitem-nos ter um *ground truth* de comparação, utilizando a imagem de led para obter os parâmetros extrínsecos do mesmo. Na Figura 7.14, podemos observar a imagem da qual foram estimados os parâmetros extrínsecos e os cantos do padrão segmentados. Posteriormente, os parâmetros extrínsecos seriam utilizados para projetar os pontos reconstruídos do padrão de xadrez no seu referencial e assim obter uma medida de erro em Z .

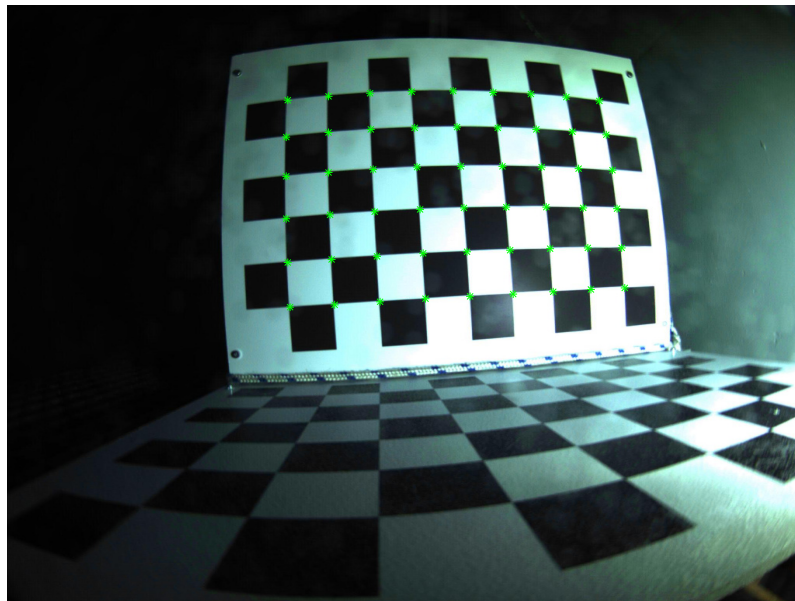


Figura 7.14: Imagem de Led do padrão utilizado para a análise do erro.

Após obter a rotação e a translação do padrão, foi possível sobrepor os cantos do mesmo sobre a nuvem de pontos e, assim, segmentar os pontos pertencentes ao alvo, como se pode observar na Figura 7.15. Na Figura 7.16 são apresentados os pontos segmentados projetados no referencial do alvo.

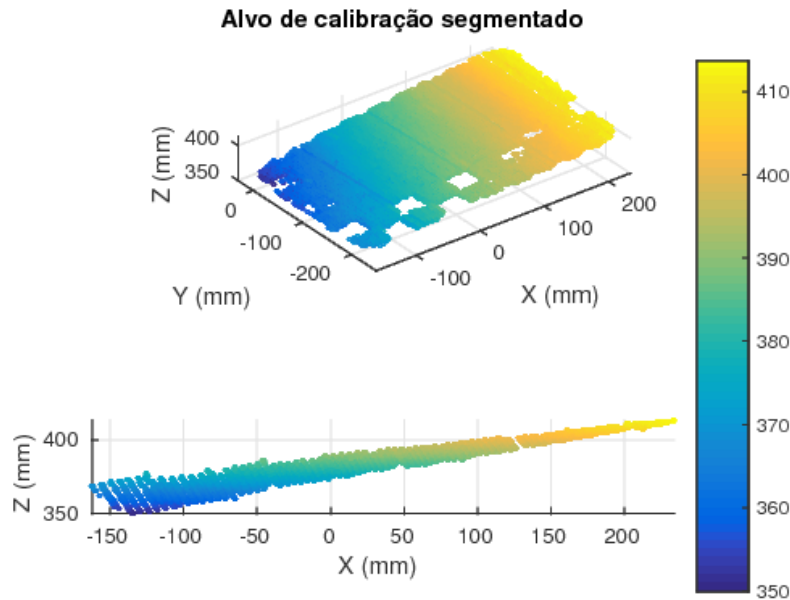


Figura 7.15: Alvo de calibração segmentado na nuvem de pontos.

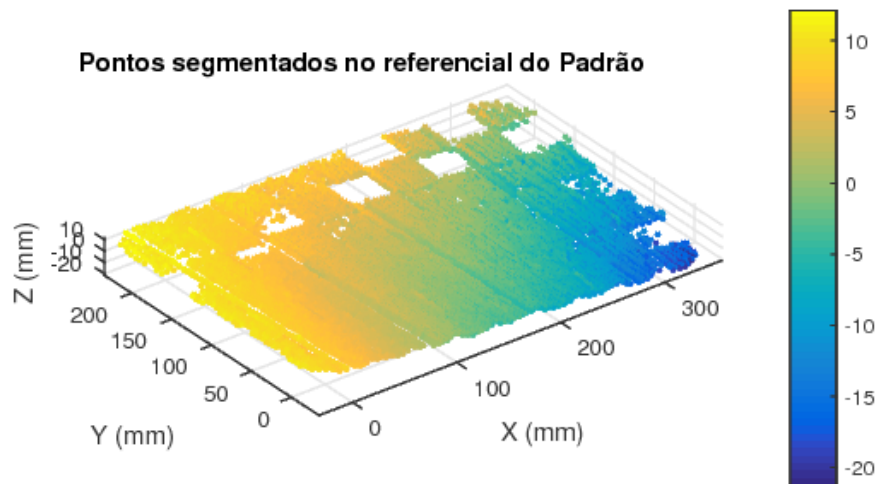


Figura 7.16: Projeção dos pontos segmentados no referencial do padrão.

Com estes resultados foi possível detetar um torção na nuvem de pontos, a qual se deve a um erro de estimação do eixo de rotação, como se pode observar nas Figuras acima. Com o objetivo de analisar de melhor forma o erro em Z, calculou-se o z^2 , o qual pode ser observado na Figura 7.17.

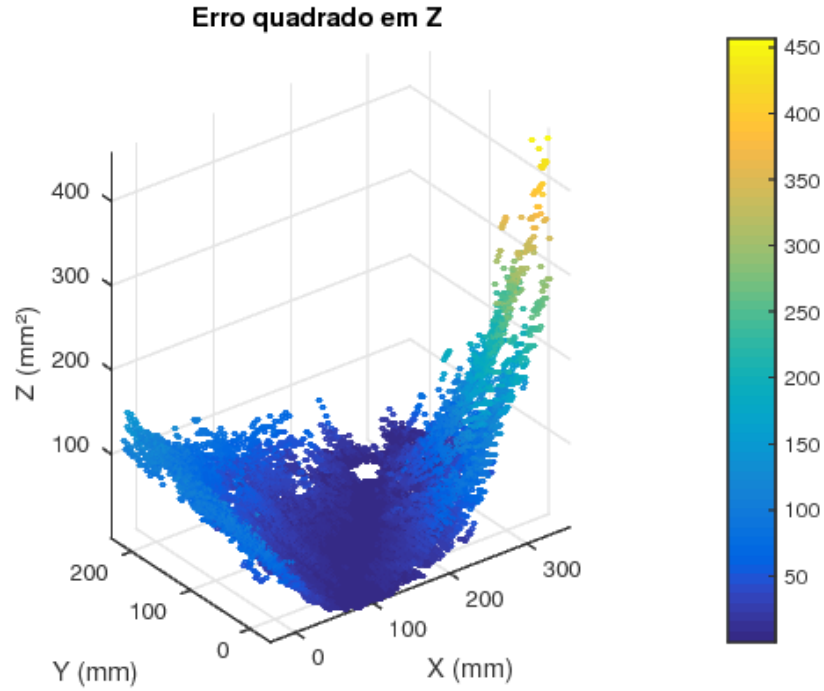


Figura 7.17: Z^2 dos pontos segmentados.

Desta forma, para minimizar a torção existente na nuvem de pontos, desenvolveu-se uma método de análise posterior à calibração. Como foi mencionado anteriormente, para a estimação do eixo de rotação foram utilizados as retas de intersecção entre todos os planos, dois a dois, com objetivo de obter a melhor estimação do eixo. Contudo, a estimação das equações do plano de laser afeta diretamente o cálculo das retas de intersecção e, por sua vez, todos os processos anteriores, tais como segmentação, correção da distorção e calibração do sensor ótico, que induzem erro na estimação das equações dos planos. Deste modo, considerou-se todas as retas de intersecção como possíveis eixos de rotação, levando ao desenvolvimento de um processo de reconstrução com todos os eixos e, posteriormente a análise em Matlab das nuvens de pontos obtidas por cada eixo, para se determinar qual o eixo mais próximo do real, entre todos.

Da calibração apresentada anteriormente resultaram 11 equações do plano de laser. No entanto, o algoritmo desenvolvido apenas utiliza planos com um determinado desfaseamento angular para o cálculo das retas de interseção. Ainda assim e, após uma filtragem obteve-se 44 eixos possíveis, como demonstra a Figura 7.18.

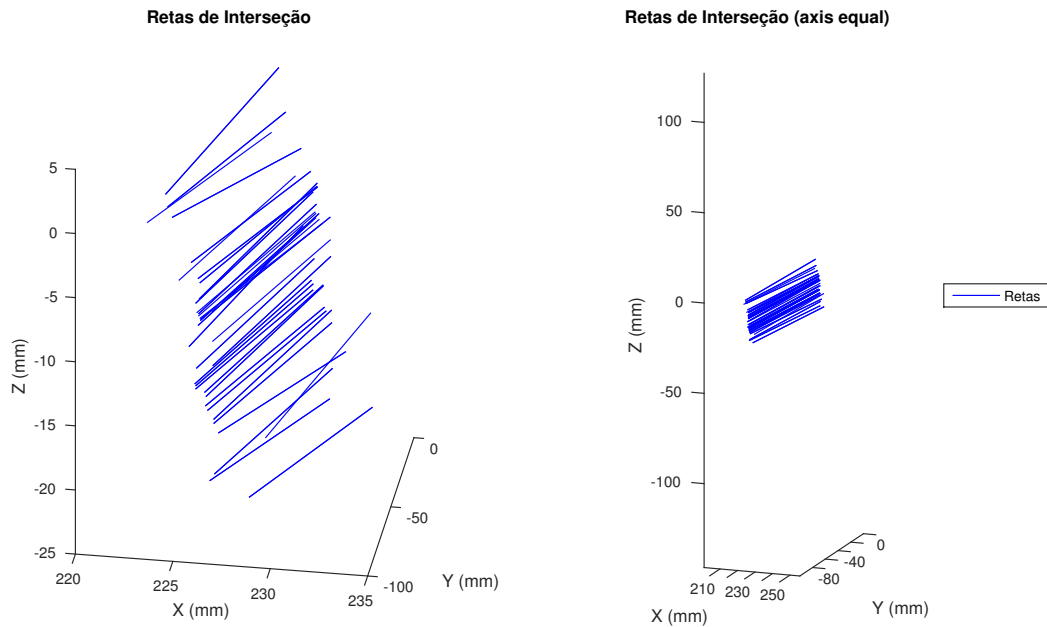


Figura 7.18: Retas de intersecção selecionadas para possível eixo de rotação.

Com a utilização do novo processo obteve-se então 64 *point clouds*, as quais foram analisadas pelo método anterior, projetando os pontos calculados no referencial do padrão. Na tabela 7.3 é apresentada a equação do melhor eixo obtido e, nas Figuras 7.20 e 7.19 os resultados obtidos da análise da nuvem de pontos gerada utilizando este eixo.

Eixo	Vetor Direção			Ponto do eixo (mm)		
	x	y	z	x	y	z
1	-0.037107	-0.99893	0.027645	230.47	0	-7.274
2	-0.034494	-0.99935	0.010229	229.297	0	-9.158

Tabela 7.3: Equações dos eixos, em 1 eixo estimado pela calibração, e em 2 pelo método de análise.

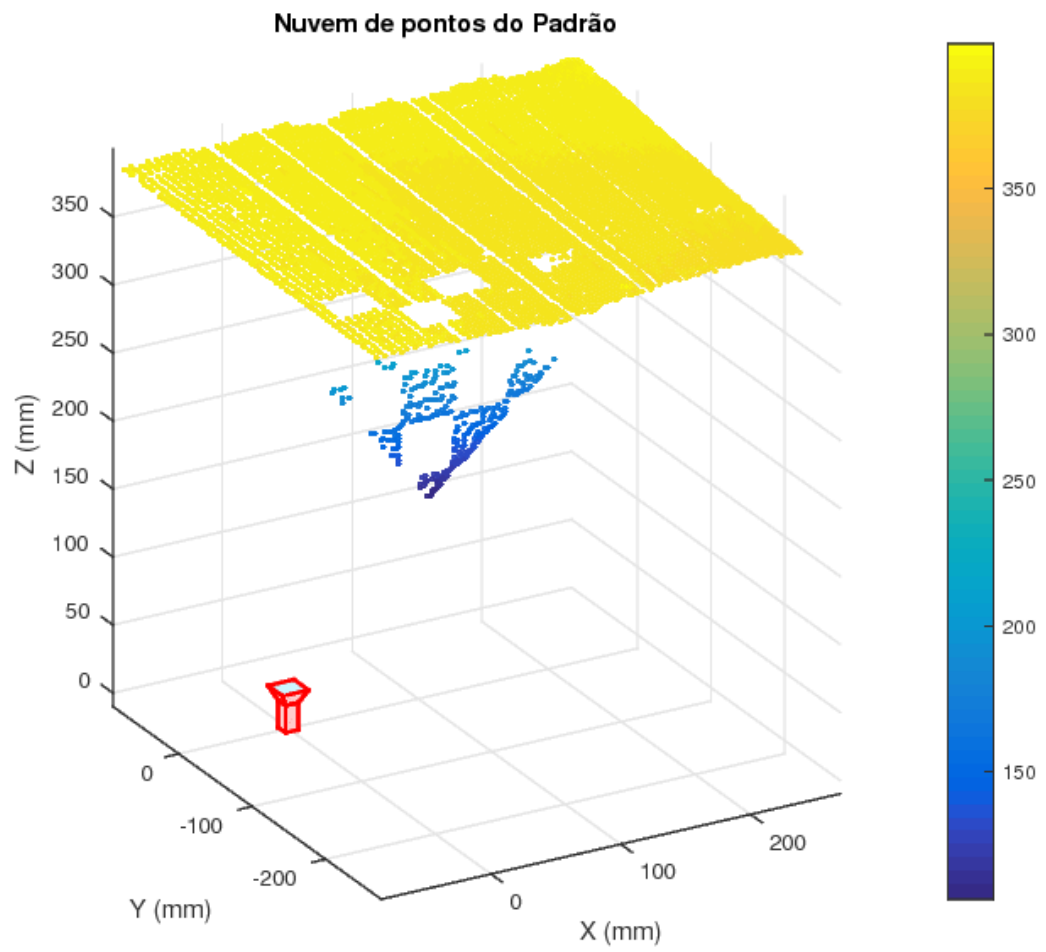


Figura 7.19: *Point Cloud* obtida com o novo eixo.

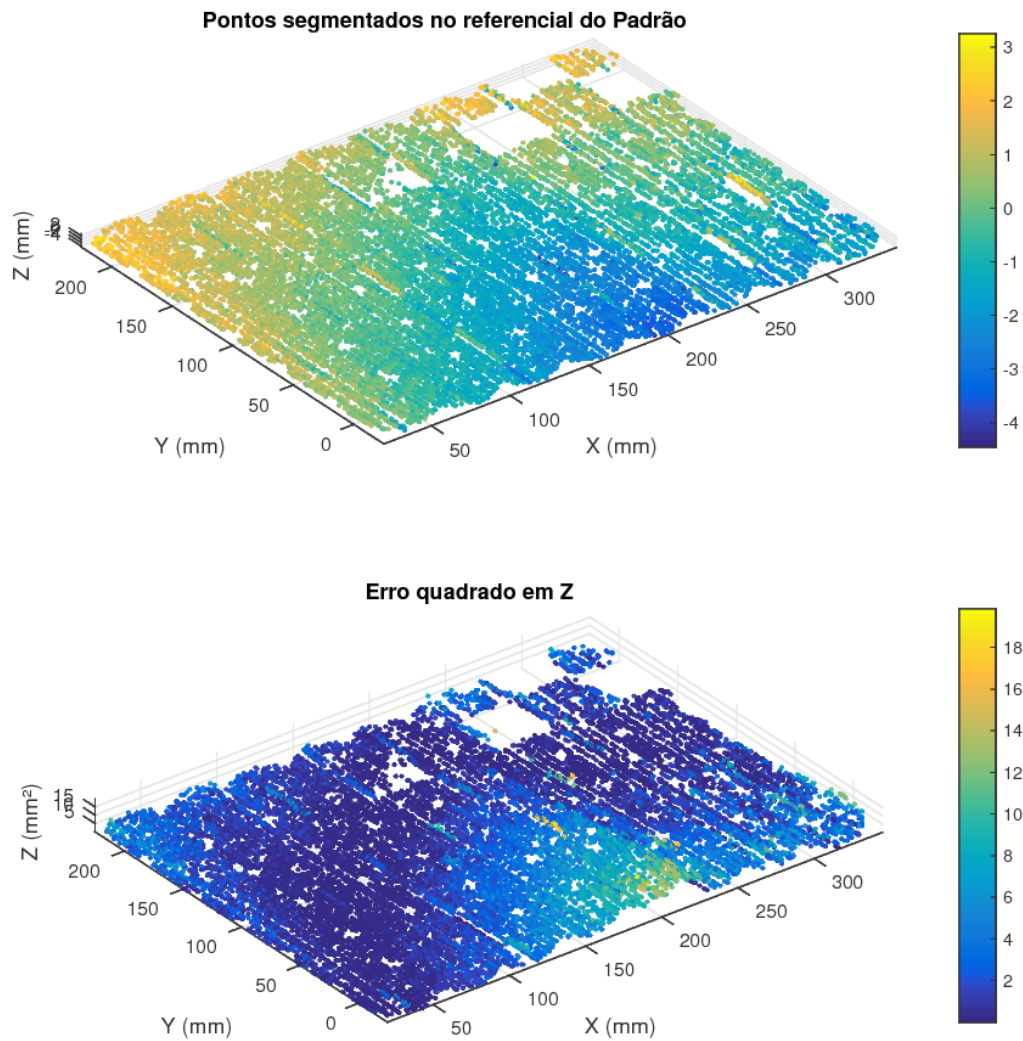


Figura 7.20: Projeção dos pontos segmentados no referencial do padrão e erro quadrado em z.

Com os resultados apresentados acima, podemos concluir que o erro do sistema em z, é aproximadamente de $\pm 4mm$, contudo não existe um método simples para determinar o erro nos restantes eixos. Assim, para obter uma aproximação do erro médio utilizou-se a nuvem de pontos colorida do padrão de xadrez (Figura 7.21), para analisar o tamanho dos quadrados.

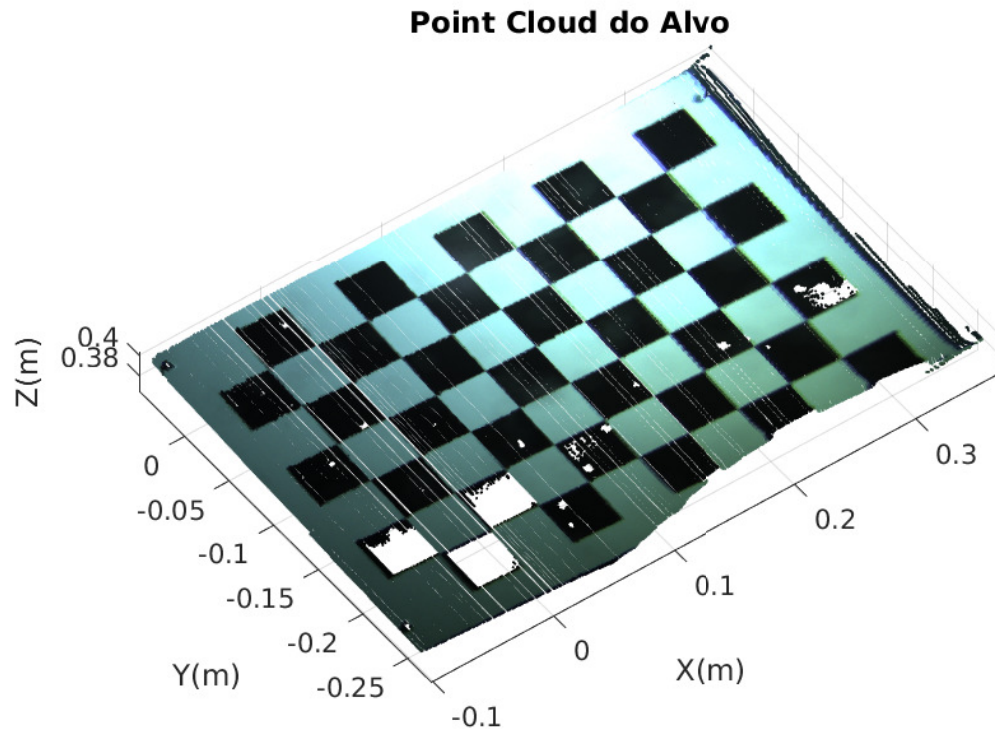


Figura 7.21: *Point Cloud* do alvo com cor.

7.4.2 Erro em x e y

O primeiro passo consistiu em aplicar um nível de *threshold* de modo a separar os pontos de cor branca e preta da nuvem de pontos. Posteriormente percorreu-se a *point cloud* com o objetivo de identificar descontinuidades na mesma. Desta forma, foi possível obter uma aproximação das linhas horizontais do padrão de calibração, Figura 7.22.

Posteriormente, com os parâmetros extrínsecos calculados anteriormente, projetou-se os cantos do alvo segmentados na imagem de led no referencial da câmara, de modo a poder sobrepor os dois conjuntos de pontos (Figura 7.23).

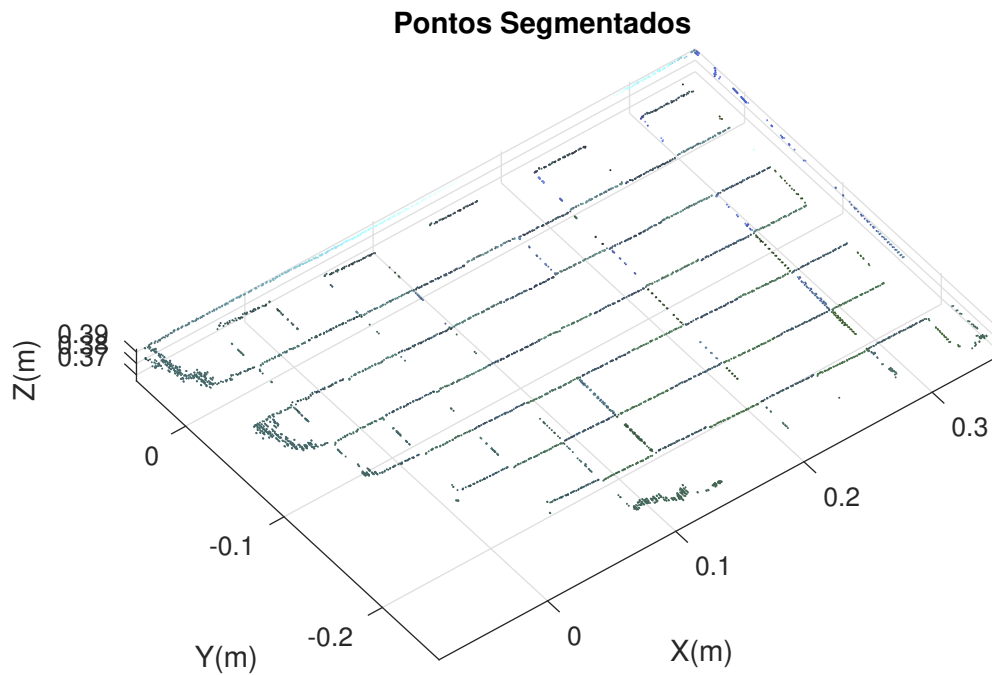


Figura 7.22: Pontos segmentados da *Point Cloud* do alvo.

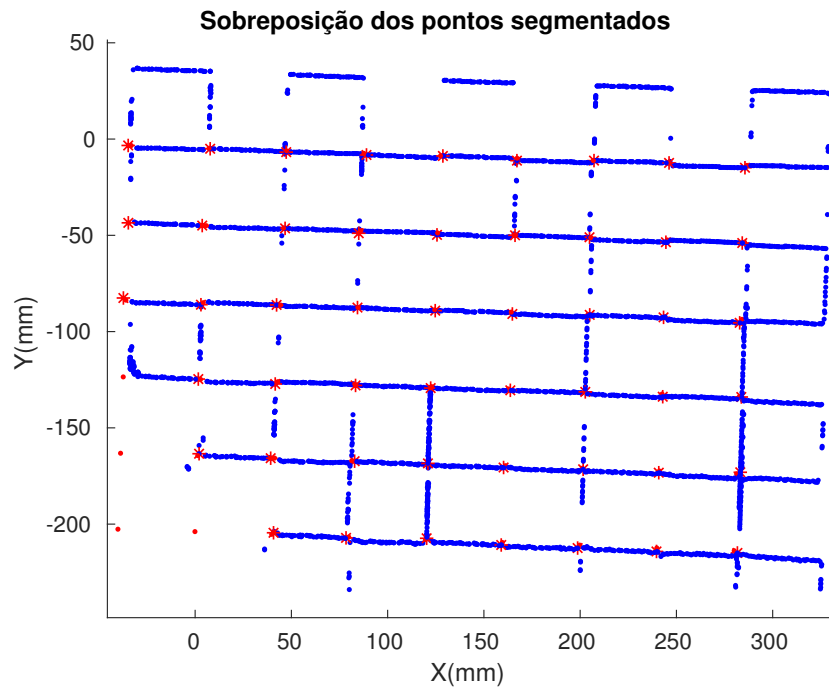


Figura 7.23: Sobreposição dos dois conjuntos de pontos.

Com o objetivo de identificar os cantos do padrão nos pontos segmentados, percorreu-se a nuvem de pontos na procura dos pontos mais próximos dos cantos projetados utilizando os parâmetros extrínsecos. Ao realizar esta operação, estamos a assumir que os cantos dos alvo estão presentes nas linhas segmentadas (Figura 7.23), deste modo os valores de erro apresentados abaixo serão apenas aproximações e não valores exatos.

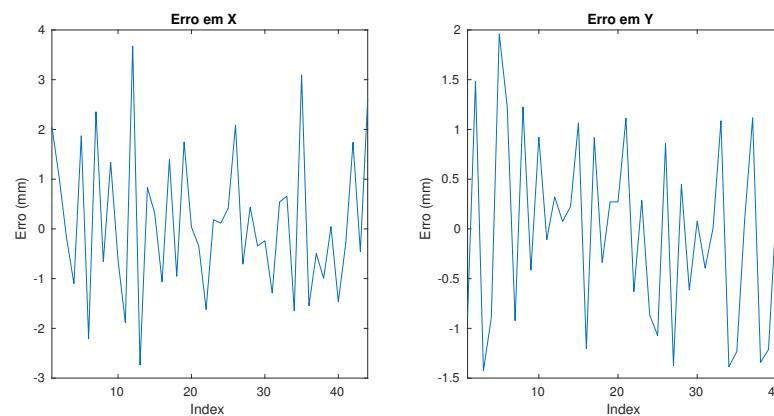


Figura 7.24: Erro em x e y das arestas calculadas.

Com alguns dos cantos selecionados, calculou-se a distância entre cantos vizinhos, sabendo que cada quadrado do padrão possui uma aresta de 40 mm, sendo o erro em x e y apresentado na Figura 7.24. Na tabela 7.4 estão refletidos os valores referentes ao erro médio e o seu respetivo desvio padrão, para cada eixo (x e y).

Eixo	Erro Médio (<i>mm</i>)	Desvio Padrão (<i>mm</i>)	Erro Quadrático Médio (<i>mm</i>)
x	0.1298	1.4743	2.1409
y	-0.0435	0.9357	0.8561

Tabela 7.4: Tabela do Erro médio e desvio padrão em x e y.

7.4.3 Passo

Uma das propriedades do sistema desenvolvido é a possibilidade de configurar a resolução angular pretendida, isto é feito controlando o incremento angular dado ao servomotor entre imagens de laser. Assim nas Figuras 7.25 e 7.26 são apresentadas dois *scans* com resoluções diferentes para demonstrar esta propriedade, sendo o movimento composto em dois movimentos da direita para a esquerda e retorno à posição inicial (direita da imagem).

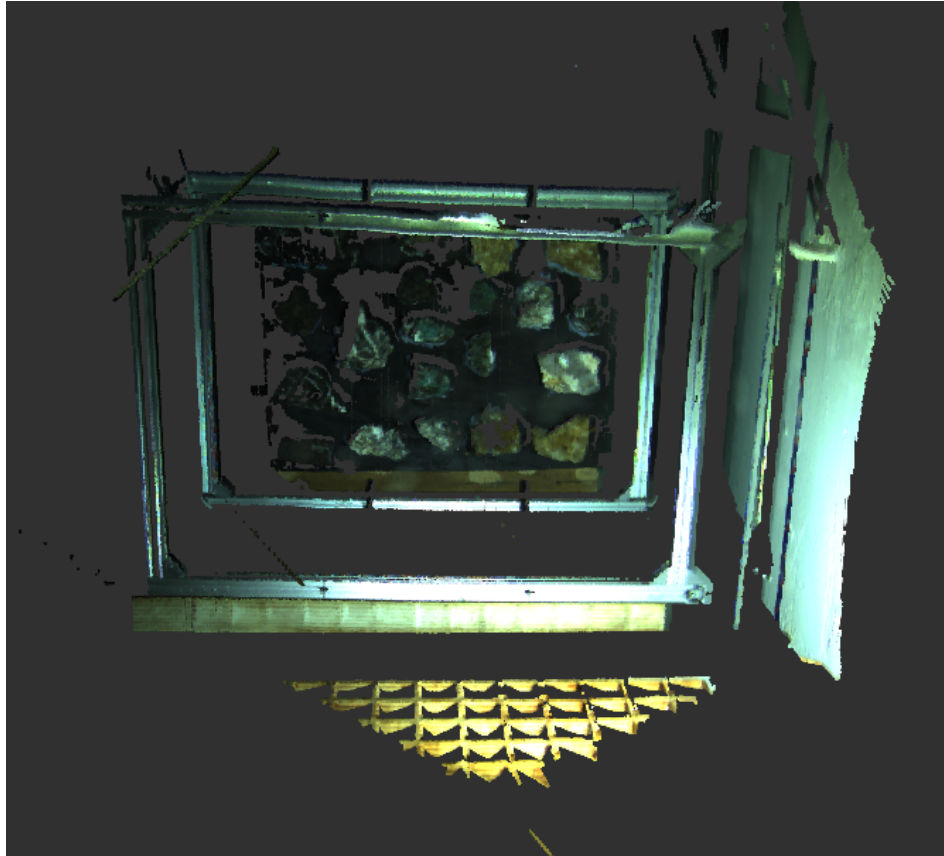


Figura 7.25: *Point Cloud* com passo de 0.44° .

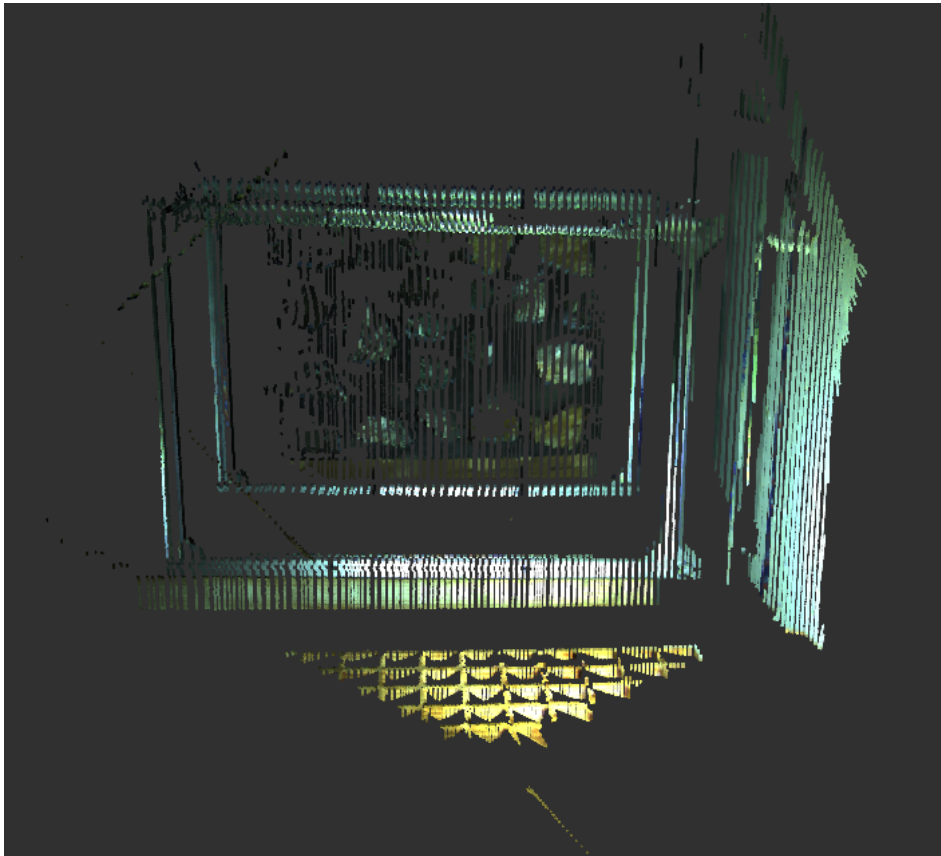


Figura 7.26: *Point Cloud* com passo de 1.32° .

O primeiro *scan* (Figura 7.25) foi realizado com um passo de 0.44° e, o segundo (Figura 7.26) de 1.32° . Na Tabela abaixo é apresentada a densidade de pontos dos dois *scans*.

<i>Scan</i>	Incremento angular	Imagens de Laser	Pontos
1	0.44°	421	≈ 250000
2	1.32°	115	≈ 75000

Tabela 7.5: Dados das duas *Point Clouds*.

Embora a experiência seja realizada nas mesmas condições, não podemos efetuar uma comparação intensa sobre o número de pontos obtidos e imagens segmentadas, pelo facto de não se poder garantir que o laser tenha passado nas mesmas posições nos dois *scans*. Contudo, podemos comprovar a possível configuração da resolução do sistema, a qual pode ser parametrizada consoante o tipo aplicação.

7.4.4 Paralelismo

Utilizando a segmentação feita anteriormente, entre as cor preta e branco (Figura 7.22), segmentaram-se agora os pontos de cada uma das retas horizontais (Figura 7.27), estimando-se a equação de cada uma delas, com o objetivo de avaliar o paralelismo entre as mesmas.

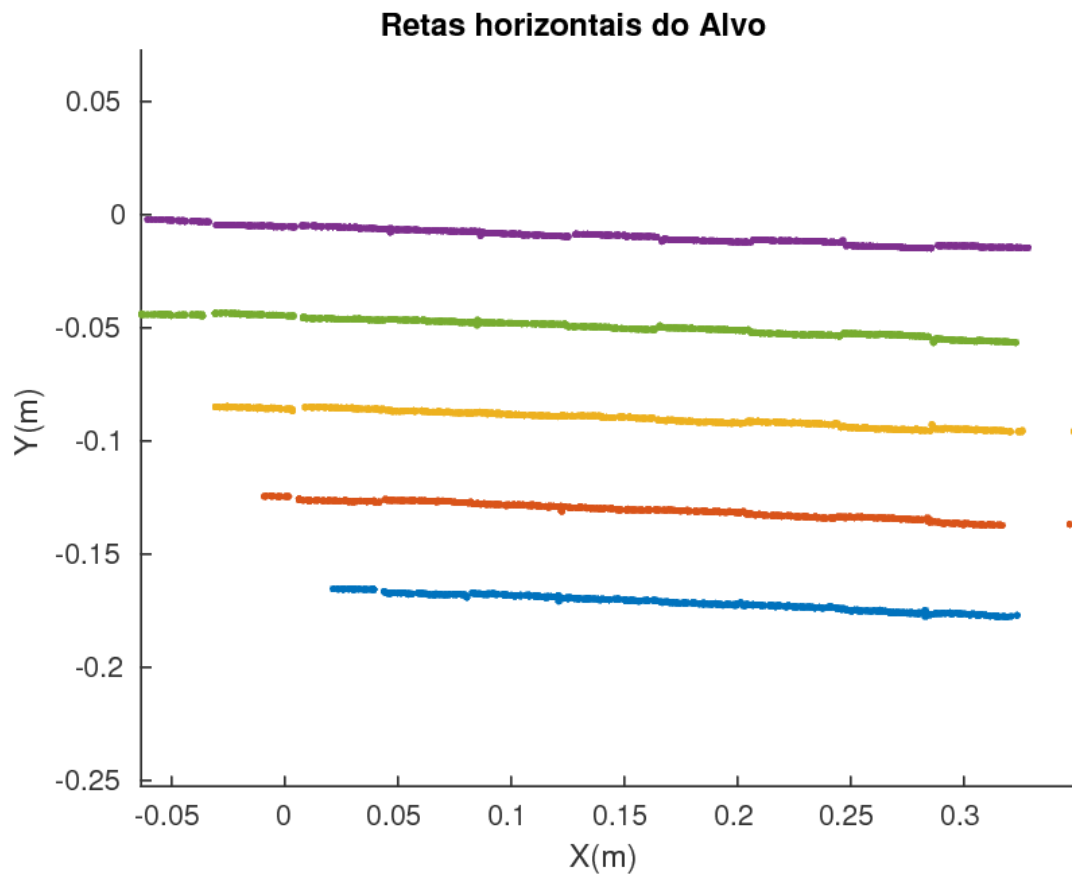


Figura 7.27: Retas horizontais do alvo de calibração.

Na tabela 7.6 são apresentadas as equações das retas segmentadas e, posteriormente realizou-se o cálculo do ângulo (θ) entre as mesmas, sendo a condição de paralelismo de $\theta = 0$.

Vetor Direção			Ponto da Reta (<i>mm</i>)		
x	y	z	x	y	z
0.9992	-0.0401	-0.0083	0.1721	-0.1715	0.3829
0.9993	-0.0368	-0.0091	0.1563	-0.1306	0.3838
0.9994	-0.0332	-0.0086	0.1495	-0.0901	0.3846
0.9995	-0.0320	-0.0074	0.1377	-0.0095	0.3863
0.9994	-0.0328	-0.0088	0.1360	-0.0496	0.3855

Tabela 7.6: Equações das retas segmentadas.

Reta	1	2	3	4	5
1	x	0.1983°	0.3977°	0.4702°	0.4198°
2	0.1983°	x	0.2056°	0.2911°	0.2264°
3	0.3977°	0.2056°	x	0.1009°	0.0233°
4	0.4702°	0.2911°	0.1009°	x	0.0944°
5	0.4198°	0.2264°	0.0233°	0.0944°	x
Valor médio			0.2428°		
Desvio Padrão			0.1503°		

Tabela 7.7: Ângulo entre duas retas.

Na tabela 7.7, além dos ângulos entre cada duas retas, são apresentados o valor médio e o desvio padrão em graus. Apesar de o valor médio ser ligeiramente elevado é importante referir que tal como o erro em x e y , calculado anteriormente, este é influenciado pelos processos de segmentação aplicados às nuvens de pontos, podendo estes introduzir erros nos valores calculados.

7.4.5 Tempo de Exposição e Ganho do sensor ótico

Com o objetivo de compreender como a intensidade do laser afeta a *Point Cloud* realizaram-se 4 *scans* da mesma superfície, para analisar o número de pontos total de cada *scan*. Os varrimentos foram realizados com diferentes tempos de exposição da imagem de laser e tempo *on* do emissor laser, sendo estes de 2, 4, 10 e 15 ms. Na Figura 7.28 são apresentadas 4 imagens, uma de cada varrimento, respectivamente.



Figura 7.28: Imagens de laser em cada um dos *scans*, 2, 4, 10 e 15 ms, respectivamente.

Na tabela 7.8 são apresentados os valores relativos ao número de pontos em cada uma das experiências, além disso na Figura 7.29 é possível observar as quatro nuvens de pontos obtidas.

Tempo de Exposição	Numero de Pontos
2 ms	≈ 85300
4 ms	≈ 134700
10 ms	≈ 187000
15 ms	≈ 207700

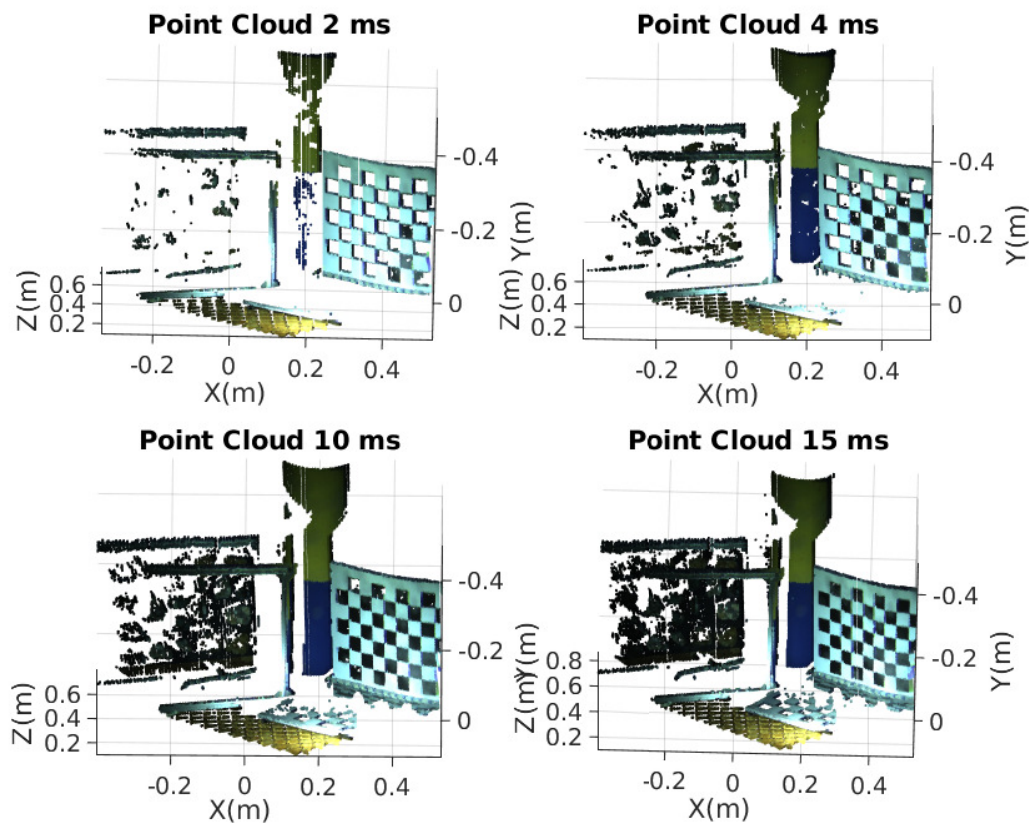
Tabela 7.8: Numero de pontos em cada *scan*.

Figura 7.29: Nuvens de Pontos obtidas nos diferentes varrimentos.

Para além do tempo de exposição, o ganho da câmara é um parâmetro que permite ajustar a intensidade dos pixels na imagem sem alterar o tempo de exposição. Com o objetivo de compreender como este parâmetro afeta o número de pontos da nuvem de pontos, realizaram-se 3 testes com diferentes ganhos na imagem de laser, 1, 2 e 3 ou 0.179, 0.359 e 0.537 *dB*. Na Figura 7.30 é possível observar as diferentes imagens obtidas.

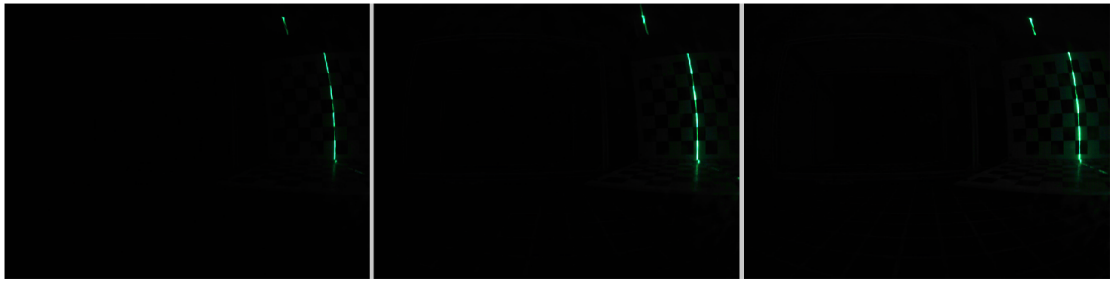


Figura 7.30: Imagens de laser com os diferentes ganhos.

Como anteriormente, analisou-se cada uma das nuvens de pontos, obtendo um valor aproximado do número de pontos em cada uma delas (tabela 7.9). Na Figura 7.31 são apresentadas as 3 *Point Clouds* obtidas para cada um dos testes.

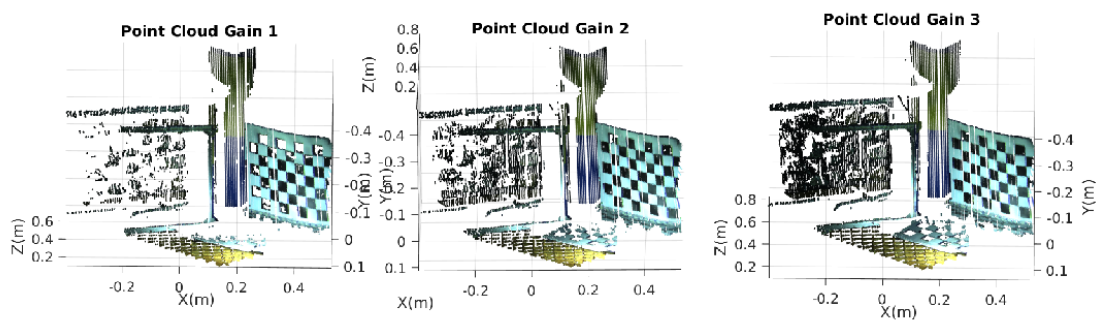


Figura 7.31: Nuvens de pontos obtidas nos diferentes varrimentos.

Ganho	Numero de Pontos
1	≈ 86000
2	≈ 109700
3	≈ 140000

Tabela 7.9: Numero de pontos em cada *scan*.

7.5 Resumo do Capítulo

Ao longo deste capítulo foram apresentadas as experiências efetuadas de modo a validar o método de calibração e reconstrução, tais como: ajuste do tempo *on* do laser, ganho da câmara, do passo de rotação do motor e análise do erro. Estas experiências permitiram realizar uma caracterização do sistema.

Através das nuvens de pontos do alvo de calibração e, do cálculo do Z^2 , conclui-se que o sistema apresenta erros reduzidos (inferiores a 4 mm) e satisfatórios, num ambiente subaquático. Além disso, foi ainda possível validar a aquisição de imagens de luz visível e de laser em simultâneo, o que permitiu ao desenvolvimento de um método de coloração das nuvens de pontos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 8

Conclusão e Trabalho Futuro

A dissertação aborda o desenvolvimento de um sistema de luz estruturada para percepção em ambientes subaquáticos, tendo o seu foco principal a problemática da calibração adjacente a um sistema deste tipo.

Inicialmente, foi realizado uma análise dos métodos utilizados no âmbito da percepção subaquática, levando assim à escolha do tipo de sistema a implementar e, dando início a uma pesquisa relativa aos métodos utilizados na calibração de um sistema de luz estruturada com um emissor laser rotativo. Rapidamente se compreendeu que ainda não existe um método padrão, sendo esta uma área em desenvolvimento, sendo por isso pertinente o estudo e desenvolvimento de um novo método.

O método de calibração desenvolvido possibilita a calibração de um sistema de luz estruturada com laser rotativo, com recurso a um alvo de calibração tridimensional, e um conjunto de imagens obtidas pelo próprio. Nesse sentido, foi desenvolvido um processo para a aquisição e armazenamento dos dados necessários.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos pelo processo de calibração, foi implementado um processo de reconstrução tridimensional. Além disso, este foi desenvolvido com recurso da framework ROS, possibilitando assim a compatibilidade com os robôs do LSA.

Posteriormente, foram efetuadas algumas experiências com o objetivo de caracterizar o sistema, o que levou à implementação de um método de refinação da calibração obtida anteriormente, para que se obtivesse os melhores resultados possíveis. De seguida, analisaram-se os *scans* realizados de modo a caracterizar o erro nos três eixos (x,y e

z) bem como a resolução do sistema. Foram ainda realizadas experiências de modo a compreender como alguns parâmetros afetam a densidade dos pontos obtidos. Os resultados obtidos foram satisfatórios apresentando erros inferiores a 4 mm, em ambientes subaquáticos.

Além da obtenção de informação tridimensional, a aquisição de imagens de luz visível era outro dos objetivos da dissertação, o qual foi concluído com sucesso, possibilitando ainda a implementação de um novo método de coloração das *Point Clouds* em *real time*.

De uma modo geral, todos os objetivos da dissertação foram atingidos.

Futuramente, existem alguns pontos a melhorar, ou mesmo novos desenvolvimentos e aplicações poderão ser implementadas.

Uma das grandes problemáticas deste sistema, reside no facto de a lente utilizada possuir uma abertura de 120° . Isto, faz com que o modelo *pinhole* utilizado não seja muito eficaz na estimação dos coeficientes de distorção. Deste modo, a utilização de outros modelos, como o modelo *fish-eye*, poderá trazer bons resultados para o sistema.

Ainda relativamente ao processo de calibração, outro dos pontos que poderá ser alterado para se obter uma melhor estimação do eixo de rotação, será o ultimo passo, onde é feita uma média de todos os possíveis eixos, contudo se os processos anteriores forem melhorados e, se os parâmetros intrínsecos apresentarem um erro reduzido, o método atual apresentará bons resultados.

Obter uma melhor calibração do sensor ótico e, um conjunto de imagens com melhor qualidade para a calibração do sistema, fará com que os resultados da calibração sejam melhores. Porém, num ambiente subaquático nem sempre é fácil calibrar o sensor optico e obter imagens com boa qualidade. Desta forma, para não criar muitas entraves físicas ao método desenvolvido, a implementação de um algoritmo posterior à calibração para refinar o eixo estimado, tornaria o método de calibração mais versátil.

Para melhorar a performance do sensor, a utilização de um projetor com multiplas linhas de laser iria aumentar consideravelmente a quantidade de informação adquirida em *real time*, contudo iria ser necessário desenvolver um método de codificação para as linhas de laser.

O sistema foi desenvolvido com o objetivo de ser integrado nos veículos subaquáticos do LSA, estando este processo já em curso. Todavia, a integração deste sistema com um

sistema de navegação subaquática, iria permitir realizar o mapeamento de cenários num referencial local. Assim, este novo sensor poderia também ser utilizado por mergulhadores.

Estes pontos representam alguns aspetos a melhorar, ou possíveis desenvolvimentos, contudo este sistema abre portas para um grande leque de novas aplicações.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Bibliografia

- [1] H-G Maas, A Bienert, St Scheller, and E Keane. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing*, 29(5):1579–1593, 2008.
- [2] V Di Pietra, E Donadio, D Picchi, L Sambuelli, and A Spanò. Multi-source 3d models supporting ultrasonic test to investigate an egyptian sculpture of the archaeological museum in bologna. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42:259, 2017.
- [3] Joaquim Salvi, Sergio Fernandez, Tomislav Pribanic, and Xavier Llado. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern recognition*, 43(8):2666–2680, 2010.
- [4] Dwight F Coleman, Robert D Ballard, and Todd Gregory. Marine archaeological exploration of the black sea. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 3, pages 1287–1291. IEEE, 2003.
- [5] Mario Prats, José J Fernández, and Pedro J Sanz. An approach for semi-autonomous recovery of unknown objects in underwater environments. In *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on*, pages 1452–1457. IEEE, 2012.
- [6] Miquel Massot-Campos and Gabriel Oliver-Codina. Underwater laser-based structured light system for one-shot 3d reconstruction. In *SENSORS, 2014 IEEE*, pages 1138–1141. IEEE, 2014.
- [7] Karl D Moore, Jules S Jaffe, and Benjamin L Ochoa. Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-bath. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(8):1106–1117, 2000.

- [8] Zhengyou Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, volume 1, pages 666–673. Ieee, 1999.
- [9] Flávio Lopes. Sistema de visão e laser para percepção em ambientes subaquáticos. ISEP, 2014.
- [10] Shun Wang, Li Qi, Yixin Zhang, Xuping Zhang, and Qian Yu. Planar-target-based structured light calibration method for flexible large-scale 3d vision measurement. *Sensors & Materials*, 25(7):501–508, 2013.
- [11] Alan M McIvor. Calibration of a laser stripe profiler. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. Proceedings. Second International Conference on*, pages 92–98. IEEE, 1999.
- [12] Sea Grant Staff. *Science Through the Eyes of Fish*, 2012.
- [13] Y Ma, S Soatto, J Kosecka, and S Sastry. An invitation to 3d vision: From images to models springer verlag, 2003.
- [14] RB Fisher and DK Naidu. A comparison of algorithms for subpixel peak detection. In *Image technology*, pages 385–404. Springer, 1996.
- [15] Dr. Jyotika Virmani. *Deep Ocean Exploration is the 21st Century ‘Space Race’*, 2018.
- [16] Luís Lopes, Norbert Zajzon, Balázs Bodo, Stephen Henley, Gorazd Žibret, and Tatjana Dizdarevic. Unexmin: developing an autonomous underwater explorer for flooded mines. *Energy Procedia*, 125:41–49, 2017.
- [17] J Almeida, A Ferreira, B Matias, A Dias, A Martins, F Silva, J Oliveira, P Sousa, M Moreira, T Miranda, et al. Air and underwater survey of water enclosed spaces for vamos! project. In *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [18] Miquel Massot-Campos and Gabriel Oliver-Codina. Optical sensors and methods for underwater 3d reconstruction. *Sensors*, 15(12):31525–31557, 2015.
- [19] Chris Roman, Gabrielle Inglis, and James Rutter. Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites. In *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pages 1–9. IEEE, 2010.

- [20] Albert Palomer, Pere Ridaó, Dina Youakim, David Ribas, Josep Forest, and Yvan Petillot. 3d laser scanner for underwater manipulation. *Sensors*, 18(4):1086, 2018.
- [21] Roger Y Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. *Proc. of Comp. Vis. Patt. Recog.*, pages 364–374, 1986.
- [22] F. Lopes, H. Silva, J. M. Almeida, C. Pinho, and E. Silva. Fish farming autonomous calibration system. In *OCEANS 2017 - Aberdeen*, pages 1–6, June 2017.
- [23] F. Lopes, H. Silva, J. M. Almeida, A. Martins, and E. Silva. Structured light system for underwater inspection operations. In *OCEANS 2015 - Genova*, pages 1–6, May 2015.
- [24] SM Luria and JoAnn S Kinney. Linear polarizing filters and underwater vision. *Undersea biomedical research*, 1974.
- [25] Gordon E Becker and Stanley H Autler. Water vapor absorption of electromagnetic radiation in the centimeter wave-length range. *Physical Review*, 70(5-6):300, 1946.
- [26] Robin M Pope and Edward S Fry. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. ii. integrating cavity measurements. *Applied optics*, 36(33):8710–8723, 1997.
- [27] Edwin J Hart and JW Boag. Absorption spectrum of the hydrated electron in water and in aqueous solutions. *Journal of the American Chemical Society*, 84(21):4090–4095, 1962.
- [28] Mario Sabbatelli. 3d vision-based perception and modelling techniques for intelligent ground vehicles, 06 2015.
- [29] John Mallon and Paul F Whelan. Precise radial un-distortion of images. In *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on*, volume 1, pages 18–21. IEEE, 2004.
- [30] Jónatas Miguel de Almeida Valença. *Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multi-espectral*. PhD thesis, 2011.
- [31] Edison O Jesus and Roberto Costa Jr. A utilização de filtros gaussianos na análise de imagens digitais. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 3(1), 2015.

- [32] DK Naidu and Robert B Fisher. A comparative analysis of algorithms for determining the peak position of a stripe to sub-pixel accuracy. In *BMVC91*, pages 217–225. Springer, 1991.