

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Utilização de Manipuladores em Ambientes Não Estruturados

Luís Filipe Pinto Cunha e Silva

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

Orientador: Prof. Dr. António Paulo Gomes Mendes Moreira

Julho de 2010

© Luís Filipe Pinto Cunha e Silva, 2010

A Dissertação intitulada

“UTILIZAÇÃO DE MANIPULADORES EM AMBIENTES NÃO ESTRUTURADOS”

foi aprovada em provas realizadas em 23/Julho/2010

o júri



Presidente Professor Doutor Paulo José Cerqueira Gomes da Costa
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Vitor Manuel Ferreira dos Santos
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Aveiro



Professor Doutor António Paulo Gomes Mendes Moreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
(Orientador)

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da
sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não
explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros
extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e
demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.



Autor - Luís Filipe Pinto da Cunha e Silva

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Na actualidade os manipuladores industriais apresentam cada vez maior relevo, obtendo um papel preponderante em diversos tipos de aplicações. Tendo evoluído de forma a oferecer uma elevada velocidade, precisão e facilidade de uso na maioria das aplicações. Para além, de conseguirem realizar as tarefas com uma velocidade e precisão superior às capacidades humanas, estes podem cumpri-las repetitivamente sem prejudicar qualidade. A capacidade de repetição com igual qualidade é factor fulcral nas linhas de produção em massa.

É nas linhas de produção, principalmente dos países mais desenvolvidos onde cada vez mais os métodos de produção de pequenas séries de projectos são utilizados, que os manipuladores industriais apresentam uma rigidez a nível de estruturação ambiental e de setup. Devido a esta gestão de operações, a rigidez de como o produto tem de entrar ou é encaminhado numa linha de produção pode implicar constantes e morosas alterações do ambiente. Assim como, reconfigurações de setup e reprogramação que são por vezes muito significativos comparativamente com o tempo de produção. É assim necessário encontrar soluções que permitam grande flexibilidade quer através de novas técnicas quer através de sensores mais evoluídos.

Neste trabalho é proposta uma abordagem de implementação de visão computacional integrada numa linha de produção utilizando um manipulador robótico. O sistema desenvolvido visa retirar a informação tridimensional de peças, através da triangulação entre um laser e uma câmara. O processo consiste em obter as dimensões da peça, a sua posição e a sua orientação para serem recolhidas e colocadas no local desejado através do manipulador robótico e de uma garra. A grande primazia deste sistema é sua capacidade de transitar entre diferentes objectos com diferentes dimensões de forma automática, sendo esta uma solução com uma boa relação qualidade/preço.

Serão apresentados processos para obter equações matemáticas do sensor de triangulação laser, assim como, uma abordagem para calibrar o sensor de triangulação laser. Serão ainda apresentados algoritmos de aquisição, processamento de imagem, calibração automática da imagem adquirida mediante a variação de luminosidade ambiente, aquisição real da velocidade da linha de transporte, reconstrução 3D e análise essencial para extrair as características e medidas necessárias. O desenvolvimento da garra, em termos mecânicos e de actuadores, as comunicações com o manipulador robótico e com a garra, assim como a respectiva programação também serão apresentados. Por fim será apresentada uma análise da precisão dos resultados do sistema desenvolvido.

Abstract

The industrial manipulators are increasingly their importance in industry, taking an active role in various types of applications. Robotic systems are reaching a state of maturity where they can offer a high speed, precision and ease of use in most applications. Besides being able to accomplish tasks with speed and accuracy than human capabilities, they can accomplish the tasks repeatedly without quality lost. The repeatability with equal quality is a key factor in the lines of mass production.

It is in production lines, especially in more developed countries where more and more methods of producing small series of projects are used, that the industrial manipulators present rigidity to provide a level of structure and environment setup. Due to these management operations, as the rigidity of the product when entered or is sent on a production line may require constant and slow environmental changes. As well as, reconfiguration and reprogramming of setup which are sometimes very significant compared to the time of production. It is thus necessary to find solutions to large flexibility either through new techniques with more advanced sensors.

In this paper we propose an approach for implementing computer vision with an integrated production line and a robotic manipulator. The system is aimed at removing the three-dimensional information of parts, through the triangulation between a laser and a camera. The system is to get the dimensions of the piece, its position and orientation to be catch and placed in a desired location through the robotic manipulator and a grip. The great advantage of this system is based on the ability to shift between different objects with different sizes and positions automatically with an appropriate cost solution.

A procedure to obtain mathematical equations of the laser triangulation sensor is presented, as well as an approach to calibrate the laser triangulation sensor. Algorithms for acquisition, image processing, automatic calibration image acquired by varying ambient lighting, acquisition of real line transportation speed, 3D reconstruction and analysis necessary to extract the features and measures are also presented. The development of the grip, in terms of mechanics and actuators, the communications with the robotic manipulator

and the grip, as well as their programming will also be presented. Finally the accuracy results of the developed system are presented.

Agradecimentos

Antes de iniciar a apresentação deste trabalho, gostaria de em primeiro lugar demonstrar o meu profundo agradecimento a algumas pessoas que foram para mim de extrema importância tanto na minha vida académica como pessoal.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais por constantemente me terem apoiado e orientado ao longo da vida, dando-me grande parte dos alicerces necessários para poder ser o que sou hoje.

Em segundo lugar gostaria de agradecer ao meu irmão, familiares e amigos que directa ou indirectamente sempre estiveram presentes nos momentos marcantes do meu percurso de vida, dando-me de igual forma todo o apoio para que conseguisse atingir todos os meus objectivos.

Em terceiro lugar não poderia esquecer a minha namorada que me acompanha já há mais de cinco anos, apoiando-me totalmente e de forma incondicional em todas as minhas escolhas e opções e estando sempre ao meu lado tanto nos momentos bons como nos menos bons.

Quanto à vida académica propriamente dita, queria expressar também os meus agradecimentos a todos os professores que me acompanharam ao longo deste período sem os quais não conseguiria chegar até este ponto.

Relativamente a este trabalho, um especial agradecimento ao Prof. Dr. António Paulo Gomes Mendes Moreira que me orientou ao longo deste período. Queria agradecer também a todos os elementos do laboratório com os quais partilhei esta experiência.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras.....	xiii
Lista de tabelas	i
Abreviaturas e Símbolos	i
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Descrição do Problema e Objectivos	1
1.2 - Estado da Arte.....	2
1.2.1 - Manipuladores Industriais	2
1.2.2 - Visão Artificial.....	4
1.3 - Estrutura do Documento.....	14
Capítulo 2	17
Sistema Proposto.....	17
2.1 - Arquitectura do Sistema	18
2.1.2 - Software	23
2.1.4 - Manipulador Robótico	26
2.1.5 - Garra	28
2.2 - Estrutura e funcionamento do sistema.....	31
Capítulo 3	35
Visão Artificial.....	35
3.1 - Processamento de Imagem	38
3.2 - Calibração da Câmara e do Laser	43
3.2.1 - Modelo da câmara	44
3.2.2 - Transformação das Coordenadas de Imagem em Coordenadas de Mundo	47
3.2.3 - Calibração da Câmara.....	48
3.2.4 - Ajuste automático dos parâmetros da câmara para calibração de luminosidade ...	50
3.3 - Reconstrução dos pontos em 3D.....	54
3.3.1 - Triangulação com Laser.....	54

3.3.2 - Reconstrução 3D das peças	57
Capítulo 4	63
Algoritmos de Calculo da Posição e Orientação do Objecto	63
4.1 - Estrutura de Dados	63
4.2 - Determinação da posição e da orientação	66
4.2.1 - Centro de massa	66
4.2.2 - Limites da peça	67
4.2.3 - Orientação da peça.....	68
4.2.4 - Dimensões da peça	69
4.3 - Resultados.....	71
Capítulo 5	75
Controlo do Sistema de Manipulação e Programação do Manipulador Industrial	75
5.1 - Controlo do Sistema de Manipulação.....	75
5.2 - Controlo da Garra.....	78
5.3 - Programação do Manipulador Robótico	80
Capítulo 6	83
Extensão a Novas Aplicações	83
6.1 - Peças Sobrepostas Transportadas pelo Tapete	84
6.2 - Peças desordenadas	85
6.2.1 - Factor de isolamento.....	86
6.2.2 - Capacidade de manipulação	87
6.2.3 - Estratégia de recolha de peças desordenadas.....	89
Capítulo 7	91
Conclusão	91
7.1 - Trabalho Futuro.....	92
Anexo A.....	93
Interface Gráfica.....	93
Anexo B	95
Peças Utilizadas para Testes.....	95
Referências	97

Lista de figuras

Figura 1.1 - Triangulação Laser	7
Figura 1.2 - Princípio de Triangulação Laser	8
Figura 1.3 - Luz Estruturada	8
Figura 1.4 - Visão Estereoscópica	9
Figura 1.5 - Tempo de Voo	10
Figura 1.6 - Interferometria	11
Figura 1.7 - Forma por Sombreamento	11
Figura 1.8 - Triangulação por Dois Feixes Laser	13
Figura 1.9 - Par Estereoscópico	13
Figura 2.1 - Esquema da Arquitectura do Sistema	18
Figura 2.2 - Câmara USB CCD Mono DMK21AU04 da ImagingSource.....	19
Figura 2.3 - Sensores CCD	20
Figura 2.4 - Funcionamento do filtro de Bayer por Interpolação das Componentes de Cor pelo Valor Médio dos Pixels Vizinhos	20
Figura 2.5 - Padrão de Bayer	21
Figura 2.6 - Fonte de Laser e Lente Cilíndrica	23
Figura 2.7 - Estrutura de transporte com condicionamento de luminosidade através de placas <i>k-line</i>	24
Figura 2.8 - Estrutura de transporte sem condicionamentos de luminosidade	25
Figura 2.9 - Estrutura de Transporte.....	25
Figura 2.10 - Esquema de um manipulador de 6 eixos	26
Figura 2.11 - Estrutura de Comunicação do Manipulador Robótico	27
Figura 2.12 - Imagem física da garra	29

Figura 2.13 - Actuador Dynamixel RX-64	30
Figura 2.14 - Conversor USB-RS485	31
Figura 2.15 - Diagrama Estrutural do Sistema	32
Figura 2.16 - Diagrama Sequencial do Funcionamento do Sistema	33
Figura 3.1 - Imagem de uma <i>frame</i> sem filtro de vermelho	36
Figura 3.2 - Imagem de uma <i>frame</i> com filtro de vermelho	37
Figura 3.3 - Imagem de uma <i>frame</i> com o laser incidente no plano do tapete	38
Figura 3.4 - Imagem de uma <i>frame</i> com o laser incidente sobre a peça	39
Figura 3.5 - Resultado da binarização de uma <i>frame</i>	40
Figura 3.6 - <i>Frame</i> com threshold desadequado	41
Figura 3.7 - <i>Frame</i> com threshold adequado	41
Figura 3.8 - Pesquisa da linha na <i>frame</i>	43
Figura 3.9 - Projecção perspectiva no modelo <i>pinhole</i>	44
Figura 3.10 - Especificação dos sistemas de coordenadas	44
Figura 3.11 - Esquema de distorção Barril (esquerda) e distorção <i>Pincushion</i> (direita)	45
Figura 3.12 - <i>Frame</i> original com distorção em barril.....	46
Figura 3.13 - Imagem após compensação do efeito de barril.....	47
Figura 3.14 - Relação entre coordenadas da imagem e do mundo.....	48
Figura 3.15 - Relação das coordenadas e rotação segundo o ângulo β	48
Figura 3.16 - Imagem resultante de uma calibração desadequada (por defeito) dos parâmetros da câmara	53
Figura 3.17 - Intercepção do plano do laser com a recta que contém todos os pontos projectados no mesmo	54
Figura 3.18 - Todos os pontos da linha do laser no plano $Z=0$	56
Figura 3.19 - Reconstrução 3D da peça na vertical - visão frontal.....	58
Figura 3.20 - Reconstrução 3D peça com orientação - visão frontal	59
Figura 3.21 - Reconstrução 3D - Visão Lateral.....	60
Figura 3.22 - Reconstrução 3D - visão perspectiva das linhas laser.....	61
Figura 4.1 - Preenchimento da matriz de alturas.....	64
Figura 4.2 - Imagem da peça adquirida.....	65
Figura 4.3 - Peça totalmente preenchida e binarizada	66

Figura 4.4 - Detecção dos limites da peça	68
Figura 4.5 - Aplicação da transformada de Hough para detecção de linhas	69
Figura 4.6 - Princípio de cálculo das dimensões da peça	71
Figura 5.1 - Máquina de Estados do Sistema de Manipulação	77
Figura 5.2 - Relação entre os ângulos e a posição do veio do motor	79
Figura 5.3 - Gráfico de relação entre a posição em graus do veio do motor e a abertura da garra em centímetros.....	79
Figura 6.1 - Factor de isolamento de peças a coordenadas 2D	87

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Tabela de erros do sistema de visão.....	72
Tabela 5.1 - Relação entre graus do actuador e abertura da garra.....	78

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i>
3D	Tridimensional
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
FPS	Frames por segundo

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Descrição do Problema e Objectivos

Na indústria cada vez mais o método de transporte e distribuição de peças numa linha de produção adquire um papel fulcral no desempenho dos processos. Sistemas automatizados de *pick-and-place* apesar da sua rigidez estrutural e de setup são soluções a serem consideradas em linhas de produção e de distribuição observando-se uma grande diversidade de aplicação em áreas distintas tanto industriais como comerciais.

Devido às vastas áreas de aplicabilidade de distribuição e aos novos métodos de produção de pequenas séries de projecto adoptados na indústria para melhorar os processos, a produtividade e a competitividade no mercado, a rigidez estrutural e os morosos setups a cada mudança de série leva a que haja uma necessidade de criar uma detecção automática do objecto. Esta detecção automática dos objectos deve permitir a aquisição da forma tridimensional do objecto assim como a sua posição no referencial do sistema para que possa ser manipulado e transportado.

Este projecto tem como objectivo a reconstrução 3D de uma peça através de um sistema de triangulação laser que é composto por uma câmara USB CCD monocromática e um laser com capacidade de projectar o feixe laser de forma planar. As peças são encaminhadas por uma linha de transporte e posteriormente são manipuladas por um robot industrial que, através de uma garra acoplada na ponta de ferramenta do robot industrial estará capacitado para agarrar na peça e transportá-la para outro local desejado.

O sistema tem de ser robusto e preciso de forma a relevar uma exactidão na reconstrução 3D da peça e na estimativa do seu posicionamento, para que esta possa ser manipulada pela garra e transportada pelo manipulador industrial. A precisão da aquisição das dimensões das peças, da reconstrução 3D e da aquisição do seu posicionamento e orientação é fundamental para que a peça possa ser manipulada e transportada sem danos para a garra, para o sistema

de transporte e para a peça. É ainda necessário associar á robustez, simplicidade. O processo deve ser simples para que a sua aplicabilidade seja vasta e de utilização acessível sem que seja necessário a presença de um engenheiro para usar a aplicação.

A solução de visão apresentada tem como objectivo um software robusto de modo que as perdas de qualidade no uso de uma câmara de características normais sejam compensadas pelos algoritmos, recorrendo-se ainda à junção de um laser. Esta robustez do software é a chave do seu desempenho uma vez que a solução de visão visa ter um baixo custo de implementação dispensando-se por esta razão o uso de câmaras de alta velocidade e de alta resolução ou de mais do que uma câmara, que encarecem significativamente o custo total do sistema.

A solução apresentada deve ser altamente modular permitindo a reconfiguração espacial dos elementos (por exemplo da câmara), desta forma, este documento descreve a implementação da aplicação de visão por triangulação laser que adquire os parâmetros geométricos da peça assim como a sua posição e orientação, da aplicação da garra baseada num actuador Dynamixel RX-64 e pelo manipulador robótico ABB. A solução apresentada descreve a implementação de cada subsistema, a comunicação e interacção entre eles para o funcionamento do sistema global.

1.2 - Estado da Arte

1.2.1 - Manipuladores Industriais

Um robot industrial é de acordo com a ISO [1], onde a norma 8373 define robot industrial como “um manipulador multifuncional controlado automaticamente, reprogramável, programável em três ou mais eixos, que pode ser fixo num local ou móveis para utilização em aplicações de automação industrial”.

De acordo com [2-6], os robots industriais são membros valiosos da força de trabalho. Na verdade, mais de 90 por cento de todos os robots são utilizados em ambientes industriais, com grande aplicabilidade na indústria automóvel [5]. Os robots revolucionaram o trabalho industrial, estando a indústria muito dependente da produtividade, alta performance e economia fornecidos por estes.

O robot industrial moderno é o produto de muitas mentes e numerosas experiências. Charles George Devol considerado o pai da robótica, inventou em 1954 o primeiro robot industrial, o Unimate. Alguns anos mais tarde, Devol e Joseph F. Engelberger formaram a primeira companhia de robótica, Unimation. Os robots da Unimation eram também chamados "máquinas de transferência programadas", visto que sua principal função era a transferência de objectos de um ponto para outro. Em 1960, a Unimation foi comprada pela Condec

Corporation. A General Motors instalou o Unimate para o manuseamento de fundição e soldadura a ponto em 1961 [2].

O robot industrial moderno continuou a evoluir nas décadas de 1960 e 70, sendo este avanço na indústria robótica directamente influenciado pelo desenvolvimento do computador. A indústria automóvel também contribuiu para o avanço da robótica tendo as empresas automóveis abordado as empresas de robótica com investimentos na década de 1980. O entusiasmo e o financiamento nem sempre estiveram em consonância com noção de instabilidade económica da época. A introdução precoce da robótica na indústria criou instabilidade financeira. Os recursos financeiros e o grande mercado interno das indústrias japonesas apoderaram-se da indústria robótica, apenas um pequeno número de companhias não japonesas foram capazes de se manter nesta área, como é o caso da companhia Sueca-Suíça ABB (ASEA Brown-Boveri) [3].

A automação alterou drasticamente as fábricas em todo o mundo uma vez que os robots industriais modernos oferecem múltiplas vantagens. Os desenvolvimentos recentes tornaram robots industriais mais *user-friendly*, económicos e inteligentes do que nunca. Os robots industriais impuseram-se na indústria devido à sua capacidade de executar trabalho árduo, monótono e perigoso. Os robots realizam as aplicações em contínuos processos repetitivos com maior exactidão e precisão do que os trabalhadores humanos. Os robots industriais são ideais para linhas de montagem, permitindo às empresas não só beneficiarem de maior produtividade mas também de melhorias na qualidade.

Os manipuladores industriais introduziram inúmeros benefícios globais na área industrial.

Sendo de referenciar os benefícios para o negócio, uma vez que os robots realizam aplicações com maior exactidão, precisão e coerência, contribuindo assim para a melhoria da qualidade do produto. Ao contrário dos trabalhadores humanos, os robots são incansáveis conduzindo ao aumento da produtividade e redução dos custos de fabrico. Eles eliminam as despesas, tais como férias / licença médica, compensação do trabalhador, e seguro médico. As empresas beneficiam por terem mais e melhores bens produzidos. O retorno típico de investimento para um robot industrial é substancial e rápido. É também de referenciar, a gestão dos benefícios visto que os robots permitem eliminar muitos problemas no local de trabalho. A produtividade dos funcionários deixa de ser uma preocupação, porque os robôs permitem produzir trabalho sem pausas. A alta rotatividade de funcionários e os cargos vagos deixam também de ser uma problemática. Para além destes factores, são incontornáveis os benefícios para os funcionários, estando os robots a assumir tarefas repetitivas e perigosas, permitindo proteger a saúde mental ou física dos trabalhadores destas tarefas. Em outros casos, os robots podem ajudar os trabalhadores tornando seu trabalho mais eficiente e mais fácil de gerir [4].

Por último, são de salientar os benefícios para o consumidor uma vez que, sendo os robots capazes de produzir de forma consistente, produtos de alta qualidade com maior

rapidez e menor custo. Os consumidores apreciam a oportunidade de acesso a produtos melhores, mais cedo, e pagar menos por isso todas as melhorias. O mundo da tecnologia robótica está em constante evolução.

Os robots estão a expandir os limites da experiência humana - a exploração das profundezas do mar, as incógnitas do espaço exterior e as complexidades do corpo humano. Eles estão a transformar a indústria, reduzindo o tempo de ciclo, melhorando a qualidade da peça e aumentando os lucros em todo o globo.

Os mais recentes desenvolvimentos na área da robótica industrial são a inteligência artificial. Os futuros robots industriais serão equipados com a aprendizagem avançada, visão e as capacidades sensoriais. O aumento da flexibilidade de aplicação conduzirá ao aumento da produtividade. Os robôs mais inteligentes serão capazes de realizar tarefas complicadas com maior precisão e autonomia.

1.2.2 -Visão Artificial

Nos últimos anos, a procura por sensores ópticos de imagens 3D tem se tornado cada vez mais relevante e levou ao desenvolvimento de instrumentos que são agora comercialmente disponíveis [7]. Durante os anos 1970 e 1980 seu desenvolvimento foi realizado principalmente em laboratórios de pesquisa, e teve como objectivo projectar novas técnicas que exploram o uso de feixes de luz em vez de sondas, tendo em vista a sua aplicação na indústria, para medição e aplicações de controlo de qualidade. Novos princípios de medição foram propostos, foram desenvolvidos protótipos adequados e caracterizados para comprovar o seu desempenho [8-14].

Em paralelo, é realizado um considerável esforço direccionado para a miniaturização e integração de fontes de luz óptica, detectores e componentes, equipamentos electrónicos e mecânicos da estrutura dos sensores. A inclusão de fontes de luz e sensores ópticos é utilizada actualmente para melhorar a reconstrução da imagem tridimensional. Na última década, a disponibilidade de técnicas e componentes levou à produção de um amplo espectro de dispositivos comercialmente disponíveis, com uma vasta gama de resolução de medição. Nos últimos tempos, a tendência tem sido para a produção de dispositivos de redução dos custos e com maior robustez e portabilidade.

Os sensores de imagem em 3D estão a aumentar de interesse em combinação com sensores visão de duas dimensões (2D), especialmente em aplicações de robótica, para evitar colisões, para resolver “remover-do-monte” e os problemas de montagem [15]. Como resultado, as empresas que se encontram tradicionalmente centradas no empreendimento de sistemas de visão 2D, estão agora a ampliar o seu espectro de produtos, incluindo a gama de sensores 3D.

Os sensores de imagem 3D operam geralmente pela projecção (na forma activa) ou aquisição (na forma passiva), de energia electromagnética para/de um objecto seguido pelo

registo da energia transmitida ou reflectida. O exemplo mais importante de aferição de transmissão é a tomografia computadorizada industrial, que utiliza alta energia de raios-X e medidas de radiação transmitida através do objecto. Os sensores de reflexão para a forma de aquisição podem ser subdivididos em sensores não ópticos e ópticos. Sensores não ópticos incluem sensores acústicos (ultra-som, sísmica), electromagnéticos (infravermelho, ultravioleta, radar de microondas) e outros. Estas técnicas procuram normalmente medir distâncias a objectos através da medição do tempo necessário para um pulso de som ou energia de microondas retornar de um objecto. Nos sensores de reflexão óptica, a luz carrega as informações de medição. Há uma notável variedade de técnicas ópticas 3D e sua classificação não é única.

As técnicas 3D são baseadas em triangulação óptica, em atraso, bem como no uso de imagens monoculares. As técnicas para se extrair informações geométricas de cenas a partir de imagens podem ser classificadas como técnicas activas ou técnicas passivas. As técnicas activas caracterizam-se pela introdução de algum tipo de sinal no ambiente e sendo as informações relacionadas à geometria recuperadas por análise do comportamento do sinal. As técnicas passivas, por sua vez, apenas colectam imagens e, a partir de sua análise, tentam estimar posições, ângulos e distâncias [16]. A distinção de técnicas também é feita entre as medidas directa e indirecta. Técnicas de medições directas resultam em dados de distância, isto é, num conjunto de distâncias entre a superfície desconhecida e do sensor de distância. Técnicas de medições indirectas são inferidas a partir de imagens monocular e do conhecimento prévio das propriedades do objecto. Eles resultam ou em dados de distância ou na orientação de superfície.

1.2.2.2 - Problemas Comuns a Técnicas Baseadas em Imagens

Quando se trabalha com a extracção de medidas do ambiente a partir de imagens é necessário ter em consideração que as estruturas geométricas confiáveis e bem definidas do cenário precisam de ser visualizadas. E, no caso da reconstrução a partir de múltiplas imagens, haverá sempre o problema de correspondência a ser resolvido. O problema da correspondência consiste em descobrir quais feições visíveis em várias imagens correspondem à projecção de um mesmo elemento da cena.

As estruturas geométricas podem não estar bem definidas em uma ou várias imagens devido a problemas no ajuste do foco ou por factores mais complexos como o *motion blur*, observado em imagens obtidas com um tempo de exposição longo ou por objectos que se movem rapidamente em relação à câmara. A problemática da oclusão também interfere na visibilidade de estruturas geométricas confiáveis, sendo esse factor mais crítico na utilização de múltiplas vistas de câmara, pois, dificulta o tratamento da correspondência. Como solução para o problema da oclusão é apontada a utilização de mais vistas da cena, até que uma

porção suficiente das superfícies esteja a ser capturada, o que encarece drasticamente o custo sistema. A baixa resolução das imagens utilizadas é outro factor a ser considerado.

De acordo com as características da técnica utilizada, é preciso avaliar também a necessidade de se ter ou não o conhecimento prévio dos parâmetros internos (i.e., distância focal, dimensões do pixel, distorção radial e coordenadas do ponto principal) e externos (i.e., posição e orientação) da câmara. Caso os parâmetros sejam necessários, é preciso observar se eles serão informados de maneira completa (i.e., sistema calibrado), de forma parcial (i.e., sistema parcialmente calibrado) ou se serão calculados ao longo do processo. Essa atenção especial deve-se ao facto das pequenas variações na calibração dos parâmetros da câmara podem causar grandes erros nas medições estimadas. Alterações nos parâmetros podem ser provocadas por factores externos como choques mecânicos e variações de temperatura. A necessidade da calibração completa do sistema traz também a desvantagem da não aplicação do método sobre pinturas ou imagens arquivadas, para os quais os parâmetros não são conhecidos.

Além dessas dificuldades, outros cuidados precisam ser considerados, como por exemplo a remoção da distorção radial nas imagens. Distorção radial é um fenómeno provocado pela lente utilizada na câmara e se caracteriza pela introdução de distorções na imagem, que aumentam à medida que se afasta do “centro” da imagem para suas bordas. Com isso, na região próxima ao ponto principal (i.e., intersecção do eixo óptico com o plano de imagem) o efeito de distorção é quase imperceptível, aumentando radialmente nas bordas da imagem. A distorção radial é agravada com a utilização em lentes com grande abertura angular e pode ser compensada aplicando-se técnicas como as descritas por Frédéric Devernay e Olivier Faugeras [17] e por Richard Hartley e Andrew Zisserman [18]. A remoção da distorção radial faz com que as imagens capturadas fiquem mais próxima das obtidas pela utilização de um modelo de câmara *pinhole* (i.e., projecção linear).

1.2.2.3 - Técnicas de reconstrução de imagem 3D

Existem diversas técnicas de reconstrução tridimensional da imagem, que de acordo com [19] podemos considerar um conjunto razoável de técnicas abordadas de seguida.

1.2.1.3.1 - Triangulação laser.

A triangulação laser utiliza uma câmara para aquisição de imagens e uma luz laser planar para iluminar o objecto. Se a posição do laser em relação à câmara, bem como um conjunto de propriedades da câmara são conhecidos, é possível calcular as coordenadas de todos os pontos ao longo do perfil do objecto. Se o objecto ou a câmara e laser têm um movimento conhecido, é possível combinar várias medições para obter uma visão tridimensional do objecto.

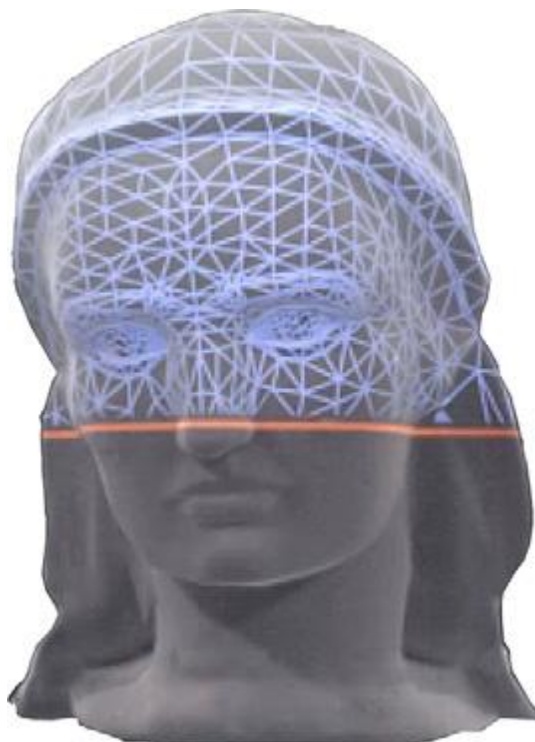


Figura 1.1 - Triangulação Laser [51]

Esta é a abordagem utilizada neste trabalho pelo que analisaremos mais detalhadamente o seu princípio de funcionamento. Triangulação é provavelmente o método mais antigo para a medição de profundidade de pontos no espaço e é provavelmente uma das técnicas mais comuns [33]. A partir da aplicação da lei dos senos (equação 1.1), sistemas baseados em triangulação medem ângulos e distâncias.

$$\frac{\sin(\angle AB)}{C} = \frac{\sin(\angle BC)}{A} = \frac{\sin(\angle CA)}{B} \quad (1.1)$$

A geometria de um sistema de triangulação activa é exibida na figura 1.2. Conhecendo-se a relação espacial (i.e., posição e orientação relativa) entre o projector laser e a câmara, bem como os parâmetros internos da câmara, a posição do ponto P no espaço Euclidiano pode ser estimada pela aplicação da lei dos senos (equação 1.1). Na figura 1.2, os segmentos de recta A, B e C definem um triângulo cujo ângulo α , o comprimento de C (i.e., denominado *baseline*) e a posição em que P é projectado na imagem capturada pela câmara são conhecidos. Com f sendo o comprimento focal e α o ângulo feito pela linha base, B, e a fonte de laser, é possível calcular o ponto P através da equação 1.2.

$$(x, y, z) = \left[\frac{C}{f \times \cot(\alpha) + x'} \right] \times (x', y', f) \quad (1.2)$$

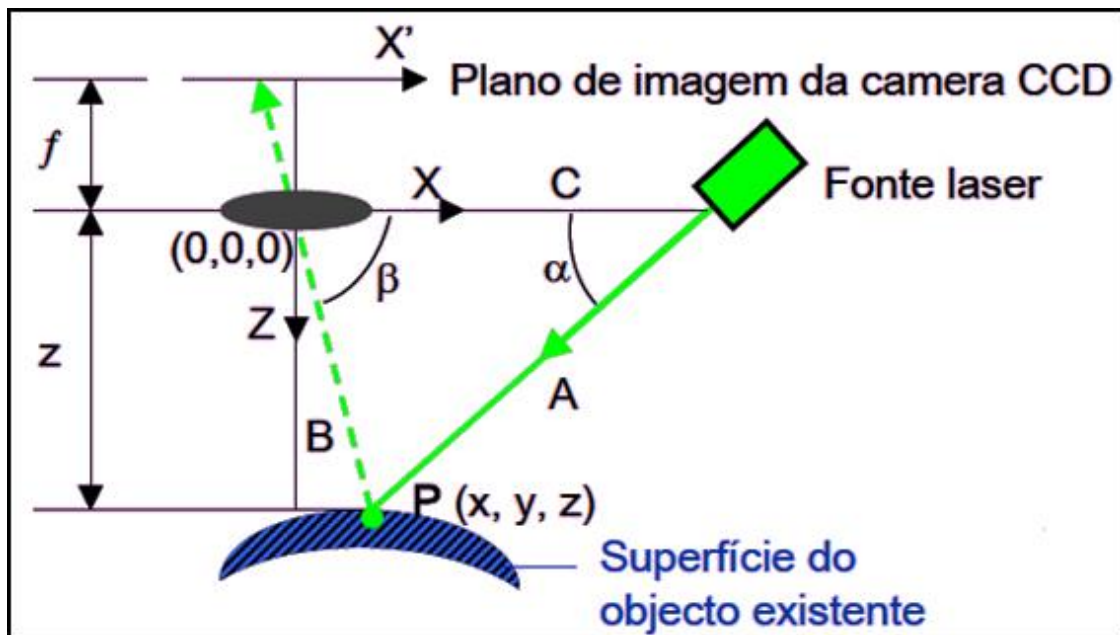


Figura 1.2 - Princípio de Triangulação Laser [50]

1.2.1.3.2 - Outros métodos

a) Luz estruturada

É semelhante à triangulação laser. Esta técnica de projecção de um padrão bidimensional de luzes não coerentes e, em seguida, a informação de profundidade é obtida pelo cruzamento entre a câmara e o plano padrão.



Figura 1.3 - Luz Estruturada [51]

b) Visão estereoscópica

O método de visão estereoscópica representa a versão passiva de técnicas de luz estruturada. Segundo [20] este descreve as técnicas de imagem estereoscópica como um método tradicional para resolver o problema da perda de profundidade, quando uma câmara é usada para executar a reconstrução 3D da imagem. A técnica de imagens estereoscópicas faz uso de duas ou mais câmaras fixas para atingir três dimensões. Uma forma alternativa é ter mais de uma imagem com uma câmara em movimento.

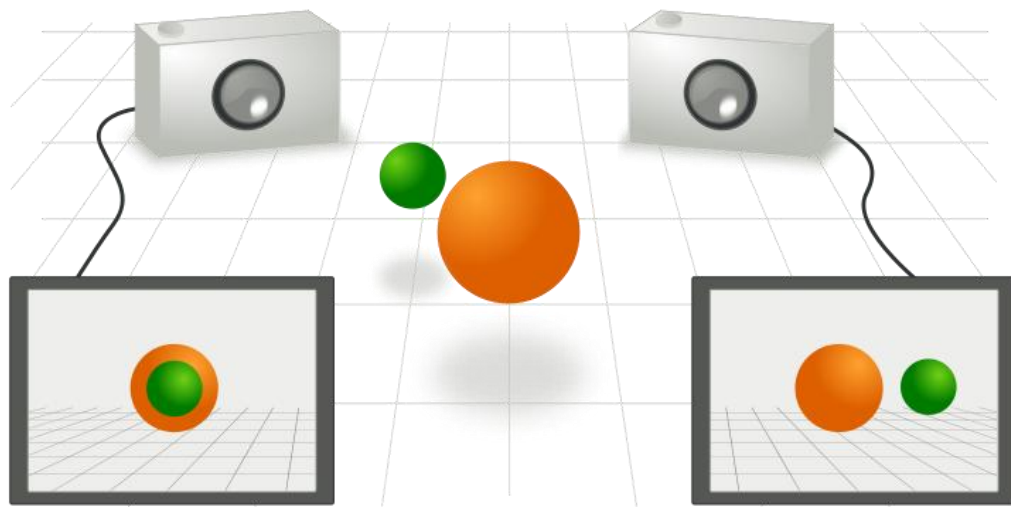


Figura 1.4 - Visão Estereoscópica [51]

c) Fotometria

Neste método, são utilizadas imagens digitais sendo de seguida necessária a calibração da câmara. A medição da imagem pode ser feita por meio de procedimentos automáticos ou semi-automáticos. No primeiro caso, são obtidos pontos de nuvens muito densos, podendo existir uma grande imprecisão e falta de peças. No segundo caso, são obtidas medidas muito precisas, sobre um número significativamente menor de pontos [30-32].

d) Tempo de voo

O princípio de tempo de voo consiste na emissão de impulsos laser que colide com a superfície do objecto, a medida do tempo de retorno e a intensidade do impulso reflectido permite a reconstrução da superfície 3D pretendida. Em muitas aplicações, a técnica é de alcance limitado por níveis de potência admissível de radiação laser, determinada por considerações de segurança do laser. Além disso, os sensores de tempo de voo enfrentam

dificuldades com superfícies brilhantes, que reflectem pouco para trás a energia da luz espalhada, excepto quando orientado perpendicularmente à linha de visão.

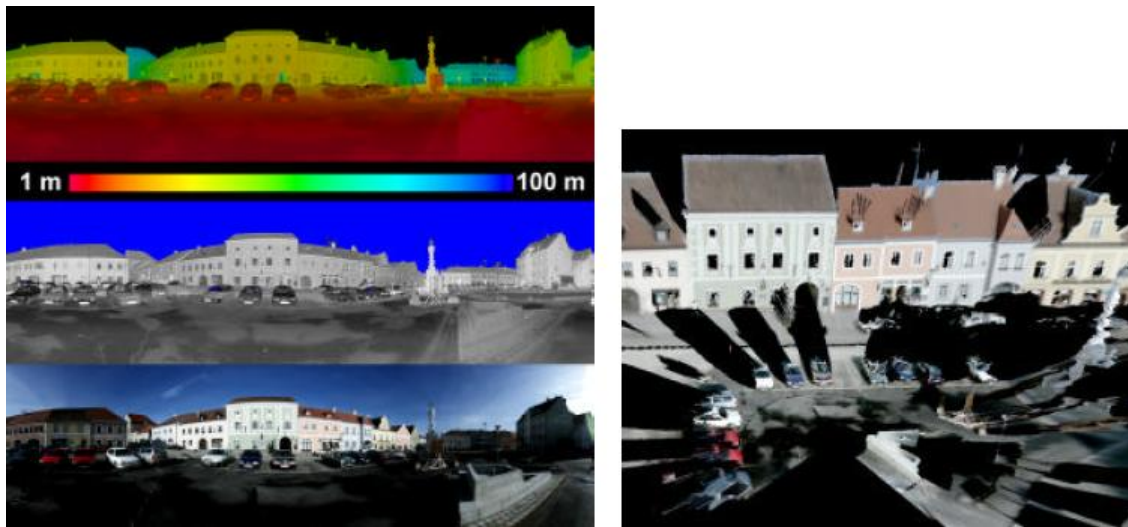


Figura 1.5 - Tempo de Voo [41]

e) Interferometria

A Interferometria é uma técnica da sobreposição de duas ou mais ondas (de entrada), o que cria como resultado uma nova e diferente onda que pode ser usada para explorar as diferenças entre as ondas de entrada. Consiste na projecção de ondas com uma variação espacial, ou um padrão temporalmente periódica, sobre uma superfície e misturando a luz deformada e reflectida com o padrão de referência previsto na superfície é possível calcular a variação e a geometria da superfície.

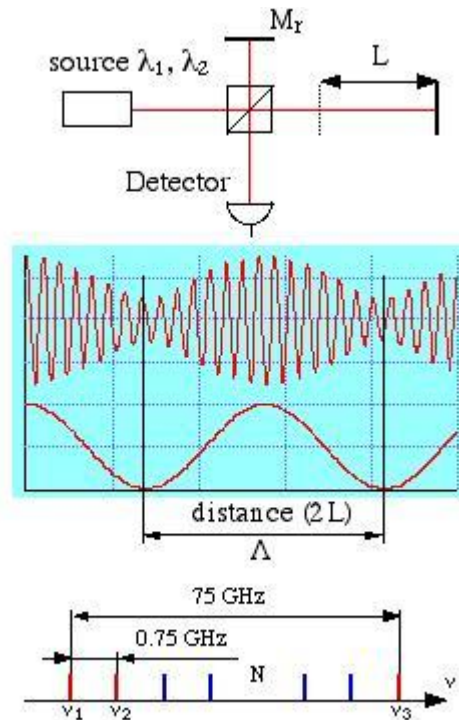


Figura 1.6 - Interferometria [19]

f) Forma por sombreamento

Este método requer a aquisição do objecto de um ângulo de visão e variando a posição da fonte de luz, o que resulta em variação do sombreamento sobre a superfície do alvo. Uma variante deste método implica a variação das condições de iluminação. A sombra superfície do alvo é útil para fazer a forma do objecto a reconstruir.



Figura 1.7 - Forma por Sombreamento [51]

1.2.2.4 - Aplicações de visão 3D

Algumas aplicações de sensores de imagem tridimensional estão no campo da indústria, no património cultural, aplicações médicas e documentação da cena do crime [19]. Na área industrial as aplicações são: controlo de qualidade superficial, medição tridimensional e engenharia reversa de peças de forma livre, para obter as especificações e desenhos de inspecção objecto. No domínio do património e cultural, essas técnicas poderiam ser usadas para a reconstrução artística, de manutenção e conservação de registo real de objectos artísticos. Pode ser aplicado também no processo de restauração, o reconhecimento de robótica móvel, modelagem ambiental e reconhecimento de objectos [19]. Várias aplicações médicas são: design de próteses, cirurgia plástica, ortopedia, próteses na ortopedia e dermatologia.

O método de triangulação com laser para reconstrução 3D tem sido muito utilizado de diversas formas. Por exemplo, em [34], o sistema auto calibra-se determinando também os parâmetros intrínsecos da câmara com base em planos ortogonais bem definidos no cenário (paredes, caixas rectangulares, ...). Na ausência de elementos que consigam garantir a calibração, sugerem ainda o uso de dois lasers de linha, ortogonais entre si. Em [21] é descrito um projecto com aplicação à reconstrução facial envolvendo a mesma tecnologia, salientando os aspectos de baixo custo e facilidade de implementação que podem ser conseguidos.

Na indústria robótica além das soluções de empresas vocacionadas para *machine vision*, por exemplo a MVTec Software GmbH, os fabricantes de manipuladores robóticos, como é o caso da ABB e da MOTOMAN, estão a apostar nas suas próprias soluções de visão artificial para braços robóticos. A ABB apresenta a solução TRueView [22] e a MOTOMAN tem como solução a MotoSight 3D [23]. Além destes sistemas serem opcionais e proprietários com terem um custo inerentemente elevado, estes sistemas são baseados em luz estruturada.

A solução da câmara com triangulação com laser é cada vez mais empregue, principalmente com a finalidade de inspecção automática e testes de qualidade. No entanto, estas aplicações baseiam-se, geralmente, no princípio de *matching*, de forma a detectar erros de fabrico por comparação com modelos conhecidos e sabendo, a cada momento, quais os objectos que se está a analisar. O trabalho aqui proposto tem um carácter inovador já que se pretende que seja o sistema a realizar a reconstrução 3D de diferentes objectos e diferentes dimensões, assim como a detecção posição e orientação para uma posterior manipulação e transporte.

A análise, em tempo real, de imagens 3D assim como a extracção de características sem ter por base um modelo de comparação, ainda tem aplicação reduzida, sendo na

principalmente na área da medicina, embora através de processamento *offline* não automatizado, que se verifica um forte tratamento de imagens 3D.

Uma das vantagens mais significativas da triangulação laser é a sua precisão e sua menor sensibilidade, comparativamente com os outros métodos, em relação às condições de iluminação e efeitos de textura da superfície. Estes sistemas são particularmente atractivos devido à capacidade de criarem reconstruções 3D com elevada precisão, capazes de trabalhar a alta velocidade e ainda dispensarem o contacto físico com os objectos.

No entanto, a solução de triangulação uma desvantagem que não pode ser desconsiderada, o facto de que nem sempre se conseguem obter representações 3D completas de objectos devido à posição relativa do laser em relação aos mesmos. Com a intenção de colmatar estas falhas, têm sido sugeridos outros setups com base na triangulação laser, como por exemplo setups com mais do que um laser [35] que além de colmatarem esta falha permitem um aumento da precisão, ou, setups com um conjunto de câmara e laser com outro conjunto de 2 câmaras formando um par estereoscópico através de fusão de dados [36].

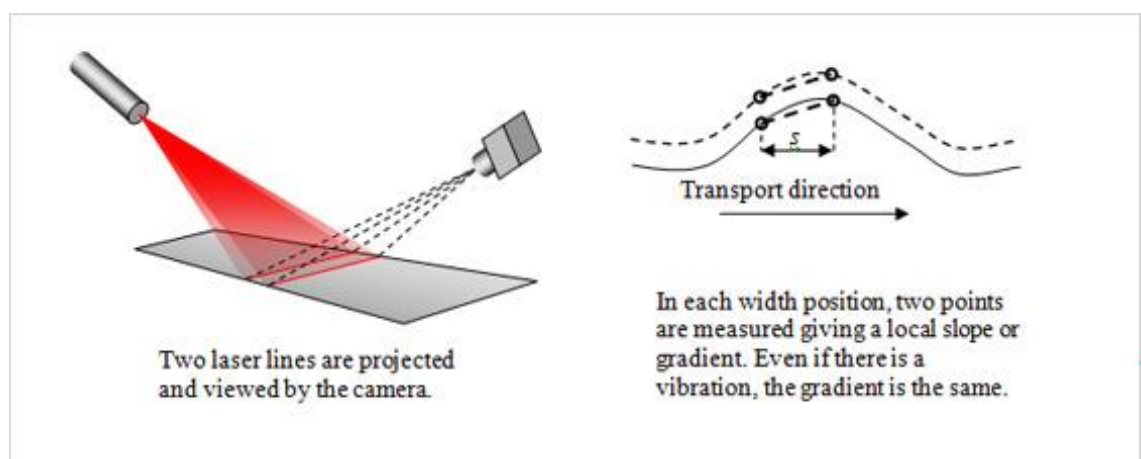


Figura 1.8 - Triangulação por Dois Feixes Laser [52]

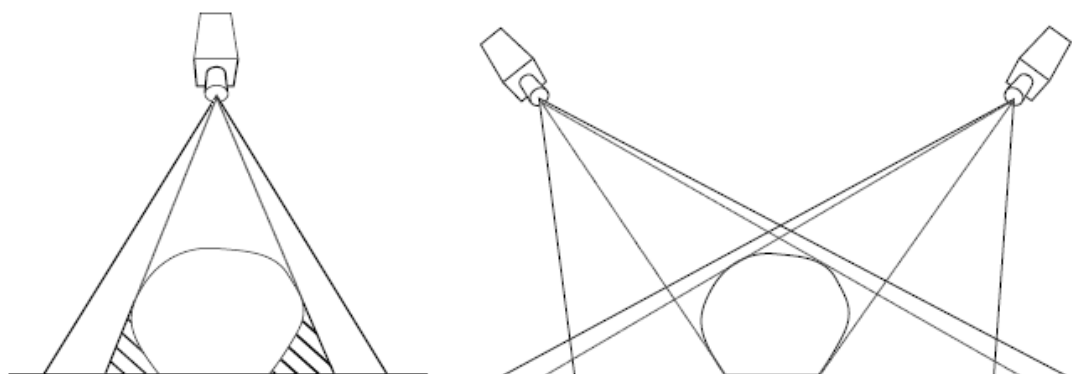


Figura 1.9 - Par Estereoscópico [41]

Alternativamente, também se propõem sistemas alheios ao uso de laser. Entre estes, destacam-se as soluções baseadas somente em visão estereoscópica [37] ou em sensores de medida de *time-of-flight* [38][39] cujo princípio básico de funcionamento assenta no cálculo do tempo de propagação entre as ondas emitidas e reflectidas.

Os trianguladores laser de ponto único são amplamente utilizados no campo industrial, para a medição de distâncias, diâmetros, espessuras, bem como em aplicações de superfície de controlo de qualidade.

De acordo [19], os lasers de linha estão a tornar-se cada vez mais populares para controlo de qualidade e engenharia reversa. Exemplos disso são o sistema Vivid 910 (Konica Minolta, Inc.), os sensores da série SmartRay (SmartRay GmbH, Alemanha) e os sistemas ShapeGrabber (ShapeGrabber Inc., CA, E.U.A.). Sensores 3D são projectados para integração com os braços do robô, para implementar operações de "agarrar e colocar" nas estações de palatização. Um exemplo é o sistema Ranger (Sick, Inc.). O sistema NextEngine (NextEngine, Inc., CA, E.U.A.) e o TriAngles scanner (intricad) dispositivo merece uma atenção especial, pois mostra a progressão neste campo está progredindo.

Podemos observar ainda o sistema Halcon, da MVTec Software GmbH [24] que está na vanguarda da visão 3D e da sua aplicabilidade na indústria assim como na integração com braços robóticos. No Halcon podemos observar que para a detecção da posição 3D de um objecto o sistema usado é uma combinação de um laser e uma câmara. Para a reconstrução 3D de um objecto o sistema Halcon combina um laser com duas ou múltiplas câmaras, assim como esta configuração de múltiplas câmaras para *matching* 3D usando modelos CAD.

1.3 - Estrutura do Documento

Este documento descreve o trabalho realizado ao longo da dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores do autor e encontra-se dividido em sete capítulos.

No capítulo 1 divide-se em três secções. Inicialmente realiza-se uma apresentação do projecto e respectivos objectivos estabelecidos para o mesmo. Na segunda secção realiza-se um enquadramento do estado da arte. Este capítulo é encerrado nesta secção que apresenta a estrutura do documento.

No capítulo 2 é realizada uma análise do projecto, sintetizando numa primeira abordagem uma proposta de solução para o problema. Começa-se com uma descrição da arquitectura desta solução, apresentando as tecnologias e elementos constituintes em cada subsistema desenvolvido, assim como o *setup* da estrutura mecânica que recria um ambiente industrial. Posteriormente é apresentada uma descrição estrutural e funcional do sistema proposto.

O capítulo 3 descreve o sistema de visão artificial que trata de todo o processamento relativo à obtenção dos modelos tridimensionais dos objectos. Aqui descreve-se a forma

sequencial dos passos implementados começando pelo processamento de imagem, a pesquisa de linhas, a transformação das coordenadas entre diferentes referenciais e a calibração da câmara e dos seus parâmetros de imagem associados. Este capítulo termina com a reconstrução tridimensional dos pontos, envolvendo o método de triangulação laser e a reconstrução 3D das peças.

O capítulo 4 descreve o algoritmo de cálculo da posição e orientação das peças. Começa-se por descrever a estrutura de dados utilizada para representar os modelos tridimensionais dos objectos que facilitam o uso de algoritmos de pesquisa. Apresenta-se então o algoritmo de cálculo da posição da peça e da sua orientação concluindo-se com uma análise dos resultados obtidos pela aplicação desenvolvida.

No capítulo 5 é descrito o sistema de manipulação das peças que inclui o manipulador robótico e a garra. Apresenta-se o algoritmo de controlo deste sistema integrando o resultado do processamento de visão com o controlo do manipulador robótico e o controlo da garra, descrevendo-se a máquina de estados para o funcionamento do processo de manipulação de objectos. Descreve-se o controlo realizado para a garra de forma a manipular os objectos com diferentes dimensões. Para concluir apresenta-se a forma de programação e controlo do manipulador que integra a ponta de ferramenta para o seu posicionamento correcto relativamente á posição e orientação da peça.

O capítulo 6 descreve extensões do algoritmo de reconstrução 3D de objectos para processamento de peças transportadas por um tapete para ambientes com peças sobrepostas. Inicialmente descreve-se como realizar a identificação de peças sobrepostas vindas num tapete que pode envolver novas orientações na manipulação das peças a considerar. Posteriormente é descrito um algoritmo como solução proposta para a recolha de objectos num ambiente com peças desordenadas.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões do trabalho realizado, comentários aos resultados obtidos e sugestões para trabalhos de futuros.

Capítulo 2

Sistema Proposto

Uma vez apresentado o problema na secção 1.1, a escolha do sistema de visão artificial é composto por uma câmara e um laser de linha, que por triangulação, permite complementar a informação da câmara com dados sobre a profundidade dos objectos, obtendo-se assim a informação tridimensional das peças.

A aquisição deste processo de visão é tratado por um conjunto de algoritmos de software que extraem as características dimensionais dos objectos permitindo calcular a posição e orientação da peça. Parâmetros estes, que são enviados para o manipulador industrial e para a garra. A incapacidade de calcular os parâmetros anteriores com uma relativa precisão pode-se traduzir numa operação errada que pode originar a danificação de peças e/ou da garra.

O software desenvolvido deve permitir uma reconfiguração simples e rápida do sistema, sendo de salientar a extrema importância da interface gráfica com o utilizador, que deve ser fácil de utilizar com acesso a funcionalidades apropriadas de reconfiguração do sistema.

A análise da comunicação com o manipulador industrial a utilizar é um aspecto importante a considerar, devendo ser escolhido o protocolo que apresente características que revelem ser mais eficiente e estandardizado por todas as marcas de manipuladores.

É necessário ter em consideração a escolha do hardware a utilizar com o objectivo de encontrar uma solução de custo adequado, nomeadamente na escolha da câmara. Além da diversa estrutura de transporte de peças, é necessário dar especial valor ao mecanismo da garra, principalmente em relação ao actuador que a constitui.

Neste capítulo será descrita a solução geral da arquitectura do sistema utilizado, o estudo e escolha do equipamento utilizado, assim como a construção do *setup* realizada.

2.1 - Arquitectura do Sistema

A análise do problema e dos objectivos pretendidos influenciam uma clara divisão numa arquitectura em subsistemas composto por cinco partes: a visão, o software de aquisição e processamento de imagem incluindo os algoritmos de cálculo da posição/orientação das peças, o sistema de transporte de peças também responsável pelo varrimento laser do sistema de visão e o sistema de manipulação que inclui a comunicação e controlo do manipulador robótico e da garra. Um esquema da estruturação e interacção dos componentes da arquitectura do sistema encontra-se apresentado na figura 2.1.

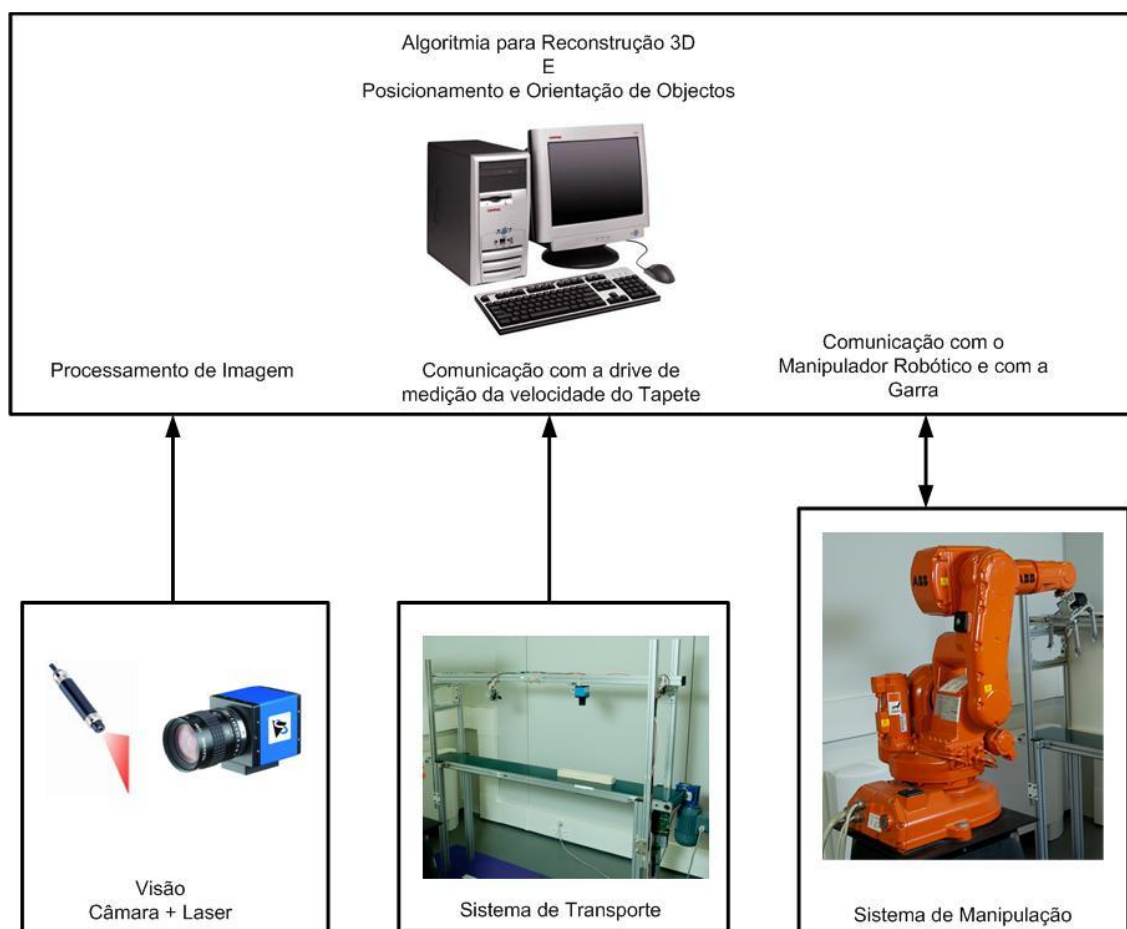


Figura 2.1 - Esquema da Arquitectura do Sistema

De acordo com [25], um sistema pode ser definido como uma combinação de elementos em interacção organizada para atingir um ou mais propósitos. Num projecto, a divisão do trabalho por subsistemas permite atacar problemas isoladamente tornando mais fácil a identificação de erros e por sua vez mais eficiente a sua resolução. No entanto, a integração dos subsistemas é aspecto fulcral a ter em consideração no desenvolvimento do projecto, devendo o sistema ser analisado e modelado para evitar conflitos na integração, normalmente segundo standards como por exemplo a ISA-95 [26]. Quando se desenvolve um

projecto por parte existe necessidade de identificar e manipular as propriedades de um sistema como um todo, o que em projectos complexos pode ser diferente de apenas somar as diversas propriedades de cada componente individual [27]. Pela figura 2.1 é possível observar a importância da componente PC, sendo este o elemento central do sistema tomando papel fundamental na integração dos subsistemas.

2.1.1 - Sistema de Visão

Este sistema é constituído por uma câmara USB monocromática e por um laser de linha, para a obtenção de frames identificando a linha do laser, incluindo também todo o processamento de imagem incluído no computador. Considerando a colocação da câmara e do laser, as frames adquiridas pela câmara são obtidos numas determinadas coordenadas, sendo que estas não são as mesmas coordenadas do mundo. Devido a isso é necessário perceber o modelo do mundo relativamente ao modelo da câmara para posteriormente deduzir a informação tridimensional de cada ponto do laser visto nas frames.

A câmara utilizada é da marca ImagingSource, sendo o seu modelo USB CCD Mono DMK21AU04 [28], que já tinha sido adquirida pelo laboratório para projectos anteriores. A sua alimentação é realizada pelo computador através do cabo USB. Não sendo uma câmara muito dispendiosa, esta oferece uma boa relação preço/qualidade. Com esta câmara obtém-se imagens com uma resolução de 640x480, sendo utilizada com uma lente com uma distância focal igual a 4mm. Para melhorar a performance da câmara foi acoplado um filtro na lente da câmara que permite apenas a passagem da luz vermelha, que é a cor do laser. No entanto, mesmo com a introdução deste filtro não se pode deixar de se ter em consideração que a luz branca da iluminação da sala, ou a luz do sol que entra pelas janelas, tem intensidade em todo o espectro, ou seja, também no vermelho.



Figura 2.2 - Câmara USB CCD Mono DMK21AU04 da ImagingSource

A opção da câmara a preto e branco deve-se ao facto de apenas ser necessário identificar em cada frame a linha do laser. Admitindo um ambiente com iluminação minimamente controlada, o brilho da linha de laser sobressai razoavelmente bem na imagem

não sendo necessário recorrer a informação de cor. As outras opções existentes e disponíveis no laboratório passavam por câmaras a cores do tipo Bayer.

As câmaras a cores, por razões económicas, em vez de possuírem três sensores CCD (referentes ao Vermelho, Verde e Azul) para cada pixel, apresentam um sensor CCD por cada pixel. Desta forma, cada pixel detecta a intensidade de uma das três cores, ver figura 2.2. Para um dado pixel, a intensidade das outras cores é calculada a partir da informação das componentes de cor dos pixels vizinhos, ver figura 2.3. Por isso a distribuição dos sensores CCD é realizada segundo um determinado padrão, denominado de padrão de Bayer, ver figura 2.4.

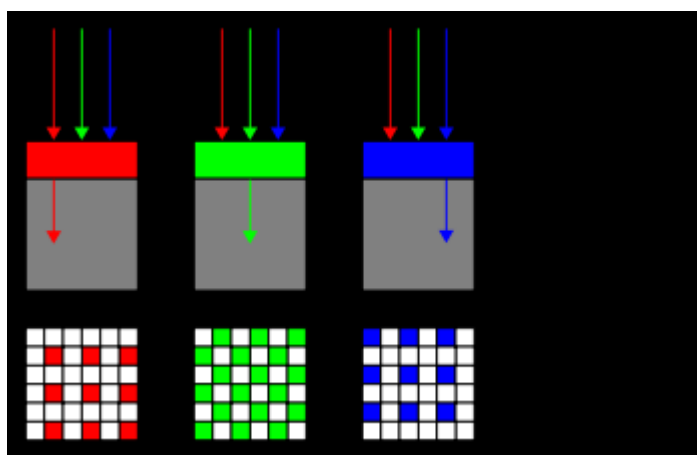


Figura 2.3 - Sensores CCD

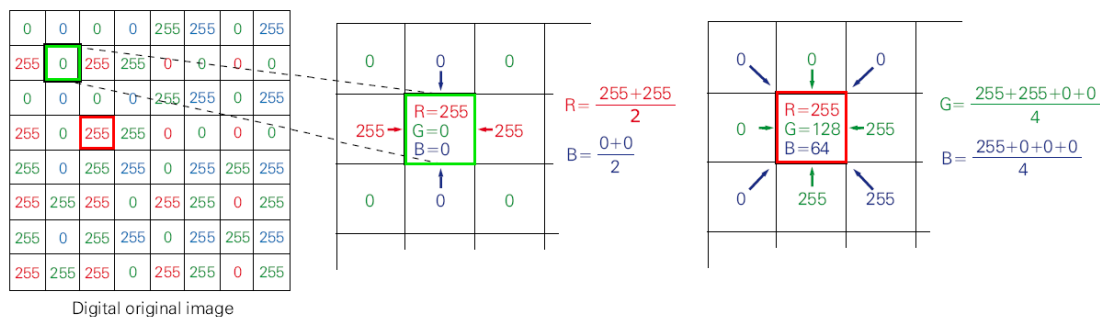


Figura 2.4 - Funcionamento do filtro de Bayer por Interpolação das Componentes de Cor pelo Valor Médio dos Pixels Vizinhos

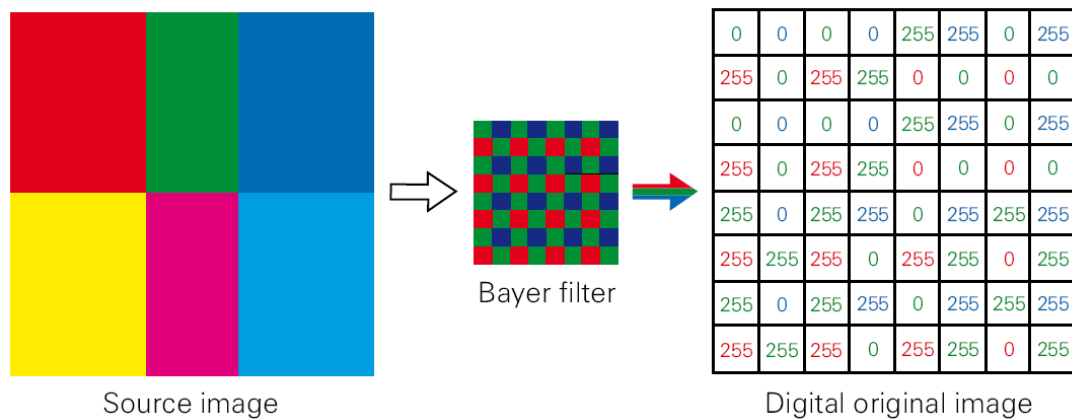


Figura 2.5 - Padrão de Bayer

No formato Bayer os dados necessitam ser previamente processados para construir uma representação RGB, ou seja, é necessário realizar uma transformação do formato Bayer para RGB. Este processo de conversão usando a informação dos pixéis vizinhos é tipicamente simples, uma vez que o método de conversão tipicamente usado porque apresenta a melhor relação qualidade/tempo de processamento, consiste numa interpolação bilinear — o valor RGB para um dado pixel é o valor médio dos pixéis vizinhos. Esta conversão apesar de simples pode originar resultados com uma baixa qualidade, sobretudo nas zonas com descontinuidades de cor, visto que este processo de transformação funciona na realidade como um filtro passa-baixo. Como o objectivo do processamento das imagens consiste na obtenção de medições, as imagens interpoladas não são uma boa solução porque suavizando as transições, atenuando desta forma eventuais descontinuidades de cor presentes num dado frame, além de acrescentar ruído à imagem.

De acordo com este formato Bayer, este padrão constituído por uma quantidade de verde relativo a 50% do total, enquanto a quantidade de vermelha e azul é de 25% cada. Este padrão tem esta configuração porque o seu autor Bryce E. Bayer, percebeu que o olho humano é duas vezes mais sensível ao verde do que ao vermelho e azul. Podemos então concluir que apenas $\frac{1}{4}$ do total de pixéis iria ser usado para captar o vermelho do laser já que os restantes servem o propósito de captar as cores verde e azul.

O processo de visão para a aquisição de imagem baseia-se na necessidade de identificar em cada frame a linha do laser. Admitindo um ambiente com iluminação minimamente controlada, o brilho da linha de laser sobressai razoavelmente bem numa imagem monocromática não sendo necessário recorrer a informação de cor.

Após esta análise, uma câmara em tons de cinzento aparece como a solução mais natural, onde cada pixel corresponde à luminosidade obtida por cada sensor, sendo que todos os pixéis registam o brilho do laser em contraste com um fundo escuro e não existindo a necessidade de efectuar conversões intermédias. Por este motivo, estas imagens da câmara

escolhida, apesar de se apresentarem a preto e branco, permitem uma maior nitidez do que as imagens devolvidas a cores.

Além de estes factores já abordados para a escolha da câmara, foi também tido em conta a existência de drivers e diversos exemplos de aplicação deste tipo de câmaras já que têm sido frequentemente usadas em projectos no grupo de investigação ligado ao laboratório onde este trabalho foi desenvolvido.

A lente utilizada possui uma distancia focal, FL , de 4mm, sendo é necessário calcular a distância de trabalho apropriada, ou seja, a distância entre o plano da lente e o tapete. Esta distância, W_d , é calculada de acordo com a equação seguinte:

$$W_d = FL \times \max\left(\frac{Obj_W + CCD_W}{CCD_W}, \frac{Obj_H + CCD_H}{CCD_H}\right) \quad (2.1)$$

Deste modo é possível conhecer a forma e o tamanho de um pixel. Considerando o formato de um pixel como um quadrado com tamanho igual l , o número de pixéis pode ser transformado numa medida em milímetros, pela seguinte equação:

$$(u_r, v_r) = l \times (u_{pixel}, v_{pixel}) \quad (2.2)$$

A partir da *datasheet* da câmara, sabemos o comprimento e a largura do CCD, $CCD_W=3.6\text{mm}$ e $CCD_H=2.6\text{mm}$, respectivamente.

Uma vez que o varrimento da peça é realizado pelo movimento do tapete, a dimensão do objecto a medir não é referente ao tamanho das peças, mas ao tamanho da área definida para processamento de imagem contendo o feixe laser. Considerando a estrutura mecânica do sistema de transporte, em particular a sua altura e a dimensão máxima do objecto a medir, Obj_W ou Obj_H , conclui-se que a lente utilizada serve perfeitamente para o nosso sistema.

Caso a lente não fosse indicada para o nosso sistema, seria necessário através da equação 2.3, encontrar uma lente com uma distância focal que satisfizesse as condições anteriores, sendo o valor mais pequeno de FL_H ou FL_W que limita a distância focal da lente.

$$FL_{H/W} = \frac{W_d \times CCD_{H/W}}{Obj_{H/W} + CCD_{H/W}} \quad (2.3)$$

Relativamente ao laser de linha, este é um dispositivo que faz incidir uma linha de luz vermelha sob o objecto que será analisada pela imagem captada pela câmara fixada na estrutura. Este tipo de laser consiste num elemento cuja luz incidirá sobre uma lente cilíndrica que o converterá para uma linha de laser. Através da rotação da lente o laser pode ser focado. O dispositivo utilizado é um laser de classe IIIb, da Lasiris, 3mW de potência, 670nm de comprimento de onda, com uma distribuição de intensidade não gaussiana (brilho

igualmente distribuído por toda a linha) que opera com uma tensão de alimentação de -12 volts.

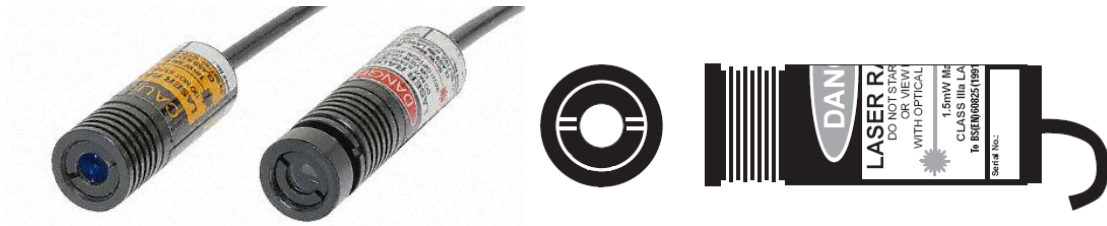


Figura 2.6 - Fonte de Laser e Lente Cilíndrica

2.1.2 - Software

A plataforma utilizada para o desenvolvimento de todo o software, que inclui a realização de todas as funções de processamento de imagem, reconstrução de objectos, cálculo da posição e orientação dos objectos, enviar parâmetros de definição para a câmara e ter a capacidade de receber os seus frames, comunicar com o manipulador industrial ABB, comunicar com a garra, foi o Lazarus [54].

O Lazarus é um software *opensource* semelhante ao Delphi, baseado em FreePascal, que tem sido muito usado nos muitos projectos realizados e que estão ainda decorrer no laboratório onde este trabalho foi executado havendo, por isso, uma base de conhecimento e experiencia por parte de diversos colegas de laboratório. Um grande suporte de utilização do Lazarus consiste numa biblioteca de componentes para Lazarus, desenvolvido pelos membros da equipa de futebol robótico 5DPO, inteiramente dedicado ao uso de câmaras *Firewire* e USB. Devido a esta biblioteca de componentes é possível a capacidade de adicionar uma câmara á aplicação, apenas pela colocação do seu componente na *form* (ambiente da interface gráfica).

Com esta ferramenta a programação visual da aplicação pode ser realizada de uma forma muito simples e pouco morosa. É possível criar uma interface gráfica, que se revela importante para facilitar a interacção homem-máquina da aplicação desenvolvida, para acompanhamento o estado do processo assim como ajuste de parâmetros do sistema.

2.1.3 - Estrutura de transporte

A estrutura transporte engloba um pequeno tapete rolante que funciona sistema de transporte sobre o qual está montada uma estrutura mecânica, construída com calhas industriais com forma de paralelepípedo, que possibilitam um elevado grau de flexibilidade,

uma vez que se pretendermos deslizar a câmara ou o laser, seja possível de fazer de forma rápida.

Num ambiente com iluminação minimamente controlada, o brilho da linha de laser sobressai razoavelmente bem na imagem. Com este pensamento de controlar a iluminação na área de processamento de imagem foi montado uma estrutura auxiliar recorrendo a placas *k-line* (placas de poliestireno expandido) usando a estrutura mecânica como base de suporte para ostentação destas placas. A estrutura foi toda revestida através de placas *k-line* ficando apenas com uma abertura de tamanho necessário para a inserção de peças no tapete rolante e com uma abertura maior para o movimento do manipulador robótico na acção de pegar nas peças. A estrutura em *k-line* foi montada com o intuito de tapar o máximo possível a zona de processamento de imagem sem prejudicar a incidência do laser no tapete, de forma a compensar as aberturas necessárias na estrutura, em particular a necessidade de área aberta para o funcionamento do manipulador uma vez que o sistema de aquisição de imagem se encontra relativamente perto da zona de funcionamento do manipulador. Com esta nova estrutura reduziu-se a interferência da luz exterior e iluminação artificial do laboratório, obtendo-se imagens mais escuras mas onde, agora, é facilmente distinguível a linha de laser do restante plano de fundo.

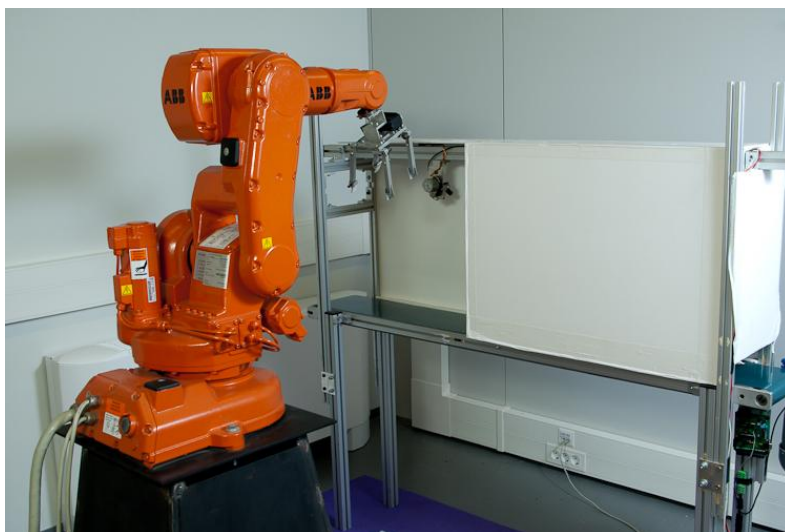


Figura 2.7 - Estrutura de transporte com condicionamento de luminosidade através de placas *k-line*



Figura 2.8 - Estrutura de transporte sem condicionamentos de luminosidade

O motor utilizado para movimentar o tapete é um motor da marca Motovario, modelo NMRV/030, que é controlado pelo inverter da Omron de modelo SYSDRIVE 3G3JV.

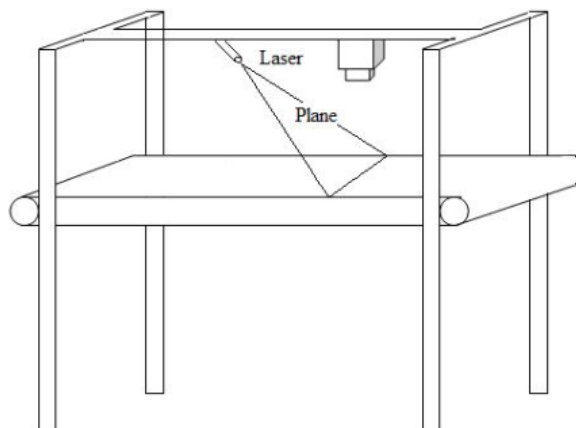


Figura 2.9 - Estrutura de Transporte

O sistema de transporte contém ainda uma parte fundamental nos resultados do sistema de visão que consiste num drive com elementos principais um micro controlador Atmega8 [55] da Atmel e um conversor Max232, que tem como objectivo contar os impulsos do *encoder* da marca Omron, modelo E6A2-CW5C [56], enviar esses impulsos periodicamente para o programa do PC de modo a calcular a velocidade real do tapete.

A velocidade do tapete é calculada por:

$$velocidade = \frac{passos_{medidos} \times metros_{ref}}{passos_{ref} \times intervalo_{tempo}} \quad (2.4)$$

onde, $\text{passos}_{\text{medidos}}$ é o número de passos medidos durante o $\text{intervalo}_{\text{tempo}}$ entre cada envio do número de passos medidos pelo *encoder*. Os $\text{passos}_{\text{ref}}$ são o número de passos do *encoder* para o tapete percorrer uma distância, $\text{metros}_{\text{ref}}$.

A drive genérica usada é uma placa PCB normalmente utilizada pela equipa de futebol robótico 5DPO. Este hardware contém um esquema de ligação entre o microcontrolador e o conversor, bastando assim realizar as ligações necessárias do *encoder* ao microcontrolador e programar este com o código necessário para realizar a função desejada. A trama enviada pela microcontrolador consiste no número de passos dados pelo *encoder* num intervalo de tempo.

2.1.4 - Manipulador Robótico

O manipulador robótico utilizado neste trabalho é da marca ABB, modelo IRB 140. Este é um manipulador de 6 eixos concebido especialmente para indústrias de manufactura onde a flexibilidade dos robots é o alicerce da automação. O controlador que acompanha este robot é o modelo S4Cplus.

É apresentado na figura seguinte um esquema do manipulador.

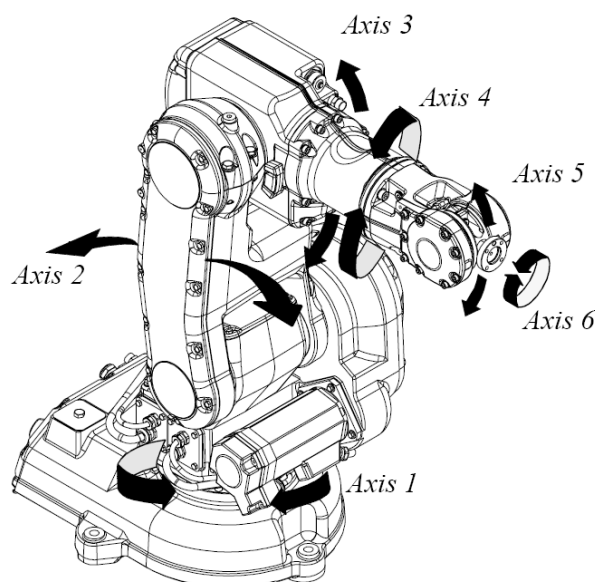


Figura 2.10 - Esquema de um manipulador de 6 eixos

O robot está equipado com o sistema operativo BaseWare OS, que é o responsável pelo controlo de todos os seus aspectos de utilização: controlo de movimento, programas de comunicação e desenvolvimento e execução de aplicações. Um aspecto importante utilizado é a capacidade de comunicar com sistemas externos. O controlador permite a comunicação

segundo diversas formas com dispositivos externos, como por exemplo comunicação com impressoras, terminais, computadores ou outros equipamentos, sendo a estrutura de comunicação esquematizada na figura 2.11.

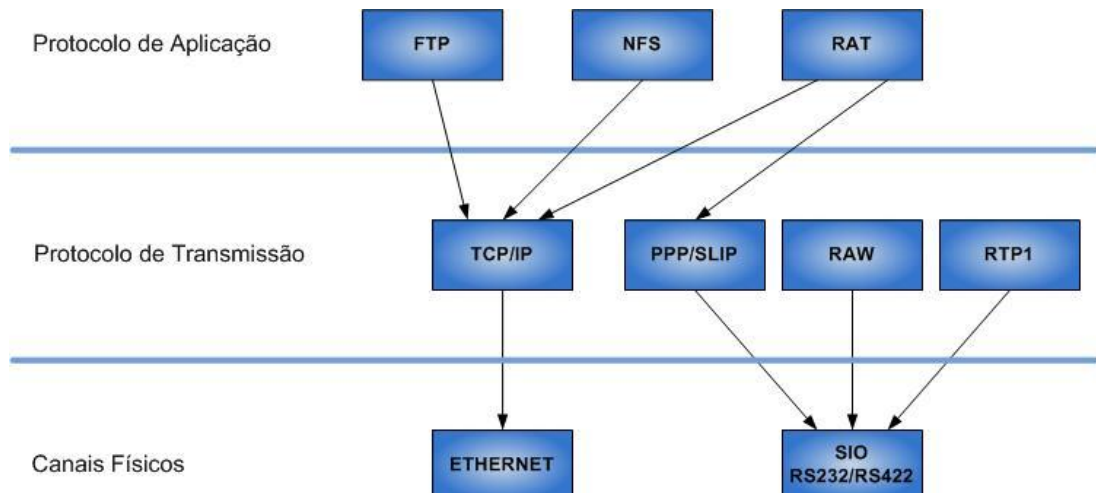


Figura 2.11 - Estrutura de Comunicação do Manipulador Robótico

O canal SIO1 realiza a comunicação por RS232 com RTS (*request to send*) e CTS (*clear to send*). O canal SIO2 funciona por RS 422 full-duplex. Ambos os canais poderão funcionar com uma velocidade de transmissão que varia entre 300 e 38400 b/s, sendo que comunicação a realizar visa apenas enviar os dados de três variáveis para o robot a velocidade de transmissão não é um assunto crítico. O canal físico de comunicação Ethernet apresenta dois canais de comunicação, LAN e SERVICE.

Os protocolos de transmissão existentes são os seguintes: PPP (transmissão ponto a ponto, utilizada para a comunicação RAP através de um canal serie), SLIP (*Serial Line Interface Protocol*), TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), RTP1 (Protocolo especial somente para *WeldTime*) e RAW (Protocolo sem *Handshake*).

Os protocolos de aplicação disponíveis são os conhecidos FTP (*File Transfer Protocol*), que permite o arquivo completo de um sistema para outro, e o NFS (*Network File System*), acesso de um computador ao sistema de arquivos de outro computador. Para o controlo e monitorização do robot através de um computador externo existe o protocolo RAP (*Robot Application Protocol*).

O controlador permite ainda o acesso directo a porta serie, tal como se faria num computador externo: um canal série deve primeiro ser aberto, recebendo um *descriptor* que será seguidamente utilizado como referência para as leituras e escritas na porta em questão.

Apesar de não se encontrar disponível para a versão do controlador que dispomos no laboratório, a ABB realmente dispõe noutras versões de uma comunicação por *Socket*

Messaging, que permitiria alterar parâmetros de variáveis e definições do sistema a partir de um PC externo, de uma forma mais standard

Para utilizar uma comunicação por Ethernet que não restrinja a transferência de ficheiros, podemos utilizar o protocolo de aplicação RAP, que fornece os serviços de acesso a variáveis, transferência de ficheiros e controlo de programas. Este protocolo funciona segundo uma forma Cliente/Servidor (PC/Robot), onde o cliente toma a iniciativa e realiza um pedido ao servidor que lhe retornar a uma resposta. Também o servidor poderá enviar uma mensagem espontânea ao cliente se este tiver feito uma subscrição. O protocolo RAP assenta sobre o protocolo RPC/XDR (*Remote Procedure Call*) que se baseia na invocação de um procedimento a uma máquina remota.

Após a análise das possibilidades de comunicação existentes e da necessidade de comunicação relativamente ao envio das três variáveis de posição da peça para o manipulador podemos concluir que para a resolução no nosso problema o protocolo RAP seria a escolha mais interessante a enveredar uma vez que este já possui um conjunto de chamadas predefinidas. Desta forma, não é necessário definir todo o protocolo de troca de dados.

Contudo, a pensar numa aplicação com continuidade, o facto do protocolo RAP não ser standard e visto que o protocolo RPC sobre o qual o primeiro se assenta ter vindo a ser descontinuado, não abona a favor, não se verificando uma escolha com futuro. Como já referido devido ao carácter da comunicação a ser realizada a velocidade não é um aspecto crucial, sendo portanto preferível a opção de comunicação através do canal de serie.

Neste trabalho devido à existência no laboratório de um manipulador industrial MOTOMAN HP6, com controlador NX100, que se trata de um robô com seis graus de liberdade tal como o manipulador ABB utilizado neste trabalho. Existiu por isso a possibilidade inicial de o trabalho ser realizado no manipulador Motoman, sendo que foi implementada uma possibilidade de comunicação com este. Para isso recorreu-se à aplicação ComMotoman que permite enviar alguns comandos via TCP para o manipulador. A aplicação implementada envia a informação de posicionamento para o ComMotoman através de um pacote UDP.

Uma outra possibilidade passaria por utilizar tal como em [40], o protocolo BSC (BiSync), um protocolo para conexões ponto-a-ponto, half-duplex. Através deste tipo de comunicação seria possível que o software desenvolvido carrega-se valores para variáveis específicas do manipulador que levariam a este se adapta-se a diferentes posições e orientações das peças.

2.1.5 - Garra

A garra mecânica construída consiste numa estrutura em alumínio com quatro dedos. A sua forma de contacto com o objecto é classificada por contacto externo e por fricção. O

mecanismo de funcionamento da garra tem como base um sistema de molas de modo a dar flexibilidade aos dedos e um actuador responsável pelo fecho ou abertura. Assim, com esta construção usando molas é possível que a garra sofra possíveis impactos sem que se degrade estruturalmente ou danificando o motor impedindo o seu funcionamento. Existe uma mola por cada dedo da garra. Um par de dedos, do mesmo lado físico de fecho da garra, tem um posicionamento fixo suportado por molas existindo assim uma ligeira capacidade de cedência no caso de impacto ou excesso de pressão. O outro par de dedos tem mobilidade que é realizada por o mecanismo de molas e pelo actuador de controlo. Este par de dedos está montado com uma barra intermédia que suporta duas molas em pressão para executar um movimento de abertura. O esforço de abertura é desta forma realizado pelas molas, sendo que o movimento de fecho é realizado pela rotação do motor. O modo com que o motor actua sobre o par de dedos com mobilidade é realizado por uma mola com maior rigidez do que as que realizam esforço de abertura. Assim o motor faz esforço através da sua rotação até um determinado ângulo de fecho para fechar a garra por intermédio de um par de dedos, no entanto no caso de abertura o motor roda até um ângulo de abertura realizado aliviando a tensão das molas permitindo que estas realizem o levantamento dos dedos e a consequente abertura da garra.

É importante referir que devido às diferentes larguras que as peças podem possuir e tendo em conta a forma recta dos dedos da garra, foi essencial estabelecer uma capacidade de ajuste nas extremidades de contacto da garra. Assim, as extremidades de contacto têm um grau de liberdade que permite mediante o ângulo dos dedos da garra, com o contacto sobre a peça que estas extremidades ajustem o seu plano de contacto ao plano da peça. Além deste pormenor de flexibilidade, as extremidades de contacto estão revestidas com uma borracha de modo a aumentar o atrito com a peça para que esta não deslize.



Figura 2.12 - Imagem física da garra

O actuador responsável pelo controlo e funcionamento da garra é o RX-64 da Dynamixel [42]. Este modelo pertence à série de actuadores Dynamixel da Robotis. O Dynamixel RX-64 é um pequeno actuador com dimensões $40.2 \times 61.1 \times 41\text{mm}$ (altura, comprimento, largura) e um peso de 125g. Apesar das suas reduzidas dimensões possui um elevado binário, $52 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$, com um corpo em plástico sendo que a sua engrenagem é completamente metálica permitindo uma grande fiabilidade e robustez de funcionamento. A escolha do actuador recaiu sobre este modelo principalmente pelo seu elevado binário e pela sua robustez. O actuador permite uma velocidade sem carga de 64 rpm e tem um potenciômetro como sensor de posição com uma resolução de $300^\circ/1024$. Este actuador contém um motor Maxon RE-MAX, que é um motor DC de rotor oco que permite obter uma elevada potência graças aos ímanes de neodímio.



Figura 2.13 - Actuador Dynamixel RX-64

O protocolo de comunicação com o actuador é RS485, com uma comunicação série assíncrona (8bit, 1stop, sem paridade), sendo que a ligação física de comunicação com este actuador é RS485 *Multi Drop Bus*. Para se realizar a comunicação do PC com o actuador usou-se um conversor USB-RS485. Todos os comandos executados entre a aplicação do PC e o conversor são realizados através de comunicação série. O actuador tem uma tabela onde na memória ROM é armazenada alguns dados, como o ID do actuador, o baud rate, o modelo, etc. Na memória RAM a tabela armazena a posição actual do actuador, a posição objectivo, a velocidade do movimento ou o binário actual. Assim, neste quadro, é possível gravar os dados que serão úteis para mover o actuador para a posição pretendida, a uma velocidade de referência. É possível também, ler a tabela do actuador para se ter conhecimento de alguns parâmetros como por exemplo o binário actual do actuador.

A estrutura da trama envia é:

$$[0 \times FF][0 \times FF][ID][Tamanho][Instrução][Parametro1] \dots [ParametroN] [Checksum] \quad (2.5)$$

Onde,

$[0 \times FF][0 \times FF]$ é o sinal que notifica o inicio da trama

$[ID]$ é a identificação do actuador que vai receber a trama

$[Tamanho]$ é o tamanho da trama dada por $[ParametroN] + 2$

$[Instrução]$ é o comando que identifica a instrução que pretendemos realizar

$[Parametro1]$ é o parâmetro que é usado para a realização de uma instrução

$[Checksum]$ é usado para verificar se a trama é danificada durante a comunicação, sendo calculado por:

$$Check\ Sum = \sim (ID + Length + Instruction + Parameter1 + \dots Parameter\ N) \quad (2.5)$$

A tabela dos endereços para as instruções pretendidas, assim como a tabela de endereços dos parâmetros pode ser observada no manual do actuador.



Figura 2.14 - Conversor USB-RS485

2.2 - Estrutura e funcionamento do sistema

Como já referido o sistema é composto por um elemento de controlo central que é o PC que é constituído pelos algoritmos de processamento de imagem, controlo de luminosidade e protocolos de comunicação. Em agregação com o PC existe o sistema de transporte de peças e o manipulador robótico que engloba o robot ABB e a garra.

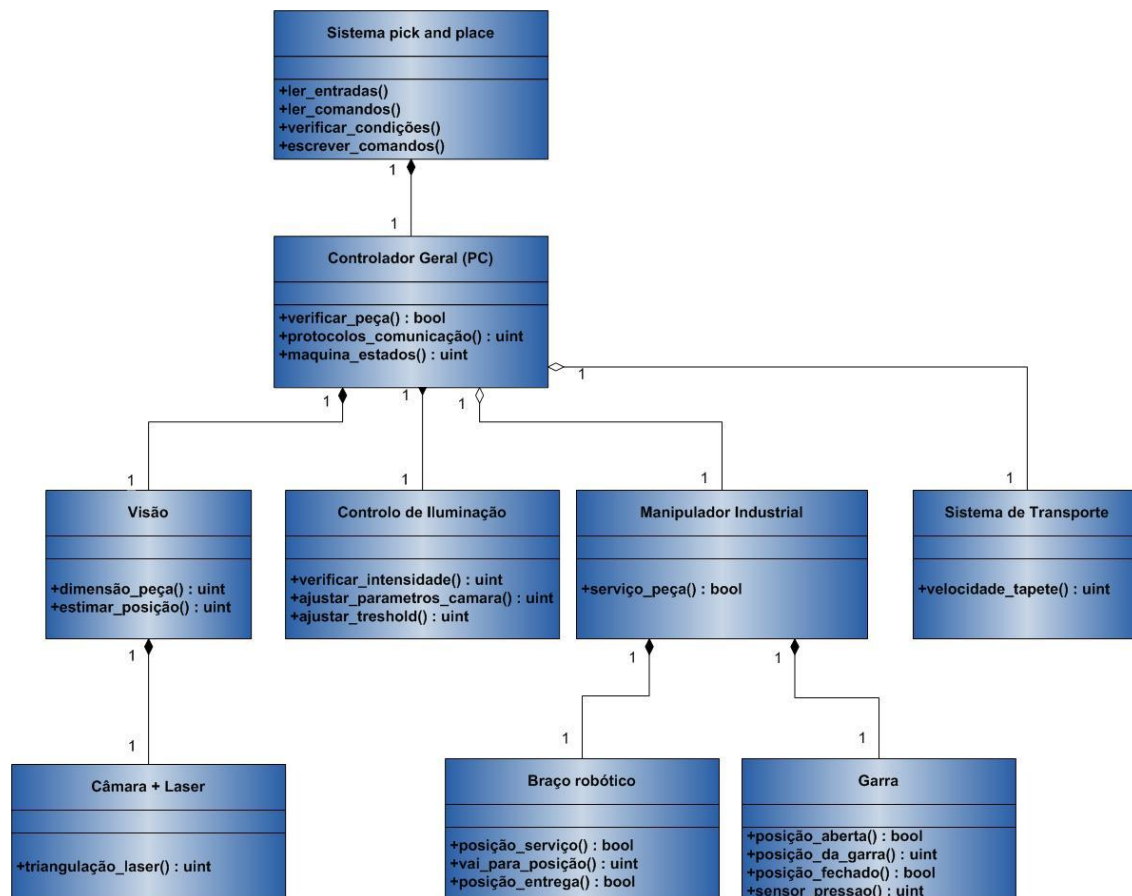


Figura 2.15 - Diagrama Estrutural do Sistema

Após a análise dos vários sistemas constituintes do projecto a sequência do processamento de uma peça é simples de descrever.

Estando o sistema de transporte em funcionamento, isto é, o tapete a rolante em movimento por força do motor a uma determinada velocidade, ao entrar uma peça no transportador esta vai percorrer a zona de análise de peças á velocidade do tapete permitindo assim o seu varrer toda a peça ao mesmo tempo que a câmara irá enviar as frames para o computador onde se irá processar a imagem e retirar a informação tridimensional dos pontos da linha do laser. Após o varrimento da peça o sistema visão irá continuar com o processamento dos dados de imagem adquiridos de modo a realizar a reconstrução tridimensional da peça. Após a reconstrução 3D, o sistema passa para processamento de toda a informação segundo um conjunto de algoritmos e funções de minimização que têm como finalidade obter os dados a posição e orientação da peca.

Em concordância com [42], as etapas pelas quais se obtém o modelo tridimensional da peca e se processam esses dados podem ser resumidas por: Desenvolvimento de Hardware, Calibração, Reconstrução 3D, Pós-processamento e Aplicação.

Estando realizado todo o processamento de imagem a fase a seguir realizada passa pela comunicação com o manipulador para que a partir da informação recebida mover a sua

ferramenta (garra) para o centro da peça com a orientação devida. Para por fim a comunicação com a garra para manipular a peça e através do manipulador robótico leva-la para um novo ponto desejado.

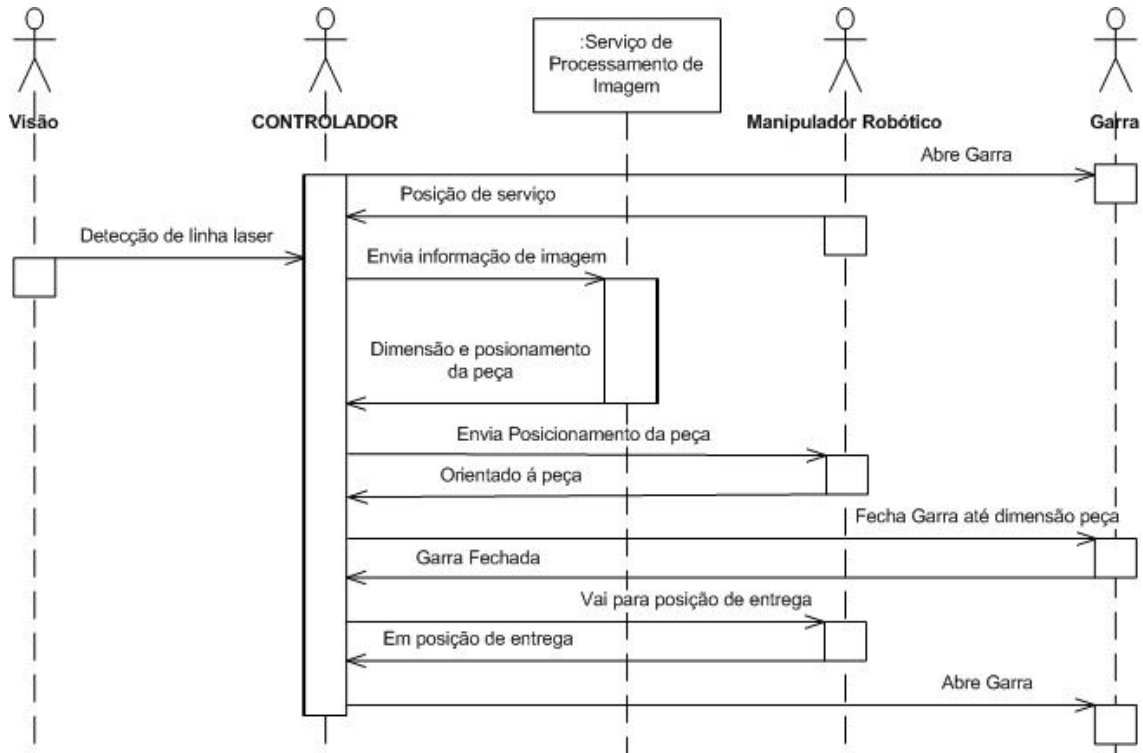


Figura 2.16 - Diagrama Sequencial do Funcionamento do Sistema

Capítulo 3

Visão Artificial

O sistema de visão artificial, como referido anteriormente no capítulo 2, baseia-se na conjugação de um laser por triangulação com uma câmara USB Monocromática, em que cada pixel é caracterizado por uma intensidade luminosa numa escala de cinzentos, entre os valores 0 (preto) e 255 (branco). O sistema de visão é o responsável pelo controlo do fluxo do programa durante o varrimento de um objecto pelo laser. De cada vez que a câmara capta uma *frame* e a envia para o computador, o sistema operativo lança o evento respectivo que lhe está associado e chama a função para processamento de imagem. Nesta função, é realizada a detecção da linha e a reconstrução dos pontos 3D.

O *frame rate* estabelecido para a câmara vai controlar o fluxo de processos do programa de processamento de imagem, assim como funcionará como base de tempo para a máquina de estados de controlo do braço robótico e da garra. À chegada de uma *frame* são executadas as rotinas de detecção de linhas, de calibração de luminosidade, de reconstrução 3D e de visualização, procedimentos estes limitados em termos temporais ao *frame rate* estabelecido (7.5 FPS). Apesar de a câmara proporcionar um *frame rate* máximo de 15 FPS, o computador usado só consegue processar a 7.5 FPS. A solução mais correcta para se determinar a cadência de controlo é de facto o uso da ocorrência das *frames* da câmara como temporizador do programa. Esta temporização demonstra-se vital para o processo de controlo da garra, em que é necessário calcular o tempo correcto em que a peça estará no local da ponta da ferramenta do manipulador para a garra fechar. Deste modo a peça é manipulada pelo seu centro de massa, calculado através da forma desta, para distribuir o peso da mesma nas pegadas da garra e assim facilitar o seu transporte.

É importante demonstrar o porquê da utilização do filtro de luz vermelha na lente pelo que se apresentam duas *frames* captadas pela câmara, onde se pode observar a linha de laser (vista a branco) ao incidir sobre uma peça. Numa das *frames* usou-se apenas a lente da câmara (figura 3.1), sendo que na outra *frame* foi acoplado o filtro na lente (figura 3.2). Na *frame* com utilização do filtro, a imagem é muito mais escura relativamente à outra,

permitindo assim retirar a informação que não interessa e que poderia tornar-se fonte de ruído, salientando-se simplesmente, por contraste, a linha de laser.

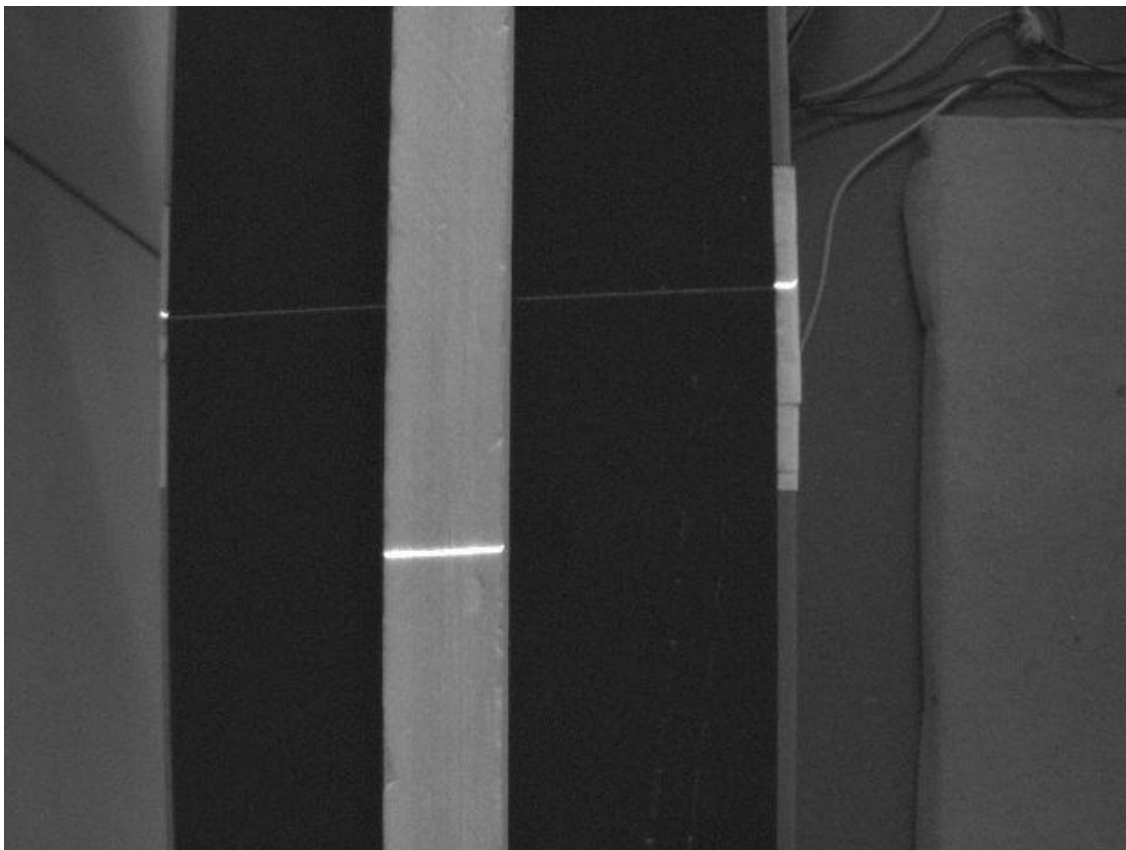


Figura 3.1 - Imagem de uma *frame* sem filtro de vermelho

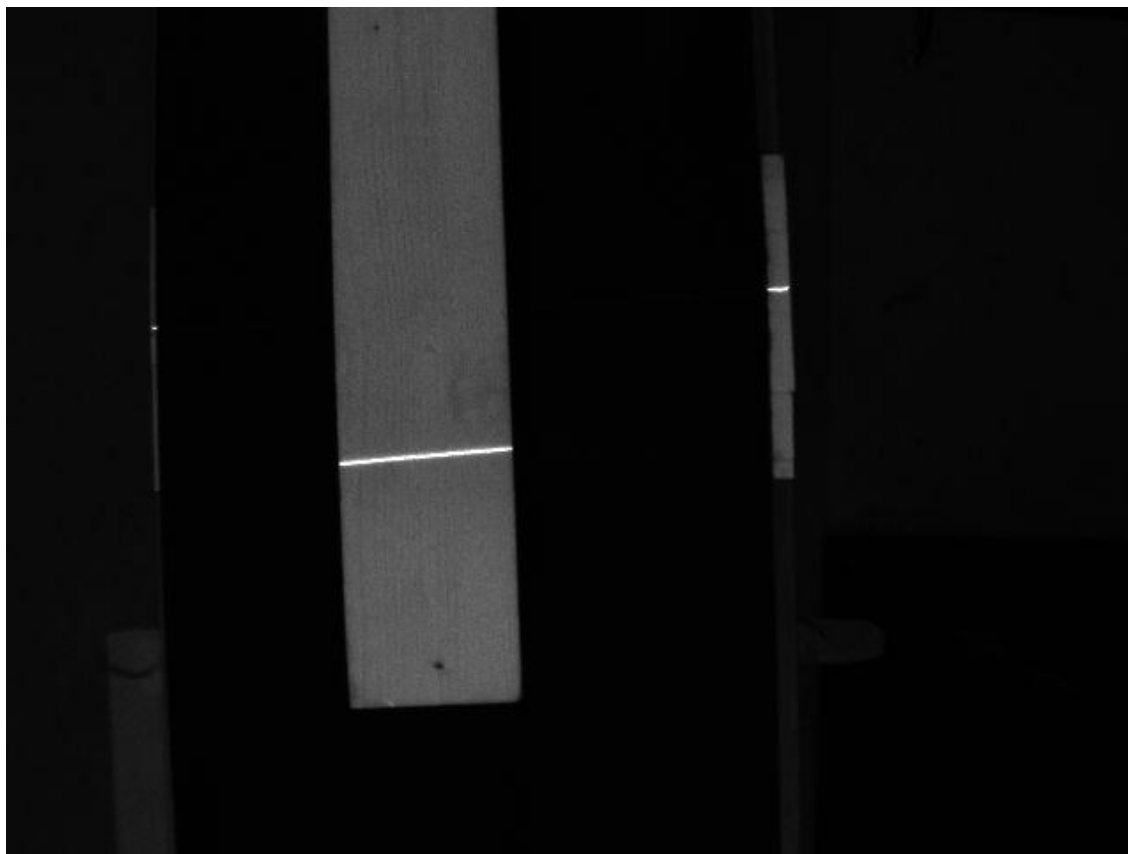


Figura 3.2 - Imagem de uma *frame* com filtro de vermelho

A utilização do filtro não é um aspecto fundamental para o funcionamento do processo de visão sendo que o sistema funcionaria sem o seu uso. No entanto, a sensibilidade luminosa seria maior e, na falta de outros condicionamentos secundários, como é o caso da estrutura em *k-line*, originaria piores resultados devido à elevada possibilidade de ruído. O sistema de calibração de luminosidade da imagem adquirida mediante o ajuste dos parâmetros da câmara é um aspecto preponderante para o processamento de imagem, tornando praticamente desnecessário o uso do filtro, conseguindo-se uma boa detecção da linha do laser incidente na peça. Contudo, a falta do filtro torna o sistema mais sensível porque vai ser afectado com um peso muito maior pelas outras componentes de cor da luz que não só a luz vermelha, aumentando a variação da luminosidade da imagem adquirida. Em substituição do filtro poderia considerar-se um conjunto de filtros que poderiam dar mais robustez à informação obtida mas que iriam tornar o processo bem mais pesado em termos de tempo de processamento. É por isso um elemento que induz um efeito muito positivo no processo de detecção do feixe laser incidente na peça aquando do processo de tratamento de imagem, reduzindo o ruído luminoso e aumentando o contraste da linha do laser.

3.1 - Processamento de Imagem

A estrutura montada impõe uma posição fixa tanto à câmara como ao laser, incidindo este sempre sobre a mesma zona da imagem quando não existe peça. No caso de existência de peças o laser vai aparecer numa outra região. Assim, é possível eliminar uma vasta área de imagem que não contém informação útil para se processar. Esta característica permite-nos limitar as zonas que, na prática, interessam processar: uma primeira zona (figura 3.4) onde o laser é visível sempre que não está a incidir sobre um objecto (incide no plano de referência), e uma segunda zona (figura 3.4) onde o laser aparece sempre que está sobre uma peça. Apenas estas duas zonas necessitam ser processadas, melhorando assim o tempo de processamento de imagem.

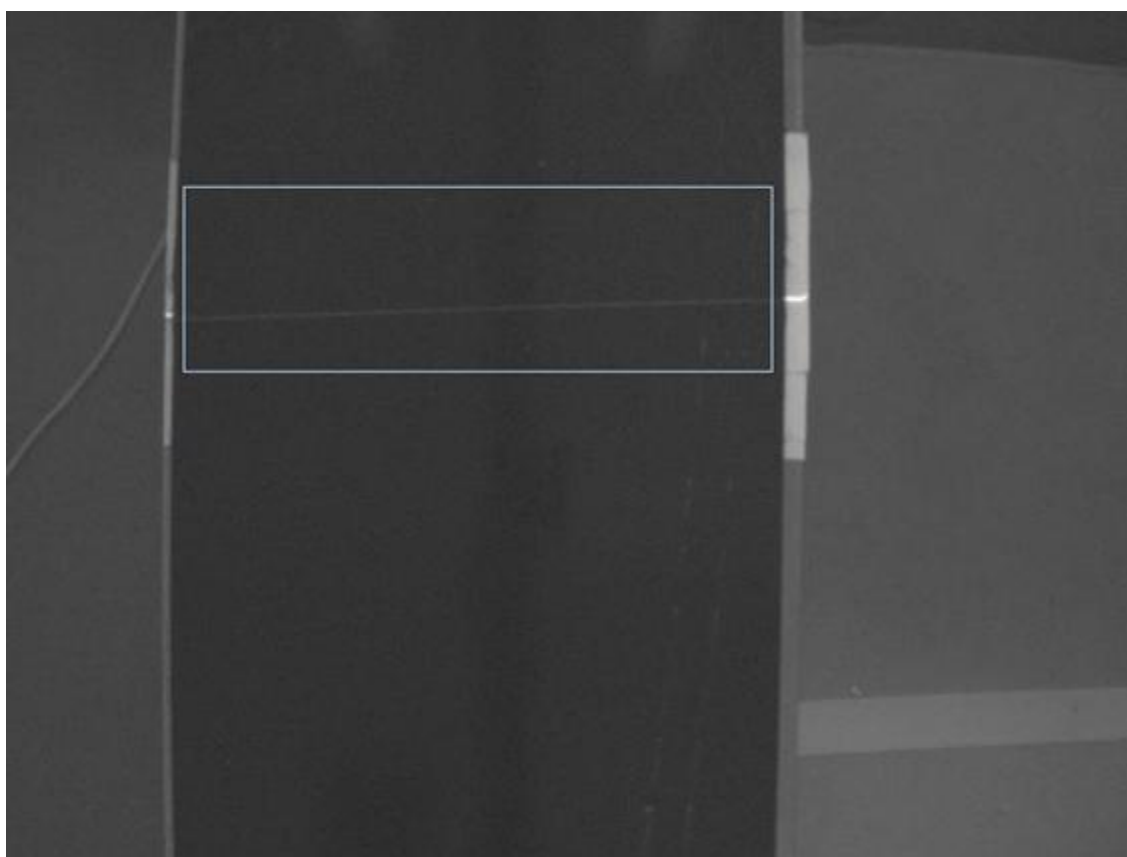


Figura 3.3 - Imagem de uma *frame* com o laser incidente no plano do tapete

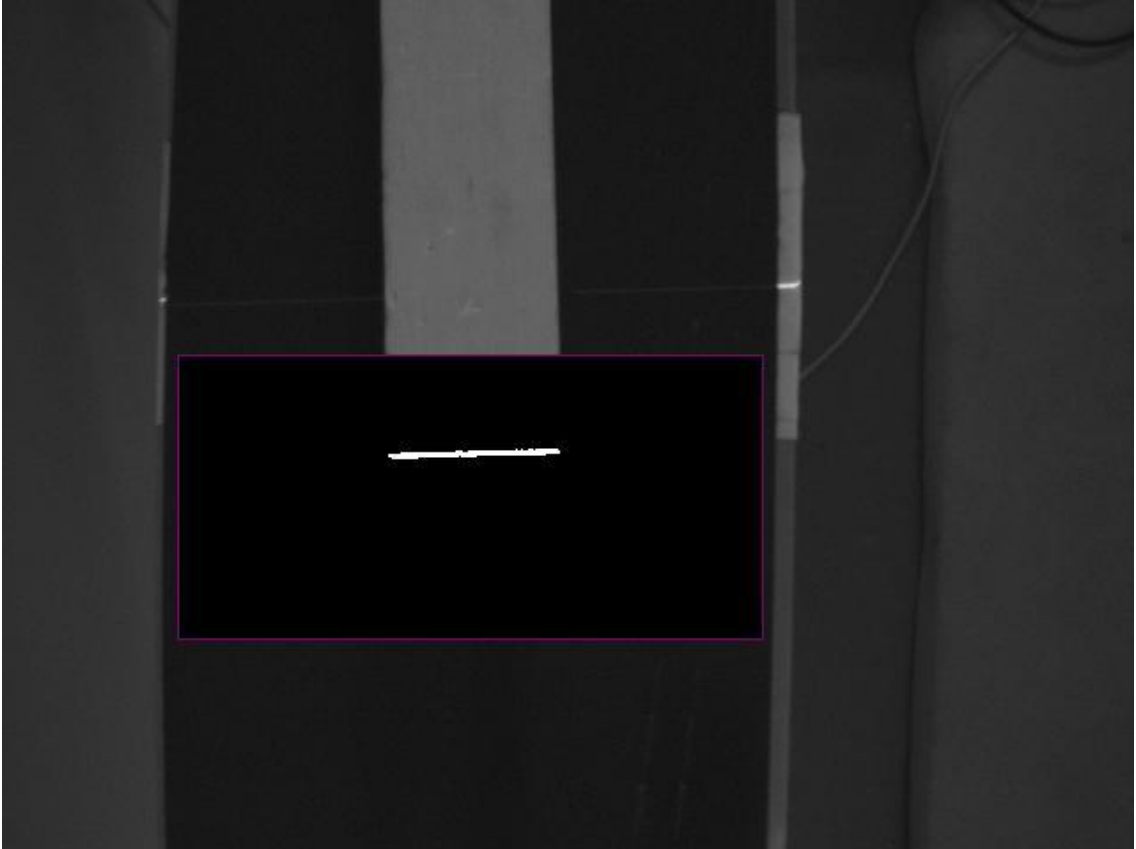


Figura 3.4 - Imagem de uma *frame* com o laser incidente sobre a peça

A existência da linha de laser numa das zonas tem como pressuposto o não aparecimento da linha na outra zona. Deste modo, uma nova peça, ao entrar no transportador, é detectada sempre que se deixa de ter a linha de laser a incidir na totalidade do plano de referência (zona a branco) e passa a incidir na outra zona (zona a roxo).

Aquando da recepção de uma *frame*, são iniciadas as rotinas de processamento de imagem. O primeiro passo é a binarização da imagem, a qual consiste em passar a imagem em escala de cinzentos adquirida pela câmara para uma imagem a preto (valor 1) e branco (valor 0).

A função de binarização pode ser descrita como:

$$Frame_{B\&W}[u, v] = \begin{cases} 0 & \text{se } Frame[u, v] < threshold \\ 1 & \text{se } Frame[u, v] \geq threshold \end{cases} \quad (3.1)$$

Nesta função o índice $[u, v]$ representa o pixel de coordenadas (u, v) da *frame*, sendo que o índice u representa a direcção horizontal da esquerda para a direita, enquanto que o índice v indica a direcção vertical, de cima para baixo. O *threshold* é o limiar de binarização para o qual os valores de cada tom de cinzento são binarizados. Abaixo do *threshold* o pixel toma valor 0 (preto), acima toma valor 1 (branco).

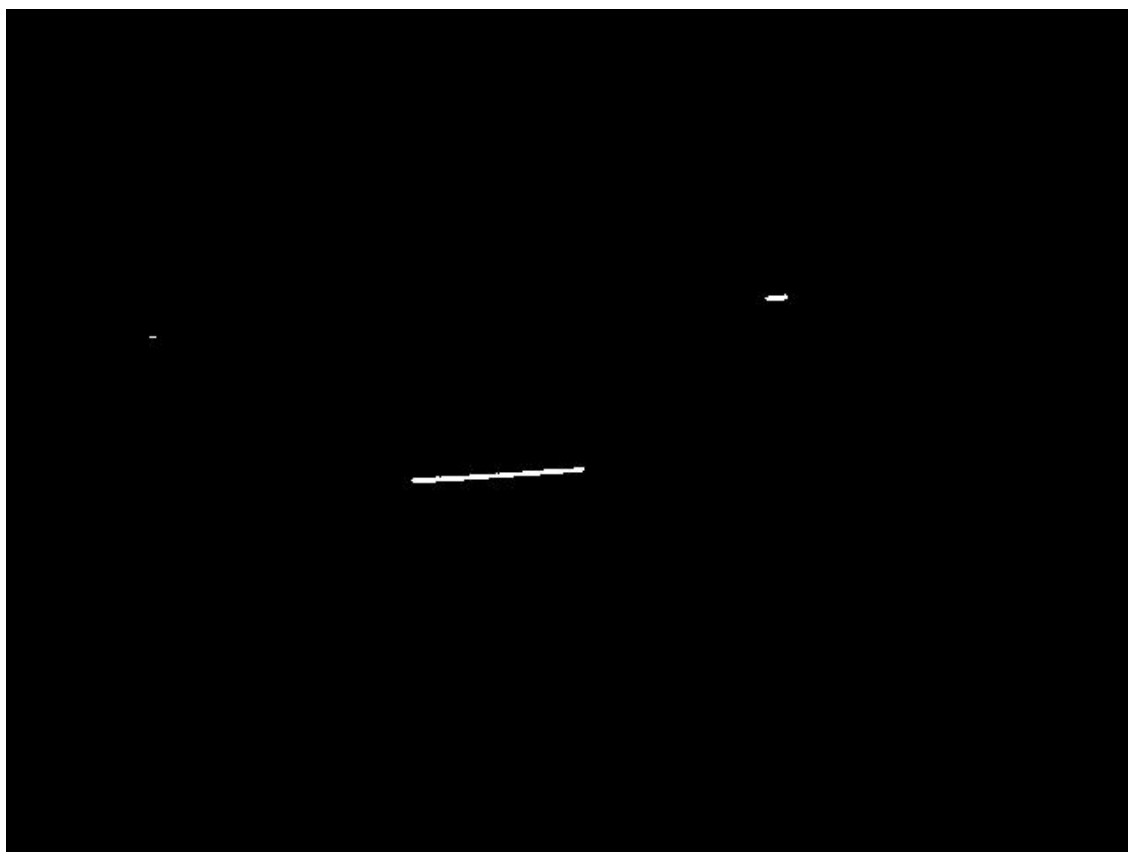


Figura 3.5 - Resultado da binarização de uma *frame*

Relativamente às duas zonas de processamento referidas, são usados *thresholds* diferentes para cada uma delas. Esta distinção de *thresholds* acontece devido ao facto de quando o laser está sobre o plano de referência, que é um verde-escuro, a linha aparece mais ténue e o *threshold* é, por esse motivo, baixo. As peças são tipicamente claras e a luz do laser é bastante mais intensa quando incide sobre elas, levando a que o *threshold* tenha de ser mais elevado para não expandir demasiado a linha e não sofrer interferência da iluminação exterior e reflexos. No entanto, devido a esta dualidade de *thresholds*, é possível ajustar o *threshold* para as cores das peças sem influência da outra região. Nas figuras 3.6 e 3.7 é possível observar o resultado do processo de binarização de uma *frame* com um *threshold* adequado e com uma má escolha de *threshold*, respectivamente.

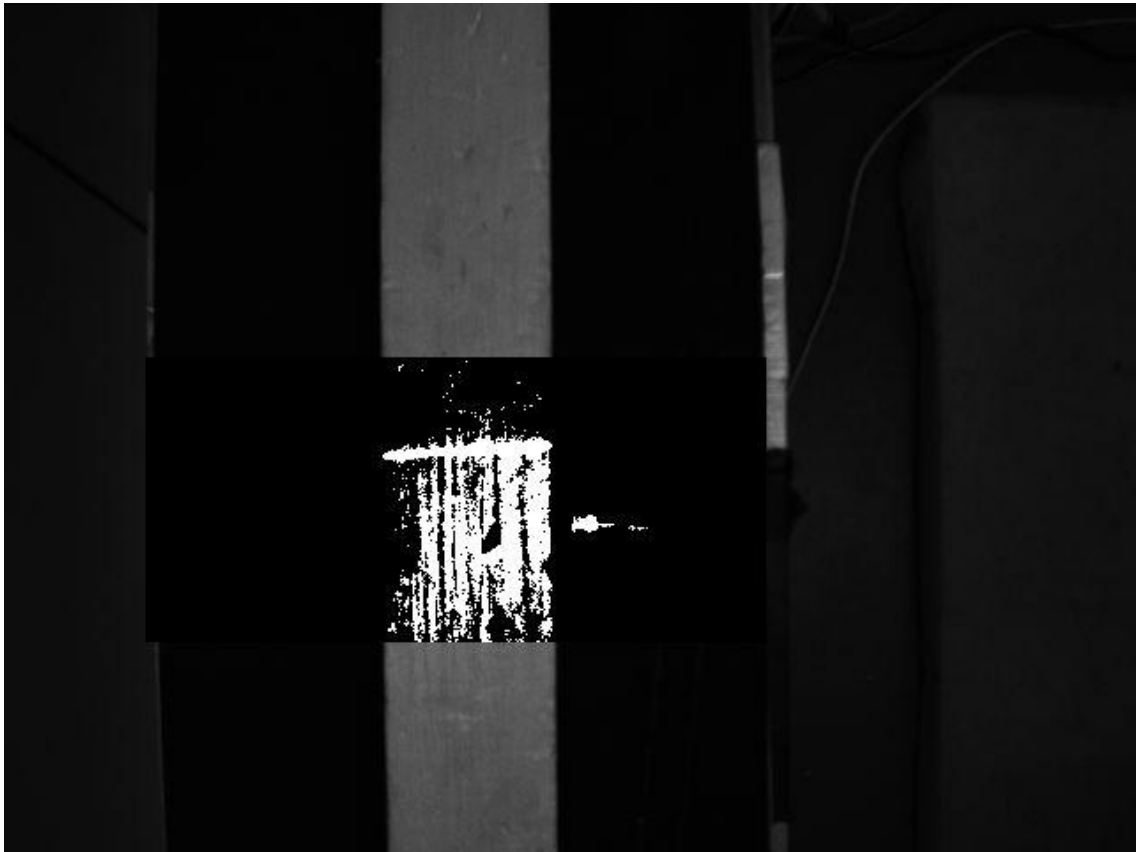


Figura 3.6 - *Frame* com threshold desadequado



Figura 3.7 - *Frame* com threshold adequado

A imagem colocada na interface gráfica permite aos utilizadores observar os pixéis de interesse e a necessidade de ajustar o valor de *threshold* até que a linha de laser seja detectada com o mínimo de ruído, para compensar os efeitos da iluminação natural e/ou artificial.

O processamento de imagem tem como objectivo a detecção da linha de laser incidente na peça. Esta detecção consiste em adquirir a linha de laser com uma orientação o mais horizontal possível. Era permissível realizar este procedimento de detecção de linha procurando o pixel de valor mais intenso e definindo este como o ponto escolhido como índice v da linha laser. No entanto, este pensamento seria demasiado simples e pouco congruente com os resultados obtidos, porque, por vezes, este ponto não é um ponto único, originando que qualquer ruído possa ser considerado erradamente como um ponto da linha laser.

O algoritmo de detecção de linhas é realizado através de varrimentos verticais na imagem, procurando um pixel com intensidade acima do *threshold* para cada coluna e o ponto encontrado define-se como início do segmento, v_i . O varrimento da imagem prossegue sendo guardados todos os pontos percorridos até se encontrar pixéis com intensidade abaixo do *threshold*, correspondendo este ao fim do segmento, v_f . Desta forma, em cada coluna da imagem é encontrado um segmento com início em v_i e fim em v_f , que forma um conjunto de pontos que definem uma linha. Cada um dos segmentos encontrados é caracterizado pela coluna u da matriz. Este segmento é criado inicialmente pela soma do número de pixéis de cada segmento, sendo realizada a soma dos valores dos pixéis e depois uma soma pesada entre os valores dos pixéis e as suas intensidades. Estes passos permitem definir cada segmento pela sua coluna u e pela média ponderada dos pixéis que o compõem, calculada por:

$$v = \frac{\sum_{j=v_i}^{v_f} Frame[u,j] \times j}{\sum_{j=v_i}^{v_f} Frame[u,j]} \quad (3.2)$$

A detecção da linha de laser é então adquirida pelo método de processamento de imagem descrito. As linhas de laser detectadas são inseridas numa estrutura de dados, que será apresentada posteriormente, onde os pontos (u,v) da linha são armazenados sob a forma de um vector em que os índices correspondem a u (valor que caracteriza o segmento da linha).

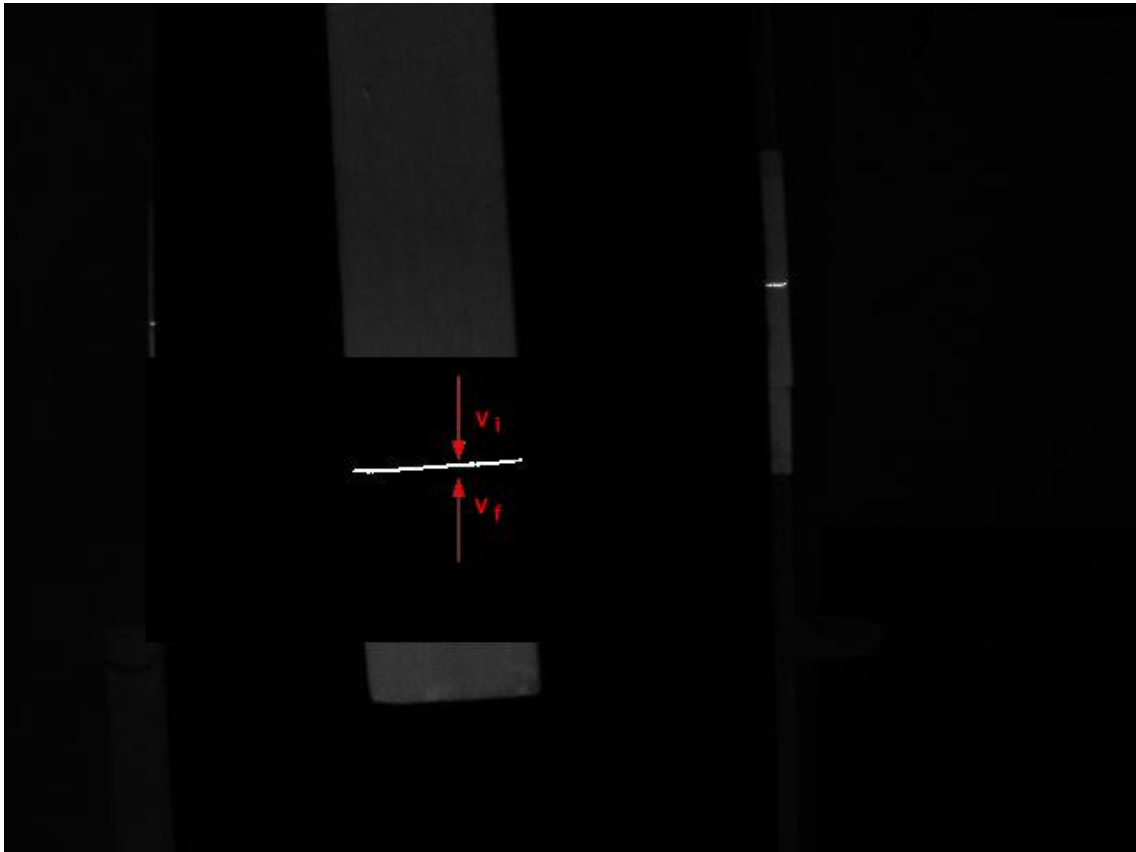


Figura 3.8 - Pesquisa da linha na *frame*

3.2 - Calibração da Câmara e do Laser

Esta etapa é fulcral no desenvolvimento do trabalho, porque esta calibração corresponde ao método de identificação do valor dos parâmetros do sistema que permite reconhecer a posição no mundo de um qualquer pixel da imagem e, igualmente, conhecer o local na imagem onde será mapeado um qualquer ponto do mundo.

Uma câmara pode ser representada através de um modelo matemático equivalente. Neste modelo os parâmetros podem ser divididos em duas classes: os parâmetros intrínsecos, que caracterizam a distância focal, a altura e a largura dos pixels do CCD, bem como o centro da imagem; e os parâmetros extrínsecos, referentes à posição e rotação da câmara no referencial do mundo.

3.2.1 -Modelo da câmara

O modelo mais comum nas câmaras convencionais é o pinhole [44]. O modelo pinhole consiste numa forma de ver uma imagem real, através de uma câmara escura. Utilizando um pequeno orifício onde a luz é captada para dentro da câmara, e sofrendo um movimento de inversão, a imagem é projectada para a parede oposta ao orifício, surgindo ao contrário.

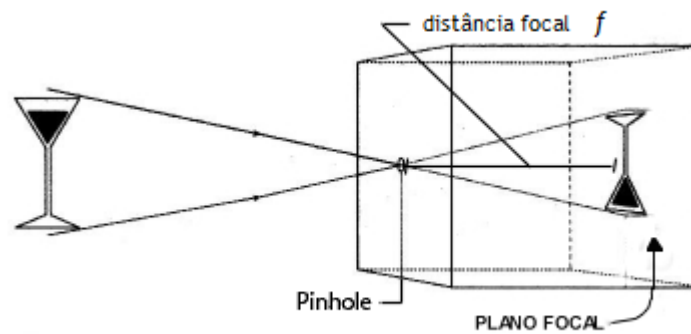


Figura 3.9 - Projecção perspectiva no modelo *pinhole*

O modelo *pinhole* fornece-nos um método de relacionar/transformar as coordenadas do espaço (em 3D) para um plano de imagem (em 2D), tendo como nome de projecção perspectiva. Os dados que se tiram de uma *frame* vêm todos relacionados com o sistema de coordenadas 2D que o representa (u , v). A imagem resultante é girada 180°, o tamanho relativo dos objectos projectados depende da sua distância ao ponto de foco, e o tamanho total da imagem depende da distância entre o plano da imagem e do ponto de foco.

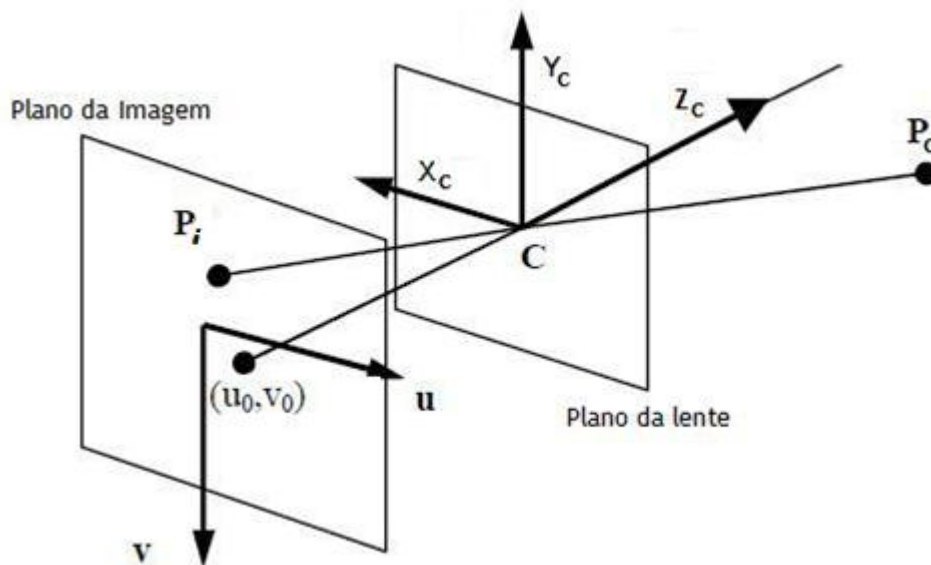


Figura 3.10 - Especificação dos sistemas de coordenadas [53]

Neste trabalho, é necessário considerar a distorção da lente. Segundo [45], podemos observar dois tipos de distorção: a distorção radial ou de Barril e a distorção *Pincushion*. Na distorção em Barril os pontos dos cantos de um quadrado na imagem estão mais próximos do centro da imagem do que deveriam, alterando a forma do objecto fotografado. A distorção *Pincushion* é o inverso, os pontos da imagem estão mais afastados do centro do que deveriam.

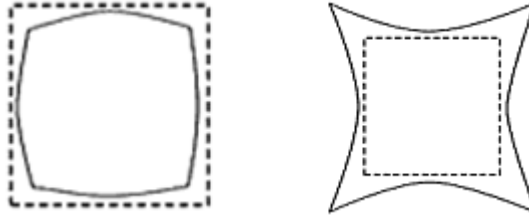


Figura 3.11 - Esquema de distorção Barril (esquerda) e distorção *Pincushion* (direita)

A diferença entre a imagem actual (distorcida) e a imagem prevista (não distorcida) pode ser expressa em termos de percentagens das distâncias a partir do centro da imagem, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{distorção (\%)} = \frac{\text{Distância medida} - \text{Distância prevista}}{\text{Distância prevista}} \times 100 \quad (3.3)$$

Tendo em conta os bons resultados conseguidos num trabalho semelhante com laser [40][41], optou-se por implementar um algoritmo de calibração simples usando apenas dois pontos.

O algoritmo de correcção de distorção é baseado no modelo de distorção de Brown [46]. São considerados apenas os factores de correcção de distorção de primeira e segunda ordem:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} K \times r^2 \\ K \times r^2 \end{bmatrix} = (1 - K r^2) \times \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

onde K é o coeficiente de correcção da distorção em barril e r é a distância em milímetros entre o pixel e o centro da imagem. As coordenadas (u_r, v_r) são correspondentes ao pixel distorcido enquanto que (u_i, v_i) é correspondente às coordenadas do pixel já corrigido para compensar a distorção. O valor de K foi ajustado iterativamente até que, por visualização dos *frames* na aplicação e observando as linhas na imagem que sabemos serem rectas no mundo, estas apareçam sem curvatura.

Analisando a configuração geométrica do sistema de visão, escolhemos um dos pontos de calibração, P_c , como sendo aquele que na imagem corresponde ao pixel central, $P_i = (u_i, v_i)$, e

medimos a sua posição no mundo (x_c, y_c, z_c) . Quando a distância x_c é igual à distância focal, a relação entre P_c e P_i é igual à equação:

$$\begin{cases} u_i = x_c - u_0 \\ v_i = y_c - v_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

onde (u_0, v_0) é o ponto de deslocamento do centro do plano da imagem relativamente ao centro da câmara.

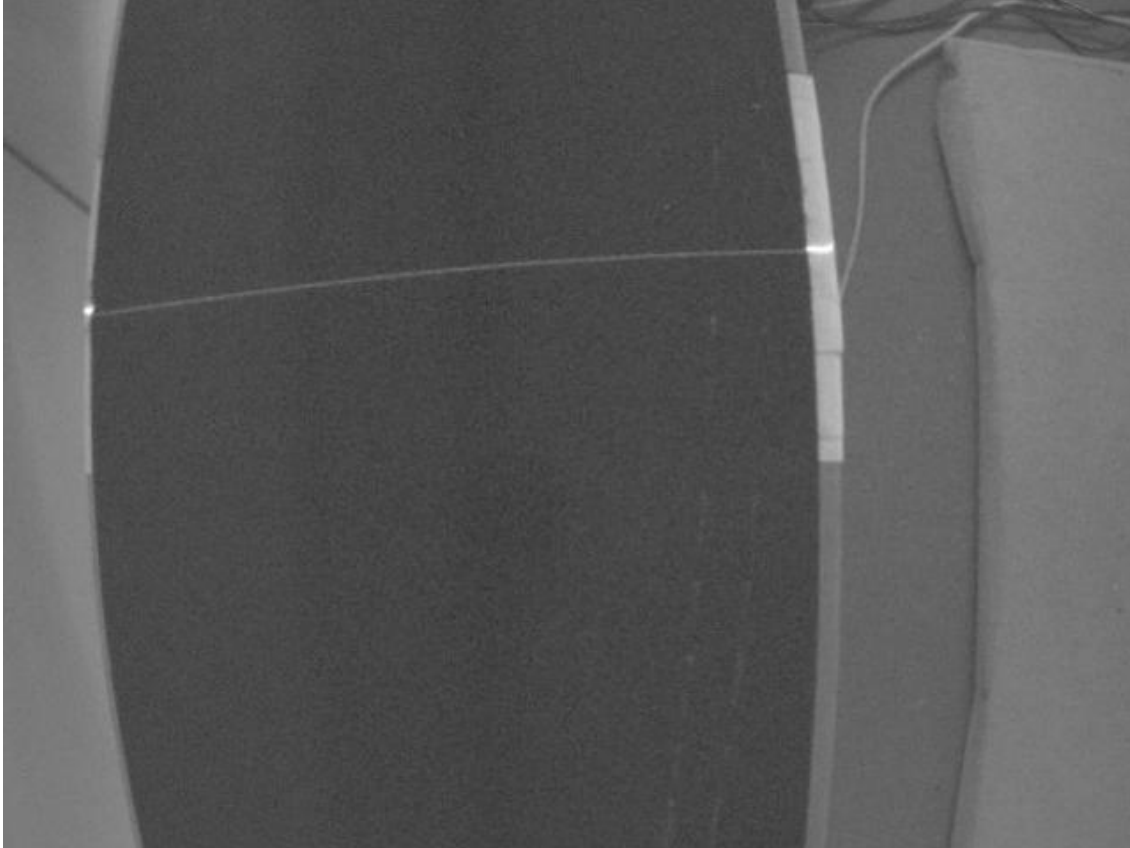


Figura 3.12 - *Frame* original com distorção em barril

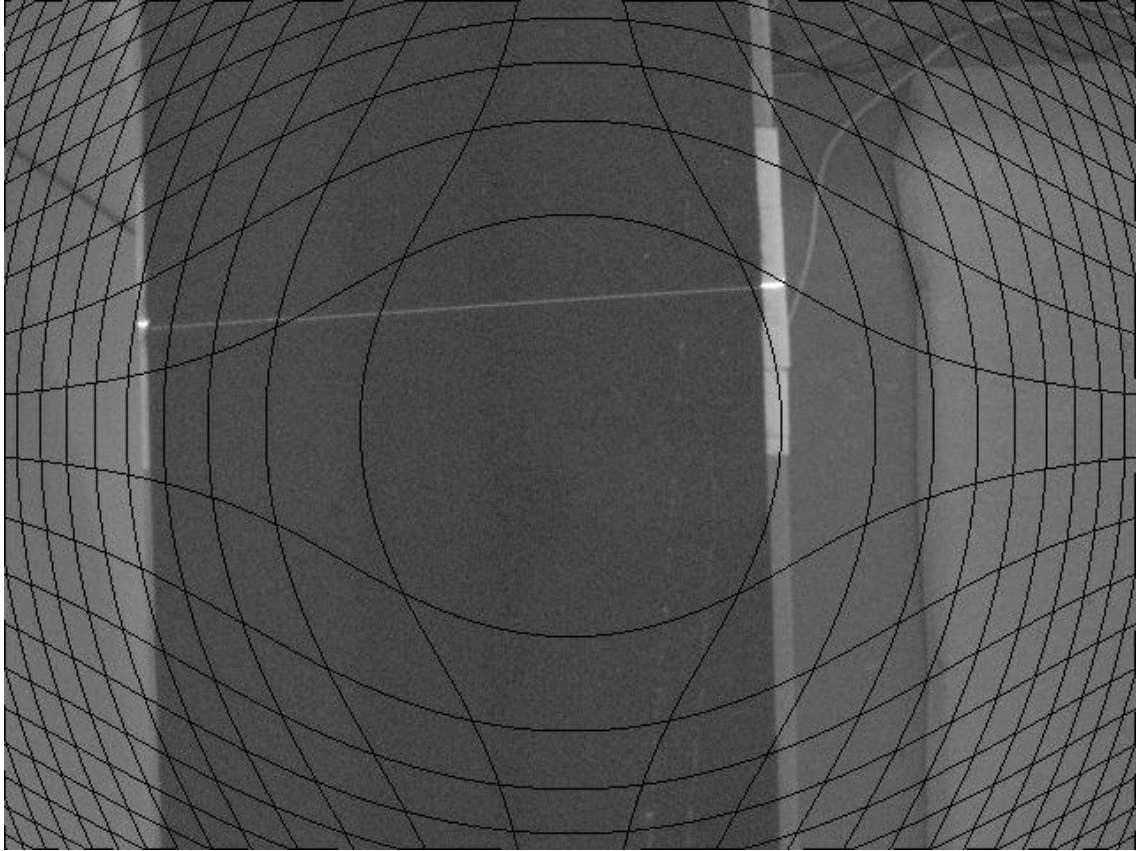


Figura 3.13 - Imagem após compensação do efeito de barril

3.2.2 - Transformação das Coordenadas de Imagem em Coordenadas de Mundo

Para se obter as coordenadas 3D de um ponto na *frame* da câmara, é necessário transformar as coordenadas 3D do ponto nas coordenadas da *frame* do mundo nas coordenadas do mesmo ponto na *frame* da câmara. Esta transformação é igual a uma translação seguida pela rotação do referencial do mundo. Assim, um ponto na *frame* da câmara, P_c , em coordenadas homogêneas, relacionadas com o mesmo ponto na *frame* do mundo, P_w , é dado pela equação:

$$P_w = \begin{bmatrix} R_c^w & T_c^w \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times P_c \quad (3.6)$$

Com,

$$T_c^w = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T \quad (3.7)$$

e

$$R_c^w = R_{x_w, \theta} \quad R_{y_w, \varphi} \quad R_{z_w, \beta} \quad (3.8)$$

Onde T_c^w é a matriz de translação e R_c^w é a matriz de rotação.

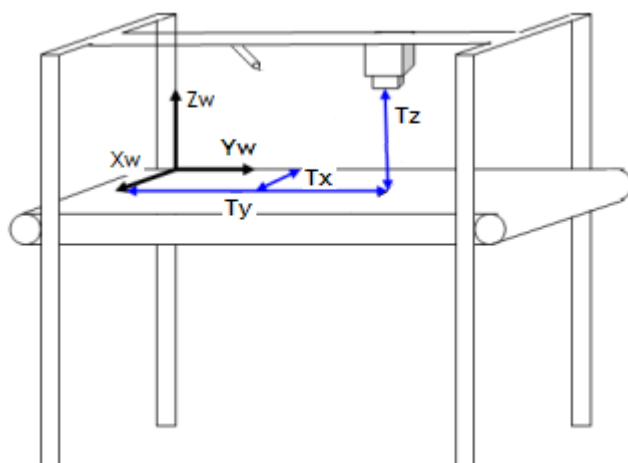


Figura 3.14 - Relação entre coordenadas da imagem e do mundo

A primeira rotação é realizada em torno do eixo x_w com um ângulo $(\theta - 180^\circ)$. A segunda rotação é realizada em torno do novo eixo y_w com um ângulo igual a φ . A terceira rotação é realizada em torno do novo eixo z_w com um ângulo igual a β .

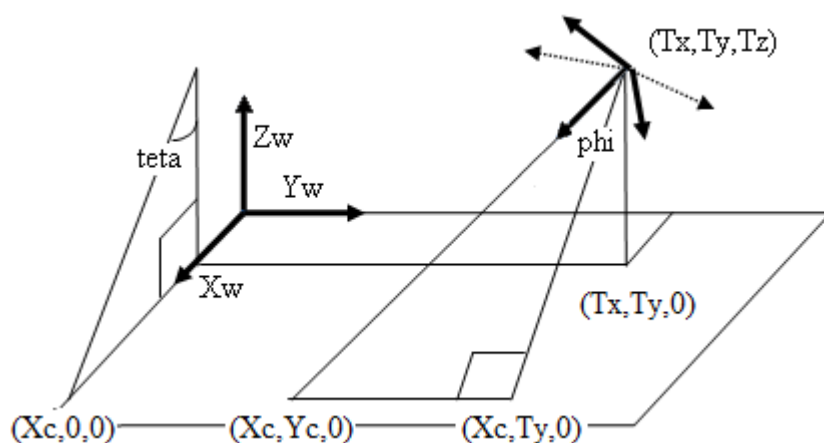


Figura 3.15 - Relação das coordenadas e rotação segundo o ângulo β

3.2.3 - Calibração da Câmera

Para determinar as rotações referidas anteriormente é necessário calcular os ângulos relativos a cada rotação. Os ângulos das duas primeiras rotações são calculados através do uso de dois pontos medindo as suas coordenadas na *frame* de referência do mundo. Os pontos usados são o ponto central da câmara, P_{cc} , e o ponto central da imagem, P_{ci} . Com estes dois pontos é possível calcular θ e φ através de:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x_c - T_x}{T_z} \quad (3.9)$$

e

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{y_c - T_y}{\sqrt{(x_c - T_x)^2 + T_z^2}} \quad (3.10)$$

O ângulo da terceira rotação, β , não pode ser calculado a partir de geometria porque a transformação anterior apenas muda a orientação do plano da imagem. Desta forma, assumindo que se conhece um ponto P_{i2} diferente do ponto central da imagem, e que este ponto é também conhecido na *frame* da imagem, as suas coordenadas serão $P_{i2} = (u_{i2}, v_{i2})$.

Se $\beta = 0$ e a origem dos eixos no plano da imagem é o pixel central, então $(u_0, v_0) = 0$. Desta forma P_{i2} é dado por:

$$P_{i2} = \begin{bmatrix} \frac{x_c}{z_c} & \frac{y_c}{z_c} \end{bmatrix}^T \times f \quad (3.11)$$

Apesar de ainda não se saber o valor da distância focal, o ângulo do vector estimado é independente disso porque a distância focal é apenas um parâmetro de factor de escala. O ângulo do vector estimado β_1 e o ângulo do vector real β_2 são dados por:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{u_{i2}}{v_{i2}} \quad (3.12)$$

e

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{x_c}{y_c} \quad (3.13)$$

O ângulo β referente à terceira rotação é então dado pela diferença entre os ângulos β_1 e β_2 , $\beta = \beta_1 - \beta_2$.

Uma vez que já temos os ângulos das rotações é então necessário calcular a distância focal. Através da norma Euclidiana de P_{i2} igual a:

$$\|P_{i2}\| = \sqrt{\left(\frac{x_c}{z_c}\right)^2 + \left(\frac{y_c}{z_c}\right)^2} \times f \quad (3.14)$$

E da norma do verdadeiro ponto P_{i2} igual a:

$$P_{i2} = \sqrt{u_{i2}^2 + v_{i2}^2} \quad (3.15)$$

Então concluímos que,

$$f = \frac{\sqrt{u_{i2}^2 + v_{i2}^2}}{\sqrt{\left(\frac{x_c}{z_c}\right)^2 + \left(\frac{y_c}{z_c}\right)^2}} \quad (3.16)$$

3.2.4 - Ajuste automático dos parâmetros da câmara para calibração de luminosidade

A luminosidade artificial/natural existente não pode ser descurada, mesmo tendo em consideração o uso do filtro de vermelhos, dado que a luz branca da iluminação da sala ou a luz do sol que entra pelas janelas tem intensidade em todo o espectro, ou seja, também no vermelho.

Num ambiente com iluminação minimamente controlada, o brilho da linha de laser sobressai razoavelmente bem na imagem podendo assim ser detectada com qualidade em cada *frame* da câmara.

Com a montagem da uma estrutura auxiliar recorrendo a placas *k-line* (placas de poliestireno expandido), reduziu-se a interferência da luz exterior e iluminação artificial do laboratório, obtendo-se imagens mais escuras mas onde, agora, é facilmente distinguível a linha de laser do restante plano de fundo.

No entanto, a necessidade de uma estrutura com uma abertura para o movimento do manipulador robótico na acção de pegar nas peças, e uma vez que o sistema de aquisição de imagem se encontra relativamente perto da zona de funcionamento do manipulador, mediante o ambiente em que se insere e a forma como a estrutura se encontra disposta nesse ambiente, é possível verificar-se a variação da luminosidade incidente na zona de aquisição de imagem.

Assim, para tornar o sistema mais robusto e dar liberdade estrutural ao mesmo, permitindo até que se tirem algumas placas de protecção, realizou-se um controlo automático dos parâmetros da câmara para se obter uma calibração automática do brilho da imagem adquirida. Para este controlo ser realizado e dispensando-se o uso de um sensor externo de luminosidade, optou-se por medir a intensidade dos pixéis da imagem e ajustar os parâmetros da câmara para os valores desejados para que a intensidade da linha do laser sobressaia na *frame*. Com o pensamento de não aumentar o tempo de processamento de imagem, a fim de não prejudicar os resultados de aquisição da linha do laser, foram analisadas soluções como, por exemplo, o controlo utilizado pela equipa 5DPO no futebol robótico em que se realiza o equilíbrio de câmara a cores com base na análise de histogramas, ou o controlo utilizado em [47] em que se ajusta o parâmetro *exposure* da câmara com base na análise do histograma.

Não existe um controlador definido como padrão para este tipo de calibração dos parâmetros da câmara, sendo que este controlo tem de ser definido mediante a análise global do sistema de visão do nosso sistema. A câmara utilizada é monocromática sendo que só temos valores de intensidade dentro de uma gama, a gama de cinzentos [0-255]. Após isto, foi necessário observar quais os parâmetros da câmara que maior influência exercem e como estes têm impacto na qualidade da imagem adquirida pela câmara de forma a sobressair a linha laser. Os parâmetros da câmara disponíveis para ajuste são o *brightness*, o *gain*, o *exposure* e o *gamma*.

Devido à dificuldade do tempo de processamento, o controlo criado consiste em calcular a intensidade dos pixéis numa pequena área da imagem sobre o tapete, sem a necessidade de recorrer à criação de histogramas e à sua análise. Para que o tempo de cálculo pudesse ser optimizado, a área definida é percorrida, sendo somadas as intensidades de cada pixel existente nessa região.

Foi realizado o cálculo da intensidade referência da região estipulada para uma imagem com a qualidade pretendida, ou seja, uma imagem com uma boa detecção da linha do laser. Após esta referência estabelecida realizaram-se testes sobre a variância de intensidades, a margem de erro permitida para que a imagem continue com uma qualidade aceitável.

A região estabelecida para análise da luminosidade foi criada tendo como premissas a realização de uma análise o mais próximo possível da zona de processamento de detecção da linha de laser e da realização de uma análise na maior área possível para se ter uma melhor amostra da luminosidade que incide sobre o tapete sem prejudicar o tempo de aquisição e processamento de imagem.

Após a inicialização do sistema é realizada uma verificação da intensidade, mas sempre utilizando os mesmos parâmetros da câmara, a partir dos quais são realizadas as respectivas calibrações até se aproximarem da intensidade referência e, como consequente, de um resultado de imagem óptima.

O controlo inicial consistiu num ajuste incremental relativamente a parâmetros da câmara com base em [47], e no impacto que o parâmetro *exposure* tem na imagem obtida. O controlador inicial consistia apenas na calibração deste parâmetro. No entanto, este ajuste demonstrou-se limitado perante as variações de luminosidade existentes num *setup* sem estrutura em *k-line*. A partir deste controlo evolui-se para um controlo com a calibração do *exposure* e do *gain*, acabando por fim por incluir a calibração da *gamma*.

O controlo de cada parâmetro é realizado através das seguintes equações:

$$Exposure = Exposure_{actual} - k1 \times (intensity_{actual} - intensity_{ref}) \quad (3.17)$$

$$Gain = Gain_{actual} - k2 \times (Gain_{actual} - Gain_{ref}) \quad (3.18)$$

$$Gamma = Gamma_{actual} - k3 \times (Gamma_{actual} - Gamma_{ref}) \quad (3.19)$$

Sendo que cada um dos valores está restrito a uma variação máxima correspondente. As constantes k_1 e k_2 foram ajustadas tendo em conta a margem de variação dos parâmetros e a sua influência no resultado da imagem. Uma vez que o parâmetro *gamma* é um parâmetro com grande impacto na qualidade de imagem, o seu ajuste ser prejudicial. Por isso, a constante k_3 foi calculada de modo a que só em caso de uma grande diferença entre valores de intensidade, o seu valor seja incrementado/decrementado em 1 unidade.

Para lidar com situações extremas de luminosidade foram criadas três configurações pré-definidas de valores dos parâmetros da câmara referidos e da intensidade de referência desejada. Estas três configurações pré-definidas correspondem a situações de um ambiente com elevada luminosidade incidente, um ambiente com uma iluminação muito reduzida e um ambiente com uma iluminação média. Estas classificações são realizadas no ambiente do laboratório usando diferentes combinações da luz artificial disponível. Para a situação de elevada luminosidade consideram-se todas as lâmpadas acesas. De forma antagónica, para a situação de luminosidade muito reduzida todas as lâmpadas são apagadas. Para a condição de iluminação média apenas uma série de lâmpadas está acesa. Com os parâmetros da câmara pré-definidos para o início do sistema, é calculada a intensidade da área de controlo de luminosidade. Através de várias medições em cada situação, chega-se a um valor de intensidade para cada ambiente. Assim permite-nos definir que abaixo de um valor de intensidade o ambiente é de iluminação muito reduzida e que acima de outro valor de intensidade a iluminação é elevada. Na ausência de enquadramento num destes ambientes, é definido como um ambiente com iluminação média.

Para cada estado de luminosidade ambiente - luminosidade elevada, média e reduzida - foram realizados ajustes pré-definidos para os parâmetros da câmara. Assim, o sistema de visão realiza no início do seu procedimento uma análise da luminosidade, identificando o ambiente envolvente e ajustando os parâmetros da câmara para os valores pré-definidos, de forma a que o processo de calibração em tempo real se aproxime do resultado de imagem desejado. O valor de intensidade de referência também é ajustado inicialmente para o respectivo ambiente.

Após esta calibração por identificação de estado é procedido o ajuste automático em tempo real dos parâmetros da câmara, obtendo assim um resultado de imagem com a qualidade desejada.

A pensar na possibilidade de uma transição brusca da luminosidade ambiente foram realizados testes das variações de intensidade medidas para todas as transições possíveis. Assim, relacionando o último valor de intensidade medido com o novo valor, mediante a sua diferença e os níveis estipulados para as possíveis transições, consegue-se transitar para o novo estado de luminosidade do ambiente, prosseguindo-se com a calibração automática em tempo real dos parâmetros da câmara para esta nova intensidade luminosa.

Este controlo de luminosidade permite que o sistema funcione correctamente com o filtro de vermelhos e sem a estrutura em *k-line*, conseguindo-se obter um resultado de imagem com a qualidade desejada e, conseqüentemente, um bom resultado na reconstrução 3D de um objecto.

No caso de funcionamento sem o filtro de vermelhos, o resultado obtido origina uma imagem com uma qualidade razoável, sem níveis elevados de ruído que são prejudiciais para a reconstrução 3D da peça. No entanto, a sua susceptibilidade a variações luminosas é elevada, sendo que só se obtém um resultado aceitável para pequenas variações luminosas. Quer isto dizer que o funcionamento do sistema de visão sem o filtro de vermelhos, num ambiente com pequenas oscilações luminosas, como por exemplo no funcionamento com a estrutura de condicionamento em *k-line*, consegue calibrar-se automaticamente, evitando assim o excesso de ruído na detecção do laser. Contudo, sem a estrutura em *k-line*, a câmara encontra-se muito susceptível a variações de luminosidade, não permitindo que o controlo consiga calibrar-se correctamente de forma estável, apresentando ruído na zona de incidência da linha do laser e nas zonas de maior impacto da luminosidade parasita.

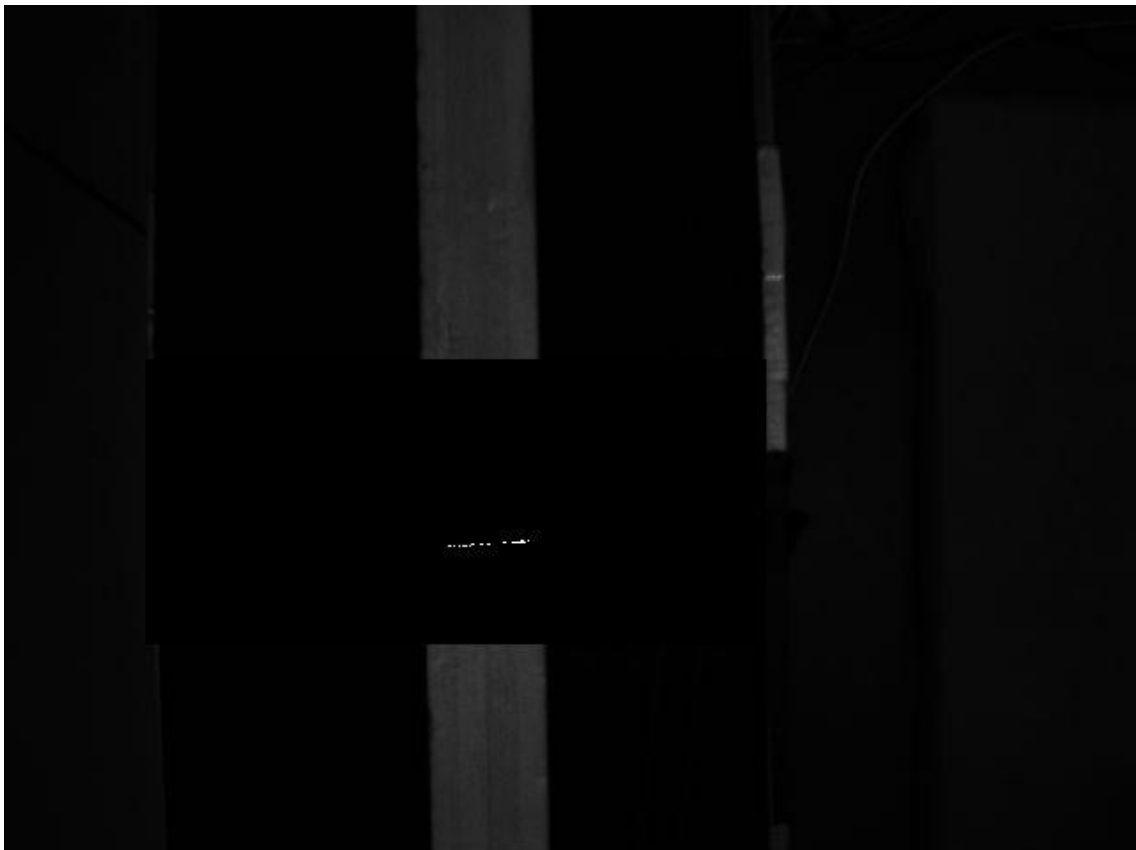


Figura 3.16 - Imagem resultante de uma calibração desadequada (por defeito) dos parâmetros da câmara

3.3 - Reconstrução dos pontos em 3D

Como já referido, existe um número infinito de pontos do mundo que é projectado no mesmo ponto na imagem. Usando apenas uma câmara, consegue-se definir a equação da recta que contém todos esses pontos. É então necessário completar a transformação de pixéis em pontos do mundo, mas para isso precisamos de informação adicional sobre o ponto.

3.3.1 - Triangulação com Laser

Para completar a informação necessária para uma identificação correcta e única do ponto a ser realmente observado é utilizado o feixe laser. Analisando a arquitectura física do nosso sistema, sabemos as posições da câmara e do laser, sabemos que a luz emitida pelo laser traduz-se por um plano, e sabemos ainda que para um dado ponto visto na imagem, o espaço geométrico da câmara vai ser uma recta óptica que os une. Ou seja, com o laser colocado obliquamente em relação à câmara (para evitar que o plano contenha a recta dos possíveis pontos), o plano intercepta a recta em apenas um ponto. Sabendo definir o plano para o laser e a recta para a câmara, apenas teremos que determinar o ponto de intersecção destes dois elementos, tal como se mostra a figura (3.17).

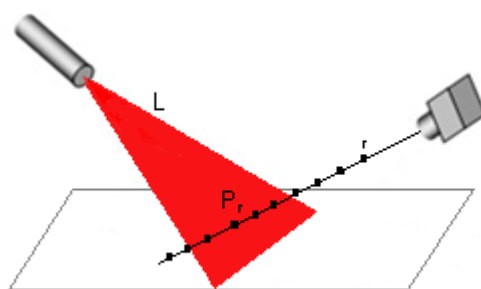


Figura 3.17 - Intercepção do plano do laser com a recta que contém todos os pontos projectados no mesmo

É então necessário implementar um algoritmo que calcula a intersecção de um plano com uma recta. Começamos por definir o plano do laser por um vector normal, $L_n = [x_n, y_n, z_n]^T$, e um ponto pertencente ao plano, $P_{L0} = [x_{L0}, y_{L0}, z_{L0}]^T$. Para um ponto P_L estar contido no plano L , o produto interno entre o vector normal e o vector $(P_L - P_{L0})$ tem de ser nulo. A recta é descrita por um vector $R_r = [x_r, y_r, z_r]^T$ com igual direcção,

querendo isto dizer que um ponto P_r da recta que está na direcção de R_r a partir de um ponto inicial da recta, $P_{r0} = [x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}]^T$.

Um ponto contido no plano do laser pode ser definido por:

$$L_n \cdot (P_L - P_{L0}) = 0 \quad (3.20)$$

Enquanto que pela equação paramétrica da recta, qualquer ponto contido na recta pode ser definida por:

$$P_r = P_{r0} + R_r \cdot t, \quad t \in \mathbb{R} \quad (3.21)$$

O ponto, P_r , que pretendemos encontrar pertence simultaneamente a r e L obtendo-se assim:

$$(P_{r0} + R_r \cdot t) \cdot L_n = L_n \cdot P_{L0} \quad (3.22)$$

Sendo $L_n \times P_{L0}$ uma constante, c . Obtemos assim para t :

$$t = \frac{c - x_n x_{r0} - y_n y_{r0} - z_n z_{r0}}{x_n x_r + y_n y_r + z_n z_{r0}} \quad (3.23)$$

É necessário agora conhecer a equação do plano do laser. Um plano pode ser definido, por exemplo, por um ponto e uma recta. A posição do laser no mundo é conhecida (medida no momento do setup do sistema).

Com a linha do laser a incidir sobre o plano de referência, que está situado em $Z=0$, é possível usar a relação entre coordenadas (u,v) e as coordenadas (x,y,z) para cada ponto dessa linha, sendo que ficamos com um problema a duas dimensões visto que só é necessário calcular 2 coordenadas.

Pelo método dos mínimos quadrados estimamos a equação da linha do laser:

$$y = mx + b + \varepsilon \quad (3.24)$$

Sendo que ε representa o erro.

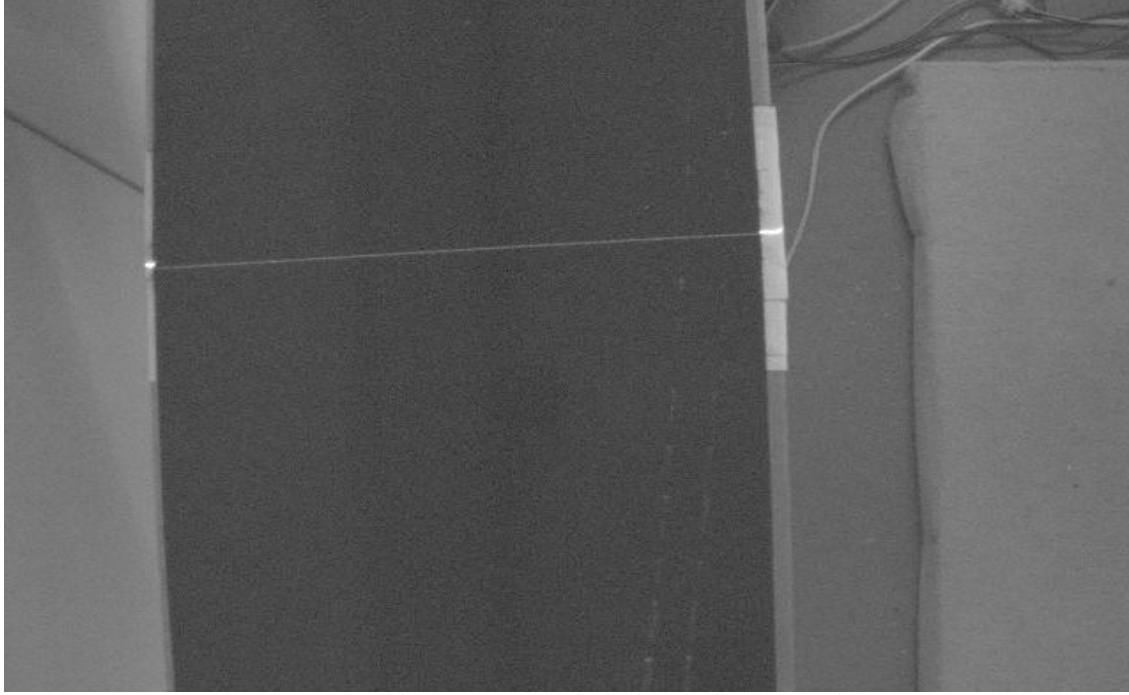


Figura 3.18 - Todos os pontos da linha do laser no plano Z=0

Uma aproximação por mínimos quadrados tem como objectivo minimizar a soma do quadrado dos erros, sendo que ficamos com:

$$\min \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \min \sum_{i=1}^N (y_i - b - mx_i)^2 \quad (3.25)$$

Sendo que para o par (x,y) temos N observações, ou seja, cada um dos pontos da linha do laser detectados na imagem e passados para coordenadas do mundo assumindo z=0.

É então necessário resolver um problema de mínimos quadrados. Para encontrar o mínimo da função calculamos o zero das derivadas parciais de b e m:

$$\begin{cases} Nb + \sum_{i=1}^N mx_i - \sum_{i=1}^N y_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 m + \sum_{i=1}^N x_i b - \sum_{i=1}^N y_i x_i = 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

Pela regra de Kramer obtemos:

$$\begin{cases} m = \frac{n \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \end{cases} \quad (3.27)$$

Uma vez definida a recta do laser, r_L em $z=0$, completamos a caracterização do plano usando mais um ponto, a posição do laser no mundo — $P_{Lw} = (x_{Lw}, y_{Lw}, z_{Lw})$. Seja P_0 um qualquer ponto pertencente à recta do laser em $x=0$ já calculada. Então, o vector normal ao

plano do laser, L_n , é calculado a partir do produto externo do vector director da recta r_L , R_{rL} , com o vector $P_{Lw} - P_0$):

$$L_n = R_{rL} \times (P_{Lw} - P_0) \quad (3.28)$$

Obtemos assim a constante c , que era o ultimo elemento que nos faltava saber, como sendo igual a:

$$c = -L_n \cdot P_{Lw} \quad (3.29)$$

Sendo assim o ponto P_r é dado por:

$$P_r = P_{r0} + R_r \cdot \left(\frac{(-L_n \cdot P_{Lw}) - x_n x_{r0} - y_n y_{r0} - z_n z_{r0}}{x_n x_r + y_n y_r + z_n z_{r0}} \right) \quad (3.30)$$

3.3.2 - Reconstrução 3D das peças

Agora, através da conjugação de informação dos pontos de coordenadas (u,v) que pertencem ao laser, fornecida pelo algoritmo de detecção de linhas, e o algoritmo completo de passagem de coordenadas de imagem para coordenadas do mundo, conseguimos reconstruir as linhas da imagem a 3D. Os algoritmos necessários para a reconstrução 3D das linhas de laser detectadas incidentes sobre uma peça já foram apresentados nesta secção. É de referir que o *scan* com o laser sobre uma peça é realizado automaticamente usando o movimento da linha de transporte que se encontra em movimento com velocidade constante. Através do *encoder* acoplado ao motor responsável pelo movimento do tapete de transporte obtém-se a velocidade do tapete sendo que, a cada nova *frame*, ajustam-se os valores (x, y, z) dos pontos para compensar o movimento da peça.

Para desenhar os objectos em 3D foi usada uma ferramenta *openSource* de OpenGL para Lazarus, o GLScene. Esta funcionalidade serve para “navegar” na imagem movendo-se em torno da peça, aproximar ou afastar de modo a verificar a qualidade da informação, mas é sobretudo importante para a verificação de erros dos varrimentos com o laser, validação da calibração e *debug*. A reconstrução é feita em tempo real.

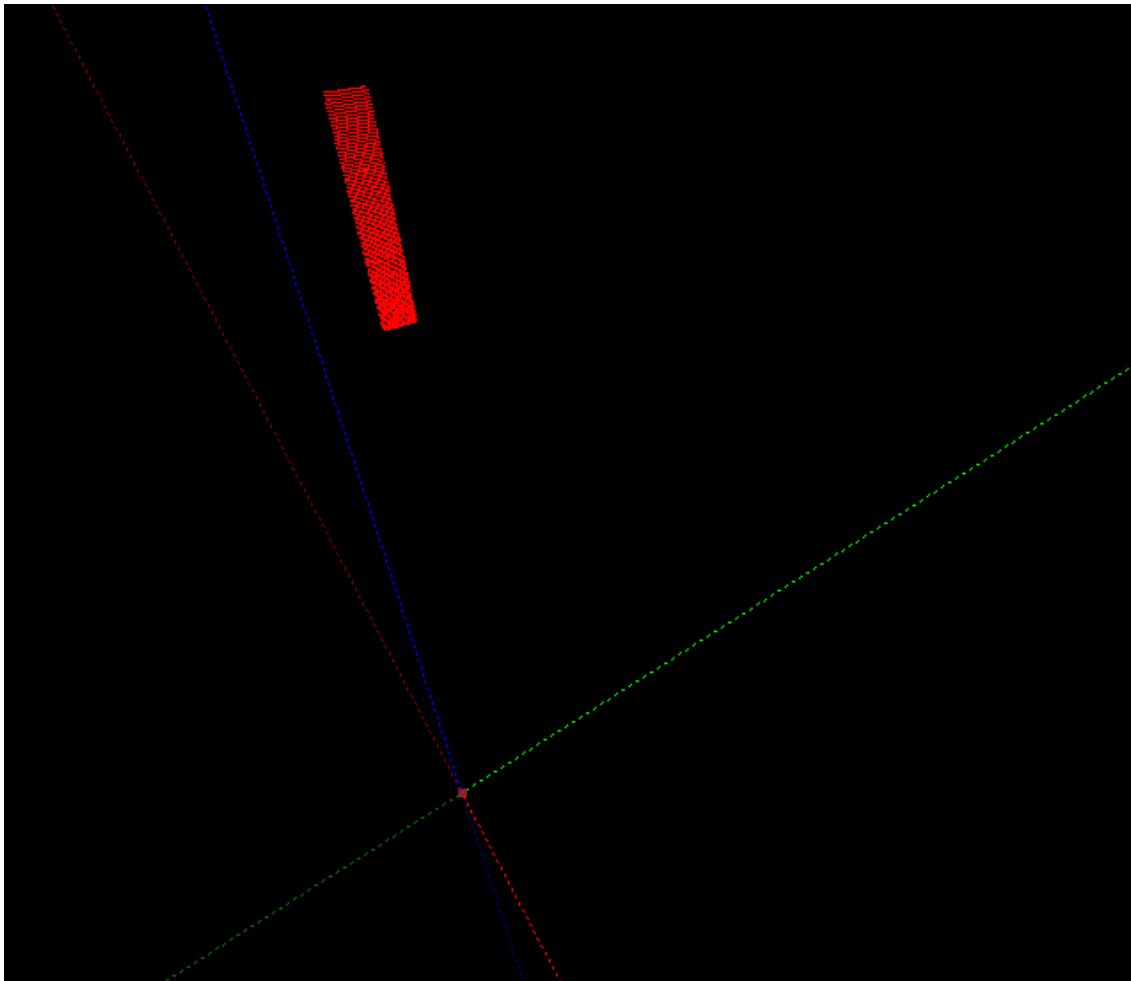


Figura 3.19 - Reconstrução 3D da peça na vertical - visão frontal

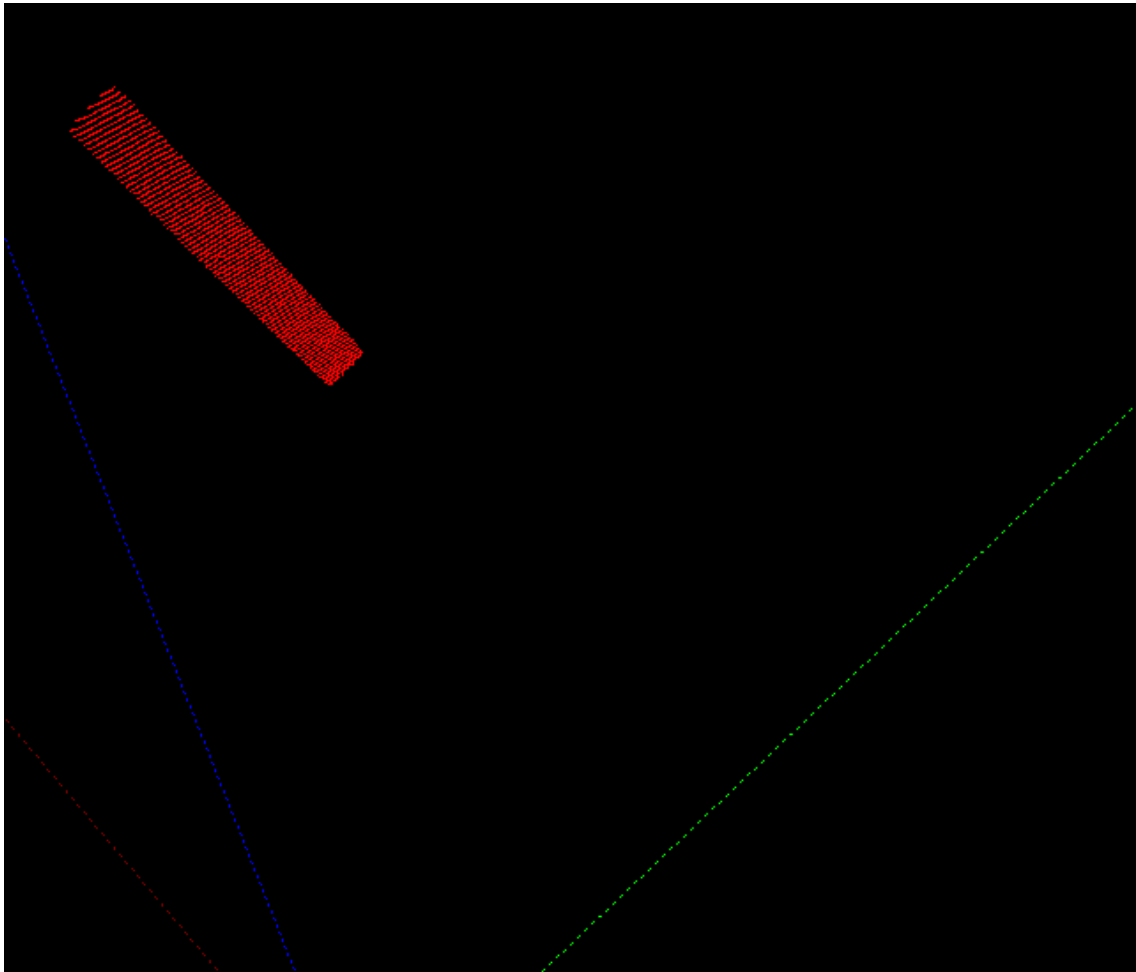


Figura 3.20 - Reconstrução 3D peça com orientação - visão frontal

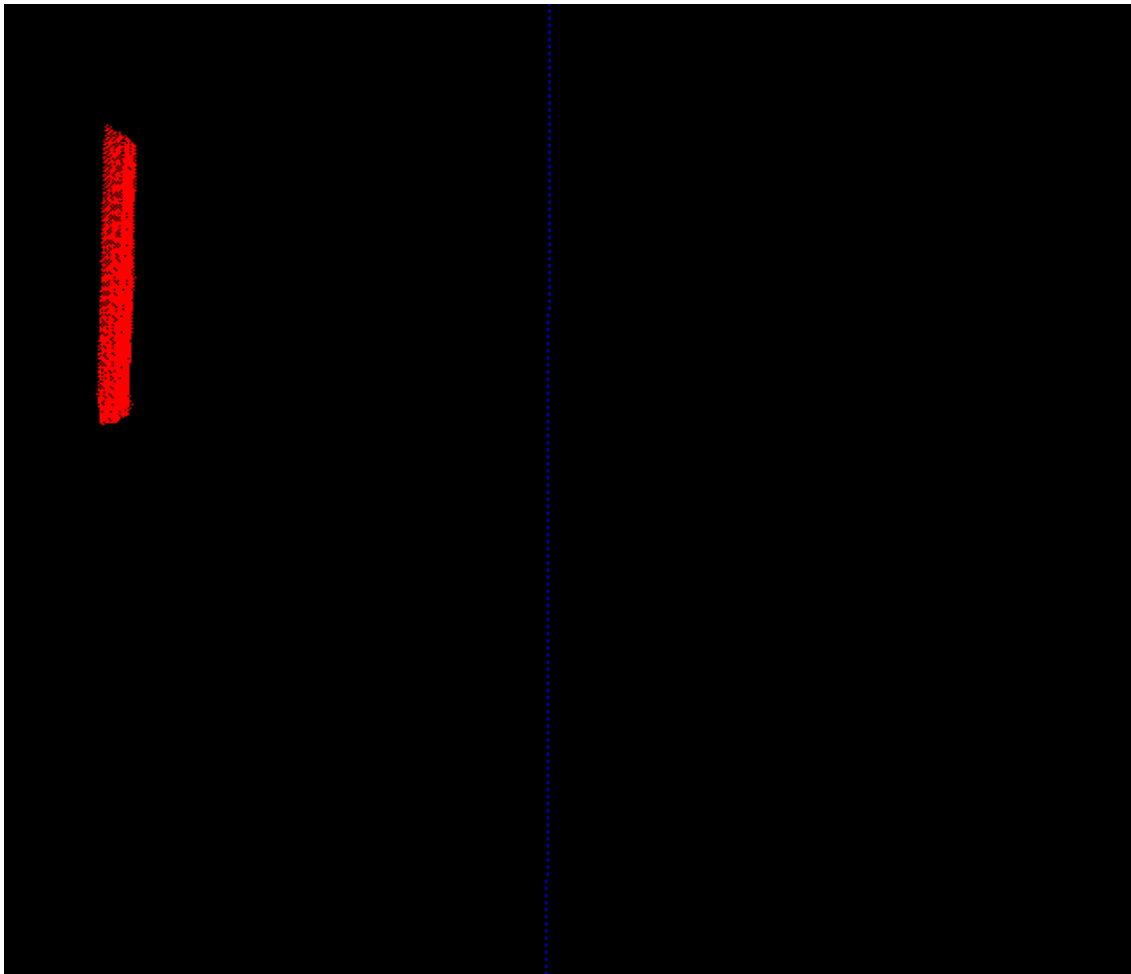


Figura 3.21 - Reconstrução 3D - Visão Lateral

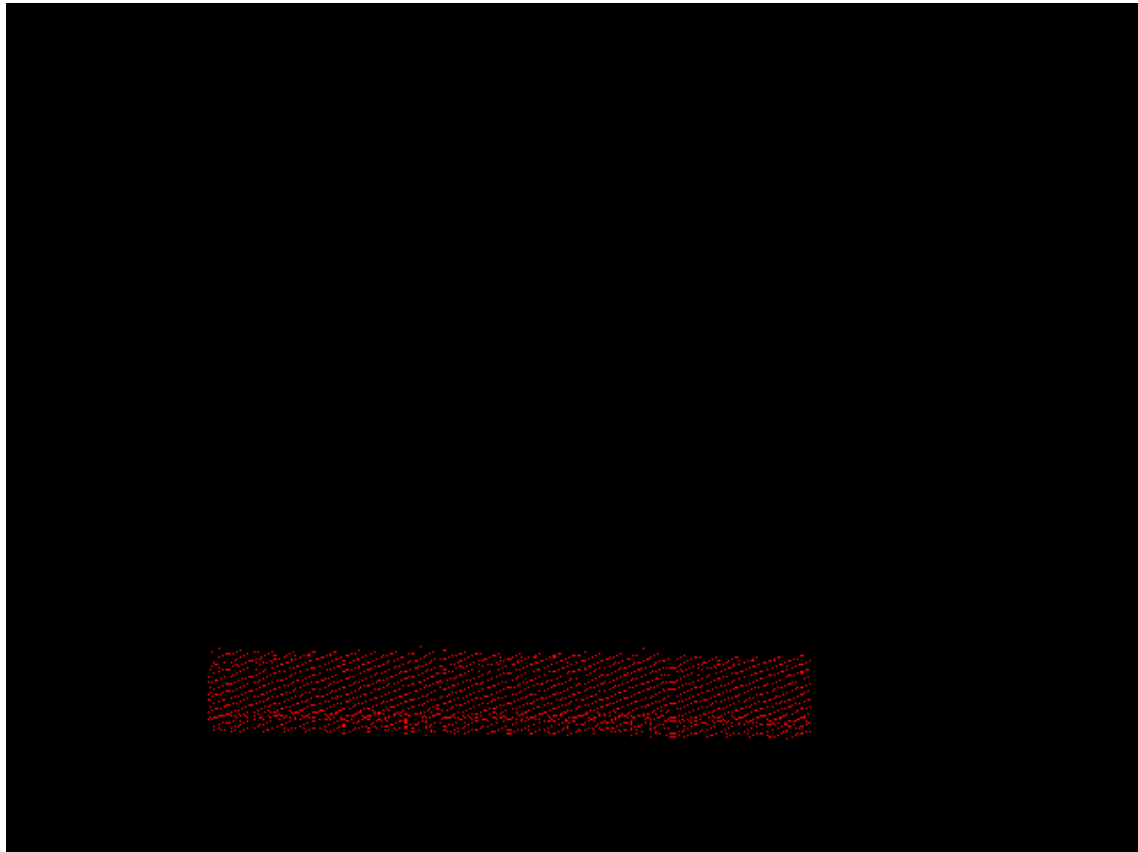


Figura 3.22 - Reconstrução 3D - visão perspectiva das linhas laser

Capítulo 4

Algoritmos de Calculo da Posição e Orientação do Objecto

As informações que se têm como objectivo extrair acerca da peça são: o centro de massa, a orientação e as dimensões da peça. O algoritmo para obter estas medidas a partir da peça e aplicado à imagem é descrito neste documento.

4.1 - Estrutura de Dados

A cada *frame* é realizado um processo de pesquisa de linha laser na zona de incidência sobre objectos. Em cada *frame* em que a linha de laser é detectada, uma estrutura denominada por RedLine é preenchida com os valores de *v* por onde passa a linha de laser. Os pontos obtidos na detecção de linhas são usados, simultaneamente, para a reconstrução 3D em tempo real e para a construção de uma matriz que é denominada, devido à informação do seu conteúdo, por matriz de alturas – MathGt. Esta estrutura de dados permite condensar toda a informação tridimensional: os índices (i,j) da matriz têm uma relação directa com as coordenadas (x,y) no mundo, enquanto que o valor de MathGt [i,j] representa a coordenada z relativa à altura da peça.

A classe MathGt contém, para além da matriz de cotas, uma série de parâmetros que permitem definir a relação dos índices (i, j) para (x, y). De facto, se definirmos um valor x_{min} e um valor y_{min} , quando (i, j) = (0; 0), o valor esperado para (x, y) será de (x_{min} , y_{min}).

Desta forma, a relação entre os índices da matriz (i, j) e as coordenadas no mundo (x, y) é representada pela equação:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{min} \\ y_{min} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} \times f_{sc} \quad (4.1)$$

onde f_{sc} é o factor de escala que transforma um índice num comprimento no mundo, isto é, representa a resolução da matriz.

Considerando um nível de precisão que permita obter um bom processo de manipulação e nunca descurando o tempo de execução dos algoritmos, a resolução escolhida foi de 1mm.

Os índices máximos da matriz podem ser obtidos pelos Pontos_{laser} referentes à estrutura de dados que contém todos os pontos obtidos na detecção de linhas, em coordenadas do mundo, através de:

$$i_{max} = \frac{\max_x Pontos_{laser} - \min_x Pontos_{laser}}{f_{sc}} \quad (4.2)$$

e

$$j_{max} = \frac{\max_y Pontos_{laser} - \min_y Pontos_{laser}}{f_{sc}} \quad (4.3)$$

A construção da estrutura de dados Mathgt é realizada por um conjunto de passos. O primeiro passo define o tamanho da matriz e preenche-a com os valores das cotas, nos índices respectivos.

O algoritmo de preenchimento de Mathgt vai adicionar a cada um dos índices adjacentes a (i', j') , a informação de altura do objecto através do valor da coordenada z no ponto correspondente, e manter um registo do número de pontos somados em cada entrada, uma vez que vários pontos vão contribuir para uma mesma posição. No final do preenchimento, o valor de cada posição é dividido pelo número de pontos adicionados.

O preenchimento da matriz é executado encontrando o índice para cada entrada da estrutura de pesquisa de linhas laser por:

$$\begin{bmatrix} i' \\ j' \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} x - x_{min} \\ y - y_{min} \end{bmatrix}}{f_{sc}} \quad (4.4)$$

O par (i', j') obtido encontra-se contido entre os índices inteiros da matriz, como se pode observar na figura 4.1.

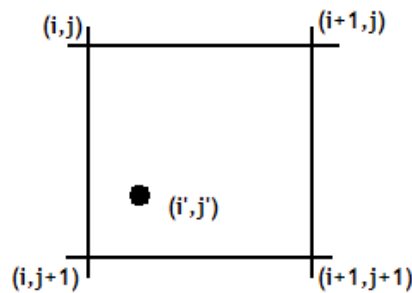


Figura 4.1 - Preenchimento da matriz de alturas

O preenchimento da matriz de alturas usa a mesma estrutura de dados criada na pesquisa de linhas laser e, como foi possível observar no processo de reconstrução 3D através da ferramenta GLScene, existem zonas sem informação. Sendo assim, na matriz de alturas existem igualmente zonas sem informação. Esta falta de informação não se deve à falha de incidência do laser sobre a peça, mas sim a pontos que por diversos factores, como por exemplo arredondamentos, não têm correspondência directa a um ponto. A falta de correspondência de um ponto pode ser compensada visto que a maior parte dos pontos ao redor desta falha estão preenchidos.



Figura 4.2 - Imagem da peça adquirida

Para colmatar estas falhas implementou-se uma rotina para aplicação de um filtro de média sobre a matriz de alturas:

$$filtro_{média} = \begin{bmatrix} 1/8 & 1/8 & 1/8 \\ 1/8 & 0 & 1/8 \\ 1/8 & 1/8 & 1/8 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

É importante realizar restrições sobre a aplicação deste filtro para que esta rotina não adultere a informação da peça adquirida por expansões da informação para zonas onde no meu físico não existem. Deste modo, é necessário fazer uma consideração dos elementos vizinhos usados para a aplicação do filtro. O filtro só é aplicado num ponto no caso de

existência de um número mínimo de vizinhos com informação, e apenas os elementos vizinhos com valor diferente de zero são considerados na aplicação do filtro.

Após o preenchimento da matriz através do filtro de média será realizada uma binarização da imagem da peça para que posteriormente se possa realizar uma boa detecção das extremidades da peça.



Figura 4.3 - Peça totalmente preenchida e binarizada

4.2 - Determinação da posição e da orientação

Com a representação matricial criada, temos toda a informação sobre a peça, detectada de forma organizada, sendo que é agora possível extrair as características do objecto mais facilmente.

4.2.1 - Centro de massa

O primeiro passo para a extracção das características do objecto consiste em calcular o centro de massa do objecto, $CM = (c_x, c_y, c_z)$. O centro de massa do objecto é a base do processo que nos permite calcular a sua posição. Conhecendo a forma em paralelepípedo das peças, e assumindo simetria das peças, podemos usar o centro de massa da peça como referência nos algoritmos seguintes.

O cálculo do centro de massa é realizado através de uma média, recorrendo a todos os pontos da peça ponderada pelos respectivos pesos. Assumindo a simetria das peças, todos os

pontos pertencentes à peça têm peso igual a 1, caso não pertençam à peça têm peso igual a 0.

$$p(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{se } MatHgt[x,y] < threshold \\ 1 & \text{se } MatHgt[x,y] \geq threshold \end{cases} \quad (4.6)$$

Assim, o cálculo das cotas do centro de massa é realizado por:

$$c_x = \frac{\sum_x \sum_y x \cdot p(x,y)}{\sum_x \sum_y p(x,y)} \quad (4.7)$$

$$c_y = \frac{\sum_x \sum_y y \cdot p(x,y)}{\sum_x \sum_y p(x,y)} \quad (4.8)$$

$$c_z = MatHgt[c_x, c_y] \quad (4.9)$$

O ponto de centro de massa é o ponto considerado para determinação da posição da peça. É este ponto que determina a posição de manipulação da peça uma vez que é através da posição do centro de massa que o manipulador orienta a sua ferramenta, a garra. Sabendo o centro de massa da peça, e após calcular as dimensões e orientação da peça, sabemos a posição global da peça.

4.2.2 - Limites da peça

O segundo passo para a extracção das características consiste na identificação dos limites da peça. Para realizar a detecção dos limites da peça, aplica-se um filtro de Sobel. O facto de se ter aplicado anteriormente um filtro de média para preenchimento da zona da peça, a uniformização reduziu o ruído presente na imagem. Assim, esta detecção dos limites da peça é uma variação do algoritmo de Canny para detecção de limites, sendo que se aplicou um filtro de média em vez do filtro gaussiano que iria causar expansões de informação indesejadas.

Perante esta situação aplicou-se então um operador de Sobel. O operador de Sobel realiza a medição 2D do gradiente espacial de uma imagem. Este operador é normalmente utilizado para encontrar o valor absoluto aproximado do gradiente em cada ponto de uma imagem em tons de cinza. O detector de limites de Sobel usa um par de filtros de convolução 3x3, aplicando um filtro para estimativa do gradiente na direcção x (colunas), G_x , e outro filtro para estimar o gradiente na direcção y (linhas), G_y . O filtro de convolução é geralmente muito menor do que a imagem real. Como resultado, o filtro é deslizado sobre a imagem,

manipulando um quadrado de pixel de cada vez. Os filtros de Sobel utilizadas nas respectivas direcções são:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

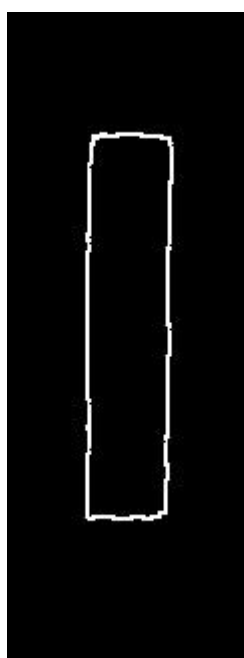


Figura 4.4 - Detecção dos limites da peça

4.2.3 - Orientação da peça

O objectivo principal da transformada de Hough, quando aplicada à detecção de padrões de imagem a partir de um conjunto de pontos, é determinar os valores dos parâmetros que regem as equações que inter-relacionam tais pontos. A ideia é que se tenha o mapeamento de um determinado espaço de dados (os pontos) para o respectivo espaço de parâmetros. Por meio desta transformação, procura-se concentrar no espaço de parâmetros as relações que unem os pontos do espaço de dados, de forma a que a busca de uma configuração analítica para o padrão de imagem a ser detectado ou reconstruído seja simplificada.

A extracção da informação dos limites da peça é então realizada após a aplicação da transformada de Hough para detecção de linhas da peça. Com aplicação da transformada de

Hough obtemos a linha da face lateral da peça e o respectivo ângulo que esta faz com o eixo do x.

A informação que a aplicação da transformada de Hough nos fornece permite-nos determinar a orientação da peça segundo o eixo x do referencial do mundo.

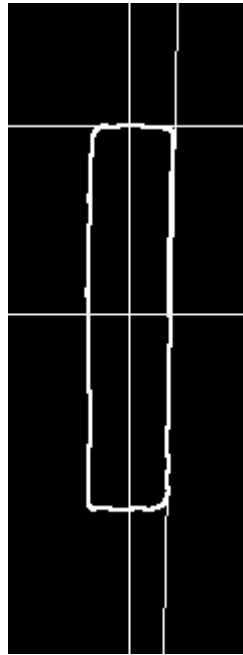


Figura 4.5 - Aplicação da transformada de Hough para detecção de linhas

4.2.4 - Dimensões da peça

Após termos aplicado a transformada de Hough e sabermos a orientação da peça, resta extrair a informação das dimensões da peça. A altura da peça está contida na matriz de alturas. Assumindo a forma em paralelepípedo e a linearidade das suas superfícies, podemos obter uma estimativa da altura da peça através de uma média ponderada. Tal como já foi considerado anteriormente, os pesos atribuídos são idênticos para todos os pontos pertencentes à peça. Este cálculo da altura é realizado

$$Altura = \frac{\sum_x \sum_y MatHgt[x,y] \cdot p(x,y)}{\sum_x \sum_y p(x,y)} \quad (4.12)$$

Para calcular as restantes dimensões da peça é necessário usar a informação obtida pela aplicação da transformada de Hough, em concreto pela linha da face lateral da peça obtida. Esta informação da transformada de Hough, obtida em conjugação com o centro de massa

calculado, permite-nos obter a largura da peça. A largura da peça é estimada através da distância mínima do ponto do centro de massa da peça à recta obtida pela transformada de Hough. Com o conhecimento da recta de Hough, r_H , podemos defini-la através da sua equação reduzida:

$$r_H : y = a \cdot x + b \quad (4.13)$$

No entanto, esta forma de caracterização da recta, para a aplicação pretendida, não é muito estável, uma vez que quanto mais verticais forem as linhas rectas, os parâmetros a e b crescem para o infinito. É, por isso, necessário realizar uma distinção dos dois estados possíveis de orientação das peças tendo em conta esta limitação do método. Para compensar esta limitação considera-se os casos em que $\theta \neq 90^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

Para o caso em que $\theta \neq 90^\circ$, a distância mínima do ponto de centro de massa à recta da superfície lateral da peça é calculada por:

$$d(CM, r_H) = \frac{|a \cdot c_x - b \cdot c_y + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.14)$$

Para o caso em que $\theta = 90^\circ$, a função da recta é $x = \rho$, em que ρ é dado pela transformada de Hough como a distância normal da origem à recta. Sendo assim, a distância mínima do ponto de centro de massa à recta da superfície lateral da peça é calculada por:

$$d(CM, r_H) = |c_x - \rho| \quad (4.15)$$

A largura da peça é então:

$$largura = 2 \times d(CM, r_H) \quad (4.16)$$

Para se calcular o comprimento da peça temos de realizar outras considerações que consistem essencialmente no varrimento da peça segundo a velocidade do tapete e na orientação da peça. Sendo assim, inicialmente calcula-se o comprimento absoluto da peça segundo o eixo dos y através de:

$$L = RedLines \times \frac{velocidade}{FPS} \quad (4.17)$$

onde L é o comprimento máximo da peça no eixo vertical da matriz, $RedLines$ é o número de linhas de laser vistas durante a reconstrução da peça, que é imposto por FPS, e a velocidade é referente à velocidade do tapete.

Pela análise geométrica da peça obtemos igualmente L como:

$$L = w \times \cos \theta + l \times \sin \theta \quad (4.18)$$

onde w é a largura da peça, l o comprimento da face lateral da peça e θ é a orientação da peça relativamente ao eixo x.

Resolvendo em ordem ao comprimento que nos interessa saber, temos:

$$l = \frac{L - w \times \cos \theta}{\sin \theta} \quad (4.19)$$

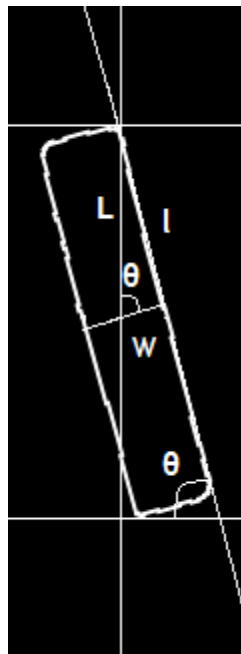


Figura 4.6 - Princípio de cálculo das dimensões da peça

Assim, com l = comprimento e w = largura, o comprimento da peça é calculado através da equação:

$$\text{Comprimento} = \frac{\text{RedLines} \times \frac{\text{velocidade}}{\text{FPS}} - \text{Largura} \times \cos \theta}{\sin \theta} \quad (4.20)$$

4.3 - Resultados

Com o sistema de visão responsável pela reconstrução 3D de objectos e do cálculo da sua posição e orientação concluídos, realizaram-se testes para determinar a sua precisão. Neste

teste foram utilizados três peças paralelepípedas com diferentes dimensões conhecidas. Além de se usarem peças com dimensões diferentes, todas as peças foram colocadas sobre o tapete em diferentes posições e orientações no intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$.

Foram realizadas análises de todas as informações obtidas pelo sistema de visão, obtendo-se os erros dos cálculos do centro de massa, da orientação e das dimensões da peça.

Erros	Centro de Massa X	Orientação	Comprimento	Largura	Altura
Média Erro Absoluto	0.08 (cm)	0.35 ($^\circ$)	0.98 (cm)	0.13 (cm)	0.04 (cm)
Erro Máximo	0.51 (cm)	1.29 ($^\circ$)	1.82 (cm)	0.39 (cm)	0.08 (cm)

Tabela 4.1 - Tabela de erros do sistema de visão

Da análise da tabela de erros, podemos concluir que o erro mais relevante consiste no cálculo do comprimento da peça. Sendo assim, é necessário compreender o porquê deste parâmetro ter um valor mais elevado comparativamente com os outros. O comprimento é a maior dimensão da peça e é a que está sujeita a maiores factores que podem influenciar o seu valor. O comprimento da peça é calculado através do varrimento das linhas laser à velocidade do tapete de transporte. A velocidade do tapete é obtida através do uso de um *encoder* acoplado ao motor, responsável pelo movimento do tapete. O erro que pode advir deste parâmetro baseia-se na calibração inicial, em que foi medido o número de passos do *encoder* para que o *encoder* percorre-se 1 metro. Este processo foi realizado repetidamente sendo considerado o valor médio dos passos medidos nas repetições realizadas.

O outro factor, que é certamente o principal responsável por este erro, é o número de FPS a que o sistema de visão processa as imagens. O computador utilizado apenas consegue processar a 7.5 FPS.

Uma relação entre a velocidade e os FPS para o erro obtido no comprimento da peça pode ser dado por:

$$erro_{comprimento} = 2 \times \frac{velocidade}{FPS} \quad (4.21)$$

As peças utilizadas para o teste do sistema de reconstrução 3D e para a manipulação de peças através do manipulador robótico e da garra foram dois traços de madeira paralelepípedos com superfícies lisas e um traço de cortiça. A utilização do traço de cortiça teve como objectivo a introdução de uma peça com forma paralelepípeda, mas com dimensões irregulares, usando desta forma uma peça não ideal para uma maior diversidade de tipo de peça. Esta peça de cortiça, devido ao seu comprimento reduzido, é a principal

responsável pelo maior valor do erro de orientação. A sua forma ondulada e dimensões irregulares aumentam o valor do erro do sistema de visão relativamente às dimensões da peça.

Mesmo com a utilização da peça de cortiça com forma irregular, os resultados obtidos apresentam uma boa precisão, permitindo que o sistema de manipulação de peças tenha uma boa fiabilidade de funcionamento.

Capítulo 5

Controlo do Sistema de Manipulação e Programação do Manipulador Industrial

5.1 - Controlo do Sistema de Manipulação

O controlo do sistema de manipulação consiste numa integração de duas máquinas de estados: a máquina de estados programada no manipulador robótico ABB e a máquina de estados do computador programada no software Lazarus.

Ambas as máquinas de estados são inicializadas individualmente. A aplicação desenvolvida em execução no computador no software Lazarus, procede inicialmente ao processamento de imagem, analisando as *frames* através de pesquisa por linhas de laser que incidem sobre a peça, dando assim início à detecção de uma peça. Após ser detectada uma peça, continua-se a pesquisa por linhas de laser em cada peça, realizando-se o processamento de imagem para reconstrução da peça. Após o processamento da localização e da reconstrução da peça, a informação sobre a posição da peça e a orientação são enviados para o manipulador, sendo esta informação ajustada à forma de manipulação das peças pela garra. No processamento da localização e orientação da peça, é também calculado o tempo que a peça, segundo a velocidade do tapete, demora a chegar à posição de manipulação.

Quando o manipulador robótico chega ao ponto desejado para esperar pela peça, essa informação de conclusão de etapa é enviada para o computador (PC). Na aplicação a correr no PC procede-se então à evolução da máquina de estados da garra. Inicialmente, esta verifica a sua posição e, caso não seja essa a situação, coloca-se na posição de aberta. O temporizador, que foi iniciado aquando do cálculo do seu valor de meta, é a transição que activa o próximo estado da garra, o seu fecho para a posição objectivo considerando a largura da peça. Após a garra ter sido fechada é verificada a pressão que esta está a realizar pela leitura da sua carga actual. Assim, o aperto ou a cedência dos dedos da garra, é realizada passo a passo até a carga actual e, respectiva pressão sobre a peça se encontre dentro do intervalo desejado.

A informação da peça que é adquirida é enviada para o manipulador robótico, servindo assim de transição para que este possa mover-se para a posição de entrega da peça. A confirmação da sua chegada à posição de entrega é enviada para o PC, sendo esta a transição necessária para que a máquina de estados da garra passe para a etapa seguinte, que consiste na sua abertura de modo a entregar a peça. A confirmação da garra aberta é enviada para o manipulador robótico, funcionando esta como a transição comum para ambas as máquinas de estado, que retomam as suas etapas de serviço iniciais. O manipulador vai para a posição de espera junto à linha de transporte e o software procede à análise das *frames* em busca de novas peças.

Em suma, o manipulador robótico tem três posições de funcionamento associadas às etapas da sua máquina de estados. É necessário fornecer uma explicação acerca de cada uma destas posições para uma melhor percepção do seu funcionamento. A posição inicial de serviço e a posição de entrega da peça são posições programadas *offline*.

A posição inicial de serviço é uma posição sobre o tapete de forma a estar perto da posição necessária para manipular uma peça. As coordenadas no mundo segundo o eixo do y, são as coordenadas da zona de manipulação de uma peça.

A posição de manipulação da peça é definida pelos algoritmos de reconstrução 3D e pela posição e orientação da peça, processados no computador. Este ponto tem como coordenada de referência, a coordenada segundo y, que define a meta para a qual a peça deve ser manipulada quando o centro de massa desta a intersectar. Esta meta fixa é o que nos permite estimar, através do centro de massa e da velocidade do tapete, o momento exacto para a garra recolher a peça.

A posição de entrega da peça é uma posição definida fora da área de transporte para se poder libertar as peças.

Manipulador Robótico

Computador

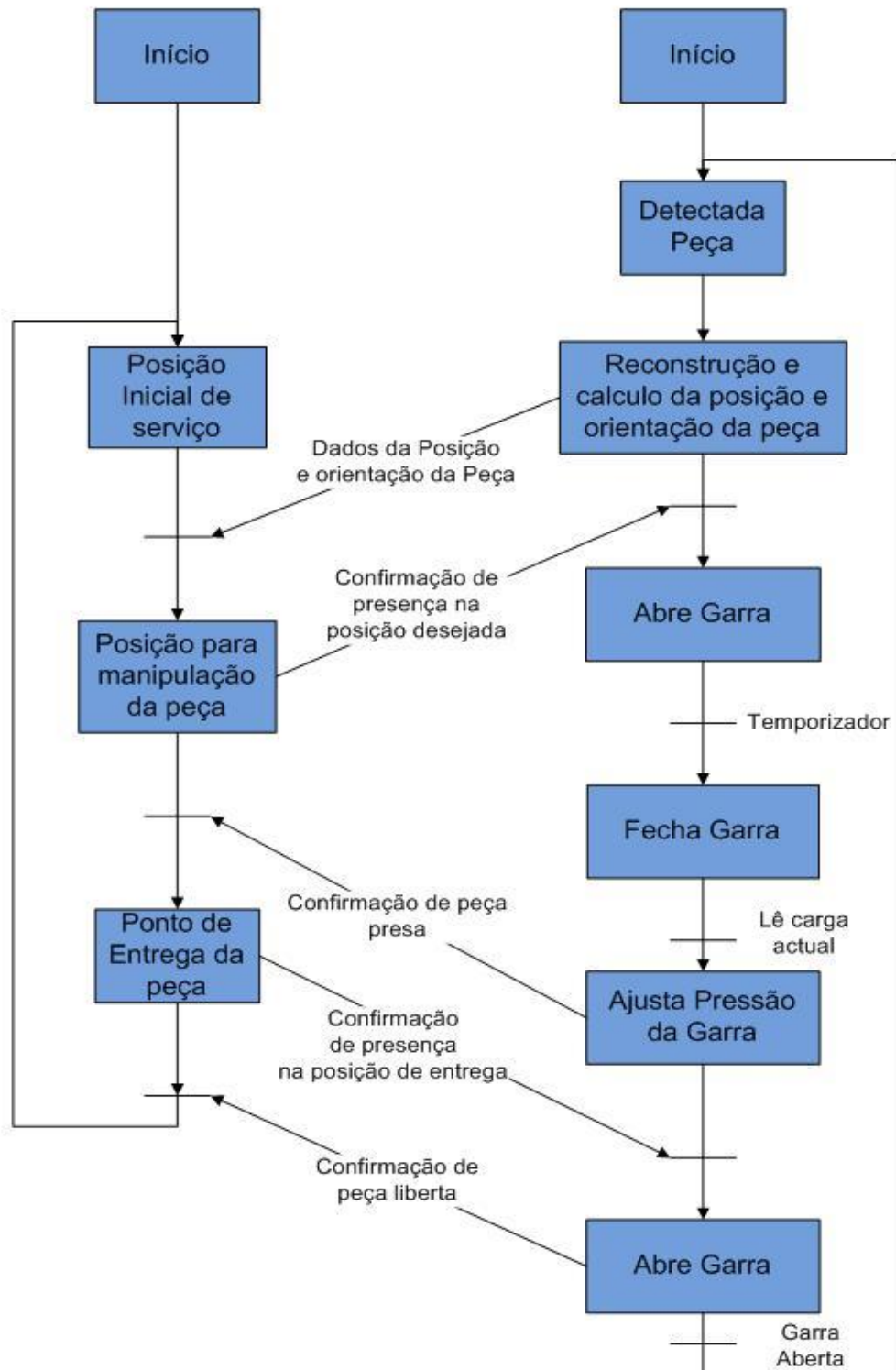


Figura 5.1 - Máquina de Estados do Sistema de Manipulação

5.2 - Controlo da Garra

Para realizar um controlo da garra foi necessário realizar uma relação entre o ângulo de posição do veio do actuador e a largura de fecho da garra. Para tal, colocou-se o motor na posição que permite maior abertura da garra e foram realizadas medidas da distância entre par de dedos da garra à medida que se incrementava a posição do motor. Obteve-se assim uma relação entre o ângulo de posição do motor e a largura entre par de dedos da garra, como se pode observar na tabela.

Posição do veio do motor (graus)	Abertura da garra (centímetros)
95	0
110	1,2
120	1,7
130	2,1
140	2,6
150	3
160	3,4
170	4
180	4,5
190	5,1
200	5,7
210	6,4
220	7,1
230	7,8
240	8,5
250	9,1
260	9,7
270	10,1
280	10,5

Tabela 5.1 - Relação entre graus do actuador e abertura da garra

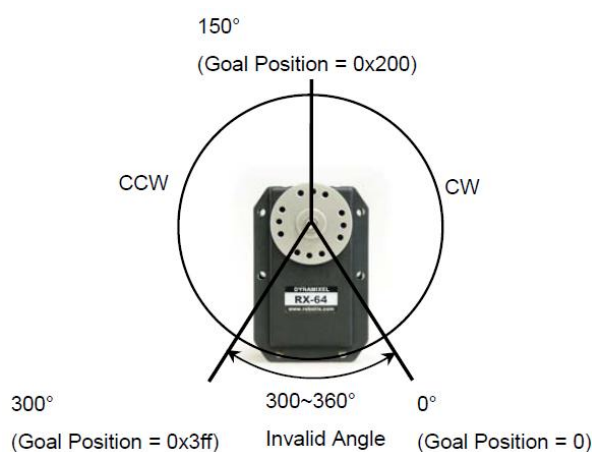


Figura 5.2 - Relação entre os ângulos e a posição do veio do motor

Usando os dados obtidos na tabela (5.1), foi traçado um gráfico dos pontos de relação de distância dos dedos da garra/ângulo do motor onde foi possível observar uma aproximação linear muito forte. Assim, foi possível obter uma função linear que estabelece a relação entre o ângulo de fecho do motor e a largura da peça que é necessário apanhar, através da recta de aproximação sobreposta no gráfico da figura (5.2).

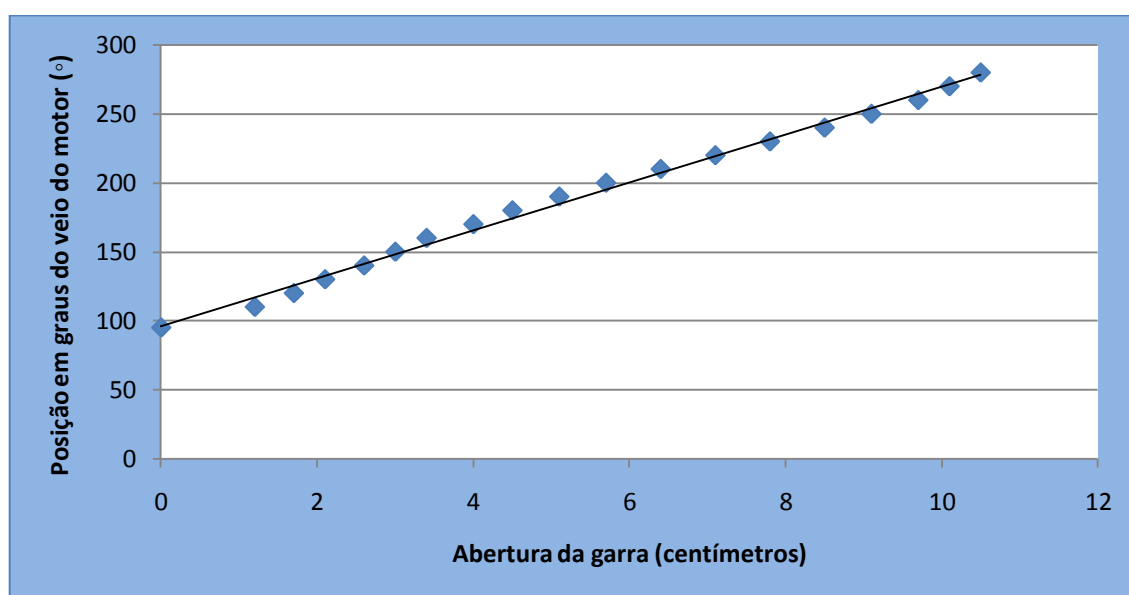


Figura 5.3 - Gráfico de relação entre a posição em graus do veio do motor e a abertura da garra em centímetros

Equação de aproximação linear obtida por mínimos quadrados:

$$graus = 17,35 \times Abertura_{centímetros} + 96,139 \quad (5.1)$$

É de referir que esta função de correspondência entre distância de abertura da garra e o ângulo do motor é apenas invocada na etapa de fechar a garra, onde a $Abertura_{centímetros}$ corresponde, nesta função, aos centímetros de largura da peça. Na etapa de abertura da garra, o controlo da garra é realizado perante um ângulo fixo estipulado como máximo de abertura.

Apesar de esta relação não ser completamente linear, o facto de o sistema de fixação nos dedos ser por molas permite que em caso de erro exista cedência das molas. No entanto, é possível compensar este erro de aproximação através do algoritmo de controlo da garra. Além do erro de aproximação, é também pensada a possibilidade de erro de aquisição da largura da peça. Por isso, a forma como o controlo da garra é realizado consiste em dois principais estados: um primeiro estado no qual o motor segue a função linear estabelecida; e um segundo estado em que é verificada a pressão exercida pelo motor, através da leitura da corrente do mesmo, e mediante este resultado realiza-se um aperto, ou abertura, da garra passo a passo, até que a pressão exercida pelo motor esteja dentro da gama estabelecida.

5.3 - Programação do Manipulador Robótico

Como já referido na secção 2.1.2 a comunicação com o manipulador robótico é realizada por canal série. Após a análise da máquina de estados do controlo do sistema de manipulação é necessário descrever como a programação do manipulador foi realizada de modo a implementar os estados de controlo desejados.

Os pontos de posicionamento do manipulador relativos à posição inicial de espera por informação de peça e a posição de entrega da peça são pontos rígidos inseridos no programa do manipulador.

A interacção de comunicação entre o manipulador robótico e o software do PC é realizada através uma trama definida para esta comunicação. No caso da comunicação por parte do manipulador robótico para o PC, a informação contida na trama consiste apenas no envio de um carácter referente à conclusão da etapa em que se encontra como, por exemplo, a confirmação de já se encontrar na posição desejada para intersecção da peça vinda no tapete.

A comunicação realizada do PC para o manipulador robótico é realizada com a mesma ideologia descrita, no sentido de comunicação contrário ao descrito anteriormente. A única excepção reside na trama inicial, que tem um conteúdo mais complexo correspondente ao envio da posição e orientação desejada para a ponta de ferramenta do manipulador para que esta possa manipular a peça transportada pelo tapete. Neste caso, a posição e orientação é

definida mediante a posição da peça no referencial do mundo e na estipulação destes parâmetros no ponto de intersecção com o manipulador no ponto de centro de massa da peça. Para definir a posição do manipulador é necessário considerar a forma e o funcionamento da ferramenta. Neste caso, como um par de dedos da garra tem posição fixa, o centro de distância entre estes, ao nível das extremidades das suas superfícies de contacto com a peça, é considerado o ponto central da ferramenta. Assim, o posicionamento da ferramenta em relação à peça é realizado tendo como referência o seu centro de massa, sendo ajustado tendo em consideração a largura da peça. Este ajuste de posicionamento funciona como um distanciamento ao centro de massa da peça através da distância deste ponto à superfície lateral da peça, para que os dedos fixos da garra se posicionem de forma a intersectarem a superfície lateral da peça centrados em relação ao centro de massa.

Um outro ajuste necessário a ter em consideração baseia-se na orientação da garra relativamente à peça. A forma de manipulação da garra relativamente à peça obriga a que o lado da garra com mobilidade de fecho e abertura esteja sempre orientado no sentido da peça. Só assim, a peça pode continuar o seu transporte no tapete sem correr o risco de impacto com a garra antes de fechar com o seu centro de massa à posição prevista para uma recolha segura. Desta forma, é necessário considerar o sentido positivo ou negativo de orientação da peça, de forma a inverter a orientação da garra mediante o sentido do ângulo da peça, para que o seu lado com mobilidade se oriente no sentido da peça.

Este ajuste de orientação da garra é responsável pela definição do ponto de posicionamento da ponta da ferramenta do manipulador. Esta implicação na orientação do posicionamento do ponto central da ferramenta deve-se ao facto de o ajuste segundo o eixo do x das coordenadas do mundo ter de ser realizado com um offset positivo ou negativo mediante a orientação da peça, para que a superfície de contacto dos dedos fixos da garra se ajustem à superfície que se encontra virada para o sentido de deslocação da peça. No caso de a peça ter uma orientação vertical, ou seja com 0°, a sua recolha é realizada com a orientação da garra no sentido predefinido da posição inicial de serviço.

O manipulador ABB IRB 140 é programado através do controlador S4Cplus. A programação do robot foi realizada *offline* através da linguagem RAPID. Esta programação consiste na execução de procedimentos para a movimentação do manipulador para um determinado ponto. Esta programação tem dois pontos gravados em *offline*, o ponto de início de funcionamento para espera da peça e o ponto de entrega da peça. O ponto de posicionamento para recolha da peça transportada pelo tapete é realizado em tempo real. Esta posição é estabelecida pelo envio de parâmetros por parte da aplicação Lazarus que definira o valor de variáveis no programa do robot que definem a posição e orientação da sua ferramenta, neste caso a garra.

Na programação do manipulador é realizada a programação de funções para comunicação com a aplicação Lazarus e descodificação da trama enviada.

Além desta programação foram realizados as indispensáveis calibrações da ferramenta e do objecto de trabalho.

Capítulo 6

Extensão a Novas Aplicações

É necessário e importante conferir liberdade estrutural ao processo de apanhar peças independentemente do ambiente de trabalho. Neste capítulo, pretende-se apresentar métodos que possibilitem ao sistema, tendo como base o algoritmo de reconstrução 3D apresentado, apanhar peças que vêm sobrepostas no tapete de transporte, bem como apanhar peças num ambiente desordenado, ou seja um conjunto de peças distribuídas desordenadamente sobre o tapete ou outro posto de trabalho. No primeiro caso, de peças sobrepostas, o setup realizado não precisa de ser alterado. No segundo caso, é necessária uma reestruturação do setup realizado. Para isto existem diversas possibilidades de setup mediante o ambiente pretendido. No caso do uso do tapete é necessário controlar o seu movimento para se realizar o movimento de varrimento do laser sobre as peças. Uma outra solução passa por um setup como em [41], em que um motor passo acoplado ao laser permite o movimento do laser realizando assim o varrimento sobre as peças.

Em problemas de *pick-and-place* que envolvem peças sobrepostas [48], [49], a parte de reconhecimento é o tema principal. Uma posição de manipulação estável das peças pode ser simplesmente determinada assumindo a posição calculada pelo algoritmo descrito neste trabalho, em que para uma manipulação estável das peças é considerada a posição do centro de massa da peça. Além disso, é geralmente assumido que a peça de posição superior deve ser recolhida em primeiro lugar. O reconhecimento das peças deve ser realizado tendo em consideração um conhecimento prévio da geometria das peças em conjunto com a utilização da transformada de Hough, que é já utilizada no algoritmo de cálculo de posição e orientação da peça, para reconhecimento de peças através da detecção das arestas da peça.

6.1 - Peças Sobrepostas Transportadas pelo Tapete

O tratamento de peça sobreposta deve-se à necessidade de dotar o sistema com novas funcionalidades que permitem a sua utilização numa nova realidade. O actual sistema realiza uma reconstrução 3D do objecto, sempre com referência em relação ao tapete transportador. Para o tratamento de peças sobrepostas, esta referência constitui uma limitação ao sistema, tornando-se necessário contornar esta limitação sem adição de hardware extra. A adição de novo hardware iria permitir a obtenção de nova informação, que conjugada à já obtida, seria suficiente para completar esta lacuna. Contudo, tal iria aumentar o preço do sistema e levar a novas modificações e especificações do ambiente industrial.

No tratamento de peças de madeira, a ideia a implementar para retirar as informações a respeito da nova orientação angular da peça tem como base uma linearização do plano superior da parte peça, resultando assim num plano da sua superfície através do qual consegue-se descobrir o seu declive obtendo assim o seu ângulo relativamente ao tapete de transporte.

No entanto, existem certos aspectos que devem ser considerados para que esta abordagem seja válida. Um aspecto é a forma como as peças podem vir sobrepostas, sendo este um factor fundamental a considerar. As peças sobrepostas podem entrar no transportador colocadas completamente sobrepostas uma sobre a outra, pelo que não se consegue realizar uma separação das peças, sendo necessário ter um conhecimento ou uma estimativa das peças. No caso normal de sobreposição de peças, a peça superior pode vir de 4 formas possíveis de processamento: sobreposta numa outra peça com inclinação tendencialmente frontal; sobreposta com inclinação para trás; sobreposta paralelamente ao tapete; ou sobreposta com uma inclinação lateral. A peça de posição superior é detectada através da transformada de Hough, segundo a qual as duas maiores rectas detectadas resultam nas arestas limitadoras da peça. A grande dificuldade deste processo está em saber a altura da peça de posição superior para saber onde a garra a pode manipular.

No entanto, para a situação de manipular a peça superior podemos ignorar os aspectos da altura real da peça, bastando assim apenas saber a altura do conjunto de peças relativamente ao tapete, do ponto intermédio do comprimento da peça e a sua orientação relativamente ao tapete, dando-se assim um offset necessário para que os suportes da garra consigam manipular a peça relativamente a esta altura.

Como já referido anteriormente a grande dificuldade do processo de recolha de peças sobrepostas consiste no reconhecimento das peças. Tendo em conta o *setup* utilizado e o uso de apenas uma câmara e um laser, torna-se difícil o reconhecimento de peças sobrepostas. O reconhecimento de peças sobrepostas através de transformadas de Hough é um processo muito moroso, sendo necessário considerar várias situações em que todas elas passam pelo

conhecimento real das peças. Uma alternativa à transformada de Hough pode passar pela aplicação de um filtro de cantos 3D das peças para possibilidade de identificação de peças isoladas.

Uma outra solução de possível implementação consiste em analisar a orientação das linhas do laser, uma vez que numa situações da peça não ter o seu plano de superfície paralelo ao tapete, tendo uma inclinação lateral, ou seja, uma rotação segundo o eixo do y.

A situação de peças sobrepostas implica um conjunto vasto de possibilidades de sobreposição de peças, em que uma só solução não consegue resolver todas as realidades possíveis, sendo necessária uma integração das soluções proposta conjugando a informação obtida por cada uma. Este problema de peças sobrepostas é equivalente quer num tapete rolante como noutro ambiente de trabalho.

6.2 - Peças desordenadas

Para a realização deste algoritmo proposto para a recolha de peças desordenadas, a localização e orientação de cada peça devem ser conhecidas de modo a permitir que o robot a manipule. A medição da localização e orientação para todas as rotinas de manipulação das peças ocupa muito tempo. Se o ambiente não é perturbado pela manipulação anterior, não é necessário realizar o processo de visão do local e orientação da próxima peça. Isto significa que é muito importante implementar uma operação de manipulação de peças que não perturbe o ambiente.

Na verdade, o pensamento é o processamento de imagem ser actualizado em cada operação de recolha porque não temos como descortinar se o ambiente foi afectado ou não durante o processo, ficando deste modo a premissa de preservação do ambiente relacionada com o facto de ser necessário evitar choques, quer por parte do manipulador robótico em conjunto com a garra, assim como por peças recolhidas.

Para formular uma estratégia eficiente de recolha de peças, os conceitos de factor de isolamento de peças e a capacidade de manipulação do robot na posição de recolha são apresentados.

As seguintes premissas são consideradas: os objectos são sólidos poliedros, os seus modelos geométricos são conhecidos, e os caminhos livres de colisões são conhecidos (caso existam obstáculos que restrinjam os movimentos do robot).

O conceito básico desta estratégia é muito simples: seleccionar a peça que é mais facilmente manipulada. A forma mais fácil de conseguir uma operação de manipulação robusta, que não perturbe as outras peças, é manipular peças isoladas. O factor de isolamento das peças deve ser determinado a partir da distância entre as peças. Numa região

densa de peças, onde a garra do robot ou as peças recolhidas têm possibilidade de tocar nas peças circundantes, o mecanismo de controlo do robot é expresso como capacidade de manipulação. Quanto maior for a capacidade de manipulação mais preciso é o controlo do robot. A operação de recolha é executada por ordem do maior factor de isolamento. A peça mais isolada é recolhida em primeiro lugar. Quando diversas peças têm o mesmo factor de isolamento, a operação é executada por ordem de maior capacidade de manipulação. A determinação do ponto de recolha da peça é importante no cálculo da capacidade de manipulação, sendo que o uso do algoritmo descrito anteriormente estabelece este ponto como o ponto de centro de massa da peça.

6.2.1 -Factor de isolamento

Um campo de potencial artificial é definido em torno de uma peça. Esse potencial pode ser artificialmente calculado como uma função de distância, ou seja, em que o potencial é calculado como a distância mínima de um ponto no espaço a uma peça. Esta função distância, $\Phi(d)$, é definida pela seguinte equação:

$$\Phi(d) = -\frac{1}{d} \quad (6.1)$$

A função $\Phi(d)$ é monótona decrescente, assim, quanto mais perto é a distância d de uma peça, menor é o potencial. A distância mínima de um ponto pertencente aos limites de uma peça relativamente às peças circundantes é calculada de acordo com a função de distância. O factor de isolamento das peças, I , é expresso pelo valor médio de todas as distâncias, d_i , aos pontos das extremidades de uma peça.

$$I = \int \frac{\Phi(d_i)}{L} dL \quad (6.2)$$

Onde, L é o comprimento total das extremidades da peça.

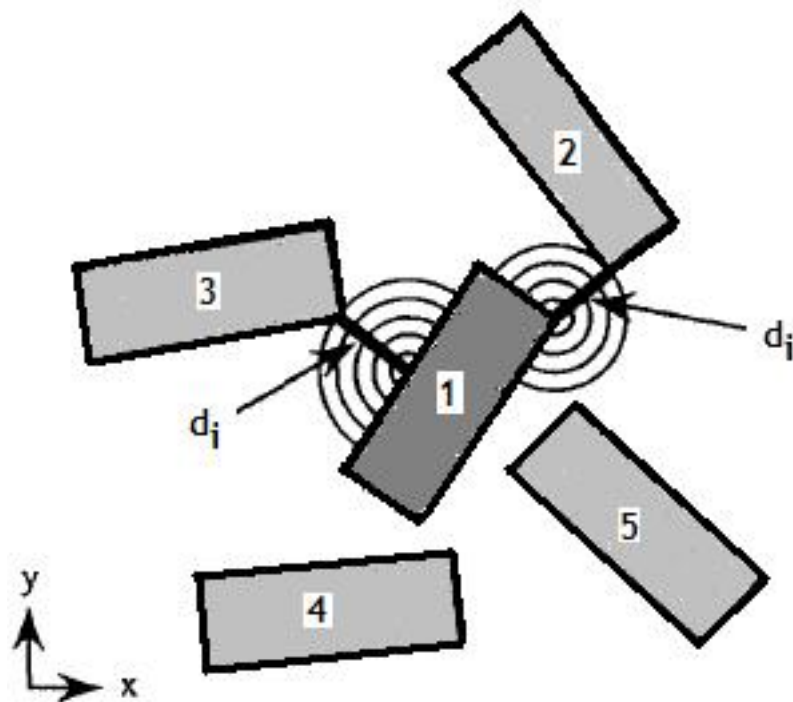


Figura 6.1 - Factor de isolamento de peças a coordenadas 2D

O factor de isolamento, I , mostra o grau de isolamento de uma peça. Consequentemente, a possibilidade de alteração do ambiente é menor quando a peça com o maior factor de isolamento é recolhida em primeiro lugar. Para as peças sobrepostas, o factor de isolamento é calculado considerando as peças em conjunto como uma peça única. Com esta configuração o campo de potencial artificial criado é negativo, pelo que se considera o maior factor de isolamento como o menor valor negativo.

6.2.2 - Capacidade de manipulação

Se a ordem de recolha de peças não poder ser determinada apenas pelo factor de isolamento, a capacidade de manipulação é usada como factor de decisão. A capacidade de manipulação expressa a flexibilidade operacional na posição de recolha da peça, isto é, a facilidade de controlo do robot. Deste modo, quando maior for o valor da capacidade de manipulação, a operação de recolha da peça é menos susceptível a perturbar o ambiente.

A capacidade de manipulação, m , é obtida por definição através do Jacobiano do manipulador, J , sendo dada por:

$$m = |\det(J)| \quad (6.3)$$

Sendo que o Jacobiano do manipulador é obtida por:

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Onde J_v e J_w são respectivamente o Jacobiano referente à velocidade linear e à velocidade angular.

Para o manipulador com 6 graus de liberdade o jacobiano é dado por:

$$\begin{bmatrix} v_6^0 \\ w_6^0 \end{bmatrix} = [J_1(q) \ J_2(q) \ J_3(q) \ J_4(q) \ J_5(q) \ J_6(q)] \dot{q}(t) \quad (6.5)$$

Onde $J(q)$ é uma matriz de dimensão 6×6 cuja coluna de ordem i , $J_i(q)$, é dada pela seguinte equação:

$$J_i(q) = \begin{cases} \begin{bmatrix} Z_{i-1} \times (O_n^0 - O_{i-1}^0) \\ Z_{i-1} \end{bmatrix}, & \text{se a junta } i \text{ é rotativa} \\ \begin{bmatrix} Z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{se a junta } i \text{ é prismatica} \end{cases} \quad (6.6)$$

Sendo O_n^0 o vector posição correspondente à extremidade do manipulador expresso no referencial da base, O_{i-1}^0 o vector posição da junta i no referencial da base, e Z_{i-1} o vector unitário definido segundo o eixo da junta i e expresso no referencial da base.

E $\dot{q}(t)$ é um vector que representa a velocidade das juntas dado por:

$$\dot{q}(t) = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3 \ \dot{q}_4 \ \dot{q}_5 \ \dot{q}_6] \quad (6.7)$$

onde os índices de $\dot{q}(t)$ são referentes a cada junta do manipulador.

Para facilitar os cálculos pode optar-se por ter apenas em consideração as juntas da base do manipulador obtendo-se assim a seguinte capacidade de manipulação:

$$m = \frac{l_2 \times l_3}{[l_2 \times \sin \theta_2 + l_3 \times \sin(\theta_2 + \theta_3)] \times \sin \theta_3} \quad (6.8)$$

onde l_2 e l_3 são, respectivamente, o comprimento dos juntas 2 e 3 do manipulador. θ_2 e θ_3 são respectivamente os ângulos dos eixos 2 e 3 do manipulador.

6.2.3 - Estratégia de recolha de peças desordenadas

1. É gerado o modelo do meio ambiente usando o centro de massa e a orientação de cada peça, calculados através da imagem obtida pelo conjunto da câmara+laser por triangulação laser e do modelo geométrico das peças.
2. Através da localização do centro de massa e orientação da peça, é possível verificar a posição de manipulação estável para cada peça. Sabendo a estrutura da garra e, deste modo, as posições de contacto com a peça relativamente ao centro de massa, pode-se verificar se a posição de manipulação está acessível. Considerando a distância entre dedos da garra pode não existir superfície na peça que permita a sua manipulação.
3. O factor de isolamento é calculado para cada peça para determinar a ordem de manipulação de peças. O manipulador, em princípio, manipula primeiro a peça com o maior factor de isolamento e que tem uma posição de manipulação acessível. Para as peças sobrepostas, o factor isolamento tridimensional é calculado assumindo as peças como peças únicas. Quando as peças sobrepostas têm o maior factor de isolamento, a peça na posição superior da pilha é seleccionada.
4. Quando as peças têm o mesmo factor de isolamento, a ordem é determinada pela capacidade de manipulação. A peça com a maior capacidade de manipulação é seleccionada em primeiro lugar.
5. Depois de cada recolha, o modelo do ambiente é actualizado assim como os restantes processos são repetidos até não existirem mais peças com possibilidade de serem manipuladas.

Capítulo 7

Conclusão

Este projecto tinha como objectivo principal manusear e controlar objectos através de um manipulador robótico. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de triangulação laser, tendo sido apresentado o respectivo modelo matemático e o procedimento de calibração. O sistema de visão foi dotado de uma robustez de ajuste dos parâmetros da câmara para a obtenção de imagens do sistema de triangulação laser com a qualidade desejada. Esta robustez é um factor indispensável para a sua implementação num ambiente não estruturado, em que se consegue controlar por completo a luminosidade.

Conseguimos obter a reconstrução 3D de um objecto com uma boa precisão, sendo que o maior erro desta reconstrução consiste no cálculo da dimensão do comprimento da peça, devido ao processamento de imagem ser realizado a 7.5 FPS. Com um computador capaz de processar as imagens a 15 FPS seria possível reduzir consideravelmente este erro. As dimensões da peça, a sua posição e orientação são obtidos no referencial do mundo, o que garante a capacidade de interacção com o manipulador robótico.

A aplicação desenvolvida é acompanhada de uma interface para o usuário que permite uma vasta interacção com todo o sistema e que garante a comunicação com o manipulador robótico e a garra implementada. A interface realizada inclui ainda a capacidade de visualizar a imagem da câmara em tempo real, assim como o processo de *threshold* para detecção da linha laser incidente na peça.

Relativamente ao sistema de manipulação das peças, conseguiu-se realizar uma programação do manipulador robótico, assim como da garra, que permitiu a integração de funcionamento destes dois elementos. Foi conseguido também a integração do manipulador e da garra com o sistema de visão, permitindo assim a manipulação de peças independentemente das suas dimensões, posição e orientação.

A estrutura da garra desenvolvida permite ao sistema uma maior flexibilidade, robustez e capacidade de lidar com peças no caso de aparecimento de erros superiores na posição, nas dimensões e na orientação.

Podemos concluir deste trabalho que conseguiu-se cumprir todos os objectivos propostos. Conseguiu-se desenvolver com sucesso um módulo de visão artificial que permite a recolha dos perfis 3D de objectos, assim como a integração com um módulo robótico constituído por um manipulador robótico e uma garra para manipulação dos objectos. O sistema foi validado por comparação das reconstruções 3D calculadas com a informação real das condições testadas e pelos testes de manipulação de peças através do sistema de transporte.

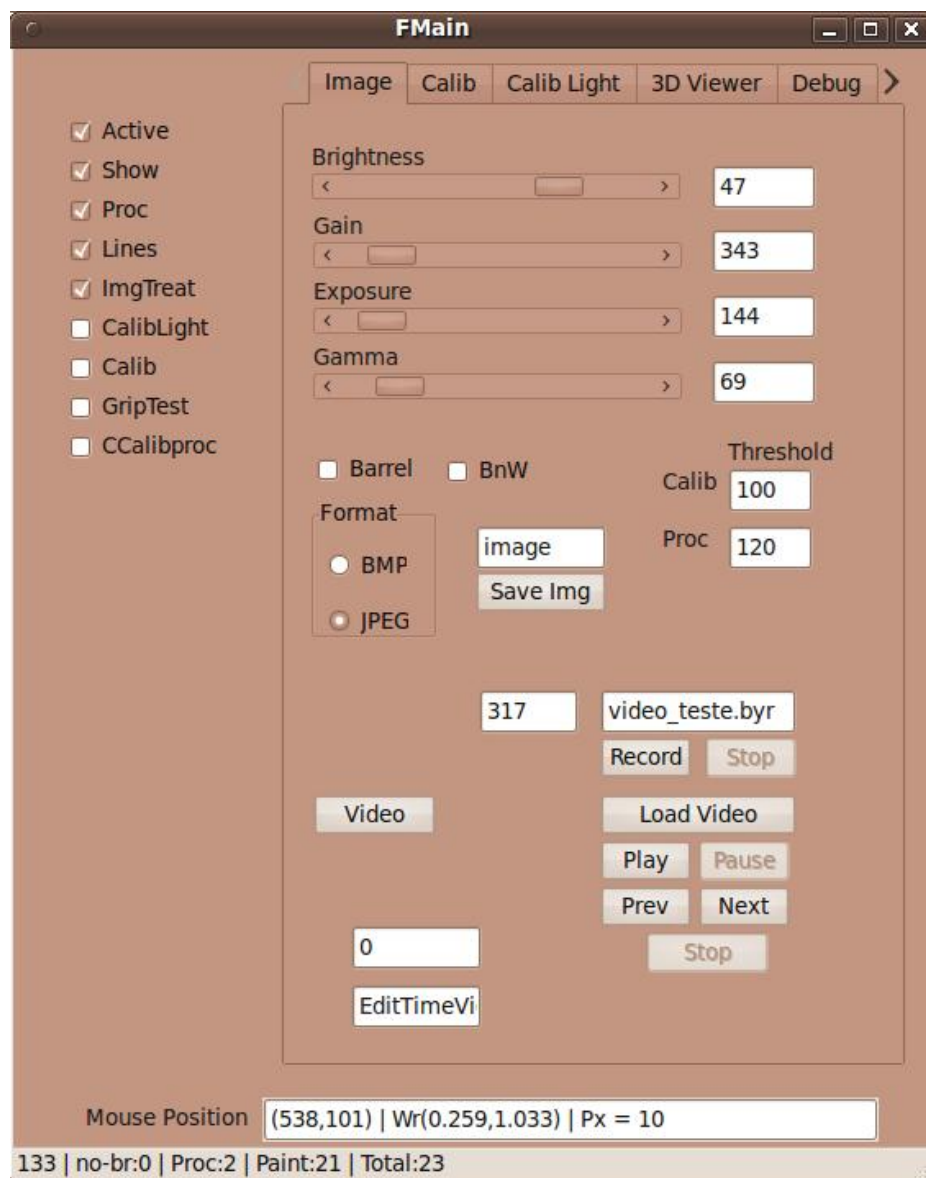
7.1 - Trabalho Futuro

Como proposta de trabalhos futuros sugere-se o melhoramento do método de calibração, substituindo-o por outro mais robusto, capaz de identificar todos os parâmetros extrínsecos e intrínsecos da câmara, conduzindo assim a uma melhor precisão na recolha de dados 3D. Um método sugerido é o método de Tsai pela sua facilidade de implementação e visto não necessitar nenhuma preparação relevante do cenário, apenas algumas folhas com marcadores.

Fica também a cargo de trabalhos futuros a implementação das aplicações descritas na secção 6. No caso do método descrito na secção 6.1, é necessário realizar uma integração das soluções propostas de forma a conjugar a informação obtida por cada método, ou realizar uma nova avaliação sobre possíveis soluções para o problema de peças sobrepostas sem recorrer a *hardware* adicional. Relativamente à secção 6.2, após a implementação do problema da secção 6.1, é necessário reestruturar o setup construído para implementar o algoritmo descrito.

Anexo A

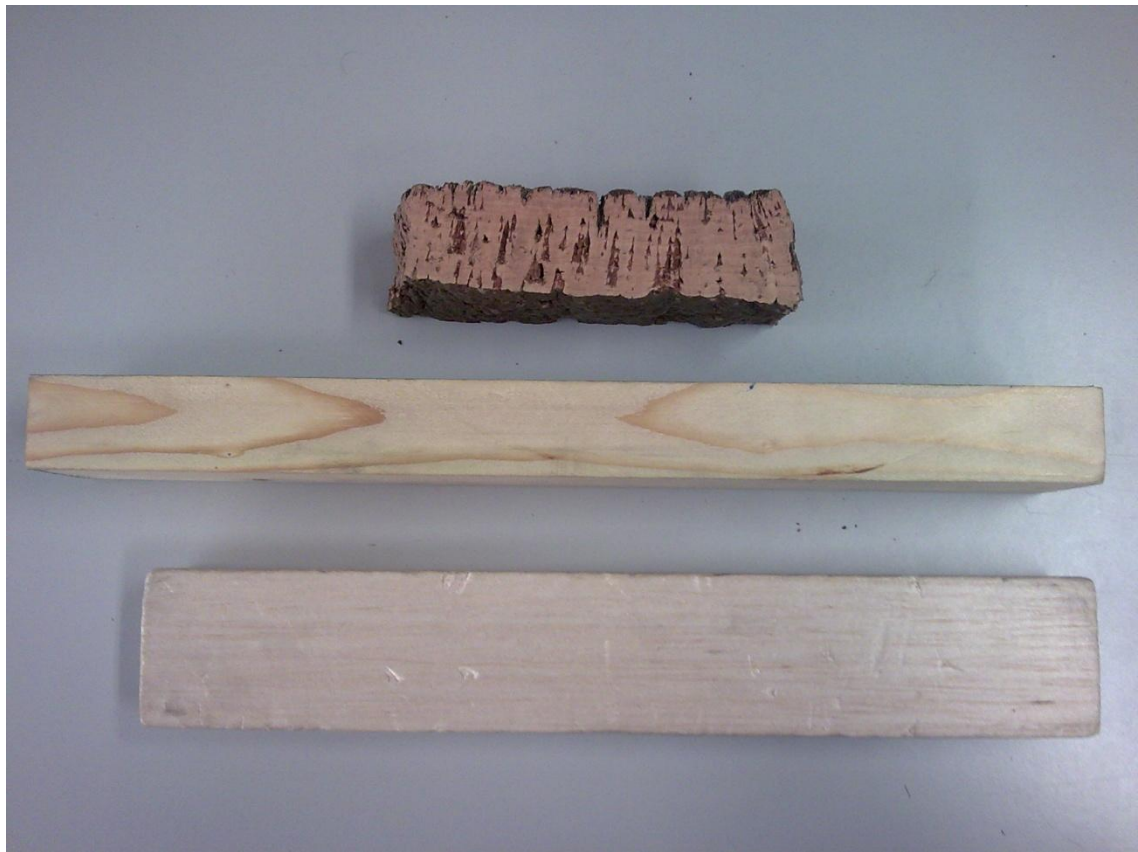
Interface Gráfica



Anexo A.1 - Interface Gráfica

Anexo B

Peças Utilizadas para Testes



Anexo B.1 - Peças Utilizadas para Testes, perspectiva 1



Anexo C.2 - Peças Utilizadas para Testes, perspectiva 2

Referências

- [1] EN ISO 8373 *Manipulating industrial robots - Vocabulary* (ISO 8373:1994)
- [2] Nof, Shimon Y. “*Handbook of Industrial Robotics*”, 2ª Edição, 1999
- [3] Westerlund, Lars. “*The extended arm of man: a history of the industrial robot*”, 2000
- [4] *The History and Benefits of Industrial Robots*. Disponível em <http://www.used-robots.com/robot-education.php?page=benefits+of+industrial+robots>. Acesso em 20/Abril/2010.
- [5] IRF - International Federation of Robotics. Disponível em <http://www.ifr.org/>. Acesso em 20/Abril/2010.
- [6] Abreu, Paulo. “Robótica Industrial - Fundamentos da Robótica. Aspectos Tecnológicos da Robótica”, Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, 2001
- [7] Blais, F. “*A review of 20 years of range sensors development*”, J. Electronic Imaging, 2004
- [8] Jarvis, R.A. “*A perspective on range finding techniques for computer vision*”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1983
- [9] Besl, P.J. “*Active, optical range imaging sensors*”, Mach. Vision Appl. 1988
- [10] Tiziani, H.J. “*Optical metrology of engineering surfaces-scope and trends*”, *Optical Measurement Techniques and Applications*, Rastogi, P.K., Ed.; Artech House: Boston, MA, 1997
- [11] Chen, F.; Brown, G.M.; Song, M. “*Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods*”, Opt. Eng. 2000
- [12] Beraldin, J.A.; Blais, F.; Cournoyer, L.; Godin, G.; Rioux, M. “*Active 3D sensing*”, NRC Publication Number, Technical Report 44159, Ottawa, 2001
- [13] Nitzan, D.; Brain, A.E.; Duda, R.O.; “*The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis*”, Proceedings of the IEEE, New York, Fevereiro 1977
- [14] Li, Y.; Gu, P. “*Free-form surface inspection techniques state of the art review*”, Comput. Aided D., 2004
- [15] Saitoh, K.; Machida, T.; Kiyokawa, K.; Takemura, H. “*A 2D-3D integrated interface for mobile robot control using omnidirectional images and 3D geometric models*”, Proc. IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Santa Barbara, USA, Outubro 2006
- [16] Fernandes, L. “*Estudo de Métodos para Extração de Formas e Realização de Medidas a Partir de Imagens*”, 2005
- [17] Devernay, F.; Faugeras, O. “*Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments*”, Proceedings of SPIE, 1995

- [18]Hartley, R.; Zisserman, A. "Multiple View Geometry in Computer Vision", Cambridge University Press, 2000
- [19]G. Sansoni , M. Trebeschi and F. Docchio, "*State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation*", Sensors 2009
- [20]J.B. Liao, M.H. Wu, R.W. Baines, "*A coordinate measuring machine vision system*", Elsevier Science, 1999
- [21]David Acosta, Olmer Garcia , Jorge Aponte "*Laser Triangulation for shape acquisition in a 3D Scanner Plus Scanner*", Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'06), 2006
- [22]TrueView. Disponível em: [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/ba8a01ad104fc7dbc125764600577203/\\$File/TrueView%205.12%20revB.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/ba8a01ad104fc7dbc125764600577203/$File/TrueView%205.12%20revB.pdf). Acesso em 20/Abril/2010
- [23]MotoSight. Disponível em <http://www.motoman.com/datasheets/MotoSight%203D.pdf>. Acesso em 20/Abril/2010
- [24]Halcon. Disponível em <http://www.mvtec.com/halcon/brochures/pdf/3d-vision-brochure.pdf>. Acesso em 20/Abril/2010
- [25]"*Systems and software engineering - System life cycle processes*", ISO/IEC 15288:2008
- [26] "Overview of Advantages", ISA-95.
- [27]Hall, Arthur. "*A Methodology for Systems Engineering*", 1989
- [28]"*CCD Camera DMK 21 AU04 from the image source*", Disponível em <http://www.theimagingsource.com>, Acesso em 31/Maio/2010.
- [29]Jorge L. C. Sanz. "*Advances in Machine Vision*". Springer-Verlag, 1989.
- [30]Remondino, F; El-Hakim, S. "*Image-based 3D modelling: A review. Photogramm*". Rec. 2006, 21, 269-291.
- [31]Remondino, F.; El-Hakim, S. "*Critical overview of image-based 3D modeling, Workshop 3D laser Scanning and Photogrammetry for Building Information Modeling*", Trondheim, Norway, September 2008; pp. 340-351
- [32]Remondino, F. "*From point cloud to surface: the modeling and visualization problem, Workshop on Visualization and Animation of Reality based 3D Models*", Tarasp-Vulpera, Suíça, Fevereiro 24-28, 2003.
- [33]Jorge L. C. Sanz. "*Advances in Machine Vision*". Springer-Verlag, 1989.
- [34]Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa "*Dense 3D Reconstruction method using Coplanarities and Metric Constraints for Line Laser Scanning*", 2007
- [35]Reinhard Noli, Michael Krauhausen "*Multi-beam laser triangulation for the measurement of geometric features of moving objects in production lines*" , 2003
- [36]Xiangyin Ma, Hongbin Zha "*Hybrid Scene Reconstruction by Integrating Scan Data and Stereo Image Pairs*", 2007
- [37]Wang Lei. "*A Novel Double Triangulation 3D Camera Design*", 2006
- [38]S. Burak Gokturk, Hakan Yalcin, Cyrus Bamji "*A Time-Of-Flight Depth Sensor - System Description, Issues and Solutions*", 2004
- [39]Andreas Ullrich, Nikolaus Studnicka, Johannes Riegl "*Long-range high-performance time-of-flight-based 3D imaging sensors*", 2002
- [40]M.Ferreira, "Pintura Robotizada Com Adaptação Automática", 2009.
- [41]Ana Ferreira. "*Extracção de Dimensões de Objectos por Laser para Integração com Manipuladores Industriais*", 2007

- [42]Manual Dynamixel RX-64. Disponível em http://www.robotis.com/zbxe/?mid=software_en&search_target=title&search_keyword=RX-64&document_srl=5438. Acesso em 20/Abril/2010
- [43]Cheng, W.; Kuang-Chiung; C. & Ming-Feng, Y. "A low-cost, userfriendly, and real-time operating 3D camera". Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 51, 1085-1091, 0098-3063, 2005
- [44]Mark Nixon, Alberto Aguado "*Feature Extraction & Image Processing*", 2ª Edição, 2008
- [45]"*Image Distortion*", Disponível em: <http://toothwalker.org/optics/distortion.html>, Acesso em 2/Junho/2010.
- [46]"Distortion (Optics)", Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(optics)), Acesso em 2/Junho/2010.
- [47]Navid Nourani-Vatani , Jonathan Roberts "*Automatic Camera Exposure Control*"
- [48]N. Ayach; B. Faverjon; J-D.Boissonnat; B.Bollack, "*Automatic handling of overlapping workpieces*" Proc. ICRP-84, p.837. 1984
- [49]K. Ikeuchi, H. Keith. " *Determining grasp configurations using photometric stereo and the PRISM binocular stereo system*", The International Journal of Robotics Research, vo.5, Nol, p.46, 1986
- [50]"Princípio de Triangulação Laser", Disponível em: http://www.estg.ipleiria.pt/files/292189_EngInv_Estg_01_0_42b2de3209b5a.pdf, Acesso em 2/Junho/2010
- [51]George Pavlidis, "*Methods for 3D digitization of Cultural Heritage*", Journal of Cultural Heritage 8 (2007) 93-98
- [52]"Triangulação por Dois Feixes Laser", Disponível em http://www.shapeline.com/article.asp?article_id=105&infogrp_id=15, Acesso em 2/Junho/2010
- [53]G. G. Savii, "*Camera Calibration Compound Genetic Simplex Algorithm*", 2004
- [54]"Lazarus Wiki", Disponível em: <http://wiki.lazarus.freepascal.org/>, 2010.
- [55] Manual Atmega8, Disponível em: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf
- [56] Encoder Omron E6A2-CW5C, Disponível em: <http://www.ia.omron.com/product/item/e6a21055a/>