

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**FEUP**

## Ensino por Demonstração de Manipuladores Industriais

Paulo Diogo Gaspar Gouveia

Dissertação/Relatório de Projecto realizada(o) no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. António Paulo Gomes Mendes Moreira

Julho de 2010

© Paulo Gouveia, 2010

A Dissertação intitulada

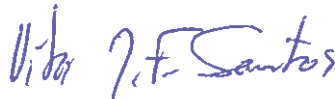
“ENSINAMENTO POR DEMONSTRAÇÃO DE MANIPULADORES INDUSTRIAIS”

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 - Paulo Diogo Gaspar Gouveia

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

# Resumo

Dada a crescente necessidade das empresas perderem o menor tempo possível na programação das suas inúmeras máquinas, em especial dos manipuladores industriais, e de em norma não possuírem os recursos de engenharia necessários para efectuarem essa programação nos seus sistemas robóticos, estas cada vez mais procuram novos métodos de programação, que sejam o mais simples e rápidos possível.

Nesta procura das empresas por melhores formas de programação apareceu a programação por demonstração (PpD) que tem-se mostrado um sistema cada vez mais robusto, eficaz e flexível.

E é neste sentido que no corrente trabalho se apresenta uma estratégia para o ensinamento rápido de manipuladores industriais, usando para o efeito uma nova tecnologia patenteada recentemente pela FEUP, o SincroVision.

De forma a validar e testar a qualidade e precisão dos algoritmos criados neste trabalho temos a tarefa de polimento de peças a ser executada pelo polidor. Para controlar a força aplicada pelo manipulador no polidor foi necessário realizar um estudo intensivo das relações corrente/força e força/velocidade de rotação aplicadas na máquina de polir.



# Abstract

One of the major efforts of industrial companies is to spend less time as possible programming the several machines, specially industrial manipulators. In this case its usually necessary contract engineering resources to carry out such programming in their robots reason why this kind of company increasingly seek new programming methods, which are as simple and quick as possible.

This demand of businesses for better ways of programming appeared the programming by demonstration (PbD), which has proved a system more robust, efficient and flexible.

Following this industry request this work presents a strategy for quick teaching of industrial manipulators, using a new technology recently patented by FEUP, the SincroVision.

In order to validate and test the quality and accuracy of the developed algorithms in this work, we have the task of polishing. To control the force applied by the manipulator in the polisher has been necessary to conduct an intensive study of the relationships current/force and force/rotational speed, applied in the polishing machine.



# Agradecimentos

Queria em primeiro lugar agradecer de forma especial ao Prof. Dr. António Paulo Moreira pelo apoio e empenho dado durante a execução deste trabalho.

Um agradecimento muito especial ao Paulo Malheiros e Marcos Ferreira por toda a ajuda, tempo e partilha de conhecimentos fornecida no decorrer deste trabalho.

Aos meus grandes amigos, que sempre estiveram ao meu lado nesta grande jornada que foi o meu percurso académico.

A todos os amigos e amigas que fui criando dentro e fora das paredes desta faculdade e que tiveram um papel muito importante para que atingisse este objectivo.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me concederam a oportunidade de conseguir atingir este objectivo.

Por fim, ao meu irmão Filipe que esteve sempre presente quando precisei.

A todos vós o meu sincero, **MUITO OBRIGADO!**



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas .....	xiv
Abreviaturas e Símbolos .....	xv
Capítulo 1 Introdução .....	1
1.1 - Estado da Arte.....	2
1.2 - Objectivos.....	6
1.3 - Estrutura do documento .....	7
1.4 - Notação usada no documento .....	8
Capítulo 2 Visão Artificial .....	11
2.1 - Introdução.....	11
2.2 - Modelo pinhole camera .....	12
Capítulo 3 Visão Estereoscópica .....	23
3.1 - Introdução.....	23
3.2 - Algumas noções .....	25
3.3 - Sistema estereoscópico e o modelo pinhole camera .....	27
3.4 - Geometria Epipolar .....	29
3.5 - Calibração do sistema de visão.....	33
3.5.1 - Algoritmo de Tsai: versatile camera calibration technique .....	33
3.5.2 - Eight-point algorithm .....	36
3.6 - Reconstrução 3D .....	37
Capítulo 4 Hardware .....	41
4.1 - Manipulador Industrial .....	41
4.2 - Sistema Estereoscópico .....	42
Marcadores Luminosos.....	44
4.3 - Sistema de Sincronização.....	45
4.4 - Máquina de Polir .....	46
4.5 - Célula de Carga .....	47
4.6 - Sistema de aquisição da corrente consumida pelo polidor .....	48

4.7 - Sensor de velocidade.....	50
4.8 - ADAM 4017 e MOXA TCC-801 .....	52
Capítulo 5 Sistema Sincrovision.....	55
5.1 - Introdução .....	55
5.2 - Modo de Funcionamento.....	56
5.2.1 - Calibração do Sistema Estereoscópico .....	57
5.2.2 - Calibração do eixo de coordenadas do manipulador em relação ao do sistema de visão estereoscópico .....	58
5.3 - Estudo da precisão do sistema .....	59
Capítulo 6 Geração de trajectórias.....	65
6.1 - Exposição do problema .....	65
6.2 - Instruções a utilizar no manipulador .....	66
6.2.1 - Instrução MOVL.....	66
6.2.2 - Instrução MOVC .....	67
6.2.3 - Instrução MOVJ.....	69
6.3 - Geração automática das trajectórias .....	70
Capítulo 7 Relações entre força, corrente e velocidade de rotação.....	71
7.1 - Hardware.....	71
7.2 - Software.....	71
7.2.1 - Programa de controlo do ATMEGA8 e de contagem de impulsos detectados pelo sensor de velocidade.....	72
7.2.2 - Programa de aquisição da corrente no motor e da força exercida na peça.....	73
7.3 - Procedimentos .....	74
7.4 - Resultados .....	76
Capítulo 8 Conclusões.....	83
8.1 - Trabalho futuro .....	84
Referências .....	87
Anexo A Conceitos .....	91

# Lista de figuras

Figura 2.1 - Representação típica do modelo de pinhole camera (retirada de wikimedia commons).....	13
Figura 2.2 - Modelo pinhole camera.....	13
Figura 2.3 - Representação dos eixos de coordenadas do modelo de pinhole camera .....	14
Figura 2.4 - Vista de lado do modelo pinhole camera.....	15
Figura 2.5 - Eixo de coordenadas $X_1Y_1$ no ponto principal e $X_2Y_2$ num dos cantos da imagem .	16
Figura 2.6 - Referencial do mundo .....	18
Figura 2.7 - Representação dos ângulos de Euler (retirada de Wikimedia Commons).....	19
Figura 3.1 - Focando o polegar, obtemos a visão de duas bandeiras. (retirado de [15]) .....	23
Figura 3.2 - Focando a bandeira, obtemos a visão de dois polegares. (retirado de [15]) .....	24
Figura 3.3 - Visão de cada olho na mesma cena. (retirado de [15]) .....	24
Figura 3.4 - Efeito de Perspectiva (retirado de [15]).....	26
Figura 3.5 - Efeito de Iluminação - Sem Iluminação (retirado de [15]) .....	26
Figura 3.6 - Efeito de Iluminação - Com Iluminação (retirado de [15]) .....	26
Figura 3.7 - Efeito de Oclusão (retirado de [15]) .....	27
Figura 3.8 - Efeito de Sombra (retirado de [15]).....	27
Figura 3.9 - Sistema de visão estereoscópica (retirada de <a href="http://www.imec.be">www.imec.be</a> ) .....	28
Figura 3.10 - Modelo de um sistema estereoscópico e representação das linhas epipolares...	30
Figura 3.11 - Particularidades assumidas no algoritmo de Tsai (retirada de [17]) .....	33
Figura 3.12 - Setup de calibração Tsai .....	34
Figura 3.13 - Triangulação ideal (retirada de [16]).....	38
Figura 3.14 - Triangulação sem intercepção das rectas de projecção (retirada de [16]).....	38

Figura 4.1 - Manipulador Motoman .....	41
Figura 4.2 - Câmara utilizada no sistema estereoscópico .....	43
Figura 4.3 - Sistema estereoscópico.....	43
Figura 4.4 - Suporte com dois leds .....	44
Figura 4.5 - Esfera com marcadores luminosos.....	45
Figura 4.6 - Placa genérica com Atmega8.....	46
Figura 4.7 - Máquina de Polir .....	46
Figura 4.8 - Célula de Carga .....	47
Figura 4.9 - Sistema Célula de Carga, peça para polimento e manipulador .....	48
Figura 4.10 - LEM HY 10-P.....	49
Figura 4.11 - Circuito de condicionamento de sinal.....	49
Figura 4.12 - Sensor HOA 6990 .....	50
Figura 4.13 - Encoder óptico.....	51
Figura 4.14 - Circuito com ATMEGA8 responsável pela contagem dos pulsos.....	52
Figura 4.15 - ADAM 4017.....	52
Figura 4.16 - MOXA TCC-801 .....	53
Figura 5.1 - Setup de configuração do Sistema Sincrovision .....	57
Figura 5.2 - Exemplo de cubo de teste .....	59
Figura 5.3 - Exemplo de cubo deformado de teste .....	59
Figura 5.4 - Esfera com marcadores luminosos.....	60
Figura 6.1 - Exemplo de caminho gerado pelo NURBS (retirada de Wikimedia Commons).....	66
Figura 6.2 - Instrução MOVL .....	66
Figura 6.3 - Position Level (retirada de [19]).....	67
Figura 6.4 - Resultado da instrução MOVC (retirada de [19]).....	67
Figura 6.5 - Dois arcos de circunferência seguidos (retirada de [19]).....	68
Figura 6.6 - Arcos consecutivos representados correctamente (retirada de [19]) .....	68
Figura 6.7 - Instrução MOVC .....	68
Figura 6.8 - Exemplo de um movimento MOVJ (retirada de [19]).....	69
Figura 6.9 - Instrução MOVJ.....	69
Figura 7.1 - Peça para polimento .....	74

Figura 7.2 - Referencial para testes .....	75
Figura 7.3 - Relação força vs velocidade de rotação do disco, com uma aproximação linear .	77
Figura 7.4 - Relação força vs velocidade de rotação do disco, com uma aproximação quadrática .....	77
Figura 7.5 - Relação força vs corrente consumida pelo motor do polidor, .....	78
Figura 7.6 - Relação força vs corrente consumida pelo motor do polidor, .....	79
Figura 7.7 - Relação da variação das três grandezas e a distância avançada com a peça em contacto com o disco .....	80

## Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Teste sem rotação. ....	61
Tabela 5.2 – Dados retirados da análise do teste sem rotação. ....	61
Tabela 5.3 – Teste com rotação. ....	62
Tabela 5.4 – Dados retirados da análise do teste com rotação. ....	62
Tabela 7.1 – Valores resultantes do teste. ....	76
Tabela 7.2 – Valores máximos. ....	80

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-coupled device
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DLT	Direct Linear Transformation
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
NURBS	Non Uniform Rational Basis Spline
MOVc	Move Circle
MOVj	Move Joint
MOVl	Move Line
PL	Position Level
PMEs	Pequenas e médias empresas
PpD	Programação por Demonstração
SVD	Singular value decomposition
TCP	Transmission Control Protocol
USB	Universal Serial Bus

## Lista de símbolos

$\pi$	Plano de imagem
$\Omega$	Plano focal
C	Centro óptico ou ponto de focagem
cm	Centímetro
f	Distância focal
F	Matriz Fundamental
Hz	Unidade SI da frequência - Hertz
I	Matriz Identidade

m	Metro
mA	Miliampère
ms	Milissegundo
mV	Milivolt
p	Plano principal
R	Matriz de Rotação
T	Matriz de translação
$X_1Y_1$	Referencial de Coordenadas no plano de imagem
XYZ	Referencial de coordenadas da câmara
$X_wY_wZ_w$	Referencial de Coordenadas do Mundo

# Capítulo 1

## Introdução

Com a deslocação das grandes séries de produção para outros países, em toda a Europa, e particularmente em Portugal, restaram as pequenas séries com grande valor acrescentado e geralmente muito específicas. Na produção robotizada recorrendo a manipuladores industriais este facto gerou um problema grave. O tempo de reprogramação de um manipulador robótico tornou-se muito elevado face ao tempo de produção. Para além de necessitar de recursos de engenharia para executar essa reprogramação, o que nem sempre existe em todas as empresas, em especial nas pequenas e médias empresas (PME's). Deste modo as técnicas de ensinamento rápido de manipuladores têm sido alvo de grande investigação e levado ao desenvolvimento de novas abordagens.

O ensinamento por gestos ou por imitação de um operador já foi abordado por alguns grupos e gera uma sequência de pontos no espaço tridimensional. Com a nova tecnologia SincroVision, patenteada recentemente pela FEUP é já possível, utilizando-se marcadores luminosos sincronizados com câmaras, fazer-se triangulação e visão estereoscópica e assim retirar a posição e rotação tridimensional da ferramenta.

O objectivo é acoplar os marcadores luminosos na ferramenta manipulada por um operador e deste modo registar-se num computador diversos pontos da trajectória.

Com esta sequência de pontos de trajectória registados, pretende-se determinar uma sequência de trajectórias que aproxime a trajectória inicial o melhor possível segundo diversos critérios. A aproximação deve ser feita quer em termos de posição no espaço quer em termos de velocidade. Por fim esta análise deverá ser traduzida para uma sequência de instruções na linguagem do manipulador industrial, criando desta forma, automaticamente, um programa que será descarregado no manipulador e o fará executar o movimento pretendido.

### 1.1 - Estado da Arte

O uso de manipuladores industriais tem vindo a desempenhar um papel cada vez mais importante no sector industrial, por vezes não sendo maior a sua entrada no mercado devido à complexidade de programação destes dispositivos. O problema está na dificuldade de passar a sabedoria e experiência de um operador para o manipulador. E neste sentido a programação por demonstração (PpD) é um dos rumos que se está a tomar para a programação deste tipo de robôs. A motivação para este trabalho vai nesse sentido, pois a imitação da trajectória humana tem as seguintes vantagens:

1) Simplifica a programação do robô - apenas é necessário efectuar o movimento desejado.

2) O movimento humano tem implícito muito potencial no que diz respeito à realização das tarefas, (exemplo: área de trabalho, direcções preferenciais que devem ser tomadas e regiões/movimentos que devem ser evitados) que seria difícil de representar através de outro método.

3) Passagem de velocidades recomendadas para determinados movimentos.

4) Habilita qualquer pessoa a operar e programar um manipulador industrial mesmo que esta não possua qualquer conhecimento de programação.

O principal objectivo da PpD é permitir a programação de trajectórias para o manipulador num curto espaço de tempo e de uma forma intuitiva. Diferentes abordagens para a PpD têm sido investigadas, diferindo entre si no tipo de manipuladores, estratégias e dispositivos usados. Sobre dispositivos e estratégias temos por exemplo o uso:

- de um guia;
- de luva antropomórfica;
- por gestos;
- de um joystick;
- de desenhos;
- da fala;
- por imitação / observação;

Yusuke Maeda et al (2008) [1] propõem alocar um guia com um sensor de força à ponta do manipulador. Neste trabalho um operador humano atribuiu um ponto inicial e final para o objecto a mover e realiza movimentos com o manipulador evitando obstáculos, guardando todos os pontos e movimentos efectuados no varrimento manual do volume. De seguida, e tendo em conta os valores guardados o manipulador calcula o espaço de trabalho e aquele que precisa para mover o volume sem tocar em obstáculos. E deste modo é planeada a melhor trajectória para o manipulador mover o objecto do ponto inicial até ao final.

Pode-se ainda referir que este método apenas se aplica a movimentos lentos ou a casos em que a velocidade não é muito relevante, ou seja, esta estratégia de programação será utilizado essencialmente para manipulação, e nunca servirá para ensinar o manipulador a polir ou pintar.

Aleotti, J. et al (2006) [2] propõem que o manipulador funcione como uma aproximação a um braço humano, usando uma fita moldável para que seja possível determinar a sua forma - o mesmo tipo de sensor que tem sido usado em aplicações na área de realidade virtual para introduzir movimentos humanos nas personagens virtuais. De forma a realizar a interacção com os objectos virtuais foi utilizada uma luva antropomórfica<sup>1</sup>. Assim sendo, é permitido ao operador mover objectos, cujos movimentos serão posteriormente analisados. É então gerada uma trajectória aproximada ao movimento inicial através do algoritmo NURBS.

Assim, neste trabalho existem 3 fases: fase de treino, fase de aprendizagem e fase de decisão. Na primeira fase, o robô efectua uma série de movimentos e o operador copia-os e os valores da fita são guardados. De seguida, o operador controla o robô em tempo real, movendo o seu braço. O robô tenta executar os movimentos, baseando-se nos valores adquiridos na primeira fase. Na fase de decisão, o operador avalia se o movimento executado pelo manipulador é o pretendido. Se assim for, dá-se por finalizada a aprendizagem; caso contrário volta-se a repetir o algoritmo até obter resultados favoráveis.

O uso de luvas antropomórficas para a programação de manipuladores também é sugerida por Ekvall, S. et al (2005) [3], onde estas são usadas para estudar a forma como pegar em objectos de diferentes formas e tamanhos. Neste trabalho o operador utiliza uma luva para pegar nos objectos, e utilizando modelos de Markov, rotação e translação da mão ou ambos simultaneamente é extraída essa informação e transferida para o manipulador.

No caso da imitação dos gestos humanos através da observação, os trabalhos de R. Dillmann et al (2004) [4], Markus Ehrenmann et al [5], Manuel Lopes et al (2005) [6] utilizam um sistema de visão para observar os movimentos do operador com o objectivo de tentar

passar o conhecimento humano na realização de tarefas simples e complexas, para robôs humanóides.

Ainda na área do ensinamento por gestos Pedro Neto et al (2009) [7] sugere uma programação, usando um sensor de movimento - acelerómetro de 3 eixos - embebido no comando da consola Wii.

Nagata, F. et al (2001) [8] usa um joystick em conjunto com um controlador de força. Neste trabalho o operador pode controlar o manipulador indicando a este a direcção e orientação da ferramenta e ter a noção de força através da rigidez do joystick.

Em outro sentido Pires, J.N. et al (2007) [9] propõem o uso de canetas digitais (da Anoto technology) para através do desenho realizar a programação de tarefas. Juntamente com o uso destas canetas, são também usados ficheiros de CAD e interfaces para gerar código para os manipuladores, o que faz com que a programação destes manipuladores seja mais fácil e intuitiva.

Com recurso à fala, temos o ensinamento de um tele-robô por Jayawardena, C. (2005) [10] onde o operador conhece o ambiente de trabalho, e através da fala descreve o objecto pretendido (forma, cor, tamanho), e no caso de o conjunto destas características já se encontrarem na base de dados, o robô recorrendo a visão artificial, tentará reconhecer e agarrar o objecto. No caso de não existir na base de dados nenhum objecto com as características descritas o robô irá questionar o operador sobre a posição real do objecto e posteriormente guardará estas novas características na base de dados.

Por sua vez em Pires, J.N. et al (2007) [11] a programação é feita através da demonstração, movendo-se o manipulador através de um guia preso na ponta do manipulador. É possível mover o manipulador nas direcções pretendidas e simultaneamente interagir com a programação das trajectórias através da fala (tirar a posição do robô, tempos de espera e tipos de movimento MOVL, MOVJ, entre outros), sendo exequível programar, de uma maneira simples e versátil, todas as trajectórias do manipulador.

Em Nagata, F. et al (2001) [12] apresenta-se um sistema que a partir de um modelo constituído por um controlador de força e um gerador de trajectórias consegue executar um polimento muito eficaz de superfícies, sem precisar para o efeito de um ensinamento complicado do manipulador.

Por sua vez Shin-ichi Nakajima et al (2004) [13] utiliza um joystick e um controlador de força de forma a conseguir realizar o polimento.

Neste estudo, estima-se a força que o manipulador exerce no polidor através da velocidade e corrente consumida da máquina de polir. Conseguindo-se assim ter vantagens em relação às estratégias de polimento apresentadas em [12] e [13], uma vez que se evita o uso de sensores de força e se facilita o ensinamento rápido por parte do operador, pois para ensinar o manipulador só necessitará de executar a tarefa uma única vez.

## 1.2 - Objectivos

Este trabalho propõe desenvolver uma estratégia de programação por demonstração de manipuladores industriais, utilizando para o efeito um sistema patenteado pela FEUP, o SincroVision.

Para atingir esta meta será utilizada visão artificial, mais propriamente um sistema de visão estereoscópico, que irá captar todos os movimentos pretendidos.

O objectivo é estudar um sistema de visão estereoscópica já existente e testar a sua calibração. E desta forma recolher dados de trajectórias, para calibrar e aperfeiçoar um software que execute a aproximação aos pontos dessa trajectória e que traduza esses movimentos em linguagem do manipulador, com a maior precisão possível.

Assim sendo é necessário fazer um estudo intensivo da variação entre a trajectória pretendida e trajectória executada, de forma a saber-se a precisão do sistema.

Por fim, a programação por demonstração de manipuladores industriais deste trabalho, será aplicada aos trabalhos de acabamento, mais especificamente o polimento de peças, pois apesar da utilização de robôs neste tipo de trabalhos ser relativamente recente, e representarem actualmente uma pequena parte do mercado dos robôs, é evidente que esta é uma área em franca expansão e cada vez mais procurada pelas empresas.

Para tal será necessário realizar um estudo intensivo das relações corrente/força e velocidade/força do polidor, com o intuito de evitar a utilização de sensores de força e de facilitar o ensinamento rápido por parte do operador, pois só necessitará de executar a tarefa uma única vez.

### 1.3 - Estrutura do documento

No capítulo número dois, sobre visão artificial, é feita uma introdução ao modelo pinhole camera, sendo apresentada alguma da geometria que o acompanha.

No capítulo três, faz-se uma introdução à visão estereoscópica, em que se explica a aplicação do modelo pinhole camera a um sistema estereoscópico. Na secção 3.4, é descrita a geometria epipolar sobre a qual um sistema estereoscópico assenta. Na secção 3.5, são apresentados dois algoritmos para a calibração de uma câmara e calibração de um sistema estereoscópico. No final do capítulo três, é exposto um algoritmo para a reconstrução 3D a partir de um sistema estereoscópico.

No quarto capítulo é apresentado e descrito todo o hardware usado na execução deste trabalho, assim como algumas das características relevantes sobre o mesmo. Muitas outras podem ser obtidas a partir das folhas de características fornecidas pelos fabricantes.

O capítulo número cinco descreve o sistema Sincrovision bem como o seu funcionamento, para além de conter os resultados referentes ao estudo intensivo da precisão deste sistema.

Para a geração de trajectórias, o capítulo seis descreve o pequeno estudo que se efectuou nesta área, para além de referir como estas são geradas na prática pelo nosso sistema.

No capítulo sete é descrita a relação existente entre a força exercida pela peça a polir sobre o disco de polimento e a corrente eléctrica consumida pelo motor da máquina de polir, bem como a relação entre essa mesma força e a velocidade de rotação do disco. Ainda neste capítulo são abordados quais os hardwares e softwares utilizados/criados para a determinação destas relações. E por fim é referido como se procedeu à realização dos testes e quais os resultados obtidos a partir dos mesmos.

As conclusões e trabalhos futuros estão presentes no capítulo oito.

## 1.4 - Notação usada no documento

Para simplificar a leitura deste documento de seguida define-se a notação utilizada.

As matrizes são representadas por letras maiúsculas e a negrito -  $\mathbf{P}$ . Os vectores são representados por letras simplesmente em maiúsculas -  $P$ .

A representação de escalares é feita em letra minúscula e em itálico - as coordenadas de um vector  $P$  tridimensional são  $(x,y,z)$ . A representação dos eixos de um referencial será feito em maiúsculas e os caracteres que os define, encontram-se todos juntos - as coordenadas do ponto  $P$  no referencial XYZ são  $(x,y,z)$ .

Palavras em inglês são identificadas em itálico - pinhole camera.

Ao longo dos capítulos de visão artificial vai ser usado um sistema de coordenadas homogéneas, para que se possam expressar certas operações através de multiplicação de matrizes - por exemplo a translação de um ponto (que num sistema cartesiano não é possível).

O sistema de coordenadas homogéneas tem mais uma dimensão do que o espaço a que respeitam. Assim sendo, no espaço bidimensional têm a forma  $(x,y,w)$ , onde  $w$  representa um plano paralelo a  $XY$ . Ao longo do documento  $w$  será igual a 1. Então para um vector  $(x,y)$  no sistema cartesiano, este no sistema de coordenadas homogéneas é definido como  $(x,y,1)$ .

No caso das matrizes, para a passagem do sistema cartesiano, para o sistema de coordenadas homogéneas é adicionada uma última linha e/ou uma coluna (preenchida com zeros, excepto o último elemento é 1) à matriz original, de forma a que esta seja quadrada -

$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ , no sistema cartesiano.

No sistema de coordenadas homogéneas a matriz anterior passa a  $\begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ .

Quando se expressar alguma variável em coordenadas homogéneas esta é identificada com um til em cima da variável - ponto  $P_m$  em coordenadas homogéneas é  $\tilde{P}_m$ .

Em qualquer altura em que se possa confundir qualquer tipo de letra/expressão representada em figuras, com a notação matemática aqui descrita, previamente é definido o que representa cada uma delas.



# Capítulo 2

## Visão Artificial

### 2.1 - Introdução

Com o surgimento da visão artificial por volta da década de 70, os investigadores começaram a implementar técnicas de processamento de imagens. Essas técnicas foram sendo amadurecidas e subdivididas em partes específicas da visão computacional. Uma dessas subdivisões é a que utiliza algoritmos de processamento de imagens (por exemplo filtros, detecção de bordas e limites dinâmicos) para extrair características específicas de uma imagem.

A visão computacional consiste no conjunto de métodos e técnicas através dos quais sistemas computacionais podem ser capazes de interpretar imagens. Ou seja, isto equivale a dizer que é a forma de fazer sistemas computacionais “olharem” para uma imagem e transformar os dados por estes fornecidos em informação útil. Porém a visão computacional ainda se encontra longe de atingir o nível do sistema ocular humano, apesar de também apresentar determinadas vantagens, como o facto de não sofrer de falsos julgamentos ou cansaço.

Desta forma estes sistemas têm vindo a ser introduzidos nas mais variadas áreas, tais como:

- Inteligência Artificial - ex: Sistemas de aprendizagem analisam imagens a fim de reconhecer padrões como por exemplo reconhecimento facial, que identifica e diferencia uma face de outra. Também são utilizados em sistemas de rastreamento e para que robôs possam “ver”.
- Monitorização/controlo de processos - ex: contagem de pessoas, inspecção industrial, análise médica, modelação topográfica.
- Ajuda/Entretenimento - ex: no auxílio de pessoas com menos capacidades ou aumentar a facilidade de jogar em consolas de vídeo jogos.

- Física - ex: estudo da radiação electromagnética, em que esta é reflectida nas superfícies dos objectos e finalmente medida no CCD da câmara. São usados algoritmos de seguimento, reconhecimento de objectos, aprendizagem, estimação de movimento e restauração de imagem.

Os trabalhos com visão artificial incidem sobretudo na análise de imagens 2D, mas nos últimos anos tem ocorrido um crescente aumento do estudo e aplicação de imagens 3D, tentando com isso aproximar as capacidades da visão artificial às da visão humana. Para tal a área da neurobiologia tem contribuído bastante, uma vez que fornece os estudos necessários para se saber com o sistema ocular humano funciona.

Neste capítulo apenas será abordado o modelo de câmaras finitas e projectivas, pois são o tipo de câmaras utilizadas no trabalho.

### 2.2 - Modelo pinhole camera

Este modelo descreve a relação matemática entre as coordenadas de um ponto 3D e a sua projecção na imagem do plano. Ele não inclui distorções geométricas nem objectos desfocados pelas lentes e apenas pode ser usado numa primeira aproximação do mapeamento da cena 3D para a cena 2D. Os erros do modelo dependem da qualidade da câmara e, em geral, o erro aumenta desde o centro da imagem até às margens desta, onde o efeito de barril é mais acentuado [14]. Apesar disso alguns destes efeitos podem ser compensados com a aplicação de algoritmos e filtros.

O funcionamento deste modelo consiste em ter todos os raios de luz emitidos e reflectidos por objectos a passarem através do pinhole e a formarem uma imagem invertida do mesmo objecto na imagem do plano, ver Figura 2.2. Cada ponto do objecto constitui um ponto na imagem, formando-se assim uma linha por cada ponto formado. A este fenómeno de projecção do espaço 3D para um plano dá-se o nome de projecção projectiva.

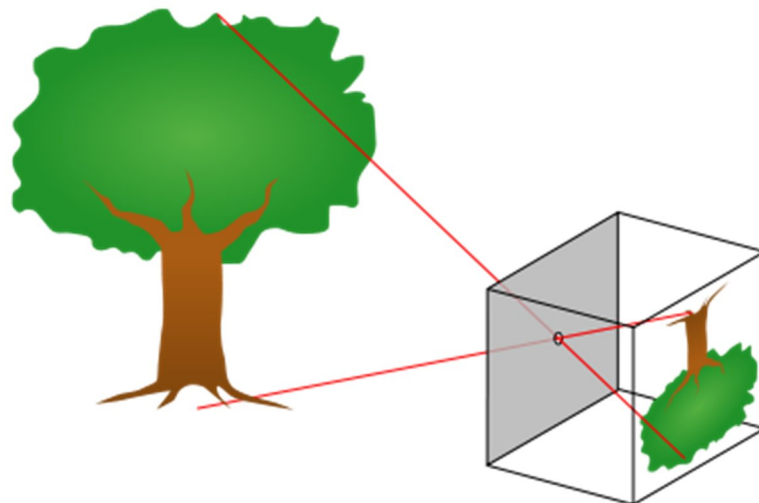


Figura 2.1 - Representação típica do modelo de pinhole camera (retirada de wikimedia commons)

Geometricamente o modelo pinhole camera consiste na existência de um plano  $\Omega$  (plano principal) fixo a uma distância  $f$  em frente a um plano de imagem  $\pi$ . No plano  $\Omega$  existe um ponto  $C$  que é denominado centro óptico ou ponto de focagem.

À distância entre o centro óptico e a imagem ( $f$ ) dá-se o nome de distância focal.

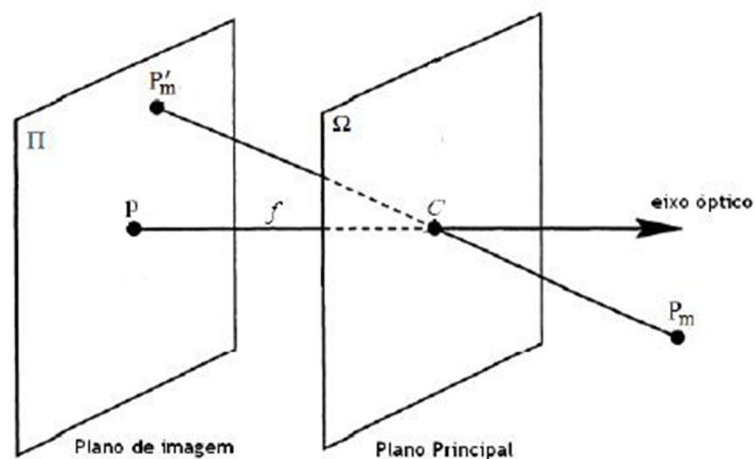


Figura 2.2 - Modelo pinhole camera

Antes da explicação dos conceitos chave, vamos definir um eixo de coordenadas no modelo. Assim sendo temos um eixo  $Z$  que aponta na direção frontal da câmera, sendo o eixo principal. O plano principal contém o referencial  $XYZ$  e é o lado da frente da câmera, a origem deste referencial será dada pelo ponto  $C$ . Esta representação do eixo de coordenadas do modelo de pinhole camera pode ser observado na Figura 2.4.

Por sua vez, o plano de imagem onde é projectada toda a cena 3D encontra-se paralelamente aos eixos XY, e está a uma distância  $f$  da origem  $C$ . No modelo real da implementação do modelo o plano da imagem está localizada na coordenada  $-f$ .

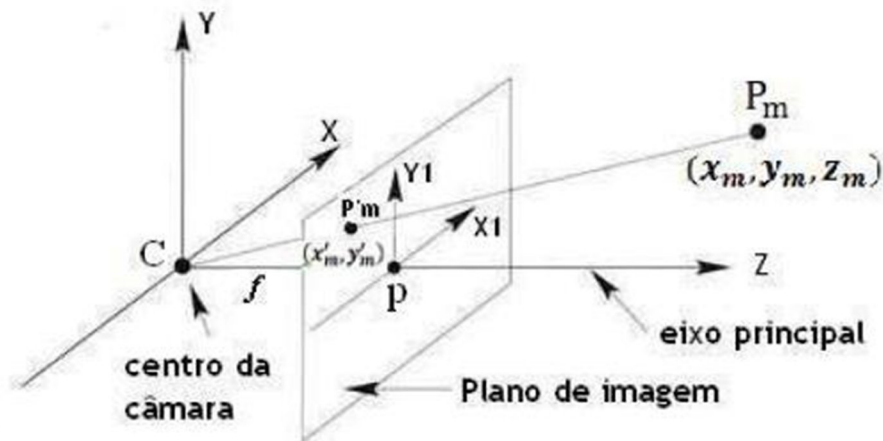


Figura 2.3 - Representação dos eixos de coordenadas do modelo de pinhole camera

Convém ainda realçar que  $P_m$  é um ponto no mundo com as coordenadas  $(x_m, y_m, z_m)$  relativamente a XYZ e a sua projecção no plano de imagem é o ponto  $P'_m$ . Neste plano temos definido um referencial 2D  $X_1Y_1$  com origem em  $p$  (centro da imagem) e nos quais as coordenadas do ponto  $P'_m$  deste sistema são  $(x'_m, y'_m)$ .

No modelo pinhole camera original com o plano de imagem em  $Z=-f$ , a relação entre as coordenadas do ponto  $P_m (x_m, y_m, z_m)$  e do ponto  $P'_m (x'_m, y'_m)$  é dado por:

$$x'_m = -f \frac{x_m}{z_m} \quad (2.1)$$

$$y'_m = -f \frac{y_m}{z_m} \quad (2.2)$$

Esta relação geométrica de 3D para 2D descrita pelo pinhole camera apenas é uma projecção da imagem no plano de imagem seguido de uma rotação de  $180^\circ$ . Mas de forma a simplificar a resolução, podemos colocar a imagem do plano na coordenada  $f$  em vez de  $-f$ . E deste modo obtemos:

$$x'_m = f \frac{x_m}{z_m} \quad (2.3)$$

$$y'_m = f \frac{y_m}{z_m} \quad (2.4)$$

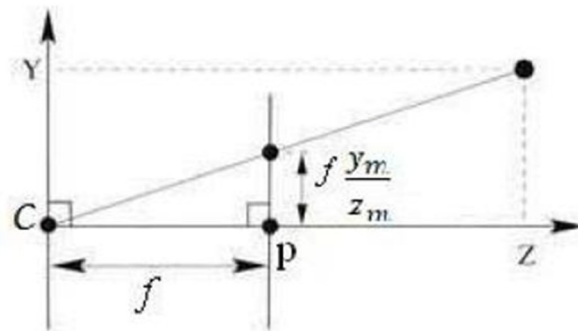


Figura 2.4 - Vista de lado do modelo pinhole camera

A relação anterior entre o ponto  $P_m$  no mundo e o ponto  $P'_m$  no plano da imagem é dada por:

$$P'_m = \mathbf{P}P_m \quad (2.5)$$

Sendo  $\mathbf{P}$  a matriz de projecção da câmara. A matriz de dimensão  $3 \times 4$  que contém os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara - distância focal, centro da imagem, factor de escala dos pixéis, rotação e translação da câmara. Em seguida explica-se onde se coloca cada um dos parâmetros na matriz de projecção.

O modelo pinhole camera assume que a origem das coordenadas na imagem do plano é feito no ponto principal,  $p$ . Tipicamente em processamento de imagem não usamos o ponto principal como origem do referencial neste plano, mas sim num dos cantos da imagem. Considerando que a origem do referencial é feita no canto inferior esquerdo do plano da imagem  $X_2Y_2$  e que as coordenadas do ponto principal neste novo referencial são  $(x_0, y_0)$ .

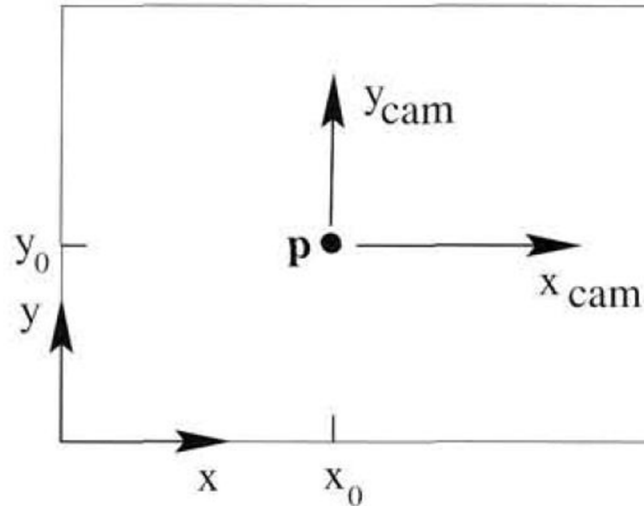


Figura 2.5 - Eixo de coordenadas  $X_1Y_1$  no ponto principal e  $X_2Y_2$  num dos cantos da imagem

Fazendo  $p_x=x_0$  e  $p_y=y_0$ , as expressões que nos dão as coordenadas  $(x'_m, y'_m)$  no plano de imagem com origem no ponto principal são:

$$x'_m = f \frac{x_m}{z_m} + p_x \quad (2.6)$$

$$y'_m = f \frac{y_m}{z_m} + p_y \quad (2.7)$$

Desta forma ficamos com a origem do nosso referencial num dos cantos da imagem.

Reescrevendo a expressão (2.5) que relaciona  $P'_m$  e  $P_m$  apenas em função dos parâmetros intrínsecos da câmara, em coordenadas homogêneas fica-se com:

$$\tilde{P}'_m = \mathbf{K} \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \tilde{P}_m \quad (2.8)$$

Em que o ponto  $\tilde{P}_m$  e  $\tilde{P}'_m$  são respectivamente:

$$\tilde{P}_m = \begin{bmatrix} P_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\tilde{P}'_m = \begin{bmatrix} P'_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sendo K dado por:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A matriz K é definida como a matriz de calibração da câmara, contendo a distância focal e o centro da imagem. [14]

O modelo anterior considera que todo o espaço em frente da câmara está representado segundo o referencial da câmara com origem em C, não sendo prático estar constantemente a representar o espaço envolvente no referencial da câmara. Para simplificar é adicionado mais um referencial tridimensional  $X_{mw}Y_{mw}Z_{mw}$  do nosso mundo exterior (chamado referencial do mundo) e é nele onde o nosso espaço de trabalho ficará representado. As coordenadas 3D do nosso ponto  $P_m$  serão  $(x_{mw}, y_{mw}, z_{mw})$  e definem o vector  $P_{mw}$ . O referencial da câmara e o referencial do mundo estão relacionados através de uma rotação e de uma translação. Na Figura 2.7 poderemos visualizar a relação entre os eixos coordenados.

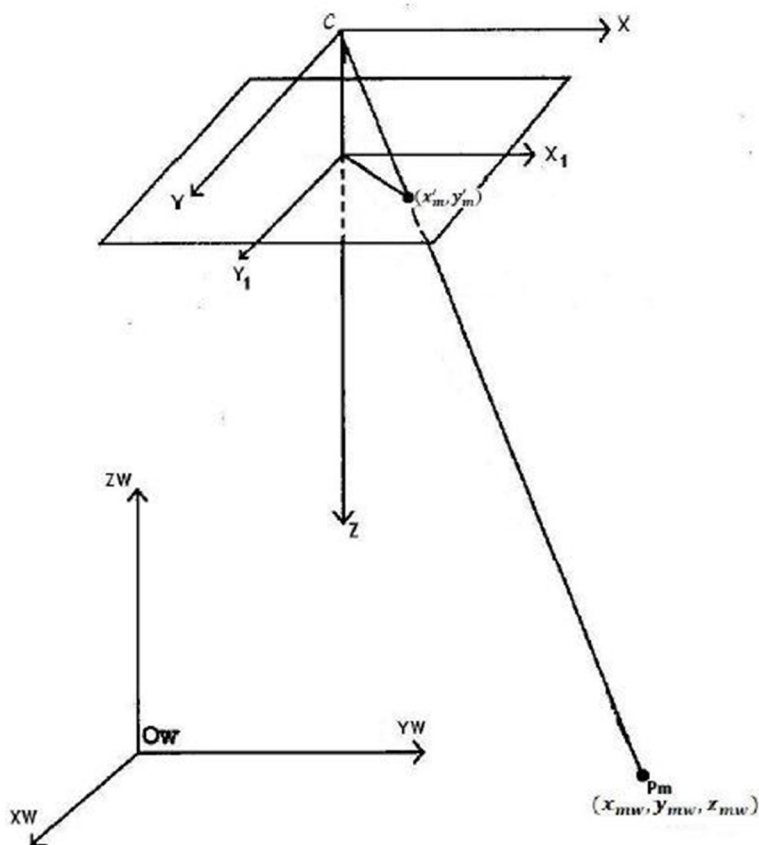


Figura 2.6 - Referencial do mundo

A relação entre os pontos nos referenciais da câmara e do mundo é expressa por:

$$P_m = \mathbf{R}(P_{mw} - T) \quad (2.12)$$

E a relação do ponto no plano de imagem com o ponto no mundo em coordenadas homogêneas é dada por:

$$\tilde{P}'_m = \mathbf{KR} \begin{bmatrix} I & -T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{P}_{mw} \quad (2.13)$$

Em que  $\tilde{P}_{mw}$  é definido por:

$$\tilde{P}_{mw} = \begin{bmatrix} P_{mw} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

A matriz  $\mathbf{R}$  é uma matriz 3x3 designada matriz de rotação sendo representada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Nesta matriz estão implícitos os 3 ângulos sobre cada um dos eixos do referencial, e que são denominados os ângulos de Euler, yaw  $\theta$ , pitch  $\varphi$  e roll  $\psi$  (Figura 2.7).

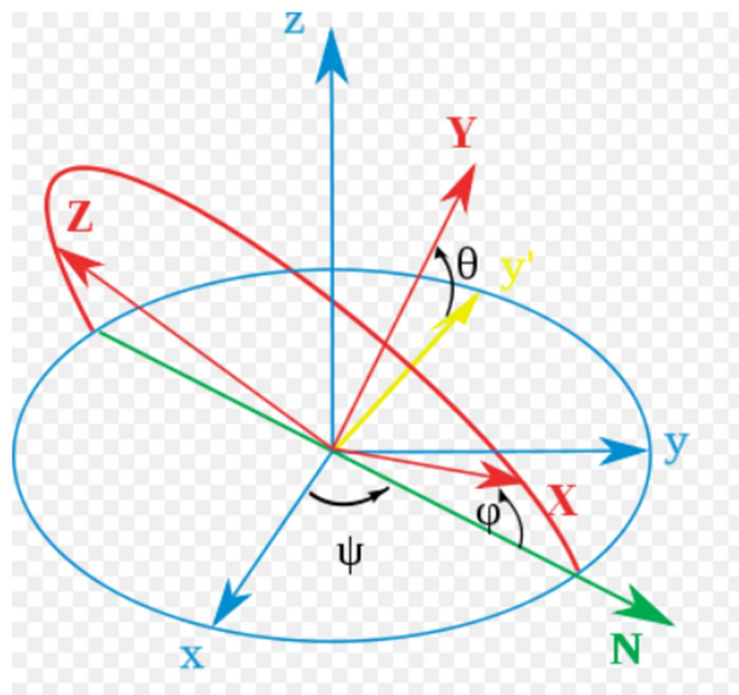


Figura 2.7 - Representação dos ângulos de Euler (retirada de Wikimedia Commons)

Estes ângulos podem ser obtidos a partir da matriz de rotação, utilizando as seguintes expressões:

$$\theta = A \tan 2(r_9, \sqrt{1 - r_9^2}) \quad (2.16)$$

$$\varphi = A \tan 2(r_3, r_6) \quad (2.17)$$

$$\psi = A \tan 2(-r_7, r_8) \quad (2.18)$$

Por sua vez o vector  $T$  da translação representado por:

$$T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Podemos então definir a matriz de projecção  $P$  da câmara:

$$\mathbf{P} = \mathbf{KR}[\mathbf{I} \quad -T] \quad (2.20)$$

A matriz  $P$  tem 9 graus de liberdade, 3 para a matriz de calibração  $K$ , 3 para  $R$  e 3 para  $T$ .

Reescrevendo a expressão (2.20) de forma a separar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmara fica-se com:

$$\tilde{P}_m = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{RT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{P}_{mw} \quad (2.21)$$

O modelo pinhole camera assume que os sistemas de eixos de coordenadas têm ambos as mesmas escalas. Nas câmaras actuais com sensores digitais de imagem, a coordenada no plano de imagem costuma ser dada em pixéis. Com a possibilidade da não existência de pixéis completamente quadrados, temos um pequeno problema de factor de escala em cada direcção. Principalmente no número de pixéis por unidade de distância. [14]

Para continuarmos a usar o modelo pinhole camera, apenas é necessário efectuar a conversão de pixéis para unidades de distância.

Então,  $K$  virá definida como:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & x \\ 0 & a_y & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Em que  $a_x = f m_x$  e  $a_y = f m_y$  representam a distância focal da câmara em termos das dimensões dos pixéis nas direcções dos eixos do referencial  $X_1Y_1$ .

Analogamente  $x_0$  e  $y_0$ , representam o ponto principal em termos de pixéis,  $x = m_x p_x$ ,  $y = m_y p_y$ . Com a adição destas duas novas variáveis,  $m_x$  e  $m_y$ , a matriz de projecção passa a ter 11 graus de liberdade.

É de todo o interesse que através de uma imagem adquirida, se consiga retirar toda a informação referente ao ponto  $P_{mw}$  no mundo. Para o efectuar necessitamos de parâmetros adicionais sobre o nosso sistema de visão que precisam de ser especificados e calibrados. [15]

Podemos assim concluir que para recorrer à visão artificial é necessário conhecer à priori alguns parâmetros sobre o sistema. Em caso de não estarmos na posse destes parâmetros então é necessário determiná-los. Posteriormente serão abordados alguns algoritmos para obtenção dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmaras, e calibração do sistema de visão.

Por fim convém realçar que considerando as distorções introduzidas pelas lentes vamos introduzir um novo ponto de coordenadas  $(x_{md}, y_{md})$ , que são as coordenadas do ponto  $P_m'$  -  $(x_m', y_m')$ , no plano de imagem devido às distorções da lente. Mais tarde este efeito de distorção será abordado, ficando desde já definido.



# Capítulo 3

## Visão Estereoscópica

### 3.1 - Introdução

A evolução natural dos animais levou a que muitos deles, incluindo o Homem, perdessem o campo de visão de 360° (proporcionado por olhos laterais e opostos, como acontece, por exemplo com o camaleão) e adquirissem a visão binocular ou estereoscópica. Assim, a noção de profundidade e a visão a três dimensões (3D) deve-se ao facto de cada um dos olhos visualizar uma cena de um ângulo ligeiramente diferente.

Podemos comprovar isto através da realização de uma pequena experiência, que consiste em alinhar o polegar de uma das mãos com um qualquer objecto (no caso da Figura 3.1 com uma bandeira) e o seu nariz. Se focar a sua visão no dedo, com os dois olhos abertos, verá o objecto a duplicar, um para cada olho (feche um olho e abra o outro e em seguida inverta). De seguida experimente focar o objecto, mantendo o polegar na linha de visão, e assim irá ter a visão de dois polegares (Figura 3.2). [15]



Figura 3.1 - Focando o polegar, obtemos a visão de duas bandeiras. (retirado de [15])



Figura 3.2 - Focando a bandeira, obtemos a visão de dois polegares. (retirado de [15])

Para entender na prática o que vem a ser visão binocular e a sua importância para a sobrevivência, basta que feche um dos olhos e assim tente fazer as actividades quotidianas. Desta forma o simples gesto de alcançar um objecto sobre a mesa passará a ser um desafio sob a visão monocular. A dificuldade mais evidente neste estado será a de perceber a profundidade e por consequência a capacidade de avaliar a distância que separa o objecto do observador. Mesmo que a visão monocular não deixe de ter elementos para uma percepção rudimentar da profundidade, as leis da perspectiva continuam a ser válidas, e assim, o tamanho aparente dos objectos diminui à medida que estes se afastam do observador e os mais próximos escondem atrás de si os mais distantes que se encontrem no mesmo eixo.

O fenómeno que permite a avaliação das distâncias chama-se paralaxe e é o resultado da comparação das duas imagens obtidas por dois pontos de vista distintos, é graças à interpretação do cérebro das imagens da cena vistas por cada um dos olhos, que é possível a visão tridimensional do mundo (Figura 3.3).

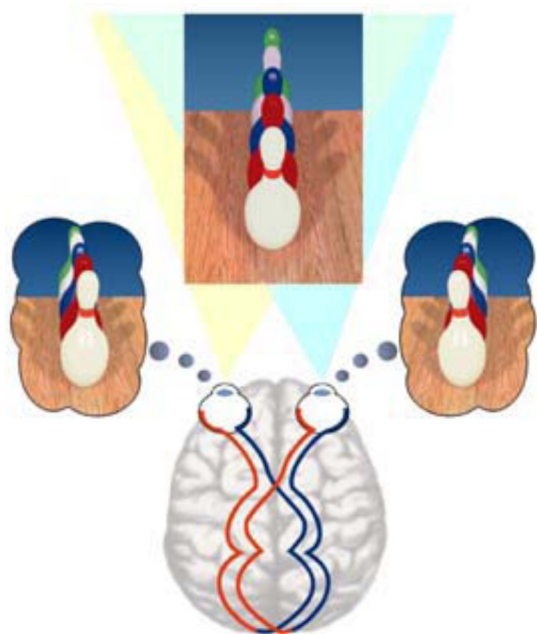


Figura 3.3 - Visão de cada olho na mesma cena. (retirado de [15])

É possível verificar a paralaxe realizando a simples experiência de colocar o dedo a cerca de 12 cm do nosso nariz. Se fecharmos o olho direito vemos o dedo numa determinada posição, se trocarmos fechamos o olho esquerdo, verifica-se que o dedo dá um pequeno salto. Mas se aumentarmos a distância do dedo ao nariz, o “salto” é cada vez menor e, portanto, a paralaxe é menor. O cérebro tem a capacidade de reconhecer esta diferença entre as imagens o que permite comparar as distâncias a que estão os objectos.

Em computação gráfica, normalmente são geradas imagens em mono (isto é, a partir de uma câmara virtual) e estas imagens são visualizadas por um monitor ou projectadas em um plano. Por sua vez, a estereoscopia visual, é feita a partir da geração de duas imagens a partir das localizações das câmaras virtuais separadas de uma determinada distância. [15]

### 3.2 - Algumas noções

Quando tiramos uma foto a partir de uma câmara fotográfica normal, existem alguns efeitos que fornecem características tridimensionais da cena em questão. A estes efeitos dá-se o nome de efeitos passivos. [15]

Estes efeitos são inerentes à aparência do mundo externo e não dependem dos nossos olhos, ou da forma de como olhamos para a imagem.

De seguida serão apresentados alguns dos efeitos passivos mais relevantes:

- **Perspectiva:** Na perspectiva, objectos de mesmo tamanho devem aparecer maiores na foto quando estiverem mais próximos da câmara. Convém no entanto ter em conta que as noções de “fundo” e “mais à frente” em uma foto são características impróprias, pois por mais que possa parecer ser 3D, a foto é uma imagem planar. Na Figura 3.4, os dois paralelepípedos têm o mesmo tamanho, mas pelo efeito de perspectiva gerado a partir de linhas, concluímos que o paralelepípedo que aparece mais atrás tem um tamanho real maior. [15]

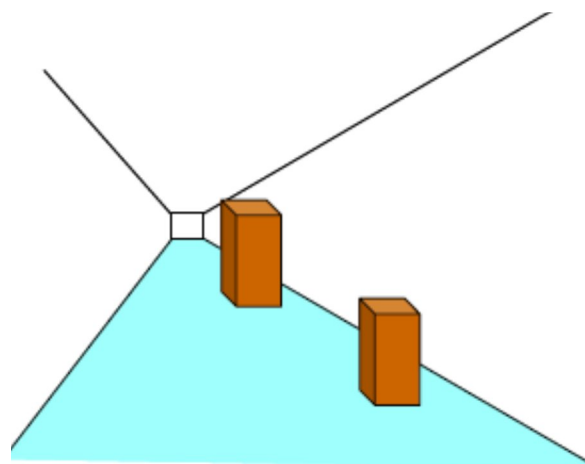


Figura 3.4 - Efeito de Perspectiva (retirado de [15])

- Iluminação: O efeito de iluminação aplicado a uma cena adiciona uma melhor descrição da forma dos objectos presentes na imagem, contribuindo assim para o aumento do grau de realismo da cena. Este efeito é exemplificado nas Figuras 3.5 e 3.6. Note que na Figura 3.5, parece que existem apenas um círculo e um hexágono, preenchidos de forma uniforme por determinadas cores. Por outro lado na Figura 3.6, podem-se observar as verdadeiras formas dos objectos tridimensionais, isto é, uma esfera e um cubo. [15]



Figura 3.5 - Efeito de Iluminação - Sem Iluminação (retirado de [15])

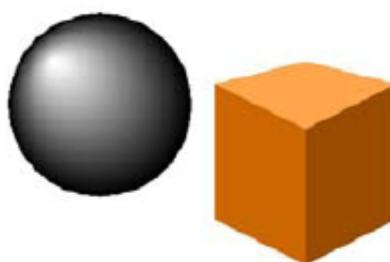


Figura 3.6 - Efeito de Iluminação - Com Iluminação (retirado de [15])

- Oclusão: A oclusão é responsável por esconder objectos em parte ou por inteiro. Com isto, podemos ter a noção da ordem dos objectos em termos da distância à câmara. Este efeito é ilustrado na Figura 3.7. Onde se pode constatar que na

imagem da esquerda a esfera está por trás do cubo, enquanto que na imagem da direita o cubo é que se encontra atrás.

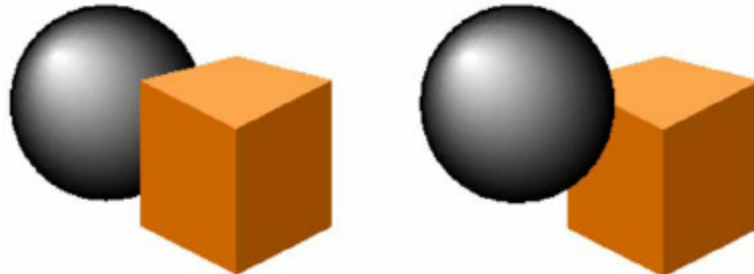


Figura 3.7 - Efeito de Oclusão (retirado de [15])

- Sombra: A sombra de um objecto encontra-se sempre no plano de apoio e por esse facto serve para se saber se esse objecto está ou não assente nesse mesmo plano. Isto é se o objecto se encontrar a uma distância da imagem da sombra, podemos concluir que o objecto não se encontra no plano de apoio, como podemos ver na Figura 3.8 com a esfera. Na mesma figura, existe um cubo que parece estar pousado no plano de apoio, mas apesar disso esta afirmação não pode ser comprovada baseando-nos apenas numa imagem projectada. [15]

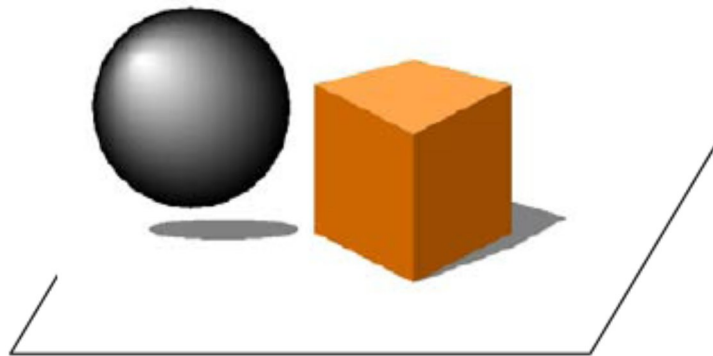


Figura 3.8 - Efeito de Sombra (retirado de [15])

### 3.3 - Sistema estereoscópico e o modelo pinhole camera

A partir do modelo descrito no capítulo anterior conseguimos perceber como efectuar o mapeamento 3D para 2D. Se juntarmos a esse sistema mais uma câmara localizada numa posição diferente da primeira, mas capturando o mesmo cenário no mesmo instante que a esta, conseguimos através de triangulação obter informação 3D através de duas imagens 2D. Este conceito do uso de duas fontes de visão para captura de informação envolvente é

denominado de visão estereoscópica. É um sistema análogo à visão humana, tendo dois pontos de vista da mesma cena através dos olhos, conseguindo assim a percepção de profundidade.

Para certas tarefas industriais é muito importante ter a noção tridimensional do cenário envolvente, o que faz o uso de um sistema estereoscópico um sistema mais robusto na recolha da informação pretendida. A Figura 3.9 retrata um sistema de visão estereoscópica.

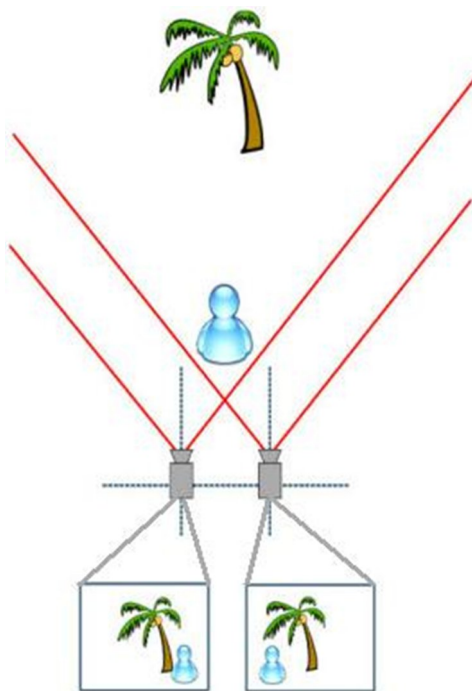


Figura 3.9 - Sistema de visão estereoscópica (retirada de [www.imec.be](http://www.imec.be))

Convém ainda referir que todos os conceitos explicados no capítulo anterior são usados no sistema de visão estereoscópica. Assim sendo começamos por adicionar mais uma câmara ao nosso sistema e fazer o mesmo raciocínio efectuado.

Tendo a câmara 1 (que daqui em diante é definida como a câmara que se encontrado lado esquerdo no caso de nos posicionarmos por trás do sistema de visão estereoscópico) que contém um referencial  $X_1Y_1Z_1$  com origem em  $C_1$ , e que contém um eixo óptico perpendicular ao seu plano de imagem com a referência  $X_1Y_1$ . Definindo para uma segunda câmara, um referencial  $X_2Y_2Z_2$  centrado em  $C_2$ , um centro óptico perpendicular ao seu plano de imagem com um referencial de coordenadas  $X_2Y_2$ .

Assim sendo, para a câmara da esquerda as relações calculadas anteriormente em (2.3) e (2.4) continuam a ser válidas, enquanto que para a segunda câmara as relações serão:

$$x'_{2m} = f_2 \frac{x_m}{z_m} \quad (3.1)$$

$$y'_{2m} = f_2 \frac{y_m}{z_m} \quad (3.2)$$

Convém ainda salientar que o referencial 3D  $(x_w, y_w, z_w)$  e o nosso ponto  $P_{mw}$  com coordenadas  $(x_{mw}, y_{mw}, z_{mw})$  no mundo, são as únicas coisas que se mantêm constantes na passagem do sistema com uma câmara para o sistema estereoscópico de duas câmaras.

Por sua vez, devido ao facto da segunda câmara ter uma rotação e uma translação diferente relativamente ao referencial do mundo com origem em  $O_w$ , existe uma matriz de rotação e translação associada.

$$\begin{bmatrix} x_{2m} \\ y_{2m} \\ z_{2m} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} x_{mw} \\ y_{mw} \\ z_{mw} \end{bmatrix} + T_2 \quad (3.3)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{K}_2 [\mathbf{R}_2 \quad -\mathbf{R}_2 T_2] \quad (3.4)$$

Onde  $P_2$ ,  $K_2$  e  $R_2$  são as matrizes de projecção, calibração e rotação, respectivamente, e em que  $T_2$  é o vector de translação da câmara 2.

### 3.4 - Geometria Epipolar

Geometria epipolar é a geometria projectiva intrínseca que existe entre duas vistas. Ela é independente da estrutura da cena e apenas depende dos parâmetros internos das câmaras e da posição relativa destas. Esta geometria intrínseca está encapsulada numa matriz de dimensão 3x3, denominada matriz fundamental  $F$ .

Dado um ponto  $P_m$  no espaço 3D, a geometria epipolar relaciona as suas projecções nos planos de imagem,  $P'_{1m}$  e  $P'_{2m}$ , respectivamente na primeira e segunda vistas, pela equação [14]:

$$P_{2m}^T \mathbf{F} P'_{1m} = 0 \quad (3.5)$$

A Figura 3.10 representa o modelo de um sistema estereoscópico, com a representação da linha epipolar do ponto  $P_m$ .

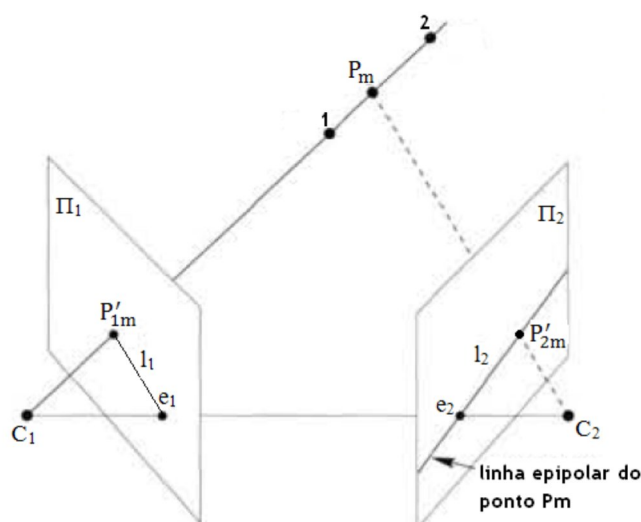


Figura 3.10 - Modelo de um sistema estereoscópico e representação das linhas epipolares

De seguida será apresentada uma breve descrição da terminologia utilizada na Figura 3.10:

Os pontos  $e_1$  e  $e_2$  são denominados epipolos das imagens 1 e 2 respectivamente. Estes dois pontos são formados pela linha que une os dois centros das câmaras  $C_1$ ,  $C_2$  e esta denomina-se a baseline do sistema.

Nesta figura está igualmente representado o plano epipolar, que é definido pelas linhas de projecção do ponto  $P_m$  no mundo, ao centro de cada câmara juntamente com a baseline. A intercepção do plano epipolar com as imagens do plano gera em cada um destes uma linha, denominada de linha epipolar.

Através destes conceitos observa-se que, que no caso do ponto  $P_m$  se mover sobre o raio de projecção definido para a câmara 1 (equivalente a mover-se para a posição 1 ou 2 na Figura 3.10), então a projecção deste ponto na imagem do plano da câmara 2, move-se sobre

a linha epipolar  $l_2$ . Este conceito é muito importante para a realização de match de pontos de duas imagens, ou seja, conhecendo um ponto  $P'_{1m}$  na primeira vista, na segunda vista não necessitamos de procurar em toda a imagem pelo correspondente par de  $P'_{2m}$ , mas sim apenas sobre a linha epipolar  $l_2$ . Esta definição também é válida no sentido inverso, isto é, conhecido um ponto  $P'_{2m}$  na segunda vista, o seu par na primeira vista está restrito à linha epipolar  $l_1$ .

Assim sendo, se já tivermos acesso à matriz  $F$  e conhecendo um ponto  $P_m$  no plano de imagem da câmara 1, então o seu par encontra-se restringido à linha epipolar  $l_2$ . Em que  $l_2$  é obtido a partir de:

$$l_2 = \mathbf{F}P'_{1m} \quad (3.6)$$

No caso inverso apenas temos que transpor a matriz  $F$ , para calcular  $l_1$ :

$$l_1 = \mathbf{F}^T P'_{2m} \quad (3.7)$$

Por outro lado se não conhecermos a matriz  $F$ , é necessário primeiramente determiná-la, existindo alguns caminhos para o efeito, como por exemplo:

- Processos lineares com e sem escalonamento;
- Processos não lineares;
- Através do conceito de paralaxe virtual.

Em [16] são explicadas algumas vantagens e desvantagens entre cada um destes processos, entre as quais se destaca o facto de os critérios não lineares serem melhores que os lineares, apesar de ao mesmo tempo serem mais pesados computacionalmente.

Neste trabalho vamos abordar dois critérios, para o cálculo da matriz  $F$ , a partir dos parâmetros intrínsecos das câmaras (obtidos pelo algoritmo de Tsai - ver secção 3.5.1) e através do eight-point algorithm - ver secção 3.5.2.

Rimon Elias e Robert Laganière et al [16] dizem que no caso de os parâmetros intrínsecos de ambas as câmaras já serem conhecidos então a matriz fundamental é a matriz essencial do sistema. Esta matriz é uma precursora da matriz fundamental e depende de 5 parâmetros descrevendo a disparidade binocular entre as duas vistas, em que os 3 primeiros parâmetros são devido à rotação 3D e os outros 2 definem a direcção da translação - apenas

descreve os parâmetros extrínsecos da câmara, enquanto a matriz  $F$  contém os parâmetros intrínsecos e extrínsecos.

Assim, se temos  $P'_{1m}$  e  $P'_{2m}$  de um ponto  $P_m$  nas duas imagens então segundo o modelo pinhole, tendo a matriz de rotação  $R$  e o vector deslocamento  $T$  da segunda vista em relação à primeira podemos então determinar  $F$  através da matriz  $E$  (matriz essencial).  $R$  e  $T$  passam a ser chamados parâmetros extrínsecos do sistema estereoscópico.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_2^{-T} T_x \mathbf{R} \mathbf{K}_1^{-1} \quad (3.8)$$

Onde  $T_x$  é a matriz anti-simétrica definida pelo vector de translação  $T$ ,  $K_2$  é a matriz de calibração da câmara 2,  $R$  a matriz de rotação do sistema estereoscópico e  $K_1$  a matriz de calibração da câmara 1.

A matriz essencial  $E$  pode ser escrita como:

$$\mathbf{E} = T_x \mathbf{R} \quad (3.9)$$

Assim sendo, a expressão 3.5 passa a ser descrita por:

$$P'_{2m}{}^T \mathbf{E} P'_{1m} = 0 \quad (3.10)$$

Ficando as matrizes  $F$  e  $E$  relacionadas por:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_2^{-T} \mathbf{E} \mathbf{K}_1^{-1} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}_2^T \mathbf{F} \mathbf{K}_1 \quad (3.12)$$

### 3.5 - Calibração do sistema de visão

#### 3.5.1 - Algoritmo de Tsai: versatile camera calibration technique

A calibração de um sistema de visão tenta calcular um largo número de parâmetros do sistema de visão. Classicamente são usados processos não lineares para percorrer todo o cenário de calibração. Para evitar estes processos não lineares, muitas vezes usam-se estratégias de sistemas de equações lineares, usadas por exemplo no modelo DLT - Direct linear transformation - em que é possível que se obtenha um número de variáveis superior ao número de graus de liberdade. O problema deste algoritmo é que ignora a distorção das lentes assim como a dependência entre parâmetros. [17]

O algoritmo de Tsai usa uma particularidade física do sistema de visão, esta particularidade trata-se do alinhamento radial. Esta particularidade é definida em função da rotação relativa e translação (excepto na componente Z) entre a câmara e os pontos de calibração - ver Figura 3.11.

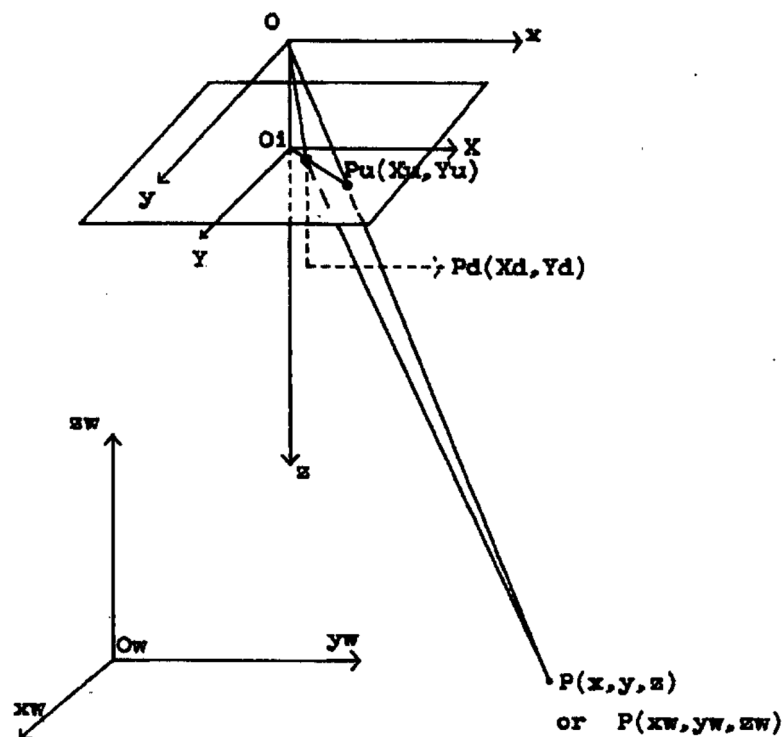


Figura 3.11 - Particularidades assumidas no algoritmo de Tsai (retirada de [17])

Da Figura 3.11 convém igualmente descrever as seguintes particularidades:

- É assumido que a distorção é radial e em nada afecta na profundidade do espaço envolvente. Não importa qual a magnitude da distorção, a direcção do vector  $O_i P_d$  (vector definido pela origem  $O_i$  e pelo ponto  $P_d$  com as coordenadas  $(x_d, y_d)$  na imagem do plano) mantém-se constante e radialmente alinhado com o vector  $P_{oz}P$ , (formado pela origem  $P_{oz}$  - dada pela coordenada  $z$  do ponto  $P$  - e pelo ponto  $P$ ). Convém ainda realçar que a coordenada  $z$  destes dois pontos é a mesma.
- A distância focal  $f$  não influencia a direcção do vector  $O_i P_d$ .
- O ponto no mundo é transladado e rodado em  $X, Y$  logo  $O_i P_d$  será sempre paralelo a  $P_{oz}P$  para todos os pontos. A componente  $Z$  de translação não altera a direcção de  $O_i P_d$ . [17]

Para a calibração são usados pontos complanares entre si tal como os da Figura 3.12.

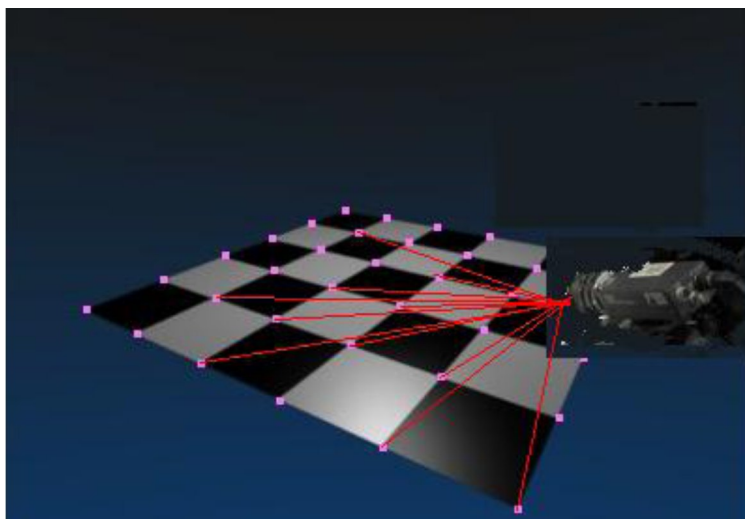


Figura 3.12 - Setup de calibração Tsai

Esta calibração é feita através de um conjunto de pontos em que as suas posições no mundo  $(x_w, y_w, z_w)$  são conhecidas - bolas rosa na Figura 3.12 - e as coordenadas  $(x'_m, y'_m)$  medidas no plano de imagem - pontos formados pela intercepção das linhas vermelhas da Figura 3.12, com o plano de imagem da câmara a calibrar.

O conjunto de pontos no mundo em que a sua posição é conhecida (pontos de calibração) estão assentes num plano (chamado plano de calibração) - plano axadrezado na Figura 3.12.

Depois de calculadas as coordenadas no plano de imagem dos pontos do mundo conhecidos, todo o algoritmo se desenrola usando as relações anteriormente descritas. Através delas é possível calcular os parâmetros intrínsecos e extrínsecos apresentados a seguir.

Os parâmetros extrínsecos que pretendemos calcular são a transformação do sistema de coordenadas 3D do mundo para o sistema de coordenadas 3D da câmara centrado no centro óptico. Existem 6 parâmetros extrínsecos, 3 deles são os ângulos de Euler, yaw  $\theta$ , pitch  $\varphi$ , e roll  $\psi$  para a rotação e os três componentes de translação do vector T.

A matriz de rotação cuja forma compacta pode ser verificada em (2.15) pode ainda ser descrita como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \sin\psi \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi \cos\varphi + \cos\psi \sin\theta \cos\varphi & \cos\psi \cos\varphi + \sin\psi \sin\theta \sin\varphi & \cos\theta \sin\varphi \\ \sin\psi \sin\varphi + \cos\psi \sin\theta \cos\varphi & -\cos\psi \sin\varphi + \sin\psi \sin\theta \cos\varphi & \cos\theta \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Para além dos parâmetros extrínsecos este algoritmo também nos permite calcular os parâmetros intrínsecos referidos no capítulo 2:

- Distância focal efectiva (f);
- Coeficiente de distorção da lente;
- Posição da origem na imagem do plano ( $C_x, C_y$ ).

Este algoritmo serve para a calibração das câmaras individualmente, no caso de um sistema estereoscópico para o cálculo da matriz F, apenas temos que calcular a rotação da segunda câmara em relação à primeira e usar as expressões (3.8) a (3.12).

Conhecidas as rotações de cada câmara ao plano de calibração, para obter a rotação e translação do sistema, ou seja, a rotação e translação da câmara 2 em relação à câmara 1, colocando esta última como origem do sistema:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^T \quad (3.14)$$

Para obter a translação da câmara 2 em relação à câmara 1:

$$T = T_1 - \mathbf{R}^T T_2 \quad (3.15)$$

São desta forma obtidos os parâmetros extrínsecos do sistema estereoscópico que são necessários para o cálculo da matriz F.

### 3.5.2 - Eight-point algorithm

O algoritmo de 8 pontos é um algoritmo linear para a estimação da matriz essencial ou da matriz fundamental de um sistema estereoscópico dependente de um factor de escala. Foi introduzido por Christopher Longuet-Higgins em 1981 para o cálculo da matriz essencial. Richard I. Hartley et al (1997) [18] descreve como este mesmo algoritmo pode ser usado para o cálculo da matriz fundamental, deste seu trabalho resultou o algoritmo de oito pontos normalizado. O algoritmo aqui descrito está rigorosamente com a mesma notação que no artigo original [16], para não haver confusões.

Neste algoritmo também é necessária a identificação entre pares de pontos nos dois planos de imagem. Usando-se a relação entre os dois planos e a matriz fundamental já descrita anteriormente em (3.5).

E sendo a matriz F de dimensão 3x3, podemos escrever os nove elementos que a constituem num vector F:

$$F = [f_{11} \quad f_{12} \quad f_{13} \quad f_{21} \quad f_{22} \quad f_{23} \quad f_{31} \quad f_{32} \quad f_{33}]^T \quad (3.16)$$

Sabendo que  $P'_{1m}$  e  $P'_{2m}$  são dadas por:

$$P'_{1m} = [x'_m \quad y'_m \quad 1] \quad (3.17)$$

$$P'_{2m} = [x'_{2m} \quad y'_{2m} \quad 1] \quad (3.18)$$

A expressão (3.5) pode assim ser reescrita como:

$$[x'_{2m}x'_m \quad y'_{2m}x'_m \quad x'_m \quad x'_{2m}y'_m \quad y'_{2m}y'_m \quad y'_m \quad x'_{2m} \quad y'_{2m} \quad 1]F = 0 \quad (3.19)$$

No caso de ocorrerem mais de 8 correspondências obtemos um sistema sobredimensionado e é viável o uso do método dos mínimos quadrados para o resolver:

$$\min_F = \sum_i (P_{2mi}^T \mathbf{F} P_{1m}')^2 \quad (3.20)$$

Considerando n pares de correspondências, então pode ser definido como:

$$\min_F = \|\mathbf{NF}\|^2 \quad (3.21)$$

Onde N é uma matriz de n x 9 elementos.

A equação (3.5) pode ser assim escrita como:

$$\mathbf{NF} = 0 \quad (3.22)$$

É ainda de referir que a solução pode ser encontrada usando a decomposição em valores singulares - Singular value decomposition (SVD) - de  $\mathbf{N}^T \mathbf{N}$  que corresponde ao vector próprio mais pequeno da matriz U, que corresponde à última coluna de U.

### 3.6 - Reconstrução 3D

Depois de encontrados os pares de pontos nas duas imagens, é de nosso interesse efectuar a reconstrução tridimensional do ponto.

Para esta tarefa mais uma vez existem diferentes caminhos que se podem tomar para efectuar a reconstrução tridimensional a partir das matrizes de projecção. Na lista seguinte são apresentadas algumas delas: minimização da distância, intercepção dos raios das câmaras, triangulação através dos raios das câmaras que podem não se interceptar e usando decomposição de valores singulares.

Idealmente através de triangulação dos raios das câmaras, era possível obter a posição tridimensional do ponto  $P_m$  (ver Figura 3.13), mas devido a ruído raramente ocorre a intercepção das rectas de projecção.

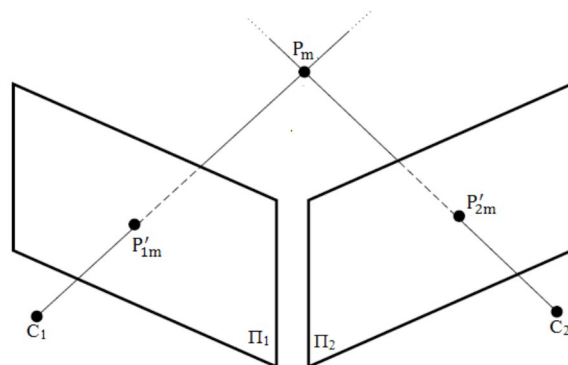


Figura 3.13 - Triangulação ideal (retirada de [16])

No entanto, as rectas de projecção podem não se interceptar na realidade, nesse caso retira-se o ponto médio da perpendicular entre os dois raios, tal como mostra a Figura 3.14.

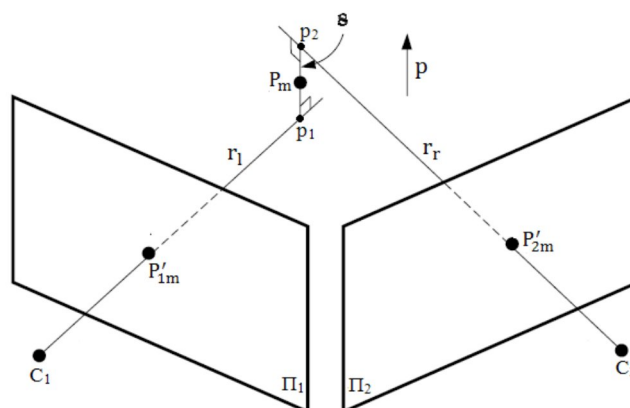


Figura 3.14 - Triangulação sem intersecção das rectas de projecção (retirada de [16])

Em [16] é proposta a equação da linha de projecção da primeira vista como sendo:

$$r_l = aP'_{1m} \quad (3.23)$$

Onde  $a$  é um valor escalar.

A linha de projecção da segunda vista, lado direito, referido ao plano de imagem esquerdo pode ser expresso como:

$$r_r = b\mathbf{R}^T P'_{2m} + T \quad (3.24)$$

Onde  $b$  é um valor escalar.

De salientar que conhecidos  $a$  e  $b$  as expressões anteriores no caso de triangulação ideal, dariam o mesmo ponto. Como estamos a considerar que a triangulação não é ideal então obtemos dois pontos  $p_1$  e  $p_2$  - ver Figura 3.14.

O vector perpendicular a  $r_l$  a  $r_r$  é:

$$p = P'_{1m} \times \mathbf{R}^T P'_{2m} \quad (3.25)$$

A linha  $s$  paralela a  $p$  e passando em  $aP'_{1m}$  é:

$$s = aP'_{1m} + cp \quad (3.26)$$

Onde  $c$  é um escalar.

Assim sendo, com a linha da esquerda mais o valor da linha perpendicular a  $r_l$  obtemos o outro extremo da linha do lado direito. Logo os pontos finais do segmento de recta  $s$  podem ser obtidos resolvendo:

$$aP'_{1m} + c(P'_{1m} \times \mathbf{R}^T P'_{2m}) = b\mathbf{R}^T P'_{2m} + T \quad (3.27)$$

Obtemos assim o ponto médio do erro entre os raios projectados. Sendo então a análise do valor escalar  $c$  uma boa forma de medir o desvio que os raios estão a sofrer entre ambos (quanto mais próximo de zero for menos erro entre as rectas existe).

Voltando ao caso em que  $a$ ,  $b$  e  $c$  são conhecidos, na representação passamos a ter os pontos  $p_1$ ,  $p_2$  já referidos anteriormente. Como estamos a considerar que o ponto  $P_m$  está a metade da distância entre  $p_1$  e  $p_2$ , esta distância é  $c/2$ .



# Capítulo 4

## Hardware

Neste capítulo será apresentado o hardware de maior importância utilizado na realização deste trabalho, apresentando-se apenas as características mais relevantes de cada um deles.

### 4.1 - Manipulador Industrial

O manipulador robótico industrial utilizado para a realização deste trabalho foi o Motoman YR-HP6-B10 (Figura 4.1), que é operado, em modo manual, através de uma consola. Quanto ao controlador utilizado para fazer a interface entre o manipulador e a consola é o Motoman NX100.



Figura 4.1 - Manipulador Motoman

A consola é a interface homem-máquina ligada ao controlador do manipulador, e através desta é possível controlar os seis eixos do manipulador manualmente, permitindo a gravação das posições onde o manipulador se encontra de modo a permitir a repetição da sequência de movimentos guardada. É ainda possível escrever programas usando a linguagem da marca, INFORM III, escolher o programa a executar, definir sistema de coordenadas, fazer a definição do TCP, entre muitas outras operações.

O manipulador foi usado para verificar se o sistema estereoscópico estava a medir bem translações e rotações dos marcadores bem como para a parte de geração de trajectórias. Foi ainda utilizado nos testes de força versus corrente consumida pelo motor da máquina de polimento e para os testes de força versus velocidade de rotação do polidor.

## 4.2 - Sistema Estereoscópico

O sistema de visão utilizado é composto por duas câmaras com lentes iguais, neste caso com distância focal de 6 mm. Estas câmaras fazem capturas de imagens com resolução de (640 x 480) pixéis e em modo automático a frequência máxima de captura está entre os 30-40ms.

A comunicação destas câmaras é efectuada via USB e permitem que o disparo do obturador funcione em modo manual ou em modo automático. Este funcionamento é configurado por software e em modo de funcionamento manual é necessário fornecer o sinal de disparo do obturador na entrada de trigger que possui. Esta característica das câmaras é importante para o nosso trabalho, pois é imperativo que as imagens capturadas pelo nosso sistema estereoscópico sejam do mesmo instante (necessita de uma sincronização precisa de ambas as câmaras).

Assim sendo apenas se usa o modo manual de disparo, e à frequência de 10 Hz. A Figura 4.2 mostra uma câmara utilizada no sistema estereoscópico.



Figura 4.2 - Câmera utilizada no sistema estereoscópico

Para finalizar, as duas câmaras utilizadas foram assentes num tripé e colocadas numa barra de suporte, separadas de uma distância de 58 cm. Esta montagem pode ser verificada na Figura 4.3. E com isto fica definido o sistema estereoscópico.



Figura 4.3 - Sistema estereoscópico

## Marcadores Luminosos

Para obter a posição e rotação da ferramenta será acoplada nela um conjunto de leds de iluminação de alta potência, que daqui em diante serão referidos como marcadores ou marcadores luminosos.

Para os testes e calibração inicial da ferramenta utilizou-se uma barra com dois marcadores distanciados de 22.6 cm (Figura 4.4), mas esta barra encontra-se preparada para permitir facilmente alterar a posição dos marcadores, caso se pretenda.

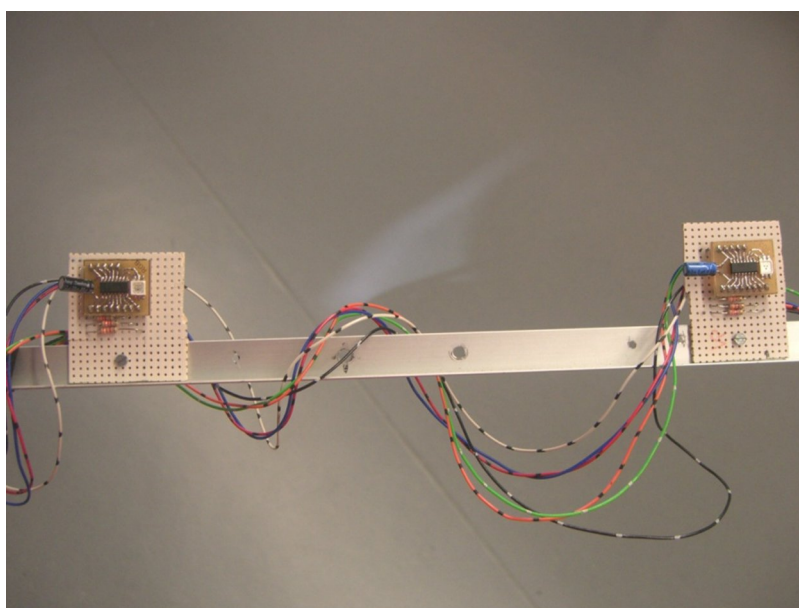


Figura 4.4 - Suporte com dois leds

Este método de calibração para além de permitir a detecção da posição da ferramenta, também nos permite retirar a rotação e orientação dela, uma vez que a distância entre os marcadores é fixa e conhecida por nós.

Após a calibração do eixo de coordenadas do sistema de visão, é necessário proceder à calibração do eixo de coordenadas manipulador em relação ao eixo de coordenadas do sistema de visão para além da realização dos testes de “ensinamento”. Para tal utilizou-se uma esfera em que geralmente estão visíveis 5 ou mais marcadores, o que aumenta a precisão e robustez do sistema (ver Figura 4.5).

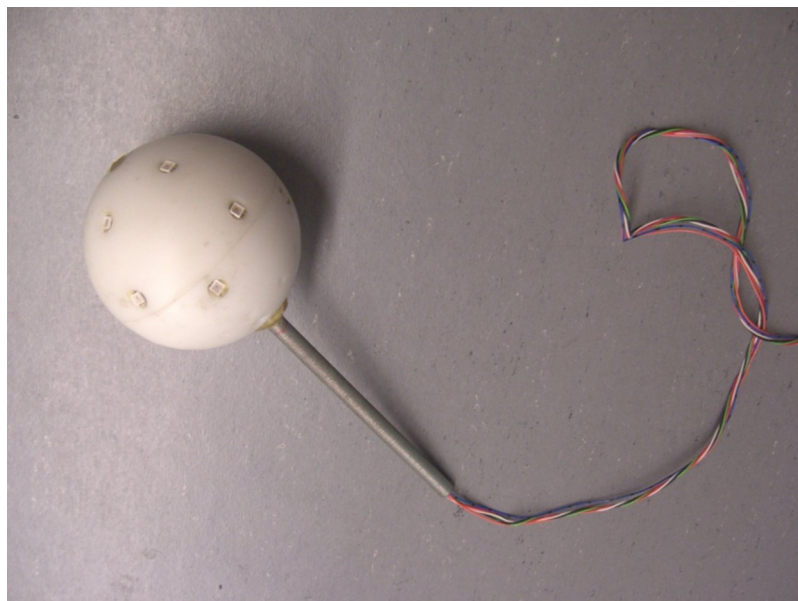


Figura 4.5 - Esfera com marcadores luminosos

Para ser possível detectar o sincronismo entre a aquisição de imagens por parte do sistema estereoscópico, os nossos marcadores não fornecem uma emissão contínua de luz, estando apenas a emitir num curto espaço de tempo, mas de forma intensa, para que desta forma possam ser capturados pelo sistema estereoscópico. Desta forma é possível fornecer uma potência muito mais elevada durante um curto espaço de tempo, o que facilita a detecção destes nas imagens. Permite ainda diminuir/anular o incómodo provocado pela intensidade de luz nos utilizadores do sistema.

O disparo dos leds está sincronizado com o sistema de trigger das câmaras, se o nosso sistema estiver bem sincronizado, os marcadores luminosos apareceram em emissão contínua no filme capturado pelas imagens, caso contrário, conseguimos visualizar um “pisca” de marcadores como na realidade se verifica a olho nu.

Convém ainda realçar que este hardware já existia anteriormente a este trabalho.

### 4.3 - Sistema de Sincronização

Para o sistema de sincronização, disparo de trigger e de marcadores foi usada uma placa genérica que contém um microprocessador Atmega8. Este micro controlador actua sobre os marcadores e a entrada de trigger através de dois mosfets de potência, durante um tempo previamente definido.

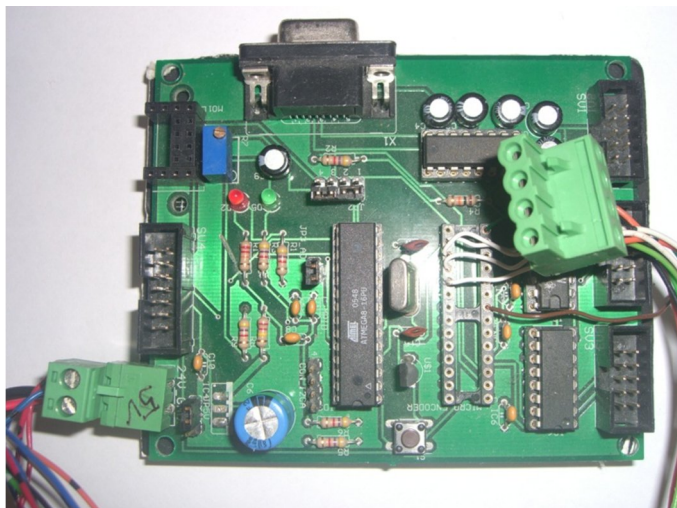


Figura 4.6 - Placa genérica com Atmega8

O circuito responsável por esta sincronização já se encontrava em funcionamento no sistema Sincrovision construído anteriormente, sendo que as suas características e funcionalidades já estavam bem testadas.

#### 4.4 - Máquina de Polir

Para a realização de testes e para o estudo das relações força versus corrente consumida pelo motor e força versus velocidade de rotação, utilizou-se uma pequena máquina de polir com 170W de potência, que se encontra ilustrada na Figura 4.7.

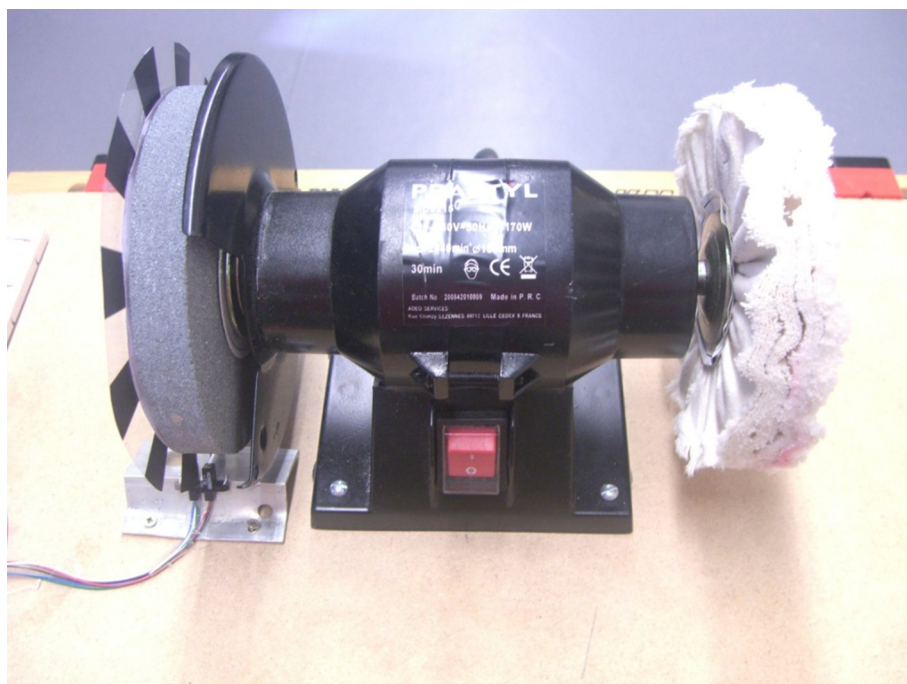


Figura 4.7 - Máquina de Polir

Com a utilização deste polidor deu para ter uma noção mais concreta de um sistema real de polimento com manipuladores industriais.

#### 4.5 - Célula de Carga

De forma a podermos saber qual a força aplicada pelo manipulador no polidor, optou-se pela utilização de uma célula de carga com extensômetros encapsulados (ver Figura 4.8).



Figura 4.8 - Célula de Carga

Neste trabalho alocou-se uma extremidade da célula de carga ao manipulador e na outra prendeu-se uma peça de metal cilíndrica para polir (Figura 4.9). Esta peça é cilíndrica de forma a minimizar o atrito com o polidor.

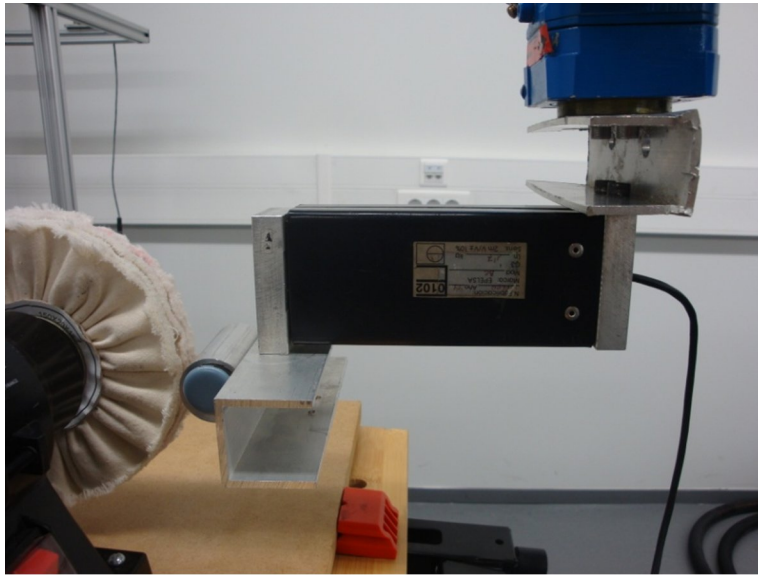


Figura 4.9 - Sistema Célula de Carga, peça para polimento e manipulador

Após a estrutura montada os testes seriam realizados aproximando perpendicularmente esta estrutura do polidor, utilizando para o efeito o manipulador, e com o encostar da peça ao disco seria de esperar que a força exercida aumentasse, pois a força que a rotação do disco exercia na peça e consequentemente na célula de carga, seria superior.

Convém ainda referir que para se poder fazer uma relação eficaz entre a força e a tensão de saída da célula de carga, inicialmente fez-se uma medição dessa relação para um peso de 1Kg. Chegando-se assim à relação de 1 Kgf corresponder a 15.5 mV na saída da célula de carga.

#### 4.6 - Sistema de aquisição da corrente consumida pelo polidor

Para se adquirir os valores da corrente consumida pela máquina de polir utilizou-se um LEM HY 10-P (a sua saída é em tensão e varia linearmente com os valores e sentido das correntes medidas que o atravessam) e um circuito de condicionamento de sinal (em que se amplifica o sinal aplicado à entrada e se faz um ajuste de escala) - Figura 4.10 e Figura 4.11, repectivamente.

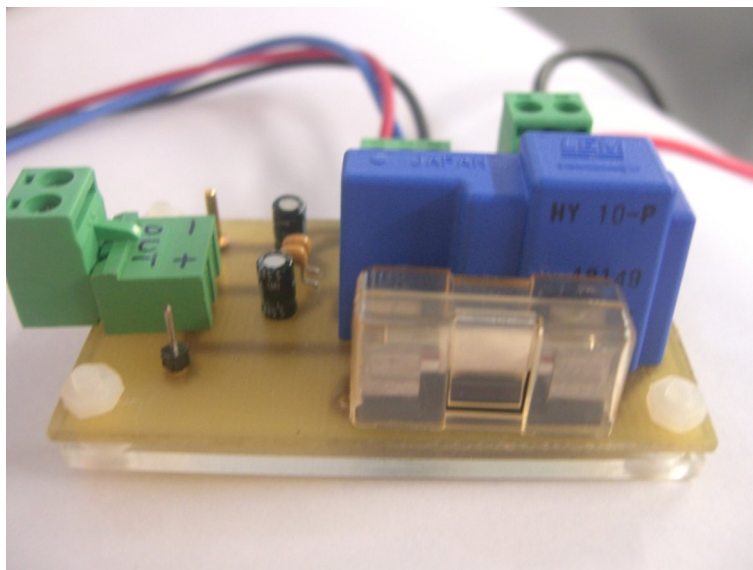


Figura 4.10 - LEM HY 10-P

Este componente apresenta como características mais relevantes:

- Corrente máxima no primário de  $\pm 30$  A;
- Corrente nominal no primário de 10 A;
- Tensão máxima de saída  $\pm 4$  V.

Tendo em conta estas características e os valores de corrente consumidos pela máquina de polir montou-se um circuito de condicionamento de sinal, onde inicialmente se dá um ganho de 7.8 ao valor da tensão de saída do LEM, que posteriormente a ser amplificado será passado por um detector de valor de pico e finalmente filtrado por um filtro passa baixo.

Seguidamente existe um ajuste de escala de forma a que a variação de tensão à saída do circuito se encontre na gama de 0 a 150 mV, de modo a ajustar-se ao sistema de aquisição. Este nível baixo de tensões foi imposto pela célula de carga. Por fim o sinal volta a passar por um filtro passa baixo, de modo a filtrar as altas frequências. (Figura 4.11)

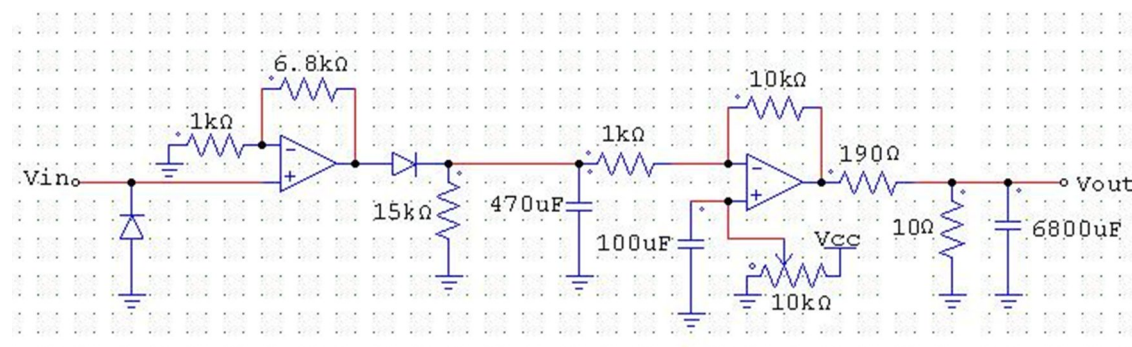


Figura 4.11 - Circuito de condicionamento de sinal

Utilizando um osciloscópio com uma pinça amperimétrica para se medir a corrente consumida pelo polidor e assim se relacionar com a tensão à saída do circuito de condicionamento, chegou-se ao valor de 154 mV corresponderem a 654.4 mA, assim sendo o valor do ganho é igual a aproximadamente 0.24 Volts/Ampère.

## 4.7 - Sensor de velocidade

Com o intuito de medir a velocidade de rotação do disco de polimento e relacioná-la com a força aplicada na máquina de polimento optou-se por utilizar o sensor HOA 6990 que consiste num díodo emissor de infravermelhos em frente de um detector Optoschmitt. A detecção de uma comutação ocorre sempre que um objecto opaco passa através da ranhura entre emissor e detector. (Ver Figura 4.12)

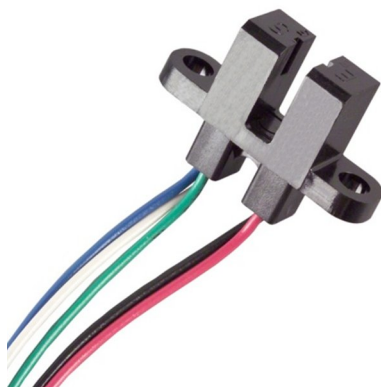


Figura 4.12 - Sensor HOA 6990

Para que se possam provocar as comutações utilizou-se um encoder óptico com 12 pulsos por volta como o da Figura 4.13.

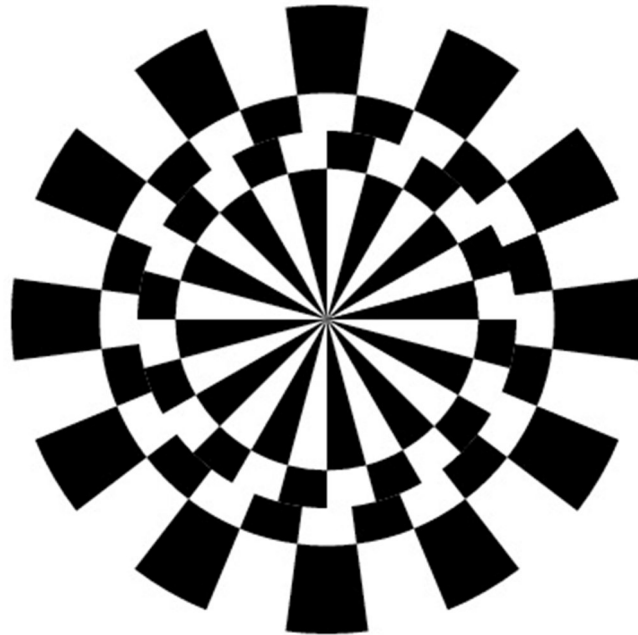


Figura 4.13 - Encoder óptico

De forma a contar o número de pulsos que o sensor detectava por cada período de 200 ms ligou-se a saída deste sensor a uma interrupção externa de um microcontrolador ATMEGA8, que por sua vez comunica via porta RS-232 com o computador. Esta montagem pode ser visualizada na Figura 4.14.

Assim para convertermos o número de pulsos contados para rotações por minuto ( $v$ ) temos apenas que aplicar a seguinte fórmula:

$$v = \frac{n}{12} \times \frac{60}{0.2} = n \times 25 \text{ (rpm)} \quad (4.1)$$

Em que  $n$  é o número de pulsos contados pelo sensor em 200 ms.

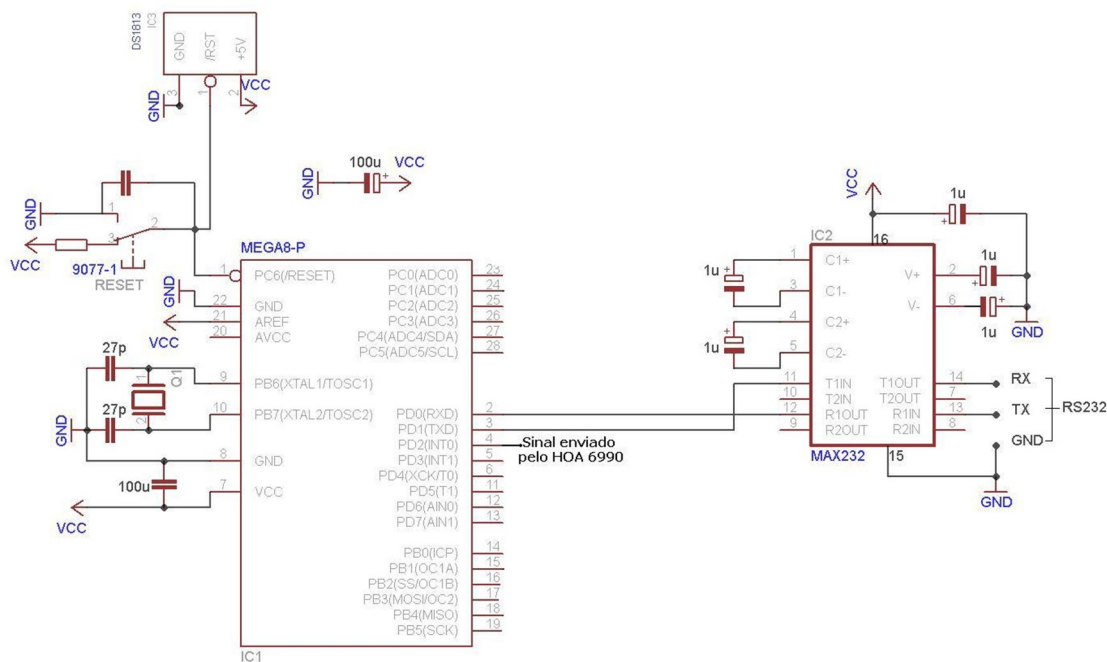


Figura 4.14 - Circuito com ATMEGA8 responsável pela contagem dos pulsos

### 4.8 - ADAM 4017 e MOXA TCC-801

De forma a se conseguir uma sincronização precisa da aquisição dos valores de corrente consumida pelo polidor e da força exercida pelo manipulador neste optou-se por se utilizar um ADAM 4017 (Figura 4.15), que é um módulo com 8 entradas analógicas e que permite uma fácil configuração das suas características (baudrate, gama de aquisição, entre outras).



Figura 4.15 - ADAM 4017

A comunicação deste módulo de entradas analógicas com o computador é feito via RS-485, por esse facto é necessário a utilização de um conversor de RS-485 para RS-232, assim sendo o conversor utilizado foi o MOXA TCC-801 (Figura 4.16).



Figura 4.16 - MOXA TCC-801



# Capítulo 5

## Sistema Sincrovision

Neste capítulo é descrito o trabalho realizado utilizando o sistema Sincrovision, bem como os resultados obtidos a partir da sua utilização.

Ainda neste capítulo serão abordados os passos efectuados para a implementação e teste dos algoritmos escolhidos.

### 5.1 - Introdução

O Sincrovision é um sistema de captura de movimento e posicionamento 3D robusto. É composto por marcadores luminosos sincronizados com um sistema estereoscópico com duas ou mais câmaras.

A utilização deste sistema neste trabalho teve por objectivo utilizar-se um método robusto, barato e simples de configurar, no ensinamento rápido do manipulador para o fim de polimento de peças.

Outro factor muito importante que levou à utilização deste sistema é o facto de ele já ter sido testado para várias aplicações, e por isso a sua robustez já ter sido confirmada.

De trabalhos anteriores com este sistema, aproveitou-se as calibrações, hardware e software já existentes, e realizou-se uma avaliação exaustiva da precisão do sistema que era algo que ainda faltava fazer. Os procedimentos e resultados dessa avaliação podem ser verificados no final do corrente capítulo.

## 5.2 - Modo de Funcionamento

O método apresentado utiliza processamento de imagens sincronizadas com os marcadores de alta intensidade, esses marcadores são tão brilhantes que ofuscam a luz do ambiente circundante, tornando-os fáceis de detectar usando câmaras "normais".

A sincronização com as câmaras permite aos marcadores estarem activos somente durante a aquisição de imagem, estando os leds acesos durante alguns microssegundos e as câmaras alguns milissegundos, o que torna aparentemente a sua luz muito fraca, não interferindo assim com a visão humana. [21]

Os marcadores podem ser acoplados ao manipulador em estruturas diversas, ou mesmo nas ferramentas que se precisem de utilizar, para determinada tarefa. Assim sendo e particularizando sobre o nosso caso de estudo, o polimento, sempre que precisamos de polir uma nova peça com novas características, o operador irá inicialmente executar os movimentos pretendidos, isto é, irá polir uma peça manualmente, num modelo com um sistema de visão estereoscópica.

Enquanto faz este ensinamento a trajectória no espaço é registada através de uma sequência de pontos e guardada em ficheiros de forma a ser posteriormente processada. Por fim e como resultado desse processamento temos esse movimento convertido em linguagem do manipulador, podendo assim dar-se as instruções ao manipulador para que este possa imitar os mesmos movimentos.

Podemos ainda referir que o operador pode verificar, em tempo real, se o robô está a fazer os movimentos correctos e se há alguma hipótese de que o este possa deixar a sua área de trabalho durante o polimento.

O setup para o funcionamento deste sistema encontra-se bem patente na Figura 5.1.

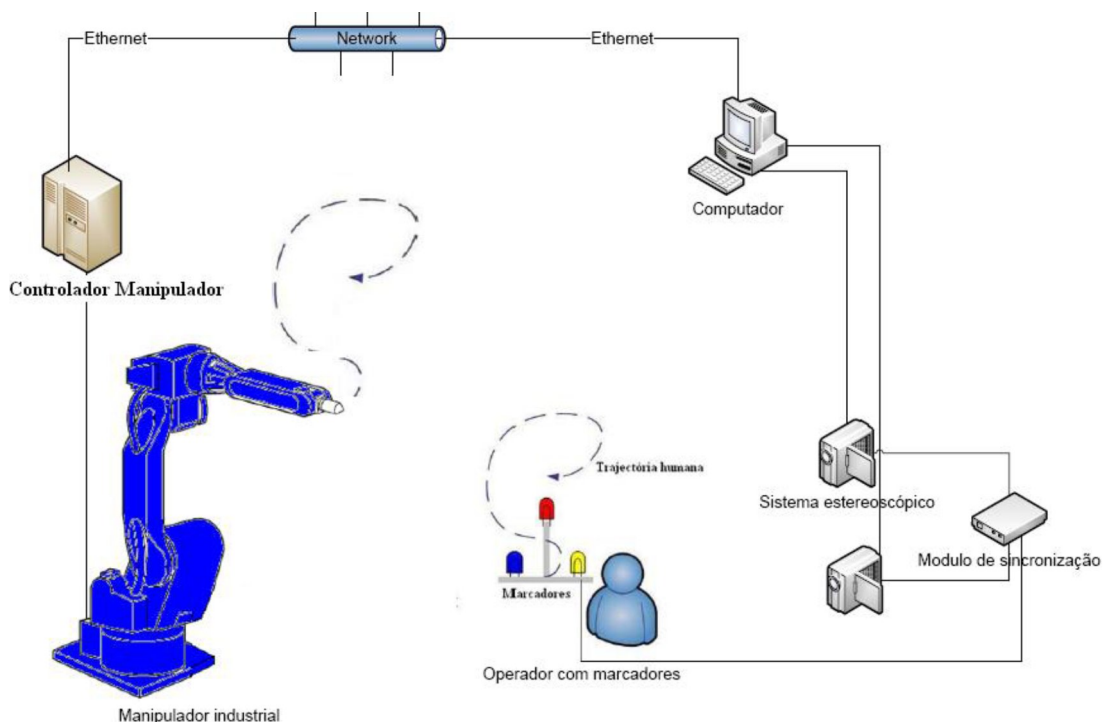


Figura 5.1 - Setup de configuração do Sistema Sincrovision

Convém por fim realçar que o modo de funcionamento acima referido só funciona após os diversos constituintes do sistema serem devidamente calibrados.

A calibração deste sistema encontra-se dividida em duas fases, a calibração do sistema estereoscópico propriamente dito e a calibração da relação entre este sistema e os marcadores luminosos acoplados ao manipulador, de forma a realizar-se a calibração dos eixos de coordenadas da ferramenta do manipulador em relação ao do sistema estereoscópico.

### 5.2.1 - Calibração do Sistema Estereoscópico

Em relação à calibração do sistema estereoscópico utilizada neste trabalho existe a necessidade de modelar matematicamente o sistema de imagem. Isso é feito usando a matriz fundamental que encapsula a geometria epipolar da configuração de imagem.

Assim sendo usamos o eight-point algorithm (referenciado na secção 3.5.2), que é o método mais simples de calcular a matriz fundamental, não envolvendo mais do que a construção da solução de um conjunto de equações lineares. Finalmente é possível estimar a

posição 3D de um determinado ponto num par de imagens com a matriz fundamental determinada. [22]

No entanto este é apenas um primeiro passo na calibração geométrica do sistema de visão estereoscópico, pois só por si não é suficiente para que se possa atingir uma óptima calibração do sistema de visão. Por esse facto, após esta fase, ocorre uma optimização dos parâmetros do sistema, recorrendo-se ao algoritmo de minimização das diferenças quadráticas de Levenberg-Marquardt.

### 5.2.2 - Calibração do eixo de coordenadas do manipulador em relação ao do sistema de visão estereoscópico

O método aplicado neste trabalho para proceder a esta calibração assenta na ocorrência de várias fases.

Numa primeira fase é utilizado o suporte com dois marcadores luminosos (Figura 4.4), para calibrar o eixo de coordenadas do sistema de visão, realizando para o efeito ensaios manuais com este suporte em frente das câmaras, e guardando os pontos das trajectórias executadas. Convém ainda referir que na execução destes ensaios se colocava esse suporte em diversas posições de forma a se conseguir uma óptima calibração para todo o tipo de movimentos.

De seguida utilizando a esfera da Figura 4.5 retiravam-se três pontos. Um com a esfera na origem do referencial do Motoman, o que nos dava a noção da translação entre o eixo de coordenadas do sistema de visão e do manipulador. E depois, um ponto com uma movimentação do manipulador no eixo dos X, e por fim um último ponto com uma movimentação no eixo dos Y, e com estes dois pontos conseguimos retirar qual a rotação existente entre os dois eixos de coordenadas em questão.

Assim sabemos o montante exacto que os valores obtidos pelo sistema de visão precisam de ser transladados e rodados, para os passarmos para o eixo de coordenadas do manipulador, e por consequência com que valores construir as tramas a enviar para este.

### 5.3 - Estudo da precisão do sistema

Uma tarefa de elevada importância neste trabalho era a realização de um estudo exaustivo da precisão do sistema, isto é, estudar qual a precisão do sistema em realizar as trajectórias/tarefas que lhe eram “ensinadas”.

Assim sendo começou-se por fazer a calibração descrita na secção 5.2.2, e depois dessa calibração realizada e testada foram realizadas diversos testes, que consistiam na criação de trajectórias aleatórias, e conseqüente comparação entre os pontos pretendidos nessa trajectória e os realmente obtidos após o ensinamento.

Nestes testes teve-se em conta vários tipos de trajectórias, desde trajectórias muito bem definidas como cubos (Figura 5.2) e cubos deformados (Figura 5.3) até trajectórias criados de forma automática e de uma forma completamente aleatória.

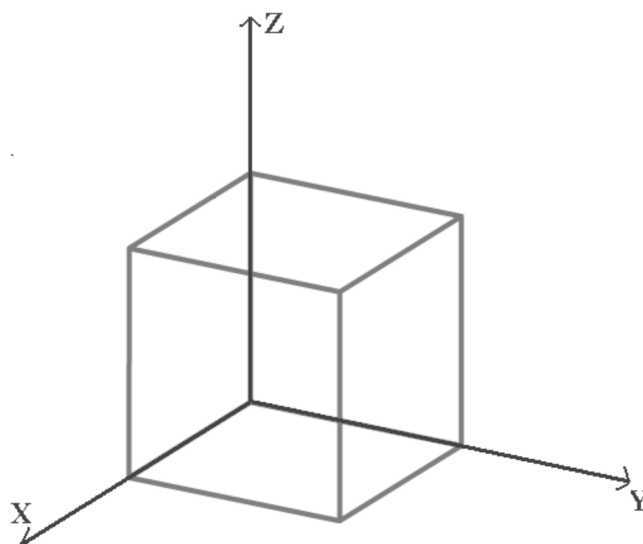


Figura 5.2 - Exemplo de cubo de teste

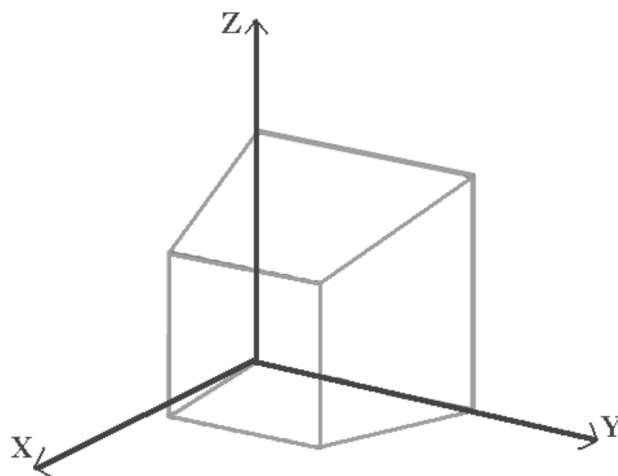


Figura 5.3 - Exemplo de cubo deformado de teste

Acerca destas trajectórias convém ainda referir que se fizeram movimentos apenas com translações e outros com translações e rotações, visto que a rotação implica em norma mais erros, e assim poderíamos ter uma noção melhor qual a sua implicação na variação do erro.

Para cada trajectória realizou-se a comunicação entre as aplicações Sincrovision e ComMotoman (aplicação responsável pela comunicação com o manipulador) para testar na prática os algoritmos e perceber qual a precisão do sistema e se possível melhorá-la. Os valores que são enviados pela aplicação Sincrovision são os da posição e rotação dos marcadores utilizados (Figura 5.4). Por sua vez na aplicação ComMotoman são formadas as tramas a enviar para o manipulador, a geração dessas instruções é melhor explicada na secção 6.3 deste trabalho.

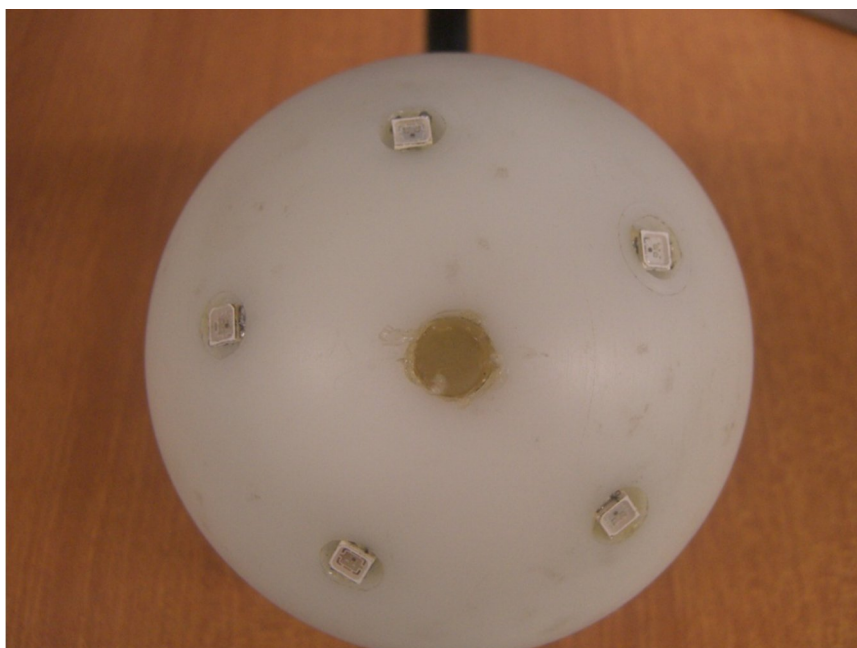


Figura 5.4 - Esfera com marcadores luminosos

Com a realização dos diversos testes para os vários casos de estudo, foi-se realizando a análise do erro obtido entre os valores das trajectórias pretendidas e as obtidas no final do ensinamento. E com isso foram-se fazendo alguns aperfeiçoamentos ao sistema até que se conseguiu atingir valores como os que a seguir se apresentam para dois testes exemplos.

Tabela 5.1 – Teste sem rotação.

Ponto no sistema de coordenadas do manipulador						Erro Absoluto [mm]
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Rx (°)	Ry (°)	Rz (°)	
0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.276617
200.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.240684
0.000	250.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.757200
61.225	100.626	186.050	0.00	0.00	0.00	0.423056
108.352	69.541	224.625	0.00	0.00	0.00	0.180523
127.784	165.700	217.277	0.00	0.00	0.00	0.362917
89.118	111.808	194.965	0.00	0.00	0.00	0.547614
113.391	77.901	222.576	0.00	0.00	0.00	0.491960
108.248	109.344	167.197	0.00	0.00	0.00	0.114739
141.460	208.959	43.280	0.00	0.00	0.00	0.319980
77.806	180.031	135.808	0.00	0.00	0.00	0.202736
82.826	119.036	99.793	0.00	0.00	0.00	0.884904
111.123	117.850	87.205	0.00	0.00	0.00	0.016860
127.156	38.595	85.759	0.00	0.00	0.00	0.195890
138.729	50.161	166.451	0.00	0.00	0.00	0.357259
82.007	91.890	199.733	0.00	0.00	0.00	0.050838
70.012	61.233	132.058	0.00	0.00	0.00	0.079627
67.948	72.852	143.794	0.00	0.00	0.00	0.147902
111.326	139.980	90.912	0.00	0.00	0.00	0.062507
121.012	200.094	204.229	0.00	0.00	0.00	0.187633

Analisando os dados da Tabela 5.1 chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 5.2 – Dados retirados da análise do teste sem rotação.

Erro Absoluto Máximo [mm]	0.884904
Erro Absoluto Médio [mm]	0.293386
Variância do Erro [mm]	0.055125

Tabela 5.3 – Teste com rotação.

Ponto no sistema de coordenadas do manipulador						Erro Absoluto [mm]
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Rx (°)	Ry (°)	Rz (°)	
0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	2.201498
200.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.459484
0.000	250.000	0.000	0.00	0.00	0.00	1.524280
134.759	121.339	168.358	-6.23	-5.67	-9.65	0.455814
58.750	71.828	183.237	-2.93	6.81	-9.45	0.979910
132.195	37.719	108.906	35.71	1.94	-9.61	0.709474
67.903	167.079	42.406	26.81	0.52	-4.97	1.444716
133.490	109.563	216.548	-21.03	-8.40	-8.27	0.105072
123.710	49.934	141.411	36.41	-0.90	-1.73	0.582212
91.830	149.864	51.472	-6.34	-1.62	-0.75	0.991122
121.630	101.168	73.719	9.78	-1.83	-8.75	0.618911
115.488	32.368	40.241	-26.97	-3.22	3.94	0.829048
126.509	102.518	181.109	-8.59	-2.68	5.34	0.054839
61.635	207.681	164.504	-37.95	-7.25	1.94	1.381319
73.029	60.380	154.589	3.57	-9.72	4.62	0.390101
132.932	112.793	28.618	36.12	-0.19	-3.19	0.748353
58.915	120.371	178.694	-37.63	0.71	-8.16	0.578421
136.823	83.689	35.013	-22.45	8.02	-4.38	0.799919
104.925	109.351	195.340	26.05	7.54	-4.22	0.603286
56.033	132.862	210.820	9.65	-5.54	3.26	0.297718

Analisando os dados da Tabela 5.3 chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 5.4 – Dados retirados da análise do teste com rotação.

Erro Absoluto Máximo [mm]	2.201498
Erro Absoluto Médio [mm]	0.787775
Variância do Erro [mm]	0.272679

Podemos então pela análise dos resultados referenciados nas Tabelas 5.2 e 5.4 constatar que com rotação o erro absoluto aumenta, em todos os sentidos. Mas mesmo assim

os valores obtidos são bastante satisfatórios, pois como podemos observar o erro médio mesmo no caso do teste com rotação é inferior a 1 mm.

Em suma, os resultados finais atingidos por estes testes foram satisfatórios pois demonstram que o nosso sistema é bastante preciso em qualquer tipo de trajectória a efectuar.



## Capítulo 6

# Geração de trajectórias

### 6.1 - Exposição do problema

Após a execução de uma trajectória pretendida, existe a necessidade de gerar a melhor trajectória possível para o manipulador, isto é, converter o movimento realizado para a linguagem do manipulador bem como melhorar este mesmo movimento.

Desta forma existe a possibilidade de guardar esta trajectória em ficheiro para posteriormente ser carregada por outra aplicação. Aplicação esta, que não funcionará em tempo real e onde será gerada a melhor trajectória para o manipulador. Ficando assim a faltar definir qual o critério que seria aplicado para fazer esta geração de trajectórias.

Um critério muito flexível e muito usado para o efeito, principalmente na área de design, é o critério de NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline), que permite de uma forma simples a representação de superfícies livres. Os seus criadores, Pierre Bézier e Paul de Casteljaou, trabalhavam ambos para a indústria automóvel e necessitavam de uma ferramenta flexível e eficaz para a representação dos contornos dos automóveis e dos chassis. [23]

O uso deste critério permite assim a representação de formas geométricas de uma forma compacta, dependendo de dois parâmetros mapeados, na superfície tridimensional pretendida e a que se pretende aproximar. Estes dois parâmetros são denominados pontos de controlo (pontos a verde na Figura 6.1) e podem ser colocados em posições estratégicas de forma a manipular a forma da curva.

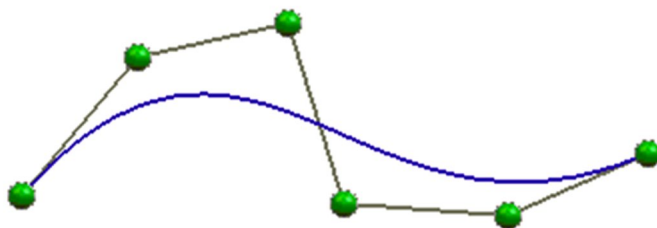


Figura 6.1 - Exemplo de caminho gerado pelo NURBS (retirada de Wikimedia Commons)

Existem dois conceitos fundamentais neste algoritmo, o grau e os pontos de controlo, e tem que existir sempre no mínimo mais um ponto de controlo do que graus. No caso de curvas simples, como por exemplo circunferências, o grau é igual 2, enquanto que para formas livres o grau é 3 ou 5. [24]

No exemplo da Figura 6.1 pretende-se gerar uma forma livre de grau 5, logo foram necessários 6 pontos de controlo.

## 6.2 - Instruções a utilizar no manipulador

### 6.2.1 - Instrução MOVL

Esta instrução move line tal como o nome indica, tem por objectivo fazer o manipulador se movimentar em linha recta, e é necessário que se defina o ponto final, a velocidade e opcionalmente o nível da posição. Convém ainda chamar a atenção que o ponto inicial das instruções é o ponto actual onde se encontra o manipulador.

Esta instrução, para o manipulador utilizado, é escrita da seguinte forma:

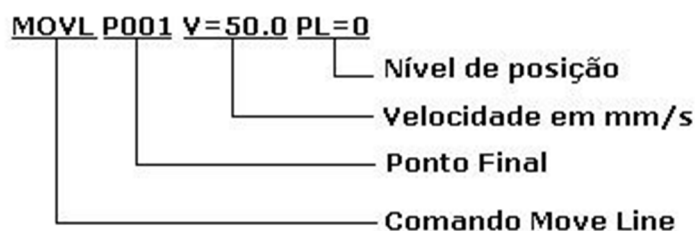


Figura 6.2 - Instrução MOVL

O parâmetro opcional PL (position level) define a aproximação do manipulador ao ponto final entre instruções. Este parâmetro tem 8 níveis possíveis e os efeitos destes níveis está bem patente na Figura 6.3.

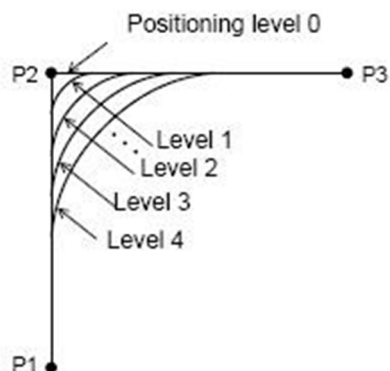


Figura 6.3 - Position Level (retirada de [19])

No caso de este parâmetro não ser definido, ele irá variar consoante a operação a executar e a velocidade do manipulador. [19]

#### 6.2.2 - Instrução MOVC

Na instrução move circle o manipulador move-se sobre um arco definido por três pontos (ver Figura 6.4).

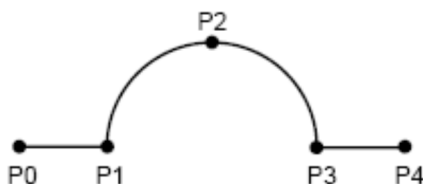


Figura 6.4 - Resultado da instrução MOVC (retirada de [19])

Dados três pontos ao manipulador P1, P2 e P3, este move-se segundo um arco de circunferência. Notar que se é programada uma interpolação linear até P0, o manipulador mover-se-á de P0 até P1 em linha recta. [19]

Caso se pretenda ter dois arcos de circunferência seguidos como apresentados na Figura 6.5, não basta transmitir os pontos de P1 até P5, pois o manipulador não irá executar o movimento pretendido [19].



### 6.2.3 - Instrução MOVJ

A instrução move joint também conhecida como movimento ponto a ponto é usada quando o manipulador não necessita de passar por um caminho específico para chegar à posição seguinte.

É um método de interpolação que comanda o movimento do robô movendo cada articulação directamente para a posição desejada, para que todos os eixos cheguem a essa posição ao mesmo tempo. O caminho realizado é previsível, provavelmente, não será linear. (Figura 6.8)

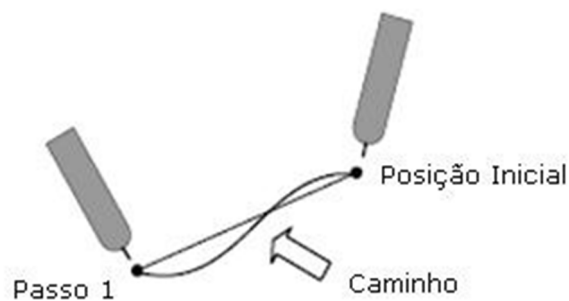


Figura 6.8 - Exemplo de um movimento MOVJ (retirada de [19])

Nesta instrução pode-se definir a velocidade VJ como percentagem da velocidade máxima definida. (Figura 6.9)

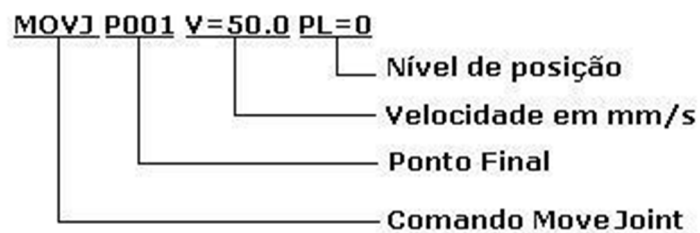


Figura 6.9 - Instrução MOVJ

### 6.3 - Geração automática das trajectórias

Para a geração automática das trajectórias o sistema implementado apenas utiliza o Move Joint uma vez que esta instrução é mais simples e rápida que as restantes, dado que não se “preocupa” com a forma como faz a trajectória entre ponto de origem e ponto de destino.

No nosso problema o factor tempo é muito relevante dado que trabalhamos com sistemas em tempo real, para além do facto de que o sistema estereoscópico funciona discretamente, logo não temos o conhecimento real de como a trajectória original é feita, apenas temos conhecimento de pontos dessa trajectória.

Outra vantagem da utilização desta instrução em detrimento das restantes apresentadas anteriormente, é evitar a perda de menos pontos, uma vez que o manipulador demora menos tempo a executar os movimentos. Assim sendo a precisão do algoritmo aumenta, pois faz movimentos mais curtos e entre pontos mais próximos, ou seja, no fim a trajectória obtida ao longo de todo o movimento é mais próxima à original do que em casos de instruções mais precisas, mas pode gerar trajectórias mais lentas devido a um número elevado de pontos.

Convém referir que estas trajectórias não são geradas ao mesmo tempo que se adquire a trajectória real, isto é, os pontos do movimento original são guardados em ficheiros que posteriormente são carregados por outra aplicação que os lê e converte para a linguagem do manipulador e ainda os envia em tempo real para este, pro forma a que possa executar o movimento pretendido. Daí a referida importância de não se perder muito tempo por cada movimento.

Para além do envio em tempo real de instruções para o manipulador, também poderia ser gerado um programa na linguagem do manipulador com as trajectórias geradas, para posterior execução.

## Capítulo 7

# Relações entre força, corrente e velocidade de rotação

Com o objectivo de se estimar a força exercida numa peça durante a operação de polimento, procurou-se encontrar a relação entre a força e a corrente consumida pelo motor e também a relação entre a força e a velocidade de rotação do motor da máquina de polir. Para isso foram efectuados logs sincronizados destas grandezas.

### 7.1 - Hardware

O hardware mais importante utilizado nestes testes foram:

- Manipulador Industrial;
- Máquina de Polir;
- Célula de Carga;
- Sensor HOA 6990;
- Circuito com ATMEGA8;
- LEM HY 10-P;
- Circuito de condicionamento de sinal para aquisição da corrente;
- ADAM 4017;
- MOXA TCC-801.

O hardware aqui listado, foi já descrito no capítulo 4.

### 7.2 - Software

Para a realização destes testes foram desenvolvidas duas aplicações. Uma de programação do microcontrolador ATMEGA8 e que servia igualmente para contar o número de pulsos que o sensor de velocidade detectava em cada período de 200 ms, e converte-los para rotações por minuto.

Esta aplicação envia, via porta série, o valor obtido a cada intervalo de 200ms para o computador, para ser amostrado numa interface gráfica feita em Delphi, que faz parte da segunda aplicação criada.

Por sua vez esta segunda aplicação, para além de receber e mostrar este valor, também realiza a comunicação com o ADAM 4017, que lhe fornece os dados da corrente consumida e da força exercida pelo manipulador, e assim conseguimos de 200 em 200 ms ter os valores das três grandezas pretendidas de uma forma sincronizada.

### 7.2.1 - Programa de controlo do ATMEGA8 e de contagem de impulsos detectados pelo sensor de velocidade

O programa, desenvolvido em linguagem C, para além das obrigatórias inicializações e configurações do microprocessador ATMEGA8, efectua um incremento por cada vez que uma interrupção externa onde o sensor de velocidade está ligado é activada, até que um temporizador, programado para contar 200 ms, do microcontrolador, atinja esse valor.

Nesse instante ocorre a comunicação via porta série com o computador de forma a amostrar esse valor na interface gráfica com o utilizador, dando-se de seguida a inicialização da variável de contagem de pulsos. Este processo repete-se ciclicamente de 200 em 200 ms até que o utilizador decida que já adquiriu os valores necessários.

### 7.2.2 - Programa de aquisição da corrente no motor e da força exercida na peça

O programa responsável pela aquisição da corrente consumida pelo motor da máquina de polimento e da força exercida pela peça no polidor, foi realizado em Delphi e tem outras funcionalidades bastante importantes, tais como servir de interface gráfico para com o utilizador, comunicar com o ADAM 4017 (responsável pela aquisição das duas grandezas referidas), esperar os dados provenientes do ATMEGA8 e realizar a conversão de todos os dados para os pretendidos.

Quanto ao seu funcionamento propriamente dito consiste em sempre que recebe uma mensagem via porta série vinda do microprocessador, pegar no valor recebido e escreve-lo na interface gráfica. Imediatamente a seguir envia uma mensagem ao ADAM 4017 a pedir uma leitura das suas portas, ao que esse módulo de portas analógicas responde enviando mensagens codificadas com esses valores. Posteriormente o programa descodifica esses valores e converte-os para miliamperes e gramas-força (corrente consumida e força exercida, respectivamente) e tal como como no caso da velocidade de rotação, escreve esses valores na interface gráfica, ficando assim o utilizador com a informação das três grandezas retiradas praticamente no mesmo instante e em períodos de 200 ms.

Convém referir que o tempo entre a leitura do microcontrolador e do ADAM é desprezável, e pode ser considerado que os dados são retirados no mesmo instante, mesmo assim de seguida será apresentada mais detalhadamente a forma como os testes foram realizados, por forma a que este tempo não tivesse mesmo qualquer importância nos resultados obtidos.

Por fim o utilizador pode gravar esses valores em ficheiros txt e realizar um estudo pormenorizado dessas relações por forma a retirar conclusões das mesmas.

### 7.3 - Procedimentos

Inicialmente foi alocada uma peça cilíndrica para realizar os testes de polimento (Figura 7.1) na estrutura da célula de carga. Foi escolhido este formato para a peça com o intuito de diminuir atritos entre a peça e o disco de polimento.

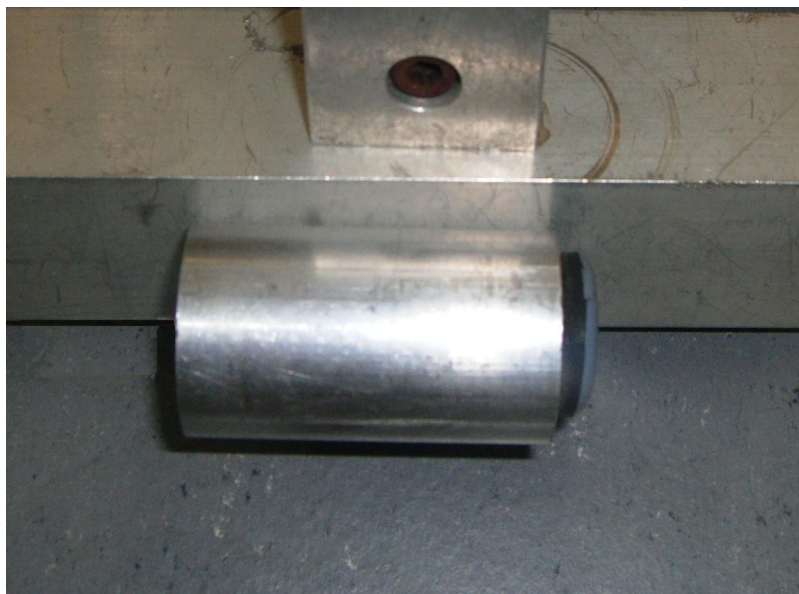


Figura 7.1 - Peça para polimento

A estrutura da célula de carga mais peça de polir foi montada no manipulador, e colocando este na posição patente na Figura 7.2, efectuou-se um avanço uniforme segundo o eixo dos X com um passo de 0.3 mm numa distância total real de cerca de 5 mm. É considerada distância total real, a distância avançada com a peça em contacto com o disco.

Para a distância total real foi definido o valor 5 mm, dado que para a tarefa de polimento interessa-nos apenas valores em que o contacto da peça a polir com o disco de polimento é bastante suave, de forma a não deteriorar nenhum dos dois materiais, nem causar danos no polidor ou manipulador.

Convém ainda referir que por cada deslocamento eram retiradas 50 amostragens procedendo-se assim à média dos valores obtidos, com o intuito de minimizar a possível existência de alguma amostra errada.

Assim sendo os testes consistiam em encostar a peça que se encontrava alocada ao manipulador à máquina de polir, e ir aproximando-a em intervalos de 0.3 mm segundo o eixo

dos X, e por cada intervalo retirar várias amostras dos valores correspondentes à força, velocidade de rotação do disco e corrente consumida pelo motor do polidor.

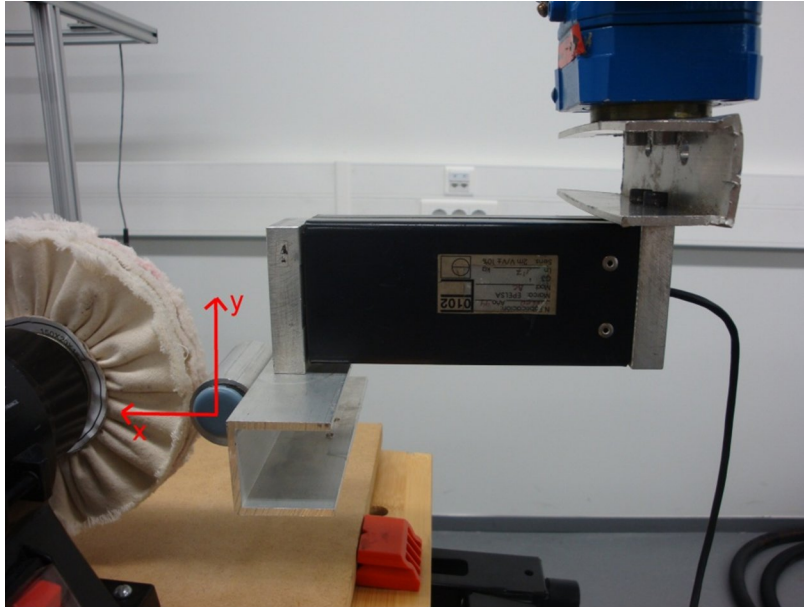


Figura 7.2 - Referencial para testes

## 7.4 - Resultados

De seguida apresentam-se os resultados de um dos vários testes realizados para estudar as relações força vs velocidade de rotação do disco e força vs corrente consumida pelo motor do polidor.

Tabela 7.1 – Valores resultantes do teste.

Velocidade de Rotação [rpm]	Corrente Consumida [mA]	Força [grf]
2764,29	551,01	8,16
2763,78	550,14	9,94
2756,12	548,52	11,92
2751,02	550,98	16,63
2740,31	554,43	21,82
2728,06	557,22	29,77
2706,63	563,13	41,68
2671,88	581,72	59,74
2630,21	617,36	82,72
2577,08	666,68	102,69
2506,77	785,73	128,15
2418,09	1041,72	153,79
2293,37	2076,81	179,96
2199,49	2304,68	186,67

Analisando os valores apresentados na Tabela 7.1 retiraram-se as relações que de seguida são apresentadas.

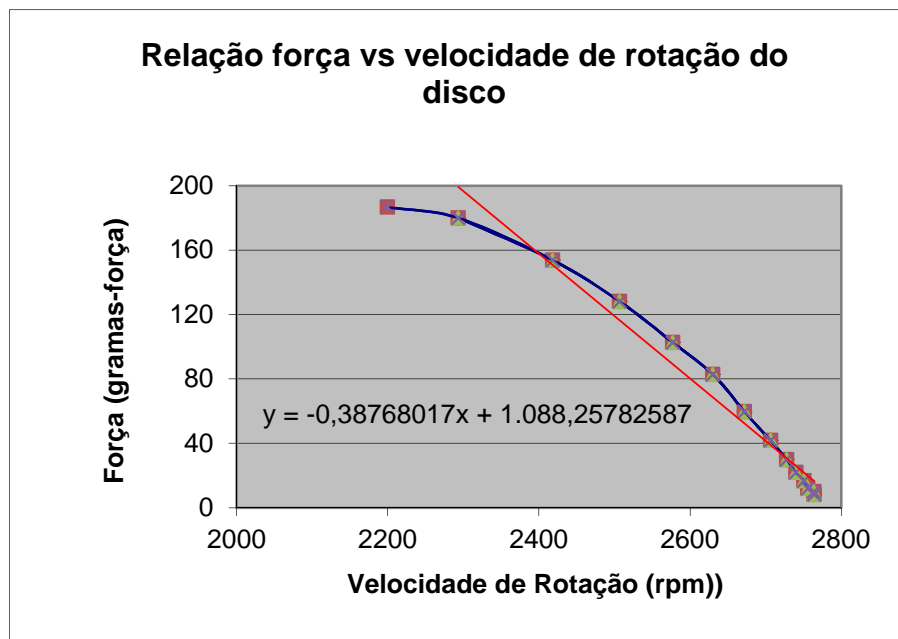


Figura 7.3 - Relação força vs velocidade de rotação do disco, com uma aproximação linear

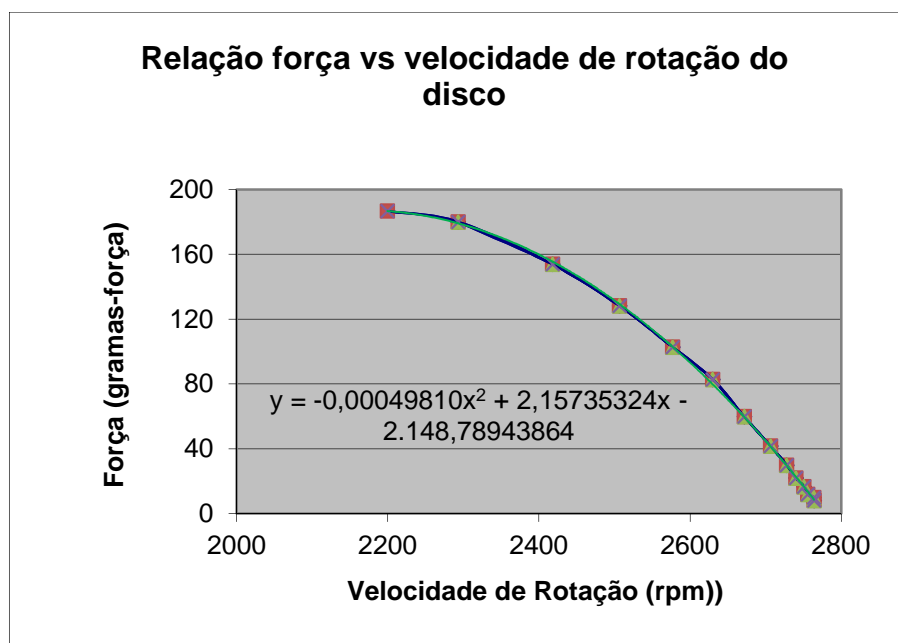


Figura 7.4 - Relação força vs velocidade de rotação do disco, com uma aproximação quadrática

Pela análise do gráfico da Figura 7.3 podemos notar que quanto maior a força que se exerce sobre o polidor menor é a velocidade de rotação do disco, como já era de esperar. Também podemos reparar que a relação encontrada é uma relação praticamente linear. No entanto para a equação da recta de aproximação linear apresentada nessa mesma figura não se teve em conta o ponto às 2200 rpm dado que se considera já estar fora da região linear.

Quanto à Figura 7.4, foi utilizada a mesma relação da Figura 7.3, mas desta feita realizou-se uma aproximação quadrática a essa relação, e como se pode verificar o resultado foi muito bom, dado que ambas as curvas se encontram quase sobrepostas.

Por fim, convém realçar que a aproximação linear a esta relação apresenta um erro absoluto máximo de 23.56 grf, enquanto que a aproximação quadrática tem um erro absoluto máximo de apenas 3.08 grf.

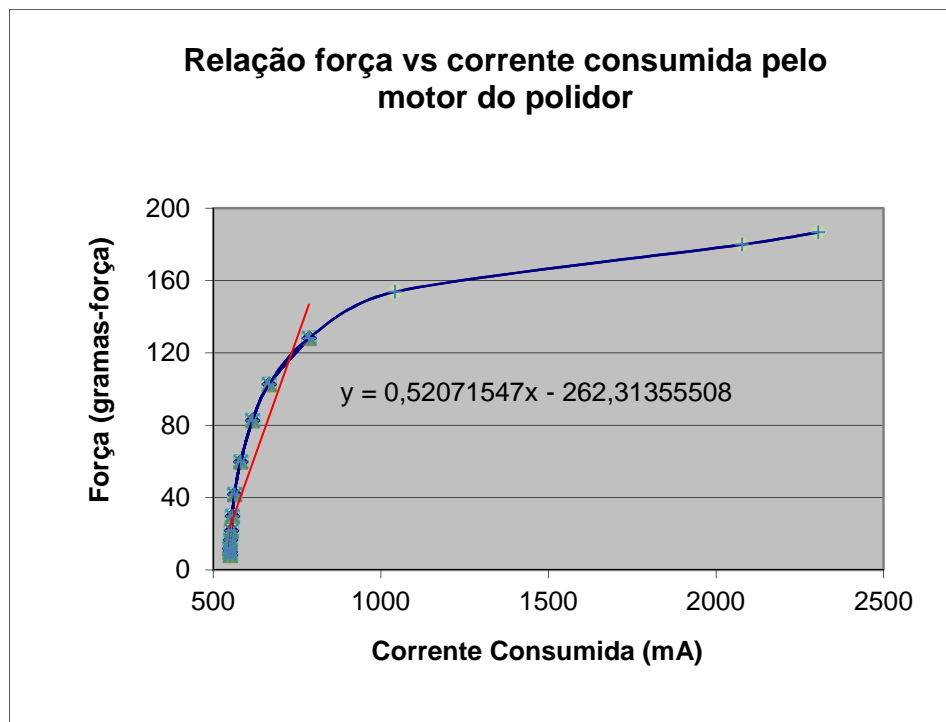


Figura 7.5 - Relação força vs corrente consumida pelo motor do polidor, com uma aproximação linear

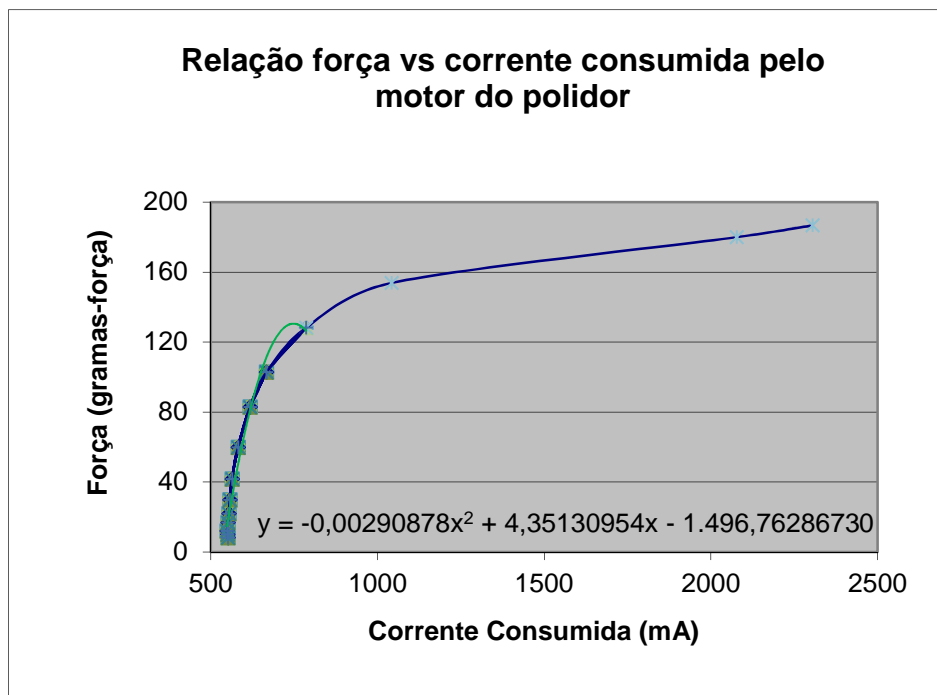


Figura 7.6 - Relação força vs corrente consumida pelo motor do polidor, com uma aproximação quadrática

Em relação ao gráfico da Figura 7.5, podemos constatar que com o aumento da força exercida pelo manipulador no polidor, também aumenta a corrente consumida pelo motor da máquina de polimento. Neste caso a relação já não parece tão linear, quanto era com a relação força vs velocidade de rotação, dado que para valores superiores a 130grf a variação da corrente consumida aumenta de forma mais drástica, do que para valores inferiores a este. Deste modo não se considera válida a zona a partir das 130grf, e por isso não se deve utilizar valores acima deste para a aproximação linear representada pela recta a vermelho. Este acontecimento pode ser explicado pela existência de algum fenómeno não linear que esteja a afectar e a invalidar estas medidas.

Por sua vez a Figura 7.6, apresenta uma aproximação quadrática à curva da relação força vs corrente consumida. Neste caso só se mostrou um bom comportamento da aproximação quadrática para valores inferiores a 100 grf. Para esses valores as curvas encontram-se praticamente sobrepostas, enquanto que desse valor até 130 grf o erro absoluto da aproximação aumenta bastante, como se pode verificar na Figura 7.6.

Em forma de comparação entre os erros obtidos com as duas aproximações há que referir que na aproximação linear temos um erro absoluto máximo de 19.20 grf, enquanto que na aproximação quadrática se verifica um erro absoluto máximo de 10.51 grf.

A repetibilidade destes resultados foi provada com a realização de diversos testes.

Por fim, realizou-se uma análise da variação percentual das três grandezas em estudo em relação à distância avançada com a peça em contacto com o disco. (Figura 7.7)

De forma a obtermos os valores das três grandezas na mesma escala, estas foram normalizadas, dividindo-se a variação de cada grandeza pela variação total máxima e multiplicando-se esse resultado por 100, tendo assim um valor percentual da variação de cada uma destas grandezas.

Assim sendo, e antes de apresentar o resultado obtido, convém referir que os valores máximos destas grandezas, obtidos na região considerada válida foram:

Tabela 7.2 – Valores máximos.

Força [grf]	130
Velocidade de Rotação [rpm]	2764
Corrente Consumida [mA]	786

O resultado obtido pode ser observado na Figura 7.7.

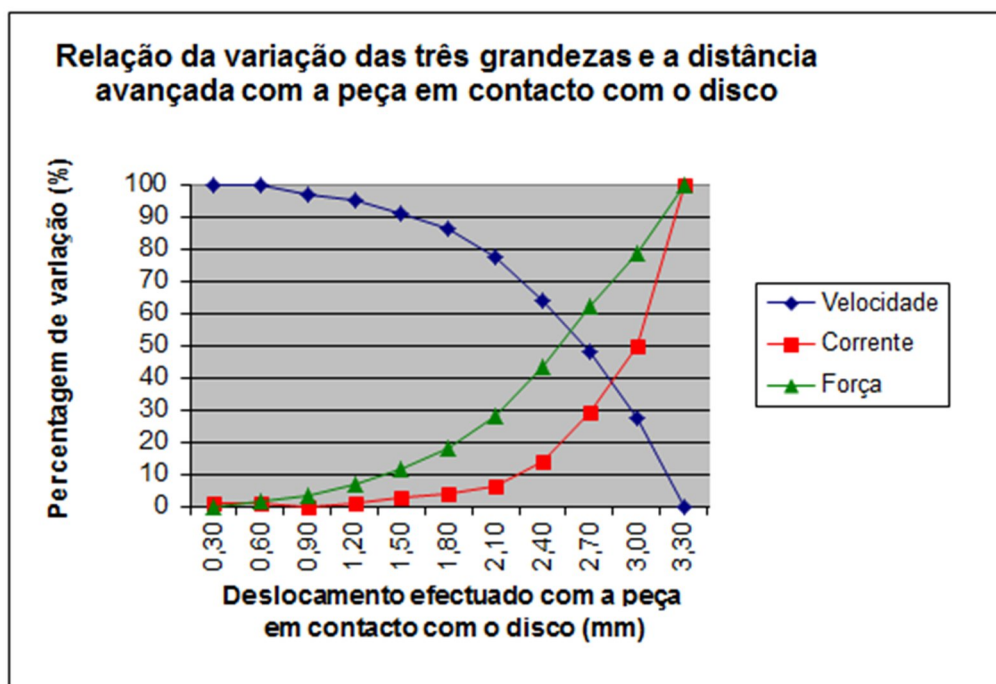


Figura 7.7 - Relação da variação das três grandezas e a distância avançada com a peça em contacto com o disco

Pela análise da Figura 7.7, podemos constatar que a velocidade diminui com a distância avançada com a peça em contacto com o disco, enquanto que a força e corrente aumentam.

Também se verifica que a velocidade de rotação do disco sofre uma variação mais acentuada a partir de 2.10 mm.

Por sua vez a corrente consumida pelo motor da máquina de polir tem um comportamento bastante constante até aproximadamente aos 2.10 mm de deslocamento da peça em contacto com o disco, e a partir desse ponto sofre uma variação mais abrupta do seu valor.

Utilizando-se as equações lineares deduzidas seria então possível estimar-se a força exercida na peça quer através da velocidade de rotação quer através da corrente do motor. Esta última válida para uma gama de forças menor. Nessa gama até se poderiam utilizar as duas estimativas em simultâneo para se ter maior imunidade ao ruído.



# Capítulo 8

## Conclusões

Neste trabalho foram abordados todos os campos propostos nos objectivos da secção 1.2 deste documento.

Foi realizado o estudo do sistema de visão estereoscópica já existente, e foram feitos testes à sua calibração, com o intuito de posteriormente recolher trajectórias para realizar testes exaustivos ao sistema de ensinamento, por forma a termos conhecimento da sua real precisão, e caso possível melhorá-la.

Com esta execução exaustiva de testes, chegou-se aos resultados apresentados na secção 5.3, de onde podemos concluir que os resultados da precisão do sistema de ensinamento são bastante satisfatórios.

Para a actividade de teste que foi o polimento, foram realizados testes para a determinação das relações força vs velocidade de rotação do disco e força vs corrente consumida pelo motor do polidor, aos quais se atingiram os resultados apresentados na secção 7.4 do corrente documento.

Estes resultados podem ser considerados satisfatórios, apesar de não serem os ideais, visto que mesmo assim é possível retirar relações simples entre as grandezas.

A recolha sincronizada destas grandezas, será futuramente muito importante no contexto da actividade do polimento, dado que com a sua utilização poder-se-á evitar a utilização de sensores de força na ferramenta para além de facilitar o ensinamento rápido por parte do operador, pois só necessitará de executar a tarefa uma única vez.

Convém ainda referir que apesar de neste trabalho ter-se tentado gerar trajectórias para o manipulador, o uso deste sistema também permite manusear o manipulador industrial

em tempo real. Este modo de operação é importante para certas actividades como por exemplo: manuseamento de substâncias perigosas ou objectos de grande porte, que de forma manual seria praticamente impossível. Sendo necessário para o efeito apenas um sistema de marcadores luminosos, um sistema de visão e um computador, para se conseguir manobrar com extrema facilidade e agilidade um manipulador industrial.

Neste trabalho utilizou-se o controlo do manipulador em tempo real para a realização de alguns testes, isto é, durante o estudo intensivo da precisão do sistema de ensinamento para além das trajectórias realizadas utilizando movimentos a partir da alocação dos marcadores luminosos no manipulador, também se utilizou este método de controlo por forma a criar trajectórias de estilos diferentes. E apesar de nestes casos não ser absolutamente necessário ter o manipulador a mover-se em simultâneo, pretendia-se com isso ter-se uma noção prática do tipo de movimento que se estava a pedir para ele realizar, bem como o seu comportamento a esses pedidos.

Podemos assim concluir que este sistema é uma alternativa fiável às soluções de programação de manipuladores industriais já existentes. E que os resultados obtidos neste trabalho são satisfatórios.

## 8.1 - Trabalho futuro

Como trabalhos futuros sugiro as seguintes ideias para as áreas de:

- Caracterização do sistema Sincrovision
  - Avaliar pontos de stress do sistema. Qual o espaçamento mínimo/máximo/ideal e posicionamento dos marcadores para os quais ainda se obtêm valores correctos. Visto que se pretende colocar os marcadores nas ferramentas dos operadores, para guardar os seus movimentos, esta etapa é muito importante, para se ter uma noção sobre o tipo de actividades a que se pode aplicar. Alguns dados foram já recolhidos, sobre a distância entre marcadores, precisando agora de se continuar com este estudo.
  
- Geração de trajectórias

- Analisar diferentes formas de geração de trajectórias para o manipulador.
- Estudar a possibilidade de aplicação das instruções MOV<sub>C</sub> e MOV<sub>L</sub> na geração das trajectórias.

➤ Actividade de polimento

- Realizar mais testes com máquinas de polir mais potentes, sobre as relações força vs velocidade de rotação do disco e força vs corrente consumida pelo motor do polidor, e tentar afinar melhor os resultados obtidos a partir destas.
- Implementar o resultado das relações encontradas para que o manipulador durante o polimento ajuste automaticamente a sua posição de forma a manter uma força constante na peça a polir.
- Efectuar vídeos de uma sessão de polimento propriamente dita.



# Referências

- [1] Yusuke Maeda, Tatsuya Ushioda and Satoshi Makita, Yokohama National University (2008), “Easy Robot Programming for Industrial Manipulators” by Manual Volume Sweeping in 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23.
- [2] Aleotti J, Caselli S (Parma University, Italy) (2006) “Robust Trajectory learning and approximation for robot programming by demonstration” in Robotics and Autonomous Systems.
- [3] Ekvall S, Kragic D (2005), “Grasp Recognition for Programming by Demonstration” in Robotics and Automation; ICRA 2005.
- [4] R. Dillmann (2004), “Teaching and learning of robot tasks via observation of human performance” in Robotics and Autonomous Systems, vol.47, no.2-3, pp. 109-116.
- [5] Markus Ehrenmann, Oliver Rogalla, Raoul Zöllner and Rüdiger Dillmann, “Teaching service robots complex tasks: Programming by demonstration for workshop and household environments”, University of Karlsruhe(TH), Germany.
- [6] Manuel Lopes, Alexandre Bernardino and José Santos-Victor (2005), “A Developmental Roadmap for Task Learning by Imitation in Humanoid Robots”. AISB - Third International Symposium on Imitation in Animals and Artefacts. Hatfield England, 2005.
- [7] P. Neto, JN Pires and AP Moreira, “High-level programming and control for industrial robotics: using a hand-held accelerometer-based input device for gesture and posture recognition”, Emerald Industrial Robot, 2009. Internal Code: IR-09-339.
- [8] F. Nagata, K. Watanabe, K. Kiguchi, K. Tsuda, S. Kawaguchi, Y. Noda and M. Komino (2001), “Joystick teaching system for polishing robots using fuzzy compliance control”. Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp. 362-367, 2001.
- [9] J.N. Pires (2007), “Demonstration videos: programming robots with digital pens”, Industrial Robotics Laboratory, Mechanical Engineering Department, Coimbra - Portugal.

- [10] C. Jayawardena, K. Watanabe, K. Izumi, Dept. of Adv. Syst. Control Eng., Saga Univ., Japan (2005), “Teaching a tele-robot using natural language commands in Micro-Nano Mechatronics and Human Science”, 2005 IEEE International Symposium.
- [11] J.N. Pires (2007), “The Industrial robot as a human coworker: the role of the speech interfaces”. In Proceedings of the International Conference on Software Development for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion (DSAI 2007), Portugal.
- [12] F. Nagata. K. Watanabe and K. Izumi (1999), “An Experiment on Profiling Task with Impedance Controlled Manipulator Using Cutter Location Data”, IEEE SMC’99 Conference Proceedings, Japan.
- [13] Shin-Ichi Nakajima, S. Terashima and M. Shirakawa (2004), “Development of Operating Robot System for Die and Mold Polishing”, 29 October 2004, Japan.
- [14] Richard Hartley and Andrew Zisserman (2003), “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press.
- [15] Alberto B. Raposo, Flávio Szenberg, Marcelo Gattass e Waldemar Celes: “Visão Estereoscópica, Realidade Virtual, Realidade Aumentada e Colaboração”, Rio de Janeiro: Departamento de Informática, PUCRio, 2004.
- [16] Rimon Elias and Robert Laganière, “Projective Geometry for Three-Dimensional Computer Vision”, University of Ottawa - Canada
- [17] Roger Y. Tsai (1987), “A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses”, in IEEE Journal of Robotics and Automation, VOL.RA-3, NO.4.
- [18] Richard I. Hartley (1997), “In defense of the eight-point algorithm”, IEEE transaction on pattern recognition and machine intelligence, VOL 19, NO. 6, June 1997
- [19] Motoman NX100 Basic Programming
- [20] “3D OBJECT MOTION TRACKING AND LOCATING SYSTEM BY MEANS OF SYNCHRONISED LIGHT EMITTERS WITH A STEREOSCOPIC VISION SYSTEM” , Patente disponível em: <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=WO2010046759&F=0>
- [21] Paulo Malheiros, Paulo Costa, António Paulo Moreira and Marcos Ferreira (2009), “Robust and Real-time Teaching of Industrial Robots for Mass Customisation Manufacturing Using Stereoscopic Vision”, INESC Porto - Manufacturing Systems Engineering Unit, FEUP, Portugal
- [22] Paulo Malheiros, Paulo Costa, António Paulo Moreira and José Carlos Lopes (2009), “Real-time Teaching of Industrial Robots Using a Synchronised Stereoscopic Vision System”, ROBOTICA 2009 - 9<sup>th</sup> Conference on Mobile Robots and Competitions, Castelo Branco, Portugal

[23] <http://www.policad.com/home/saiba-mais#TOC-NURBS> ,26-06-2010

[24] <http://www.rhino3d.com/nurbs.htm>, 26-06-2010



# Anexo A

## Conceitos

Efeito de Barril: É um efeito da lente que faz com que as imagens assumam formas esféricas. É visível com mais frequência em imagens de linhas perfeitamente rectas, mais ainda nas que ficam próximas à borda do enquadramento da imagem.

Epipolos ou Pontos Epipolares: Ponto de intersecção da linha que une os centros das câmaras com cada plano de imagem. [14]

Geometria Projectiva : Consiste no estudo das propriedades descritivas das figuras geométricas. A geometria projectiva utiliza elementos ideais no infinito, onde há uma simetria notável entre pontos e rectas.

Inteligência Artificial: É uma área de pesquisa da ciência da computação dedicada a procurar métodos ou dispositivos computacionais que possuam ou simulem a capacidade humana de resolver problemas, pensar, ou de forma mais ampla, ser inteligente.

Linha Epipolar: Linha resultante da intersecção do plano epipolar com os planos de imagem. Passa entre os pontos projectados no plano de imagem e nos epipolos. [14]

Luas Antropomórficas: São luvas que têm a funcionalidade de retirar o modelo da mão.

Manipulador Industrial: É oficialmente definido pela ISO como um "manipulador multi-propósito controlado automaticamente, reprogramável e programável em três ou mais eixos"

Matriz Anti-simétrica: Uma matriz anti-simétrica é aquela em que a sua matriz transposta coincide com a sua matriz oposta:  $A^T = -A$

Matriz Identidade: Em matemática, é uma matriz quadrada e diagonal, cuja função é ser o elemento neutro da multiplicação de matrizes. É denotada por  $I_n$  (onde  $n$  é a ordem da matriz), ou simplesmente por  $I$ . A matriz é construída da seguinte forma: os elementos da diagonal principal têm valor 1, e os demais elementos da matriz são zero:

$$I_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Paralaxe: é a distância horizontal entre a imagem à esquerda e à direita em que aparecem os objectos em relação ao observador. Existe paralaxe zero, positiva, negativa e divergente.

Percepção de Profundidade: Capacidade visual para percepção tridimensional do Mundo, até agora o conceito de percepção é reservado aos humanos, embora qualquer animal consiga mover-se no seu ambiente envolvente, apenas nós humanos conseguimos transmitir a noção de distância uns aos outros.

Plano Epipolar: Plano que contem a linha que une os epipolos. [14]

Programação por Demonstração: É uma técnica para ensinar a um computador ou a um robô comportamentos novos demonstrando como se faz determinada tarefa, em vez de programá-la com os comandos da máquina.