



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Manuel Gomes da Silva

**Design e Construção de um
Robot Antropomórfico**

Tese de Mestrado
Automação e Robótica / Electrónica Industrial

Trabalho efectuado sob a orientação da
**Professora Doutora Estela Guerreiro da Silva Bicho
Erlhagen**

DECLARAÇÃO

Nome: Rui Manuel Gomes da Silva

Endereço electrónico: rsilva@dei.uminho.pt

Telefone: 253510190 / 964882230

Número do Bilhete de Identidade: 12167412

Título da dissertação: Design e construção de um robot antropomórfico

Orientador: Doutora Estela Guerreiro Silva Bicho Erlhagen

Ano de conclusão: 2008

Designação do Mestrado: Mestrado em Electrónica Industrial – Área de Automação e Robótica

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

A procura do conhecimento é inevitavelmente um caminho longo e difícil. Pelo contributo prestado, expresso aqui o meu reconhecimento a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para levar a cabo com sucesso este trabalho.

À minha orientadora, Doutora Estela Bicho, pelos conhecimentos, incentivo, disponibilidade, e apoio incondicional que sempre demonstrou tornando a sua orientação um aspecto fundamental do desenvolvimento deste trabalho.

Uma palavra especial à minha parceira de trabalho Eliana Costa e Silva, que em muito ajudou na fase de projecto do robot, na tomada de decisões importantes e pelo apoio prestado na parte matemática do trabalho.

Ao grupo de Robótica Móvel e Antropomórfica do Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho, onde o trabalho foi realizado pelo bom ambiente criado, a troca de ideias com a qual tanto se aprende e apoio mútuo diário, nomeadamente: Nzoji Hipólito; Luís Louro; Toni Machado; Emanuel Sousa; Flora Ferreira; João Ferreira e Joaquim Silva.

À minha família por estar sempre presente quando necessário, e me ter apoiado incondicionalmente em toda a minha vida, sem eles não seria possível atingir este ponto.

À Sílvia, que de forma excepcional me incentivou e ajudou ao longo deste trabalho demonstrando um apoio incondicional.

A elaboração deste trabalho foi possível graças ao financiamento através de uma bolsa de investigação (Ref^a UMINHO/BI/019/2007 - Projecto JAST), e

fornecimento de material necessário através dos projectos: *i) JAST “Joint Action Science and Technology”,* projecto financiado pela Comissão Europeia, (ref. IST-2-003747-IP); *ii) “Anthropomorphic robotic systems: control based on the processing principles of the human and other primates’ motor system and potential applications in service robotics and biomedical engineering”,* financiado pela FCT e Universidade do Minho, (ref. CONC-REEQ/17/2001); *iii) LEMI “Learning to read the motor intention of others: towards socially intelligent robots”,* (POCI/V.5/A0119/2005, 08/2007-12/2008) financiado pela FCT.

Resumo

Esta dissertação teve como objectivo a concepção e construção de um robot antropomórfico para ser usado em tarefas que envolvam interacção e coordenação com humanos. Partindo do objectivo principal o trabalho foi estruturado em várias tarefas: *i)* concepção e dimensionamento da estrutura para o robot; *ii)* a selecção de um sistema de visão adequado; *iii)* a integração de todos os dispositivos necessários (braço, mão, unidade *Pan-Tilt* e câmaras); *iv)* a identificação e cálculo das coordenadas 3D de objectos.

A estrutura do robot foi projectada não só para suportar o peso de todos os componentes que compõem este, mas também e muito importante, para garantir estabilidade mesmo em situações em que o braço executa movimentos bruscos. O tamanho e a forma da estrutura apresentam medidas antropométricas de modo a conferir ao robot um aspecto humanóide, por forma a aumentar a aceitabilidade por parte dos humanos. O robot está equipado com um braço de $7 DoF$, similar ao de um humano, e uma mão artificial com 4 graus de liberdade. O conjunto braço + mão permite ao robot agarrar e manipular objectos, de modo similar à acção humana. O pescoço, de 2 graus de liberdade (neste caso uma unidade *Pan-Tilt*), permite ao robot alterar o sítio para onde direcciona o olhar, conseguindo desta forma focar a atenção em áreas diferentes do ambiente.

Na escolha do sistema de visão foi tido em consideração o ambiente em que se insere o robot, o campo de visão necessário, assim como o seu preço e desempenho, tendo-se conseguido atingir uma boa relação qualidade preço. O cálculo das coordenadas 3D de objectos, foi feito combinando técnicas de processamento de

imagem para a identificação de objectos com imagens *stereo* obtidas do sistema de visão seleccionado.

O robot está actualmente a ser usado em vários projectos de investigação (nacionais e internacionais) que abordam vários aspectos/problemas relacionados com a interacção e colaboração próxima entre humanos e robots.

Palavras-chave: robot antropomórfico, visão *stereo*, processamento de imagem, interacção humano-robot, colaboração humano-robot.

Abstract

The focus of this work was the design and construction of an anthropomorphic robot to be used in tasks that involve close physical interaction and coordination with humans. The work was structured in several sub-tasks: *i)* design and construction of the robot's structure; *ii)* selection of an adequate vision system; *iii)* integration of all the required devices (arm, hand, pan-tilt unit and cameras); *iv)* identify and calculate 3D coordinates of objects.

The robot's structure was designed not only to withstand the weight of all the components, but also and very important, to ensure the stability even in situations where the arm performs harsh movements. The size and shape of the structure have anthropometric measures, giving the robot a human-like form to increase the acceptability by humans. The robot is equipped with an anthropomorphic $7 DoF$ arm, a dexterous artificial hand with $4 DoF$. The set arm + hand allows the robot to grasp and manipulate objects in a human-like way. The robot has a $2 DoF$ neck (Pan-Tilt unit) that allows the robot to change the direction where is looking, being able to focus the attention in different areas of the environment.

In the selection of the vision system, it was taken into account: the environment where the robot is; the required field of view; the price and the performance. A good ratio between quality and price was achieved. The calculation of 3D coordinates was made combining image processing techniques for object identification with stereo images acquired by the vision system.

The robot is currently being used in several research projects (national and international) that address many aspects/problems related with close human-

robot interaction and coordination.

Keywords: anthropomorphic robot, stereo vision, image processing, human-robot interaction, human-robot cooperation

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Porquê um robot antropomórfico?	2
1.2	Motivação e objectivos desta dissertação	4
2	Estado da Arte	7
2.1	Critérios e princípios de <i>design</i>	8
2.2	Exemplos de robots	9
2.2.1	Robot <i>ARMAR</i>	10
2.2.2	Robot <i>James</i>	12
2.2.3	<i>Laboratory for Perceptual Robotics</i>	13
2.2.4	<i>Ruhr-Universität Bochum – Institut für Neuroinformatik</i>	14
2.2.5	<i>NASA</i>	16
2.2.6	Universidade de Waseda	19
2.2.7	<i>PHRIENDS</i>	25
2.2.8	<i>Motoman</i>	27
2.3	Conclusões	28
3	Componentes do Robot	29
3.1	Braço	29
3.2	Mão	34
3.3	Corpo	37
3.3.1	Dimensões e proporções antropomórficas	39
3.3.2	Resistência do material	40

3.3.3	Estabilidade da estrutura	44
3.4	Pescoço	48
3.5	Olhos	50
3.5.1	Seleccção das lentes	51
3.5.2	Calibração	54
4	Integração do Sistema	57
4.1	Arquitectura de <i>software</i>	57
4.2	Processamento de imagem	64
4.3	Extracção de coordenadas	69
4.3.1	Cálculo	69
4.3.2	Transformação	72
4.4	Planeamento do movimento do braço	77
5	Resultados: O ARoS em Acção	79
6	Conclusão e Trabalho Futuro	83
	Referências Bibliográficas	93

Lista de Figuras

1.1	Robot <i>ARoS</i> a manipular um objecto.	5
2.1	Alguns robots humanóides	10
2.2	Robot humanóide <i>ARMAR III</i> , imagem retirada de Asfour et al. (2006a).	10
2.3	Robot humanóide <i>James</i> (imagem retirada de Jamone et al. (2006)).	12
2.4	Robot Dexter (imagem retirada de www-robotics.cs.umass.edu).	13
2.5	<i>CoRA - Cooperative Robotic Assistant</i> (imagem retirada de Iossifidis et al. (2002)).	15
2.6	<i>Robonaut</i> (imagem propriedade de <i>Johnson Space Center, NASA</i>).	17
2.7	Hadaly-2 (imagem retirada de Hashimoto et al. (2002).)	20
2.8	Wendy - Waseda ENgineering Designed sYmbiont (imagem propriedade de <i>Sugano Lab, Waseda University</i>).	21
2.9	<i>Robita</i> - Robot capaz de usar expressões faciais e do corpo para comunicar.	23
2.10	<i>Wamoeba</i> (imagem propriedade de <i>Sugano Lab 2006, Waseda University</i>).	24
2.11	<i>Justin</i> - Robot do projecto PHRIENDS, imagem adaptada de Borst et al. (2007).	26
2.12	Modelos comercializados pela <i>Motoman</i>	27
3.1	Configuração base do braço antropomórfico identificando os diferentes módulos e as medidas.	30

3.2	<i>Amtec Lightweight Arm 7 DoF</i> - Braço antropomórfico equipado com uma mão robótica.	32
3.3	Modelo a três dimensões da configuração do braço usada.	33
3.4	Esquema que ilustra as medições que o sensor colocado no pulso é capaz de realizar (o modelo apresentado não ilustra o pulso do braço usado).	34
3.5	Mão robótica fabricada pela <i>Barrett Technologies</i> . Ilustração do espaço de trabalho dos dedos e algumas medidas (<i>mm</i>) importantes da mão(imagens adaptadas de Townsend (2000)).	35
3.6	Limites angulares dos dedos (imagem adaptada de Townsend (2000)).	35
3.7	Proporções do corpo humano por Drillis and Contini (1966).	38
3.8	Projecto da estrutura numa ferramenta de desenho gráfico 3D.	41
3.9	Teste de resistência da estrutura inicial.	42
3.10	Pormenor do resultado dos testes de resistência na parte do apoio do braço.	42
3.11	Apoio do braço visto em pormenor.	43
3.12	Apoio do braço visto em pormenor.	43
3.13	Exemplo onde se mostram as forças presentes na estrutura.	44
3.14	Dois casos em que o braço se encontra esticado, visto de cima.	45
3.15	Teste de estabilidade da estrutura onde se mostram as forças aplicadas no pior caso a que estará sujeita.	46
3.16	Unidade Pan-Tilt <i>PTU-D46-17</i> comercializado pela <i>Directed Perception</i> (imagens adaptadas do documento de especificações técnicas do fabricante).	49
3.17	Sistema <i>stereo</i> comercializado pela empresa <i>Videre Design</i> , modelo <i>STH-DCSG-VAR-C</i> , usado no robot.	50
3.18	Diagrama para auxílio ao cálculo do ângulo de visão horizontal das câmaras (<i>HFOV</i>).	52

3.19	Diagrama para auxílio ao cálculo do ângulo de visão vertical das câmaras (<i>VFOV</i>).	52
3.20	Algumas das imagens da câmara esquerda usadas para a calibração do sistema.	55
3.21	Exemplo de um par de imagens onde são detectadas as características necessárias ao processo de calibração.	56
4.1	Arquitectura de <i>software</i> do robot baseada na plataforma <i>YARP</i>	58
4.2	ARoS Sim - Aplicação para simular o robot em 3D.	59
4.3	Cálculo do ângulo <i>Pan</i> baseado nas coordenadas de um ponto no espaço.	62
4.4	Cálculo do ângulo <i>Tilt</i> baseado nas coordenadas de um ponto no espaço.	62
4.5	Interface de controlo dos parâmetros de aquisição de imagens	64
4.6	Objectos para a tarefa de construção: (a) Base; (b) Parafuso; (c) Roda; (d) Coluna (as imagens não estão à escala).	64
4.7	Diagrama que mostra o processamento aplicado às imagens capturadas.	65
4.8	Exemplo de uma cena típica vista pela câmara do robot.	66
4.9	Imagens binárias criadas a partir da segmentação efectuada na imagem original.	67
4.10	Configuração dos parâmetros de segmentação de cor.	67
4.11	Objectos detectados pelo processamento aplicado.	68
4.12	Geometria aplicada à computação <i>stereo</i> . (Imagem retirada de Konolige and Beymer (2007a)).	69
4.13	Exemplo de uma cena vista pelas duas câmaras do robot.	70
4.14	Resultado da computação <i>stereo</i> das imagens mostradas na Figura 4.13.	71

4.15	Sistemas de eixos coordenados no robot, referencial da câmara e referencial do mundo. Pontos intermédios para a transformação das coordenadas.	73
5.1	Tarefa onde o robot colabora com um humano, ajudando o seu parceiro a completar uma tarefa com sucesso (vídeo disponível <i>online</i> em http://www.youtube.com/GRASDUM).	80
5.2	Tarefa com o robot colaborando com um humano, onde é demonstrada a capacidade do robot detectar erros cometidos pelo humano (vídeo disponível <i>online</i> em http://www.youtube.com/GRASDUM).	81

Lista de Tabelas

3.1	Algumas especificações técnicas.	30
3.2	Limites de cada junta ilustradas na Figura 3.2.	31
3.3	Algumas especificações da mão robótica utilizada fornecidas pelo fabricante <i>Barrett Technologies</i>	36
3.4	Algumas especificações da unidade Pan-Tilt fornecidas pelo fabricante <i>Directed Perception</i>	49
4.1	Transformações de coordenadas entre os referenciais intermédios, indicando os pontos de origem relativos à Figura 4.15.	74
4.2	Resultados do cálculo de coordenadas dos objectos detectados na Figura 4.11 (unidades em <i>cm</i>).	76
4.3	Desempenho do processo de tratamento de imagem e cálculo de coordenadas medido em diferentes computadores.	76

Esta página foi intencionalmente deixada em branco!

Capítulo 1

Introdução

A robótica tem alcançado nos últimos anos uma importância e desenvolvimento tecnológicos consideráveis. Todos os anos centros de investigação e empresas dos mais variados ramos apresentam inovações importantes neste campo. Trata-se de uma área multi-disciplinar e que requer um estudo de temas diversos, fundindo áreas como a mecânica, electrónica, informática e matemática num só sistema com o objectivo de criar o que pode ser designado de robot.

Na origem de todo este desenvolvimento estiveram os robots manipuladores por terem um potencial de uso enorme na indústria. As capacidades actuais de robots manipuladores existentes no mercado permitem automatizar processos produtivos reduzindo a intervenção humana como acontece actualmente na indústria automóvel. Os robots industriais não interagem directamente com os operadores humanos, antes pelo contrário, estão normalmente separados por barreiras físicas por razões de segurança. Em 2003 era previsível que num futuro próximo, robots de serviço equipados com mecanismos de comunicação e interacção com humanos seriam usados fora dos ambientes industriais tradicionais (Graf et al., 2003). Actualmente, há já casos de robots de serviço que interagem directamente com humanos, um exemplo é o *Robovie* (Shiomi et al., 2007) que serve de guia a pessoas num museu.

Como resposta à evolução das necessidades sociais a robótica sofreu uma clara

evolução nos últimos anos. Focando-se inicialmente em temas como o controlo do movimento, a investigação nesta área evoluiu também para responder às necessidades actuais em campos como a inteligência artificial (Garcia et al., 2007). No domínio industrial, civil e militar permitiu a substituição dos humanos em tarefas de risco (por exemplo, robots usados pela polícia no desarme de explosivos).

1.1 Porquê um robot antropomórfico?

Recentemente a explosão no campo da robótica de serviços impulsionou o desenvolvimento de robots capazes de colaborar de forma autónoma e inteligente, com humanos em tarefas que exigem cooperação. Os robots podem assim deixar de ser vistos como uma ferramenta e começar a ser encarados como um parceiro com o qual se pode colaborar. Um facto que tem um papel muito importante na interacção humano-robot é a forma do robot, visto que ajuda a estabelecer uma expectativa social por parte do humano. Se o robot tem uma forma que se assemelhe a um animal (por exemplo o cão *Aibo* da *Sony*), as pessoas tendem a tratar o robot como um animal. Por outro lado, quando as pessoas são confrontadas com um robot que apresente uma forma antropomórfica, estas tendem a interagir com ele de uma forma mais similar à forma que interagem com humanos (Duffy, 2003).

O ritmo de crescimento da população idosa nas sociedades modernas tem vindo progressivamente a aumentar, o que poderá simultaneamente justificar uma maior necessidade de meios de apoio a esta população, nomeadamente de ajudantes robóticos. Por isso, se os robots se tornarem acessíveis quer económica quer tecnicamente, podem, por exemplo, revolucionar a forma como os cuidados de saúde são prestados. Deste modo é expectável que em breve sejam desenvolvidas formas de tornar os robots capazes de apoiar pessoas idosas ou deficientes em tarefas como, preparar uma refeição ou ajudar a tomar medicamentos. Um exemplo é o robot *Care-O-Bot II*, está equipado com um braço robótico, e foi desenvolvido para prestar auxílio a pessoas nas suas casas, usa sistemas sensoriais 3D a laser

e visão para evitar colisões quando manipula objectos (Graf et al., 2003).

Há no entanto investigadores que defendem pontos de vista distintos quanto à aparência e forma de operar de um robot de serviço (Harris, 2007). Por um lado, há quem defenda que os robots devam parecer, agir e sentir como humanos. Na realidade japonesa, a interacção com os robots acontece já de forma natural (as crianças desde pequenas brincam com robots), fazendo parte da sua cultura e sendo já pretendidos andróides com características de um humano, nomeadamente no cuidado a pessoas idosas.

Por outro lado, no Ocidente, existe uma perspectiva diferente. Os robots não devem ser feitos para substituírem completamente os humanos, devendo antes ser vistos como máquinas construídas com o intuito de fazer com que os humanos tenham uma melhor qualidade de vida. A interacção dos humanos com o robot *ASIMO* é caracterizada por uma perfeita consciência de que se está a interagir com um robot, com um aspecto amigável. Este exemplo representa um meio termo aceitável entre o andróide e a máquina.

Colocar robots humanóides em ambientes humanos não estruturados facilita em parte a integração do robot, porém adiciona algumas dificuldades técnicas a este processo. Pelo facto do robot ser antropomórfico e ter capacidades de locomoção e manuseamento de objectos semelhantes a um humano, é praticamente desnecessário fazer uma adaptação do ambiente, podendo deixá-lo inalterado sendo adequado a qualquer humano. Por outro lado, um robot que opere num ambiente não modificado é sujeito a exigências muito superiores quando comparado com um robot industrial, visto este último operar num ambiente estruturado onde tudo é pensado para facilitar as tarefas que executa.

Mehrabian (1971) afirma que grande parte da comunicação entre os humanos é não verbal, basicamente existem três elementos na comunicação: i) palavras - 7%; ii) tom de voz - 38%; iii) linguagem corporal - 55%. Por isso, se as nossas palavras disserem uma coisa e o corpo disser outra, tendencialmente as pessoas acreditam mais na linguagem corporal.

Nas interações sociais diárias, os humanos demonstram uma capacidade notável para coordenar os seus comportamentos com vista a atingir objectivos comuns (Sebanz et al., 2006). A comunicação não verbal é considerada essencial para garantir uma coordenação eficiente e bem sucedida. Os humanos observam continuamente as acções dos outros, interpretando-as incessantemente em termos dos seus resultados e usam isto para fazer predições com o objectivo de seleccionar comportamentos adequados (Newman-Norlund et al., 2007). É por isso importante dotar robots autónomos com capacidades cognitivas que lhes permitam agir como agentes socialmente conscientes em tarefas humano-robot (para uma revisão sobre robots socialmente interactivos ver (Fong et al., 2003)). Desenvolvem-se deste modo arquitecturas de controlo que reflectem o nosso conhecimento dos mecanismos neuro-cognitivos, envolvidos na percepção, raciocínio e acção num contexto social (Bicho et al., 2008; Erlhagen and Bicho, 2006; Erlhagen et al., 2006a,b, 2007). Se um robot for capaz de, não só identificar as nossas acções, mas também entendê-las, poderá usar essa informação para prever os nossos objectivos e antecipar as suas acções de modo a ajudar-nos. Do mesmo modo, para que a interacção seja mais fluente, é importante que o humano seja capaz de ler intenções motoras no movimento do robot. Por conseguinte é importante que o robot tenha não só forma antropomórfica como também movimentos similares aos humanos.

1.2 Motivação e objectivos desta dissertação

A pesquisa e desenvolvimento no campo da robótica antropomórfica pode agrupar-se em três grandes áreas: *design* do robot, geração do movimento e controlo de estabilidade. Estas áreas têm-se focado principalmente nos actuadores usados, tais como motores DC, músculos artificiais, entre outros (Garcia et al., 2007) e existem já robots humanóides capazes de imitar movimentos humanos no que concerne à capacidade de andar no caso do *Asimo* (Chestnutt et al., 2005) ou correr como no caso do *Qrio* (Geppert, 2004).

Actualmente os investigadores tendem a focar a sua atenção em tarefas de interacção e cooperação entre robots e humanos que envolvem ou exigem a manipulação (singular ou conjunta) de objectos. Por exemplo, o *Robonaut* da *NASA* que, não tendo pernas, foi construído com o objectivo de realizar trabalho conjunto, em estações espaciais, com astronautas, tendo sido projectado para se adaptar às ferramentas já existentes, usadas pelos astronautas.

Assim motivado pelo impacto que os robots antropomórficos podem ter, esta dissertação teve como objectivo principal a concepção de uma plataforma robótica antropomórfica para estudar a interacção e coordenação com humanos; sendo esta dotada de um braço antropomórfico com uma mão para que possa agarrar e manipular objectos, bem como um sistema de visão que lhe permita determinar a localização de objectos no ambiente onde se insere. Esta plataforma possui uma arquitectura de controlo que facilita a integração com diversos métodos de controlo minimizando o tempo de preparação do robot. Com este propósito foi concebido e construído o robot de nome *ARoS* (*Anthropomorphic Robot System*) ilustrado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Robot *ARoS* a manipular um objecto.

Capítulo 1. Introdução

Pretende-se que a plataforma apresentada neste trabalho sirva de apoio à investigação realizada em diversas áreas da robótica de serviços, focando-se na robótica antropomórfica e em alguns tópicos a ela associados. Exemplo disto é a geração de movimentos “*human-like*” para o braço e a cognição no sentido de ter uma percepção abstracta do mundo que o rodeia, reconhecendo e antecipando acções realizadas por humanos, por forma a cooperar com um humano de forma inteligente.

O *ARoS* foi desenvolvido no âmbito de três projectos:

- i) *Anthropomorphic robotic systems: control based on the processing principles of the human and other primates’ motor system and potential applications in service robotics and biomedical engineering* (ref. CONC-REEQ/17/2001). Este projecto, estuda formas de fazer com que os movimentos de um braço robótico se aproximem aos movimentos de um humano, dotando-o para tal de capacidades cinemáticas apropriadas.
- ii) *JAST - Joint Action Science and Technology*, financiado pela Comissão Europeia (ref. IST-2-003747-IP). O objectivo é fazer com que dois agentes (em configurações humano-humano, humano-robot, robot-robot) colaborem em diferentes tarefas, tais como, a construção e montagem conjunta de um objecto.
- iii) *LEMI “Learning to read the motor intention of others: towards socially intelligent robots”*, (POCI/V.5/A0119/2005, 08/2007-12/2008), projecto de colaboração internacional financiado pela FCT.

Capítulo 2

Estado da Arte

Os robots têm sido usados até há muito pouco tempo em campos isolados da sociedade humana devido às suas limitadas capacidades de manipulação e interação com humanos. Contrariamente, é esperado que os robots humanóides, pela sua forma, possam coexistir e trabalhar diariamente com humanos em hospitais, escritórios ou mesmo em casa, na execução de tarefas do dia-a-dia, ainda que as capacidades motoras e a inteligência destes robots estejam ainda longe das apresentadas pelos humanos para resolver tarefas diferentes e complexas. Como tal, é importante que os robots possam ser capazes de lidar com uma grande variedade de tarefas e objectos que se encontram em ambientes dinâmicos e não estruturados.

Relativamente ao estado da arte da robótica antropomórfica, será apresentado neste capítulo um estudo sobre o que é feito nesta área por alguns grupos de investigação e empresas, focando a atenção nos trabalhos mais relevantes e descrevendo a constituição dos diversos robots.

Brooks and Stein (1994) apresentaram o robot *Cog*, um torso humanóide equipado com uma cabeça, olhos e braços que se moviam e algumas capacidades básicas para ouvir, aprender e falar. Embora o controlo de movimentos seja um assunto que necessita de ser desenvolvido, nomeadamente a execução de movimentos de forma aproximada aos movimentos humanos, passou a dar-se mais

relevância à cognição e aprendizagem. De notar que esta área da robótica está preocupada não só em criar agentes que sejam antropomórficos na sua estrutura física, mas também na aparência (Bekey, 1998). O objectivo final será o de introduzir robots humanóides num ambiente humano para que seja possível auxiliar, por exemplo, idosos e deficientes motores, usando para o efeito uma linguagem simples e natural de comunicação que não envolva uma aprendizagem prévia por parte dos humanos. Para que este objectivo seja atingido, diversos temas de estudo são abordados, entre eles: i) interface humano-robot intuitivo - a cooperação com humanos só é possível se o robot for capaz de comunicar, interagir e colaborar de uma forma natural e intuitiva. Interfaces que envolvam vários canais de comunicação, tais como voz, gestos e expressões, são essenciais e tornam a interacção mais natural e a programação do robot mais eficiente, levando desta forma a que a interacção seja mais flexível; ii) expressão e percepção de emoções (Breazeal, 1998; Itoh et al., 2004) - por ser uma parte importante da comunicação entre humanos, é igualmente importante que os robots apresentem estas capacidades; iii) aprendizagem ou imitação, de forma a que seja possível ensinar tarefas a partir de demonstrações (Erlhagen et al., 2006a,b) de forma a permitir a qualquer pessoa programar o robot para diferentes tarefas.

2.1 Critérios e princípios de *design*

Um projecto capaz de responder a todos os desafios (colocados a este tipo de robot) requer uma integração intensiva das partes mecânica, electrónica e computacional. Há na história diversos relatos de pessoas que tentam replicar humanos construindo autómatos. Leonardo da Vinci foi um dos primeiros, construindo entre 1495 e 1497 um humanóide articulado (Rosheim, 1997). Recentemente, os resultados positivos alcançados por alguns grupos de investigação fizeram aumentar o interesse pela robótica humanóide, sendo apresentados alguns casos neste capítulo.

Para que um robot seja visto como humanóide, é importante que se pareça

com um humano, não sendo contudo estritamente necessário que este tenha um tamanho humano. Em termos de visualização, é fundamental que este tenha proporções antropométricas correctas, permitindo uma associação fácil com um humano (mesmo que o robot não tenha um aspecto exactamente humano). Um robot humanóide está normalmente dotado de um grande número de graus de liberdade (*DoF - Degrees of Freedom*), de modo a ter a capacidade de executar movimentos complexos. O robot *ARoS*, cuja concepção e construção é descrita neste trabalho, tem poucos graus de liberdade quando comparado com outros humanóides, simplificando o controlo e permitindo que a investigação se foque em questões como a percepção e a cognição.

O robot terá que estar dotado de sistemas coordenados entre si, que cooperem para conseguir usar a sua mobilidade e capacidades sensoriais, aplicando-as à tomada de decisões acerca das tarefas a realizar, necessitando para tal de uma percepção do ambiente que o rodeia. Possuir informação sensorial adequada e um sistema de controlo dos movimentos que assegure a robustez do sistema e a segurança do utilizador, é outro pré-requisito fundamental exigido a qualquer robot de serviço.

2.2 Exemplos de robots

De entre os robots humanóides, destacam-se alguns criados para terem uma aparência física humana (também denominados de andróides) como o *EveR-2* (ver Figura 2.1(b)) (Lee et al., 2008) construído pelo *Korea Institute of Industrial Technology*, ou o *Repliee Q1* (ver na Figura 2.1(a) a versão 2) (Minato et al., 2004) construído pela Universidade de Osaka. Estes são especialmente orientados para interagir com humanos, mantendo até uma conversa.

Outra tendência na investigação da robótica humanóide passa pelo andar bípede, destacando-se entre estes a investigação da Honda com o robot *Asimo* (Sakagami et al., 2002) na Figura 2.1(c). Outro exemplo da investigação feita em andar bípede é o robot *JOHNNIE* (Pfeiffer et al., 2002), construído pela

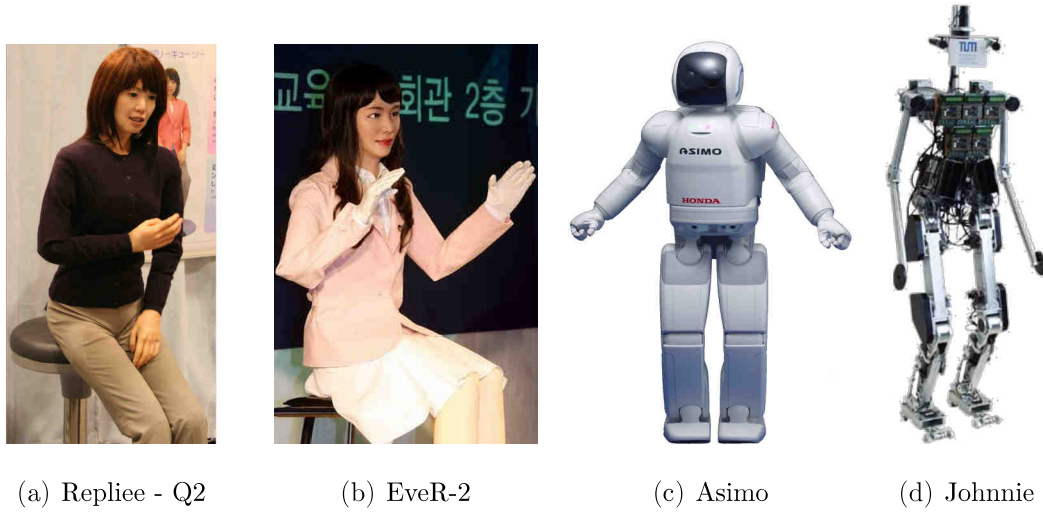


Figura 2.1: Alguns robots humanóides

Universidade Técnica de Munique (ver Figura 2.1(d)).

2.2.1 Robot *ARMAR*

O objectivo principal deste robot é a programação e execução de tarefas de manipulação, usando um mapeamento em tempo real de uma tarefa demonstrada por uma pessoa (Asfour et al., 2000).

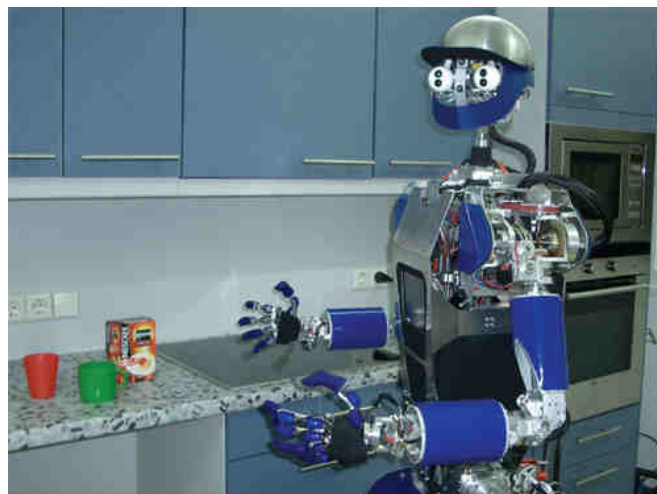


Figura 2.2: Robot humanóide *ARMAR III*, imagem retirada de Asfour et al. (2006a).

O robot *ARMAR III* mede aproximadamente $1,75\text{ m}$, uma altura similar à de um humano e tem um total de 49 DoF divididos por duas partes: um torso humanóide e uma plataforma para se movimentar. A parte superior do corpo é constituída por dois braços com 7 DoF , duas mãos, a cabeça e o pescoço (Asfour et al., 2006a). Tem um total de 27 DoF : a cabeça tem no total 7 DoF ; a cintura tem 3 DoF ; cada braço tem 7 DoF ; a plataforma móvel tem 3 DoF . Adicionalmente as mãos são compostas por 8 DoF cada uma. A parte superior do corpo (ver Figura 2.2) foi desenhada para ser modular e leve mantendo o tamanho e proporção de uma pessoa média.

A cabeça tem 7 DoF e está equipada com duas câmaras digitais. As câmaras podem ser rodadas segundo um ângulo *Tilt* comum e segundo um ângulo *Pan* independente, o sistema de visão está montado em cima de um pescoço com 4 DoF . A amplitude de movimentos do pescoço e dos olhos são similares aos de um humano. Na cabeça estão montados seis microfones para conseguir uma localização 3D da direcção do som.

O corpo do *ARMAR III* está equipado com 3 DoF no torso e dois braços de 7 DoF antropomórficos, e cada um equipado com uma mão de 8 DoF . De forma a que o sistema de manipulação esteja preparado para responder às exigências impostas por um ambiente humano, cada junta dos braços está equipada com um *encoder* e sensor de binário, permitindo um controlo de posição, velocidade e binário.

Este robot consegue estimar a posição 3D e orientação de objectos através do uso do sistema *stereo*, ao nível das capacidades motoras este robot consegue efectuar movimentos *human-like* para agarrar objectos, são usados diversos algoritmos de cinemática inversa e uma representação virtual do ambiente, para calcular possíveis colisões do braço com objectos ou com o corpo do robot, um movimento só é efectuado se não resultar em colisão. Como o braço tem 7 DoF possui um grau de redundância que é usado para que os limites das juntas não sejam atingidos (Asfour et al., 2006b).

2.2.2 Robot *James*

O robot *James* (ver Figura 2.3) foi projectado para um cenário onde é necessário manipular objectos. O tamanho do *James* é similar ao de uma criança de dez anos, construído em alumínio pesa ao todo 8 kg . Está equipado com olhos que se podem mover, um pescoço, um braço com uma mão e um conjunto de sensores que permitem lhe permitem obter informação do ambiente em que se insere.

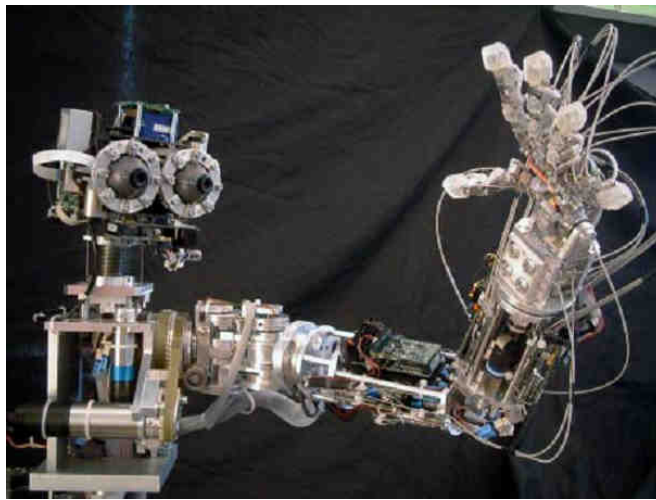


Figura 2.3: Robot humanóide *James* (imagem retirada de Jamone et al. (2006)).

A cabeça está equipada com duas câmaras que podem rodar segundo os ângulos *Pan* e *Tilt* independentemente (4 DoF), estão montadas num pescoço de 3 DoF , que permite a movimentação da cabeça num espaço rotacional 3D. O braço tem 7 DoF : três deles localizados no ombro; um no cotovelo; e três no pulso. A mão tem 5 dedos cada um com três juntas, um dos dedos, o polegar é oposto aos outros quatro tal como acontece na mão humana.

Tendo em conta que o *James* foi projectado para operar em ambientes onde é necessária a manipulação de objectos, foi dada especial atenção ao projecto do sistema sensorial integrado na mão, em cada dedo está incorporado um sensor táctil, estes são usados para caracterizar os objectos agarrados quanto à dureza,

complementando assim a informação visual adquirida (Jamone et al., 2006).

2.2.3 *Laboratory for Perceptual Robotics*

O *Laboratory for Perceptual Robotics*¹ recorre a sistemas robóticos que colaboram com humanos e outros robots, usando sistemas que tomam iniciativas não só derivadas da competição interna entre diferentes objectivos, mas também tendo em consideração os seus parceiros. Um dos objectivos principais da investigação tem a ver com a forma como um sistema robótico pode explicar porque é que se comporta de uma determinada forma, comunicando de forma eficiente com outros. De entre os diversos robots disponíveis neste grupo, destaca-se o robot humanóide *Dexter* (ver Figura 2.4).

Dexter

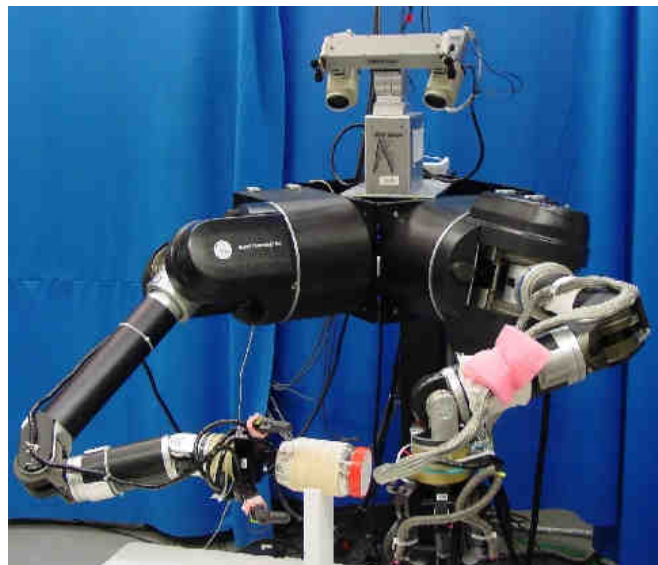


Figura 2.4: Robot Dexter (imagem retirada de www-robotics.cs.umass.edu).

O robot *Dexter* consiste em, dois braços manipuladores *WAM* (*Whole Arm*

¹ *Computer Science Department, University of Massachusetts Amherst*

Manipulator) comercializados pela empresa *Barrett Technologies*², duas mãos *Barrett Hand* da mesma empresa, e uma cabeça equipada com um sistema *stereo BiSight*. Os braços são manipuladores com $7 DoF$ e uma geometria aproximadamente antropomórfica, cada junta do braço consegue detectar quando um actuador sofre esforço, esta característica será usada para implementar algoritmos usados para agarrar objectos com ambas as mãos, por sua vez, cada dedo das mãos, está equipado com células de carga integradas nas pontas do dedo. A cabeça consiste num sistema mecânico com $4 DoF$, permite rodar a cabeça segundo os ângulos *Pan* e *Tilt*, e as duas câmaras podem ser rodadas independentemente (*verge*). Na cabeça estão ainda instalados quatro microfones para localizar e interpretar sons.

2.2.4 *Ruhr-Universität Bochum – Institut für Neuroinformatik*

O grupo de robótica autónoma foca a sua investigação nos problemas que advêm do trabalho com assistentes robóticos, robots semi-autónomos que interagem com humanos partilhando o mesmo espaço num ambiente natural. Estes devem interpretar comandos fornecidos por um humano e realizar acções como orientar-se na direcção de objectos, agarrá-los, manipulá-los e passá-los a um humano. Tendo por base a forma como os neurónios funcionam, é usada dinâmica de atractores para controlar os movimentos do robot, gerando trajectórias ou sequências de movimentos orientados à tarefa. Um exemplo de um robot construído neste instituto é o robot *Arnold* (Bergener et al., 1997), projectado para tarefas de serviço como localizar, reconhecer e agarrar objectos num ambiente desconhecido com obstáculos estáticos e dinâmicos. Embora tenham surgido posteriormente outros como o *CoRA*.

²www.barrett.com

CoRA

O robot *CoRA* - *Cooperative Robotic Assistant* (ver Figura 2.5) tem como tarefa colaborar com um humano, em tarefas simples de manipulação de objectos. O seu sistema sensorial é composto por visão, audição, dispositivos tácteis e sensores de força para obter informação da fala, gestos do humano, direcção do olhar do humano e reconhecimento de objectos (Iossifidis et al., 2004).

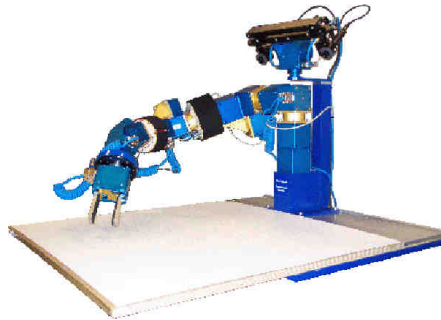


Figura 2.5: *CoRA* - *Cooperative Robotic Assistant* (imagem retirada de Iossifidis et al. (2002)).

O robot *CoRA* foi desenhado para ser um sistema antropomórfico e adaptado ao ambiente humano, usando tecnologia actual e bem estabelecida. É um torso antropomórfico fixo numa mesa de modo a interagir com um humano do outro lado da mesa.

Na cabeça tem $2 DoF$ (*Pan* e *Tilt*) e está equipada com duas câmaras a cores (formando um sistema *stereo*) e microfones. O sistema de visão é capaz de efectuar reconhecimento de objectos, reconhecer gestos e estimar posição e orientação 3D de objectos. Tem ainda um segundo sistema *stereo* fixo na mesa usado para estimar a direcção do olhar do humano com quem está a trabalhar. O sistema acústico é composto por microfones, um *software* de reconhecimento de fala e um sintetizador de fala.

A configuração do braço usada é semelhante à de um braço humano com um ombro de $3 DoF$, um cotovelo com $1 DoF$ e um pulso com $3 DoF$, perfazendo um total de $7 DoF$. No entanto o corpo tem também $1 DoF$, isto permite aumentar

o nível de redundância do sistema, oferecendo desta forma maior flexibilidade na escolha da posição para agarrar um objecto. Dois módulos do braço têm a capacidade de medir as forças aplicadas, conseguindo informação das forças aplicadas no ombro e no pulso. Desta forma é possível que o humano interaja fisicamente com o braço do robot, podendo corrigir trajectórias que possam levar o braço a colidir com um objecto não detectado pelo sistema de visão (ver Iossifidis et al. (2002) para mais detalhes acerca dos sistemas deste robot).

2.2.5 NASA

Os requisitos necessários às actividades no espaço fora de veículos (*EVA*³) a bordo da Estação Espacial Internacional, como as tarefas de manutenção e construção, têm um custo elevado e são perigosas. Os astronautas têm que se preparar intensivamente antes de deixarem a estação espacial, devendo nomeadamente ser extremamente cuidadosos na prevenção de danos no fato. As futuras missões de exploração espacial poderão vir a envolver construção e manutenção de *habitats*, exploração geológica, processamento de materiais, preparações de descolagem e aterragem, manipulação de instrumentos científicos, entre outras tarefas que expõem os humanos a ambientes perigosos.

Robonaut

O ramo tecnológico de sistemas robóticos no *Johnson Space Center* na NASA, está actualmente a desenvolver sistemas robóticos que permitam reduzir a actividade de astronautas no exterior e que apresentem rápidas capacidades de resposta. Um desses sistemas é o *Robonaut* (ver Figura 2.6), um robot humanóide capaz de interagir com sistemas externos à estação espacial (sistemas esses destinados apenas a humanos) e capaz de usar as mesmas ferramentas que um humano.

Os braços do *Robonaut* foram construídos à escala humana, de forma a que o tamanho seja similar ao de um astronauta num fato espacial. O tamanho do

³ExtraVehicular Activity

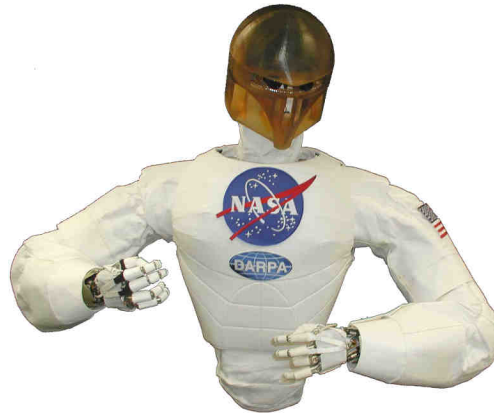


Figura 2.6: *Robonaut* (imagem propriedade de *Johnson Space Center*, NASA).

braço foi uma das considerações principais no seu projecto, podendo no entanto destacar outras, como:

- Força semelhante à de um humano;
- alcance à escala humana;
- resistência à temperatura, de modo a suportar oito horas de trabalho no espaço;
- movimentos suaves;
- redundância;
- segurança;
- gama de movimentos que excedam os de um membro humano.

As mãos do *Robonaut* têm um total de 14 *DoF*. São constituídas por um antebraço que contém 14 motores e os controladores electrónicos, um pulso com 2 *DoF* e uma mão de cinco dedos com 12 *DoF*. Parte dos graus de liberdade que a mão dispõe conferem-lhe a capacidade de manipular objectos (três dedos, sendo um deles o polegar), enquanto que os restantes permitem que um objecto seja agarrado de forma firme enquanto é manipulado (dedo anelar, mindinho e a palma da mão).

A cabeça está equipada com 2 pequenas câmaras que fornecem visão *stereo* ao operador, permitindo uma sensação de profundidade. A distância inter-ocular

das câmaras é semelhante à distância entre os olhos de um humano. No entanto já foi desenvolvido um novo sistema de visão para o robot que inclui duas câmaras maiores com controlo de *zoom*, ajuste de foco e da íris. O sistema possui ainda uma câmara mais pequena que fornece uma visão periférica. As câmaras movimentam-se de forma independente para seguir humanos e objectos simultaneamente. Tem um pescoço articulado, que permite ao operador orientar a cabeça do robot na direcção que desejar, usando um sensor de 6 eixos montado no capacete do operador. O pescoço tem $2 DoF$, *Pan* e *Tilt*. O uso de um capacete na cabeça, limita a flexibilidade do sistema de visão, porém, os requisitos do trabalho no espaço exigem protecção extra de modo a evitar que as câmaras fiquem demasiado expostas.

O torso consiste num endosqueleto em alumínio protegido por uma armadura exterior, que termina num ponto onde cada membro é montado. Este ponto está num lugar estratégico, tendo sido lá colocadas 3 células de carga de 6 eixos usadas para medir forças externas que afectem o robot. A armadura exterior protege o robot em vários aspectos: nos componentes electrónicos, na ocultação dos cabos de ligação e na atenuação dos impactos com o corpo. O espaço de trabalho de cada braço sobrepõe-se ao espaço do outro, por isso, e porque o robot irá trabalhar em espaços exíguos, é esperado que haja contactos entre braços ou dos braços com o ambiente que o rodeia. O robot lida com estas situações, visto que está preparado para tolerar colisões. A protecção exterior do corpo, está coberta por uma camada de protecção feita de um material esponjoso destinada a absorver os choques dos braços com o corpo.

Apesar deste robot ser tecnologicamente muito sofisticado, foi desenvolvido para ser teleoperado, ou seja, um humano controla remotamente as acções do robot, permitindo o controlo de todos os $43 DoF$. Para facilitar esta tarefa, um sistema de tele-presença fornece ao operador, através de realidade virtual, informação actualizada do estado do robot, de forma a que o operador sinta que está de facto no espaço de trabalho do robot.

2.2.6 Universidade de Waseda

A Universidade de Waseda, no Japão tem sido um dos principais lugares de pesquisa e desenvolvimento em robótica antropomórfica desde 1970. Desde então, foram aqui desenvolvidos vários robots humanóides integrando diversas tecnologias. Estes incluem o *WABOT-1* (Kato, 1973), capaz de andar usando os dois membros inferiores e de transportar objectos agarrando-os com as mãos que possuíam sensores tácteis; o robot músico *WABOT-2* (Sugano and Kato, 1987), que conseguia ler uma pauta musical com os olhos e tocar melodias de dificuldade média num teclado electrónico; o *Hadaly-2*, que trabalha em conjunto com um parceiro humano; e o robot bípede - o *WABIAN* Hashimoto et al. (2002).

Hadaly

Em 1995, foi criado o protótipo de um robot humanóide com vista a efectuar e realizar troca de informação com humanos, com o nome de *Hadaly-1* (Hashimoto et al., 1997).

Na continuação deste projecto foi construído o *Hadaly-2* (ver Figura 2.7) que integra reconhecimento do ambiente por visão com a capacidade de conversação (reconhecimento e síntese de fala) e usa gestos no seu comportamento, sendo assim capaz de interagir com humanos. Possui funções de interacção física para manter contacto directo com humanos de uma forma suave e segura. A sua forma não é totalmente antropomórfica, possuindo rodas na parte inferior que lhe permitem movimentar-se.

Hashimoto et al. (2002) oferecem uma visão geral dos sistemas que constituem este robot. A mão tem uma forma antropomórfica com quatro dedos e 13 *DoF*. O polegar tem 4 *DoF*, tal como um dedo humano, enquanto os outros dedos têm 3 *DoF*. Na base de cada dedo está colocado um sensor de força/binário de seis eixos. Através desta característica torna-se possível uma interacção directa com humanos, como por exemplo apertar mãos ou passar objectos. A configuração e localização dos graus de liberdade do braço foram determinadas tendo como



Figura 2.7: Hadaly-2 (imagem retirada de Hashimoto et al. (2002).)

referência o braço humano. O braço *WAM-10*, usado por este robot, tem $7 DoF$, tal como um braço humano. Desta forma, cada braço do robot (incluindo os dedos) possui $20 DoF$. Quando o braço é esticado, o peso máximo que é suportado é de aproximadamente $500 g$.

Está equipado com um mecanismo de ajuste da capacidade de resposta e viscosidade de forma mecânica. Usando este mecanismo, é possível interagir com humanos de uma forma segura. Para controlar o braço e antebraço, foram usados motores AC e DC e travões electromagnéticos que ajustam a capacidade de reposta e a viscosidade da junta, equipando cada junta com três actuadores. Quanto à mobilidade deste robot, é usado um mecanismo de rodas para se movimentar. Controlando as duas rodas frontais, é possível fazer com que o robot se desloque para a frente e para trás e rode sobre si próprio. O corpo tem um grau de liberdade, o que torna possível que o robot mova a parte de cima do corpo mesmo parado.

As mãos, os braços e o corpo contêm no total 71 actuadores, dotando o robot de $41 DoF$. De modo a controlar eficientemente este sistema de larga escala, foi construído um sistema de controlo distribuído. Num nível de controlo superior, é usado um computador para gerir a comunicação com os sistemas de voz e visão,

para o planeamento do movimento do manipulador e para o controlo das rodas e do corpo. O nível de controlo inferior é composto por dois sistemas de controlo para o manipulador esquerdo e direito, usando cada um deles um computador e placas de interface para o controlo dos movimentos. Para o desenvolvimento do software de controlo foi usada linguagem *C*.

WENDY

Apesar dos robots humanóides mais impressionantes serem dotados de pernas que usam para se moverem, no caso deste robot *WENDY* (*Waseda ENgineering Designed sYmbiont*), ilustrado na Figura 2.8, a prioridade deste projecto foi dotar o robot com a capacidade de adaptar o seu movimento ao dos humanos enquanto é assegurada uma interacção segura (Morita et al., 1999). Usando uma cobertura para absorver os choques e movimentos reflexos criados através da medição dos impactos que sofre consegue garantir alguma segurança na interacção com humanos.

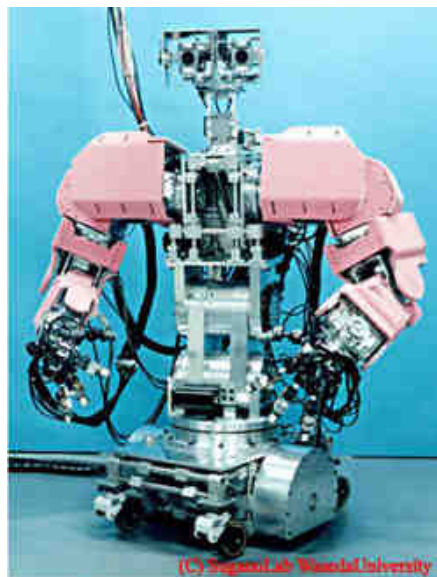


Figura 2.8: Wendy - Waseda ENgineering Designed sYmbiont (imagem propriedade de *Sugano Lab, Waseda University*).

Morita et al. (1999) fazem uma descrição dos componentes deste robot: a cabeça serve não só para adquirir informação visual mas também para interagir em tarefas com humanos, já que os humanos inferem o que o robot está a fazer através dos movimentos dos olhos. Na cabeça estão duas câmaras *CCD* para detectar objectos e humanos. Os olhos têm um mecanismo que lhes proporciona *3 DoF*, enquanto que o pescoço tem *4 DoF*. A localização das câmaras é importante uma vez que afecta não só o processamento de imagem, mas também a impressão causada nos humanos, estando separadas tanto quanto possível de modo a que o sistema de visão detecte objectos a *10 cm* da face.

A cintura é usada para expandir o espaço de trabalho do robot, podendo adicionalmente ser feitos movimentos com todo o corpo de modo a reduzir as forças de impacto resultantes de uma colisão com um humano. A cintura tem *3 DoF*, de forma a que o robot se possa dobrar até chegar ao chão, sem perder estabilidade e cair.

Neste tipo de robot os manipuladores são usados para interagir com os humanos levando a cabo tarefas de cooperação. O *WENDY* está ainda equipado com dois braços *WAM-10* de *7 DoF* que permitem que haja uma interacção segura entre o robot e um humano (Morita and Sugano, 1997). Tem a capacidade de controlar a fricção que sente nos dedos para ajustar a pressão que exerce no objecto, do mesmo modo que os humanos alteram a pose dos dedos relativamente à forma do objecto que manipulam. Para maximizar a capacidade de adaptação ao objecto, os dedos são curvos, em borracha, contendo adicionalmente unhas para objectos que necessitem de uma pressão maior.

ROBITA

As expressões não verbais como os gestos, movimento dos olhos, postura e expressão facial, desempenham uma função muito importante na interacção entre humanos. O objectivo da construção deste robot *ROBITA - Real-world Oriented BI-modal Talking Agent* (ver Figura 2.9), foi a implementação do corpo de um

robot capaz de usar expressões faciais e conversação de forma natural usando gestos como apontar, combinados com expressões verbais (“aquele” ou “este”) (Tojo et al., 2000).



Figura 2.9: *Robita* - Robot capaz de usar expressões faciais e do corpo para comunicar.

Quanto à sua constituição, é composto por duas câmaras *CCD*, duas sobrancelhas, dois microfones omnidireccionais, dois braços e um sistema de rodas para se movimentar. Estes dispositivos permitem ao robot fazer reconhecimento de fala, detecção da direcção da fonte de som, reconhecimento de gestos, reconhecimento de caras, sintetização de frases (em Japonês) entre outras.

Quanto aos graus de liberdade controláveis deste robot, tem na cabeça 6 *DoF* (olhos - 2 *DoF*; pescoço - 2 *DoF*; sobrancelhas - 2 *DoF*), os braços têm cada um 4 *DoF* e o corpo tem 1 *DoF*, todos eles podem ser controlados independentemente. No corpo está montado um sistema de alimentação eléctrica cuja fonte de energia podem ser baterias ou a rede eléctrica, um processador que controla os actuadores, uma unidade de controlo dos motores, uma unidade para controlo

das câmaras, um computador para a fala e umas colunas de som. Os processos que exigem um maior custo computacional, tais como o reconhecimento de fala e o processamento de imagem são executados por computadores externos, sendo enviados comandos para o robot através de uma rede sem fios. O computador a bordo do robot apenas é responsável pela actuação nos dispositivos. Externamente existem sete computadores ligados em rede, responsáveis por todo o processamento de informação adquirida.

WAMOEBA

O *WAMOEBA* (*Waseda Artificial Mind On Emotion BAse*) é completamente autónomo visto que possui baterias, estando todo o sistema de controlo alojado no seu corpo. Tem dois braços com 7 *DoF*, que usa para expressar emoções através de gestos e para realizar interacção física com humanos (ver Figura 2.10).

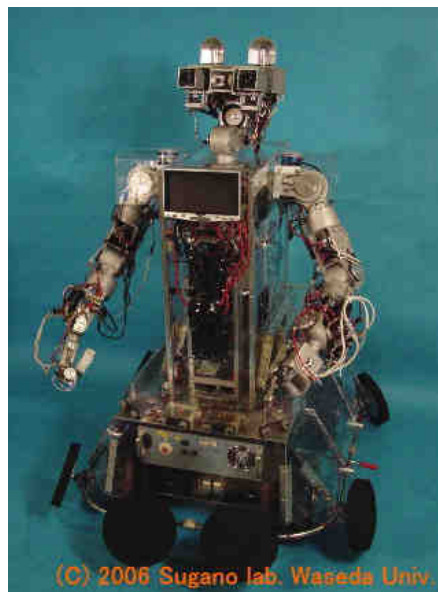


Figura 2.10: *Wamoeba* (imagem propriedade de *Sugano Lab 2006*, *Waseda University*).

As mãos estão equipadas com um sensor fotoelétrico para detectar os objectos que agarra e usa os sensores nos dedos para medir a força com que aperta um

objecto. Uma vez que os humanos conseguem gerar muita informação visual, sonora e táctil é importante que o robot seja capaz de a detectar e interpretar. Está equipado para tal com quatro sensores de ultra-sons para calcular distâncias, duas câmaras *CCD* a cores e dois microfones (colocados à esquerda e à direita). Adicionalmente, tem dois ecrãs *LCD* (um na cabeça e outro no peito) para indicar o seu estado emocional. O sistema que é usado para se deslocar permite que se movimente em diversos pisos, inclusivamente ao ar livre, podendo ser operado durante cerca de 30 minutos através de baterias Sugano (2005).

2.2.7 *PHRIENDS*

O projecto europeu *PHRIENDS* (*Physical Human-Robot Interaction: Dependability and Safety*), que conta com a participação de diversas instituições, visa o desenvolvimento de robots que coexistam e cooperem com humanos, permitindo uma interacção humano-robot que seja confiável e segura. Para tal, desenvolvem componentes chave para a próxima geração de robots, os quais terão que cumprir regras de segurança muito exigentes, permitindo ainda um bom desempenho. Isto implica enfrentar novos desafios no projecto dos diversos componentes do robot, incluindo mecânica, controlo, algoritmos de planeamento e sistemas de supervisão. A abordagem deste trabalho consiste num projecto integrado de sistemas robóticos para uma interacção física entre humano-robot, revolucionando o paradigma clássico do projecto de robots industriais (projecto rígido para precisão e controlo activo de segurança) para uma nova abordagem que visa um projecto de robots intrinsecamente seguros e um controlo que ofereça bom desempenho.

Justin

No âmbito do projecto *PHRIENDS* é usado um robot desenvolvido pelo *DLR - Institute of Robotics and Mechatronics*. Trata-se de um torso humanóide, sendo apenas constituído pela parte superior, com dois braços e duas mãos (ver Figura 2.11). Este sistema é usado para testar conceitos de controlo e programação

Capítulo 2. Estado da Arte

aplicados à manipulação de objectos com duas mãos. O projecto deste robot usou trabalho prévio deste instituto, nomeadamente o braço *LWR - Lightweight Robot* (Albu-Schäffer et al., 2007) e a mão *DLR Hand* (Borst et al., 2003). O torso tem por base a mesma tecnologia usada pelo braço *LWR*.

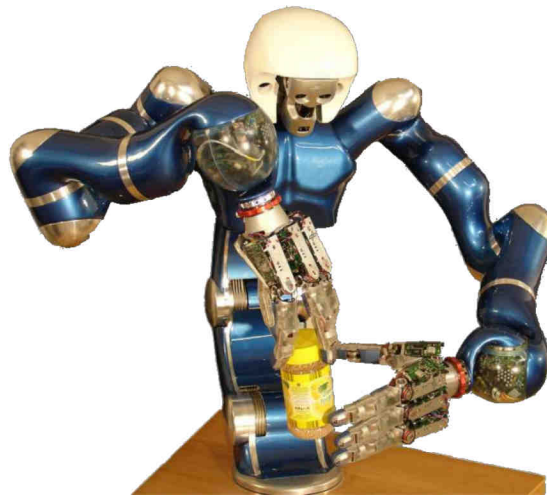


Figura 2.11: *Justin* - Robot do projecto PHRIENDS, imagem adaptada de Borst et al. (2007).

Tal como os humanos, que alargam o seu espaço de trabalho combinando movimentos de braços e do corpo, o robot é capaz de expandir o espaço onde pode manipular objectos através dos graus de liberdade que o torso possui. A forma modular do braço permite que o robot tenha uma configuração humanóide com um braço esquerdo e um braço direito. Consegue assim manipular objectos de grandes dimensões recorrendo aos dois braços em simultâneo. A estrutura de controlo é modular, permitindo integrar facilmente diversas ferramentas para o controlo do sistema, tal como o *Matlab/Simulink*. O sistema robótico tem um total de 43 *DoF* controláveis, dois braços com 7 *DoF* cada, duas mãos com 13 *DoF* cada, uma unidade *Pan-Tilt* para a cabeça com 2 *DoF* e um torso com 3 *DoF*. Adicionalmente, e para além dos sensores de força em cada uma das juntas controláveis, foram integrados sensores de força com 6 *DoF* nos pulsos e nas pontas dos dedos.

Para além da percepção táctil permitida pelas mãos, a percepção visual de-

semprenha um papel importante em tarefas de manipulação. Idealmente, é possível estimar a posição de objectos arbitrários e até reconstruir a sua geometria tridimensional. Para esta finalidade, o sistema de modelação multi-sensorial e tridimensional *3DMo* foi integrado no robot.

2.2.8 *Motoman*

Esta empresa comercializa soluções de automação e robótica para aplicações que envolvam: soldadura, montagem, corte de materiais, manuseamento de materiais, entre outras. Tem por isso vários produtos que incluem braços robóticos, alguns deles, mais ou menos humanóides. Desde Outubro de 2007 comercializa um torso estático equipado com dois braços de *7 DoF* (ver Figura 2.12(a)) orientado para o manuseamento de materiais e montagem.

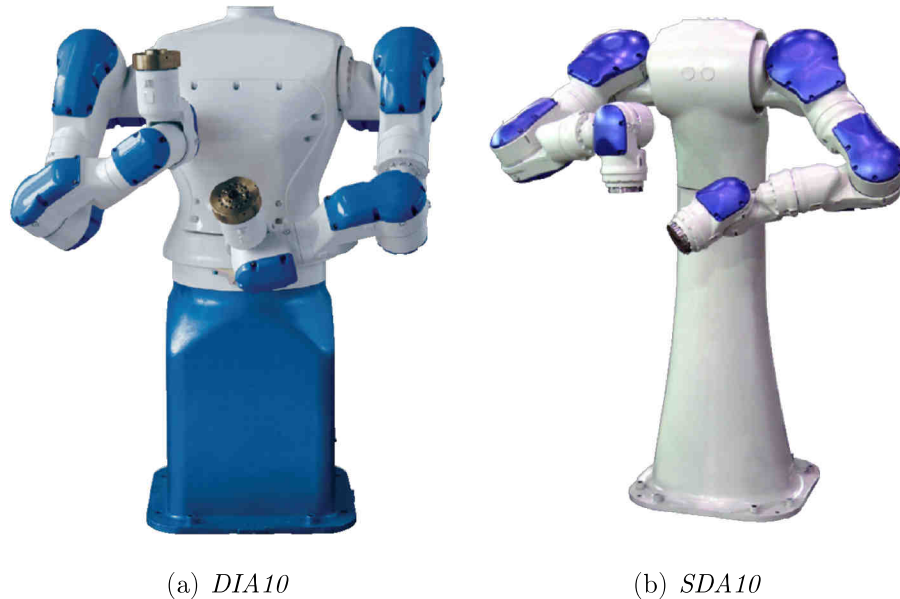


Figura 2.12: Modelos comercializados pela *Motoman*

SDA10

O modelo *SDA10* (ver Figura 2.12(b)) que está disponível comercialmente desde Junho de 2008, é a evolução do modelo anterior (*DIA10*) pelo que tam-

bém está equipado com dois braços de $7 DoF$ e uma junta rotativa na “cintura”, permitindo a rotação do torso. Todos os cabos de ligação são internos ao robot reduzindo possíveis interferências destes nos movimentos.

Este robot tem uma capacidade de carga de 10 kg por cada braço. Os braços podem trabalhar em conjunto numa tarefa duplicando assim a capacidade de carga total do sistema, e oferecendo a possibilidade de lidar com objectos maiores.

O controlo deste robot é feito usando um controlador externo *NX100* que permite o controlo simultâneo de vários eixos e oferece conectividade a um computador através de diversos protocolos standard (Ethernet/IP, Profibus-DP, etc). A eventual desvantagem do uso deste controlador é o seu tamanho ($120\text{ cm} \times 65\text{ cm} \times 65\text{ cm}$) e o peso (entre 150 kg e 250 kg), o que dificultaria a montagem desta estrutura numa plataforma móvel.

2.3 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados diversos robots humanóides já existentes com capacidades similares às do *ARoS*, na sua maioria, robots que têm vindo a ser desenvolvidos por universidades, embora também estejam presentes alguns protótipos construídos por empresas, e até uma solução comercial, embora muito recente, como base para um robot humanóide/antropomórfico.

A seguir apresentam-se os componentes que foram seleccionados para a construção do *ARoS*, e as razões por detrás da selecção dos respectivos componentes.

Capítulo 3

Componentes do Robot

Ao longo deste capítulo serão apresentados os componentes que constituem o robot, efectuando uma descrição sobre cada um deles e destacando os aspectos mais relevantes. O robot é composto por um braço antropomórfico com 7 *DoF*, uma mão com 4 *DoF*, um pescoço com 2 *DoF* e um sistema de visão *stereo*. Uma estrutura metálica suporta todos os componentes e dá-lhe forma como se de um esqueleto se tratasse.

3.1 Braço

Fabricado pela *AMTEC Robotics / Schunk*, é um braço antropomórfico com 7 *DoF* (ver Figura 3.2). As razões principais que levaram à escolha deste braço foram: ser antropomórfico, leve, não necessitar de um controlador externo e ainda o preço, que, comparativamente a outros braços disponíveis no mercado com características semelhantes é significativamente mais baixo.

Será de seguida feita uma descrição deste braço abordando 4 aspectos principais: estrutura, sistema de actuação, sistema sensorial e controlo.

Relativamente à estrutura, o braço é leve e robusto, tendo sido projectado de forma modular, possibilitando o controlo individual de cada módulo, permitindo ainda conectar ao módulo M6 (ver Figura 3.1) diferentes *end-effectors*. Original-

Capítulo 3. Componentes do Robot

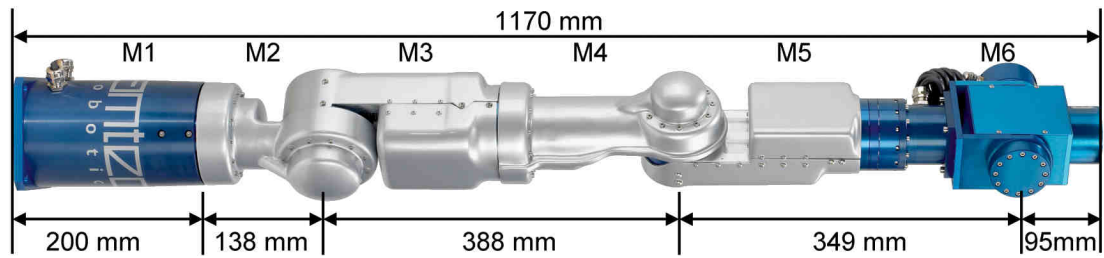


Figura 3.1: Configuração base do braço antropomórfico identificando os diferentes módulos e as medidas.

mente este braço veio equipado com uma garra, embora neste robot tenha sido usada uma mão robótica. Todos os elos são ocos, com juntas rotacionais, tornando possível que todos os cabos necessários à ligação dos diferentes módulos fiquem no interior do braço. Todo o sistema electrónico necessário ao seu funcionamento está totalmente integrado nos módulos de forma a que os requisitos de espaço sejam mínimos, não tornando o braço demasiado volumoso. A estrutura leve permite uma optimização do peso total do braço, sendo isto conseguido através do uso de materiais compósitos, neste caso, fibra de carbono reforçada para os módulos *M1* a *M5* (Figura 3.1). O pulso (módulos *M6* e *M7*), por sua vez, é feito em alumínio, garantindo ao mesmo tempo uma elevada rigidez. O peso total do braço é de 12 kg sendo capaz de manusear cargas até 3 kg (ver Tabela 3.1).

Descrição	
Especificações Mecânicas	
Capacidade de carga	3 kg
Peso	12 kg
Temperatura ambiente	$5^{\circ}\text{C} \rightarrow 55^{\circ}\text{C}$
Repetibilidade	1 mm
Especificações Eléctricas	
Tensão nominal	24VDC
Corrente nominal	2A
Corrente máxima	12A

Tabela 3.1: Algumas especificações técnicas.

Cada junta é composta por uma engrenagem do tipo *Harmonic Drive* actuada

por um servo-motor DC sem escovas, o que permite aumentar a longevidade do motor, não necessitando de manutenção relevante. Todos os módulos têm um amplificador e controlo de movimento integrado, sendo o controlo de baixo nível feito directamente em cada uma das juntas. Os módulos estão conectados a um barramento CAN ligado directamente a um computador, o que oferece flexibilidade na comunicação com cada módulo. Torna-se necessário apenas um cabo para ligar o braço ao computador. Quanto à alimentação do braço, esta é feita através de uma fonte externa de 24VDC, sendo contudo possível também a utilização de baterias. Adicionalmente, todos os módulos M1 a M6 (Figura 3.1) estão equipados com um travão magnético, permitindo desta forma que as juntas exerçam força, mesmo quando o braço está desligado. Sendo os módulos independentes, o braço é composto de módulos com características diferentes. Na Tabela 3.2 estão os limites de cada módulo que compõem o braço, a posição angular mínima e máxima, o mínimo incremento em graus e ainda a velocidade e aceleração máxima que cada um permite.

Junta Rotativa	Pos. Mín	Pos. Máx.	Inc. Mín.	Vel. Máx.	Acel. Máx.
1	-165°	165°	0,6°	52,2°/s	208,8°/s ²
2	-15°	181°	0,6°	52,2°/s	208,8°/s ²
3	-165°	165°	0,6°	52,2°/s	208,8°/s ²
4	-25°	196°	0,5°	41,2°/s	164,8°/s ²
5	-165°	165°	0,5°	41,2°/s	164,8°/s ²
6	-120°	120°	2°	240°/s	960°/s ²
7	-180°	180°	3°	360°/s	1440°/s ²

Tabela 3.2: Limites de cada junta ilustradas na Figura 3.2.

Quanto ao sistema de actuação, cada módulo tem integrado toda a electrónica de controlo necessária e, como tal, funciona de forma independente. O controlo é feito gerando os valores de cada módulo, passo a passo, de forma a que o movimento conjunto de todos produzam um movimento suave e fluído. O micro-controlador incorporado em cada módulo torna o processamento de dados mais rápido.

No que diz respeito ao sistema sensorial, o braço está equipado com *encoders*

Capítulo 3. Componentes do Robot

incrementais em todos os módulos para o controlo de posição e velocidade, tendo ainda a capacidade de monitorizar a temperatura de cada módulo.

Relativamente ao sistema de controlo sendo este descentralizado, permite um processamento de sinal digital independente para cada módulo.

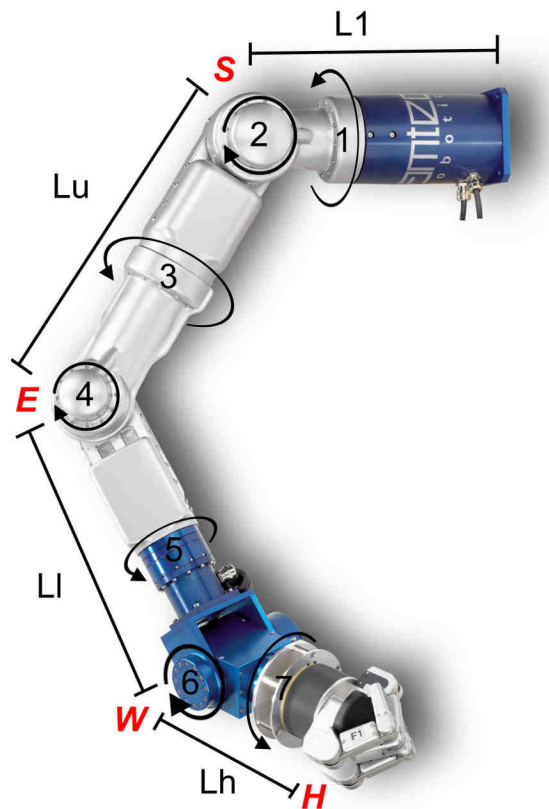


Figura 3.2: *Amtec Lightweight Arm 7 DoF* - Braço antropomórfico equipado com uma mão robótica.

Na Figura 3.2, podem identificar-se alguns pontos que encontram uma correspondência mais ou menos directa com um braço humano. Tentando aproximar a forma do braço robótico a um braço humano, podem estabelecer-se as seguintes relações:

- Ponto S - Ombro;
- Ponto E - Cotovelo;
- Ponto W - Pulso;
- Ponto H - Mão.

Fazendo estas associações é possível dividir o braço robótico nas mesmas partes que um braço humano, nomeadamente braço e antebraço. Usando as medidas presentes na Figura 3.1, pode assim afirmar-se que:

- L_1 - distância do centro do corpo ao ombro;
- L_u - comprimento do antebraço - 39 cm aprox.;
- L_l - comprimento do braço - 35 cm aprox.;
- L_h - medida do pulso à palma da mão - não aplicável no caso da Figura 3.1.

O braço ilustrado no esquema da Figura 3.1 representa a versão base deste tipo de braço. Na Figura 3.2, o braço está equipado com uma mão em vez da garra, sendo que a configuração usada neste robot tem, além da mão robótica, um sensor de força entre o pulso e a mão como ilustra a Figura 3.3

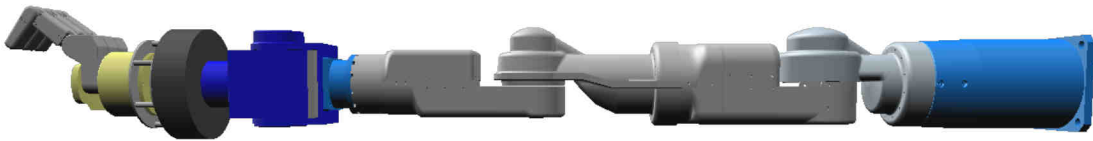


Figura 3.3: Modelo a três dimensões da configuração do braço usada.

Nesta configuração, o comprimento total do braço é de aproximadamente $1,4\text{ m}$ (da base à palma da mão). A medida L_h ilustrada na Figura 3.2 é de cerca de 26 cm , quando adicionado o sensor de força.

Como ilustrado na Figura 3.4, o sensor de força que está montado no pulso do braço que equipa o robot tem a capacidade de fazer medições, não só das forças mas também dos binários em três eixos. Estas capacidades de medida dotam o braço com a capacidade de se mover até que atinja uma determinada força (com uma resolução de $0,1\text{ N}$).

Este braço, com 7 DoF , é extremamente versátil e apropriado para uma variedade de aplicações: sistemas de inspeção, robótica de serviços, interacção homem-máquina e ainda o uso em plataformas móveis, entre outras.

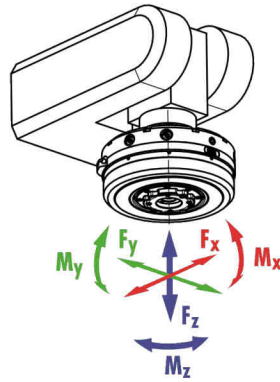


Figura 3.4: Esquema que ilustra as medições que o sensor colocado no pulso é capaz de realizar (o modelo apresentado não ilustra o pulso do braço usado).

3.2 Mão

Os humanos usam as mãos com dois propósitos: para actuar no ambiente, sendo usadas para agarrar e manipular objectos e, ao mesmo tempo, para recolher informação ao tomar contacto com objectos. A mão escolhida para este robot serve apenas como um actuador, servindo para agarrar objectos, embora esta tenha sensores de força nos dedos que fornecem alguma informação sobre o objecto agarrado.

Na Figura 3.5(a) está ilustrada a mão escolhida para este robot, a *Barrett Hand BH8-262*, tem três dedos, tendo cada um deles um motor associado. Nas Figuras 3.5(b) e 3.5(c) está ilustrado o espaço de trabalho dos dedos, ou seja, o conjunto de posições que os dedos podem assumir usando os graus de liberdade que possuem. Apesar de ter duas juntas em cada dedo, apenas é possível usar uma delas. Na Figura 3.6(a) pode observar-se em pormenor um dedo com as rotações possíveis, cuja base pode rodar 140° , enquanto que a falange roda 45° .

Para manipular objectos simples, agarrando-os de forma firme, é suficiente fazer-se uso de apenas uma destas rotações, sendo neste caso apenas usada a rotação da base dos dedos. No total equipam a mão quatro motores, um para cada dedo e um para o *spread* que diz respeito à capacidade dos dedos $F1$ e $F2$

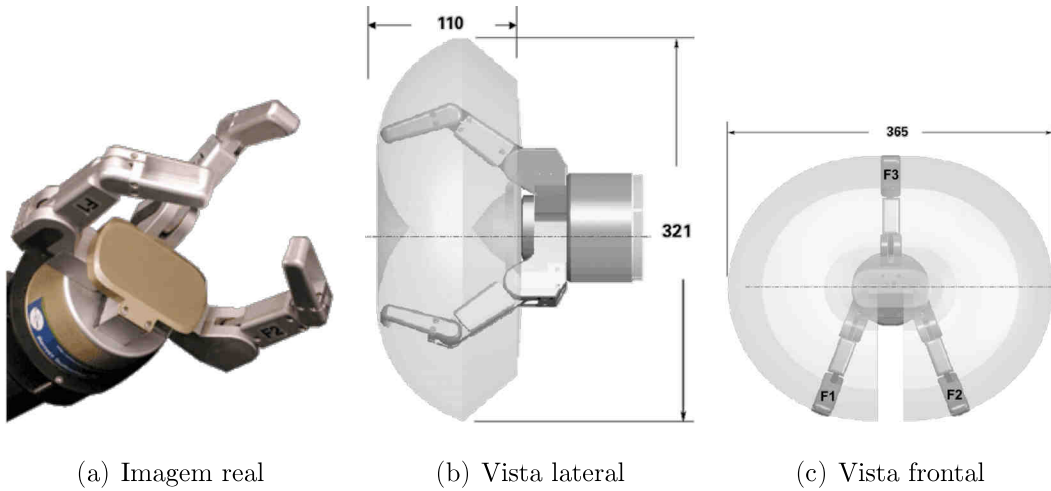


Figura 3.5: Mão robótica fabricada pela *Barrett Technologies*. Ilustração do espaço de trabalho dos dedos e algumas medidas (*mm*) importantes da mão (imagens adaptadas de Townsend (2000)).

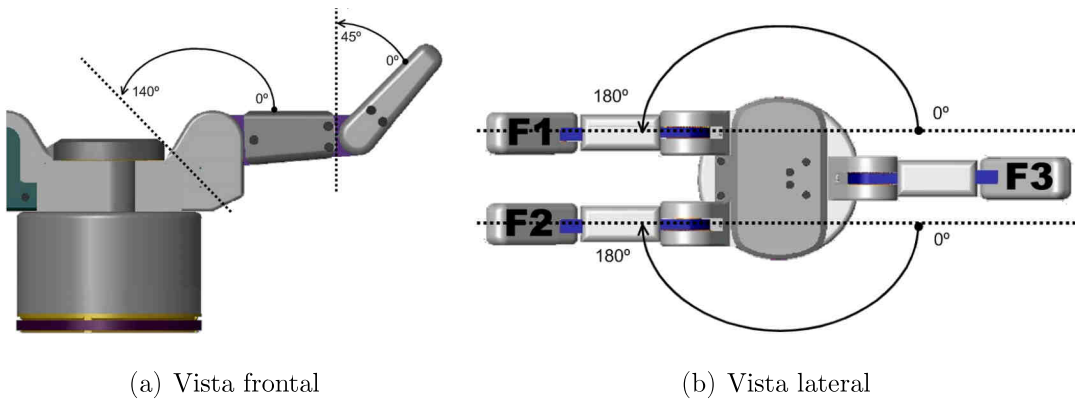


Figura 3.6: Limites angulares dos dedos (imagem adaptada de Townsend (2000)).

para rodar em torno da palma da mão, como ilustrado na Figura 3.6(b).

A mão foi projectada para ser muito leve ($1,18\text{ kg}$), como descrito na Tabela 3.3, não sendo desta forma a capacidade de carga do braço (apenas 3 kg , ver na Tabela 3.1) significativamente afectada.

Se a mão fosse demasiado pesada, a capacidade do robot para manipular objectos estaria severamente comprometida, sendo este um aspecto importante

Capítulo 3. Componentes do Robot

Velocidade de abertura dos dedos	140°/s
Velocidade de <i>spread</i>	360°/s
<i>Encoders</i> ópticos incrementais	resolução de 0,008°
Sensor de força	até 15N na ponta do dedo
Comunicação	RS-232C
Peso	1,18 kg
Capacidade de carga	6 kg
Motores	DC servo sem escovas
Alimentação	Fonte externa AC 100/240 V AC, 50/60 Hz
Tamanho	295 × 145 × 40 mm
Peso	1,3 kg

Tabela 3.3: Algumas especificações da mão robótica utilizada fornecidas pelo fabricante *Barrett Technologies*.

e um ponto favorável nas características desta mão robótica. Embora maior do que uma mão humana, o seu tamanho é adaptado à manipulação de objectos com dimensões apropriadas ao manuseamento por humanos. Desta forma, o robot está qualificado a realizar trabalho em contacto directo com humanos, partilhando os mesmos objectos.

Como ilustrado na Figura 3.6(b), os dedos *F1* e *F2* têm a capacidade de rodar em torno da palma da mão. Este facto pode ser interpretado como tendo dois polegares, sendo assim capaz de se adaptar a uma grande variedade de objectos e tornando possível o uso de diferentes estilos para agarrar objectos.

Os motores usados na actuação dos dedos, são servo-motores sem escovas. Este tipo de motor caracteriza-se por ter um binário elevado, baixo peso e uma resposta rápida. Como não tem escovas a manutenção necessária é praticamente inexistente. O sistema de actuação, sendo totalmente eléctrico torna-se mais limpo e silencioso. O tipo de engrenagem usada permite que os dedos façam pressão no objecto, mesmo havendo falha de energia assegurando um aperto firme.

O CPU presente no interior possui um interpretador de comandos de alto nível, estando desta forma a programação simplificada e o tráfego de informação necessário reduzido. A comunicação é implementada usando o protocolo série RS-232C, o que permite que a integração com qualquer computador fique facilitada

e acessível em qualquer plataforma, quer ao nível do hardware (os cabos são acessíveis), quer ao nível do software (qualquer sistema operativo básico possui controladores nativos para comunicação série).

Do ponto de vista da destreza e antropomorfismo, esta mão não seria a escolha mais adequada quando comparada com outras (Biagiotti et al., 2004): a mão do robot *Robonaut* da NASA foi construída para se adaptar a ferramentas desenhadas para a mão humana (Ambrose et al., 2000), sendo contudo apenas um protótipo, não comercialmente disponível; a mão *DLR Hand II* (Butterfass et al., 2001) tem uma forma e tamanho mais aproximado ao humano, sendo porém de complexa adequação ao braço do robot. A selecção da mão centrou-se alternativamente na adequação ao tipo de objectos e manipulação exigidos a este robot. Adicionalmente, esta mão pode ser ligada directamente ao braço seleccionado, visto este oferecer essa possibilidade.

3.3 Corpo

Para o corpo foi projectada uma estrutura que permite alojar todos os componentes que compõem o robot e lhe dá forma. Esta foi construída de forma a ter proporções antropométricas, ser robusta e segura, permitindo-lhe suportar não só o peso do braço, mas também os seus movimentos. Foi necessária a definição de pontos de fixação que permitissem montar o sistema de visão completo, neste caso, de forma anatomicamente correcta do ponto de vista humano. Como a estrutura oferece ao robot a sua forma foi usado um estudo antropométrico do corpo humano, de modo a que o tamanho e as proporções da estrutura fossem correctas do ponto de vista antropomórfico.

A antropometria, estudando as medidas físicas do corpo humano, foi usada para que o tamanho da estrutura fosse proporcional ao braço robótico, conferindo ao robot uma proporcionalidade humana. Tendo em conta o estudo apresentado por Drillis and Contini (1966), foi possível calcular a altura da estrutura relativamente ao comprimento do braço.

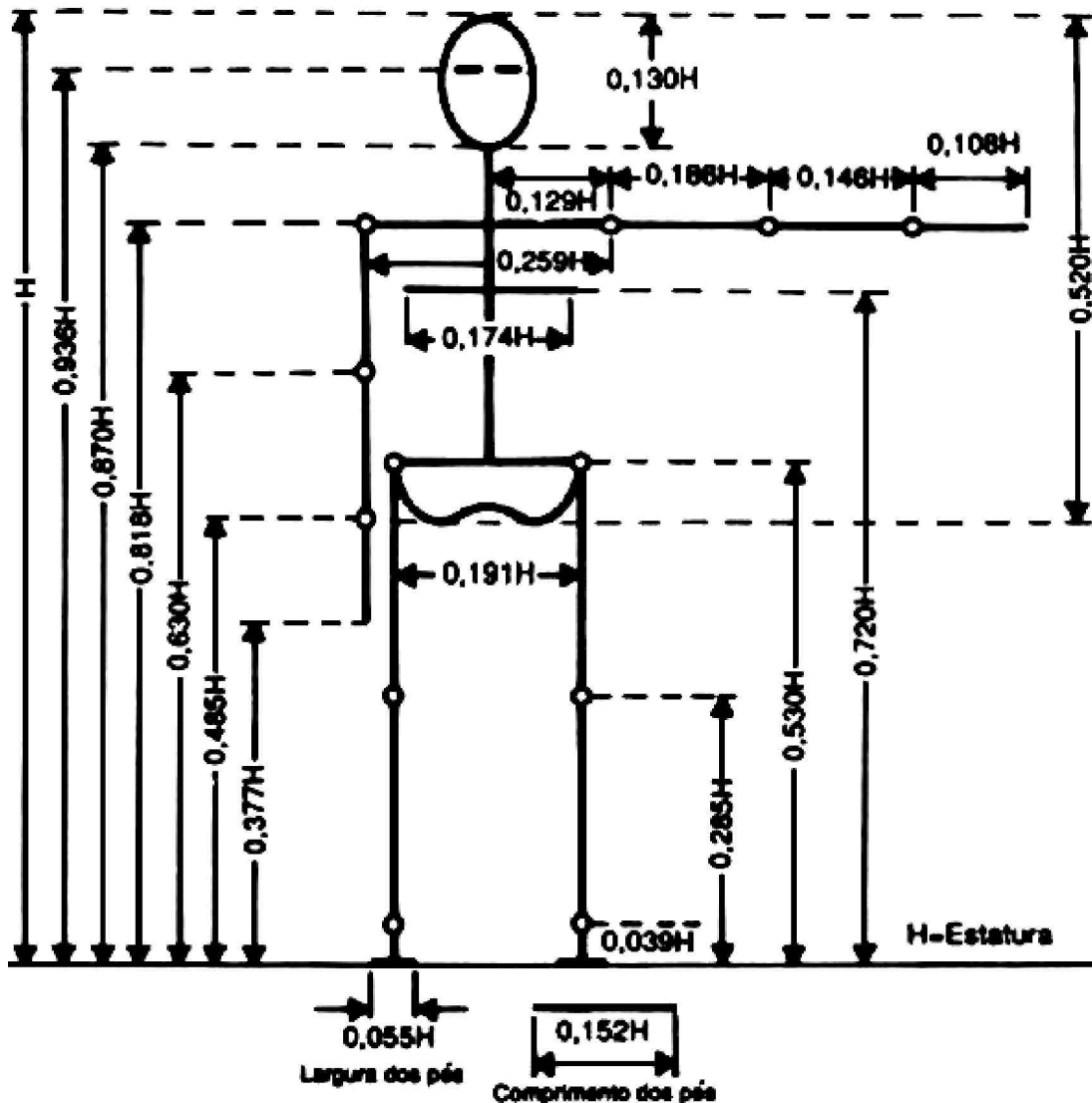


Figura 3.7: Proporções do corpo humano por Drillis and Contini (1966).

O estudo de Drillis and Contini (1966) teve como objectivo o projecto e construção de próteses avançadas. Para a determinação das relações antropomórficas entre as medidas do corpo humano estes investigadores fizeram um estudo que contou com a participação de 20 sujeitos do sexo masculino, permitindo obter boa aproximação das diversas medidas do corpo humano relativamente à altura do sujeito. Outros estudos sobre as medidas do corpo humano têm sido apresentados (Bjørnstrup, 1995), focando diferentes aspectos dos segmentos do corpo

tais como massa, volume, densidade, centro de massa entre outros. Na construção do nosso robot, para que a partir das medidas do braço robótico se consiga projectar uma estrutura proporcional ao braço, interessa apenas uma estimativa do comprimento de cada segmento do corpo humano.

3.3.1 Dimensões e proporções antropomórficas

Para obter um dimensionamento correcto da estrutura, foi necessário ter em consideração diversas medidas. Estas foram calculadas de modo a que a estrutura fosse proporcional ao braço:

- Altura do robot - H
- Altura dos ombros - H_{ombros}
- Largura dos ombros - L_{ombros}
- Largura do tronco - L_{tronco}

A partir da Figura 3.7, pode-se tirar que a altura até aos ombros é:

$$H_{ombros} = 0,818H, \quad (3.1)$$

onde H é a altura da planta do pé ao topo da cabeça, estabelecendo uma comparação entre o braço humano e o braço robótico e analisando as medidas do braço robótico de que dispomos, constata-se que a medida entre o ombro e o cotovelo é de $0,388\text{ m}$ (como se pode ver na Figura 3.2). Recorrendo à Figura 3.7 conclui-se que:

$$0,186H = 0,388\text{ m} \Leftrightarrow H = \frac{0,388}{0,186} \quad (3.2)$$

Para calcular a altura que a estrutura terá até aos ombros, usando a Eq. 3.1, pode-se substituir H por H_{ombros} :

$$0,388 = \frac{0,186}{0,818} H_{ombros} \quad (3.3)$$

então,

$$H_{ombros} = 0,388 \frac{0,818}{0,186} \Leftrightarrow H_{ombros} = 1,71\text{ m} \quad (3.4)$$

Capítulo 3. Componentes do Robot

Porém, uma altura até aos ombros de $1,71\text{ m}$ faria com que o robot fosse demasiado alto em comparação com uma pessoa de estatura média. Apesar do braço usado ter forma antropomórfica, este é consideravelmente maior do que um braço de uma pessoa de estatura média. Para que a diferença de alturas entre o robot e um humano não fosse muito acentuada, uma vez que isto poderia causar desconforto na interação da pessoa com o robot, resolveu-se adoptar uma altura ligeiramente menor para a estrutura, decidindo-se, por conseguinte, que a altura até aos ombros fosse de $1,5\text{ m}$.

Da mesma forma, foi calculada a largura que a estrutura teria através da largura do tronco ilustrada na Figura 3.7 por:

$$L_{tronco} = 0,191H \quad (3.5)$$

Usando a relação encontrada para H na equação 3.2, pode dizer-se que:

$$L_{tronco} = 0,191 \times \frac{0,388}{0,186} \Leftrightarrow L_{tronco} \approx 40\text{ cm} \quad (3.6)$$

Usando estas medidas, projectou-se numa ferramenta 3D a estrutura que dá forma ao robot, como se mostra na Figura 3.8.

Esta estrutura tem $1,5\text{ m}$ de altura e 40 cm de largura (calculadas com base em proporções antropomórficas), e a base forma uma cruz com $1,2\text{ m}$ de lado, sendo esta apenas uma estimativa inicial, foi necessário validar esta escolha. Após o desenho da estrutura, algumas das suas características foram validadas, recorrendo a cálculos analíticos ou através de simulação.

3.3.2 Resistência do material

O primeiro passo para a construção da estrutura foi a escolha do material; tendo que ser resistente e com um custo aceitável, considerou-se inicialmente uma opção entre alumínio ou ferro. Optou-se pela construção em tubo rectangular de ferro com dimensões de $15\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ e 5 mm de espessura. Este material, além de ser mais barato do que alumínio, é também mais pesado, o que para uma estrutura

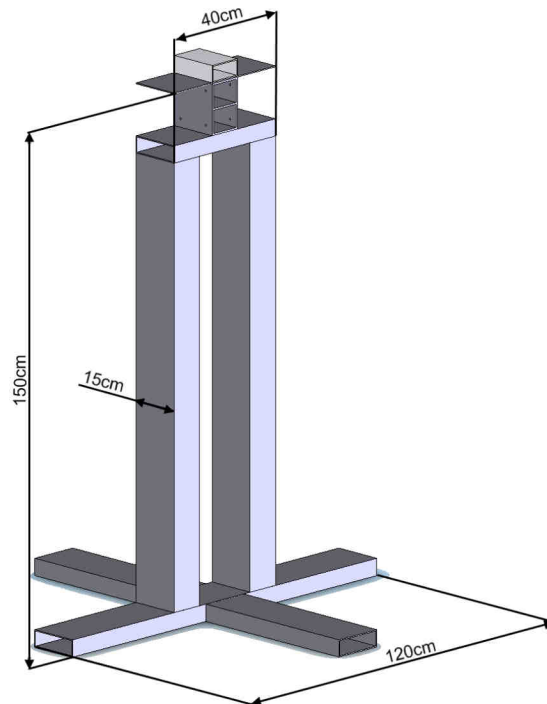


Figura 3.8: Projecto da estrutura numa ferramenta de desenho gráfico 3D.

que não será fixada ao chão é conveniente, pois oferece maior estabilidade. Após esta escolha, foi validada a resistência deste tipo de material, através de uma análise estática da estrutura, para que por um lado, fosse obtido algum “*feedback*” das partes da estrutura mais problemáticas face ao “*stress*” provocado pelo braço, e por outro lado, se verificasse a resistência do material. Através da utilização de um *software* apropriado (*COSMOSXpress*, um módulo extra para o *software* de desenho *SolidWorks*), foram feitas simulações da estrutura: considerou-se a base da estrutura fixa no chão, uma barra quadrada com o mesmo peso do braço e uma força de $20N$, o equivalente a 2 kg aplicada na extremidade. A gravidade foi considerada em todos os testes realizados. Para a primeira iteração da estrutura, foram obtidos os seguintes resultados:

Como se pode observar na Figura 3.9, a parte mais sensível da estrutura é o apoio onde será montado o braço. Neste caso, existem algumas zonas onde se

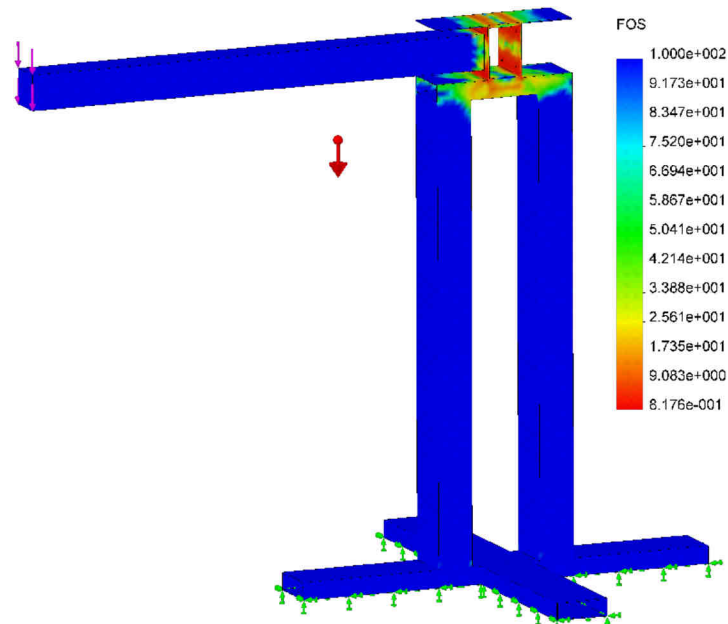


Figura 3.9: Teste de resistência da estrutura inicial.

verifica um $FOS^1 = 0,82$: sendo este valor inferior a 1, esta parte da estrutura não seria capaz de resistir nas condições desta primeira iteração, podendo eventualmente quebrar, ainda que o material usado nesta parte seja já mais espesso do que o resto da estrutura. Pode-se ver na Figura 3.10 o pormenor deste teste para esta parte da estrutura:

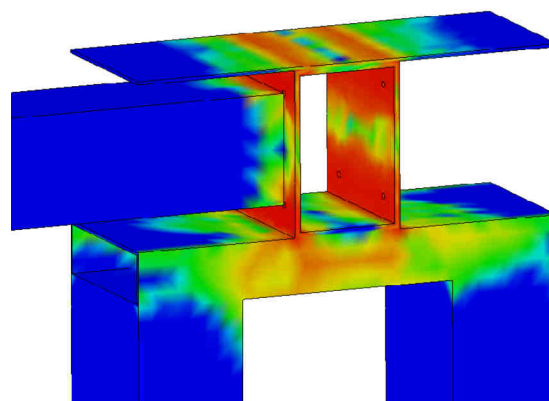


Figura 3.10: Pormenor do resultado dos testes de resistência na parte do apoio do braço.

¹Factor Of Safety

Para resolver este problema, esta parte mostrada na Figura 3.11(a) teve que ser redesenhada, sendo adicionada uma barra horizontal no interior para lhe conferir maior resistência, como ilustra a Figura 3.11(b)

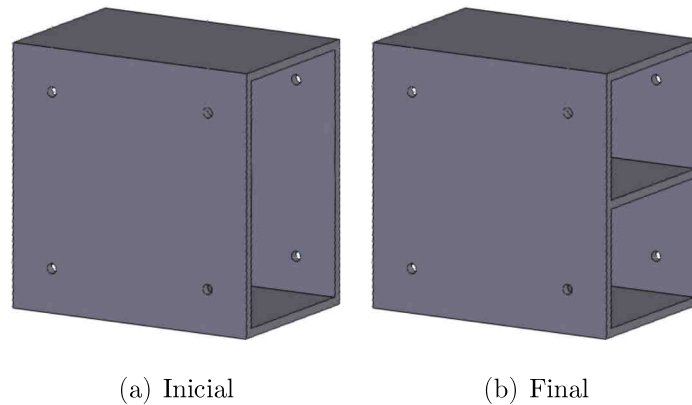


Figura 3.11: Apoio do braço visto em pormenor.

Repetiram-se então os testes com o novo apoio para o braço, apresentando já melhores resultados, como mostra a Figura 3.12

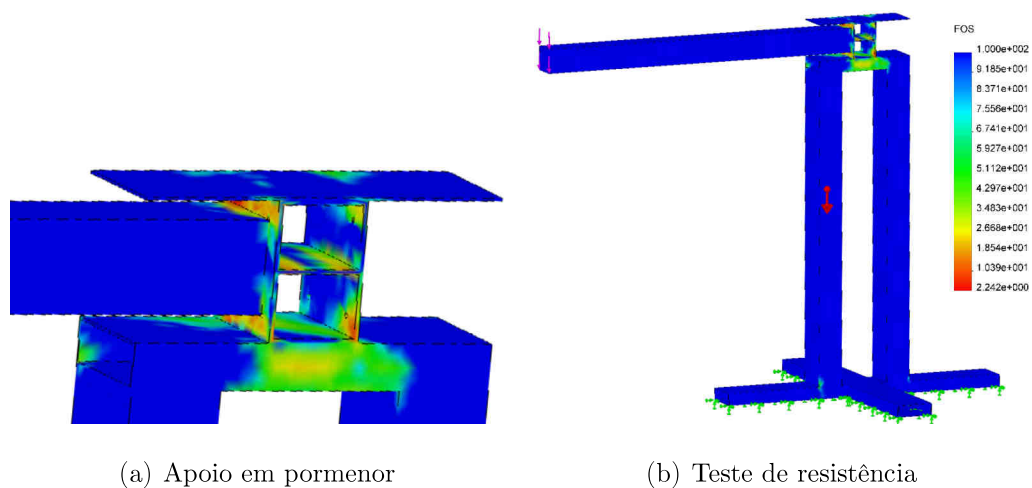


Figura 3.12: Apoio do braço visto em pormenor.

Esta versão da estrutura apresenta já um FOS mínimo de 2.2 como se observa na Figura 3.12(b). Desta forma, a estrutura está sobre-dimensionada, oferecendo um grau de confiança elevado e uma margem de segurança de 1, 2. Este teste va-

lida a resistência do material escolhido, sendo no entanto ainda necessário validar a estabilidade da estrutura.

3.3.3 Estabilidade da estrutura

Os cálculos seguidamente apresentados, dizem respeito à estabilidade da estrutura, procurando acautelar situações que possam provocar instabilidade na estrutura. Para que a esta estrutura seja estável, não deve tombar quando o braço faz movimentos bruscos; para tal, a base onde assenta a estrutura tem que ser suficientemente grande para oferecer estabilidade. Considere-se o seguinte exemplo da Figura 3.13, onde foi colocada uma barra rectangular com o peso do braço (considerou-se que o braço se possa mover rodando em torno do ponto B da Figura 3.13, simplificando os cálculos):

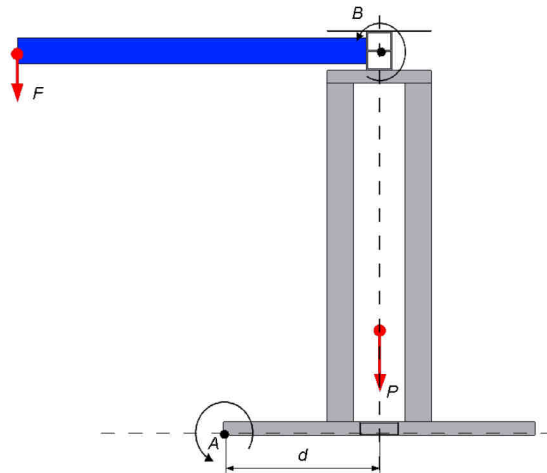


Figura 3.13: Exemplo onde se mostram as forças presentes na estrutura.

Considerando que ao mover-se, o braço exerce uma força F como indica a Figura 3.13 e que não podemos permitir que haja rotação em torno do ponto A , a base de sustentação e o peso da estrutura devem fazer com que não exista rotação em torno do ponto A no sentido anti-horário, de modo a que a estrutura não caia. Desta forma, a soma dos momentos de todas as forças aplicadas ao ponto A terá

que ser inferior a zero, considerando o sentido anti-horário como positivo:

$$\sum T_A < 0 \quad (3.7)$$

Caso esta condição se verifique, a estrutura manter-se-á estável. Para tal, d , que representa o comprimento de cada secção que compõe a base, terá que ser suficientemente grande.

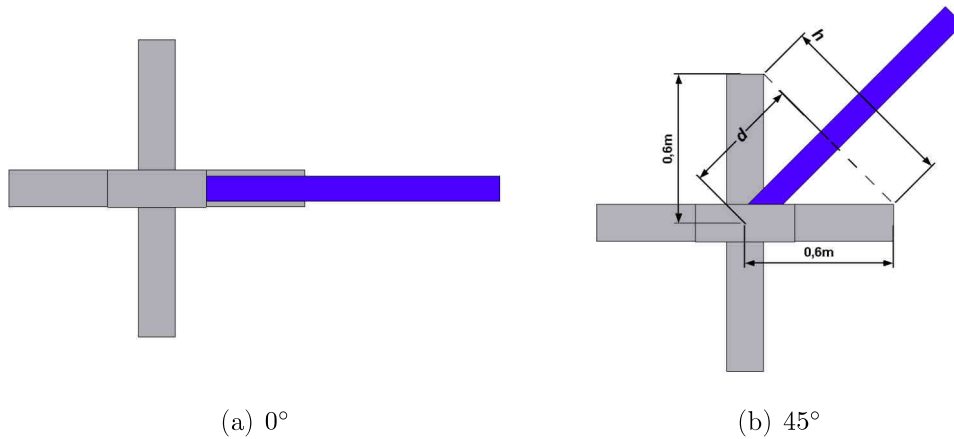


Figura 3.14: Dois casos em que o braço se encontra esticado, visto de cima.

Olhando ainda para o exemplo da Figura 3.13, o pior caso não será quando o braço se encontra alinhado com o corpo como mostra a Figura 3.14(a), mas sim quando o braço faz um ângulo de 45° com o corpo como se mostra na Figura 3.14(b). Será nesta situação que a distância d ilustrada na Figura 3.13 será menor.

$$0,6^2 = \left(\frac{h}{2}\right)^2 + d^2 \Leftrightarrow d = \frac{0,6}{\sqrt{2}} \Leftrightarrow d = 0,42m \quad (3.8)$$

Então o ponto de rotação A da Figura 3.13 estaria a 42 cm do centro do corpo e não a 60 cm que é o comprimento de cada secção da base.

Tendo em conta as forças aplicadas na estrutura, como mostra a Figura 3.15, apenas a componente Pt do peso aplicada no centro de massa da estrutura R e a componente Ft da força F aplicada no ponto C contribuem para que haja rotação em torno do ponto A .

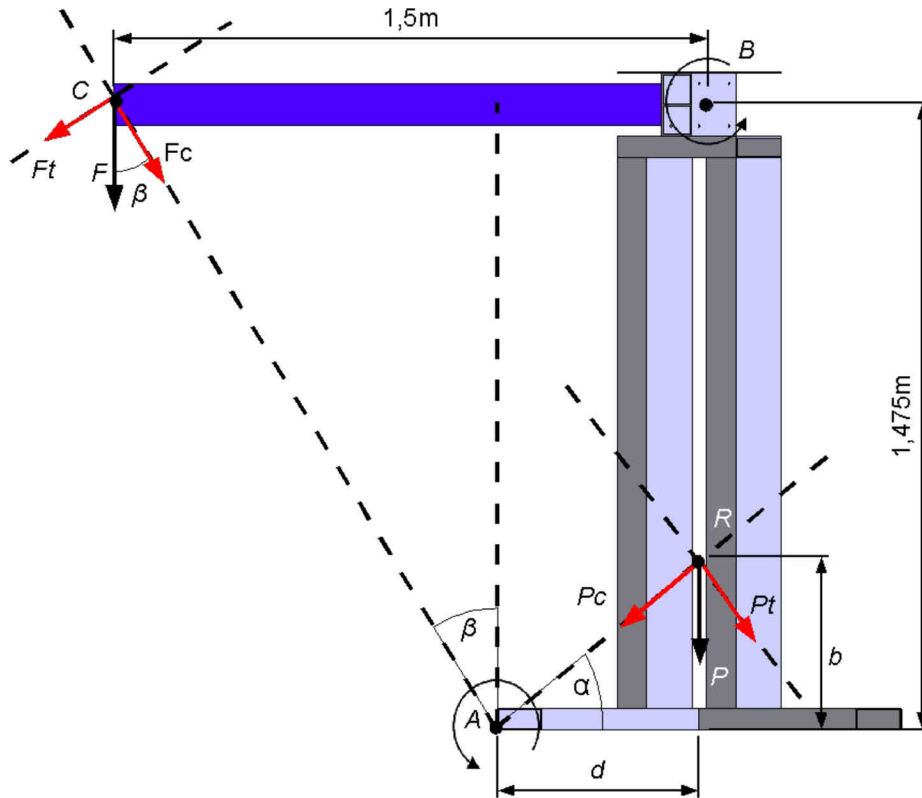


Figura 3.15: Teste de estabilidade da estrutura onde se mostram as forças aplicadas no pior caso a que estará sujeita.

A massa da estrutura depende do material usado, tendo sido neste caso usado um tubo rectangular de ferro com dimensões $15\text{cm} \times 5\text{cm}$ e 5mm de espessura. Este material apresenta um peso de $8,9\text{kg/m}$, usando-se $5,25\text{m}$ de tubo, somando a isto o peso do apoio do braço:

$$M = 8,9 \times 5,25 + 0,2 \Leftrightarrow M = 46,93\text{kg} \quad (3.9)$$

O ponto R da Figura 3.15 onde é aplicado o peso é o centro de massa da estrutura e pode ser calculado por:

$$R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i r_i, \quad (3.10)$$

onde r_i é a altura até ao centro de massa de cada uma das secções que compõem a estrutura, m_i a massa de cada secção e M o peso total da estrutura. Para este cálculo dividiu-se a estrutura em três partes:

- Base (b)
- Corpo (c)
- Apoio do braço (a)

Temos então que:

$$R = \frac{1}{M} (m_b r_b + m_c r_c + m_a r_a) \Leftrightarrow R \approx 0,43m, \quad (3.11)$$

sendo que o valor do centro de massa é a medida b representada na Figura 3.15, e tem um valor de 43 cm .

Calcula-se o momento do peso (P) em torno do ponto A da seguinte forma:

$$T_{PA} = P_t \overline{AR} \Leftrightarrow T_{PA} = P \cos(\alpha) \overline{AR}, \quad (3.12)$$

onde P é a força que o peso exerce na estrutura, dado pelo produto da massa pela aceleração da gravidade, \overline{AR} é a medida em linha recta desde o ponto A até ao ponto R na Figura 3.15, e α é calculado através da razão entre b e d da Figura 3.15, então:

$$T_{PA} = M g \cos(\alpha) \overline{AR} \Leftrightarrow T_{PA} = 195\text{ Nm} \quad (3.13)$$

Da mesma forma pode calcular-se o momento da força F em torno do ponto A :

$$T_{FA} = F_t \overline{AC} \Leftrightarrow T_{FA} = F \sin(\beta) \overline{AC} \quad (3.14)$$

A força exercida pelo braço no ponto C da Figura 3.15 depende da massa do braço e da aceleração máxima por ele permitida:

$$F = m a \Leftrightarrow F = (m_{\text{braco}} + m_{\text{mao}}) a \quad (3.15)$$

Recorrendo às Tabelas 3.1 e 3.3, temos que o peso do braço é de 12 kg e a mão pesa cerca de 1 kg . a é a aceleração linear naquele ponto que pode ser calculada recorrendo à aceleração angular máxima do braço na junta próxima ao corpo:

$$a = \gamma r, \quad (3.16)$$

Capítulo 3. Componentes do Robot

onde γ é a aceleração angular máxima permitida pela primeira junta do braço (ver Tabela 3.2) e r o raio da curva, que neste caso foi simplificado para ser a distância do centro do corpo até a extremidade do braço.

Por fim, tem-se então que o momento da força F é dado por:

$$T_{FA} = (m_{braco} + m_{mao}) \gamma r \sin(\beta) \overline{CA} \Leftrightarrow T_{FA} \approx 76 Nm \quad (3.17)$$

Resumindo, $T_{PA} = 195 Nm$ e $T_{FA} = 76 Nm$. Logo, e como $T_{PA} > T_{FA}$, a estrutura é suficientemente estável para suportar os movimentos do braço, cumprindo todos os objectivos para os quais foi desenhada.

3.4 Pescoço

Um dos propósitos do pescoço humano é o de podermos direccionar o nosso olhar para diversos locais sem que seja necessário movimentar o resto do corpo. No caso do nosso robot, foi utilizada uma unidade *Pan-Tilt* (Figura 3.16(a)), comercializada pela *Directed Perception*², permitindo direccionar as câmaras do robot.

A Figura 3.16(b) mostra que o *Pan-Tilt* tem um tamanho compacto, o que o torna apropriado para ser usado como pescoço neste robot. Este componente oferece uma solução versátil para esta parte do robot, uma vez que é leve, compacto, pode ser controlado por computador e, sendo um dispositivo disponível “*off-the-shelf*”, garante ser fiável e ao mesmo tempo de baixo custo, cumprindo todos os requisitos desta aplicação.

O *Pan-Tilt* pode ser controlado por computador através de comandos enviados pela porta série, usando para tal o protocolo de comunicação RS-232/485. Esta é uma característica extremamente importante, pois possibilita que a cabeça do robot se possa mover “*on-the-fly*” ao mesmo tempo que interage com um parceiro.

O controlo é feito em tempo real, aceitando até 60 comandos/segundo e permitindo um controlo muito preciso da posição (absoluta e relativa), velocidade

²www.dperception.com

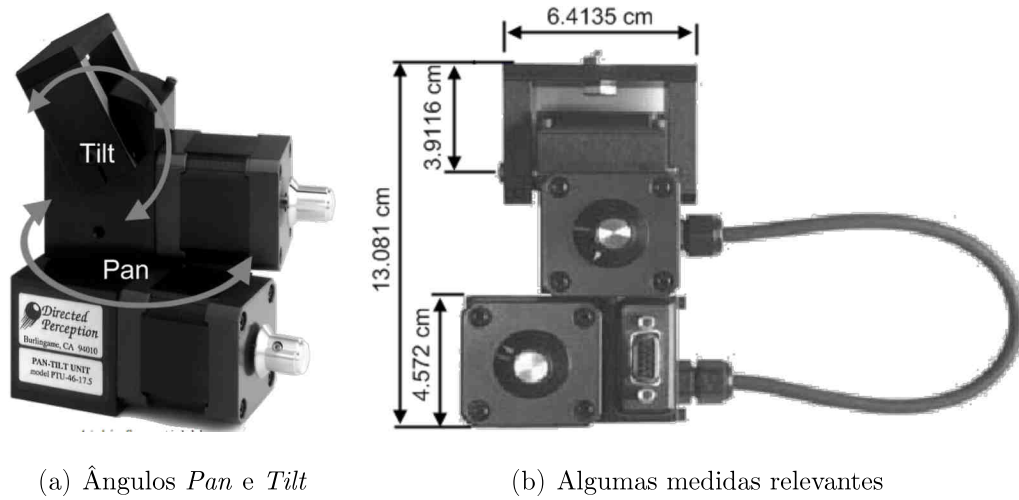


Figura 3.16: Unidade Pan-Tilt *PTU-D46-17* comercializado pela *Directed Perception* (imagens adaptadas do documento de especificações técnicas do fabricante).

Pan	
Velocidade mínima	0.0123°/s
Velocidade máxima	300°/s
Gama angular	+159° → -159°
Tilt	
Velocidade mínima	0.0123°/s
Velocidade máxima	300°/s
Gama angular	+31° → -47°
Resolução da posição	
1/2 passo	0,05143°
1/8 passo	0,0123°
Capacidade de carga	
Peso	2,7 kg
Altura	1,36 kg
Tensão de alimentação	13,2 cm
Temperatura	9 → 30VDC
	-20°C → +60°C

Tabela 3.4: Algumas especificações da unidade Pan-Tilt fornecidas pelo fabricante *Directed Perception*.

e aceleração. Na Tabela 3.4 podemos ver algumas especificações técnicas deste componente, entre elas as velocidades máximas e gamas angulares, assim como a resolução permitida (sendo esta inferior a $1/10^\circ$). O robot é dotado com $2 DoF$

no pescoço, o suficiente para conseguir direccionar as câmaras para todas as direcções pretendidas (o pescoço humano tem 3 *DoF*).

No que diz respeito ao ângulo *Pan*, o pescoço humano pode rodar entre -100° e $+100^\circ$ (onde 0° representa o humano a olhar em frente). A Tabela 3.4 mostra a gama angular do ângulo *Pan*, sendo esta superior à de um pescoço humano. Relativamente ao ângulo *Tilt*, o pescoço humano consegue rodar de -103° até 71° (onde 0° representa o humano a olhar em frente. Recorrendo de novo à Tabela 3.4 pode ver-se que a gama de valores que este dispositivo permite é inferior.

3.5 Olhos

Nos humanos, os olhos permitem captar grandes quantidades de informação relevante do mundo que nos rodeia, sendo como tal extremamente importantes. Da mesma forma, é através dos olhos que o robot adquire grande parte da informação sensorial de que necessitará para realizar uma tarefa - neste caso, a posição tridimensional no mundo dos diversos elementos com os quais vai interagir.



Figura 3.17: Sistema *stereo* comercializado pela empresa *Videre Design*, modelo *STH-DCSG-VAR-C*, usado no robot.

Este modelo (*STH-DCSG-VAR/-C*) comercializado pela *Videre Design*³ consiste em duas câmaras VGA com uma resolução de 640x480 píxeis montadas numa estrutura de alumínio. As câmaras são ligadas ao PC através de um interface digital *Firewire* (IEEE 1394) e estão equipadas com um *Global Shutter*. Esta

³www.videredesign.com

característica faz com que todos os píxeis na imagem sejam expostos simultaneamente durante o mesmo intervalo de tempo, o que permite que as imagens de objectos em movimento sejam mais estáveis, atenuando o efeito de arrastamento. As duas câmaras estão completamente sincronizadas no barramento *Firewire*, com um intervalo máximo de $60 \mu s$, para garantir que os píxeis de cada uma das imagens sejam adquiridos ao mesmo tempo (Konolige and Beymer, 2007a). Isto é importante para assegurar que o par de imagens adquirido (esquerda e direita) seja exactamente da mesma cena, de modo a não prejudicar a computação *stereo*.

3.5.1 Selecção das lentes

A selecção das lentes é de uma importância crucial, tendo de ser seleccionadas de acordo com o ambiente e a aplicação na qual será usado o sistema de visão. As imagens adquiridas devem mostrar na totalidade o cenário que o robot deve ver, pelo que a distância focal das lentes deve permitir que a câmara consiga captar imagens contendo todos os objectos à sua frente e que fazem parte da sua tarefa. Como se pode ver na Figura 3.8, a altura da estrutura é de $1,5 m$; somando a isto a altura da unidade *Pan-Tilt* e do suporte do sistema de visão, as câmaras ficam a cerca de $1,7 m$ do chão. Os ângulos de visão horizontal e vertical do conjunto câmara + lente devem ser tais que permitam ver a $1,5 m$ de distância da câmara uma área com $1,6 m$ de largura e $1,5 m$ de comprimento (área da mesa + espaço ocupado pelo parceiro).

A partir da Figura 3.18 temos que:

$$HFOV = 2\alpha \quad (3.18)$$

A partir daqui pode-se calcular *HFOV* da seguinte forma:

$$HFOV = 2 \arctan \left(\frac{0,8}{1,5} \right) \Leftrightarrow HFOV \approx 56,1^\circ \quad (3.19)$$

Tendo em conta o tamanho do sensor de imagem usado nesta câmara, o ângulo de visão horizontal (*HFOV*) para uma determinada distância focal f é calculado

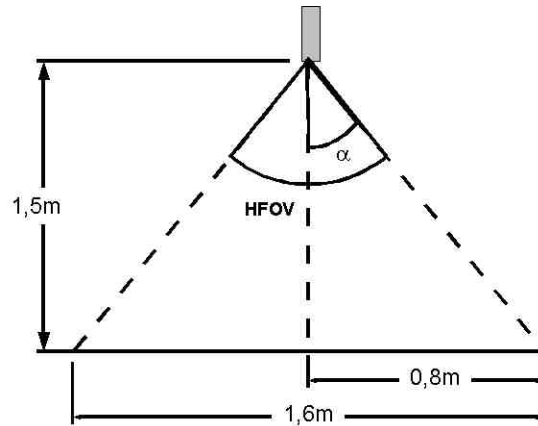


Figura 3.18: Diagrama para auxílio ao cálculo do ângulo de visão horizontal das câmaras (*HFOV*).

por:

$$HFOV = 2 \arctan \left(\frac{1,92}{f} \right) \quad (3.20)$$

Usando o valor de *HFOV* calculado na equação 3.19 pode calcular-se *f*:

$$f_H = \frac{1,92}{\tan \left(\frac{HFOV}{2} \right)} \Leftrightarrow f_H = 3,6mm \quad (3.21)$$

Para que a câmara tenha um ângulo de visão horizontal apropriado, a lente terá que ter uma distância focal de pelo menos 3,6 *mm*.

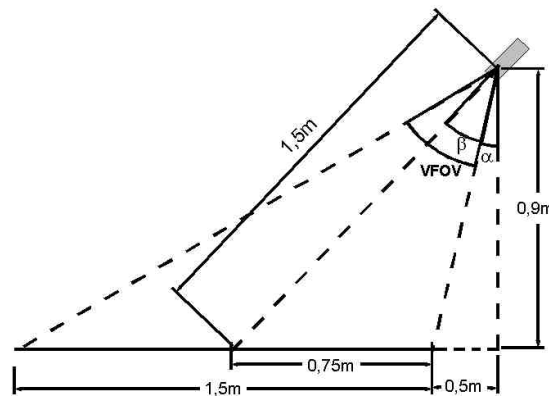


Figura 3.19: Diagrama para auxílio ao cálculo do ângulo de visão vertical das câmaras (*VFOV*).

Da mesma forma, recorrendo à Figura 3.19, o ângulo de visão vertical (*VFOV*)

pode ser calculado por:

$$VFOV = 2\beta \quad (3.22)$$

Para o cálculo deste valor, foi necessário ter em consideração o facto de que o robot estará afastado da mesa com a qual vai trabalhar cerca de 50 cm e a diferença de alturas da câmara até à mesa será cerca de 90 cm . Para calcular β terá que se calcular α :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{0,5}{0,9}\right) \quad (3.23)$$

Pode afirmar-se que:

$$\alpha + \beta = \arctan\left(\frac{0,75 + 0,5}{0,9}\right) \quad (3.24)$$

Logo,

$$\beta = \arctan\left(\frac{0,75 + 0,5}{0,9}\right) - \arctan\left(\frac{0,5}{0,9}\right) \quad (3.25)$$

Finalmente, e substituindo β na equação 3.22, $VFOV$ pode ser calculado por:

$$VFOV = 2\left(\arctan\left(\frac{0,75 + 0,5}{0,9}\right) - \arctan\left(\frac{0,5}{0,9}\right)\right) \Leftrightarrow VOFV \approx 50,38^\circ \quad (3.26)$$

Tendo em conta o tamanho do sensor de imagem usado nesta câmara, o ângulo de visão vertical $VFOV$ para uma determinada distância focal f é calculado por:

$$HFOV = 2\arctan\left(\frac{1,44}{f}\right) \quad (3.27)$$

Usando o valor de $VFOV$ calculado na equação 3.26 pode calcular-se f :

$$f_V = \frac{1,44}{\tan\left(\frac{VFOV}{2}\right)} \Leftrightarrow f_V = 3,06\text{mm} \quad (3.28)$$

Para que a câmara tenha um ângulo de visão vertical apropriado, a lente terá que ter uma distância focal de pelo menos $3,06\text{ mm}$.

Para satisfazer os requisitos dos ângulos de visão horizontal e vertical simultaneamente, a distância focal da lente seleccionada terá que ser o mínimo dos valores encontrados. Definindo f_H ($3,6\text{ mm}$) como a distância focal necessária

para o ângulo de visão horizontal calculada em 3.21 e, f_V ($3,06\text{ mm}$) como a distância focal necessária para o ângulo de visão vertical calculada em 3.28, então a distância focal f será:

$$f \leq \min(f_H, f_V) \Leftrightarrow f \leq 3,06\text{ mm} \quad (3.29)$$

As opções de escolha da lente para esta câmara seriam:

- $2,8\text{ mm}$
- $4,0\text{ mm}$
- $8,0\text{ mm}$

Pelo que as lentes seleccionadas têm uma distância focal de $2,8\text{ mm}$. Sendo esta distância superior ter-se-ia apenas uma visão parcial da cena e, por outro lado, com uma distância focal inferior conseguir-se-ia uma imagem bem mais abrangente. Porém, isso originaria espaço na imagem que não teria informação útil e por isso seria desperdiçado.

3.5.2 Calibração

Antes de poder ser usado de forma apropriada, este sistema teve que ser calibrado adequadamente. Idealmente, as câmaras são perfeitas, tendo a mesma distância focal e os eixos ópticos alinhados paralelamente um ao outro. Na prática, as câmaras são imperfeitas, as lentes adicionam distorção na imagem, há sempre uma ligeira discrepância entre as distâncias focais das duas lentes e os eixos ópticos estão desalinhados.

O processo de calibração deste sistema determina dois conjuntos de parâmetros, intrínsecos e extrínsecos, para compensar as imperfeições do sistema (Konolige and Beymer, 2007b). Estes parâmetros são usados para distorcer as imagens originais das câmaras corrigindo as imperfeições e mostrando como as imagens seriam capturadas se as câmaras estivessem perfeitamente alinhadas e sem distorção das lentes.

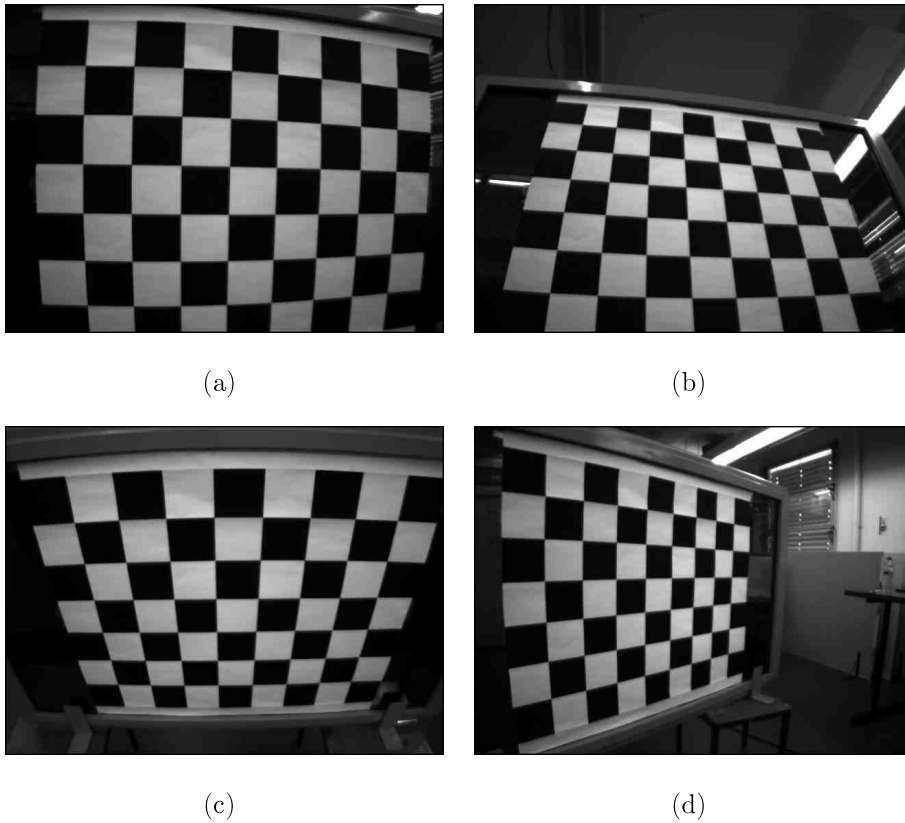
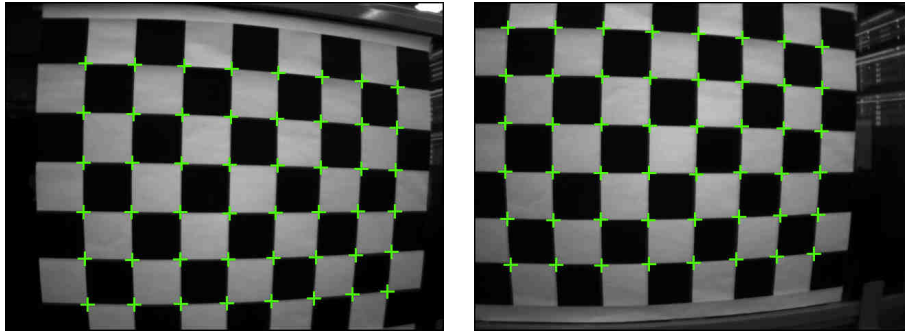


Figura 3.20: Algumas das imagens da câmara esquerda usadas para a calibração do sistema.

O processo de calibração consiste em mostrar um objecto plano (quadro rectangular com quadrados pretos e brancos) às câmaras em pelo menos cinco posições diferentes. Na Figura 3.20 são mostradas algumas das imagens usadas na calibração. Após a aquisição dos cinco pares de imagens, estas são analisadas para encontrar características semelhantes em cada uma; neste caso, são procuradas as intersecções entre os quadrados pretos e brancos, como mostra a Figura 3.21. Quando todos os pares de imagens são analisados e todas as características identificadas, o processo calcula a melhor aproximação para os parâmetros, usando um algoritmo de optimização não linear. É criado então um modelo matemático das câmaras para compensar as imperfeições do sistema. O processo de calibração é baseado no trabalho de Iocchi and Konolige (1998) que desenvolveu um sistema de visão *stereo* multi-resolução para aplicação em robots móveis.



(a) Esquerda

(b) Direita

Figura 3.21: Exemplo de um par de imagens onde são detectadas as características necessárias ao processo de calibração.

Antes da calibração, a distância entre as duas câmaras foi ajustada (esta distância é designada por *baseline*). Uma *baseline* apropriada varia de acordo com a aplicação - se o cenário com o qual se pretende trabalhar está longe das câmaras, devem usar-se *baselines* maiores (tipicamente superiores a 15 cm). No caso do nosso robot, os objectos estão relativamente perto das câmaras (entre 1 m e 2 m), tendo que ser usada uma *baseline* entre 6 cm e 10 cm. A *baseline* seleccionada para este sistema *stereo* foi de 7 cm, o que representa a distância entre os olhos de um humano.

Este sistema de visão da *Videre Design* possui uma *API* para programação em *C++* para efectuar a computação *stereo* de um par de imagens. Embora neste modelo as câmaras sejam independentes, a tecnologia é baseada no sistema *Small Vision System* descrito por Konolige (1997) e implementado também em *hardware*, libertando desta forma o computador desta tarefa. Para este robot optou-se por seleccionar um modelo com *baseline* variável, de modo a permitir maior flexibilidade no uso do sistema.

Capítulo 4

Integração do Sistema

Em robótica surge muito frequentemente a necessidade de controlar um grande número de dispositivos, interligando-os entre si. Este robot possui um braço com $7 DoF$, equipado ainda com um sensor de força, uma mão com $4 DoF$, uma unidade *Pan-Tilt* com $2 DoF$ e duas câmaras. Surge pois a necessidade de gerir todos estes dispositivos. Ao longo deste capítulo será abordada a forma como a gestão dos vários dispositivos foi feita, o processamento de imagem que é necessário para que o robot identifique diferentes objectos, assim como a computação de imagens *stereo* para que seja possível calcular coordenadas 3D.

4.1 Arquitectura de *software*

Como foi já referido, o robot possui muitos dispositivos que precisam de ser geridos de forma eficiente. Para tal, foi necessário construir uma arquitectura distribuída baseada numa plataforma existente, chamada *YARP*¹ (Metta et al., 2006). Esta plataforma oferece um conjunto de ferramentas que vão ao encontro das necessidades computacionais exigidas por um robot humanóide equipado com vários dispositivos. Trata-se de uma plataforma dedicada ao desenvolvimento de *software* a longo termo, para aplicações que exigem resposta em tempo real, com-

¹Yet Another Robot Platform

Capítulo 4. Integração do Sistema

putacionalmente exigentes, e que envolvem a necessidade de interagir com diversos *drivers* e *hardware* (Metta et al., 2006). Um dos primeiros problemas que surge na interligação de diferentes dispositivos é a comunicação entre eles, uma vez que esta pode ser feita usando protocolos diferentes. Como tal, é importante ter uma solução que permita grande flexibilidade ao lidar com diversos dispositivos em simultâneo. O *YARP* ajuda a organizar a comunicação entre sensores, processadores e actuadores, tornando o sistema completamente modular e fazendo com que a evolução natural do sistema seja facilitada. Isto é possível devido ao uso de um modelo abstracto de comunicação “*transport-neutral*”, abstraindo o utilizador do meio usado para comunicação (Fitzpatrick et al., 2008).

Usando esta ferramenta como base, foi desenvolvida a arquitectura mostrada na Figura 4.1.

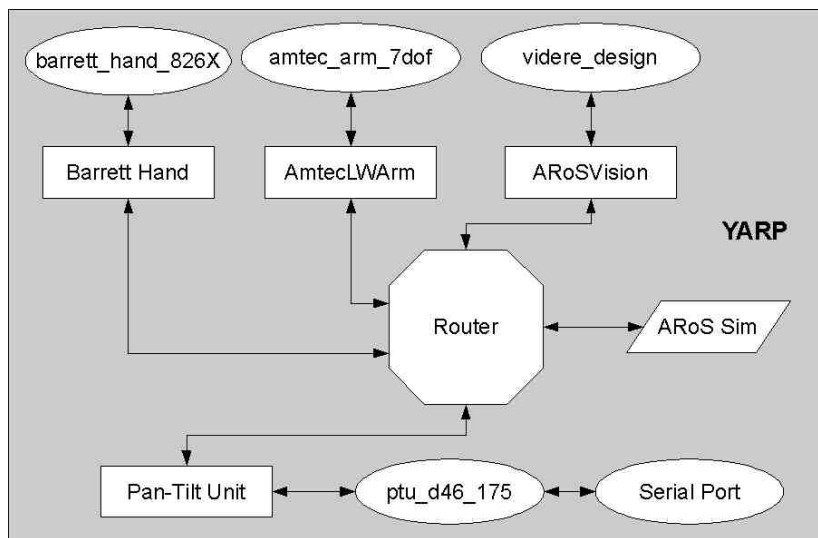


Figura 4.1: Arquitectura de *software* do robot baseada na plataforma *YARP*.

A implementação desta arquitectura foi orientada a cada componente. Para cada componente foi criado um *driver* representado por uma elipse na Figura 4.1, no caso do *Pan-Tilt* foi necessário criar um *driver* para a porta série e, a partir desse, implementar o controlador para o *Pan-Tilt*. Para cada *driver* foi criado um programa denominado de *Network Wrapper*, tendo este como função

tornar o dispositivo acessível na rede *YARP*, de modo a que este aceite comandos enviados a partir da rede (na Figura 4.1 os diversos *Network Wrappers* surgem representados por rectângulos). Cada um destes programas aceita comandos que podem ser enviados de outro computador ligado à rede, permitindo controlar a posição, a velocidade e a aceleração de cada módulo conectado - por exemplo, é possível controlar cada junta do braço independentemente ou o braço como um todo.

O programa *Router* tem a função de ligar inicialmente cada programa na rede. Desta forma, não criando conexões directas entre cada programa, evita-se que sejam criadas ligações desnecessárias, podendo estas serem adicionadas posteriormente com o sistema *online*. Cada programa regista a sua porta de comunicação no *Router* para que esteja acessível para outros.

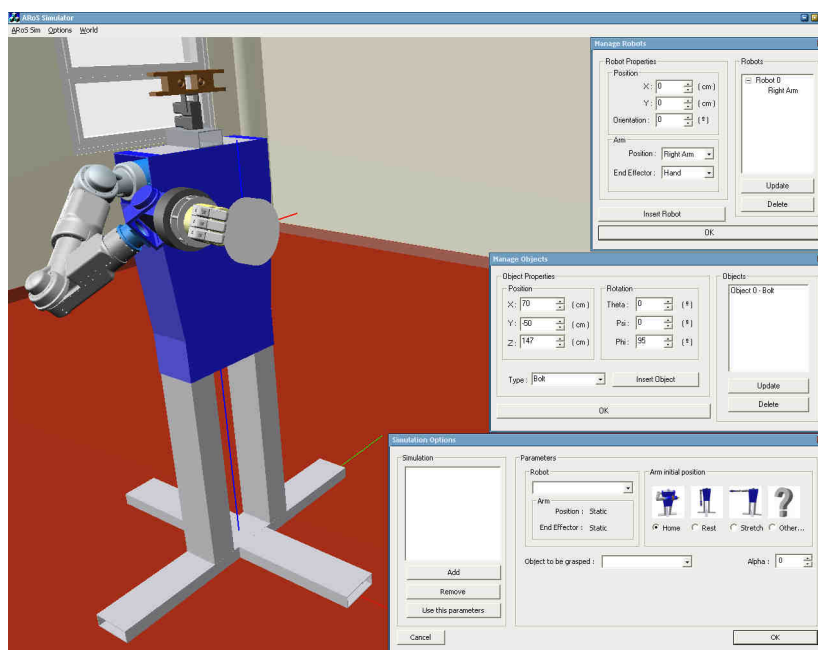


Figura 4.2: ARoS Sim - Aplicação para simular o robot em 3D.

Esta arquitectura permite ainda que se liguem nesta rede programas de mais alto nível para interagir com o robot, sem necessitarem de qualquer *driver* específico, tal como surge representado na Figura 4.1. Um destes programas é o *ARoS Sim*, ilustrado na Figura 4.2, com capacidade para simular o movimento

do braço e, posteriormente, reproduzir o movimento no robot real. Desta forma, os algoritmos de controlo do braço podem ser testados em segurança no ambiente de simulação, sem que haja risco de danificar qualquer componente do robot. Inicialmente, este programa de simulação foi usado para testar a cinemática inversa deste braço, sendo posteriormente as funcionalidades expandidas de modo a conseguir simular o movimento do braço. Os modelos 3D das peças que formam o braço e a mão foram cedidas pelos respectivos fabricantes, sendo tudo o resto desenhado numa aplicação CAD para tornar o ambiente de simulação o mais realista possível.

A implementação das aplicações de controlo representadas na Figura 4.1, permitem criar uma camada de abstracção entre o utilizador e os dispositivos físicos, evitando preocupações com qualquer implementação específica subjacente aos fabricantes.

Braço e Mão

A implementação dos controladores de alto nível para o braço e para a mão, representados na Figura 4.1, teve por base um modelo de controladores genérico. O controlo de baixo nível quer do braço, quer da mão, é baseado no controlo de motores, pelo que todos os comandos implementados se baseiam em comandos simples enviados a qualquer motor:

- Inicializar;
- Mover o motor (posição, velocidade ou aceleração);
- Parar o motor;
- Leitura de parâmetros do motor (posição, velocidade ou aceleração).

Encapsulando estes comandos no controlador, liberta-se o utilizador da necessidade de qualquer interacção com controladores específicos dos dispositivos. Desta forma, o controlo do braço e da mão têm por base os mesmos controlos de alto nível.

Pan-Tilt

O controlo da unidade *Pan-Tilt* é também baseado no controlo de motores, neste caso dois. Aplica-se a este dispositivo os mesmos princípios que foram seguidos para a implementação dos controladores do braço e da mão, explicados anteriormente.

No entanto foi necessária a criação de um nível mais elevado de controlo de modo a facilitar a interacção do robot com o humano. Quando o robot e o humano interagem, é importante para o humano perceber os movimentos do robot, quer do braço, através de movimentos parecidos com os dos humanos, quer da cabeça, fazendo com que seja perceptível para onde está a olhar o robot em cada instante. Embora as câmaras tenham um ângulo de visão suficientemente grande para que não seja necessário direccionar a cabeça do robot para qualquer objecto, o facto do robot movimentar a cabeça torna a interacção do humano com o robot mais natural e fácil para o humano. Foi criada uma forma de poder orientar a cabeça do robot para qualquer ponto no espaço definido por coordenadas cartesianas (x, y, z) ; estas são usadas no cálculo dos ângulos *Pan* e *Tilt*, permitindo que o robot direcione a cabeça para esse ponto.

A Figura 4.3 mostra a aproximação utilizada para o cálculo do ângulo *Pan*.

A origem do eixo de coordenadas usado coincide com o centro do robot, estando em altura posicionado no chão. O eixo *X* encontra-se direccionado para a frente do robot e o eixo *Y* para a esquerda do robot, estando desta forma o eixo *Z* direccionado para cima. Então, considerando um objecto ou um ponto de coordenadas (x, y, z) , o ângulo *Pan* pode ser calculado da seguinte forma:

$$Pan = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4.1)$$

A medida d_O presente na Figura 4.3 será necessária para o cálculo do ângulo *Tilt*, podendo ser calculada através das coordenadas do ponto por:

$$d_O = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.2)$$

A Figura 4.4 mostra a abordagem usada para o cálculo do ângulo *Tilt*:

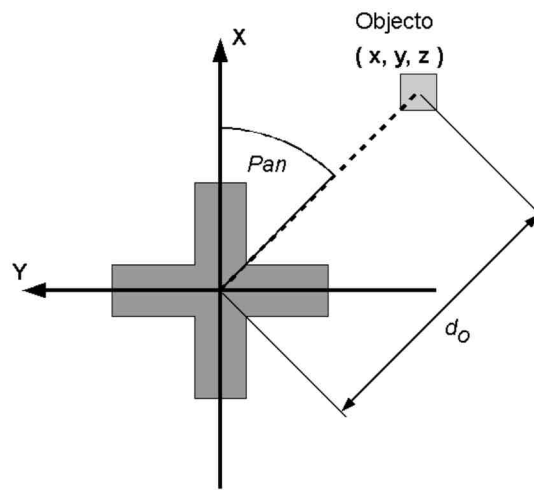


Figura 4.3: Cálculo do ângulo *Pan* baseado nas coordenadas de um ponto no espaço.

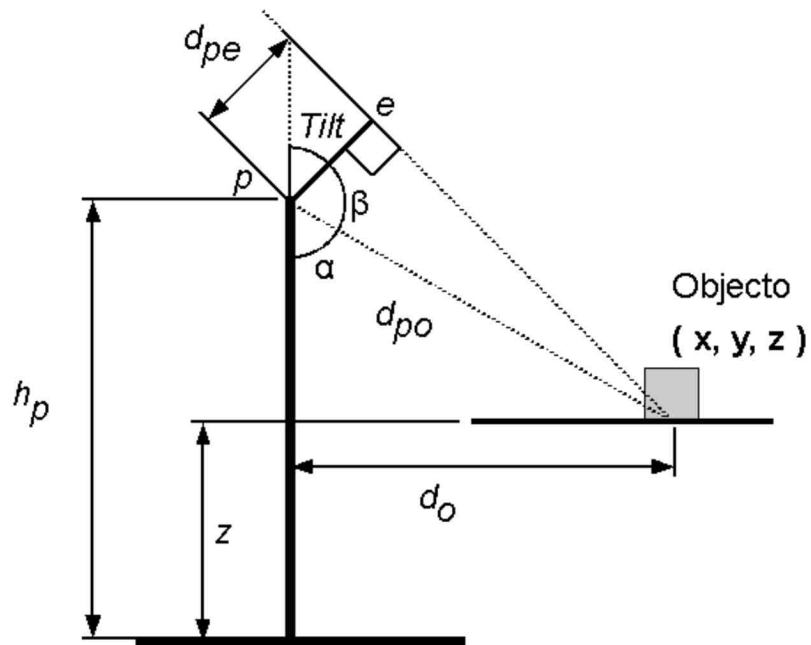


Figura 4.4: Cálculo do ângulo *Tilt* baseado nas coordenadas de um ponto no espaço.

Para uma melhor interpretação do esquema da Figura 4.4, importa definir as variáveis presentes na figura:

- h_p - Altura do chão ao pescoço do robot;
- d_{pe} - Distância do pescoço até às câmaras;
- z - Altura até ao ponto para onde se quer olhar;
- d_O - Distância ao objecto, no plano paralelo ao chão, dada pela equação 4.2;
- d_{pO} - Distância em linha recta do pescoço até ao ponto;

d_{pO} é definida por:

$$d_{pO} = \sqrt{(h_p - z)^2 + d_O^2} \quad (4.3)$$

Calculando α :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_O}{h_p - z}\right) \quad (4.4)$$

e β :

$$\beta = \arccos\left(\frac{d_{pe}}{d_{pO}}\right) \quad (4.5)$$

Usando o esquema da Figura 4.4, pode-se calcular o ângulo *Tilt* por:

$$Tilt = 180^\circ - \alpha - \beta \quad (4.6)$$

Câmaras

A parte da integração das câmaras usa os drivers específicos fornecidos pelo fabricante, de forma a que as imagens sejam correctamente adquiridas.

A iluminação do ambiente onde se encontra o robot, é muito importante para a qualidade da imagem adquirida. Para melhorar a qualidade da imagem é possível controlar manualmente os parâmetros de captura das câmaras (exposição, ganho, luminosidade, equilíbrio de brancos, saturação, ...), embora possam ser controlados automaticamente. O controlo automático dos parâmetros destas câmaras prejudica a cor obtida, logo, foi necessário implementar o controlo manual destes. A Figura 4.5 mostra o interface implementado para o controlo destes parâmetros.

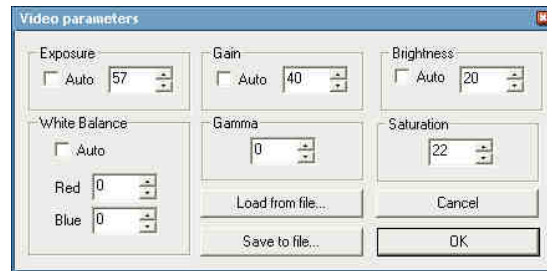


Figura 4.5: Interface de controlo dos parâmetros de aquisição de imagens

Este módulo encarrega-se da captura e processamento da imagem e também do cálculo das coordenadas dos objectos detectados. É responsável pela criação de uma camada de abstracção na arquitectura de controlo, tornando acessível na rede toda a informação processada, adquirida pelo robot através das câmaras.

4.2 Processamento de imagem

O processamento aplicado às imagens capturadas pelas duas câmaras do robot terá como objectivo identificar diferentes objectos simultaneamente, calculando a região na imagem que cada um ocupa. Os objectos seleccionados para este procedimento têm características bem definidas (ver Figura 4.6) e, dada a sua simplicidade, a procura destes na imagem foi baseada numa característica apenas - a cor.

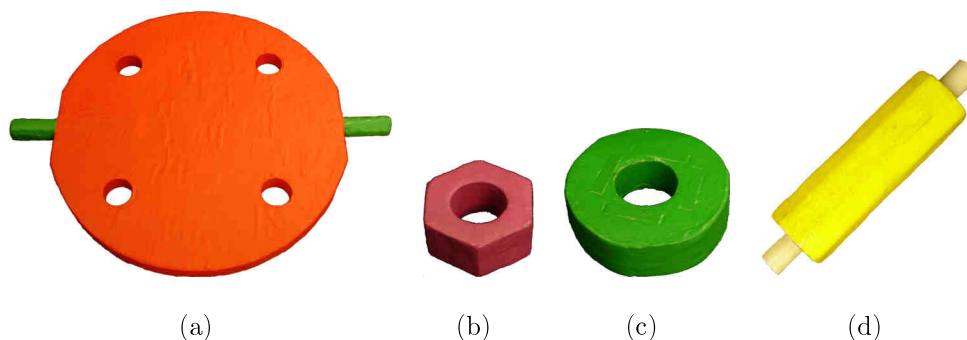


Figura 4.6: Objectos para a tarefa de construção: (a) Base; (b) Parafuso; (c) Roda; (d) Coluna (as imagens não estão à escala).

A imagem proveniente das câmaras está no espaço de cores *RGB* (*Red Green Blue*). Contudo, e porque a procura dos objectos será baseada na cor, é necessário usar um espaço de cores mais adequado a esta tarefa. Os espaços *HSV* (*Hue Saturation Value*) e *HLS* (*Hue, Lightness, Saturation*) usam uma codificação mais intuitiva e semelhante à visão humana e por isso mais conveniente ao processamento de cores (Li et al., 2002). Estes espaços de cores apresentam duas vantagens claras: a luminosidade e a informação cromática da cor são codificadas separadamente, tornando a definição da cor insensível à iluminação e, por outro lado, a codificação da componente cromática (*Hue* e *Saturation*) é intuitiva. Usando este espaço de cores, cada cor é definida através de um valor de *Hue* e *Saturation* independentemente da luminosidade presente. O processamento apli-

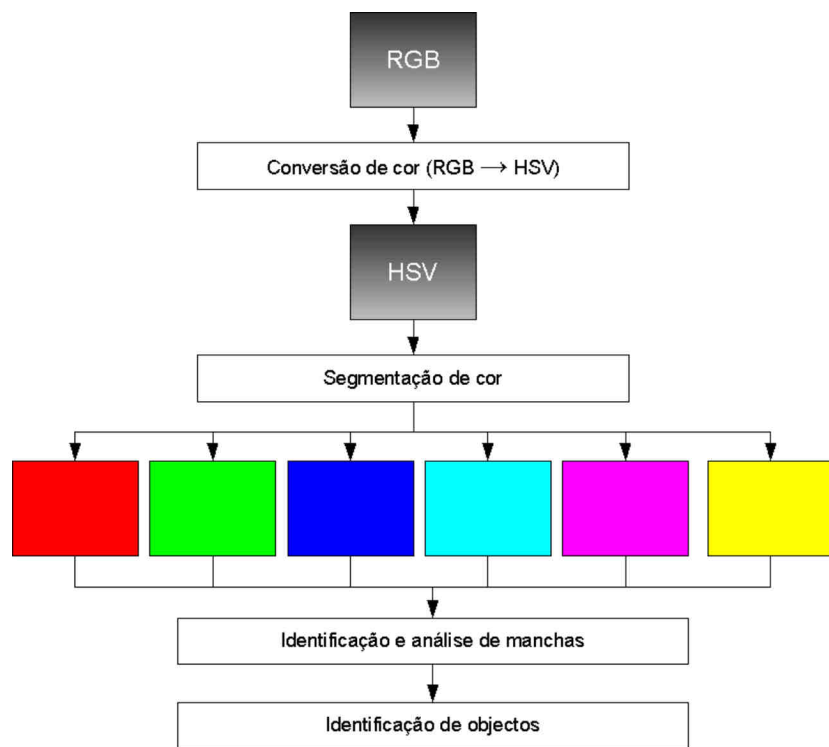


Figura 4.7: Diagrama que mostra o processamento aplicado às imagens capturadas.

cado às imagens capturadas surge ilustrado num diagrama da Figura 4.7), seguido de um exemplo de uma imagem não processada na Figura 4.8. Apesar do sistema

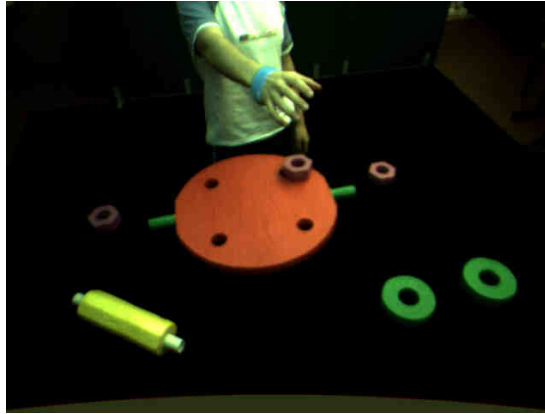


Figura 4.8: Exemplo de uma cena típica vista pela câmara do robot.

stereo ser composto por duas imagens (esquerda e direita), apenas a imagem esquerda é processada. Esta opção deve-se ao facto do eixo coordenado fixo do sistema *stereo* ter a sua origem na câmara esquerda e da imagem capturada por esta ser usada como referência para a computação *stereo* das duas imagens.

Após a conversão do espaço de cores da imagem, esta é segmentada e são criadas seis novas imagens com o resultado dessa segmentação, sendo criada uma imagem binária para cada cor usada. Para facilitar a identificação de cores foram usadas apenas as cores primárias e secundárias (vermelho, verde, azul, ciano, magenta e amarelo). Cada imagem binária criada tem os píxeis de cada uma das cores usadas (ver Figura 4.9). De seguida, aglomeram-se os píxeis contínuos em cada imagem binária para criar manchas, sendo cada mancha posteriormente associada a um objecto da seguinte forma:

- Vermelho - Base;
- Verde - Roda (desde que tenha uma área suficientemente grande);
- Magenta - Parafuso;
- Amarelo - Coluna;
- Ciano - Mão do humano.

A associação da cor verde a uma roda acontece apenas quando a mancha verde detectada é superior a um certo limite. Isto é feito porque a base tem duas

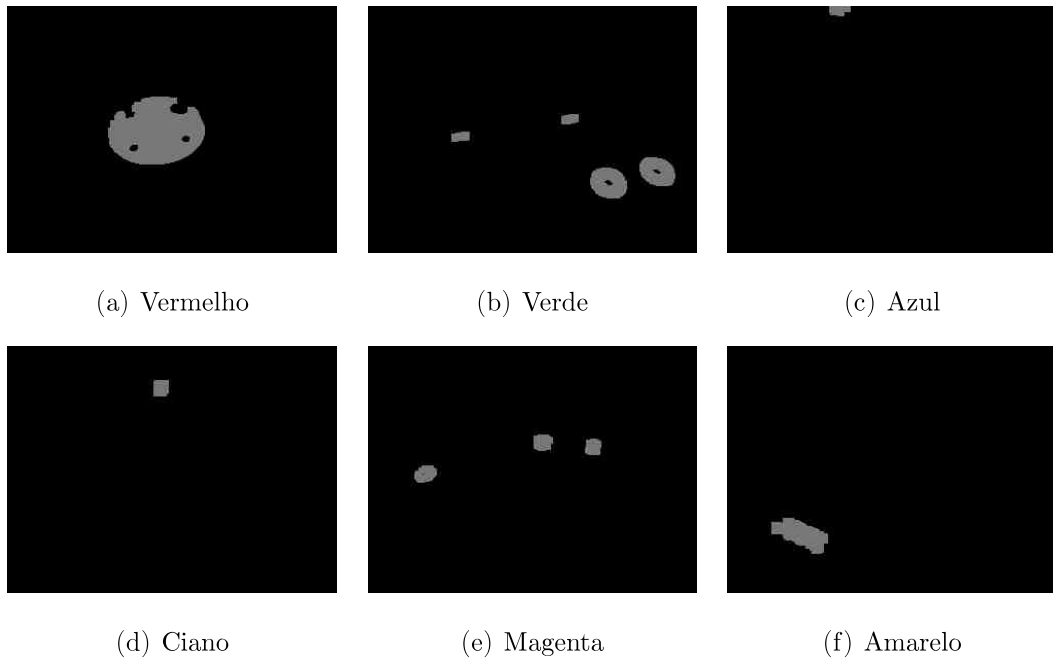


Figura 4.9: Imagens binárias criadas a partir da segmentação efectuada na imagem original.

extremidades que são verdes tendo por isso que ser testado o tamanho para as diferenciar de uma roda. A cor azul não é neste momento usada por não ser necessária nesta fase.

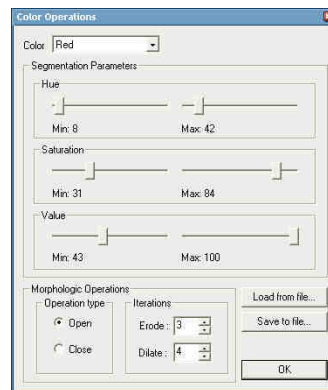


Figura 4.10: Configuração dos parâmetros de segmentação de cor.

De modo a facilitar o ajuste dos parâmetros de segmentação, a aplicação desenvolvida para o processamento de imagem permite a alteração em tempo

Capítulo 4. Integração do Sistema

real, dos parâmetros de cada cor (ver Figura 4.10).

Como resultado do processamento de imagem, é calculada a região ocupada por cada objecto na imagem, como mostra a Figura 4.11. A mancha de cor ciano

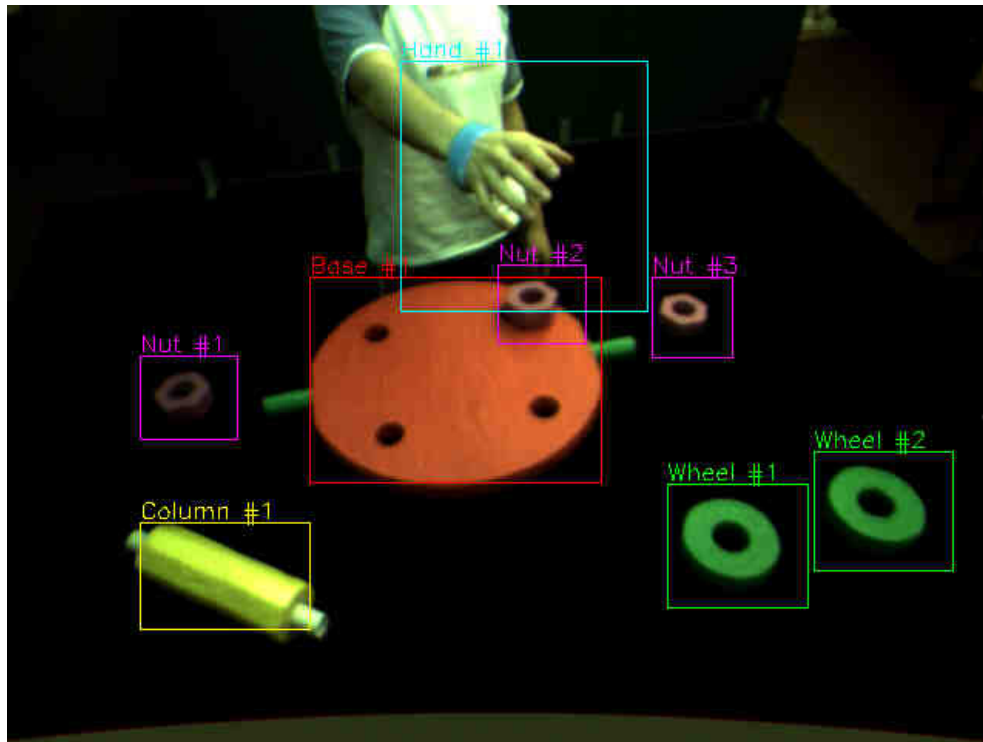


Figura 4.11: Objectos detectados pelo processamento aplicado.

que é detectada, ao contrário das outras cores, é usada para criar uma região na imagem com uma área muito superior à sua, para que seja possível abranger a totalidade da mão do humano. Posteriormente, a região que abrange a área ocupada pela mão é enviada a outro módulo para que o gesto seja reconhecido, módulo este que foi desenvolvido por Westphal (2006). Enviando apenas a imagem da mão, e não toda a imagem capturada, é possível tornar o reconhecimento do gesto bastante mais rápido.

4.3 Extracção de coordenadas

O cálculo das coordenadas de cada objecto será feito usando uma análise *stereo* das duas imagens capturadas. A extracção de coordenadas será feita em dois passos, cálculo das coordenadas retiradas directamente do sistema *stereo* e transformação destas para um sistema de eixos coordenados adequado ao robot.

4.3.1 Cálculo

O processo de análise *stereo* consiste em medir a distância de um ponto à câmara tendo por base a projecção desse mesmo ponto em duas imagens.

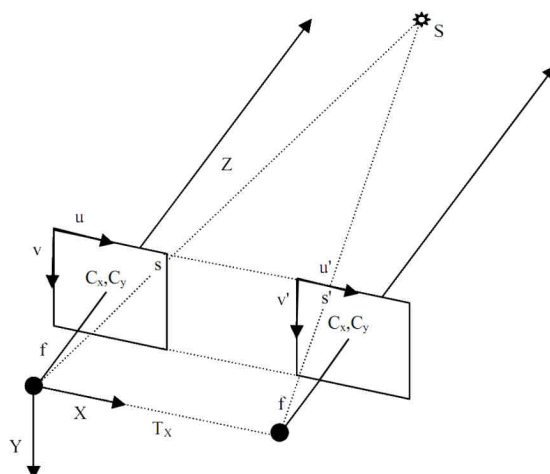


Figura 4.12: Geometria aplicada à computação *stereo*. (Imagem retirada de Konolige and Beymer (2007a)).

A Figura 4.12 ilustra a geometria presente na análise *stereo* de duas imagens capturadas por câmaras iguais com lentes iguais, tendo estas a mesma distância focal. O sistema de coordenadas principal está centrado no ponto de focagem (normalmente o centro) da câmara esquerda. Ambas as imagens estão no mesmo plano e alinhadas de forma a que a primeira linha da imagem esquerda coincida no espaço com a primeira linha da imagem direita. Os eixos Z de cada câmara atravessam a imagem no ponto (C_x, C_y) , não sendo este ponto necessariamente o centro da imagem, ainda que esteja muito próximo.

Capítulo 4. Integração do Sistema

Qualquer ponto S é projectado nas duas imagens segundo uma linha que atravessa o ponto de focagem, tendo os pontos s e s' como coordenadas (u, v) e (u', v') , respectivamente. Estes dois pontos têm v e v' com o mesmo valor e a diferença entre eles é o valor no eixo u - esta diferença é denominada de disparidade. Por sua vez, a disparidade está relacionada com duas medidas: a distância do ponto de focagem ao ponto S e a distância entre as câmaras (T_x) - esta última designada por *baseline*. Um ponto 3D pode então ser projectado no espaço usando uma matriz de projecção, cuja descrição é feita por Konolige and Beymer (2007a). Estes autores abordam também com mais detalhe os processos de análise e cálculo associados à geometria de um sistema *stereo*.

Um dos grandes problemas da análise *stereo* é encontrar elementos correspondentes nas duas imagens. A partir do momento em que esta correspondência é encontrada, pode ser calculada uma coordenada a partir da geometria associada a imagens *stereo* (ver Figura 4.12). Para efectuar a correspondência entre os pontos das imagens, este sistema usa o método de correlação de área, que compara pequenas áreas das imagens usando correlação.

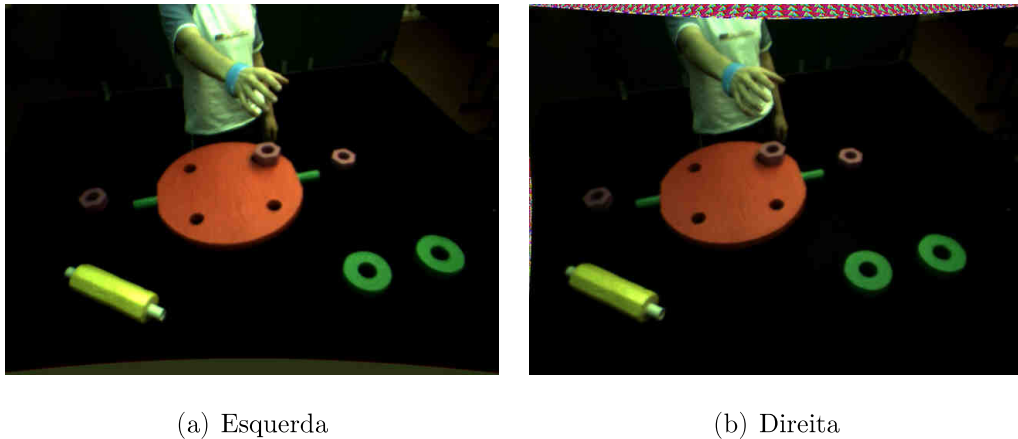
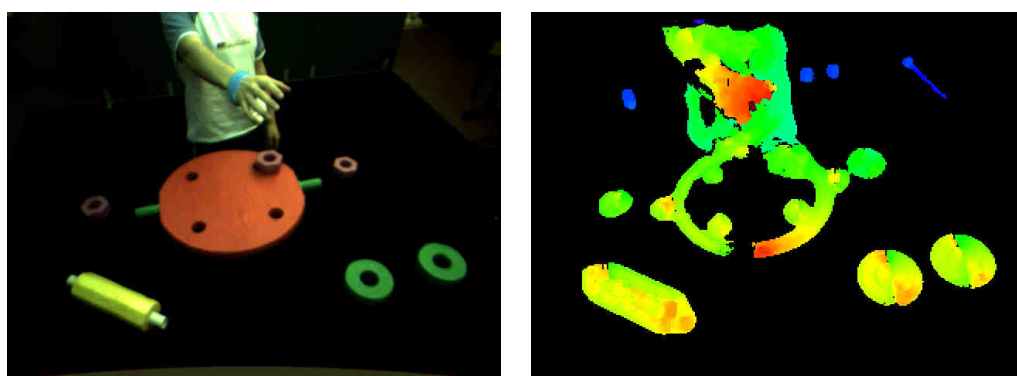


Figura 4.13: Exemplo de uma cena vista pelas duas câmaras do robot.

Antes de qualquer cálculo, as imagens são corrigidas de modo a que a imagem resultante não tenha qualquer distorção (na Figura 4.13, pode ver-se um exemplo

de duas imagens já corrigidas). De seguida, os píxeis da imagem são normalizados usando uma média local da intensidade dos píxeis vizinhos. Só então é feito o processo de correspondência dos pontos de ambas as imagens, usando o método de correlação de área, onde cada região da imagem esquerda é comparada com outras regiões da imagem direita que estejam dentro da janela de procura (esta pode ser variável). Terminado o processo de correlação, é associado a cada píxel na imagem de referência uma disparidade, que corresponde a um valor que quantifica a diferença entre o mesmo ponto nas duas imagens - quanto maior for este valor, mais distante estará o ponto da câmara. Por fim, é aplicado um filtro para limpar algum eventual ruído na imagem de disparidade.



(a) Imagem esquerda

(b) Imagem de disparidade

Figura 4.14: Resultado da computação *stereo* das imagens mostradas na Figura 4.13.

Na Figura 4.14(b) é mostrado um exemplo do resultado do cálculo *stereo*, em que cada píxel representa a disparidade desse ponto na imagem de referência (a esquerda). Esta é uma forma gráfica de representação da nuvem de pontos 3D criada pelo algoritmo *stereo*, em que as zonas mais “quentes” (vermelho), estão mais perto da câmara e as zonas mais “frias” (azul) estão mais afastadas. As zonas a preto, são zonas onde o algoritmo de análise *stereo* não conseguiu encontrar correspondências válidas. Associando a distância do ponto à câmara com a posição na imagem, é calculada a coordenada 3D de cada ponto.

O resultado da procura de objectos apresentado na Figura 4.11 combinado com o cálculo *stereo* ilustrado na Figura 4.14(b), permite associar à área de cada objecto um conjunto de pontos desse mesmo objecto. Efectuando uma média aritmética de todos os pontos 3D na região do objecto, é possível calcular o seu ponto central. Assim, as coordenadas (x, y, z) de cada objecto podem ser calculadas da seguinte forma:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_n \quad ; \quad y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_n \quad ; \quad z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_n \quad (4.7)$$

Onde n é o número de pontos na região do objecto.

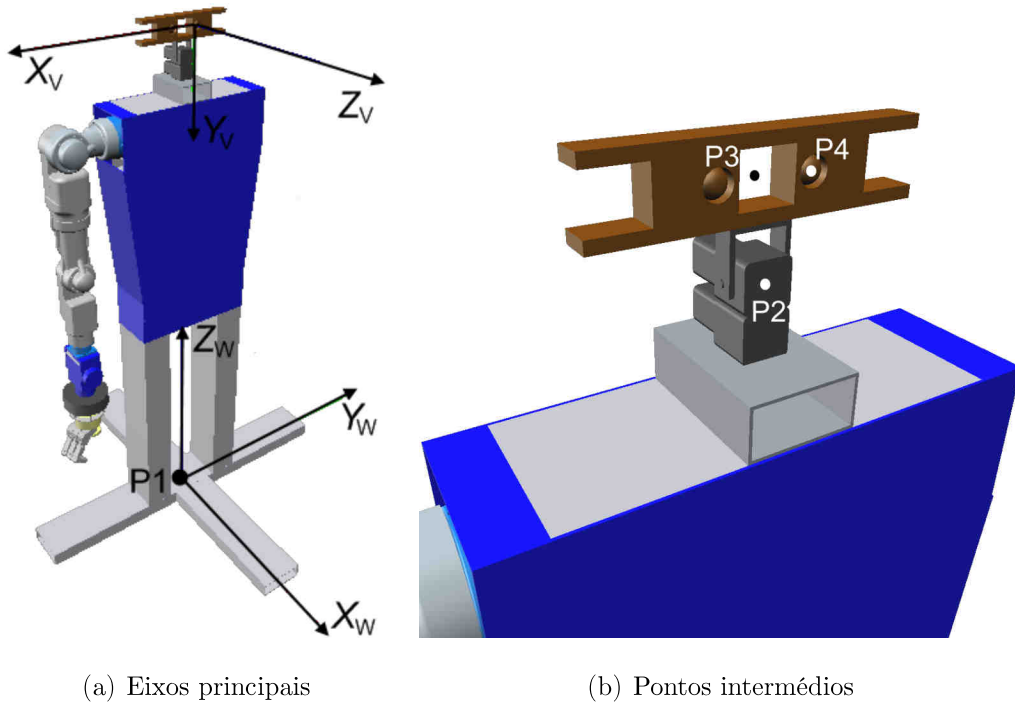
Deste modo, consegue calcular-se a coordenada de um objecto detectado pelo processamento de imagem, estando no entanto esta no eixo coordenado da câmara.

4.3.2 Transformação

Para que as coordenadas calculadas possam ser usadas, estas terão que ser convertidas em coordenadas equivalentes num sistema de eixos coordenados externo colocado no mundo, coincidente com o robot. A Figura 4.15 ilustra a transformação necessária das coordenadas do referencial $V(x_V, y_V, z_V)$ para o referencial $W(x_W, y_W, z_W)$.

Para transformar as coordenadas, foram usadas matrizes de transformação de *Denavit - Hartenberg*, criando referenciais intermédios que permitem ter em conta as rotações do pescoço a partir dos ângulos *Pan* e *Tilt*, a distância entre os eixos e a altura do robot. Tendo por base as imagens apresentadas na Figura 4.15, foram usados os eixos com as respectivas transformações, estando estes apresentados na Tabela 4.1.

As variáveis *Pan* e *Tilt* da Tabela 4.1 representam os ângulos em cada instante no pescoço do robot. *Baseline* é uma constante que representa a distância entre as duas câmaras. Metade da medida *Baseline* é a distância entre os pontos P_3 e P_4 da Figura 4.15. *D1* é a altura do robot até ao pescoço, correspondente à



(a) Eixos principais

(b) Pontos intermédios

Figura 4.15: Sistemas de eixos coordenados no robot, referencial da câmara e referencial do mundo. Pontos intermédios para a transformação das coordenadas.

distância entre os pontos $P1$ e $P2$ da Figura 4.15, ao passo que $D2$ é a distância entre os pontos $P2$ e $P3$ da Figura 4.15. A partir destas transformações, são determinados os parâmetros de Denavit-Hartenberg necessários (α , A , D , θ), estando estes apresentados na Equação 4.8 em forma de vectores para facilitar a visualização.

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\pi}{2} \\ -\frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} ; A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{baseline}{2} \end{bmatrix} ; D = \begin{bmatrix} D1 \\ 0 \\ 0 \\ -D2 \\ 0 \end{bmatrix} ; \theta = \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} + Pan \\ Tilt \\ -\frac{\pi}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

A transformação de um sistema de eixos coordenados $n - 1$ no sistema de

Capítulo 4. Integração do Sistema


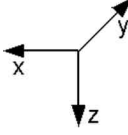
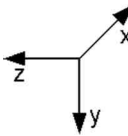
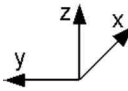

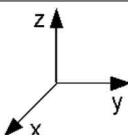
Designação do eixo	Ponto de origem	Eixo	Transformações
Vision	P4		$Rot X = 90^\circ$ $Trans X = -Baseline/2$ $Trans Z = 0$ $Rot Z = 0^\circ$
4	P3		$Rot X = -90^\circ$ $Trans X = 0$ $Trans Z = -D2$ $Rot Z = -90^\circ$
3	P2		$Rot X = -90^\circ$ $Trans X = 0$ $Trans Z = 0$ $Rot Z = Tilt^\circ$
2	P2		$Rot X = 0^\circ$ $Trans X = 0$ $Trans Z = 0$ $Rot Z = (Pan + 90)^\circ$
1	P2		$Rot X = 0^\circ$ $Trans X = 0$ $Trans Z = D1$ $Rot Z = 90^\circ$
World	P1		

Tabela 4.1: Transformações de coordenadas entre os referenciais intermédios, indicando os pontos de origem relativos à Figura 4.15.

eixos coordenados seguinte n é dada pela matriz apresentada na Equação 4.9:

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & A_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & A_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & D_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Usando a matriz de transformação apresentada na Equação 4.9, as coordenadas de um sistema de eixos $n - 1$ podem transformar-se em coordenadas de um

sistema de eixos n da seguinte forma:

$$Coord_n = T_n^{n-1} Coord_{n-1} \quad (4.10)$$

Para tal, e por restrições impostas pelo tamanho da matriz de transformação, a Matriz $Coord$ de coordenadas deve ser definida por:

$$Coord = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Então, para transformar as coordenadas no sistema de eixos do sistema de visão ($Vision$) em coordenadas no sistema de eixos do mundo ($World$), basta multiplicar a matriz de transformação global pelas coordenadas obtidas no sistema de visão:

$$Coord_{World} = T_{World}^{Vision} Coord_{Vision} \quad (4.12)$$

Onde,

$$T_{World}^{Vision} = T_4^{Vision} T_3^4 T_2^3 T_1^2 T_{World}^1 \quad (4.13)$$

São apresentados na Tabela 4.2 alguns resultados do cálculo de coordenadas para as rodas, parafusos e base.

Estes resultados foram obtidos usando $Pan = -15^\circ$ e $Tilt = -45^\circ$ por corresponderem à posição da cabeça que melhor se adequa à visualização de toda a cena em frente ao robot. O cálculo das coordenadas é no entanto flexível, podendo ser efectuado com diferentes valores de Pan e $Tilt$. Os resultados obtidos apresentam um erro médio de cerca de $1,5\text{ cm}$, embora o erro máximo que se verifica esteja entre os 2 cm e os 4 cm . Dadas as dimensões da mão, este erro torna-se aceitável, uma vez que esta apresenta um tamanho suficiente para agarrar os objectos, mesmo que estejam ligeiramente deslocados. O sistema *stereo*, por si só, consegue obter resultados com um erro inferior; no entanto, o facto do sistema estar montado numa estrutura que não é perfeita e haver erros de alinhamento

Coordenadas	Reais			Calculadas			Erro absoluto		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
Nut 1	114	37	85	113,8	35,2	87,7	0,2	1,8	2,7
Nut 2	112	-27	97	112,2	-25,8	95,1	0,2	1,2	1,9
Nut 3	114	-60	85	117,6	-60,2	82,3	3,6	0,2	2,7
Wheel 1	63	-43	85	63,2	-42,7	84,4	0,2	0,3	0,6
Wheel 2	63	-67	85	63,8	-68,8	83	0,8	1,8	2
Base	103	-12	93	99,2	-10,1	93	3,8	1,9	0
Média	—	—	—	—	—	—	1,47	1,2	1,65
Máximo	—	—	—	—	—	—	3,8	1,9	2,7

Tabela 4.2: Resultados do cálculo de coordenadas dos objectos detectados na Figura 4.11 (unidades em *cm*).

da unidade *Pan-Tilt* relativamente ao centro do robot, contribui para o aumento do erro. Logo, quanto mais distantes se encontrarem os objectos, mais se fará sentir este erro.

Todo o processo de tratamento de informação, incluindo as operações efectuadas sobre a imagem (captura, processamento, cálculo *stereo*) e o cálculo de coordenadas, foi testado em dois computadores com características distintas. O desempenho foi avaliado através do *frame rate* apresentado, ou seja, a partir do número de imagens que se conseguem processar por segundo.

A Tabela 4.3 mostra o desempenho do sistema em dois computadores distintos. O desempenho relativamente baixo do sistema deve-se ao facto do processo de computação *stereo* ser muito pesado a nível computacional, o que se faz sentir no processo global de processamento.

Computador	<i>Frame rate</i>
Intel® Pentium™ 4, 3 GHz, 1 GB RAM	3,5 fps
Intel® Core 2 Quad™ Q6600, 2.4 GHz, 2 GB RAM	6,3 fps

Tabela 4.3: Desempenho do processo de tratamento de imagem e cálculo de coordenadas medido em diferentes computadores.

No entanto, este sistema apresenta um desempenho que, no contexto da aplicação onde é usado, se torna apropriado, uma vez que não é necessária uma

localização instantânea de cada objecto.

4.4 Planeamento do movimento do braço

O planeamento do movimento do braço é baseado num algoritmo de planeamento de trajectórias, baseado em resultados experimentais de movimentos 3D do braço/mão humano onde são alcançados e agarrados objectos (Silva, 2008)². Num primeiro passo começa por se determinar a postura³ final do braço e mão, e de seguida determina-se a trajectória das juntas. A postura final seleccionada é aquela que resulta do menor deslocamento de todas as juntas. Esta toma em consideração a informação do sistema de visão acerca da posição e orientação do objecto, e da forma como se pretende agarrar o objecto que foi determinada pela arquitectura cognitiva do *ARoS* (Bicho et al., 2008).

Para a selecção da trajectória começa-se por considerar um movimento directo desde a postura inicial até à postura final, impondo um perfil “*bell-shaped*” de velocidade angular das juntas. Em seguida é reproduzido mentalmente o movimento desde a postura inicial à final, com a intenção de antecipar colisões do braço/mão com obstáculos no ambiente, incluindo o objecto a agarrar. Caso seja antecipada uma colisão, procuramos um movimento alternativo, com este propósito é utilizada a noção de “*via posture*” ou “*bounce posture*” introduzida por Rosenbaum et al. (2001); Meulenbroek et al. (2001); Vaughan et al. (2006) que consiste na sobreposição de um movimento de “*back-and-forth*” ao movimento directo. O movimento alternativo é encontrado recorrendo a posturas adoptadas anteriormente armazenadas em memória, e procurando por uma “*via posture*” que resulte num movimento livre de colisão com um deslocamento mínimo das juntas.

²Trabalho desenvolvido no âmbito do projecto “*Anthropomorphic robotic systems: control based on the processing principles of the human and other primates’ motor system and potential applications in service robotics and biomedical engineering*”, financiado pela FCT e Universidade do Minho, (ref. CONC-REEQ/17/2001)

³posição de todas as juntas que compõe o braço e a mão

Capítulo 4. Integração do Sistema

Mais detalhes sobre o planeamento do movimento do braço podem ser encontrados em Silva (2008).

Capítulo 5

Resultados: O ARoS em Acção

Neste capítulo serão apresentados alguns resultados que mostram o robot *ARoS* em pleno funcionamento colaborando com um humano numa tarefa de construção.

No projecto “*JAST - Joint Action in Science and Technology*” o “*focus*” é na comunicação não verbal (i.e. o humano não “fala com o robot”), o que implica que o robot deve ser capaz de inferir o que o parceiro humano pretende fazer e agir de acordo com isso. O objectivo é fazer com que dois agentes consigam construir o modelo de uma plataforma de um robot (composta por uma base, duas rodas e dois parafusos), cooperando para realizar esta tarefa. A distribuição espacial dos objectos obriga a que cada um dos agentes tenha que passar objectos ao parceiro de modo a garantir o sucesso da tarefa. Por não haver comunicação verbal, a capacidade de perceber as intenções do parceiro, a partir da observação do movimento do seu corpo é crucial.

Na Figura 5.1 é possível verificar que as acções do robot são influenciadas pelas acções do parceiro (ver Bicho et al. (2008) para detalhes sobre a arquitectura de controlo do robot).

Na sequência de imagens da Figura 5.1 o robot colabora activamente com um humano, ajudando-o numa tarefa de construção. O humano faz um movimento com o braço na direcção do robot, no sentido de lhe pedir um objecto. O robot

Capítulo 5. Resultados: O ARoS em Acção



Figura 5.1: Tarefa onde o robot colabora com um humano, ajudando o seu parceiro a completar uma tarefa com sucesso (vídeo disponível *online* em <http://www.youtube.com/GRASDUM>).

infeere que o humano pretende inserir uma roda, decidindo então satisfazer o pedido e passa uma roda ao humano que, por sua vez, a agarra e insere no seu devido local (Figuras 5.1(a) a 5.1(e)). Simultaneamente, o robot insere a roda do seu lado (Figura 5.1(f)). De seguida, o humano pede ao robot um parafuso, não se apercebendo que tem um no seu espaço de trabalho. Como o robot precisa do parafuso, dá indicação ao humano onde pode encontrar um no seu espaço

de trabalho (Figuras 5.1(g) a 5.1(i)), o humano agarra o parafuso e insere-o. Simultaneamente, o robot completa a sua tarefa inserindo o parafuso do seu lado (Figuras 5.1(j) a 5.1(k)).

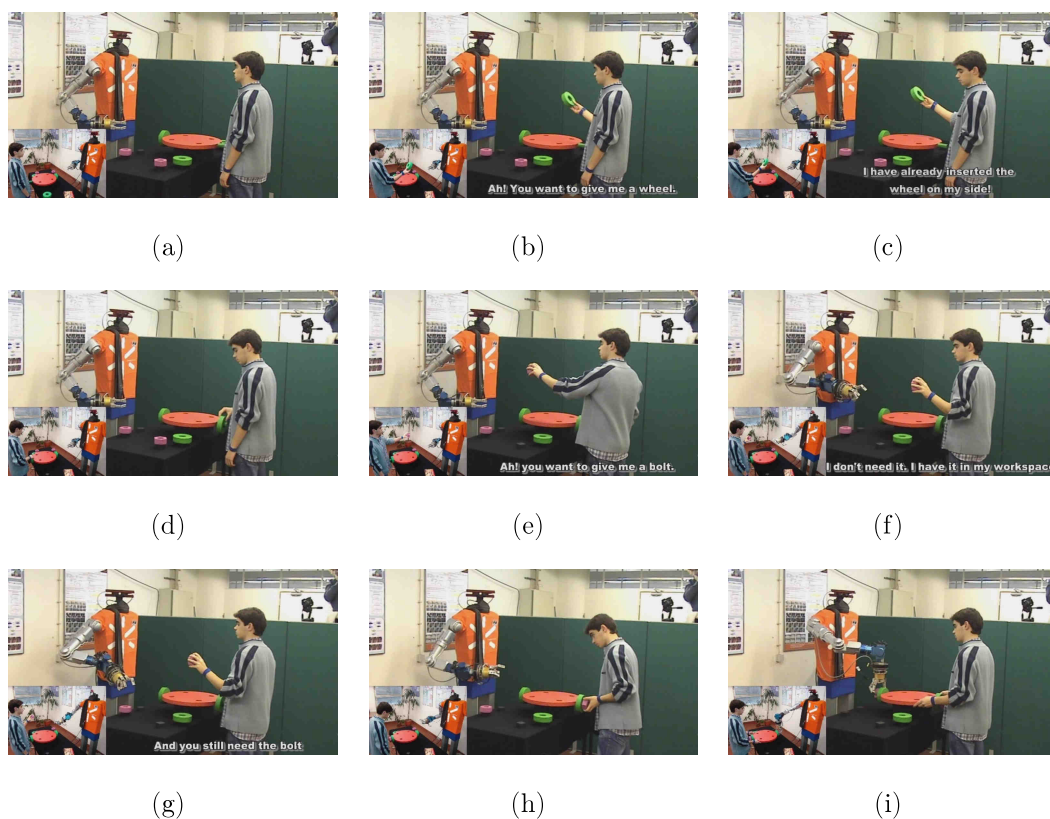


Figura 5.2: Tarefa com o robot colaborando com um humano, onde é demonstrada a capacidade do robot detectar erros cometidos pelo humano (vídeo disponível *online* em <http://www.youtube.com/GRASDUM>).

Na sequência de imagens da Figura 5.2, observa-se a capacidade do robot em colaborar com um humano, detectando erros nas acções do humano e corrigindo-as.

Quando a tarefa é iniciada, a roda no lado do robot já foi inserida. O humano tenta passar uma roda ao robot, este dá uma indicação de que esta parte da sua tarefa já foi cumprida e que o humano ainda necessita daquele objecto. Apercebendo-se do erro, o humano insere a roda no seu lado (Figuras 5.2(a) a

5.1(d)). Em seguida, o humano tenta passar um parafuso ao robot, este indica que tem um no seu espaço de trabalho e que o humano ainda necessita do parafuso, então o humano insere o parafuso no seu lado ao mesmo tempo que o robot insere o parafuso que se encontra no seu espaço de trabalho (Figuras 5.2(e) a 5.1(i)).

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

Este trabalho apresentou o *ARoS*, um robot antropomórfico, que foi concebido para tarefas de interacção e cooperação com um parceiro humano

Foi projectada uma estrutura de suporte aos diversos sistemas que compõem o robot, sendo esta estrutura desenhada para responder aos diversos desafios deste robot e simulada para que o seu dimensionamento fosse o mais confiável possível. O sistema braço+mão foi seleccionado de modo a que o robot tivesse forma humana. O tamanho do braço influenciou as dimensões da estrutura para que as proporções do robot fossem semelhantes às de um humano. O braço usado no robot não tem a mesma capacidade de carga de um braço humano, contudo os objectos que se pretendem manipular são leves e pequenos, e como tal, um braço apenas é suficiente. A mão, apesar de não apresentar a forma ideal do ponto de vista humano, adapta-se perfeitamente às suas funções. Da mesma forma, o braço não apresenta proporções totalmente correctas do ponto de vista humano (a zona do pulso é desproporcional relativamente ao resto do braço, o que prejudica a visualização do movimento - este aspecto encontra-se neste momento em aperfeiçoamento), mas no entanto é capaz de executar movimentos similares aos de um humano. Apesar do robot estar equipado apenas com um braço, está preparado para receber um braço extra, ficando habilitado dessa forma a realizar tarefas que exijam manipulações mais complexas de objectos.

O sistema de visão composto por uma unidade *Pan-Tilt* e duas câmaras dotam o robot de uma visão *stereo* apropriada para estimar distâncias aos objectos que detecta. Combinando a informação proveniente do sistema *stereo* com a inclinação das câmaras através da unidade *Pan-Tilt*, é possível calcular coordenadas 3D de objectos com boa precisão. Isto torna o robot capaz de agarrar qualquer objecto que esteja ao seu alcance, desde que o objecto tenha uma dimensão apropriada e a sua orientação não seja relevante, visto que o *software* de detecção de objectos não consegue determinar a orientação, determina a sua posição no espaço à medida que vai sendo necessário. Tendo em conta que o sistema *stereo* é de baixo custo, o desempenho oferecido é muito bom, conseguindo processar a informação dentro dos requisitos temporais impostos pela aplicação. É no entanto possível acelerar o processo, se para tal for usado um sistema de visão que processe a informação *stereo* por si em *hardware* próprio, libertando o processador do computador dessa tarefa. Sistemas deste género estão disponíveis através do mesmo fabricante das câmaras usadas neste robot, sendo desta forma possível processar praticamente em tempo real informação 3D do ambiente onde o robot se insere.

No futuro pretende-se que este robot tenha a capacidade de reagir de forma apropriada a situações em que ocorra um erro seu e, a partir daí, conseguir corrigir-se a si próprio - estas são situações que irão inevitavelmente ocorrer em aplicações com condições reais. Será importante ainda que o robot possa ter a capacidade de aprender novas tarefas por observação e interacção (Sousa, 2008), permitindo que o robot seja flexível e se adapte a diferentes ambientes e tarefas.

Além da capacidade de aprendizagem, pretende-se tornar este robot socialmente mais inteligente (um robot autónomo que interage activamente com humanos, fazendo com que o robot não seja usado como uma mera ferramenta) integrando capacidades para: *i)* perceber a intenção dos movimentos e *ii)* interpretar expressões faciais.

Referências Bibliográficas

- A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, C. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck, and G. Hirzinger, “The dlr lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 376–385, 2007.
- R. O. Ambrose, H. Aldridge, R. S. Askew, R. R. Burrige, W. Bluethmann, M. Diftler, C. Lovchik, D. Magruder, and F. Rehnmark, “Robonaut: Nasa’s space humanoid,” *IEEE INTELLIGENT SYSTEMS*, pp. 57–63, 2000.
- T. Asfour, K. Regenstein, P. Azad, J. Schröder, A. Bierbaum, N. Vahrenkamp, and R. Dillmann, “Armar-iii: An integrated humanoid platform for sensory-motor control,” in *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids’06)*, Genova, Italy, 2006, pp. 169–175.
- T. Asfour, K. Regenstein, P. Azad, J. Schröder, and R. Dillmann, “Armar-iii: A humanoid platform for perception-action integration,” *International Workshop on Human-Centered Robotic Systems (HCRS), Munich, October 6th and 7th, 2006*.
- T. Asfour, K. Berns, and R. Dillmann, “The humanoid robot armar: Design and control,” *The 1st IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2000)*, pp. 7–8, 2000.
- G. A. Bekey, “On autonomous robotics,” *The Knowledge Engineering Review*, vol. 13, no. 2, pp. 143–146, 1998.

Referências Bibliográficas

- T. Bergener, C. Bruckhoff, P. Dahm, H. Janßen, F. Joublin, and R. Menzner, “Arnold: An anthropomorphic robot for human environments,” Institut für Neuroinformatik, Rhur-Universität Bochum, 44780 Bochum, Internal report 97-12, July 1997.
- L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, and G. Vassura, “How far is the human hand? a review on anthropomorphic robotic end-effectors,” Department of Electronics, Computer Science and Systems, University of Bologna, Tech. Rep., 2004.
- E. Bicho, L. Louro, N. Hipólito, and W. Erlhagen, “A dynamic neural field architecture for flexible and fluent human-robot interaction,” in *Proceedings of the 2008 International Conference on Cognitive Systems*. Karlsruhe, Germany: University of Karlsruhe, April 2008.
- J. Bjørnstrup, “Estimation of human body segment parameters - historical background,” Laboratory of Image Analysis, Institute of Electronic Systems, Aalborg University, Tech. Rep. LIA 95-20, October 1995.
- C. Borst, M. Fischer, S. Haidacher, H. Liu, and G. Hirzinger, “Dlr hand ii: experiments and experience with an anthropomorphic hand,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA '03*, vol. 1, September 14-19 2003, pp. 702–707.
- C. Borst, C. Ott, T. Wimböck, B. Brunner, F. Zacharias, B. Bäuml, U. Hillenbrand, S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, “A humanoid upper body system for two-handed manipulation,” in *Inproceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, 10-14 April 2007, pp. 2766–2767.
- C. Breazeal, “Early experiments using motivations to regulate human-robot interaction,” in *In Proceedings of 1998 AAAI Fall Symposium: Emotional and Intelligent, The Tangled Knot of Cognition*, Orlando, FL., 1998, pp. 31–36.

- R. A. Brooks and L. A. Stein, “Building brains for bodies,” *Autonomous Robots*, vol. 1, no. 1, pp. 7–25, 1994.
- J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, “Dlr-hand ii: next generation of a dextrous robot hand,” *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 1, 2001.
- J. Chestnutt, M. Lau, G. Cheung, J. Kuffner, J. Hodgins, and T. Kanade, “Footstep planning for the honda asimo humanoid,” in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 629–634.
- R. Drillis and R. Contini, “Body segment parameters,” New York University, School of Engineering, Research Division, Technical Report 1166-03, September 1966, new York under contract with Office of Vocacional Rehabilitation, Department of Health, Education and Welfare.
- B. R. Duffy, “Anthropomorphism and the social robot,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 177–190, 2003.
- W. Erlhagen and E. Bicho, “The dynamic neural field approach to cognitive robotics.” *Journal of Neural Engineering*, vol. 5, pp. 36–54, 2006.
- W. Erlhagen, A. Mukovskiy, and E. Bicho, “A dynamic model for action understanding and goal-directed imitation.” *Brain Research*, vol. 1083, pp. 174–188, 2006.
- W. Erlhagen, A. Mukovskiy, E. Bicho, G. Panin, C. Kiss, A. Knoll, H. V. Schie, and H. Bekkering, “Goal-directed imitation for robots: a bio-inspired approach to action understanding and skill learning,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, pp. 353–360, 2006.
- W. Erlhagen, A. Mukovskiy, F. Chersi, and E. Bicho, “On the development of intention understanding for joint action tasks.” in *6th IEEE Int. Conf. on De-*

Referências Bibliográficas

- velopment and Learning, 11-13 July.* Imperial College London, 2007, pp. 140–145.
- P. Fitzpatrick, G. Metta, and L. Natale, “Towards long-lived robot genes,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 1, pp. 29–45, 2008.
- T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn, “A survey of socially interactive robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, pp. 143–166, 2003.
- E. Garcia, M. A. Jimenez, P. G. Santos, and M. Armada, “The evolution of robotics research,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 90–103, 2007.
- L. Geppert, “Qrio the robot that could,” *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 5, pp. 34–37, 2004.
- B. Graf, E. Helms, V. Lakshmana, and B. Rohrmoser, “Anthropomorphic robot assistants - giving the human a helping hand,” March 2003.
- D. Harris, “To be almost human or not to be, that is the question,” *Electronic Design*, vol. 55, no. 4, p. 37, February 2007.
- S. Hashimoto, S. Narita, H. Kasahara, A. Takanishi, S. Sugano, K. Shirai, T. Kobayashi, H. Takanobu, T. Kurata, K. Fujiwara, T. Matsuno, T. Kawasaki, and K. Hoashi, “Humanoid robot-development of an information assistant robot hadaly,” *Robot and Human Communication, 1997. RO-MAN '97. Proceedings., 6th IEEE International Workshop on*, pp. 106–111, Sep-1 Oct 1997.
- S. Hashimoto, S. Narita, H. Kasahara, K. Shirai, T. Kobayashi, A. Takanishi, S. Sugano, J. Yamaguchi, H. Sawada, H. Takanobu, K. Shibuya, T. Morita, T. Kurata, N. Onoe, K. Ouchi, T. Noguchi, Y. Niwa, S. Nagayama, H. Tabayashi, I. Matsui, M. Obata, H. Matsuzaki, A. Murasugi, T. Kobayashi, S. Haruyama, T. Okada, Y. Hidaki, Y. Taguchi, K. Hoashi, E. Morikawa, Y. Iwano, D. Araki, J. Suzuki, M. Yokoyama, I. Dawa, D. Nishino, S. Inoue,

- T. Hirano, E. Soga, S. Gen, T. Yanada, K. Kato, S. Sakamoto, Y. Ishii, S. Matsuo, Y. Yamamoto, K. Sato, T. Hagiwara, T. Ueda, N. Honda, K. Hashimoto, T. Hanamoto, S. Kayaba, T. Kojima, H. Iwata, H. Kubodera, R. Matsuki, T. Nakajima, K. Nitto, D. Yamamoto, Y. Kamizaki, S. Nagaike, Y. Kunitake, and S. Morita, “Humanoid robots in waseda university: Hadaly-2 and wabian,” *Autonomous Robots*, vol. 12, no. 1, January 2002.
- L. Iocchi and K. Konolige, “A multiresolution stereo vision system for mobile robots,” in *In Proceedings of the AI*IA98 Workshop on New Trends in Robotics Research*, 1998.
- I. Iossifidis, C. Bruckho, C. Theis, C. Grote, C. Faubel, and G. Schöner, “Cora: An anthropomorphic robot assistant for human environment,” in *Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Berlin, Germany, 2002.
- I. Iossifidis, C. Bruckhoff, C. Theis, C. Grote, C. Faubel, and G. Schöner, *Cooperative Robot Assistant (CoRA) For Human Environments*. Springer Press, 2004, vol. 14/2004, no. ISBN: 3-540-23211-7., pp. 385–401. [Online]. Available: <http://www.springerlink.com/index/91656F7B99CD2C2C>
- K. Itoh, H. Miwa, M. Matsumoto, M. Zecca, H. Takanobu, S. Roccella, M. C. Carrozza, P. Dario, and A. Takanishi, “Various emotional expressions with emotion expression humanoid robot we-4rii,” in *2004 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation, Proceedings, TExCRA 2004*, Tokyo, Japan, 2004, pp. 35–36, humanoid robots; Various emotional expressions; Robot hand; Patent number;.
- L. Jamone, G. Metta, F. Nori, and G. Sandini, “James: A humanoid robot acting over an unstructured world,” in *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS’06)*, 2006, pp. 143–150.
- I. Kato, “Development of wabot 1, biomechanism 2,” 1973.

Referências Bibliográficas

- K. Konolige, “Small vision systems - hardware and implementation,” in *In Proceedings of International Symposium on Robotics Research*, Hayama, Japan, 1997, pp. 111–116.
- K. Konolige and D. Beymer, *SRI Small Vision System - User’s Manual*, SRI International, May 2007, software version 4.4d.
- , *SRI Small Vision System - Calibration Supplement to the User’s Manual*, SRI International, May 2007, software version 4.4d.
- D.-W. Lee, T.-G. Lee, B. So, M. Choi, E.-C. Shin, K. Yang, M.-H. Baek, H.-S. Kim, and H.-G. Lee, “Development of an android for emotional expression and human interaction,” in *Proceedings of the 17th World Congress of The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11 2008, pp. 4336–4337.
- N. Li, J. Bu, and C. Chen, “Real-time video object segmentation using hsv space,” *Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on*, vol. 2, pp. II-85–II-88, 2002.
- A. Mehrabian, *Silent messages*. Oxford, England : Wadsworth, 1971, viii, 152.
- G. Metta, P. Fitzpatrick, and L. Natale, “Yarp: yet another robot platform,” *International Journal on Advanced Robotics Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 43–48, 2006.
- R. Meulenbroek, D. Rosenbaum, C. Jansen, J. Vaughan, and S. Vogt, “Multijoint grasping movements: Simulated and observed effects of object location, object size and initial aperture,” *Experimental Brain Research*, vol. 138, no. 2, pp. 219–234, May 2001.
- T. Minato, M. Shimada, H. Ishiguro, and S. Itakura, “Development of an android robot for studying human-robot interaction,” in *Lecture Notes In Computer*

- Science: Proceedings of the 17 th international conference on Innovations in applied artificial intelligence*, vol. 17, no. 20. Springer, 2004, pp. 424–434.
- T. Morita and S. Sugano, “Development and evaluation of seven-d.o.f. mia arm,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation 1997, ICRA '97*, 1997, pp. 462–467.
- T. Morita, H. Iwata, and S. Sugano, “Development of human symbiotic robot: Wendy,” in *Inproceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, May 10-15 1999, pp. 3183–3188.
- R. D. Newman-Norlund, M. L. Noordzij, R. G. J. Meulenbroek, and H. Bekkering, “Exploring the brain basis of joint action: Co-ordination of actions, goals and intentions,” *Social Neuroscience*, vol. 2, no. 1, pp. 48–65, March 2007.
- F. Pfeiffer, K. Loffler, and M. Gienger, “The concept of jogging johnnie,” in *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation. ICRA '02.*, vol. 3, Washington D.C., USA, May 2002, pp. 3129–3135.
- D. Rosenbaum, R. Meulenbroek, and J. Vaughan, “Planning reaching and grasping movements: theoretical premises and practical implications,” *Motor Control*, vol. 5, no. 2, pp. 99–115, April 2001.
- M. E. Rosheim, “In the footsteps of leonardo [articulated anthropomorphic robot],” *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 4, no. 2, pp. 12–14, June 1997.
- Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, “The intelligent asimo - system overview and integration,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, 2002, pp. 2478–2483.
- N. Sebanz, H. Bekkering, and G. Knoblich, “Joint action: bodies and minds moving together,” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 10, pp. 70–76, 2006.

Referências Bibliográficas

- M. Shiomi, T. Kanda, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Interactive humanoid robots for a science museum,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 25–32, 2007.
- E. C. Silva, “A model for planning the movement in 3d of a 7dof anthropomorphic robotic arm,” University of Minho, Tech. Rep., 2008.
- E. Sousa, “Learning in a dynamic field based architecture for human-robot interaction: An hebbian perspective,” Master’s thesis, University of Minho, 2008.
- S. Sugano, “Design of humanoid robot for human-robot interaction - waseda robots: Wendy and wamoeba,” in *Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2005 IEEE International Conference on 2005*, 2005, pp. 16–19. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/11203/36063/01708588.pdf?isnumber=36063&arnumber=1708588>
- S. Sugano and I. Kato, “Wabot-2: Autonomous robot with dexterous finger-arm–finger-arm coordination control in keyboard performance,” *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 90–97, Mar 1987.
- T. Tojo, Y. Matsusaka, T. Ishii, and T. Kobayashi, “A conversational robot utilizing facial and body expressions,” in *2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 2, 2000, pp. 858–863.
- W. Townsend, “The barretthand grasper - programmably flexible part handling and assembly,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 181–188, 2000.
- J. Vaughan, D. A. Rosenbaum, and R. G. J. Meulenbroek, “Modeling reaching and manipulating in 2- and 3-d workspaces: The posture-based model,” in *Proceedings of the ICDL 2006*. Bloomington: Proceedings of ICDL 2006 [CD-Rom], June 2006.

- G. Westphal, “Feature-driven emergence of model graphs for object recognition and categorization,” Ph.D. dissertation, Institut für Neuro- und Bioinformatik, Universität zu Lübeck, 2006.

Referências Bibliográficas

Esta página foi intencionalmente deixada em branco!