

Relatório Científico-Pedagógico da disciplina de

Robótica Industrial

E seu enquadramento na formação em Automação na

Licenciatura em Engenharia Mecânica na

Universidade de Aveiro

Vítor Manuel Ferreira dos Santos

Março de 2004

Departamento de Engenharia Mecânica

Universidade de Aveiro

Conteúdos

1. INTRODUÇÃO	1
2. PLANOS DE ESTUDOS E FORMAÇÃO EM AUTOMAÇÃO	2
2.1 O PLANO ORIGINAL.....	2
2.2 ANÁLISE DAS COMPONENTES DE FORMAÇÃO EM AUTOMAÇÃO NA LICENCIATURA	4
2.3 A AUTOMAÇÃO NOUTRAS UNIVERSIDADES PORTUGUESAS	5
3. A ROBÓTICA EM UNIVERSIDADES PORTUGUESAS	7
4. A DISCIPLINA DE ROBÓTICA INDUSTRIAL DA UNIVERSIDADE DE AVEIRO.....	14
4.1 INTRODUÇÃO.....	14
4.2 CARACTERIZAÇÃO E OBJECTIVOS DE FORMA RESUMIDA.....	15
4.3 CONTINGÊNCIAS NA CRIAÇÃO DA DISCIPLINA.....	16
4.4 CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS	17
4.5 BIBLIOGRAFIA E OUTRA DOCUMENTAÇÃO	22
4.5.1 <i>Livros</i>	22
4.5.2 <i>Apontamentos do professor</i>	23
4.5.3 <i>Exercícios e exames resolvidos</i>	24
4.6 METODOLOGIAS PEDAGÓGICAS.....	25
4.6.1 <i>Aulas teóricas</i>	25
4.6.2 <i>Aulas práticas e componente experimental</i>	25
4.6.3 <i>Planeamento do semestre de 2003/2004</i>	27
4.6.4 <i>Sumários da edição de 2003/2004</i>	28
4.6.5 <i>Avaliação</i>	32
4.6.6 <i>Avaliação do ensino</i>	33
4.7 ESTATÍSTICAS.....	33
5. A ROBÓTICA INDUSTRIAL NO FUTURO DA LICENCIATURA.....	35
6. CONCLUSÕES	36
7. ANEXO I – EXEMPLARES DE PROVAS DE AVALIAÇÃO ESCRITAS.....	37
8. ANEXO II – LISTA DOS TRABALHOS PRÁTICOS PARA AVALIAÇÃO	44

Nota Prévia

Este documento descreve a génese, os objectivos, os conteúdos e as metodologias de avaliação da disciplina de Robótica Industrial na Licenciatura em Engenharia Mecânica (LEM) da Universidade de Aveiro (UA). Entre outros, são descritos os processos iniciais de enquadramento em todo um plano curricular com as suas diversas contingências, não só em robótica mas em toda a frente de Automação com uma análise comparada do que à data se passava em outras universidades portuguesas. Segue-se a definição de objectivos e conteúdos da disciplina bem como as opções tomadas face a restrições e limitações contextuais na formação, e sobretudo na continuidade da formação, dos futuros licenciados em Engenharia. Além disso inclui-se também uma descrição detalhada de programa, sumários, uma breve análise bibliográfica, processos de avaliação, e algumas reflexões de índole pedagógica e científica. Em anexo juntam-se exemplares de provas escritas de avaliação e a lista de trabalhos práticos propostas e realizados pelos estudantes.

1. Introdução

A criação do primeiro plano de estudos da Licenciatura em Engenharia Mecânica (LEM) da Universidade de Aveiro (UA) surge após a publicação no Diário da República nº 85, II Série, de 12 de Abril de 1994, pp. 3344, tendo o 1º ano do curso iniciado no ano lectivo de 1994/1995. Conforme se pode ler nos Guias da Universidade de Aveiro dos anos de 1995/96 e seguintes, foram linhas delineadoras na criação da licenciatura, entre outras, razões de contexto sócio-tecnológico da região do Distrito de Aveiro e regiões limítrofes. De facto, e como dizem os documentos, a indústria metalomecânica implantada na região, com pequenas e grandes empresas (sendo destas últimas o melhor exemplo a ex-Renault em Cacia, Aveiro) requeria a presença de quadros em Engenharia Mecânica; esses quadros, por não existirem formados na região, eram “importados” de universidades vizinhas, nomeadamente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Houve na criação desta licenciatura um certo carácter de modernidade porque, e à semelhança do que aliás já se praticava na FEUP, uma licenciatura moderna em Engenharia Mecânica deve contemplar os instrumentos tecnológicos que permitam aos tradicionais processos de fabrico e produção uma maior eficácia e produtividade e também maior segurança. Explica-se assim a presença da componente de Automação como uma das duas grandes apostas, ao lado da Tecnologia Mecânica, na fundação desta licenciatura.

Esperava-se que um futuro engenheiro mecânico pela Universidade de Aveiro apresentasse competências quer sobre os processos tecnológicos como a maquinaria, a extrusão, a estampagem, etc., quer sobre as vertentes de automatização das máquinas, processos e sistemas produtivos em geral.

Na componente de automação foram estipuladas, mesmo se apenas informalmente, três frentes de actividade que hoje se podem designar do seguinte modo: i) Automatismos e Sistemas, ii) Informática Industrial e iii) Robótica. Em consequência, encetou o Conselho Directivo da então Secção Autónoma de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro o processo de recrutamento de docentes para dar corpo a cada uma destas três frentes. Foi no contexto de um concurso para Professor Auxiliar de um Doutor em Engenharia Mecânica ou Electrónica com experiência em Robótica que o autor concorreu e foi admitido para o corpo docente da Universidade de Aveiro em Março de 1996. Na secção Autónoma de Engenharia Mecânica havia já nessa altura dois assistentes em fase de Doutoramento ligados às outras duas componentes preconizadas para a área de Automação. No horizonte próximo estava também a contratação de um assistente convidado ligado à Indústria para fortalecer o vínculo Universidade-Indústria que desde cedo se advogava para esta licenciatura. Acabou por ser este o quadro fixo de quatro docentes em Automação durante vários anos na Licenciatura em Engenharia Mecânica.

A área de robótica, e também a de informática industrial, eram, e ainda o vão sendo, componentes de alguma especialidade na formação em automação e por isso constam normalmente no último, ou no limite, nos dois últimos anos do curso. No caso da Universidade de Aveiro, apareciam no 5º ano do curso, que só se viria a iniciar no ano lectivo de 1998/1999. Desde Março de 1996 haveria assim um período de cerca de dois anos antes que a componente de Robótica viesse a ser leccionada. Durante esse tempo, e a par da outra actividade requerida normalmente aos docentes (aulas, investigação, participação na gestão da Escola) havia uma tarefa de conceber programas curriculares, preparar aulas, bem como equipar laboratórios e delinear trabalhos práticos para alunos.

2. Planos de estudos e formação em automação

2.1 O plano original

O plano de estudos original da licenciatura (Tabela 1) previa um tronco comum de quatro anos e no quinto ano separava-se em dois ramos: Ramo de Tecnologia e Ramo de Automação. Este plano teve ajustes pontuais (em 1996-1997) na alteração de certas cargas horárias para ficar mais condizente com a natureza das disciplinas em causa. Foram disso exemplo a disciplina de Electrotecnia (2º ano, 2º semestre), leccionada pelo autor, que passou da carga horária 3/0/0 (T/TP/P) para 2/0/2, e a disciplina de Servomecanismos, leccionada por um dos outros docentes da área de automação (5º ano, 1º semestre do Ramo de Automação) que passou da carga horária 3/1/0 para 2/1/2. Estas preocupações foram apontadas, e posteriormente consumadas, por intermédio do autor e de outro docente da área de automação, e eram já um presságio da necessidade de alguns reajustes do plano de estudos.

Ano	1. Semestre					2. Semestre				
	Área	Disciplinas	T	TP	P U.C.	Área	Disciplinas	T	TP	P U.C.
1	M	Cálculo I	3	2	0 4.5	M	Cálculo II	3	2	0 4.5
	F	Física I	2	1	2 3.5	F	Física II	2	1	2 3.5
	Q	Química I	2	1	2 3.5	Q	Química II	2	1	2 3.5
	I	Introdução à Informática	3	0	2 4	I	Program., Estruturas de Dados e Algoritm.	3	0	2 4
	L	Inglês (anual)	0	2	0	L	Inglês (anual)	0	2	0 3
			<i>Totais</i>	2	2	15.5		<i>Totais</i>	2	2
2	M	Cálculo III	3	2	0 4.5	M	Introdução à Estatística	3	2	0 4.5
	M	Introdução à Análise Numérica	3	2	0 4.5	ELE	Electrotecnia	3	0	0 3
	EMe _c	Mecânica dos Sólidos	2	0	3 3	CEM	Introdução aos Materiais	1	1	2 2.5
	Ge	Economia I	2	2	0 3.5	CEM	Química-Física dos Polímeros	2	2	0 3.5
						F	Termodinâmica Macroscópica	3	2	0 4.5
			<i>Totais</i>	1	9	15.5		<i>Totais</i>	2	1
3	EMe _c	Mecânica das Estruturas	2	0	3 3	F	Fenómenos de Transferência	3	2	1 4.5
	EMe _c	Tecnologia Mecânica I	2	0	3 3	EMe _c	Máquinas Térmicas	2	0	2 3
	EMe _c	Vibrações	3	0	0 3	GEM	Propriedades Mec. e Térmicas	3	1	0 3.5
	CEM	Instrumentação e Controle Automático	2	2	0 3.5	EMe _c	Automatismos Industriais	2	0	2 3
	EMe _c	Desenho Técnico	1	0	3 2	EMe _c	Desenho de Construção Mecânica	1	0	3 2
			<i>Totais</i>	2	1	14.5		<i>Totais</i>	2	2
4	EMe _c	Órgãos de Máquinas e Antep. (anual)	2	0	3 6.5	EMe _c	Órgãos de Máquinas e Antep. (anual)	2	0	3 6.5
	EMe _c	Concepção e Fabrico Assis. por Comp.	2	0	2 3	F	Transmissões Hidrostáticas	3	2	1 4.5
	EMe _c	Tecnologia Mecânica II	2	0	3 3	EMe _c	Tecn. dos Processos de Ligação	2	0	3 3
	Ge	Gestão e Organização da Produção I	2	2	0 3.5	Ge	Gestão da Qualidade	2	2	0 3.5
	M	Inv. Operacional e Optimização	2	0	3 3					
			<i>Totais</i>	2	3	12.5		<i>Totais</i>	2	0
5	Ramo de Tecnologia:									

EMe c	Sem. de Processos Tecnológicos (anual)		10			EMe c	Sem. de Processos Tecnológicos (anual)		12		11
EMe c	Engenharia das Superfícies	3	1	0	3.5	EMe c	Materiais de Construção Mecânica	3	1	0	3.5
EMe c	Informática Industrial	3	0	2	4	EMe c	Microtecnologia	2	0	0	2
	Opção I	2	0	3	3		Opção II	3	0	2	4
	<i>Totais</i>	2	4		10.5		<i>Totais</i>	2	3		20.5
Ramo de Automação:											
	Projecto de Automação (anual)		10				Projecto de Automação (anual)		12		11
EMe c	Servomecanismos	3	1	0	3.5	EMe c	Robótica Autónoma e Móvel	2	0	0	2
EMe c	Informática Industrial	3	0	2	4	EMe c	Comando Numérico de Máquinas Ferram.	3	0	2	4
	Opção I	2	0	3	3		Opção II	2	0	3	3
	<i>Totais</i>	2	4		10.5		<i>Totais</i>	2	4		20

Tabela 1 – Plano de estudos original da Licenciatura em Engenharia Mecânica (1994-1996)

A tarefa de planear e preparar a componente de robótica na licenciatura deparou-se desde cedo com uma questão estrutural do próprio curso. Nesse plano original estava (apenas) prevista uma disciplina obrigatória no 2º semestre do 5º ano designada por Robótica Autónoma e Móvel. Os conteúdos propostos *a priori* no processo de criação do curso apontavam uma abordagem considerada pelo autor como não totalmente adequada para aquilo que seriam os preceitos de uma formação em robótica numa Licenciatura em Engenharia Mecânica. De facto, uma análise mais detalhada para essa proposta original (Tabela 2), mostra a informalidade com que terá sido elaborada. O programa não é apenas ambicioso para a carga horária que propunha (2/0/0), mas é também desajustado naquilo que deveria ser uma formação sólida em robótica para um curso de licenciatura em engenharia, e até algo desequilibrado no detalhe com que os tópicos eram apresentados.

1. Introdução e classificação de robots. 1.1 Braços articulados. 1.2 Robots móveis e AGV (auto guide vehicles).	7.2 Ultrassons. 7.3 Infravermelhos. 7.4 Visão artificial. 7.5 Laser range finder. 7.6 Giroscópios. 7.7 Acelerómetros. 7.8 Sensores de proximidade.
2. Especificações de robots. (essencialmente definições básicas e terminologia).	8. Planeamento de movimento. 8.1 Espaço de configurações. 8.2 Campos de potencial. 8.3 Diagramas de Voronoi. 8.4 Restrições holonómicas.
3. Arquitectura de braços robóticos.	9. Utilização de simuladores.
4. Cinemática directa e inversa. 4.1 Definição do problema e modelos.	10. Casos reais: estudo detalhado de um ou mais exemplos.
5. Controlo de robots. 5.1 Posição e velocidade. 5.2 Controlo dos motores. Controladores PID. 5.3 electrónica AC e DC. 5.4 Controlo digital.	
6. Planeamento de trajectórias e estimação da posição.	
7. Realimentação sensorial. 7.1 Odómetros.	

Tabela 2 - Programa original da disciplina de Robótica Autónoma e Móvel (1996)

Face ao panorama descrito havia um grande trabalho a desenvolver no sentido de dotar a licenciatura, mormente no ramo de Automação, de uma disciplina de robótica que garantisse mais-valias de aprendizagem e experiência aos futuros jovens licenciados. Era assim aparente que a robótica deveria ser dividida em duas disciplinas distintas; numa primeira dever-se-iam abordar os

fundamentos da robótica de manipulação (de grande relevo no meio industrial) e na outra, então sim, abordar questões mais avançadas ligadas à robótica móvel e a problemática da percepção normalmente associada. Em suma, os conteúdos originais para Robótica Autónoma e Móvel, devidamente adaptados, separar-se-íam em duas (ainda) grandes fracções! No entanto, e na impossibilidade de uma reestruturação curricular à época, só restava uma possibilidade imediata: recorrer às disciplinas opcionais do curso para suprir a lacuna no plano. As disciplinas opcionais anteriormente criadas para o ramo de Automação são as indicadas na Tabela 3 onde se constata a inexistência de uma qualquer disciplina onde se pudesse, com legitimidade, abordar os assuntos da robótica de manipuladores uma vez que a robótica móvel ficaria com o seu espaço no 2º semestre na disciplina obrigatória já referida, e agora em vias de reorganização.

Por conseguinte, após proposta do autor aos órgãos científicos, foi criada oficialmente em 1998 uma nova disciplina de opção para o 1º semestre do 5º ano que viria a ser designada por Robótica Industrial onde o tema central seria o estudo e utilização dos manipuladores robóticos.

Opção I (1º Sem 5º Ano)	Opção II (2º Sem 5º Ano)
Teorias de Sistemas e Controlo	Complementos de Automação
Cálculo de Variações	Microtecnologia
Introdução à Gestão de Empresas	Equações Diferenciais
Fiabilidade e Controlo de Qualidade	Gestão Integrada de Projectos
Poluição Atmosférica I	Poluição Atmosférica II

Tabela 3 – Lista original das disciplinas de Opção para o Ramo de Automação (1996)

2.2 Análise das componentes de formação em automação na licenciatura

A formação em robótica não pode ser abordada indistintamente de todo o quadro de formação em Automação. Por isso, e antes da criação da disciplina de Robótica Industrial e mesmo depois disso (desde os anos de 1997 a 1999) foram elaborados documentos que visavam a preparação de uma reestruturação curricular que desse mais consistência à formação em automação na licenciatura em Engenharia Mecânica na Universidade de Aveiro. Esses documentos definiam as competências do engenheiro mecânico com especialidade em Automação suportando-se em trabalhos anteriores de outros autores (tais como A. Magalhães e F. Almeida, em "Falando de Automação", da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ou ainda A. Dente do IST no documento "Automação e Controlo Industrial - Que formação para os Engenheiros de Automação e Controlo Industrial?") e faziam ainda uma análise comparada dos planos curriculares em Automação em várias licenciaturas nas Universidades Portuguesas à data. A pirâmide de automação, reproduzida da *Industrial Technology Catalog* na Figura 1 com adaptações, resume a organização e dependência de saberes na definição do que é a Automação e serviu também ela de guia a uma avaliação da componente de automação na licenciatura onde a robótica estaria inserida.

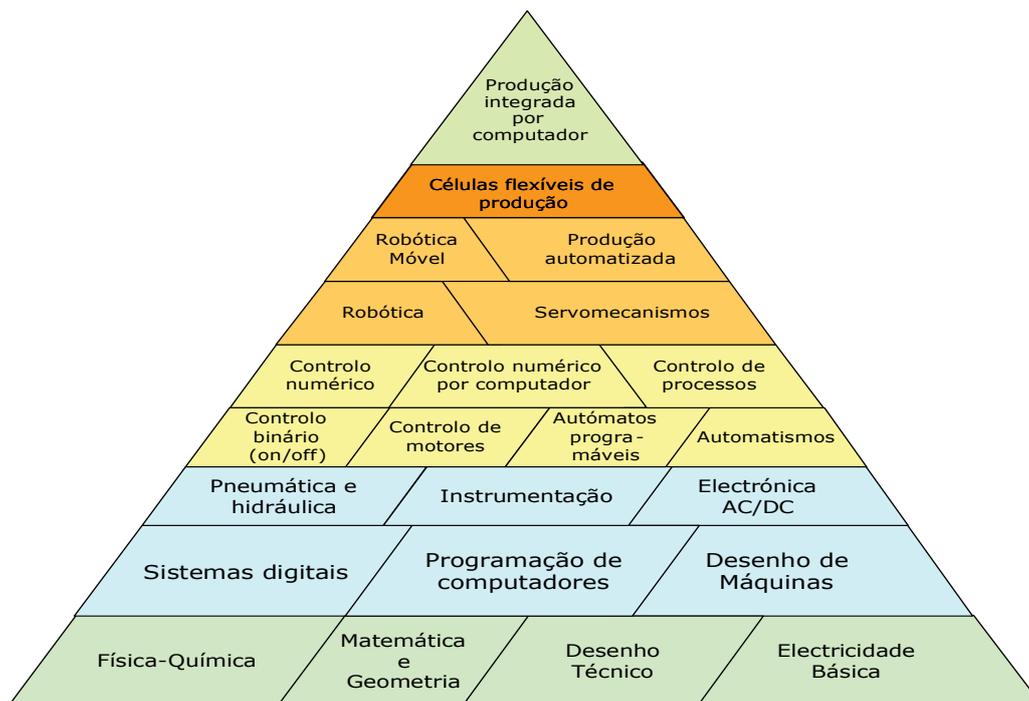


Figura 1 – Pirâmide de Automação (Adaptado de *Industrial Technology Catalog* editado pela companhia Americana AMATROL, 1988)

2.3 A automação noutras universidades portuguesas

Assim, durante os anos de 1996-1998 foi encetado um estudo para observar o panorama em outras universidades portuguesas, não apenas na Robótica Industrial mas na componente de Automação em geral; as descrições e análises que de seguida se fazem devem ser vistas nesse contexto temporal.

Verificando os planos de estudo da Licenciatura em Engenharia Mecânica noutras universidades portuguesas, onde também se oferece o ramo de automação, constata-se a existência de mais disciplinas adstritas ao chamado “tronco comum” da licenciatura do que na Universidade de Aveiro! Mas, e que é mais importante, verifica-se haver uma continuidade na abordagem da automação, assegurada pela presença de uma ou mais disciplinas em todos, ou quase todos os semestres do curso após o 1º ano. Apresentam-se de seguida (Tabela 4 e textos subsequentes) os panoramas das principais universidades portuguesas em comparação com a Universidade de Aveiro no que diz respeito às disciplinas que formam a coluna dorsal da componente de automação.

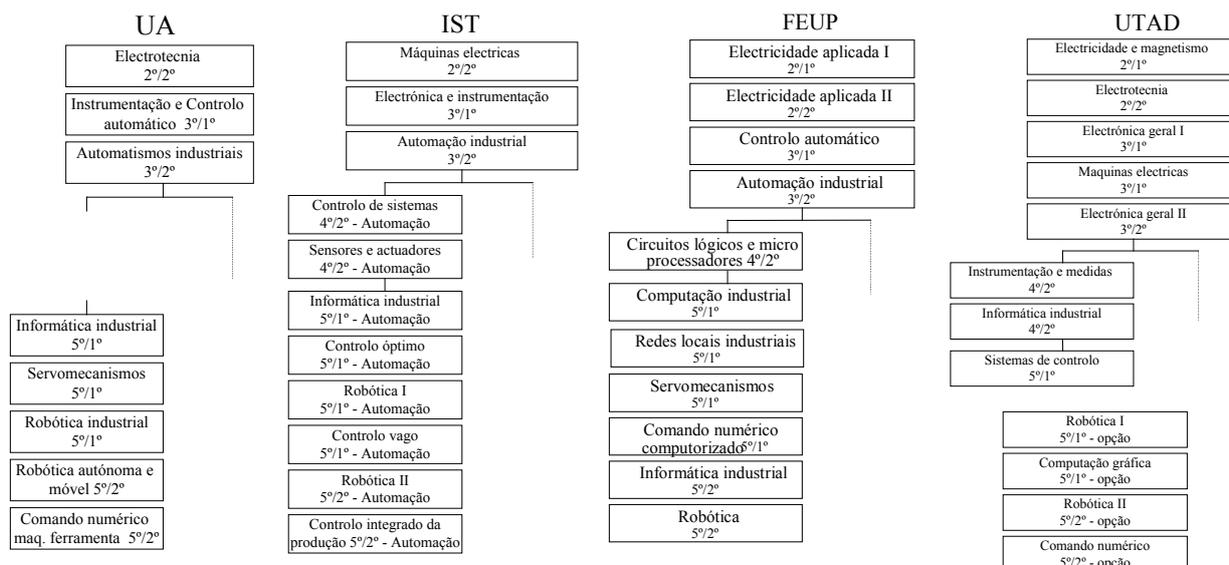


Tabela 4 - Comparação da componente de automação em Licenciaturas em Engenharia Mecânica entre a UA, o IST, a FEUP e a UTAD por volta dos anos de 1997/98. Actualmente os planos de estudo são ligeiramente diferentes ou as disciplinas mudaram de nome.

A **Universidade Nova de Lisboa** não apresenta a variante de automação na Licenciatura de Engenharia Mecânica, mas mesmo assim consta de um tronco comum que abarca as seguintes disciplinas, que se reconhecem essenciais ao estudo e aprendizagem da Automação:

Automação I Automação II	Electrotécnica Geral Electrónica Geral	Introdução aos Computadores e Programação Teoria de Sistemas
-----------------------------	---	---

A **Universidade do Minho** não oferece uma especialização em automação, mas ainda assim o seu programa de Licenciatura em Engenharia Mecânica oferece tantas ou mais disciplinas de base (tronco comum) do que a licenciatura de Aveiro:

2º Ano	3º Ano	4º Ano	5º Ano
Electricidade e Magnetismo Electrónica e Regulação	Electrotecnia	Automação	Opção II - Máquinas-Ferramenta e Comando Numérico Opção III - Automação do Fabrico

Por seu lado, a **Universidade de Coimbra** também não apresenta a variante de automação na Licenciatura de Engenharia Mecânica. Todavia, no seu tronco comum (2º e 3º ano) apresenta as três disciplinas semestrais de *Electrónica e Instrumentação*, *Práticas de Computação*, e *Automação*. Por outro lado, oferece uma variante de automação na Licenciatura em Engenharia Electrotécnica, em que o Ramo de Automação se distingue no logo no 3º ano e que contempla um plano de estudos como se indica de seguida a título meramente informativo:

3.º Ano	4.º Ano	5.º Ano
Automação Industrial Sistemas de Operação Tecnologias e Metodologias da Produção	Redes de Dados I, Sistemas de Tempo Real Controlo Digital I, Controlo de Qualidade e Manutenção Mecatrónica, Instalações Eléctricas e de Telecomunicações Criação e Gestão de Empresas Robótica, Controlo Digital II Técnicas de Planeamento e Gestão	Controlo Não Destrutivo Opção Opção Compatibilidade Electromagnética Opção Opção Projecto

Com estes dados era óbvio que a componente de automação, tão firmemente assinalada como relevante na concepção do curso de Licenciatura em Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, não encontrava em termos de planos de estudo essa expressão que afinal era tão mais óbvia nas outras universidades; urgia reestruturar, mas só em 2001 surgiu o novo plano de estudos (Tabela

5). Até lá, porém, a componente de robótica do curso não pôde esperar e o processo de remodelação de Robótica Autónoma e Móvel e a criação da disciplina de Robótica Industrial tiveram lugar.

1º Semestre						2º Semestre								
Ano	Área	Disciplinas	T	TP	P	UC	ECTS	Área	Disciplinas	T	TP	P	UC	ECTS
1º	M	Cálculo I	2	3	0	4	7	M	Cálculo II	3	3	0	5	8
	F	Elementos de Física	2	1	2	3.5	5.5	F	Mecânica	2	1	2	3.5	7
	Q	Química Básica	2	1	2	3.5	5.5	EMEC	Introd. à Engenharia Mecânica	2	0	2	3	5.5
	M	Álgebra Linear e Geometria Analítica	3	2	0	4.5	7	I	Introdução à Programação em Fortran	2	0	3	3	5
	I	Aplicacionais para Ciências e Engenharia	2	0	2	3	5	EMEC	Desenho Técnico	1	0	3	2	4.5
		Totais		24		19	30				24		17	30
2º	F	Electricidade e Magnetismo	2	1	2	3.5	6	M	Métodos Estatísticos	2	0	3	3	6
	M	Cálculo III	3	2	0	4.5	7.5	ELE	Electrónica Básica	2	0	2	3	5
	M	Métodos Numéricos	2	0	3	3	6.5	F	Termodinâmica Macroscópica	3	2	0	4.5	7.5
	EMEC	Mecânica dos Sólidos	2	0	2	3	5.5	EMEC	Mecânica Aplicada I	2	0	2	3	7
	EMEC	Desenho de Construção Mecânica	1	0	3	2	4.5	CEM	Introdução aos Materiais	1	1	2	2.5	4.5
		Totais		23		16	30				22		16	30
3º	E	Introdução à Economia	2	2	0	3.5	5	EMEC	Mecânica de Fluidos	2	0	2	3	6
	EMEC	Tecnologia Mecânica I	2	0	3	3	6.5	EMEC	Automação I	2	0	3	3	6.5
	EMEC	Mecânica Aplicada II	2	0	2	3	6	EMEC	Tecnologia Mecânica II	2	0	3	3	6.5
	ELE	Instr. e Electrotecnia Aplicada	2	0	3	3	6.5	EMEC	Mecânica das Estruturas	2	0	2	3	6.5
	EMEC	Termodinâmica Aplicada	2	0	2	3	6	EMEC	Concepção e Fabrico Assistido por Computador	1	0	3	2	4.5
		Totais		22		16	30				22		14	30
4º	EMEC	Órgãos de Máquinas I	2	0	2	3	6	EMEC	Órgãos de Máquinas II	2	0	2	3	6
	CEM	Mat. de Construção Mecânica	2	1	2	3.5	7	EMEC	Máquinas Térmicas	2	1	2	3.5	7
	EMEC	Transmissão de Calor	2	0	2	3	6	EMEC	Tecn. dos Processos de Ligação	2	0	2	3	6
	GES	Gestão de Empresas	3	0	0	3	4	EMEC	Anteprojecto Mecânico		4		2.5	4
	EMEC	Servomecanismos	2	1	2	3.5	7	EMEC	Automação II	2	0	3	3	7
		Totais		21		16	30				22		15	30
5º	EMEC	Projecto (anual)	1	6		4	6	EMEC	Projecto (anual)	1	10		7	12
		Opção I	2	0	3	3	6		Opção IV	2	0	2	3	6
		Opção II	2	0	2	3	6		Opção V	2	0	2	3	6
		Opção III	2	0	2	3	6		Opção VI	2	0	2	3	6
		Opção Livre	3 a 4			3-4	6							
		Totais (min-max)		23-24		16/17	30				23		16	30

Tabela 5 - Plano de estudos da LEM da UA após a reestruturação curricular em 2001.

3. A Robótica em Universidades Portuguesas

A robótica é leccionada nas universidades portuguesas ao nível de licenciatura (normalmente no último ano, o 5º, dos cursos de Engenharia), mas também ao nível de Mestrado (Tabela 6). Encontram-se, como seria de esperar, duas linhas dominantes: uma ligada à robótica de manipuladores (mais relacionada com o termo “industrial”) e outra sobre sistemas móveis, incluindo sobretudo os autónomos.

Universidade	Disciplinas de cursos de:	
	Licenciatura	Mestrado
FEUP	Robótica (LEM) Robótica (LEEC)**	Robótica Industrial (MAIC)
IST	Robótica (LEEC e MEEC integrado)	
	Robótica (LEM)	Robótica Móvel** (MEEC)
	Robótica de Manipulação (LEM e MEM integrado)	
Coimbra	Robótica (LEEC)	Robótica Industrial (MEMec)

		Metodologias da Robótica Móvel** (MEEC)
		Robótica de Manipulação (MEEC)
		Sistemas Robóticos Autónomos** (MEEC)
UNL	Robótica (LEEC) (3 UC)	-
UTAD	Robótica I (4.5 UC) (EMEC)	-
	Robótica II (4.5 UC) (EMEC)	
Minho	-	Tecnologia Robótica (Mest.Elec.Indus.-AR)
UBI	Automação e Robótica II (EMEC)	-

Tabela 6 - Lista das principais disciplinas de robótica nos cursos de licenciatura e mestrado de universidades portuguesas, excluindo a Universidade de Aveiro. Assinalam-se com ** as disciplinas dedicadas à robótica móvel.

Quase todas as universidades têm tido disciplinas de robótica nas licenciaturas em Engenharia, sendo disso a excepção mais notória o caso da Universidade de Minho; esse facto foi inclusivamente assinalado no Relatório de Avaliação Externa que, na sua página 9, relativamente à Licenciatura em Engenharia Mecânica refere: (<http://www.acessoensinosuperior.pt/pdfs/1/100003042.pdf>) “O curso é desprotegido na área da robótica e integração de equipamentos automáticos em sistemas produtivos.”

Nome da disciplina	Área/Depart.	Grau de ensino	Número de ocorrências
Robótica (... , I, II)	Eng. Mecânica	Lic.	4
	Eng. Electrot.	Lic.	1
Robótica de Manipulação	Eng. Mecânica	Lic/Mest.	1
	Eng. Electrot.	Mest.	1
Robótica Industrial	Eng. Mecânica	Mest.	2
Automação e Robótica II	Eng. Mecânica	Lic.	1
Tecnologia Robótica	Eng. Electrot.	Mest.	1
Outras disciplinas ligadas apenas à robótica móvel	Eng. Electrot.	Mest.	3
		Lic.	1

Tabela 7 – Frequência de designações das principais disciplinas de robótica no universo das universidades portuguesas excluindo a Universidade de Aveiro.

Como se constata na Tabela 7, existe uma vasto leque de disciplinas dedicadas à robótica de manipuladores, sob um de três nomes principais: “Robótica”, “Robótica de Manipulação” ou “Robótica Industrial”, recordando porém que o nome não define tudo, e por vezes até estará algo desviado dos conteúdos. Outra conclusão é a ligação inequívoca entre a robótica de manipuladores/industrial e a área de Engenharia Mecânica, com 7 disciplinas *versus* 3 disciplinas ligadas à área de Engenharia Electrotécnica. Todavia, uma das 7 contabilizadas, a do Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo da FEUP, é o resultado da colaboração entre vários departamentos, incluindo o de Engenharia Electrotécnica. À parte esta contabilização fria, a observação dos conteúdos curriculares consolida o facto referido: ou seja, os conteúdos e organização geral surgem mais consistentes nas disciplinas da FEUP o do IST leccionadas às respectivas licenciaturas e mestrados em Engenharia Mecânica, como se pode observar nas tabelas que se seguem. Nessas tabelas transcrevem-se, com informação adicional, a lista das disciplinas de robótica de manipuladores e afins leccionadas na grande maioria das universidades públicas portuguesas. São omitidas, no contexto deste relatório, as descrições de disciplinas ligadas exclusivamente à robótica móvel e/ou autónoma. Para todos os casos é indicada a fonte da informação.

ROBÓTICA
Instituição: FEUP
Docentes: Paulo Abreu
Curso: Lic. Engenharia Mecânica
Carga horária/UC: 2/2/0, 3.5 UC
Referência web: http://www.fe.up.pt/si/disciplinas_geral/FormView?P_CAD_CODIGO=EM612&P_ANO_LECTIVO=2003/2004&P_PERIODO=2S
Objectivos <ul style="list-style-type: none"> • É objectivo desta disciplina transmitir os conhecimentos adequados à compreensão do funcionamento e utilização de sistemas robóticos, nomeadamente aos aspectos tecnológicos envolvidos na concepção, as características de funcionamento, programação e as aplicações industriais.
Programa <ul style="list-style-type: none"> • Fundamentos da Robótica. Desenvolvimento histórico. Definições de Robôs Automação e robótica *Aspectos Tecnológicos da Robótica. Configurações de robôs Sensores e actuadores Sistemas de Transmissão Mecânica em Robôs. • Análise Cinemática: Cinemática directa. Cinemática inversa. • Princípios do Controlo de Robôs: Controlo de posição; controlo de força. • Planeamento de trajectórias Interpolação no espaço das juntas. Interpolação no espaço cartesiano. • Linguagens de Programação em Robótica. Linguagens a nível do robô e a nível de tarefa. • Aplicações de Robôs Industriais Processos: soldadura, corte, rebarbagem. Operações de Montagem Operações de manipulação. • Especificação de Robôs. Características de repetibilidade, precisão, velocidade, capacidade de carga, peso, alcance, dimensões, espaço de trabalho, alimentações, controlador, interfaces e comunicações, eixos externos controláveis. • Células robotizadas
Bibliografia Principal <ul style="list-style-type: none"> • A disciplina é apoiada por bibliografia própria da disciplina "Robótica industrial" - acetatos • Fu, K. S., Gonzalez, R. C., Lee, C. S. G.: Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.
Bibliografia Complementar <ul style="list-style-type: none"> • Groover, M. P. ; Weiss, M., Nagel, R; Odrey, N.G. Industrial Robotics - Technology, programming and Applications McGraw-Hill, 1986. • Sciavicco, Lorenzo; Siciliano, Bruno Modeling and Control of Robot Manipulators McGraw-Hill, 1996. • Craig, John J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control Addison-Wesley Publishing, 1989.
Métodos de Ensino <ul style="list-style-type: none"> • A disciplina compreende aulas teóricas de exposição, apoiadas por meios audiovisuais relativos aos aspectos tecnológicos e de utilização de sistemas robóticos. As aulas práticas são complementares das aulas teóricas, permitindo aos alunos o aprofundamento dos aspectos da análise cinemática e dinâmica de sistemas robóticos e o contacto com robôs industriais, a sua utilização e a sua aplicação em tarefas de carácter industrial. Está prevista uma visita a uma empresa metalomecânica possuidora de células de soldadura robotizada.
Modo de Avaliação <ul style="list-style-type: none"> • Avaliação distribuída com exame final.
Componentes de Avaliação <ul style="list-style-type: none"> • A avaliação é feita com base num Teste/Exame final escrito com a duração de 2 horas, e Monografia sobre tema relacionado com Robótica não Industrial e sua apresentação oral
Calculo da Classificação Final <ul style="list-style-type: none"> • Teste/Exame 70% • Monografia 30%

ROBÓTICA INDUSTRIAL
Instituição: FEUP
Docentes: António Mendes Lopes, Paulo Abreu
Curso: Mestrado em Automação Instrumentação e Controlo (MAIC) 2003-2004
Carga horária/UC: 3/0/0
Referência web: http://www.fe.up.pt/si/disciplinas_geral/FormView?P_CAD_CODIGO=MAIC1202&P_ANO_LECTIVO=2003/2004&P_PERIODO=3T
<p>Objectivos</p> <ul style="list-style-type: none"> • É objectivo desta disciplina transmitir os conhecimentos adequados à compreensão do modo de funcionamento e de utilização de sistemas robóticos, nomeadamente no que diz respeito aos aspectos tecnológicos, às características de funcionamento e de programação de robôs industriais, bem como às suas aplicações industriais. <p>Programa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fundamentos da Robótica: Automação e Robótica, Desenvolvimento histórico, Definição de sistemas Robóticos. Aspectos Tecnológicos da Robótica: Configurações físicas de robôs, Sensores e Actuadores, Sistemas de transmissão mecânica • Análise Cinemática: notação de Denavit-Hartenberg, cinemática directa, cinemática inversa, análise de exemplos. • Análise Dinâmica: Formulação de Newton Euler, análise de exemplos • Aplicações industriais de robôs: soldadura, corte, rebarbagem, manipulação e montagem • Robôs de estrutura paralela. Especificação de robôs e de células robotizadas. • Design de garras para manipuladores robóticos. Programação on-line e off-line de robôs. Sessão de demonstração de programação off-line • Programação de um robô industrial (sessão laboratorial) <p>Bibliografia Principal</p> <ul style="list-style-type: none"> • A disciplina é apoiada por bibliografia própria da disciplina “Robótica Industrial” - acetatos e livro Fu, K. S., Gonzalez, R. C., Lee, C. S. G.: Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, 1987 <p>Bibliografia Complementar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sciavicco, Lorenzo; Siciliano, Bruno Modeling and Control of Robot Manipulators Springer Verlag, 2000 ISBN: 1852332212 • Groover, M. P. ; Weiss, M., Nagel, R; Odrey, N.G. Industrial Robotics - Technology, programming and Applications McGraw-Hill, 1986 <p>Métodos de Ensino</p> <ul style="list-style-type: none"> • A disciplina compreende aulas teóricas de exposição, apoiadas por meios audiovisuais sendo complementadas por uma sessão laboratorial de programação de um robô industrial.

ROBÓTICA
Instituição: IST
Docente: Rui Loureiro
Curso: Lic. Engenharia Mecânica
Carga horária/UC: 3/0/2
Referência web: http://www.dem.ist.utl.pt/~guialem/P/Robotica.N.html
<p>Objectivos Gerais da disciplina</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dotar o estudante com os conhecimentos sobre o robô, seus componentes e funções. Apresentar ao estudante as aplicações industriais do robô e prepará-lo para o projecto de células de trabalho robotizadas. <p>Objectivos Operacionais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conhecer a estrutura mecânica do robô e a forma de o modelar geométrica e cinematicamente.

Aprendizagem do planeamento de trajectórias de acordo com os objectivos a alcançar e forma de programar o robô.
<p>Programa</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Terminologia e definições gerais - Introdução; Constituintes mecânicos dos robôs; Definições; Morfologia; Características. 2. Matrizes de Transformação - Coordenadas homogéneas; Transformações homogéneas; Translação e rotação. 3. Modelos geométricos - Geometria de robôs: Descrição. Modelo geométrico directo: Orientação do elemento terminal, Ângulos de Euler, Quaterniões. Modelo geométrico inverso: Método de Paul. Singularidades. 4. Cinemática - Cinemática directa: Jacobiano. Espaço de trabalho. Singularidades. Cinemática inversa. 5. Aferição de robôs - Caracterização da precisão e da repetibilidade. 6. Planeamento de trajectórias: - Tarefas típicas. Trajectória entre dois pontos: Interpolação polinomial. Lei Bang-Bang. Trajectórias com pontos intermédios: Interpolação linear. Funções cúbicas. 7. Sistemas robotizados: - Componentes básicos; Funções do robô no sistema; Aplicações - O robô tipo. Conceitos mecânicos elementares, Movimentação; Transferência de potência; Sensores; Elementos terminais; Motores; Controladores e sua arquitectura. 8. Células de trabalho: Exemplos e Análise de processos; Escolha de robôs. Especificação de robôs comerciais - guia prático. 9. Programação: - Arquitectura, considerações sobre o hardware; Sequência de controlo e considerações sobre o controlo de tempo real; Linguagens e estrutura do programa; Instruções típicas e funções sensoriais;
<p>Bibliografia</p> <ul style="list-style-type: none"> Wisama KHALIL, Etienne DOMBRE: Modélisation, identification et commande des robots, Hermes Paris 1999, ISBN 2-7462-0003-1. R.D. KLAFTER, T.A. CHMIELEWSKI, M.NEGIN: Robotic Engineering, an Integrated Approach, Prentice-Hall, 1989 Robótica - Apontamentos da disciplina.
<p>Bibliografia Secundária</p> <ul style="list-style-type: none"> Michel LAJOIE, Bernard LODIER: Mécanique et Mécanismes, ellipses Paris 1998, ISBN 2-7298-5898-9.
<p>Avaliação de Conhecimentos</p> <ul style="list-style-type: none"> Avaliação contínua por testes, ou via exame final. Nota final = 0.25 Prática + 0.75 Teórica

ROBÓTICA DE MANIPULAÇÃO
Instituição: IST
Docente: João Rogério Caldas Pinto
Curso: Lic. Engenharia Mecânica / Mest. Engenharia Mecânica
Carga horária/UC: 4/0/1
Referência web: http://www.dem.ist.utl.pt/~guialem/P/RoboticaManipulacao.N.html
<p>Objectivos Gerais da disciplina</p> <ul style="list-style-type: none"> Introdução aos conceitos básicos de visão por computador. Introdução à dinâmica de robôs. Estudo de sistemas clássicos e modernos de controlo de robôs. Introdução ao controlo de robôs baseado em visão.
<p>Objectivos Operacionais</p> <ul style="list-style-type: none"> Capacidade de projectar e implementar controladores clássicos para robôs. Capacidade de projectar e implementar sistemas de controlo de robôs por visão.

<p>Programa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Introdução à robótica de manipulação. • Dinâmica de robôs. • Controlo Independente das juntas de robôs. Controlo Multivariável. • Modelação de robôs usando Matlab/simulink. • Geometria Projectiva. • Modelação e calibração de câmaras. • Visão estéreo. • Determinação do movimento discreto a partir de imagens de pontos e linhas. • Introdução ao controlo de robôs por visão.
<p>Bibliografia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mark W. Spong, M. Vidyasagar, " Robot Dynamics and Control", John Wiley, 1989 • O. Faugeras, "Three dimension Computer Vision, A Geometric View Point" The MIT Press, 1993 • Sciavicco, L.; Siciliano, B.; Modelling and Control of Robot Manipulators, Springer-Verlag, 2000
<p>Avaliação de Conhecimentos</p> <ul style="list-style-type: none"> • A avaliação da disciplina é feita através da avaliação da resolução de problemas e de um trabalho final. Os problemas serão propostos todas as semanas para apresentação na semana seguinte. Estes problemas serão valorizados em 40%. O trabalho final será valorizado em 60%.

ROBÓTICA
Instituição: IST
Curso: Lic. Eng. Electrotécnica e de Computadores
Carga horária/UC: 3/0/2
Referência web: http://mega.ist.utl.pt/~leec/
<p>Programa:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manipuladores robóticos e robots móveis. • Aplicações industriais e na área de serviços. • Manipuladores: Cinemática; Breves noções de cinemática diferencial e dinâmica; Planeamento de trajectórias; Controlo de movimento em espaço livre. • Robots móveis: Estruturas cinemáticas típicas; Navegação; Condução; Planeamento de trajectórias; Coordenação na execução de missões. • Arquitecturas funcionais e de equipamento

ROBÓTICA
Instituição: Universidade de Coimbra
Docentes: Jorge Manuel Batista
Curso: Licenciatura em Eng. Electrotécnica e de Computadores
Carga horária/UC: 3/1/1
Referência web: http://www.deec.uc.pt/ , LEEC; Disciplinas/Ramos; Automação
<p>Programa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Robôs de manipulação: modelo geométrico; modelo cinemático; modelo dinâmico. • Sensores e actuadores usados em robótica de manipulação. • Geração de trajectórias. • Linguagens de programação de robôs. • Controlo de posição e força. • Introdução às técnicas de Inteligência artificial aplicadas à manipulação.

AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA II
Instituição: Universidade da Beira Interior
Curso: Licenciatura em Engenharia Electromecânica
Carga horária/UC: 3/0/2, 3.5 UC (Tipo : Obrigatória)
Referência web: http://www.ubi.pt/index.php?coluna=login&pagina=disespecifica&opcur=19 &opcodramo=0&opcoddis=1928
Programa: <ul style="list-style-type: none"> • O papel dos robots nas linhas de produção. • Métodos e oportunidades tecnológicas. • Tipos de robots: anatomia e activadores de robots, transmissão da potência, dispositivos terminais. • Controlo de malha fechada de robots: sensores e transdutores de posição, velocidade e distância. • Sensitividade tactual: tecnologia e aplicações. • Visão artificial: aquisição e processamento de imagem, métodos e tecnologias.

ROBÓTICA INDUSTRIAL
Instituição: Universidade de Coimbra
Docentes: Norberto Pires
Curso: Mestrado Engenharia Mecânica
Carga horária/UC: 2 U.C:
Referência web: http://www.dem.uc.pt/docs/mest2003.pdf

TECNOLOGIA ROBÓTICA
Instituição: Universidade do Minho
Docentes: Fernando Ribeiro, Estela Bicho
Curso: Mestrado em Electrónica Industrial – Automação e Robótica
Carga horária/UC: 2 UC
Referência web: http://www.eng.uminho.pt/ensino/mestrados/curso.aspx?id=MENG_EI_AC
Programa <ul style="list-style-type: none"> • Introdução à Robótica Industrial. • Configurações e componentes de um robô. • Características de manipuladores. • Cinemática. • Sensores e fusão sensorial. • Programação de robôs. • Segurança. • Implicações socio-económicas e sociais da tecnologia robótica.

ROBÓTICA I e ROBÓTICA II
Instituição: UTAD
Curso: Lic. Engenharia Mecânica – Opção Robótica (recentemente alterada para Automação Industrial após recomendação da Comissão Externa de Avaliação do Curso)
Carga horária/UC: 4.5 UC
Referência web: http://home.utad.pt/Cursos/Engenharia_Mecanica/

ROBÓTICA DE MANIPULAÇÃO
Instituição: Universidade de Coimbra
Docentes: Jorge Pereira Batista; Rui Matos Araújo
Curso: Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Carga horária/UC:
Referência web: http://www.deec.uc.pt/
<p>Programa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Introdução aos sistemas robóticos. • Componentes e subsistemas. • Descrição do movimento de um corpo rígido. • Cinemática da manipulação. • Análise do espaço de trabalho e planeamento de trajectórias. • Sensores. • Modelação da estática e da dinâmica. • Controlo de robots. • Planeamento de tarefas. • Programação e simulação.

Nesta retrospectiva falta referir como é abordada a robótica de manipuladores nas universidades estrangeiras. Como se pode imaginar, a actividade é imensa e o número de escolas de Engenharia e Ciências da Computação que ensinam robótica é da ordem das muitas centenas e que vão desde os pequenos países até aos gigantes como os Estados Unidos ou o Japão. Todavia, não se pode deixar de referir universidades em países como Alemanha, Suécia e vários outros, tal como não se pode ignorar a indústria robótica de manipuladores, muitas vezes associada ou em colaboração com essas universidades, e onde, por exemplo, o caso de Israel também é digno de referência.

Dada a impraticabilidade *a priori* de seleccionar o melhor modelo estrangeiro como inspiração na concepção de uma disciplina de Robótica Industrial, uma solução passará por analisar a literatura consagrada na área, que é toda, ainda, de origem estrangeira! Assim, ao analisar-se um livro de autores como Siciliano, Craig, Fu, McKerrow, ou mesmo Groover, entre vários outros, é possível criar modelos de uma disciplina de Robótica Industrial que sirva determinados propósitos de formação. Esse foi um dos itens levados em conta na criação da disciplina de Robótica Industrial na Universidade de Aveiro.

4. A disciplina de Robótica Industrial da Universidade de Aveiro

4.1 Introdução

A primeira questão na criação da disciplina levantou-se logo no seu nome. O que se pretendia era introduzir a robótica como área de formação específica no curso de licenciatura; ora, essa introdução deve ser feita com base em paradigmas sólidos e confirmados por uma prática corrente, se possível ligada a actividade na sociedade, mormente a industrial. Por outro lado, se se trata de uma disciplina de entrada numa dada área, as bases teóricas (conjunto de princípios e conceitos) e as metodologias devem ter aqui a sua apresentação aos estudantes. A robótica de manipulação é claramente o ponto de entrada na robótica para uma licenciatura em Engenharia Mecânica (e até noutras) porque é uma evolução directa da automação rígida e implica também a introdução adicional

de autonomia nos sistemas clássicos de controlo. Não obstante, os objectivos de criação da disciplina não podem ignorar o contexto curricular a montante e a jusante. Assim, não era só a robótica de manipulação o objectivo, mas era também a dotação dos futuros licenciados de ferramentas para compreensão e integração de manipuladores em vários contextos. Este enquadramento exigia um correcto entendimento dos sistemas e modelos de manipuladores robóticos bem como outros conhecimentos que se começavam a afirmar industrialmente, nomeadamente as questões de visão artificial. Dado que se queria lidar com manipuladores robóticos (conhecidos por robots industriais) e também deixar um caminho aberto nas ligações aos sistemas produtivos, o nome “Robótica Industrial” foi escolhido para a nova disciplina. A alternativa “Robótica” era demasiado vasta, e a versão “Robótica de Manipulação” menos abrangente do que o que se queria. Excluído ficou por exemplo o nome “Introdução à Robótica” por não se coadunar com o facto de se tratar de uma disciplina terminal de graduação (licenciatura) onde, talvez também por motivos psicológicos, se não esperam designações introdutórias ou de base no nome das disciplinas.

No contexto curricular referido, recordando que a LEM da UA é um curso de banda larga, a disciplina de Robótica Industrial só poderia operar num âmbito de disciplina de opção para os alunos que pretendam uma especialização em Automação. Não era esse fenómeno estranho dado passar-se algo similar em várias outras licenciaturas nacionais; daqui não deveria resultar nenhuma atenção adicional pelo facto de se estar na presença de uma disciplina de opção.

4.2 Caracterização e objectivos de forma resumida

De seguida, e adiantando um pouco o que se detalhará mais à frente, apresenta-se uma caracterização da disciplina e apontam-se os seus objectivos de forma resumida, tal como aparece nos documentos oficiais da UA (guiões, etc.), e como é transmitida aos alunos. Nas secções seguintes é apresentada informação mais detalhada.

A designação “Robótica Industrial” surge do estudo dos manipuladores que são usualmente conhecidos por robots industriais. A disciplina enquadra-se no período final de uma licenciatura com afinidade à Automação, e pressupõe bons conhecimentos de álgebra e das grandezas e conceitos de mecânica, bem como uma razoável capacidade de lidar com objectos no espaço a três dimensões.

Antes de entrar no ponto central do programa, que são as cinemáticas directa, inversa e diferencial, é dado um certo destaque a sistemas de coordenadas e transformações geométricas para permitir uma progressão mais sólida pelo programa dentro.

Em detrimento da estática e dinâmica de manipuladores, que se reconhece ser de importância muito relevante, nomeadamente para o controlo e o próprio projecto e concepção de braços robóticos, optou-se por fazer uma introdução à visão por computador pelo facto de tal área se apresentar como das mais importantes na robótica industrial actual. Iguamente consequência desse cuidado é a relativamente pequena dimensão da atenção dada ao planeamento de trajectória. Todavia, os fundamentos e métodos principais estão contemplados e assegurados.

Na componente prática os alunos trabalharão em ambiente Matlab que se revela uma ferramenta perfeitamente indicada para estas matérias onde a manipulação de vectores e matrizes é, de facto, obrigatória.

A disciplina tem como principal objectivo o de dar formação sobre os princípios da manipulação robótica e a sua fundamentação teórica. Desse modo, não se aborda uma linguagem particular para a programação de robots industriais, mas espera-se que, no final, um aluno com aproveitamento e com

conhecimentos rudimentares de programação, consiga aprender e compreender uma qualquer linguagem para programar manipuladores.

Um outro objectivo é o de introduzir a visão por computador como instrumento de versatilidade na utilização dos robots industriais. Mais uma vez não se aborda em particular nenhum dos pacotes de software comercial, mas porém faz-se um trabalho e uma análise com os fundamentos dos processos e algoritmos. Também aqui o uso da ferramenta MatLab ajuda a cumprir objectivos, além dessa prática ser ela própria um objectivo para alunos que não tiveram a oportunidade de contactarem com esta ferramenta de Engenharia em anos anteriores do curso.

4.3 Contingências na criação da disciplina

Na altura da criação, as disciplinas de opção tinham atribuídas (e continuam ainda nesse formato) 3 unidades de crédito (UC). Por outro lado, o plano de estudos, e certas directivas da própria universidade, impunham limites nos horários que impediam que a disciplina de opção tivesse mais de 4 ou 5 horas semanais no total. Nesta conjuntura, e face à necessidade assumida de que a componente laboratorial fosse realmente um garante de formação mais completa dos estudantes, a carga horária final fixou-se em 2 horas teóricas e 3 horas laboratoriais por semana.

No plano curricular apresentado na Tabela 1 constatam-se alguns “sustos” para o professor de robótica! Parecem faltar a montante uma ou outra disciplina de matemática e física aplicada. Por exemplo, não há referências a Álgebra Linear e Geometria Analítica nem a Mecânica Aplicada! Analisando os currículos das restantes disciplinas à data constata-se quase isso mesmo: a álgebra é dada numa parte do programa de Cálculo II e de Mecânica Aplicada há muito pouco, apesar de uma ou outra disciplina (como Vibrações) abordarem esses conceitos. Ou seja, corria-se o risco de os estudantes de Robótica Industrial terem algumas dificuldades em, por exemplo, inverter uma matriz ou de compreender e dominar grandezas vectoriais no espaço como posição ou velocidades! Várias destas questões foram parcialmente suplantadas no programa de Robótica Industrial ao inserir-se uma abordagem aos sistemas de coordenadas que se revelou muito eficaz, sobretudo na componente laboratorial. Isto explica a necessidade deste capítulo no programa e do tempo que se lhe dedica. Outra questão que se constata do plano na Tabela 1 é que a formação anterior dos estudantes em sistemas de controlo é limitada e sem prática laboratorial, e relativamente distante no tempo (disciplina de Instrumentação e Controlo Automático no 1º semestre do 3º ano). Por outro lado, a disciplina de Servomecanismos aparece em simultâneo com Robótica Industrial no 1º semestre do 5º ano: não havia assim grandes possibilidades de contar com conhecimentos adquiridos nessa disciplina. Os conteúdos programáticos e os métodos de ensino deveriam reflectir também estas realidades e estas contingências todas.

No que respeita à continuidade para o 2º semestre, poder-se-ia contar que houvesse disciplinas a jusante que, ou complementassem a formação ou alargassem o âmbito de aplicação dos conceitos aprendidos. Uma dessas disciplinas poderia ser Robótica Autónoma e Móvel, obrigatória à data no currículo de Automação: por várias razões, não se criou rigidamente essa dependência (pré-requisito) sendo a razão principal a de que uma disciplina era opcional e a outra obrigatória (os alunos poderiam não ser os mesmos). De qualquer forma, algumas ferramentas eram similares (como o uso de MatLab) e verificou-se que os estudantes que tinham tido Robótica Industrial tinham agora mais facilidade em Robótica Autónoma e Móvel.

Mais importante que esta relação entre as robóticas dos dois semestres era a possibilidade de continuar o processo de especialização em Automação, ou seja, chegar à integração fabril onde o manipulador é parte de uma célula e contribui para o fabrico integrado. Nos primeiros anos de funcionamento, o 2º semestre da LEM só contou com a disciplina de Comando Numérico de Máquinas-Ferramenta (que não cobria a integração fabril) e só depois da reestruturação (Tabela 5) surgiu a disciplina de Controlo Integrado da Produção, também ela opção, onde finalmente se completam os objectivos de formação de um Engenheiro Mecânico com especialidade em automação, e onde a formação em Robótica Industrial pode servir na sua maior extensão.

O novo plano curricular da LEM (Tabela 5) em vigor a partir do ano de 2001 já não enferma das limitações referidas, o que permite perspectivar uma evolução dos conteúdos programáticos como se descreverá adiante.

Outra contingência séria foi a duração usual do primeiro semestre no calendário escolar da UA. Entre 1998/99 (quando a disciplina funcionou pela primeira vez) e o ano de 2003/04, a duração do 1º semestre, no que se refere às aulas de Robótica Industrial, foi respectivamente de 12, 12, 13, 13, 12 e 11 semanas efectivas de aulas. Ou seja, a média é de pouco mais de 12 semanas; esta restrição, que aliás se vislumbrava logo de início, também tem de ser levada em conta na concepção do programa da disciplina.

Uma outra contingência que um professor deve ponderar é a natureza e abordagem base de uma disciplina Universitária de robótica: deve ser uma disciplina baseada na programação de manipuladores ou deve ser uma disciplina de formação em que a programação é acessória? Claramente, e citando o ditado chinês de que “mais vale ensinar um faminto à beira-rio a pescar do que dar-lhe um peixe para comer”, é entendimento do autor que é preferível ensinar aos futuros licenciados o **que querem programar** (conceitos) do que **como programar** (linguagem). Não significa isto que o saber fazer não seja importante, é-o, e muito, mas uma coisa não impede a outra. Se se souber o que se quer fazer (por exemplo, implementar uma cinemática qualquer, usando ponto-a-ponto ou ao longo de uma trajectória cartesiana contínua) então a linguagem não é determinante; mesmo na (improvável) eventualidade de uma certa linguagem não implementar uma cinemática inversa ponto-a-ponto, o engenheiro saberá como isso se faz, e mesmo que não tenha as equações presentes na sua mente, sabe que é um problema de cinemática inversa e vai-se “refrescar” recorrendo às suas referências de quando estudou! Voltando à alegoria do provérbio, o operador sabe “pescar” e não se apoqueta se o “peixe” é diferente de outro que já viu no passado! Esta a grande razão porque os conteúdos programáticos não devem criar uma dependência de uma linguagem como o VAL ou qualquer outra de alto nível, isto é, ao nível do robot ou ao nível da tarefa. Restringir-se à programação ao nível das juntas surge, portanto, como a via mais universal de ensinar a programação de manipuladores a futuros Engenheiros. Se se estivesse a referir meros operadores de robots, então o discurso seria provavelmente invertido!

4.4 Conteúdos programáticos

Depois de consideradas as contingências referidas anteriormente, de analisadas os suportes bibliográficos e os meios laboratoriais de computação, a primeira versão dos conteúdos programáticos delineados foi a constante na Tabela 8.

INTRODUÇÃO Origem da terminologia;

<p>Definições de robot; Robótica fixa e móvel; O robot e a automação.</p> <p>ESTRUTURA E TIPOLOGIA DE MANIPULADORES Componentes de um manipulador; Tipos de juntas; Espaço de trabalho de um manipulador.</p> <p>SISTEMAS DE COORDENADAS Noções introdutórias e revisões; Transformações a duas dimensões; Coordenadas homogéneas; Matrizes de transformação a 3 dimensões; Transformações gerais e ângulos de Euler (RPY); Transformações inversas.</p> <p>CINEMÁTICA DIRECTA Definição de cinemática de um manipulador; Parâmetros de juntas e elos; Atribuição de sistemas de coordenadas – sistema de Denavit-Hartenberg; Exemplos de construção da Cinemática Directa; Ângulos finais de orientação em função das juntas.</p> <p>CINEMÁTICA INVERSA O problema; Casos simples. Algoritmo para uma Heurística de Cinemática Inversa.</p> <p>CINEMÁTICA DIFERENCIAL A problemática; Transformações diferenciais; O Jacobiano de um manipulador; Singularidades.</p> <p>INTRODUÇÃO AO PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS Tipos de movimento; Abordagens para planeamento de trajectórias.</p> <p>ESTÁTICA E DINÂMICA DE MANIPULADORES Forças, momentos e sua propagação; Velocidades e acelerações; A dinâmica na formulação de Lagrange Método de Newton-Euler</p> <p>CONTROLO DE MANIPULADORES Conceitos e leis de controlo Controlo de posição Controlo de força Controlo híbrido</p> <p>INTRODUÇÃO À VISÃO POR COMPUTADOR Introdução; Imagem digital e técnicas de iluminação; Geometria de formação da imagem; Imagem em baixo nível; Elementos de morfologia;</p>
--

Tabela 8 – Primeira versão sobre um programa de Robótica Industrial

Sobre o primeiro programa pensado para Robótica Industrial são desde logo notórias algumas opções base tais como as seguintes:

- há uma componente dedicada a sistemas de coordenadas,
- a inclusão da visão artificial e,
- a não inclusão explícita de linguagens de programação ao nível do robot ou da tarefa.

Estas opções reflectem a ideia que sempre esteve subjacente na concepção da disciplina: dar formação basilar de forma sólida (isto é, os estudantes tinham não só de perceber, mas de trabalhar

com os conceitos e saber fazer, não apenas saber como se faz!), e também a de introduzir a visão artificial como ferramenta complementar na robótica.

Como referido antes, entende o autor que dar importância excessiva a uma qualquer linguagem de programação de alto nível é comprometedor na formação a médio e longo prazo dos estudantes. Por essa razão não contempla o programa o estudo de nenhuma linguagem industrial porque se os conceitos de base estiverem bem consolidados, então o futuro licenciado aprenderá qualquer linguagem de programação de manipuladores porque se tratará pouco mais do que uma questão de sintaxe que o manual lhe resolve! Em resumo, se um estudante tiver bem aprendido o que é cinemática inversa, directa e diferencial, conseguirá, dentro de certos limites, programar um robot industrial porque sabe o que quer fazer. Juntando a isto as questões e transformações geométricas no espaço devidamente apreendidas e praticadas, pode o futuro engenheiro aspirar inclusivamente à simulação ou concepção de cadeias cinemáticas mais complexas ou mais específicas para uma qualquer abordagem menos comum. Todas estas opções curriculares se reflectem na componente laboratorial da disciplina e nas metodologias de ensino e avaliação como se descreve adiante.

Um planeamento mais minucioso, e após a observação das solicitações feitas aos estudantes e das suas reacções nas primeiras aulas da disciplina no já “distante” ano de 1998, concluiu-se que seria impossível leccionar com sucesso (leia-se com a real aprendizagem dos estudantes) em 12 ou 13 semanas de aulas o programa proposto na Tabela 8! Assim, e recordando as contingências e os receios referidos na secção 4.2, o programa foi redimensionado para a versão que persiste ainda hoje, seis edições mais tarde.

Ao programa original tiveram de ser retirados os capítulos relativos à Estática e Dinâmica e também o do Controlo de Manipuladores. A razão foi simples: a Visão deveria ser preservada! Com isto perdeu-se sobretudo a possibilidade de dotar os estudantes dos elementos necessários para darem o passo final no projecto e concepção de manipuladores robóticos, como máquinas que são, ou talvez mais grave que isso, ficou por abordar a questão do dimensionamento de problemas reais com massas e/ou velocidades elevadas onde as questões da dinâmica são imperiosas. Foi uma opção assumida, mas incontornável! Porém, e após desenvolvimentos recentes na conjuntura do próprio plano de estudos da LEM e do calendário escolar da UA, renasce a possibilidade de introduzir pelo menos o capítulo da dinâmica de manipuladores como se descreve mais adiante.

O programa detalhado, em funcionamento actual, é o que se transcreve na Tabela 9. É, como já referido, um programa “clássico” inspirado em diversas referências bibliográficas, mas de onde saiu (temporariamente, espera-se) a Dinâmica e o Controlo de Manipuladores, onde se preserva (ou introduz, face a alguns autores) a Visão Artificial, e onde os conceitos geométricos e suas transformações no espaço a 6 dimensões (as 3 translações e as 3 orientações) têm uma importância que se veio a confirmar justa no decorrer das aulas.

Tabela 9 - Programa detalhado da disciplina de Robótica Industrial

1. INTRODUÇÃO
1.1 Origem do termo 'robot'
1.2 Algumas definições de Robot e Robótica
1.3 Classificação de robots
1.3.1. Gerações (cronologicamente)

- 1.3.2. Nível de inteligência do controlador (pela JIRSA)
- 1.3.3. Nível de controlo dos programas no controlador
- 1.3.4. Linguagem de programação
- 1.4 Alguns marcos na história da robótica**
- 1.5 Os manipuladores robóticos**
- 1.5.1. Robótica fixa versus robótica móvel
- 1.5.2. Elementos principais de um manipulador (ou robot industrial):
Braço e punho (*arm-wrist*). O controlador. Actuadores. Sensores
- 1.6 O robot e a automação**
- 1.6.1. Tipos de automação
- 1.6.2. Aplicações tradicionais dos manipuladores industriais
- 1.7 Importância do robot industrial**

2. ESTRUTURA E TIPOLOGIA DE MANIPULADORES

2.1 Componentes

- 2.1.1. Braço mecânico
- 2.1.2. Ponta ou Garra (*End-effector*). Garras e Ferramentas
- 2.1.3. Actuadores e tipos de actuação
- 2.1.4. Sensores. Sensores de posição e sensores de velocidade.
- 2.1.5. Controlador

2.2 Tipos de juntas

- 2.2.1. Graus de liberdade e graus de mobilidade
- 2.2.2. Representação e arranjo cinemático
- 2.2.3. O braço humano

2.3 Espaço de trabalho e tipos de manipuladores

- 2.3.1. Cartesiano (PPP)
- 2.3.2. Cilíndrico (RPP)
- 2.3.3. Esférico (RRP)
- 2.3.4. Articulado Horizontal - SCARA (RRP)
- 2.3.5. Articulado vertical (antropomórfico) - RRR

2.4 Resolução, Repetibilidade, Precisão

3. SISTEMAS DE COORDENADAS

3.1 Noções introdutórias - revisões

- 3.1.1. Sistemas de eixos
- 3.1.2. Vectores e Matrizes
 - Produto de um escalar por uma matriz
 - Inversão de uma matriz
 - Produto interno (escalar) de vectores
 - Produto externo de vectores ou produto vectorial
 - Produto genérico de matrizes
- 3.1.3. Pontos e referenciais

3.2 Transformações geométricas elementares

- 3.2.1. Exemplos de transformações
- 3.2.2. A notação matricial para representar transformações de um ponto a duas dimensões
 - Transformação geométrica genérica
 - Matriz identidade (transformação nula) e sem translação
 - Reflexão em relação a um eixo (simetria axial)
 - Reflexão em relação à origem (simetria central)
 - Factor de escala
 - Rotação de 90°
- 3.2.3. Matriz rotação para um caso geral
- 3.2.4. Limitações da matriz de transformação para representar a translação

3.3 Coordenadas homogéneas

- 3.3.1. Introdução de componentes adicionais na matriz de transformação
- 3.3.2. Transformações compostas - produtos de matrizes de transformação
 - Sucessão de Translações (comutativo)
 - Sucessão de Rotações no plano (comutativo)
 - Sucessão de Translações e rotações (não comutativo)

3.4 Matrizes de transformação a 3 dimensões

- 3.4.1. Generalização dos conceitos para 3 dimensões
- 3.4.2. Componentes da matriz de transformação
- 3.4.3. Interpretações do que significa a matriz de transformação.
- 3.4.4. Pós-multiplicação e pré-multiplicação de matrizes de transformação
- 3.4.5. Transformações inversas.
- 3.4.6. Grafos e equações de transformação
 - Exemplo de uma montagem vista do referencial da peça

Exemplo de montagem vista do referencial global

3.5 Orientação e ângulos de Euler (RPY)

3.5.1. A componente de orientação numa transformação

3.5.2. Formas de expressar a orientação

Roll-Pitch-Yaw (RPY)

Ângulos de Euler (tipo II)

4. CINEMÁTICA DIRECTA DE MANIPULADORES

4.1 Cinemática de um manipulador

4.1.1. Definição

4.1.2. Espaço das juntas e espaço cartesiano:

4.1.3. O algoritmo da Cinemática Directa

4.2 Parâmetros de juntas e elos

4.2.1. Eixo de uma junta

Eixo de junta rotacional

Eixo de uma junta prismática

4.2.2. Os quatro parâmetros de elos e juntas

Comprimento do elo (l_i)

Distância entre elos ou deslocamento de juntas (d_i)

Ângulo de junta (θ_i)

Ângulo de torção do elo (α_i)

4.2.3. Alguns exemplos de elos

4.2.4. Os parâmetros cinemáticos variáveis

4.2.5. Transformação ${}^{i-1}A_i$ associada a um elo

4.3 Atribuição de sistemas de coordenadas

4.3.1. Exemplos simples de sistemas de coordenadas

Um manipulador planar a 2 DOF

Um manipulador não planar a 2 DOF

4.3.2. Algoritmo de Denavit-Hartenberg

4.3.3. Representação de Denavit-Hartenberg para um PUMA de 6 DOF

4.4 Exemplos de construção da Cinemática Directa

4.4.1. Um manipulador a 5 DOF (*Microbot Alpha II*)

4.4.2. Um manipulador do tipo SCARA (4 DOF)

4.5 Ângulos finais de orientação em função das variáveis de junta

4.5.1. Comparação da matriz RPY com a parte rotacional da matriz ${}^R T_H$

4.5.2. Limitações de precisão e reformulação

4.5.3. Exemplo de aplicação a um manipulador com 2 DOF em 3 dimensões.

5. CINEMÁTICA INVERSA

5.1 O Problema

5.1.1. Resolução para um manipulador RR no plano

5.1.2. Resolução para o manipulador RR a 3D

5.1.3. Métodos e condições de existência de soluções.

5.1.4. A redundância cinemática

5.2 Algoritmo para uma Heurística de Cinemática Inversa

5.3 Recurso a transformações inversas e comparação dos elementos matriciais

5.4 Solução de uma equação usual no problema da cinemática inversa

5.5 Algumas soluções analíticas padrão

5.5.1. Robot planar de 3 elos

5.5.2. Solução do braço antropomórfico a 3 DOF

5.5.3. Solução do punho esférico

5.5.4. Manipuladores com um punho esférico

6. CINEMÁTICA DIFERENCIAL

6.1 A problemática

6.2 Transformações diferenciais

6.2.1. Conceitos

6.2.2. Metodologia de utilização

6.2.3. Exemplo numérico

6.3 O Jacobiano de um manipulador

6.3.1. Determinação do Jacobiano

6.3.2. Jacobiano inverso

6.3.3. Recurso à pseudo-inversa

6.4 Singularidades

7. INTRODUÇÃO AO PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS

7.1 Tipos de movimento

7.2 Abordagens para planeamento de trajectórias

7.3 Planeamento nas juntas

7.3.1. Função para a continuidade da velocidade

7.3.2. Planeamento nas juntas com pontos intermédios de passagem

7.3.3. Alternativa a polinómios de ordem superior

7.4 Planeamento no espaço operacional

7.4.1. Princípios

7.4.2. Problemas no planeamento do espaço operacional

8. INTRODUÇÃO À VISÃO POR COMPUTADOR

8.1 Introdução

8.1.1. Formação da imagem

8.1.2. Componentes do processo de visão por computador

Percepção, Pré-processamento, Segmentação, Descrição, Reconhecimento.

8.1.3. Aquisição de imagem

8.1.4. A imagem e a imagem digital

8.1.5. Técnicas de Iluminação

Iluminação difusa; Retroiluminação; Luz estruturada; Iluminação direccionada

8.2 Geometria de formação da imagem

8.2.1. A transformação de perspectiva

8.2.2. Referencial do mundo e referencial da câmara (imagem)

8.2.3. Modelo da câmara.

8.2.4. Calibração da câmara

8.3 Imagem em baixo nível

8.3.1. Relações básicas entre píxels

8.3.2. Pré-processamento

O processo base: máscaras de convolução e ou filtros

Exemplo para a detecção de píxels isolados

Suavização

Média; Mediana; Suavização de imagens binárias

Realce

Conceito de histograma; Equalização de histograma; Realce local

Detecção de Arestas

Formulação; Operadores de Gradiente - operadores de Sobel; Operador de Laplaciano

8.3.3. A limitação

8.4 A visão de médio nível

8.4.1. Operadores morfológicos

Erosão; Dilatação; Fecho; Abertura; Esqueletização; Propagação.

8.4.2. A Segmentação

Detecção de arestas e limitação dinâmica

Algoritmos de limitação dinâmica

Algoritmo de "Isodados"; Algoritmo do triângulo.

8.4.3. Operações de morfologia binária

Isolar objectos com buracos

Preencher buracos em objectos

Remover objectos no bordo da imagem

Obtenção de exo-esqueleto

4.5 Bibliografia e outra documentação

4.5.1 Livros

A bibliografia sobre robótica de manipulação é relativamente abundante, e há um conjunto de livros fundamentais que se recomendam mais do que os restantes dado cobrirem com rigor e clareza a maior parte dos assuntos. Por outro lado, não há um livro único que cubra o programa exactamente como ele foi delineado para a disciplina da LEM da UA; todavia haverá vários conjuntos de dois ou três que o fazem por completo. Na selecção de livros a indicar aos estudantes procurou-se o mais possível indicar títulos disponíveis na biblioteca da UA para facilitar a sua consulta. Assim, os livros indicados aos estudantes por ordem de interesse ou relevância para esta disciplina (mas não necessariamente pelo seu valor como documentos formais sobre robótica), e em função também da disponibilidade imediata, são os seguintes:

- [1] - **Introduction to Robotics** – P. McKerrow, Addison-Wesley, 1993.
- [2] - **Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence** – K. Fu, R. Gonzalez, C. Lee, McGraw-Hill, 1987.
- [3] - **Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control** – R. Paul, MIT Press, 1981.
- [4] - **Introduction to Robotics: Mechanics and Control** – J. Craig, Addison-Wesley, 1989.
- [5] - **Modelling and Control of Robot Manipulators** – L. Sciavicco, B. Siciliano, McGraw-Hill, 1996.
- [6] - **Fundamentals of Robotics: Analysis & Control** – R. J. Schilling, Prentice-Hall, 1990.
- [7] - **Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications** – M. P. Groover, M. Weiss, R. N. Nagel, N. G. Odrey, McGraw-Hill, 1986.

Além dos anteriores, indicaram-se ainda os seguintes livros mas só a título complementar dado que apresentem uma utilidade mais limitada.

- [8] - **Mechanics and Control of Robots** – K. Gupta, Springer Verlag, 1997.
- [9] - **Industrial Robotics Handbook** – V. Hunt, Industrial Press Inc., 1983.

Nalguns capítulos do programa proposto há uns livros mais indicados do que outros. O livro de P. McKerrow cobre razoavelmente bem todo o programa excepto a Visão. Para isso deve recorrer-se ao livro de K. Fu que também cobre bem outros aspectos, mormente as cinemáticas e o planeamento de trajectórias. A Visão, porém, carece de literatura adicional mais específica, dos quais a referência clássica “Digital Image Processing” de R.C. Gonzalez e P. Wintz, de 1987 ainda mantém actualidade. Porém, há textos modernos sob os títulos “Machine Vision” ou “Computer Vision” também acessíveis ao iniciado, e sem excluir, claro, alguns *sites on-line* muito bons para introdução a essa área de estudo. O livro de R. Paul é algo antigo (1981) mas mantém um formalismo completo no desenvolvimento dos assuntos que pode motivar o estudante entusiasmado porque tem muitos detalhes; por exemplo, a par do livro de J. Craig, são os únicos dos títulos indicados que derivam completamente as equações da dinâmica de um manipulador RR no plano, o que é muito didáctico para os estudantes. Na área do controlo, embora ainda não contemplada no programa em curso, o livro de R. Craig e o de L. Sciavicco são talvez os mais completos. O livro de R. Craig é também um dos melhores para o planeamento de trajectória.

Não obstante esta diversidade e a boa cobertura que os livros fazem do programa, constatou-se que os estudantes, e mesmo assim só alguns deles, não terão consultado mais do que o livro de P. McKerrow ou de K. Fu!

4.5.2 Apontamentos do professor

Um facto a fazer notar é que não há praticamente nenhum livro completo de robótica publicado em língua portuguesa! Não devia ser isso um óbice dado que, ao nível em que as disciplinas de robótica são leccionadas, se espera versatilidade e fluência dos estudantes na língua Inglesa. Apesar de (talvez) desejável, isso não é sempre o que se passa e, por vezes, a barreira da fluência na língua impede a aprendizagem e os estudantes recorrerem aos livros em língua estrangeira cada vez mais em último recurso. Essa pratica não é de encorajar mas, por vezes, o pragmatismo acaba por imperar e é de considerar a publicação a breve prazo de um texto fundamental de robótica em língua portuguesa.

Estes sentimentos levaram o autor a compilar umas notas soltas e ir redigindo uns textos de apoio às aulas de robótica industrial. Actualmente, esses documentos, bastante concentrados em termos de conteúdos, ultrapassam já uma centena de páginas e têm sido muito bem acolhidos pelos

estudantes como elemento de estudo. Esta “proto-sebenta” carece de alguma evolução e adaptação, mas pode ser o embrião de um futuro livro de robótica escrito em língua portuguesa. Note-se que esses textos provisórios têm estado disponíveis na *Internet* e, curiosamente, a receptividade da comunidade brasileira tem sido elevada ao ponto de muitas pessoas enviarem *E-mails* a pedir autorização para usar o material em trabalhos e aulas em várias universidades brasileiras! Também por essa via se justifica o aparecimento de um texto em língua portuguesa.

Esse documento está disponível como complemento a este relatório e reflecte de perto os conteúdos programáticos actuais. Além de uma revisão geral, carece, pelo menos de um capítulo sobre a dinâmica de manipuladores (já em preparação) e a escrita adequada do capítulo de Visão que está simplesmente em forma de apresentação e que é insuficiente como elemento de estudo principal nessa área.

4.5.3 Exercícios e exames resolvidos

Outro ponto importante no estudo completo de robótica é a resolução de exercícios e problemas. Normalmente, o recurso ao computador é “obrigatório” dadas muitas questões numéricas e geométricas envolvidas na manipulação, tais como problemas de montagem (*assembling*), entre outros. Porém, muitos problemas carecem de uma fase de análise e formulação (como, por exemplo, estabelecer os parâmetros de Denavit-Hartenberg de um certo manipulador) e só depois se recorre ao computador para lidar com a cinemática seja na forma simbólica ou numérica.

Para apoio em muitas aulas práticas foram concebidos exercícios de teor misto, isto é, uma parte conceptual e uma parte de programação/implementação no computador. O recurso à visualização gráfica de resultados permite uma mais rápida avaliação/confirmação por parte do aluno; por isso deve usar-se uma ferramenta computacional que o permita facilmente, como é o caso do MatLab. Alguns exercícios que não se façam nas aulas práticas podem sempre ser feitos fora delas desde que haja um computador disponível.

Além destes exercícios de apoio, os estudantes congratulam-se com a divulgação de resoluções dos exames de anos anteriores. Esta prática tem vantagens e desvantagens. Uma desvantagem é o risco de os estudantes se cingirem exclusivamente às resoluções de exames para o seu estudo, descurando outras componentes bibliográficas. Compete ao professor alertar e avisar dos perigos desta abordagem que pode trair os incautos. Isso foi sendo feito oralmente e por escrito no *site* da disciplina repetidas vezes.

Uma outra desvantagem de apresentar resoluções de exames, sobretudo quando se pretende uma apresentação condigna e útil, é o trabalho do professor na elaboração e organização do texto da resolução, nomeadamente quando há abundância de figuras e equações, como foi quase sempre o caso. Uma resolução pode levar dias a preparar e a apresentar, como foi o caso das fornecidas aos estudantes e disponíveis em anexo aos apontamentos sobre a disciplina.

Por outro lado, a resolução de exames pode ser vantajosa em duas frentes: em primeiro lugar força o professor a certificar com todo o rigor o nível do exame que propõe e assim melhor avaliar os requisitos que exige aos estudantes durante as provas escritas. Durante a elaboração *a priori* de uma resolução descobrem-se por vezes problemas que na concepção dos exercícios não pareciam tão fáceis ou tão difíceis: a experiência do docente tende a diminuir estas “surpresas”, mas nunca se está isento de um julgamento incorrecto do grau de dificuldade de um exercício. A outra vantagem da divulgação de resoluções é a de mostrar aos estudantes como se pode resolver um exercício do princípio ao fim e de certa forma proporcionar-lhes uma fonte adicional de estudo.

Em suma, a divulgação de resoluções deve ser parcimoniosa e cautelosa. Quando foi feita, juntou-se-lhe uma recomendação de primeiro tentar resolver sem olhar para a resolução e só depois recorrer a ela para confirmar/infirmar resultados ou métodos. Uma outra recomendação dada aos estudantes foi a de nunca, mas nunca, seguir o desenrolar de uma resolução e satisfazer-se porque se compreendeu o processo e terminar aí o estudo...! Esse é o mais perigoso método de estudo (se é que é método) porque não teve envolvimento activo do estudante e ele terá sido traído pela sua ligeireza: se for tentar fazer esse mesmo exercício por si só, mesmo depois de ver a resolução, sem estudo, poderá não ter qualquer sucesso!

4.6 Metodologias pedagógicas

4.6.1 Aulas teóricas

As aulas teóricas são de uma hora, duas vezes por semana. Em uma ou duas das edições anteriores, as aulas foram concentradas em duas horas consecutivas; podia ganhar-se tempo (menos *overheads* de tempo perdido no início de cada aula) mas o rendimento geral (alunos e professor) não era necessariamente maior. Nas aulas teóricas faz-se a exposição dos assuntos no quadro; ou seja, na maioria das aulas, desde os sistemas de coordenadas até ao planeamento de trajectória, inclusivé, as matérias são escritas no quadro e as equações e estruturas matemáticas e geométricas derivadas em tempo real impelindo os estudantes, e dando-lhes tempo para isso, a transcreverem o que vai sendo escrito. Esta é com certeza a melhor forma de envolver toda a gente porque é interactiva e ritmada por natureza; requer uma boa preparação do docente e uma fluência na exposição dos assuntos, mas os resultados são muito positivos. De facto, não faz muito sentido projectar numa tela uma derivação de equações e operações matriciais se o processo não for absorvido pelo estudante. Nos capítulos expositivos, como as partes introdutórias e generalidades, o recurso à projecção pode ser preferível porque enriquece a informação veiculada. Isso aconteceu parcialmente no capítulo da Visão, mas também aí não se dispensou a reprodução no quadro de detalhes que tinham de ser derivados com a cadência apropriada. A apresentação de filmes com processos industriais robotizados é também um instrumento valioso e motivador da curiosidade dos estudantes: desenrolam-se sempre diálogos e questões interessantes. Na ausência de visitas de estudo a empresas reais com sistemas robotizados, que nem sempre são possíveis, a apresentação de filmes colmata parcialmente essa impossibilidade.

4.6.2 Aulas práticas e componente experimental

Crê-se que uma diferença relevante entre esta disciplina e outras de robótica noutras Universidades está na sua componente laboratorial. Dois tipos de actividade se preconizam e se praticam: simulação de sistemas em ambiente computacional e programação de um robot real, ao nível das juntas e usando visão artificial real. Aprender robótica só se consegue compreendendo os conceitos e métodos, e depois praticando. É forçoso ao iniciado na área, e futuro engenheiro, executar trabalhos quer de simulação quer com sistemas reais. Para estimular esse envolvimento, os trabalhos devem ser interessantes e devem ser avaliados com justiça.

O ambiente de computação/desenvolvimento escolhido foi o Matlab pelas suas grandes potencialidades na manipulação de matrizes, estruturas simbólicas, representação gráfica e pela facilidade de programação. A juntar a isso, as novas versões do Matlab permitem já interface com

hardware como o acesso a portas de comunicações e acesso a outros dispositivos como câmaras de vídeo, etc.

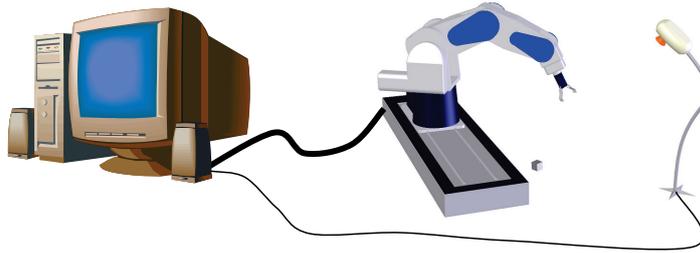


Figura 2 – Ilustração da instalação de um trabalho prático de Robótica Industrial

O trabalho nas aulas práticas é feito individualmente, ou seja, cada aluno tem acesso a um computador só para si e depende de si próprio para resolver os problemas. Isto leva a turmas limitadas a máximos de 14 ou 15 alunos o que proporciona excelentes condições de aprendizagem. Isto foi sempre garantido em todas as edições da disciplina, incluindo um ano em que havia 21 alunos a frequentar as aulas, tendo resultado em duas turmas práticas! A exceção está num último trabalho pensado para grupos de dois alunos porque envolve o acesso a um manipulador real (EUROBTEC IR52C) e que obriga a uma racionalização do tempo de utilização para todos poderem desenvolver trabalho.

Como já referido, nas aulas práticas resolvem-se exercícios propostos e iniciam-se os trabalhos práticos para avaliação que os estudantes concluem depois fora das aulas. Ao fim de duas ou três edições da disciplina adoptou-se um modelo de trabalhos práticos que tem dado óptimos resultados. Trata-se de conceber os trabalhos de forma cumulativa ao longo do semestre, isto é, cada trabalho conta com o trabalho anterior completando-o até se chegar a uma aplicação de robótica industrial experimental incluindo o uso real de visão.

No ano lectivo 2003/2004 foram definidos 5 trabalhos a realizar na seguinte sequência:

- 1- *Mini-toolbox* de funções geométricas
- 2- Definição de Manipulador e Cinemática Directa
- 3- Cinemática Inversa do Robot EUROBTEC IR52c
- 4- Aplicações Robóticas Usando Visão Artificial
- 5- a) Programação e Operação do Robot Eurobtec IR52c Aplicando Visão por Computador
b) Parte II – Tarefas de integração do sistema de visão

O primeiro trabalho permite o desenvolvimento das ferramentas geométricas base como transformações geométricas usando matrizes e coordenadas homogéneas; o trabalho nº 2 introduz e aplica a notação de Denavit-Hartenberg e permite a representação gráfica da cinemática directa de um manipulador similar ao Eurobtec IR52C. No 3º trabalho, sempre recorrendo aos anteriores, atinge-se o problema da cinemática inversa do manipulador a 5 DOF. Este trabalho revela-se sempre como o primeiro grande desafio dos estudantes. No trabalho nº 4 dão-se os primeiros passos na visão artificial e como ela se coaduna com a cinemática diferencial com um problema de simular o seguimento de um pino móvel. Finalmente o trabalho nº 5 integra os anteriores e adiciona a tarefa de comunicar com o manipulador para lhe enviar os valores das juntas individuais e assim ter sempre em mão toda a cinemática do sistema. Além disso exige-se uma certa capacidade de extrair informação de imagens de vídeo e usá-la no comando do manipulador.

O trabalho 5 é o mais longo e o mais exigente de todos, e é dimensionado para trabalho de grupo de dois alunos. Na parte II os grupos realizam tarefas distintas entre si o que estimula mais o

trabalho entre os grupos. Há dois tipos de trabalhos nesta fase, os que usam câmara fixa e os que têm câmara solidária com o manipulador. Os estudantes aperceberam-se bem das diferenças de dificuldade e dos problemas práticos que muitas vezes não são modelados como, por exemplo, as distorções geométricas da câmara de vídeo, ou as folgas e falhas de repetibilidade do manipulador.

Os alunos trabalham ao nível das juntas, isto é, a informação que trocam com o sistema de controlo do robot diz respeito à posição e velocidade das juntas, e só isso! A cinemática inversa, entre outros cálculos, é assegurada pelos programas do estudante e não pelo controlador do robot. Este apenas recebe uns códigos binários por uma linha RS232. Foi necessário, antes de mais, desenvolver uma *toolbox* de médio nível para Matlab para que os estudantes só se tivessem de preocupar com o estabelecimento da comunicação e não com os detalhes de nível físico ou de protocolo das ligações. Esse trabalho de conceber a *toolbox*, sob coordenação do docente da disciplina, foi executado por um técnico superior.

Não obstante as limitações do *hardware* disponível (trata-se de material didáctico, e não verdadeiramente industrial) alguns trabalhos finais foram interessantes e deram demonstrações válidas da integração da visão com o manipulador. A lista e descrição dos trabalhos propostos no ano lectivo de 2003/2004 é apresentada no Anexo II deste relatório.

Entre 1999 e 2001 as edições da disciplina contaram nas aulas práticas com um docente assistente para as conduzir. Dado esse assistente ser especializado em robótica (viria a doutorar-se nessa área em 2002), esse período representou uma fase muito produtiva na definição e ajuste dos trabalhos e exercícios práticos. A boa coordenação entre regente e assistente é sempre muito vantajosa para os alunos dado haver uma única linha de acção ao longo de toda a disciplina.

4.6.3 Planeamento do semestre de 2003/2004

O ano lectivo de 2003/2004 foi algo ingrato por ter permitido apenas 11 semanas efectivas de aulas; deveu-se essa situação ao facto de ser a primeira vez que o 5º ano funcionava nos moldes pós-reestruturação e que impediu a definição de turmas e inscrição nas opções na primeira semana de aulas, prejudicando portanto o arranque do semestre. Todavia, e face à experiência dos anos anteriores, foi possível fazer um planeamento e adaptá-lo às circunstâncias.

Capítulo	Aulas	Práticas	
1-Introdução	1	1	MatLab. Introdução.
2-Estrutura e tipologia e manipuladores	1		
3-Sistemas de coordenadas	4	2	Sistemas de coordenadas.
4-Cinemática Directa	5	3	Denavit-Hartenberg, Cin. Directa e Cin. Inversa.
5-Cinemática Inversa	2		
6-Cinemática Diferencial	4	3	Planeamento e simulação de movimento
7-Planeamento de trajectória	2		
8-Visão por Computador	5	3	Visão. Simulada e real
Totais	22	12	

Tabela 10 - Planeamento do semestre de 2003/2004

Num semestre regular de 12 a 13 semanas há mais aulas teóricas nos capítulos da cinemática diferencial e no planeamento de trajectória e que, na presente edição, tiveram de ter alguns ajustes. Nas aulas práticas far-se-ão mais exercícios específicos de simulação em Matlab. Na secção seguinte apresentam-se os sumários efectivos ao longo de um semestre; o planeamento foi cumprindo com desvios menores.

4.6.4 Sumários da edição de 2003/2004

Sumários das aulas teóricas

LIÇÃO Nº 1

DATA 29/9/2003

Apresentação da disciplina. Programa. Objectivos. Avaliação. Planeamento.
Introdução – breve história da robótica, aplicações e importância actual da robótica industrial
Visionamento de alguns filmes sobre manipuladores robóticos em aplicações industriais.

LIÇÃO Nº 2

DATA 30/9/2003

Estrutura e tipologia de manipuladores.
Componentes de um manipulador. Tipos de actuadores e sua comparação.
Tipos de juntas. Graus de liberdade. Comparação com o braço humano.
Grupos de juntas de um manipulador. Espaço de trabalho de um manipulador: os tipos mais comuns.
Resolução, Precisão e Repetibilidade de um manipulador

LIÇÃO Nº 3

DATA 7/10/2003

Sistemas de coordenadas; sistemas directos, representação de um ponto/vector no espaço.
Representação de um ponto em diferentes sistemas de coordenadas. Vectores e matrizes - revisões.
Transformações no espaço a duas dimensões - a matriz de transformação. Caso geral da matriz de rotação no plano (dedução). Limitações da matriz para representar translações. Coordenadas homogéneas - definição. A matriz transformação como uma sequência de rotação em torno da origem sucedida de translação.

LIÇÃO Nº 4

DATA 6/10/2003

Matriz de transformação: casos particulares de rotação e de translação.
Composição de transformações: multiplicação de matrizes. A não comutatividade da multiplicação.
O espaço a três dimensões
 Generalização das coordenadas homogéneas.
 Componentes da matriz de transformação. Os três tipos de rotações e respectivas matrizes.
Significados de uma transformação geométrica.
Composição de transformações
 Multiplicação de matrizes de Transformações. Exemplo a três dimensões
 Transformações relativas: pré-multiplicação e pós-multiplicação de transformações geométricas
 Exemplo a duas dimensões.

LIÇÃO Nº 5

DATA 13/10/2003

Composição de transformações
 Ainda a Pré-multiplicação e pós-multiplicação de transformações geométricas.
 Excerto de um problema/exemplo a três dimensões.
Transformação inversa: ${}^N T_R = {}^R T_N^{-1}$, ${}^N \mathbf{q} = {}^R T_N^{-1} \mathbf{q}$.
 Exemplo ilustrativo.
Introdução aos princípios da montagem

LIÇÃO Nº 6

DATA 14/10/2003

Movimentação de objectos (princípios da montagem - *assembling*)
Grafos de transformação e equações de transformação
 Exemplo de inserção de um parafuso e preensão de um objecto
Grafos de transformação e equações de transformação
 Um exemplo numérico de montagem simples
Rotações Generalizadas - a orientação.
 Ângulos de Euler. Os dois casos mais usados: Raw-Pitch-Yaw e os de Euler tipo II.
 Relação entre os ângulos de Euler tipo II e o punho de muitos manipuladores industriais

LIÇÃO Nº 7

DATA 20/10/2003

Introdução à cinemática de manipuladores
 Definição e caracterização das cinemáticas
 O problema da cinemática directa.
O algoritmo base da cinemática directa
Caracterização de tipos de juntas - eixo de uma junta

Exemplos de elos de manipuladores e atribuição dos seus sistemas de coordenadas.

LIÇÃO Nº 8

DATA 21/10/2003

Parâmetros cinemáticos de elos/juntas

Definição dos 4 parâmetros: os variáveis e os fixos conforme as juntas.

A matriz de transformação geométrica associada a um elo.

A cinemática directa como produto das matrizes de transformação geométrica intermédias

Cinemática directa de uma manipulador RR planar: comparação entre as via usando matrizes de transformação e a via geométrica.

LIÇÃO Nº 9

DATA 27/10/2003

Cinemática directa para um manipulador com dois graus de liberdade a 3D.

Sistemas de eixos, parâmetros cinemáticos, matrizes de transformação

Verificação de alguns termos da matriz final

A metodologia de Denavit-Hartenberg para atribuição de sistemas de coordenadas.

Exemplo de aplicação do Algoritmo de Denavit-Hartenberg

Manipulador com 5 graus de liberdade - Microbot Alpha-II

LIÇÃO Nº 10

DATA 28/10/2003

Metodologia D-H para o Manipulador com 5 graus de liberdade - Microbot Alpha-II (conclusão)

A relação entre o espaço das juntas e o espaço cartesiano.

Outro exemplo de aplicação do algoritmo de Denavit-Hartenberg

Manipulador do tipo SCARA - juntas rotacionais e prismáticas num mesmo problema.

LIÇÃO Nº 11

DATA 3/11/2003

Conclusão do algoritmo da cinemática directa.

Obtenção dos ângulos de orientação final, $R(\theta)$, $P(\phi)$, $Y(\psi)$, em função da orientação do end-effector.

Questões de precisão numérica: a função $\text{atan2}(y,x)$.

Re-arranjo das equações matriciais com vista à separação de variáveis pelo recurso à pré-multiplicação pelas matrizes inversas. Exemplo num manipulador RR a 3D.

LIÇÃO Nº 12

DATA 4/11/2003

A Cinemática Inversa

O Problema

Resolução trigonométrica para um manipulador RR a 2D

Condições de existência de solução

Redundância e configurações degeneradas

Resolução para um manipulador RR a 3D a partir da matriz cinemática directa

Questões de precisão numérica e limitações de algumas funções trigonométricas

LIÇÃO Nº 13

DATA 10/11/2003

Algoritmo para uma heurística de Cinemática Inversa

Aplicação a um manipulador de 2 DOF em 3D

Preocupações na obtenção da solução (uso da função atan2 e termos de translação)

Pré-multiplicação pela matriz A_1^{-1} para obtenção de solução mais robusta numericamente

A solução da equação: $K_1 \cos \theta + K_2 \sin \theta = K_3$.

Cinemática inversa de um manipulador planar a 3DOF .

LIÇÃO Nº 14

DATA 11/11/2003

Cinemática inversa de um manipulador antropomórfico de 3 DOF.

Redundância e riscos de as descurar analiticamente

Solução para a cinemática inversa do punho esférico

3 DOF com intersecção de eixos

LIÇÃO Nº 15

DATA 17/11/2003

Princípios para a solução de manipuladores a 6 DOF com um punho esférico

Solução da cinemática inversa de um manipulador antropomórfico com 6 DOF

Decomposição em duas partes: manipulador antropomórfico de 3 DOF e punho esférico de 3 DOF

LIÇÃO Nº 16

DATA 18/11/2003

Introdução à cinemática diferencial

O problema – questões de velocidade e de posição.

Caminho e trajectória - o movimento diferencial.

Relação de velocidades no espaço operacional e no espaço das juntas
O Jacobiano (directo) de um manipulador – cálculo para robots RR planar e RR a 3D
O Jacobiano inverso de um manipulador
Formas de cálculo do Jacobiano inverso
Questões computacionais e cálculo numérico.

LIÇÃO Nº 17

DATA 24/11/2003

Jacobiano inverso de um manipulador- conclusão
Singularidades: situações e tipos.
Introdução ao planeamento de trajectórias
Abordagens para planificar trajectórias
Planeamento no espaço das juntas.
O planeamento “ponto-a-ponto”
Condições continuidade na posição e velocidade: polinómios de 3ª ordem e derivação dos seus coeficientes.
Referência ao planeamento com ponto intermédios (os “*via points*”)

LIÇÃO Nº 18

DATA 25/11/2003

Planeamento de trajectórias - conclusão
Planeamento com andamentos parabólicos e lineares. Questões sobre as limitações dos manipuladores: limites de juntas; limites de velocidade; limites de aceleração.
Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano.
Filosofia geral; abordagem mais usual e principais problemas associados.

LIÇÃO Nº 19

DATA 2/12/2003

Introdução à visão por computador
Formação da imagem.
A imagem digital: resolução espacial e de amplitude.
Principais técnicas de iluminação.
Princípios da utilização de luz estruturada.
Geometria da formação de imagem. Pontos no mundo 3D e no plano da câmara.
Transformação de perspectiva.

LIÇÃO Nº 20

DATA 9/12/2003

Transformação de perspectiva; Calibração da câmara.
Introdução ao pré-processamento de imagens.
Relações entre pixels. Vizinhaça e distância.
Os filtros ou máscaras de convolução.
Um filtro para detectar pontos isolados. Exemplo de algoritmo.
Exemplos de filtros
Técnicas de suavização: média de imagens, média e mediana.
Técnicas de realce: conceito de histograma. Equalização de histograma e seus efeitos.
Deteção de arestas: Operadores de gradiente e filtros de Sobel. O laplaciano.

LIÇÃO Nº 21

DATA 15/12/2003

A limitação. Limiar de limitação e limitação dinâmica.
Suavização de imagens binárias
Visão por computador – o médio nível
Operadores morfológicos em imagens binárias e princípios de segmentação
Erosão, dilatação, fecho, abertura, esqueletização, propagação.

LIÇÃO Nº 22

DATA 16/12/2003

Binarização dinâmica de imagens
Algoritmo de Isodados e algoritmo do triângulo.
Operações morfológicas
Isolamento de objectos com “buracos”
Preenchimento de “buracos” em objectos
Remoção de objectos nos bordos da imagem
Cálculo do Exo-esqueleto
Operadores morfológicos em MatLab.
Um exemplo de problema a resolver com visão.

Sumários das Aulas práticas

LIÇÃO Nº 1

DATA- 30/9/2003

Introdução ao MatLab:
Operações com vectores e matrizes, representação gráfica.
Resolução de alguns “Exercícios de Iniciação ao MatLab”.

LIÇÃO Nº 2

DATA- 7/10/2003

Apresentação do Trabalho 1 – “Minitoolbox de Funções Geométricas”.
Desenvolvimento de funções em MatLab. Funções de transformação geométrica.
Exercícios sobre Sistemas de Coordenadas
Exercício da rotação do Cubo (SC - nº4)

LIÇÃO Nº 3

DATA- 14/10/2003

Esclarecimentos finais sobre o trabalho 1
Exercícios sobre Tarefas de Montagem
 Uso de grafos e equações de transformação para fazer uma tarefa de montagem proposta pelo docente. Visualização em MatLab do resultado de montagem.

LIÇÃO Nº 4

DATA- 21/10/2003

Apresentação do Trabalho 2 – “Definição de Manipulador e Cinemática Directa”.
Exercício de cinemática directa
 O manipulador RR no plano.
 Escrita de uma função para a sua cinemática directa
 Escrita de uma função para animação da cinemática directa do RR planar.

LIÇÃO Nº 5

DATA- 28/10/2003

Exercícios sobre Sistemas de Coordenadas e Cinemática directa
Implementação de uma função para obtenção da matriz de transformação de um elo a partir dos parâmetros cinemáticos.
Aplicação da função anterior para obter a cinemática directa de um manipulador RRR no plano.
Animação em MatLab do manipulador anterior.
Repetição do exercício anterior mas em que o terceiro elo mantém a horizontal.
Uso da metodologia de Denavit-Hartenberg e explicações adicionais sobre o trabalho prático nº 2.

LIÇÃO Nº 6

DATA- 4/11/2003

Exercícios sobre Cinemática Inversa:
Implementação da função de cinemática inversa do robô 2R.
Representação/animação do movimento
Robot planar a RRR com constrangimento do último elo apontar sempre para um mesmo ponto do espaço.
Animação do robot RRR onde o punho descreve uma trajectória circular e outras.

LIÇÃO Nº 7

DATA- 11/11/2003

Apresentação do Trabalho 3: “Cinemática Inversa do Robô Eurobtec IR52c”.
Introdução da Toolbox simbólica do Matlab
Exercícios sobre Cinemática Inversa
O manipulador a 3DOF no espaço. As funções para a cinemática inversa.
Questões de especificação da orientação do end-effector.
Introdução de elementos para a resolução de um manipulador antropomórfico e 4 DOF

LIÇÃO Nº 8

DATA- 18/11/2003

Cinemática inversa de um manipulador antropomórfico
Exercício de simulação da cinemática inversa com uso da orientação como parâmetro de entrada.
Simulação de uma operação transferência ponto-a-ponto com alguns pontos intermédios de passagem.
Animação com as abordagens de interpolação de pontos no espaço operacional e no espaço das juntas.

Apresentação do Trabalho 4: “Aplicações Robóticas Usando Visão Artificial”.

Exercícios sobre Planeamento de Trajectórias e Cinemática diferencial:

Planeamento de trajectórias nas juntas de um manipulador RR. Representação das curvas das juntas e do percurso do end-effector.

Andamento linear e andamento suavizado (polinómio de 3ª ordem) das juntas.

Animação gráfica ilustrando o andamento “suavizado”

Obtenção analítica do Jacobiano e Jacobiano inverso do manipulador RR planar.

Planeamento da trajectória no espaço operacional ao longo de uma recta entre dois pontos

Recurso à matriz de Jacobiano inverso para obter as novas posições de forma incremental.

Representação do andamento das juntas e avaliação do erro com base na amplitude do intervalo de simulação.

Exercício sobre visão:

Síntese de imagens simples: quadrados e circunferências brancas em fundo preto. A função *meshgrid()* do matlab. Obtenção de imagem de três pinos circulares em posições aleatórias.

Introdução da função *bwmorph()* do matlab para fazer erosão de uma imagem até reduzir objectos a pixels.

Extracção das coordenadas na imagem e enquadramento e correcção dimensional das coordenadas na imagem. Obtenção das coordenadas no espaço do mundo real.

Apresentação do Trabalho 5: “Programação e Operação do Robot Eurobtec Aplicando Visão por Computador”.

Exercícios sobre Visão:

Gerar, visualizar e adicionar ruído aleatório de distribuição uniforme a uma imagem binária.

Procedimentos de filtragem: média de imagens e *threshold*

Implementação de um algoritmo para eliminação de pontos isolados usando máscaras.

Implementação de algoritmos de detecção de aresta usando filtros de sobel.

Exercícios sobre Visão

Resolução do problema: “Contagem automática dos bagos de arroz na imagem rice.tif do matlab”.

Técnicas de adição de ruído (*imnoise*) e pré-processamento de imagem:

filtragem (média, mediana – *medfilt*) e visualização e equalização de histograma

uso de operadores morfológicos sobre a imagem binarizada (erosão e “*shrink*”).

O problema do limiar de binarização (“*thresolding*”)

Implementação do algoritmo de limitação dinâmica “isodados”.

Demonstração prática de algumas funções de comando do robot Eurobtec e da aquisição de imagens em MatLab usando uma WebCam e o vfm (Video For MatLab)

4.6.5 Avaliação

Nesta disciplina propõe-se uma avaliação com duas componentes de igual ponderação na classificação final: uma parte dita teórica, resultante da realização de prova escrita (de que se juntam exemplares no Anexo I deste relatório) e outra dita prática, resultante da avaliação dos trabalhos práticos e seu respectivo relatório.

A avaliação dos trabalhos práticos obedece a uma definição precisa dos parâmetros de forma a preservar a maior justiça entre os estudantes. Ilustra-se na Tabela 11 o caso das cotações de um determinado trabalho realizado durante a época de 2003/2004 onde apenas se suprimiram os nomes dos alunos. Nessa tabela distinguem-se objectivos e valores separados para os programas (código) e para o relatório associado. Aplicam-se também penalizações (pouco mais que simbólicas, como 1% por dia de atraso) para as entregas fora de prazo. A abundância de trabalhos práticos ao longo do semestre prefigura um regime de avaliação contínua que tem a vantagem de ser mais justa e de

manter os alunos bem sintonizados com a matéria e não guardando o estudo para a véspera do exame escrito.

Objectivos individuais			15%	15%	15%	30%	10%	10%	5%	Atrasos		Penalizações		Nota Final do Trabalho (de 0 a 20)
Cinemática inversa restrita	Cin. Inversa completa	Atender a limites e redundâncias	Média de objectivos	Interface e/ou facilidade de uso	Organização do código	Funcionamento geral do trabalho	Conformidade do relatório	Clareza e rigor do relatório	Elementos adicionais inseridos	Código (dias)	Rel (dias)	Código (1% / dia) (Maximo 25%)	Relatório (1% / dia) - (Máx 25%)	
2	3.75	1.5	2.42	3	3.5	3.5	2.75	2.75		22	22	-0.525	-0.121	11.5
2	3.5	2.5	2.67	3	3.5	3.25	3	3				0	0	14.8
2	3	2	2.33	3	3	3	-	-				0	0	10.8
1.5	1	0	0.83	1.5	1.5	1	2	2.5				0	0	6.6
2	3.75	2.75	2.83	3	3.5	3	3.25	3.25				0	0	14.8
2	3.75	1.5	2.42	3.5	3.5	3.5	3	3	3			0	0	16.1
2.5	3	2	2.5	2.5	2.5	2.75	3.75	3				0	0	13.1
3.5	3.25	3.25	3.33	3.5	3.5	3.5	4	3.9	4			0	0	18.0
2.5	3	2.75	2.75	3	3.25	3.25	-	-	2.75			0	0	12.3
2	3.75	1.5	2.42	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5		26	26	-0.616	-0.125	11.1
2.5	3.75	2.5	2.92	3	2.75	3.25	4	3.75	2.75			0	0	15.9

Tabela 11 – Exemplo de avaliação/cotação do trabalho prático nº 3 numa turma de 11 alunos. As cotações parciais valem entre 0 (Não cumprido) e 4 (Muito bem cumprido).

4.6.6 Avaliação do ensino

É dever de um professor preocupar-se com a receptividade e opinião dos estudantes que frequentam uma sua disciplina. Por isso, deve dar-lhes essa oportunidade procurando a maior objectividade possível. A solução usual passa pela distribuição de um inquérito no final do ano lectivo. Esse inquérito deve ser anónimo e de resposta rápida. Aos alunos de Robótica Industrial tem vindo a ser distribuído o inquérito reproduzido na Tabela 12.

4.7 Estatísticas

O aproveitamento escolar tem sido muito significativo (Tabela 13), notando-se (raras) reprovações apenas nos casos em que o interesse do estudante desaparece por completo e ele reduz a frequência ou desiste das aulas. A disciplina não é considerada difícil, mas sim muito trabalhosa, na opinião informal dos alunos. Por outro lado, também a consideram interessante e mostram-no com o empenho nos trabalhos, e muitas vezes nas soluções engenhosas que concebem para os problemas mais inusitados; também isso faz parte da formação de um engenheiro e só mostra que se formarão profissionais com grande potencial.

Os resultados da avaliação do ensino são também positivos e relativamente regulares de ano para ano. Ilustram-se na Tabela 14 os resultados do inquérito da edição de 2001/2002 por terem um número maior de inquéritos realizados (21 estudantes) e que garante uma maior credibilidade da amostra. Os números apresentados representam a média das respostas dadas pelos estudantes, normalizadas na escala de 0-20.

Questionário de avaliação do ensino ministrado

O questionário é anónimo. Preencher a grelha com ponderação e sinceridade. Desse modo poderá contribuir para um bom nível de ensino. Assinalar com uma cruz a opção que melhor traduz a sua opinião sobre o assunto (5=Excelente; 1=Mau). Obrigado pela colaboração.

Disciplina: Ano Lectivo:

Parâmetro		5	4	3	2	1
Aulas Teóricas	Ambiente geral das aulas teóricas					
	Capacidade pedagógica do professor e metodologia de apresentação dos assuntos					
	Domínio aparente das matérias por parte do professor					
	Capacidade do professor em motivar os alunos					
	Entusiasmo do professor pelo tema ensinado					
	Assiduidade do professor					
	Existência e adequação da bibliografia					
	Disponibilidade do professor fora das aulas					
Aulas práticas	Ambiente geral das aulas práticas					
	Assiduidade do professor das aulas práticas					
	Assistência do professor nas aulas práticas					
	Disponibilidade e funcionalidade dos equipamentos durante as aulas práticas					
	Nível e disponibilidade do guia de trabalhos práticos					
Geral	Adequação da avaliação em relação ao nível de leccionação da disciplina.					
	Opinião geral da disciplina, podendo contemplar eventualmente outros parâmetros não assinalados acima.					

Tabela 12 - Questionário de avaliação do ensino dado aos estudantes para preencher

Ano lectivo	Aprovados	Reprovados	Taxa de aprovação
1998/1999	3	1	75%
1999/2000	5	1	83%
2000/2001	7	0	100%
2001/2002	21	0	100%
2003/2004	9*	2*	*

Tabela 13 - Estatística de aproveitamento ao longo dos anos. *À data deste relatório, a época de recurso do ano de 2003/2004 ainda não tinha tido lugar, podendo as aprovações subir.

Observe-se ainda na Tabela 14, e respectiva figura, algo que acontece em praticamente todos os inquéritos, nesta e noutras disciplinas; na questão sobre a assiduidade, as respostas dos estudantes não atingem os 100% (nota 20) apesar de o docente nunca ter faltado às aulas. Ou alguns estudantes respondem sem toda a sinceridade, ou não sabem o que é assiduidade! Também por aqui se poderia questionar a validade deste inquérito mas, na falta de melhor processo, os resultados podem ter, pelo menos, um valor indicativo.



Tabela 14 – Resultados do inquérito de avaliação do ensino no ano de 2001/2002, normalizado para uma escala de 0-20.

5. A Robótica Industrial no futuro da licenciatura

Como referido em secções anteriores, o novo plano de estudos da LEM da UA que entretanto entrou em vigor veio colmatar um conjunto de situações que se vão repercutir na disciplina de Robótica Industrial.

Claramente, houve um conjunto de alterações que darão os seus frutos dentro de algum tempo. Os mais imediatos são resultantes de Servomecanismos ter passado para o 4º ano do curso e de se ter introduzido a disciplina de Automação II no 2º semestre do 4º ano. A mais longo prazo podem colher-se alguns frutos da introdução no início do curso das disciplinas de Álgebra Linear e Aplicacionais para Ciências e Engenharias onde se ensina MatLab, aliviando as aulas práticas iniciais de Robótica Industrial.

No que respeita Servomecanismos e as disciplinas de Mecânica Aplicada, entretanto inseridas no curso, abrem-se perspectivas para passar a abordar no programa a Dinâmica de manipuladores e alguma possibilidade de considerar o controlo de manipuladores, pelo menos as linhas principais. Contribui para este cenário a inserção de Automação II no 2º semestre do 4º ano que passou a ter no seu plano a primeira abordagem à Visão Artificial. Dessa forma, ficará Robótica Industrial aliviada de ter de introduzir os assuntos de raiz e pode-se começar a considerar a realização de trabalhos de maior envergadura usando Visão.

Para tudo isto concorre ainda o novo modelo de calendário escolar que promete alargar em mais uma semana o primeiro semestre abrindo espaço para um programa como aquele que se propôs de início e se apresentou na Tabela 8, mas com algumas modificações na parte da Visão já que aqueles conteúdos passaram a ser introduzidos noutra disciplina.

Este panorama optimista, dado que se caminha para uma disciplina completa de Robótica Industrial, carecerá de um re-equipamento laboratorial: o manipulador disponível é muito limitado (o controlador não permite controlo por velocidade, por exemplo) e já apresenta degradação mecânica como folgas e desgastes. Dever-se-ia investir num manipulador “menos didáctico” e “mais industrial” e rumar a reais aplicações industriais como é o caso da soldadura, ou outras, como se faz em uma ou outra universidade onde há componente laboratorial no ensino.

A integração de manipuladores em células de fabrico, e a concepção dessas mesmas células, continuará fora do âmbito da disciplina de Robótica Industrial porque existe no segundo semestre do 5º ano a disciplina de Controlo Integrado da Produção (CIP) leccionada por outro docente de automação onde esses assuntos são abordados de forma sistemática e organizada.

6. Conclusões

A disciplina de Robótica Industrial da Licenciatura em Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro teve de ser concebida de raiz para colmatar uma insuficiência do curso, e teve de se acomodar a limitações estruturais do próprio curso. Hoje, essas restrições estão em fase de desaparecimento e a disciplina encaminha-se para uma fase de maturidade que lhe assegurará um lugar de destaque no panorama nacional das disciplinas afins. Isso acontece quer pelo equilíbrio dos seus conteúdos quer pela componente laboratorial que preconiza e que, em conjunto, darão formação adequada a futuros Engenheiros Mecânicos com especialização em Automação, e com competência para intervir no tecido industrial dos processos robotizados e altamente automatizados do futuro próximo.

Esta proposta de Robótica Industrial terá lugar como disciplina relevante numa Licenciatura em Engenharia Mecânica e, talvez em breve, como disciplina de um eventual Mestrado integrado, como já acontece noutras universidades, à luz das consequências que a Declaração de Bolonha trará no sistema de ensino e formação superior em Portugal.

7. Anexo I – Exemplos de provas de avaliação escritas

Apresentam-se neste anexo, a título ilustrativo, os seguintes exemplares de provas escritas dados aos estudantes em épocas passadas:

Prova de 1 de Fevereiro de 2001

Prova de 8 de Janeiro de 2004

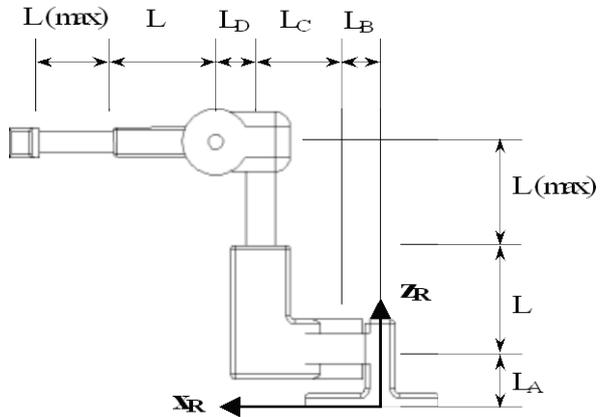
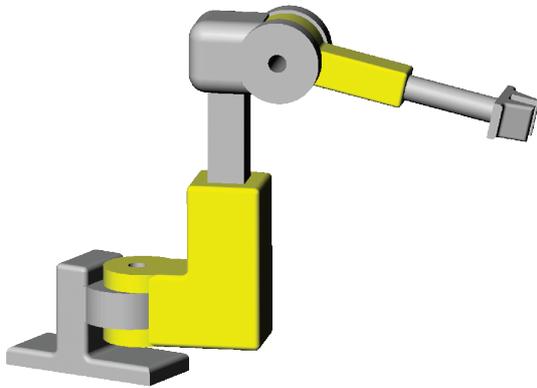
Nas realização das provas (normalmente de duração entre 2.5 a 3 horas) é dado aos estudantes um formulário com todas as expressões relevantes e muitas outras de trigonometria, etc.



Robótica Industrial

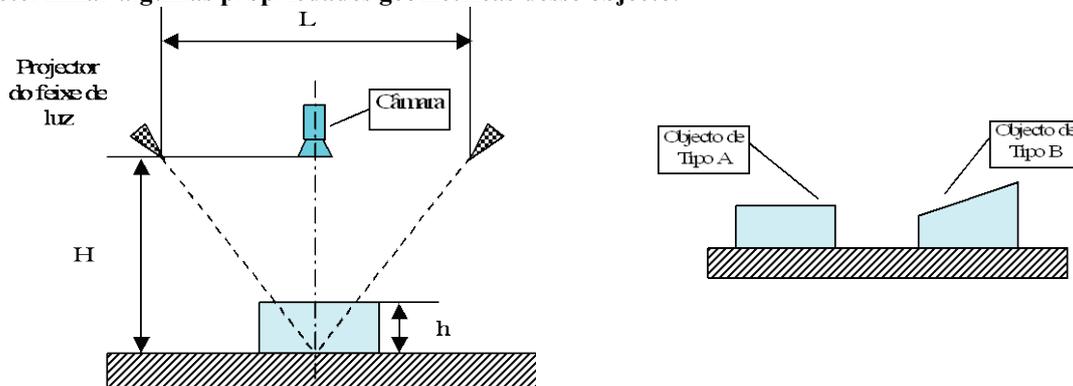
Exame de 1 de Fevereiro de 2001
 Licenciatura em Engenharia Mecânica - Ramo Automação

1- Seja o seguinte robot industrial com duas juntas prismáticas e duas juntas rotacionais:



- Esboçar o seu espaço de trabalho, admitindo que cada junta rotacional tem uma excursão de $\pm 90^\circ$ em torno das posições ilustradas à direita, e cada junta prismática tem uma excursão máxima de L e mínima de 0 (admitir as simplificações necessárias para validar fisicamente estas condições).
- Indicar os parâmetros cinemáticos e os sistemas de coordenadas usando o algoritmo de Denavit-Hartenberg.
- Estabelecer as expressões da posição cartesiana (x, y, z) da sua extremidade (*end-effector*) em relação ao sistema de coordenadas da primeira junta e também em relação ao sistema de coordenadas \mathbf{R} apresentado na figura da direita.
- Determinar a orientação do *end-effector* (ângulos de Euler do tipo RPY) em função das variáveis de junta.
- Com a restrição da quarta junta constante, determinar as expressões da cinemática inversa para as coordenadas de posição, indicando e ilustrando as situações de redundância.
- Admitindo a quarta junta constante, determinar as expressões da velocidade linear da ponta do manipulador em função das velocidades das outras três juntas.
- Com a quarta junta constante, determinar analiticamente as singularidades do manipulador, e ilustrar as situações físicas a que correspondem.
- Admitindo $L=1$, $L_A=L_B=L_D=0.25$ e $L_C=0.5$, com a junta 1 imóvel na posição $\theta_1=0$, e a junta 2 imóvel no curso totalmente estendido, usando planeamento de trajectória nas juntas, determinar qual a velocidade máxima atingida nas juntas 3 e 4 ao levar-se o *end-effector* da posição $(3.0; 0.0; 2.25)$ para a posição $(1.5; 0.0; 1.384)$ em 1 segundo.

2- Seja um sistema onde dois feixes de luz são projectados num plano, à distância H , de tal modo que geram padrões coincidentes nesse plano, como se ilustra de seguida. Um objecto interposto no percurso dos feixes leva ao aparecimento de um padrão na superfície do objecto que permite determinar algumas propriedades geométricas desse objecto.



- Indicar que condições mínimas devem verificar os feixes de luz, para se distinguirem objectos do tipo A de objectos do tipo B, como ilustrado, e propor e descrever uma metodologia concreta de processamento

baseada nos pixels da imagem para distinguir as duas situações. Considerar que a câmara só é sensível aos padrões de luz reflectidos pela superfície do objecto, e não distingue a própria superfície do objecto da superfície de apoio.

- b) No caso de o objecto ser do tipo A, na situação ilustrada, determinar a sua altura h em função dos parâmetros do sistema e da imagem (Expressar h em função de H , L , λ e das coordenadas relevantes de pontos na imagem da câmara)
-

Cotação: 1- 15 valores; 2- 5 valores

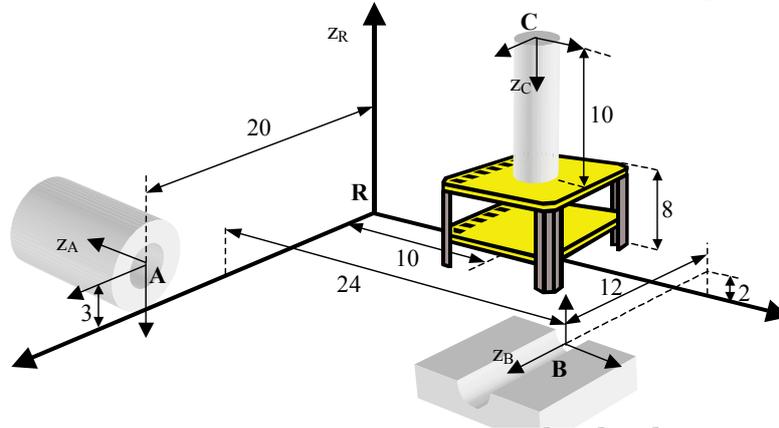


Opção I – Robótica Industrial

Teste de 8 de Janeiro de 2004

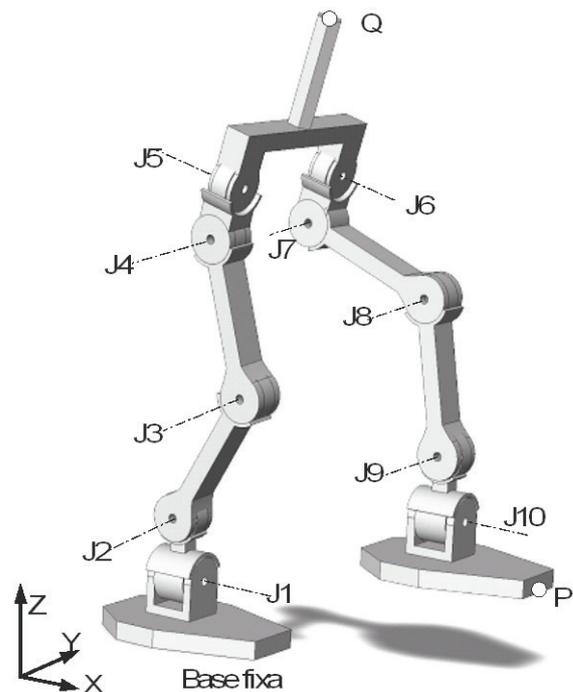
Licenciatura em Engenharia Mecânica

- 1- Quer-se completar uma sequência de montagem onde o objecto em C deve passar pela posição intermédia B e finalmente encaixar no objecto A (Não levando em conta as questões de colisão).

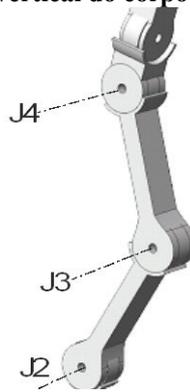


- a) Indicar as matrizes dos diversos referenciais em relação a R (${}^R T_C$, ${}^R T_B$, ${}^R T_A$).
- b) Estabelecer o grafo e a equação de transformação geométrica.
- c) Supondo que o percurso $R \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ será executado pelo garra de um manipulador, quais são as transformações que a garra do manipulador verá do seu próprio ponto de vista como necessárias quando se prepara para ir de C para B e também de B para A?
- d) Indicar como se poderia evitar os riscos de colisão, nomeadamente de B para A?
- 2- Seja a seguinte estrutura cinemática com 10 graus de liberdade onde os eixos das juntas estão indicados de J1 a J10, e o ponto P representa a extremidade do sistema. Para simplificar, admitir que nas distâncias entre eixos só há dois comprimentos distintos envolvidos: L1 para comprimentos “pequenos” (como a distância entre os eixos J1 e J2, ou a distância de J1 à face inferior da base fixa), e L2 para comprimentos “grandes” (distância entre os eixos J2 e J3, etc.). Pode também admitir-se que nas restantes distâncias necessárias para a descrição geométrica também só há valores L1 ou L2.

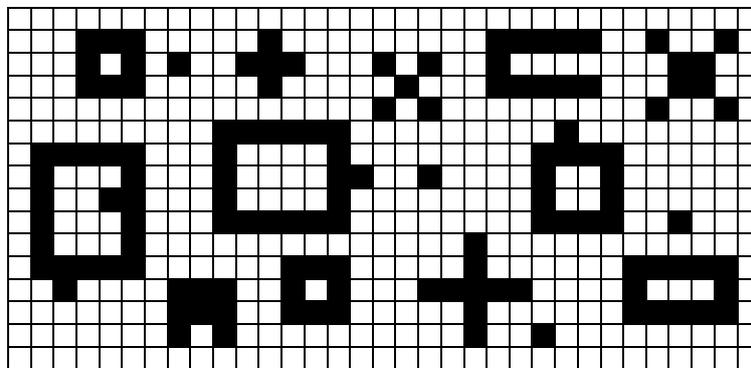
- a) Atribuir e representar todos os sistemas de coordenadas de acordo com a metodologia de Denavit-Hartenberg. (Pode usar-se a folha fornecida em anexo para a resolução)
- b) Depois de atribuir os diversos comprimentos L1 e L2 como proposto no enunciado, determinar a matriz de transformação geométrica que relaciona a posição do primeiro sistema de coordenadas (x_0, y_0, z_0) do robot em relação ao referencial indicado sabendo que o “centro” da base fixa se encontra nas coordenadas ($X_b, Y_b, 0$) nesse referencial.
- c) Como resultariam os sistemas de coordenadas e a tabela de parâmetros cinemáticos se o ponto final de interesse fosse o ponto Q representado em vez do ponto P? (Ignorar, portanto, tudo o que não afecte o ponto Q)
- d) No subsistema respeitante ao ponto Q, como introduzido na alínea anterior, e admitindo que as juntas estão limitadas a uma excursão de 180° , por observação visual, indicar e ilustrar as redundâncias aparentes do sistema em termos de (x, y, z) assinalando eventuais casos de degeneração e, nesse caso, apontar uma solução para obviar o problema.



- 3- Considerar um manipulador que é um subsistema do sistema do problema anterior e compreendido entre o eixo J2 e o eixo J5 exclusive, ou seja, um manipulador com 3 graus de liberdade e em que a posição zero é obtida com o alinhamento vertical do corpo dos 3 elos.



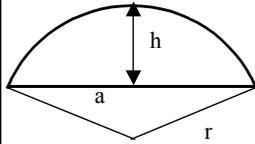
- Nas condições do enunciado, estabelecer a cinemática directa do sistema (Usar as medidas L1 e L2 como no problema anterior).
 - Determinar as expressões da velocidade linear da ponta (ex-J5) em função das velocidades das juntas $(\dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4)$.
 - Quer-se executar uma trajectória “suave” nas juntas em que a junta J2 parte do valor -45° , passa no instante $t=0.2$ s nos -10° , no instante $t=0.5$ s nos $+30^\circ$, no instante $t=0.8$ s nos $+10^\circ$ e chega à posição de -30° para $t=1$ s onde se imobiliza. Determinar a expressão ou expressões polinomiais que indicam a velocidade da junta J2, $\dot{\theta}_2(t)$, durante todo o tempo (1 segundo) em que dura o movimento.
 - Esboçar um gráfico da aceleração de J2 durante o movimento anterior, e onde devem figurar valores e tempos.
- 4- Usando visão por computador, pretende-se identificar e catalogar alguns tipos de objectos numa cena captada numa imagem com 256 níveis de cinzento. A imagem processada e posteriormente binarizada é representada de seguida.



- Excluindo as técnicas de iluminação, indicar e descrever resumidamente quatro ferramentas ou técnicas distintas de pré-processamento da imagem original que a podem “melhorar” antes da binarização, em particular no que repeita a redução de ruído e o aumento do contraste.
- Se na imagem binária representada os pixels do “fundo” tiverem valor “0” e os pixels dos “objectos” tiverem valor “1”, indicar e descrever, usando um exemplo desta imagem, um processo que numa única passagem permita “suavizar” a imagem binária, ou seja, que elimine os pixels protuberantes (ou reentrantes) em linhas verticais e/ou horizontais e só esses. Se o processo proposto não eliminar os pontos de “objecto” isolados, propor adicionalmente uma forma de os remover.
- Admitindo que a imagem já foi suavizada (pixels protuberantes, pixels reentrantes e pontos isolados de objectos todos eliminados), indicar com um exemplo concreto um filtro que determine se um ponto é ponto terminal de uma linha qualquer.
- Descrever com todos os passos necessários um procedimento para a obtenção de uma imagem onde só figurem os objectos fechados com cavidade interior (“buracos”). Se for necessário usar funções de MatLab para alguma operação *standard*.

Cotação: 1→ 5 ;2→ 5 V; 3→5 V; 4→5 V

Formulário para Robótica Industrial - v2001

Volumes de sólidos	Geometria e relações trigonométricas:		
Esfera: $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ Cone: $V = \frac{\pi R^2 L}{3}$ Cilindro: $V = \pi R^2 L$ Toro: $V = 2\pi^2 Rr^2$		$\cos(a \pm b) = \cos a \cos b \mp \sin a \sin b$ $\sin(a \pm b) = \sin a \cos b \pm \cos a \sin b$ $\tan(a \pm b) = \frac{\tan a \pm \tan b}{1 \mp \tan a \tan b}$	$\sin^2 a + \cos^2 a = 1$ $\sin^2 \frac{a}{2} = \frac{1 - \cos a}{2}$ $\cos^2 \frac{a}{2} = \frac{1 + \cos a}{2}$
$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4}}$			

Pseudo-inversa da matriz A (m×n): $\mathbf{A}^+ = \begin{cases} \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T)^{-1} & \Leftarrow m \leq n \\ \mathbf{A}^{-1} & \Leftarrow m = n \\ (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T)^{-1} \cdot \mathbf{A}^T & \Leftarrow m \geq n \end{cases}$	Solução da equação: $k_1 \cos \theta + k_2 \sin \theta = k_3$ $\theta = 2 \operatorname{atan2} \left(k_2 \pm \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}, k_1 + k_3 \right) =$ $= \operatorname{atan2}(k_2, k_1) \pm \operatorname{atan2} \left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}, k_3 \right)$
---	---

Transformações de orientação

<p>Ângulos RPY: $Roll(\phi) = Rot(z, \phi)$, $Pitch(\theta) = Rot(y, \theta)$, $Yaw(\psi) = Rot(x, \psi)$</p> <p>$RPY(\phi, \theta, \psi) = Rot(z, \phi)Rot(y, \theta)Rot(x, \psi) =$</p> $= \begin{bmatrix} C\phi C\theta & -S\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi & S\phi S\theta S\psi & C\phi S\theta C\psi & S\phi S\theta C\psi & 0 & 0 \\ S\phi C\theta & C\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi & -C\phi S\theta S\psi & S\phi S\theta C\psi & -C\phi S\theta C\psi & 0 & 0 \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	<p>Ângulos de Euler (tipo II):</p> <p>$Euler(\phi, \theta, \psi) = Rot(z, \phi)Rot(y, \theta)Rot(z, \psi) =$</p> $= \begin{bmatrix} C\phi C\psi - S\phi C\theta S\psi & -C\phi S\psi - S\phi C\theta C\psi & S\phi S\theta & 0 \\ S\phi C\psi + C\phi C\theta S\psi & -S\phi S\psi + C\phi C\theta C\psi & -C\phi S\theta & 0 \\ S\theta S\psi & S\theta C\psi & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
---	---

Definição dos parâmetros cinemáticos na notação de Denavit-Hertenberg ($i=1, 2, \dots, n$):

Distância de juntas (link offset):	Error! Objects cannot be created from editing field codes.	Ângulo de junta (joint angle):	$\theta_i = \angle(x_{i-1}, x_i)_{z_{i-1}}$
Comprimento do elo (link length):	$l_i = \overline{O_i, (z_{i-1} \cap x_i)_{x_i}}$	Ângulo de torção do elo (link twist angle):	$\alpha_i = \angle(z_{i-1}, z_i)_{x_i}$

Expressão da transformação geométrica associada a um elo (Algoritmo D-H)

$$A_i = Rot(z, \theta)Trans(0,0,d)Trans(l,0,0)Rot(x, \alpha) = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & l_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & l_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Expressões polinomiais de 3ª ordem para o planeamento de trajetória:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0)t^2 - \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0)t^3$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \dot{\theta}_0 t + \left[\frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f} \dot{\theta}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{\theta}_f \right] t^2 + \left[-\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{\theta}_f + \dot{\theta}_0) \right] t^3$$

Transformação de Perspectiva

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix}$$

8. Anexo II – Lista dos trabalhos práticos para avaliação

Neste anexo estão os trabalhos práticos apresentados ao longo do semestre. Contribuem para a nota final na componente prática em pesos similares dando normalmente um pouco mais de peso ao trabalho número 5 pela exigência mais alargada que possui.

Os trabalhos 1, 2 3 e 4 são individuais.

O trabalho 5 (parte I e parte II) é destinado a grupos de dois alunos.

Trabalho 1: *Minitoolbox* de Funções Geométricas

Objectivo

Desenvolvimento de uma estrutura de dados para a definição de objectos poligonais e implementação de transformações geométricas a aplicar; demonstração das potencialidades destas ferramentas usando as capacidades gráficas do MATLAB.

Descrição

- 1) Definição de um ou mais objectos poligonais (ver exemplo da Figura 1):
 - Atribuir um sistema de coordenadas a cada objecto;
 - Criar uma estrutura de dados composta pelas coordenadas dos vértices (referencial do objecto).
- 2) Visualização do objecto no espaço 3D em relação a um referencial global e implementação das transformações geométricas (translação e rotação).
- 3) Demonstração da funcionalidade da *minitoolbox* de transformações geométricas. **Sugestão:**
 - Definir e simular a transformação geométrica a aplicar ao objecto *A* de tal forma que este, na posição final, encaixe no objecto *B* (exemplo de uma tarefa de montagem);
 - Resolver o mesmo problema do encaixe simulando passo-a-passo as transformações geométricas (composição de transformações) a aplicar ao objecto *A* de tal forma que este, descrevendo uma trajectória ao longo de linhas rectas, evite a colisão com o objecto *B*;
 - Ilustrar o processo de transformação inversa, isto é, obter passo-a-passo a configuração original do(s) objecto(s);

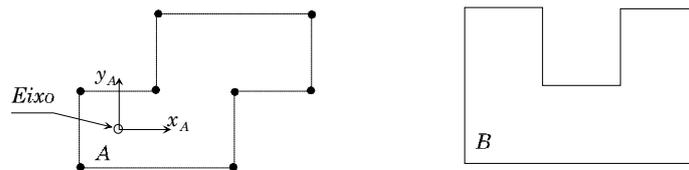


Figura 1: Representação de dois objectos poligonais *A* e *B*.

PERÍODO PARA ENTREGA: 2 semanas

Trabalho 2: Definição de Manipulador e Cinemática Directa

Objectivo

A cinemática directa de um manipulador é o problema de determinar a posição e orientação do elemento terminal, uma vez conhecida a estrutura cinemática e as coordenadas das juntas. Neste trabalho pretende-se desenvolver um conjunto de *scripts* e funções que permitam: (1) descrever a estrutura cinemática de um manipulador série em termos dos parâmetros de Denavit-Hartenberg; (2) implementar as transformações necessárias ao cálculo da cinemática directa; (3) demonstrar a funcionalidade destas ferramentas com a animação gráfica do robô Eurobtec.

Descrição

- 1) Conceber uma "tabela descritiva" para representar os 4 parâmetros cinemáticos de cada um dos elos de um manipulador genérico (n graus de liberdade e com juntas rotacionais e/ou prismáticas) usando a convenção de Denavit-Hartenberg; escrever um script **DH** que simplesmente descreva o método de representação usado (para ser invocado com o "help", por exemplo).
- 2) Implementar um pequeno script **EUROBTEC** que carregue os dados cinemáticos do robô Eurobtec IR52c com base nas convenções previamente definidas.
- 3) Implementar uma função **ELOTRANS** para calcular a matriz de transformação genérica A_i (associada ao elo i) com base na descrição cinemática DH e no vector das juntas q (com valores concretos).
- 4) Implementar uma função **CINDIR** para calcular a cinemática directa do manipulador (posição e orientação) em função da sua descrição cinemática DH e de uma matriz Q de coordenadas generalizadas das juntas; para um manipulador com n juntas, Q é uma matriz $n \times m$ (ou $m \times n$) que descreve uma trajectória de m pontos.
- 5) Implementar uma função **ROBPLOT** para produzir a animação gráfica do robô a partir da descrição cinemática DH e das trajectórias das juntas Q ; desenhar o sistema de coordenadas associado ao elemento terminal para mostrar a orientação da garra (os eixos XYZ podem ser identificados por diferentes cores).

PERÍODO PARA ENTREGA: 2 semanas

Trabalho 3: Cinemática Inversa do Robot EUROBTEC IR52c

Objectivos

Obtenção da cinemática inversa do manipulador EUROBTEC IR52C e simulá-la em ambiente MatLab.

Numa primeira abordagem implementar uma solução restrita e mais simples como descrito.

Numa segunda abordagem implementar a solução completa a 5 graus de liberdade.

Levar em conta limites de espaço de trabalho e limites de juntas, bem como redundâncias.

Fases do trabalho

- 1) Estabelecer as equações de cinemática directa em posição e orientação para o robot Eurobtec IR52c na forma simbólica.
- 2) Implementar a cinemática inversa do robot para posição, assumindo numa primeira fase uma **restrição cinemática** do 4º grau de liberdade (o 5º só afecta a componente de orientação que deve ser ignorada nesta fase). A **restrição cinemática** tem o objectivo de simplificar a abordagem mas mesmo assim usar todo o manipulador. As restrições do último elo a implementar são as seguintes: vertical para cima 'VC', vertical para baixo 'VB', horizontal para dentro 'HD' e horizontal para fora 'HF' (referido ao último elo). Estas quatro situações devem fazer parte das "coordenadas" no espaço operacional sobre o qual se quer fazer cinemática inversa: [x, y, z, RC].
- 3) Implementar a cinemática inversa completa (5 DOF) a partir de um dado vector de posição e orientação $r=[P_x, P_y, P_z, \text{ang1}, \text{ang2}]$ em que ang1 e ang2 são dois ângulos de Euler a definir conforme as opções eventualmente tomadas.
- 4) Na implementação anterior observar e fazer respeitar o seguinte:
 - A solução inversa só deve ser possível quando a posição desejada para o elemento terminal se encontra dentro do volume de trabalho! (confirmar limites da juntas do robot);
 - Detectar a situação de redundância, lidar com ela no sentido de optar pela solução "mais próxima" da posição corrente do robot.

Nota geral

Para ilustrar a funcionalidade das implementações realizadas, fazer a simulação dos movimentos com representação do robot e da orientação do "gripper". Para facilitar a visualização podem representar-se os elos por estruturas geométricas mais elaboradas (ex. rectângulos): este melhoramento é todavia opcional!

PERÍODO PARA ENTREGA: 2 semanas

Trabalho 4: Aplicações Robóticas Usando Visão Artificial

Objectivos

Simulando um robot e a imagem obtida numa câmara resolver dois problemas que na prática correspondem à localização de determinados objectos no espaço e ao seguimento de um outro objecto quando este estiver em movimento.

Dados gerais

A imagem e câmara devem ter as seguintes características: resolução: 256×256; distância focal: 6 mm; pixel pitch: 60 pixel / mm.

Etapas do trabalho

1) Determinar as coordenadas de três pinos (Figura 1), no sistema de coordenadas de referência XYZ_r , a partir de uma representação do plano de imagem da câmara em unidades de pixel. A imagem é obtida a partir da câmara colocada na vizinhança do robô (3R). Os pinos têm altura desprezável e têm um diâmetro 15 vezes menor que a altura Z a que se encontra o plano da câmara.

- Gerar uma imagem binária de forma a que a “posição” central dos três pinos seja aleatória ou escolhida pelo utilizador (forma interactiva com o rato, por exemplo);
- Obter o ponto central de cada pino e obter as suas coordenadas.
- Uma vez conhecidas as coordenadas de imagem, aplicar a transformação inversa de perspectiva para determinar as coordenadas reais;
- Calibrar a câmara aplicando a transformação geométrica adequada;
- Validar o processo de localização dos pinos realizando a animação do movimento do robô.

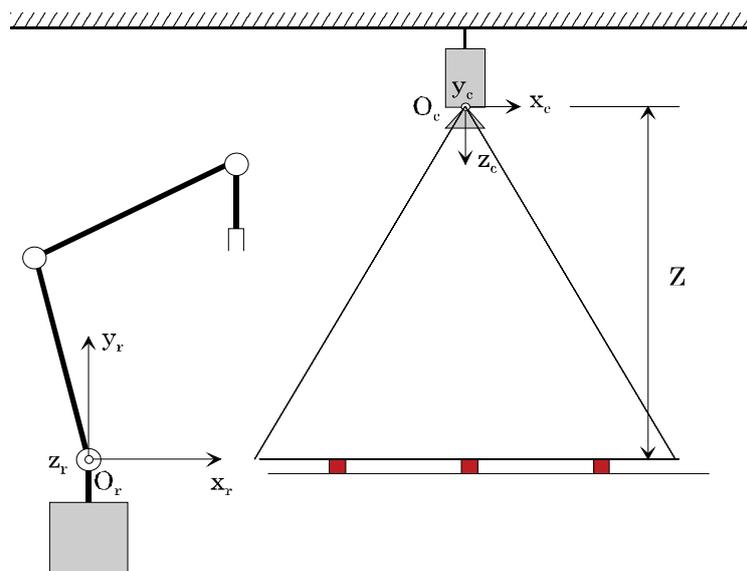


Figura 1 – Localização de três pinos usando câmara fixa.

- 2) Pretende-se que a câmara montada na extremidade do robô (Eurobotec IR52c) acompanhe o movimento do pino que, por sua vez, se desloca ao longo de uma mesa de transferência (Figura 2):
- Definir o movimento do pino no sistema de coordenadas do mundo real XYZ_r assumindo que se trata apenas das coordenadas do seu ponto central (**sugestão**: usar função sinusoidal);
 - Uma vez conhecidas as coordenadas reais do pino simular a imagem do objecto vista pela câmara vídeo montada no robô:
 - i) Calibrar a câmara aplicando a transformação geométrica adequada;
 - ii) Aplicar a transformação de perspectiva e obter as coordenadas calculadas no plano da imagem;
 - Implementar uma lei de controlo que compare a posição actual do pino em relação à câmara com o valor desejado e que proporcione um sinal de controlo (*i.e.*, velocidade da extremidade do robô) que permita reduzir esse erro, tanto quanto possível, a zero;
 - Simular o movimento conjunto do robô e da câmara para depois analisar a evolução temporal do erro entre a trajectória do pino e a realizada pela câmara.

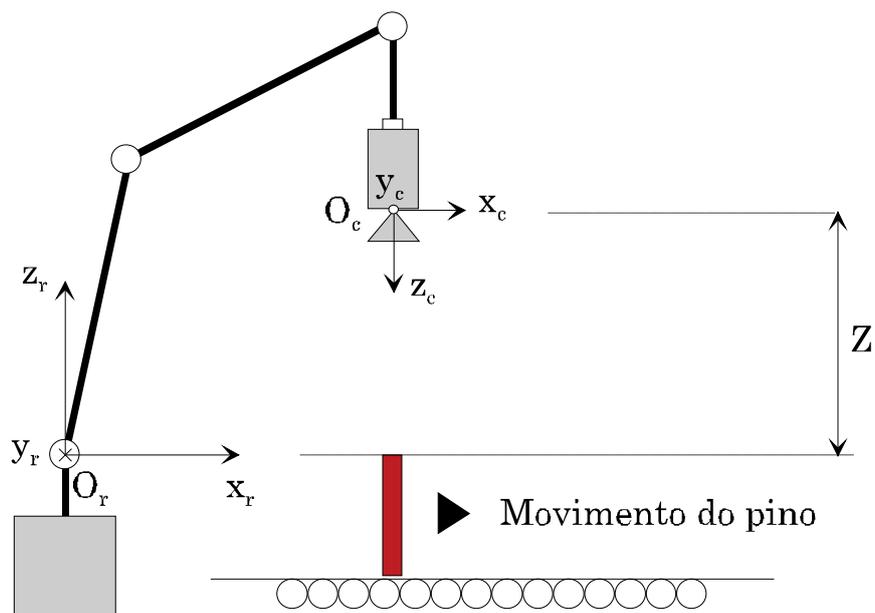


Figura 2 – Seguimento de um objecto usando câmara montada no robô.

PERÍODO PARA ENTREGA: 2 semanas

Trabalho 5: Programação e Operação do Robot Eurobtec IR52c Aplicando Visão por Computador

Objectivos do trabalho

O principal objectivo é o de programar e integrar o braço manipulador existente no laboratório com o uso de visão artificial. São objectivos mais concretos os seguintes:

Definir todos os sistemas de coordenadas necessários à integração do sistema completo, actuar efectivamente o manipulador e obter imagens reais da unidade de visão.

Aplicar os resultados da cinemática inversa previamente desenvolvida para determinadas movimentações do robot.

Obter e processar imagens para levar a cabo os requisitos específicos do trabalho a que se associa no final uma de várias tarefas propostas como a última etapa do trabalho.

Equipamentos

O sistema será constituído pelo robô Eurobtec IR52c, uma *Webcam* e um computador para o comando geral do processo. A *Webcam* será acedida do MatLab através de uma ferramenta designada por Video For Matlab (vfm). Fazer 'help vfm' para conhecer as diversas opções. Por exemplo, o comando $A=vfm('grab',1)$ adquire uma imagem para a matriz A.

O manipulador é acedido por duas portas RS232: uma para o comando geral (eixos, etc.) e outra para actuar o gripper. A biblioteca de funções de alto nível inclui a seguinte:

Função	Descrição dos parâmetros	Valores de retorno
Funções de configuração do sistema		
[RobotPort,GripperPort]=InitComm(Porta1,Porta2)	'COM1', 'COM2',...	Portos para aceder a eixos e gripper
result=InitRobot(RobotPort)	Porto do robot	1 – OK, 0 – Error
result=EndComm(RobotPort,GripperPort)	Portos do robot e do gripper	1 – OK, 0 – Error
Funções de operação do robot		
result=SetRobotHome(RobotPort)	Porto do robot	1 – OK e home atingida, 0 – Error
result=SetRobotAxes(RobotPort,AXES,ANGLES)	Porto to robot; eixos rotacionais a actuar (valores entre 0 a 4); valores dos ângulos a impor em cada eixo desejado (valores em graus). Os limites de cada eixo dependem do eixo e serão monitorados pela função que impede valores excessivos.	0 – OK (comandos enviados) 1 – angulo fora dos limites 2 – Eixo inexistente 3 – Eixo ainda em movimento 4 – Outros erros (hardware)
result=SetRobotSpeeds(RobotPort,AXES,SPEEDS) (Função ainda em estado de desenvolvimento)	Porto to robot; eixos rotacionais em causa (valores entre 0 a 4); valores das novas velocidades em cada eixo desejado (graus/segundo). Os limites de cada eixo serão monitorados pela função que limita valores extremos.	0 – OK (comandos enviados) 1 – velocidade excessiva 2 – Eixo inexistente 4 – Outros erros (hardware)
result=SetLinearAxe(RobotPort,VALOR)	Porto do robot; posição linear desejada (em mm entre 0 e 600)	1 – OK (comando enviado) 0 – Error (em movimento ou fora dos limites)
result=OpenGripper(GripperPort)	Porto do gripper	1 – OK, 0 – Error
result=CloseGripper(GripperPort)	Porto do gripper	1 – OK, 0 – Error (Não Implem.)
Funções auxiliares de teste e diagnóstico		

result=LinearInMov(RobotPort)	Porto do Robot	1 – Eixo linear em STOP 0 – Eixo linear em movimento
-------------------------------	----------------	---

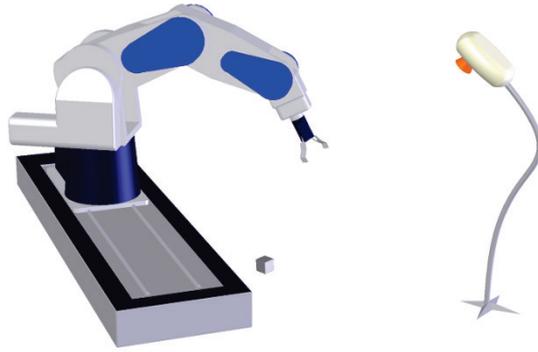
Etapas do trabalho

1 – Estabelecimento efectivo das comunicações entre o robot e um programa de Matlab para que, recorrendo à cinemática inversa, transfira um objecto de pequenas dimensões (um pequeno cubo, por exemplo) de um lado para o outro do eixo linear. Antes porém, deve ser feita a simulação do processo. Para efeitos de confirmação e acompanhamento visual, a simulação deve acompanhar o movimento real do robot. Esse efeito é possível dado que a função que impõe a posição dos eixos (*SetRobotAxes*) devolve códigos que indicam se o eixo está ou não em movimento (ver tabela anterior).

Quando estiver disponível a possibilidade de impor as velocidades das diversas juntas, deve procurar-se obter movimento síncrono dos eixos, ou seja, na movimentação entre dois pontos (ponto a ponto) o movimento inicia e termina para todos os eixos ao mesmo tempo.



2 – Colocação da *Webcam* numa determinada posição fixa e, depois de calibrada, obter a localização de um objecto de geometria simples (o mesmo cubo) para fazer a transferência para outra área a definir, por exemplo o outro lado do eixo linear.

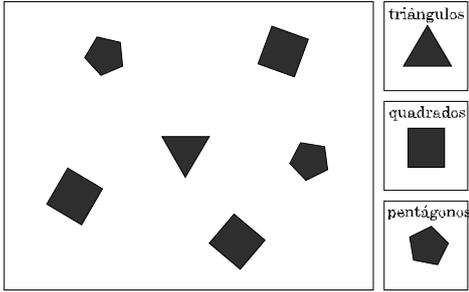
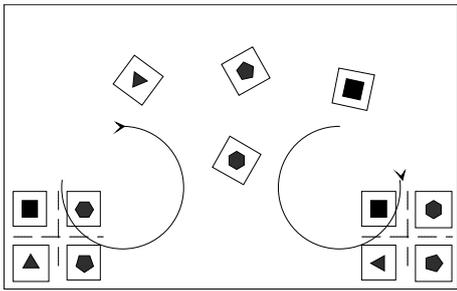
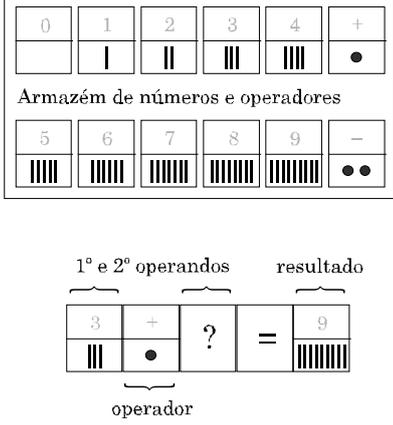
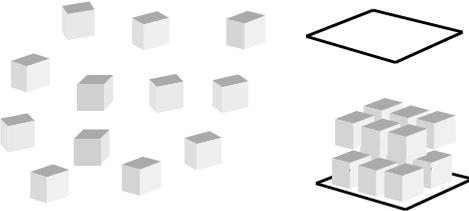


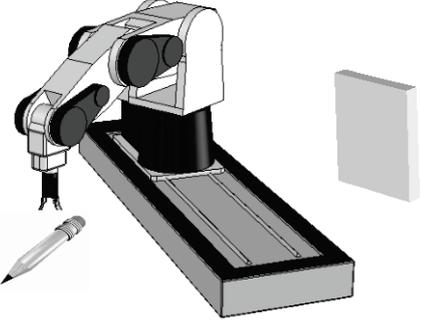
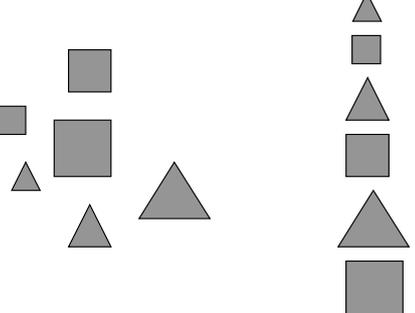
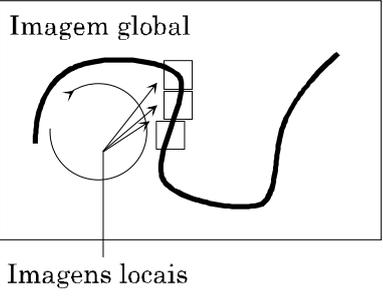
3 – A última etapa do trabalho consiste numa mais completa e desenvolvida integração da visão como processo importante em robótica industrial. São propostas várias tarefas das quais cada grupo de trabalho deve escolher uma. A secção seguinte descreve mais detalhadamente cada uma dessas tarefas propostas.

PERÍODO PARA ENTREGA: 20 Janeiro de 2004 (ou antes).

Trabalho 5, Parte II: Tarefas de integração do sistema de visão

A segunda parte do trabalho pressupõe a utilização da *webcam* como o elemento chave na realização de tarefas de manipulação usando o robot Eurobttec IR52c. As tarefas propostas envolvem a localização, montagem e inspeção de peças de diferentes formas, podendo a câmara estar fixa ou montada no próprio robot.

TAREFAS COM CÂMARA FIXA	
<p>Tarefa 1 – Localização e transferência de objectos</p> <p>Vários objectos de diferentes formas são colocados sobre a mesa de trabalho. O primeiro objectivo é localizar esses objectos e determinar os seus pontos centrais (centróides). De seguida, o robot pega em cada um dos objectos e, de acordo com a sua forma, coloca-os empilhados uns sobre os outros numa caixa apropriada contabilizando o número de unidades transferidas. Podem ter-se até 3 objectos de cada geometria.</p>	
<p>Tarefa 2 – Montagem de um puzzle de 4 cubos</p> <p>Um utilizador constrói o puzzle de 4 cubos (faces identificáveis) numa área reservada para o efeito antes de espalhar as peças sobre a mesa de trabalho. O objectivo é que o robot construa o cubo de forma automática depois de memorizar a construção inicial e de localizar cada peça quando espalhadas no espaço de trabalho.</p>	
<p>Tarefa 3 – Operações aritméticas</p> <p>Um conjunto de números (0 a 9) e operadores (+ e -) encontram-se armazenados sobre a mesa de trabalho em posições pré-definidas. A cada uma das peças é ainda preciso associar um código ou grafismo que facilite a sua identificação. Um utilizador selecciona o(s) número(s) e o operador e coloca-os numa outra área reservada. Com o auxílio do sistema de visão o robot deve ser capaz de completar as operações propostas, passando pela identificação dos símbolos e pelo manuseamento das peças.</p>	
<p>Tarefa 4 – Paletização Dinâmica</p> <p>Detectar uma um conjunto de 12 cubos iguais e proceder à sua paletização (empilhamento) onde as dimensões da <i>palette</i> podem ser variáveis: sugerem-se <i>palettes</i> onde a base pode ser 2X2, 3X3, 4X2. A base pode figurar desenhada com linhas em papel e pode ter diversas orientações no plano. A determinação da geometria da base</p>	

faz-se dinamicamente por visão no início de cada operação.	
<p>Tarefa 5 – Graffiti</p> <p>Com a ajuda de visão, detectar a posição de uma caneta ou marcador de dimensões adequadas (colocada horizontalmente sobre o plano ou noutra posição mais ou menos favorável), pegar nela de forma apropriada e escrever num painel em dimensões legíveis algumas letras do alfabeto à escolha, em particular algumas mais simples (A, F, E, H, etc.). A colocação do painel pode ter de obedecer a restrições que os programadores queiram impor (vertical, paralelo à base linear, etc...).</p>	
<p>Tarefa 6 – Ordenação de Objectos</p> <p>Vários objectos de diversas dimensões e formas são colocados sobre a mesa de trabalho (por exemplo deve haver objectos iguais mas de escala diferente). O primeiro passo é localizar esses objectos e em seguida deve avaliar-se a sua dimensão (área). Depois disso, o manipulador deve colocá-los noutra local e alinhados por ordem crescente de tamanho (área).</p>	
TAREFAS COM CÂMARA ACOPLADA AO ROBOT	
<p>Tarefa 7 – Seguimento incremental de linha</p> <p>Definir uma linha (curva) sobre a área de trabalho e localizar um dos seus extremos. Considerando este primeiro ponto como o ponto de partida, deslocar o robot de forma incremental de modo a que siga sobre a linha até ao outro extremo. Após cada movimento incremental (movimento ponto-a-ponto) é preciso adquirir uma nova imagem para determinar a direcção pretendida. No final representar o caminho real do robot e comparar com a linha seguida.</p>	
<p>Tarefa 8 – Medição de planos inclinados</p> <p>Marcar numa folha um grande sinal “+” de dimensões conhecidas. Com a câmara acoplada ao robot devem tirar-se várias perspectivas de forma a determinar com a melhor exactidão possível a inclinação real do plano pela deformação da imagem. Procurar dinamicamente a ortogonalidade da câmara com a superfície do plano pode ser uma via adequada. Deve haver pelo menos 4 planos inclinados de valores distintos que se querem medir.</p>	