

---

# Robótica



2002/2003  
JA Campos Neves

---

## Robótica 1 – Objectivos

---

Pretende esta disciplina fornecer as bases necessárias para a compreensão da robótica, no máximo da sua extensão, facultando, por um lado, uma abordagem teórica, de cariz científico e orientada para o desenvolvimento e investigação, e por outro lado uma componente prática e aplicativa do robótica. Assim os discentes poderão compreender o desenvolvimento da robótica alargando em consequência a base aplicativa desta.

## Robótica 2 – Metodologia

---

A metodologia didáctica da disciplina fundamenta-se no equilíbrio dinâmico entre uma componente teórica de formação e uma abordagem complementar prática facultada em aulas laboratoriais, onde os alunos desenvolvem trabalhos específicos que complementem e sedimentem os conhecimentos adquiridos na formação teórica. Estes trabalhos serão quer de índole bibliográfica, quer aplicativa, em temas de desenvolvimento e de actualidade

## Robótica - Programa

---

- Fundamentos de Robótica
- Classificação e Estrutura dos Robôs
- Aplicações da Robótica
- Sistemas de Accionamento
- Modelo Cinemático
- Interpolações de trajectórias
- Sensores em robótica
- Programação de Robots

## Robótica – disciplina

---

### Aulas teóricas

- Matéria sobre robótica, explorando conceitos teóricos e sua aplicação no estudo, desenvolvimento e aplicação de robots em diversos meios.
- Sistemas internos e externos aos robots.
- Programação de robots
- Desenvolvimento de soluções robotizadas específicas e utilização de robots de mercado.
- Programação.

## Robótica – avaliação

---

Cerca de 15 semanas de aulas, com 4 horas por semana, o que significa um total de 60 horas de aulas.

### Avaliação:

Frequência e/ou exame (RGA instituído)

Trabalhos práticos

1 ou 2 alunos por trabalho

Cada trabalho é apresentado ao longo do semestre, pelo menos 2 vezes, e em datas a definir. Da primeira para a segunda apresentação, deve haver evolução no desenvolvimento do trabalho. Os trabalhos são de uso comum e constituem uma base documental da disciplina, para anos precedentes.

Deve haver interesse, e ser entendida a utilidade do estudo inerente a cada trabalho.

Cada apresentação conta para a avaliação

No final deve ser entregue:

Um relatório escrito (arquivo)

Um CD contendo o trabalho e a apresentação (total)

Os trabalhos tem um peso de cerca de 40% na classificação final.

## Robótica – história

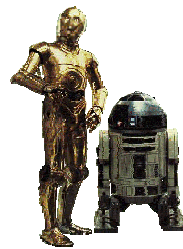
A palavra robot (ROBOT) deriva da língua Checa (Robota) e significa “trabalhador forçado” ou “escravo/servo”. Foi pela primeira vez utilizada em 1921 por Karel Capek, um escritor Checo, que descreve os robots como máquinas que se assemelham a pessoas mas que trabalham duas vezes mais e não apresentam sentimentos humanos.

Nos nossos dias a mesma ideia tem servido para muitas outras produções cinematográficas futuristas ou de ficção, e com elementos tipo robots mais evoluídos (p. ex. *Terminator*), humanizados (*Guerra das Estrelas*), ou mesmo semi-humanos (onde o ser humano é privada da sua consciência e transformado numa máquina humana -*Robotcop*).

Robots - (c)jacn- 02/03

7

## Robótica – exemplos 1

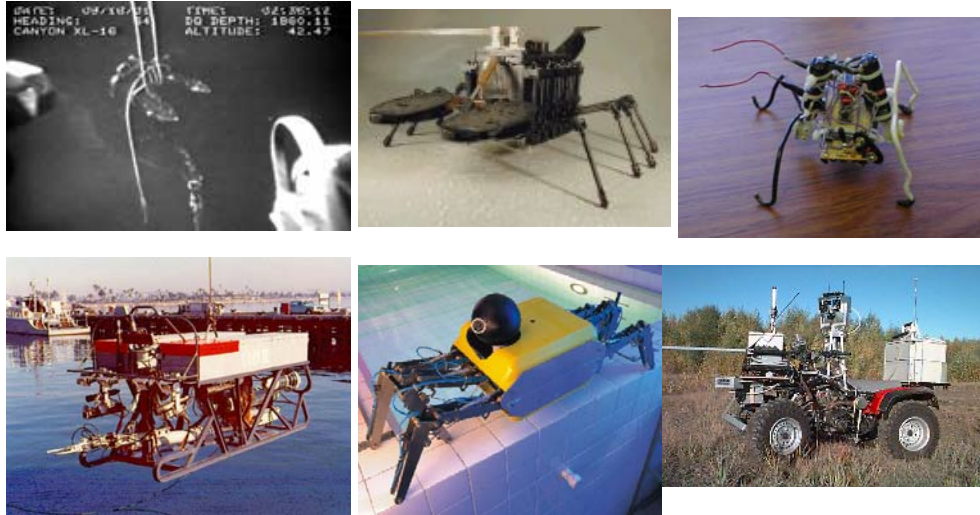


Em alguns dos exemplos citados o robot é uma estrutura mecânica com habilidade de movimentos excepcionais, e noutros é uma máquina automodelável com as mesmas capacidades extraordinárias - sentidos ultra desenvolvidos, uma capacidade mecânica anormal, um conhecimento acima da média do ser humano comum, e toda uma panóplia de dons facultados por uma ciência futurista. Embora existam substâncias que possam ( pelo menos teoricamente ) ser automodeláveis (substâncias electroreológicas) o estado actual da tecnologia e da ciência ainda está muito longe do que é apresentado pela indústria cinematográfica, não obstante o permitir antever o que pode (eventualmente) ser uma parte do futuro da tecnologia e da robótica

Robots - (c)jacn- 02/03

8

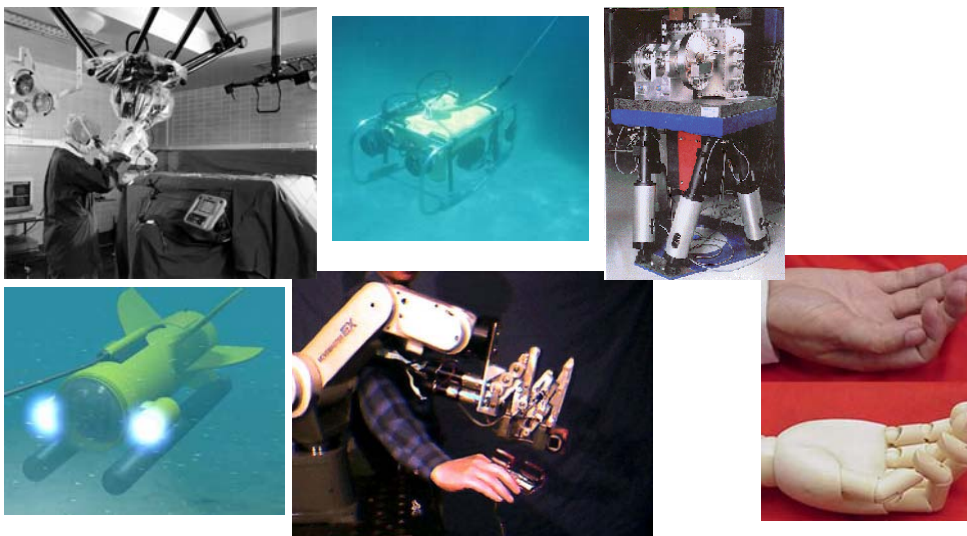
## Robótica – ejemplos 2



Robots - (c)jacn- 02/03

9

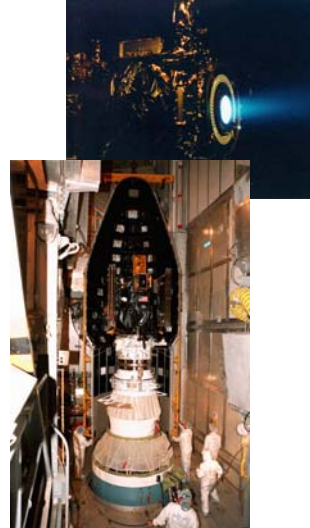
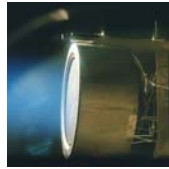
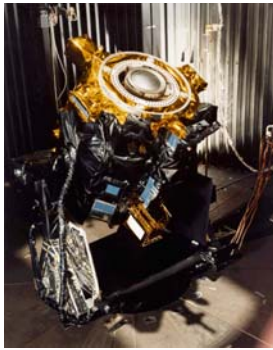
## Robótica – ejemplos 3



Robots - (c)jacn- 02/03

10

## Robótica – exemplos 4



Robots - (c)jacn- 02/03

11

## Robótica – exemplos 5



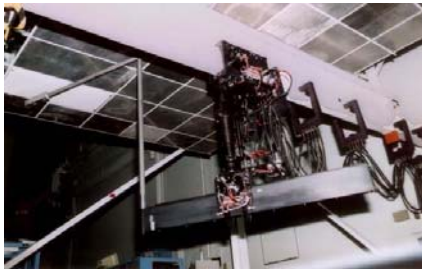
Robots - (c)jacn- 02/03

12

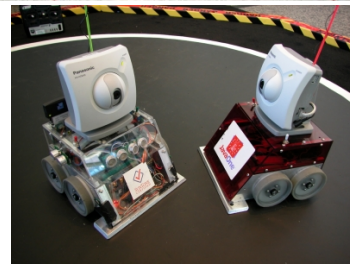
## Robótica – exemplos 6



The Ariel robot is designed to detect underwater mines (CNN)

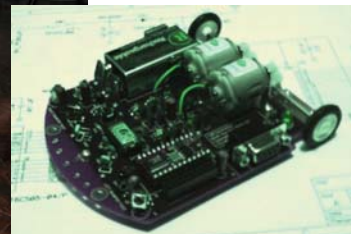


Robots - (c)jacn- 02/03



13

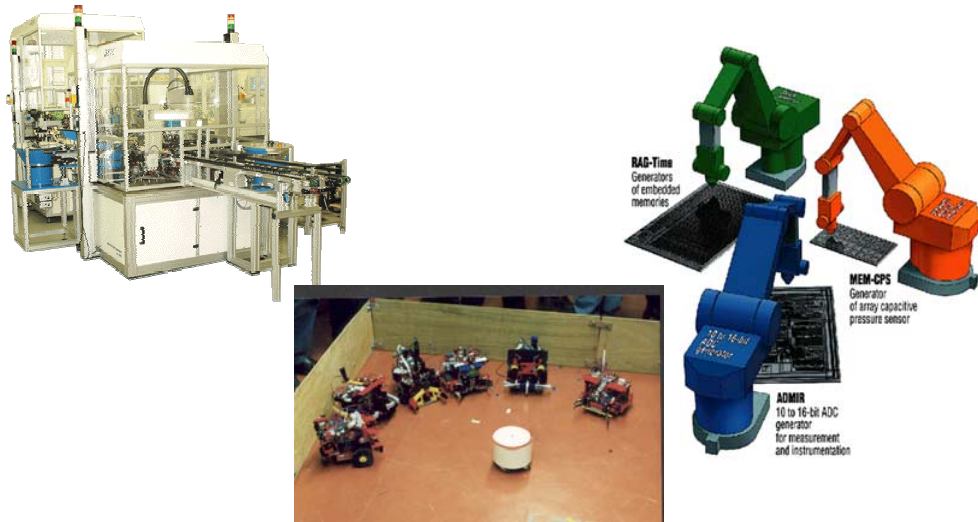
## Robótica – exemplos 7



Robots - (c)jacn- 02/03

14

## Robótica – ejemplos 8



Robots - (c)jacn- 02/03

15

## Robótica – ejemplos 9

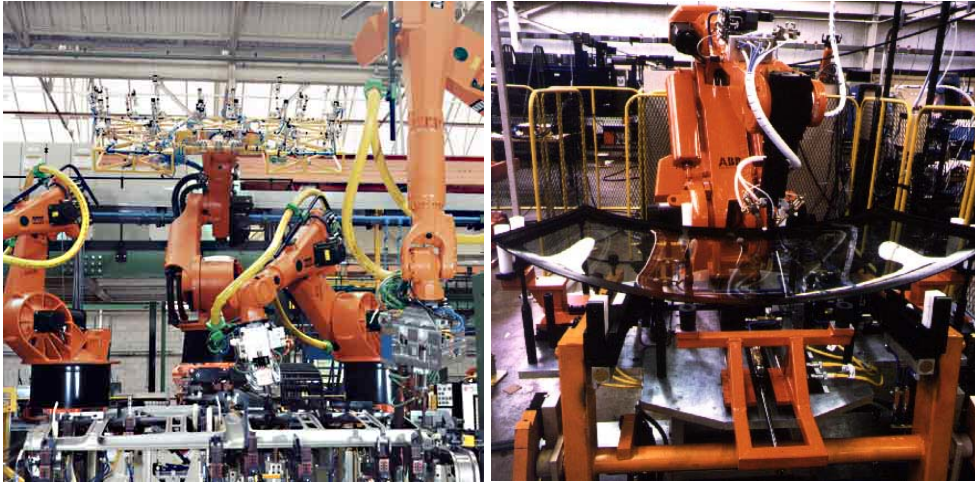


Robots - (c)jacn- 02/03

16



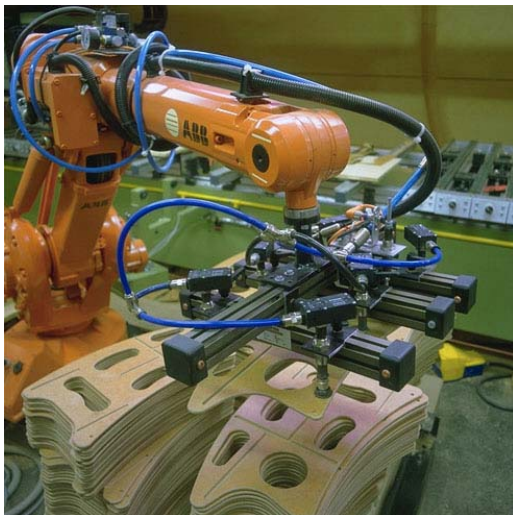
## Robótica – ejemplos 10



Robots - (c)jacn- 02/03

17

## Robótica – ejemplos 11

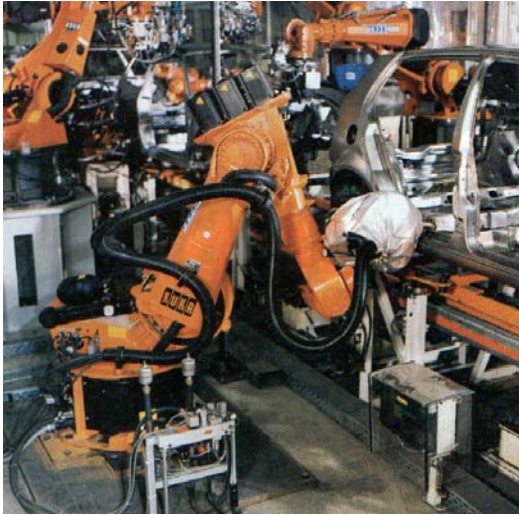


Robots - (c)jacn- 02/03



18

## Robótica – ejemplos 12



Robots - (c)jacn- 02/03

19

## Robótica – ejemplos 13



Robots - (c)jacn- 02/03

20

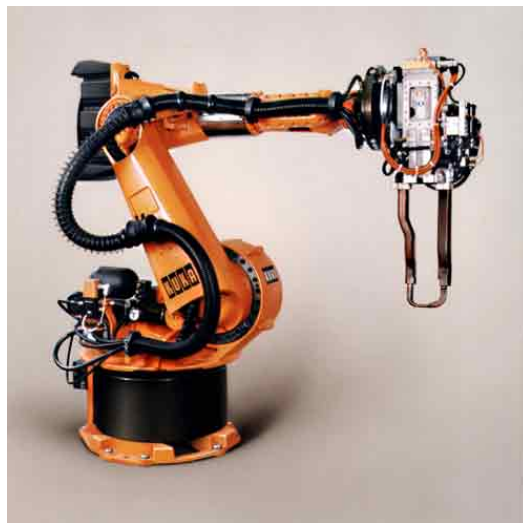
## Robótica – ejemplos 14



Robots - (c)jacn- 02/03

21

## Robótica – ejemplos 15



Robots - (c)jacn- 02/03

22

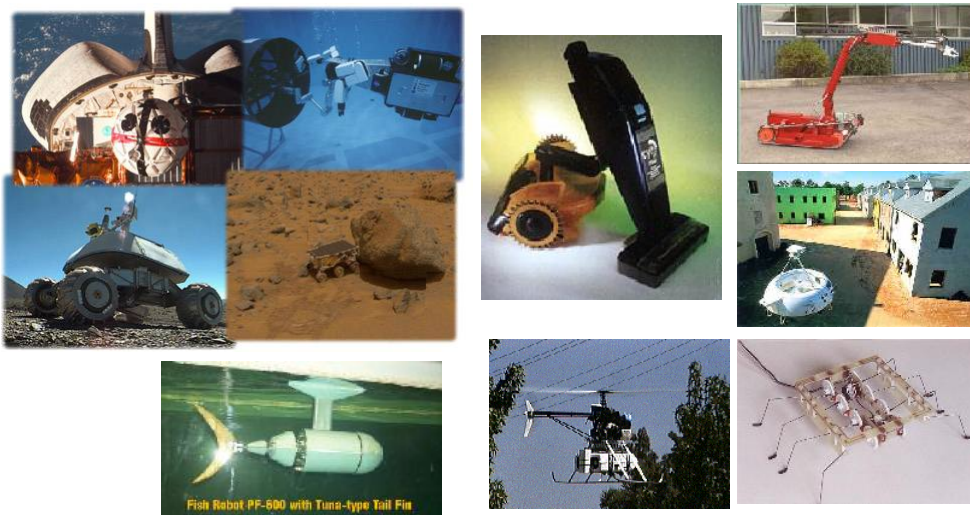
## Robótica – ejemplos 16



Robots - (c)jacn- 02/03

23

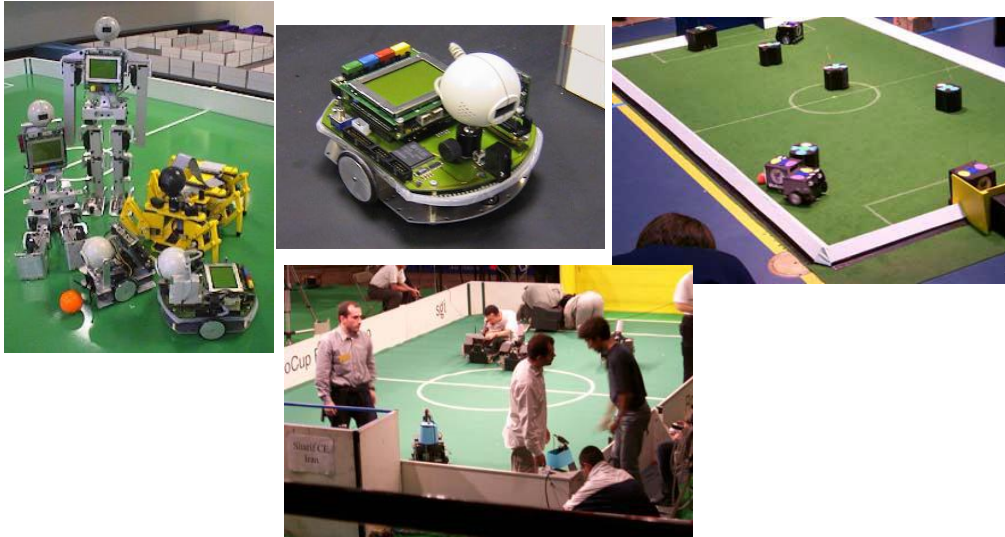
## Robótica – ejemplos 17



Robots - (c)jacn- 02/03

24

## Robótica – ejemplos 18



Robots - (c)jacn- 02/03

25

## Robótica – ejemplos 19



CorredorBrutus

Robots - (c)jacn- 02/03

26

## Robótica – ejemplos 20



Robots - (c)jacn- 02/03

27

## Robótica – ejemplos 21



Robots - (c)jacn- 02/03

28

## Robótica – exemplos 22



Robots - (c)jacn- 02/03

29

## Robótica – exemplos 23



ASIMO da Honda

As exemplified by P2 and P3, the two-legged walking technology developed by Honda represents a unique approach to the challenge of autonomous locomotion. Using the know-how gained from these prototypes, research and development began on new technology for actual use. ASIMO represents the fruition of this pursuit.

<http://world.honda.com/ASIMO>



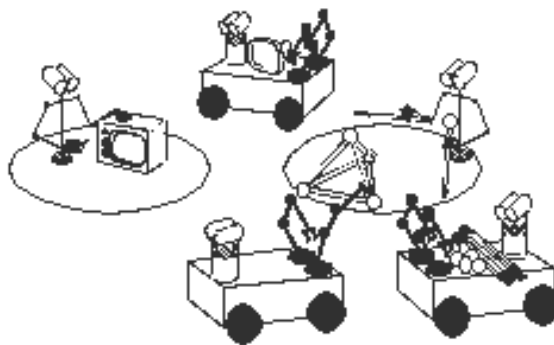
Robots - (c)jacn- 02/03

30

## Robótica e Automação 1

Os problemas existem em muitos sectores e é a procura das soluções associadas que nos permitem o desenvolvimento da tecnologia e a busca de novos produtos.

Foram necessários várias dezenas de anos para que esta ideia de máquinas para servir o homem conseguisse ser atingida sendo os robots cada vez mais utilizados em especial, no sector industrial, mas não em exclusivo. Assim ligar a robótica à automação é um conceito lógico e válido.



Robots - (c)jacn- 02/03

31

## Robótica e Automação 2

Num contexto industrial pode-se definir Automação como uma tecnologia que relaciona a Electrónica, Mecânica e Sistemas de Apoio e Supervisão assistidos por computador, usados nas operações de produção e controlo da produção. Há várias outras terminologias que surgem associadas, como é a Mecatrónica – fusão entre a electrónica e a mecânica – mas com um contexto aplicativo diferente.

São disso exemplo:

- as linhas de produção,
- as linhas de transferencia e de transporte automático de peças,
- sistemas realimentados de controlo,
- as máquinas de controlo numérico,
- os robots,
- os robots submarinos, os robots espaciais (Mars Rover)

Assim, a robótica é cada vez mais considerada como uma parte integrante dos sistemas de automação.

Robots - (c)jacn- 02/03

32



## Classes de automação

---

Podem considerar-se três classes de Automação Industrial.

- 1- Automação Fixa,
- 2- Automação Programável,
- 3- Automação Flexível.

## Automação Fixa 1

---

A Automação Fixa é usada quando:

- o volume de produção é grande, e portanto é adequado (técnica e financeiramente) desenvolver-se equipamento especializado para processar de uma forma eficiente com elevadas velocidades um produto ou partes constituintes deste. São disso exemplos : indústria automóvel, indústria da pasta de papel, entre outros. No caso da indústria automóvel temos linhas de produção altamente dedicadas compostas por dezenas de estações/postos de trabalho usadas na execução de tarefas de maquinaria assemblagem, etc...
- Factores Económicos - de um ponto de vista económico a questão fulcral é que a rentabilização de um investimento de elevada tecnologia tem um custo elevado. Este custo do equipamento é (ou deve ser) diluído pelo grande número de unidades produzidas o que se traduz na redução do preço por unidade, e em simultâneo numa divulgação acrescida dos produtos, num alargamento dos mercados, ou seja uma “visão de economia global ou globalizante”.

## Automação Fixa 2

---

Podemos considerar a automação fixa a que surge quando uma determinada empresa compra um sistema automatizado de produção, para a elaborar grandes quantidades de peças (lâmpadas, parafusos, circuitos integrados, partes de automóveis, indústria farmacêutica, etc...) sem estar preocupada com a flexibilização do tipo de produto. Um dos melhores exemplos é o do sector automóvel e do fabrico de circuitos integrados. No primeiro caso, e em virtude do tempo de vida de uma automóvel, os equipamentos devem permitir alguma flexibilidade de fabrico, dado os investimentos associados serem grandes e o numero de veículos produzidos não ser muito elevado (algumas centenas por dia). No caso do fabrico de Circuitos Integrados, o caso é diferente, visto que se produzem centenas de milhar, a milhões de CI por dia. Em geral os sistemas automatizados de produção são dedicados, e geralmente instalados ainda em fase de protótipos, sendo afinados logo que se inicia a produção. O mercado, que é condicionante da resposta das empresas, impõe tempos curtos e uma elevada cadência produtiva.

## Automação Fixa 3

---

Naturalmente que numa abordagem desta natureza existem riscos inerentes que podem colocar em causa o desempenho e a viabilidade do investimento/projecto.

Riscos:

- financiamento inicial elevado => obrigatoriedade de uma produção elevada,
- especificidade do equipamento => torna-se obsoleto se se mudar de tipo de produto a fabricar.
- finalmente tem que se ter em consideração o ciclo de vida dos produtos na análise de rentabilização de uma estrutura de produção automatizada. Se o ciclo é pequeno então é obrigatório que o volume seja o mais elevado, senão não há hipótese de se rentabilizar o equipamento. Note-se que o mercado actual é caracterizado (cada vez mais) por produtos com baixos ciclos de vida, de baixo custo, ou seja altamente mutáveis.

## Automação Programável 1

---

A Automação programável é utilizada quando o volume de produção é relativamente baixo e quando existe uma grande gama de produtos a ser fabricado. Um dos exemplo mais característicos corresponde às linhas de produção de calçado, que geralmente são de mão-de-obra intensiva, e onde as séries de calçado variam em tamanho e são em pequenas (relativamente) quantidades. Neste caso os sistemas de produção devem permitir/assegurar uma produção que cubra toda a gama de produtos a serem fabricados, bem como uma mutação fácil do *design* do calçado.

Portanto temos um volume de produção de um produto é relativamente pequeno, com elevada diversidade de produtos a ser produzidos.

Logo o equipamento deve ser projectado para ser flexível e adaptativo através de programas específicos para a execução de tarefas que assegurem a flexibilidade e a diversidade de produtos exigida, e que permitam às empresas uma resposta às solicitações e às variações externas do mercado para o qual trabalham.

## Automação Programável 2

---

Podemos considerar:

- (como Factores Económicos) custo diluído num grande número de produtos (diferentes).
- dada a flexibilidade do sistema de produção, produzir pequenos lotes, ou mesmo peças únicas, de forma a rentabilizar o custo do investimento tecnológico.

## Automação Flexível 1

---

A Automação Flexível situa-se entre os dois níveis anteriores. Esta caracteriza-se por uma flexibilidade no processo produtivo, mas não tão grande quanto a Automação Programável assegura.

Uma máquina, pequena ou grande, é flexível na medida em que pode ser utilizada para assegurar a produção de produtos variados. A noção de flexibilidade opõe-se à noção de especialização de dispositivos concebidos para produzirem sempre o mesmo tipo de objectos

## Automação Flexível 2

---

Flexibilidade não significa, forçosamente, automaticidade: a produção mecânica tradicional, com recurso às máquinas-utênsilios universais e tradicionais, é caracterizada por uma boa flexibilidade mas onde a produtividade é média, porque a automatização é quase nula. No caso contrário, ou seja nas máquinas para grandes séries, temos as máquinas automáticas especializadas, onde procuramos ter uma elevada produtividade, mas com uma flexibilidade quase nula. Tal é o caso de máquinas dedicadas à produção de muitas peças, sempre iguais – ex.: circuitos integrados, escovas limpa pára-brisas, etc... !

Assim o problema da automação flexível consiste em tentar conciliar um grau de automação elevado, a fim de garantir uma forte produtividade, e simultaneamente, a boa flexibilidade indispensável ao fabrico de pequenos e médios lotes de objectos. Note-se que este tipo de objectos a fabricar (i.é pequenos e médios lotes) é cada vez mais importante dado que se verifica uma diminuição da duração média de vida dos produtos, uma taxa de inovação considerável e consequentemente uma taxa de substituição inerente, e uma crescente diversificação.

## Automação Flexível 3

---

Por exemplo, em França (início dos anos 90) 75% dos casos de produção referem-se a lotes pequenos e médios de peças parametrizadas e de peças complexas constituídas por montagem de peças mais simples, e cuja cadência de fabrico varia entre as 1 peça a 30 peças por hora. Na generalidade do mundo ocidental, 75% das peças são fabricadas em lotes repetitivos, em geral de menos de 50 unidades. Por outro lado 5% do tempo de passagem de uma peça numa linha de produção é consagrado à *usinagem* desta, e o restante sendo gasto em esperas, deslocamentos entre postos de trabalho e manutenção entre operações sucessivas.

Assim, o que se pretende com um sistema de produção flexível é diminuir os custos de retorno do investimento, a qualidade, as condições de trabalho e de segurança.

## Automação Flexível 4

---

Esta Automação Flexível inclui os FMS (*Flexible Manufacturing Systems*) e os sistemas CIM (*Computer Integrated Manufacturing*).

Estes dois conceitos tem relativamente pouco tempo de existência (20 a 30 anos) e pretendem responder às exigências de mercado de alguma flexibilidade na produção com custos de investimento facilmente rentabilizáveis por séries (de produção) de média dimensão.

Uma das principais características que diferencia a Automação Programável (AP) dos FMS é que na AP dos produtos são feitos em lotes. Quando um lote está terminado o equipamento é reprogramado a fim de processar o lote seguinte. Mas nos FMS diferentes produtos podem ser montados em simultâneo num mesmo sistema de produção. Isto permite uma flexibilidade acrescida que não existe na AP, dado que só produz um lote de cada vez.

## Automação Flexível 5

São caracterizados por :

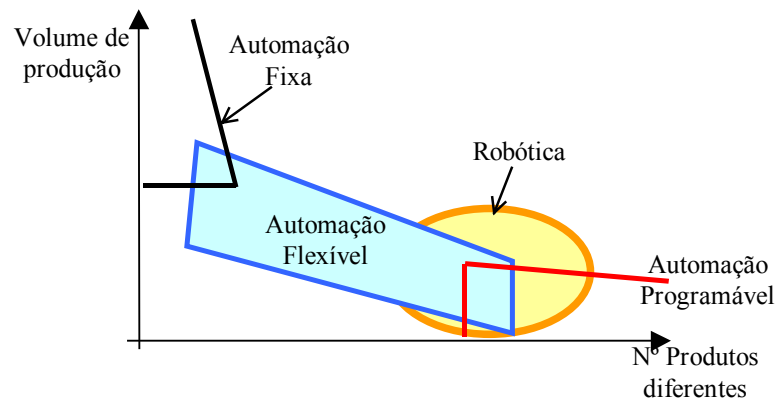
- Volume médio de produção.
- Possuem as características da Automação Fixa e da Automação Programável, portanto podem responder a volumes variáveis de produção.

Necessitam programação para diferentes produtos, muito embora a variedade de produtos seja menor que na Automação Programável.

Integração:

- computador central controla as várias actividades que ocorrem no sistema,
- “spooling” das várias partes constituintes do sistema controlando as operações a serem efectuadas.

## Automação Flexível 6



### Automação Flexível

Produção de diferentes produtos  
ao mesmo tempo no mesmo sistema de fábrica.

### Automação Programável

Processa um único programa ao mesmo tempo  
=> produz um único tipo de peça de cada vez.

## Automação Flexível 7

---

Dos três tipos de sistemas de produção referidos, a Robótica situa-se entre a Automação Programável e os sistemas FMS (*Flexible Manufacturing Systems*), dado que um robot industrial é basicamente uma estrutura antropomórfica ( i.é similar à forma humana) de uso genérico, e que pode ser programado para executar lotes pequenos, ou médios ou mesmo grandes.

A sua função principal é mover partes, ou executar tarefas repetitivas sobre objectos de trabalho, um numero de vezes que lhe for especificado, ou pedido. A tarefa acaba quando o programa de robot for executado, o que significa o lote, ou parte dele concluído. Assim a programação de um robot admite uma versatilidade produtiva acrescida, e uma flexibilidade na realização de diferentes tarefas industriais.

## Robots na automação 1

---

O conceito de robot industrial foi patenteado nos USA em 1954 por G.C. Devol. Este descreve como construir um braço mecânico controlado para executar tarefas industriais.

O primeiro robot industrial foi instalado em 1961 pela Unimation Inc. e executava a tarefa de soldadura automática.

A definição de robot industrial apresentada pela RIA (*Robotics Industries Association*) é a seguinte:

– *Um robot é um manipulador reprogramável e multifuncional desenvolvido para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos específicos, através de uma variedade de movimentos programáveis para executar inúmeras tarefas.*

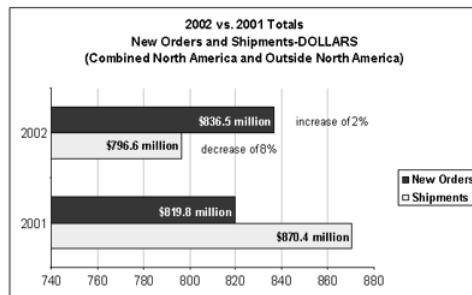
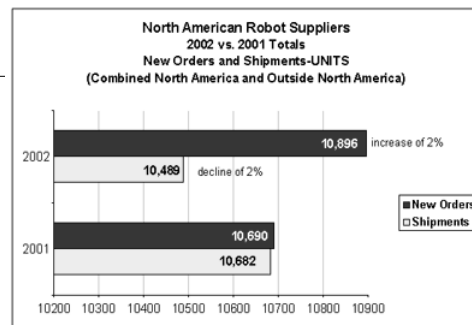
## Robots na automação 2

RIA: [www.robotics.org](http://www.robotics.org)

- Established in 1974, RIA is the only trade group in North America organized exclusively to promote the use of robotics. The Association collects and reports market statistics each quarter based on actual totals provided confidentially by RIA member companies, which is estimated to represent more than 90% of the robotics market activity in North America.

## Robots na automação 3

Ann Arbor, Michigan – North American manufacturing companies ordered 10,573 robots valued at \$811 million from North American based robotics suppliers in 2002, an increase of six percent in units and five percent in revenue from 2001, according to new figures released by Robotic Industries Association (RIA), the industry's trade group.





## Robots na automação 4

---

When sales to companies outside North America are included, North American robot suppliers saw overall increases of two percent in units and revenues.

“We’re encouraged that robot orders rose last year, given the extremely difficult environment for all capital equipment industries,” said Donald A. Vincent, Executive Vice President of RIA. “We hope this means that the worst is behind us, but the continued weakness in the U.S. economy combined with uncertainty over the possibility of war in Iraq makes it very difficult to know what will happen in 2003.

“No matter what happens in 2003, manufacturing companies can’t delay investments in new equipment indefinitely. In order to compete in the global market, manufacturers in all industries will eventually increase their investments in productive technologies like robots that can help them boost productivity, improve product quality, speed time to market, and reduce overall manufacturing costs,” Vincent explained.

Vincent said that he expects the International Robots & Vision Show in Chicago, June 3-5, 2003, to help spur interest in robotics. “The show, which is held just once every two years, gives manufacturing companies a chance to evaluate all of the latest robotics products. More than 5,000 potential buyers from throughout the world are expected to attend, many looking to buy new equipment immediately.”

RIA estimates that some 126,000 robots are now being used in the United States, placing the U.S. second only to Japan in robot use.

## Robots na automação 5

---

Founded in 1974, RIA represents some 230 robot manufacturers, component suppliers, system integrators, end users, educational institutions, research groups, and consulting firms. RIA collects and reports statistics each quarter based on actual totals provided by member companies, which RIA estimates represents over 90% of the North American robotics market.

<http://www.evolution.com/product/oem/er2/>

## Robots na automação 6

Case Study - Downtime Between Changeovers...

Downtime Between Changeovers Reduced with XChange Tool Changer

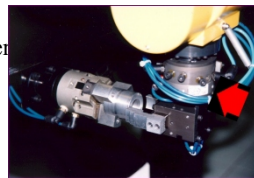
Company: Applied Robotics, Inc.

Submitted by: Angel Fura

Contact: info@arobotics.com

Application: Arc Welding

Industry: Other



Situation: Automated manufacturing is done in batches. Each batch requires different tooling on the robot arm.

Problem: The manual changing of tooling to accommodate the different components leads to miswiring of the second tool and lengthy downtime between the changeovers.

Solution: Applied Robotics' XChange tool changers utilize a fail-safe pneumatically actuated latching mechanism to hold the tooling firmly in place. Tool changing offers the ability to connect and disconnect robotic tooling and its associated utilities. Signal, pneumatic, electric and fluid utilities are engineered for millions of connection cycles.

Applied Robotics offers a family of tool changers to accommodate different needs and applications. See your representative for further details.

## Robots na automação 7

De acordo com a definição anterior os robots industriais incluem-se geralmente na Automação Programável:

- actualmente os robots industriais são máquinas controladas por computador.
- são programados para executarem uma determinada tarefa até que sejam novamente programados para executarem uma outra.

· Aplicações:

Processos fabris: pintura , carga e descarga , transporte de materiais, soldadura, etc...!

Explorações: espaciais, subaquáticas, ...

Manipulação de materiais perigosos

Medicina sistemas de apoio à cirurgia e ao diagnóstico

Industria cinematográfica

etc...

O leque de aplicações tem vindo a crescer com o aumento de capacidade dos robots, muito embora o seu domínio de aplicação não se limite ao sector industrial.

## Robots na automação 8

Em certas indústrias, nomeadamente a automóvel, os robots são incluídos na Automação Fixa:

- nestes sistemas existem vários robots que trabalhando em conjunto, e sempre a executar o mesmo processo, executam uma determinada tarefa.
- disso são exemplo as linhas de montagem de automóveis.



Robots - (c)jacn- 02/03

53

## Robots na automação 9

Vantagens na aplicação de robots:

Flexibilidade – podemos com robots assegurar um elevado grau de flexibilidade no processo produtivo, e portanto com uma mesma máquina obtermos ( produzirmos) mais produtos diferentes.

Aumento da produção – um robot é um dispositivo que deve assegurar uma produção pelo menos 2 vezes superior à de um ser humano, na realização da mesma tarefa, se se pretende que seja rentável. Deste ponto decorre um aumento da produção.

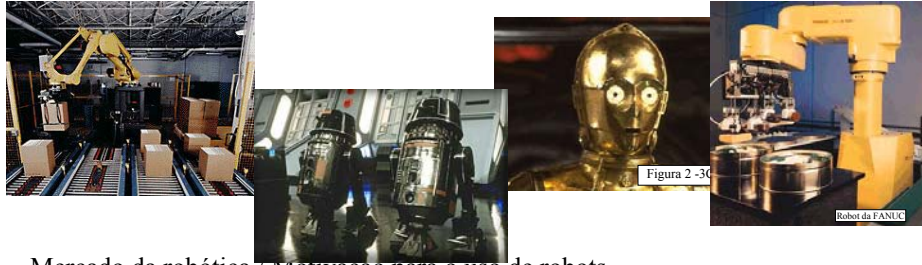
Aumento da qualidade final dos produtos – dado que há a necessidade de se reflectir sobre o processo de fabrico, a qualidade final destes será acrescida pelo aumento das qualidades parcelares. Ora um robot permite, pelo menos na fase em que interfere, aumentar a qualidade do produto.

Aumento da qualidade de vida (uma vez que efectuem trabalhos indesejáveis). Este ponto é motivo de alguma polémica dado que nem sempre se substituem operadores humanos por máquinas em operações de alto risco. No entanto é sabido que quando esta substituição ocorre, ela permite transferir pessoas para tarefas (eventualmente) menos danosas para o homem.

Robots - (c)jacn- 02/03

54

## Robots na automação 10



Mercado da robótica / Motivação para o uso de robots.

Crescimento aproximadamente exponencial na década de 80 e 90 das vendas e instalações:

- reconhecimento da utilidade em efectuar certas operações,
- novas tecnologias permitindo melhor “interface” utilizador - robot
- aumento do mercado => diminuição dos preços => utilização em pequenas e médias empresas.

## Robots na automação 11

Estudo elaborado pelo *Carnegie Mellon University Robotics Institute* (1981)  
(alguns factores)

Classificação	Utilizadores	Utilizadores Potenciais
1	Redução do custo da mão de obra	Redução do custo da mão de obra
2	Eliminação dos trabalhos perigosos	Aumento da qualidade do produto
3	Aumento do lucro	Eliminação dos trabalhos perigosos
4	Aumento da qualidade do produto	Aumento do lucro
5	Aumento da flexibilidade	Aumento da flexibilidade
6	Redução no desperdício do produto	Redução no desperdício do produto

## Robots na automação 12

---

Robótica no Futuro -esperam-se:

- unidades móveis com maior autonomia,
- o que permite alargar o campo de produtos a serem fabricados por robots e o seu leque de aplicações.
- mais do que um braço,
- dado que permite uma maior flexibilidade,
- sistemas multi-sensorial,
- comandos por processamento de voz,
- unidade inteligente.

Investigação nas áreas de:

- Engenharia Mecânica, Engenharia Electrónica, Engenharia Software, Engenharia Industrial, Engenharia de Materiais, Ciências Sociais, Inteligência Artificial

Custos na aplicação de robots: custo do robot, custo do end-effector (mão), custo do equipamento de suporte, custo dos dispositivos sensitivos, custo do sistema de segurança, custo da instalação, custo da manutenção, custo da programação, custo da reorganização da linha, espaço físico, Custo da formação do pessoal custos sociais decorrentes. etc...!

## Robots na automação 13

---

A decisão de Robotização terá de ser efectuada de um forma cuidadosa e minuciosa, tendo em atenção que cada caso é um caso particular.

Hoje, dado o momento de reestruturação económica, política e social, aliada a mudanças profundas de hábitos de trabalho e das regras do mercado mundial, a robótica tem sido restringida por factores de ordem social, que preconizam uma utilização racional de sistemas que substituam o homem apenas em tarefas que lhe possam ser gravosas, com elevado factor de risco, ou então impossíveis de serem realizadas.

São disso caso a missão a Marte, as explorações e o trabalho em fundos marinhos, ou operações em centrais nucleares ou em fábricas de purificação de elementos radioactivos, ou em centrais de separação e tratamento de lixos.

## Robots na automação 14



Robot de soldadura.



Robot de soldadura.

Robots - (c)jacn- 02/03

59

## *Fundamentos de Robótica 1*

A Robótica é uma ciência da engenharia que se refere como uma combinação entre a tecnologia de máquinas de produção e da ciência da computação. Esta abrange, para além do que foi referido um grande numero de áreas de estudo periféricas que são requeridas e usadas na construção e utilização de robots.

Estrutura básica de um robot

A anatomia de um robot, ou a sua estrutura básica, refere-se à construção física do robot nas suas várias partes constituintes -

- Base - a base corresponde ao elemento que assegura a fixação de um robot ao solo. A grande maioria é fixa mas cada vez mais os robots tem uma base móvel, montada numa estrutura que se movimenta, ou num robot dito móvel, com o intuito de alargar o seu espectro de funcionalidades.
- corpo e braço - o corpo está ligado à base e é composto por elemento móveis de diversos tipos. Na extremidade oposta à da base tem um pulso (“wrist”).
- pulso (“wrist”) a que está associado a mão ou efectuador (end-effector), que possui um conjunto de movimentos adicionais facultando ao robot a possibilidade de efectuar movimentos específicos adicionais.

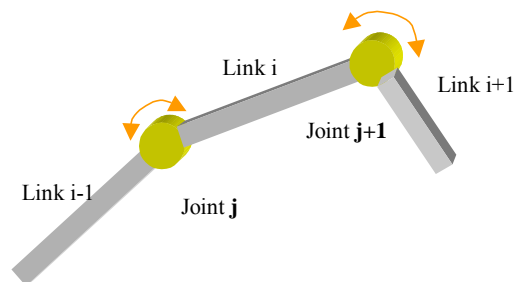
Robots - (c)jacn- 02/03

60

## Fundamentos de Robótica 2

A estrutura composta por **braco+pulso** é comum designar-se por **Manipulador**, dado efectuar a manipulação (por aproximação antropomórfica) de objectos ou a realização de tarefas de forma similar ao ser humano.

Um Manipulador é normalmente constituído por uma sequência de braços (“*links*”) mecânicos. Cada braço é ligado ao próximo por uma junção (“*joint*”). A estrutura mecânica efectua movimentos, que são provocados por actuadores (“*Drivers*”) para accionarem as junções do manipulador.



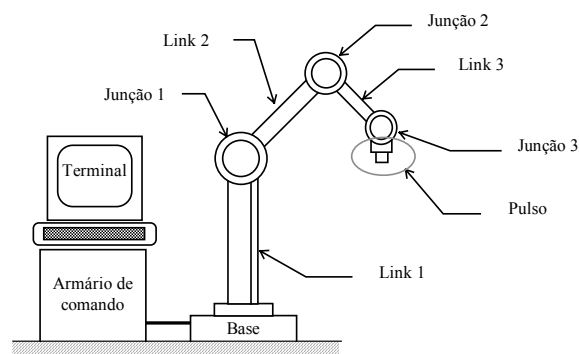
Robots - (c)jacn- 02/03

61

## Fundamentos de Robótica 3

Adicionalmente existe um Computador ou um Autômato Programável usado como controlador e armazém dos programas das diversas tarefas.

Finalmente o *End-effector* que é a parte responsável pelo agarrar / transportar / manipular os objectos, ou pela execução de tarefas específicas.



Robots - (c)jacn- 02/03

62

## Fundamentos de Robótica 4

A função das junções é controlar o movimento entre os braços. Cada junção contribui com um grau de liberdade para o movimento efectuado pelo *end-effector*.

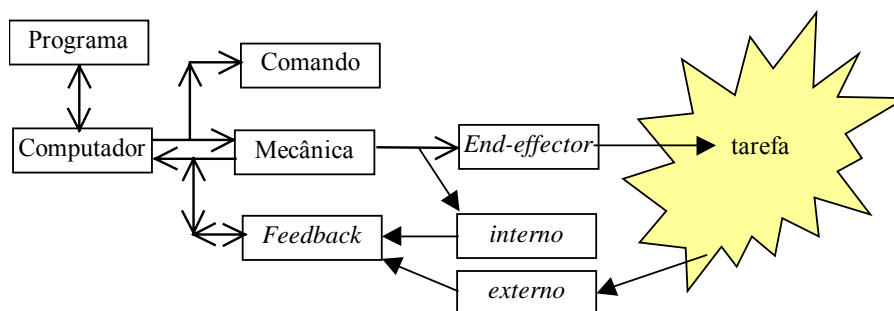
Define-se **Grau de Liberdade** ao movimento associado a cada articulação. Por outras palavras cada articulação é responsável pelo movimento do braço segundo uma determinada forma (Rotação ou Translação).

O conjunto de todas as articulações permitem executar uma família de movimentos que facultam um determinado grau de liberdade de movimento no espaço 3D do robot.

Assim, os manipuladores mais comuns apresentam 4 ou 6 graus de liberdade permitindo ao *end-effector* posicionar-se e orientar-se em qualquer posição no espaço, o que significa 4 a 6 articulações.

A figura seguinte apresenta um exemplo bem conhecido da robots inteligentes, tal como a ficção científica os projecta e os apresenta ao grande publico

## Fundamentos de Robótica 5



Todo o desenho e processo associado ao robot é orientado para a realização das tarefas de forma flexível. O conceito de reprogramação tem inerente a flexibilidade e a possibilidade de modificar o seu objectivo de trabalho.



## Fundamentos de Robótica 6

Principais características de robots.

Um robot possui, ou é parametrizado, por um conjunto de características de base, que são os parâmetros fundamentais em funcionamento. Estes parâmetros são:

- Velocidade de deslocação
- Capacidade de carga ou de elevação
- Alcance (*attainability*)
- Resolução espacial
- Exactidão
- Repetibilidade

Embora existam relações funcionais entre eles, são no entanto parâmetros distintos

X: characteristic should be known for given application to work well										
?: characteristic may or may not be important for given application depending on conditions										
Proposed test criteria	Spot Welding	Material	Assembly with Pose-to-Pose	Assembly with Path Control	Inspection with Pose-to-Pose Control	Inspection with Path Control	Machining/Deburring/Polishing/Cutting	Spray-painting	Arc Welding	Adhesive/Sealing
		Handling	Control Only							
unidirectional pose accuracy	X	X	X	X	X	X			X	
unidirectional pose repeatability	X	X	X	X	X	X			X	
multi-directional pose accuracy		X	X	X	X	X				
variation distance accuracy	?	?	?	?	?	?				
distance repeatability	?	?	?	?	?	?				
pose stabilization time	X	X	X	X	X	X				
pose drift	X	X	X	X	X	X			X	
path accuracy				X		X	X	X	X	X
path repeatability				X		X	X	X	X	X
cornering deviations				X		X	X		X	X
stabilization path length				X		X	X		X	X
path velocity accuracy							X	X	X	X
path velocity repeatability							X	X	X	X
path velocity fluctuation							X	X	X	X
minimum stabilization time	X	X	X	X					X	
static compliance	X	X	X	X			X			

## Características de robots...!

---

[unidirectional pose accuracy and pose repeatability](#)

multi-directional pose accuracy variation  
distance accuracy and distance repeatability  
pose stabilization time  
drift of pose characteristics  
path accuracy and path repeatability  
cornering deviations  
path velocity characteristics  
minimum positioning time  
static compliance

[http://trueforce.com/Industrial\\_Manipulators\\_&\\_Automation/manipulator\\_performance.htm](http://trueforce.com/Industrial_Manipulators_&_Automation/manipulator_performance.htm)

## Velocidade de deslocação 1

---

- **A velocidade de deslocação** é medida no pulso e corresponde à máxima velocidade a que o robot pode deslocar o pulso. Em geral, um robot manipulador é capaz de efectuar movimentos muito lentos (quase imperceptíveis) até deslocamentos a alguns metros por segundo, o que são velocidades razoáveis.

No entanto há um compromisso em termos de velocidade – dado que para cada movimento há uma aceleração, e uma desaceleração, velocidades elevadas podem ser difíceis em determinadas tarefas. Por outro lado as velocidades são condicionadas pelo efectuador, pela tarefa e pelo objecto a ser deslocado (caso seja caso disso).

A máxima velocidade mede-se com o braço do robot estendido, portanto com o efectuador o mais afastado da base. Também são condicionantes da velocidade os sistemas de actuação – caso se trate de um sistema de actuação eléctrico a velocidade não é muito grande, mas o controle fino do movimento é melhor do que num sistema de actuação pneumático ou hidráulico.

## Velocidade de deslocação 2

---

Os que permitem maior velocidade são os hidráulicos, mas com menor precisão. Numa tarefa, é usual definir-se uma velocidade máxima, e todas as velocidades no programa serão percentagens desta velocidade máxima. A velocidade numa tarefa é determinada:

- pela precisão com que o efectuador deve ser posicionado ao longo da execução do programa,
- pelo peso do objecto a deslocar-se (quando maior o peso do objecto, maior a inércia e maiores os efeitos de aceleração necessários),
- com a distância a que este vai ser deslocado.

Note-se que geralmente, há uma relação inversa entre a exactidão dos movimentos de um robot e a velocidade a que este se move.

## Alcance

---

- *Alcance* é um dos pontos a ter em consideração num robot é a sua capacidade de atingir os objectos sobre os quais vai trabalhar. A ideia de base é equivalente à nossa capacidade de chegarmos com um simples, e exclusivo, movimento do braço a um objecto ao seu alcance sem deslocar o tronco nem usar as pernas para deste se aproximar. Assim considera-se o *Alcance*, ou a capacidade de atingir um objecto como a distância máxima que este atinge deste a sua base. Este parâmetro vai estar directamente associado ao volume de trabalho de um robot.

## Capacidade de elevação

---

### Capacidade de elevação

- A capacidade de elevação e de transporte de carga é importante em muitas aplicações dado poder limitar o leque de peças a serem manipuladas e condicionar o tipo, a configuração e as características funcionais de um robot. Assim cada configuração tem características específicas em termos de resposta à carga máxima e à carga nominal suportada.

## Resolução

---

**A resolução** é o menor incremento do movimento no volume de trabalho do robot. Por outras palavras considere-se o volume de trabalho do robot (volume onde o braço se move no espaço), e associa-se a resolução à menor divisão, ao menor passo, que a estrutura articulada permite.

A resolução de um robot depende de :

- Unidade de Controlo
- Sensores de posição

Há dois tipos de resolução:

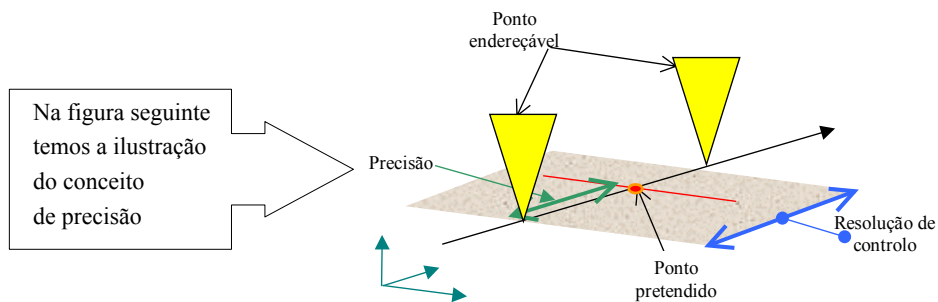
- Resolução do programa
  - menor incremento de posição permitido pelo programa do robot - BRU (Basic Resolution Unit)
- Resolução de controlo (feedback)
  - menor variação de posição que os sensores de feedback discriminam

A melhor performance obtém-se quando a resolução de controlo é igual à resolução do programa. A resolução global do sistema será a pior das duas.

# Precisão

A **precisão** do robot, refere-se à capacidade do manipulador colocar o pulso numa determinada posição no volume de trabalho. A Precisão depende de:

- imprecisões mecânicas [ folgas (rodas dentadas, actuadores hidráulicos, arqueamento dos braços) ]
- algoritmos de controlo ( arredondamentos nos cálculos )
- resolução do sistema



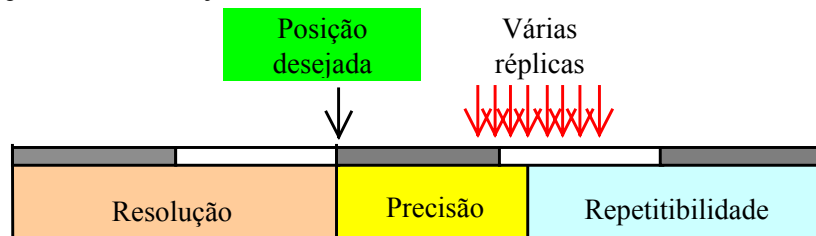
Robots - (c)jacn- 02/03

73

# Repetibilidade

A **repetibilidade** está associada à capacidade de um robot executar tarefas repetidas, passando por pontos repetidos. Se um robot se movimentar para uma determinada posição um número de vezes em iguais condições à normalmente resulta que os diferentes movimentos levam a diferentes posições. A repetibilidade do sistema é o desvio médio das posições reais.

A repetibilidade dos robots é usualmente melhor que a sua precisão, principalmente porque a precisão depende de vários factores, tais como a carga à qual o robot está sujeito.



Robots - (c)jacn- 02/03

74

## Classificação e Estrutura dos Robots

A classificação dos sistemas Robotizados pode ser efectuada recorrendo a:

Tipo de sistemas

- PTP : Ponto-a-ponto ( "point-to-point" ).
- CP : trajectória contínua ( "continuous path" ).
- sequência limitada.
- (robots) inteligentes.

Tipo de controlo:

- malha aberta.
- malha fechada.

Anatomia dos robots:

- cartesiano,
- esférico,
- cilíndrico,
- articulado,
- etc...

A selecção do tipo de sistema, controlo e anatomia depende sempre do fim para que se destina o robot.

## Anatomia dos robots

Um Robot é constituído por uma série de articulações (junções) e ligações (braços).

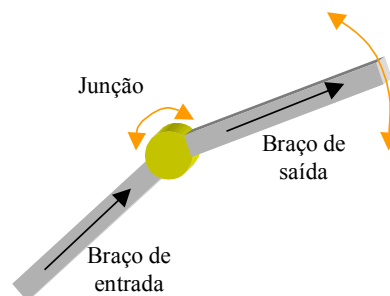
Robot => encadeado de braços e junções.

Junção:

- permite o movimento relativo entre duas partes do corpo,
- representa um grau de liberdade.
- uma articulação liga dois braços

Braço:

- braço de entrada
- braço de saída



## Exemplo

Exemplo: robot manipulador típico à possui duas secções:

Corpo (body) e Braço (arm), normalmente com três graus de liberdade :

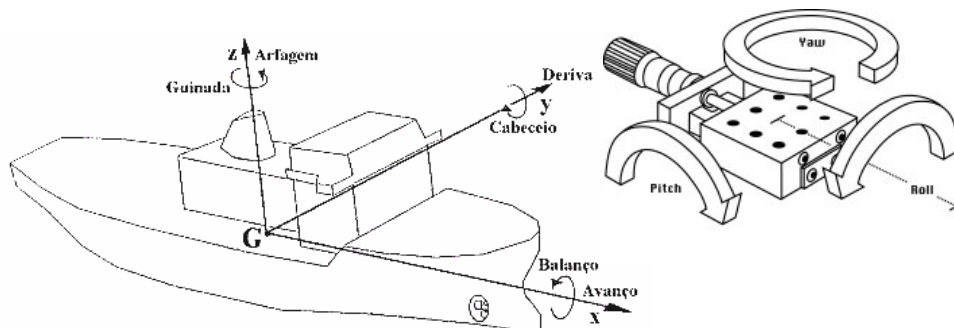
1. movimento vertical (eixo dos Z)
2. movimento radial (dentro e fora ou eixo dos Y)
3. movimento direita para a esquerda (eixo X ou rotação em torno de Z)

Pulso (wrist), normalmente com 3 graus de liberdade:

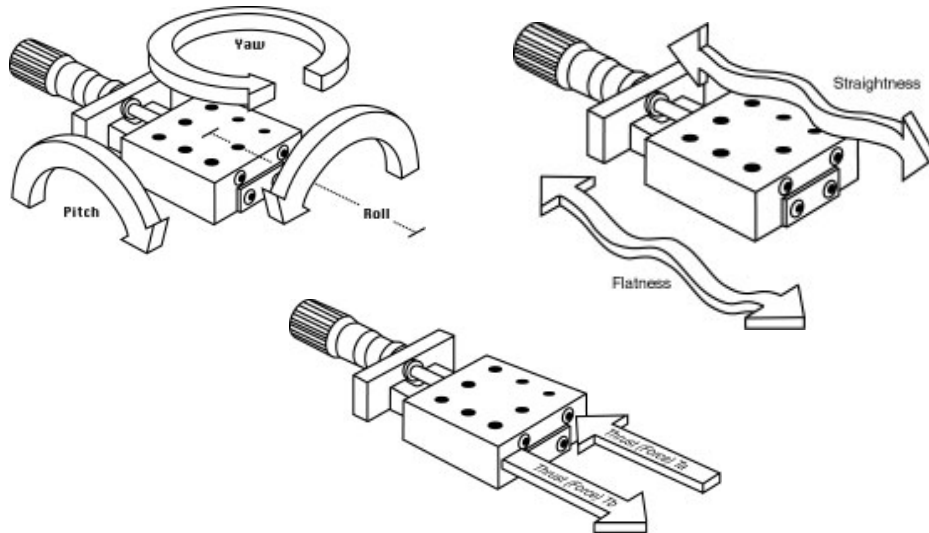
4. rotação (Roll), junção do tipo T
5. azimute (Yaw), junção do tipo R
6. inclinação (Pitch), junção do tipo R

## Movimentos 1

A figura seguinte ilustra os ângulos de rotação no caso de um navio, onde é possível entender o que representam as rotações (Roll-Pitch-Yaw // Balanço-Arfagem-Deriva) em termos do movimento do barco.



## Movimentos 2

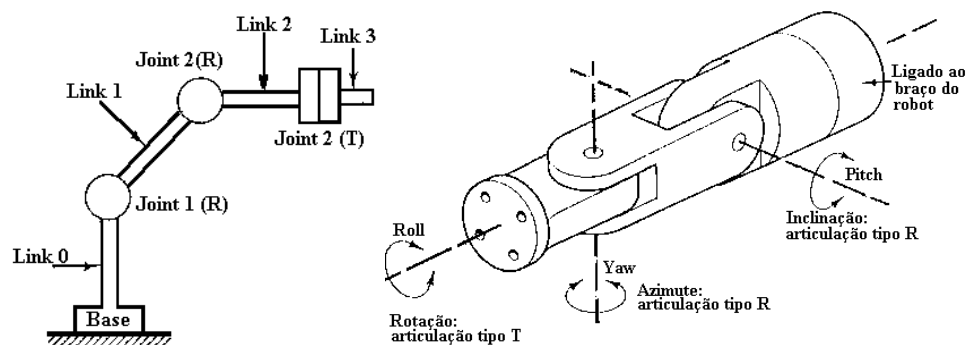


Robots - (c)jacn- 02/03

79

## Movimentos 3

As duas figuras seguintes apresentam o corpo de um manipulador, apoiado na Base, e composto por um conjunto de links e articulações (Joints) e o pulso, com os movimentos possíveis.



Robots - (c)jacn- 02/03

80



## Movimentos 4

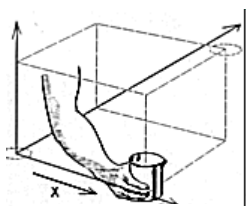
Fazendo um paralelo com o ser humano, a questão base da robótica consiste em facultar aos manipuladores a realização de seqüências de movimentos no espaço tridimensional (3D) de forma controlada e segundo trajetórias específicas bem definidas. Assim a base deste processo resume-se à programação de movimentos simples, baseados nas operações elementares de Rotação e Translação, que conhecemos e sabemos operar, da matemática. Estas serão descritas, por sua vez, por transformações entre referenciais específicos.

Nas figuras seguintes estão ilustrados os principais movimentos executados por um braço humano aos quais associamos as transformações matemáticas respectivas. Nas três primeiras temos translações de um objecto segundo as direcções X, Y e Z de um referencial cartesiano ortogonal.

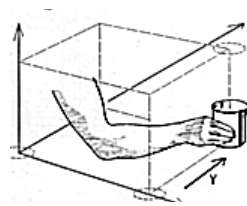
Robots - (c)jacn- 02/03

81

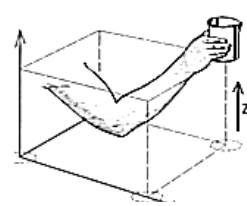
## Translações



Translação segundo X



Translação segundo Y



Translação segundo Z

As translações permitem chegar a qualquer ponto no espaço, mas sem que se consiga alterar a orientação do objecto. Assim apenas deslocamos o objecto segundo linhas paralelas aos eixos do referencial de base. Uma forma de se compreender a acção e a limitação das translações é tentar beber água contida num copo colocado numa mesa à nossa frente, apenas com translações – conseguimos levar o copo desde a mesa até um ponto próximo da nossa boca, mas não conseguimos rodar o copo para beber.

Robots - (c)jacn- 02/03

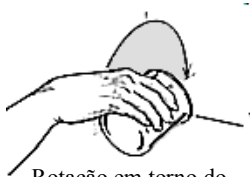
82

## Translação e Rotação

Adicionando rotações às translações anteriores, o leque de possibilidades torna-se, em termos de espaço 3D quase ilimitada – este é função de limitações volumétricas e físicas próprias ao movimentos em si ( por exemplo a limitação de voar ou de atingir pontos de difícil acesso).

Nas figuras seguintes estão representadas as rotações básicas em torno dos eixos X, Y e Z de um referencial cartesiano ortogonal, rotações essas que nos deixam entender de melhor forma os efeitos associados destas transformações.

## Rotação



Rotação em torno do eixo dos X



Rotação em torno do eixo dos Y



Rotação em torno do eixo dos Z

A composição dos dois tipos de movimentos (translações e rotações) permite que cheguemos a qualquer ponto do nosso espaço circundante, tendo associado os movimentos de deslocação do corpo (também rotações e translações...).

## Efectuador - bases

---

Associado ao pulso existe o órgão terminal (end-effector):

- elemento este que se considera como não fazendo parte do robot devido à sua variabilidade
- cada aplicação pode requerer um tipo específico de efectuador
- um mesmo robot manipulador pode ter vários efectuadores, que troca durante a execução das tarefas.

## Tipos de Junções 1

---

Um efectuador é semelhante, em termos de movimentação a um manipulador. Em ambos os casos há que ter em conta os tipos possíveis de movimentos que se podem fazer, e com que tipos de sistemas mecânicos.

São as junções do corpo e do braço colocam o órgão terminal na posição pretendida (posição/orientação).

São as junções do pulso orientam o órgão terminal.

Dependendo da posição relativa entre os braços de entrada e saída e do tipo de movimento, pode-se efectuar a seguinte classificação para a diferentes junções

## Tipos de Junções 2

**Linear - L:** movimento linear com os eixos dos braços (entrada e saída) paralelos entre si.

**Rotational - R:** movimento de rotação com o eixo de rotação perpendicular ao eixo do braço de saída e ao eixo do braço de entrada.

**Twisting - T:** movimento de rotação com o eixo de rotação paralelo ao eixo do braço de saída e de entrada.

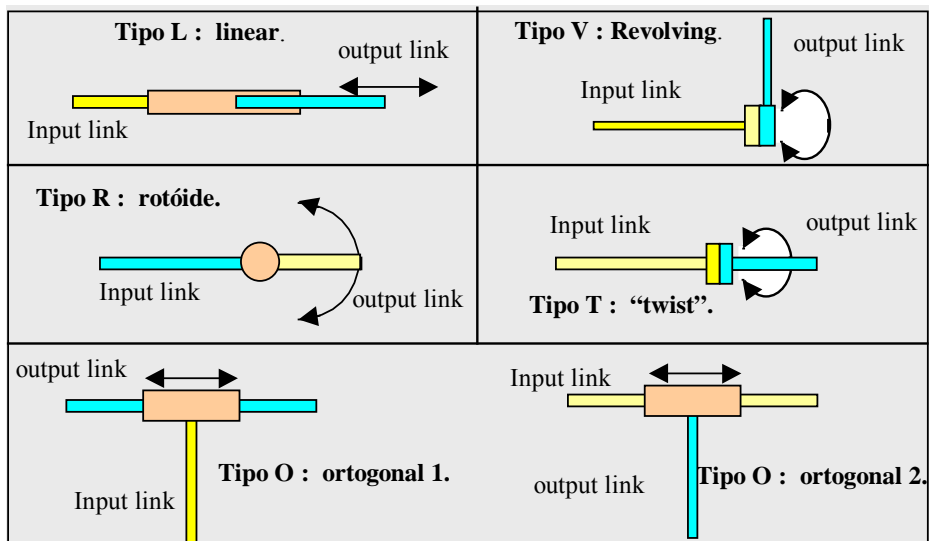
**Revolving - V:** movimento de rotação com o eixo de rotação paralelo ao eixo do braço de entrada e perpendicular ao eixo do braço de saída.

**Orthogonal - O:** movimento linear com os eixos dos braços (entrada e saída) perpendiculares entre si

Robots - (c)jacn- 02/03

87

## Tipos de Junções 3

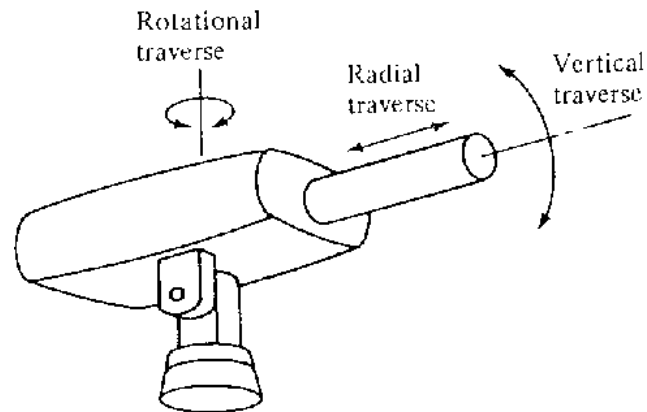


Robots - (c)jacn- 02/03

88

## Tipos de Junções 4

A figura seguinte apresenta um robot com 3 dos graus de liberdade que lhe estão associados, bem como o tipo de deslocamento que efectuam.



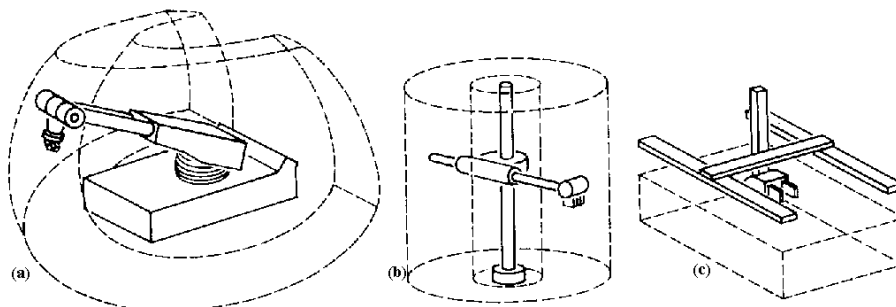
Robots - (c)jacn- 02/03

89

## Volume de Trabalho 1

Espaço dentro do qual o robot pode manipular o pulso. O volume de trabalho depende de:

- Configuração física do robot
- Tamanho do Corpo, Braço e Pulso
- Limites físicos associados aos movimentos das junções
- Na figura seguinte podemos observar alguns volumes de trabalho de robots manipuladores com anatomias diferentes e características, respectivamente polar, cilíndrico e cartesiano.



Robots - (c)jacn- 02/03

90

## Configurações típicas dos robots

Existem robots industriais com uma variedade de formas, dimensões e configurações físicas, mas que podem ser generalizados em quatro grandes tipos fundamentais, no que refere a configurações funcionais:

1. Configuração Polar.
2. Configuração Cilíndrica.
3. Configuração Cartesiana.
4. Configuração Articulada ou Manipulador (jointed-arm).



Robots - (c)jacn- 02/03

91

## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (1)

Esta configuração é caracterizada por uma estrutura de movimentos lineares (deslizamentos) segundo as direcções X, Y e Z o que permite ao pulso atingir qualquer ponto dentro de um volume paralelepédico.

Este tipo de configuração também é designada por robot xyz ou robot rectilíneo.

Uma variante deste tipo de configuração são os robots em pórtico (“gantry”) que utilizam parte da configuração em “caixa” do modelo da IBM RS-1.

O volume de trabalho nesta configuração possui uma distribuição uniforme da resolução dado ser um sistemas de deslocamento XYZ.

Robots - (c)jacn- 02/03

92

## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (2)

As principais vantagens deste tipo de configuração são :

Movimentos facilmente programáveis e controláveis, dado termos deslocamentos lineares.

Alta precisão, dentro dos limites impostos pela unidade de calculo e do sistema mecânico. Em todo caso permite melhores resultados que noutros tipos de configurações pela própria estrutura do robot.

Precisão, velocidade e capacidade de carga constante em todo o espaço de trabalho, em particular nos “pórtico”.

Simplicidade do sistema de controlo, dado limitar-se a três actuadores e três *encoders* lineares.

Coordenadas XYZ de percepção fácil, o que simplifica a sua operação e programação.

Estrutura robusta e rígida.

Cobertura de uma área grande

Grande capacidade de carga

Simplicidade estrutural oferecendo grande fiabilidade

Facilidade de expansão, portanto de aumentar a linha de operação.

## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (3)

Aplicações: em trabalhos que exijam movimentos lineares de alta precisão.

Se se pretender efectuar um movimento linear de comprimento  $l$  a uma velocidade  $V$ , as equações das velocidades para cada eixo são respectivamente:

$$V_x = (x/l)V;$$

$$V_y = (y/l)V;$$

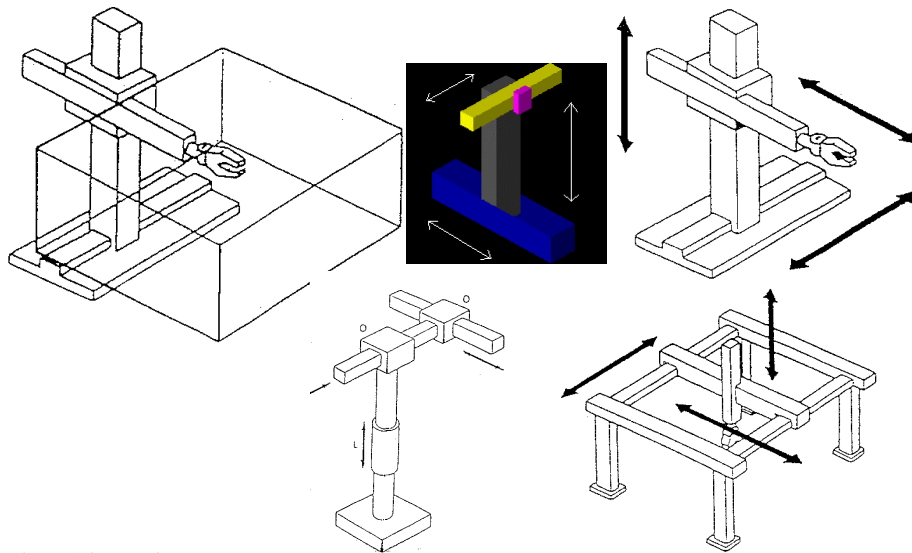
$$V_z = (z/l)V;$$

com  $x, y, z$  as componentes de  $l$  em  $X, Y, Z$ , isto é,

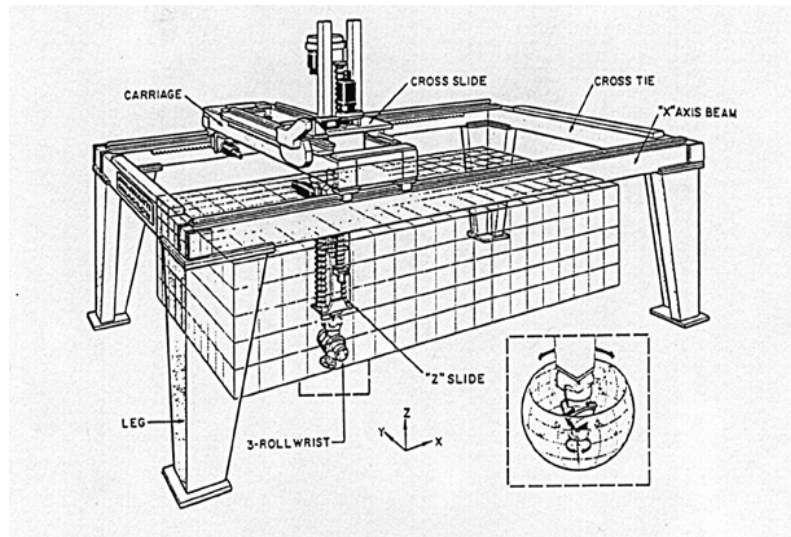
$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

Portas de fornos, *pick and place*

## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (4)

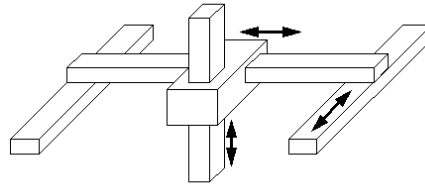
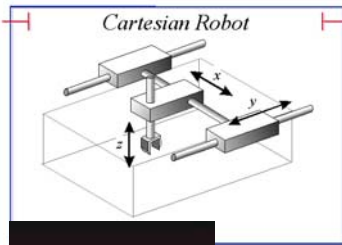


## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (5)

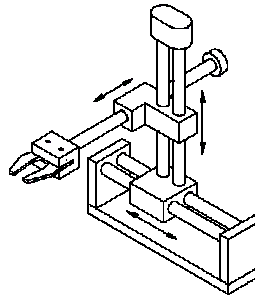




## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (6)



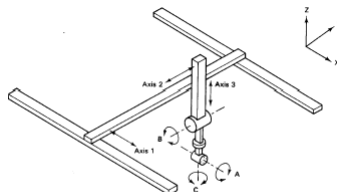
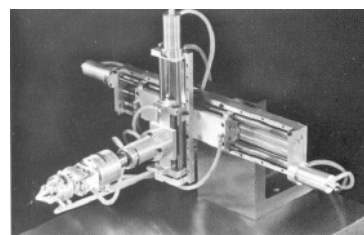
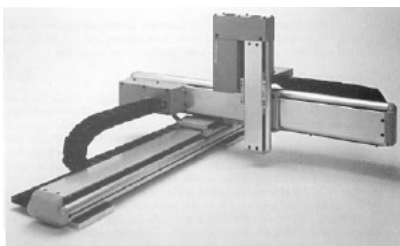
CARTESIAN/RECTILINEAR/GANTRY



Robots - (c)jacn- 02/03

97

## Configuração Cartesiana ou XYZ – LOO (7)



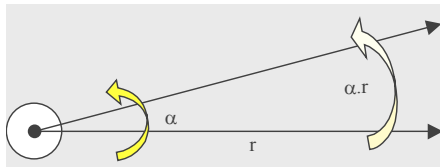
Robots - (c)jacn- 02/03

98

## Configuração Cilíndrica – TLO (1)

Na configuração cilíndrica o movimento é conseguido à custa de um descolamento vertical numa coluna de ascensão (eixo dos Z) seguido de um movimento de rotação da coluna, e do deslizamento de um eixo perpendicular a esta. O espaço de trabalho tem a forma de um cilindro, tal como se pode ver nas figuras seguintes.

Nesta configuração a resolução não é constante e depende da distância  $R$  (medida na horizontal) entre a coluna e o pulso. Se a resolução da base (eixo rotação) é de  $a$  radianos a resolução do braço é  $a*r$ .



Robots - (c)jacn- 02/03

Exemplo: *encoder* de 6000 impulsos por volta, com um comprimento do braço 1000mm.

Resulta: resolução da rotação da base:  $360 / 6000 = 0.06^\circ$ .

Resolução do braço  $1000 \times 0.06 \times \pi/180 = 1.05 \text{ mm}$

99

## Configuração Cilíndrica – TLO (2)

Vantagens:

- Movimentos facilmente controlados e programados
- Simplicidade do sistema de controlo
- Elevada precisão
- Operação rápida
- Fácil acesso à frente e para os lados
- Simplicidade estrutural oferecendo grande fiabilidade

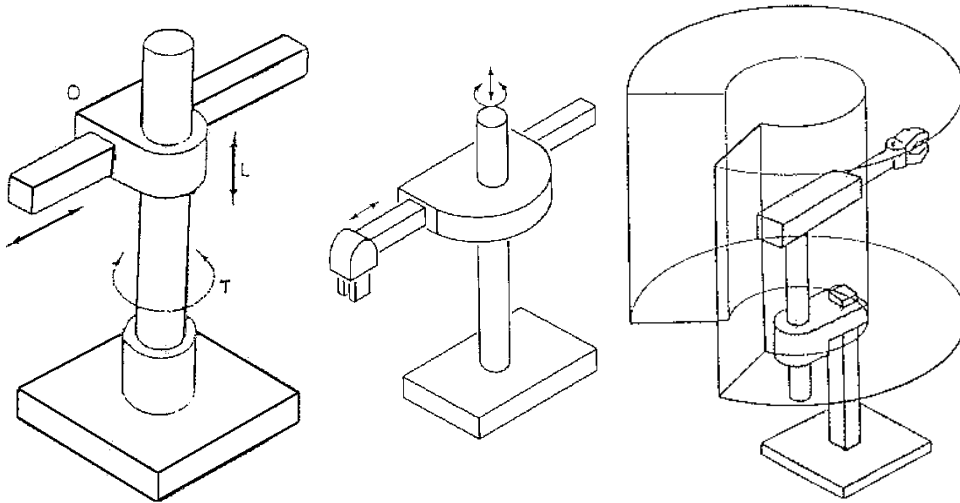
Aplicações:

- Espaços radiais onde o trabalho é aproximado essencialmente no plano horizontal e sem obstruções
- Células de fabrico, cargas e descargas de tapetes transportadores

Robots - (c)jacn- 02/03

100

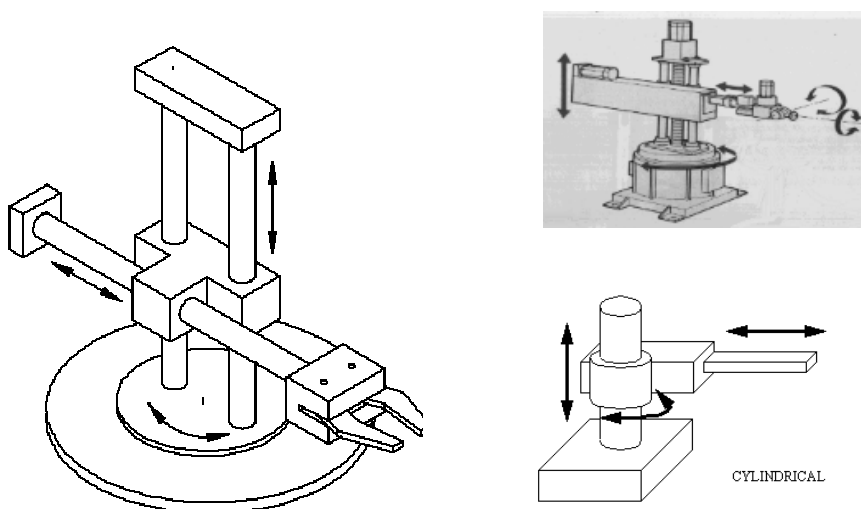
### Configuração Cilíndrica – TLO (3)



Robots - (c)jacn- 02/03

101

### Configuração Cilíndrica – TLO (4)

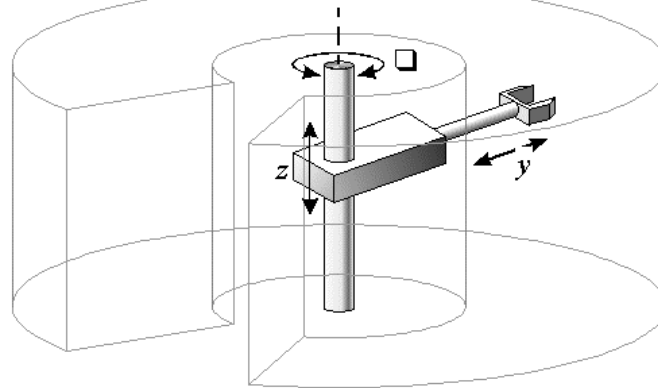


Robots - (c)jacn- 02/03

102

## Configuração Cilíndrica – TLO (5)

### *Cylindrical Robot*

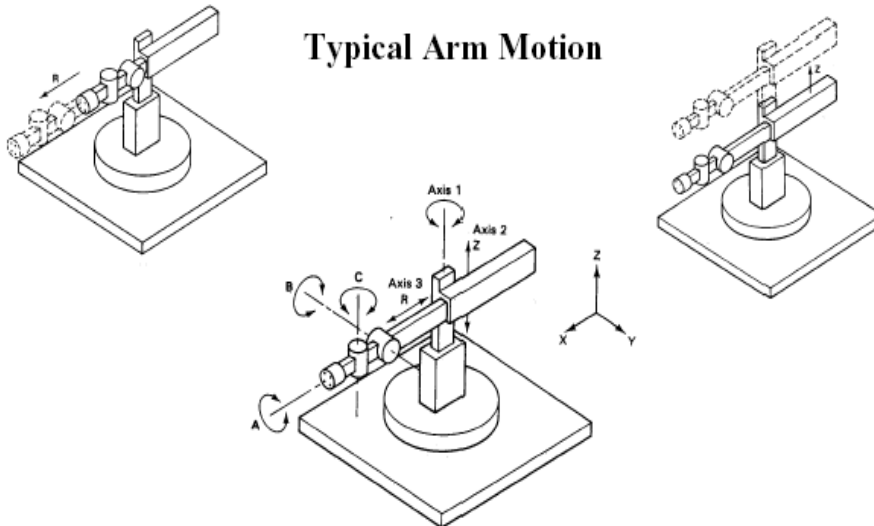


Robots - (c)jacn-02/03

103

## Configuração Cilíndrica – TLO (6)

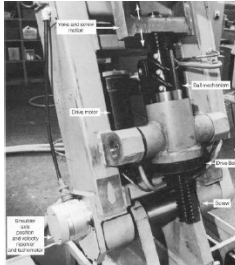
### Typical Arm Motion



Robots - (c)jacn-02/03

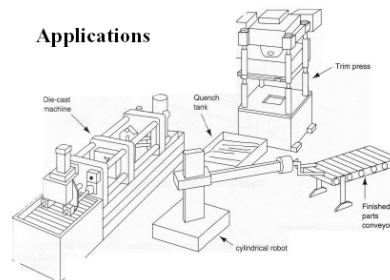
104

## Configuração Cilíndrica – TLO (7)



- Advantages:
  - Deep horizontal reach into production machines
  - Vertical structure of the machine con-serves floor space.
  - Rigid structure is possible for large payloads and good repeatability.
- Disadvantage:
  - Limited side reach

### Applications



Robots - (c)jacn- 02/03

105

## Configuração Polar ou Esférica – TRL (1)

A configuração polar ou esférica serve-se de um braço telescópico que gira em torno de um eixo de rotação, que, por sua vez, efectua um movimento angular de subida/descida. Assim pode atingir todo um conjunto de pontos no interior de uma esfera. Aqui is robots mais conhecidos são o UNIMATE 2000 da Unimation e o MAKER 110 da United States Robots.

Desvantagens:

2 eixos com resolução baixa (eixos de rotação), variando com o comprimento do braço, e com a carga deste e, virtude do efeito de alavanca que se faz sentir. Quanto mais afastado da região interna do volume de trabalho, e quanto maior for a carga, então pior será a resolução deste robot.

Robots - (c)jacn- 02/03

106

## Configuração Polar ou Esférica – TRL (2)

### Vantagens:

Movimentos facilmente controlados e programados. Note-se que como actuadores temos um sistema de deslocamento linear e duas rotações.

Coordenadas polares de percepção fácil, embora mais difícil que trabalhar em coordenadas cartesianas.

Capacidade de movimentar cargas elevadas, mas função dos sistemas de actuação usados.

Operação rápida

Precisão e repetibilidade a grandes distâncias, embora como referido com baixa resolução.

### Aplicações:

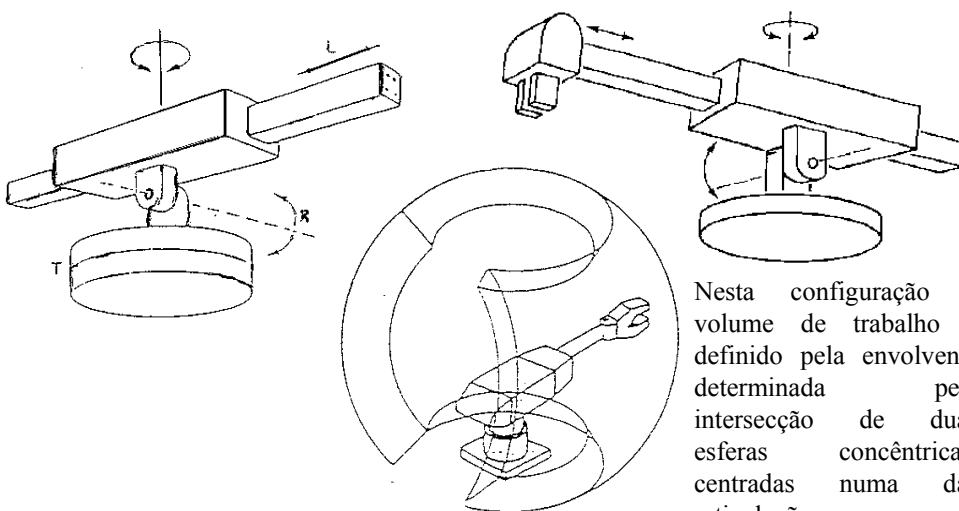
Elevar e desviar cargas não requerendo trajectos complexos

Trabalho em túneis horizontais ou inclinados

Robots - (c)jacn- 02/03

107

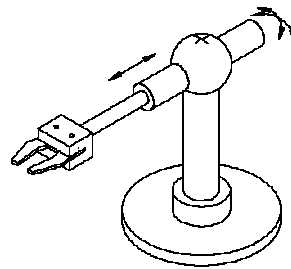
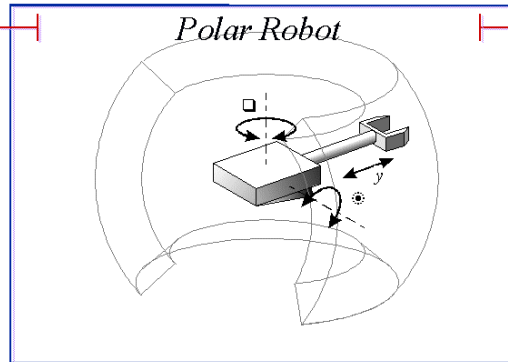
## Configuração Polar ou Esférica – TRL (3)



Robots - (c)jacn- 02/03

108

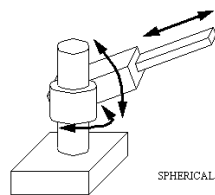
## Configuração Polar ou Esférica – TRL (4)



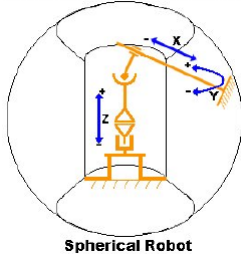
Robots - (c)jacn- 02/03

109

## Configuração Polar ou Esférica – TRL (5)



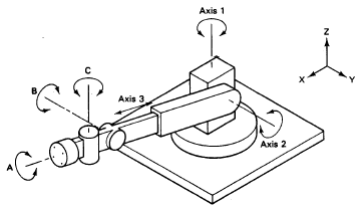
**Kinematic and Work Envelope**



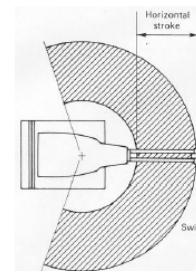
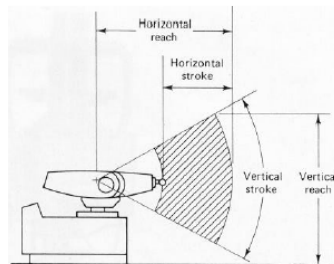
Robots - (c)jacn- 02/03

110

## Configuração Polar ou Esférica – TRL (6)



### Work Envelope



Robots - (c)jacn- 02/03

111

## Configuração Articulada ou Manipulador -TRR 1

A configuração articulada ou manipulador é a mais próxima dos movimentos humanos, ou seja a que melhor imita o braço humano. Ela é, em geral, constituída por dois componentes rectos (equivalentes ao braço e antebraço) montados num pedestal vertical. Estes componentes estão ligados por duas junções que permitem movimentos de rotação. As junções correspondem ao ombro e ao cotovelo no homem. O pulso está ligado à junção extrema permitindo mais movimentos, portanto mais junções.

Esta configuração apresenta as seguinte vantagens:

- elevada manobrabilidade
- facilidade de superar obstáculos
- facilidade de acesso para a frente, lados, trás e cima
- grande alcance para pequena área no solo
- desenho delgado permitindo fácil integração em espaços restritos
- operações rápidas devidas às articulações rotativas
- facilidade de seguir trajectos contínuos e complexos

Robots - (c)jacn- 02/03

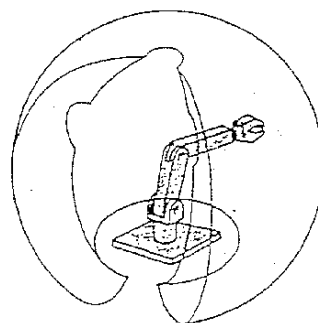
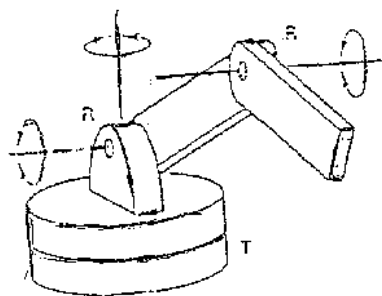
112



## Configuração Articulada ou Manipulador -TRR 2

Devido a rotações angulares:

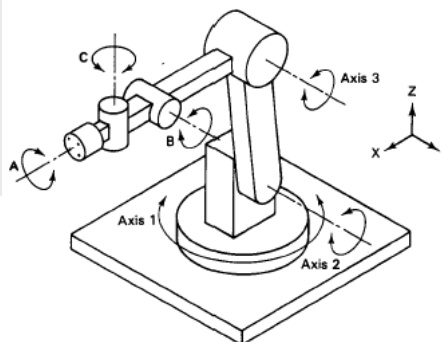
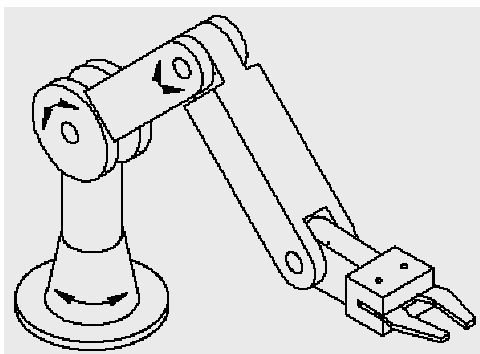
- cálculos complexos para seguir trajetórias retilíneas
- programação complicada por dificuldade em visualizar movimentos tridimensionais
- resolução espacial depende da posição do braço.



Robots - (c)jacn- 02/03

113

## Configuração Articulada ou Manipulador -TRR 3



Robots - (c)jacn- 02/03

114

## Configuração Articulada ou Manipulador -TRR 4

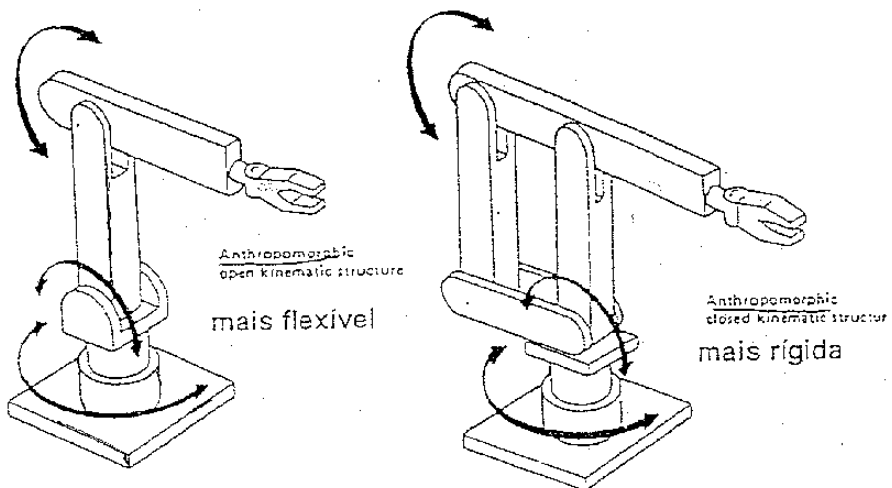


*... e o Óscar vai para...!*

Robots - (c)jacn- 02/03

115

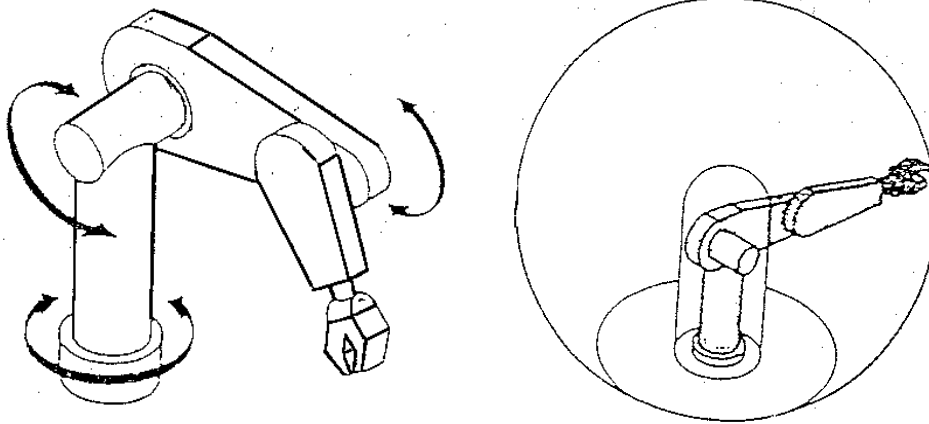
## Configuração Articulada ou Manipulador -TRR 3



Robots - (c)jacn- 02/03

116

## Configuração Articulada ou Manipulador -TRR 4



Robots - (c)jacn- 02/03

117

## Configuração SCARA - 1

Configuração SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) – VRO.  
A configuração SACRA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) é uma versão modificada da configuração articulada anterior, e cuja característica é que o cotovelo e o ombro rodam segundo eixos verticais, portanto é uma combinação da configuração cilíndrica com a articulada operando no plano horizontal.

Vantagens:

- Elevada manobrabilidade e acesso dentro da sua área programável
- Operação rápida
- Alta precisão

Relativamente alta capacidade de carga devido à rígida estrutura na vertical

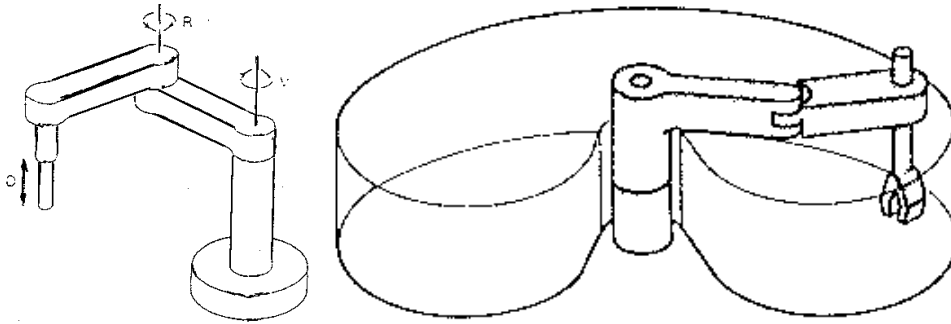
Robots - (c)jacn- 02/03

118

## Configuração SCARA - 2

Aplicações:

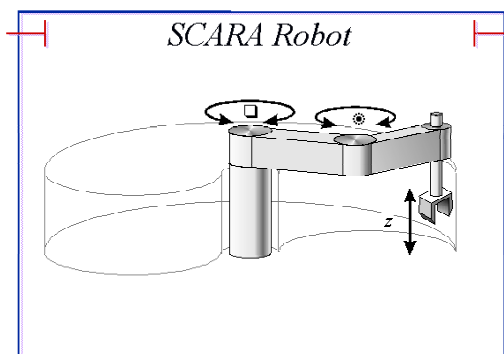
- Trabalhos de montagem no plano horizontal, tarefas de *pick and place*.



Robots - (c)jacn- 02/03

119

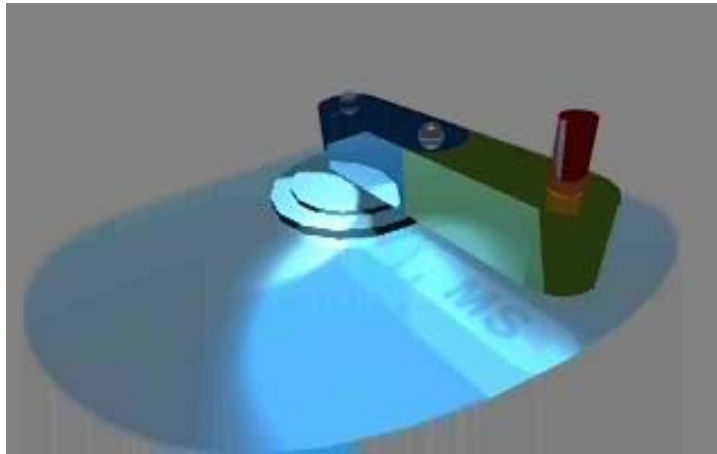
## Configuração SCARA - 3



Robots - (c)jacn- 02/03

120

## Configuração SCARA - 4



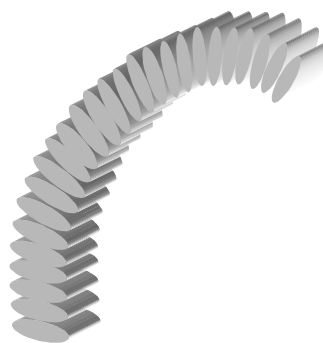
... e mexe..!

Robots - (c)jacn- 02/03

121

## Configuração Espinal 1

A configuração espinal é um caso particular de robot, desenvolvido na universidade de Gotteborg, na Suécia, e corresponde a um sistema constituído por um conjunto de discos ovóides perfurados na periferia e traccionados por um sistema motorizado colocado na base do robot. Quando se estica um dos cabos e se distende os outros, efectua-se um movimento de deslocamento segundo o plano do cabo traccionado, tal com se pretende visualizar na imagem da direita.



Robots - (c)jacn- 02/03

122

## Configuração Espinal 2

A tracção de um dos cabos vai obrigar os discos a flectirem uns sobre os outros de forma a permitir dobrar, ou posicionar, a estrutura em pontos específicos do espaço tridimensional.

Constituição:

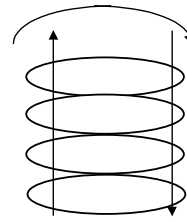
- Série de junções motorizadas
- ou ovóides de aço tencionados por dois conjuntos de cabos de aço operados por actuadores lineares

Vantagens:

- Manobrabilidade excelente em espaços restritos.
- Muito compacto.
- Facilidade de contornar obstáculos.
- Espaço ocupado relativamente pequeno.

Aplicações:

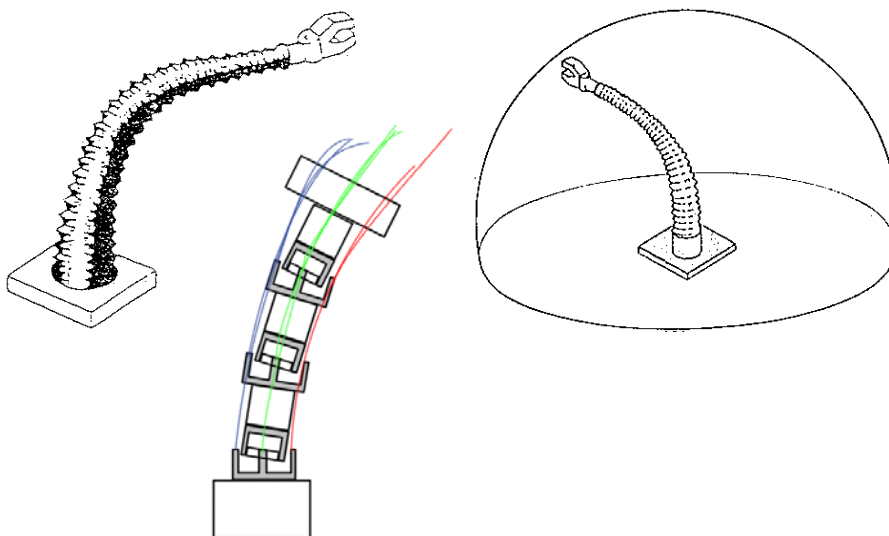
- Manobras em espaços restritos.
- Controlo apertado sobre os movimentos, manuseamento remoto de produtos perigosos.



Robots - (c)jacn- 02/03

123

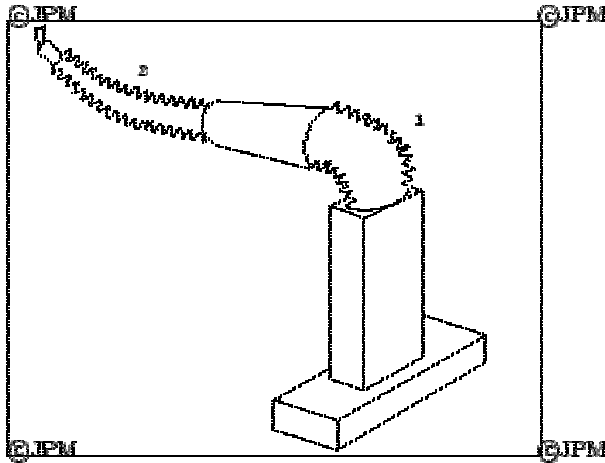
## Configuração Espinal 3



Robots - (c)jacn- 02/03

124

## Configuração Espinal 4



Robots - (c)jacn- 02/03

125

## Configuração Pendular - RRL

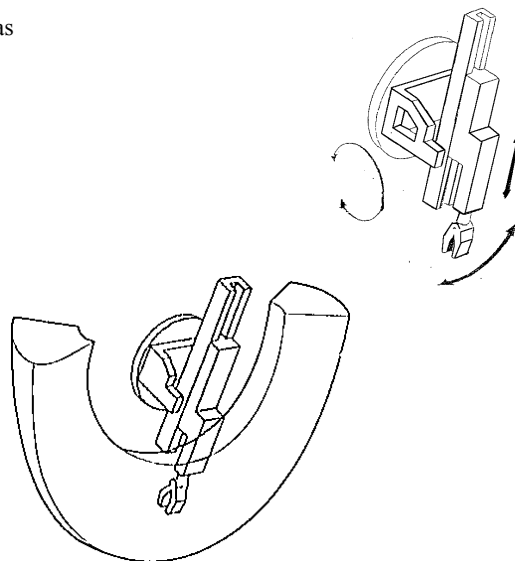
Combina uma articulação Linear com duas articulações rotacionais.

Vantagens:

- Elevada capacidade de carga
- Arranjos de montagem muito versáteis
- Geometria simples permitindo operação rápida

Aplicações:

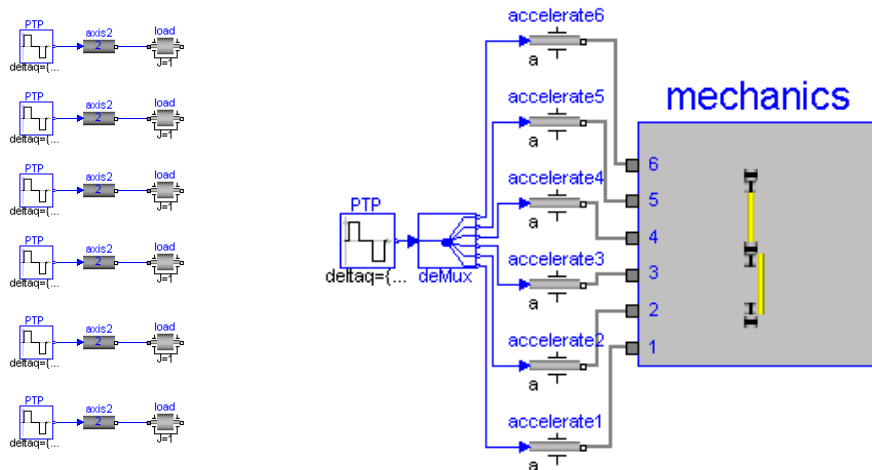
- Tarefas pesadas de difícil acesso para o operador humano
- Exemplo de aplicação :soldadura por ponto dentro do automóvel.



Robots - (c)jacn- 02/03

126

## Arquiteturas CP x PTP



Robots - (c)jacn- 02/03

127

## Montagem dos robots 1

As envolventes de trabalho são normalmente especificadas supondo o robot montado no solo na posição vertical:

- limita o tamanho, forma, disposição e orientação da envolvente de trabalho
- sendo normalmente posicionado no centro do fluxo de produção pode ser um perigo em caso de avaria
- pode causar congestionamento nos períodos de manutenção, configuração ou programação
- desencoraja mudanças da planta fabril

Outras posições de montagem do robot podem:

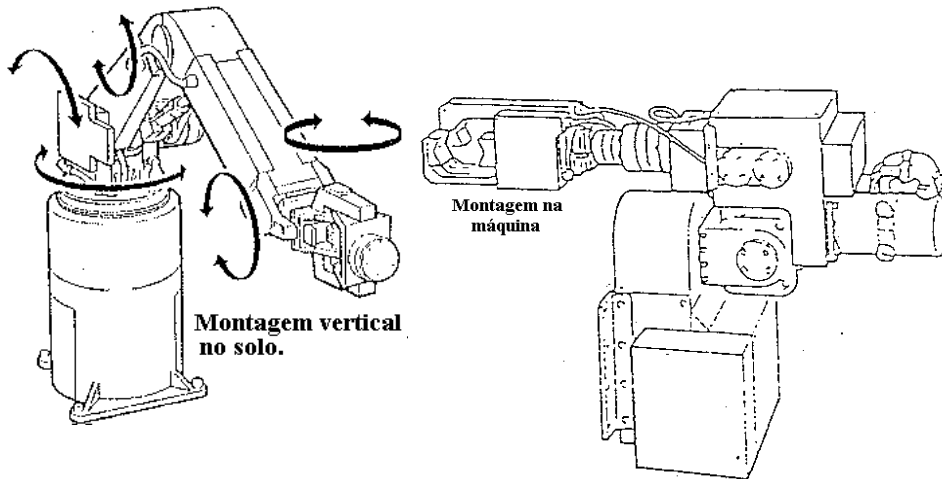
- facilitar o acesso ao trabalho
- libertar espaço no solo
- obviar obstruções do espaço de trabalho
- melhorar características estáticas, dinâmicas e capacidade de carga
- reduzir o curso dos movimentos e assim reduzir os ciclos de trabalho
- possibilitar a utilização de configurações de robots mais simples

Robots - (c)jacn- 02/03

128



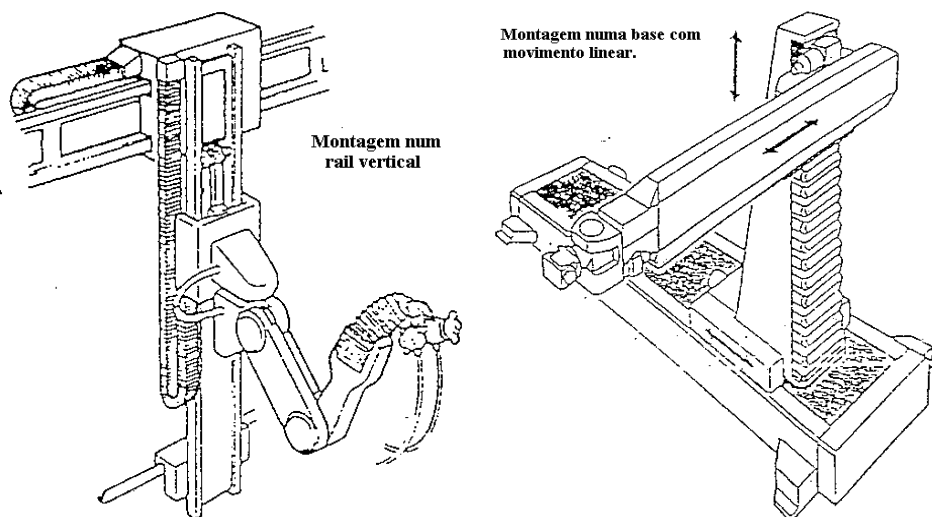
## Montagem dos robots 2



Robots - (c)jacn- 02/03

129

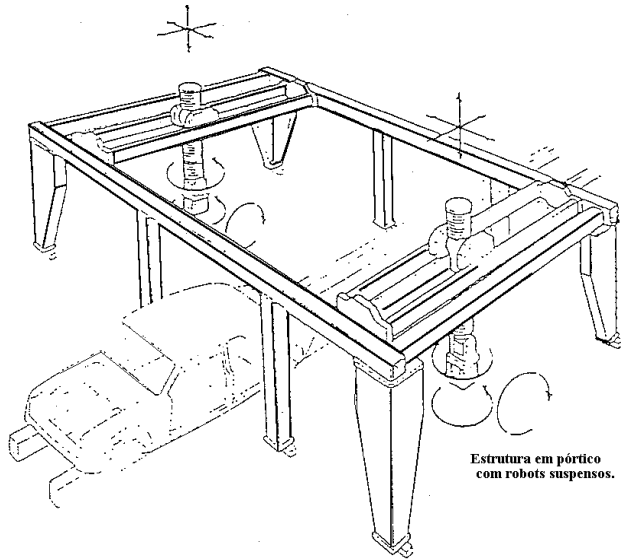
## Montagem dos robots 3



Robots - (c)jacn- 02/03

130

## Montagem dos robots 4

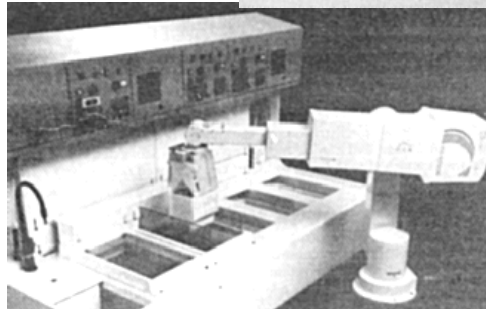
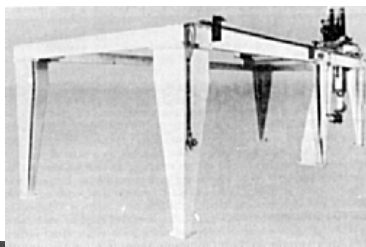
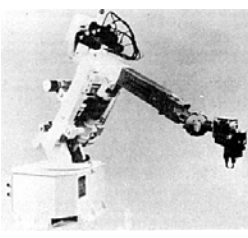
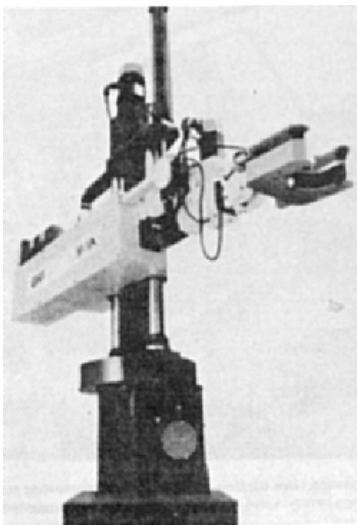


Estrutura em pórtico  
com robots suspensos.

Robots - (c)jacn- 02/03

131

## Montagem dos robots 5



Robots - (c)jacn- 02/03

132

## *Controlo do robot 1 (Robot Seq. Lim.)*

---

Robot de sequência limitada

A ideia base nos robots de sequência limitada corresponde a programar-se, para um mesmo movimento, cada articulação de forma a efectuar um movimento de um ponto A até um ponto B, definidos pelos extremos da trajectória de cada articulação. Assim, cada articulação vai efectuar um movimento de um ponto até outro, o movimento total sendo a concatenação dos movimentos parciais.

A programação, ou a definição dos pontos de paragem, é feita recorrendo a um programador humano, que calibra os sensores de fim de curso de cada articulação, desde o ponto inicial até ao ponto final. Isto implica que uma alteração na trajectória obriga a uma redefinição dos pontos em que os sensores de fim de curso estão, logo a um novo "setup" para cada articulação, o que diminui a flexibilidade do sistema articular, e aumenta os tempos de modificação para novas tarefas.

## *Controlo do robot 2 (Robot Seq. Lim.)*

---

Características gerais:

1. controlado por limitadores de fim de curso para cada uma das junções
2. obriga a um "setup" mecânico do manipulador e não programável
3. movimentos varrendo o curso das articulações, dentro do seus limites físicos de actuação.
4. sem sistema de *feedback* para posicionamento
5. accionamentos pneumáticos
6. aplicações do tipo "pick and place" e ciclos simples de movimentação

## *Controlo do robot 3 (Robot Seq. Lim.)*

---

Em geral este tipo de sistema manipulador é usado em tarefas simples de deslocamento de peças de um ponto a outro (“pick-and-place”) e os sistemas de accionamento são geralmente do tipo pneumático, na medida em que o que se pretende é apenas deslocar o sistema, articulação a articulação, de um ponto a outro.

Normalmente não há nenhum tipo de sistema de feedback, ou seja, nenhum tipo de sistema sensorial que permita quer interna, quer externamente efectuar qualquer tipo de vigilância ou correcção dos deslocamentos

## *Controlo do robot 4 (Robot PTP)*

---

### Robot PTP

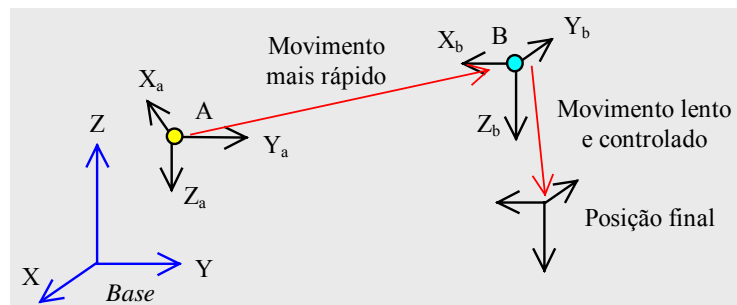
O robot move-se até uma posição pré-definida, depois de parado o end-effector efectua a operação programada. De seguida o robot move-se para a próxima posição.

Neste caso a ideia é definir pontos intermédios numa trajectória num espaço 3D, onde o robot vai evoluir. Esta trajectória é especificada por pontos + orientações, pontos esses que são os mais importantes no desenvolvimento da trajectória, ou seja aqueles que correspondem aos grandes movimentos do braço.

Os restantes movimentos, ou os movimentos mais finos, são conseguidos à custa do efectuador, que se desloca mais lentamente e de forma mais ajustada. A figura seguinte procura representar esta abordagem, onde o robot se desloca de um ponto A até um ponto B, onde vai efectuar o movimento fino em B.

## Controlo do robot 5 (Robot PTP)

- A ideia é similar à que ocorre numa viagem: uma automobilista desloca-se de um ponto A até B a uma velocidade grande, recorrendo por exemplo a auto-estradas, e quando chega a B, tem que procurar uma dada morada e um local para estacionar, onde os movimentos a realizar são a mais baixa velocidade e com muito maior cuidado.



Robots - (c)jacn- 02/03

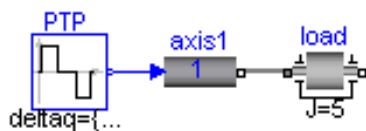
137

## Controlo do robot 6 (Robot PTP)

Num robot deste tipo a trajectória e a velocidade durante o movimento **não são** monitorizados, pelo que o robot requer apenas sensores para controlar a posição final.

Existem duas estruturas básicas, função da estratégia de deslocamento adoptada:

- cada eixo move-se de um ponto para o próximo o mais depressa possível.
- o movimento de todos os eixos termina ao mesmo tempo.



Robots - (c)jacn- 02/03

138

## Controlo do robot 7 (Robot PTP)

O robot move-se de um ponto para o outro em sequência, sem controlo da trajectória entre os dois pontos:

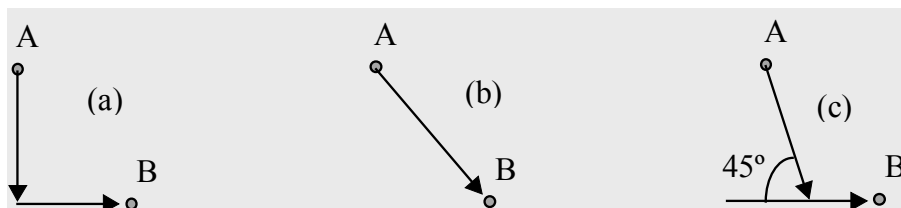
- controlador tem memória para guardar o programa:
  - sequência de movimentos de um ciclo de trabalho
  - posições associadas a cada elemento do ciclo de movimento
- operação = reprodução das sequências e posições memorizadas
- sucessivas posições do robot são guardadas, e o robot “salta” de ponto para ponto
- controlo realimentado para garantir as posições finais.

Robots - (c)jacn- 02/03

139

## Controlo do robot 8 (Robot PTP)

Estratégias possíveis de deslocamento entre dois pontos.



Tipos de estratégias para as trajectórias acima apresentadas.

Ou vai em linha recta de A para B via um ponto ortogonal aos dois

Ou vai de A até B em linha recta

Ou vai de A para B

Robots - (c)jacn- 02/03

140

## Controlo do robot 9 (Robot CP)

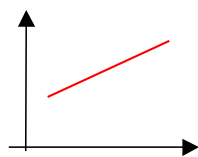
### Robot CP (“Continuous Path” ou trajectória contínua )

O end-effector executa a operação enquanto os eixos estão em movimento. Todos os eixos podem mover-se simultaneamente e a diferentes velocidades.

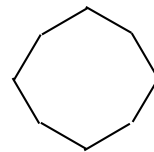
A trajectória entre pontos é controlada pelo sistema de controlo :

- pontos intermédios entre os pontos inicial e final calculados e memorizados, permitindo movimentos suaves e aproximadamente contínuos
- trajectórias calculadas com diversos tipos de interpolações
- linear
- circular
- parabólica
- movimento do pulso controlado durante o movimento das restantes articulações.

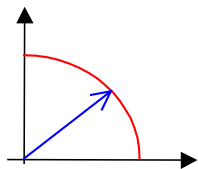
## Controlo do robot 10 (Robot CP)



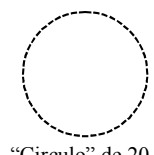
Aproximação linear (linhas rectas).  
Forma geral do tipo:  $y = mx + b$ , que é usada para interpolar a trajectória, fornecendo os pontos intermédios.



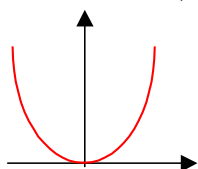
“Círculo” de 8 lados.



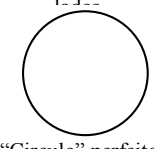
Aproximação circular.  
Forma geral do tipo:  $x^2 + y^2 = r^2$ , que é usada para interpolar a trajectória, fornecendo os pontos intermédios.



“Círculo” de 20



Aproximação parabólica.  
Forma geral do tipo:  $y = x^2$ , que é usada para interpolar a trajectória, fornecendo os pontos intermédios.



“Círculo” perfeito.

## *Controlo do robot 11 (Robot I)*

---

### ***Robot inteligente (Robot I)***

O conceito de Robot Inteligente corresponde à imagem de ficção científica de um robot multifuncional, e com capacidade de aprendizagem e de reacção autónoma. Este tipo de robots, que existe para situações limitadas, possui um controlador mais sofisticado, normalmente um controlador programável tipo PC, e a capacidade funcional de:

- Capacidade de interagir com o ambiente:
  - alteração de trajectória.
  - alteração de parâmetros.
- Para tal recorre a informação sensorial:
  - velocidade de progressão condicionada pela força realizada.
  - contorno de obstáculos detectados por visão artificial.
  - ajuste à posição das peças a manipular.

Portanto está munido com uma panóplia de sistemas sensoriais que lhe dão uma percepção completa do que se passa no seu exterior.

## *Controlo do robot 12 (Robot I)*

---

São robots altamente programáveis usando para tal a linguagens de programação específicas, exemplo AL e AML, ou outras.

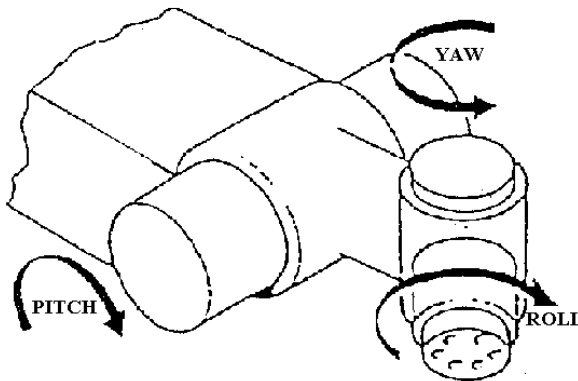
Estas linguagens tem em consideração eventos exteriores ao deslocamento fornecidos por sistemas sensoriais vários, quer internos ou externos ao robot, e específicos ao efectuador, como por exemplo:

- vigilância de presenças na área das trajectórias
- alteração das posições finais das partes a serem abordadas.
- segurança operacional em termos de movimentos (“...o gato no espaço de trabalho”).
- deslizamento de peças no efectuador.
- Etc ...



## Órgão terminal - End-effector 1

O órgão terminal é aquele que vai realmente efectuar as tarefas do robot. O braço limita-se a deslocá-lo entre pontos, pelo que este tem que ter uma capacidade de deslocamento acrescida, uma autonomia específica, e um sistema de controlo similar ao restante. Esta autonomia é que é usada em termos de trabalhos vários a efectuar. A figura seguinte apresenta os movimentos do órgão terminal do robot.



Robots - (c)jacn- 02/03

145

## end effector (definition)

- In [robotics](#), an end effector is a device or tool connected to the end of a robot arm. The structure of an end effector, and the nature of the programming and hardware that drives it, depends on the intended task.
- If a robot is designed to set a table and serve a meal, then robotic hands, more commonly called grippers, are the most functional end effectors. The same or similar gripper might be used, with greater force, as a pliers or wrench for tightening nuts or crimping wire. In a [robot](#) designed to tighten screws, however, a driver-head end effector is more appropriate. A gripper is a hindrance in that application; the driver can be attached directly to the robot arm. The driver can be easily removed and replaced with a device that operates with similar motion, such as a bit for drilling or an emery disk for sanding.
- A robot arm can accommodate only certain end-effector task modes without changes to the ancillary hardware and/or programming. It is not possible to directly replace a gripper with a screwdriver head, for example, and expect a favorable result. It is necessary to change the programming of the robot controller and use a different set of end-effector motors to facilitate torque rather than gripping force. Then the gripper can be replaced with a driver head.

Robots - (c)jacn- 02/03

146

## Órgão terminal - End-effector 2

### Tipos de Efectuadores (“End-effectors”)

Podemos considerar dois tipos básicos de efectuadores: os que adquirem as partes a trabalhar e os que são utensílios por si só.

Estes são geral mente designados por :

1. Grippers (pinça ou preensor)
  - Utilizados para agarrar objectos, para transporte ou
  - Operar os objectos em ferramentas (polar, fresar, etc...)
2. Tools (ferramentas ou utensílios)
  - Ferramentas que operam directamente sobre os objectos, ou partes destes a serem trabalhados (objectos de trabalho)

Robots - (c)jacn- 02/03

147

## Órgão terminal - End-effector 2a



Robots - (c)jacn- 02/03

148

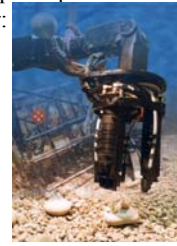
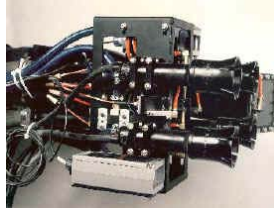
## Órgão terminal - End-effector 3 (Grippers)

São usados para agarrar e segurar objectos. Permite deste modo que o robot desloque objectos dentro do seu volume de trabalho. As aplicações mais comuns são :

- Carga e descarga de objectos.
- Agarrar em objectos de tapetes rolantes, em armazéns ou outros.
- Orientar objectos em paletas, ou em locais específicos.

Os objectos a manipular podem ser de vários tipos, o que condiciona o tipo de preensor usado. Podemos considerar os seguinte tipos de objectos a manipular:

- Materiais brutos
- Garrafas
- Papel / Cartões
- circuitos integrados
- peças para assemblagem
- Etc ...



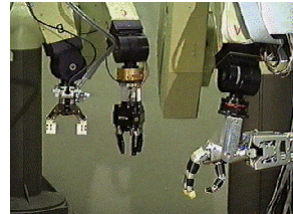
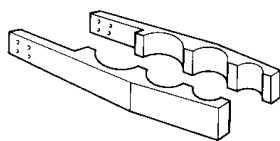
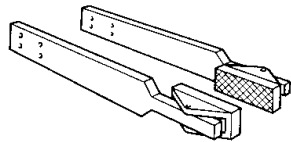
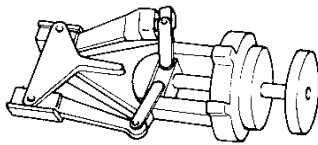
Tools (ferramentas), que também podem ser transportados por uma preensor para executar determinadas tarefas.

Robots - (c)jacn- 02/03

149

## Órgão terminal - End-effector 4 (Grippers)

As figuras seguintes apresentam uma mão standard, e dois tipos de dedos usados para objectos genéricos e para objectos de forma característica, mas com três tamanhos diferentes.

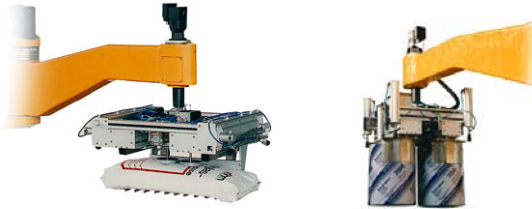


Robots - (c)jacn- 02/03

150

## Órgão terminal - End-effector 5 (Grippers)

- Podem-se ter *grippers* SIMPLES (compostos por uma única pinça, ou objecto de prensão) DUPLOS (compostos por 2 pinças que actuam independentemente), mesmo TRIPLOS, ou superior, a fim de se otimizar a realização de tarefas, desde que o processo de fabrico associado seja adaptado a esta tipo de preensor duplo.
- Os *grippers* duplos são normalmente usados em aplicações do tipo carga/descarga, mas não exclusivamente.
- A ideia é que dado que a maior parte do tempo de operação é passado em transporte, e que os tempos de operação são grandes, então, podemos utilizar um único manipulador, com vários *grippers*, para otimizar a tarefa, pela possibilidade de jogar com os tempos de operação das máquinas e de transporte entre estas.

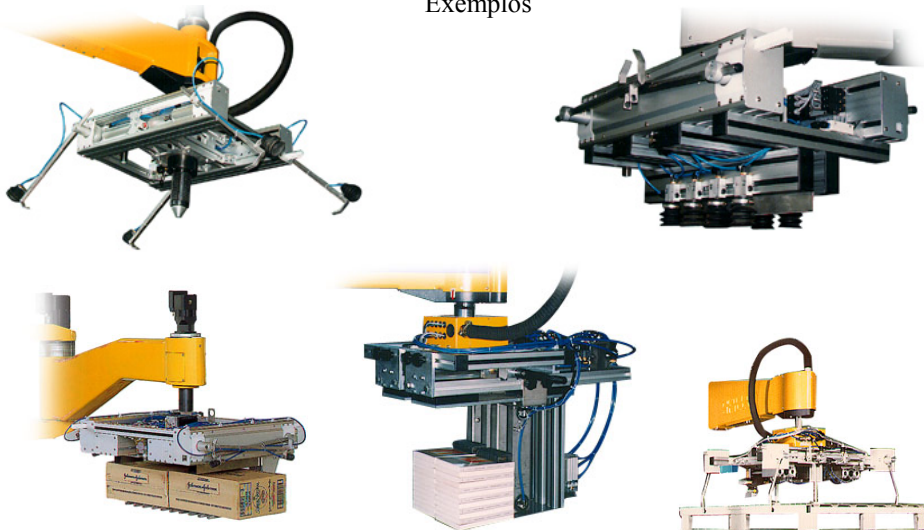


Robots - (c)jacn- 02/03

151

## Órgão terminal - End-effector 5a (Grippers)

Exemplos



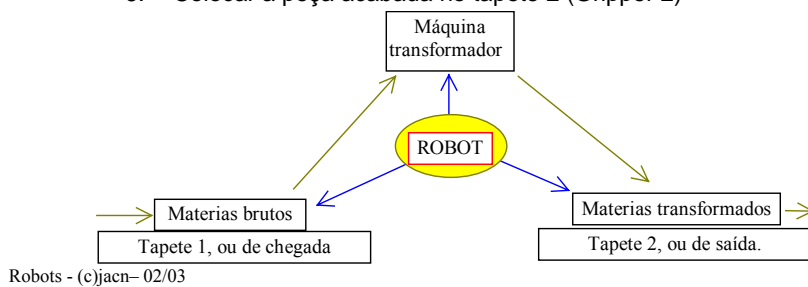
Robots - (c)jacn- 02/03

152

## Órgão terminal - End-effector 6 (Grippers)

Exemplo de utilização de um sistema de duplo preensor. Neste exemplo a acção do Robot pode ser descrita da seguinte forma:

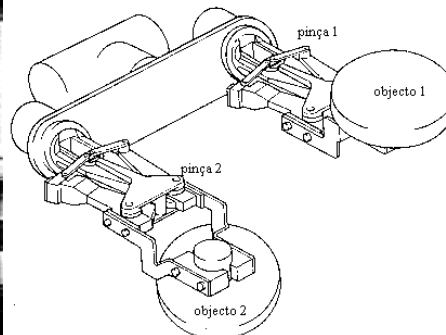
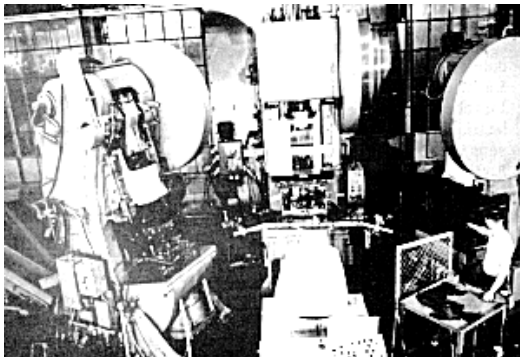
1. Pegar numa peça em bruto do tapete 1 (Gripper 1)
2. Deslocar o braço até à máquina transformadora (Gripper 1 e 2).
3. Retirar uma peça acabada da máquina transformadora (Gripper 2)
4. Colocar a peça em bruto na máquina (Gripper 1)
5. Deslocar o braço da máquina transformadora até ao Tapete 2 (Gripper 1 e 2).
6. Colocar a peça acabada no tapete 2 (Gripper 2)



153

## Órgão terminal - End-effector 7 (Grippers)

A figura seguinte ilustra uma mão com duas pinças distintas que permite segurar dois objectos em simultâneo, obviando tempo de operação em determinadas tarefas.



Robots - (c)jacn- 02/03

154

## Órgão terminal - End-effector 8 (Tools)

### “Tools” (utensílios ou ferramentas)

São usadas para efectuarem um determinado tipo de trabalho, diferente de agarrar, segurar, etc.

Exemplo: polimento de torneiras usando um braço manipulador, onde várias situações são possíveis: uma em que a peça a ser polida é levada pelo manipulador até ao centro de polimento (i.e. máquina onde se efectua o polimento). Neste caso o efectuador é um preensor. O outro caso corresponde a termos o objecto fixo numa estação de trabalho, e é o preensor que transporta a ferramenta que faz o polimento da peça.

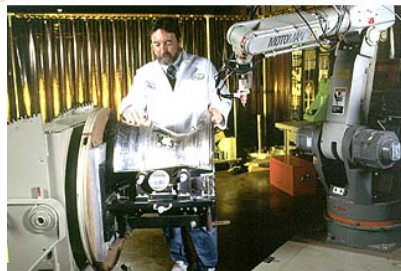
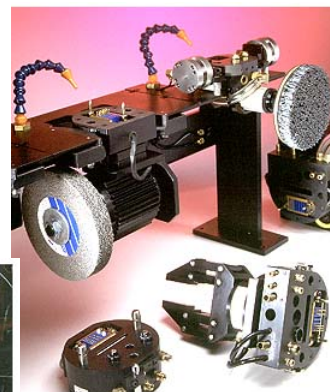
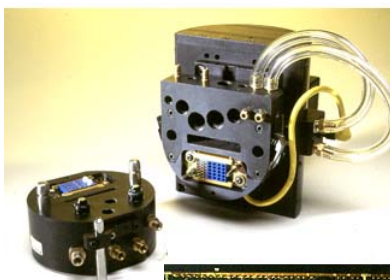
Aplicações:

- soldadura ponto a ponto : os eléctrodos são o próprio end-effector
- pintura por spray : o efectuador é o sistema de pintura, estando ligado a uma central de bombagem de tinta + ar sobre pressão.
- soldadura em arco: o utensílio é a estação de soldadura.
- corte por jacto de água: o efectuador transporta o bico de saída, a estação de pressão estando localizada no exterior do manipulador. Os sistemas mais usuais neste tipo de aplicação são em pórtico, dada a natureza da função de trabalho.

Robots - (c)jacn- 02/03

155

## Órgão terminal - End-effector 8a (Tools)



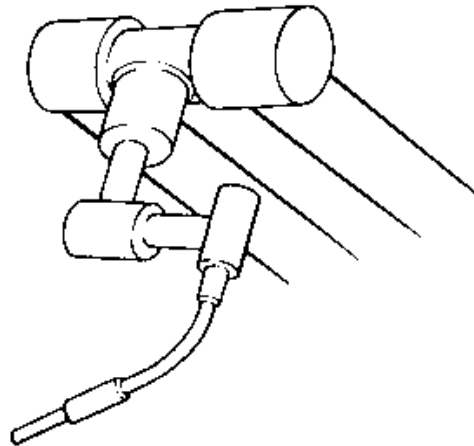
Robots - (c)jacn- 02/03

156

### Órgão terminal - End-effector 9 (Tools)

As pinças são frequentemente utilizadas para agarrar os diversos tipos de ferramentas.

No caso da figura seguinte o *Tool* é um maçarico para soldadura por arco. As soldaduras realizadas podem ser simples ou múltiplas. Este tipo de sistema é utilizado para curvas específicas com ângulos de ataque diferentes.

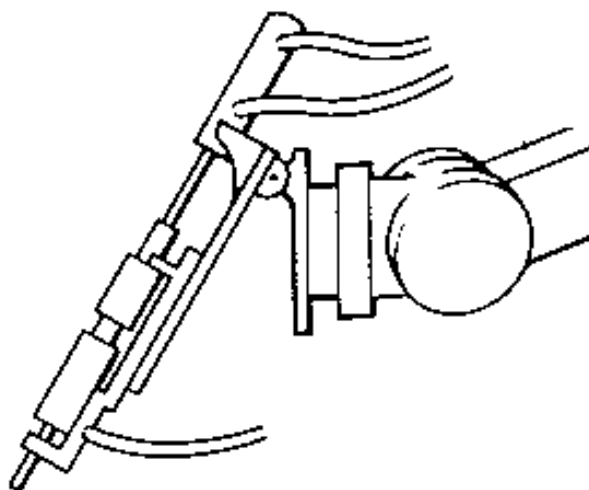


Robots - (c)jacn- 02/03

157

### Órgão terminal - End-effector 10 (Tools)

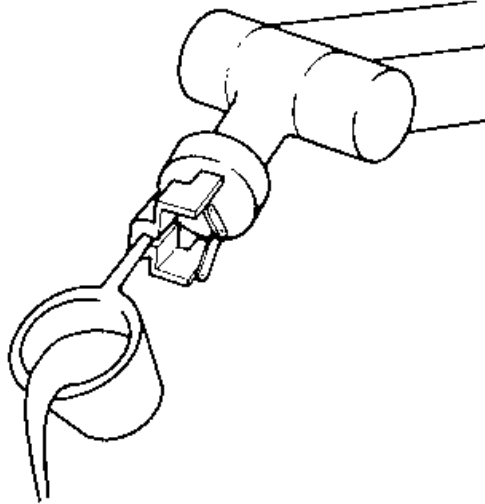
*Tool* utilizado para soldadura de objectos (por exemplo cascos de barcos) Neste caso o manipulador deve transportar um alimentador de solda que está fixo na parte superior do pulso.



Robots - (c)jacn- 02/03

158

### Órgão terminal - End-effector 11 (Tools)



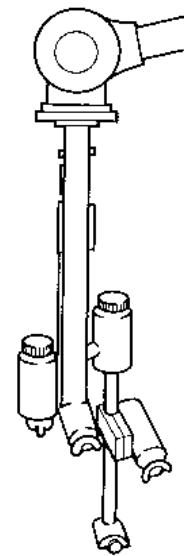
Este *utensílio* é uma colher de carregamento de materiais a elevadas temperaturas, como metais fundidos. O produto pode ser virado numa câmara de injeção ou directamente no molde (*Sonafi* por exemplo). Caso se formem espumas ou existam produtos na superfície há técnicas que permitem retirar esses elementos da colher.

Robots - (c)jacn- 02/03

159

### Órgão terminal - End-effector 12 (Tools)

No caso seguinte o Tool é uma pistola de pintura. Um robot pode aplicar uma, ou várias camadas de pintura a velocidade controlada, o que permite automatizar a aplicação da tinta, ou qualquer outro tipo de produto cujo comportamento seja semelhante. Em termos de trajectórias das áreas a pintar um robot é capaz de efectuar uma pintura sem falhas, sem esquecer regiões e sem alterar o tempo de passagem, logo a quantidade de tinta depositada.



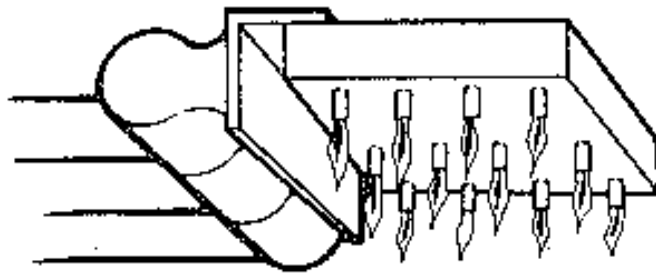
Robots - (c)jacn- 02/03

160



### Órgão terminal - End-effector 13 (Tools)

A figura a seguir apresenta um *Tool* utilizado para aquecer objectos num processo industrial. Neste caso o robot deve ter um mecanismo de controlo que lhe permita aquecer mais nos pontos em que tal seja necessário. O maçarico transportado é alimentado a gás (por exemplo) e obriga a uma protecção adicional para o braço, a fim de não o danificar

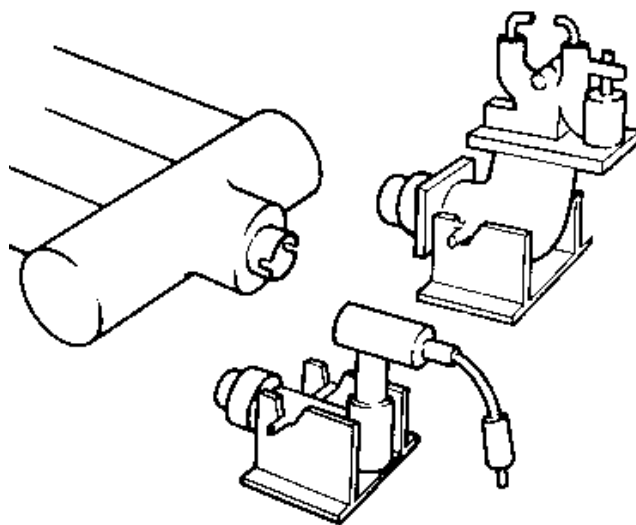


Robots - (c)jacn- 02/03

161

### Órgão terminal - End-effector 14 (Tools)

Aqui temos um exemplo de mudança de utensílio. No programa do robot há operações que são efectuadas com um ou outro utensílio e que tem que ser alterado no curso da operação.

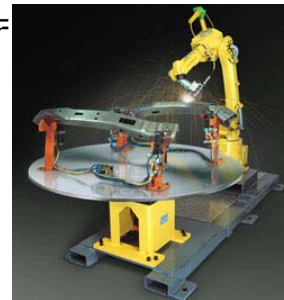
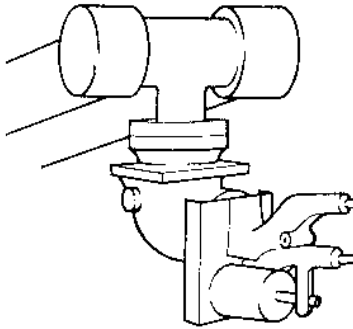


Robots - (c)jacn- 02/03

162

## Órgão terminal - End-effector 15 (Tools)

Este *Tool* é uma pistola de soldadura por ponto a ser incluída numa linha de soldadura. Geralmente os pontos a serem soldados são definidos no programa e o manipulador leva este utensílio entre os vários pontos de forma a efectuar a soldadura. Admite todo o tipo de trajectórias e com os pontos com os espaçamentos que forem necessários.

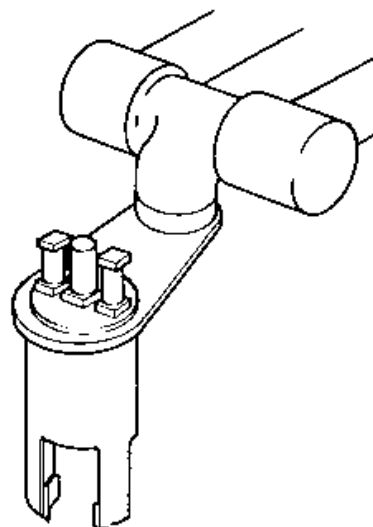


Robots - (c)jacn- 02/03

163

## Órgão terminal - End-effector 16 (Tools)

Neste caso o *Tool* é um utensílio com múltiplas funções. Na parte superior deste há várias partes diferentes que são usadas para furar, apertar, aparafusar, etc. , tudo no mesmo utensílio. Em função da execução do programa há a possibilidade de trocarmos a ferramenta a usar de maneira a que a tarefa seja cumprida, sempre com um mesmo manipulador.

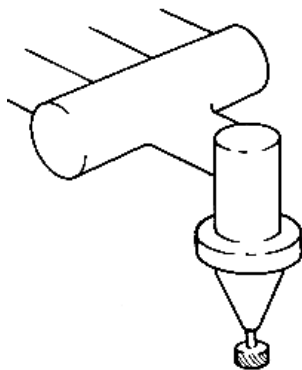


Robots - (c)jacn- 02/03

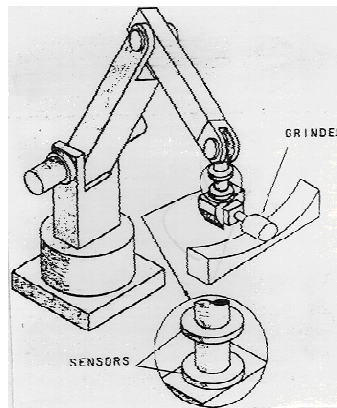
164

## Órgão terminal - End-effector 17 (Tools)

*Tool* composto por uma cabeça de fresagem, geralmente usada para fresar, rebarbar ou outra operação de desgaste orientado. Aqui apenas há que mudar o tipo de elemento cortante a ser colocado na extremidade do *tool*. A velocidade de operação é função da operação e dos materiais envolvidos, e a trajectória é o elementos mais simples de controlar.



Robots - (c)jacn- 02/03



165

## Órgão terminal - End-effector 18 (tipos de Grippers)

Tipos de *Gripper* - podemos ter vários tipos de preensores, no que refere ao princípio de funcionamento, ou natureza da grandeza usada para efectuar a prensão.

Assim consideramos :

*Gripper* Mecânico:

- Os dedos utilizados para agarrar os objectos são mecânicos. Normalmente são amovíveis tornando o *end-effector* mais versátil
- A função do mecanismo do *gripper* é transformar um tipo de energia (à entrada) na acção de agarrar ..., permitindo abrir e fechar os *dedos* sobre os objectos.
- Aqui podemos considerar os sistemas bidigitais, tridigitais etc..., que correspondem a vários sistemas, em termos da geometria do acto de prensão diferentes. Naturalmente que os sistemas de pinças bidigitais são as mais simples de controlar.

Robots - (c)jacn- 02/03

166

## Órgão terminal - End-effector 19 (tipos de Grippers)

A energia fornecida ao *gripper* pode ser na forma:

pneumática: requer um sistema de fornecimento de energia pneumática exterior, tubagens adicionais para transporte da pressão, e sistemas de actuação para controlo do fecho/abertura da pinça.

hidráulica : o princípio é o mesmo, mas com um sistema hidráulico de fornecimento de energia. É usado para trabalhos que exijam uma elevada pressão de preensão, ou para o transporte de cargas com grande massa.

eléctrica : usam-se actuadores de natureza eléctrica, tipo motores ou electroímans como actuadores.

mecânica

Robots - (c)jacn- 02/03

167

## Órgão terminal - End-effector 20 (tipos de Grippers)

- Métodos de segurar o objecto no *gripper*
  - A configuração do preensor é crítica em termos da execução de tarefas a executar. Por exemplo, segurar um ovo ( que é um teste critico em termos de sistema de preensão) não é o mesmo que segurar um parafuso, um vidro ou uma caixa contendo peças.
  - O tipo de preensor pode, pois, condicionar as tarefas que o robot vai desempenhar, e a sua viabilidade produtiva, ou seja a sua flexibilidade.

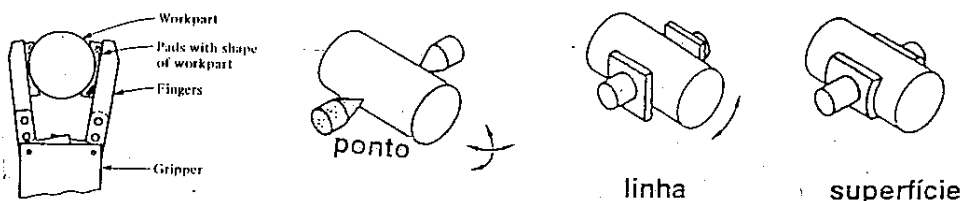


Robots - (c)jacn- 02/03

168

## Órgão terminal - End-effector 21 (tipos de Grippers)

- Configuração física dos dedos do gripper
- Agarrar ou pegar num objecto obriga a definir processos e meios de preensão específicos que facilitem a tarefa para o robot. Em geral desenha-se a parte de contacto com o objecto com a mesma geometria do objecto. O melhor exemplo são as nossas mãos que tem um conjunto de dedos que nos permitem agarrar num sem numero de objectos.
- Fica-se limitado a um tipo de objecto, se este tiver uma forma complexa, ou a um conjunto reduzido de objectos. São disso caso as pinças usadas para segurar determinados utensilios, ou peças de forma específica.



Robots - (c)jacn- 02/03

169

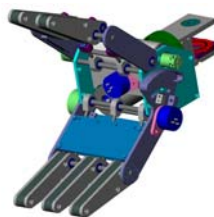
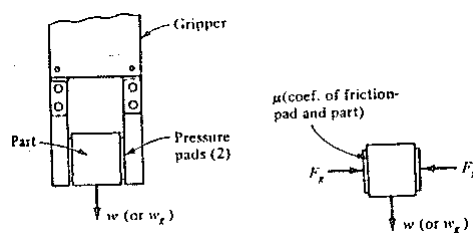
## Órgão terminal - End-effector 22 (tipos de Grippers)

Criando atrito entre os dedos e o objecto.

Os dedos tem que aplicar uma força ao objecto capaz de o segurar mesmo quando sujeito a:

- velocidades
- aceleração
- força da gravidade.

A zona de contacto é de um material macio, aumentado o atrito e evitando a criação de mazelas nas peças

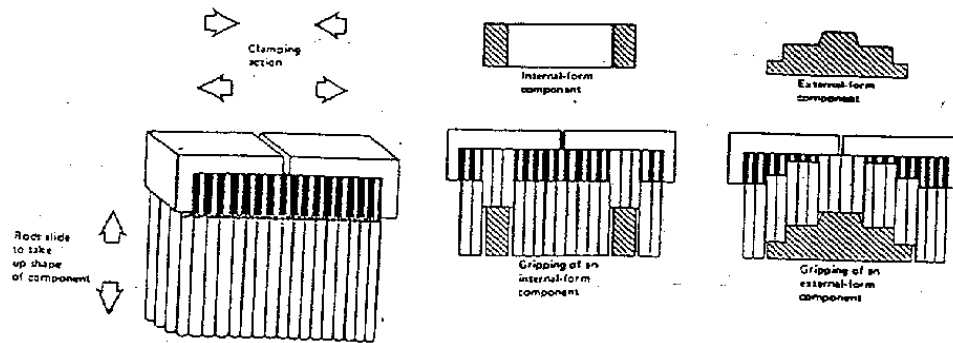


Robots - (c)jacn- 02/03

170

## Órgão terminal - End-effector 23 (tipos de Grippers)

Outra opção é :



Robots - (c)jacn- 02/03

171

## Órgão terminal - End-effector 24 (tipos de Grippers)

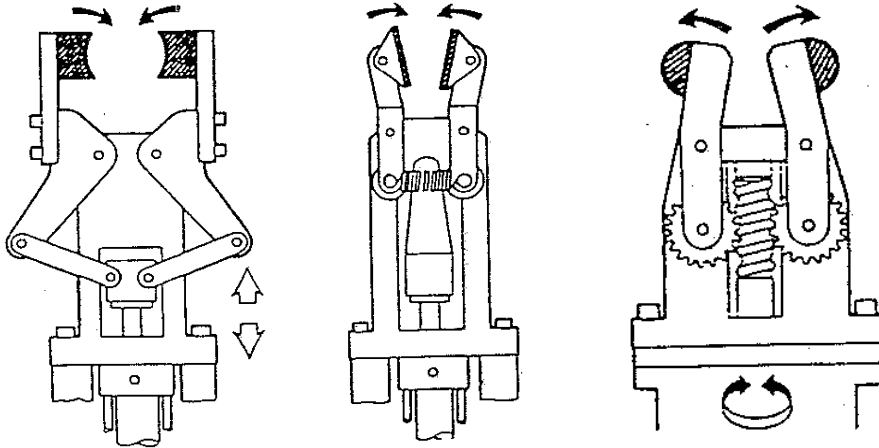
- Tipos de mecanismos - classificação quanto ao movimento.
- Também temos várias classificações, em questão do tipo de movimento que a pinça realiza no acto de preensão. Os *grippers* actuam nos dedos, que são as extremidades de actuação, ou contacto com o objecto, abrindo-os ou fechando-os, e recorrendo a um dos movimentos seguintes.
- A ideia é adequar a forma de transmissão do movimento do actuador da pinça aos dedos de forma a fecharem-se correctamente, e de forma síncrona sobre o objecto a adquirir.
- Existem várias formas de transmitir o movimento aos dedos, função do tipo de abertura/fecho, do numero de dedos e de outros parâmetros adicionais.

Robots - (c)jacn- 02/03

172

### Órgão terminal - End-effector 25 (tipos de Grippers)

- Alavanca (movimento do tipo Pivot) - movimento pivotado.
- Os dedos rodam sobre um ponto fixo (Pivot).



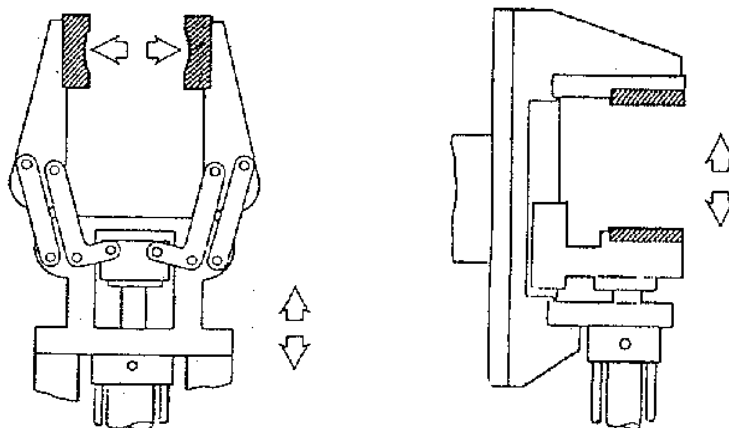
Robots - (c)jacn- 02/03

173

### Órgão terminal - End-effector 26 (tipos de Grippers)

Linear ou translação - movimento paralelo

Os dedos abrem e fecham movendo-se paralelamente um ao outro



Robots - (c)jacn- 02/03

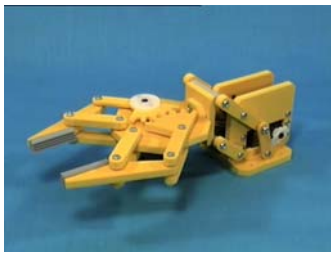
174

## Órgão terminal - End-effector 27

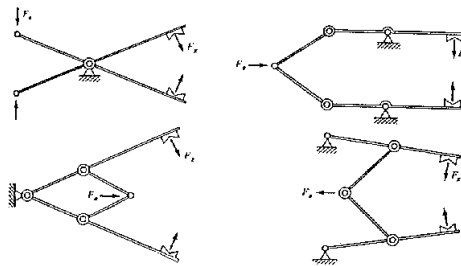
Tipos de mecanismos - classificação quanto ao tipo de cinemática

i) *Linkage* - Existe uma enorme variedade de configurações recorrendo a este método. O tipo de configuração determina:

- a relação entre a força aplicada à entrada ( $F_a$ ) e a força aplicada aos dedos ( $F_g$ ), ver figura seguinte.
- a abertura máxima dos dedos
- resposta do gripper à força  $F_a$ .



Robots - (c)jacn- 02/03

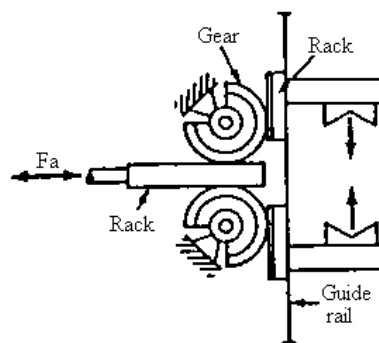


175

## Órgão terminal - End-effector 28

ii) Gear and Rack

- Os dedos são fixos a um pistão (haste dentada) ou a um mecanismo que efectue um movimento linear.



Robots - (c)jacn- 02/03

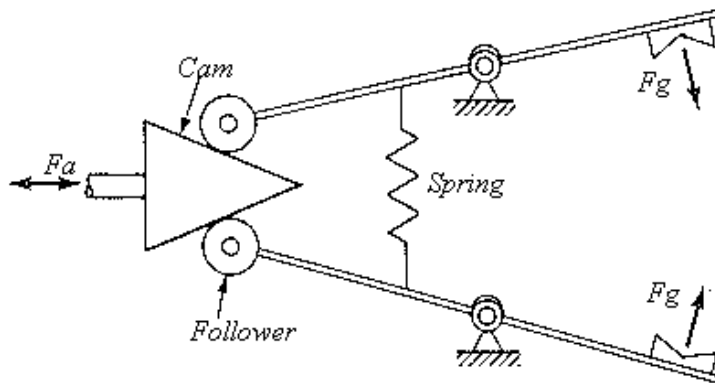
176



### Órgão terminal - End-effector 29

#### iii) CAM

- O uso da mola permite acomodar nos dedos peças de diferentes tamanhos, recorrendo ao mesmo *gripper*.



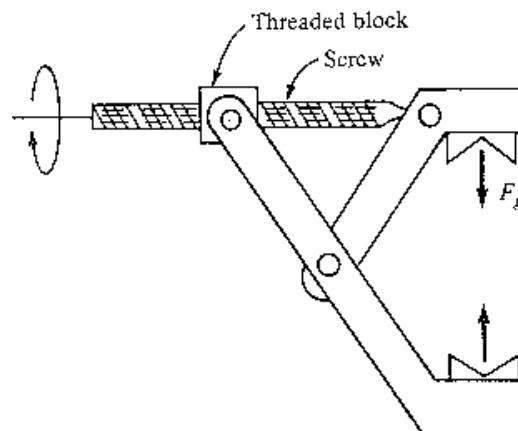
Robots - (c)jacn-02/03

177

### Órgão terminal - End-effector 30

#### iv) Screw (parafuso).

- Quando o parafuso é rodado numa direcção o bloco move-se na direcção oposta



Robots - (c)jacn-02/03

178

## Órgão terminal - End-effector 31

### Gripper Vácuo

Designados também por *grippers* de sucção, são geralmente utilizados para agarrar objectos lisos, como por exemplo placas de vidro. Requerimentos dos objectos:

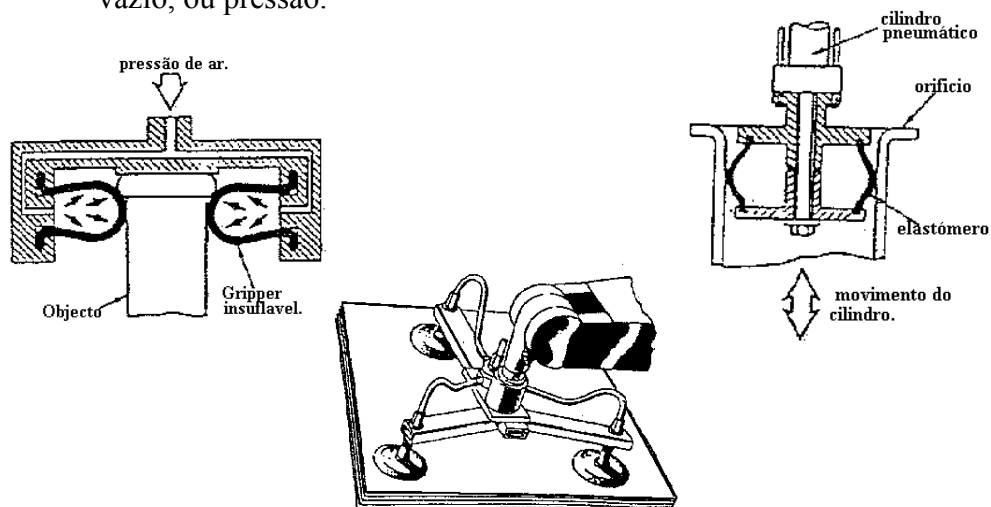
- lisos, planos
- limpos
- não rugoso

Vantagens do *gripper* por vácuo:

- Aplicável a uma variedade de materiais diferentes
- Relativamente leves
- Necessita de uma só superfície de contacto com o material.

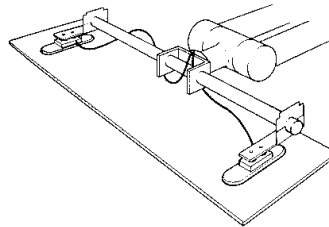
## Órgão terminal - End-effector 32

As figuras seguintes apresentam alguns exemplos de *grippers* por vácuo, ou pressão.

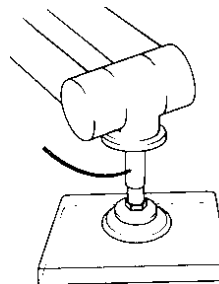


### Órgão terminal - End-effector 33

Pinça de robot utilizando bombas de sucção para uma preensão óptima de superfícies planas, sem pó, e sem gorduras, de forma a assegurar um transporte adequado. Neste caso o peso da peça deve ser muito controlado de forma a não danificar o manipulador, evitar deslizamentos laterais e o próprio processo de preensão deve ser controlado para assegurar que ambos os preensores estão em funcionamento.



A figura da direita apresenta uma mão equipada de um sistema de preensão por vazio, usado em peças frágeis (tubos de raios catódicos, lâmpadas, ovos, etc...). O sistema de sucção tem um controlo de vazio de forma garantir a preensão. Em termos de fiabilidade este é um sistema bastante fiável e estável, mais que os preensores magnéticos.

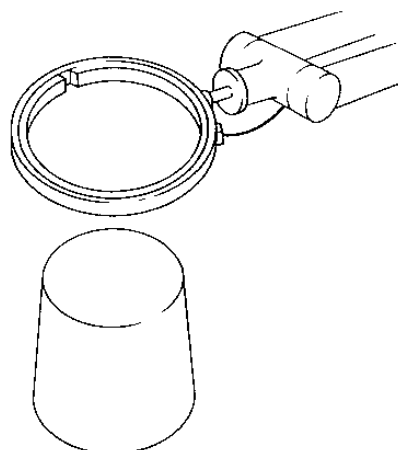


Robots - (c)jacn- 02/03

181

### Órgão terminal - End-effector 34

Na figura anterior temos um efectuador equipado com uma bexiga extensível, usada para a preensão de objectos cilíndricos grandes e leves. Este tipo de preensor varia com o tipo de objectos a adquirir de forma que podem assumir vários desenhos diferentes.

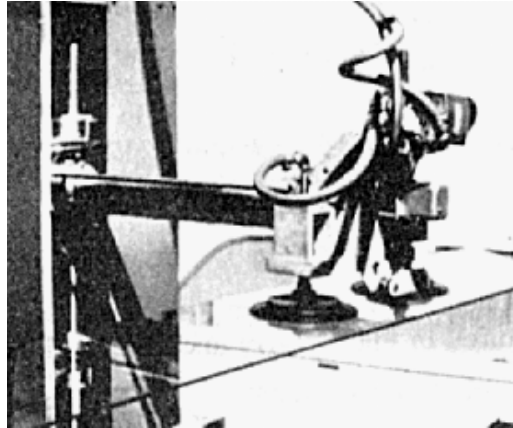


Robots - (c)jacn- 02/03

182

## Órgão terminal - End-effector 35

Exemplo de preensão de uma placa de vidro com uma pinça pneumática de duas bombas.



Robots - (c)jacn- 02/03

183

## Órgão terminal - End-effector 36

### *Grippers* magnéticos

Usados para manipular materiais ferrosos. São geralmente constituídos por um sistema electromagnético permanente ou electromagnético, alimentado por corrente.

#### Vantagens:

- rápidos a pegar nos materiais
- permitem objectos com vários tamanhos
- permitem objectos com buracos (ao contrário dos grippers de vácuo)
- uma única superfície de contacto

#### Desvantagens:

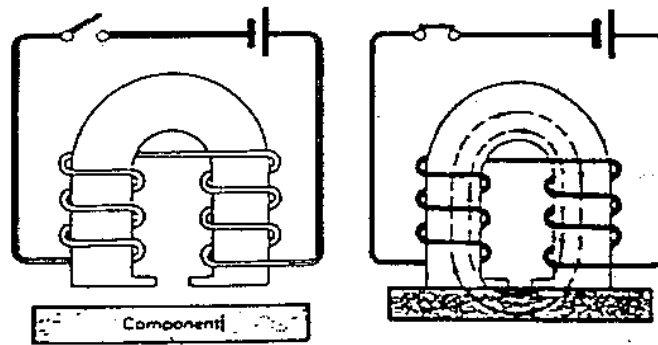
- provocam no objecto um magnetismo residual que pode ser problemático nas operações seguintes.
- quando retiram objectos de uma pilha, o campo magnético tem que ser calculado por forma a que só um objecto seja agarrado

Robots - (c)jacn- 02/03

184

## Órgão terminal - End-effector 37

Sistemas de prensão electromagnéticos.



Robots - (c)jacn- 02/03

185

## Órgão terminal - End-effector 38

Grippers magnéticos

<u>Electromagnéticos</u>	<u>Campos magnéticos permanentes</u>
■ mais fácil de controlar	■ não necessitam de fontes externas
■ requerem um módulo de controlo	■ perda de controlo na libertação da peça, sendo necessário acoplar mecanismos para libertar a peça.
■ requerem uma fonte de corrente contínua	■ são utilizados em ambientes perigosos
■ quando a peça tem que ser largada, a unidade de controlo inverte a polaridade a um nível de potência reduzido antes de cortar o campo magnético, por forma a eliminar o campo magnético residual e a assegurar uma libertação total da peça.	

Robots - (c)jacn- 02/03

186

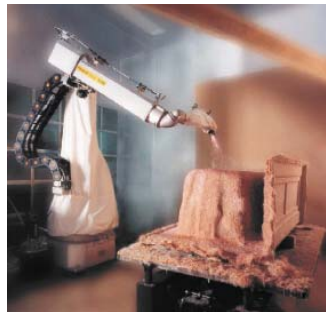
## Órgão terminal - End-effector 39

### Grippers Aderentes e outros tipos.

- Os dedos são de uma substância adesiva, são utilizados exclusivamente no manuseamento de materiais leves, exemplo manuseamento de tecidos na industria têtil.
- Podemos também ter o caso de grippers, de forma específica, ou especialmente desenhados para pegarem em certos objectos, como são os vários casos apresentados a seguir.



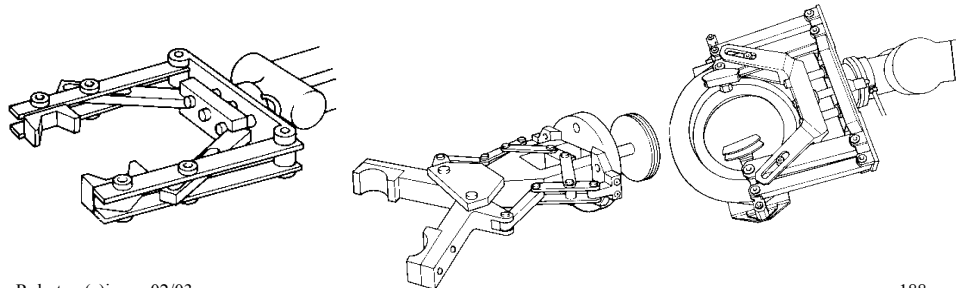
Robots - (c)jacn- 02/03



187

## Órgão terminal - End-effector 40

Neste primeiro grupo temos, da esquerda para a direita, uma pinça para objectos que são adquiridos pelo seu centro de massa. No caso do centro, temos uma pinça com grande abertura de dedos, para objectos que nem sempre se encontram no mesmo local e que por isso necessitam de um sistema com grande amplitude de movimentos, portanto uma maior área de varrimento para o processo de aquisição do objecto. Na pinça da direita, temos um exemplo de um sistema que permite pegar em objectos quer pelo lado interior quer pelo lado exterior, como é o caso de cilindros ocos. Usam-se quando o objecto a ser manipulado tem, em fases diferentes do processo, pontos de aquisição diferentes, como os lados exteriores e interiores.

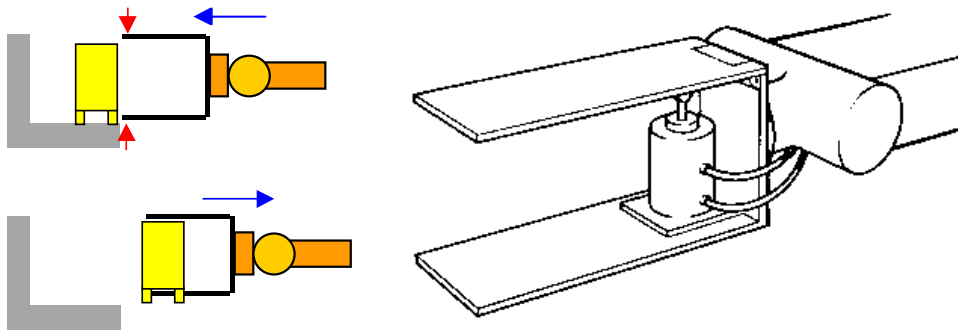


Robots - (c)jacn- 02/03

188

## Órgão terminal - End-effector 41

As pinças a seguir apresentadas foram concebidas para processos de aquisição diferentes. No caso da esquerda, pretende-se que a aquisição da peça se faça pela parte superior e inferior da peça, como o esquema ao lado ilustra, onde um objecto pousado numa prateleira é elevado pelo topo e pela base.

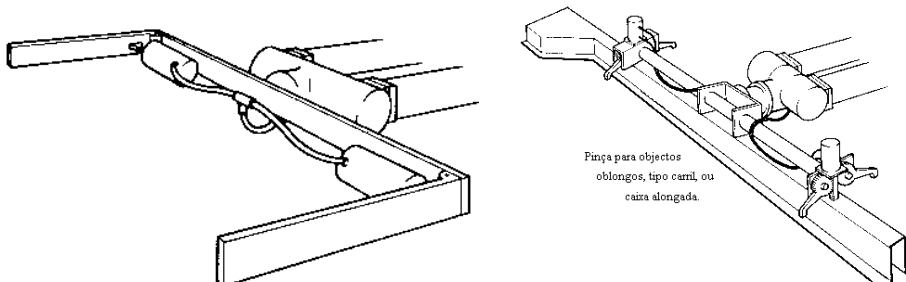


Robots - (c)jacn- 02/03

189

## Órgão terminal - End-effector 42

- Na primeira pinça temos um tipo de preensor de muito grande abertura lateral, para objectos com grande imprecisão na sua posição de preensão, e pequeno peso.
- Nas pinças a seguir apresentadas temos um exemplo de um sistema de preensão de tubos pelos extremos, mas de pequena dimensão. Neste caso os dedos fecham-se de forma independente sobre o tubo. A pinça da direita foi desenvolvida para peças oblongas como por exemplo lâmpadas fluorescentes.

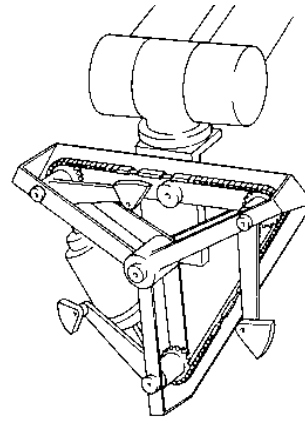
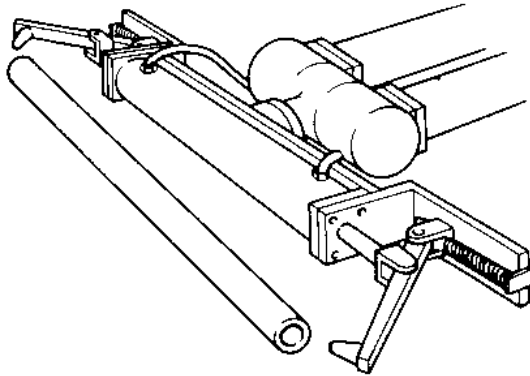


Robots - (c)jacn- 02/03

190

### Órgão terminal - End-effector 43

A pinça seguinte segura o objecto pela sua parte interior, como é o caso de tambores ou cilindros. O princípio de actuação baseia-se num mecanismo que abre três dedos na parte interna do tambor para o segurar

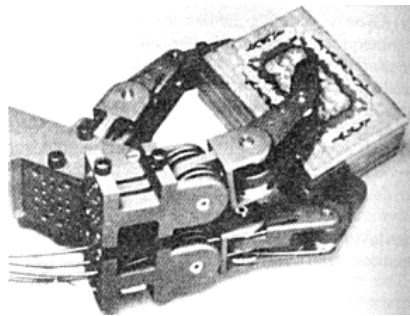


Robots - (c)jacn- 02/03

191

### Órgão terminal - End-effector 44

- Finalmente temos a mão artificial, com sistema de prensão tridigital, desenvolvida pelo JPL - Jet Propulsion Lab, em Pasadena, nos USA, e que visa aproximar-se do sistema de prensão humano. Esta pinça apresenta-se com três dedos compostos pelas falanges que temos nas nossas mãos e com o mesmo tipo de movimentos que estas apresentam entre elas.



Robots - (c)jacn- 02/03

192



## Interface robot-orgão terminal

### Interface entre o robot e o órgão terminal

- Requisitos:
  - suporte físico capaz de suportar as diferentes acções durante o ciclo de trabalho
  - deve fornecer a energia para o funcionamento do end-effector
  - deve fornecer os sinais de controlo (feedforward e feedback)
- Suporte Físico
  - (1) Robustez
    - Está relacionado com a capacidade das ligações aguentarem o esforço que o ciclo de trabalho obriga:
    - As ligações tem que ter robustez e rigidez necessárias para suportar os seguintes efeitos:
      - Peso do *gripper*
      - Peso do objecto
      - Forças de aceleração e desaceleração

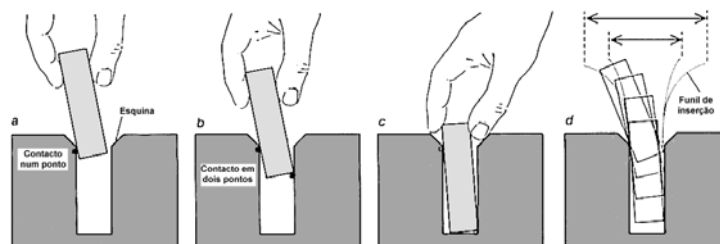
Robots - (c)jacn- 02/03

193

## Compliance 1

### (2) Compliance

- Exemplo: introdução de um objecto num orifício (exemplo introdução e aperto de parafusos)
- Se existir pouca clareza na definição da posição do buraco, qualquer tentativa de introdução do objecto fora do centro poderá causar danos quer ao objecto quer ao orifício.
- A figura seguinte esquematiza a inserção de uma peça rectangular num orifício, onde se podem constatar as situações em jogo

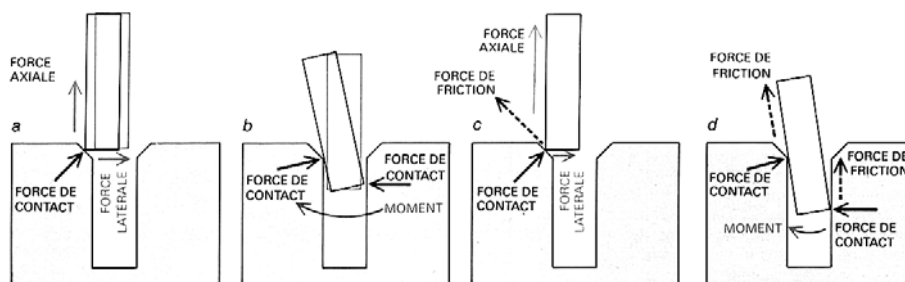


Robots - (c)jacn- 02/03

194

## Compliance 2

- Assim foram desenvolvidas técnicas (*Remote Center Compliance Devices*) que respondem a forças laterais durante o movimento de inserção do objecto no orifício, sem danificar quer o objecto, quer o gripper. As figuras seguintes ilustram o problema e apresentam o esboço de soluções propostas, bem como o conjunto de forças (acção e reacção) envolvidas, quando há contacto do objecto com a zona de encaixe.



Robots - (c)jacn- 02/03

195

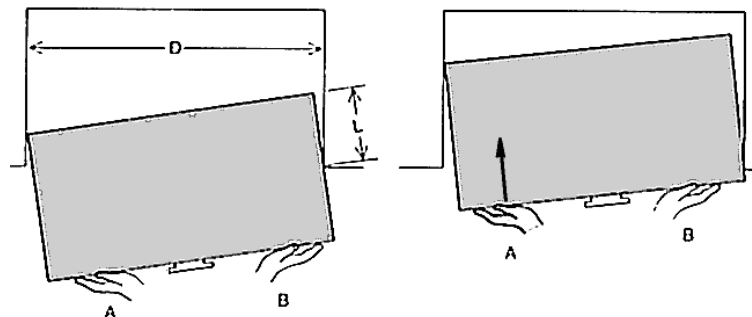
## Compliance 3

- Esta ultima sequência descreve claramente o conjunto de forças perante as quais o sistema tem que reagir e responder para poder realizar a tarefa de inserção do objecto.
- Note-se que qualquer reacção de contacto é decomposta em duas forças de reacção, uma tangencial e outra lateral, à qual se vai adicionar, na sequência da inserção, um momento resultante da rotação da peça, e mais forças de fricção provocadas pelo atrito, e em vários pontos.
- Na inserção automatizada, onde existe feedback, é a este conjunto de forças que o sistema tem que reagir.
- Uma situação corrente é a da inserção de uma gaveta mas fora do eixo de colocação, como se pode ver a seguir

Robots - (c)jacn- 02/03

196

## Compliance 4



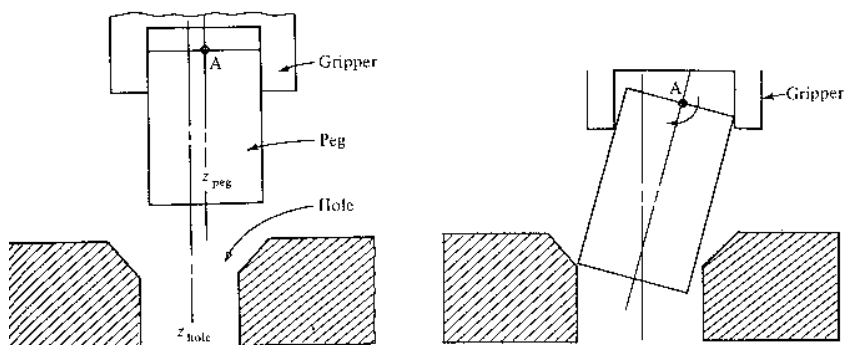
- Neste caso, se a gaveta for mal colocada, e se houver um contacto, então tentaremos aumentar a força no lado onde a oposição ao movimento é menor, de maneira a tentar inserir no seu local correctamente. A questão base é que este tipo de operações é feito pelo ser humano de forma automática, enquanto que um robot tem que saber quais as forças em questão e como reagir adequadamente.

Robots - (c)jacn- 02/03

197

## Compliance 5

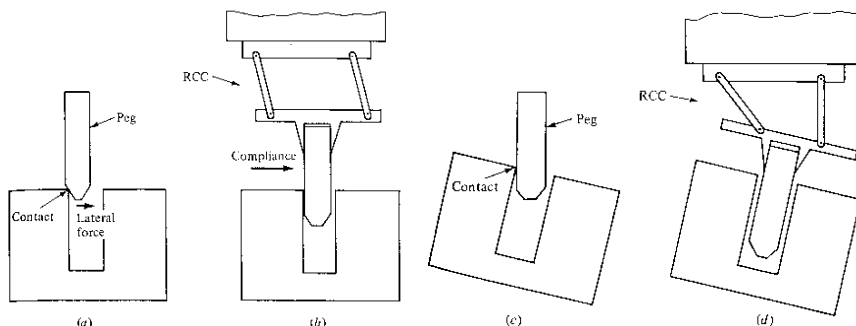
- O problema de uma inserção incorrecta. Gera-se uma força de reacção no gripper que o pode destruir, devido a uma inserção incorrecta na posição final.



Robots - (c)jacn- 02/03

198

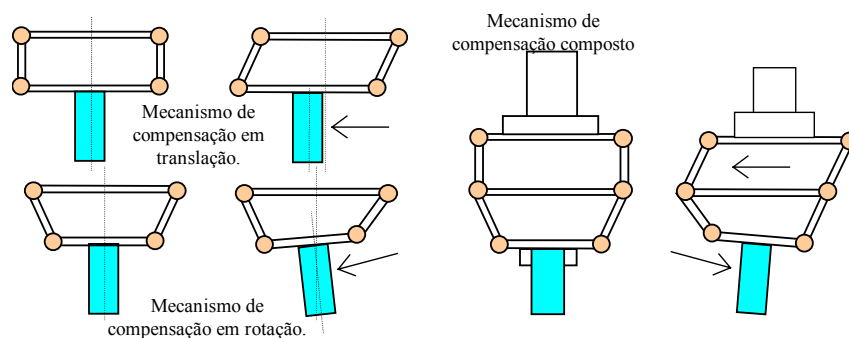
## Compliance 6



Soluções idealizadas: sistemas que permitam uma compensação do movimento anómalo

## Compliance 7

Princípio sobre o qual assenta o mecanismo de compensação: decomposição dos esforços de reacção em componentes de rotação e de translação e respectivos sistemas de compensação. Observem-se as várias posições que os pontos de referência assumem para se conseguir acrescentar alguma liberdade de movimento ao efectuador.



## Compliance 8

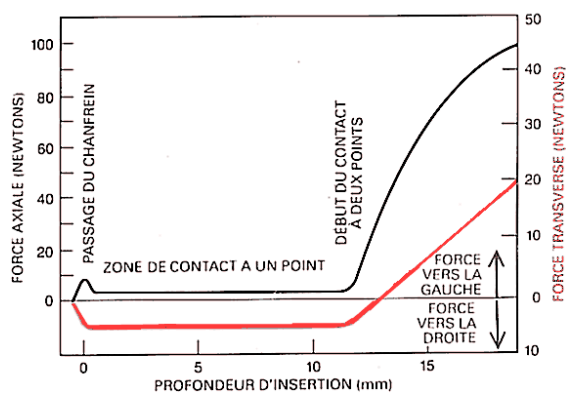
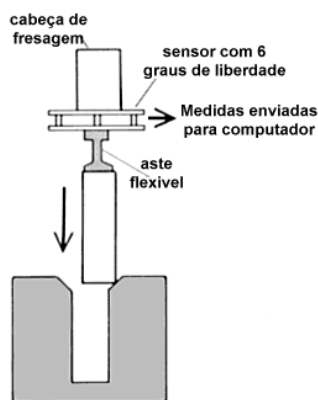
- O processo de compensação faz-se recorrendo a sensores com vários graus de liberdade colocados no pulso do robot, de forma receber as informações destes e a poder gerar movimentos pequenos que possibilitem a inserção sem danificar o objecto, o local de inserção e o robot.
- As figuras seguintes mostram um processo de inserção de um objecto cilíndrico num orifício com medida de forças em jogo.
- Note-se que no gráfico há duas curvas representado as forças de reacção transversais e laterais bem como as acções respectivas. Estas forças serão diferentes em função da resolução do processo de inserção, das respostas dos sensores e do tipo de *compliance* em questão, ou seja dos graus de liberdade que esta admite.

Robots - (c)jacn- 02/03

201

## Compliance 9

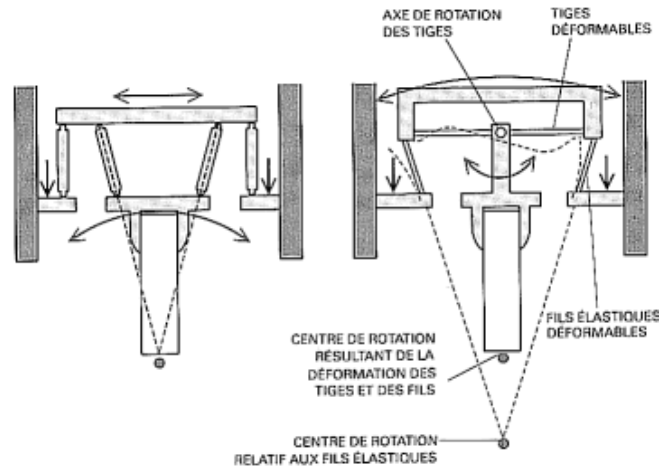
Jogo de feedback, e forças, e de condução automática de um processo de fresagem robotizada, num sistema de compliance inteligente.



Robots - (c)jacn- 02/03

202

## Compliance 10



## Protecção de sobrecarga

Pode-se considerar sobrecarga o facto do end-effector ficar preso numa máquina ou num tapete.

Ocorrendo um evento não programado que pode colocar em risco não só o end-effector como todo o robot.

Na resolução desta situação usam-se:

- sensores para indicar a ocorrência de um evento estranho prevenindo a ocorrência desse evento.
- sistemas de ruptura que separam o end-effector do robot

## *Fornecimento de energia*

---

- Os sinais de controlo que regulam as acções do órgão terminal são normalmente efectuados pelo controlo do fornecimento de energia. É disso exemplo o sistema de fecho e abertura do gripper pneumático.
- Eléctrico: maior controlo na actuação do gripper e na força aplicada. Em lugar das 2 posições on/off o gripper pode ser controlado para um número de posições desejado. Utilização de sensores para um melhor controlo da força a aplicar.

## **Sistemas hidráulicos**

---

### **Hydraulic Powered Robots**

- Heaviest payloads (high power-to-size ratio)
- Consumes energy even when robot not in use
- Leak hydraulic fluid (fire hazard in welding environment)
- Need to "exercise" robot to get fluids up to normal operating temperature prior to production start-up
- Need motor, pump, tank, piping, valves
- High maintenance costs (both electrical and mechanical skills)
- Can produce linear or rotary motion

<http://webcampus3.stthomas.edu/tpsturm/private/notes/qm380/robotype.html>

## Sistemas eléctricos

---

- Expanding trend
- Medium payload (parts assembly, machine tending, material handling, welding, coating) under 250 lbs.
- Use either servo motors (with feedback) or stepper motors (for small payloads)
- Can use either DC or AC servo motors (AC more popular)
- Quietest in operation
- Consume less energy
- Most repeatable
- No leakage
- No generation of power (hydraulic or pneumatic) required
- Can have either direct-drive or reduction-drive
- Direct:
  - Motor-drive shaft connected directly to the axis
  - Can only provide angular motion in 1-1 ratio
  - Provide fastest arm motion and quickest response
- Reduction:
  - Excellent rotational torque
  - Angular positioning with belt/pulley, gear train, or harmonic drive
  - Linear motion with ball-screw drive

## Modelo Cinemático 1

---

Tal como foi visto, um robot manipulador é composto por uma série de elementos rígidos ligados em série, de acordo com especificações de cada articulação, tendo uma extremidade fixa (BASE) e a outra extremidade sendo livre de se movimentar, e à qual se encontra ligado o efectuador.

O movimento do robot é conseguido pelo movimento relativo das várias articulações, portanto pelo movimento das várias ligações a fim de se colocar a mão em determinadas posições, e, na maioria dos casos, esta posição define-se em relação à base do robot.

A **cinemática do robot** trata do estudo analítico da geometria do movimento do robot, em relação a um sistema referencial de coordenadas fixo, como uma função do tempo, sem entrar em consideração com forças/momentos que provocam esse movimento.

Portanto, lida com a descrição analítica do movimento espacial do robot em função do tempo, particularmente as relações entre os ângulos (posições) das articulações e a posição e orientação do efectuador.



## Modelo Cinemático 2

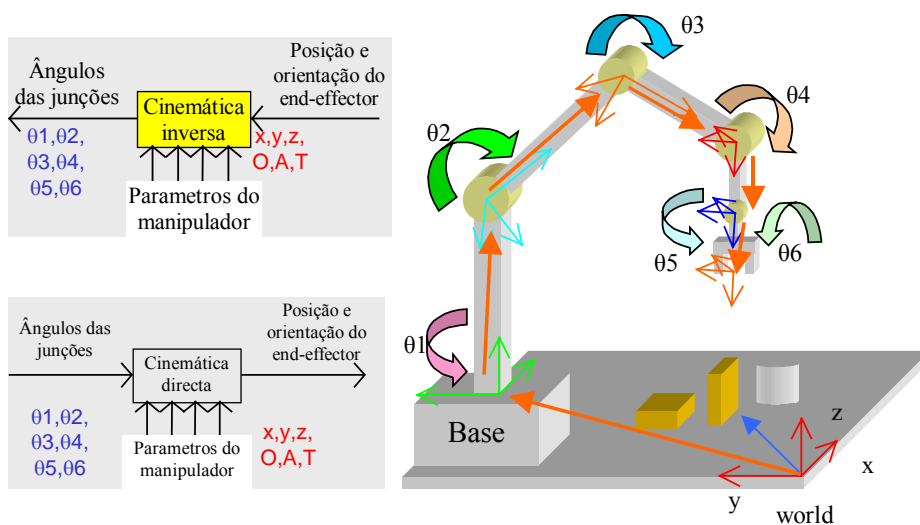
Modelo Cinemático Directo e Modelo Cinemático Inverso.

O problema do modelo cinemático resume-se a dois conceitos duais:

1. para uma dado manipulador, dado um vector  $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$ , e os parâmetros geométricos dos links, e onde  $n$  articulações, é o numero de graus de liberdade, qual a posição do efectuador em relação a um sistemas de coordenadas ?
2. dada uma posição e orientação pretendida para o efectuador, e os parâmetros associados aos links entre as articulações em relação a um determinado referencial, pode o manipulador atingir a posição pretendida ?

Em geral, o problema que se coloca mais frequentemente é o da cinemática inversa, na medida em que o que as variáveis independentes num robot são as associadas às junções, e uma tarefa é definida em termos de um sistema de coordenadas de referencia.

## Modelo Cinemático 3



## Modelo Cinemático 4

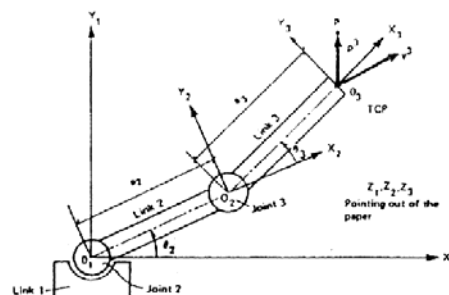
### Modelo geométrico

Nomenclatura: podemos considerar, de base os seguintes sistemas coordenados, necessário para a execução de uma tarefa por um robot, em termos de cinemática.

- **WCS** - world coordinate system  
– sistema de coordenadas do mundo.
- **TCS** - Tool coordinate system  
– sistema de coordenadas do gripper.
- **SCS** - Sensor coordinate system  
– sistema de coordenadas do sensor.
- **TCP** - Tool Center Point  
– ponto central da pinça.

## Modelo Cinemático 5

Exemplo 1: determinação da cinemática directa do manipulador seguinte



a) determinação da posição do TCP ( $X_t, Y_t$ ) em função dos ângulos das junções

$$\begin{aligned}
 X_t &= a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \varphi \\
 Y_t &= a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin \varphi \\
 \text{com} \rightarrow \varphi &= \theta_3 + \theta_2
 \end{aligned}$$

## Modelo Cinemático 6

Exemplo 1 (cont.)

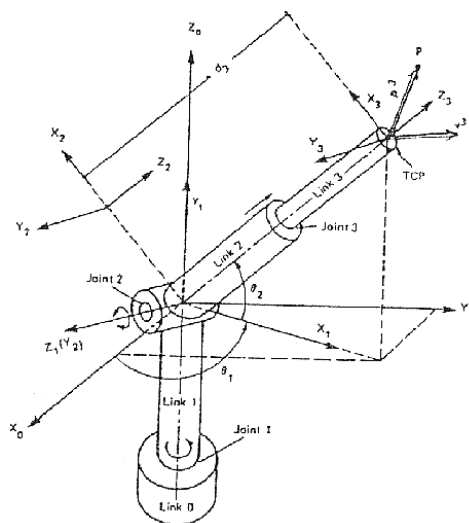
b) determinação da velocidade do TCP

$$\begin{aligned}\dot{X}_t &= -[a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin \varphi] \dot{\theta}_2 - [a_3 \sin \varphi] \dot{\theta}_3 \\ \dot{Y}_t &= [a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \varphi] \dot{\theta}_2 + [a_3 \cos \varphi] \dot{\theta}_3\end{aligned}$$

As equações a) e b) representam a solução da cinemática directa para este robot

## Modelo Cinemático 7

Exemplo 2: determinação da cinemática directa do manipulador seguinte



## Modelo Cinemático 8

- a) determinação da posição do TCP ( $X_t, Y_t, Z_t$ ) em função dos ângulos das junções :

$$\begin{aligned}X_t &= d_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\Y_t &= d_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\Z_t &= d_3 \sin \theta_2\end{aligned}$$

- b) determinação da velocidade do TCP.

$$\begin{aligned}\dot{X}_t &= (\cos \theta_1 \cos \theta_2) \dot{d}_3 - (d_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2) \dot{\theta}_1 - (d_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ \dot{Y}_t &= (\sin \theta_1 \cos \theta_2) \dot{d}_3 - (d_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2) \dot{\theta}_1 - (d_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ \dot{Z}_t &= (\sin \theta_2) \dot{d}_3 + (d_3 \cos \theta_2) \dot{\theta}_2\end{aligned}$$

As equações a) e b) representam a solução da cinemática directa para este robot

## Modelo Cinemático 9

Observando os exemplos anteriores podemos concluir que:

- não existe uma abordagem geométrica sistemática
- complexidade da matemática depende da estrutura do manipulador
- complexidade da solução aumenta com o número de graus de liberdade

A solução passa por definir um processo sistemático de calculo dos modelos cinemáticos directo/inverso de robots manipuladores, de forma a simplificar o processo de calculo.

## Modelo Cinemático 10

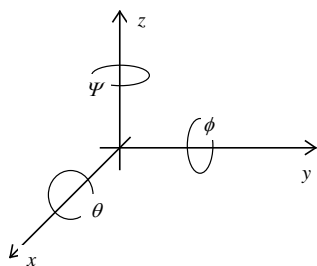
Em 1955 Denavit e Hartenberg (DH) apresentam uma solução sistemática generalizada para definir o modelo geométrico. Esta abordagem fundamenta-se num processo de modelização sistemática das articulações, junções, que compõem um robot manipulador, começando na primeira articulação, e acabando no efectuador, e usa transformações homogéneas para definir estas ligações.

Translação:

$$P_2 = TP_1 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

## Modelo Cinemático 11

Rotação:

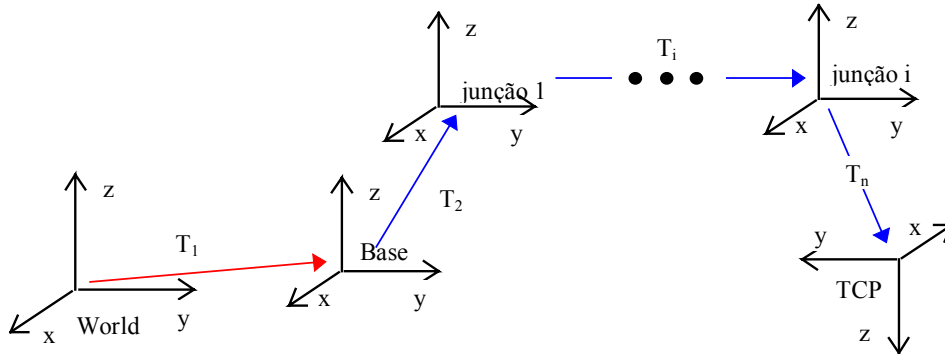


$$[R_{\theta,z}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R_{\phi,y}] = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R_{\Psi,x}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ 0 & \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## Modelo Cinemático 12



Portanto o **modelo do robot** passa a ser um conjunto de transformações homogêneas que ligam as diversas articulações, de forma a descrever os movimentos efectuados entre estas e com o pulso, na sua totalidade.

## Modelo Cinemático 13

Na figura anterior temos esquematizado a base de modelização usada nos modelos cinemáticos de sistemas manipuladores. Existe sempre um referencial (ou **frame** na terminologia anglo-saxónica) do mundo, designado por **World**, em relação ao qual tudo é definido, quer seja uma articulação, quer a base do robot, quer os sistemas sensoriais internos ao robot, quer os externos, como a visão, ou os objectos a manipular e os pontos de referencia ou de passagem das trajectórias.

Entre cada **frame** podemos definir um conjunto de equações que exprimem as coordenadas de um ponto (note-se que se trata de posição + orientação) em relação ao referencial anterior, de forma a que tudo se possa definir, ou exprimir, em relação a um referencial único de referencia. Em geral, o referencial de base do robot é usado como referencial do mundo, em sistemas manipuladores.

Em sistemas móveis (robot móveis ou **AGV** - “**Autonomus Guided Veicules**”) este referencial costuma ser exterior, e genérico, ou então corresponde à posição de repouso do robot.

## Modelo Cinemático 14

Para descrever as **transformações  $T_i$**  entre cada articulação, usamos as matrizes anteriormente definidas de transformação entre referenciais.

A sua composição permite definir uma transformação única entre o mundo (WORLD), a pinça ou utensílio e os objectos a manipular.

Note-se que cada objecto tem associado a si um referencial de base, em relação ao qual são definidos pontos específicos de trabalho.

Estes, desde que existam na tarefa, e no espaço de trabalho do robot, tem que ser ligado por matrizes de transformação ao referencial do mundo.

## Modelo Cinemático 15

Em resumo: Um ponto descrito pelo vector  $p$  pode sofrer uma transformação do sistema de coordenadas (referencial ao "**frame**")  $O_i$  para  $O_{i-1}$  usando a seguinte transformação homogénea:

$$p^{i-1} = T_{i-1}^i p^i; \text{ com } T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} [C_{i-1}^i]_{3 \times 3} & [d_{i-1}^i]_{1 \times 3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

na qual a matriz  $C$  é a matriz de rotação (transformação) e o vector  $d$  o vector que responsável pela translação (também uma transformação).

Aplicada à robótica a matriz de transformação  $T_{i-1}$  relaciona dois referenciais ("**frames**") consecutivos, que correspondem a dois braços consecutivos num manipulador.

## Modelo Cinemático 16

---

### Modelo de Denavit-Hartenberg (DH)

- O modelo de DH é principalmente implementado em robots manipuladores que consistem numa cadeia de ligações (braços), cada um contendo um grau de liberdade e a junção é do tipo Revolução/Rotação (*revolute*) e Prismática/Translação (*prismatic*), usadas nos manipuladores.
- O objectivo é definir as várias transformações que ligam os referenciais associados a cada articulação. Para tal, Denavit e Hartenberg procuraram sistematizar a definição de um referencial de associado à articulação  $i+1$ , a partir da articulação  $i$ , ou seja ao referencial  $i$ .

## Modelo Cinemático 17

---

O processo baseia-se em atribuir o novo referencial a partir do anterior, considerando que há definições primordiais na definição deste, nomeadamente no que concerne aos à colocação dos eixos do novo referencial, ao tipo de movimento que é executado (rotação/translação) e entram em consideração com constantes que existam entre eles.

O esquema seguinte apresenta o método para a obtenção deste modelo. Note-se que se começa por uma articulação  $i=0$ , e que a seguinte se define a partir dos eixos desta.



## Modelo Cinemático 18

Implementação do MDH:

A ideia consiste em definir um referencial de base (BASE), em relação ao qual todos os outros vão ser definidos. Cada articulação vai ter atribuída um *frame* de trabalho, que é definido à custa do *frame* anterior, até ao primeiro *frame*, que é a BASE anteriormente referida.

Para se definir a transformação entre cada referencial, usa-se uma regra que nos permite definir os eixos de cada novo referencial, o tipo de articulação (rotação/translação) e eventuais parâmetros ( $a_i$  e  $\alpha_i$ ) que possam existir e que sejam inerentes à articulação.

Só a definição escrupulosa destas regras permite definir cada referencial novo à custa do anterior. Naturalmente que para que se possa realizar esta definição, é necessário possuímos os dados constituintes para cada junção, e que são, ou devem, ser fornecidos, pelo fabricante de robots.

O principio de obtenção do modelo é o seguinte:

## Modelo Cinemático 19

- 1- numerar as ligações e as junções, começando da base.
- 2- estabelecer sistemas de coordenadas (*frames*) para cada uma das junções de acordo com o seguinte procedimento:
  - a) o eixo  $Z_{i-1}$ : coloca-se ao longo do eixo de movimentação de cada articulação  $i$ .
  - b) o eixo  $X_i$ : é perpendicular a  $Z_i$  e a  $Z_{i-1}$
  - c) o eixo  $Y_i$ : completa o sistema de coordenadas (regra da mão direita)
  - d) a origem do referencial  $O_i$ : encontra-se na intersecção da normal comum entre os eixos de articulações  $i$  e  $i+1$

## Modelo Cinemático 20

- 3- definir os seguintes parâmetros para os pares ligação/junção:
- $q_i$ : ângulo da articulação, medido entre os eixos  $X_{i-1}$  e  $X_i$ , em torno do eixo  $Z_{i-1}$ . Variável para uma junção *revolute*, constante para uma junção prismática.
  - $d_i$ : distância entre a origem da estrutura de coordenadas  $(i-1)$  e a intersecção do eixo  $Z_{i-1}$  com o eixo  $X_i$ , na direcção do eixo  $Z_{i-1}$ . Variável para uma junção *prismática*, constante para uma junção *revolute*.
  - $a_i$ : distância entre a intersecção do eixo  $Z_{i-1}$  com o eixo  $X_i$  e a origem da estrutura de coordenadas  $(i)$ , na direcção do eixo  $X_{i-1}$  (distância mais curta entre o eixo  $Z_{i-1}$  e  $Z_i$ ). Parâmetro constante.
  - $\alpha_i$ : ângulo de *offset* entre o eixo  $Z_{i-1}$  e o eixo  $Z_i$ , em torno do eixo  $X_i$ . Parâmetro constante.

## Modelo Cinemático 21

4- Matriz para a junção  $i$ , com :

$$C_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}$$

A Matriz de orientação de  $\mathcal{O}_i$  relativamente a  $\mathcal{O}_{i-1}$ ,

$$d_{i-1}^i = \begin{bmatrix} a_i \cos \theta_i \\ a_i \sin \theta_i \\ d_i \end{bmatrix}$$

descreve a posição de  $O_i$  relativamente a  $O_{i-1}$

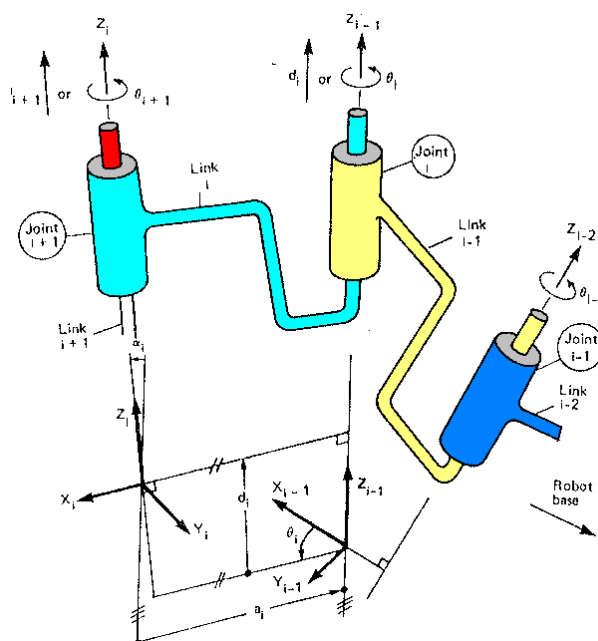
## Modelo Cinemático 22

A Matriz  $T_{i-1}^i$  é determinada aplicando rotações e translações à frame  $O_{i-1}$  para a alinhar com a frame  $O_i$ , efectuando os seguintes passos:

- Rodar  $O_{i-1}$  em torno de  $Z_{i-1}$  de um ângulo  $q_i$ .
- Translação da frame  $O_{i-1}$  (já com a rotação anterior) por  $a_i$  e  $d_i$ , respectivamente em  $X_{i-1}$  e  $Z_{i-1}$ .
- Rodar a frame  $O_{i-1}$  (resultado em b) por um ângulo  $a_i$  em torno de  $X_{i-1}$ .

## Modelo Cinemático 23

A figura seguinte permite visualizar as diferentes variáveis associadas à definição dos referenciais, bem como as constantes inerentes a cada passo. É conveniente que cada etapa anterior seja acompanhada no esquema seguinte.



## Modelo Cinemático 24

---

Em termos de sistemas robotizados comerciais, o problema da definição do modelo cinemático do robot não se coloca, na medida que isso já está definido a nível interno.

Porém há casos em que é necessário determinar-se o modelo do manipulador, ou então tê-lo mesmo que fornecido pelo fabricante, em particular quando se implementam sistemas de geração automática de trajectórias, ou de geração de planos.

Isto é usual quando se procede à inserção de sistemas sensoriais em manipuladores, ou quando se pretendem definir linguagens de mais alto nível, para efeitos de comando dos sistemas.

## Modelo Cinemático 25

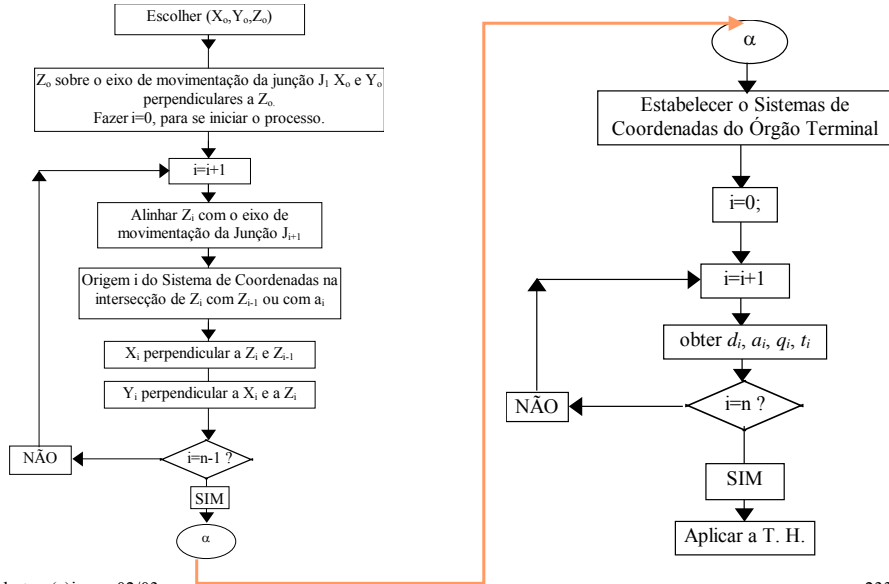
---

Nestes casos proceder-se à simulação dos movimentos a serem executados pelos robots, a fim de se avaliar da sua possibilidade de realização, ou para se poder comparar o comportamento deste durante, e no final da execução dos movimentos.

Outras questões podem ser colocadas quando se pretende efectuar o estudo do comportamento dos sistemas em carga, onde se verificam variações no comportamento dos manipuladores.

Há ainda os sistemas inteligentes em que as tarefas podem ser definidas de forma mais grosseira ou elementar, e onde os sistemas tem a possibilidade de evoluírem dentro da sua execução para os objectivos sumariamente definidos.

## Modelo Cinemático 26



## Modelo Cinemático 27

### Aplicação do método D.H.

CASO 1: Braço articulado, 3 junções de rotação

Procedimento

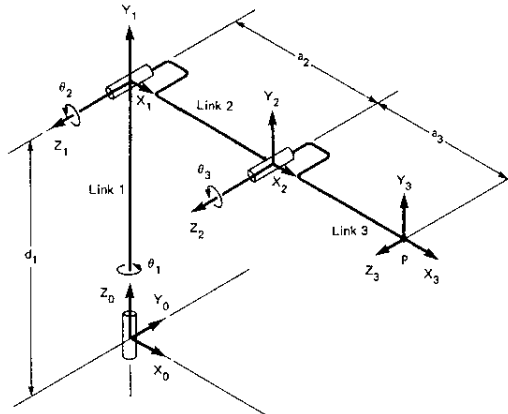
- 1) Numeração das junções/ligações
- 2) Posicionamento/Orientação dos referenciais (“frames”).
  - $Z_i \rightarrow$  na direcção do eixo de rotação
  - $X_i \rightarrow$  perpendicular a  $Z_{i-1}$  e a  $Z_i$
  - $Y_i \rightarrow$  regra da mão direita
- 3) Parâmetros das junções

EX: Junção 1

- a distancia entre as origens  $O_0$  e  $O_1$  ao longo do eixo  $Z_0$  é  $d_1$ .
- os eixos  $Z_0$  e  $Z_1$  intersectam-se pelo que  $a_1=0$ .
- o ângulo  $a_1$  medido de  $Z_0$  para  $Z_1$  em torno de  $X_1$  é  $+90^\circ$ .
- $q_1$  medido de  $X_0$  para  $X_1$  é a variável da junção.

## Modelo Cinemático 28

Junção	Parâmetros das junções			
	$\theta_i$ (*)	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	$d_1$	0	$+90^\circ$
2	$\theta_2$	0	$a_2$	0
3	$\theta_3$	0	$a_3$	0
(*)	variáveis			



Matrizes de transformação entre articulações.

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_1^2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2.C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2.S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_2^3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_3.C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & a_3.S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

onde  $C_i$  e  $S_i$  representam, para facilitar a escrita,  $C_i = \cos \theta_i$  e  $S_i = \sin \theta_i$ .

Robots - (c)jacn-02/03

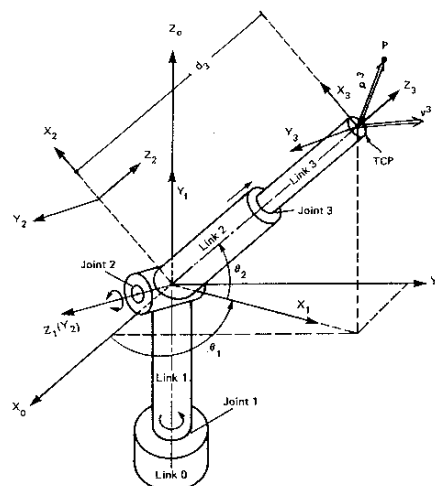
235

## Modelo Cinemático 29

CASO 2: Braço esférico, 1 junção linear e 2 junções de rotação:

- Parâmetros das junções

Junção	Parâmetros das junções			
$i$	$\theta$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	0	0	$90^\circ$
2	$\theta_2+90$	0	0	$90^\circ$
3	$\theta$	$d_3$	0	0



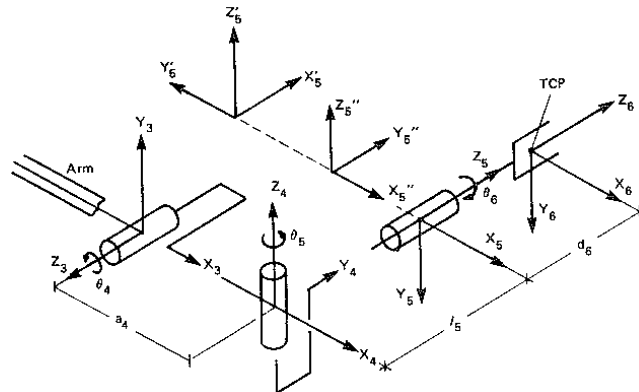
Robots - (c)jacn-02/03

236

## Modelo Cinemático 30

### CASO 3: Pulso com 3 eixos ( Bend-Bend-Roll )

As junções são numeradas partindo da junção 4 que move o pulso relativamente ao referencial 3 (“frame 3”) e que corresponde ao *terminus* do braço, ou ao ponto terminal do manipulador.



Robots - (c)jacn-02/03

237

## Modelo Cinemático 31

$$T_4^{5'} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_5 & -\cos\theta_5 & 0 & -l_5 \cdot \sin\theta_5 \\ \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & l_5 \cdot \cos\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{5'}^5 = T_{R5'}^{5''} T_{R5''}^5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Junção	Parâmetros das junções			
i	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
4	$\theta_4$	0	0	-90
5	$\theta_5$	und.	und.	-90
6	$\theta_6$	$d_6$	0	0

Robots - (c)jacn-02/03

238

## Modelo Cinemático 32

- Com o sistema de coordenadas escolhido  $O_4$  e  $O_5$  a distancia  $l_5$  (figura) não corresponde a  $d_5$  nem a  $a_5$ , pelo que é necessário considerar uma frame auxiliar  $O_5'$  de modo a tornar possível a obtenção dos parâmetros das junções.

$$T_4^5 = T_4^{5'} T_5'^5$$

–  $T_4^{5'}$  → transformação entre  $O_4$  e  $O_5'$ .

–  $T_5'^5$  → transformação entre  $O_5'$  e  $O_5$ .

- A matriz de transformação para o pulso é dada por:

$$T_3^6 = T_3^4 T_4^5 T_5^6 = T_3^4 T_4^{5'} T_5'^5 T_5^6$$

onde

## Modelo Cinemático 33

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & a_4 \cdot \cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & a_4 \cdot \sin\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

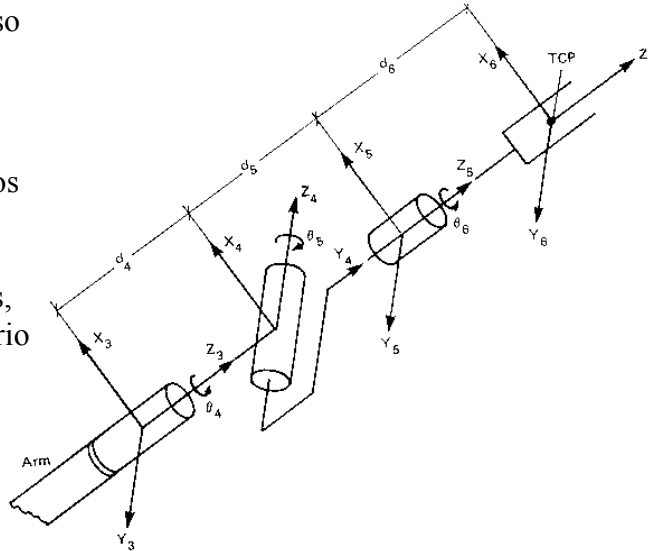
$$T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & -l_5 \cdot \sin\theta_5 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & l_5 \cdot \cos\theta_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



## Modelo Cinemático 34

CASO 4: Pulso com 3 eixos. (Roll, Bend, Roll) Novamente de acordo com os eixos definidos os parâmetros  $d_5$  e  $a_5$  não estão definidos, pelo que é necessário criar uma *frame* auxiliar



Robots - (c)jacn- 02/03

241

## Modelo Cinemático 35

Os parâmetros das junções, neste caso são os seguintes:

Junções	Parâmetros das junções			
i	$q_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
4	$q_4$	$d_4$	0	$+90^\circ$
5	$q_5$	-	-	-90
6	$q_6$	$d_6$	0	0

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & l_5 \cdot \sin\theta_5 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & l_5 \cdot \cos\theta_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Manipulador com 6 eixos - direcção e orientação

$$T_0^6 = T_0^3 T_3^6$$

Robots - (c)jacn- 02/03

242

## Modelo Cinemático 36

Generalizando:

- Se o manipulador está referenciado a uma frame fixa (WCS)

$$T_{wcs}^6 = T_{wcs}^0 T_0^6$$

- Se o manipulador permite mais do que um *gripper*, e este está referenciado à sua base

$$T_0^{tool} = T_0^6 T_6^{tool}$$

- Combinando

$$T_{wcs}^{tool} = T_{wcs}^6 T_6^{tool} = T_{wcs}^0 T_0^6 T_6^{tool}$$

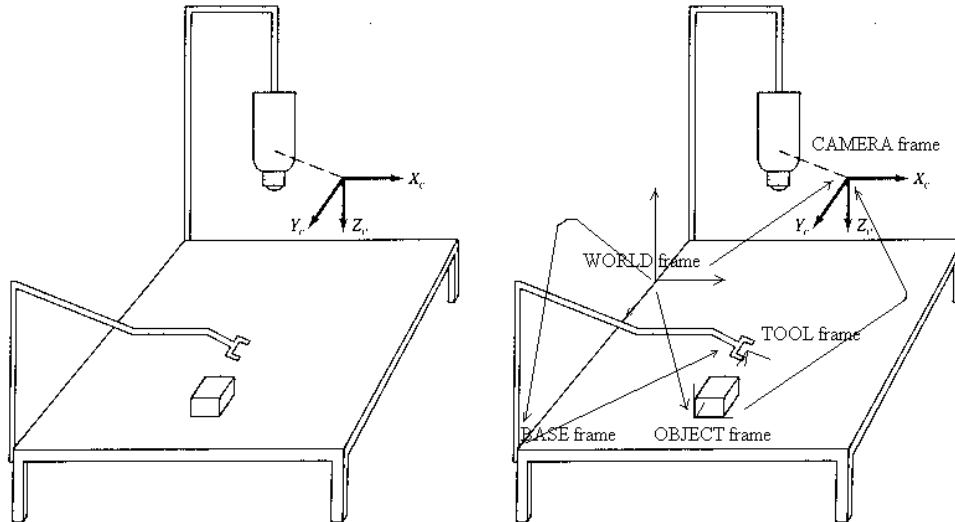
## Modelo Cinemático 37

Um exemplo desta situação pode ser observado na figura seguinte onde se apresenta uma área de trabalho, correspondente ao plano suporte horizontal da mesa, onde a um canto temos o braço manipulador e num outro canto dispomos de um sistema de visão, cujo plano imagem é paralelo ao plano suporte horizontal, possuindo um referencial que lhe é próprio.

Quando a câmara observa a cena, ou seja a mesa, e detecta um objecto numa dada posição, deve ser capaz de fornecer a sua posição e orientação ao sistema de comando do robot, de forma que este consiga manipular os objectos presentes. Para tal há que efectuar todo o conjunto de transformações que lhe permitam exprimir os objectos no referencial do mundo para o robot.

A esta operação designa-se por calibração do sistema de visão, mas o termo é extensível ao robot.

## Modelo Cinemático 38



Robots - (c)jacn- 02/03

245

## Interpolação de trajetórias 1

- Pretende-se solucionar o problema da cinemática inversa, isto é dada uma posição do órgão terminal pretende-se calcular as variáveis ao nível da junções.
- Implementado recorrendo a técnicas de interpolação de trajetórias.
- Necessidade de interpoladores → são utilizados quer ao nível da aprendizagem, quer ao nível da operação dos robots do tipo CP (“*Continuous Path*”) e “inteligentes”.
- Aprendizagem:
  - a aplicação de comandos no domínio das junções na aprendizagem manual e off-line é impraticável, pelo que são usados os sistemas de coordenadas do mundo (WCS) ou o da ferramenta (TCS).
- Operação:
  - interpoladores são usados para gerar movimentos ao longo de rectas entre pontos programados (fornecidos pelo operador/programador). Aplicações: carga/descarga; montagem; soldadura por arco.
  - os pontos programados podem ser determinados em tempo real durante a fase de operação.
  - algoritmos de navegação

Robots - (c)jacn- 02/03

246

## Interpolação de trajetórias 2

Estrutura base de um interpolador

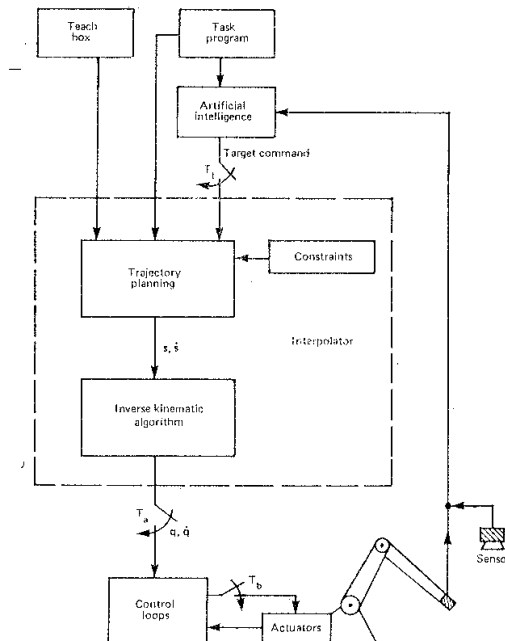
Os comandos de movimento num robot do tipo Trajectória Contínua (“CP”), são gerados através de um sistema hierárquico, com 3 níveis.

No nível intermédio encontra-se o interpolador, que é o responsável pelo:

- Planeamento de trajetórias
  - especifica um número de pontos intermédios entre os pontos fornecidos pelo operador aquando a fase de aprendizagem ou pelo programa da tarefa.
  - estes pontos têm que ter em consideração:
    - volume de trabalho
    - célula envolvente
    - limites de velocidade e aceleração
- Implementação de algoritmos da cinemática inversa
  - permite obter para cada junção a posição e velocidade de movimentação

## Interpolação de trajetórias 3

Esquema funcional de um interpolador de trajetórias de robot manipulador



## Interpolação de trajectórias 4

- Os três níveis de hierarquia operam em intervalos de amostragem diferentes:
  - Tb - controlo ao nível das junções
  - Ta - interpolador
  - Tt - algoritmos de Inteligência Artificial ( I.A. ).

Em que  $T_b \leq T_a \leq T_t$ , um menor  $T_b$  resulta em menores overshoots de posição, menor  $T_a$  menores secções intermédias melhorando o seguimento da trajectória.

Normalmente os três níveis hierárquicos são implementados em máquinas diferentes e independentes, mas sincronizadas entre si.

## Interpolação de trajectórias 5

Planeamento de trajectórias

- Divide a trajectória entre pontos alvo (“target points”) em pequenas secções adicionando pontos intermédios, em função de requisitos da evolução desta, ao longo da trajectória.

Definição dos Target Points:

- Ponto final numa trajectória fornecido através de:
  - fase de aprendizagem,
  - pelo programa que descreve a tarefa,
  - resposta de sensores externos ao robot
- Incremento relativamente ao ponto anterior,
  - direcção e magnitude, normalmente usada em robots adaptativos que implica a inserção funcional de sensores para permitir seguir uma determinada trajectória (I.A)

## Interpolação de trajectórias 6

Determinação de vector posição e do vector velocidade, para posicionar e orientar o órgão terminal

- Velocidade:

- Expressa recorrendo ao incremento  $Ds$ ,  $Ds = s(i) \cdot T_a$ , em que:

- $s(i)$  é o valor de  $s$  para  $t = iT_a$
- $ds(i)$  é o deslocamento durante o período  $T_a$ ,
- pelo que  $s(i) = s(i-1) + Ds(i)$

- Aceleração:

- o algoritmo de planeamento de trajectórias calcula a aceleração no início do movimento (arranque) e a desaceleração final (quando atinge o target point).
- 3 fases: aceleração com  $a = a_1$ , velocidade constante, desaceleração  $a = -a_2$ .

## Interpolação de trajectórias 7

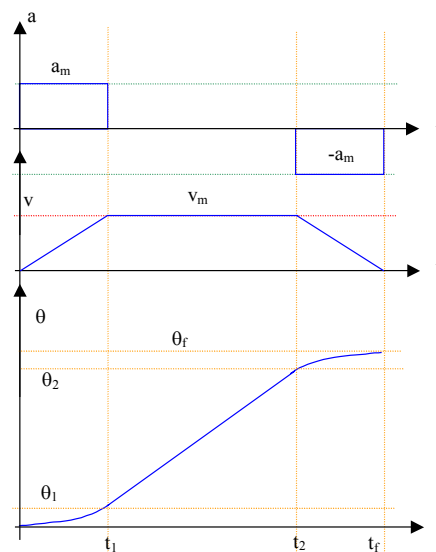
Começando com  $\Delta s(0) = 0$  obtemos:

$$\Delta s = \Delta s(t-1) - a_1 \cdot T_a^2$$

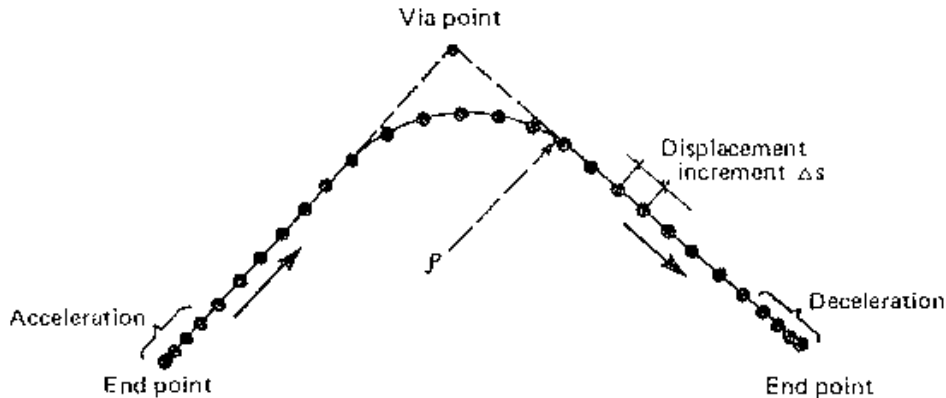
- fase de aceleração termina quando a velocidade atinge o valor máximo,  $\Delta s$  máximo).
- fase de velocidade constante ( $\Delta s$  constante)
- fase de desaceleração,  $\Delta s$  diminui com uma aceleração de  $-a_2$  :

$$\Delta s = \Delta s(t-1) - a_2 \cdot T_a^2$$

O raio da curva ( $\rho$ ) corresponde à máxima aceleração permitida pelo TCP, para se efectuar a curva mais fechada a aceleração não atinge o valor máximo.



## Interpolação de trajectórias 8



Exemplo de geração de uma trajectória, que parte de um ponto inicial, até um ponto final, passando por um ponto auxiliar (*Via point*). Aqui é possível observarem-se os pontos que o interpolador gera para que o manipulador efectue o movimento

## Interpolação de trajectórias 9

- Tipos de interpoladores (algoritmos de cinemática inversa)
- pretende-se de  $s$  e  $s'$  obter  $\theta$  e  $\theta'$  [ou  $q$  e  $q'$ ] (variáveis articulares)
- num manipulador com  $n$  eixos os vectores  $\theta$  e  $\theta'$ , têm  $n$  componentes
- a transformação que efectua a cinemática inversa é aplicada em cada intervalo  $T_a$
- dois tipos de interpoladores
  - absolutos
  - incrementais

## Interpolação de trajetórias 10

Interpoladores absolutos

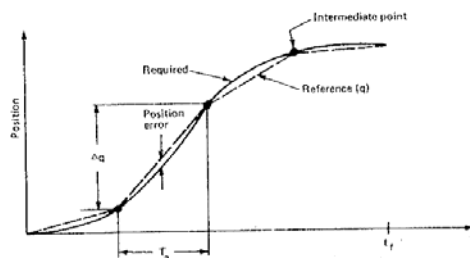
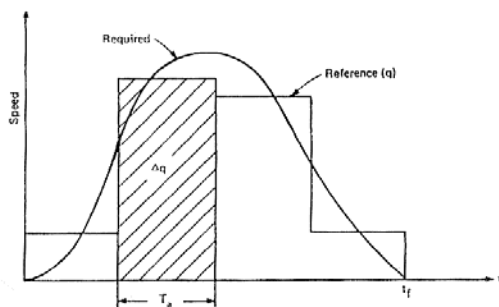
- em cada período de amostragem ( $i$ ) é determinada uma posição absoluta  $q(i)$ .

$$\dot{q} = \frac{\Delta q(i)}{T_a} = \frac{q(i) - q(i-1)}{T_a}$$

- a velocidade mantém-se constante durante o período de amostragem.
- o erro de posição depende do  $\Delta q$ ; erros maiores para  $T_a$  maior, ou velocidades maiores;

$$\Delta q = \dot{q}(i)T_a$$

## Interpolação de trajetórias 11





## Interpolação de trajetórias 12

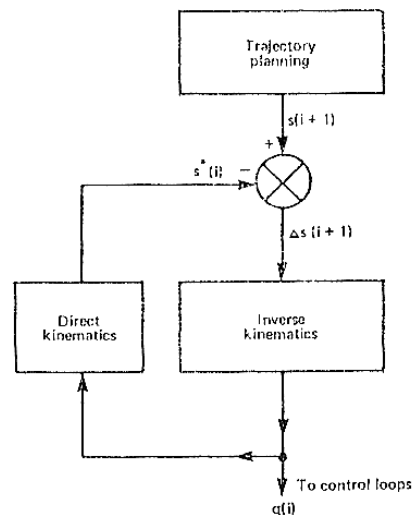
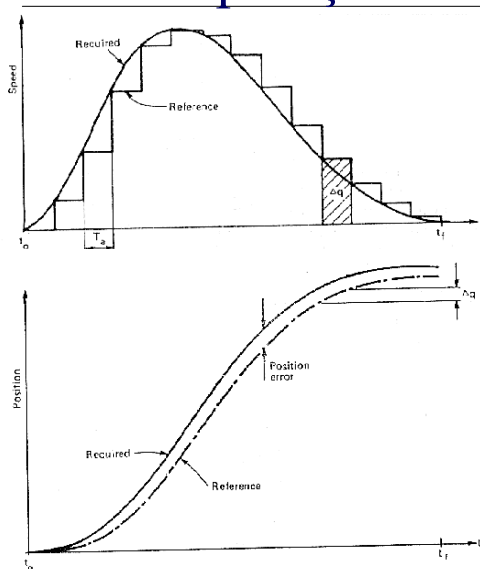
### Interpoladores Incrementais

- em cada período  $T_a$  o vector  $s'(i)$  é transformado em  $q'(i)$ , ou  $\theta'(i)$
- em cada intervalo a velocidade é constante  $\rightarrow \Delta\theta = \theta'(i) \cdot T_a$
- a posição  $\theta(i)$  é determinada integrando a velocidade (soma dos  $\Delta\theta$ ):

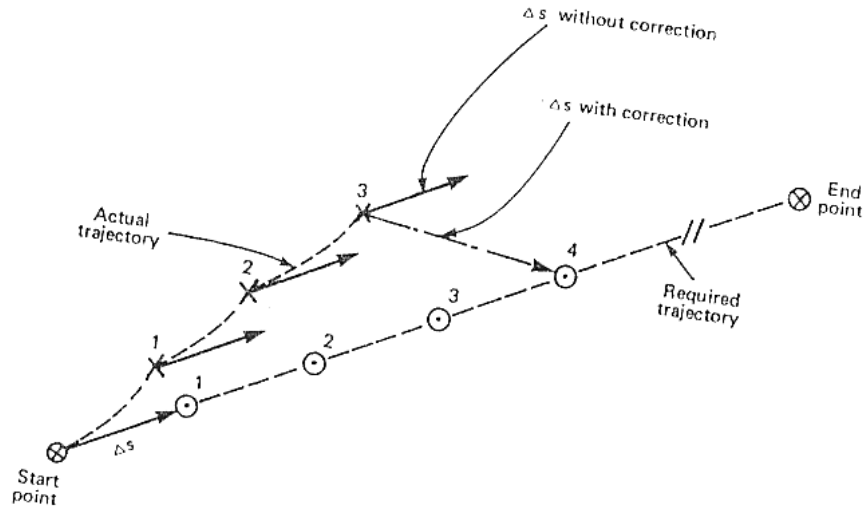
$$q(i) = \sum_{j=1}^i \Delta q(j)$$

- erro de posição
  - erro acumulado
  - mais sensível a erros computacionais
  - os erros de posição criam erros adicionais de trajetória (figura)

## Interpolação de trajetórias 13



## Interpolação de trajetórias 14



Robots - (c)jacn- 02/03

259

## Planeamento de Trajectórias 1

Planeamento de Trajectórias (coordenadas articulares e cartesianas)

Define-se Trajectória como a curva no espaço que a mão do manipulador deve descrever desde a posição/orientação inicial até à posição/orientação final.

Pretende-se os formalismo que nos permitam definir a descrever os movimentos do robot, entre pontos.

Podemos considerar trajectórias interpoladas e trajectórias aproximadas, e as respectivas funções polinomiais, funções do tempo, que as aproximam e produzem sequências de pontos de controlo serializados no tempo/espaço.

Os pontos são em geral definidos em coordenadas cartesianas, em lugar das coordenadas articulares, pois torna-se mais facil a sua visualização. Para se obterem as coordenadas articulares, temos que efectuar o calculo inverso das coordenadas cartesianas definidas pelo produtos de matrizes que descrevem as articulações (cinemática inversa).

Em geral há um grande numero de possibilidades de curvas ( linha recta, trajectória curva suave, etc...) entre pontos de uma trajectória, definida pelos pontos inicial e final, fornecidos pelo utilizador.

Robots - (c)jacn- 02/03

260

## Planeamento de Trajectórias 2

- Considerações:

- Obrigatoriedade de evitar obstáculos
- Obrigatoriedade de trajectória

Estas considerações (restrições) resultam em 4 modos de controlo

		Obrigatoriedade de evitar obstáculos	
		SIM	NÃO
Obrigatoriedade de trajectórias	SIM	Planeamento <i>off-line</i> de movimentos. Livres de colisões e seguimento <i>on-line</i> da trajectória	Planeamento <i>off-line</i> de trajectórias e seguimento <i>on-line</i> da trajectória
	NÃO	Controlo de posição mais detecção e evitar os obstáculos	Controlo de Posição

Aproximação / interpolação, da trajectória desejada, efectuada por uma classe de funções polinomiais. A especificação dos pontos finais (*end-points*) pode ser efectuada recorrendo a coordenadas das junções ( $\theta_i$  e  $d_i$ ) ou recorrendo a coordenadas cartesianas (x,y,z).

## Planeamento de Trajectórias 3

Duas abordagens para o planeamento de trajectórias:

- “Joint Space”:
- as trajectórias são planeadas em termos das variáveis a controlar,
- o planeamento de trajectórias pode ser feito em tempo real,
- as trajectórias podem ser planeadas mais facilmente.
- Algoritmo básico para cada junção:
  - $t=t_0$ ;
  - loop: Wait for next control interval;
  - $t=t+\delta t$ ;
  - $h(t)$ =where the manipulator joint position should be at time t;
  - if ( $t == t_p$ ) exit;
  - goto loop;
- $h(t)$  → função de planeamento da trajectória, actualizada em cada intervalo de controlo.

## Planeamento de Trajectórias 4

“Cartesian Space”:

- é mais fácil de determinar a localização das ligações e da mão durante o movimento (necessário para fazer trajectórias livres de colisão).
- desvantagem: não existem algoritmos de controlo implementados no domínio das variáveis cartesianas, uma vez que não existem sensores capazes de medir a posição da mão em coordenadas cartesianas  $\Rightarrow$  transformação das coordenadas cartesianas para as coordenadas das junções  $\Rightarrow$  aumento no tempo de processamento.

## Planeamento de Trajectórias 5

“Cartesian Space” (cont.)

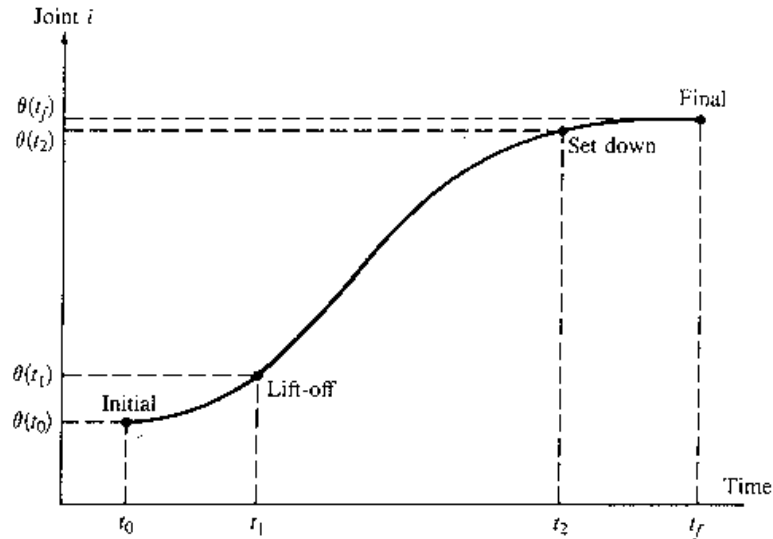
Algoritmo básico:

```
t=t0;  
loop:  Wait for next control interval;  
       t=t+deltat;  
       H(t)=where the manipulator hand should be at time t;  
       Q{H(t)}=joint solution corresponding to H(t);  
       if (t == tf) exit;  
       goto loop;
```

onde  $H(t) \rightarrow$  coordenadas cartesianas, matriz que relaciona a posição da mão relativamente ao sistemas de coordenadas base,

e onde,  $Q\{H(t)\} \rightarrow$  coordenadas ao nível das junções, ou seja o problema da cinemática inversa, que calcula as posições das variáveis articulares em função das coordenadas cartesianas.

## Planeamento de Trajectórias 6



Robots - (c)jacn-02/03

265

### *Planeamento das Trajectórias no espaço das junções 1*

#### Restrições

As restrições impostas ao movimento são a base para o cálculo dos parâmetros (coeficientes) dos polinómios. Por exemplo no caso da posição inicial, sabemos que o movimento do pulso começa parado, logo com velocidade e aceleração nulas, e que no fim desta primeira parte do movimento geral da trajetória, devemos ter condições limites, tais que o tramo restante do movimento seja contínuo e suave. Por outras palavras, as várias partes que compõem o movimento são contínuas entre si, o que significa que as condições que temos no fim da primeira parte do movimento, devem ser as que temos no início da segunda parte do movimento. O princípio é o que se aplica a funções contínuas (conceito matemático) na medida em que o movimento tem que ser contínuo, logo derivável em todo o seu domínio de existência. Por outro lado não deve ser esquecido que estamos a tratar de movimento reais, e não de abstrações matemáticas. O trabalho efectuado por um manipulador é realmente um movimento físico num espaço 3D.

Robots - (c)jacn-02/03

266

## Planeamento das Trajectórias no espaço das junções 2

### Posição Inicial:

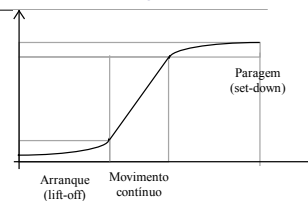
- 1. Posição (dada:  $x, y, z$ , domínio das junções)
- 2. Velocidade (dada: normalmente zero)
- 3. Aceleração (dada: normalmente zero)

### Posições Intermediárias:

- 4. Posição de “Lift-Off” (arranque) (dada)
- 5. Posição de “Lift-Off” (continua com o segmento de trajectória anterior)
- 6. Velocidade (continua com o segmento de trajectória anterior)
- 7. Aceleração (continua com o segmento de trajectória anterior)
- 8. Posição de “Set-Down” (desaceleração) (dada)
- 9. Posição de “Set-Down” (continua com o próximo segmento de trajectória)
- 10. Velocidade (continua com o próximo segmento de trajectória)
- 11. Aceleração (continua com o próximo segmento de trajectória)

### Posição Final:

- 12. Posição (dada)
- 13. Velocidade (dada, normalmente zero)
- 14. Aceleração (dada, normalmente zero)



Robots - (c)jacn-02/03

267

## Planeamento das Trajectórias no espaço das junções 3

Sendo assim deve encontrar-se um polinómio que satisfaça as restrições (posição, velocidade, aceleração) dos pontos inicial, final, “lift-off”, “set-down”. E que as posições, velocidades e acelerações sejam contínuas no intervalo de tempo  $\{t_0, t_f\}$ .

Pretende-se obter um polinómio de grau  $n$  que especifique a posição  $q_i(t)$  e que satisfaça as restrições em  $q_i(t)$  e  $q_i'(t)$ .

Uma aproximação é um polinómio de grau 7:

$$q_i(t) = a_7 t^7 + a_6 t^6 + a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t^1 + a_0$$

Contudo este polinómio tende a produzir movimento estranho (oscilatório nos extremos), devido aos valores dos  $a_i$  no polinómio. Um dos problemas derivado desta situação aparece em alguns simuladores externos de trajectórias usados em sistemas de computação gráfica integrados nos robots das linhas de montagem. Por vezes os modelos aproximados nos gabinetes de projecto, não podem ser usados directamente no controlo dos robots devido aos efeitos de oscilações aleatórias que produzem.

Robots - (c)jacn-02/03

268

## *Planeamento das Trajectórias no espaço das junções 4*

Pelo que normalmente a trajectória é dividida em vários segmentos de tal forma que se possa usar polinómios de grau inferior para descrever esses mesmos segmentos de trajectórias. Existem 3 trajectórias típicas:

### – Trajectória 4-3-4

- constituída por polinómios de :
  - grau 4 → grau 3 → grau 4

### – Trajectória 3-5-3

- constituída por polinómios de :
  - grau 3 → grau 5 → grau 3

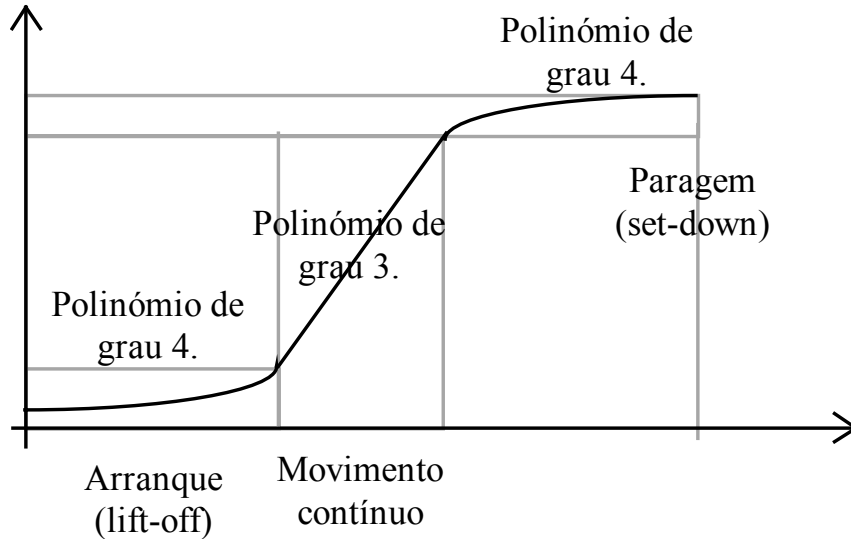
### – Trajectória 5 – Cúbica

- constituída por polinómios de :
  - grau 3 → grau 3 → grau 3 → grau 3 → grau 3

## Trajectória 4-3-4 (1º)

- Cada articulação tem 3 segmentos de trajectória, e cada segmento é aproximado por um polinómio de grau específico, respectivamente grau 4, grau 3 e grau 4:
  - o 1º segmento é um polinómio do grau 4 que especifica a trajectória desde a posição inicial até à posição de “lift-off”.
  - o 2º segmento é um polinómio de grau 3, que especifica a trajectória desde a posição de “lift-off” até à posição de “set-down”.
  - o 3º segmento é um polinómio de grau 4 que especifica a trajectória desde a posição “set-down” até à posição final.

## Trajectória 4-3-4 (2º)



Robots - (c)jacn- 02/03

271

## Trajectória 4-3-4 (3º)

Determinação dos coeficientes:

Para cada junção é necessário determinar os 3 diferentes polinómios à para um manipulador com N junções é necessário especificar 3N polinómios.

Para generalizar o método de cálculo é introduzida uma variável temporal normalizada , e que representa a evolução do tempo desde 0.0 até 1.0, ou de 0% a 100%, e que se consegue normalizando o tempo total. Esta variável permite tratar cada equação, para cada trajectória da mesma forma.

Variáveis:

- t: variável de tempo normalizada,  $t \in [ 0 , 1 ]$ .
- $\tau$  : tempo real em segundos
- $\tau_i$  : tempo real no fim do i-ésimo segmento de trajectória
- $t_i = \tau_i - \tau_{i-1}$  : tempo necessário para executar o i-ésimo segmento de trajectória

$$t = \frac{\tau - \tau_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}}$$

Robots - (c)jacn- 02/03

272



## Trajectória 4-3-4 (4º)

A trajectória consiste numa sequência de polinómios  $h_i(t)$ , que juntas, formam a trajectória para a articulação  $i$ .

1º Segmento:  $h_1(t) = a_{14}t^4 + a_{13}t^3 + a_{12}t^2 + a_{11}t + a_{10}$

2º Segmento:  $h_2(t) = a_{23}t^3 + a_{22}t^2 + a_{21}t + a_{20}$

3º Segmento:  $h_n(t) = a_{n4}t^4 + a_{n3}t^3 + a_{n2}t^2 + a_{n1}t + a_{n0}$

onde  $a_{ij}$ , corresponde ao coeficiente  $i$  da trajectória  $j$ .

Velocidade:

$$v_i(t) = \frac{dh_i(t)}{d\tau} = \frac{dh_i(t)}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\tau_i - \tau_{i-1}} \frac{dh_i(t)}{dt} = \frac{1}{t_i} \frac{dh_i(t)}{dt}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n$$

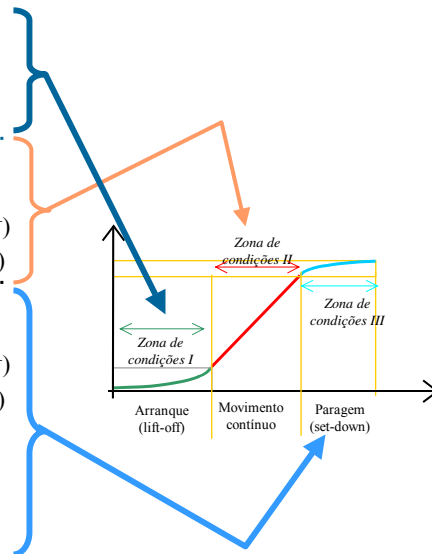
Aceleração:

$$a_i(t) = \frac{d^2h_i(t)}{d\tau^2} = \frac{1}{t_i^2} \frac{d^2h_i(t)}{dt^2}$$

## Trajectória 4-3-4 (5º)

### Condições de fronteira:

- Posição inicial:  $\theta_0 = \theta(t_0)$
- Velocidade inicial:  $v_0$
- Aceleração inicial:  $a_0$
- Posição de *lift-off*:  $\theta_1 = \theta(t_1)$
- Continuidade na posição em  $t_1$ ,  $\theta(t_1^-) = \theta(t_1^+)$
- Continuidade na velocidade em  $t_1$ ,  $v(t_1^-) = v(t_1^+)$
- Continuidade na aceleração em  $t_1$ ,  $a(t_1^-) = a(t_1^+)$
- Posição de *set-down*:  $\theta_2 = \theta(t_2)$
- Continuidade na posição em  $t_2$ ,  $\theta(t_2^-) = \theta(t_2^+)$
- Continuidade na velocidade em  $t_2$ ,  $v(t_2^-) = v(t_2^+)$
- Continuidade na aceleração em  $t_2$ ,  $a(t_2^-) = a(t_2^+)$
- Posição final  $\theta_f = \theta(t_f)$
- Velocidade final:  $v_f$
- Aceleração final:  $a_f$



## Trajectória 4-3-4 (6º)

### 1º Segmento de trajectória

$$h_1(t) = a_{14}t^4 + a_{13}t^3 + a_{12}t^2 + a_{11}t + a_{10}$$

$$v_1(t) = (4a_{14}t^3 + 3a_{13}t^2 + 2a_{12}t + a_{11})/t_1$$

$$a_1(t) = (12a_{14}t^2 + 6a_{13}t + 2a_{12})/t_1^2$$

Para  $t=0$ :

$$a_{10} = h_1(0) = \theta_0,$$

$$v_0 = a_{11}/t_1 \Rightarrow a_{11} = v_0 t_1,$$

$$a_0 = 2a_{12}/t_1^2 \Rightarrow a_{12} = a_0 t_1^2 / 2$$

resulta:

$$h_1(t) = a_{14}t^4 + a_{13}t^3 + (a_0 t_1^2 / 2)t^2 + (v_0 t_1)t + \theta_0$$

Para  $t=1$

$$v_1 = (4a_{14} + 3a_{13} + a_0 t_1^2 + v_0 t_1) / t_1$$

$$a_1 = (12a_{14} + 6a_{13} + a_0 t_1^2) / t_1^2$$

### 2º Segmento de trajectória

$$h_2(t) = a_{23}t^3 + a_{22}t^2 + a_{21}t + a_{20}$$

Para  $t=0$ ,

$$a_{20} = h_2(0) = \theta_2(0)$$

$$v_1 = a_{21}/t_2 \Rightarrow a_{21} = v_1 t_2$$

$$a_1 = 2a_{22}/t_2^2 \Rightarrow a_{22} = a_1 t_2^2 / 2$$

Como existe continuidade de trajectórias

$$v_1(1) = v_2(0) \text{ e } a_1(1) = a_2(0)$$

Para  $t=1$

$$h_2(1) = a_{23} + a_{22} + a_{21} + a_{20}$$

$$v_2(1) = (3a_{23} + 2a_{22} + a_{21}) / t_2$$

$$a_2(1) = (6a_{23} + 2a_{22}) / t_2^2$$

### Último segmento de trajectória:

$$h_n(t) = a_{n4}t^4 + a_{n3}t^3 + a_{n2}t^2 + a_{n1}t + a_{n0}$$

Robots - (c)jacn- 02/03

275

## Trajectória 4-3-4 (7º)

Fazendo  $t' = t-1$ , para  $t' = 0 \Rightarrow$  posição final, ou seja transformamos  $t$  para um novo  $t$  que varia de  $-1$  até  $0$ , na posição final. Repetindo o raciocínio do caso anterior, vamos determinar os parâmetros em questão, para  $t' = 0$ :

$$a_{n0} = h_n(0) = \theta_f$$

$$v_f = a_{n1}/t_n \Rightarrow a_{n1} = v_f t_n$$

$$a_f = 2a_{n2}/t_n^2 \Rightarrow a_{n2} = a_f t_n^2 / 2$$

Para  $t' = -1$ :

$$h_n(-1) = a_{n4} - a_{n3} + a_f t_n^2 / 2 - v_f t_n + \theta_f$$

$$v_n(-1) = (-4a_{n4} + 3a_{n3} - a_f t_n^2 + v_f t_n) / t_n$$

$$a_n(-1) = (12a_{n4} - 6a_{n3} + a_f t_n^2) / t_n^2$$

Como existe continuidade de trajectórias

$$v_2(1) = v_n(-1) \text{ e } a_2(1) = a_n(-1)$$

Recorrendo às condições de continuidade determina-se os restantes coeficientes dos polinómios 4-3-4.

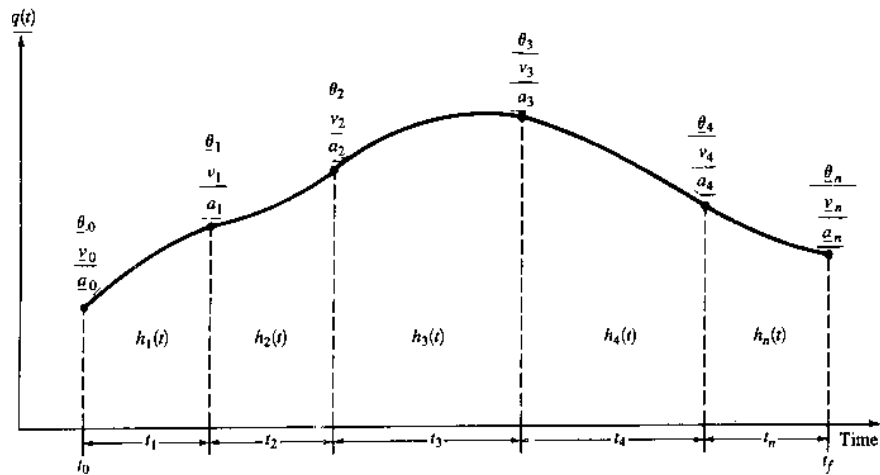
O procedimento de cálculo para a trajectória 3-5-3 é equivalente ao anterior (trajectória 4-3-4).

Robots - (c)jacn- 02/03

276

## Trajectoria 5 – cúbica (1º)

Cinco segmentos de trajetórias descritas por polinómios de grau 3.



Robots - (c)jacn- 02/03

277

## Trajectoria 5 – cúbica (2º)

Vantagens

- 1- é o menor grau polinomial que garante continuidade de aceleração e velocidade
- 2- reduz os cálculos computacionais e possíveis instabilidades numéricas

É necessário interpolar mais dois pontos para além do “lift-off” and do “set-down”, sendo para isso fornecido o tempo  $t_i$  para cada intervalo de interpolação

$$h_j(t) = a_{j3}t^3 + a_{j2}t^2 + a_{j1}t + a_{j0}, \quad \text{para } j = 1, 2, 3, 4, \dots, n$$

$$v_j(t) = (3a_{j3}t^2 + 2a_{j2}t + a_{j1})/t_j$$

$$a_j(t) = (6a_{j3}t + 2a_{j2})/t_j^2,$$

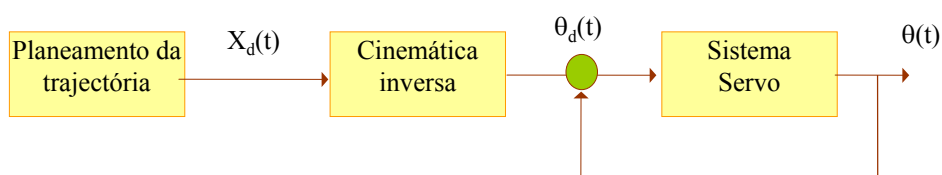
$$\text{e com } \tau_{j-1} \leq \tau \leq \tau_j \text{ e } t \in [0, 1].$$

Robots - (c)jacn- 02/03

278

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 1

Os sistemas Robotizados que utilizam Linguagens de programação, especificam por completo uma tarefa como uma sequência de pontos no espaço cartesiano, em que cada um é especificado recorrendo a uma transformação homogénea relacionando o sistema de coordenadas do manipulador com o do espaço de trabalho.

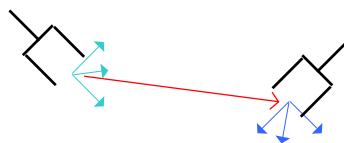


Robots - (c)jacn- 02/03

279

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 2

- Embora os pontos sejam descritos recorrendo a transformação  $\mathbf{H}[-]$ , não é especificada a trajectória entre pontos no espaço.
- Especifica-se a trajectória como sendo uma translação e duas rotações:
  - translação ao longo da linha que une os dois pontos
  - rotação de forma a fazer coincidir os vectores de aproximação
  - rotação em torno do eixo da ferramenta de forma a fazer coincidir os vectores de rotação.



Robots - (c)jacn- 02/03

280

### Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 3

Posições finais do manipulador  $\Rightarrow T_0^6 T_6^{tool} = C_0^{base}(t) P_{base}^{obj}$

com :

$T_0^6 \rightarrow$  matriz de transformação descrevendo a posição e orientação da mão em relação ao sistema de coordenadas da base

$T_6^{tool} \rightarrow$  matriz de transformação descrevendo a posição e orientação da ferramenta em relação ao sistema de coordenadas da mão

$C_0^{base}(t) \rightarrow$  matriz de transformação em **função do tempo** descrevendo o sistema de coordenadas de trabalho do objecto em relação ao sistema de coordenadas base.

$P_{base}^{obj} \rightarrow$  matriz de transformação descrevendo a posição e orientação da ferramenta em relação ao sistema de coordenadas de trabalho.

$T_0^6 T_6^{tool} \rightarrow$  descreve a posição do órgão terminal e a orientação do manipulador

$C_0^{base}(t) P_{base}^{obj} \rightarrow$  descreve a posição do objecto a manipular

pelo que :  $T_0^6 = C_0^{base}(t) P_{base}^{obj} \left[ T_6^{tool} \right]^{-1} \rightarrow$  descreve a configuração do manipulador para agarrar o objecto

### Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 4

Para  $n$  pontos consecutivos da trajectória vem:

$$T^6 T_i = C_i(t) P_i \quad T^6 T_1 = C_1(t) P_1$$

...

$$T^6 T_n = C_n(t) P_n$$

Nas posições definidas podemos calcular a distância entre 2 pontos consecutivos e se tivermos a velocidade lineares e angulares da mão podemos obter os tempos  $T_i$  de deslocação entre dois pontos consecutivos.

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 5

Aplicação:

$P_{ij}$  → posição  $P_i$  expressa em relação ao sistema de coordenadas  $j$   
 Posição 1 expressa em relação ao seu sistema de coordenadas:

$$T^6 T_1 = C_1(t) P_{11}$$

Posição 1 expressa em relação ao sistema de coordenadas da posição 2:

$$T^6 T_2 = C_2(t) P_{12}$$

$$P_{12} = C_2^{-1}(t) C_1(t) P_{11} (T_1)^{-1} (T_2)$$

O objectivo das equações anteriores é a determinação de  $P_{12}$  dada  $P_{11}$ .

Assim o movimento entre dois pontos consecutivos  $i$  e  $i+1$ , pode ser especificado de:

$$T^6 = C_{i+1}(t) P_{i,i+1} (T_{i+1})^{-1}$$

$$\text{para } T^6 = C_{i+1}(t) P_{i+1,i+1} (T_{i+1})^{-1}$$

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 6

Movimento entre posições:

1- Definir a transformação  $D$  tal que:  $P_{i+1,i+1} = P_{i,i+1} D(1)$

2- Define-se a variável  $\lambda$ , como sendo o tempo normalizado  $=t/T_i$  com  $t$  o tempo real desde o começo do movimento

$T_i$  tempo total para o segmento.

Na posição  $i \Rightarrow$  tempo real  $=0 \Rightarrow \lambda=0$

Na posição  $i+1 \Rightarrow$  tempo real  $=T_i \Rightarrow \lambda=1$

pelo que  $D(1) = (P_{i+1,i+1})^{-1} P_{i,i+1}$  com  $P_{i,i+1}$  e  $P_{i+1,i+1}$  expressas recorrendo a T.H.

De acordo com o exposto:  $D(\lambda) = L(\lambda) R_A(\lambda) R_B(\lambda)$

$$\text{Com } L(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda x \\ 0 & 1 & 0 & \lambda y \\ 0 & 0 & 1 & \lambda z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_A(\lambda) = \begin{bmatrix} S^2 \psi V(\lambda \theta) + C(\lambda \theta) & -S \psi C \psi V(\lambda \theta) & C \psi S(\lambda \theta) & 0 \\ -S \psi C \psi V(\lambda \theta) & C^2 \psi V(\lambda \theta) + C(\lambda \theta) & S \psi S(\lambda \theta) & 0 \\ -C \psi S(\lambda \theta) & -S \psi S(\lambda \theta) & C(\lambda \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_B(\lambda) = \begin{bmatrix} C(\lambda \phi) & -S(\lambda \phi) & 0 & 0 \\ S(\lambda \phi) & C(\lambda \phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sendo:

$$V(\lambda \theta) = 1 - \cos(\lambda \theta)$$

$$C(\lambda \theta) = \cos(\lambda \theta)$$

$$S(\lambda \theta) = \sin(\lambda \theta)$$

...

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 7

Resumo: Planeamento em S.C. Cartesianas

Para se mover de uma posição  $P_i$  para  $P_{i+1}$  a função de movimento  $D(\lambda)$  é calculada  $\Rightarrow D(\lambda) = L(\lambda)R_A(\lambda)R_B(Y)$ , com  $D(1) = (P_{i,i+1})^{-1}P_{i+1,i+1}$

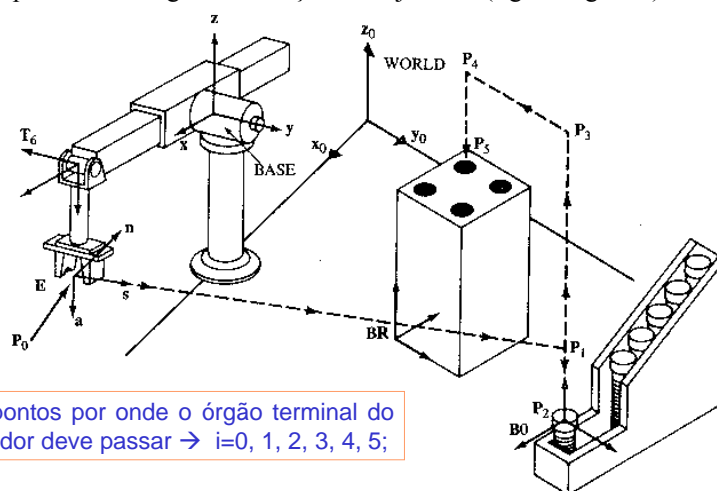
Pelo que  $T^6(\lambda)$  pode ser calculado recorrendo a  $T^6(\lambda) = C_{i+1}(\lambda)P_{i,i+1}D(\lambda)(T_{i+1})^{-1}$

De seguida é efectuado o calculo no modelo cinemático inverso, pois embora a definição da trajectória seja feita em termos de coordenadas cartesianas, a nível interno o sistema tem que ser controlado ao nível das variáveis articulares, ou seja temos que proceder à determinação das variáveis das junções.

Interpolação ao nível das junções

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 8

EXEMPLO: pretende-se as matrizes que descrevem o movimento do manipulador ao longo da execução da trajectória (figura seguinte)



## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 9

Na figura WORLD, BASE, INIT, B0, BR,  $T_6$ , E,  $P_i$ , são matrizes homogéneas de 4x4,

e sendo, BASE, INIT, B0, BR  $\rightarrow$  expressas relativamente ao sistema de coordenadas WORLD,

$T_6$   $\rightarrow$  expressa relativamente à BASE

E  $\rightarrow$  expressa relativamente a  $T_6$

$P_0$   $\rightarrow$  expressa relativamente a INIT

$P_1, P_2, P_3$   $\rightarrow$  expressas relativamente a B0

$P_4$  e  $P_5$   $\rightarrow$  expressas relativamente a BR

Equações que expressam o movimento em cada ponto:

$$P_0: \text{BASE } T_6 \text{ E} = \text{INIT } P_0$$

$$P_1: \text{BASE } T_6 \text{ E} = \text{B0 } P_1$$

$$P_2: \text{BASE } T_6 \text{ E} = \text{B0 } P_2$$

$$P_3: \text{BASE } T_6 \text{ E} = \text{B0 } P_3$$

$$P_4: \text{BASE } T_6 \text{ E} = \text{BR } P_4$$

$$P_5: \text{BASE } T_6 \text{ E} = \text{BR } P_5$$

## Planeamento de trajectórias no espaço cartesiano 10

Para se deslocar do Ponto P0 para P1:

$$T_6 = \text{BASE}^{-1} \text{INIT } P_{00} \text{ E}^{-1}, \text{ relativamente a } P_0$$

$$T_6 = \text{BASE}^{-1} \text{B0 } P_{01} \text{ E}^{-1}, \text{ relativamente a } P_1$$

resultando :  $P_{01} = \text{B0}^{-1} \text{INIT } P_{00}$

Assim o movimento de P0 para P1  $\Rightarrow$  que a configuração do manipulador deve passar de

$$T_6 = \text{BASE}^{-1} \text{B0 } P_{01} \text{ E}^{-1},$$

para

$$T_6 = \text{BASE}^{-1} \text{B0 } P_{11} \text{ E}^{-1},$$



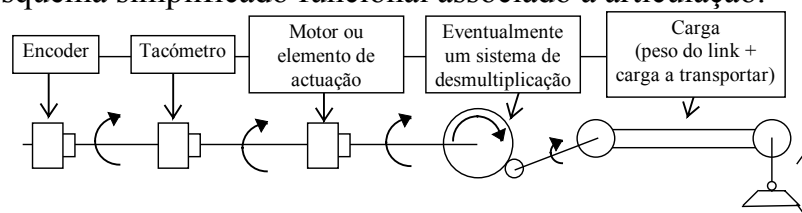
## Sensores em Robótica 1

Um robot é um sistema articulado de actuação estruturada e programável no espaço de trabalho. Isto significa que possui, mesmo que de forma elementar, sensores vários que asseguram a posição relativa de cada articulação, e eventualmente sensores exteriores para complementar a realização da tarefa de forma coordenada.

Em termos de controlo interno cada sistema articular possui, em geral, os seguintes elementos funcionais para que possa posicionar no espaço o pulso e consequentemente o efectuador. Estes são a base do controlo interno do sistema articulado. No entanto, existem, ou são usados, intensivamente, mais sensores, cujas funções podem ir da vigilância, ou seja protecção dos operadores, ao complemento do controle da tarefa a ser executada pelo robot.

## Sensores em Robótica 2

Esquema simplificado funcional associado a articulação.



Em termos de aplicação industrial de robots, podem ser considerados dois tipos de manipuladores, no que refere ao método de execução de tarefas. Eles são:

- robots sem sensores , ou com sensores elementares.
  - Na realidade não existem robots sem sensores, pois um *microswitch* de detecção de fim de curso pode ser considerado um sensor interno à estrutura.
- robots com sensores, ou robots inteligentes.

## Sensores em Robótica 3

---

Os primeiros a serem usados foram os robots sem sensores, que eram manipuladores munidos de um controlador e de sensores simples (tipo fins de curso) e que realizavam tarefas elementares, ou manipulavam peças simples e sempre em posições bem definidas.

Nestes casos o sistemas de controlo não era mais que um autómato, ou um processador, que assegurava de forma sequencial o desenrolar da tarefa, esta ultima sendo descrita por sequências de pontos, ou por movimentos limites (i.é da posição inicial até à posição final) de cada articulação.

Tais manipuladores tem o seu ambiente de trabalho bastante estruturado e controlado, o que obriga a uma periferia funcional organizada de forma concisa a fim de que as peças a manipular, ou a tarefa (p. ex. soldadura) a ser executada se encontrem sempre nas mesmas posições. Tais máquinas são sobretudo usadas em sistemas de produção de grandes séries.

## Sensores em Robótica 4

---

Em todo o processo de execução de uma tarefa tem que haver um sincronismo absoluto entre as várias partes do sistema global de trabalho, ou seja desde a chegada das peças, até à saída das partes manipuladas, tudo tem que ser sincronizado, de forma a evitar funcionamentos erróneos que obriguem a parar o sistema.

No entanto, a experiência mostra que as condições periféricas de trabalho mudam sempre em qualquer momento, o que significa que a taxa de exequibilidade de uma tarefa não é total. Por outras palavras existem sempre perturbações aleatórias de ordem vária que quando concorrem na execução da tarefa fazem com que o sistema de controle não seja capaz de responder adequadamente.

Os robots com sensores pretendem responder a estas situações, visando minimizar, ou anular, os erros de execução produzidos por tais situações aleatórias.

## Sensores em Robótica 5

Em geral, um robot com sensores, possui um sistema informatizado que integra várias informações provenientes dos sensores, trata os dados localmente, e que os envia ao controlador de tarefas a fim de corrigir, ou efectuar alterações “on-line”, durante a execução de uma tarefa.

Por outras palavras sistemas de integração funcional, em tempo real, que façam o tratamento de dados local e que facultem ao robot a inteligência reactiva ao acontecimento ou à mudança no meio, que qualquer ser humano normal possui.

Este é um dos parâmetros que define a flexibilidade de um manipulador: a sua capacidade de se auto-adaptar a modificações na tarefa, pela modificação automática das trajectórias, do controlo do programa, dos utensílios, da posição do efectuador, etc... .

## Sensores em Robótica 6

### Meio ambiente.

Um meio ambiente evolutivo é aquele onde o estado das condições no interior do volume de trabalho se alteram sem interferência directa do manipulador. Por vezes estas modificações podem ocorrer na sequência de uma execução, ou indirectamente da execução.

Diz-se que um robot tem um comportamento adaptativo quando, é capaz, por si só, de modificar a sequência de ordens, ou de movimentos, sem alterar o objectivo principal do programa em execução, em função de uma alteração das condições no seu volume de trabalho. Por outras palavras, **num meio evolutivo um robot deve ter um comportamento adaptativo.**

Para que esta afirmação seja verídica, é necessário que o robot seja capaz de **compreender** que ocorreu uma mudança no volume de trabalho, e de entender o sentido dessa alteração bem como as implicações que isso tem no desempenho da tarefa que está a executar. Tal é feito com a ajuda de sistemas sensoriais.

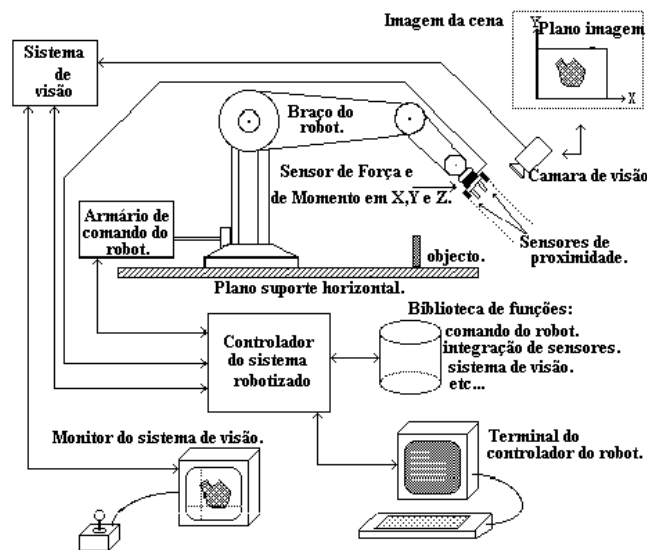
## Sensores em Robótica 7

Segundo esta óptica, um sensor, ou sistema sensorial, é composto por um dispositivo que actua como um interface inteligente, calibrado e adaptativo, entre o mundo de trabalho e o manipulador (i.e. sistema de controlo do robot).

A figura do slide seguinte apresenta um manipulador e alguns sensores que podem ser aplicados neste. A sua integração é fisicamente, e funcionalmente, concretizada no controlador do robot.

Aqui vão fluir todas as informações provenientes dos sensores e do sistema de visão e vão ser geradas ordens para a execução “inteligente” de tarefas onde o meio ambiente por mudar. As peças encontram-se neste exemplo colocadas num plano suporte horizontal, e são manipuladas algures dentro do volume de trabalho deste. Num exemplo industrial as peças poderiam chegar num tapete transportador e ser colocadas, após manipulação, num depósito específico, ou num tapete de saída.

## Sensores em Robótica 8



## Sensores em Robótica 9

No que respeita aos sensores estes podem ter dois tipos distintos de funcionamento:

- como sistemas de vigilância e protecção (evitamento de colisões, protecção de operadores, e do próprio braço articulado), e são o que se designa por sensores de segurança.
- os que efectuam a percepção de modificações durante a execução da tarefa, (partindo do principio que em situações de emergência graves o robot pára). Neste caso podemos considerar ainda a seguinte subdivisão:
  - evitamento de colisões entre robots, ou entre o robot e o meio ambiente de trabalho.
  - inspecção de peças a serem manipuladas ou de partes trabalhadas pelo manipulador mais efectuador (pinça ou utensílio), para efeitos de controle de qualidade.
  - determinação da orientação/posição de peças e de informações complementares sobre estas.

## Sensores em Robótica 10

Ao nível de execução de uma tarefa, pode-se considerar as seguintes situações de erro:

1. **erro fatal:** é aquele que obriga a parar a execução da tarefa, na medida em que a sua ocorrência implica a eventual destruição do braço, ou coloca em perigo o operador.
2. **erro de execução:** é aquela em que o seu aparecimento impede a realização da tarefa, sem colocar em risco nem o braço nem o operador.

Para cada um dos casos existem sistemas sensoriais que facultam dados ao controlador informações sobre o tipo de ocorrência de erro, mas a sua inclusão no braço pode trazer vantagens, mas igualmente inconvenientes, em particular no nível funcional.

Por outro lado, os sistemas sensoriais devem possuir saídas tais que sejam inteiramente compatíveis com o controlador, ou seja que possam ser integradas em tempo real na execução do programa, facultando uma adaptabilidade acrescida. Tais sistemas podem ser incluídos na robótica inteligente.

## Sensores em Robótica 11

Em geral os sensores devem proporcionar ao manipulador uma maior flexibilidade funcional, uma maior eficácia na execução das tarefas, aumentar a precisão relativa das posições, diminuir os erros de posição/orientação, evitar colisões e corrigir trajectórias.

Também é função destes fornecer informações sobre a possibilidade, ou impossibilidade de realização de uma tarefa, e salvaguardar operadores e máquinas durante a execução de programas.

Um último ponto refere-se à ligação, ou integração, de sensores : estes são efectivamente periféricos, o que obriga a uma partilha da utilização da estrutura de execução, a um interface apropriado e a um sincronismo coordenado, do fluxo de dados e informações, com o resto do processo, o que implica um aumento geral da complexidade dos sistemas.

## Sensores em Robótica 12

### Exemplo de uma tarefa “Pick and Place”.

A escolha dos sensores para um robot é função do tipo de tarefa que este realiza. Para cada tarefa diferente temos erros que podem por em causa a possibilidade de realização desta, enquanto que para outras tarefas executadas pelo mesmo robot os mesmos erros em nada afectam a execução.

Se se pretende construir um Manipulador Universal, capaz de responder como um ser humano em condições normais, então todo o tipo de sensores deve ser adicionado de maneira a aumentar ao máximo a autonomia funcional, e diminuir as condicionantes eventuais do meio exterior, possibilitando a percepção de todos os erros possíveis de ocorrer.

Por exemplo no caso de uma tarefa Pick and Place, a pior das situações que um robot pode encontrar é aquela em que :

- as peças a manipular possuem defeitos irregulares e aleatórios,
- onde a trajectória de transporte pode ficar obstruída,
- onde o local de aquisição e de deposição das peças pode ter erros de posição/orientação, ou estar mal preparado para receber os objectos.

## Sensores em Robótica 13

---

Para este tipo de tarefa os sensores a usar devem permitir avaliar e ponderar, segundo parâmetros bem definidos, sobre cada uma das ocorrências possíveis de erro.

No entanto se a tarefa for de soldadura em contínuo, os sensores a usar seriam diferentes, e o uso possível destes em nada, ou quase nada iria auxiliar no processo de compreensão do mundo exterior, ou da recuperação de erros.

Assim o problema resume-se a definir correctamente todos os sensores capazes de extrair informações sobre o que está a ocorrer durante o desenrolar da tarefa,

De forma a que o controlador seja capaz de corrigir, automaticamente, qualquer situação de erro, ou seja qualquer situação que possa colocar em risco o objectivo para o qual ele está a operar → a tarefa.

## Sensores em Robótica 14

---

### Classificação dos sensores.

Um sensor em robótica pode ser classificado de acordo com duas características:

- a natureza do funcionamento, o que está associado à grandeza a medir.
- o seu papel, ou contributo, no desempenho de uma determinada tarefa a ser realizada por um robot.

No que respeita ao papel podemos referir que a essência da medida e ao seu enquadramento temos dois tipos de sensores:

- Proprioceptivos: quando traduzem informações características sobre o estado interno do manipulador. Estes são frequentemente designados por Internos ao robot. As informações são a posição relativa da articulação, a velocidade e a aceleração.
- Exteroceptivos: quando fornecem informações relativas ao meio de trabalho (processos de reconhecimento) ou às interacções entre o manipulador e o seu meio ambiente.

## Sensores em Robótica 15

---

No que refere aos sensores Exteroceptivos, estes também são chamados de sensores Externos, cujas principais funções são as seguintes:

- robots móveis (navegação),
- identificação de objectos,
- manipulação de objectos.
- Contribuição em termos de informação para qualquer ocorrência que coloque em questão a realização da tarefa

Em relação ao seu funcionamento físico, os sensores são classificados como:

- Activos: quando funcionam em emissão/recepção.
- Passivos: quando se limitam a receber informações provenientes do exterior.

## Sensores em Robótica 16

---

Principais tipos de sensores usados em robótica.

Em robótica usam-se vários tipos de sensores, função das especificações e particularidades da tarefa a ser executada. No entanto uma divisão base pode ser proposta, fundamentada no processo de funcionamento, e que divide os sensores em sensores de contacto (que medem a grandeza por contacto com o objecto) e sem contacto (que não precisam de contacto com o objecto para procederem à medida). A seguir resume-se a base dos principais sensores usados em manipuladores e em robótica móvel.

Os principais sensores de contacto são:



# Sensores em Robótica 17

## O Microswitch

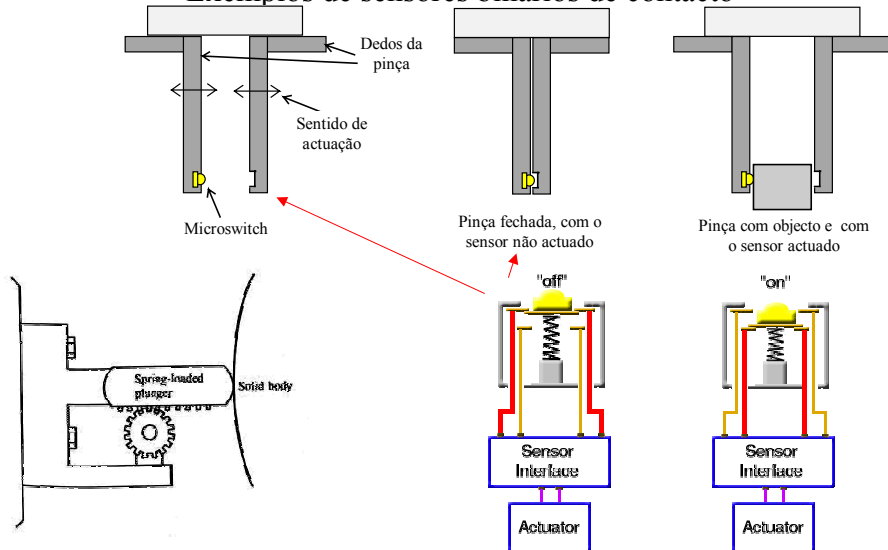
Basicamente é um interruptor. Este sensor pode ser usado de diversas formas, a mais simples como limitador de fim de curso de trajetórias executadas pelo manipulador, como é o caso dos sistemas articulados mais simples .

Nos sistemas articulados simples, os sensores de fim de curso são usados para delimitar os pontos extremos do movimento da articulação, pelo que programar estes manipuladores para tarefas diferentes não é mais que definir a posição do fim de curso correspondente à posição limite do link.

Outro dos usos que lhe está atribuído é como detector de prensão, onde este é colocado dentro da pinça. Neste caso quando um objecto é adquirido o sensor é actuado, enviando para o sistema a informação de que um objecto está entre os dedos do efectuador. Por vezes usam-se mais que um microswitch, de forma a termos uma informação redundante mas mais correcta do processo de prensão.

# Sensores em Robótica 18

## Exemplos de sensores binários de contacto

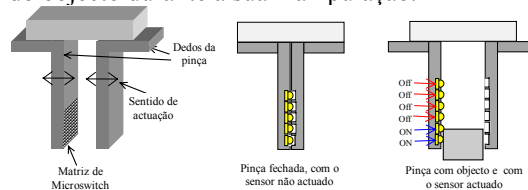


# Sensores em Robótica 19

## Matriz ou superfície de contacto

Normalmente são usados microinterruptores, sendo o seu maior campo de aplicação a detecção da presença de objectos nas garras do manipulador. Se se movimentar a mão ao longo de um objecto e tomarmos sequencialmente contacto com a sua superfície é possível centrar a mão para agarrar os objectos. Se usarmos vários sensores binários pode aumentar-se a informação táctil.

A informação produzida por este tipo de sensor é binária, não nos facultando assim, uma distribuição quantitativa da força de prensão e da força de reacção, mas apenas uma informação sobre distribuição da presença do objecto na pinça. A análise desta informação permite saber se há, ou não, deslizamento do objecto durante a sua manipulação.

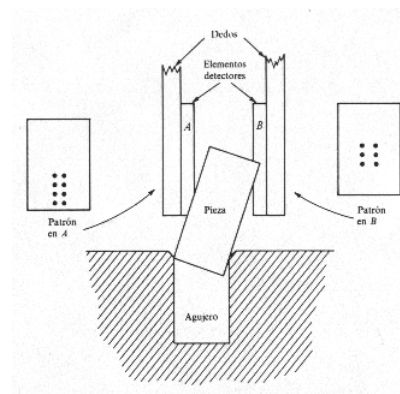
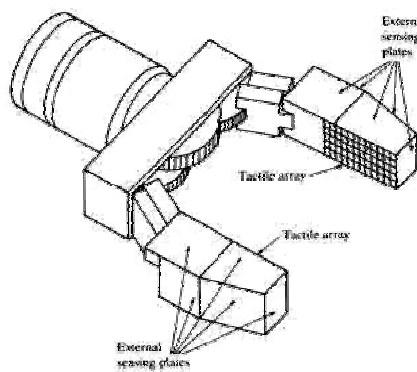


Robots - (c)jacn- 02/03

307

# Sensores em Robótica 19-b)

## Matriz ou superfície de contacto(2)



Robots - (c)jacn- 02/03

308

## Sensores em Robótica 20

### Sensor de força de aquisição

Este sensor mede a força aplicada ao objecto a ser adquirido. O problema que pretende resolver é o da medida das várias forças que podem ocorrer durante a execução de uma tarefa, forças essas que podem ser produzidas e aplicadas em vários pontos da estrutura do efectuador.

Em geral as forças que requerem uma maior atenção são as que são aplicadas no/pelo efectuador, na medida que estão directamente relacionadas com o objecto e com o efectuador, mas também com toda a estrutura articulada. Podem também ser medidas forças várias numa tarefa, onde o efectuador seja um utensílio, como é o caso de um sistema de corte ou de fresagem.

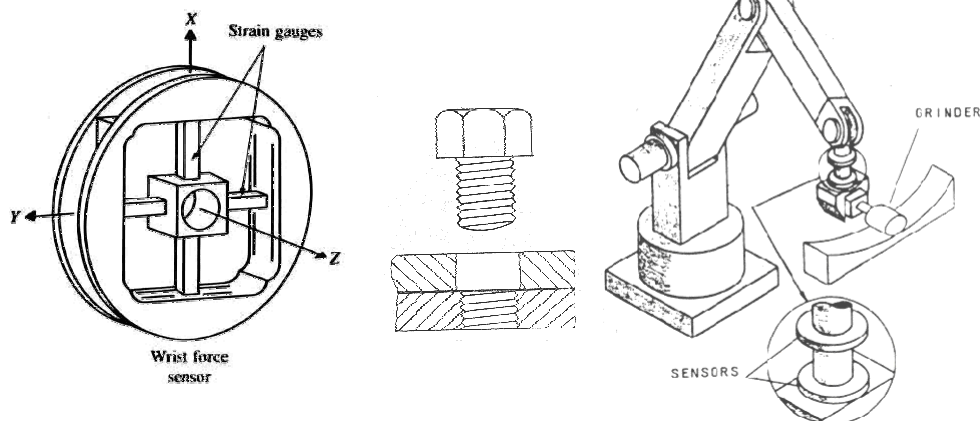
Nestes casos há que conhecer várias forças de reacção, de compressão, de corte, torção, etc... que aparecem no processo.

Robots - (c)jacn- 02/03

309

## Sensores em Robótica 21

### Sensor de força de aquisição



Robots - (c)jacn- 02/03

310

## Sensores em Robótica 22

### Sensor de pressão

Sensor de pressão (força distribuída nos dedos da pinça), também é chamado de “pele artificial”. A atenção dada às forças ao nível da pinça levaram ao desenvolvimento de sensores específicos para medida das forças no efectuador. Estes fundamentam o seu funcionamento através do toque entre os dedos da pinça e o objecto, e com uma matriz de sensores que medem a força, o deslocamento ou a torção, a deformação, etc.. do objecto nos dedos da pinça. Nos sensores de tacto analógicos a saída é proporcional à força exercida.

Existem vários tipos, diferenciando-se pelo modo de funcionamento.

Caso de matriz de eléctrodos em contacto eléctrico com um material condutor cuja resistência varia em função da pressão. Os objectos ao comprimirem a superfície condutora causam deformações locais que são medidas como variações contínuas da resistência. Um material condutor (grafite) é colocado entre um eléctrodo comum e uma matriz de eléctrodos. Cada eléctrodo é constituído por uma área rectangular que define um ponto de tacto. A corrente flui desde o eléctrodo comum até cada um dos eléctrodos sensitivos e varia em função da compressão do material condutor.

## Sensores em Robótica 23

### Sensor de pressão (2)

Na figura A pares de eléctrodos são colocados num mesmo substracto com circuitos electrónicos activos. O material condutor é colocado por cima dos substracto e isolado, excepto nos eléctrodos. A resistência varia com a compressão e é interpretada pelos circuitos electrónicos activos.



Figura B

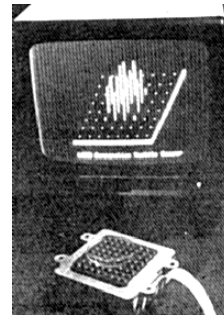


Figura A

Na figura B o material condutor é colocado entre duas matrizes de eléctrodos finos e flexíveis que se cruzam. Cada intersecção é um ponto de tacto. Alterações na resistência são medidas fazendo o varrimento sucessivo dos eléctrodos e medindo a corrente em cada um desses elementos da matriz. Existem variantes destas “peles artificiais”, baseados em por exemplo no efeito piezoeléctrico, ou na análise de deslocamento de sombras em elementos transparentes.

## Aplicação de sensores de força e momento (1)

Usam-se por exemplo, para apertar parafusos, uma operação monótona e comum quando é realizada por humanos. Para que seja realizada por robots, estes deverão possuir sensores de força e momento.

As operações envolvidas neste processo são:

- Agarre do parafuso. O sensor é utilizado para determinar se o parafuso foi bem preso;
- Posicionamento do parafuso;
- Apertar o parafuso. O sensor é utilizado para exercer força constante sobre o parafuso na direcção de aperto;
- Interromper o aperto do parafuso. O sensor é utilizado para identificar o final do movimento de aperto.

**Numa primeira operação**, o robot utiliza um encaixe automático para prender a cabeça do parafuso. O sensor de força identifica a adição de peso e a partir de um sinal enviado para o computador que controla o braço, o processo vai para a próxima operação.

## Aplicação de sensores de força e momento (2)

**Numa segunda** operação, o robot posiciona o parafuso, apertando-o sobre a chapa. O robot não tem noção da força a ser aplicada no aperto e é através de um sensor de força que o sinal é enviado para o computador indicando que uma forte força está a ser aplicada sobre o parafuso. O robot pára o trabalho, e o controlador faz "reset" ao programa.

- O excesso de força exercida sobre o parafuso, pode ser devido as seguintes circunstâncias:
- O furo superior da chapa foi colocado erradamente ou não existe;
- O furo é pequeno ou o parafuso é largo;
- A garra é colocada erradamente.

**Numa terceira operação**, o parafuso é apertado, a partir da aplicação de uma força constante sobre a cabeça do parafuso.

**Numa quarta operação**, o aperto do parafuso é interrompido. Quando o parafuso chega ao final de seu curso, o sensor notifica um incremento de momento do parafuso para o controlador

## Sensores em Robótica 24

### Sensor de força do braço e do pulso

Além da força exercida pelos dedos no objecto, há ainda a força exercida ao nível do pulso e do braço, e que obriga, eventualmente, ao seu controlo. Geralmente os sistemas manipuladores com utensílio, ou pinça, dedicados possuem um ponto de maior fragilidade, por onde se pode quebrar o pulso a fim de evitar danificar a restante estrutura, e isto devido aos custos envolvidos, o que é mais uma razão para se efectuar o controlo das forças em jogo.

Os sensores usados neste caso consistem num sistema triaxial de medida de forças e momentos, segundo as direcções X, Y e Z do frame do efectuador, sistemas estes constituídos por um conjunto de extensómetros que permitem medir a deformação de elementos segundo cada uma das direcções definidas.

Note-se que este sistema é a base do controlo de posição em operação de inserção de objectos em orifícios, com ou sem compliance, na medida em que evitam, ou permitem controlar as forças de reacção em jogo produzidas pelo exterior no manipulador

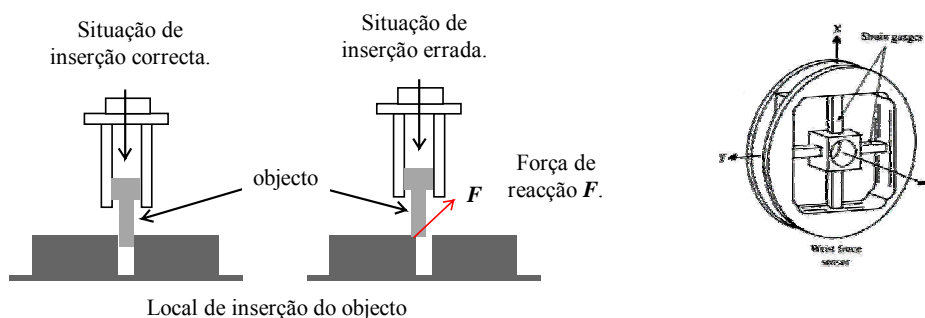
Robots - (c)jacn- 02/03

315

## Sensores em Robótica 25

### Sensor de força do braço e do pulso

Ao nível do braço podem ser usados vários sistemas de medida de força, mas o mais usual é medir a carga associada a cada link - por exemplo em sistemas de actuação por motor eléctrico, é usual colocar-se uma resistência de baixo valor em série com a alimentação, e medir a variação da corrente, em função da variação da carga mecânica que o braço transporta. Uma curva de calibração é naturalmente necessária.



Robots - (c)jacn- 02/03

316

## Sensores em Robótica 26

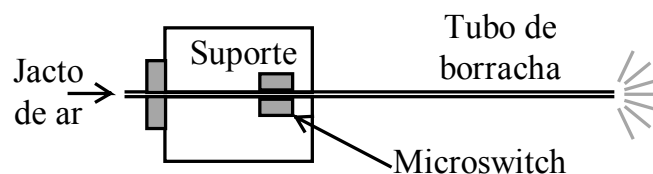
### Sensor de deslizamento

- O sensor de deslizamento do objecto na pinça pretende fazer a detecção de movimento do objecto em relação aos dedos da pinça. Dois tipos de informação podem ser produzidas: detecção de deslizamento (tipo on/off), e determinação da direcção e da distância do deslizamento.
- Embora as peles artificiais sejam capazes de fornecer informações sobre a ocorrência de deslizamento do objecto na pinça, no decurso de uma tarefa, existem sistemas mais simples cujo emprego se justifica em função do tipo de tarefa a executar e do contexto geral onde se insere o robot (técnico, produtivo e financeiro). Estes são baseados num elemento em tudo similar ao rato de usado nos computadores - uma esfera dentro de uma estrutura com dois codificadores de posição angulares, colocada dentro da pinça, permite verificar se há um deslizamento, e qual o seu sentido, de maneira a que medidas correctivas possam ser tomadas.

## Sensores em Robótica 27

### Antena de contacto (1) [ou sensores de pêlo]

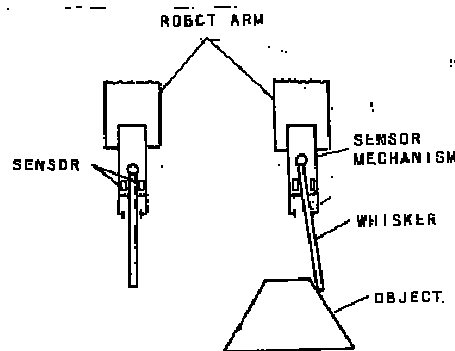
Este sensor é extremamente simples- ele consiste numa antena, em geral em borracha flexível, por onde passa um jacto de ar, mecanicamente conectada a um, ou mais, microswitch. A borracha é usada para não danificar o sensor ou os objectos com que este contacte. Por vezes usa-se um jacto de ar para manter o elemento de contacto hirto. Quando não há contacto o sensor não é actuado, mas desde que se verifique um contacto, então o microswitch é actuado, indicando que naquele ponto da trajectória há um objecto. A figura seguinte ilustra um desses sistemas.



## Sensores em Robótica 28

### Antena de contacto (2) [ou sensores de pêlo]

O nome deste sensor indica o seu modo de operação. Os sensores de pêlo, são varas leves e salientes do actuador. Como os pêlos de um gato, eles sinalizam o contacto com algum objecto no ambiente.



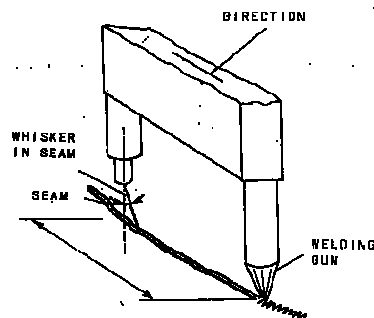
Robots - (c)jacn- 02/03

319

## Sensores em Robótica 29

### Antena de contacto (3) [ou sensores de pêlo]

O contacto com um objecto externo, move o pêlo, causando a transmissão de um sinal eléctrico. O controlador, então obtém instruções apropriadas para o braço do robot. Estes sensores, são extremamente delicados e sensíveis a choques. Portanto, frequentemente quebram. Entretanto, eles tem algumas aplicações práticas. Por exemplo, podem ser usados para medir os contornos e superfícies de objectos, como mostra a seguinte figura, no controle de soldagem:



Robots - (c)jacn- 02/03

320



## Sensores em Robótica 30 (sem contacto)

Os principais sensores sem contacto são divididos em dois grandes grupos:

1. os sistemas de visão (com e sem iluminação estruturada).
2. sensores de proximidade e que podem ter uma saída binária que indica a presença de um objecto no espaço e dentro da sua área de funcionamento, ou uma saída analógica facultando uma variação contínua da distância ao sensor. São usados no processo de aquisição de objectos e no evitamento de obstáculos. Podemos referir os seguintes sensores de proximidade: sensores indutivos, capacitivos, optoelectrónicos e ultra-sónicos.

## Sensores em Robótica 31 (sem contacto)

### Sensores indutivos

Baseiam o seu funcionamento na mudança da indutância devido à presença de um objecto metálico nas imediações. Quando um objecto entra e sai do campo magnético, as alterações resultantes nas linhas fluxo induz uma corrente no enrolamento cuja amplitude e forma são proporcionais à taxa de alteração no fluxo. O sinal de tensão à saída do sensor depende da interacção do objecto com o sensor, isto é se o objecto está a entrar ou a sair do campo de acção do sensor. O sensor requer movimento para produzir uma forma de onda.

### Sensores capacitivos

Em termos de funcionamento são similares aos indutivos, mas detectam particularmente materiais ferromagnéticos. Baseiam-se na detecção duma alteração na capacidade induzida por uma superfície colocada perto do sensor. O sensor é composto por um eléctrodo sensitivo e um eléctrodo de referência separados por um material dieléctrico. Pode usar-se o sensor capacitivo como parte de um circuito oscilador, desenhado de forma a oscilar quando a capacidade do sensor exceder um dado valor. Essa oscilação é traduzida numa tensão de saída que indica a proximidade dos objectos. Uma solução mais elaborada é a de usar o elemento capacitivo como parte de um circuito que está constantemente a ser referenciado por uma onda sinusoidal. Uma alteração na capacidade produz um deslocamento de fase entre o sinal de referência e o sinal vindo do condensador.

## Sensores em Robótica 32 (sem contacto)

### Sensores optoelectrónicos

Os sensores optoelectrónicos detectam a proximidade de um objecto pela sua influência num sinal luminoso enviado por um dispositivo emissor. Têm a vantagem de ter um reduzido tamanho, boa fiabilidade, baixo consumo de energia e longa duração.

São constituídos por um emissor (geralmente um LED), que funciona como transmissor de luz infravermelha, e um fotodíodo que funciona como um receptor.

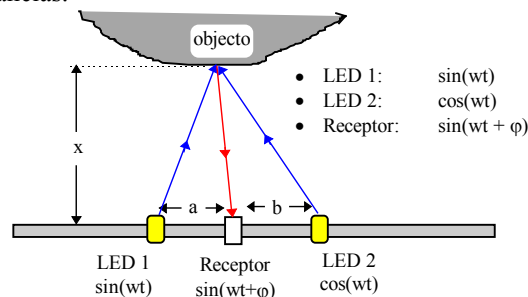
Estes são usados quer nas extremidades dos dedos da pinça para permitir saber a que distância se encontra o objecto ou o fundo de trabalho, dentro dos dedos da pinça para (por interrupção do feixe) saber se há ou não um objecto, como encoder óptico nas variáveis articulares, e como dispositivo de segurança na periferia do braço, ou então montados nos vários links para indicar se algum objecto se aproximou (entrando em linha de conta com as posições relativas destes que podem provocar respostas extemporâneas.

Em geral é com o funcionamento em reflexão directa sobre o objecto que são usados.

Podem existir variantes construtivas destes no que refere ao numero de fotoemissores usados: ou se usam 2 ou 4 o que permite determinar a distância ou a distância e a inclinação da superfície do objecto que se encontra em frente do sensor.

## Sensores em Robótica 33 (sem contacto)

A figura seguinte ilustra um destes elementos com 2 LED's e que é usado para medir distâncias.



A expressão que permite calcular  $x$ , é:  $\varphi = \arctg \left[ \frac{a^2 + x^2}{b^2 + x^2} \right]^{\frac{3}{2}}$ , onde  $\varphi$  é a diferença de fase entre os dois sinais enviados pelos LED's,  $a$  e  $b$  é a distância entre cada LED e o fotoreceptor (em geral  $a+b$  é de cerca de 4 cm) e  $x$  é a distância que se pretende determinar.

## Sensores em Robótica 34 (sem contacto)

### Sensores ultra-sónicos

Os sensores por ultra-sons são usados para a detecção de objectos e cálculo de distâncias.

As ondas ultra-sónicas ao propagarem-se num meio e chocarem com outro meio diferente uma parte delas são reflectidas até à sua origem. Tendo em conta a velocidade de propagação e o tempo que medeia entre a emissão e o seu retorno pode calcular-se a distância até ao objecto.

Como gerador e detector usam-se transdutores piezoelétricos, gerando uma tensão eléctrica proporcional à pressão exercida à superfície e vice-versa. O maior uso destes sensores verifica-se na determinação de distâncias relativamente grandes dadas as suas características funcionais. São especialmente usados em robótica móvel para determinarem distâncias aos objectos do meio ambiente, e encontram-se dispostos em bateria de elementos na periferia do robot móvel.

Há ainda sensores acústicos que podem ser usados mas com o objectivo de permitirem detectar ou discriminar sons diferentes no ambiente de trabalho. Assim, podem ser usados como sistemas de medida de sons anómalos (caso de fracturas de materiais, ou sons de auxílio, tipo ordens de um operador, em situações de emergência), ou ainda como processo de comunicação evoluído entre um operador e o controlador do robot (sistemas STT - Speech To Text, ou de interpretação automática de palavra).

## Sensores em Robótica 35 (sem contacto)

### Sistemas de visão 1

### *[objectivos]*

Os sistemas de visão são o sensor preferencial em robótica. O seu principal objectivo é de adquirir informações específicas sobre a posição e orientação dos objectos ou de pontos destes, a saber :

- inspecção visual de objectos, do objecto do trabalho e da envolventes dos robots.
- detecção de objectos no plano suporte horizontal.
- orientação e localização de objectos 2D e 3D.
- reconhecimento de objectos.
- determinação de pontos de aquisição para a pinça.
- extracção de características referentes aos objectos e ao meio.
- aprendizagem de objectos e do meio ambiente (robótica móvel).

## Sensores em Robótica 36

### Sistemas de visão 2

[objectivos]

- determinação de distâncias.
- controlo da qualidade das peças trabalhadas.
- controlo da qualidade do objecto do trabalho (caso de um utensílio- por exemplo de uma soldadura, ou de um corte realizado por um manipulador com um utensílio apropriado).
- condução de robots (manipuladores e móveis). Aqui podem-se usar uma só câmara montada num ponto estratégico do robot, ou várias câmaras (visão binocular ou visão trinocular com, ou sem iluminação activa, para o reconhecimento do espaço envolvente de trabalho).
- movimento de um objecto.

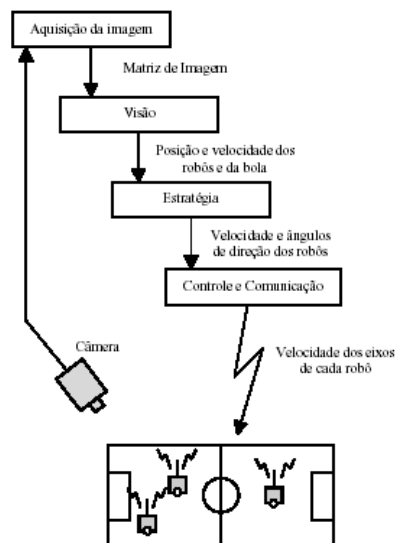


Robots - (c)jacn- 02/03

327

## Sensores em Robótica 37

Exemplo de sistema de controlo de robots-ratos.



Robots - (c)jacn- 02/03

328

## Grandezas medidas por sensores em robótica

### Grandezas medidas por sensores em robótica

De um ponto de vista de funcionamento do sensor, há que definir as grandezas que vamos medir, na medida em que um sensor efectua a transformação de uma grandeza numa outra capaz de ser compreendida pelo sistema de controle. As principais grandezas medidas em robótica são:

- Tacto: responde a força de contacto com outro objecto
- Proximidade: indicam se um objecto está próximo do sensor, antes de ocorrer contacto.
- Distância. Os sensores de distância medem a distância de um ponto do objecto ou do ambiente ao sensor (ponto de referencia), dentro do raio de acção do sensor. São usados para navegação, evitamento de colisões, segurança e presença de objectos em locais específicos onde se encontrem. Podemos considerar dois tipos de distancias (grandes e pequenas) a serem medidas, e isto à escala de funcionamento do robot:
  - Para medida de pequenas distâncias usam-se os sensores capacitivos, indutivos ou magnéticos.
  - Para medida de grandes distâncias longas usam-se sistemas baseados em ondas rádio (radares), ou sistemas baseados em ondas sonoras (vulgo sonar).

## Grandezas medidas por sensores em robótica

Cada um destes sistemas possui técnicas específicas ao método de medida. As técnicas mais utilizadas são: Triangulação, Luz estruturada e Tempo de voo:

- Triangulação: neste técnica o objecto é iluminado por um feixe de luz muito fino (i.é fortemente direccionado) que reflecte na superfície dos objectos. Se o detector for focado numa parte muito estreita do objecto, o que ele vê é um ponto de luz. Quando o detector “sentir” o ponto de luz, a sua distância  $D$  ao objecto pode ser calculada de forma trigonometria desde que se conheça a distância entre a fonte de luz e o detector, bem como o ângulo entre o detector e a linha que une a fonte ao detector. Se o conjunto fonte/detector se mexer num plano fixo é possível obter um conjunto de pontos cuja distância até ao detector são conhecidas.

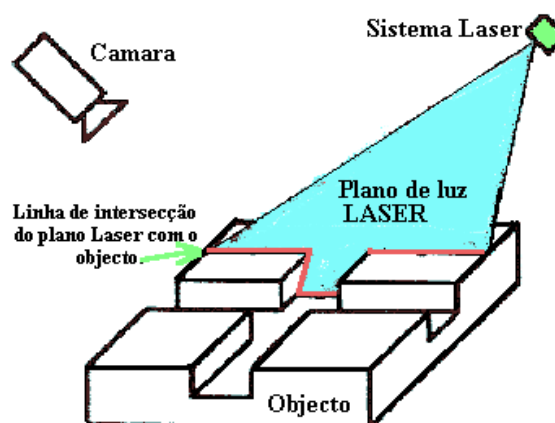
## Luz estruturada

Luz estruturada: projecção de um padrão de luz (geralmente laser embora se possa usar uma fonte corrente de incandescência com um sistema óptico apropriado) num conjunto de objectos. Usa-se a distorção do padrão para calcular a distância aos objectos. A projecção de um plano ( ou de uma forma predefinida) de luz nos objectos cria uma risca (ou uma forma distorcida) de luz que é vista através de uma câmara colocada a uma distância B da fonte de luz.

O comportamento da risca de luz permite obter uma análise da distância aos objectos (uma inflexão indica uma mudança de superfície, e uma descontinuidade corresponde a um intervalo entre superfícies). Os sistemas são dispostos de tal forma que a fonte de luz e a câmara estão à mesma altura, e o plano de luz é perpendicular à linha que une a origem da fonte de luz e o centro das lentes da câmara.

Plano de referência => plano vertical que contém a recta que une a fonte de luz e o centro das lentes; perpendicular ao plano de luz. Com esta disposição a câmara está colocada de tal forma que qualquer risca vertical aparece também vertical na imagem. Logo todos os pontos na mesma coluna na imagem têm a mesma distância ao plano de referência

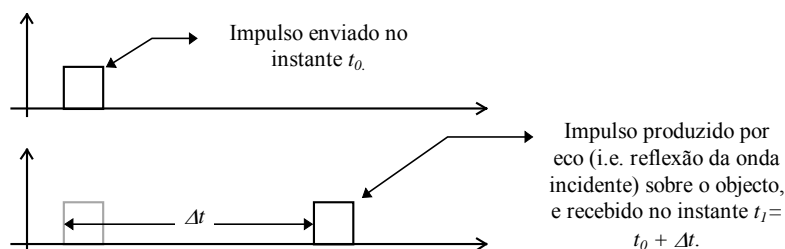
## Exemplo de sistema de iluminação laser



## sistema laser

Tempo de voo. Há duas técnicas básicas usadas:

- i) Envio e recepção de um impulso: Medição do tempo que um impulso de luz (laser pulsado) ou ultra-som demora desde que é emitido até à recepção do impulso reflectido pela superfície, ao longo de um mesmo caminho. No caso de se usar feixe laser, a determinação da distância é calculada por  $D = c \cdot T / 2$ , onde  $T$  é o tempo de voo e  $c$  a velocidade da luz. Para medir o tempo  $T$  são necessários instrumento com grande precisão para detectar variações pequenas de distâncias. A detecção de variações de mm implica  $DT$  na ordem dos pico segundos (ps).



Robots - (c)jacn- 02/03

333

## Sistema laser

- ii) Feixe de laser contínuo (desvio de fase): Consiste na medição do desvio de fase entre o feixe emitido e o reflectido. O feixe de luz com comprimento de onda  $\lambda$  é dividido em 2 feixes. Um feixe é designado por feixe de referência e viaja uma distância :  $D_{ref} = L$ . Um feixe viaja uma distância  $D$  até ao objecto, é reflectido e viaja  $D + L$ :  $D' = L + 2D$ . Se  $D = 0$  então,  $D' = D_{ref}$  o que significa que chegam à mesma altura ao medidor de fase logo, a diferença de fase é nula. Se  $D$  aumenta, então o desvio de fase é tal que  $D' = L + q\lambda/360$ , se  $q = 360^\circ$  as duas forma de ondas estão novamente alinhadas, pelo que não se obtém resultados práticos. Uma solução consiste em modular o feixe em amplitude com uma forma de onda de muito maior comprimento de onda, o sinal de referência passa a ser a função moduladora.

Robots - (c)jacn- 02/03

334

## Outros sensores

---

- Temperatura. A medida da temperatura é fundamentalmente usada para supervisionar e controlar as condições de trabalho no meio ambiente, e em alguns casos, dos objectos manipulados. É, pois, uma grandeza controlada para efeitos qualitativos sobre o objecto do trabalho. Por vezes, e durante a realização de uma tarefa, é necessário medirem-se dados referentes aos objectos, ou ao meio ambiente, pelo que se usam sensores de calor. Estes permitem controlar a temperatura, e os mais usados são os bimetálicos, os termopares e os termistores, muito embora existam vários sistemas que efectuem a medida de temperatura, como é o caso dos pirómetros.
- *Sensores de gases*. Tal como os sensores de temperatura não são directamente usados no controlo do braço, mas antes no controlo do meio ambiente, para a monitorização de tarefas específicas. Eles baseiam o seu funcionamento em reacções químicas que provocam expansão ou libertação de calor, e de oxigénio. A sua utilização é muito restrita em robótica.

## *Sensores internos 1*

---

Os Sensores Internos são elementos de feedback do sistema de controlo do robot, e tal como foi já referido, permitem efectuar o controlo da posição, da velocidade e da aceleração das várias junções, durante a execução de uma trajectória. São os seguintes os sensores usados:

- Sensores de posição: permitem o controlo da posição e orientação pretendida. Estes podem ser os seguintes:
- Potenciómetros: são elementos analógicos de medida solidários com a estrutura articular e que funcionam como divisores de tensão, ou seja a tensão de saída é proporcional à posição do cursor. Podem ser lineares ou circulares conforme o tipo de articulação.



## *Sensores internos 2*

- Encoders ópticos são elementos digitais de dois tipos (incrementais ou absolutos) dependendo de saída:
  - incremento: elemento transparente (vidro, plástico, etc...) solidário com a parte móvel, com riscas opacas e/ou riscas reflectoras colocadas alternadamente. Um fotodíodo (ou outra fonte de luz) é colocada de um dos lados do disco, ou de forma a “sentir” a alternância associada ao movimento. Um receptor óptico é colocado no lado oposto. A saída do fotoreceptor é um trem de impulsos cuja frequência é proporcional à velocidade de rotação dos disco. Para se obter informação de direcção usam-se 2 conjuntos de fotodíodos e 2 conjuntos de fotoreceptores desfasados de 90°. Contando os impulsos e tendo conhecimento da posição inicial é possível determinar a posição actual.
  - absoluto: não é necessário o conhecimento da posição inicial. Existem mais pistas e um número de pares fototransmissores e fotoreceptores iguais ao número de pistas. As pistas estão alinhadas por forma a que o número binário resultante forneça o valor do ângulo de rotação.  
Resolução :  $2n$

## *Sensores internos 3*

- Resolvers (RVDT): elemento analógico, constituído em geral por rotor (uma bobine) e estator (duas ou quatro bobines), e cuja saída é proporcional ao ângulo de rotação. O rotor é excitado com sinal  $A \cdot \sin(\omega t)$ , o sinal aos terminais do estator recolhido sendo,  $v_{s1} = A \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(q)$  e  $v_{s2} = A \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(q)$ , onde  $q$  ângulo do rotor relativamente ao estator. O sinal de excitação é sinusoidal.
- Sensores de velocidade.  
Efectuam a medida da velocidade de cada articulação, e os sensores mais usuais são:
  - tacómetro DC.
  - gerador DC, cuja tensão de saída é proporcional à velocidade angular da armadura, e dado pela expressão :  $V_o(t) = K \cdot \omega$

## *Sensores externos*

---

Os sensores externos objectivam facilitar a execução de tarefas em ambiente evolutivo. Estes permitem, com linguagens de alto nível de programação:

- uma programação mais simples (na execução de tarefas complexas), dado que parte da tarefa de controlo local on-line, é deixado a cargo dos sensores e do controlador inteligente do robot. Uma tarefa, neste contexto, passa a ser definida por uma instrução de MOVE P1, P2 com um controle intrínseco do meio ambiente e das peças.
- menos restrições nos mecanismos de controlo, dado que a flexibilidade geral aumenta.
- sistemas mais versáteis (melhor adaptação a um maior número de tarefas a executar), e logo uma maior flexibilidade na execução, e nas séries de peças a serem produzidas/manipuladas.

## *Programação de robots 1*

---

Um programa de robot pode ser definido como um conjunto de pontos para os quais o robot se desloca, logo programar um robot consiste em ensinar ao robot a sequência de movimentos, e de pontos que este tem que efectuar para realizar uma determinada tarefa.

Nesses pontos, ou pelo menos em alguns deles, o robot pode ter de desempenhar certas acções, como abertura/fecho do gripper, mas também integrar informações provenientes de várias fontes de informação, sensores sistemas de coordenação funcional, supervisores de célula de trabalho, etc..., específicas e ligadas ao robot.

## *Programação de robots 2*

---

- Métodos de programação.

Programar um robot é definir-lhe a sequência de pontos, com maior ou menor autonomia, que tem que “visitar” para realizar uma tarefa, mas também onde informação vária é produzida durante o decorrer da tarefa, possa ser incluída. Há basicamente dois métodos de programação de robots:

- por demonstração (guidance): manual ou “teach box” , ON-LINE
- linguagens de programação: AL, AML, ..., ON-LINE e OFF-LINE

A programação por demonstração é essencialmente utilizada para programar robots de repetição (playback). O operador leva o braço do robot à posição desejada, fazendo uso de:

- uma caixa de comandos (Teach Box ou Teach Pendant)
- ou arrastando o braço do robot, movimentando individualmente cada articulação do robot até se atingir a posição desejada.

## *Programação de robots 3*

---

Duas opções existem : ou ponto atingido é então gravado na memória do controlador recorrendo à caixa de comandos, ou recorrendo ao teclado do sistema de controlo, ou então todo o movimento é gravado sobre a forma de uma sequência de pontos e posições que o robot vai assumir, correspondendo à trajectória. O tipo de movimento que o operador efectua com o robot pode ser expresso em termos do referencial de base, ou em termos das variáveis articulares do sistema.

Alguns sistemas possuem uma luva especial (tipo as que se usam nos programas de realidade virtual), ou outro tipo de dispositivo específico, que permite simular o movimento do efectuador e do braço. Tal sistema é especialmente usado quando as dimensões do robot são demasiadamente grandes para possibilitar um fácil movimento em modo de aprendizagem.

Actualmente a técnica de programação mais usada é que recorre à Teach Pendant para armazenar pontos da trajectória, sendo no entanto baseado no ponto-a-ponto.

## *Programação de robots 4*

- As técnicas que armazenam toda a sequência de pontos são, geralmente, usadas nos sistemas onde a tarefa é dependente do movimento, como é o caso da pintura robotizada à pistola, onde é necessário definir-se uma zona de pintura que vai ser função da trajectória do manipulador e da posição do bico da pistola. Por outro lado é possível definir-se com este sistema de aprendizagem de trajectórias, a maior ou menor suavidade das curvas a serem executadas durante a tarefa. Outro exemplo é o que usam os sistemas de soldadura contínua por arco.
- A programação por linguagens deriva do conceito de programação de computadores, onde o operador define um programa como uma sequência de ordens e comandos numa linguagem específica, e onde os pontos usados na execução da tarefa podem ser definidos via teclado, ou recorrendo ao Teach Box externo, que nos permite movimentar o braço do robot. Este meio é mais utilizada em sistemas “inteligentes” onde a interacção com o meio envolvente ao robot é necessária.

## *Programação de robots 5*

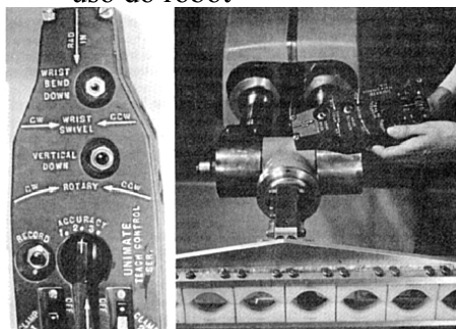
Na programação designada por ON-LINE a programação é feita no local de trabalho e com o robot apenso ao computador.

Em OFF-LINE a programação é efectuada fora do local de trabalho, e sem a utilização do robot, geralmente recorrendo a sistemas de CAD que permitem visualizar o espaço de trabalho, os objectos e o robot e simular todo o processo operativo em sequência. Um destes exemplos é o que ocorre nas instalações onde é impossível efectuar-se a aprendizagem dos pontos da trajectória no local de trabalho, como é o caso da industria naval (neste caso o CAD fornece as trajectórias de operação aos vários sistemas robotizados).

## *Programação de robots 6 (Lead Through)*

### Programação Guiada (Lead Through)

As figuras seguintes apresentam as principais ferramentas usadas por um operador num processo de Programação Guiada. Estas são o robot, a sua Teach Pendant, e a perícia do operador no desempenho da sua tarefa associado à experiência que possui no uso do robot



Robots - (c)jacn- 02/03



345

## *Programação de robots 7 (Lead Through)*

- O primeiro ponto é que a Programação Guiada é uma técnica de programação ON-LINE, caso contrário não seria possível executar a tarefa - há que conhecer todos os pontos da trajectória para que esta seja executável.
- O programador, geralmente um operário especializado, guia o robot pela sequência de movimentos desejada, fornecendo deste modo ao robot uma correcta sequência para cada eixo, isto é, o operador guia o robot até ao ponto desejável. O processo de condução pode ser feito em termos de coordenadas articulares, método de controle difícil dada alguma eventual impossibilidade que possa ocorrer, ou em coordenadas cartesianas, em relação quer ao referencial de base, quer ao referencial do TCP. O sistema internamente calcula as posições correspondentes recorrendo ao modelo cinemático do robot.
- Em cada ponto e recorrendo à *Teach Box* é armazenada a configuração do robot, e eventualmente podem ser definidas mais informações referentes ao ponto. É usual encontrar-se fixo ao *end-effector* do robot um manipulo destacável para auxilio deste tipo de programação. De notar que o objectivo é deslocar o pulso, e efectuador, do robot ao longo de uma sequência de pontos, onde cada um representa uma posição e uma orientação.

Robots - (c)jacn- 02/03

346

## *Programação de robots 8 (Lead Through)*

---

### *Desvantagens*

- Há vários inconvenientes da utilização deste modo de programação de robots, na medida em que deslocar o braço obriga a um movimento com controle fino em cada ponto.
- Por outro lado, e a fim de se manter o sistema equilibrado, é necessário efectuar a aprendizagem a muito baixa velocidade, sob pena de se poder danificar o robot com alguma falsa manobra. Dado que a programação tem que ser efectuada no local de trabalho do robot, em geral é obrigatório proceder-se à paragem de parte, senão mesmo da totalidade, da linha de montagem, o que pode ser particularmente crítico em locais perigosos, ou onde o ambiente seja pouco propício à presença de um operador

## *Programação de robots 9 (Lead Through)*

---

Em resumo, pode-se dizer que os principais inconvenientes são:

- difícil o manuseamento à alívio dos braços recorrendo a sistemas hidráulicos
- programação efectuada a baixa velocidade
- perigosa em ambientes não adequados à presença humana.
- obriga à paragem da linha de produção.

## *Programação de robots 10 (Lead Through)*

### *Vantagens*

Há algumas vantagens na programação guiada de robots, e que estão ligadas à eficiência da tarefa assim programada. Note-se que para que um robot evolua de um ponto A para um ponto B, cada um definido por uma posição e orientação, há múltiplas trajectórias possíveis de serem executadas por um robot, o que levanta o problema da optimização das trajectórias.

Para um ser humano a trajectória, teoricamente mais simples é uma linha recta, mas nem sempre tal é possível dado que estamos a trabalhar com estruturas rígidas interligadas passíveis de criarem situações de conflito físico entre elas se mal colocadas. Portanto, um movimento tem que entrar em linha de conta com as posições intermediárias dos vários links que compõe o braço. Ora um operador humano sabe como optimizar a trajectória de forma a que cada ponto seja acedido correctamente, sob condição que o programador seja experiente.

## *Programação de robots 11 (Lead Through)*

- Em simultâneo as configurações que a estrutura pode assumir passam a ser definidas também pelo utilizador diminuindo o trabalho da unidade de controle de tarefas.
- Outro ponto interessante é que todo o processamento matemático passa para um segundo plano, dado que apenas são definidos pontos, e as condições, associadas à execução de uma determinada trajectória; o calculo interno é feito após a aprendizagem, o sistema usando apenas os resultados deste calculo. Finalmente, e dado que a aprendizagem é supervisionada por um operador, e que os ambientes de trabalho são, em geral, controlados, há um menor risco global de erro que levaria à paragem da execução da tarefa.

## *Programação de robots 12 (Lead Through)*

Em resumo pode-se dizer que as vantagens são:

- perícia do operador “transmitida” ao robot.
- o movimento do robot é determinado, sob controlo do operador.
- as descrições matemáticas complexas do movimento do braço são eliminadas.
- menor necessidade para a intervenção de sensores externos.

A programação é feita pelo sistema de controlo, lendo e registando as condições e estado de cada eixo.

Os dados referentes à velocidade e/ou à posição para cada eixo são regularmente obtidas e registadas sequencialmente na memória do controlador, ou então definidas como parâmetros adicionais no momento da programação ou da execução da tarefa.

Tratam-se de parâmetros adicionais à trajectória.

## *Programação de robots 13 (Lead Through)*

O sistema de controlo pode gravar os dados referentes às coordenadas sob duas formas:

É possível ler e registar a informação no fim de cada movimento, sendo esta acção assinalada normalmente pelo pressionar de um botão na botoneira (Teach Box). Esta técnica é apropriada para movimentos simples tipo ponto a ponto. É normalmente usada nos robots do tipo PTP.

Alternativamente o sistema de controlo pode gravar sucessivamente os dados do movimento em intervalos fixos de tempo ao longo da tarefa. Este tipo de programação é mais utilizada onde existem obstáculos a serem controlados, ou onde haja a necessidade de um controlo mais apertado sobre os movimento.

Este tipo de programação é relativamente ineficiente em termos de utilização de memória, uma vez que o comprimento do programa é directamente proporcional ao tempo requerido para completar a tarefa



## Programação de robots 14 (Lead Through)

### Programação através da Teach Box

- Técnica ON-LINE, uma vez que usa também o robot durante a fase de programação. O operador recorre à Teach Box para guiar o robot através dos movimentos desejados.
- Mais utilizada para manusear robots de dimensões e peso elevados.
- Técnica menos segura, uma vez que qualquer movimento inadvertido pode causar danos quer para o robot e demais periféricos, quer para o operador.
- Existe a falta de controlo óptimo devido ao facto do robot ser controlado remotamente, o que dificulta o posicionamento exacto sobre os objectos.
- A principal vantagem deste método é a segurança do operador em ambientes considerados perigosos.
- A principal desvantagem prende-se com o facto de ser necessária a contínua atenção do operador para a Teach Box a fim de controlar o movimento. Muitos erros ocorrem nesta fase, podendo posteriormente reflectirem-se no programa .

## Programação de robots 15 (Lead Through)

A botoneira possui normalmente uma gama de funções relacionadas com o movimento de cada um dos eixos, controlo do end-effector, controlo da execução do programa.

Dependendo do sistema de controlo, existem mais ou menos funções disponíveis na Teach Box, como por exemplo:

- possibilidade de saltos condicionais,
- incondicionais para diferentes partes do programa,
- funções de atraso temporais,
- execução de subprogramas,
- leitura de dados provenientes de sensores, ...

Em ambas as técnicas já descritas os programas são gerados por operários especializados nas tarefas a serem desempenhadas pelo robot e não por técnicos especialista em automação e afins

## Programação de robots 16 (Lead Through)

### Programação através da entrada de coordenadas

As instruções do robot são introduzidas no sistema de controlo como uma sequência de linhas de comando na Teach Box ou directamente no controlador.

Os dados relacionados com os eixos e outras instruções, são introduzidos sequencialmente e discretamente pela ordem pela qual são necessários. No entanto não se processa qualquer movimento no robot durante a fase de entrada do programa.

Estes sistemas Robotizados são geralmente designados por Robots do tipo "PlayBack".

## Programação de robots 17 (Lead Through)

As restrições afectas a este tipo de robot são:

- a aceleração máxima e velocidade máxima para cada junção
- volume de trabalho da aplicação
- controlo efectuado por um conjunto de pontos (posições no espaço) previamente gravados em memória
- a sequência de operações é executada manualmente a baixa velocidade, sendo gravados um conjunto de pontos (posições e orientações) que serão à posteriori executadas pelo robot à velocidade desejada o número de vezes desejado.
- classificação dos robots "PlayBack"
  - "PlayBack" com controlo ponto-a-ponto PTP
  - "PlayBack" com controlo continuo PC

## Programação de robots 18 (Lead Through)

### Programação remota OFF-LINE

- Este tipo de programação refere-se à programação realizada sem a presença do robot. O programa é desenvolvido, corrigido e testado antes de ser carregado na memória do sistema de controlo do robot.
- Vantagens:
  - os programas podem ser efectuados sem a presença do robot, não obrigando à paragem da célula.
  - as operações do robot (sincronização, sequências de movimento,...) podem ser cuidadosamente planeadas, optimizadas e testadas.
  - os programas podem ser escritos em módulos.
  - operações condicionais podem facilmente ser introduzidas no programa.
  - existem facilidades de controlo de outros elementos automatizados dentro da mesma célula.

## Facilidades de programação 1

- Características do sistema de controlo
  - A maioria dos sistemas de controlo compreendem um elevado número de modos de operação que podem ser activados ou desactivados pelo operador:
  - MODO HOME - Este modo permite que os eixos do robot retornem, independentemente ou em simultâneo para a sua posição original (home ou park position). Uma vez que o movimento de retorno é efectuado pelo caminho mais curto deve-se ter em atenção possíveis colisões.
  - O display da botoneira apresenta normalmente a seguinte informação:
    - posição das junções
    - posição das coordenadas
    - posições originais
    - valores dos timers e counters
    - estado de input/output de certos bits

## Modos

---

MODO TEACH - este modo permite que o programador crie um programa, edite um programa ou grave uma sequência retida em memória.

A criação do programa pode ser efectuada através de:

1. introdução de coordenadas,
2. recorrendo à botoneira,
3. programação guiada.

Existe ainda a possibilidade dentro do modo teach de actuar nos timers, counters e efectuar testes aos estados das saídas.

O display da botoneira apresenta normalmente a seguinte informação:

- sequência de dados do programa presentes em memória
- posição corrente das junções
- posição corrente das coordenadas
- monitorização dos valores dos timers e counters
- monitorização dos bits input/output

## Modos 1

---

MODO STEP - este modo permite que um programa previamente gravado seja executado um passo de cada vez. Os passos subsequentes só serão executados quando um botão da consola do operador for premido.

O display da botoneira apresenta normalmente a seguinte informação:

- número do passo que está a ser executado
- número do passo do programa já executados e por executar
- posição corrente das junções
- posição corrente das coordenadas
- monitorização dos valores dos timers e counters
- monitorização dos bits input/output

## Modos 2

---

MODO AUTO - permite a execução automática de uma sequência

O display da botoneira apresenta normalmente a seguinte informação:

- sequência de dados do programa presentes em memória
- posição corrente das junções
- posição corrente das coordenadas
- monitorização dos valores dos timers e counters
- monitorização dos bits input/output

## Modos 3

---

MODO PARAMETER - este modo permite que um número interno de valores, variáveis de estado e valores por defeito sejam redefinidos.

Alguns parâmetros são definidos pelo fabricante e não podem ser alterados. Outros parâmetros podem ser redefinidos pelo operador:

- a) limites máximos da movimentação de cada eixo, sendo activado um alarme de condição e o movimento parado
- b) máxima velocidade de operação para cada eixo em modo single step e em modo de execução automática
- c) park position
- d) transmissão/recepção via RS232, ou com outro tipo de protocolo

Alguns sistemas de controlo podem restringir a entrada em alguns dos seus modos de funcionamento até que um comando "home" seja executado, evitando assim que funções como teach, step e auto sejam activadas a partir de posições desconhecidos dos eixos.

## Tipos de pontos a armazenar

---

Tipos de pontos a armazenar

Na maioria dos sistemas de controlo podem, ser armazenados 3 tipos de pontos:

1. Ponto desejado - no modo de operação, os pontos desejados devem ser alcançados com exactidão, logo o movimento do braço é instantaneamente parado nesses pontos.
2. Via Point - é usado quando o braço tem que se mover entre obstáculos
3. Pontos de referência - é um ponto desejado que contem uma instrução condicional.

Por exemplo - se um sensor transmite um sinal específico que diz que o braço pode mover-se para uma determinada posição, e se o sinal do sensor é diferente então o braço deve mover-se para outra posição

## Linguagens de programação 1

---

As linguagens utilizadas na programação de robots são essencialmente de alto nível desenhadas especificamente para a programação de robots.

Vantagens:

- facilidade de programação
- descrever tarefas complexas
- utilização e integração de informação sensorial
- portabilidade entre sistemas
- elevada capacidade decisão vs. resposta
- capacidade de controlo de múltiplos robots

Desvantagens:

- sistemas computadorizados associados ao controlador do robot
- maior capacidade dos recursos: memória, processamento, ...
- programador especializado em linguagens de programação.

## Linguagens de programação 2

Dois tipos de linguagens de programação:

### a) programação explícita

- o utilizador tem que fornecer todas as sequências do movimento do manipulador: posição, velocidade.
  - requer que o utilizador conheça as operações básicas do manipulador para fazer um programa eficiente. Linguagens orientadas ao robot.
  - o programa é constituído por uma série de ordens ou instruções que vão definindo com rigor as operações necessárias para levar a cabo a aplicação. Normalmente são extensões de uma linguagem de alto nível já existente tendo em vista a satisfação dos requisitos da programação de robots.
- passos necessários para o desenvolvimento de um programa:
- i. definição, usando estruturas de dados, da localização (posição e orientação) das peças e das suas características
  - ii. divisão do processo de montagem em sequências de acções (movimento do robot, agarrar, largar, inserir objectos, ...)
  - iii. comandos sensoriais tendo em vista a detecção de situações anormais e monitorização do processo
  - iv. debug e refinamento repetindo os passos anteriores

## Linguagens de programação 3

### b) programação especificativa

- o utilizador expressa os comandos orientados à tarefa/objecto em lugar de especificar todas as operações de movimento.
- maior capacidade de inteligência (abstracção) da linguagem.
- a tarefa de montagem é descrita como uma sequência de objectivos de posição dos objectos.
- é um tipo de linguagem em que o operador descreve as especificações dos objectos mediante uma modelização, bem como as tarefas a realizar sobre eles. Posteriormente, a especificação das tarefas é transformada num programa ao nível do robot e que cumpre as tarefas especificadas (síntese do programa do robot).

## Linguagens de programação 4

Sendo assim, o planeamento de tarefas está dividido em três fases:

- modelização do mundo
- especificação das tarefas
- síntese do programa

No planeador de tarefas, a especificação da tarefa é decomposta numa sequência de subtarefas e é extraída a informação da posição final, operandos, especificações e relações entre objectos.

As subtarefas passam então por um planeador de subtarefas que gera um programa de robot que satisfaz as condições requeridas.

## Linguagens de programação 5

### Hierarquia de linguagens

As linguagens que têm sido desenvolvidas para robots recaem em uma das três categorias:

1. nível de manipulação: WAVE, SIGLA, VAL, AL (L. Explícita)
2. nível de objecto: LAMA, RAPT, AUTOPASS (L. Explícita & L. especificativa)
3. nível de tarefa; PLANNER, SAIL (L. especificativa)

8.3.3- Problemas associados ao uso das L.P.

- I. A sua aprendizagem é bastante complexa, o que faz com que somente pessoas com algum background técnico possam fazer uso delas.
- II. Não existe uma standardização das linguagens, ou seja, cada fabricante produz uma determinada linguagem aplicada a determinado robot.



## Linguagens de programação 6

### - Arquitetura

#### Sistema Operativo

- modo monitor :            controlo de supervisão
- modo execução (run):    executa o programa
- modo editar:                escrever ou modificar programas

#### Interpretador ou compilador

- interpretador:
  - instruções descodificadas e executadas uma a uma
- compilador:
  - todo o programa é descodificado
  - corre a versão totalmente descodificada
  - execução mais rápida

## Linguagens de programação 7

### Elementos e funções da linguagem:

- constantes e variáveis
- comandos de movimento
- comandos dos órgãos terminais e dos sensores
- computações e operações
- controlo do programa e subrotinas
- comunicações e processamento de dados
- comandos do modo monitor

## Linguagens de programação 8

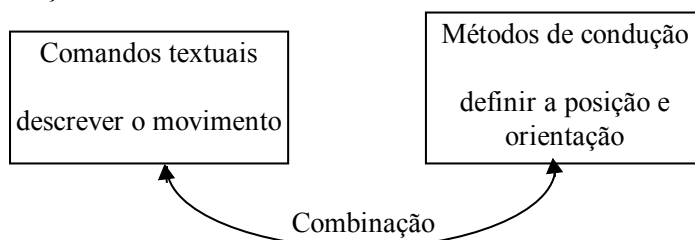
Constantes e Variáveis:

```
DEFINE A1 = POINT < X , Y, Z, O, A, T >
```

```
DEFINE A1 = POINT < X , Y, Z, 0.0, 0.0, 0.0 >
```

Os primeiros três valores dão a posição do end-effector e os três últimos a orientação do mesmo

Programação de movimento



Robots - (c)jacn- 02/03

371

## Linguagens de programação 9

MOVE P1 - mover da presente posição para a posição e orientação definida pela variável P1

HERE P1 ou LEARN P1 - usados no procedimento guiado para atribuir o nome a um determinado ponto

MOVES P1 - sufixo S = interpolação rectilínea

MOVE A1 VIA A2 - mover para o ponto A1 passando por A2

DMOVE (4,12.5) - movimento incremental 4ª articulação de 12.5°

- instruções úteis para manuseamento de materiais

APPROACH P1, 70 MM - move a garra para 70 mm acima de P1, ficando com a mesma orientação que terá em P1

MOVE P1

(actua a garra)

DEPART 70 MM

- trajectória : série de pontos ligados num único movimento

DEFINE PATH123 =PATH(P1,P2,P3) - define percurso pelos pontos P1, P2, P3

Robots - (c)jacn- 02/03

372

# A Linguagem VAL 1

*Generalidades.*

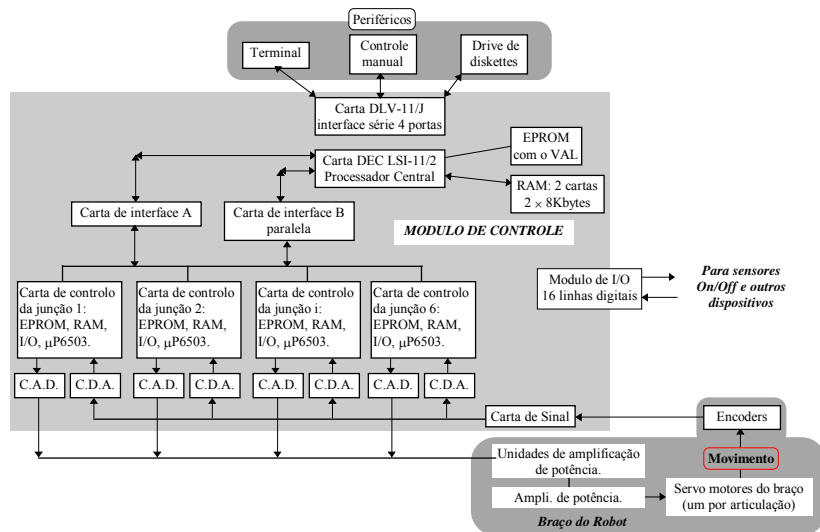
O VAL foi lançado no mercado em 1979, e foi a primeira linguagem de programação de robots a ser comercializada. Foi criada e desenvolvida para a UNIMATION por um estudante de Standford respondendo a dois imperativos precisos:

- a necessidade de usar um micro-computador para a sua implantação
- a necessidade de definir facilmente as tarefas a serem realizadas pelos robots.

O sistema robot PUMA, da UNIMATION, é constituído pelo braço e pelo armário de comando deste. O braço possui 6 articulações (rotações em torno de 6 eixos). No armário de comando os módulos que nos interessam são:

- módulo de controle,
  - o módulo de entradas-saídas (I/O),
  - o módulo do amplificador de potência,
- tal como pode ser visto na figura seguinte.

# A Linguagem VAL 2



## A Linguagem VAL 3

O sistema software que controla o braço, chamado VAL, está armazenado numa EPROM que se situa no modulo de comando. No sistema VAL há duas maneiras de comandar o braço:

- - ou a partir do *Teach Pendant*, ou caixa de controlo manual,
  - ou a partir de programas escritos pelo utilizador e armazenados na memória da máquina.

Em qualquer um dos casos é o modulo de controlo que transmite as instruções de comando do braço. Os dados, relativos às posições/orientações, obtidos por intermédio dos encoders de posição do braço, são transmitidos de retorno ao modulo de controle, o que permite efectuar um controlo em malha fechada. Tal como foi referido são sensores proprioceptivos e internos ao sistema.

Assim o PUMA pode também usar as 16 linhas de entrada/saída digitais para interagir com o seu meio ambiente, e para fazer a integração em células de trabalho com outros dispositivos. Estas linhas, ou canais, podem ser detectados e o seu estado condicionar a execução do programa do utilizador, ou facultar alterações específicas neste. Também podem ser utilizadas para iniciar, ou parar, outros equipamentos periféricos que cooperem com o PUMA (transportadores, ou outros robots a trabalharem em cooperação), ou sensores que se encontrem montados no braço e sua vizinhança.

## A Linguagem VAL 4

### *Funcionamento do VAL.*

VAL é simultaneamente um sistema de comando por computador e uma linguagem de programação de robots, concebidos para controlar os robots industriais da UNIMATION. O computador é a unidade de comando e tem dois níveis de funcionamento:

1. Nível Alto: ou sistema de funcionamento chamando MONITOR, pois permite controlar o sistema, com interacção do utilizador.
2. Nível Baixo: que serve para as operações de diagnóstico no que refere à unidade de comando, e designado por ODT.

O MONITOR é um programa residente em PROM e que tem a seu cargo comandar o robot. As ordens que este recebe vem quer do Teach Pendant, quer dos programas escritos pelo utilizador.

## A Linguagem VAL 5

---

O monitor é muito flexível, pois pode realizar a maioria das tarefas que lhe são atribuídas pelas ordens que recebe, isto mesmo que o programa se encontre em execução. As ordens podem ser tratadas em paralelo com a execução, e tem os seguintes destinos:

- controle do estado do sistema.
- definição das posições do robot.
- armazenamento e modificação das informações em *diskette*.
- criação e modificação de programas de comando.

## A Linguagem VAL 6

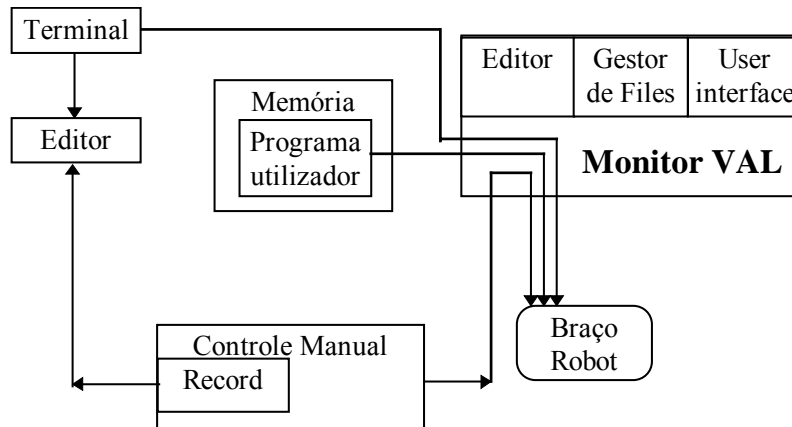
---

Existem 3 tipos de *prompts* no sistema, em modo monitor:

- [ \* ]: indica que o monitor espera uma ordem Monitor, durante a execução de um programa. Isto significa que enquanto que um programa se encontra em execução temos a possibilidade de enviar ordens ao sistema.
- [ . ]: o mesmo que o anterior, mas sem um programa estar a ser executado.
- [ ? ]: indica que estamos em modo **Editor**, portanto em modo de redacção de um programa.

## A Linguagem VAL 7

A figura seguinte apresenta o funcionamento do sistema VAL.



Robots - (c)jacn- 02/03

379

## A Linguagem VAL 8

*Variáveis de localização.*

Um programa escrito por um utilizador é composto por duas partes distintas: os pontos onde o robot deve ir, chamados Posições (definidas por uma posição + orientação e expressas por 6 parâmetros) , e as instruções da linguagem VAL, que definem os movimentos que o braço deve efectuar.

Há duas maneiras de representar os Posições no sistema VAL: seja como pontos de precisão, ou então como transformações.

Robots - (c)jacn- 02/03

380

## A Linguagem VAL 9

- Pontos de precisão: fornecem a posição angular das articulações do robot. Dado que o PUMA é um robot com 6 articulações, todas elas rotóides, então um ponto de precisão é definido como um vector de 6 posições angulares correspondentes aos ângulos que cada articulação tem. O seu aspecto é o seguinte:

JT1    JT2    JT3    JT4    JT5    JT6

Esta representação é a de maior precisão em termos de definição, conseguida pelo robot, e a execução dos programas, com pontos de precisão é muito mais rápida.

Tem o inconveniente da representação estar ligada à geometria do robot, logo os componentes de um ponto de precisão não podem ser manipulados durante a execução de um programa.

## A Linguagem VAL 10

Transformações: são compostas por uma posição (X, Y, Z) expressa em milímetros, e por uma orientação (O, A, T) expressa em graus, definida em relação a um referencial de base. Em geral usa-se o referencial do mundo (WORDL) ou o referencial de base do robot (BASE - coincidente com a 1ª articulação). Portanto a sua forma é : X Y Z O A T.

Tem como principais vantagens :

- o facto de só se refere à posição e à orientação do efectuador, logo não depende na geometria do braço.
- é uma representação intuitiva do Posição na medida em que as suas componentes são definidas em relação a outras, com a ajuda das transformações compostas. Uma transformação que usa transformações compostas é designada *transformação relativa*.

Os inconvenientes são o facto de ter uma menor precisão, devido ao esforço de calculo requerido, e uma execução lenta, na medida em que temos que calcular o modelo de cinemática inversa para determinar as várias posições das variáveis articulares.

## A Linguagem VAL 11

### *Definição dos Posições*

Os Posições são armazenados no sistema na forma de variáveis designadas por um nome, nome esse que é atribuído pelo utilizador, tal como se faz em qualquer programa de computador. O nome pode usar qualquer caractere (letra, numero, mas tem que começar obrigatoriamente por uma letra). De notar que os pontos de precisão são precedidos do símbolo #.

No exemplo seguinte podemos apresenta-se o principio que norteia a definição de posições relativas.

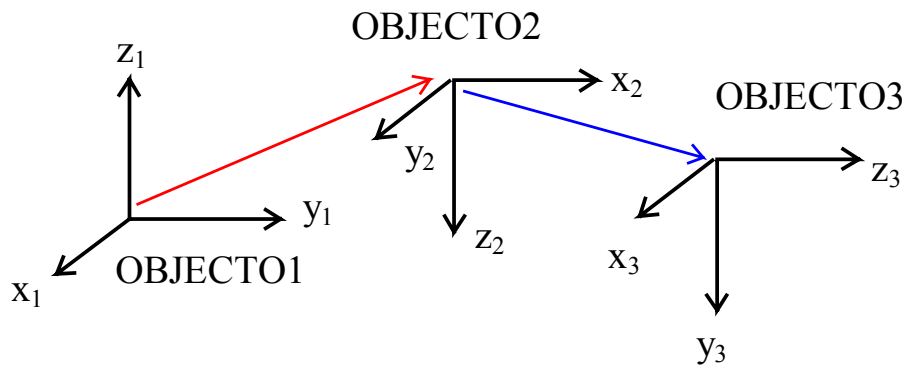
## A Linguagem VAL 12

- Seja um objecto (OBJECTO) pousado numa placa (PLACA), objecto esse que só pode adquirido por um ponto particular (ADQUIRIR). Temos as seguintes instruções correspondentes ao processo de aquisição do objecto por um robot manipulador, em relação ao referencial do mundo, que é aquele em relação ao qual todas as tarefas, e pontos, estão definidos. Uma ultima observação refere-se à terminologia usada na representação de transformações compostas de posições, onde o símbolo [ : ] significa que temos uma transformação composta com a primeira, ou seja:

OBJECTO1 : OBJECTO2 : OBJECTO3      significa que o temos um frame de base (OBJECT1) e dois frames compostos sucessivamente que são OBJECTO2 e OBJECTO3, tal como se mostra na figura seguinte.



## A Linguagem VAL 13



Robots - (c)jacn- 02/03

385

## A Linguagem VAL 14

HERE PLACA

- define a posição e a orientação da placa no referencial de referencia do mundo (referencial WORLD (x,y,z) ).

HERE PLACA:OBJECTO

- estabelece a transformação relativa OBJECTO como sendo igual à posição e à orientação do objecto em relação ao posição da placa.

HERE PLACA:OBJECTO:ADQUIRIR

- estabelece a transformação relativa ADQUIRIR como sendo igual à posição e à orientação da pinça (i.é do efectuador), portanto do ponto por onde o objecto vai ser pegado pelo efectuador, em relação à posição e orientação do objecto no referencial do mundo.

MOVE PLACA:OBJECTO:AQUIRIR

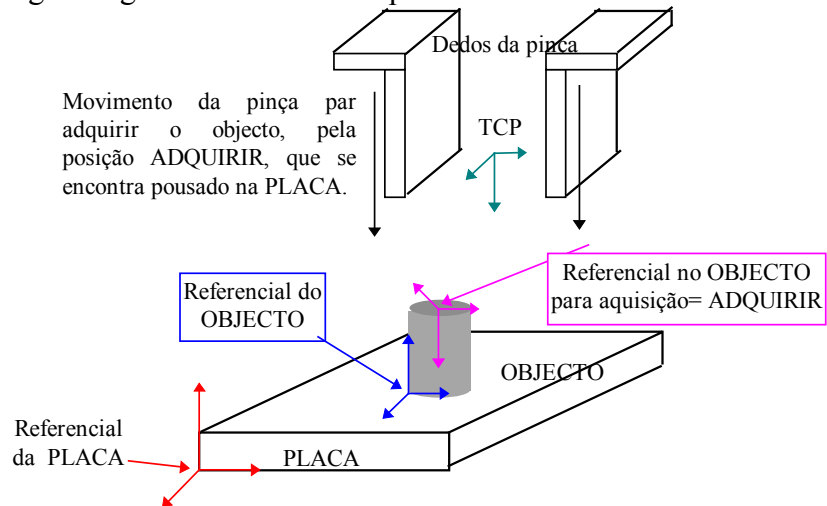
faz a aquisição do objecto.

Robots - (c)jacn- 02/03

386

# A Linguagem VAL 15

A figura seguinte ilustra o exemplo:

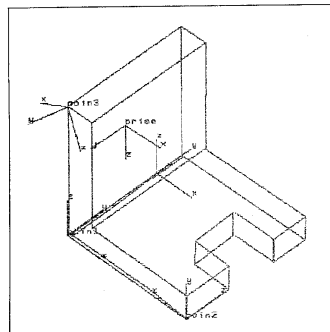


Robots - (c)jacn- 02/03

387

# A Linguagem VAL 16

O esquema seguinte apresenta um sistema automático de definição de posições relativas, recorrendo a um sistema de programação interactiva, de referenciais relativos para execução de tarefas.



Définition interactive de repères fonctionnels:

- Les repères fonctionnels sont définis par rapport au repère de base, qui est placé au centre de masse de l'objet et qui a ses axes orientés par axes de torsion de l'univers.

- Les transformations entre le repère de l'objet et les repères fonctionnels sont exprimées sous forme (TRANSLATION) (ROTATION):

DELTA\_X DELTA\_Y DELTA\_Z ROLL PITCH YAW

```

objet : 28.516 48.387 39.007 0.000 0.000 0.000
cosp1 : -23.546 -42.387 -38.007 0.000 0.000 0.000
cosn2 : 24.454 -48.387 -38.007 00.000 0.000 -100.000
prip1 : +20.546 -48.387 32.888 100.000 0.000 0.000
cosn3 : -27.546 -42.387 72.888 -100.000 -40.000 -70.000
    
```

Robots - (c)jacn- 02/03

388

## A Linguagem VAL 17

### *Execução de um programa.*

Um programa pode ser executado uma vez, 10 vezes ou  $n$  vezes, conforme a necessidade. A execução pode ser em contínuo ou passo-a-passo. Para se efectuar a interrupção da execução podemos recorrer quer ao botão OFF na caixa de comando manual, quer ao comando ABORT que se executa via teclado da consola. Pode-se usar, em situação de emergência o botão de paragem de emergência (ABORT) que se encontra no topo do armário de comando do PUMA.

Nos dois primeiros casos, pode-se resumir a execução do programa passo-a-passo, a partir do ponto em que foi parado, para seguir a sua execução.

Caso se tenha usado o botão de paragem de emergência, então não é possível continuar a execução, senão a partir do primeiro ponto (i.é primeira instrução) do programa.

## A Linguagem VAL 18

### *Execução de uma trajectória.*

Há duas maneiras de se executarem trajectórias com o VAL. A primeira é por interpolação das articulações e a segunda em linha recta.

- Movimento por interpolação das articulações:
  - Efectua uma interpolação entre a posição inicial e a posição final de cada articulação, de forma que todas as articulações acabam os seus movimentos em simultâneo. O tempo total dos deslocamentos das articulações é regulado em função da articulação que requer o maior tempo possível para executar o movimento.
  - A regulação da velocidade do monitor e do programa combinam-se de forma a determinarem a fracção da aceleração máxima e a velocidade a que as articulações são colocadas em movimento. Cada articulação acelera até uma velocidade constante, desloca-se a essa velocidade, e seguidamente desacelera até à posição final.
  - Com este método de controlar o movimento no PUMA, o movimento é mais preciso e a resposta mais rápida, embora tenha o inconveniente de não haver uma velocidade constante ao longo do deslocamento do efectuador, e a trajectória não é linear (em geral é complexa).

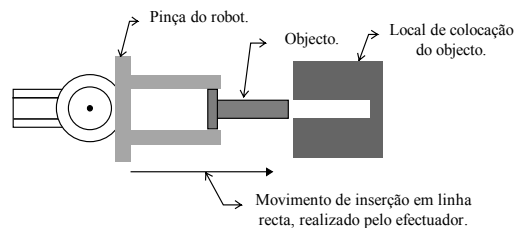
## A Linguagem VAL 19

- • Movimento em linha recta:
  - Neste tipo de movimento as articulações são colocadas em movimento de forma a que o TCP (*Tool Central Point*) do efectuador, acelere (desde o ponto inicial) até uma velocidade constante e segundo uma trajectória rectilínea. Este desloca-se a esta velocidade até uma posição próxima da final, desacelerando até ao ponto final do movimento. O efectuador desloca-se em linha recta durante o movimento.
  - Dado que há que efectuar um maior controle das várias variáveis articulares, o movimento é menos rápido, realizando-se com alguma imprecisão (em relação à trajectória realmente rectilínea) e provoca algumas limitações de movimentos dada a configuração que o braço tem que assumir para assegurar que o deslocamento em linha recta é realizável. Este tipo de movimento só deve usado em caso de necessidade, como é o que ocorre na inserção de uma peça cilíndrica num orifício cilíndrico (cf. figura seguinte).

Robots - (c)jacn- 02/03

391

## A Linguagem VAL 20



### As ordens Monitor.

Há duas categorias de ordens Monitor:

- as que podem ser enviadas quando nenhum programa utilizador está em execução, o *prompt* sendo o ponto [ . ].
- as que se podem enviar quando um programa está a ser executado o *prompt* sendo o ponto [ \* ].

Há ordens que se podem enviar ao sistema de comando em qualquer uma das duas situações acima descritas.

A seguir apresentam-se as principais ordens e comandos da linguagem:

Robots - (c)jacn- 02/03

392

## A Linguagem VAL 20

- Comandos do programa:
  - [\*] A ABORT
  - [.\*] SP SPEED <value>
- altera a velocidade à qual todos os programas do robot são executados, o seu valor variando de 0.01 (muito lento) até 327.67 (muito rápido) a velocidade normal (nominal) sendo 100.00.
  - [.] DO DO [ <instruction> ]
  - [.] EX EXECUTE [ <instruction> ] , [ <n vezes> ] , [ <step> ]
- De notar que <n vezes> pode variar de 32767 até - 32768.
  - [.\*] P
- continua a execução de um programa após este ter sido parado por uma instrução de Pause, ou por um erro de execução. Também pode ser usada quando um programa está à espera de um sinal WAIT que não ocorre. Neste caso a sua acção é equivalente a saltar a instrução.
  - [.] R
- o mesmo que com o comando P, mas permite recomeçar, ou tentar recomeçar, após um erro de execução da tarefa.
  - [.] S[ <programa> ][ <n loop> ][ <step> ]
- executa um programa em passo-a-passo, em função de um dos parâmetros especificados.

## A Linguagem VAL 21

- Estado interno do sistema: as seguintes instruções permitem ver o estado interno do sistema:
  - [.\*] CLEAR : reinicializa todo o sistema VAL, e apaga todas as variáveis.
  - [.\*] FREE : apresenta a percentagem de memória que não está em uso.
  - [.\*] STATUS : apresenta o estado do sistema e das variáveis de I/O.
  - [.\*] DONE : sai do modo MONITOR e entra em ODT.

## A Linguagem VAL 22

- Edição do programa:
  - [.\*] EDIT [ <programa> ] [ <step> ]
  - permite a edição do programa <programa> começando no passo <step> do programa. Um vez entrado no modo de edição podem-se usar as seguintes instruções:
    - [.\*] C <programa>,[ <step> ]
    - começa a edição do programa <programa> a partir da linha indicada pelo parâmetro step, que caso seja omitido inicia a edição na primeira linha.
      - [.\*] D [ <n steps> ]
      - apaga n linhas de programa, definidas por <n steps>, a partir da posição actual do cursor. Se nada é especificado apaga apenas a linha onde está o cursor.
        - [.\*] E sai do modo de edição e retorna ao modo Monitor.
        - [.\*] I insere linhas de código no programa utilizador.
        - [.\*] L faz o display da linha anterior do programa.
        - [.\*] P [ <n steps> ]
        - print das <n steps> linhas seguintes do programa, e coloca o cursor na ultima linha impressa.
        - [.\*] R [ <arg #>].[ <value> ]
        - substitui o argumento <arg #> pelo valor <value> na instrução onde se encontra.
        - [.\*] S [ < steps> ]

## A Linguagem VAL 23

- Estado e Comando do sistema:
  - [.\*] STA status: fornece o estado interno do sistema.
  - [.\*] WH WHERE: fornece o ponto do TCP actual [1] do sistema.
  - [.] Z zero: reinicializa o sistema, apagando todos os dados em memória, assim como programas.
  - [.] CA CALIBRATE: efectua a calibração interna dos motores, recorrendo aos encoders de posição das articulações.  
[1] Neste caso o conceito de “actual” corresponde à posição em continuo que o TCP ocupa. Assim, se durante a execução de um programa se quiser ver onde está o TCP, este programa efectua o display de um vector com 6 coordenadas onde se pode ver onde este se encontra, em relação ao referencial de BASE do robot → X Y Z O A T.

# A Linguagem VAL 24

---

Exemplo de escrita de um programa em VAL:

EDIT DEMO.1

PROGRAM DEMO.1

- » 1. APPRO PART, 50        move braço para local acima de PART
- » 2. MOVES PART    move em linha recta para PART
- » 3. CLOSEI        em PART, fecha a pinça.
- » 4. DEPARTS 150    afasta-se, em linha recta, com objecto.
- » 5. APPROX BOX, 200    aproxima-se de BOX, com o objecto.
- » 6. MOVE BOX        coloca PART em BOX
- » 7. OPENI         abre os dedos e larga PART.
- » 8. DEPART 75        afasta-se de BOX.