

Introdução à Robótica

ADELARDO A. D. MEDEIROS

Laboratório de Engenharia de Computação e Automação (LECA/DEE)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

E-mail: adelardo@leca.ufrn.br URL: <http://www.leca.ufrn.br/adelardo/>

1 Introdução

Uma das maiores ambições humanas sempre foi dar vida a seus artefatos. Após a Revolução Industrial, passou-se a alimentar o sonho de uma criatura mecânica, inicialmente concebida como *autômato*, a quem o homem delegaria as tarefas menos nobres e mais laboriosas.

Este conceito foi utilizado pelo escritor tcheco Karel Čapek na peça “*Rossum’s Universal Robots*” (“O Robô Universal de Rossum”), de 1921. Nesta ocasião, ele criou o termo *robot*¹ – derivado da palavra eslava *robota*, que significa trabalho executivo – para designar o autômato construído por Rossum, que termina levantando-se contra a espécie humana no romance de ficção científica.

Nos anos 40, o conhecido escritor de ficção científica Isaac Asimov concebeu os robôs como autômatos de aparência humana mas desprovidos de sentimentos. O termo *robótica* foi introduzido por Asimov para simbolizar a ciência devotada ao estudo dos robôs, que seria baseada em três leis fundamentais:

1. Um robô não pode agredir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano se machuque.
2. Um robô deve obedecer às ordens dadas por seres humanos, exceto quando tais ordens entrem em conflito com a primeira ordem.
3. Um robô deve proteger sua própria existência, tanto quanto esta proteção não entre em conflito com as duas primeiras ordens.

A popularização da ficção científica influenciou o público leigo de tal forma que ele continua a imaginar o robô como um humanóide que pode falar, andar, ver e escutar e que se assemelha, se não a uma pessoa comum, pelo menos a algo como os robôs do filme *Guerra nas Estrelas*. Os robôs atuais, entretanto, nem sempre correspondem a esta idéia generalizada, o que levou à introdução de outras definições para estes termos.

2 Definições

2.1 Robôs

Existem muitas definições para um robô, entre as quais ressaltamos duas:

1. *Dispositivo ou máquina automática que realiza funções normalmente associadas a seres humanos*

¹O termo em português, *robô*, deriva do aportuguesamento da pronúncia francesa para *robot*

Essa definição (ou similar) é encontrada em dicionários de uso geral. Ela faz aparecer duas características que o senso comum atribui aos robôs:

Autonomia: capacidade de executar suas tarefas sem interferência humana.

Antropomorfismo: as capacidades e tarefas de um robô devem assemelhar-se a capacidades e tarefas que normalmente são atributos dos seres humanos (e não das máquinas).

Tal definição, embora próxima do conceito usual da palavra robô, não é muito precisa: uma máquina de lavar, por exemplo, poderia se enquadrar na definição.

2. *Máquinas que, além de serem capazes de reproduzir tarefas e movimentos implícitos em sua construção, complementam a parte mecânica com dispositivos eletrônicos inteligentes de suporte, os quais dão um certo grau de autonomia a estes engenhos.*

Nesta definição aparecem dois novos aspectos usualmente também associados aos robôs:

Mobilidade: um robô deve ter capacidade de executar algum movimento.

Inteligência: o conceito de “inteligência” é tão ou mais difícil de definir que o termo “robô”. Usualmente, são adotadas definições subjetivas, que indicam como inteligente todo comportamento que se assemelhe a um comportamento eminentemente humano (e não puramente animal).

Essa definição também é bastante abrangente, pois inclui certos engenhos que, embora apresentem muitos problemas similares aos robôs, usualmente não são considerados como tais (um avião ou veículo com piloto automático, por exemplo).

Uma classe especial dos robôs são os *braços*, ou robôs manipuladores, que encontram várias aplicações na indústria. Um manipulador industrial pode ser definido, adotando-se a formulação do *Robot Institute of America*, da seguinte forma:

Um robô é dispositivo reprogramável e multifuncional projetado para mover materiais, partes, ferramentas ou dispositivos especializados, através de movimentos variáveis programados para execução de uma variedade de tarefas.

Nessa definição, destacam-se dois aspectos importantes que diferenciam os robôs de outros equipamentos usuais em automação industrial (como as máquinas de comando numérico):

Multi-funcionalidade: um robô pode ser utilizado em diferentes tarefas.

Reprogramabilidade: a tarefa executada pode ser modificada.

2.2 Robótica

Ciência e tecnologia que estuda os robôs. Em razão dos progressos acontecidos nos últimos tempos, seu campo de atuação tem-se expandido constantemente, o que levou recentemente à definição da robótica como a *ciência que estuda a conexão inteligente da percepção com a ação*.

A robótica é um campo de trabalho interdisciplinar que abrange desde o projeto de componentes mecânicos e elétricos até a tecnologia de fabricação de sensores e tratamento de sinais, sistemas de computação e inteligência artificial. Os assuntos com os quais o profissional da robótica trata se relacionam intimamente com a mecânica, eletrônica, teoria da informação e teoria da automação e controle.

3 Geometria de manipuladores

Os robôs manipuladores são constituídos de diversas partes rígidas (*segmentos*) ligadas em série. A mobilidade do manipulador é assegurada pela presença de juntas, que podem ser *rotacionais* ou *prismáticas* (lineares), sendo as primeiras preferidas em razão da compacticidade e robustez. Um dos extremos da cadeia de segmentos é fixado à base e o outro é livre e conectado a uma ferramenta. Neste tipo de cadeia aberta, cada junta acrescenta um grau de liberdade ao robô.

Pode-se classificar os manipuladores em termos de seus graus de liberdade (fig. 1) ou em função da seqüência de tipos de juntas que ele apresenta (figuras 2 a 5). Os manipuladores antropomórficos, principalmente os com seis graus de liberdade, são os mais usuais em ambientes industriais: neste tipo de máquina, usualmente distingue-se os três segmentos iniciais, ou *braço*, dos três finais, ou *punho* (fig. 6).

4 Cinemática de manipuladores

A cinemática de manipuladores trata do estudo analítico da geometria do movimento de um manipulador com relação a um sistema de coordenadas de referência, sem levar em conta as forças e torques que causam o movimento.

4.1 Cinemática direta

Para um dado manipulador, dados as variáveis (ângulos ou deslocamentos) que descrevem as posições das juntas e os parâmetros geométricos dos segmentos, qual é a posição e a orientação do órgão terminal em relação ao sistema de coordenadas de referência? Para responder a este tipo de questão, a Robótica utiliza principalmente duas ferramentas:

- Matrizes de transformação homogênea
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg

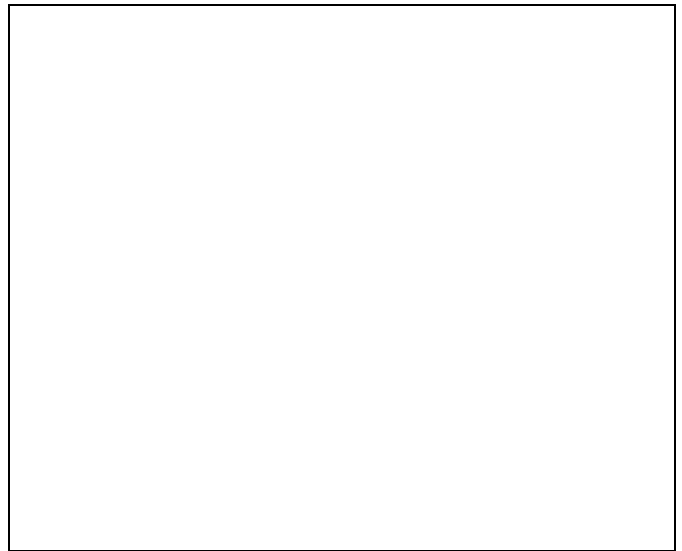


Figura 1: Robô industrial com seis graus de liberdade

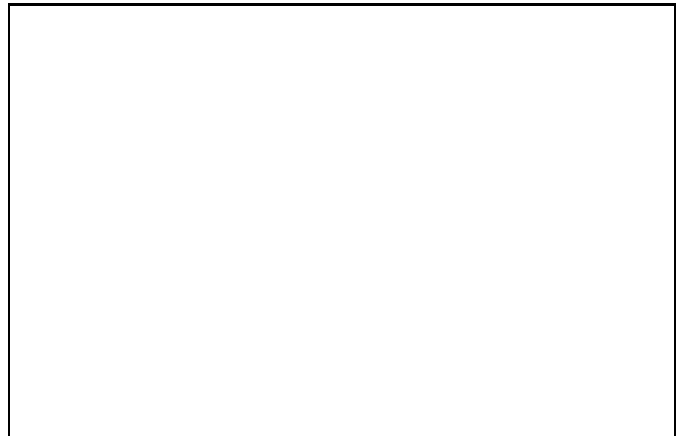


Figura 2: Robô cartesiano

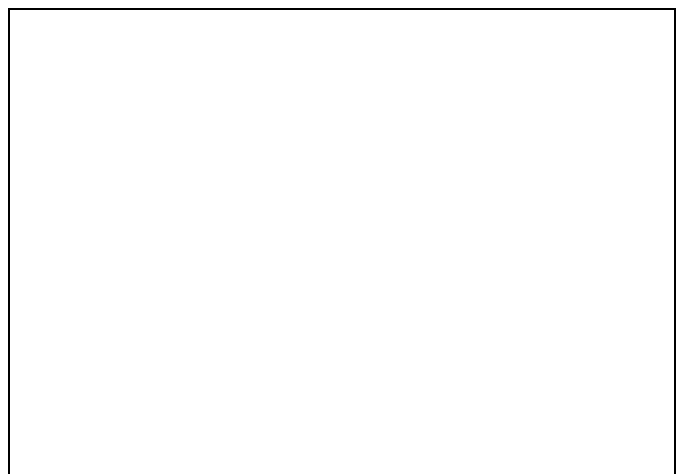


Figura 3: Robô cilíndrico

4.1.1 Transformações homogêneas

Um ponto \vec{v} no espaço euclidiano tradicional, ou seja,

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$$

onde \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} são vetores ortogonais ao longo dos três eixos cartesianos, pode ser representado, em coordenadas

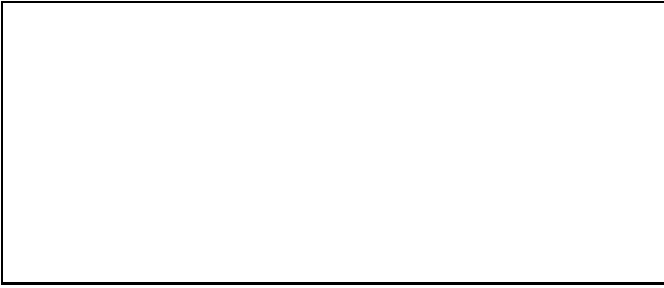


Figura 4: Robô esférico

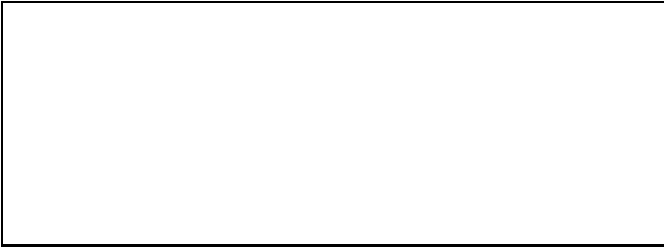


Figura 5: Robô antropomórfico



Figura 6: Punho esférico

homogêneas, por um vetor coluna 4×1 :

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{matrix} v_x \omega \\ v_y \omega \\ v_z \omega \\ \text{fator de escala, usualmente 1} \end{matrix}$$

Uma transformação homogênea, T , é uma matriz 4×4 e pode representar translação, rotação, escala, perspectiva ou uma combinação delas. Em robótica, usualmente apenas as operações de translação e rotação são utilizadas.

Considere um ponto u expresso em coordenadas homogêneas. Sua transformação no ponto v e a transformação inversa são obtidas através de

$$v = T \cdot u \quad \text{e} \quad u = T^{-1} \cdot v$$

Uma matriz de rotação pode ser definida como um operador que age sobre um vetor de posição em coordenadas homogêneas e mapea suas coordenadas expressas em um sistema rotacionado de coordenadas $OUVW$ (sistema ligado ao corpo) para um sistema de coordenadas de referência $OXYZ$. Na figura 7 nós apresentamos os dois sistemas de coordenadas, cujas origens coincidem no ponto O . O sistema $OXYZ$ é fixo no espaço tridimensional, e considerado como sistema de referência. O sistema $OUVW$ pode sofrer rotações em relação ao sistema $OXYZ$. Fisicamente, podemos considerar que o sistema $OUVW$ está ligado a um corpo rígido que se move (como um dos segmentos de um braço manipulador) e move-se junto com ele.

Gostaríamos de encontrar uma transformação homogênea \mathbf{R} , de dimensões 4×4 , que transforme as coordenadas de p_{uvw} para as coordenadas expressas com respeito ao

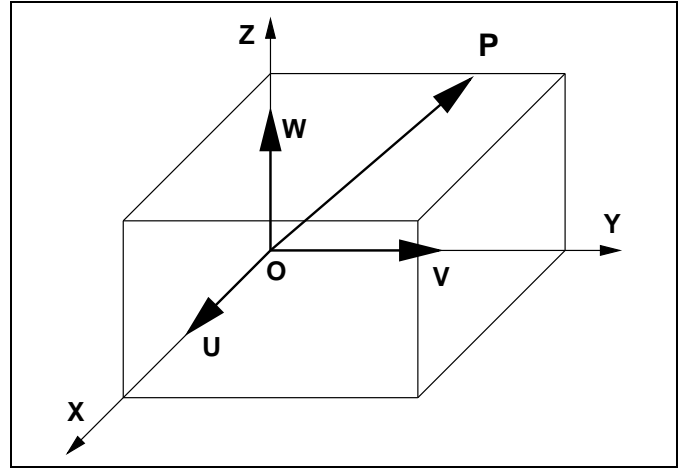


Figura 7: Sistemas de coordenadas do corpo e da referência

sistema $OXYZ$, após o sistema $OUVW$ (e o ponto P junto com ele) haver sido rodado. Isto é,

$$p_{xyz} = R \cdot p_{uvw}$$

Se o sistema $OUVW$ é rodado de um ângulo α em torno do eixo OX , a matriz de rotação correspondente, $R_{x,\alpha}$, é dada por

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

Similarmente, as matrizes para uma rotação de um ângulo ϕ em torno do eixo OY e para uma rotação de θ em torno do eixo OZ são, respectivamente,

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

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

A operação de translação também pode ser efetuada através de uma transformação homogênea. O ponto $v_1 = [x, y, z, 1]^T$ pode ser transladado para o ponto $v_2 = [x + d_x, y + d_y, z + d_z, 1]^T$ através da operação:

$$v_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} v_1$$

As transformações homogêneas mapeam um vetor expresso em coordenadas homogêneas com relação ao sistema de coordenadas $OUVW$ para o sistema de coordenadas de referência $OXYZ$, podendo o sistema $OUVW$ ter sofrido rotações ou translações em relação ao sistema $OXYZ$. Diversas operações sucessivas podem ser combinadas através da



Figura 8: Sistemas de coordenadas para robô Puma

multiplicação das matrizes correspondentes. Como essas operações não são comutativas, a ordem ou seqüência das multiplicações efetuadas é importante. A transformação homogênea resultante pode ser obtida usando as seguintes regras:

1. Inicialmente, ambos os sistemas coincidem, de modo que a transformação homogênea é uma matriz identidade 4×4 , ou I_4 .
2. Se o sistema móvel $0UVW$ gira ou translada em torno de um dos eixos principais do sistema $0XYZ$, então deve-se *premultiplicar* a transformação homogênea anterior pela matriz de rotação ou translação apropriada.
3. Se o sistema móvel $0UVW$ gira ou translada em torno de um dos seus próprios eixos principais, então deve-se *posmultiplicar* a transformação homogênea anterior pela matriz de rotação ou translação apropriada.

Exemplo: Encontre a transformação homogênea resultante que representa uma rotação de α em torno do eixo $0X$, seguida de uma translação de b em torno do eixo rotacionado $0V$.

$$\begin{aligned}
 T &= T_{x,\alpha} I_4 T_{v,b} = T_{x,\alpha} T_{v,b} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & b \cos \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & b \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4.1.2 Parâmetros de Denavit-Hartenberg

Um braço manipulador, conforme indicado na figura 8, é composto de uma seqüência de corpos rígidos, os segmentos, conectados por juntas prismáticas ou rotacionais.

Cada par junta-segmento acrescenta um grau de liberdade ao dispositivo. Assim, para um manipulador de N graus de liberdade, há N pares junta-segmento, bem como um segmento 0 inicial, rigidamente conectado a um sistema de referência inercial. O último segmento é conectado à ferramenta de trabalho.

Um sistema de coordenadas cartesiano (x_i, y_i, z_i) pode ser estabelecido para cada segmento, com $i = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de graus de liberdade do robô. O i -ésimo sistema de coordenadas é fixado no segmento i e move-se junto com ele. Cada sistema de coordenadas é determinado e estabelecido com base no seguinte algoritmo (ver exemplos nas figuras 8):

1. Estabeleça o sistema de coordenadas da base. O eixo z_0 deve coincidir com o eixo de rotação da junta 1. x_0 e y_0 são arbitrários.
2. Para i variando de 1 a $n - 1$:
 - (a) Alinhe o eixo z_i com o eixo de rotação da junta $i + 1$.
 - (b) Localize a origem do i -ésimo sistema de coordenadas na interseção do eixos z_i com:
 - o eixo z_{i-1} ; ou
 - a normal comum entre os eixos z_i e z_{i-1} quando eles forem paralelos.
 - (c) Estabeleça o eixo x_i :
 - normal aos eixos z_i e z_{i-1} ; ou
 - ao longo da normal comum entre os eixos z_i e z_{i-1} quando eles forem paralelos.
 - (d) Determine o eixo y_i pela regra da mão direita.
3. Estabeleça o sistema de coordenadas da ferramenta. Como usualmente a última junta é rotacional, estabeleça z_n ao longo do eixo z_{n-1} e apontando para fora do robô, x_n normal a z_{n-1} e y_n segundo a regra da mão direita.

A representação de um segmento, proposta por Denavit e Hartenberg, depende de quatro parâmetros geométricos,

que descrevem completamente qualquer junta prismática ou rotacional:

- θ_i é o ângulo do eixo x_{i-1} para o eixo x_i , medido em torno do eixo z_{i-1} (usando a regra da mão direita).
- d_i é a distância da origem do $i - 1$ -ésimo sistema de coordenadas para a interseção do eixo z_{i-1} com o eixo x_i , medida ao longo do eixo z_{i-1} .
- a_i é a distância da interseção do eixo z_{i-1} com o eixo x_i para a origem do i -ésimo sistema de coordenadas, medida ao longo do eixo x_i ; em outras palavras, é a distância mais curta entre os eixos z_{i-1} e z_i .
- α_i é o ângulo do eixo z_{i-1} para o eixo z_i , medido em torno do eixo x_i (usando a regra da mão direita).

Para uma junta rotacional, d_i , a_i e α_i são os parâmetros da junta e permanecem constantes, enquanto θ_i é o parâmetro da junta que muda quando o segmento i move (ou gira). Para uma junta prismática, θ_i , a_i e α_i são os parâmetros constantes, enquanto d_i é a variável da junta.

Uma vez obtidos os parâmetros de D-H, é possível calcular-se uma transformação homogênea A_i^{i-1} que relaciona o i -ésimo sistema de coordenadas com o $i - 1$ -ésimo sistema de coordenadas:

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

Usando-se a matriz A_i^{i-1} , pode-se relacionar um ponto P expresso no sistema de coordenadas i com suas coordenadas homogêneas no sistema $i - 1$:

$$p_{i-1} = A_i^{i-1} p_i$$

A transformação homogênea A_i^0 , que especifica a localização do i -ésimo sistema de coordenadas com relação ao sistema de coordenadas de base, pode ser obtida por multiplicação sucessiva das matrizes A_i^{i-1} :

$$A_i^0 = A_1^0 A_2^1 \cdots A_i^{i-1} = \prod_{j=1}^i A_j^{j-1} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

4.2 Cinemática inversa

O problema da cinemática inversa consiste em, dadas a posição e a orientação desejadas para o órgão terminal do manipulador e os parâmetros geométricos dos segmentos, determinar (caso exista) a configuração das juntas do manipulador capaz de atingi-la. Este problema é bem mais complexo do que o da cinemática direta, pois envolve outros problemas:

- Espaço de trabalho – O comprimento dos segmentos de um robô é finito e usualmente existem limites mecânicos no curso das juntas, de forma que o *espaço de trabalho* do manipulador é restrito.
- Alta complexidade e múltiplas soluções – A cinemática inversa envolve a resolução de um sistema de equações não-lineares bastante complexo, e que usualmente admite múltiplas soluções (como na fig. 9).

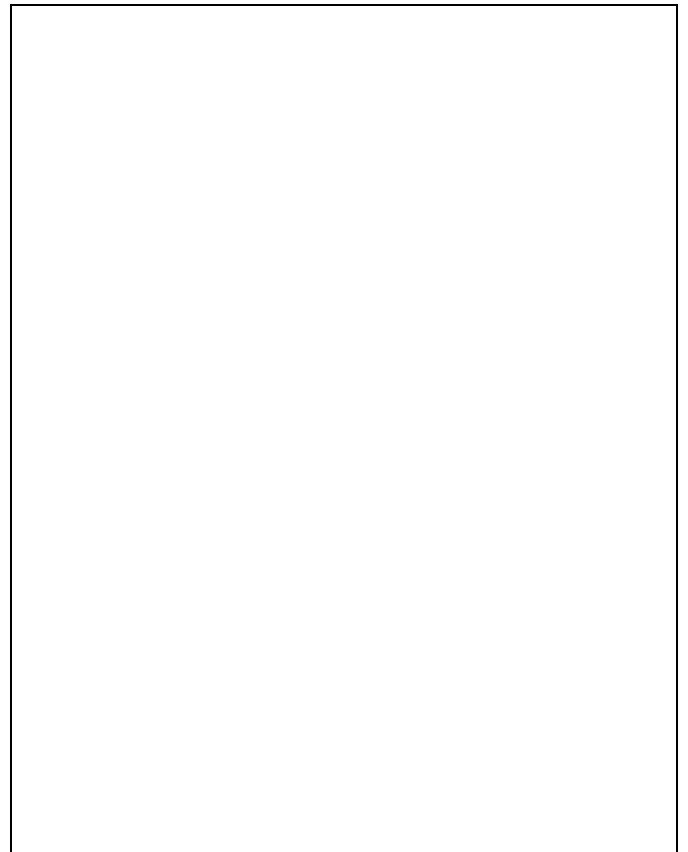


Figura 9: Múltiplas formas de atingir-se uma posição: (a) por cima e à esquerda; (b) por baixo e à esquerda; (c) por cima e à direita; e (d) por baixo e à direita.

Este problema não tem uma solução genérica como no caso da cinemática direta, devendo ser resolvido para cada tipo de manipulador. Uma solução analítica fechada pode ser obtida desde que haja:

- três eixos de juntas adjacentes que se interceptam, o que é satisfeito por um punho esférico (fig. 6); ou
- três eixos de juntas adjacentes e paralelos a um outro eixo.

Para exemplificar, vamos tomar o exemplo de um robô do tipo PUMA (fig. 8). Seja $p = [p_x \ p_y \ p_z]$ a posição desejada, em termos do sistema de coordenadas da base, para o ponto onde o eixo das três últimas juntas se interceptam. O ângulo da primeira junta, θ_1 , necessário para que o manipulador atinja essa posição, é:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{p_y \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_x d_2}{p_x \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2} - p_y d_2} \right)$$

5 Dinâmica de manipuladores

As equações dinâmicas de movimento de um manipulador são um conjunto de equações matemáticas relacionando os torques ou forças aplicados às juntas com os movimentos (posições, velocidades e acelerações) dos segmentos do manipulador.

O robô é uma estrutura dinâmica complexa e seu modelo dinâmico completo integra milhares de termos, além

evidentemente de ser não-linear. Várias formulações foram propostas para obter este modelo. As mais conhecidas são:

- Equações de Lagrange-Euler (L-E) – a obtenção do modelo dinâmico de um manipulador baseando-se na formulação L-E é relativamente simples e sistemática. Infelizmente, o cômputo dos coeficientes que integram a equação matricial final requer uma quantidade elevada de operações aritméticas, o que dificulta a sua utilização em aplicações de controle em tempo real.
- Equações de Newton-Euler (N-E) – a abordagem N-E, baseada em equações recursivas, é bastante eficiente para cômputo em tempo real, pois utiliza uma formulação vetorial no lugar da formulação matricial clássica das matrizes de transformação homogêneas. Infelizmente, as equações recursivas destroem a “estrutura” do modelo dinâmico, o que dificulta a interpretação dos resultados na fase de projeto do sistema de controle.
- Equações generalizadas de d’Alembert (G-D) – permitem um cômputo mais rápido que as equações de L-E e explicitam a contribuição dos efeitos translacionais e rotacionais para esse segmento.

O método de Lagrange-Euler baseia-se no cálculo do Lagrangiano e sua relação com as forças aplicadas:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- L : função lagrangiana = energia cinética K - energia potencial P
- q_i : coordenadas generalizadas do manipulador
- \dot{q}_i : derivada em relação ao tempo da coordenada generalizada q_i
- τ_i : força (ou torque) generalizada aplicada ao sistema na junta i para atuar sobre o segmento i .

As coordenadas generalizadas de L-E podem ser qualquer conjunto de variáveis que descreva completamente a localização de um sistema com relação a um sistema de coordenadas de referência. Em um robô manipulador, as candidatas naturais a serem adotadas como coordenadas generalizadas são as variáveis das juntas: para juntas rotacionais, $q_i = \theta_i$, e para juntas prismáticas, $q_i = d_i$.

Para um robô de seis graus de liberdade, a aplicação da equação de Lagrange-Euler leva a

$$\tau_i(t) = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \ddot{q}_j + I_i \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i$$

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{Traço} \left(\frac{\partial T_p^0}{\partial q_j} J_p \frac{\partial T_p^0}{\partial q_i} \right)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{Traço} \left(\frac{\partial^2 T_p^0}{\partial q_j \partial q_k} J_p \frac{\partial T_p^0}{\partial q_i} \right)$$

$$D_i = \sum_{p=i}^6 -m_p g^T \frac{\partial T_p^0}{\partial q_i} \bar{r}_p$$

$$J_i = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int x_i y_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int y_i dm \\ \int x_i z_i dm & \int y_i z_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix}$$

$$\text{Traço}(A) = \sum_{i=1}^6 a_{ii};$$

- I_i : inércia do atuador i ;
- J_i : matriz de pseudo-inércia do segmento i com relação ao sistema de coordenadas da junta i ;
- T_i^0 : matriz de transformação homogênea da junta i , com relação à base;
- \bar{r}_i : vetor que descreve o centro de massa do segmento i com relação ao sistema de coordenadas da junta i ;
- g : o vetor de gravidade expresso no sistema de coordenadas da base (se a base está em nível e com o eixo z orientado para o alto, $g = [0 \ 0 \ -9,8 \ 0]$)

O objetivo maior do estudo da dinâmica é o projeto de um controlador apropriado para o manipulador. O modelo obtido é extremamente não-linear e computacionalmente complexo, o que leva à utilização de modelos simplificados ou de técnicas inovadoras de controle.

6 Planificação e geração de trajetórias

Os problemas de planificação de trajetória estática (caminho) e dinâmica (trajetória propriamente dita) aparecem tanto em robôs móveis (fig. 10) quanto em manipuladores. Antes de mover-se um robô, deve-se levar em conta se existem obstáculos no caminho (restrições de obstáculos) e se a aplicação exige que o robô ou órgão terminal passe por alguma posição em particular (restrições de percurso). Essas duas exigências combinadas levam a quatro possíveis modos de controle:

		Obstáculos	
		Sim	Não
P e r c u r s o	S	Geração de vários caminhos (off-line)	Geração de caminho (off-line)
	m	Acompanhamento de caminho (on-line)	Acompanhamento de caminho (on-line)
r e s t r i ç õ e s	N	Controle de posição (on-line)	Controle de posição (on-line)
	ã	Deteção e desvio de obstáculos (on-line)	

Uma vez determinado um caminho sem colisão, o caso com restrições de percurso e de obstáculos torna-se equivalente ao caso com restrição de percurso e sem restrição de obstáculos, desde que se considere o caminho encontrado como uma macro-restrição de caminho. Em muitos casos onde não há restrições de percurso não é necessário uma planificação de trajetória, bastando especificar-se o ponto final desejado e deixando-se a movimentação do robô a cargo dos controladores locais das juntas.

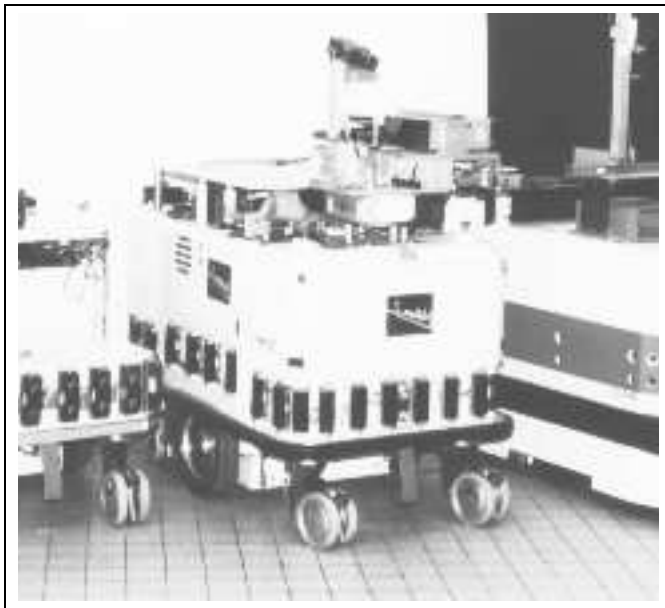


Figura 10: Exemplos de robôs móveis (família *Hilare*)

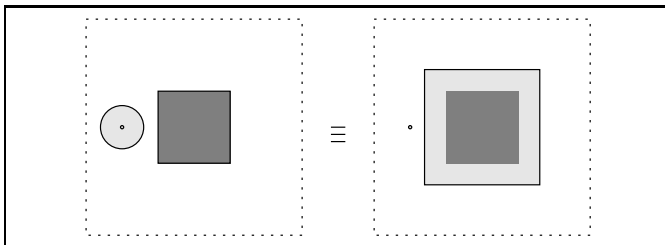


Figura 11: Engrandecimento de obstáculos para robô móvel circular

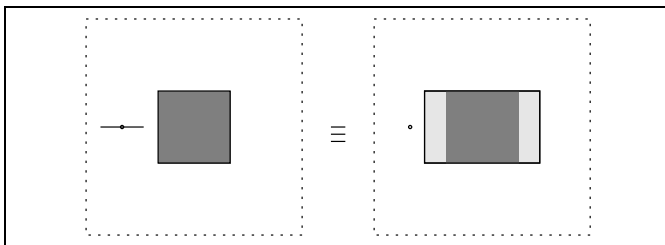


Figura 12: Engrandecimento de obstáculos para robô móvel não-circular de orientação fixa

6.1 Procura de caminhos sem colisão

A procura de caminhos sem colisões para um corpo, em um ambiente de duas ou três dimensões, usualmente pode ser reduzida à procura de caminhos para um ponto em um ambiente de n dimensões, através do engrandecimento dos obstáculos.

Caso 1: Robô móvel circular

Neste exemplo, os obstáculos são simplesmente engrandecidos, em todas as dimensões, de um valor igual ao raio do robô (figura 11).

Caso 2: Robô móvel não-circular de orientação fixa

Os obstáculos são engrandecidos em cada dimensões, de um valor igual à metade da dimensão correspondente do robô (figura 12).

Caso 3: Robô móvel não-circular de orientação variável

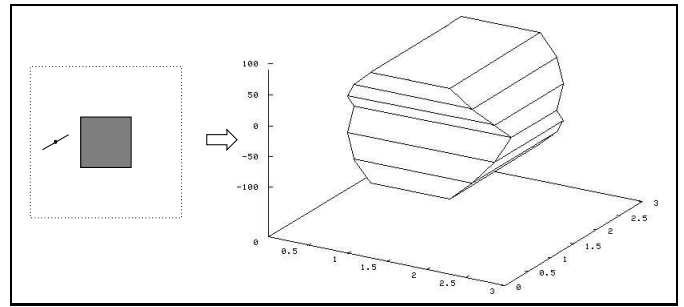


Figura 13: Engrandecimento de obstáculos para robô móvel não-circular de orientação variável

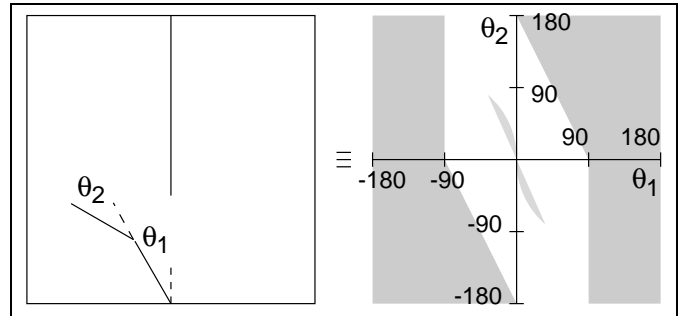


Figura 14: Engrandecimento de obstáculos para robô manipulador

Para cada valor de orientação, recai-se no caso anterior. Para poder-se levar em conta tanto o posicionamento quanto a orientação ao mesmo tempo, passa-se de um plano 2D para o espaço 3D, onde a terceira dimensão corresponde ao ângulo de rotação do robô. Cada obstáculo no plano gera um volume no espaço, e o problema passa a ser encontrar uma trajetória para um ponto neste espaço ocupado por obstáculos volumétricos, como indicado na figura 13.

Caso 4: Robô manipulador

Os obstáculos são mapeados em um espaço de dimensão n , onde cada uma das n dimensões corresponde a uma das variáveis de junta. Na figura 14 mostra-se um exemplo com um robô de dois graus de liberdade.

Uma vez feito o engrandecimento dos obstáculos, resta o problema de determinação de um caminho para um ponto neste espaço n -dimensional. Algumas abordagens consagradas são o diagrama de Voronoi e a divisão em células convexas.

- Diagrama de Voronoi (fig. 15). Dado um ambiente com obstáculos, o diagrama de Voronoi deste ambiente é, de forma simplificada, o conjunto de pontos que têm a propriedade de estarem à mesma distância dos dois obstáculos mais próximos, levando-se em conta as menores distâncias entre os obstáculos e o ponto. Para se navegar entre dois pontos, procede-se da seguinte forma:

1. move-se o robô do ponto de partida até o ponto do Voronoi mais próximo;
2. caminha-se sobre o Voronoi até o ponto mais próximo possível do ponto de destino;
3. desloca-se o robô até o ponto final desejado.

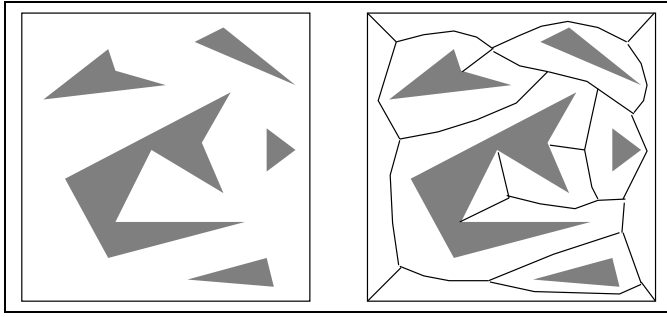


Figura 15: Diagrama de Voronöi

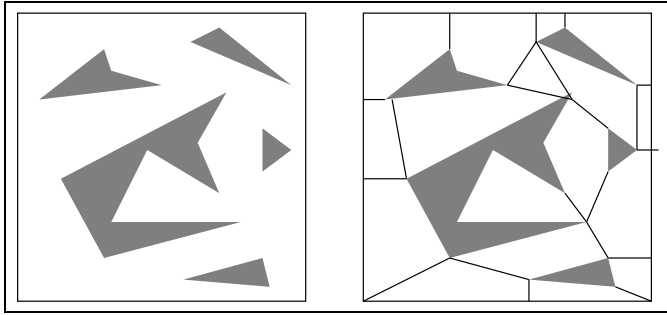


Figura 16: Divisão em células convexas

Este método garante um caminho sem colisões, desde que exista um caminho válido entre os pontos desejados.

- Subdivisão em células convexas (fig. 16). Divide-se o ambiente em células delimitadas por polígonos convexos, ou seja, polígonos em que as retas unindo quaisquer dois pontos internos ao polígono estão inteiramente contidas dentro do polígono. Como a navegação dentro de uma célula convexa não oferece risco de colisão, basta mover-se do interior de uma célula para o ponto médio da fronteira com a célula adjacente, e assim sucessivamente, até atingir-se a célula que contém o ponto desejado.

6.2 Geração de trajetórias

Em alguns casos, tais como em robôs de solda, a trajetória desejada é especificada no espaço cartesiano, devendo-se fazer a conversão para o espaço de trabalho das juntas. Em razão da complexidade da cinemática inversa, é bastante difícil determinar-se os deslocamentos exatos nas juntas ($\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)$) necessários para que o órgão terminal do manipulador percorra a trajetória especificada.

Uma abordagem aproximada e que dá excelentes resultados é a seguinte:

- Escolhem-se N pontos notáveis ao longo da trajetória especificada no espaço cartesiano, descritos através do instante de tempo e da posição do órgão terminal desejados.
- Para cada um desses N pontos, usando-se a cinemática inversa do manipulador, calculam-se os ângulos das juntas correspondentes. Para um robô de seis graus de liberdade, calcular-se-iam portanto $6 \times N$ ângulos θ_{ij} , $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, $j = 1, \dots, N$.

- Para cada junta, tem-se então uma série de N valores para a variável da junta, com os instantes de tempo associados. Por interpolação, calcula-se então uma trajetória que passe por todos os pontos nos instantes apropriados.

Sabe-se que para interpolar N pontos precisa-se de um polinômio de ordem $N - 1$. Como usualmente o valor de N é grande para se garantir uma boa trajetória, o polinômio interpolador teria uma ordem elevada. Isto não é desejável, pois o cálculo dos coeficientes tende a ser dificultada por erros numéricos e há grande possibilidade de serem introduzidos movimentos indesejados nas posições intermediárias.

Uma abordagem alternativa consiste em dividir-se a trajetória da junta em sub-trajetórias, cada uma das quais descrita por um polinômio de ordem menor. Esse método contorna as dificuldades inerentes à utilização de polinômios de ordem elevada, mais introduz o problema de continuidade da trajetória nos pontos de chaveamento entre dois polinômios: para que não haja problemas de vibração no robô, a trajetória deve ser contínua nos pontos de chaveamento.

Os polinômios de terceira ordem são os polinômios de menor ordem entre os que permitem continuidade de posição e velocidade nos pontos de chaveamento. Em relação a uma variável de junta, deve-se calcular uma trajetória $q(t)$, formada por uma sequência de $N - 1$ polinômios cúbicos $\Pi_k(t)$, para $k = 1, \dots, N - 1$:

$$\begin{aligned} q(t) &= \Pi_k(t) & \text{para } t_k \leq t < t_{k+1} \\ \Pi_k(t) &= a_{k3}t^3 + a_{k2}t^2 + a_{k1}t + a_{k0} \end{aligned}$$

No método onde os polinômios interpoladores são conhecidos como *splines* cúbicas, não se impõem valores específicos para as velocidades nos pontos de interpolação, mas exige-se a continuidade tanto da velocidade quanto da aceleração. Para cada um dos pontos intermediários de interpolação (excluindo-se o primeiro e o último) as seguintes equações devem ser satisfeitas:

$$\begin{aligned} \Pi_{k-1}(t_k) &= q_k \\ \Pi_{k-1}(t_k) &= \Pi_k(t_k) \\ \dot{\Pi}_{k-1}(t_k) &= \dot{\Pi}_k(t_k) \\ \ddot{\Pi}_{k-1}(t_k) &= \ddot{\Pi}_k(t_k) \end{aligned}$$

Para o primeiro e último pontos, a posição, velocidade e aceleração desejados usualmente são especificados:

$$\begin{aligned} \Pi_1(t_1) &= q_i & \Pi_{N-1}(t_N) &= q_f \\ \dot{\Pi}_1(t_1) &= \dot{q}_i & \dot{\Pi}_{N-1}(t_N) &= \dot{q}_f \\ \ddot{\Pi}_1(t_1) &= \ddot{q}_i & \ddot{\Pi}_{N-1}(t_N) &= \ddot{q}_f \end{aligned}$$

O sistema resultante tem mais equações ($4N - 2$) do que incógnitas ($4N - 4$). Para poder resolvê-lo, diversas possibilidades existem:

- Elimina-se a possibilidade de atribuir um valor arbitrário à aceleração inicial e final.
- Utiliza-se polinômios de quarta ordem para o primeiro e o último segmentos.

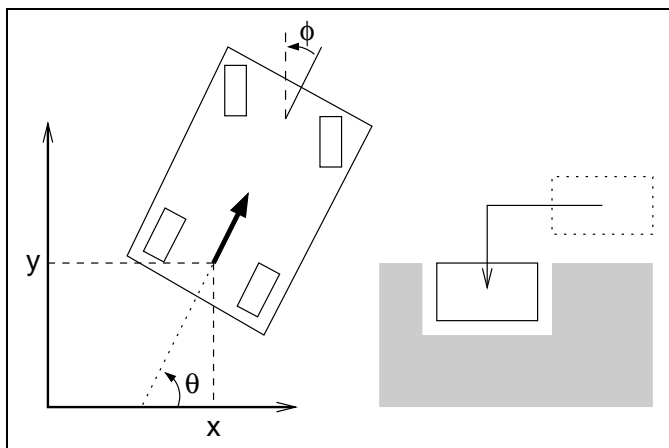


Figura 17: Restrição não-holônoma em um carro

- Introduz-se dois pontos virtuais suplementares para os quais apenas a continuidade em posição, velocidade e aceleração é exigida, sem especificar-se o valor da posição. A introdução dos pontos virtuais implica na determinação de $N + 1$ polnômios cúbicos.

6.3 Trajetórias dinâmicas

Na execução dinâmica dos caminhos, alguns parâmetros adicionais devem ser considerados:

- Geração do perfil de velocidades, com o correspondente mapeamento do espaço de trabalho para o espaço das juntas. Quanto o perfil de velocidades não faz parte das especificações da trajetória desejada, deve-se gerá-lo levando-se em conta as limitações mecânicas do robô e otimizando-se critérios como tempo de percurso, gasto de energia, etc.
- Restrições de movimento do robô, como a não-holonomia. Sistemas não-holônimos são aqueles em que há uma equação não-integrável envolvendo as derivadas dos parâmetros de configuração. Um exemplo de sistema não-holônomo é um automóvel (fig. 17), para o qual vale a equação

$$\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = 0$$

A consequência da não-holonomia é que nem todo caminho no espaço admissível de configurações (ou seja, sem haver colisões) corresponde necessariamente a uma trajetória executável pelo veículo, como é o caso da trajetória impossível indicada na figura 17.

7 Controle de manipuladores

Várias técnicas de controle têm sido propostas, tanto para efetuar o controle no espaço das juntas quanto no espaço cartesiano. Muitas delas se baseiam em compensação do efeito de acoplamento entre as juntas empregando o modelo dinâmico do robô, enquanto outras utilizam técnicas de identificação em tempo real para sintonizar controladores adaptativos.

7.1 Controle linear

Atualmente, os controladores de muitos manipuladores industriais se baseiam em laços de realimentação em posição e velocidade independentes para cada junta e que recebem como entrada de referência uma trajetória desejada para a junta. Apesar do acoplamento não-linear inerente entre as juntas do manipulador, um tal controlador muitas vezes é suficientemente eficiente. As principais duas razões para isso parecem ser as grandes taxas de redução entre os atuadores e os segmentos do robô e os grandes ganhos de realimentação no laço de controle.

7.2 Utilização do modelo dinâmico completo

O controle em malha aberta de um robô com base no seu modelo dinâmico completo tem interesse apenas teórico, pois se baseia em um controle do manipulador inteiramente sem realimentação. A idéia consiste basicamente em, conhecendo-se as posições e velocidades desejadas para as juntas (q_d e \dot{q}_d), calcular-se o torque que deve ser aplicado a cada instante nas juntas, $\tau_d(t)$, através do modelo dinâmico do manipulador (seção 5):

$$\tau_i(t) = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \ddot{q}_j + I_i \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i$$

Conhecendo-se a cada instante o torque que deve-se aplicar nos segmentos, pode-se determinar com precisão o torque τ_{md} que deve ser gerado pelos atuadores.

Sob o ponto de vista conceitual, este método garante a geração exata da trajetória desejada, mas na prática não pode ser utilizado. Ele baseia-se em um conhecimento perfeito e completo dos modelos tanto do robô quanto dos atuadores, o que nunca pode ser garantido. Como não há realimentação da posição efetiva do manipulador a ser comparada com a posição desejada, os erros não são corrigidos, além de serem cumulativos.

7.3 Método do torque computado

O método do torque computado alia as vantagens da utilização do modelo dinâmico do robô com a medição do erro do controle linear. Suponha-se que a dinâmica do manipulador seja governada pela equação do seu modelo dinâmico, que pode ser reescrita da forma

$$\tau = D(q)\ddot{q} + h_N(q, \dot{q})$$

Vamos introduzir uma realimentação não-linear neste sistema fazendo

$$\tau = h_N(q, \dot{q}) + D(q)u_q$$

onde u_q é um novo vetor de entrada. Então, o sistema de malha fechada resultante é

$$\ddot{q} = u_q$$

que é linear e desacoplado com relação às variáveis das juntas. A introdução desta realimentação equivale portanto a uma linearização do sistema.

Vamos assumir inicialmente a situação ideal, onde o modelo dinâmico é representado fielmente o manipulador, sem nenhum erro de modelamento, e onde não há perturbações externas ao sistema. Neste caso, obtém-se $q(t) = q_d(t)$ simplesmente fazendo-se $u_q = \ddot{q}_d$, o que recai na estratégia de controle discutida na seção 7.2, com todas as suas limitações.

Para levar em conta os erros de modelamento e perturbações externas inevitavelmente existentes no sistema, a idéia é reduzir seu efeito no controle instalando-se um servocontrolador no sistema linearizado. A figura 18 é um diagrama esquemático desta abordagem de controle em duas etapas (linearização e servocompensação), conhecida como técnica do torque computado.

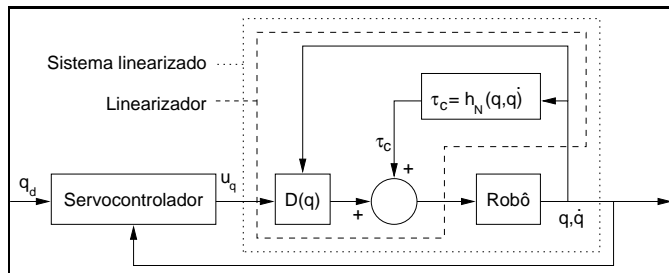


Figura 18: Técnica do torque computado

8 Percepção e fusão de dados

Um robô verdadeiramente inteligente deve basear-se em informações obtidas em tempo real, e não apenas em dados fornecidos *a priori*, o que implica em dotar a máquina com as capacidades de:

- Obtenção de mapas
- Detecção de obstáculos

Na obtenção de mapas, a maior dificuldade consiste em extrair a informação em três dimensões a partir de sensores pouco precisos a longas distâncias (sonares) ou bidimensionais (câmeras). Uma técnica bastante utilizada consiste em combinar informações de diversos sensores (por exemplo, via visão estéreo).

A informação dos sensores pode ser tratada para obter-se informação sobre a posição espacial do robô ou utilizada diretamente como sinal de realimentação para o controle, através de técnicas de realimentação visual. A realimentação visual vem sendo bastante estudada nestes últimos tempos: ao invés de utilizar as imagens para ajudar a localizar o robô no espaço, reformula-se o problema de forma a que se deseje posicionar um ou mais *pixels* notáveis em um ponto preciso do quadro de imagens.

9 Planificação de tarefas e arquiteturas de controle

Em robôs com largo grau de autonomia, é necessário determinar-se um certo planejamento das tarefas a serem

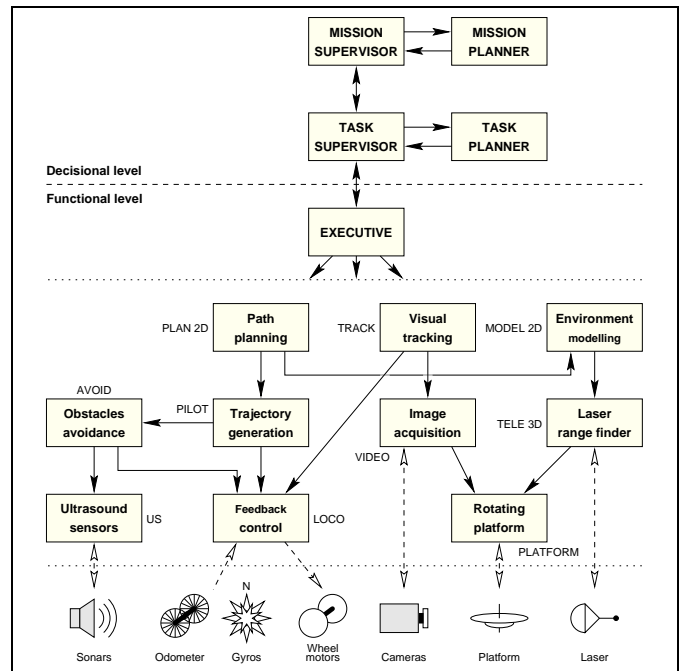


Figura 19: Exemplo de arquitetura de controle

executadas. Isso requer a utilização de técnicas de inteligência artificial e uma definição da arquitetura de controle do sistema. Na figura 19 vê-se um esquema da arquitetura de controle dos robôs apresentados na figura 10.

A planificação em robótica utiliza as técnicas clássicas de inteligência artificial. Os grandes complicadores, entretanto, são o grande volume de informações obtidos pela percepção e o fato que o robô precisa agir rapidamente (mesmo que não tão inteligentemente) em determinadas situações.

10 Bibliografia

- **Borenstein, J. et al.** *Navigating Mobile Robots - Systems and Techniques*. A K Peters, 1996.
- **Corke, P.I.** *Visual Control of Robots - High-Performance Visual Servoing*. Research Studies Press/John Wiley & Sons, 1996.
- **Fu, K.S. et al.** *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*. McGraw-Hill, 1987.
- **Parker, J.R.** *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. John Wiley & Sons, 1997.
- **Paul, R.P.** *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. MIT Press, 1981.
- **Russell, S. e Norvig, P.** *Artificial Intelligence - A Modern Approach*. Prentice-Hall, 1995.
- **Sciavicco, L. e Siciliano, B.** *Modeling and Control of Robot Manipulators*. McGraw-Hill, 1996.