

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

Posicionamento Inteligente de um Manipulador Robótico

Por:

Cristiany de Nazaré Moscoso do Amaral Ferreira

Dissertação apresentada à coordenação de Pós-graduação em informática – COPIN – da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Informática.

Orientadores: José Homero Feitosa Cavalcanti, Dr.

Pablo Javier Alsina, Dr.

Campina Grande - PB

Agosto de 1999



Ficha catalográfica

Ferreira, Cristiany de Nazaré Moscoso do Amaral

F383p

Posicionamento Inteligente de um Manipulador Robótico

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Coordenação de Pós-Graduação em Informática, Campina Grande – 1999.

80 p. il

Orientador: José Homero Feitosa Cavalcanti

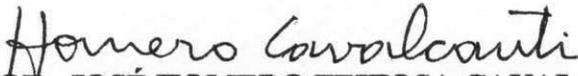
1. Inteligência Artificial
2. Controle Inteligente
3. Robótica
4. Lógica Fuzzy

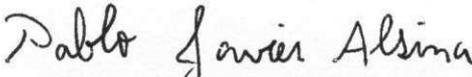
CDU – 007.52

POSICIONAMENTO INTELIGENTE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO

CRISTIANY DE NAZARÉ MOSCOSO DO AMARAL FERREIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23.08.1999


PROF. JOSÉ HOMERO FEITOSA CAVALCANTI, Dr.
Orientador


PROF. PABLO JAVIER ALSINA, D.Sc
Co-orientador


PROF. JOSÉ FELÍCIO DA SILVA, Dr.
Examinador

CAMPINA GRANDE – PB

À minha mãe amada, Teresa Moscoso.

Agradecimentos

Meu agradecimento em especial a meu orientador Prof. Dr. Homero Feitosa Cavalcanti pela orientação, esforço, apoio, incentivo e principalmente paciência.

Também meus sinceros agradecimentos ao professor Edilson Ferneda pelo apoio dado nos momentos iniciais e mais difíceis dessa jornada. Meu muito obrigada aos companheiros Everaldo, Aleksandro e Juracy que vivenciaram comigo diariamente grande parte do trabalho, dando suas opiniões, incentivos e cooperação.

A Aleksandra e aos primos Márcio e Deni, pelo apoio dado em casa.

A minha mãe Teresa Moscoso pela força dada durante a realização deste trabalho. Meu agradecimento em especial para meu marido Ricardo Ferreira pelas conversas e apoio dados neste período, e a Gabriela pelos chutes dados em minha barriga.

E meu muito obrigada a todos que indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vi
Lista de Quadros.....	vii
Resumo.....	viii
Abstract.....	ix
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Sistemas Inteligentes.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Organização da Dissertação	3
Capítulo 2 Robótica	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 A Robótica.....	5
2.3 Configuração de um Robô.....	6
2.3.1 Espaço de Trabalho (Workspace)	7
2.3.2 O Manipulador	8
2.3.3 A Unidade de Controle.....	9
2.3.4 Atuadores.....	11
Capítulo 3 Robôs manipuladores	14
3.1 Introdução.....	14
3.2 Manipulador com Um Grau de Liberdade.....	14
3.2.1 O pêndulo simples.....	15
3.3 Manipulador com Dois Graus de Liberdade.....	17
3.3.1 Braço com dois elos.....	18

3.3.2 Determinação dos ângulos das juntas.....	20
3.3.3 Determinação dos eixos cartesianos.....	20
3.4 Manipulador com Três Graus de Liberdade.....	22
3.5 Conclusão.....	23
Capítulo 4 Garras.....	24
4.1 Introdução.....	24
4.2 Garras.....	24
4.3 Tipos de Garras.....	24
4.4 Garras Mecânicas.....	25
4.5 Garras Magnéticas.....	27
4.6 Garras de Sucção.....	29
4.7 Outros Dispositivos.....	30
4.8 Conclusão.....	32
Capítulo 5 O Robô AUTOXAD.....	33
5.1 Introdução.....	33
5.2 O AUTOXAD.....	33
5.3 Arquitetura do AUTOXAD.....	34
5.4 O Sistema Inteligente do AUTOXAD.....	35
5.5 O Ambiente de Trabalho do AUTOXAD.....	36
5.6 Implementação do AUTOXAD.....	37
5.7 Módulo da Simetria entre as Alas do Rei e da Dama.....	39
5.8 Análise Geométrica de L2 e L3.....	41
5.9 Posicionando a garra sobre uma casa do tabuleiro de xadrez.....	42
5.10 .1 Posicionando o eixo do motor da base.....	43
5.10.2 Posicionando os motores dos elos L2 e L3.....	43

5.11 Resultados Obtidos.....	45
5.11.1 Posicionamento de $2R \rightarrow 2C_R$	45
5.11.2 Posicionamento de $1B_D \rightarrow 3B_D$	46
5.11.3 Posicionamento de $1C_R \rightarrow 1C_D$	48
5.11.4 Outros Posicionamentos	49
5.12 O protótipo do AUTOXAD	49
5.13 Conclusão	51
Capítulo 6 Conclusão	52
Bibliografia	54
Apêndice A Lógica Fuzzy	59
A.2. Fundamentos da Lógica Nebulosa	61
A.3. Operações	62
A.3.1. União.....	62
A.3.2. Interseção	63
A.3.3. Complemento	63
A.4. Expressão Nebulosa do Conhecimento	64
A.5. Sistemas de Controle Nebuloso	65
Apêndice B Motor de Passo.....	67
Apêndice C Posicionamento do Pêndulo Invertido	69
Apêndice D Posicionamento do Pêndulo Duplo.....	77

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - AS QUATRO ANATOMIAS BÁSICAS DO ROBÔ: (A) POLAR, (B) CILÍNDRICO, (C) ARTICULADOS E (D) CARTESIANO.	7
FIGURA 2.2 – ESPAÇOS DE TRABALHO PARA ALGUMAS DAS ANATOMIAS DE ROBÔ: POLAR, CILÍNDRICO E CARTESIANO RESPECTIVAMENTE.	8
FIGURA 2.3 - CONTROLE EM MALHA FECHADA.	10
FIGURA 2.4 - CONTROLE DE MALHA ABERTA.	10
FIGURA 2.5 - S400. EXEMPLO DE UM ROBÔ ELÉTRICO.	12
FIGURA 2.6 - HYD-2800. EXEMPLO DE UM ROBÔ HIDRÁULICO.	12
FIGURA 2.7 - BOADICEA. EXEMPLO DE UM ROBÔ PNEUMÁTICO.	13
FIGURA 3.1 - DESENHO DO PÊNDULO SIMPLES.	16
FIGURA 3.2 - O POSICIONAMENTO DO EIXO DO MOTOR.	16
FIGURA 3.3 - MANIPULADORES COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE. (A) PÊNDULO DUPLO. (B) BRAÇO MANIPULADOR.	18
FIGURA 3.4 - BRAÇO MANIPULADOR.	19
FIGURA 3.5 – O BRAÇO NO PONTO P (X,Y), INDICANDO DUAS CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS PARA ALCANÇAR-SE A POSIÇÃO.	22
FIGURA 3.6 - MANIPULADOR COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE.	23
FIGURA 4.1 - DEDOS INTERCAMBIÁVEIS.	26
FIGURA 4.2 - DUAS MANEIRAS DE SEGURAR UMA PEÇA: (A) SISTEMA DE <i>CONSTRUÇÃO FÍSICA</i> , (B) SEGURAR A PEÇA POR ATRITO.	26
FIGURA 4.3 - DISPOSITIVO SEPARADOR UTILIZADO COM UMA CARGA MAGNÉTICA.	29
FIGURA 4.4 - DISPOSITIVO COM VENTURI USADO PARA OPERAR UM COPO DE SUCCÃO.	30
FIGURA 4.5 - BALÃO EXPANSÍVEL: (A) BALÃO PEGANDO UM COPO (B) BALÃO INFLADO.	31
FIGURA 4.6 - MÃO ANTROPOMÓRFICA.	31
FIGURA 5.1 - O ROBÔ AUTOXAD.	34
FIGURA 5.2 - (A) O DESENHO DO AUTOXAD (B) O EIXO BASE.	35
FIGURA 5.3 – O SISTEMA SI.	35
FIGURA 5.4 - POSIÇÃO DAS ESTRUTURAS.	36
FIGURA 5.5 - CASAS SIMÉTRICAS NA MESMA LINHA.	37
FIGURA 5.6 - FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DA POSIÇÃO DA COLUNA.	38
FIGURA 5.7 – MOVIMENTO DE UMA PEÇA.	40
FIGURA 5.8 – REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS ELOS L2 E L3 NO PLANO CARTESIANO.	41
FIGURA 5.9 – REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO MANIPULADOR.	43
FIGURA 5.10 - REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS ELOS L2 E L3 NO PLANO CARTESIANO. ..	44
FIGURA 5.11 - REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DA GARRA NAS POSIÇÕES $2R \rightarrow 2C_R$	45

FIGURA 5.12 - REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DA GARRA NAS POSIÇÕES $1B_D \rightarrow 3B_D$.	47
FIGURA 5.13 - REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DA GARRA NAS POSIÇÕES $1C_R \rightarrow 1C_D$.	48
FIGURA 5.14 - JANELA DO AUTOXAD	50
FIGURA 5.15 - JANELA DE AJUDA DO AUTOXAD	50
FIGURA A.1 - REPRESENTAÇÃO DE VALORES NA LÓGICA NEBULOSA.	60
FIGURA A.2 - FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA.	61
FIGURA A.3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OPERAÇÃO UNIÃO.	62
FIGURA A.4 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OPERAÇÃO INTERSEÇÃO.	63
FIGURA A.5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OPERAÇÃO COMPLEMENTO.	64
FIGURA A.6 - SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO.	65
FIGURA B.1 - CONECTOR DB25/FÊMEA.	67
FIGURA B.2 - MOTOR GENÉRICO DE QUATRO FASES.	68
FIGURA C.1 - O CÍRCULO DO TORQUE.	70
FIGURA C.2 - FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DO CÍRCULO.	70
FIGURA C.3 - FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DE POSIÇÃO $\theta(T)$ E VELOCIDADE ANGULAR $\Omega(T)$.	73
FIGURA C.4 - O CÍRCULO DAS ESTRATÉGIAS.	74
FIGURA C.5 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DE NO.	74
FIGURA C.6 - CONTROLADOR NEURAL DE POSIÇÃO.	76
FIGURA D.1 - ESTRUTURA ROBÓTICA.	77
FIGURA D.2 - SEQÜÊNCIA DE ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTOS.	78
FIGURA D.3 - DIAGRAMA DE ESTADOS DAS ESTRATÉGIAS.	79

Lista de Tabelas

TABELA 5.1 - DADOS DAS POSIÇÕES 2R E 2C _R	46
TABELA 5.2 - DADOS DAS POSIÇÕES 1B _D E 3B _D	47
TABELA 5.3 - DADOS DAS POSIÇÕES 1C _R E 1C _D	48
TABELA 5.4 - POSICIONAMENTO DO AUTOXAD.....	49

Lista de Quadros

QUADRO 5.1- ANÁLISE DA SIMETRIA AO MOVIMENTO.	38
QUADRO 5.2 - MOVIMENTO DO MOTOR QUANDO EXISTE SIMETRIA.	39

Resumo

Nesta dissertação descreve-se o projeto, a implementação, a montagem de um protótipo, e os resultados experimentais obtidos de um Sistema de Posicionamento Inteligente de um braço mecânico utilizado para mover as peças sobre um tabuleiro de xadrez. O Sistema é baseado em técnicas de Inteligência Artificial, utilizando Lógica Fuzzy cujas regras e axiomas foram obtidas a partir da observação (analogia) dos movimentos das mãos de um jogador (simetria) durante a manipulação das peças numa partida de xadrez. Serão apresentados alguns detalhes da construção do braço mecânico e os resultados experimentais obtidos do movimento de peças no tabuleiro de xadrez.

Abstract

In this dissertation is described the project, the implementation, the assembly of a prototype, and the obtained experimental results of a System for Intelligent Positioning of a mechanical arm used to move the pieces on a chessboard. The System is based on techniques of Artificial Intelligence, using fuzzy logic whose rules and axioms were obtained starting from the observation (analogy) of the movements of the a player's hands (symmetry) during the manipulation of the pieces in a chess game. Some details of the construction of the mechanical arm and the obtained experimental results of the movement of pieces in the chessboard will be presented.

Introdução

1.1 Sistemas Inteligentes

A Inteligência Artificial (IA) tem como principal objetivo entender os mecanismos da inteligência e realizá-los nas máquinas, as quais deverão ter, em princípio, a capacidade de aprender, adaptar-se e evoluir, para que sejam consideradas inteligentes (Fukuda, 1997).

Uma das áreas que atualmente mais utiliza técnicas de IA é a robótica. Os robôs, por necessitarem de um alto grau de adaptabilidade e flexibilidade em um ambiente determinado, possuem liberdade para realizar determinadas tarefas de acordo com o meio em que estão inseridos, como por exemplo, na exploração espacial, na manipulação de amostras (ampolas) em análises biomédica e cirurgia. Esses robôs devem perceber o meio em que estão inseridos e modificar suas ações para realizar tarefas específicas, através de um comportamento inteligente.

Um dos temas de grande interesse na robótica, é o posicionamento de braços robóticos durante a execução de uma tarefa de manipulação de objetos (robôs antropomorfos). Muitas tarefas exigem que os movimentos sejam executados dentro de um tempo e uma trajetória rigorosamente exatos. Porém, algumas vezes as tarefas a serem executadas não necessitam de tal exatidão, mas por outro lado necessitam de um grau de adaptabilidade e flexibilidade próximo aos encontrados nos seres humanos. Portanto, o estudo de técnicas que empregam a adaptabilidade em sistemas robóticos se mostra interessante principalmente quando se necessita que esses sistemas desempenhem tarefas nocivas aos seres humanos e que apresentem um comportamento variável. A manipulação de amostras em laboratórios de análise clínica se enquadra neste tipo de tarefa. Entretanto é possível apresentar um estudo de sistemas robóticos através de problemas semelhantes com fácil adaptação para esses ambientes atípicos e que pelas próprias características, não suportam a presença de terceiros.

Em robótica, o uso de controladores baseados em Lógica Fuzzy (LF) (apresentada no Apêndice A) apresenta como vantagem a facilidade de descrição do comportamento de um robô com regras heurísticas definidas, a priori, por um especialista humano (Uebel, 1995). A principal idéia do controle nebuloso é construir um modelo das ações de controle de um perito

humano, que é capaz de controlar a planta sem a necessidade de um modelo matemático. O especialista especifica suas ações de controle na forma de regras lingüísticas. As regras de controle são traduzidas numa estrutura da teoria de conjuntos fuzzy provendo um cálculo que pode simular o comportamento do especialista humano (Gomes, 1994).

Atualmente os robôs não dependem somente de movimentos sincronizados e extremamente exatos, eles necessitam também de independência para realizar determinadas tarefas de acordo com o meio em que estão inseridos. Um robô pode sentir o meio, modificar suas ações para conduzir tarefas específicas, através de um comportamento inteligente. Seu comportamento inteligente é que o diferencia cada vez mais de máquinas convencionais.

Pode-se dividir o sistema robô em três sub-sistemas: os componentes mecânicos, constituído do manipulador, mão (ou órgão terminal) e o “atuador” que os move; Sensores, para medição da posição do robô e do ambiente externo; e a inteligência, que é a habilidade de um sistema agir de uma forma razoável num ambiente incerto, onde uma ação apropriada aumenta a probabilidade de sucesso.

Os Sistemas de Controle Inteligente devem possuir a habilidade de sentir o seu ambiente, processar informações para reduzir as incertezas nos parâmetros do processo, planejar, gerar e executar ações de controle (Cavalcanti, 1995a). Um Sistema de Controle Inteligente (SCI) pode ser implementado com técnicas de controle associado a técnicas de Inteligência Artificial (Regras Fuzzy, Redes Neurais e Sistemas Especialistas) e utilizando microcomputadores para o controle digital e a gerência do sistema (Porte, 1989).

A implantação do SCI deve ser capaz de estabelecer seus próprios objetivos baseados no reconhecimento da situação (percepção), e podendo utilizar conhecimentos adquiridos anteriormente (experiência). O SCI deve ser capaz de operar com incertezas e tomar decisões em ambientes não estruturados.

1.2 Objetivo

A principal meta deste trabalho é descrever o projeto e implementação de um Sistema Inteligente para o controle do posicionamento de um manipulador robótico com três graus de liberdade sobre as peças de um tabuleiro de xadrez. Este SI utiliza algumas analogias dos

movimentos de um jogador, e LF para que o manipulador seja capaz de posicionar-se sobre a casa no tabuleiro de xadrez e movimenta-la para outra casa. O controle do manipulador é feito em tempo real, utilizando um escalonador de tarefas em tempo real.

1.3 Organização da Dissertação

O texto desta dissertação está organizada em 5 capítulos e quatro apêndices. No capítulo 2 apresenta-se um sucinto histórico da robótica, o seu estágio atual. Mostrando algumas configurações de robô, sua anatomia, atuadores (motores elétricos, atuador hidráulico e atuador pneumático) e unidade de controle.

Alguns tipos de robôs manipuladores, são discutidos no capítulo 3. Mostra-se manipuladores com um, dois e três graus de liberdade.

No capítulo 4, descreve-se alguns tipos de garras existentes para o uso em braços robóticos manipuladores. Garras mecânicas, com a utilização de dedos intercambiáveis e as duas maneiras de se segurar um objeto com este tipo de garra; Garras magnéticas, suas vantagens e desvantagem são mostrados e suas duas categorias (eletroímã e ímã permanente); e outros tipos são descritos nesta seção.

No capítulo 5 apresenta-se o protótipo do sistema manipulador robótico. Inicialmente descreve-se o manipulador, constituído de elos, juntas, atuadores e uma garra magnética. Então mostra-se o ambiente de trabalho do manipulador, finalmente, serão feitos alguns experimentos para o posicionamento do braço robótico descrevendo as posições das estruturas (base do manipulador e tabuleiro), e algumas análises.

As conclusões finais e trabalhos futuros são descritos no capítulo 6.

Apêndice A, define-se a Lógica Nebulosa e compara-se a mesma com a Lógica Booleana. A seguir, apresenta-se os fundamentos da lógica nebulosa, algumas operações que podem ser feitas por conjuntos nebulosos. Mostra-se como é possível expressar o conhecimento usando lógica fuzzy, e uma apresentação do controlador.

No Apêndice B descreve-se sucintamente as características de um motor de passo utilizado como atuador no manipulador robótico.

No Apêndice C uma aplicação de um sistema de posicionamento de um pêndulo invertido, com a utilização de uma solução neuro-nebulosa para colocar o pêndulo na posição invertida a partir de algumas estratégias. E finalmente o Apêndice D uma descrição da aplicação robótica de um pêndulo duplo, para a transferência de carga entre dois manipuladores proposto por Alsina e Cavalcanti (1997). Eles utilizaram esta aplicação robótica para demonstrar a utilização de um sistema de controle inteligente utilizando algumas técnicas de IA.

Robótica

2.1 Introdução

Neste capítulo inicialmente apresenta-se um sucinto estudo sobre a robótica. A seguir descreve-se algumas características técnicas de componentes básicos de um robô, tais como, o manipulador, a unidade de controle e atuadores.

2.2 A Robótica

Um dos primeiros trabalhos realizados pela ficção científica em relação a robótica, foi a novela escrita por Mary Shelley, publicada em 1817. Intitulada Frankenstein, a estória trata de um doutor chamado Frankenstein, que descobre o segredo da vida e decide criar um homem. Ao invés disso ele acaba produzindo um monstro horroroso que se torna um terror, aterrorizando a comunidade local e finalmente destruindo seu criador.

O termo robô surgiu no início dos anos 20, da tradução inglesa de uma peça de ficção escrita por Karel Capek, na Tchecoslováquia, cujo título foi “Os Robôs Universais de Russum”. Neste caso os robôs eram submissos ao homem. Mais tarde vieram outras contribuições para a história da robótica, tais como a de Isaac Asimov, que em seus livros viu a figura do robô como uma máquina bem projetada, à prova de falhas que atua de acordo com três princípios, chamados por Asimov de as “Três Leis da Robótica”:

- Um robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um humano seja ferido.
- Um robô deve obedecer às ordens dada por humanos, exceto quando isto conflitar com a Primeira Lei.
- Um robô deve proteger sua própria existência, a menos que isto conflite com a Primeira ou a Segunda Lei.

Segundo o Instituto de Robótica da América, um robô é um manipulador (re)programável, multifuncional projetado para mover materiais, peças, instrumentos ou outros dispositivos especiais através de vários movimentos e pode ser programado para realizar uma variedade de tarefas (Amirouche, 1993).

2.3 Configuração de um Robô

Existem quatro configurações básicas de robôs: Cartesiano, Cilíndrico, Polares e Articulados. Estas configurações estão ilustradas no diagrama da Figura 2.1.

Robôs polares, possuem duas juntas com movimentos rotacionais e uma junta que pode ser levantada e abaixada ao redor do eixo (ver Figura 2.1a).

Os robôs cilíndricos podem ser representados por duas linhas perpendiculares e uma base de rotação. O braço do robô está ligado ao suporte para que possa ser movido radialmente em relação a coluna do robô. Um exemplo de configuração cilíndrica esta ilustrado na Figura 2.1b.

O robô articulado possui juntas que se movem similarmente aos movimentos das juntas de um ser humano. Consta de dois componentes retos, correspondendo ao antebraço e braços humano, montados num pedestal vertical. Esses componentes estão conectados por juntas rotacionais correspondendo ao ombro e cotovelo. Um punho está unido à extremidade do antebraço propiciando assim diversas juntas adicionais (ver Figura 2.1c).

Nos robôs cartesianos, os seus movimentos são feitos junto a um eixo com três linhas perpendiculares representando os eixos xyz. A Figura 2.1d ilustra este tipo de configuração.

Os componentes básicos de um robô são, o manipulador, o controlador e o atuador.

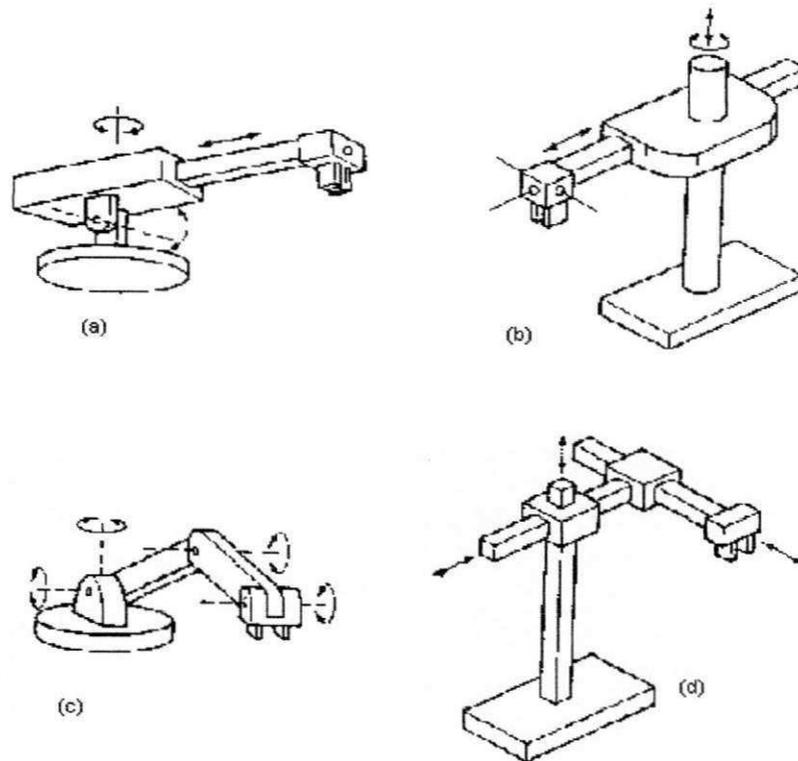


Figura 2.1 - As quatro anatomias básicas do robô: (a) Polar, (b) Cilíndrico, (c)Articulados e (d) Cartesiano.

2.3.1 Espaço de Trabalho (Workspace)

O espaço de trabalho é o termo que se refere ao espaço dentro do qual o robô pode manipular a extremidade de seu punho. A convenção de usar a extremidade do punho para definir o espaço de trabalho do robô é adotada para evitar a complicação de diferentes tamanhos de órgãos terminais que possam ser fixados ao punho do robô. O órgão terminal constitui um opcional ao robô básico e não deve ser contado como parte do espaço de trabalho do robô. Um órgão terminal comprimido montado no punho aumentaria significativamente a extensão do robô em comparação com um órgão terminal menor. Por outro lado, o órgão terminal ligado ao punho pode não ser capaz de alcançar determinados pontos dentro do espaço de trabalho do robô, por causa da combinação particular de limites de atuação das juntas do braço.

O espaço de trabalho é determinado pelas seguintes características físicas do robô:

- A configuração física do robô;

- Os tamanhos dos componentes do corpo, braço e punho;
- Os limites dos movimentos das juntas do robô



Figura 2.2 – Espaços de trabalho para algumas das anatomias de robô: Polar, Cilíndrico e Cartesiano respectivamente.

A influência da configuração física sobre a forma do espaço de trabalho é ilustrada na Figura 2.2. Um robô de coordenadas polares tem um espaço de trabalho que é descrito por uma esfera parcial, um robô de coordenadas cilíndricas possui um espaço de trabalho com o formato de um cilindro e um robô de coordenadas cartesianas aproxima-se de um espaço de trabalho em forma de paralelepípedo. O espaço de trabalho de um robô articulado, possui diversas formas de se representar (possui um formato irregular), pois vai depender do formato do robô. O tamanho de cada perfil de espaço de trabalho é influenciado pelas dimensões dos componentes do braço e pelos limites dos movimentos de suas juntas. Usando-se a configuração cilíndrica como exemplo, os limites sobre a rotação da coluna em torno da base determinariam que parte de um cilindro completo o robô poderia alcançar com a extremidade de seu punho.

2.3.2 O Manipulador

Os manipuladores robóticos trabalham com sensores, garras e diversos tipos de ferramentas. Eles consistem basicamente de elos, que são as partes rígidas de um manipulador robótico (comparados grosseiramente aos ossos do braço de uma pessoa), são ligados por

juntas que permitem a movimentação dos elos vizinhos. As juntas possuem sensores de posição que medem a rotação ou movimento das juntas (ângulo das juntas).

O número de graus de liberdade que o manipulador possui é o número de variáveis de posição independentes especificadas para localizar todas as partes do mecanismo. Por exemplo, no caso típico de robôs industriais, cada posição de juntas é geralmente definido como uma simples variável, considera-se que o número de juntas seja igual ao número de graus de liberdade.

No final da cadeia de elos que constitui o manipulador localiza-se a “mão” do manipulador (órgão terminal). Dependendo da aplicação pretendida com o manipulador, existe uma grande variedade de órgãos terminais. Eles são divididos em duas categorias principais: garra e ferramentas. As garras são órgãos terminais usados para pegar e segurar objetos. Existem alguns tipos de garras, tais como, garras mecânicas, copos de sucção, garras magnéticas, ganchos e outros. Já as ferramentas são presas diretamente no punho do manipulador, e assim consideradas como órgão terminal. Alguns exemplos de ferramentas usadas como órgãos terminais em aplicações robóticas são: ferramentas para soldagem a ponto, maçaricos para soldagem a arcos, bicos para pintura e outras. Estes tipos de órgãos terminais serão vistos com mais detalhes no capítulo 4.

2.3.3 A Unidade de Controle

A Unidade de Controle de um robô é o seu “cérebro”. Ela recebe sinais de entrada dos sensores dos robôs e transmite sinais de saída para os atuadores do robô. Há dois tipos de sistemas de controle de robôs: malha fechada e malha aberta.

No sistema de malha fechada, após o controlador mandar sinais de comando ao atuador para o manipulador, um sensor retorna um sinal ao controlador, fechando assim a malha (controlador→atuador→manipulador→sensor→controlador). Um esquema de controle do tipo malha fechada é ilustrado na Figura 2.3.

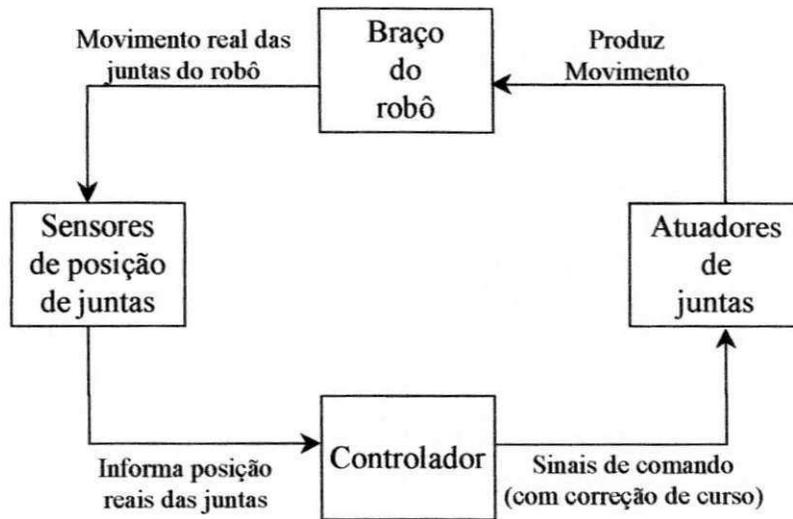


Figura 2.3 - Controle em Malha Fechada.

No esquema do tipo malha aberta ilustrado na Figura 2.4, não há sensor para medir os sinais de resposta dos atuadores para o manipulador, para saber se o movimento foi realizado com sucesso, não havendo sinais de realimentação do manipulador para o controlador. Diz-se assim que a “malha de controle” é aberta, os sinais de controle indo do controlador para o atuador e deste para o manipulador (controlador→atuador→manipulador). Tudo o que se sabe é onde o manipulador deveria estar e não se ele realmente chegou a sua posição desejada.

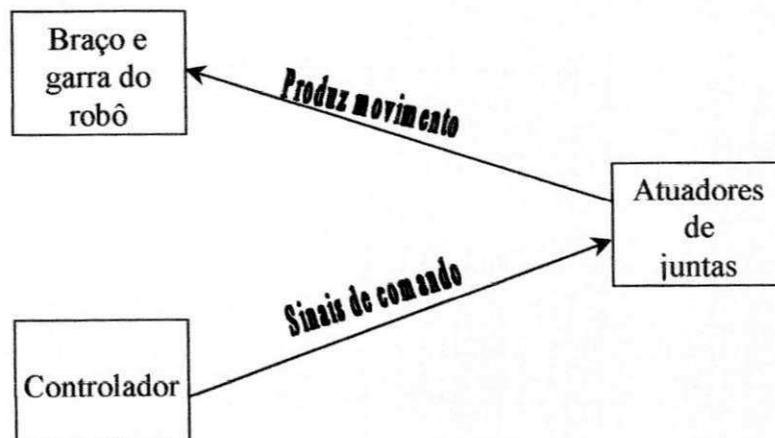


Figura 2.4 - Controle de Malha Aberta.

Os sistemas de controle de robôs utilizados para mover motores podem ser em malha aberta ou fechada. Por exemplo, o motor de cc (corrente contínua) necessita de um controle de malha fechada, pois ele não possui exatidão, necessitando assim de um sensor de posição (detector de posição) para detectar a posição angular do elo movimentado. Já o sistema com motor de passo (apresentado no Apêndice B), o utilizado no manipulador estudado nesta dissertação, o posicionamento sem eixo pode ser feito em malha aberta, pois o motor de passo é um motor que possui uma boa exatidão. Não necessitando assim de sensores de posição.

2.3.4 Atuadores

O atuador é uma versão mecânica de um músculo de um ser humano, ou seja, atuadores são dispositivos que fornecem a força motriz efetiva para as juntas dos robôs. Os movimentos produzidos pelos atuadores, movimento giratório ou em linha reta, são chamados de movimento rotacionais ou lineares, respectivamente. Geralmente os robôs recebem sua força de uma das seguintes fontes: ar comprimido (pneumático), fluido pressurizado (hidráulico) ou eletricidade (motores elétricos). São três os tipos de atuadores: elétricos, pneumáticos e hidráulicos. A força utilizada em cada um destes atuadores deve ser transmitida do atuador para a junta do manipulador através de algum mecanismo de transmissão de força, tais como, sistema de polia, engrenagens, sistemas de cabos, mangueiras e outros.

Os sistemas elétricos não possuem tanta velocidade ou potência quanto os sistemas hidráulico/pneumático, porém, sua precisão e repetibilidade são bem melhores. Os robôs elétricos tendem a ser menores e requerem menos espaço útil no piso, e suas aplicações tendem para um trabalho mais preciso, como o de montagem. Os motores de corrente contínua (motores cc) e motores de passo são os dois principais tipos de motores elétricos usados em aplicações de robótica. Os atuadores elétricos possuem algumas vantagens, tais como, um baixo custo, a facilidade de manutenção, precisão e repetibilidade. Um exemplo de robô elétrico é o S400 ilustrado na Figura 2.5. O S400 é um robô articulado produzido pela G. M. Manuc, com seis eixos, que utiliza servo motores. Este robô é utilizado por empresas para soldagem a ponto e a arco, por carga e descarga e outros.



Figura 2.5 - S400. Exemplo de um robô elétrico.

Os atuadores hidráulicos foram a fonte original de força nos primeiros robôs (Amirouche, 1993). Estes atuadores são geralmente acionados por fluidos (óleo pressurizado) em movimento. Eles tem maior potência, produzem maior força em um menor volume. Este tipo de atuador é associado a robôs de grande porte e é projetado para acionar juntas rotacionais ou lineares. Os sistemas de acionamento hidráulico propicia aos robôs maior velocidade e força, em contrapartida, eles tem tendência de vazamentos de óleo, ocupam um grande espaço físico e tem um alto custo de manutenção. As vantagens do acionamento hidráulico são: possuem uma alta velocidade, seus projetos são simples e tem uma grande resistência física. O HYD-2800 ilustrado na Figura 2.6 é um robô hidráulico utilizado em laboratórios por estudantes para simular uma aplicação industrial na vida real.

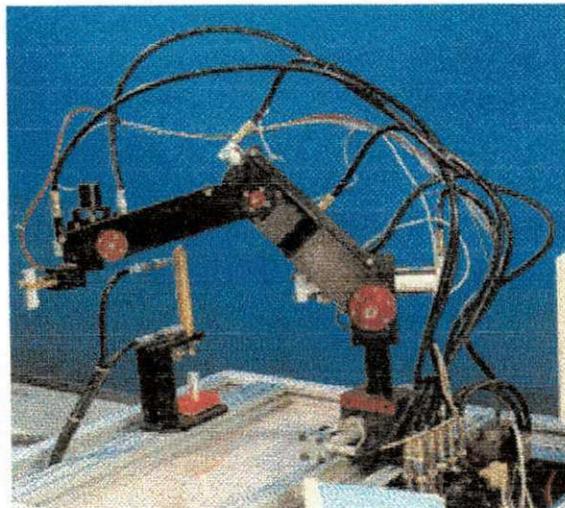


Figura 2.6 - HYD-2800. Exemplo de um robô hidráulico.

Atuadores pneumáticos são os mais simples para projetar, e seu custo é mais baixo que os dos outros atuadores aqui citados. São geralmente utilizados em robôs de grande porte mas são limitados a simples operações com ciclos rápidos. Os robôs que utilizam este tipo de atuador possuem uma dificuldade para controlar e posicionar um manipulador robótico. As vantagens dos atuadores pneumáticos são: possuem um baixo custo de acionamento, sua montagem é rápida e o custo de manutenção é baixo. Na Figura 2.7 está ilustrado o robô boadicea. Ele é um tipo de robô pneumático. O Boadicea possui seis pernas, sua estrutura mecânica foi construída com fibra de carbono, tubos de alumínio e tubos de plástico de injeção.

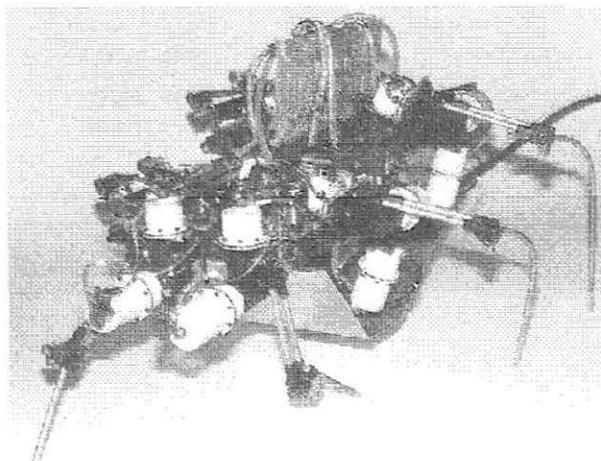


Figura 2.7 - Boadicea. Exemplo de um robô pneumático.

Robôs manipuladores

3.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentado alguns tipos de manipuladores robóticos. Inicialmente, faz-se uma sucinta descrição do pêndulo simples que representa um manipulador com um grau de liberdade. Em seguida, estuda-se o pêndulo duplo que é considerado um robô com dois elos. Por último analisam-se manipuladores com três graus de liberdade (três elos de ligação) que é semelhante ao utilizado para os testes experimentais do AUTOXAD.

3.2 Manipulador com Um Grau de Liberdade

Os pêndulos simples são geralmente utilizados como manipuladores de um elo (um grau de liberdade). Os sistemas físicos do tipo pêndulo são aplicados freqüentemente para demonstrar e verificar experimentalmente o desempenho de algoritmos de controle de sistemas não lineares (Cavalcanti, 1994). O pêndulo simples possui características não lineares e seu comportamento apresenta modos instáveis e estáveis. Existem diferentes estratégias de controle adaptativo de plantas não lineares. Algumas dessas estratégias são baseadas na integração de Redes Neurais Artificiais e Lógica Fuzzy (Sales, 1997).

Vários autores estudaram o posicionamento na vertical (para cima) do pêndulo simples. Batur e Kasparian (1991) simularam um sistema de controle fuzzy para estabilizar um sistema carro e pêndulo invertido, sujeito a uma pequena variação do ângulo θ do pêndulo em relação a normal. Já Ishida et al. (1991) utilizaram uma rede neural multi camada para estabilizar um sistema carro e pêndulo invertido, também sob pequenas variações no ângulo θ entre o pêndulo e a normal. Lin e Sheu (1992) foram capazes de estabilizar um sistema carro e pêndulo invertido, através de um sistema híbrido, fuzzy e convencional. Furuta e Yamakita (1991) apresentaram um sistema experimental de um pêndulo invertido e um controlador capaz de posicionar o braço do pêndulo na posição para cima. Eles usaram um modelo não linear para desenvolver o controlador para deslocar o braço do pêndulo até próximo da

posição para cima e usando um modelo linearizado do sistema pêndulo invertido, desenvolveram um controlador linear capaz de movimentar o pêndulo e posicionar o seu braço junto ao ponto de maior instabilidade. Jain et al. (1994) propuseram um controlador neural com sintonia por algoritmos genéticos para ser utilizado no controle de um manipulador robótico flexível de uma única junta. Soares e Góes (1994) apresentaram a modelagem dinâmica e a identificação experimental de um elo robótico flexível. Eles utilizaram a formulação de Lagrange e a discretização do sistema a parâmetros distribuídos pelo método dos modos admitidos. Gomes (1994) apresentou resultados teóricos e experimentais obtidos a partir da análise dos efeitos dos atritos não lineares sobre a dinâmica de um manipulador com um único braço, propôs então posteriormente uma lei de controle ativo com compensação de atrito, com estrutura principal do tipo linear quadrático gaussiano.

Recentemente Cavalcanti et al. (1999) propuseram um Sistema de Controle Inteligente desenvolvido para o posicionamento de um pêndulo na posição invertida e descreveram os resultados experimentais obtidos do posicionamento do um pêndulo invertido. Eles utilizaram uma Rede Neural Artificial como controlador, a Lógica Fuzzy para a especificação das referências e estratégias de controle, e Algoritmos Genéticos (AG) para gerar diferentes parâmetros do controlador neural. Eles conseguiram posicionar, com sucesso, o pêndulo invertido com peso desconhecido na posição de equilíbrio instável.

3.2.1 O pêndulo simples

Na Figura 3.1 é ilustrado o esquema geral de um pêndulo simples. O comportamento dinâmico do pêndulo é descrito matematicamente pela Equação 3.1. Nesta equação $Tl(t)$ representa o torque de carga; M a massa do pêndulo; L o comprimento do pêndulo; P representa o peso do pêndulo; t o tempo na forma contínua; θ representa o ângulo entre o braço e a normal ao suporte do pêndulo.

$$Tl(t) = ML^2 \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + PL \text{sen}(\theta(t)) \quad 3.1$$

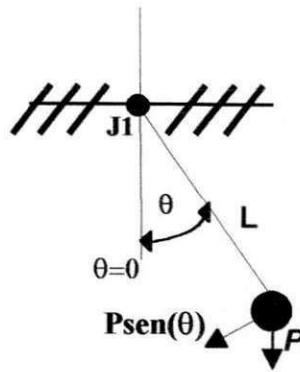


Figura 3.1 - Desenho do pêndulo simples.

Na Figura 3.2 ilustra-se o esquema da montagem de um pêndulo simples (braço rígido) acoplado a um peso (na extremidade) e ao eixo do motor (na base). Nesta Figura (3.2) são mostradas quatro posições especiais do braço do pêndulo, representados pelos ângulos θ entre o braço do pêndulo e a normal. Um pêndulo só é dito ser um pêndulo invertido se for permitido o seu posicionamento em $\theta = \pi$ rad (ou $-\pi/2 > \theta > \pi/2$). Considera-se que os ângulos são medidos no sentido horário. No apêndice C descreve-se o controle de um pêndulo invertido (Cavalcanti, 1994) utilizando algumas técnicas de Inteligência Artificial, um controlador neural adaptativo acoplado a regras fuzzy, e algumas estratégias necessárias ao posicionamento invertido do pêndulo.

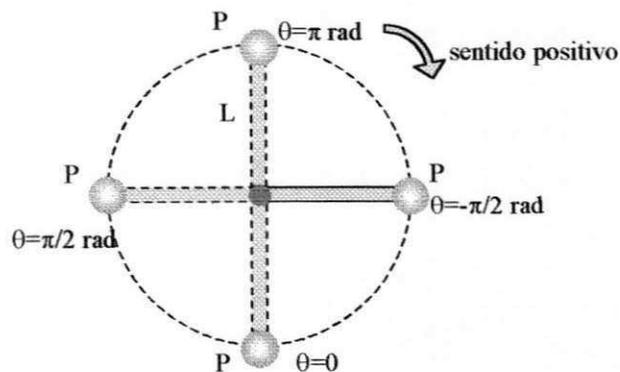


Figura 3.2 - O posicionamento do eixo do motor.

3.3 Manipulador com Dois Graus de Liberdade

Um sistema robótico com dois graus de liberdade pode ser empregado numa gama de aplicações geralmente dirigidas aos estudos científicos. Ele pode ser utilizado como pêndulos duplos, robôs manipuladores, e outros.

Alguns autores estudaram o pêndulo de duplo braço. Buchner e Hemami (1988) que apresentaram resultados obtidos com simuladores para o posicionamento vertical (para cima) de um pêndulo invertido de dois elos. Jim et al. (1992) apresentaram resultados de simulação obtidos com o posicionamento para cima, usando controladores neurais, de um pêndulo invertido de duplo braço. Em 1994, Lee e Smith fizeram o controle de um robô (*Acrobot*) usando controladores fuzzy sintonizados a partir de Algoritmos Genéticos. No mesmo ano Matuoka e Cruz apresentaram o projeto e simulação de um controlador de posição para um manipulador mecânico com dois graus de liberdade, baseados na técnica da alocação de pólos através do Método do lugar das Raízes Ótimo. Cavalcanti e Farneda (1995) apresentaram resultados experimentais obtidos no posicionamento para cima de um pêndulo invertido de duplo braço usando um sistema de controle híbrido (controlador neural direto e lógica fuzzy) . Cavalcanti et al. (1995) apresentaram resultados preliminares usando um Sistema de Controle Inteligente para o posicionamento de um robô trapezista.

Nobre e Palhares (1998) apresentaram o projeto e a análise de um controlador fuzzy desenvolvido para um manipulador robótico de dois graus de liberdade. Eles utilizaram regras lingüísticas de controle, desenvolvidas a partir de estudos qualitativos e quantitativos da planta. Eles também apresentaram o critério de desempenho utilizado para a análise da estabilidade do manipulador robótico.

Recentemente, Ferreira et al. (1998) apresentou resultados experimentais de um SCI utilizando Lógica Fuzzy, Redes Neurais Multi Camadas e um escalonador inteligente de tarefas, para o controle de dois braços robóticos do tipo pêndulo duplo, que foi utilizado na troca de pesos entre eles (ver Apêndice D).

3.3.1 Braço com dois elos

As aplicações mais comuns de sistemas robóticos com dois elos são ilustradas na Figura 3.3 (pêndulo e braço manipulador). A cinemática e a dinâmica de manipuladores semelhantes ao pêndulo duplo são descritos nos livros de Craig (1986) e de Spong (1989).

Para criar um esquema de controle de movimento de um manipulador é necessário que sejam desenvolvidas técnicas de representação do braço no seu espaço de trabalho e no tempo. O caminho feito pela extremidade livre do manipulador robótico no espaço de trabalho necessita da representação de posição e orientação de suas partes, ferramentas e de seus mecanismos. Para se definir matematicamente o posicionamento e orientação de um manipulador geralmente é necessário a definição de um sistema de coordenadas e do desenvolvimento de convenções para a sua representação.

O comportamento do robô com dois graus de liberdade (Figura 3.3b) é semelhante aos dois pêndulos simples conectados em série (Figura 3.3a). Na Figura 3.3 é ilustrado o diagrama simplificado do manipulador robótico com braços $L1$ e $L2$, que representam o comprimento dos elos dos braços, as juntas são rotuladas como $J1$ e $J2$, $\theta1$ representa o ângulo entre o braço $L1$ e a normal ao suporte do pêndulo que passa pela junta $J1$ do pêndulo, e $\theta2$ representa o ângulo entre o elo $L1$ e o elo $L2$.

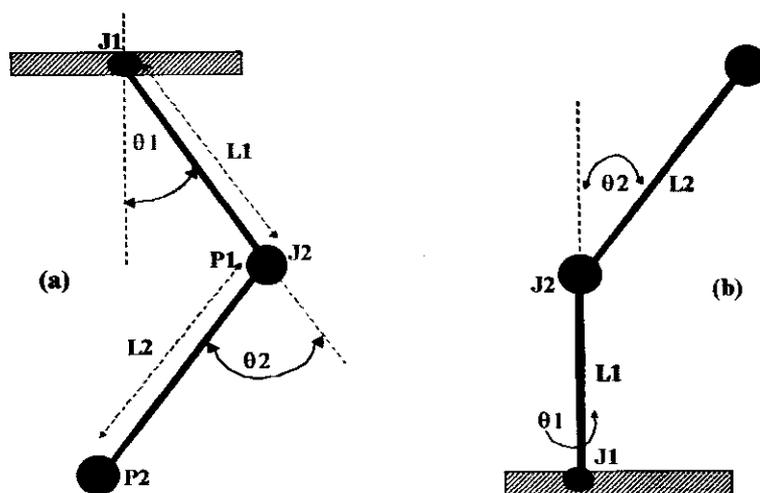


Figura 3.3 - Manipuladores com dois graus de liberdade. (a) Pêndulo duplo. (b) Braço Manipulador.

O posicionamento de um manipulador robótico pode ser feito a partir da definição dos posicionamentos e seus braços no espaço cartesiano. Isto envolve o uso de um sistema de coordenadas cartesianas que é externo ao robô. A posição do final do braço é definida no espaço bidimensional ${}^A P = [P_x, P_y]^T$, onde ${}^A P$ representa um ponto A no espaço; P_x e P_y são as coordenadas dos eixos x e y do espaço (Craig, 1986).

Um outro modo de definir a posição do manipulador robótico é utilizando os ângulos das juntas θ_1 e θ_2 , forma conhecida como representação no espaço da “junta”, que pode ser definida como, $P_j = (\theta_1, \theta_2)$, onde P_j representa a posição do braço no espaço, tendo θ_1 e θ_2 como o ângulo das juntas dos elos L1 e L2.

As vezes há a necessidade de robôs se comunicarem com outras máquinas. Essas outras máquinas podem não ter uma compreensão detalhada da cinemática do robô, de modo que se necessita de uma representação “neutra”, tal como o espaço cartesiano, para se trabalhar. Para se usar ambas as representações deve-se poder fazer a transformação de uma para outra. Ir do espaço de junta para o espaço cartesiano é chamado de transformação direta, e ir do espaço cartesiano para o espaço de juntas, chama-se de transformação inversa.

Na cinemática descreve-se a posição da ferramenta do manipulador e a localização de dois pontos na superfície em um sistema de coordenadas comum. O manipulador poderá ser capaz de sentir sua posição em algum ambiente utilizando sensores internos (sensores de posição) localizados em suas juntas, que podem avaliar diretamente os ângulos das juntas. Para isso necessita-se expressar as posições dos pontos na superfície em termos destes ângulos das juntas (Spong, 1989). Na Figura 3.4 é ilustrado um braço manipulador robôs com dois elos.

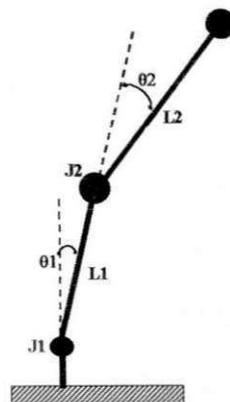


Figura 3.4 - Braço Manipulador.

3.3.2 Determinação dos ângulos das juntas

Pode-se determinar a posição da extremidade do braço no espaço cartesiano definindo um vetor r_1 para o elo 1 e um vetor r_2 para o elo 2 (ver eq.3.2 e 3.3).

$$r_1 = [L_1 \cos \theta_1, L_1 \sin \theta_1] \quad (3.2)$$

$$r_2 = [L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (3.3)$$

Adicionando os dois vetores acima, geram-se as coordenadas x e y da extremidade do braço (ponto $^A P$) no espaço.

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.4)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.5)$$

A orientação da ferramenta do braço relativo a base do braço é dada pela direção dos eixos x_2 e y_2 relativos aos eixos x_0 e y_0 (eq.3.6).

$$\begin{bmatrix} i_2 \cdot j_0 & j_2 \cdot j_0 \\ i_2 \cdot j_0 & j_2 \cdot j_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.3.3 Determinação dos eixos cartesianos

A fim de comandar o manipulador robótico objetivando move-lo para o local desejado será preciso fazer o inverso da determinação dos ângulos das juntas. Dados os ângulos das juntas (θ_1 e θ_2) pode-se determinar as coordenadas x e y para a garra.

Utilizando como exemplo o manipulador ilustrado na Figura 3.4, e supondo que θ_2 é positivo, utilizando as identidades trigonométricas das eq.3.7 e eq.3.8.

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B \quad (3.7)$$

$$\sin(A + B) = \sin A \cos B + \sin B \cos A \quad (3.8)$$

Pode-se então rescrever as equações 3.4 e 3.5 como,

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (3.9)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (3.10)$$

Elevando ambos os termos ao quadrado e somando as duas equações, obtém-se a equação do ângulo de r_2 (eq.3.11).

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} := D \quad (3.11)$$

Pode-se representar θ_2 na forma da eq.3.12.

$$\theta_2 = \cos^{-1}(D) \quad (3.12)$$

Uma outra representação de θ_2 é obtida a partir da eq.3.11 obtendo-se a eq.3.13.

$$\sin(\theta_2) = \pm \sqrt{1 - D^2} \quad (3.13)$$

então, θ_2 pode ser representado pela eq.3.14.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \pm \frac{\sqrt{1 - D^2}}{D} \quad (3.14)$$

A vantagem desta representação é que a solução tanto para cima quanto para baixo da junta é obtida escolhendo os sinais positivo ou negativo na eq.3.14. Se $\theta_1 = \theta_2$, θ_1 é calculado como mostrado na eq.3.15.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L_2 \sin \theta_2}{L_1 + L_2 \cos \theta_2} \right) \quad (3.15)$$

Para o posicionamento de um manipulador robótico de dois elos existem duas configurações possíveis para alcançar o ponto (x, y) dentro do alcance do manipulador, este ponto tem duas soluções, como ilustrado na Figura 3.5, as configurações portanto chamadas

de ABOVE (acima) e BELOW (abaixo) que determinam se o cotovelo (junta) deve fazer um ângulo θ_2 , maior ou menor que zero, como ilustrado na Figura 3.5. Ou neste ponto pode ter exatamente uma solução, se o manipulador tiver de ser estendido ao máximo para alcançar o ponto desejado.

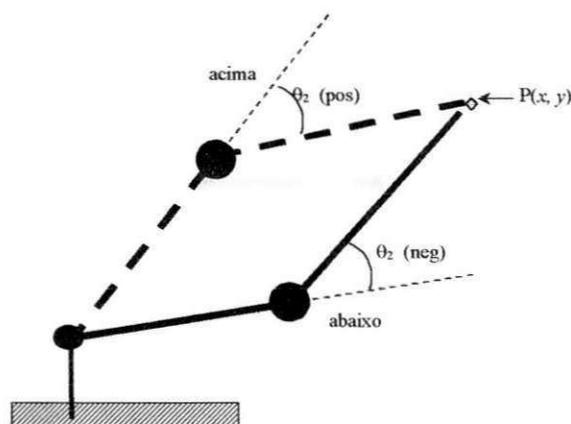


Figura 3.5 – O braço no ponto P (x,y), indicando duas configurações possíveis para alcançar-se a posição.

3.4 Manipulador com Três Graus de Liberdade

Um manipulador robótico com três graus de liberdade possui um grau de flexibilidade bem maior que o outros aqui apresentados. Estes manipuladores robóticos são utilizados não só na pesquisa científica como em indústrias, somente para fazer pequenas tarefas do tipo, pegar um objeto de um lugar e por em outro, por exemplo.

Mel (1990) apresenta MURPHY, um planejador de movimentos de um braço robótico que utiliza visão artificial para detectar as posições do ambiente. Atkeson e Reinkensmeyer (1990) utiliza um modelo de sistema de controle desenvolvido numa memória associativa implementada em uma rede neural. A rede neural artificial produz um mapeamento da dinâmica inversa do robô e procura melhorar o desempenho do segmento de uma trajetória através de experiências similares previamente armazenadas. Ritter et al. (1992) utilizaram redes neurais para o controle e posicionamento de um braço de robô. O robô é suposto operar sozinho em seu ambiente. Ferreira et al. (1999ab) apresenta o protótipo e alguns resultados experimentais de um sistema robótico desenvolvido para a manipulação de objetos por um

braço robótico empregando técnicas de Inteligência Artificial (IA), que foi utilizado para solucionar o problema de movimentação de peças em um tabuleiro de xadrez.

Um esquema de um manipulador com três graus de liberdade está ilustrado na Figura 3.6. Onde, J representa a junta do manipulador, θ o ângulo de suas juntas e os escritos 1, 2 e 3 representam os elos referenciados. No capítulo 5 será descrito mais detalhadamente um manipulador com três graus de liberdade que serviu para os testes realizados para o posicionamento do manipulador sobre um tabuleiro de xadrez.

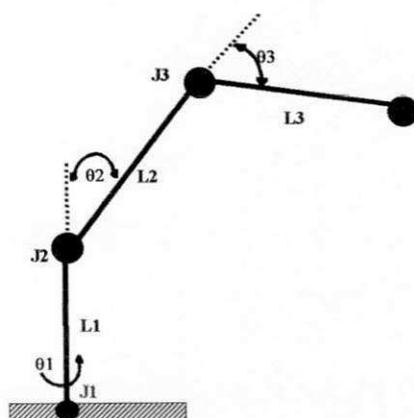


Figura 3.6 - Manipulador com três graus de liberdade.

3.5 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se sucintamente robôs com um, dois e três graus de liberdade. A seguir, no Capítulo 4, será feita uma descrição sucinta dos diferentes tipos de garras, considerando principalmente as garras magnéticas que foram utilizadas no protótipo do AUTOXAD.

Garras

4.1 Introdução

Apresenta-se neste capítulo alguns tipos de garras existentes para uso em braços robóticos manipuladores. São analisadas alguns tipos de garras. A garra mecânica com dedos intercambiáveis e as duas maneiras de se segurar um objeto com ela. As garras magnéticas e suas duas categorias (eletroímã e ímã permanente). As garras de sucção, os ganchos, o balão expansível e a mão antropomórfica. Também são descritas as características, vantagens e desvantagens dessas garras

4.2 Garras

As garras são órgãos terminais usados para pegar e segurar objetos. Geralmente elas são utilizadas em aplicações de manuseio de peças tais como: carga e descarga de máquinas; pegar peças de uma esteira e empilhar essas peças sobre cavaletes. Outros tipos de objetos podem ser manuseados pelas garras dos robôs, tais como: caixas de papelão, garrafas, matérias-primas, ferramentas e outros.

4.3 Tipos de Garras

As garras podem ser classificadas como garras simples ou garras duplas. A garra simples distingue-se pelo fato de apenas um dispositivo de pega é posto no punho do robô. Já a garra dupla possui dois dispositivos de pega no punho do robô, que são usados separadamente, ou seja, manuseiam dois objetos separadamente. Geralmente a garra dupla é utilizada em aplicações de carga e descarga de máquinas, pois numa situação de trabalho requer que uma peça de trabalho bruta seja carregada de um transportador para uma máquina e que a peça acabada seja descarregada sobre um outro transportador. Com a garra simples, o robô teria que descarregar primeiramente a peça acabada e depois carregar a peça bruta, isto iria consumir um tempo precioso no ciclo da produção. Já com uma garra dupla, o robô pode

pegar a peça do transportador de entrada com um dos dispositivos de pega e tê-la pronta para trocar a peça acabada pela peça bruta. Assim quando o ciclo de produção da máquina for completado o robô pode avançar e pegar a peça acabada com o outro dispositivo de pega, com um período de tempo minimizado.

Outra maneira de se classificar as garras é como a peça a ser manipulada é pega, se pela sua superfície externa ou interna (como no caso de um objeto em forma de copo). O primeiro tipo de garra é chamado de garra de pega externa e o segundo tipo de garra de pega interna.

Existem outros tipos de órgãos terminais que são projetados para realizar algum tipo de trabalho sobre o objeto manipulado, que não seja para finalidade de pega e põe. As ferramentas são muito utilizadas como órgãos terminais, ela é presa ao punho do robô para que possa executar o trabalho. Uma das aplicações mais comum dos robô industriais é a soldagem a ponto na qual os eletrodos de solda constituem o órgão terminal do robô. Outros exemplos de aplicações de robôs nos quais ferramentas são utilizadas como órgão terminal incluem pintura por pulverização e soldagem a arco. As garras às vezes são utilizadas para manipulação de ferramentas em vez da peça de trabalho. As ferramentas são presas diretamente no punho do robô possibilitando que várias ferramentas sejam manipuladas durante o ciclo de trabalho.

4.4 Garras Mecânicas

Uma garra mecânica é um órgão terminal que usa dedos mecânicos acionados por um mecanismo de pega. Os dedos são os apêndices da garra que faz, de fato, contato com o objeto. Os dedos são fixados ao mecanismo ou são parte integrante deste. Se os dedos forem do tipo intercambiáveis, podem ser destacados e substituídos. O uso de dedos intercambiáveis permite a troca dos dedos devido ao desgaste e também possibilitam a intercambiabilidade dos dedos. Diferentes jogos de dedos para o uso com o mesmo mecanismo de pega podem ser projetados para acomodar diferentes modelos de peças. Um exemplo dessa característica de intercambiabilidade está ilustrado na Figura 4.1, na qual a garra é projetada para acomodar dedos de tamanhos variáveis. Na maioria das aplicações, dois dedos são suficientes para segurar a peça de trabalho ou um outro objeto. Garra com três ou mais dedos não são comuns.

A função do mecanismo da garra é transmitir alguma forma de energia para a ação de pega dos dedos contra a peça. A energia fornecida pelo robô pode ser pneumática, elétrica, mecânica ou hidráulica. O mecanismo deve poder abrir e fechar os dedos e exercer força suficiente contra a peça quando fechados para pega-la de uma forma segura.

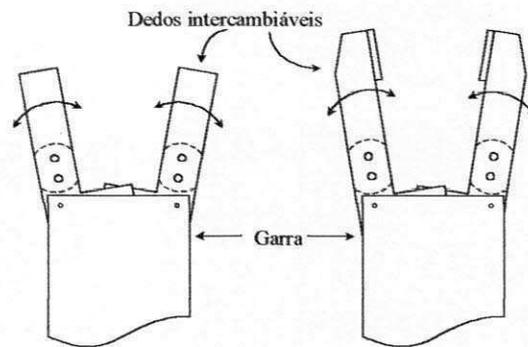


Figura 4.1 - Dedos intercambiáveis.

Existem duas maneiras de uma garra segurar uma peça. A primeira é por *constricção física* da peça entre os dedos. Nessa abordagem os dedos envolvem a peça até um certo ponto, impedindo assim o movimento da peça. Isto é, geralmente os dedos são projetados com a superfícies de contato dos dedos na forma aproximada da geometria da peça. Esse modo de segurar a peça está ilustrado na Figura 4.2a.

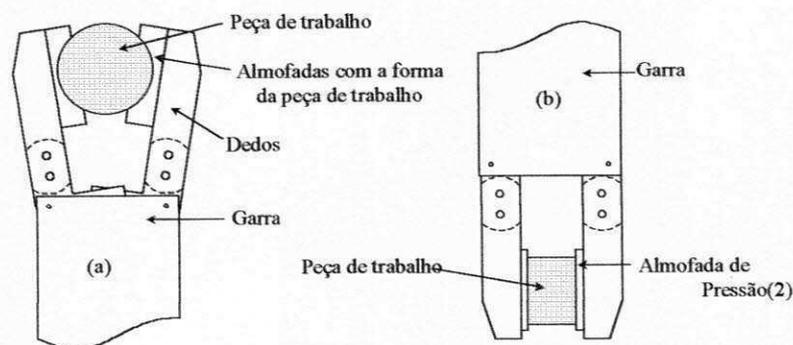


Figura 4.2 - Duas maneiras de segurar uma peça: (a) Sistema de *constricção física*, (b) Segurar a peça por atrito.

A segunda maneira de se segurar a peça, é por atrito entre os dedos e a peça de trabalho. As garras possuem almofadas presas em seus dedos que fazem contato com a peça que são geralmente fabricados de um material relativamente macio. Isto tende a aumentar o atrito além de proteger a superfície da peça contra arranhões ou outros danos (ver Figura 4.2b).

4.5 Garras Magnéticas

As garras magnéticas podem ser um meio muito razoável de manusear materiais ferrosos. A placa de aço inoxidável, por exemplo, não seria uma aplicação apropriada para uma garra magnética, porque o aço inoxidável 18-8 não é atraído por ímã. Outros aços, porém, incluindo certos tipos de aços inoxidáveis, seriam candidatos adequados para esse tipo de manuseio, especialmente quando os materiais manuseados são em forma de chapas ou de placas.

Em geral, garras magnéticas oferecem as seguintes vantagens em aplicações de manuseio de materiais por robôs:

- Os tempos de pega são muito rápidos;
- Variações no tamanho da peça podem ser toleradas: a garra não precisa ser projetada para uma determinada peça de trabalho;
- Elas têm a capacidade de manusear peças metálicas com furos (o que não é possível com garras a vácuo);
- Necessitam apenas uma superfície para pega.

As desvantagens das garras magnéticas incluem o magnetismo residual que permanece na peça de trabalho. Este magnetismo pode causar problema no manuseio subsequente da peça, pode provocar o seu deslizamento lateral, problemas que limitam a exatidão da manipulação de materiais. Uma outra desvantagem de uma garra magnética é que não é possível apanhar apenas uma chapa de uma pilha. A atração magnética tende a penetrar além da chapa superior na pilha, resultando na possibilidade de mais de uma chapa serem levantadas pelo ímã. Esse problema pode ser enfrentado de várias maneiras. Em primeiro

lugar, as garras magnéticas podem ser projetadas para limitar a penetração efetiva para uma profundidade que iria corresponder à espessura da chapa superior da pilha. Em segundo lugar, o dispositivo usado para empilhar as chapas pode ser projetado para separar as chapas para serem pegas pelo robô. Um dispositivo empilhador desse tipo produz um efeito chamado “ventilador” e faz uso de um campo magnético para induzir uma carga nas chapas ferrosas na pilha. As chapas próximas à parte superior da pilha recebem uma carga magnética, fazendo com que, pelo fato de possuírem a mesma polaridade, se repilam. A chapa mais afetada é a que está na parte superior da pilha que tende a se levantar acima do resto da pilha, facilitando a pega pela garra magnética do robô.

Garras magnéticas podem ser divididas em duas categorias: as que usam eletroímã e as que usam ímãs permanentes. Garras eletromagnéticas são mais fáceis de controlar, mas necessitam de uma fonte de corrente contínua e de uma unidade controladora adequada. Nos dispositivos de pega robóticos a peça deve ser liberada no ciclo de manuseio. Isto é mais fácil de realizar com um eletroímã do que com um ímã permanente. Quando a peça está pronta para ser liberada, a unidade controladora inverte a polaridade e diminui o nível de potência antes de desligar o eletroímã. Esse procedimento permite cancelar o magnetismo residual na peça de trabalho e assegura uma liberação positiva da peça.

Ímãs permanentes têm a vantagem de não exigir uma fonte de energia externa para operá-los. Porém existe uma perda de controle que acompanha essa vantagem aparente. Por exemplo, quando a peça precisa ser liberada no final do ciclo de manuseio, deve ser previsto algum meio de separar a peça do ímã. O dispositivo que realiza essa tarefa é chamado separador e, a sua função é destacar mecanicamente a peça do ímã. O desenho de um possível pino separador está ilustrado na Figura 4.3.

Ímãs permanentes são frequentemente considerados para serem aplicados a tarefas de manuseio de materiais em ambientes que requerem aparelhos a prova de explosão. O fato de nenhum circuito elétrico ser necessário para operar o ímã reduz o perigo de faísca que poderia causar incêndio nesses ambientes.

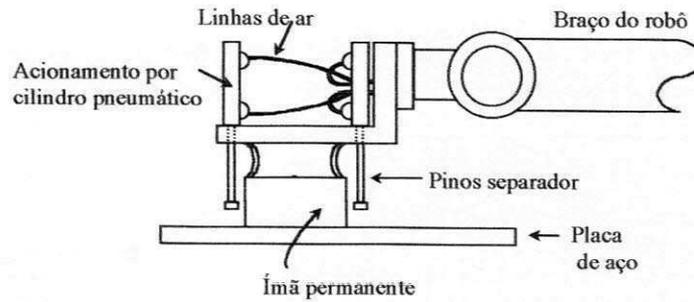


Figura 4.3 - Dispositivo separador utilizado com uma carga magnética.

4.6 Garras de Sucção

Os copos de sucção podem ser usados como dispositivos de pega para manusear certos tipos de objetos. Os objetos a serem manuseados devem ser planos, lisos e limpos, condições necessárias para formar um vácuo satisfatório entre o objeto e o copo de sucção.

Os copos de sucções usados nesse tipo de garra de robô são geralmente fabricados de material elástico, como borracha ou plástico macio. Uma exceção seria quando o objeto a ser manuseado é feito de um material duro. O formato do copo de sucção, é geralmente redondo. Necessita-se de algum meio para remover o ar existente entre o copo e a superfície da peça para criar o vácuo. A bomba de vácuo e o venturi são dois dispositivos comuns usados para essa finalidade. A bomba de vácuo é um dispositivo operado por um pistão ou um dispositivo de palhetas acionado por um motor elétrico, que é capaz de criar um vácuo relativamente alto. O venturi é um dispositivo mais simples, conforme ilustrado na Figura 4.4, e pode ser acionado por meio de ar comprimido disponível na fábrica. Seu custo inicial é menor que o de uma bomba de vácuo, e ele é relativamente confiável por causa de sua simplicidade. Porém, a confiabilidade global do sistema de vácuo irá depender da fonte de ar comprimido.

Algumas das características e vantagens que caracterizam a operação de pega com copos de sucção usados em aplicações robóticas são:

- Exige apenas uma superfície da peça para pega;
- Aplica uma distribuição uniforme da pressão na superfície da peça;
- Garra relativamente leve;

- Aplicável a uma grande variedade de materiais.

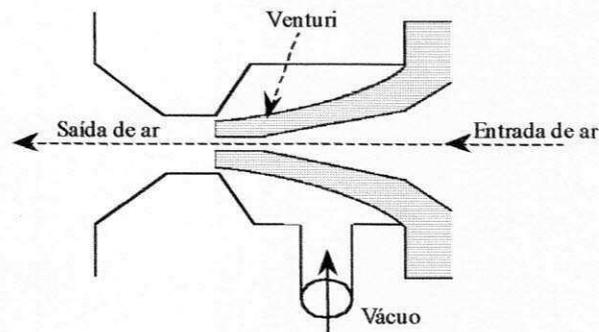


Figura 4.4 - Dispositivo com venturi usado para operar um copo de sucção.

4.7 Outros Dispositivos

Os ganchos são usados como órgão terminal para manusear caixas de peças e para carregar e descarregar peças que são penduradas. Obviamente, os objetos a serem locomovidos pelo gancho devem ter algum tipo de punho pelo qual o gancho possa segurar a peça (ver Apêndice D).

O balão inflável é também outro tipo de garra que se expande para pegar os objetos. Ele é fabricado de borracha ou outro material elástico que o tornem apropriado para pegar objetos frágeis. O balão aplica uma pressão de pega contra a superfície do objeto a ser pego. Um exemplo de garra tipo balão inflável está ilustrado na Figura 4.5. A Figura 4.5a mostra o balão usado para a pega do diâmetro interno de um copo e a Figura 4.5b mostra o balão inflado.

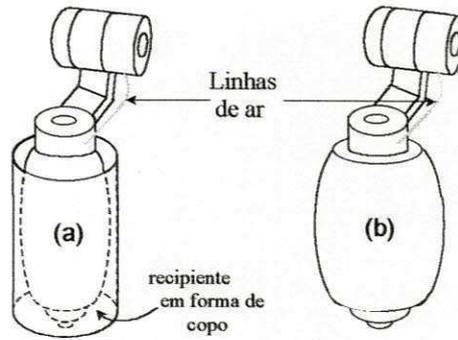


Figura 4.5 - Balão expansível: (a) Balão pegando um copo (b) Balão inflado.

Ultimamente muitas pesquisas visam projetar uma garra universal capaz de pegar e manusear uma grande variedade de objetos com geometrias diferentes. A maioria desses modelos de garras em estudo são modeladas de forma semelhante à mão humana. Um dispositivo com o número de articulações e eixos de movimento controlado como a mão humana é mecanicamente muito complexo. Com isso, esses tipos de órgão terminais de pesquisa geralmente não possuem a mesma quantidade de dedos de uma mão humana. Isso reduz a complexidade da mão sem a perda significativa da funcionalidade. Na Figura 4.6 está ilustrada uma mão universal (mão antropomórfica).



Figura 4.6 - Mão antropomórfica.

4.8 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se diversos tipos de garras, utilizadas para os mais diversos tipos de trabalho. A ênfase foi dada as garras magnéticas pois elas são utilizadas pelo manipulador robótico AUTOXAD para movimentar as peças do tabuleiro de xadrez em seu espaço de trabalho.

O Robô AUTOXAD

5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o protótipo de um sistema robótico desenvolvido para a manipulação de objetos empregando técnicas de Inteligência Artificial (IA). Inicialmente apresenta-se o protótipo do robô e o Sistema Inteligente que emprega Lógica Fuzzy para efetuar o controle do robô. Em seguida apresenta-se o uso do sistema robótico na solução do problema de movimentação de peças em um tabuleiro de xadrez. Finaliza-se o capítulo com a apresentação dos resultados experimentais obtidos.

5.2 O AUTOXAD

Atualmente os robôs requerem liberdade para a realização de determinadas tarefas de acordo com o meio em que se encontram. Esses robôs devem perceber o meio em que estão inseridos e modificar suas ações para realizar tarefas específicas, através de um comportamento inteligente. Na Figura 5.1 apresenta-se o sistema robótico (AUTOXAD) projetado para o posicionamento de peças de xadrez em um tabuleiro. O protótipo do manipulador robótico possui três graus de liberdade e uma garra magnética. O AUTOXAD utiliza um Sistema Inteligente (SI) para controle e posicionamento dos seus braços.

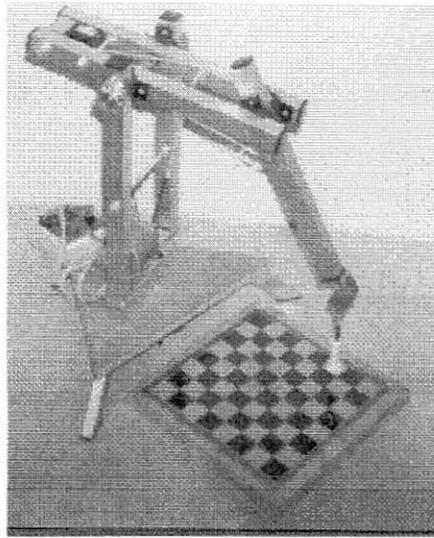


Figura 5.1 - O robô AUTOXAD

5.3 Arquitetura do AUTOXAD

O AUTOXAD é composto de três elos (L1, L2 e L3) e uma garra (ver exemplos em Craig, 1986), conforme ilustrados na Figura 5.2a. Onde os elos L2 e L3 possuem um comprimento de 15cm cada, e uma base de rotação para o posicionamento do manipulador sobre o tabuleiro. O AUTOXAD também possui uma garra magnética acoplada na extremidade do elo L3. As juntas dos braços são acionadas por motores de passo (ver Apêndice B), sendo que a junta 1, responsável pelo movimento do braço L1, gira em torno da normal ao Eixo Base (ver Figura 5.2b), executando movimentos para a direita e esquerda. A junta 2, responsável pelo movimento do braço L2, executando movimentos para cima e para baixo e a junta 3, responsável pelo movimento do braço L3, executando movimentos também para cima e para baixo. A localização dos motores (M1, M2 e M3) é ilustrada na Figura 5.2a. O motor M1 movimenta o braço L1 através de um conjunto de roldanas. O motor M2 preso a base do braço L1 movimenta o braço L2 com um sistema de transmissão por cabos, e o motor M3 preso ao braço L2 movimenta o braço L3 também com um sistema de transmissão por cabos. O braço L3 possui uma garra eletromagnética (eletroímã) em sua extremidade.

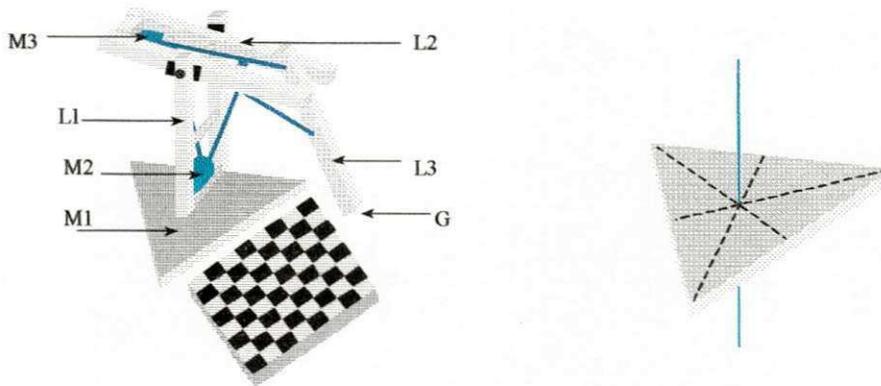


Figura 5.2 - (a) O desenho do AUTOXAD

(b)O Eixo Base.

5.4 O Sistema Inteligente do AUTOXAD

Na Figura 5.3 está ilustrado o Sistema Inteligente (SI) desenvolvido para o posicionamento das peças de xadrez sobre o tabuleiro. O SI é composto por uma base de conhecimento, onde estão armazenadas as informações, em forma de regras, sobre a localização de todas as casas do tabuleiro de xadrez; um módulo Fuzzy (Zadeh, 1988) que permite a inferência sobre as regras; e um módulo ATUADOR encarregado do movimento dos braços do robô. O SI foi implementado utilizando a linguagem de programação C++ Builder da Borland.

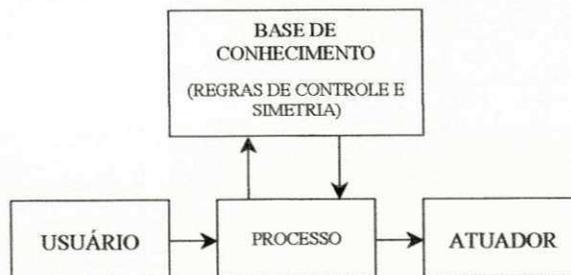


Figura 5.3 – O Sistema SI.

5.5 O Ambiente de Trabalho do AUTOXAD

Convencionou-se que a frente do tabuleiro deve ser paralela ao lado frontal do triângulo equilátero da base do robô (ver Figura 5.4). Além disso, a reta perpendicular a esse lado deve passar pelo centro do tabuleiro dividindo-o em dois lados (lado da dama e lado do rei). Esses posicionamentos são necessários devido a análise de simetria que será feita para especificar as posições das peças no tabuleiro de xadrez.

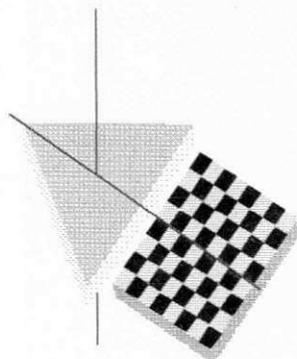


Figura 5.4 - Posição das Estruturas.

Um tabuleiro de xadrez é formado por oito colunas de oito casas ou de oito linhas de 8 casas, ou seja sessenta e quatro casas. As colunas do tabuleiro foram nomeadas como T_D , C_D , B_D , D , R , B_R , C_R e T_R , onde T representa a coluna da torre, C representa a coluna do cavalo, B representa a coluna do bispo, D representa a coluna da dama e R representa a coluna do rei. O subscrito $_D$ e $_R$ indicam a representação dos lados do tabuleiro, ou seja, lado da dama e lado do rei. As linhas foram enumeradas de um a oito. Cada casa no tabuleiro de xadrez é identificada pelo número da linha seguido do nome da coluna, por exemplo, $3C_D$, $5R$, $8T_R$.

Analisando-se o tabuleiro pode-se observar a existência de simetria entre os lados da dama e do rei do tabuleiro. Por exemplo, se a garra do AUTOXAD estiver posicionado sobre o ponto X, marcado na Figura 5.5 (no encontro das linhas tracejadas), o movimento para a coluna D é simétrico ao movimento para a coluna R, pois o manipulador utilizará apenas o motor M1 (da base) para deslocar a garra e posicioná-la sobre uma das duas colunas. Partindo-se dessa análise é possível observar que todas as colunas de um lado do tabuleiro possuem uma coluna simétrica do outro lado.

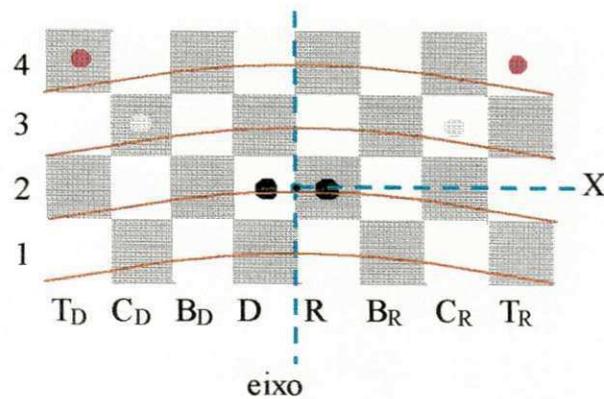


Figura 5.5 - Casas simétricas na mesma linha.

Supondo-se que o manipulador esteja posicionado sobre a casa 4R e que se deseja movimenta-lo para a casa 4B_R (representa-se 4R→4B_R), então será necessário modificar o posicionamento dos braços L2 e L3, ou seja, para executar este movimento será necessário acionar o motor M2 na direção que faça L2 ir para baixo e acionar o motor M3 tal que o braço L3 vá para cima. Observe-se que o movimento dos motores M2 e M3 é o mesmo quando o manipulador for posicionado sobre a casa 4B_D vindo da casa 4D. Os movimentos dos motores M2 e M3 para posicionar o manipulador sobre a mesma linha são equivalentes nas duas alas. Isto é, os movimentos de M2 e M3 para posicionar 4R→4B_R são iguais aos necessários para posicionar o manipulador em 4D→4B_R.

5.6 Implementação do AUTOXAD

A cada movimento das peças no tabuleiro de xadrez foi associado uma casa fonte e uma casa destino. Por exemplo, 3C_D → 3B_R, indicando o movimento de uma peça vinda da terceira linha da coluna do cavalo da dama (fonte) para a terceira linha da coluna do bispo do rei (destino).

A cada movimento do AUTOXAD foi associada uma meta ou objetivo. A meta do sistema foi planejada a partir da analogia de uma situação do mundo real, isto é, baseou-se na observação dos movimentos realizados por um jogador de xadrez. Com isso, foi possível predefinir uma seqüência de movimentos necessários para a realização da meta desejada.

Definiu-se cinco estratégias: IDENTIFICA, FONTE, PEGA, DESTINO e SOLTA. A estratégia IDENTIFICA, localiza a posição da peça; FONTE, movimenta o robô para a posição da peça; PEGA a garra pega a peça; DESTINO, movimenta a peça para a casa desejada; e SOLTA, a garra solta a peça no lugar determinado.

Essas estratégias foram implementadas por Cavalcanti (1997) em forma de tarefas para que fosse possível executá-las através de um escalonamento em tempo real. A cada tarefa foi associado um descritor. Os descritores são representados por $\text{descr}(\text{id}, \text{st}, \text{temp}, \text{freq})$ onde, id é a identificação da tarefa; st , indica o estado da tarefa (executando=-1, bloqueada=0, e pronta=1); tempo, o tempo de ativação da tarefa em ms; e freq, intervalo de tempo em que a tarefa será novamente ativada.

Observou-se que para o SI movimentar corretamente o braço, o sistema dependerá de seu conhecimento prévio do ambiente de trabalho, isto é, deverá ter o conhecimento do tabuleiro e suas casas, as peças utilizadas no jogo, a posição inicial da garra no tabuleiro (centro), e outras informações. Isto significa que o sistema necessita de uma base de conhecimento composta por dados e regras para que o manipulador consiga alcançar a sua meta com êxito. A base de conhecimento deverá também receber as posições simétricas existentes.

Foram desenvolvidas algumas regras nebulosas para o reconhecimento das casas fontes e destino durante o movimento de peças no tabuleiro. Para as colunas foram associadas duas variáveis, uma discreta (θ_c) e uma variável fuzzy (θ_{cf} , variável lingüística). A determinação da posição de cada coluna (ou linha) no tabuleiro é baseada no conhecimento do tabuleiro e na função de pertinência (ver Figura 5.6).

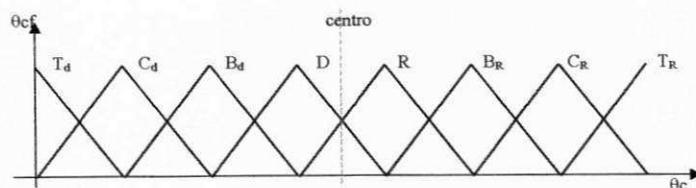


Figura 5.6 - Função de pertinência da posição da coluna.

5.7 Módulo da Simetria entre as Alas do Rei e da Dama

Inicialmente deve-se especificar o posicionamento das casas fonte e destino. Por exemplo, sabendo-se que a peça_fonte está em 3C_D e a casa_destino é 3B_R, o AUTOXAD detecta que o lado_fonte=D, o lado_destino=R, a linha_fonte=3, a linha_destino=3, a coluna_fonte=C e a coluna_destino=B. O módulo que analisa a SIMETRIA no movimento da peça da sua casa fonte para a casa destino é apresentado no quadro das regras apresentados no quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Análise de simetria ao movimento.

```
SIMETRIA=0 //Variável booleana que indica a simetria
if (posicionado) //Garra posicionada sobre uma casa
  then
    if(linha_fonte == linha_destino) //Casas fonte e destino na mesma linha
      then
        if(lado_fonte != lado_destino) //Lados da dama e do rei
          then
            if(coluna_fonte==coluna_destino || coluna_fonte==(R | D)
              || coluna_fonte==(D | R))
              then SIMETRIA = 1
```

Conhecendo-se a existência de SIMETRIA durante o movimento da garra a seguinte regra Fuzzy e sua tarefa associada representam o movimento do motor da base do AUTOXAD (ver quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Movimento do motor quando existe simetria.

```
if (SIMETRIA==1)
    then motor base (M1)
```

No caso de SIMETRIA=0 (não há simetria), o movimento do AUTOXAD deverá ser feito pelos motores M1, M2 e M3. A Figura 5.7 ilustra um possível movimento de peças entre as casas $3B_R$ para $3C_R$. O AUTOXAD movimenta os três motores para ajustar o posicionamento da peça. Ele desloca o motor base (M1) na direção da casa_destino. A seguir, ele movimenta o braço L2 para baixo e o braço L3 para cima, posicionando a garra sobre a casa $3C_R$. O mesmo tipo de movimento é feito para o posicionamento nas casas da mesma linha sem simetria. A implementação dos comandos foi feita utilizando tarefas em tempo real para acionamento dos motores de tal forma que uma tarefa pode possuir um conjunto de comandos de movimentação dos motores. Um comando é representado no sistema pela declaração posição(M1, M2 e M3). Onde M1, M2 e M3 são os valores a serem utilizados durante o movimento dos motores M1, M2 e M3, respectivamente.

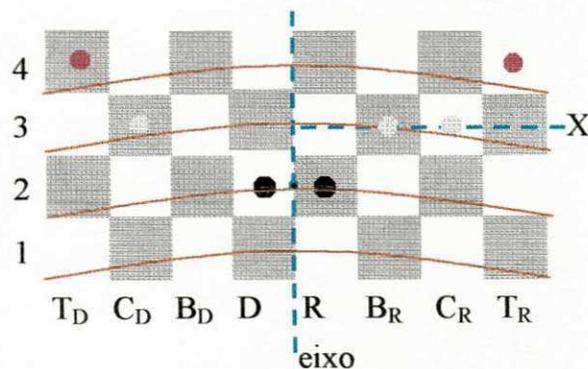


Figura 5.7 – Movimento de uma peça.

Devido a arquitetura do manipulador robótico o seu espaço de trabalho no tabuleiro de xadrez ficou resumido a três linhas e seis colunas. Estipulou-se como posição inicial da garra exatamente sobre a primeira linha no centro do tabuleiro (Eixo Base).

5.8 Análise Geométrica de L2 e L3

Na Figura 5.8 apresentam-se dois desenhos de L2 e L3 no plano cartesiano. O plano cartesiano é perpendicular ao eixo base do AUTOXAD. Observe-se que a junta de L2 (J2) está na origem dos eixos X e Y. Considere-se que o elo L2 faz um ângulo θ_2 em relação ao eixo X e L3 faz um ângulo θ_3 em relação ao eixo X, e que a garra do elo L3 está sobre o eixo X. Na Figura 5.8a os elos L2 e L3 possuem o mesmo comprimento, enquanto na Figura 5.8b, eles são diferentes.

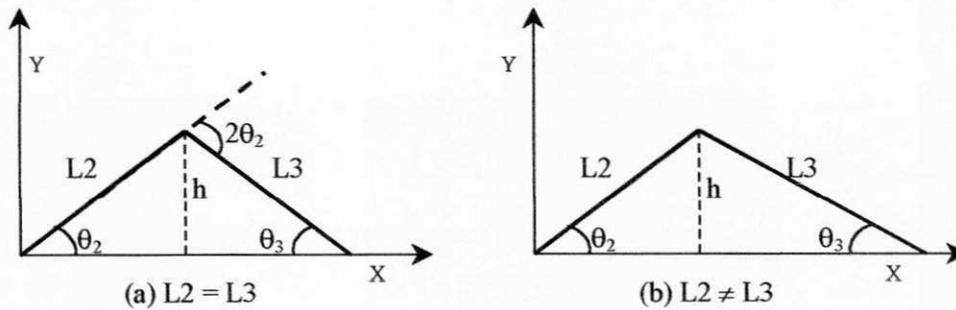


Figura 5.8 – Representação do posicionamento dos elos L2 e L3 no plano cartesiano.

Utilizando-se geometria básica consegue-se calcular os ângulos θ_2 e θ_3 sendo conhecido o ponto em que a garra encosta no eixo X. Os dois braços formam dois triângulos, iguais na Figura 5.8a e diferentes na Figura 5.8b. Os valores dos senos dos ângulos θ_2 e θ_3 são mostrados na eq.5.1 e eq.5.2. A partir das eq.5.1 e eq.5.2 obtém-se a relação entre os senos dos ângulos θ_2 e θ_3 mostrados na eq.5.3. Supondo-se conhecido θ_2 , o valor de θ_3 pode ser calculado utilizando a eq.5.4.

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{h}{L_2} \quad (5.1)$$

$$\text{sen } \theta_3 = \frac{h}{L_3} \quad (5.2)$$

$$\frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_3} = \frac{L_3}{L_2} \quad (5.3)$$

$$\text{sen } \theta_3 = \frac{L2}{L3} \text{sen } \theta_2 \quad (5.4)$$

Se os elos L2 e L3 possuírem o mesmo comprimento, a partir da eq.5.4 obtém-se $\theta_3 = \theta_2$. Se os comprimentos dos elos L2 e L3 forem diferentes, a partir da eq.5.4, obtém-se a eq.5.5. A regra fuzzy mostrada na eq.5.6, utilizada no Sistema Inteligente do AUTOXAD, ilustra a movimentação da garra sobre o eixo x quando $\theta_3 = \theta_2$. A variável booleana *garra_sobre_eixo_X* indica que a garra está posicionada sobre o eixo X das coordenadas cartesianas. O AUTOXAD possui braços com comprimentos iguais (L2=L3).

$$\theta_3 = \arcsen\left(\frac{L2}{L3} \text{sen } \theta_2\right) \quad (5.5)$$

$$\text{if } L2 == L3 \text{ and } \theta_2 == \theta_3 \quad \text{then } \text{garra_sobre_eixo_X} \quad (5.6)$$

$$\text{if } \text{lado_fonte} == \text{lado_destino} \quad \text{then } \theta = \theta_destino - \theta_fonte \quad (5.7)$$

$$\text{if } \text{lado_fonte} != \text{lado_destino} \quad \text{then } \theta = \theta_destino + \theta_fonte \quad (5.8)$$

5.9 Posicionando a garra sobre uma casa do tabuleiro de xadrez

Na Figura 5.9 ilustra-se a representação do posicionamento da garra do manipulador em relação ao centro das casas do tabuleiro de xadrez. O Tamanho de cada casa do tabuleiro é de 2cm de lado. Denomina-se Z a distância entre o eixo base e a primeira linha do tabuleiro. As variáveis x e y representam a metade do comprimento do lado de cada casa do tabuleiro. X representa a distancia em que o manipulador está posicionado, ou seja, a soma dos x. Y representa a distancia em que o manipulador está posicionado, ou seja, a soma dos y. Supondo-se que inicialmente a garra esteja sobre o centro da casa 2R seu deslocamento $X=x=2\text{cm}$, e $Y=y=3*2=6\text{cm}$. P1, P2 ... Pn, representam as posições onde a garra se posiciona. Os ângulos do posicionamento da garra são representados por $\theta P1, \theta P2 \dots \theta Pn$. l1, l2 ... ln, são representações da distância que o manipulador deve percorrer para posicionar-se no centro da casa. A distância da garra ao eixo base do manipulador é representada por

$$P = \sqrt{(Z + 3y)^2 + x^2} .$$

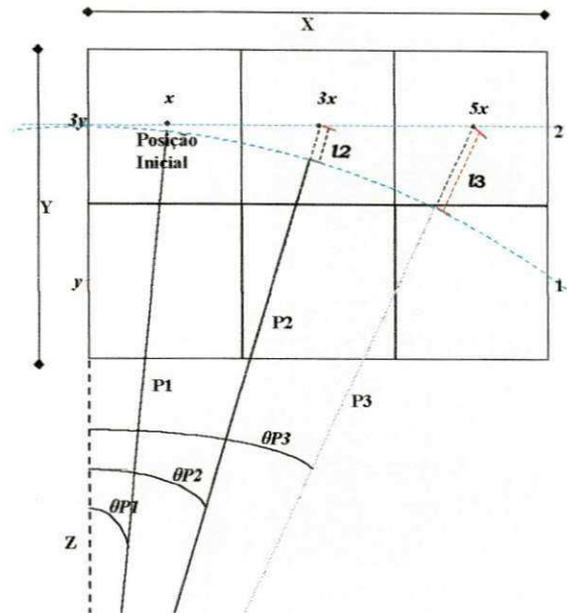


Figura 5.9 – Representação do posicionamento do manipulador.

5.10.1 Posicionando o eixo do motor da base

O ângulo do plano dos braços L2 e L3 em relação ao eixo base é dado pela eq.5.7. Observe-se que se deve conhecer Z e x para se encontrar o ângulo θ . O motor de passo da base do AUTOXAD é conectado, via correia, a um disco rígido que está acoplado ao eixo da base. A relação dos raios dos círculos do motor de passo e do disco é igual a 9. Sabendo-se que o motor de passo possui um passo de 7.5 graus, necessitando de 48 passos para uma rotação, calculam-se $D=9*48=432$ passos para uma rotação do disco (ou 360°). Calculou-se 1,2 passos/grau. Por exemplo, para $\theta=15^\circ$, o número de passos é $n_p=1,2*15=18$ passos.

$$\theta = \arctg\left(\frac{X}{Z+3y}\right) \quad (5.7)$$

5.10.2 Posicionando os motores dos elos L2 e L3

Supondo-se que se deseja mover a garra de P1 (2R) para a casa 2B_R (P2) movimentando-se os três elos. Nessa nova posição $P2 = \sqrt{(Z+3y)^2 + (3x)^2}$ e θ_{P2} é dado na

forma da eq.5.7 (trocando-se θ_1 por θ_2). O valor de θ_2 é calculado na forma apresentada na sub-seção anterior.

Para posicionar a garra em P2 deve-se movimentar os elos L2 e L3, observe-se que $P_2 > P_1$, o que pode ser visto na projeção de P1 sobre P2. Define-se a projeção de P1 sobre P2 como o ponto em que o círculo de raio P1 cruza a reta que passa sobre P2. A diferença entre os dois raios ($l = P_2 - P_1$) representa a distância que os dois elos (L2 e L3) devem percorrer sobre o eixo X (ver Figura 5.10).

De acordo com a regra da eq.5.6 para que a garra seja movida sobre o eixo X os valores dos ângulos devem ser iguais. Na Figura 5.10 a posição fonte (ângulos θ_2 e θ_3 , ou θ) dos elos L2 e L3 estão representadas com linhas cheias e a posição destino (ângulos θ_2' e θ_3' ou θ') destes elos estão representadas com linhas tracejadas. Observe-se que $l = 2 * L * (\cos(\theta') - \cos(\theta))$. Conhecendo-se l calcula-se θ' utilizando a eq.5.9.

$$\cos(\theta') = \cos(\theta) + l / (2 * L) \quad (5.8)$$

$$\theta' = \arccos[\cos(\theta) + l / (2 * L)] \quad (5.9)$$

A seguir, determinou-se experimentalmente a relação entre θ e o número de passos dos motores dos elos L2 e L3. Para o sistema motor de passo, composto do motor adicionado ao cabo de ligação com os elos, e ao comprimento dos elos L2 e L3, observou-se um valor equivalente ao movimento de um disco com raio de circunferência de aproximadamente 10cm. Obteve-se experimentalmente um valor para o deslocamento dos elos de 0.5cm por passo. Observe-se que o valor do ângulo do elo 3 (L3) é o dobro do ângulo do elo 2 (L2), isto é, o valor dos passos a serem movimentados o elo L3 é o dobro dos passos para movimentar L2 (ver Fig.5.10)

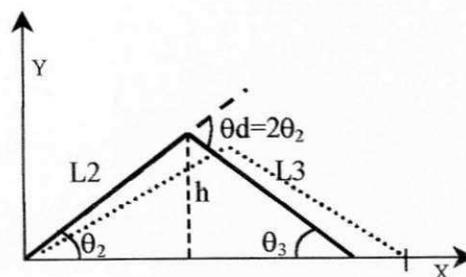


Figura 5.10 - Representação do posicionamento dos elos L2 e L3 no plano cartesiano.

5.11 Resultados Obtidos

A seguir, utilizando o AUTOXAD, serão apresentados alguns resultados obtidos pelo posicionamento da garra do manipulador robótico para diversas posições no tabuleiro de xadrez.

5.11.1 Posicionamento de $2R \rightarrow 2C_R$

A Figura 5.11 ilustra a representação do posicionamento da garra do manipulador sobre as posições fonte e destino. O primeiro passo do AUTOXAD é descobrir se a posição_fonte= $2R$ é simétrica em relação a posição_destino= $2C_R$ (regras dos quadros 5.1 e 5.2).

Após a confirmação de que as posições fonte e destino não são simétricas ($SIMETRIA=0$), pode-se calcular a distância a ser percorrida pelos elos L2 e L3, e o ângulo θ a ser rotacionado pelo motor da base (elo L1).

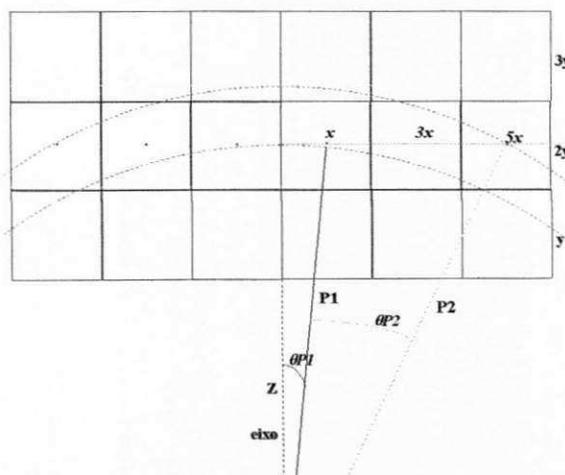


Figura 5.11 - Representação do posicionamento da garra nas posições $2R \rightarrow 2C_R$.

Na TABELA 5.1 ilustram-se os dados utilizados no posicionamento do robô, ou seja, os dados de posicionamento da casa fonte e os dados de posicionamento da casa destino. Com esses dados pode-se calcular o deslocamento que deve ser feito pelos elos L1, L2 e L3.

TABELA 5.1 – Dados das posições 2R e 2C_R.

Posição	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)
Fonte	15	2	6
Destino	15	10	6

Utilizam-se os comprimentos dos posicionamentos centrais das casas. Para calcular o deslocamento que deve ser feito pelos elos L2 e L3 utiliza-se a equação $\sqrt{(Z+Y)^2 + X^2}$. Obtém-se como resultado P1=21,09 cm e P2=23,26 cm.

Pode-se calcular a distância a ser percorrida pelos elos L2 e L3 usando $l = P2 - P1 = 2,17$. Conhecendo-se que o deslocamento dos elos é de 0.5cm por passo. O ângulo dos elos L2 e L3 são calculados pela equação 5.9. O valor dos ângulos fonte de θ_2 e θ_3 são $45,33^\circ$, e o valor do ângulo destino de θ_2' e θ_3' é 44° . Sabendo-se que o deslocamento em passos de L3 é duas vezes o deslocamento de L2. Então a quantidade de passos a serem dados pelos motores de L2 e L3 são 4 e 8 passos respectivamente.

Calcula-se o incremento do movimento rotacional da garra para a posição destino pela regra fuzzy mostrada na eq. 5.7 ($\theta = \theta_{\text{DESTINO}} - \theta_{\text{FONTE}}$), então $\theta = 20,02^\circ$, que corresponde a 24 passos pelo elo da base L1.

5.11.2 Posicionamento de $1B_D \rightarrow 3B_D$

Na Figura 5.12 ilustra-se uma representação do posicionamento da garra do manipulador sobre as posições fonte e destino. Após verificar se as duas posições são ou não simétricas, neste caso não, pois a posição_fonte= $1B_D$ e a posição_destino= $3B_D$ estão na mesma coluna, então segundo o quadro 5.1 as colunas das posições destino e fonte sendo diferentes, não há simetria. O primeiro passo do AUTOXAD é saber se pelas regras dos quadros 5.1 e 5.2 há simetria.

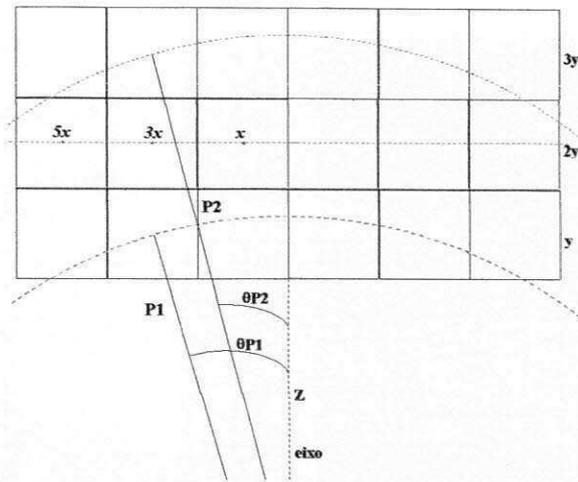


Figura 5.12 - Representação do posicionamento da garra nas posições 1B_D→3B_D.

O movimento de peças 1B_D→3B_D representa um exemplo de movimento da garra em uma mesma coluna. Os dados referentes às posições fonte e destino são ilustrados na TABELA 5.2. A partir desses dados pode-se calcular o deslocamento que deve ser realizado pelos elos L1, L2 e L3.

TABELA 5.2 – Dados das posições 1B_D e 3B_D.

Posição	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)
Fonte	15	6	2
Destino	15	6	10

Calcula-se o comprimento P1=18,02 cm e o comprimento P2=25,71 cm, então o deslocamento a ser realizado de 1B_D para 3B_D é de $l=P2-P1=7,69$ cm. Utilizando-se as eq.5.8 e eq.5.9 obtém-se o ângulo $\theta_2=\theta_3= 53,1^\circ$ e $\theta_2'=\theta_3'=52,9^\circ$ que deve ser movido pelos elos L2 e L3. Transformando-se ângulo em passos (rotação do motor de passo), obtém-se o elo L2 com 15 passos para baixo e o elo L3 com 30 passos para cima. O ângulo θ a ser movimentado por L1 é $5,95^\circ$, que corresponde a 7 passos.

5.11.3 Posicionamento de $1C_R \rightarrow 1C_D$

Na Figura 5.13 ilustra-se a representação do posicionamento da garra do manipulador sobre as posições fonte e destino, P1 e P2 respectivamente. Pode-se verificar a partir do quadro 5.1 que as posições fonte e destino são simétricas, então não há necessidade de movimento com os elos L2 e L3. Faz-se apenas duplicar o deslocamento do ângulo feito pelo elo L1 (seguindo a regra fuzzy mostrada na eq.5.8, $\theta = \theta_1 + \theta_2$), que a garra irá posicionar-se na casa destino. Então temos o ângulo $\theta = 2 * 19,44 = 38,88^\circ$, ou seja, 46 passos no motor de passo do elo L1.

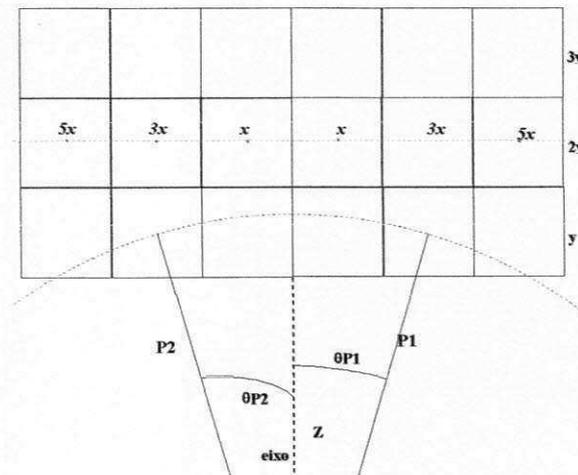


Figura 5.13 - Representação do posicionamento da garra nas posições $1C_R \rightarrow 1C_D$.

TABELA 5.3 – Dados das posições $1C_R$ e $1C_D$.

Posição	R (cm)	X (cm)	Y (cm)
Fonte	15	6	2
Destino	15	6	2

5.11.4 Outros Posicionamentos

Na Tabela 5.4 apresentam-se resultados experimentais obtidos no movimento para posicionamento da garra entre as posições fontes e destino especificadas.

TABELA 5.4- Posicionamento do AUTOXAD.

Posição_fonte	Posição_destino	θ	l	Posição(L1,L2,L3)
C1	3C _R	21,8°	9,92	(26,-19,38)
C1	1B _R	19,44°	1,02	(23,-2,4)
2R	2C _R	20,02°	2,17	(24,-4,8)
1D	2D	1,26°	3,98	(-2,8,-16)
C1	3C _D	21,8°	9,93	(-26,-19,38)
1B _D	1C _R	49,9°	1,7	(60,-3,6)
2R	2B _D	21,38°	0,75	(-25,-2,4)

5.12 O protótipo do AUTOXAD

A Figura 5.14 ilustra a tela principal do software AUTOXAD. Nesta tela é apresentado um menu com quatro opções: Arquivo, Motores, Estabilização e Ajuda.

A opção Arquivo possui apenas uma sub-opção denominada sair, que permite sair do programa.

A opção Motores é utilizada para a escolha do endereço da porta paralela a ser usada pela interação sistema AUTOXAD e manipulador. As opções dos endereços são 278, 378 e 3BC. A escolha do endereço da porta paralela também pode ser feita pelo ComBox Motor de Passo.

A opção Estabilização é utilizada para traçar o gráfico do movimento do manipulador AUTOXAD.

A Ajuda que só possui uma sub-opção, ilustrada na Figura 5.16, apresenta algumas características básicas do software AUTOXAD.

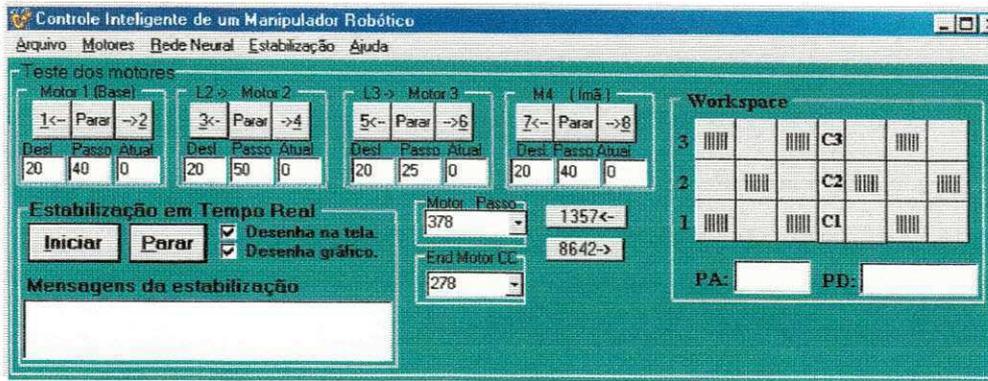


Figura 5.14 – Janela do AUTOXAD

À direita da Figura 5.14 apresenta-se o espaço de trabalho do AUTOXAD. Convenciona-se que a posição inicial da garra do AUTOXAD será sobre o ponto indicado por C1, ou seja, posicionado no eixo base na primeira linha. A partir desta posição pode-se posicionar o manipulador robótico em qualquer casa do tabuleiro.



Figura 5.15 – Janela de Ajuda do AUTOXAD

5.13 Conclusão

Apresentou-se neste capítulo o protótipo do sistema robótico AUTOXAD utilizado para a manipulação de peças de xadrez. Apresentou-se o Sistema Inteligente que emprega Lógica Fuzzy para efetuar o controle do robô. Foram feitas algumas análises matemáticas para o posicionamento do manipulador. Concluiu-se o capítulo com a apresentação dos resultados experimentais obtidos no movimento de peças entre algumas casas do tabuleiro de xadrez.

Conclusão

Nesta dissertação apresentaram-se considerações do projeto e implementação de um SI baseado em regras nebulosas, bem como detalhes de sua implementação e alguns resultados experimentais no controle do manipulador robótico para o posicionamento de uma garra magnética sobre uma peça em um tabuleiro de xadrez.

Construiu-se um protótipo de um manipulador robótico AUTOXAD, de montagem relativamente simples e flexível desenvolvido para execução de diversos tipos de tarefas. Para esse protótipo conseguiu-se testar e implementar um SI desenvolvido com paradigma da inteligência artificial, Lógica Fuzzy. Usou-se como bancada de testes, um manipulador robótico com três elos, para emular uma pessoa movimentando (posicionando) uma peça sobre o tabuleiro de xadrez. Foram desenvolvidas 5 estratégias de movimento das peças para o posicionamento das peças.

A análise matemática do AUTOXAD para o controle dos elos L2 e L3 de mesmo tamanho e tamanhos diferentes, foram definidas para o sistema que pode funcionar acima das expectativas iniciais.

Vantagens:

- Simplicidade;
- Obtem-se o conhecimento total do software e do hardware;
- Utilização de um SE baseado em simetria, que é de fácil entendimento de usuários e projetistas;
- Interface aplicativa (apresentação do movimento das peças no tabuleiro de xadrez) e científica (projeto e desenvolvimento de um protótipo ou adaptação para outra aplicação).

Desvantagens :

- A pouca precisão da montagem utilizando cabos para transmissão o que ocasionou erros no posicionamento da garra;
- Falta de controle da aceleração o que acarretou erros no posicionamento da garra;
- A garra pode sustentar pesos de até 200g enquanto o robô só consegue movimentar cargas de 10g.;
- A interface gráfica ainda não é tão amigável.

Trabalhos futuros:

- Um novo protótipo, modificando a transmissão por cabos, para maior precisão e que seja capaz de movimentar pesos maiores que peças de xadrez;
- Utilizar perfis de velocidade e aceleração para diminuir os erros do posicionamento do AUTOXAD;
- Desenvolver um SE capaz de ensinar ao AUTOXAD as características de um espaço de trabalho;
- Desenvolver um AUTOXAD com alturas de posicionamento variáveis, verificando a possibilidade de utiliza-lo com mais um elo;
- Um manipulador para movimentar o tabuleiro de xadrez e conseguir mais espaço de trabalho, e assim trabalhar com robôs cooperantes.

Bibliografia

- Alcina, P. J. Controle Neuroadaptativo Modular de Manipuladores Robóticos. Campina Grande – PB: Novembro de 1996. 154 p. - Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba.
- Alcina, P. J.; Cavalcanti, J. H. F.; **Real Time Intelligent Control System for Load Exchange Between Two Robots**. In: Workshop on Intelligent Robotics, 2°. Anais, Brasília. 1997, Vol. 1, pp. 80-88.
- Alcina, P. J.; Cavalcanti, J. H. F. **Real Time Intelligent Control System for Load Exchange Between Two Robots**. ICARV'98 – International Conference Control, Automation, Robotics and Vision, 8-11 December of 1998, Singapore.
- Amirouche, F. M. L. Computer – Aided Design and Manufacturing. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- Åstrom, K. J.; Hägglund, T. **Automatic Tuning of PID Controllers**. Instrument Society of America, USA, 1988.
- Atkeson, Christopher G.; Reinkensmeyer, David J. **Using Associative Content-addressable Memories to Control Robots**. In: MILLER III, W. Thomas; SUTTON, Richard S.; WERBOS, Paul J. (Eds.). *Neural Networks for Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.
- Batur, C.; Kasparian, V. **Adaptive Expert Control**. *International J. Control*, Vol. 54, No. 4, pp. 867-881, April 1991.
- Buchner, H. J.; Hemami, H. **Servocompensation of Disturbances in Robotics Systems**, *International J. Control*, Vol. 58, No. 1, pp. 273-288, April 1988.
- Cavalcanti, J. H. F. Controlador Neural Adaptativo. Campina Grande – PB: Outubro de 1994, 122p. Tese (doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba.
- Cavalcanti, J. H. F.; Fereda, E. **Intelligent Control of an Inverted Pendulum – Evolution**. SBAI'95, Curitiba – PR, 10-12 de Setembro de 1995a, pp. 121-126.

- Cavalcanti, J. H. F.; Sales, E. F. Jr.; Fereda, E. **Intelligent Control of an Inverted Pendulum**. II SBRN'95, São Carlos – SP, Outubro de 1995b.
- Cavalcanti, J. H. F. e Alsina, P. J., **Load Exchange Between two Robots**, Workshop on Intelligent Robots – WRI'97, Brasília, Agosto de 1997, Pp. 80-88.
- Cavalcanti, J. H. F.; Alsina, P. A.; Fereda, E. **Posicionamento de um Pêndulo Invertido Usando Algoritmos Genéticos**. SBA Controle & Automação, Vol. 10, No. 1, Janeiro – Abril de 1999, pp. 31-38.
- Coelho, Leandro dos Santos; Coelho, Antônio Augusto Rodrigues. **Projeto e Sintonia Evolutiva de Controladores PD e PID com aplicação em um Manipulador Robótico**. Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference – XII CBA. Vol. I, pp. 381-386. September 14-18 of 1998, Uberlândia – MG.
- Craig, John J. Introduction to Robotics Mechanics & Control. Addison - Wesley Publishing Company, USA, 1986. 303p.
- Ferreira (2), J. R. S.; Alsina, P. J.; Cavalcanti, J. H. F. **Escalonador Inteligente de Tarefas Aplicado à Robótica**. III IEEE INDUSCON'98, São Paulo – SP, Setembro de 1998, pp. 117-120.
- Ferreira (2), J. R. S.; Cavalcanti, J. H. F.; Alsina, P. J. **A Robotic Application Using Intelligent Tasks Scheduling and Knowledge Acquisition**. CARS&FPF'99 – International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, 15°. Águas de Lindóia – SP. Valance Hotel, 18-20 de Agosto de 1999.
- Ferreira (3), A. P. L. Uma Proposta de Controle Neural para o Posicionamento de um Braço Mecânico. Porto Alegre – RS: 1996. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ferreira, C. N. M. A.; Cavalcanti, J. H. F.; Alsina, P. J.; Ferreira, J. R. S. **Posicionamento Inteligente de um Manipulador Robótico**. A ser publicado em: COBEM'99. Novembro de 1999a. Águas de Lindóia – SP.

- Ferreira, C. N. M. A.; Cavalcanti, J. H. F.; Alsina, P. J.; Ferreira, J. R. S. **Posicionamento Inteligente de um Manipulador Robótico**. ICIE'99. Agosto de 1999b. Buenos Aires, Argentina.
- Fukuda, T. **Learning, Adaptation and Evolution For Intelligent System**. ISTE'97 Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Guimarães – Portugal University of Minho, July 7-11 1997 Vol. 1, TU9-TU14.
- Furuta K.; Yamakita, M. **Swing Up Control of Inverted Pendulum**. IECON'91, Proceedings, October 1991, Kobe – Japan, pp.2193-2198.
- Furuta, Takayuki; Tomiyama, Ken. **Two Adaptive Robust Sliding Mode Controlers for Robot Manipulators**. Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, 16-18 August, 1994, Columbus – Ohio – USA.
- Gomes, Sebastião Cícero Pinheiro. **Modelagem e Controle de Manipuladores Flexíveis**. 10^o Congresso Brasileiro de Automática & 6^o Congresso Latino Americano de Controle Automático. Rio de Janeiro, 19 a 23 de Setembro de 1994. pp. 1010-1015.
- Gomide, F. A. C.; Gudwin, R. R. **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy**. SBA Controle e Automação, Vol. 4 No. 3. Florianópolis – Santa Catarina, Setembro-Outubro de 1994.
- Imai, Álvaro K.; Gomes, Geraldo M. P.; Sarzeto, Clódio A. P. **Modelagem, Simulação e Controle Robusto de um Manipulador Robótico Plano**. Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference – XII CBA. Vol. III, pp. 1107-1112. September 14-18 of 1998, Uberlândia – MG.
- Ishida, T.; Shiokawa, N.; Nagado, T.; Shinichi, G. **Learning Control of a Inverted Pendulum Using a Neural Network**. IECOM'99. Proceedings, October 1991, Kobe – Japan, pp.1401-1404.
- Jain, S.; Peng, P.; Tezes, A.; Khorrami, F. **Neural Networks Designs with Genetic Learning for Control of a Single Link Flexible Manipulator**. American Control Conference, Maryland, 1994. pp. 2570-2574.

- Jim, Y.; Pipe, T.; Winfield, A. **DBP Learning Low For Real Time Neural Control**, ICARCV'92, 1992, pp.co.8.2-co-8.8.
- Khalid, M.; Omatu, S. **A neural Network Controlle for a Temperature Control System**. IEEE Control System, June 1992, pp.58-64.
- Kumpati, S. N. **The Handbook of Brain and Neural Networks**. Massachusetts Institute of Technology, 1995, pp. 69-73.
- Lee, M.A.; Smith, M.H. **Automatic Design and Turing of a Fuzzy System for Controlling the Acrobot Using Genetic Algorithms, DSFS, and Meta-Rule Techniques**. NAFIPS/IFIS/NASA, San Antonio, Texas, 1994. pp. 416-420.
- Lin, C. E.; Sheu, Y. R. **A Hibrid – Control Approach for Pendulum – Car Control**. IEEE Transactions on Industrial Eletronics, Vol.39, No. 3, pp.208-214, June 1992.
- Matuoka, Carlos Alberto; CRUZ, J. Jaime. **Controle de Posição de Manipuladores Através do Método do Lugar das Raízes Ótimo**. 10° Congresso Brasileiro de Automática & 6° Congresso Latino Americano de Controle Automático. Rio de Janeiro, 19 a 23 de Setembro de 1994. pp. 885-890.
- Mel, Bartlett W. **Vision-Based Robot Motion Planning**. In: MILLER III, W. Thomas; SUTTON, Richard S.; WERBOS, Paul J. (Eds.). *Neural Networks for Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.
- Nobre, Farley S. M.; Palhares, Álvaro G. B. **Projeto e Análise de um Controlador Nebuloso e sua Aplicação em um Manipulador Robótico**. Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference – XII CBA. Vol. III, pp. 1101-1106. September 14-18 of 1998, Umberlândia – MG.
- Porter, B. **Issues in the Design of Ontelligent Control Systems**, IEEE Control Systems Magazine, January 1989, pp. 97-99.
- Rich, E. ; Knight, K. **Inteligência Artificial**. Makron Books. São Paulo, 1991, pp. 39-74.
- Ritter, H.; Martinetz, T.; Schulten, K. **Neural Computation and Self-Organized Maps – An Introduction**. Addison-Wesley, 1992.

Sales, Esdras Ferreira Jr. Sistema de Controle Inteligente de um Braço Robótico. Campina Grande – PB: Dezembro de 1997. 70 p. – Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal da Paraíba.

Soares, Álvaro M.S.; Góes, Luís C.S. **Modelagem e Identificação Experimental de um Elo Robótico Flexível**. 10^o Congresso Brasileiro de Automática & 6^o Congresso Latino Americano de Controle Automático. Rio de Janeiro, 19 a 23 de Setembro de 1994. pp. 1022-1027.

Spong, Mark W.; Vidyasagar, M. Robot Dynamics and Control. John Wiley & Sons, Inc. 1989.

Tanomatu, J.; Omatu, S. **Towards Effective Neuromorphy Controllers**. IECON'91, proceedings, October 1991, Kobe – Japan, pp.- 1395-1400.

Uebel, L. F.; Botelho, S. S. C.; Simões, E. V.; Barone, D. A. C. **Controle Inteligente de Robôs Móveis Autônomos**. RAM x Fuzzy. II SBRN, São Carlos, 18-20 de Outubro de 1995.

Zadeh, L. A. **Fuzzy Logic**, IEEE Computer Magazine, April 1988, pp.83-93. Publicado também In: Anderson, J.A.; Rosenfeld, E. (Ed.) *Neurocomputing Foundations of Researchs*, pp.177-194, The MIT Press, Cambridge, USA.

Lógica Fuzzy

Aristóteles, Filósofo grego (384 – 322 A.C.), foi o fundador da ciência da lógica, e estabeleceu um conjunto de regras rígidas para que conclusões pudessem ser aceitas como logicamente válidas. O emprego da lógica de Aristóteles levou a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões. Como um exemplo:

“Todo ser vivo é mortal” (premissa 1);

“Sarah é um ser vivo” (premissa 2);

Como conclusão destas duas premissas temos:

“Sarah é mortal”.

Desde então, a lógica Ocidental, assim chamada, tem sido binária, isto é, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa. Esta suposição e a lei da não contradição, que coloca que “U e não U” cobrem todas as possibilidades, foram a base do pensamento lógico Ocidental.

A lógica nebulosa viola estas suposições. O conceito de dualidade, estabelecendo que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, faz a lógica nebulosa parecer natural, até mesmo inevitável. A lógica de Aristóteles trata com valores “verdadeiros” das afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas, sim ou não, preto ou branco. Por exemplo, aquele homem é alto ou baixo? A taxa de risco para aquele empreendimento é grande ou pequena? Um sim ou um não para essas questões é na maioria das vezes uma resposta incompleta. Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. Esta imperfeição intrínseca à informação representada numa linguagem natural tem sido tratada matematicamente no passado com o uso da teoria das probabilidades.

Contudo, a lógica nebulosa, com base na teoria dos conjuntos nebulosos, tem se mostrado mais adequada para tratar imperfeições da informação do que a teoria das probabilidades. De forma mais objetiva, podemos definir lógica nebulosa como sendo uma

ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural, e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores de hoje em dia.

Considere a seguinte questão: a altura de uma pessoa é representada na abscissa e três funções (baixo, mediano e alto) representam a classificação das pessoas em relação a altura, conforme ilustrado na Figura A.1.

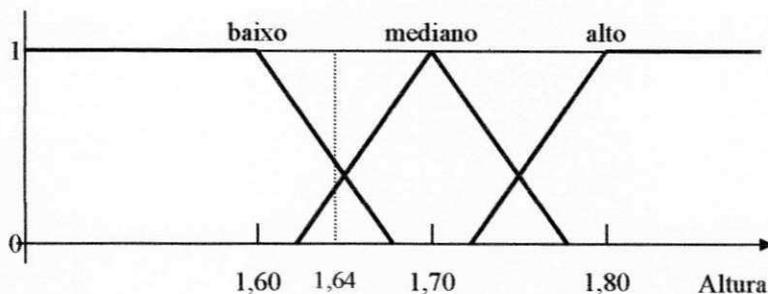


Figura A.1 - Representação de valores na lógica nebulosa.

Uma pessoa medindo 1,64m de altura é considerada baixa, de acordo com o gráfico da Figura A.1, mas está muito próxima de ser considerada com altura mediana. Entretanto é possível se uma pessoa é totalmente baixa de 0 até 1,60m. A partir de 1,60m a reta que define o valor baixo começa a decrescer, enquanto, a reta que define a altura mediana começa a crescer. Uma pessoa com 1,70m é considerada altura mediana e acima de 1,80m é considerada alta. Essas medidas são totalmente imprecisas, variando de acordo com os conceitos de cada, região, cidade, país e outros. Em muitas situações porém, os valores não exatos são mais importantes e possuem significados mais expressivos do que os valores exatos. Devido a esta propriedade a capacidade de realizar inferências, a lógica nebulosa tem encontrado grandes aplicações nas áreas: Sistemas Especialistas, computação com palavras, raciocínio aproximado, linguagem natural, controle de processos, robótica, reconhecimento de padrões e outros.

A.2. Fundamentos da Lógica Nebulosa

O conceito formal de conjunto nebuloso, fundamento da lógica nebulosa, foi introduzido por Lotfi A. Zadeh em 1988. Na teoria clássica dos conjuntos um elemento do universo em discurso (domínio) pertencente ou não ao referido conjunto, assume valores 0 ou 1. Na teoria dos conjuntos nebulosos existe um grau de pertinência de cada elemento pode assumir qualquer valor dentro do intervalo $[0,1]$. O valor 1 representa completa pertinência e o valor 0 indica uma completa exclusão. Essa generalização aumenta significativamente o poder de expressão da função característica, onde esta função, diz o grau de pertinência $\mu_A(x)$ de um elemento x pertencente a um universo U com respeito a um conjunto A , onde $A \subseteq U$.

Assim, se Y é uma variável que toma valores num universo U , então, a distribuição de possibilidades associada com Y pode ser vista como uma condição elástica nos valores que podem ser atribuídos a Y . Por exemplo, se F é um subconjunto de U caracterizado pela função de pertinência $\mu_f \rightarrow [0,1]$, então a declaração “ Y é F ” é traduzido numa distribuição de possibilidade para Y sendo igual a F . Então pode-se dizer que o conjunto nebuloso A é definido como o par ordenado $A = \{x, \mu_A(x)\}$.

Onde $x \in X$ e $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$. A função de pertinência $\mu_A(x)$ descreve o grau a que o objeto x pertence ao conjunto A . Quando $\mu_A(x) = 0$, representa nenhuma pertinência e $\mu_A(x) = 1$, representa pertinência total.

Por exemplo, seja X a representação da altura de uma pessoa. O subconjunto A de X que representa as pessoas baixas ($\mu_A(x)$) é o conjunto nebuloso com a função de pertinência mostrada na Figura A.2. Observe que $\mu_A(x) \cong 1$ para pessoas com até 1,60m de altura. A partir de 1,60m, $\mu_A(x)$ começa a decrescer. Para $X = 1,60$ m, $\mu_A(x) \cong 1$.

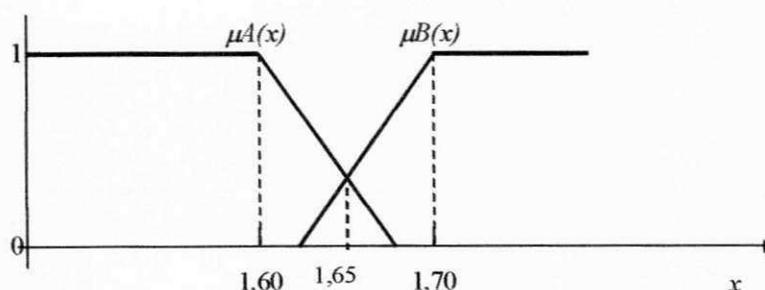


Figura A.2 – Função de pertinência.

Um conjunto nebuloso pode ter mais de uma representação, assim pode-se descrever a altura de uma pessoa também por um subconjunto B de X representando as pessoas medianas ($\mu_B(x)$), cuja função de pertinência esta ilustrada na Figura A.2. Observe que $\mu_B(x) \cong 1$ para pessoas com altura acima de 1,70. Também observe que para $X=1,65\text{m}$, $\mu_A(x)=\mu_B(x)$, ou seja, uma pessoa com 1,65m tem o mesmo graus de altura tanto para baixo como para mediano.

A.3. Operações

A teoria originária dos conjuntos nebulosos foi fundamentada nos termos das três operações feitas com conjuntos (*união, interseção e complemento*) que são equivalentes as operações da lógica booleana (*ou, e e negação*). Assumindo que $A \in X$ e $B \in X$, mostra-se a seguir as estas operações.

A.3.1. União

Utiliza-se a operação união para associar dois subconjuntos (A e B). A união feita entre eles resultará em um subconjunto que abrangerá os pontos máximos dos subconjuntos unidos. Esta operação é equivalente à operação *ou* da lógica booleana, pois é tratada nos extremos do intervalo $[0, 1]$. A representação da operação é descrita na Equação A.1. A Figura A.3 ilustra as curvas das funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$.

$$A \cup B \rightarrow \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \text{máx}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \forall x \in X \quad (\text{A.1})$$

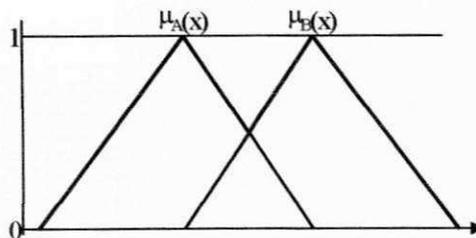


Figura A.3 - Representação gráfica da operação união.

A.3.2. Interseção

Esta operação é utilizada para definir a região comum entre dois subconjuntos (A e B). A interseção feita entre eles resultará em um subconjunto na qual abrangerá os pontos que pertencem aos dois subconjuntos. Esta operação é equivalente à operação *e* da lógica booleana, pois é tratada nos extremos do intervalo [0, 1]. A representação da operação interseção é descrita na Equação A.2. A Figura A.4 ilustra as curvas das funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$.

$$A \cap B \rightarrow \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \forall x \in X \quad (\text{A.2})$$

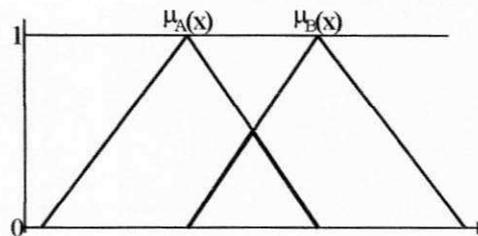


Figura A.4 - Representação gráfica da operação interseção.

A.3.3. Complemento

A operação complemento é utilizada para definir a função de pertinência oposta de um subconjunto. Podemos definir o complemento de um subconjunto A como A' . A' é formado pelos pontos de A dentro do intervalo [1, 0]. Esta operação é equivalente à operação *negação* da lógica booleana, pois é tratada nos extremos do intervalo [0, 1]. A representação formal desta operação é descrita pela Equação A.3. A sua representação gráfica está ilustrada na Figura A.5.

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \forall x \in X \quad (\text{A.3})$$

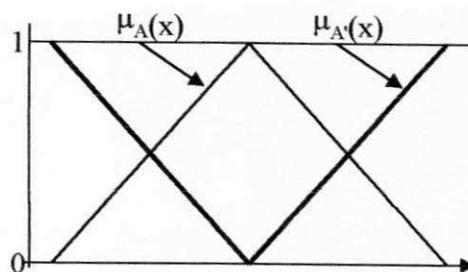


Figura A.5 - Representação gráfica da operação complemento.

A.4. Expressão Nebulosa do Conhecimento

Para expressar um conceito em lógica nebulosa, a utilização de elementos qualitativos é muito comum. Ou seja, o uso de expressões do tipo: “mais ou menos”, “não muito”, “médio”, entre outros. Estas idéias são ditas como variável lingüística. Uma variável lingüística tem como característica assumir valores dentro de um conjunto de termos lingüísticos, ou seja, palavras ou frases. Como por exemplo, uma variável lingüística altura poderá assumir um dos membros do conjunto {muito alto, alto, médio, médio alto, baixo, muito baixo}. Para se atribuir um significado aos termos lingüísticos, associa-se a cada um deles um conjunto nebuloso definido sobre um universo de discurso comum.

Uma das formas mais comuns de se expressar o conhecimento é por meio de regras do tipo condição-ação. Exemplificando, um conjunto de condições que descrevem uma parcela observável das saídas do processo, são associadas com uma ação de controle que irá manter ou elevar o processo às condições de operações desejadas. A idéia aqui é representar o conhecimento por meio de um conjunto de regras nas quais as condições são dadas a partir de um conjunto de termos lingüísticos associados a variáveis de entrada/saída do processo (as quais são entradas do controlador). As ações de controle ou as saídas são expressas de modo similar para cada variável de controle (saída). Regras do tipo *se-então-senão* são freqüentemente chamadas de regras de controle nebuloso. Tipicamente, uma proposição lingüística sobre o valor das variáveis de entrada é, por exemplo, o erro é grande e positivo. De modo análogo, uma típica ação de controle é uma descrição lingüística, como por exemplo, aumente um pouco a velocidade do carro.

A.5. Sistemas de Controle Nebuloso

Em controle nebuloso não necessita da modelagem do processo, e sim, da modelagem das ações a partir de um conhecimento de um especialista. Essa é, portanto, uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle de processos (Åstrom, 1989), pois os mesmos são desenvolvidos via modelagem matemática dos processos de modo a derivar as ações de controle como função do estado do processo. A estrutura básica de um controlador nebuloso esta ilustrado na Figura A.6.

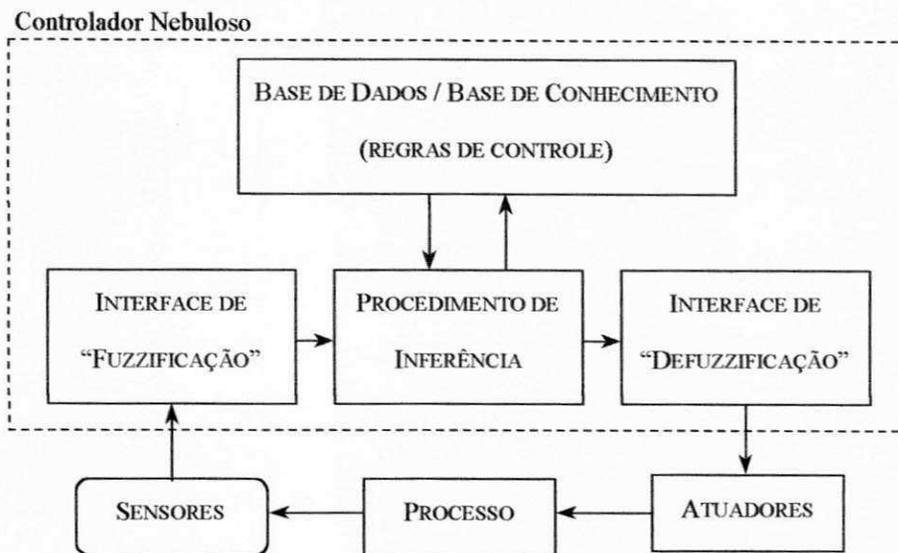


Figura A.6 – Sistema de Controle Nebuloso.

O núcleo do controlador só analisa variáveis nebulosas. As informações têm que ser transformadas na forma nebulosa ou “*fuzzyficadas*” (transformadas em conjuntos nebuloso). A interface de “*fuzzyficação*” recebe os valores das variáveis de entrada (vindo dos sensores), faz um escalonamento para dimensionar os valores a universos discursos normalizados e “*fuzzyfica*” os valores (transformando números em conjuntos nebulosos), para torna-los instâncias de variáveis lingüísticas. A base de conhecimento consiste de um conjunto de regras que caracterizam as estratégias de controle e seus objetivos. A base de dados armazena as informações necessárias sobre as discretizações, as normalizações dos universos de discurso, as partições nebulosas dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinência. O procedimento de inferência atua sobre os dados nebulosos de entrada,

juntamente com as regras, para inferir as ações de controle nebulosas, usando o operador de implicação nebulosa e as regras de inferência da lógica nebulosa. A inferência de “*defuzzyficação*” atua sobre as ações de controle nebuloso inferidas, transformando-as em ações de controle não nebuloso, efetuando, em seguida, um escalonamento para compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com os valores dos universos de discursos reais das variáveis.

Deve-se determinar uma ação de controle não-nebuloso para ser enviada ao controle logo após se inferir a ação de controle nebuloso. A ação de controle não-nebuloso escolhida deve ser a que represente melhor a decisão nebulosa. Não há nenhum procedimento sistemático para escolher a estratégia de “*defuzzyficação*”. As estratégias mais comuns são: o critério do máximo (MAX), o qual escolhe o ponto onde a função inferida tem o seu máximo; a média dos máximos (MDM), representa o valor médio entre todos os pontos de máximos se existir mais de um máximo; e o método de centro de área (CDA) que retorna as coordenadas do centro da área da função inferida.

Motor de Passo

Os motores de passo são dispositivos elétricos, utilizados na robótica para movimentar os elos dos manipuladores. Os manipuladores assumem posições angulares discretas quando aplicada uma excitação em forma de pulsos. Isto é, para cada instante o rotor assume posições angulares bem definidas ao longo de uma rotação. Dessa forma, sua velocidade angular oscila entre um máximo, na mudança de posição, e um mínimo (normalmente zero) quando se encontra na posição definida. A seguir apresenta-se a descrição de uma interface para o controle de até quatro motores de corrente contínua por microcomputadores do tipo IBM-PC através da porta paralela.

A porta paralela de um microcomputador pessoal pode ser utilizada como um canal de entrada e saída do microcomputador. Um porta contém 25 sinais, conforme ilustrado na Figura A.1, divididos funcionalmente em: 8 sinais de saída (para dados, pinos 2 a 9), 4 sinais de saída (para controle, pinos 10 a 13), 5 sinais de entrada (para controle, pinos 1, 14, 15, 16 e 17) e 8 sinais ligados ao terra (pinos 18 a 25).

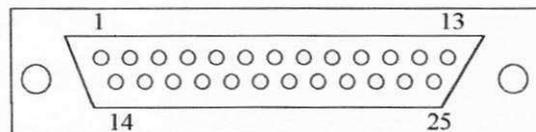


Figura B.1 - Conector DB25/Fêmea.

Estes motores possuem três estados de operação: parados, ativados com rotor parado ou girando em etapas. Na Figura B.2 esta ilustrado uma representação esquemática de um tipo de motor de passo. O estator é composto de quatro pólos eletromagnéticos e o rotor é um ímã permanente de dois pólos. Se os pólos eletromagnéticos do estator forem ativados de modo que o pólo 3 seja N (Norte magnético) e o pólo 1 seja S, então o alinhamento do rotor será como ilustrado na Figura B.2a. Se o estator for excitado de modo que o pólo 4 seja N e o pólo 2 seja S, o rotor fará um giro de noventa graus no sentido horário B.2b.

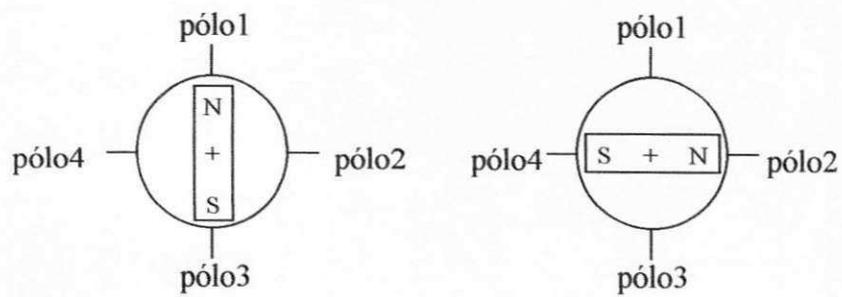


Figura B.2 - Motor genérico de quatro fases.

No modo de acionamento normal, o rotor se posiciona exatamente sobre o local designado para cada passo, percorrendo quatro passos por ciclo. A seqüência de acionamento pode ser obtido excitando-se uma fase por vez.

Posicionamento do Pêndulo Invertido

Na implementação experimental do pêndulo feita no NEUROLAB, foi usado um pêndulo com comprimento de $L = 0,1\text{m}$ e de peso $P = 0,1\text{ Kg}$ a fim de que para determinados valores do ângulo $\theta(t)$, o torque $Tl(t)$ seja maior que o atrito viscoso do eixo do motor. Assim, quando o torque do motor for igual a zero, o pêndulo é movido para a posição em que $\theta = 0$.

Na Equação 3.1, o torque da carga $Tl(t)$ depende do deslocamento e também da aceleração do pêndulo. A partir das Figuras 3.1 e C.1, e considerando o pêndulo em repouso (estado estável) podem ser observadas as seguintes características do sistema pêndulo invertido:

O pêndulo está no estado estável em $\theta(t) = \pi\text{rad}$. Qualquer deslocamento do pêndulo fará $Tl(t) \neq 0$ levando o pêndulo ao ponto $\theta(t) = 0\text{ rad}$.

Com o pêndulo em repouso, o torque $|Tl(t)|$ será maximizado para $|\theta(t)| = \frac{\pi}{2}\text{ rad}$.

O pêndulo estará no estado estável com $\theta(t) = 0\text{ rad}$. Qualquer movimento no pêndulo em torno de $\theta(t) = 0\text{ rad}$ o fará retornar ao ponto $\theta(t) = 0\text{ rad}$.

O módulo do torque $Tm(t)$ gerado pelo motor deverá aumentar para estabilizar (posicionar e imobilizar) o pêndulo quando $|\theta(t)|$ crescer de 0 a $\frac{\pi}{2}$.

O módulo do torque $Tm(t)$ gerado pelo motor deverá diminuir para o pêndulo quando $\theta(t)$ crescer de $|\theta(t)| = \frac{\pi}{2}$ a $|\theta(t)| = \pi$.

Na Figura C.1 é mostrado um círculo com quatro quadrantes representando o torque de carga $Tl(t)$ gerado pelo pêndulo (Lin, 1992) para diferentes ângulos $\theta(t)$ do pêndulo. O torque $Tm(t)$ gerado pelo motor (diretamente proporcional à tensão da armadura do motor) para estabilizar o pêndulo deve ter a mesma intensidade de $Tl(t)$ mas com sinal contrário. Os quadrantes foram definidos a partir do ponto de instabilidade em $\theta(t) = \pi$. Q1 foi definido no

intervalo $-\pi \leq \theta(t) < -\pi/2$, e Q2 foi definido para $-\pi/2 < \theta(t) < 0$, Q3 foi definido no intervalo $0 < \theta(t) < \pi/2$ e Q4 foi definido no intervalo $\pi/2 < \theta(t) < \pi$. Os quadrantes podem ser vistos na função de pertinência θ_m de $\theta(t)$ ilustrada na Figura C.2. (θ_m representa a função de pertinência dos quadrantes de $\theta(t)$ e $\Delta U(t)$ representa o incremento em $U(t)$).

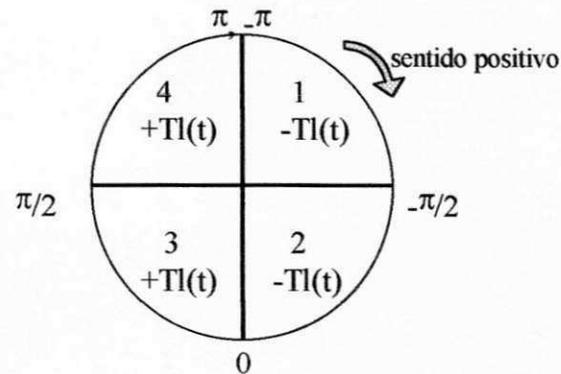


Figura C.1 - O círculo do torque.

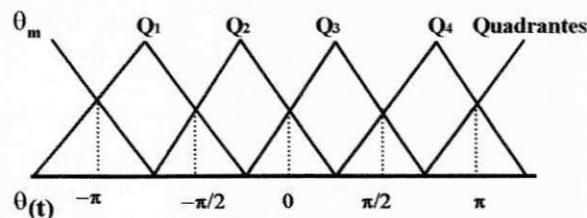


Figura C.2 - Função de pertinência do círculo.

Considerou-se o torque $Tl(t)$ positivo nos quadrantes Q3 e Q4 e torque $Tl(t)$ negativo, nos quadrantes Q1 e Q2. Isto é, o torque $Tm(t)$, a ser gerado pelo motor para estabilizar o pêndulo, deve ser positivo quando o braço do pêndulo estiver posicionado nos quadrantes Q1 e Q2 e deve ser negativo quando o braço do pêndulo estiver posicionado nos quadrantes Q3 e Q4.

O posicionamento $\theta(t)$ do eixo do motor segue uma referência $\theta_r(t)$. No caso do pêndulo invertido, para cada quadrante do círculo de torque da Figura C.1, existem diferentes

valores de $U(t)$ capazes de sustentar o pêndulo invertido em $\theta(t) = \theta_r(t)$. O valor exato de $U(t)$ não é conhecido. Baseado nas características do sistema pêndulo invertido representadas pela Equação 1, no círculo de torque da Figura C.1, e na função de pertinência da Figura C.2 foram desenvolvidas as seguintes regras nebulosas para o treinamento seguido de controle neural.

Regra 1. Quando o braço do pêndulo estiver parado em Q1 ou Q2, $U(t)$ deve ser positivo:

$$\text{if } \theta_m = Q1 \text{ or } \theta_m = Q2 \text{ then } U(t) > 0;$$

Regra 2. Quando o braço do pêndulo estiver parado em Q3 ou Q4, $U(t)$ deve ser negativo:

$$\text{if } \theta_m = Q3 \text{ or } \theta_m = Q4 \text{ then } U(t) < 0;$$

Regra 3 e 4. Quando o braço do pêndulo estiver em Q1 ou Q4, $|\Delta U(t)|$ será crescente para posicionar e sustentar o pêndulo de $|\theta| = \pi \text{ rad}$ a $|\theta| = \pi/2 \text{ rad}$:

$$\text{if } \theta_m = Q4 \text{ then } \Delta U(t) < 0;$$

$$\text{if } \theta_m = Q1 \text{ then } \Delta U(t) > 0;$$

Regra 5 e 6. Quando o braço do pêndulo estiver em Q2 ou Q3, $|\Delta U(t)|$ será decrescente para posicionar e sustentar o pêndulo de $|\theta| = \pi/2 \text{ rad}$ a $|\theta| = 0$:

$$\text{if } \theta_m = Q2 \text{ then } \Delta U(t) > 0;$$

$$\text{if } \theta_m = Q3 \text{ then } \Delta U(t) < 0;$$

Durante o treinamento do controlador neural foram seguidas algumas regras adicionais, que não podem ser consideradas necessariamente regras nebulosas, obtidas do círculo de torque da Figura C.2. Essas regras, consideradas como regras de apoio, foram indiretamente utilizadas no desenvolvimento das diferentes estratégias de controle do pêndulo invertido.

1. Não foram usados como referências os valores de $|\theta_r(t)| = \pi/2$ rad que é o posto de maior torque gerado pelo pêndulo. Nesses pontos, a corrente na armadura do motor se aproxima do seu limite máximo.

2. Treinou-se a RNMC do controlador neural com valores do ângulo de referência próximo do ponto de estabilidade do pêndulo, ou $\theta_r(t) \cong 0$ rad.

3. Cavalcanti et al. (1994) desenvolveram o conceito de estado passivo para permitir o treinamento em tempo real da RNMC. Basicamente, eles supuseram que o sistema representado pelo conjunto motor mais controlador neural (sistema global) tem pelo menos um estado de equilíbrio, e sem perda de generalidade, a origem pode ser considerada um desses estados. Representando-se o sistema motor na forma discreta por $x=f(x,u)$, eles definiram:

Definição 1. Um ponto $x_e \in \mathcal{R}^n$ é um ponto de equilíbrio de $x=f(x,u)$ se existir uma entrada u_e tal que: $x_e=f(x_e,u_e)$.

Assim, particularmente, a RNMC da Figura C.1 pode ser treinada, usando-se a tensão de excitação da armadura u e o x_e , para fornecer na sua saída o valor u_e correspondente ao estado de equilíbrio. Baseado nessa estratégia, Cavalcanti et al. (1994) definiram o estado passivo do sistema global como:

Definição 2. Um sistema dinâmico está no estado passivo quando estiver no ponto de equilíbrio com $x_e = f(x_e,u_e)$ e o controlador neural garante a excitação de controle u_e .

Os valores de $\theta_r(t)$ foram gerados para garantir os estados passivos durante o treinamento da RNMC. Isso garantiu que o pêndulo se movimentasse lentamente o que permitiu a simplificação na geração dos sinais usados no treinamento da RNMC.

O algoritmo de treinamento da RNMC com a dinâmica do pêndulo, foi desenvolvido a partir das características do sistema pêndulo invertido descrito em Sales (1997).

As regras nebulosas 7, 8, 9 e 10 foram desenvolvidas para o posicionamento com segurança do eixo do motor. Para essas regras, definiu-se a variável nebulosa θ_p com a função de pertinência $\theta_p = PG$ quando $\theta(t) > \pi$ (ou $\theta(t) > 1$ pu.), e $\theta_p = NG$ quando $\theta(t) < -\pi$ (ou, em

pu., $\theta(t) < -1$). Para a velocidade, definiu-se a variável nebulosa p com a função de pertinência $\Omega_p = NG$ quando $\Omega(t) < -1$ (ver Figura C.3).

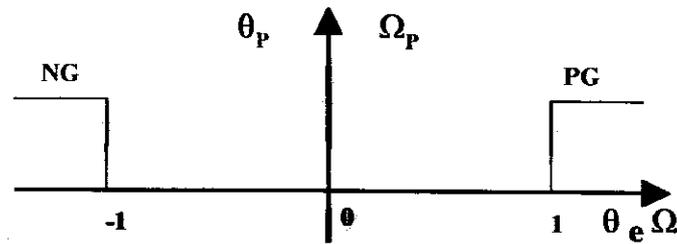


Figura C.3 - Função de pertinência de posição $\theta(t)$ e velocidade angular $\Omega(t)$.

Regra 7. Limite no valor do ângulo $\theta(t)$ em pu.

$$\text{if } \theta_p = PG \text{ then } \theta(t) = \theta(t) - 1$$

Regra 8. Limite no valor do ângulo $\theta(t)$ em pu.

$$\text{if } \theta_p = NG \text{ then } \theta(t) = \theta(t) + 1$$

Regra 9. Limite na velocidade do braço do pêndulo.

$$\text{if } \Omega_p = PG \text{ or } \Omega(t) = N \text{ then } U(t) = 0$$

A partir das regras nebulosas de número 1 a 9 Cavalcanti et al. (1995b) sugeriram a utilização de um conjunto de três estratégias para representar as posições do pêndulo e permitir o seu controle.

No diagrama de estados, Figura C.4, é apresentado o círculo de estratégias desenvolvido para o SCI. Nesse círculo são mostrados três estratégias: TREIN, OSCIL e ATRAC. Essas estratégias são ativadas de acordo com o estado do sistema pêndulo invertido (posição e velocidade do pêndulo). Inicialmente, a estratégia TREIN (treinamento) é ativada. Após a RNMC ter sido treinada, as demais estratégias são ativadas. Essas estratégias são a base do treinamento da RNMC, de acordo com as posições de referências do braço do pêndulo.

TREIN – treinamento oscilante, é usada quando $\theta \cong 0$. Consiste em variar θ_r em torno do ponto de maior estabilidade ($\theta = 0 =$ ponto passivo), de modo a treinar a rede neural.

OSCIL – posicionamento oscilante do braço do pêndulo. Ela é ativada nas seguintes condições: (1)depois do estado de TREIN e (2)o ângulo de referência é $\theta_r(t) \cong 0$. Ela consiste em variar θ_r alternadamente com o seu módulo crescente, de modo que o pêndulo oscile e ganhe energia o suficiente para atingir os quadrantes superiores.

ATRAC – posicionamento zero do braço do pêndulo. Ela é ativada nas seguintes condições: (1)depois do estado OSCIL e (2)quando $|\theta(t)| \cong \pi$ e $|\Omega|(t) \cong 0$. Ela consiste em impor a referência $\theta_r = \pi$ de modo a atrair o pêndulo para a posição de equilíbrio instável, que é o objetivo final de controle.

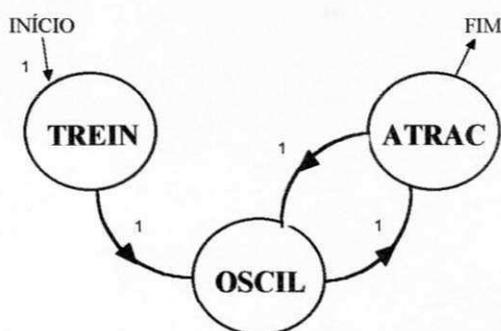


Figura C.4 - O círculo das estratégias.

A variável NO (número de oscilações), representada como NO_f na forma nebulosa (Figura C.5), é usada para indicar o fim da fase de treinamento. NO_f possui três funções de pertinência: Z, M e G.

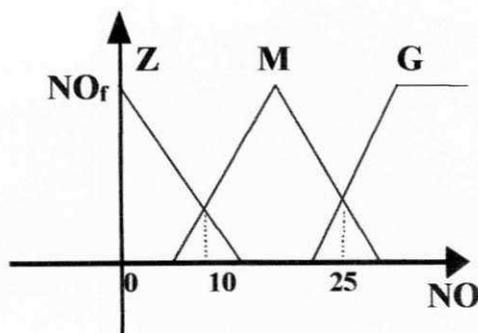


Figura C.5 - Funções de pertinência de NO.

Inicialmente no SCI, as variáveis booleanas que indicam a mudança de estados no círculo das estratégias têm os seguintes valores: INICIO= "1" e TREIN = OSCIL = ATRAC = FIM = "0".

A regra 10 dispara a estratégia TREIN:

Regra 10. if INICIO then TREIN = 1

A estratégia TREIN é representada pelas regras nebulosas 11 e 12 mostradas abaixo. δ é o valor do ângulo referência. A regra 13, que dispara a estratégia OSCIL, é executada quando o valor de NO é médio (M na Figura C.5). Isto é, o operador sugere o número de operações durante o treinamento.

Regra 11. if TREIN and $\theta_r(t) \approx \delta$ then $\theta_r(t) = -\delta$ and NO = NO + 1

Regra 12. if TREIN and $\theta_r(t) \approx -\delta$ then $\theta_r(t) = \delta$ and NO = NO + 1

Regra 13. if TREIN and NO_f = M then TREIN = 0 and OSCIL = 1

A regra nebulosa 14 é usada na estratégia OSCIL. ϕ representa o incremento do ângulo referência. Define-se a variável nebulosa $\theta_m = \text{MAX}$ quando $|\theta(t)| \cong \pi$ (pêndulo próximo da sua posição invertida).

Regra 14. if OSCIL and $\theta(t) \approx \theta_r(t)$ then $\theta_r(t) \approx -\theta_r(t) - \phi \cdot \text{SGN}(\theta_r(t))$ and NO = NO + 1

A estratégia de atração (ATRAC) é acionada sob as condições mostradas na regra nebulosa 15. Isto é, quando o braço do pêndulo se aproximar do objeto.

Regra 15. if OSCIL and $\theta_m = \text{MAX}$ then ATRAC = 1 and OSCIL = 0 and $|\theta_r(t)| = \pi$.

Durante a estratégia ATRAC a variável NO é incrementada quando o pêndulo atravessa, com velocidade não nula, o ponto $\theta(t) \approx \theta_r(t)$ (ver regra nebulosa 16).

Regra 16. if ATRAC and $\theta(t) \approx \theta_r(t)$ and $\theta(t) - \theta(t-1) \neq 0$ then NO = NO + 1

A regra nebulosa 17 é usada para finalizar o posicionamento do pêndulo.

Regra 17. if ATRAC = 1 and $\theta = \theta_r(t)$ and $\theta(t) - \theta(t-1) = 0$ then FIM = 1 and ATRAC = 0.

Regra 18. if ATRAC=1 and NOF=G then OSCIL=1 and ATRAC=0.

A regra 18 é usada para, quando ultrapassar o número de oscilações permitidas, acionar a estratégia OSCIL.

Controlador Neural

O controlador neural usado no SCI é ilustrado na Figura C.6 (Kumpati, 1990). Assume-se que $\theta_r(t+1)$ representa o valor de referência ou o valor desejado para a posição $\theta(t+1)$ do eixo do motor, onde $\theta_r(t+1)$ e $\theta(t+1)$ são representados em p.u. (por unidade) com valor base 2π rad. $U(t)$ tensão de armadura, é representada em p.u. com valor base 12v. O esquema geral do controlador neural adaptativo direto, como descrito por Tanomaru e Omatu (1991) e Khalid e Omatu (1992) esta ilustrado na Figura C.6. Este controlador possui três valores de entrada, seus valores são representados por X_i , com $X_1=U(t)$; $X_2=\theta(t)$; $X_3=\theta_r(t)$. W_{in} representa os pesos entre os neurônios Lineares da primeira camada e os neurônios Sigmóide da camada escondida, o W_{out} representa os pesos entre os neurônios Sigmóides da camada escondida e os neurônios Tangente Hiperbólico da camada de saída.

O índice de desempenho $I(u)$ usado na adaptação da Rede Neural Multicamada do sistema motor é definido pela Equação C.1.

$$I(U) = \frac{1}{2}(e_{t+1})^2 = \frac{1}{2}[\theta_r(t+1) - \theta(t+1)]^2 \quad (C.1)$$

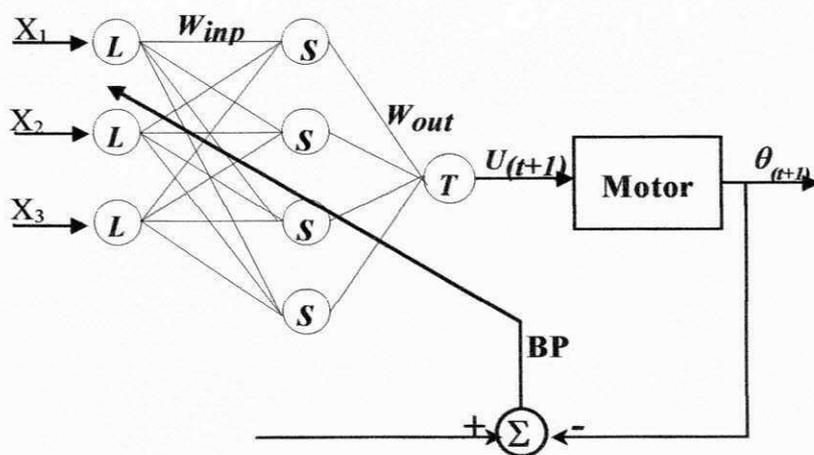


Figura C.6 - Controlador Neural de Posição.

Posicionamento do Pêndulo Duplo

Como aplicação de um pêndulo duplo podemos citar os robôs cooperantes construídos no NEUROLAB, para a transferência de carga entre dois manipuladores proposto por Alsina e Cavalcanti (1997). Eles utilizaram esta aplicação robótica para demonstrar a utilização de um sistema de controle inteligente utilizando algumas técnicas de IA, tais como, redes neurais artificiais, lógica fuzzy e sistemas especialistas. Os movimentos robóticos gerados pelo SCI foram relacionados à tarefas que são acionadas em tempo real por um escalonador de tarefas. A montagem dos braços robóticos em forma de pêndulos, permitiu o estudo dos movimentos de cada manipulador através das leis físicas do pêndulo. O esquema de montagem esta ilustrado na Figura D1.

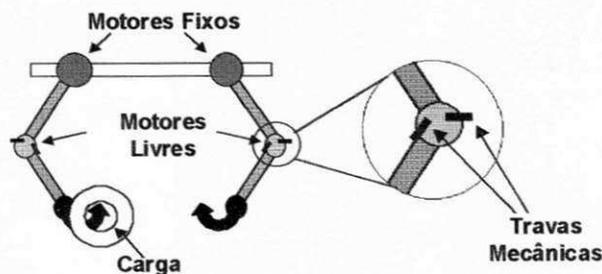


Figura D.1 - Estrutura robótica.

Cada manipulador possui dois motores de corrente contínua (motor cc). O primeiro motor (fixo) possui sensores ópticos para detecção de posição e pode ser posicionado na faixa de ângulos $-\pi/2$ a $\pi/2$. O valor positivo do ângulo indica que o movimento é realizado no sentido horário.

O segundo motor (livre) não possui detectores ópticos de posição, mas possui travas mecânicas que o forçam a permanecer na faixa de ângulos $-\pi/4$ a $\pi/4$, podendo ser posicionados nos ângulos $-\pi/4$, 0 e $\pi/4$. Os dois manipuladores possuem nas suas extremidades um gancho que é usado para sustentar a carga. Cada manipulador é composto por dois pêndulos, conforme ilustrado na Figura D.1.

Os movimentos dos manipuladores estão relacionados com as tensões aplicadas sobre os motores, objetivando alcançar um determinado ângulo para que os movimentos sejam bem sucedidos.

Visando diminuir o espaço do problema, a meta do sistema foi planejada baseada em uma analogia com uma situação do mundo real, ou seja, através de uma analogia, foi possível encontrar a seqüência de movimentos necessária para a realização da meta desejada e ao mesmo tempo, diminuir significativamente a quantidade de estados a serem tratados. A analogia utilizada para este problema foi a troca de uma moeda de valor entre um casal de cegos em uma rua da cidade. Imaginando como os cegos se comportariam no ato de um deles entregar a moeda ao outro, seis estratégias de movimento foram definidas para a transferência de carga entre os dois manipuladores robóticos, conforme ilustrado na Figura D.2.

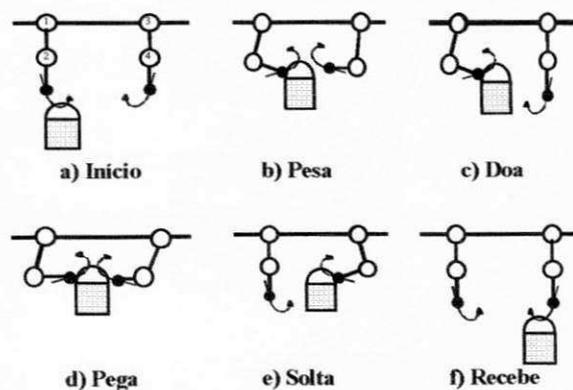


Figura D.2 - Seqüência de estratégias de movimentos.

As estratégias são: **Início**, estado inicial de repouso dos dois manipuladores (Figura D.1a). **Pesa**, identifica qual manipulador possui a carga (Figura D.1b). **Doa**, representa o movimento realizado pelo manipulador para entregar a carga ao outro manipulador (Figura D.1c). **Pega**, representa o movimento realizado pelo outro manipulador para receber a carga

(Figura D.1d). **Solta**, representa o movimento realizado pelo manipulador para deixar a carga com o outro manipulador (Figura D.1e). **Recebe**, representa o movimento realizado pelo outro manipulador após receber a carga (Figura D.1f).

Considerando que qualquer um dos dois manipuladores pode estar de posse da carga, um diagrama de estados foi elaborado para definir a seqüência de ativação das tarefas para realizar a troca da carga entre os manipuladores. A Figura D.3 ilustra este diagrama com o segundo manipulador de posse da carga e o primeiro manipulador sem a carga. A seqüência de transferência é ilustrada através das estratégias sombreadas.

Cada estratégia é composta por um conjunto de instruções que realizam o movimento desejado. Essas instruções são compostas por comando de movimentação de motor, rotina de treinamento através de rede neural artificial, rotina de inferência através de lógica fuzzy etc. A execução de qualquer estratégia de movimento ou instruções em um dado momento é garantida pela associação delas à tarefas. Define-se tarefa como sendo uma rotina (ou função) independente acionada por um escalonador em um certo instante. Escalonador é o algoritmo responsável pelo acionamento das tarefas.

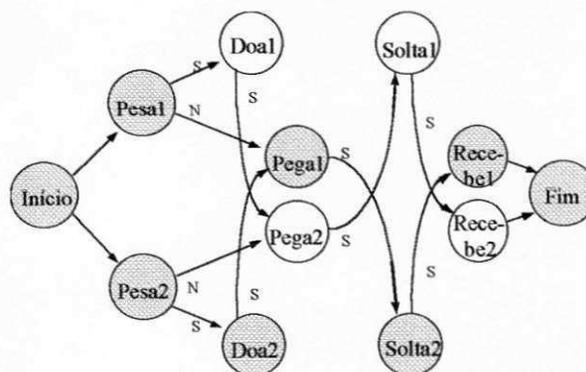


Figura D.3 - Diagrama de estados das estratégias.

Cada tarefa possui um descritor que é utilizado no escalonamento das tarefas. O descritor é representado por $Descr(id, st, tempo, freq)$. Cada descritor possui 4 campos: *id* (identificação), identifica a tarefa; *st* ("status"), indica o estado da tarefa que pode ser: executando ($st=-1$), bloqueada ($st=0$) e pronta ($st=1$); *tempo*, tempo para a ativação da tarefa em ms; *freq* (frequência), intervalo de tempo em que a tarefa será novamente ativada.

O escalonador de tarefas em tempo real (ETR) proposto por Alsina e Cavalcanti (1997), depende exclusivamente do tempo, onde a cada interrupção que ocorre de 1 em 1 ms, o ETR decrementa e verifica o tempo de espera de cada tarefa, quando este chega a zero o status da tarefa é alterado para o valor 1, ou seja, a tarefa é passada para o status pronta. Em seguida, o escalonador verifica o status de todas as tarefas, aquela que tiver status igual a um, será posta para executar.

O controle e posicionamento dos manipuladores em uma determinada posição é garantido pelo Sistema de Controle Inteligente (SCI) (Alcina, 1997). O SCI, usando lógica fuzzy e uma rede neural artificial multicamadas, fornece os valores das referencias a serem seguidas pelos motores dos dois manipuladores robóticos. O SCI se encarrega do treinamento da rede neural do controlador através do algoritmo de propagação retroativa do erro.

O SCI utiliza as informações obtidas do ambiente, através dos detectores de posição, para inferir e definir qual tarefa será acionada. As regras de inferência que compõe a base de conhecimento e as funções de pertinência utilizadas por inferências fuzzy.