UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto e Montagem Experimental de um Manipulador Robótico Não-Linear de dois Graus de Liberdade

Autor: Luís Gustavo de Mello Paracêncio Orientador: Prof. Dr. Helder Aníbal Hermini Co-orientador: Prof. Dr. José Manoel Balthazar

05/05

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

Projeto e Montagem Experimental de um Manipulador Robótico Não-Linear de dois Graus de Liberdade

Autor: Luís Gustavo de Mello Paracêncio Orientador: Prof. Dr. Helder Aníbal Hermini Co-orientador: Prof. Dr. José Manoel Balthazar

Curso: Engenharia Mecânica Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2005 S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P21p	Paracêncio, Luis Gustavo de Mello Projeto e montagem experimental de um manipulador robótico não-linear de dois graus de liberdade / Luis Gustavo de Mello ParacêncioCampinas, SP: [s.n.], 2005.
	Orientadores: Helder Aníbal Hermini, José Manoel Balthazar Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
	1. Manipuladores (Mecanismo). 2. Robôs - Dinâmica. 3. Grupos holomonicos. 4. Dinâmica. 5. Robótica. I. Hermini, Helder Aníbal. II. Balthazar, José Manoel. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Titulo em Inglês: Project and assembly of a nonlinear robotic manipulator of two degress of freedom Palavras-chave em Inglês: Robotic manipulators, Nonlinear dynamics, Monholonomic systems Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica Banca examinadora: Paulo Sérgio Varoto, Marco Lúcio Bittencourt Data da defesa: 21/12/2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Projeto e Montagem Experimental de um Manipulador Robótico Não-Linear de dois Graus de Liberdade

Autor: Luís Gustavo de Mello Paracêncio Orientador: Prof. Dr. Helder Aníbal Hermini Co-orientador: Prof. Dr. José Manoel Balthazar

Prof. Dr. Helder Aníbal Hermini Universidade Estadual de Campinas – DPM/ FEM/ UNICAMP

Prof. Dr. Paulo Sérgio Varoto Universidade de São Paulo – USP/ São Carlos

Prof. Dr. Marco Lúcio Bittencourt Universidade Estadual de Campinas – DPM/ FEM/ UNICAMP

Campinas, 21 de dezembro de 2005.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A DEUS, pela vida e por me dar forças para realizar este trabalho.

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao Professor Dr. Helder Anibal Hermini e Professor Dr. José Manoel Balthazar pela excelente orientação fornecida e amizade construída.

A minha namorada, Marina, que participou deste grande momento da minha vida, me ajudando, me incentivando e estando sempre presente.

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

A todos meus amigos, que através de sugestões, auxílios, críticas e incentivos, contribuíram de maneira fundamental para a realização desta etapa.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Projeto Mecânico e demais departamentos da UNICAMP, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Tudo posso naquele que me fortalece. Filipenses 4.13

Resumo

PARACÊNCIO, Luís Gustavo de Mello, "Projeto e Montagem de um Manipulador Robótico Não-Linear de dois Graus de Liberdade". Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 79 páginas. Dissertação (Mestrado).

A partir de considerações de dinâmica não-linear aplicada à robótica, foi desenvolvida a montagem experimental de um manipulador de dois graus de liberdade em que à primeira junta é atuada e a segunda é sub-atuada. Para tal, foram estabelecidos os objetivos para a concepção do protótipo gerado. A montagem experimental foi realizada a partir do desenvolvimento de manipuladores de dois graus de liberdade, considerados rígidos, podendo ser futuramente estendidos a outros graus de liberdade com alguma flexibilidade. A partir dos resultados apresentados, puderam ser verificadas as vantagens e desvantagens da utilização das arquiteturas de controladores aplicadas ao comando de mecanismos robóticos.

Palavras-Chaves:

- Manipuladores robóticos, dinâmica não-linear, sistemas não-holonomico.

Abstract

PARACÊNCIO, Luís Gustavo de Mello, "Project and Assembly of a Nonlinear Robotic Manipulator of two Degrees of freedom". Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 79 pages. Dissertação (Mestrado).

From reasons of applied nonlinear dynamics to robotics, it was developed an experimental setting of manipulator of two degrees of freedom where to the first joint is acted and second is sub-acted. The objectives had been established for the conception of the generated archetype. The experiment was carried through the development of manipulators of two degrees of freedom considered rigid. It can be extended to other degrees of freedom with some flexibility in future. The advantages and disadvantages of the use of architectures of controllers could be identified for applied to the command of mechanisms robotics.

Key Words:

- Robotic manipulators, nonlinear dynamics, nonholonomic systems.

Índice

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Nomenclatura	vii

Capítulo 1

1 - Introdução	01
1.1 - Objetivo e motivação da dissertação	
1.2 - Organização do trabalho	

Capítulo 2

2 - Implementação experimental – Hardware	. 09
2.1 - Hardware: Elementos constituintes do manipulador	. 11
2.1.1 - Elos do robô	.11
2.1.2 - Rolamento rígido de esfera	. 13
2.1.3 - Transdutor de Posição – Encoder	. 14
2.1.3.1 - Chave Optoeletrônica	. 16
2.1.3.2 - Diodos Emissores de Luz (LED)	. 17
2.1.3.3 - Fotodiodos	. 18
2.1.3.4 - Fototransistor	. 19
2.1.4 - Transdutor de Posição – Potenciômetro	. 20
2.1.5 - Redutor de Velocidade	. 23
2.1.5.1 - Seleção do Redutor de Velocidade	. 24

2.1.6 - Estator	26
2.1.7 - Motor de Corrente Contínua	28
2.1.7.1 - Princípio de Funcionamento	28
2.1.7.2 - Determinação das características elétricas do motor de corrente	
contínua	30
2.1.8 – Sistema modular QBX ultracompacto	38
2.2 – Primeira bancada experimental	39
2.3 – Segunda bancada experimental	39
2.4 – Terceira bancada experimental	41

Capítulo 3

3 - Implementação Experimental – Software	. 42
3.1 - Painel frontal e do diagrama de bloco	. 42

Capítulo 4

4 - Resultados e Análise Experimental	
4.1 - Método de ensaio	

Capítulo 5

5 - Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	56
Referências Bibliográficas	57
Apêndice A - LabView	60
Apêndice B - Resumo da dinâmica de manipuladores robóticos de dois graus de liberdade	71

Lista de Figuras

Figura 1.1:	Manipulador robótico (Weidemann, Scherm e Heimann, 2005)	03
Figura 1.2:	Manipulador robótico (Fujita, Kawai e Spong, 2002)	03
Figura 1.3:	Manipulador robótico (Trendafilova e Brussel, 2000)	04
Figura 1.4:	Estrutura do manipulador robótico (Nakamura, Suzuki e Koinuma, 1995)	05
Figura 1.5:	Manipulador robótico	. 07
Figura 2.1:	Elementos constituintes do manipulador robótico	10
Figura 2.2:	Elos do sistema robótico	. 11
Figura 2.3:	Peça 01	. 12
Figura 2.4:	Peça 02 e 05	. 12
Figura 2.5:	Peça 03	. 12
Figura 2.6:	Peça 04	. 12
Figura 2.7:	Peça 06	. 12
Figura 2.8:	Rolamento rígido de esfera	. 13
Figura 2.9:	Encoder de movimento angular e encoder de movimento linear	. 14
Figura 2.10:	Disco do encoder incremental rotativo – 120 pulsos /revolução	. 15
Figura 2.11:	Encoder acoplado ao motor	. 15
Figura 2.12:	Representação gráfica dos sinais A, B e Z de um encoder incremental	. 15
Figura 2.13:	Chave optoeletrônica	. 17
Figura 2.14:	Símbolo de um fotodiodo	. 19
Figura 2.15:	Símbolo de um fototransistor	. 19
Figura 2.16:	Circuito optoacoplador	20
Figura 2.17:	Circuito do potenciômetro multivoltas	21
Figura 2.18:	Detalhes construtivos de um potenciômetro multivoltas	21

Figura 2.19:	Circuito elétrico de um potenciômetro	. 22
Figura 2.20:	Redutor de velocidade	. 24
Figura 2.21:	Sistema de transmissão com roda dentada e rosca sem fim	. 26
Figura 2.22:	Detalhes construtivos do sistema estator acoplado entre o redutor e o link 1	. 27
Figura 2.23:	Detalhes dimensionais anéis, base do estator e acoplamento entre o redutor de	
	velocidade e o link	. 28
Figura 2.24:	Estrutura elétrica do motor	. 29
Figura 2.25:	Estrutura mecânica do motor	. 29
Figura 2.26:	Foto e detalhe dimensional do motor utilizado no protótipo	. 30
Figura 2.27:	Acoplamento modular	. 32
Figura 2.28:	Base de madeira (Motor e Gerador)	. 33
Figura 2.29:	Variac, Gerador, Motor	. 33
Figura 2.30:	Ligação dos cabos para início da análise	. 34
Figura 2.31:	Curvas características com tensão constante de 25 Vcc	. 35
Figura 2.32:	Curvas características com tensão constante de 50 Vcc	. 36
Figura 2.33:	Curvas características com tensão constante de 100 Vcc	. 37
Figura 2.34:	Sistema modular QBX inserido ao manipulador	. 38
Figura 2.35:	Primeira bancada experimental e seus componentes	. 39
Figura 2.36:	Segunda bancada experimental e seus componentes	. 40
Figura 2.37:	Conector para transferência do sinal e placa de aquisição LabView	. 40
Figura 2.38:	Terceira bancada experimental e seus componentes	. 41
Figura 3.1:	Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) – Painel Frontal	. 43
Figura 3.2:	Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) – Painel Frontal	. 44
Figura 3.3:	Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) – Painel Frontal	. 45
Figura 3.4:	Diagrama de blocos – Tela 1	. 46
Figura 3.5:	Diagrama de blocos – Tela 1 continuação	. 47
Figura 3.6:	Diagrama de blocos – Tela 2	. 48
Figura 3.7:	Diagrama de blocos – Fluxograma de funcionamento 1	. 49
Figura 3.8:	Diagrama de blocos – Fluxograma de funcionamento 2	. 50
Figura 4.1:	Gráficos da Velocidade e Deslocamento sobre o tempo (com ruído)	. 52
Figura 4.2:	Plano de fase (com ruído)	. 52

Figura 4.3:	Gráficos da Velocidade e Deslocamento sobre o tempo (sem ruído)	
Figura 4.4:	Plano de fase (sem ruído)	
Figura 4.5:	Gráficos da Velocidade e Deslocamento sobre o tempo	
Figura 4.6:	Plano de fase	
Figura 4.7:	Resultados de Nakamura, Suzuki e Koinuma em 1995	
Figura A.1:	Painel Frontal e Diagrama de Blocos	
Figura A.2:	Paleta de Ferramentas	
Figura A.3:	Paleta de controle e função	
Figura A.4:	Bloco de sincronismo	
Figura A.5:	Bloco de Média	
Figura A.6:	Bloco para agrupamento	
Figura A.7:	Estrutura seqüencial	
Figura A.8:	Bloco divisor	
Figura A.9:	Bloco de aquisição de gráfico	
Figura A.10	: Bloco for loop	
Figura A.11	: Bloco derivativo	
Figura B.1:	Manipulador robótico com dois elos rígidos e juntas rotativas	

Lista de Tabelas

Tabela 2.1:	Dimensão das peças relacionadas acima	13
Tabela 2.2:	Características do potenciômetro multi-voltas	22
Tabela 2.3:	Coeficiente Cd	25
Tabela 2.4:	Coeficiente Cf	25
Tabela 2.5:	Dimensão das peças relacionadas à figura 2.23	28
Tabela 2.6:	Dimensão da peça relacionada à figura 2.26	30
Tabela 2.7:	Dimensão da peça relacionada à figura 2.27	32
Tabela 2.8:	Características do motor com alimentação de 25Vcc	35
Tabela 2.9:	Características do motor com alimentação de 50Vcc	36
Tabela 2.10:	Características do motor com alimentação de 100Vcc	37
Tabela A.1:	Tipos de ligação	65

Nomenclatura

*J*_i: i – ésimo *momentum* generalizado, [kg.m².rad/s]

- θ_i : i ésima posição generalizada, [rad]
- si: distância entre o vínculo e o centro de gravidade do i -ésimo tramo, [m]
- *l*_i: distância entre os vínculos do i –ésimo tramo, [m]
- *m*_i: massa do i –ésimo tramo, [kg]
- I_i : momento de inércia do tramo i, [kg.m²]
- θ : velocidade angular, [rad/s]
- t tempo, [s]

 $a = m_1 s_1^2 + m_2 l_1^2 + I_1$: elemento diagonal da matriz de inércia correspondente ao link1, [kg.m²] $b = m_2 l_2 s_2$: elemento não diagonal da matriz de inércia, [kg.m²]

 $c = m_2 s_2^2 + I_2$: elemento diagonal da matriz de inércia correspondente ao link2, [kg.m²]

- GDL: grau de liberdade.
- g: aceleração da gravidade, $[9,8m/s^2]$
- V_e : tensão de alimentação, [V]
- R_t : resistência total do potenciômetro, [Ω]
- V_o : tensão de saída, [V]
- *C_d*: coeficiente para determinação do fator de serviço em função do empenho do redutor durante o dia em função da carga gerada pela máquina utilizadora.
- $C_{j:}$ coeficiente para a determinação do fator de serviço F_s em função do número de intervenções horárias em relação ao tipo de carga empregada pela máquina utilizadora.
- f_{su} : fator de serviço utilizado
- T: torque, [N.m]

 K_t : constante que depende das dimensões físicas do motor

- φ : número total de linhas de fluxo que entra na armadura por um pólo, [N]
- *I*_{*a*}: corrente da armadura. [A]
- V_{ta} : tensão no terminal da armadura, [V]
- V_g : força contra-eletromotriz, fcem [V]
- V_t : tensão no terminal do motor, [V]
- *I*_{*l*}: corrente na linha, [A]
- *I*_d: corrente do campo em derivação, [A]
- r_a : resistência do circuito da armadura, [Ω]
- r_s : resistência do campo, [Ω]
- $V_t I_a$: é a potência fornecida à armadura do motor, [W]
- *v*: velocidade do motor, [rpm]

Capítulo 1

1 Introdução

O estudo de manipuladores robóticos tem atraído o interesse recente de pesquisadores na área da robótica, sendo que os estudos do movimento não-linear são um dos principais focos em suas subseções. O movimento não-linear de mecanismos está relacionado a argumentos teóricos e práticos, como o controle de robôs móveis (Laumond, 1987), reorientação do corpo de robôs, contatos rolantes (Lafferriere e Sussmann, 1993), controlabilidade (Bushnell, Tilbury e Sastry, 1993), reorientação de articulações sub-atuadas do robô no espaço (Nakamura, 1990) (Sreenath, 1990). Este movimento não-linear está diretamente relacionado com a não-holonomia dinâmica do servomecanismo. Portanto, é importante efetuar a análise do comportamento não-linear.

O manipulador planar de duas articulações com a segunda articulação livre é um dos sistemas mecânicos mais simples em que se pode constatar tais efeitos e para tal, são necessários aparatos para estabelecimento de controle da articulação ativa bem como interface que permita a aquisição dos parâmetros cinemáticos e dinâmicos, simultaneamente, de ambas articulações, usando tempo-periódico na entrada e modulação de amplitude do erro de realimentação.

As equações de movimento dos sistemas supramencionados são normalmente representadas por equações diferenciais de primeira ordem. Este estudo do movimento não-linear sobre mecanismos em movimento permite controlar os servomecanismos em regimes de maior velocidade, como também otimizar a precisão do *set point*.

As restrições do movimento podem ocorrer devido a dinâmica dos mecanismos. Os mecanismos sub-atuados apresentam coordenadas generalizadas que não são atuadas. Neste fato reside a origem das restrições dinâmicas. Nakamura e Iwamoto (Nakamura e Iwamoto, 1993) estudaram a integrabilidade de tais restrições. Oriolo e Nakamura (Oriolo e Nakamura, 1991) esclareceram que as restrições dinâmicas de um manipulador com junções livres são geralmente não-holonômicas, não integráveis e, conseqüentemente, de segunda ordem.

No controle de um manipulador com articulações livres, Arai e Tachi (Arai e Tachi, 1991) estudaram o controle de trajetórias de um manipulador dotado de freios eletromagnéticos dispostos nas articulações livres.

Nakamura e Iwamoto (Nakamura e Iwamoto, 1993) discutiram um sistema de multi-ligação do espaço com livres junções e o seu controle. (Wichlund, Sordalen e Egeland, 1995) propuseram estabilização de um manipulador de articulação livre de dois graus de liberdade.

Weidemann, Scherm e Heimann (Weidemann, Scherm e Heimann, 2005) estabeleceram duas aproximações não-lineares de controle em tempo discreto para manipuladores que operam em planos horizontais equipados de articulações passivas, em que a primeira aproximação de controle foi baseada em uma linearização prolongada e bem executada com erros suficientemente pequenos e a segunda aproximação de controle proposto para neutralizar grandes desvios de trajetória, como ilustrado na figura 1.1.



Figura 1.1: Manipulador Robótico (Weidemann, Scherm e Heimann, 2005)

Na figura 1.2 é ilustrado a aplicação do controle visual do gabarito utilizando uma câmera fixa ao final do link1. A finalidade é dar estabilidade ao movimento. (Fujita, Kawai e Murao, 2005).



Figura 1.2: Manipulador Robótico (Fujita, Kawai e Spong, 2002)

A folga no conjunto de engrenagens, conhecido como *backlash* é muito comum em sistemas mecânicos em que os elementos não se ajustam perfeitamente, isto é, sistemas com

folgas mecânicas e desta forma, é possível o estudo da presença da não-linearidade e o comportamento caótico entre as engrenagens. Trendafilova e Brussel estudaram esse tipo de comportamento em um manipulador conforme ilustrado na figura 1.3. (Trendafilova e Brussel, 2001).



Figura 1.3: Manipulador Robótico (Trendafilova e Brussel, 2000)

Um robô manipulador é definido como uma máquina com características significantes de versatilidade e flexibilidade. Um robô manipulador exemplificado na figura 1.4 é composto por:

• Manipulador: constituído por um conjunto de elos conectados através de articulações (ou juntas), um pulso e um efetuador projetado para realizar a tarefa requerida pelo robô;

• Atuadores: responsáveis pela movimentação do manipulador, através de forças aplicadas direta ou indiretamente nas juntas;

- Sensores: indicam o status do manipulador;
- Sistema de controle (computador): permite o controle e a supervisão do manipulador.

As juntas do manipulador podem ser rotativas, que permitem movimentos de rotação das diferentes partes do robô (elos, punho ou efetuador) ou prismáticas, que permitem movimentos de translação. Geralmente, sensores de velocidade ou de posição são colocados nas juntas do robô.



Figura 1.4 – Estrutura do manipulador robótico (Nakamura, Suzuki e Koinuma, 1995)

A figura 1.4 demonstra o manipulador robótico planar com dois graus de liberdade que tornou-se objeto de investigação do presente trabalho que propõe o projeto, a montagem e a instrumentação do servo-sistema. No apêndice B, pode ser observada breve introdução da dinâmica de manipuladores robóticos de articulações livres.

É importante salientar que a presença de juntas não atuadas permite que os manipuladores sub-atuados sejam funcionalmente diferentes dos convencionais, onde todas as juntas são atuadas, com relação aos seguintes critérios:

• Acoplamento dinâmico: controle dos graus de liberdade não atuados é possível somente quando o acoplamento entre eles e os graus de liberdade atuados é suficiente para permitir transmissão de forças e torques destes para aqueles;

• Controlabilidade dos graus de liberdade não atuados: todos os graus de liberdade de um manipulador sub-atuados são, em geral, controláveis, embora não concorrentemente. Enquanto o controle dos graus de liberdade atuados pode ser feito diretamente, o controle dos graus de liberdade não atuados só é possível indiretamente, através da aplicação de forças nos graus de liberdade atuados.

• **Restrições não-holonomicas:** as equações dinâmicas de manipuladores sub-atuados geralmente incluem restrições não-holonomicas que aparecem devido à falta de atuação em alguns dos graus de liberdade;

• Não-linearidade: as equações dinâmicas de manipuladores sub-atuados são não-lineares e dependem não só dos parâmetros cinemáticos mas também dos parâmetros do sistema.

Suzuki (Suzuki, 1997) realizou o estudo de dispositivos da análise de movimentos dinâmicos não-lineares de sistemas mecânicos não-holonomicos; a formulação da variação da orientação de satélites com movimentos cíclicos; a análise do comportamento de manipuladores de livre-junção em resposta a uma entrada periódica; a definição e construção de novos mecanismos com as introspecções de não-linearidade na dinâmica e no controle e manipuladores de livre-junção com somente um motor.

A característica do trabalho de Nakamura, Suzuki e Koinuma (Nakamura, Suzuki, e Koinuma, 1995) foi estudar os problemas não-lineares de várias ferramentas, usando para isto a não-holonomia na dinâmica não-linear, cinemática e o controle não-linear, como também a cinemática dos quartenios, os formulários diferenciais, a análise do espaço da fase e análise do mapa de Poincaré, calculando a média da análise e análise hamiltoniana.

1.1 Objetivo e motivação da dissertação

Este trabalho teve como principal objetivo gerar a proposta de ambiente baseada em computação reconfigurável aplicada a um sistema robótico de dois graus de liberdade, sendo que para atingir tal objetivo foram elaborados hardware e software dedicados às tarefas de aquisição de sinais que serão descritas detalhadamente no decorrer do trabalho.

O controle de estruturas modulares tem sido um assunto bastante pesquisado nos últimos vinte anos, devendo-se este interesse principalmente às aplicações espaciais. A maioria das aplicações concentra-se no controle de robôs manipuladores. Apesar de se tratar de um assunto bastante pesquisado a nível mundial, no Brasil ainda são poucos os pesquisadores dedicados ao

desenvolvimento de estudos sobre este tema.

A motivação deste estudo é propiciar um ambiente com característica modular que permita a elaboração de novos experimentos com o desenvolvimento de ferramentas de software que permitam a monitoração dos diferentes sensores e atuadores da planta do projeto. Para tal, foram desenvolvidos módulos independentes, com interfaces de comunicação definidas como parte de uma estrutura de arquitetura orientada a fluxo de informação aberta.



Figura 1.5: Manipulador Robótico

Através da arquitetura hierárquica e aberta, na qual são distribuídas as diversas ações de controle em níveis crescentes de complexidade e utilização de recursos de computação reconfigurável, propõe-se a validação deste ambiente com o dispositivo robótico experimental.

O protótipo gerado tem como objetivo consolidar o conhecimento em diversas áreas de pesquisa, como modelagem matemática, controle e automação, sistemas de potência, transdução e sensorização, transmissão de dados, eletrônica embarcada e engenharia de *software*. A aplicação destas tecnologias permitirá a aquisição de dados e tratamentos matemáticos a partir da aplicação de técnicas da dinâmica não-linear, possibilitando a detecção de efeitos de relevada importância na área da robótica. Contudo, é abordado neste trabalho o projeto dos equipamentos, montagem e implementação da interface computacional elaborada em ambiente LabView[®] dedicada a aquisição e análise dos sinais.

Da bibliografia consultada, foi possível observar que Suzuki (Suzuki, 1997) efetuou o estudo de dispositivos da análise de movimentos dinâmicos não-lineares de sistemas mecânicos não-holonomicos; a formulação da variação da orientação de satélites com movimentos cíclicos; a análise do comportamento de manipuladores de livre-junção em resposta a uma entrada periódica; a definição e construção de novos mecanismos com as introspecções de não-linearidade na dinâmica e no controle e manipuladores de livre-junção com somente um motor.

1.2 Organização do trabalho

Para atingirmos os objetivos delineados, este texto está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, são apresentados os princípios de funcionamento e a descrição construtiva dos elementos constituintes do servo-sistema que compôs a aplicação prática deste trabalho.

No Capítulo 3, é apresentados a interface LabView e os procedimentos para a elaboração dos instrumentos virtuais.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados e análise dos sinais através do software LabView[®].

No Capítulo 5, são apresentadas a conclusão e propostas de trabalhos futuros.

No Apêndice A, é apresentada breve introdução sobre o software LabView que foi utilizado no presente trabalho.

No Apêndice B, é apresentado um resumo da dinâmica de manipuladores robóticos de dois graus de liberdade.

Capítulo 2

2 Implementação experimental - Hardware

Neste capítulo, serão abordados os princípios de funcionamento e a descrição construtiva dos elementos constituintes do servo-sistema que compôs a aplicação prática deste trabalho.

O experimento que trata o presente capítulo teve como objetivo principal à validação da montagem de um manipulador. Com essa finalidade, foi implementado um protótipo de manipulador planar com duas articulações rotacionais planares, sendo que a primeira articulação foi ativada por um motor de corrente contínua e a segunda articulação apresenta giro livre. Tal aparato permitiu a verificação do modelo e a aplicação de movimentos para o manipulador. O desenho de cada elemento do projeto foi construído utilizando o software AutoCad[®] 2002.

A figura 2.1 apresenta a vista tridimensional e lateral do protótipo, com a disposição e identificação dos elementos que são:

- Base do projeto;
- Base do motor de corrente contínua;
- Base do encoder;
- Acoplamentos;
- Motor de corrente contínua;

- Redutor de velocidade;
- Potenciômetro;
- Estator;
- Encoder;
- Link's.





Figura 2.1:Elementos constituintes do Manipulador Robótico

2.1 Hardware: Elementos constituintes do manipulador

Os elos do sistema robótico foram projetados utilizando o software AutoCAD[®] 2000 com base no artigo publicado em 1995 por Nakamura, Suzuki e Koinuma. Os elementos constituintes do manipulador que foram desenvolvidos no laboratório do Departamento de Projeto Mecânico da UNICAMP estão descritos abaixo como segue os itens:

2.1.1 Elos do robô

Na figura 2.2 os elos foram projetados de forma modular para possíveis alterações de formas e tamanhos, que pode ser dado continuidade em trabalhos futuros.



Figura 2.2: Elos do sistema robótico

Detalhes dimensionais dos elos do manipulador robótico através das figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7:



Figura 2.7: Peça 06

Cujas dimensões estão demonstradas na tabela 2.1.

	Peça 01						Peça 02/ 05								
	Α	В	С	D	Е	F	G	Н	Ι	J	K	L			
Dimensão (mm)	10	30	r10	r40	33	10	74	10	12,61	20	12,61	10			

	Peça 03				Peça 04								Peça 06		
	Μ	Ν	0	Р	Q	R	S	Т	U	V	W	X	Y	Ζ	
Dimensão (mm)	r11	r40	33	10	18	33	15	r4	r40	r7,5	10	10	r40	33	

Tabela 2.1: Dimensão das peças relacionadas acima.

2.1.2 Rolamento rígido de esfera

O rolamento rígido de esfera utilizado é adequado para suportar as cargas radiais e as cargas axiais entre os elos do manipulador. Os detalhes dimensionais estão expostos na figura 2.8.



Figura 2.8: Rolamento rígido de esfera

Onde:

- *D* diâmetro externo (mm);
- d diâmetro externo (mm);
- *B* espessura (mm);
- *C* carga dinâmica (kN);
- *V* velocidade limite (rpm);
- *m* massa (Kg).

2.1.3 Transdutor de Posição - Encoder

O encoder é um transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos digitais elétricos. Esses pulsos gerados podem ser usados para determinar velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição ou direção.



Figura 2.9: Encoder de movimento angular (a), Encoder de movimento linear (b).

No projeto desenvolvido o sistema de leitura é baseado em um disco (encoder rotativo), formado por janelas radiais transparentes e opacas, alternadas, como pode ser visto na figura 2.10. Este é iluminado perpendicularmente por uma fonte de luz infravermelha, quando então, as imagens das janelas transparentes são projetadas no receptor (figura 2.11). O receptor converte essas janelas de luz em pulsos elétricos.

O encoder incremental fornece normalmente dois pulsos quadrados defasados em 90°, que são chamados usualmente de canal A e canal B. A leitura de apenas um canal fornece somente a velocidade, enquanto que a leitura dos dois canais fornece também o sentido do movimento.

Um outro sinal chamado de Z ou zero também está disponível e ele dá a posição absoluta "zero" do encoder. Este sinal é um pulso quadrado em que a fase e a largura são as mesmas do canal A.



Figura 2.10: Disco do encoder incremental rotativo – 120 pulsos por revolução



Figura 2.11: Encoder acoplado ao Motor



Figura 2.12 – Representação gráfica dos sinais A, B e Z de um encoder incremental

A resolução do encoder incremental é dada por pulsos por revolução (normalmente chamado de PPR), isto é, o encoder gera certa quantidade de pulsos elétricos por uma revolução dele próprio, no caso rotativo. Para determinar a resolução, o número de pulsos foi dividido por 360°.

A precisão do encoder incremental elaborado no projeto não é alta, neste caso é de 120 pulsos por revolução, em comparação com os encoders comerciais que chegam por volta de 10.000 pulsos por revolução, pois esta depende de fatores mecânicos, elétricos e ambientais, que são:

- Erros na escala das janelas do disco;
- Excentricidade do disco;
- Excentricidade das janelas;
- Erro introduzido na leitura eletrônica dos sinais;
- Temperatura de operação e dos próprios componentes transmissores e receptores de luz, fatores estes que são otimizados em encoders dedicados a sistemas robóticos industriais. (Thomazini e Albuquerque, 2005).

2.1.3.1 Chave Optoeletrônica

A chave optoeletrônica é usada para a leitura do disco ranhurado como mostrado na figura 2.10. As entradas do sistema de aquisição de sinais são efetuadas através de acoplamento óptico. Em implementações práticas, os componentes optoeletrônicos ilustrados na figura 2.13 mais utilizados são os diodos emissores de luz (LED), fotodiodos, optoacopladores. (Thomazini e Albuquerque, 2005).



Figura 2.13: Chave optoeletrônica

2.1.3.2 Diodos Emissores de Luz (LED)

Em um diodo de junção comum com polarização direta, há uma combinação de portadores nesta junção (elétrons-lacunas). À medida que esses elétrons caem de um nível mais alto de energia para um nível mais baixo, eles irradiam energia, sendo parte dessa energia emitida em forma de calor e outra parte na forma de *fótons*. (Thoamzini e Albuquerque, 2005).

No silício e no germânio a maior parte dessa energia é emitida na forma de calor, sendo a luz emitida insignificante.

Os diodos LED tem sido atualmente utilizados para indicação em substituição as lâmpadas piloto convencionais devido ao seu baixo consumo de energia (baixa tensão e baixa corrente), sua vida longa e rápida comutação *on-off* (liga-desliga).

Enquanto os diodos comuns são fabricados a partir do silício e do germânio, os LEDs são construídos a partir de elementos como o fosfato de arsenieto de gálio (GaAsP) ou o fosfato de gálio (GaP) e o número de *fótons de luz* emitida é suficiente para constituir uma fonte de luz bastante visível. O processo de emissão de luz por aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado de *eletroluminescência*.

O símbolo mais utilizado para representar um diodo LED é mostrado abaixo:



Como o LED é um dispositivo de junção *pn*, ele terá uma característica de polarização direta.

Os LEDs operam com tensão típica que varia entre 1,7 a 3,3V para correntes entre 10 a 50mA e potências típicas entre 10 a 150mW emitindo luz nas cores vermelha, amarela, laranja, verde, branca e azul e atualmente, também na cor azul.

A corrente e a tensão em um LED variam de acordo com a cor do LED e sua própria tolerância.

O fato de sua construção ser de semicondutor, torna-o bastante robusto, podendo sua vida útil atingir cerca de 100.000 horas.

A corrente no LED pode ser calculada pela fórmula:

$$I = \frac{V - V_{LED}}{R_s}$$
(2.1)

2.1.3.3 Fotodiodos

O fotodiodo mostrado na figura 2.14 caracteriza-se por ser sensível à luz, isto é, quando a luz incide em sua junção ocorre uma produção de elétrons e lacunas. Quanto maior for a intensidade luminosa que incide na junção, maior será o número de portadores minoritários e maior será a corrente reversa. (Thomazini e Albuquerque, 2005).



Figura 2.14: Símbolo de um fotodiodo

2.1.3.4 Fototransistor

O fototransistor ilustrado na figura 2.15 é um transistor, cuja junção, coletor e base ficam expostos à luz e atua como fotodiodo. O transistor amplifica a corrente, fornece alguns mA (miliamperes) com alta luminosidade e sua velocidade é menor que a do fotodiodo. Suas aplicações são as do fotodiodo, exceto em sistemas de fibra ótica devido à operação em alta freqüência. (Thomazini e Albuquerque, 2005).



Figura 2.15: Símbolo de um fototransistor

Em resumo, podemos dizer então que um fotodiodo é um dispositivo que converte a luz recebida em determinada quantidade elétrica.

Se associarmos um LED a um *fotodiodo*, teremos então um optoacoplador, conforme mostra a figura 2.16.



Figura 2.16: Circuito optoacoplador

O optoacoplador possui um LED no lado da entrada e um fotodiodo no lado da saída. A tensão da fonte V_1 e o resistor série R_1 produzem uma corrente através do LED. Por sua vez, a luz emitida pelo LED atinge o fotodiodo, produzindo a corrente I_2 e somando as tensões ao longo da malha, temos:

$$V_{s} (saida) - V_{2} + I_{2}R_{2} = 0$$
 (2.2)
 $V_{s} (saida) = V_{2} - I_{2}R_{2}$

No circuito acima, a tensão de saída depende da corrente reversa I_2 . Se a tensão de entrada V_1 estiver variando, a quantidade de luz emitida estará também flutuando, o que significa que a tensão de saída também pode ser alterada de acordo com a tensão de entrada.

Portanto, o optoacoplador é um dispositivo capaz de acoplar um sinal de entrada com um circuito de saída, com a vantagem de possuir isolação entre os dois circuitos extremamente elevados, pois o único contato entre esses dois circuitos é um feixe de luz.

2.1.4 Transdutor de Posição - Potenciômetro

Na articulação livre do manipulador, foi disposto um potenciômetro multi-voltas para processar a transdução da posição angular da junta à qual o transdutor foi acoplado. Quanto ao princípio de funcionamento, os potenciômetros convertem energia mecânica em energia elétrica. A entrada corresponde a um deslocamento rotacional helicoidal (multi-volta) como é esquematizado na figura 2.17. (Thomazini e Albuquerque, 2005).
E quando uma tensão é aplicada aos terminais fixos do potenciômetro, a tensão de saída medida no terminal variável é proporcional ao deslocamento da entrada.



Figura 2.17: Circuito do potenciômetro multi-voltas

O princípio de funcionamento de um transdutor potenciômetro baseia-se na variação de resistência de um potenciômetro conectado mecanicamente a um eixo para monitorar a sua posição.



Figura 2.18: Detalhes construtivos de um potenciômetro multi-voltas

Os potenciômetros são constituídos basicamente de elemento resistivo sobre o qual desliza um contacto móvel (figura 2.19).



Figura 2.19: Circuito elétrico de um potenciômetro

Equação:

$$V_0 = \frac{V_e}{R_t}$$
(2.3)

onde,

V_e = tensão de alimentação (V)

 R_t = resistência total do potenciômetro (Ω)

V_o = tensão de saída (V)

Potência Nominal	@ 40°C 3W
Tolerância de Resistência	± 5%
Rotação Efetiva	3600° (+10° -0°)
Linearidade	± 0,25%
Resistência Final	5000 Ohms
Rigidez Dielétrica	1000VAC
Temperatura Operacional	-55°C a 125°C

Tabela 2.2: Características do potenciômetro multi-voltas

O elemento resistivo dos transdutores potenciométricos, na sua forma mais comum, é constituído por um fio condutor bobinado sobre um suporte isolante. A variação de resistência entre o seu contacto móvel e um dos seus extremos fixos é função dos seguintes fatores:

- Posição relativa do contato sobre a resistência total;
- Valor da resistência;

 Distribuição da resistência em relação ao deslocamento (translação ou rotação) do contato. Esta distribuição poderá ser linear, logarítmica.

Nos transdutores potenciométricos, utilizados para a medida de deslocamentos, existe uma relação linear entre o sinal saída e o deslocamento que lhe deu origem. Na prática, para obter uma boa linearidade, é necessário que a medida do sinal de saída seja efetuada por um circuito cuja resistência interna seja suficientemente alta quando comparada com a resistência total do transdutor.

A seleção e utilização de resistências em circuitos, nos quais a precisão é um dos fatores decisivos do desempenho, deve ser acompanhada de precauções técnicas quanto à:

- Tolerância do valor nominal e à sua estabilidade, em função das condições de armazenamento e de funcionamento (por exemplo, as resistências mais estáveis são as de fio bobinado, as de película fina metálica, de carvão e as aglomeradas);
- Potência máxima dissipável ao coeficiente de temperatura;
- Tensão máxima aos terminais ao ruído de fundo;
- Faixa de freqüências recomendada, fora da qual se tornam significativas às capacitâncias e as indutâncias parasitas associadas, sejam ao corpo ou aos terminais de acesso;
- Linearidade.

2.1.5 Redutor de Velocidade

O motor de corrente contínua foi acoplado ao redutor de velocidade doado pela Geremia Redutores LTDA, mostrado na figura 2.20, composto por conjunto de coroa e parafuso com rosca sem-fim acondicionado em uma carcaça com sistema de lubrificação, destinado a reduzir a velocidade e aumentar o torque. (Geremia Redutores LTDA, 2004).



Figura 2.20: Redutor de Velocidade

2.1.5.1 Seleção do Redutor de Velocidade

Para fazer a escolha correta de qual redutor se ajustaria melhor ao regime de trabalho do motor em função da carga acoplada ao redutor, houve a necessidade de examinar se aquele redutor estaria submetido a cargas alternadas, com arranques e paradas freqüentes durante o período de trabalho. O fator de serviço f_{su} considera todas essas condições:

$$f_{su} = C_d \times C_f \tag{2.4}$$

sendo que:

 C_d – coeficiente para determinação do fator de serviço em função do empenho do redutor durante o dia e em função da carga gerada pela máquina utilizada (tabela 2.3).

 C_f – coeficiente para a determinação do fator de serviço F_s em função do número de intervenções horárias em relação ao tipo de carga empregada pela máquina utilizada (tabela 2.4). f_{su} – fator de serviço utilizado.

Os valores indicados nas tabelas valem para empenho do redutor durante oito horas diárias e com carga uniforme. (Geremia Redutores LTDA, 2004).

Coeficiente Cd							
Tipo de Carga	Horas diárias de trabalho						
npo de curgu	2	4	8	16	24		
Uniforme	0,75	0,9	1	1,25	1,5		
Moderada	1	1,12	1,25	1,5	1,75		
Pesada	1,25	1,5	1,75	2	2,5		

Tabela 2.3: Coeficiente Cd

Coeficiente Cf									
Tipo de Carga	Número de arranque horário								
npo uo cungu	10	20	30	60	120	240			
Uniforme	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,4			
Moderada	1,15	1,2	1,25	1,3	1,4	1,5			
Pesada	1,2	1,25	1,3	1,35	1,45	1,55			

Tabela 2.4: Coeficiente Cf

Um sistema de transmissão com roda dentada e rosca sem-fim, como o mostrado na figura 2.22, pode ter atritos estático e viscoso consideráveis. O rendimento típico é da ordem de 50 a 80 %, para as relações de transmissão entre 20 e 200, respectivamente. Este tipo de transmissão normalmente não é reversível, de forma que a motorização é feita somente no eixo da rosca sem-fim. Para uma rotação da roda dentada, a rosca sem-fim gira Z rotações, onde Z representa o número de dentes da roda dentada. A relação de transmissão é dada por :

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = Z \tag{2.5}$$



Figura 2.21: Sistema de transmissão com roda dentada e rosca sem-fim

2.1.6 Estator

Para tornar possível a transferência do sinal elétrico do potenciômetro até a base do robô, foi disposto um estator, cujos detalhes construtivos podem ser verificados abaixo como mostram as figuras 2.22 (a), 2.22 (b) e 2.22 (c).





(b)



Figura 2.22: Detalhes construtivos do sistema estator acoplado entre o Redutor e o Link 1



Figura 2.23: Detalhes dimensionais anéis, base do estator e acoplamento entre o redutor de velocidade e o link

Cujas dimensões estão demonstradas na tabela 2.5.

	Anel de Latão			Cilindro de PVC			Acoplamento				
	Α	B	С	D	Ε	F	G	Н	Ι	J	K
Dimensão (mm)	r25,05	16	4	6	r26,05	34	r30,05	r25,05	65	r20	r10

Tabela 2.5: Dimensão das peças relacionadas à figura 2.23

2.1.7 Motor de Corrente Contínua

2.1.7.1 Princípio de Funcionamento

Um ímã permanente tem os pólos norte-sul definidos. Um eletroímã também possui estes pólos, porém a característica de cada pólo (norte ou sul) depende do sentido da corrente elétrica. Quando se altera o sentido da corrente, a posição dos pólos também se altera; do norte para o sul e de sul para norte.



Figura 2.24: Estrutura elétrica do motor.

Um dos eletroímas de um motor tem posição fixa e está ligado à armação externa do motor sendo denominado *campo magnético*. O outro eletroímã está colocado no eixo de rotação e tem o nome de *armadura*. Quando se liga o motor, a corrente chega à bobina do campo, determinando os pólos norte e sul. Há, também, o fornecimento de corrente ao ímã da armadura, o que determina a situação norte ou sul dos seus pólos. Os pólos opostos dos dois eletroímãs se atraem, como acontece nos ímãs permanentes. O ímã da armadura, tendo movimento livre, gira com a finalidade de que seu pólo norte se aproxime do pólo sul do ímã do campo e seu pólo sul do pólo norte do outro. Se nada mais acontecesse, o motor pararia completamente. Um pouco antes de se encontrarem os pólos opostos, a corrente é invertida no eletroímã da armadura com o uso de um comutador, invertendo assim, a posição de seus pólos; o norte passa a ser o que está próximo ao norte do campo e o sul passa a ser o que está próximo ao sul do campo. Eles então se repelem e o motor continua em movimento. Esse é o princípio de funcionamento do motor de corrente contínua. (Kosow, 1993; Fitzgerald, 1990).



Figura 2.25: Estrutura mecânica do motor de corrente contínua

Para acionar a articulação ativa do robô foi utilizado motor de corrente contínua ilustrado na figura 2.26, o qual não tinha as características elétricas.

Os parâmetros elétricos e mecânicos deste acionador foram obtidos experimentalmente como descrito nas seções subseqüentes.



Figura 2.26: Foto e detalhe dimensional do motor utilizado no protótipo

Cujas dimensões estão demonstradas na tabela 2.6.

	Motor				
	A B C D				
Dimensão (mm)	135,5	34,5	r6,25	r39,5	

Tabela 2.6: Dimensão da peça relacionada à figura 2.26

2.1.7.2 Determinação das características elétricas do motor de corrente contínua

Para a determinação das características elétricas do motor de corrente contínua utilizado no manipulador robótico foram utilizados:

- Fonte de tensão CC variável (0 110Vcc);
- Voltímetro;
- Amperímetro;

- Gerador;
- Motor de corrente contínua;
- Variac;
- Aparelho de luz estroboscópica;
- Tacômetro digital;
- Borneiras e cabos para conexão elétrica, ilustrados nas figuras 2.29 e 2.30.

O objetivo do experimento da determinação das características do motor de corrente contínua, foi obter aproximadamente a tensão $V(V_{cc})$ e a corrente I(A) máxima suportada pelo motor de corrente contínua por não ter nenhuma característica do mesmo. Com esses dados, foram gerados os gráficos: Velocidade v(rad/s) x Corrente Elétrica I(A); velocidade v(rad/s) x Torque T(N.m) e torque T(N.m) x Corrente Elétrica I(A).

Através da coleta da corrente elétrica, tensão e velocidade, o torque e a potência do motor de corrente contínua foram calculados:

$$T = \frac{V \cdot I}{v} \tag{2.6}$$

onde,

- T Torque (N m);
- V Tensão (V);
- I Corrente Elétrica (A);
- v Velocidade (rpm).

Para início da análise do motor de corrente contínua na obtenção das características elétricas, primeiramente foi projetada base de madeira com a finalidade de fixar e nivelar o eixo do motor e gerador, conforme mostrado na figura 2.28. Com o intuito dos eixos não estarem exatamente alinhados, foi projetado acoplamento modular para que não houvesse tal problema como mostra a figura 2.27.



Figura 2.27: Acoplamento modular

Cujas dimensões estão demonstradas na tabela 2.7.

	Peças - Acoplamento					
	Α	В	С	D	Е	F
Dimensão (mm)	25	15	5	r10	r6,3	r7,05

Tabela 2.7: Dimensão da peça relacionada à figura 2.27





Figura 2.28: Base de madeira (Motor C.C. e Gerador)



Figura 2.29: Variac, Gerador, Motor



Figura 2.30: Ligação dos cabos para início da análise

I(A)	V(V)	v(rpm)	T (N.m)	P(W)
0,60	25	1333	0,1075	15
0,71	25	1329	0,0994	14
0,82	25	1326	0,1476	20,5
1,10	25	1259	0,2086	27,5
1,40	25	1193	0,2802	35
1,72	25	1176	0,3492	43
1,91	25	1105	0,4127	47,75
2,20	25	1044	0,5031	55





Figura 2.31: Curvas características com tensão constante de 25 Vcc

Tabela 2.9:	Tabela 2.9: Características do motor com alimentação de 50Vcc									
I(A)	V(V)	v(rpm)	T (N.m)	P(W)						
0,690	50	2674	0,1232	34,50						
1,150	50	2584	0,2125	57,50						
1,500	50	2538	0,2822	75,00						
2,000	50	2501	0,3818	100,00						
2,510	50	2385	0,5025	125,50						
3,010	50	2364	0,6079	150,50						







Figura 2.32: Curvas características com tensão constante de 50 Vcc

Tabela 2.1	Tabela 2.10: Características do motor com alimentação de 100Vcc								
I(A)	V(V)	v(rpm)	T (N.m)	P(W)					
1,050	100	5635	0,1779	105					
1,450	100	5414	0,2558	145					
2,200	100	5270	0,3986	220					
3,210	100	5121	0,5986	321					
4,100	100	5097	0,7681	410					







Figura 2.33: Curvas características com tensão constante de 100 Vcc

2.1.8 Sistema modular QBX ultracompacto

Este sistema da National Instruments Corporation ainda não foi lançado no mercado por estar em fase de testes. Nós tivemos o privilégio de testá-lo e comprovar sua eficiência. A figura 2.34, mostra o QBX e sua disposição na bancada experimental.





Figura 2.34: Sistema modular QBX inserido ao manipulador

Características:

- Placas de 4cm x 4cm empilháveis;
- Processador 32 bits;
- Memória RAM 256KB interna;
- 2MB memória flash;
- Software LabVIEW *Embedded* incluído;
- Contador / temporizador 16 bits;
- Freqüência de clock controlada por software 68MHz;
- Comunicação Bluetooth, classe 2, interface UART;
- Comunicação Serial RS-232 (2 portas);
- Módulo de alimentação por bateria recarregável ou Fonte AC.

Módulos I/O:

- 4 Entradas Analógicas Single-ended ou 2 Diferenciais com 14 bits de resolução, range + ou -2,4V, ganhos 1 a 20, 10kS/s, 2000 amostras FIFO;
- 2 Saídas analógicas com 16 bits de resolução, + ou -2,4V;
- 4 Linhas de entradas e saídas digitais 3,3V CMOS.

2.2 Primeira bancada experimental

A primeira bancada experimental desenvolvida no laboratório é constituída de um motor elétrico de corrente contínua acoplado a redutor de velocidade, link's e para medida de posição são utilizados dois sensores do tipo encoder angular, conforme mostra a figura 2.35.



Figura 2.35: Primeira bancada experimental e seus componentes

Como a junta ativa tem movimento constante, a utilização do encoder na junta passiva não seria apropriada devido o uso de um cabo para a transferência do sinal. Este cabo prejudicaria o movimento da junta passiva por causa de seu peso.

2.3 Segunda bancada experimental

Para eliminar o problema da primeira bancada, foi implementado um estator na junta ativa e no lugar do encoder na junta passiva foi colocado um potenciômetro, como mostra a figura 2.36. A utilização do estator verificou a presença de ruído, como é apresentado no capítulo 4.



Figura 2.36: Segunda bancada experimental e seus componentes

A figura 2.37 mostra o conector e a placa de aquisição para transferência do sinal analógico do transdutor.



Figura 2.37: Conector para transferência do sinal e placa de aquisição *LabView*

A ligação do transdutor no conector das entradas analógicas é:

- GND = Borne 33 ou 1 ou 2;
- Entrada Analógica 1 = Borne 5; ou Entrada Analógica 2 = Borne 7.

2.4 Terceira bancada experimental

Para a conclusão da montagem, foi utilizado o sistema QBX para aquisição do sinal, eliminando os problemas citados nas seções 2.2 e 2.2.1. Na figura 2.38 mostra a bancada final.



Figura 2.38: Terceira bancada experimental e seus componentes

Capítulo 3

3 Implementação Experimental - Software

Para a implementação da análise da junta passiva e do processo de aquisição de sinal do transdutor, foi desenvolvida interface em linguagem orientada a fluxo de informações em ambiente LabView[®]. Abaixo são apresentados os diagramas de programação do software utilizado com cada passo do procedimento para a elaboração da aquisição do sinal no transdutor e complementando o significado de cada bloco utilizado, que é apresentado no apêndice A.

3.1 Painel frontal e do diagrama de bloco

Nesta seção, será apresentada a janela do painel frontal e do diagrama de blocos desenvolvidos para a aquisição dos sinais no manipulador robótico construído e mostrado no capítulo 2.

As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 mostram o painel frontal do *software* LabView[®], que consiste em uma janela apresentada na tela do monitor, na qual são desenhados ícones com formatos que lembram os componentes de um painel de instrumento (botões, chaves, indicadores, gráficos, etc). Esses componentes estão associados a variáveis e parâmetros, cujos valores são medidos ou ajustados. O diagrama de blocos apresentado nas figura 3.4, 3.5 e 3.6 representa graficamente os processos aos quais são submetidos as variáveis e parâmetros apresentados no painel frontal.



Figura 3.1: Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) – Painel Frontal

- 1 Botão para sair da programação;
- 2 Título do objeto;
- 3 Botão para zerar e inicio de aquisição;
- 4 Display indicador da variação do ângulo e número de voltas;
- 5 Controle numérico;
- 6 Indicador do tempo decorrido e ponto atual;
- 7 Display indicador de posição.



Figura 3.2: Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) – Painel Frontal

- 8 Título do objeto;
- 9 Gráfico XY (Velocidade X Tempo);
- 10 Gráfico XY (Deslocamento X Tempo).



Figura 3.3: Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) - Painel Frontal

- 11 Título do objeto;
- 12 Gráfico XY (Velocidade X Deslocamento).

A disponibilidade da interface gráfica permitiu a apresentação da informação em uma forma mais ergonômica, isto é, segundo arranjo visual adequado à tarefa que se pretende realizar. Desta forma, em vez de usar somente o teclado, a captura das entradas do usuário (comandos, ações, ajuste de parâmetros) foram feitas de modo mais natural, usando o apontador do *mouse* em um ícone (por exemplo, desenhado com o aspecto de um botão ou chave). Além disso, as conexões podem ser apresentadas entre os diversos equipamentos que compõem o experimento, através do diagrama de blocos. Com esses ingredientes, a interface conceitual do computador pode prover o instrumento virtual com os mesmos componentes funcionais encontrados nos painéis frontais e painéis de conexões dos instrumentos.



Figura 3.4: Diagrama de blocos – Tela 1

- 1 Estrutura de seqüência;
- 2 Terminal de controle numérico digital;
- 3 Dispositivo;
- 4 e 26 Taxa da amostra;
- 5 Constante de transformação;
- 6 Tempo entre pontos (ms);
- 7 Via de ligação de dados;
- 8 Wait Until Next ms Multiple;
- 9 Função de subtração;
- 10 Função de multiplicação;
- 11 Constante de transformação;

- 12 Função de divisão;
- 13 Via de ligação de dados;
- 14 Terminal indicador de posição;
- 15 Constante numérica;
- 16 Função de divisão;
- 17 Função de derivação;
- 18, 21 e 23 Função de agrupamento;
- 19, 20 e 22 Terminal gráfico XY;
- 24 Número de amostragem;
- 25 Atalho para sair do programa;
- 27 Controle de tabulação.



Figura 3.5: Diagrama de blocos - Tela 1 continuação

- 28 Porta serial;
- 29 Função Bluetooth;
- 30 Wait Until Next ms Multiple;
- 31 Atalho para sair do programa.



Figura 3.6: Diagrama de blocos – Tela 2

- 32 Número do dispositivo atribuído à configuração;
- 33 Canal (0) da entrada análoga a medir;
- 34 Número de amostras do canal;
- 35 Taxa de amostra;
- 36 Função de entrada analógica;
- 37 Função da média entre pontos.



Figura 3.7: Diagrama de blocos - Fluxograma de funcionamento 1



Figura 3.8: Diagrama de blocos - Fluxograma de funcionamento 2

As figuras 3.7 e 3.8 apresentam o fluxograma de funcionamento da interface programada para o objetivo deste trabalho que foi implementado no software $LabVIEW^{\mathbb{R}}$. Os elementos que compõem cada diagrama e cada painel estão descritos neste capítulo 3 e no apêndice A.

Capítulo 4

4 Resultados e Análise Experimental

Neste capítulo é descrita a validação experimental desenvolvida em laboratório no Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, utilizando para tal o manipulador robótico descrito nas sessões anteriores.

A partir da interface computacional desenvolvida, foram executadas experiências para verificar a análise da velocidade, deslocamento e plano de fase da junta passiva do manipulador robótico.

4.1 Método de ensaio

Concretizado a montagem do protótipo, foram implementados os ensaios, dos quais foram obtidos os gráficos de deslocamento, velocidade e plano de fase. As características do motor utilizadas para análise foram: Tensão 5Vcc, Velocidade 27rad/s, Torque 0,05N.m, Freqüência 4Hz.

Inicialmente, pelo efeito do atrito das escovas com o estator, ocorreu a presença de ruído como pode ser observado na figuras, 4.1 e 4.2.



Figura 4.1: Gráficos da Velocidade e Deslocamento sobre o tempo (com ruído)



Figura 4.2: Plano de fase (com ruído)

Como procedimento seguinte, foi girada manualmente a articulação livre eliminando a presença do estator, sendo obtidos os gráficos de deslocamento, velocidade e plano de fase mostrados nas figuras 4.3, 4.4, nos quais puderam constatar que o estator causou tal ruído.



Figura 4.3: Gráficos da Velocidade e Deslocamento sobre o tempo (sem ruído)



Figura 4.4: Plano de fase (sem ruído)

A partir da verificação da perturbação gerada pelo atrito das escovas do estator, tomou-se nova estratégia, a qual utiliza o envio de informações da articulação livre por ondas de rádio.

Para tal, foi utilizado o sistema da QBX com programação LabView[®] da National Instruments.



Figura 4.5: Gráficos da Velocidade e Deslocamento sobre o tempo



Figura 4.6: Plano de fase

A figura 4.7 demonstra o resultado obtido por Nakamura, Suzuki e Koinuma em 1995 que investigaram o comportamento não-linear do manipulador planar de livre-junção de dois graus de liberdade e de seu controle de posicionamento. Este resultado pode ser comparado com o resultado obtido neste trabalho mostrado na figura 4.6.



Figura 4.7: Resultado de Nakamura, Suzuki e Koinuma em 1995

Capítulo 5

5 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

O trabalho de instrumentação e aquisição de sinais do manipulador de livre-junção de dois graus de liberdade descrito neste trabalho apresentou muitas perturbações geradas devido as nãolinearidades inerentes ao *hardware*, principalmente com relação aos dispositivos dedicados a transdução de sinais.

Em relação aos resultados obtidos com êxito foram atingidos os objetivos iniciais que eram projeto e montagem do sistema. Existem várias modificações e melhoramentos possíveis que, certamente, tornarão o equipamento desenvolvido muito mais eficiente e preciso.

Para a continuidade deste trabalho são analisadas algumas sugestões para o aprimoramento do experimento, tais como:

- 1) Aumento do número de graus de liberdade na forma de articulações livres;
- Otimização da interface eletrônica e sensorização para que se reduza qualquer tipo de ruído em sinais experimentais colhidos, minimizando assim o problema de interpretação incorreta dos resultados;
- 3) Adicionar um link fissurado para se efetuar o estudo de fadiga mecânica no sistema;
- 4) Implementação de controle;
- 5) Estudo entre as folgas nas engrenagens (backlasch) existente no redutor de velocidade;
- 6) Adição de freio eletromagnético;
- 7) Aperfeiçoamento do encoder incremental;
- 8) Estudo das não-linearidades dos acoplamentos.
Referências Bibliográficas

- Arai, H., and Tachi, S.: "Position Control of a Manipulator with Passive Joints Using Dynamic Coupling", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, n°.4, pp. 528-534, 1991.
- Arai, H., Tani, K., and Tachi, S.: "Dynamic Control of a Manipulator with Passive Joints in Operational Space," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, pp. 85-93, 1993.
- Bushnell, L., Tilbury, D., and Sastry, S.: "Extended Goursat Normal form with Applications to Nonholonomic Motion Planning", Proc. IEEE Conference on Decision and Control, San Antonio, Texus, 1993.
- Fitzgerald, A. E.: "Electric Machinery". 5th ed. McGraw-Hill, 1990.
- Fujita, M., Kawai, H. and Murao, T.: "Passivity-based Control of Visual Feedback Systems with a Movable Camera", Proc. of the 13th International Workshop on Dynamics & Control, pp. 103-110, Wiesensteig, Germany, May 2005.
- Fujita, M., Kawai, H., and Spong, M. W.: "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L2 - again Performance Analysis", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 1, n°. 11, November 2002.

Geremia Redutores LTDA, Bento Gonçalves, RS. Catálogo de Redutores de Velocidade. 2004.

- Kosow, Irving. L.: "Máquinas Elétricas e Transformadores", São Paulo, ed. Globo, pp. 72-139, 1993.
- Lafferriece, G., and Sussmann, H. J.: "A differencial Geometric Approach to Motion Planning, in Nonholonomic Motion Planning", (Z. X. Li and J. F. Canny, eds.), pp. 235-270, 1993.
- Laumond, J. P.: "Feasible Trajectories for Mobile Robots with Kinematic and Environment Constraints, in Intelligent Autonomous Systems", (O. L. Hertzberger, and F.C.A. Groen, eds), pp.346-354, 1987.
- Lenci, S., and Rega G.: "Controlling Nonlinear Dynamics in a Two-Well Impact System: II. Attractors and Bifurcation Scenario under Unsymmetric Optimal Excitations", International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 8, n°. 12, pp. 2409-2424, 1998.
- Nakamura, Y., and Iwamoto, R.: "Space Multibody Structure Connected with Free Joints and its Shape Control", Proc. of 32th CDC, pp. 3126-3131, 1993.
- Nakamura, Y., Suzuki, T., and Koinuma, M.: "Nonlinear Behavior and Control of Underactuated Robotic Mechanisms", Proc. Of the 7th International Symposium of Robotics Research, Munich, Germany, 1995.
- National Instruments Corporation. LabView[®]: "Tutorial Manual", Part Number 320998A-01, version of software 6.0, January1996 Edition.
- Oriolo, G., and Nakamura, Y.: "Control of Mechanical Systems with Second-order Nonholonomic Constraints: Underactuated Manipulators," 30th IEEE Conf. on Decision and Control, Brighton, UK, pp. 2398-2403, 1991.
- Sreenath, N.: "Nonlinear Control of Multibody Systems in Shape Space", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1776-1781, Cinncinati, OH, 1990.

- Suzuki, T.: "Analysis and Control Nonholonomic Systems under Dynamical Constrains", Tokyo: Graduate School the University of Tokyo, 1997, 179p. Doctor Engineering.
- Thomazini, D., Albuquerque, P. U. B.: "Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações", São Paulo: Érica, 2005.
- Trendafilova, and H. Van Brussel.: "Non-linear Dynamics Tools for the Motion Analysis and Condition Monitoring of Robot Joints", Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 15, Issue 6, pp. 1141-1164, November 2001.
- Wichlund, K., Sordalen and Egeland O.: "Control Properties of Underactuated Vehicles", Proc. of ICRA 95, pp. 2009-2014, 1995.
- Weidemann, D.; Scherm, N.; Heimann, B.: "Discrete-Time Control of underactuated Manipulators", 13th International Workshop on Dynamics & Control, Dailmler Chrysler Training Center, Wiesensteig, Germany, pp. 133-140, 2005.

Apêndice A - LabView

Para melhor entendimento do procedimento de programação descrito no capítulo 3, será apresentada nas seções abaixo a descrição da linguagem utilizada.

A.1 Introdução ao *LabVIEW*

O *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) utiliza uma linguagem de programação chamada G. Essa linguagem possui diretivas, como PASCAL e C, porém ao invés de utilizar comandos na forma de texto para gerar as linhas de código, usa uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de um diagrama de blocos.

Por utilizar uma estrutura de programação orientada pelo fluxo de dados e hierárquica, o *LabVIEW* torna simples a implementação de sistemas complexos que englobam aquisição e manipulação de dados, ou ainda o controle de equipamentos através do computador. Além disso, o *LabVIEW* inclui diversas bibliotecas compostas por componentes, contendo funções para aplicações específicas (algoritmos de análise estatística, processamento e geração de sinais, etc.). (LabView[®], 1996).

A.2.1 Instrumentos virtuais

Qualquer programa feito em *LabVIEW* é chamado de instrumento virtual (VI - virtual *instrument*) já que sua aparência e operação assemelham-se às de instrumentos reais. Um VI, assim como um programa usual, é composto por um conjunto de instruções que fazem a

manipulação e fluxo dos dados, e por uma interface com o usuário, é possível encontrar as entradas e saídas necessárias. Basicamente, pode-se identificar em um *VI* duas partes que o compõem:

• *Diagrama de blocos* – é a estrutura do programa propriamente dita que contém o código fonte construído de forma gráfica;

• *Painel frontal* – constitui a interface com o usuário, apresentando de forma visual todos os controles, gráficos e indicadores que formam uma tela, que simula o painel físico de um instrumento. Este pode ser formado por botões, *leds, knobs* e indicadores que permitem a interação através do *mouse* ou do teclado do computador.

Pode-se ainda encapsular um *VI* inteiro (isto é, diagrama de blocos + painel frontal) em um módulo re-utilizável dentro de um outro *VI*. Esse módulo encapsulado constituirá um *subVI*. Assim sendo, podemos incluir um terceiro ingrediente componente de um VI genérico:

• *Ícone / conector* – define as entradas e saídas do *VI* acessíveis à conexão quando este é utilizado como um *subVI* dentro de um outro *VI* (é análogo às definições de entrada e saída para se usar uma rotina como função dentro de um programa numa linguagem convencional). O ícone é a definição da aparência gráfica que se deseja que este *VI* tenha no diagrama de blocos quando usado como um *subVI*.



Figura A.1: Painel Frontal e Diagrama de Blocos

Na parte superior do painel frontal há uma barra de ferramentas como descrita a seguir:

よる (Market State) 13pt Application Font	
	11

onde,

수 장

Roda o VI, uma vez.

Roda o *VI*, continuadamente, isto é, quando chega ao final, volta novamente ao início e recomeça.



Aborta a execução do VI.



Pausa / Continua a execução do VI.



Ícone / Conector.

A.2.2 Paleta de ferramentas

Para editar, operar ou construir um VI são usadas várias ferramentas. Desta forma, o conhecimento e compreensão dessas ferramentas e sua utilização são essenciais para usar o *LabVIEW*.



Figura A.2: Paleta de Ferramentas

Descrição das ferramentas principais:

Permite a operação dos controles e botões no painel frontal (*Operation Tool*).

Posiciona, formata e seleciona objetos (Position Tool).



*

4

Edita textos e cria rótulos (Text Tool).

Conecta objetos no diagrama de blocos (Wiring Tool).

A.2.3 Paleta de função e controle

As paletas de função e controle contém sub-paletas de objetos que podem ser utilizadas para criar um *VI*. A paleta de função serve para montar o diagrama de bloco enquanto a paleta de controle para indicar indicadores e controles.



Figura A.3: Paleta de controle e função

A.2.4 Controles e indicadores

No painel frontal as entradas e saídas do *VI* são representadas respectivamente por controles e indicadores, que visualmente podem ser apresentados seja como *knobs*, botões, indicadores digitais, *leds*, ou ainda sob vários outros formatos e tipos.

A.2.5 Estruturas e Gráficos

Assim como em outras linguagens nos programas contém laços, no *LabVIEW* há determinadas estruturas que representam graficamente laços, como o *for* e o *while* no diagrama de blocos. Além disso, é possível usar estruturas de decisão, como o *case* ou ainda estruturas específicas do *LabVIEW*, como o *sequence* e o *formula node*.

Quando se faz necessário que os dados gerados por um *VI* sejam apresentados através de um gráfico, não é preciso dar comandos especiais ou fazer uma rotina só para isso, como em linguagens convencionais. No *LabVIEW* já existe uma função implementada apenas para gerar um gráfico, que pode ser formatado de acordo com o padrão que se deseja obter.

A.2.6 Componentes utilizados na programação

A.2.6.1 Ligações

Transfere dados entre objetos do diagrama de bloco através de ligações. São semelhantes a variáveis em linguagens de programação baseadas em texto. Cada ligação tem uma única fonte de dados, mas podem ser ligadas a vários *VI's* e funções que fazem a leitura dos dados. As ligações são de cores, estilos e espessuras diferentes, dependendo de seus tipos de dados. A tabela A.1 apresenta os tipos mais comuns de ligações.

Tipo de Ligação	Escalar	Arranjo 1D	Arranjo 2D	Cor
Numérico				Laranja (ponto flutuante),
				Azul (inteiro)
Booleano	•••••	******	200000000000000000000000000000000000000	Verde
String	www.www.www.www.www.www.www.www.www.ww	-0000000000	RARRARAR	Rosa

Tabela A.1: Tipos de ligação

A.2.6.2 Bloco - Wait until next ms multiple

Esta função sincroniza atividades. É possível chamar esta função em um laço para controlar a taxa da execução. Esta função faz chamadas assíncronas do sistema, mas os seus nós funcionam sincronizadamente. Conseqüentemente, a execução não termina até que o tempo especificado decorra.



Figura A.4: Bloco de sincronismo

múltiplos de mili-segundos - entrada que especifica quantos mili-segundos decorrem quando os funcionamentos do *VI*.

valor do tempo em mili-segundo - retorna o valor do temporizador em mili-segundo.

A.2.6.3 Bloco - Mean

Computa a média (μ) dos valores na seqüência de entrada X.



Figura A.5: Bloco de Média

X - seqüências de entrada.

média - média dos valores na seqüência de entrada *X*.

erro - retorna todo o erro ou circunstância de advertência do *VI*.

Detalhe da média

Este VI usa a seguinte fórmula:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \tag{A.1}$$

onde n é o número dos elementos em X.

A.2.6.4 Bloco Bundle

Utilizada para montar um conjunto dos elementos individuais. Pode ser utilizada para mudar os valores de elementos individuais em um conjunto já existente sem ter que especificar novos valores para todos os elementos. A placa do conector indica os tipos de dados.



Figura A.6: Bloco para agrupamento

cluster - conjunto cujo valor queira mudar. O número de terminais da entrada deve combinar com o número dos elementos no conjunto da entrada.

element 1..n - aceita qualquer tipo de dados.

output cluster - resultado do conjunto.

A.2.6.5 Estrutura de seqüência

Consiste em um ou mais sub-diagramas, ou molduras, que executam seqüencialmente. Um clique a direita da estrutura é utilizado para adicionar e suprimir molduras, ou para criar local de seqüência com objetivo de passar dados entre as molduras.

₽ <u>40[0n]</u> ▼ ▶₽	
; <u></u> ;	

Figura A.7: Estrutura seqüencial

A.2.6.6 Bloco divisor

Computa o quociente das entradas.



Figura A.8: Bloco divisor

x - podem ser um número, uma disposição ou um conjunto escalar dos números, disposição dos conjuntos dos números, e assim por diante.

y – podem ser um número, uma disposição ou um conjunto escalar dos números, disposição dos conjuntos dos números, e assim por diante.

x / y - número de dupla precisão como ponto flutuante se x e y forem inteiros. No general, o tipo da saída é a representação larga das entradas, se as entradas não forem inteiros ou se suas representações diferirem.

A.2.6.7 Bloco de entrada analógica para aquisição da forma de onda

Adquire um número especificado das amostras em uma taxa especificada de um único canal da entrada e retorna os dados adquiridos. A entrada analógica adquire uma forma de onda o *VI* executa uma medida programada de uma forma de onda (leituras múltiplas da tensão em uma taxa especificada) em um único canal da entrada análoga. Se ocorrer um erro, uma caixa de diálogo aparece, dando lhe a opção para parar o *VI* ou para continuar.



Figura A.9: Bloco de aquisição de gráfico

dispositivo - número do dispositivo atribuído à configuração.

canal - identifica o canal da entrada análoga a medir.

número de amostras - número de amostras do canal que o *VI* adquirem antes que a aquisição termine. Para este parâmetro - 1000 amostras.

taxa de amostras - número pedido das amostras por segundo onde o *VI* adquire do canal especificado. Para este parâmetro - taxa de 1000 amostras /segundo.

limite elevado - nível previsto mais elevado dos sinais que queira medir. A entrada é θ . Se incorporar θ , o sistema usa os limites incorporados ao máximo, ou se estiver usando nome no canal, seleciona os limites para configuração do canal. Expressa o valor limite nas unidades de leituras. Este valor computa o ganho.

limite baixo - nível previsto mais baixo dos sinais que queira medir. A entrada é 0. Se incorporar 0, o sistema usa os limites incorporados ao máximo, ou se você estiver usando nome no canal, seleciona os limites para configuração do canal. Expressa o valor de limite nas unidades de leituras. Este valor computa o ganho.

forma de onda - contém dados de entrada análoga escalados.

período real da amostra - intervalo real entre amostras, que é o inverso da taxa real da amostra. O período real da amostra pode diferir da taxa pedida da amostra, dependendo das potencialidades de sua unidade física.

A.2.6.8 Bloco For Loop

Executa seus tempos do sub-diagrama *n*, onde *n* é o valor ligado ao terminal da contagem (*N*). O terminal da iteração (*i*) fornece a contagem da iteração do laço atual, que varia de *0* a *n*-1.

N	
<u> </u>	

Figura A.10: Bloco for loop

A.2.6.9 Bloco derivativo

Executa uma diferenciação discreta do sinal de amostra X.



Figura A.11: Bloco derivativo

- (X e o sinal de amostra.
- **condição inicial** descrito pela equação abaixo nesta seção.
- **condição final** descrito pela equação abaixo nesta seção.
- **dt** é o intervalo de amostragem e deve ser maior que zero.
- **\mathbf{M} dX/dt** é a derivada do sinal de entrada.
- *erro* returns any error or warning from the VI.

Detalhes da derivação x(t)

A diferenciação f(t) de uma função F(t) é definida como:

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t).$$
(A.2)

Permitir que Y represente a amostra de saída da seqüência d / dt X. A execução discreta é dada por

$$y_i = \frac{1}{2dt} (x_{i+1} - x_{i-1}).$$
(A.3)

para i = 0, 1, 2, ..., n-1, quando n é o número de amostra em x(t),

x - 1 é especificado pela condição inicial quando i = 0, e x_n é especificado pela condição final quando i = n-1.

A condição inicial e a condição final minimizam o erro nos limites.

Apêndice B

Neste apêndice é relatada breve introdução sobre o a dinâmica de manipuladores planares de duas articulações, onde a primeira articulação é atuada e a segunda articulação é livre.

B.1 - Dinâmica de manipuladores robóticos de dois graus de liberdade

O tipo mais simples de manipulador com articulação livre, é o manipulador planar de duas articulações descrito na figura B.1, na qual a primeira junta é atuada e a segunda junção livre. Este sistema robótico apresenta seu espaço de trabalho no plano horizontal.



Figura B.1: Manipulador robótico com dois elos rígidos e juntas rotativas

Onde:

- m massa (kg); θ – posição (rad); I – momento de inércia (kg.m²); l – distância entre os eixos (m);
- s distância entre o eixo e o centro de gravidade (m).

Para obter as equações dinâmicas de um robô manipulador com n graus de liberdade podese utilizar o Lagrangeano (L).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial q} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = T \qquad \qquad L = K - V \qquad (B.1)$$

onde:

- K é a energia cinética,
- V é a energia potencial,
- *T* é a força generalizada,
- q é a coordenada generalizada.

Seja I_1 momento de inércia do membro *i* em torno de um eixo perpendicular ao plano *xy* e passando pelo centro de massa do membro *i*. Tendo em conta que estamos usando as variáveis das juntas como coordenadas generalizadas. Inicialmente,

$$V_{c1} = J_{V_{c1}} \theta \tag{B.2}$$

onde

$$J_{V_{c1}} = \begin{bmatrix} -l_{c1} sen\theta & 0\\ -l_{c1} \cos\theta & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(B.3)

Analogamente,

$$V_{c2} = J_{V_{c2}} \dot{\theta} \tag{B.4}$$

onde

$$J_{V_{c2}} = \begin{bmatrix} -l_1 sen \theta_1 - l_{c2} sen(\theta_1 + \theta_2) & -l_{c2} sen(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 sen \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(B.5)

Portanto, a parcela translacional da energia cinética é dada por

$$\frac{1}{2}m_1V_{c1}^{T} + \frac{1}{2}m_2V_{c2}^{T}V_{c2} = \frac{1}{2}\dot{\theta}\left\{m_1J_{V_{c1}}^{T}J_{V_{c1}} + m_2J_{V_{c2}}^{T}J_{V_{c2}}\right\}\dot{\theta}$$
(B.6)

A seguir, serão tratados os termos da velocidade angular. Devido à simplicidade deste manipulador, muitas das dificuldades não aparecem. Em relação ao sistema inercial, tem-se

$$W_1 = \theta_1 K$$

$$W_2 = (\theta_1 + \theta_2) K$$
(B.7)

Entretanto, conforme assinalado anteriormente, é necessário exprimir essas velocidades angulares em relação aos sistemas locais. Felizmente, os eixos *z* estão todos paralelos nesse caso, de modo que a expressão acima é também válida em relação aos sistemas locais. Além disso, como W_i está alinhado com *k*, o triplo produto W_i^T s₁ W_i reduz-se simplesmente a $(I_{33})_i$

multiplicado pelo quadrado do módulo da velocidade angular. A quantidade $(I_{33})_i$ é, na verdade, o que foi chamado acima de I_i . Portanto, a energia cinética de rotação do sistema total é

$$\frac{1}{2} \overset{\cdot}{\theta}^{T} \left\{ s_{1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + s_{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right\} \overset{\cdot}{\theta}$$
(B.8)

Está tudo pronto para a montagem da matriz de inércia $D(\theta)$. Para tanto, tem-se apenas que adicionar as duas matrizes dadas nas equações. B.6 e B.8, respectivamente. Assim:

$$D(\theta) = m_1 J_{V_{c1}}^T J_{V_{c1}} + m_2 J_{V_{c2}}^T J_{V_{c2}} \begin{bmatrix} s_1 + s_2 & s_2 \\ s_2 & s_2 \end{bmatrix}$$
(B.9)

Executando a multiplicação acima e usando relações trigonométricas elementares, chega-se a

$$d_{11} = m_1 s_1^2 + m_2 (l_1^2 + s_2^2 + 2l_1 s_2 \cos \theta_2) + I_1 + I_2$$

$$d_{12} = d_{21} = m_2 (s_2^2 + 2l_1 s_2 \cos \theta_2) + I_2$$

$$d_{22} = m_2 s_2^2 + I_2$$
(B.10)

Pode-se, agora, calcular os símbolos de *Christoffel* usando a definição $c_{ijk} := \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial d_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial d_j} + \frac{\partial d_{ij}}{\partial d_k} \right\}, \text{ obtendo}$

$$c_{111} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_{11}}{\partial \theta_1} = 0$$

$$c_{121} = c_{211} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_{11}}{\partial \theta_2} = -m_2 l_1 s_2 sen \theta_2 =: h$$

$$c_{221} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_{12}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{22}}{\partial \theta_1} = h$$

$$c_{112} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_{21}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{11}}{\partial \theta_2} = -h$$

$$(B.11)$$

$$c_{122} = c_{212} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_{22}}{\partial \theta_1} = 0$$

$$c_{222} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_{22}}{\partial \theta_2} = 0$$

A energia potencial do manipulador é dada pela soma das energias potenciais dos dois membros, logo:

$$V_{1} = m_{1}gs_{1}sen\theta_{1}$$

$$V_{2} = m_{2}g(l_{1}sen\theta_{1} + s_{2}sen(\theta_{1} + \theta_{2}))$$

$$V = V_{1} + V_{2} = (m_{1}s_{1} + m_{2}l_{1})gsen\theta_{1} + m_{2}s_{2}gsen(\theta_{1} + \theta_{2})$$
(B.12)

Portanto, as funções ϕ_k definidas em $\phi_k = \frac{\partial V}{\partial \theta_k}$ tornam-se

$$\phi_{1} = \frac{\partial V}{\partial \theta_{1}} = (m_{1}s_{1} + m_{2}s_{2})g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos(\theta_{1} + \theta_{2})$$

$$\phi_{2} = \frac{\partial V}{\partial \theta_{2}} = m_{2}s_{2}\cos(\theta_{1} + \theta_{2})$$
(B.13)

Finalmente, pode-se escrever as equações dinâmicas como em

$$\sum_{i} \theta_{kj}(\theta) \ddot{\theta}_{j} + \sum_{ij} c_{ijk}(\theta) \dot{\theta}_{i} \dot{\theta}_{j} + \phi_{k}(\theta) = \tau_{k}, \ k = 1, ..., n$$
(B.14)

Na equação (B.14) existem três tipos de termos:

(1) termos envolvendo as segundas derivadas das coordenadas generalizadas;

(2) termos quadráticos das primeiras derivadas de θ , onde os coeficientes podem depender de θ , os quais podem ser classificados em:

(2.1) termos centrífugos: envolvem produtos do tipo θ_i^2

(2.2) termos de Coriolis: envolvem um produto do tipo $\theta_i \theta_j$ onde $i \neq j$

(3) termos envolvendo somente θ mas não as suas derivadas, os quais surgem da derivação da energia potencial.

Substituindo nessa equação as várias quantidades e omitindo os termos nulos, obtemos

$$d_{11}\ddot{\theta}_{1} + d_{12}\ddot{\theta}_{2} + c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} + c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} + \phi_{1} = \tau_{1}$$

$$d_{21}\ddot{\theta}_{1} + d_{22}\ddot{\theta}_{2} + c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} + \phi_{2} = \tau_{2}$$
(B.15)

Nesse caso, a matriz $C = (\theta, \dot{\theta})$ é dada por:

$$C = \begin{bmatrix} h\dot{\theta}_2 & h\dot{\theta}_2 + h\dot{\theta}_1 \\ -h\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$
(B.16)

A equação da aceleração na junta 1 é:

$$\begin{bmatrix}
\tau_{1} - (c_{121} \dot{\theta}_{1} \dot{\theta}_{2} + c_{211} \dot{\theta}_{2} \dot{\theta}_{1} + c_{221} \dot{\theta}_{2}^{2} + \phi_{1}) & d_{12} \\
\vdots \\
\tau_{2} - (c_{112} \dot{\theta}_{1} + \phi_{2}) & d_{22}
\end{bmatrix} = \ddot{\theta}_{1}$$
(B.17)

Resolvendo a equação (B.17) tem-se,

$$\frac{d_{22}[\tau_1 - (c_{121}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + c_{211}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + c_{221}\dot{\theta}_2^2 + \phi_1)] - d_{12}[\tau_2 - (c_{112}\dot{\theta}_1^2 + \phi_2)]}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} = \ddot{\theta}_1 \quad (B.18)$$

Substituindo a equação (B.13) na equação (B.17),

$$\frac{d_{22}\{\tau_{1} - [c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} + c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} + (m_{1}s_{1} + m_{2}s_{2})g\cos\theta_{1}}{+ m_{2}s_{2}g\cos(\theta_{1} + \theta_{2})]\} - d_{12}\{\tau_{2} - [(c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} + m_{2}s_{2}\cos(\theta_{1} + \theta_{2})]\}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} = \ddot{\theta}_{1}$$
(B.19)

$$\frac{d_{22}\{\tau_{1} - [c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} + c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} + m_{1}s_{1}g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos\theta_{2}]\}}{-\frac{d_{12}\{\tau_{2} - [c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} + m_{2}s_{2}\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}\cos\theta_{2}]\}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}}} = \ddot{\theta}_{1}$$
(B.20)

$$\frac{d_{22}\tau_{1} - d_{22}c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} + d_{22}c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + d_{22}c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} + d_{22}m_{1}s_{1}g\cos\theta_{1}}{+ d_{22}m_{2}s_{2}g\cos\theta_{1} + d_{22}m_{2}s_{2}g\cos\theta_{2} - d_{12}\tau_{2}}$$

$$\frac{+ d_{12}c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} + d_{12}m_{2}s_{2}\cos\theta_{1} + d_{12}m_{2}s_{2}\cos\theta_{2}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} = \ddot{\theta}_{1}$$
(B.21)

Portanto, tem-se:

$$-\ddot{\theta}_{1} \begin{bmatrix} \cos\theta_{1}(d_{22}m_{1}s_{1}g + d_{12}m_{2}s_{2} + 2d_{22}m_{2}s_{2}g) \\ +\cos\theta_{2}(d_{22}m_{2}s_{2}g + d_{12}m_{2}s_{2}) - d_{22}c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} \\ + d_{22}c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + d_{12}c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} + d_{22}c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} \\ d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21} \end{bmatrix} = \frac{d_{12}\tau_{2} - d_{22}\tau_{1}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}}$$
(B.22)

A equação da aceleração na junta 2 é:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & \tau_1 - (c_{121} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + c_{211} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + c_{221} \dot{\theta}_2^2 + \phi_1) \\ \vdots \\ d_{21} & \tau_2 - (c_{112} \dot{\theta}_1 + \phi_2) \end{bmatrix} = \ddot{\theta}_2$$
(B.23)
$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}$$

Resolvendo a equação (B.23) tem-se,

$$\frac{d_{11}[\tau_2 - (c_{112}\dot{\theta}_1^2 + \phi_2) - d_{21}[\tau_1 - (c_{121}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + c_{211}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + c_{221}\dot{\theta}_2^2 + \phi_1)]}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} = \ddot{\theta}_2 \quad (B.24)$$

Substituindo a equação (B.13) na equação (B.24),

$$\frac{d_{11}\{\tau_2 - [c_{112}\dot{\theta}_1^2 + m_2 s_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)]\} - d_{21}\{\tau_1 - [c_{121}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2^2 + (m_1 s_1 + m_2 s_2)g\cos\theta_1 + m_2 s_2g\cos(\theta_1 + \theta_2)]\}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} = \ddot{\theta}_2 \qquad (B.25)$$

$$\frac{d_{11}\{\tau_{2} - [c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} + m_{2}s_{2}\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}\cos\theta_{2}]\}}{-d_{21}\{\tau_{1} - [c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} + c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} + m_{1}s_{1}g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos\theta_{1} + m_{2}s_{2}g\cos\theta_{2}]\}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} = \ddot{\theta}_{2}$$
(B.26)

$$\frac{d_{11}\tau_{2} - d_{11}c_{112}\dot{\theta}_{1}^{2} - d_{11}m_{2}s_{2}\cos\theta_{1} - d_{11}m_{2}s_{2}\cos\theta_{2}}{-d_{21}\tau_{1} + d_{21}c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} + d_{21}c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} + d_{21}c_{221}\dot{\theta}_{2}^{2} + d_{21}m_{1}s_{1}g\cos\theta_{1}}{\frac{+d_{21}m_{2}s_{2}g\cos\theta_{1} + d_{21}m_{2}s_{2}g\cos\theta_{2}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}}} = \ddot{\theta}_{2}$$
(B.27)

Portanto, tem-se:

$$-\ddot{\theta}_{2} \begin{bmatrix} \cos\theta_{1}(d_{21}m_{1}s_{1}g - d_{11}m_{2}s_{2}\cos + 2d_{21}m_{2}s_{2}g) \\ -\cos\theta_{2}(d_{11}m_{2}s_{2} + d_{21}m_{2}s_{2}g) + d_{21}c_{121}\dot{\theta}_{1}\dot{\theta}_{2} \\ + d_{21}c_{211}\dot{\theta}_{2}\dot{\theta}_{1} - d_{11}c_{112}\dot{\theta}_{1} + d_{21}c_{221}\dot{\theta}_{2} \\ \frac{d_{21}\tau_{1} - d_{11}\tau_{2}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}} \end{bmatrix} = \frac{d_{21}\tau_{1} - d_{11}\tau_{2}}{d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}}$$
(B.28)

Tem não-linearidades: $\cos\theta_1, \cos\theta_2, \theta_1, \theta_2, \theta_2, \theta_1, \theta_1^2, \theta_2^2, \theta_1, \theta_2$.