



Julio Quadrio de Moura Guedes

**Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um
Manipulador Robótico Acionado por Tendões**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro

Abril de 2010



Julio Quadrio de Moura Guedes

**Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um
Manipulador Robótico Acionado por Tendões**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Marco Antonio Meggiolaro

Orientador
Depto. de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

Mauro Speranza Neto

Depto. de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

Marcelo de Andrade Dreux

Depto. de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Abril de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Julio Quadrio de Moura Guedes

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação na PUC-Rio em 2004, juntamente com o curso sequencial de Empreendedorismo pelo CCE, também, na PUC-Rio em 2004 e especialização em Engenharia de Suprimentos em Construção e Montagem com foco na área de Petróleo e Gás na UFF em 2008. Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq.

Ficha Catalográfica

Guedes, Julio Quadrio de Moura

Projeto, simulação e desenvolvimento de um manipulador robótico acionado por tendões / Julio Quadrio de Moura Guedes ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2010.

144 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Manipulador contínuo. 3. Tendões. 4. Inspeção. 5. Robótica. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Julio e Sandra,
a minha esposa, Domitila e aos meus
irmãos Camila, Joni e Carolina.

Agradecimentos

Ao orientador e amigo, Marco Antonio Meggiolaro, por todo o apoio, incentivo e comprometimento para o desenvolvimento deste e de diversos outros trabalhos.

Aos professores Mauro Speranza Neto e Mauro Schwanke da Silva por toda a orientação acadêmica deste os primeiros períodos da graduação até os dias atuais.

Ao padrinho Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis pela amizade, incentivo e suporte, tantos nos momentos pessoais quanto nos acadêmicos.

Aos amigos da RioBotz, alunos da graduação e pós-graduação que frequentam o Laboratório de Engenharia de Controle e Automação da PUC-RJ pelo incentivo.

À minha família, em especial, à minha esposa, por compreender minha ausência durante este período acadêmico e a Geralda Jerônimo de Moura pelo apoio e correções.

Resumo

Guedes, Julio Q. M.; Meggiolaro, Marco Antonio. **Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Acionado por Tendões**. Rio de Janeiro – RJ, 2010. 144p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um novo conceito de manipulador está sendo estudado com o intuito de realizar tarefas inviáveis para manipuladores tradicionais. Este modelo de manipulador se baseia em manipuladores contínuos. Eles apresentam uma estrutura similar a uma coluna vertebral, são altamente modulares, leves, podem ser atuados remotamente e possuem alto índice de adaptabilidade com o ambiente. Este tipo de manipulador apresenta características interessantes para utilização em diversos tipos de tarefas, principalmente em inspeções em locais com muitos obstáculos e ambientes inóspitos para os seres humanos. Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um protótipo de manipulador contínuo atuado remotamente por tendões. Ele possui estrutura modular formado por “vértebras” ligadas serialmente. Inicialmente projetado através de ferramentas computacionais para em seguida ser construído fisicamente. São apresentados estudos cinemáticos e simulações com comparações entre a parte teórica e experimental. Por fim, é desenvolvida uma situação para simular a atuação do manipulador em uma tarefa real.

Palavras-Chave

Manipulador contínuo; tendões; inspeção; robótica;

Abstract

Guedes, Julio Q. M.: Meggiolaro, Marco Antonio. **Design, Simulation and Development of a Tendon Drive Robotic Manipulator.** Rio de Janeiro – RJ, 2010. 144p. MSc Dissertation – Mechanical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

A new concept of robotic manipulator is studied to perform tasks not viable for traditional manipulators. This new model is based on a continuum manipulator. It has a structure similar to a backbone, it is highly modular, lightweight, it can be remotely actuated, and it has a high level of adaptability to the environment. This type of manipulator has interesting features for uses in various types of tasks, especially in inspections in places with many obstacles and inhospitable to humans. This thesis presents the development of a remote tendon drive robotic continuum manipulator prototype. It has a modular structure composed of serially connected vertebrae. It is initially designed by computational tools, and then physically built. Kinematic studies and simulations are presented with comparisons between theoretical and experimental results. Finally, a situation is presented to simulate the performance of the manipulator in a real task.

Keywords

Continuum manipulator; tendons; inspection; robotic,

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos do Trabalho	17
1.3. Revisão Bibliográfica	17
1.4. Organização do Trabalho	22
2. Concepção do Manipulador	23
2.1. Conceitos Básicos	23
2.2. Cálculos de Rigidez por Elementos Finitos	41
2.2.1. Análise da Membrana	42
2.2.2. Cálculo de Rigidez para Vértebra	43
2.2.2.1. Deslocamento no eixo Z	44
2.2.2.2. Deslocamento Rotacional	45
3. Modelagem Teórica	47
3.1. Conceitos Básicos de Cinemática	47
3.1.1. Transformação Homogênea	50
3.2. Notação de Denavit-Hartenberg	52
3.3. Modelagem do Sistema	55
4. Construção e Montagem	69
4.1. Características dos Materiais	69
4.2. Construção e Montagem	71
5. Experimentos e Resultados	82
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	102
6.1. Contribuições neste Trabalho	102
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	103
7. Bibliografia	105

8. Anexos	108
Anexo I	109
Anexo II	114
Anexo III	118
Anexo IV	122
Anexo V	130
Anexo VI	131
Anexo VII	132
Anexo VIII	143

Lista de Figuras

Figura 1 – Robô Snake-Arm.....	16
Figura 2 – Robô Charlotte	19
Figura 3 – Robô MARS.....	19
Figura 4 – Manipulador Tradicional x Contínuo.....	20
Figura 5 – Estrutura Baseada em Molas.....	27
Figura 6 – Estrutura Baseada em Juntas Pneumáticas.....	27
Figura 7 - Membrana	28
Figura 8 - Coluna.....	29
Figura 9 - Anel.....	29
Figura 10 – Corte Transversal do Tendão	30
Figura 11 – Vértebra.....	30
Figura 12 – Elo	31
Figura 13 – Elo com Parafusos de Fixação	32
Figura 14 – 3 Elos com Parafusos	33
Figura 15 – Servomotor AX-12+	34
Figura 16 – Encoder e Relação de Engrenagens	35
Figura 17 - Polia	36
Figura 18 – Base, Servomotor e Polia	37
Figura 19 – Posicionamento dos Servos.....	37
Figura 20 - Base.....	38
Figura 21 – Manipulador Completo	39
Figura 22 – Passagem de Tendões.....	40
Figura 23 – Malha Gerada para o Cálculo da Membrana.....	42
Figura 24 – Forças e Deformação o Cálculo da Membrana	43
Figura 25 – Malha Gerada para o Cálculo da Vértebra.....	44
Figura 26 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.1	44
Figura 27 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.2	45
Figura 28 – Posição e Orientação do Corpo Rígido	47
Figura 29 – Transformação Rotacional	48
Figura 30 – Notação de Denavit-Hartenberg.....	53

Figura 31 – Definição de s_i , κ_i e ϕ_i .	56
Figura 32 – Adaptação da Vértebra para D-H	57
Figura 33 – Vetores	63
Figura 34 – Montagem do Sistema para Gerar a Seção Corrugada	72
Figura 35 – Membrana Normal (topo) x Corrugada (inferiores)	72
Figura 36 – Anel Antes e Depois da Usinagem	73
Figura 37 – Coluna Antes e Depois da Usinagem	73
Figura 38 – Vértebra Montada	74
Figura 39 – Detalhe da Terminação dos Tendões	74
Figura 40 – Placa Base, Servos, Polias e Tendões	75
Figura 41 - Manipulador Completo	76
Figura 42 – Fiação do Servomotor	77
Figura 43 – Conexão Servomotores e Computador	77
Figura 44 – Comunicação Servos ↔ Controlador	78
Figura 45 – Interface de Calibração	83
Figura 46 – Posição Inicial do Manipulador	84
Figura 47 – Tendões nos Elos Consequentes	85
Figura 48 – Tela Principal do <i>Software</i> de Controle	87
Figura 49 – Medições (Retesado e com $\pm 0,4\text{rad}$ no Elo 01)	89
Figura 50 – Malha de Controle por Torque Computado	93
Figura 51 – Gravidade	94
Figura 52 – Controle por Torque Computado	95
Figura 53 – Resposta Simulação $0,4\text{rad}$	96
Figura 54 – Ilustração do Problema	96
Figura 55 – Ângulo da Etapa 01	98
Figura 56 – Ângulo da Etapa 02	98
Figura 57 – Ângulo da Etapa 03	99
Figura 58 – Etapa 01	100
Figura 59 – Etapa 02	100
Figura 60 – Etapa 03	100
Figura 61 – Ângulos Medidos	101

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Relação de Engrenagens.....	35
Tabela 2-2 – Configuração da Malha dos Testes	42
Tabela 3-1 – Parâmetros x Tipo de Juntas.....	54
Tabela 3-2 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg	58
Tabela 4-1 – Erros no Pacote Status.....	79
Tabela 4-2 – Taxas de Transmissão	80
Tabela 5-1 – Pré-tensionamento dos Tendões.....	82
Tabela 5-2 – Relação entre IDs e Elos	86
Tabela 5-3 – Variações de θ_1	93
Tabela 5-4 – Variações de θ_2	94
Tabela 5-5 – Entradas para Realização das Etapas.....	103
Tabela 5-6 – Ângulos da Simulação.....	105

Lista de Símbolos e Abreviações

CRIGOS – *Compact Robot for Image Guided Orthopedic Surgery*

D-H – Notação de Denavit-Hartenberg

Delrin AF – *Acetal homopolymer PTFE-filled*

DoF – *Degrees of Freedom*

END – Ensaio Não Destrutivo

FEP – Etil-Propileno Fluorado

ID – Número de Identificação

MARS – *Miniature Robot for Surgical procedures*

PTFE – PoliTetraFluorEtileno

ROV – *Remoted Operated Vehicle*