

Alexandre de Lima Spinola

**Modelagem e Controle Não Linear da Direção de um
Veículo Terrestre**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientadores: Marcos Azevedo da Silveira
Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2003

Alexandre de Lima Spinola

**Modelagem e Controle Não Linear da Direção de um
Veículo Terrestre**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Marcos Azevedo da Silveira
Orientador
DEE/PUC-Rio

Mauro Speranza Neto
Co-Orientador
DEM/PUC-Rio

Fernando Ribeiro da Silva
DEMM/IME

Carlos Tércio Correa da Silva
DEE/PUC-Rio

Ney Augusto Dumont
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2003

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

Alexandre de Lima Spinola

Engenheiro de Controle e Automação formado pela PUC-Rio em 2001, ingressou para o Mestrado, no Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio em agosto de 2001, na área de Processamento de Sinais e Controle de Processos. Enquanto aluno de graduação estagiou na indústria offshore, na DSND Consub, no desenvolvimento de um robô submarino de operação remota nacional. Trabalhou ainda com criação de aplicativos dedicados para análise estrutural mecânica, na EasyCAE Designer. Após se formar, trabalhou nos laboratórios do DEE, como Auxiliar de Ensino e Pesquisa e como Estagiário em Docência, este último como requisito obrigatório por ser bolsista da CAPES. Já no final do Mestrado voltou a trabalhar na indústria offshore, como engenheiro de sistemas de controle submarinos, na FMC CBV Subsea, projetando, especificando e provendo manutenção a sistemas de controle multiplexados para auxílio à extração de petróleo no fundo do mar. Ao longo do curso de mestrado criou, junto com mais quatro sócios, a BioGénie Projetos, empresa atuante na área biomédica de produção de próteses em geral, projetando equipamentos para o mercado odontológico além de patentes de métodos e aplicações. Dentro da BioGénie é o responsável pela área de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e sua aplicação direta aos novos produtos.

Ficha Catalográfica

Spinola, Alexandre de Lima

Modelagem e controle não linear da direção de um veículo terrestre / Alexandre de Lima Spinola ; orientadores: Marcos Azevedo da Silveira, Mauro Speranza Neto – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

140 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Controle não linear. 3. Dinâmica veicular. 4. Modelagem de sistemas dinâmicos. 5. Linearização por realimentação de estados. 6. MATLAB. 7. SIMULINK. I. Silveira, Marcos Azevedo da. II. Speranza Neto, Mauro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Química. IV. Título.

”Só conheço uma liberdade, e essa é a liberdade do pensamento”.

Antoine de Saint-Exupéry

Agradecimentos

Aos meus orientadores Professores Marcos Azevedo da Silveira e Mauro Speranza Neto, pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho e, acima de tudo, pela amizade.

A CAPES e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não existiria.

Aos meus pais Oscar e Lúcia, pela educação, incentivo e amor de sempre.

À minha irmã Cláudia, por sua alegria contagiante e pelas conversas de irmãos.

Aos meus amigos de longa data, por todo o apoio, paciência e compreensão nas horas de sumiço total.

Aos professores Fernando e Tércio, que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários dos departamentos de Engenharia Elétrica e de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram a seguir em frente.

Resumo

Spinola, Alexandre de Lima. **Modelagem e Controle Não Linear da Direção de um Veículo Terrestre**. Rio de Janeiro, 2003. 140p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Modelagem e Controle Não Linear da Direção de um Veículo Terrestre descreve um estudo em dinâmica veicular no qual inicialmente apresenta-se um modelo analítico para representar a geração de forças longitudinais e laterais no contato do pneu com o solo. Em seguida é desenvolvido, para um automóvel de passeio, um modelo não linear de 4 graus de liberdade (velocidades longitudinal, lateral, de guinada e de rolagem), e a sua linearização. Expande-se esse modelo para um de 8 graus de liberdade, no qual inclui-se o movimento de rotação axial de cada uma das quatro rodas, e consideram-se os movimentos do veículo somente no plano, sem efeitos de *pitch* ou *bounce*, mas apresentando alguma relação de distribuição de cargas devido ao *roll*. Todos os modelos em malha aberta são validados através de simulações computacionais em diversas condições típicas de operação. Na segunda parte desse trabalho é apresentada a estratégia proposta para o tratamento do problema de controle direcional do veículo em uma manobra qualquer, empregando a metodologia da linearização por realimentação, tendo como base o modelo linear de 4 graus de liberdade. São analisados os resultados encontrados através de simulação computacional para a malha fechada com diferentes combinações de parâmetros, empregando os modelos não lineares de 4 e 8 graus de liberdade. Conclui-se discutindo a possibilidade de generalização deste procedimento para diferentes aplicações em Dinâmica Veicular.

Palavras-chave

1. Controle Não Linear; 2. Dinâmica Veicular; 3. Modelagem de Sistemas Dinâmicos; 4. Linearização por Realimentação de Estados; 5. Matlab; 6. Simulink

Abstract

Spinola, Alexandre de Lima. **Modeling and Non Linear Control of a Ground Vehicle's Steering**. Rio de Janeiro, 2003. 140p. Msc. Dissertation - Electric Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Modeling and Non Linear Control of a Ground Vehicle's Steering describes a study in vehicle dynamics, which presents an analytic model representing the generation of longitudinal and lateral forces at the contact patch between tire and ground. Next it is developed, for a typical passenger car, a non-linear model with four degrees of freedom (longitudinal, lateral, yaw and roll velocities), and its linearization. This model is then expanded to another one with eight degrees of freedom, which includes the axial rotation of each one of the four wheels, and considers the vehicle's movement only at a known plane, without pitch and bounce effects, but including some load distribution among the wheels, due to roll. Computational simulations in various typical operation conditions validate all open loop models. The second part of this work presents the proposed strategy for directional control of a vehicle at any type of manoeuvre, using the feedback linearization methodology, directly applied to the linear four degrees of freedom model. The results obtained through computational simulation for a closed loop model with different parameters are analysed using both nonlinear four and eight degrees of freedom models. The possibility of generalizing this procedure to distinct applications in Vehicle Dynamics is, then, discussed.

Keywords

1. Non Linear Control; 2. Vehicle Dynamics; 3. Modeling of Dynamic Systems; 4. Feedback Linearization 5. Matlab; 6. Simulink

Sumário

1 Introdução	13
2 Modelagem do Pneu	17
2.1. Introdução	17
2.2. Forças e momentos dos pneus	19
2.3. Resistência ao rolamento	21
2.4. Força de tração ou frenagem e deriva longitudinal (slip e skid)	24
2.5. Força lateral e ângulo de deriva	37
2.6. Caracterização do comportamento de pneus em curvas	38
2.7. Teoria da elipse de aderência	42
2.8. Simulação do modelo do pneu	48
3 Modelo de Quatro Graus de Liberdade	50
3.1. Construção do modelo não linear	50
3.1.1. Modelagem do pneu	55
3.1.2. Simplificando o modelo não linear para a dinâmica lateral	61
3.2. Simulação do modelo de quatro graus de liberdade	68
4 Modelo de Oito Graus de Liberdade	74
4.1. Construção do modelo não linear	74
4.2. Simulação do modelo de oito graus de liberdade	86
5 Controle por Linearização da Realimentação de Estados	97
5.1. Teoria de controle	97
5.1.1. Linearização no sentido entrada-saída	97
5.1.2. Formas normais	99
5.1.3. Análise dos estados não observáveis	103
5.1.4. Estabilidade assintótica local	105
6 Controle Aplicado ao Modelo de Quatro Graus de Liberdade	106

6.1. Formas normais	108
6.2. Análise dos estados não observáveis	112
6.3. Análise de estabilidade	114
6.4. Controle para rastreamento de trajetória	115
6.5. Simulação do modelo com quatro graus de liberdade	116
7 Conclusões e Trabalhos Futuros	122
8 Referências Bibliográficas	125
Anexo 1 Tentativa de Controle do Modelo de Oito Graus de Liberdade	128
A1.1 Linearização da função de entrada	128
A1.2 Controle aplicado ao modelo de oito graus de liberdade	130
A1.3 Formas normais	133
A1.4 Análise de estabilidade em regime estacionário	135
Anexo 2 Lista de Variáveis e Dados Numéricos	138

Lista de figuras

Figura 1 – Representação de um modelo de dinâmica veicular	19
Figura 2 – Sistema de eixos do pneu	20
Figura 3 – Efeito de onda estacionária	23
Figura 4 – Características de pneus	24
Figura 5 – Comportamento do pneu durante a tração (aceleração positiva)	26
Figura 6 – Variação do esforço de tração com a deriva longitudinal	27
Figura 7 – Comportamento do pneu sob frenagem (desaceleração)	35
Figura 8 – Comportamento do pneu sujeito a uma força lateral	37
Figura 9 – Curva de força lateral para os dois tipos de pneu	38
Figura 10 – Conceito de elipse de aderência	41
Figura 11 – Construção da elipse de aderência	43
Figura 12 – Curvas de forças laterais sob ação de força normal de 4000N	48
Figura 13 – Curvas de forças longitudinais sob ação de força normal de 4000N	49
Figura 14 – Elipse de aderência de um pneu a 4000N de força normal	49
Figura 15 – Determinando as acelerações em x e y	51
Figura 16 – Diagrama de corpo livre para equilíbrio de torques	53
Figura 17 – Identificação dos ângulos de deriva	55
Figura 18 – Orientação de componentes das forças nos pneus	60
Figura 19 – Geometria de Ackermann	65
Figura 20 – Modelo de 4 graus de liberdade em ambiente de simulação	68
Figura 21 – Função de entrada degrau	69
Figura 22 – Resposta ao degrau: ângulo de guinada	70
Figura 23 – Resposta da velocidade lateral ao degrau	70
Figura 24 – Deslocamento no referencial global do modelo de 4 graus de liberdade	71
Figura 25 – Ângulo de esterçamento constante para movimento em curva	71
Figura 26 – Deslocamento lateral do modelo de 4 graus ao longo do tempo	72
Figura 27 – Deslocamento do modelo no plano XY, a uma curvatura constante	72
Figura 28 – Variação do ângulo de guinada ao longo do tempo	73
Figura 29 – Equilíbrio de forças	76

Figura 30 – Diagrama de forças nas rodas	79
Figura 31 – Curvas de torque do motor	81
Figura 32 – Modelo de 8 graus de liberdade em ambiente de simulação	87
Figura 33 – Função de entrada para o modelo de 8 graus de liberdade	88
Figura 34 – Ângulo de guinada para mudança de pista	89
Figura 35 – Deslocamento do modelo de 8 graus de liberdade para a mudança de pista	89
Figura 36 – Visão geral do deslocamento no referencial global	90
Figura 37 – Forças laterais durante o movimento de mudança de faixa	91
Figura 38 – Deriva longitudinal durante o movimento de mudança de faixa	91
Figura 39 – Forças normais na mudança de faixa	92
Figura 40 – Compensação de velocidades nas rodas durante a mudança de faixa	92
Figura 41 – Teste de estabilidade do modelo de oito graus de liberdade em curva	93
Figura 42 – Deslocamento do modelo 8GL em curva de raio constante	94
Figura 43 – Ângulos de guinada e rolagem do modelo de 8 graus de liberdade	95
Figura 44 – Forças normais durante o movimento de curva de raio constante	95
Figura 45 – Teste de estabilidade em regime permanente	114
Figura 46 – Diagrama da estratégia de controle	115
Figura 47 – Diagrama de blocos no ambiente de simulação do modelo de 4 graus	116
Figura 48 – Controlador com pólos próximos à origem	117
Figura 49 – Melhoria do sistema após deslocar pólos para a esquerda	118
Figura 50 – Rastreamento da trajetória desejada	118
Figura 51 – Acompanhamento de uma curva de raio constante	119
Figura 52 – Velocidade lateral durante realização de curva de raio constante	120
Figura 53 – Aplicação de nos estados do modelo de 4 graus – SNR = -3dB	121
Figura 54 – Aplicação de ruído no sinal de controle – SNR = -4dB	121
Figura 55 – Quebra da estabilidade da dinâmica interna	136