

**Ricardo Morrot Lima**

**Simulação Tridimensional em Tempo Real  
de Veículos Robóticos em Terrenos Acidentados**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2010

**Ricardo Morrot Lima**

**Simulação Tridimensional em Tempo Real  
de Veículos Robóticos em Terrenos Acidentados**

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

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Hans Ingo Weber**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de setembro de 2010

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

### **Ricardo Morrot Lima**

Graduou-se em Desenho Industrial – Projeto de Produto pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 1997. Pós-Graduação em Análise, Projeto e Gerência de Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2000.

#### Ficha Catalográfica

Lima, Ricardo Morrot

Simulação tridimensional em tempo real de veículos robóticos em terrenos acidentados / Ricardo Morrot Lima ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2010.

170 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. Simulação. 3. Tridimensional. 4. 3D. 5. Tempo real. 6. Veículos robóticos. 7. Terrenos acidentados. 8. Controle de estabilidade. 9. Dinâmica veicular. 10. LuGre. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Não haveria um segundo da minha vida que eu não dedicasse a Deus,  
e este trabalho só foi possível porque Ele o permitiu,  
à minha querida mãe, Luiza, que me passou toda essa perseverança de vida,  
aos meus irmãos, Alexandre e Mônica, de quem tenho bastante orgulho,  
e à minha querida sobrinha, Katheryn, que estará eternamente no meu coração.

## Agradecimentos

Tenho muito a agradecer.

Agradeço primeiramente ao professor Mauro Speranza Neto pela atenção dada, por ter ouvido a minha intenção e me indicado ao professor Marco Antonio Meggiolaro, meu orientador.

Sinto-me feliz por poder retribuir formalmente ao meu orientador Marco Antonio Meggiolaro pelo desafio a que foi submetido, pela paciência, pelas vastas horas que lhe roubei e, acima de tudo, pela confiança depositada em mim, mantida mesmo nas dificuldades.

Gostaria de agradecer especialmente ao professor Hans Ingo Weber por ter acreditado em mim e por ter me impulsionado para o universo maravilhoso da dinâmica.

Não há como deixar de agradecer a uma figura essencial, sem a qual a jornada seria literalmente um “terreno acidentado”: obrigado ao amigo Pedro Blois pela ajuda técnica, científica, pela força e conexão estabelecida.

Aos amigos César Raúl Mamani Choquehuanca, Danny Hernán Zambrano, Cristian Mejia Sanchez e a todos os que colaboraram direta ou indiretamente para a concretização deste sonho.

A toda galera do Tecgraf/MVGEO representada pelo professor Luís Fernando Martha e, em especial, a ele.

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro durante o curso de mestrado.

Meus sinceros agradecimentos.

## Resumo

Lima, Ricardo Morrot; Meggiolaro, Marco Antonio. **Simulação Tridimensional em Tempo Real de Veículos Robóticos em Terrenos Acidentados**. Rio de Janeiro, 2010. 170p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação aborda conceitos interdisciplinares de Engenharia Mecânica e Engenharia de Software, com foco principal no estudo de sistemas mecânicos. Atualmente, operações de monitoração por meio de veículos autônomos se tornam cada vez mais comuns, enquanto os ambientes a que esses veículos robóticos são submetidos passam a ser cada vez mais hostis, principalmente em relação aos obstáculos e características dos terrenos. O presente trabalho introduz o desenvolvimento de um simulador dinâmico em 3D em tempo real para veículos robóticos em terrenos acidentados. Um algoritmo de interseção é desenvolvido entre um terreno 3D genérico e cada roda de um veículo. Um modelo de força de contato pneu-terreno é implementado, levando em consideração as combinações das derivas longitudinal e lateral. O modelo também inclui os efeitos de corrente contínua de motores, levando-se em consideração a interação entre a parte mecânica e a elétrica, inclusive uma aproximação contínua do modelo de atrito de LuGre, considerando as limitações de potência das baterias do sistema. O simulador também inclui equações para um controle de estabilidade 2D, levando em consideração apenas a estabilização do ângulo de arfagem (*pitch*) do veículo. Este trabalho propõe, além disso, um controle de estabilidade 3D utilizando um indicador de estabilidade que pode ser calculado em tempo real, baseado em uma estimativa de distribuição de forças de contato entre roda e terreno. O simulador é validado mediante comparações com soluções analíticas do comportamento longitudinal do veículo robótico.

## Palavras-chave

Simulação; Tridimensional; 3D; Tempo Real; Veículos Robóticos; Terrenos Acidentados; Controle de Estabilidade; Dinâmica Veicular; LuGre.

## Abstract

Lima, Ricardo Morrot; Meggiolaro, Marco Antonio. **Three-dimensional Simulation in Real Time of Mobile Robotics on Rough Terrain**. Rio de Janeiro, 2010. 170pp. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation approaches interdisciplinary concepts of Mechanical Engineering and Software Engineering, with a main focus on the study of mechanical systems. Nowadays, the task of monitoring with autonomous vehicles has become more and more common, while the environment to which those robot vehicles are exposed becomes more and more hostile, mainly in relation to the obstacles and characteristics of the terrain. The present work introduces the development of a 3D real-time dynamic simulator of robot vehicles on rough terrain. An intersection algorithm is developed between a 3D generic terrain and each wheel of a vehicle. A tire-soil contact force model is implemented, taking into consideration the combined longitudinal and lateral drifts. The model includes the effects of direct current motors, taking into consideration the interaction between mechanical and electric parts, including a continuous approximation of LuGre's friction model, considering the power limitations of the system batteries. The simulator also includes an equation for a 2D stability control, taking into consideration only the stabilization of the pitch angle of the vehicle. This work also proposes a 3D stability control using an indicator of stability that can be calculated in real time, based on an estimated distribution of wheel-terrain contact forces. The simulator is validated through comparisons with analytic solutions of the longitudinal behavior of the robot vehicle.

## Keywords

Simulation; Three-dimensional; 3D; Real Time; Mobile Robots; Rover; Rough Terrain; Traction Control; Vehicle Dynamics; LuGre.

# Sumário

1 Introdução	20
1.1. Definição de Rover	24
1.2. Definição de Robô Móvel ( <i>Mobile Robot</i> )	25
1.3. Objetivo	26
1.4. Estrutura da Dissertação	26
2 Revisão Bibliográfica	28
2.1. Controle de Tração em Terrenos Acidentados	28
2.2. Simuladores Avaliados	29
2.3. Arquitetura dos Simuladores Avaliados	38
2.4. Biblioteca Gráfica dos Simuladores Avaliados	41
2.5. Biblioteca Utilizada na Dinâmica dos Simuladores Avaliados	42
3 Simulador Desenvolvido	45
3.1. Descrição Geral	47
3.2. Modelagem do Terreno	49
3.3. Modelagem do Veículo Robótico	52
3.3.1. Parâmetros Geométricos do Veículo Robótico	52
3.3.2. Forças Externas sobre o Veículo Robótico	54
3.3.3. Forças Internas entre a Roda e o Chassi	55
3.3.4. Algoritmo de Busca do Ponto de Contato entre Roda e Terreno	56
3.4. Modelagem Dinâmica do Veículo Robótico	61
3.5. Modelo da Força de Contato Pneu-Terreno	66
3.5.1. Derivas Longitudinal e Lateral	66
3.5.2. Cálculo das Forças Longitudinal e Lateral	67
3.5.3. Combinação das Derivas	71
3.6. Atuador	71
3.7. Método de Integração	73
4 Controle	74



5 Validação do Software	81
5.1. Validação da Simulação da Arrancada	81
5.2. Validação da Simulação do Salto	85
6 Resultados	88
6.1. Controle Proporcional Simples em Terreno Senoidal	92
6.2. Controle CDTA em Terreno Senoidal	95
6.3. Controle Proporcional Simples em Terreno Plano com uma Rampa	97
6.4. Controle CDTA em Terreno Plano com uma Rampa	100
7 Conclusões	104
8 Referências bibliográficas	106
Anexo A: Organização dos Arquivos do Aplicativo VirtualBotz 3D	113
Anexo B: Diagrama de Classes (UML) do Simulador	115
Anexo C: Comandos do Joystick (Analógico)	121
Anexo D: Teclas de Funcionalidades do Simulador	123
D.1. Terminar execução do simulador	123
D.2. Alternar visão da simulação pelas câmeras interna e externas do veículo robótico	123
D.3. Visualizar legendas	126
D.4. Encerrar (parar) simulação corrente	126
D.5. Iniciar nova simulação	126
D.6. Salvar simulação corrente em vídeo	127
D.7. Visualizar trajetória do centro de massa do veículo robótico após a simulação	129
D.8. Posicionar o veículo robótico pelo centro de massa ao longo da trajetória após a simulação	131

D.9. Alterar escala de rotação e translação do mundo virtual	132
Anexo E: Scripts de Configuração do Simulador	133
Anexo F: Opções de Terrenos	145
Anexo G: Configurando Opção de Terreno no Script da Simulação	151
Anexo H: Renderização do Terreno	153
Anexo I: Configurando o Veículo Robótico no Script da Simulação	155
Anexo J: Configurando os Motores das Rodas do Veículo Robótico no Script da Simulação	164
Anexo K: Habilitando no Script da Simulação a Geração de Dados da Simulação Corrente do Veículo Robótico em Arquivos	167

## Lista de Figuras

Figura 1 – Protótipo desenvolvido pelo Grupo de Robótica CENPES/Petrobras a ser utilizado na região amazônica	23
Figura 2 – Gasoduto Coari, Manaus (Barral, 2007, p. 20) [4]	24
Figura 3 – CLARAty navegando o Rocky 8 ROAMS Simulator [37]	30
Figura 4 – ROAMS, ou Rover Modeling and Simulation, produzido pelo Jet Propulsion Laboratory da NASA, em uma missão de superfície [25]	31
Figura 5 – Universal Mechanisms simulando um veículo robótico de seis rodas para transporte [12]	32
Figura 6 – Universal Mechanisms simulando a dinâmica de um utilitário sobre uma lombada [12]	32
Figura 7 – Gazebo simulando multirrobo em ambiente controlado, modificado de [15]	33
Figura 8 – Um exemplo da configuração de rover no RCAST [16]	34
Figura 9 – CRAB Rover durante uma simulação [38]	35
Figura 10 – Aplicação robótica utilizando o simulador RDS [33]	36
Figura 11 – Ambiente visual do RDS para criação de aplicações robóticas [33]	36
Figura 12 – Veículo passando sobre uma rampa unilateral, SIMPACK Automotivo	37
Figura 13 – Arquitetura em camadas do CLARAty, modificado de [10]	39
Figura 14 – Exemplo, modificado de [27], ilustrando a hierarquia de objetos e o conceito de herança de classes	40
Figura 15 – Diagrama da arquitetura do aplicativo Gazebo, modificado de [60]	41
Figura 16 – Veículo para Inspeção Visual Interna de dutos (VIVI)	45
Figura 17 – Modelo de grade regular retangular utilizado pelo VirtualBotz 3D	49
Figura 18 – Extremos do domínio do terreno no VirtualBotz 3D	50
Figura 19 – Ilustração das variáveis de interpolação do terreno	51
Figura 20 – Esquema com as dimensões do chassi	52

Figura 21 – Centro de massa teórico da roda, sem qualquer deformação na suspensão	53
Figura 22 – Dimensões da roda	54
Figura 23 – Esquema de forças externas atuando sobre o veículo robótico	55
Figura 24 – Esquema de forças interna entre a roda e o chassi	55
Figura 25 – Deslocamento imposto sobre a suspensão	56
Figura 26 – Ilustração da discretização da circunferência inferior da roda	57
Figura 27 – Ilustração do esquema do cálculo de $X_{cp}$	58
Figura 28 – Ilustração da convergência do ponto de contato da roda com o terreno	59
Figura 29 – Esquema do ponto de contato da roda com o terreno	61
Figura 30 – Esforços agindo entre a roda e o terreno	63
Figura 31 – Curva produzida pela versão original da “ <b>Fórmula Mágica</b> ” em [53]	68
Figura 32 – Região admissível para as forças de tração nas rodas 1 e 2 [56]	75
Figura 33 – Combinações da região $D$ e $I$ [56]	76
Figura 34 – Pontos de interseção entre $I$ e o menor diamante das linhas de mesma potência para os quatro casos básicos	77
Figura 35 – Sistema de cálculo dos eixos de estabilidade	79
Figura 36 – Gráfico 2D do momento de estabilidade do veículo robótico na tela de visualização do aplicativo VirtualBotz 3D	80
Figura 37 – Definição das grandezas utilizadas no cálculo da solução analítica para o teste de arrancada do veículo robótico	82
Figura 38 – Definição das grandezas utilizadas no cálculo da solução analítica para o teste de salto do veículo robótico	85
Figura 39 – Perfil do terreno senoidal desenhado no MATLAB	89
Figura 40 – Início da simulação: cenário da primeira simulação, com o veículo robótico VIVI, no terreno senoidal	89
Figura 41 – Veículo robótico VIVI no terreno senoidal superando o primeiro aclave	90
Figura 42 – Perfil da rampa do terreno desenhado no MATLAB	91
Figura 43 – Cenário da segunda simulação com o veículo robótico VIVI, no terreno plano com uma rampa ao final	91

Figura 44 – Veículo robótico VIVI no início da rampa na segunda simulação, no terreno plano com uma rampa	92
Figura 45 – Velocidade do centro de massa do veículo com o controlador proporcional simples com compensação de gravidade	93
Figura 46 – Força normal com o controlador proporcional simples com compensação de gravidade	93
Figura 47 – Gráfico da deriva longitudinal da roda traseira com o controlador proporcional simples com compensação de gravidade	94
Figura 48 – Potência dos motores com o controlador proporcional simples com compensação de gravidade	95
Figura 49 – Gráfico da velocidade do centro de massa do veículo com o controle CDTA	95
Figura 50 – Força normal com o controle CDTA	96
Figura 51 – Gráfico da deriva longitudinal da roda traseira com o controle CDTA	96
Figura 52 – Potência dos motores com o controle CDTA	97
Figura 53 – Gráfico da velocidade do centro de massa do veículo com o controle proporcional simples em terreno plano com uma rampa	98
Figura 54 – Força normal com o controlador proporcional simples em terreno plano com uma rampa	98
Figura 55 – Gráfico da deriva longitudinal da roda traseira com o controle proporcional simples em terreno plano com uma rampa	99
Figura 56 – Potência dos motores com o controlador proporcional simples em terreno plano com uma rampa	99
Figura 57 – Velocidade do centro de massa do veículo com o controle CDTA em terreno plano com uma rampa	101
Figura 58 – Força normal com o controle CDTA em terreno plano com uma rampa	101
Figura 59 – Deriva longitudinal da roda traseira com o controle CDTA em terreno plano com uma rampa	102
Figura 60 – Potência dos motores com o controle CDTA em terreno plano com uma rampa	103
Figura 61 – Diagrama de classes (UML) do terreno	118

Figura 62 – Diagrama de classes (UML) do veículo robótico	119
Figura 63 – Diagrama de classes (UML) para matrizes 3x3 e vetores 3x1/1x3	120
Figura 64 – Comandos dos manetes do joystick	121
Figura 65 – Comandos dos botões do joystick	122
Figura 66 – Teclas de funcionalidades do simulador (teclado padrão internacional)	123
Figura 67 – Veículo robótico observado pela câmera virtual 1, permitindo a movimentação do mundo virtual de forma independente do veículo robótico	124
Figura 68 – Visão pela câmera virtual interna do veículo robótico durante várias simulações com diferentes tipos de terrenos	125
Figura 69 – Imagem obtida pela câmera virtual externa que acompanha o veículo robótico	126
Figura 70 – Janela de seleção do CoDec para geração do vídeo AVI da simulação	127
Figura 71 – Imagem de um vídeo AVI gerado com a visão do observador, externa ao veículo	127
Figura 72 – Imagem de um vídeo AVI gerado com a câmera virtual interna do veículo robótico	128
Figura 73 – Imagem de um vídeo AVI gerado com a visão da terceira câmera virtual do aplicativo VirtualBotz 3D, em uma simulação com o tipo de piso similar ao dos pilotis da PUC-Rio	128
Figura 74 – Veículo robótico com os vetores $Z$ do centro de massa após o término da simulação	129
Figura 75 – Veículo robótico com os vetores $X$ , $Y$ e $Z$ do centro de massa após o término da simulação	130
Figura 76 – Veículo robótico com o centro de massa representado por uma linha contínua, após o término da simulação	130
Figura 77 – Veículo robótico retornando aos centros de massa anteriores ao do término da simulação	131
Figura 78 – Veículo robótico avançando às posições dos centros de massa até o término da simulação	132
Figura 79 – Exemplo de opção de terreno senos	145

Figura 80 – Exemplo de opção de terreno <i>flat</i>	146
Figura 81 – Ilustração do terreno de grade regular retangular	146
Figura 82 – Exemplo da ordenação da malha do terreno	148
Figura 83 – Simulação utilizando a leitura de terreno do tipo <i>mesh</i> (arquivo de malha “terrain_mesh2.msh”)	148
Figura 84 – Exemplo de opção de terreno <i>image</i> (mapa de altura) com o arquivo “heightmap3.bmp” definido para altura máxima “1.0”	149
Figura 85 – Exemplo de opção de terreno <i>image</i> (mapa de altura) com o arquivo “heightmap3.bmp” definido para altura máxima “5.0”, com o veículo robótico superando o aclive do terreno em diferentes instantes	149
Figura 86 – Exemplo de opção de terreno <i>image</i> (mapa de altura) com o arquivo “heightmap52.bmp” definido para altura máxima “1.0”	150
Figura 87 – As três simulações utilizam o mesmo terreno criado a partir de um mapa de altura (arquivo “heightmap63.bmp”), sendo a ilustração (a) sem nenhuma textura, com (b) textura “grass3.bmp” e (c) com “tile31.bmp”	154
Figura 88 – Modelo de roda desenhado no software Blender com apresentação em vértices e arestas	157
Figura 89 – Modelos de roda com definição dos materiais	158
Figura 90 – Exemplos de chassi bem simples, ambos com poucos detalhes e malha triangular	159
Figura 91 – Imagens da composição rodas mais chassi feita pelo simulador VirtualBotz 3D	159
Figura 92 – Visualização em Microsoft Excel do gráfico gerado pelo torque de uma das rodas do veículo robótico em uma simulação	168
Figura 93 – Visualização em Microsoft Excel do gráfico do sinal de controle PID de uma das rodas do veículo robótico durante uma simulação	169
Figura 94 – Visualização em Microsoft Excel do gráfico do vetor $z$ do centro de massa do veículo robótico em uma simulação	169
Figura 95 – Visualização em Microsoft Excel do gráfico do vetor $z$ do centro de massa de uma das rodas dianteiras do veículo robótico, em vermelho, e uma das rodas traseiras, em azul, durante uma simulação	170

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre os simuladores avaliados	38
Tabela 2 – Biblioteca gráfica dos sistemas avaliados	42
Tabela 3 – Simuladores avaliados e suas bibliotecas de dinâmica	43
Tabela 4 – Coeficientes dos pneus para a “ <b>Fórmula Mágica</b> ” em [54], valores em $kN$	68
Tabela 5 – Coeficientes $a_1$ até $a_8$ para o pneu do veículo	69
Tabela 6 – Parâmetros do motor Magmotor [48] utilizado no robô VIVI	72
Tabela 7 – Parâmetros do veículo para solução analítica	81
Tabela 8 – Especificações do veículo robótico VIVI	88
Tabela 9 – Pastas do aplicativo	113
Tabela 10 – Localização e descrição de todas as bibliotecas do aplicativo	115
Tabela 11 – Exemplos de alguns dos dados dos fabricantes de motores [48]	165



## Abreviaturas

API	Application Program Interface
AS2TM	AESCO Soft Soil Tire Model
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASL	Autonomous Systems Lab
AVI	Audio Video Interleaved
CAD	Computer Aided Design
CDTA	Controle Dinâmico para Terrenos Acidentados
CUDA	Compute Unified Device Architecture
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Melo
CLARAty	Coupled-Layer Architecture for Robotic Autonomy
CODEC	Contração do termo “COder-DECoder”
CPU	Central Processing Unit
DEM	Digital Elevation Model
FEM	Finite Element Modeller
GLUT	The OpenGL Utility Toolkit
GNU GPL	GNU General Public License
GPGPU	General-Purpose computing on Graphics Processing Units
GPU	Graphics Processing Unit
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
MER	Mars Exploration Rover
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ODE	Open Dynamics Engine
RCAST	Rover Chassis, Analysis and Simulation Tools
RDS	Microsoft Robotics Developer Studio
RGS	Rover Graphical Simulator
ROAMS	Rover Analysis, Modeling and Simulation
RUR	Rossum's Universal Robots
TIN	Triangular Irregular network

## Abreviaturas

UCP	Unidade Central de Processamento
UM	Universal Mechanisms
UML	Unified Modelling Language
Win32	Plataforma de programação em janelas (Windows) para 32 bits
WM2D	Working Model 2D
.MSH	Arquivo contendo coordenadas de uma coleção de polígonos
.MTL	Arquivo de biblioteca de materiais referenciados pelos arquivos wavefront (.OBJ)
.OBJ	Arquivo contendo coordenadas 3D de objeto em três dimensões

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis.”

Fernando Sabino

“A vida não dá e nem empresta, não se comove e nem se apieda. Tudo quanto ela faz é retribuir e transferir aquilo que nós lhe oferecemos.”

Albert Einstein

“Se as pessoas soubessem o quão duramente eu trabalhei para obter a minha habilidade, ela não pareceria tão maravilhosa depois de tudo.”

Michelangelo