



**Manuel Eduardo Loaiza Fernández**

**Implementação de um Dispositivo de Rastreamento Óptico  
com 6 Graus de Liberdade para Interação com Aplicações  
de Realidade Virtual**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Marcelo Gattass  
Co-orientador: Prof. Alberto Barbosa Raposo

Rio de Janeiro, abril de 2005



**Manuel Eduardo Loaiza Fernández**

**Implementação de um Dispositivo de Rastreamento Óptico  
com 6 Graus de Liberdade para Interação com Aplicações  
de Realidade Virtual**

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

**Marcelo Gattass**

Orientador

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Alberto Barbosa Raposo**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Bruno Feijó**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Paulo Cezar Pinto Carvalho**

Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA)

**Waldemar Celes Filho**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 1 de abril de 2005

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

### **Manuel Eduardo Loaiza Fernández**

Graduou-se em Engenharia de Sistemas na Faculdade de Produção e Serviços da Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa - Perú em 2002. Atualmente tem continuado com a linha de pesquisa sobre Computação Gráfica com ênfase na Área de Realidade Virtual.

#### Ficha catalográfica

Loaiza Fernández, Manuel Eduardo

Implementação de um dispositivo de rastreamento óptico com 6 graus de liberdade para interação com aplicações de realidade virtual / Manuel Eduardo Loaiza Fernández; orientador: Marcelo Gattass; co-orientador: Alberto Barbosa Raposo. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Informática, 2005.

105 f. : il. ; 30 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Realidade virtual. 3. Rastreamento óptico. 4. Visão computacional. 5. Processamento de imagens. I. Gattass, Marcelo. II. Raposo, Alberto Barbosa. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. IV. Título.

CDD: 004

Aos meus pais Eduardo e Violeta, aos meus avós Clotilde, Edgar e Blanca, e a  
minha esposa Mayra.

## **Agradecimentos**

A Deus, por ter me dado a vida e a força necessária para continuar cada dia com o mesmo entusiasmo e dedicação.

Aos meus pais, Eduardo e Violeta e meus avós, Clotilde, Edgar e Blanca, pelo amor e exemplo de vida que me deram e que sempre lembro em todos os momentos da minha vida.

A minha noiva e agora minha esposa, Mayra, pela paciência tida neste dois últimos anos.

Aos meus tios Oscar, Milar, Enrique, Cira, Frida, Marlene, Gloria e Digber pelos conselhos e ajuda que recebi deles.

Aos meus irmãos, Luis e Marizze, por todo o carinho e ânimos que me deram durante estes dois anos.

Aos meus orientadores Marcelo Gattass e Alberto Barbosa Raposo, pela confiança depositada no meu trabalho e por todos os ensinamentos repassados ao longo dos anos. Agradeço-lhes profundamente por seu apoio e amizade.

Ao Tecgraf pela ajuda técnica que me permitiu crescer profissionalmente e desenvolver esta dissertação.

Aos meus amigos, Romano, Gustavo, Felipe, Marcio, Thiago, Eduardo Thadeu, Nicolao, Lula e Junior por terem me presenteado com suas amizades e apoio durante o desenvolvimento desta dissertação.

À CAPES que me propiciou a bolsa de estudo fundamental para a realização desse trabalho.

E finalmente, a todas as pessoas que não foram mencionadas, mas que foram importantes em algum momento da minha vida.

## Resumo

Loaiza Fernández, Manuel Eduardo. **Implementação de um Dispositivo de Rastreamento Óptico com 6 Graus de Liberdade para Interação com Aplicações de Realidade Virtual**. Rio de Janeiro, 2005. 105p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas de rastreamento são uma das tecnologias cruciais para os sistemas de realidade virtual. Eles permitem detectar continuamente a posição e orientação de marcadores ou objetos específicos que o usuário utiliza para interagir com o sistema. Uma das tecnologias mais utilizadas para implementar este tipo de sistema é o rastreamento óptico, a qual permite ao usuário ter maior liberdade em seus movimentos porque não precisa de cabos ou elementos mecânicos que possam restringir ou atrapalhar a sensação de imersão que se tenta criar na interação com ambientes de realidade virtual. Este trabalho apresenta a construção e implementação de um dispositivo de entrada, baseado em rastreamento óptico, que é utilizado para interação com aplicações de realidade virtual do tipo semi-imersivas em um ambiente desktop comum. O dispositivo tem a capacidade de recuperar seis graus de liberdade dos movimentos feitos por um conjunto de marcadores que são controlados pela mão do usuário. A partir da recuperação dos seis graus de liberdade, o dispositivo é complementado com a capacidade de emissão de eventos que permitem a interação do usuário com a aplicação. No final apresenta-se uma aplicação que demonstra a adaptação dos eventos gerados e o desempenho do dispositivo implementado.

## Palavras-chave

Realidade virtual, rastreamento óptico, visão computacional, processamento de imagens.

## **Abstract**

Loaiza Fernández, Manuel Eduardo. **Implementation of an Optical Tracking Device with 6 Degrees of Freedom for Interacting with Virtual Reality Applications.** Rio de Janeiro, 2005. 105p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tracking systems are a fundamental technology in virtual reality systems. They provide a continuous detection of the position and orientation of markers or specific objects that the user employs to interact with the system. One of the technologies most commonly used to implement these types of systems is the optical tracking, which allows the users to have more freedom in their movements because it does not need cables or mechanical elements that can restrict or hinder the immersion sensation that is tried to create in the interaction with virtual reality environments. This work presents the construction and implementation of an input device that is based on optical tracking that is used for interaction with semi-immersive virtual reality applications on ordinary desktop environments. This device has the capability to get the six degrees of freedom of the movements made by a set of markers that are controlled by the user hand. Based on the six degrees of freedom recovered, the device is complemented with the ability to emit events that allow the interaction of the user with the application. Finally, an application is presented for demonstrating the use of the generated events and the performance of our device.

## **Keywords**

Virtual reality, optical tracking, computer vision, image processing.

## Sumário

1	Introdução	14
1.1.	Motivação	15
1.2.	Objetivo	16
1.3.	Organização da dissertação	17
2	Dispositivos de Rastreamento para Realidade Virtual	18
2.1.	Rastreamento Óptico	24
2.1.1.	Estratégias	27
2.1.2.	Fluxo de Processos	30
3	O Dispositivo de Rastreamento Óptico	32
3.1.	Projeto Físico do Dispositivo	32
3.2.	Processo de Rastreamento	35
3.2.1.	Processamento da Imagem e Extração de Marcadores	36
3.2.2.	Calibração de Câmeras	40
3.2.2.1.	Implementação do Método TSAI Não-Coplanar	41
3.2.2.2.	O Método TSAI Não-Coplanar	46
3.2.3.	Correlação de Marcadores	55
3.2.3.1.	Captura da Amostra de Pontos	57
3.2.3.2.	A Geometria Epipolar	59
3.2.3.3.	Estratégia para a Correlação	62
3.2.4.	Reconstrução 3D	71
3.2.4.1.	Recuperação de Dados de Entrada	72
3.2.4.2.	Método de Reconstrução	73
3.2.4.3.	Processo de Reconstrução	78
4	Extração dos 6 Graus de Liberdade e Aplicações de Teste	85
4.1.	Extração dos 6 DoF	86
4.1.1.	Translações – 3 DoF	89
4.1.2.	Rotações – 3 DoF	91

4.2. Aplicações de Teste	93
4.2.1. Aplicação de Navegação com um Robô Submarino	93
4.2.2. Aplicações Adicionais	94
4.2.2.1. PINTOR 3D	95
4.2.2.2. BRAÇO ROBÔ VIRTUAL	96
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	98
5.1. Trabalhos Futuros	99
6 Referências Bibliográficas	101

## Lista de figuras

Figura 1 : Aplicações de Realidade Virtual.	14
Figura 2 : Dispositivos especializados usados para dar imersão ao usuário	15
Figura 3 : Rastreador Eletromagnético “Flock of Birds”.	20
Figura 4 : Dispositivos mecânicos (a) “Fakespace FS2” Fakespace Systems, (b) “CyberForce ” Immersion Corporate.	21
Figura 5 : Dispositivos acústicos (a) “The Fly Mouse” Logitech, (b) “IS-900” Intersense wand.	22
Figura 6 : Dispositivo inercial, Fakespace Systems Inc “CubicMouse “.	23
Figura 7 : Dispositivo híbrido que combina rastreamento inercial e GPS, “Battlefield Augmented Reality System (BARS)”.	24
Figura 8 : Diagrama Funcional de um sistema de rastreamento óptico.	25
Figura 9 : Tipos de marcadores (a) Marcadores Esféricos, (b) Fiducial Landmarks.	26
Figura 10 : (a) Câmera adaptada com uma fonte de luz infravermelha, (b) Marcadores esféricos retrorreflexivos.	28
Figura 11 : Câmeras e fontes IR de Vicon Motion Systems.	28
Figura 12 : (a) Marcadores de papel branco, (b) Lâmpadas de luz ultravioleta.	29
Figura 13 : (a) Marcadores e fundo com cor definida, (b) Fiducial markers.	30
Figura 14 : Características comuns da arquitetura dos dispositivos comerciais e o proposto nesta dissertação.	33
Figura 15 : Dispositivo proposto nesta dissertação.	33
Figura 16 : Espaço para rastreamento da movimentação livre da mão do usuário.	35
Figura 17 : Imagens de vídeo capturadas por 3 câmeras web.	36
Figura 18 : Imagens de vídeo convertidas à escala de cinzas e processadas com filtro gaussiano de kernel 5x5.	38
Figura 19 : Imagens de vídeo convertidas em imagens binárias por filtro threshold.	39
Figura 20 : Imagem de vídeo onde se visualiza o centro dos pontos do padrão e marcadores.	40

Figura 21 : Modelo de captura da câmera pinhole.	41
Figura 22 : Câmeras web utilizadas, (a) Logitech QuickCam Pro-4000, (b) Creative WebCam Nx-Pro.	43
Figura 23 : Imagem dos eixos do sistema global de referência dentro da caixa de rastreamento.	44
Figura 24 : Imagem do padrão utilizado inicialmente.	44
Figura 25 : Imagem do padrão com a identificação dos pontos de calibração.	45
Figura 26 : Imagem que descreve a transformação entre os sistemas de coordenadas do mundo para a câmera.	47
Figura 27 : Imagem que descreve a transformação entre os sistemas de coordenadas da câmera para coordenadas da imagem.	51
Figura 28 : Descrição dos 4 passos que transformam coordenadas do mundo em coordenadas da imagem.	54
Figura 29 : Caso intuitivo.	55
Figura 30 : Caso com mais de um marcador.	56
Figura 31 : Marcador para captura da amostra.	57
Figura 32 : Pontos capturados em coordenadas 2D em cada câmera.	58
Figura 33 : Interseção entre os planos da imagem e planos gerados pela linha base.	59
Figura 34 : Figura 34: Definição de uma linha epipolar.	60
Figura 35 : Posicionamento das câmeras no dispositivo proposto.	62
Figura 36 : Planos da imagem com as câmeras posicionadas numa mesma altura.	63
Figura 37 : Planos da imagem com as câmeras posicionadas em diferentes bases, ou seja, diferentes alturas.	63
Figura 38 : O posicionamento das câmeras é em bases diferentes, ou seja, diferentes alturas.	64
Figura 39 : Geração de linhas epipolares pela câmera pivô e projetadas sobre as câmeras dos lados.	65
Figura 40 : Visualização da estratégia de círculos de restrição.	68
Figura 41 : Visualização dos índices dos marcadores de cada câmera e a correspondência encontrada para cada linha.	69
Figura 42 : Na câmera da esquerda, dois marcadores se ocultam mutuamente e	

são detectados como um só marcador.	70
Figura 43 : Reconstrução da posição 3D de cada marcador.	71
Figura 44 : (a) Matrizes de parâmetros intrínsecos, (b) parâmetros extrínsecos, (c) conversão de ponto no mundo para ponto na imagem.	72
Figura 45 : Coordenadas 2D de cada marcador em cada câmera.	73
Figura 46 : Processo geral da reconstrução.	74
Figura 47 : Visualização de todos os marcadores reconstruídos.	80
Figura 48 : Distribuição e forma definidas pelos marcadores físicos.	82
Figura 49 : Criação de combinações entre pontos candidatos.	83
Figura 50 : Candidatos 3D escolhidos no final do processo.	83
Figura 51 : Spaceball com o subsistema de eixos, definidos a partir da posição inicial da bola preta.	86
Figura 52 : Spaceball (a) 3 DoF translações ao puxar a bola preta, (b) 3 DoF rotações ao girar a bola preta.	87
Figura 53 : Conjunto de marcadores e subsistema de eixos criado pelos marcadores.	87
Figura 54 : Conjunto de marcadores em posição inicial em nosso espaço de visão.	88
Figura 55 : Distribuição do sistema do mundo.	89
Figura 56 : Dispositivo de Rastreamento Óptico. 3 DoF translações ao mover o marcador central.	89
Figura 57 : Cubo restritivo em volta do marcador central.	90
Figura 58 : Dispositivo de Rastreamento Óptico. 3 DoF rotações ao girar o subsistema de eixos.	91
Figura 59 : (a) Posição base dos marcadores, (b) Variações detectadas como rotações.	92
Figura 60 : Captura e visualização das rotações geradas.	92
Figura 61 : Aplicação do Robô Submarino	94
Figura 62 : Pintor 3D.	95
Figura 63 : Aplicação do Braço Robô Virtual controlada pela mão do usuário.	96

## Lista de tabelas

Tabela 1 : Lista de índices dos marcadores correlacionados em relação à câmera pivô.	69
Tabela 2 : Lista de índices com caso de oclusão de um marcador na câmera da esquerda.	71
Tabela 3 : Correspondência entre candidatos da câmera da esquerda e da direita com a câmera pivô.	79
Tabela 4 : Número de pontos reconstruídos entre as câmeras.	79
Tabela 5 : Número de pontos 3D candidatos finais para cada marcador.	80