



**Gabriel Tavares Malizia Alves**

**Um Estudo das Técnicas de Obtenção de Forma a  
partir de Estéreo e Luz Estruturada para Engenharia**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Professor Marcelo Gattass

Co-orientador: Professor Paulo Cezar Pinto Carvalho

Rio de Janeiro, junho de 2005



**Gabriel Tavares Malizia Alves**

**Um Estudo das Técnicas de Obtenção de Forma a  
partir de Estéreo e Luz Estruturada para Engenharia**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Informática do Departamento de  
Informática do Centro técnico e Científico da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo  
assinada.

**Prof. Marcelo Gattass**

Orientador

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho**

Co-orientador

IMPA

**Prof. Waldemar Celes Filho**

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Alberto Barbosa Raposo**

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Anselmo Antunes Montenegro**

IMPA

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico  
Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de junho de 2005

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

### **Gabriel Tavares Malizia Alves**

Graduou-se em Engenharia de Computação no Instituto Tecnológico de Aeronáutica em 2002. Continuou seus estudos no programa de Mestrado em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Durante a permanência nesta instituição, atuou em projetos voltados para a indústria do petróleo no laboratório Tecgraf.

#### Ficha Catalográfica

Alves, Gabriel Tavares Malizia

Um estudo das técnicas de obtenção de forma a partir de estéreo e luz estruturada para engenharia / Gabriel Tavares Malizia Alves; orientador: Marcelo Gattass; co-orientador: Paulo Cezar Pinto Carvalho. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Informática, 2005.

88 f. ; 30 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Luz estruturada. 3. Mapa 3D estéreo. 4. Calibração coplanar de câmera. 5. Reconhecimento de formas. I. Gattass, Marcelo. II. Carvalho, Paulo Cezar Pinto. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. IV. Título.

CDD: 004

Aos meus pais.

## Agradecimentos

A Deus, nosso Pai de amor infinito, por viver, aprender, compartilhar, errar e consertar, sempre seguindo em frente.

À minha família. Em especial aos meus pais Nelson Malizia Alves e Maria Alzemira Tavares de Oliveira. Tudo que sou e conquistei é fruto de seus muitos anos de dedicação e apoio. Se Deus concede aos pais a missão de criar os seus filhos, dando amor, educação, ensinamentos e bons exemplos para que estes tenham todas as condições para se tornarem homens de bem, então meus pais cumpriram a sua missão com louvor.

À minha namorada Maraísa Martinha Gambarra, pelo carinho e companheirismo ao longo destes dois anos juntos.

Ao meu orientador e Professor Marcelo Gattass pelos importantes conhecimentos adquiridos. Em especial pelas aulas que transmitiram grande experiência de um mestre com anos de estrada, organização e entusiasmo de quem realmente gosta do que faz.

Ao Professor Paulo Cezar Coelho, pessoa de grandes conhecimentos, pelos importantes sugestões dadas ao trabalho.

Aos Professores de Mestrado Bruno Feijó, Clarisse Sieckenius de Souza, Luiz Henrique de Figueiredo, Ruy Luiz Milidiú e Waldemar Celes Filho por tudo que aprendi ao longo destes dois anos e que certamente foi base deste trabalho e de outros.

A Anselmo Antunes Montenegro e Asla Medeiros e Sá pelas importantes contribuições dadas a este trabalho.

À CAPES pelo importante apoio financeiro e ao Departamento de Informática da PUC-RIO pela oportunidade de estudar nesta unidade que continua a estabelecer os parâmetros de excelência em ensino e pesquisa no Brasil.

Aos amigos e colegas, de mestrado e do Tecgraf, Calomeni, Felipe, Gustavo, Hedlana, Manuel, Márcio Henrique, Marcos, Michel, Rodrigo, Romano e Tiago pelos bons momentos vividos juntos, apoio e amizade.

Aos meus coordenadores do Tecgraf Alberto Barbosa Raposo, Carlos Cassino e Eduardo Thadeu Leite Corseuil pelas oportunidades de crescimento profissional, projetos desenvolvidos e conhecimentos transmitidos.

Aos amigos e irmãos da Casa Sentimento.

## Resumo

Alves, Gabriel Tavares Malizia; Gattass, Marcelo (Orientador); Carvalho, Paulo Cezar Pinto (Co-orientador); **Um Estudo das Técnicas de Obtenção de Forma a partir de Estéreo e Luz Estruturada para Engenharia**; Rio de Janeiro, 2005. 88p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Há uma crescente demanda pela criação de modelos computacionais representativos de objetos reais para projetos de engenharia. Uma alternativa barata e eficaz consiste na utilização de técnicas de Visão Computacional baseada em câmeras e projetores disponíveis no mercado de computadores pessoais. Este trabalho avalia um sistema óptico estéreo ativo para capturar formas geométricas de objetos utilizando um par de câmeras e um projetor digital. O sistema se baseia em idéias de trabalhos anteriores, com duas contribuições nesta dissertação. A primeira é uma técnica mais robusta de detecção de pontos notáveis em padrões de calibração das câmeras. A segunda contribuição consiste num novo método de ajuste de cilindros que visa aplicar o sistema estudado na inspeção de instalações de dutos industriais. As conclusões apresentadas procuram avaliar a robustez e precisão do sistema proposto como um instrumento de medidas em Engenharia.

## Palavras-Chave

Luz estruturada; mapa 3D estéreo; calibração coplanar de câmera; reconhecimento de formas.

## Abstract

Alves, Gabriel Tavares Malizia; Gattass, Marcelo (Advisor); Carvalho, Paulo Cezar Pinto (Co-advisor); **A Study of Techniques for Shape acquisition using Stereo and Structured Light aimed for Engineering**; Rio de Janeiro, 2005. 88p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

There has been a growing demand for creation of computer models based on real models for engineering projects. A cheap and effective alternative consists in using Computer Vision techniques based on cameras and projectors available at the personal computer market. This work evaluates a stereo optic system for capturing geometric shapes from objects using a pair of cameras and a single digital projector. The system is based on former works and a pair of contributions is obtained at this dissertation. The first contribution is a more robust technique for finding corners and points at cameras calibration patterns. And the second one consists on a new method for cylinder fit for inspecting industrial piping facilities with the studied system. The final conclusions evaluate the robustness and precision from the proposed system as a measurement tool for Engineering.

## Keywords

Structured light; stereo 3D map; coplanar camera calibration; shape recognition.



## Sumário

1 Introdução	14
2 Visão Computacional e Obtenção de Formas	16
2.1. Visão Computacional	16
2.2. Forma a partir de Estéreo Ativo	17
2.2.1. Codificação Temporal	20
2.2.2. Codificação Espacial	22
2.2.3. Codificação Modulada	23
2.2.4. Codificação com Cores	24
2.2.5. Classificação dos Métodos	26
2.2.6. Sistema Estudado	27
3 Sistema Estudado	29
3.1. Calibração de Câmera	29
3.1.1. Padrão com Círculos	36
3.1.2. Padrão com Vértices	39
3.2. Luz Estruturada Codificada	44
3.3. Captura e Processamento de Imagem	47
3.4. Triangulação e Modelo Final	53
4 Implementação, Resultados e Testes	58
4.1. Implementação	58
4.1.1. Shaper	58
4.1.2. Visualizer	60
4.1.3. Arquivo de Saída	61
4.2. Resultados	62
4.2.1. Padrões de Calibração	65
4.2.2. Câmeras	66
4.2.3. Projetores	67
4.3. Testes	68
4.3.1. Primeiro Teste	68
4.3.2. Segundo Teste	71
5 Conclusão	76
5.1. Trabalhos Futuros	78
6 Referências Bibliográficas	79
7 Apêndice A – OpenCV	82
8 Apêndice B – Tabelas de Dados dos Testes	85

8.1. Primeiro Teste	85
8.2. Segundo Teste	87

## Lista de Figuras

Figura 1 – Classificação dos métodos de aquisição de formas.	18
Figura 2 – Exemplo de sistema estéreo ativo capturando uma cena.	19
Figura 3 – Codificação temporal binária.	21
Figura 4 – Objeto iluminado por luz estruturada.	22
Figura 5 – Padrões de codificação espacial: (a) padrão de grid; (b) padrão com matriz codificada; (c) padrão inicial para matriz codificada.	22
Figura 6 – Padrão de luz modulada.	24
Figura 7 – Padrões com cores: (a) padrão com listras; (b) padrão arco-íris; (c) padrão periódico; (d) gráfico da intensidade das cores no padrão periódico.	25
Figura 8 – Padrão com matriz de pontos coloridos: (a) exemplo de matriz gerada; (b) problemas ocorridos na projeção do padrão.	25
Figura 9 – Disposição física do sistema estudado.	28
Figura 10 – Modelos de Câmera de Tsai.	29
Figura 11 – Relação entre coordenadas do mundo e da câmera.	30
Figura 12 – Os quatro passos do algoritmo de Tsai.	33
Figura 13 – Processo de obtenção de pontos do padrão com círculos: (a) desenho do padrão; (b) imagem capturada do padrão; (c) resultado final; (d) imagem binária; (e) bordas das componentes conexas encontradas; (f) elipses encontradas.	36
Figura 14 – Componentes conexas em uma imagem binária.	38
Figura 15 – Padrão com vértices.	39
Figura 16 – Bordas das componentes conexas da imagem capturada: (a) imagem capturada do padrão; (b) bordas obtidas.	40
Figura 17 – Vetores resultantes da soma das distâncias de um pixel aos seus vizinhos.	41
Figura 18 – Processo de obtenção dos vértices do padrão. (a) vértices identificados; (b) pontos das arestas; (c) retas encontradas e suas interseções; (d) resultado final.	42
Figura 19 – Codificação temporal de Gray.	45
Figura 20 – Distribuição Gaussiana com $\sigma = 1$ .	47
Figura 21 – Padrão e seu inverso projetados sobre objeto.	49
Figura 22 – Resultado do filtro para determinar listras projetadas.	50
Figura 23 – Captura com diferentes valores de exposição: (a) imagem do padrão; (b) imagem do padrão inverso; (c) resultado para um par de imagens; (d) imagem com alta exposição do padrão; (e) imagem com alta exposição do padrão inverso; (f) resultado para dois pares de imagens.	51
Figura 24 – Detecção e refinamento de fronteiras.	52
Figura 25 – Grupos de pixels com mesmas coordenadas codificadas.	54
Figura 26 – Triangulação e interseção de duas retas no espaço.	54
Figura 27 – Nuvem de pontos do objeto modelado.	56
Figura 28 – Modelo geométrico poligonal criado: (a) sem textura; (c) com textura.	57

Figura 29 – Janela de opções da aplicação Shaper.	59
Figura 30 – Calibração de parâmetros extrínsecos das duas câmeras.	60
Figura 31 – Modelo carregado na aplicação Visualizer.	61
Figura 32 – Modelos criados a partir de objetos reais: (a) estátua de bronze; (b) tubulação com cilindro ajustado; (c) vaso; (d) tubulação danificada.	63
Figura 33 – Nível de detalhes em modelos criados: (a) estátua de bronze; (b) estátua de bronze com menos pontos; (c) moringa; (d) moringa com menos pontos; (e) tubulação com padrões de interferência.	65
Figura 34 – Captura de fronteiras entre regiões claras e escuras: (a) fronteiras capturadas com erros; (b) fronteiras capturadas corretamente.	67
Figura 35 – Distância medida entre dois pontos no modelo.	70
Figura 36 – Cilindro parametrizado.	72

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Taxonomia para métodos de codificação de luz estruturada baseada nas suas características e restrições.	26
Tabela 2 – Taxonomia para métodos de codificação de luz estruturada baseada em transmissão de dados digitais.	27
Tabela 3 – Distâncias médias medidas utilizando-se o padrão com círculos para a calibração no primeiro teste.	69
Tabela 4 - Distâncias médias medidas utilizando-se o padrão com vértices para a calibração no primeiro teste.	71
Tabela 5 – Resultados obtidos pelos padrões de calibração no segundo teste.	74
Tabela 6 – Resultados obtidos pelo primeiro usuário no primeiro teste.	85
Tabela 7 – Resultados obtidos pelo segundo usuário no primeiro teste.	86
Tabela 8 – Resultados obtidos pelo terceiro usuário no primeiro teste.	86
Tabela 9 – Resultados obtidos para a posição A no segundo teste.	87
Tabela 10 – Resultados obtidos para a posição B no segundo teste.	87
Tabela 11 – Resultados obtidos para a posição C no segundo teste.	88