

6

Referências Bibliográficas

- 1 TRUCCO, EMANUELE; VERRI, ALESSANDRO; **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. New Jersey, EUA, Prentice Hall, 1998.
- 2 NALWA, VISHVJIT S. **A Guided Tour of Computer Vision**. EUA, Addison-Wesley Professional, 1993.
- 3 SCHARSTEIN, DANIEL; SZELISKI, RICHARD. **High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light**. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, volume 1, pp. 195-202, Madison, WI, junho 2003.
- 4 BATLLE, J; MOUADDIB, E.; SALVI, J. **Recent Progress in Coded Structured Light as a Technique to Solve the Correspondence Problem: A Survey**. Pattern Recognition 31(7), p. 963-982, 1998.
- 5 SÁ, ASLA MEDEIROS et al. **Coded Structured Light for 3D-Photography: an Overview**. Revista de Informática Teórica e Aplicada, Vol. 9, No. 2, outubro 2002.
- 6 POSDAMER, J. L; ALTSCHULER, M. D; **Surface Measurement by Space-Encoded Projected Beam Systems**. Comput. Graphics Image Process. 18, p. 1-17, 1982.
- 7 INOKUCHI, SEIJI; SATO, KOSUKI; YAMAMOTO, HIRYUKI. **Range Imaging System Based on Binary Image Accumulation**. Proc. of 8th International Conference on Pattern Recognition, p. 233-234, 1986.
- 8 INOKUCHI, SEIJI; SATO, KOSUKI; MATSUDA, FUMIO. **Range Imaging for 3D Object Recognition**. Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, p. 806-808, 1984.
- 9 LE MOIGNE, J; WAXMAN, A. **Structured Light Pattern for Robot Mobility**. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, p. 541-548, 1988.
- 10 MORITA, H; YAJIMA, K; SAKATA, S. **Reconstruction of Surfaces of 3D objects by M-array Pattern Projection Method**. Proc. of International Conference on Computer Vision, p. 468-473, 1988.

- 11 CARRIHILL, B; HUMMEL, R. **Experiments with the Intensity Ratio Depth Sensor**. Computer Vision Graphics Image Process, 32, p. 337-358, 1985.
- 12 BOYER, K; KAK, A. **Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging**. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 9, Issue 1, p. 14-28, 1987.
- 13 TAJIMA, J; IWAKAWA, M. **3-D Data Acquisition by Rainbow Range Finder**. Proc. International Conference on Pattern Recognition, p. 309-313, 1990.
- 14 WUST, C; CAPSON, D. **Surface Profile Measurement Using Color Fringe Projection**. Machine Vision and Applications, Vol. 4, Issue 3, p. 193-203, 1991.
- 15 GRIFFIN, P. M.; NARASIMHAN, L. S.; YEE, S. R. **Generation of Uniquely Encoded Light Patterns for Range Data Acquisition**. Pattern Recognition 25, Vol. 6, p. 609-616, 1992.
- 16 HALL-HOLT, O; RUSINKIEWICZ, S. **Stripe Boundary Codes for Real-Time Structured-Light Range Scanning of Moving Objects**. ICCV, p. 13-19, 2001.
- 17 TSAI, ROGER Y. **An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision**. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, p. 364-373, 1986.
- 18 TSAI, ROGER Y. **A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Cameras and Lenses**. IEEE Journal, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, agosto 1987.
- 19 ZHANG, ZHENGYOU. **A Flexible New Technique for Camera Calibration**. Microsoft Research. Technical Report MSR-TR-98-71, dezembro 1998. Disponível em: <<http://research.microsoft.com/~zhang>>. Acesso em: 13 jul. 2004.
- 20 SZENBERG, FLÁVIO. **Acompanhamento de Cenas com Calibração Automática de Câmeras**. Tese de Doutorado, Departamento de Informática, PUC-RIO, 2001.
- 21 UMBACH, DALE; JONES, KERRY N. **A Few Methods for Fitting Circles to Data**. Não publicado, 2000. Disponível em: <<http://www.cs.bsu.edu/hompages/kerryj/kjones/circles.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2005.
- 22 HEATH, F. G. **Origins of the Binary Code**. Scientific American Vol. 227, No. 2, agosto 1972.

- 23 MAGACHO, ROMANO J. **Integração de um Dispositivo Óptico de Rastreamento a uma Ferramenta de Realidade Virtual**. Tese de Mestrado, Departamento de Informática, PUC-RIO, 2004.
- 24 RADEMACHER, PAUL; STEWART, NIGEL. **GLUI User Interface**. Disponível em: <<http://www.nigels.com/glt/glui>>. Acesso em: 13 jul. 2005.
- 25 SCURI, ANTÔNIO. **IM: Image Representation, Storage, Capture and Processing**. Disponível em: <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/im>>. Acesso em: 13 jul. 2005.
- 26 INTEL. **Intel Open Source Computer Vision Library**. Intel Research. Disponível em: <<http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv>>. Acesso em: 13 jul. 2004.
- 27 SHOEMAKE, KEN. **ARCBALL: A User Interface for Specifying Three-Dimensional Orientation Using a Mouse**. Proceedings of Graphics Interface, 1992, p. 151-156.
- 28 TEXAS INSTRUMENTS. **Digital Light Processing Technology**. Disponível em: <<http://www.dlp.com/>>. Acesso em: 13 jul. 2004.
- 29 SHREINER, DAVE et al. **OpenGL Programming Guide, Fourth Edition**. EUA, Addison-Wesley Professional, novembro 2003.
- 30 SOURCEFORGE. **Minpack**. Versão em C. Disponível em: <<http://cvs1.sourceforge.net/viewcvs.py/gretl/gretl/minpack/>>. Acesso em: 13 jul. 2005.
- 31 ZHANG, ZHENGYOU. **Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientation**. International Conference on Computer Vision (ICCV'99), Corfu, Grécia, p. 666-673, setembro 1999.

OpenCV (Intel Open Source Computer Vision Library) [26] é uma API de médio a alto nível destinada ao desenvolvimento de aplicações na área de Visão Computacional, como o nome já diz, e está disponível em versões para Windows e Unix. Contendo uma coleção de funções em C e algumas classes em C++ que implementam vários algoritmos populares de visão computacional e processamento de imagens, OpenCV é direcionado a aplicações em tempo real. Identificação de objetos, reconhecimento facial, reconhecimento de gestos e captura de movimentos são alguns exemplos de áreas que utilizam esta biblioteca.

A versão mais atual desta biblioteca é a 4.0 beta. Porém neste trabalho utilizou-se a versão 3.0 beta para Windows, que era a mais recente no começo do projeto. Esta versão já vem com documentação em HTML bastante útil, porém que pode ser melhorada em alguns pontos, principalmente no modo de uso e na descrição incompletos de algumas funções. A documentação divide a biblioteca em sete principais partes, cada uma fazendo referência a um conjunto de funções e estruturas com mesma finalidade:

- Operações e estruturas básicas.
- Processamento e análise de imagens.
- Análise estrutural.
- Análise de movimento e rastreamento de objetos.
- Reconhecimento de objetos
- Calibração de câmeras e reconstrução 3D.
- Interface gráfica e aquisição de vídeo.

A primeira parte descreve as operações e estruturas básicas, utilizadas por todas as outras funções do OpenCV. A estrutura utilizada para representar imagens é chamada de *IPLImage*, originalmente usada pela biblioteca Intel Image Processing Library. Esta estrutura é bastante detalhada e possui campos como números de canais, largura, altura, tamanho, posição da origem, matriz de dados e outros mais específicos, como máscara de cores etc. Além desta estrutura, há

estruturas representativas de pontos, retângulos, matrizes, grafos, árvores e outras estruturas dinâmicas. Como alternativa para persistência de dados, pode-se salvar uma instância de qualquer estrutura em um arquivo em formato XML e posteriormente recarregá-la. São disponibilizadas funções básicas para adicionar, subtrair, multiplicar, dividir, encontrar valor máximo e mínimo, comparar e aplicar operações lógicas entre imagens e matrizes. Há também funções específicas de matrizes e vetores como matriz transposta e inversa, produto escalar e vetorial, autovalores e autovetores de matrizes simétricas e resolver sistemas de equações lineares. Ou seja, as operações e estruturas básicas são bastante abrangentes e servem como base para diversas aplicações em diferentes etapas, desde operações com imagens até a construção de grafos complexos.

Na parte de processamento de imagens encontramos funções para suavizar, como filtro Gaussiano e filtro médio, funções para detecção de bordas e cantos, como Canny e Sobel, funções para conversão e reamostragem de imagens, como pirâmide Gaussiana, e outras funções úteis como dilatação e erosão. Há também funções para desenhar linhas, pontos, círculos, elipses, polígonos e texto em imagens. Para a parte de análise, pode-se obter uma lista de componentes conexas de uma imagem, aplicar a transformada de Hough para linhas e criação de histogramas, entre outras possibilidades.

A análise estrutural possui funções para contornos, geometria e subdivisões planares. Cálculo de perímetro e área de um contorno, feixe convexo de uma lista de pontos, teste de convexidade de um polígono e cálculo de melhor reta ou elipse utilizando o método de mínimos quadrados são exemplos de funções encontradas.

Análise de movimento e rastreamento de objetos traz métodos específicos para cálculo de fluxo óptico utilizando diferentes algoritmos, acúmulo de estatísticas de fundo, segmentação de movimento etc. Destaca-se a implementação do filtro de Kalman.

No OpenCV há duas funções para calibração de câmeras. Estas funções utilizam o algoritmo de Zhang descrito em [18] e [31]. A primeira função calibra os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera a partir de uma sequência de imagens de um padrão de calibração. A segunda função calcula apenas os parâmetros extrínsecos da câmera, utilizando uma imagem do padrão de calibração.

Por último, o OpenCV disponibiliza uma modesta interface gráfica para o desenvolvimento de aplicações, permitindo a criação de janelas e outras poucas opções. É possível carregar e salvar imagens facilmente em todos os formatos mais usados, como BMP, JPEG, PNG e TIFF. Na parte de vídeo, podemos obter imagens a partir de câmeras de vídeo ou arquivos AVI, bem como criar um novo arquivo AVI. Interessante destacar que há uma função que permite obter um quadro rapidamente quando há necessidade de sincronização de diferentes câmeras.

Em geral e de uma forma qualitativa, as funções são bem implementadas e muito rápidas, cumprindo o seu objetivo de servir a aplicações em tempo real.

8.1.

Primeiro Teste

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos por cada um dos três usuários que participaram do primeiro teste. Cada modelo capturado foi gerado duas vezes utilizando calibrações de câmeras distintas. O padrão um refere-se ao padrão com círculos enquanto que o padrão dois refere-se ao padrão com vértices. A coluna distância média dá o valor da média aritmética de todas as distâncias medidas pelo usuário para um dado segmento.

Segmento	Modelo Um Distância (cm)		Modelo Dois Distância (cm)		Modelo Três Distância (cm)		Distância Média (cm)
	Padrão Um	Padrão Dois	Padrão Um	Padrão Dois	Padrão Um	Padrão Dois	
$\overline{0\ 1}$	20,988	21,086	20,988	20,884	21,083	21,013	21,007
$\overline{2\ 7}$	21,074	21,024	21,074	20,962	20,963	20,980	21,013
$\overline{8\ 9}$	14,939	14,981	14,939	14,922	15,021	14,975	14,963
$\overline{10\ 11}$	14,914	14,879	14,914	14,924	14,844	14,885	14,893
$\overline{0\ 7}$	24,984	25,069	24,984	24,930	24,774	24,847	24,931
$\overline{1\ 2}$	24,830	24,870	24,830	24,853	24,954	25,051	24,898
$\overline{8\ 11}$	15,003	15,125	15,003	14,994	14,990	15,046	15,027
$\overline{9\ 10}$	14,958	14,945	14,958	14,935	15,013	15,044	14,976

Tabela 6 – Resultados obtidos pelo primeiro usuário no primeiro teste.

Segmento	Modelo Um Distância (cm)		Modelo Dois Distância (cm)		Modelo Três Distância (cm)		Distância Média (cm)
	Padrão Um	Padrão Dois	Padrão Um	Padrão Dois	Padrão Um	Padrão Dois	
$\overline{0\ 1}$	21,050	21,126	20,873	20,927	21,043	21,024	21,007
$\overline{2\ 7}$	21,084	20,989	21,105	20,929	20,882	20,963	20,992
$\overline{8\ 9}$	14,748	14,894	14,911	14,912	14,943	14,919	14,889
$\overline{10\ 11}$	14,855	14,883	14,797	14,945	14,868	14,816	14,861
$\overline{0\ 7}$	24,970	25,078	24,806	24,977	24,751	24,875	24,910
$\overline{1\ 2}$	24,896	24,865	24,920	24,899	24,920	25,032	24,922
$\overline{8\ 11}$	14,939	15,027	14,879	14,950	14,958	15,052	14,968
$\overline{9\ 10}$	14,838	14,929	14,933	14,891	14,980	15,032	14,934

Tabela 7 – Resultados obtidos pelo segundo usuário no primeiro teste.

Segmento	Modelo Um Distância (cm)		Modelo Dois Distância (cm)		Modelo Três Distância (cm)		Distância Média (cm)
	Padrão Um	Padrão Dois	Padrão Um	Padrão Dois	Padrão Um	Padrão Dois	
$\overline{0\ 1}$	21,002	21,066	20,969	20,922	21,044	21,102	21,018
$\overline{2\ 7}$	21,047	21,008	20,953	20,902	20,958	20,966	20,973
$\overline{8\ 9}$	14,929	14,868	14,914	14,991	14,929	14,993	14,937
$\overline{10\ 11}$	14,918	14,845	14,906	14,894	14,847	14,858	14,887
$\overline{0\ 7}$	25,059	25,096	24,823	24,919	24,836	24,851	24,931
$\overline{1\ 2}$	24,847	24,826	24,947	24,883	24,977	25,074	24,926
$\overline{8\ 11}$	15,033	15,035	14,909	14,977	14,900	15,013	14,978
$\overline{9\ 10}$	14,852	14,946	14,939	14,890	14,979	15,034	14,940

Tabela 8 – Resultados obtidos pelo terceiro usuário no primeiro teste.

8.2. Segundo Teste

As tabelas apresentam os resultados obtidos no segundo teste. A tubulação utilizada como modelo foi capturada em três posições diferentes, dadas pelas letras A, B e C. Para cada teste foram gerados oito modelos, modificando a posição dos padrões de calibração, calibrando novamente as câmeras e mantendo as mesmas imagens capturadas. Ajustou-se um cilindro para cada modelo criado.

Modelos	Número de Linhas	Número de Pontos	Padrão com Círculos	Padrão com Vértices
			Diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)
Modelo A1	32×32	325	149,14	150,38
Modelo A2	64×64	1233	148,94	150,26
Modelo A3	32×32	325	150,34	146,71
Modelo A4	64×64	1233	149,99	146,78
Modelo A5	32×32	325	149,19	150,45
Modelo A6	64×64	1233	148,94	150,31
Modelo A7	32×32	325	154,83	150,12
Modelo A8	64×64	1233	154,47	150,10

Tabela 9 – Resultados obtidos para a posição A no segundo teste.

Modelos	Número de Linhas	Número de Pontos	Padrão com Círculos	Padrão com Vértices
			Diâmetro (cm)	Diâmetro (cm)
Modelo B1	32×32	243	144,94	145,11
Modelo B2	64×64	883	146,73	147,84
Modelo B3	32×32	243	145,04	148,09
Modelo B4	64×64	883	147,51	151,03
Modelo B5	32×32	243	145,03	147,73
Modelo B6	64×64	883	147,71	150,47
Modelo B7	32×32	243	149,77	145,12
Modelo B8	64×64	883	152,93	147,61

Tabela 10 – Resultados obtidos para a posição B no segundo teste.

Modelos	Número de Linhas	Número de Pontos	Padrão com Círculos	Padrão com Vértices
			Diâmetro (cm)	Diâmetro (cm)
Modelo C1	32×32	343	154,42	151,31
Modelo C2	64×64	1249	153,70	150,62
Modelo C3	32×32	343	154,77	155,52
Modelo C4	64×64	1249	154,33	155,39
Modelo C5	32×32	343	152,63	152,09
Modelo C6	64×64	1249	152,06	151,51
Modelo C7	32×32	343	154,89	152,05
Modelo C8	64×64	1249	154,43	151,43

Tabela 11 – Resultados obtidos para a posição C no segundo teste.