

# REGISTRO DE SECÇÕES SERIADAS USANDO A TRANSFORMADA GENERALIZADA DE HOUGH.

JOSÉ EDUARDO. C. CASTANHO <sup>1</sup>

RENATO LUPPI <sup>2</sup>

OLGA REGINA P. BELLON <sup>3</sup>

<sup>1</sup>UNESP - FET - DETE

Cx. Postal 473

17033-360, Bauru, S.P.

<sup>2</sup>UNICAMP - FEE - DCA .Cx. Postal 6101

13081 Campinas, S.P.

<sup>3</sup>UFPR - Dept. de Informática .Cx. Postal 19081

81531-970 Curitiba, P.R.

**ABSTRACT:** The use of Generalized Hough Transform to register images of serial cross sections is presented. The GHT enables the implementation of an automatic registration method, which is useful when dealing with a great number of images for purposes of 3D reconstruction and visualization.

## I - INTRODUÇÃO:

A reconstrução tridimensional de objetos cujos cortes foram obtidos por seccionamento físico (usual nos estudos biológicos) apresenta dificuldades decorrentes do desalinhamento ou falta de registro entre as imagens de secções adjacentes. O registro das imagens, nestes casos, tem sido feito de modo manual, resultando em trabalho intensivo e inviabilizando algumas aplicações que demandam o tratamento de grande número de secções. O processo de registro pode ser descrito como sendo a determinação da transformação que faz com que duas imagens, tomadas sob situações diferentes, coincidam quanto à orientação e posição e é, geralmente, tratado como um problema de minimização das distâncias entre elementos característicos correspondentes das duas imagens. Para o registro de imagens neste tipo de aplicação, duas correntes são identificadas na literatura:

1. Uso de marcas fiduciais: baseia-se na introdução de pinos, antes do seccionamento, de forma a gerar pontos fiduciais conhecidos. Métodos semi-automáticos para identificação das marcas fiduciais e determinação do registro entre imagens são citados na literatura [1], [2]. Este processo apresenta algumas restrições: a) a introdução dos pinos pode ocasionar distorções no

objeto em estudo; b) marcas fiduciais grandes podem não ser adequadas para o registro preciso entre as imagens; c) existem casos em que não é possível o uso de marcas fiduciais.

2. Uso de pontos característicos da imagem para determinação das transformações de rotação, translação e escala. Exemplos de pontos característicos da imagem são o centróide e raio médio ponderado [3]. Estes pontos sofrem a mesma transformação dos pontos da imagem e, portanto, podem ser utilizados para a determinação da transformação. Este método não exige a preparação do objeto, trabalha sobre a imagem ou seu contorno e portanto pode ser automatizado [4]. Entretanto, não pode ser empregado em objetos que sofram deformações grandes e/ou nas quais os pontos característicos usados não sofram as mesmas transformações.

As imagens de secções seriadas apresentam grande dificuldade no registro porque suas estruturas e seus contornos podem variar muito de secção para secção. Estas mudanças podem ser acentuadas quando secções intermediárias são eliminadas por causa de perdas ou redução da quantidade de dados a ser processada. Como consequência não existe um casamento perfeito entre os pontos característicos mas apenas uma aproximação,

uma vez que o registro é feito, na verdade, entre objetos diferentes.

Fica em aberto, assim, a determinação de um método que seja suficientemente preciso e que apresente características adequadas para sua implementação automatizada.

Neste trabalho propõe-se avaliar os resultados obtidos pela utilização da Transformada Generalizada de Hough (TGH) [5], [6], [7], para o registro das imagens e como forma de automatização do processo de alinhamento para reconstrução tridimensional. A Transformada Generalizada de Hough é usualmente utilizada para a detecção, reconhecimento ou registro de instâncias de um modelo nas imagens. Davis [8] mostra a utilização da TGH no registro dos relevos de um terreno em imagens tomadas sob pontos de vista diferentes. Seu trabalho se concentra, entretanto, na demonstração da implementação hierárquica da transformada sem dar ênfase a qualidade dos resultados do registro. Além disso, as imagens tratadas não apresentam deformações, apenas diferenças devido aos pontos de tomada.

Para se atingir o objetivo proposto, o algoritmo para TGH foi implementado com modificações para minimizar alguns problemas da implementação clássica. Os resultados obtidos por este processo foram comparados com os resultados obtidos pelo registro manual das mesmas imagens.

## II. A IMPLEMENTAÇÃO DA TGH.

A transformada de Hough foi inicialmente proposta como um método para a detecção de retas e curvas descritas analiticamente [9], [10], [11]. Posteriormente, Merlim e Faber [5] e, de uma maneira mais prática, Ballard [6], ampliaram o conceito básico do algoritmo para a detecção de formas arbitrárias quaisquer, não descritas analiticamente. A formulação da TGH não será aqui apresentada, visto ser a mesma exaustivamente discutida na literatura [7].

De maneira geral, a TGH é aplicada entre um modelo e elementos da imagem. Entretanto, na aplicação presente, não existe um modelo previamente estabelecido e devem-se adotar elementos existentes em uma das imagens para esse fim. Para o registro de duas secções é suficiente a utilização dos pontos de borda externa, embora outros elementos possam ser usados. A implementação foi realizada considerando os passos relacionados a seguir:

- 1 - *Pré-processamento para segmentação e identificação dos contornos  $C_i$  e  $C_{i+1}$  que caracterizam um par de secções.*
- 2 - *Elaboração de uma tabela de vetores que descreve o contorno  $C_i$*

3 - *Aplicação da Transformada Generalizada de Hough sobre o contorno  $C_{i+1}$ .*

4 - *Busca no espaço Hough para detecção do pico que identifica a secção e seus parâmetros de translação e rotação.*

5 - *repetem-se os passos 3 e 4 até a resolução desejada.*

6 - *Incrementa  $i$ .*

7 - *Retorna ao passo 1 se ainda existem imagens para serem analisadas.*

A primeira etapa do processo consiste na detecção de bordas nas imagens das secções e na identificação da borda externa da primeira secção. Essa borda então é tomada como sendo um padrão a ser buscado nas imagens seguintes. Na implementação realizada, isto é feito com a binarização da imagem segundo um limiar adequado, obtido iterativamente, e com a geração da descrição dos contornos da imagem em código cadeia. A partir do código cadeia é possível realizar-se facilmente a classificação dos contornos e a identificação daquele que melhor descreve a secção.

O segundo passo do processo consiste na construção da tabela para representação dos cortes na forma propícia para a implementação da transformada de Hough, ou seja, na forma de vetores. Para redução do custo computacional, foi realizada uma amostragem ao longo do contorno, reduzindo-se assim o número de pixels para a formação da tabela de vetores. A frequência de amostragem é um compromisso entre desempenho computacional e precisão na descrição da forma e, conseqüentemente, na precisão dos resultados. Para fins práticos, formas bem comportadas, isto é, pouco complexas e com pouca deformação, podem sofrer uma amostragem mais espaçada. Para a implementação da etapa de acumulação, optou-se por realizar um algoritmo do tipo adaptativo, semelhante ao apresentado por Illingworth [12].

A implementação clássica da TGH apresenta alguns problemas que dificultam sua utilização prática [13]. Tais problemas são: 1) Vetores similares de parâmetros resultam em acumulação de células diferentes devido a erros de quantização; 2) Para um grande número de parâmetros o espaço Hough necessário se torna muito grande, tornando difícil a busca e identificação de clusters; 3) A probabilidade de surgimento de falsos clusters devido a existência de ruído na imagem é muito alta; 4) O alto custo computacional.

Na presente implementação da TGH, apenas o primeiro problema é agravado devido à inevitável dissimilaridade entre as formas. Este problema freqüentemente é resolvido, nas aplicações usuais, pela determinação dos picos dentro de uma vizinhança de células ou pela acumulação de uma vizinhança de células ao invés de apenas uma. Ambos os métodos

conduzem a resultados semelhantes, como demonstra Ballard [6]. Obviamente, neste caso, à medida que a dissimilaridade entre as formas aumenta, há um agravamento do problema pois o erro na determinação da célula a ser acumulada aumenta.

Entretanto, pelas características próprias da aplicação, é possível minimizar os outros problemas. Em primeiro lugar, pode-se trabalhar apenas com os contornos dos objetos de interesse, previamente segmentados e separados da imagem original. Esse procedimento praticamente elimina o aparecimento de clusters falsos devido a completa ausência de ruído na imagem e, principalmente, assegura a formação de um único cluster, tornando inequívoca a sua identificação pela busca da máxima acumulação no espaço de parâmetros. Isto é possível porque não se pretende determinar a existência ou identificar diversas instâncias de um mesmo objeto em uma imagem, mas sim determinar a função de transformação entre dois objetos previamente identificados. Em segundo lugar, ao reduzir-se a imagem apenas aos pixels que compõem o contorno da secção, consegue-se obter um certo controle da posição dos objetos na imagem e, dessa maneira, é possível limitar a faixa de valores dos parâmetros no espaço Hough. Reduz-se, assim, simultaneamente, a quantidade de memória utilizada e o tempo de processamento.

#### IV - COMENTÁRIOS E RESULTADOS.

Para teste e avaliação do algoritmo foram usadas 18 secções obtidas pelo seccionamento de um pimentão, escolhido para teste por ter em suas bordas formas côncavas e convexas e uma variação acentuada longitudinalmente. Cada corte foi realizado a uma distância de aproximadamente 5mm um do outro. A tabela 1 apresenta os valores de rotação obtidos para cada par de secções através do método aqui descrito e os valores obtidos por registro manual baseado em marcas feitas no corpo do pimentão antes do seccionamento. A primeira coluna indica as secções entre as quais os valores de transformação se referem, ou seja, a transformação entre as duas secções.

Algumas considerações devem ser feitas relativamente aos resultados obtidos. Primeiro, os valores obtidos manualmente possuem um erro associado de difícil quantificação. Este erro advém da própria natureza manual do processo, caracterizado pela dificuldade de obtenção das coordenadas das marcas de referência e da própria imprecisão da colocação destas no pimentão. Segundo, os pontos tomados como referência para determinação das transformações são diferentes em cada processo (manual e automático). No processo manual são

| secções<br>i - (i+1) | ângulo<br>manual | ângulo<br>(TGH) | erro   |
|----------------------|------------------|-----------------|--------|
| 1-2                  | -115             | -119            | 4      |
| 2-3                  | 172              | 186             | -14    |
| 3-4                  | 5,9              | 9               | -3,1   |
| 4-5                  | -24,6            | -19             | -5,6   |
| 5-6                  | 6,5              | 7               | 0,5    |
| 6-7                  | -30,9            | -31             | 0,1    |
| 7-8                  | 23,2             | 20              | 3,2    |
| 8-9                  | -18,3            | -24             | 5,7    |
| 9-10                 | 192,0            | 193             | 1,0    |
| 10-11                | -169,5           | -169            | 0,5    |
| 11-12                | 163,1            | 166             | -2,9   |
| 12-13                | -199,3           | -195            | 4,3    |
| 13-14                | 274,4            | 297             | -22,6  |
| 14-15                | -7,9             | -5              | 12,9   |
| 15-16                | -325,0           | -324            | -1,0   |
| 16-17                | 20,6             | 266             | -245,4 |
| 17-18                | 288,9            | 292             | -3,1   |

Erro médio quadrático = 4,7 (obtido utilizando 13 valores de melhor comportamento, portanto excluídas as rotações 1-2, 2-3, 13-14 e 16-17). Ângulos e erros em graus.

**Tabela 1** - Diferença entre ângulos de rotação medidos manualmente e os ângulos obtidos através da Transformada de Hough

utilizadas marcas (grosseiras) nas secções do pimentão e no segundo são tomados pontos aleatórios nas bordas. Como as bordas são obtidas através de simples binarização da imagem, os valores obtidos são fortemente dependentes do limiar de corte. Este resultado poderia ser melhorado pela obtenção dos pixels de borda através de algoritmos mais precisos, como os operadores de Canny [14]. Finalmente, deve-se ressaltar que os resultados de transformação, com a TGH, são dependentes da taxa de amostragem realizada sobre o contorno.

Observando-se os valores de erro obtidos podemos perceber que o erro se mantém baixo para a maioria das transformações. Alguns valores, entretanto, são bastante altos e são consequência, principalmente, da grande variação de forma entre uma secção e a seguinte. Em geral, quanto maior a diferença de formato e escalamento entre uma secção e outra, maior é o erro obtido com a TGH.

Como observado acima, a deformação das fatias é, neste tipo de aplicação, o fator responsável pela introdução de imprecisão no método. Apesar disso, é bastante comum que as deformações apresentem certos padrões. Alguns destes poderiam ser descritos como: achatamento ou alongamento da forma, expansão ou contração, esparramamento, etc. Estas deformações são típicas tanto em objetos naturais como nos artificiais. A identificação do tipo de deformação presente pode ser útil na elaboração de modificações para o método apresentado, de tal maneira que haja uma compensação às deformações. Por exemplo, formas que apresentam expansões ou contrações podem ser tratadas como se fossem escalamentos. Isto pode ser realizado pela

adição de um parâmetro de escalamento no espaço Hough. Assim, a variação do escalamento seria compensada pela deformação da secção e os resultados corretos de translação e rotação seriam obtidos. Um caso de difícil solução pela utilização da TGH é quando as secções sofrem deslocamentos laterais, ou escorregamentos laterais (por exemplo, um cone inclinado). Neste caso, a solução obtida produzirá uma reconstrução 3D alterada do corpo e outros métodos devem ser empregados.

Deve-se notar que, na medida em que o resultado da transformada de Hough é dependente da moda estatística, o valor obtido será consequência da contribuição do maior número de pontos que satisfaçam o modelo. Se estes pontos, que casam com o modelo, estão uniformemente distribuídos ao longo do contorno da secção, então o resultado será em geral correto. Caso os pontos se concentrem em um determinado trecho do contorno, então o resultado será um deslocamento dos parâmetros de transformação na direção deste trecho. Ou seja, a secção transformada para alinhamento tende a encostar no lado da curva que contribui mais para a formação do pico. Este resultado será ou não válido dependendo do objeto sendo tratado.

Fica em aberto para discussão a determinação de um método para a validação dos resultados obtidos com a transformação, ou seja, uma medida que informe o quanto o resultado obtido é preciso.

#### IV - CONCLUSÕES

Foi demonstrado neste trabalho a viabilidade do emprego da Transformada de Hough como método para registro e alinhamento de uma seqüência de cortes de um objeto para fins de reconstrução e visualização. O método apresentado permite uma implementação automática de todo o processo de registro, permitindo sua utilização em grande número de imagens. Além disso, o método é imune a grandes variações em uma pequena quantidade de pixels, apresentando nesses casos melhores resultados que métodos baseados na minimização quadrática. Através do pré-processamento da imagem foi possível se evitar alguns dos problemas mais comuns da TGH.

Foram sugeridas modificações da TGH para atacar convenientemente casos particulares destas deformações, que não permitem o uso da implementação clássica da TGH para a solução do problema de registro.

#### IV - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1 - J. S. Prothero and J. W. Prothero. "Three-dimensional reconstruction from serial

sections". *Comput. Biomed. Res.* 19, 1986, 361-373.

2 - A. W. Toga and T. I. Arnica. "Image analysis of brain physiology". *IEEE Comput. Graphics Applications* 5, No 12, 1985, 20-25.

3 - Mitchie and J. K. Argyawal. "Contour Registration by shape-specific points for shape matching". *Comput. Vision Graphics Image Processing*.

4 - Merickel, Michael. "3D Reconstruction: The Registration Problem". *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 42, 206-219. 1983.

5 - P. M. Merlin and D. J. Farber, "A parallel mechanism for detecting curves in pictures" *IEEE T-COMP.* 24, 96-98. (1975).

6 - D. H. Ballard. "Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes". *Pattern Recognition* Vol. 13, No.2, pp. 111-122, 1981.

7 - J. Illingworth and J. Kittler. "Survey of the Hough Transform." *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 44, 87-116, (1988).

8 - Larry S. Davis. "Hierarchical Generalized Hough Transforms and Line-Segment Based Generalized Hough Transforms". *Pattern Recognition* vol. 15, No 4, pp. 277-285, 1982.

9 - P. V. C. Hough. "A method and means for recognizing complex patterns", U.S. Patent 3,069,654.

10 - R. D. Duda, and P. E. Hart. "Use of the Hough Transform to detect lines and curves in pictures", *CACM* 15, 11-15.

11 - C. Kimme, D. H. Ballard, and J. Sklansky. "Finding circles by an array of accumulators". *CACM* 18, 120-122.

12 - J. Illingworth and J. Kittler. "The Adaptive Hough Transform". *IEEE PAMI*, vol9, no 5, September 1987.

13 - W. Eric L. Grimson, and Daniel P. Huttenlocher. "On the sensitivity of the Hough Transform for Object Recognition". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, No. 3, March 1990.

14 - Canny, J. F., "A Computational Approach to Edge Detection", *IEEE PAMI*, vol. 8, pp. 679-698, 1986.