

Hough-Circles: Um Módulo de Detecção de Circunferências para o ImageJ

Hemerson Pistori^{1*}, Jeferson Pistori¹ e Eduardo Rocha Costa

¹ Grupo de Pesquisa em Engenharia e Computação (GPEC)
Universidade Católica Dom Bosco
Caixa Postal 100, Av. Tamandaré, 6000
79117-900 Campo Grande, MS, Brasil

pistori, jpistori@ucdb.br

Abstract. *The paper presents a circumference recognition software, based on Hough transforms, that has been included in the ImageJ open-source package, as a plugin. Hough transforms are largely used in digital image processing to recognize simple geometrical entities, like lines, circles and ellipses. The software presented here has been used, primarily, as a pupil tracking module in a computer vision system for human-machine interaction based on eye-gaze interpretation.*

Resumo. *Este artigo apresenta a implementação de um detector de circunferências, baseado em transformadas de Hough, que foi incluído no conjunto de módulos (plugins) do software livre ImageJ, de processamento e análise de imagens. As transformadas de Hough são utilizadas, principalmente, no reconhecimento de objetos com contorno geométrico simples, como retas, circunferências e elipses. O detector aqui apresentado foi utilizado, inicialmente, para detectar as pupilas humanas em um sistema de visão computacional para comunicação homem-máquina baseada na direção do olhar.*

1. Introdução

A transformada de Hough, em sua forma original, é conhecida desde os anos 60 [Hough, 1959, Hough, 1962, Kimme et al., 1975]. Técnicas baseadas nessa transformada tem sido aplicadas, desde então, na solução de problemas envolvendo a detecção e o reconhecimento de formas geométricas em imagens digitais [McLaughlin, 1998, Grimson and Huttenlocher, 1990]. A abrangência da técnica de Hough pode ser ilustrada através de alguns trabalhos recentes, que incluem a eliminação de objetos espúrios, como rastros de aeronaves e satélites artificiais, em imagens astronômicas [Storkey et al., 2004]; o reconhecimento de tumores na região da aorta em imagens de ecoendoscopia e a detecção da região dos olhos para identificação da direção do olhar em sistemas de interação homem-máquina [Toennies et al., 1998, Pistori et al., 2003].

Neste artigo serão apresentados, de maneira bastante didática, os conceitos centrais da transformada de Hough, juntamente com um implementação de um detector

*Apoiado pela Universidade Católica Dom Bosco

de circunferências baseado nessa transformada. Essa implementação, com o nome de *Hough-Circles*, foi selecionada para compor o conjunto de módulos alternativos do pacote livre ImageJ¹, mantido pelo *Research Service Branch* do prestigiado NIH (*National Institute of Health*). O ImageJ é um software de apoio ao desenvolvimento de sistemas de processamento de imagens digitais [Abramoff et al., 2004]. O *Hough-Circles* também está incluído na plataforma SIGUS [Pistori and Pereira, 2004], um ambiente integrado para desenvolvimento de sistemas de visão computacional para comunicação homem-máquina através de sinais corporais, como movimentos de mãos e face.

Na próxima seção as transformadas de Hough serão introduzidas. Em seguida, será apresentada a implementação para detecção de circunferências que foi incluída no conjunto de módulos do ImageJ. Por fim, serão relatadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2. Transformadas de Hough

O problema da detecção de circunferências com raio fixo consiste em determinar quais os pontos de uma imagem pertencem a uma mesma circunferência de raio r . Ou seja, tem-se um conjunto de coordenadas (x, y) e pretende-se encontrar valores possíveis para os parâmetros (x_c, y_c) , correspondentes aos pontos centrais de circunferências. Para isso, constroi-se um *espaço de Hough*, que para o caso específico, pode ser visto como uma matriz, com a mesma dimensão da imagem digital, em que as colunas e linhas representam, respectivamente, os possíveis valores de x_c e y_c . Cada célula dessa matriz recebe, inicialmente, o valor zero, e para cada ponto (x, y) da imagem, incrementa-se no espaço de Hough, todas as células (x_c, y_c) representando centros de circunferências, de raio r , que passam por (x, y) . Ao final, as células contendo os valores mais altos indicarão os centros “mais prováveis” de circunferências.

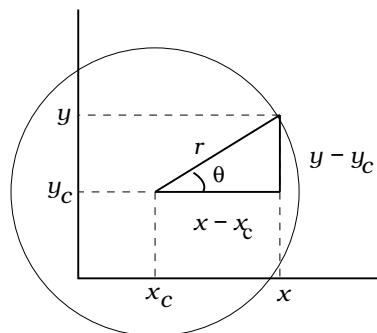


Figura 1: Circunferência de raio r e centro x_c, y_c

Para calcular todos os valores de (x_c, y_c) para um determinado ponto (x, y) , geralmente não se utiliza a equação 1, pois sua parametrização em função de x_c e y_c não produz, diretamente, implementações eficientes.

$$r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \quad (1)$$

¹<http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/>

A fórmula mais utilizada é baseada em uma representação em coordenadas polares. É fácil perceber, através da Figura 1, e utilizando conceitos elementares de trigonometria ², que as duas equações seguintes são válidas:

$$x_c = x - r * \cos(\theta) \quad (2)$$

$$y_c = y - r * \sin(\theta) \quad (3)$$

Algoritmo 1 Criação do espaço de Hough

entrada: Matriz I , $n \times m$, representando a imagem binarizada.

saída: Matriz H , com o mesmo tamanho da imagem, representando o espaço de Hough.

```

1: para  $x = 0$  até  $n$  faça
2:   para  $y = 0$  até  $m$  faça
3:     se  $I(x, y) = 255$  então
4:       para  $\theta = 0$  até  $2 * \pi$  faça
5:          $x_c = x - r * \cos(\theta)$ 
6:          $y_c = y - r * \sin(\theta)$ 
7:          $H(x_c, y_c) = H(x_c, y_c) + 1$ 
8:       fim para
9:     fim se
10:   fim para
11: fim para

```

O algoritmo 1 mostra como um espaço de Hough, H , pode ser criado a partir de uma imagem digital, I . Depois que o espaço é criado, a detecção de circunferências passa a ser um problema simples de se encontrar pontos de máximo no espaço de Hough. É importante notar que o conceito de transformada de Hough aplica-se somente quando é possível se distinguir, na imagem original, os pontos pertencentes ao contorno, ou borda, dos objetos. O algoritmo 1 assume então que imagem é previamente processada através de um filtro de detecção de borda e de um filtro de binarização (que “marca” os pixels pertencentes a uma borda com o valor 255, e todos os outros com o valor 0).

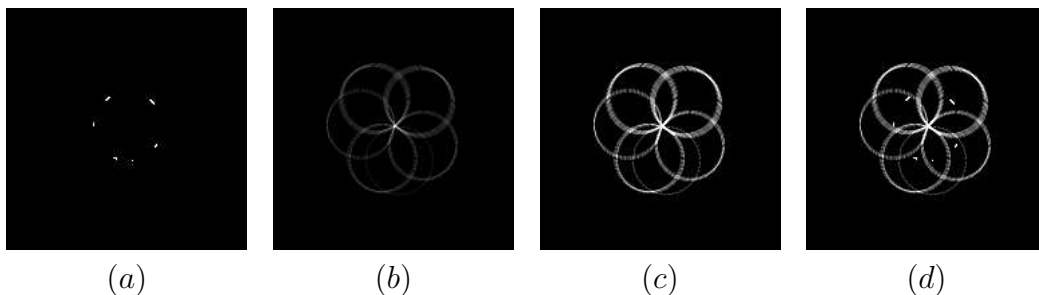


Figura 2: Exemplo de uma imagem (a), seu respectivo espaço de Hough (b), o mesmo espaço de Hough com ajuste de contraste para facilitar a visualização (c) e uma imagem composta pela adição da imagem original com o espaço de Hough (d)

²Definição de seno e cosseno em triângulos retângulos

Na Figura 2.(b) apresentamos o espaço de Hough através de uma imagem em tons de cinza, em que o brilho é diretamente proporcional ao valor acumulado em cada célula da matriz. Esse espaço de Hough corresponde à imagem contendo uma circunferência altamente corrompida, mostrada na Figura 2.(a). O espaço de Hough é apresentado também através da Figura 2.(c), em que o contraste foi realçado para facilitar a visualização das células do espaço de Hough com valores diferentes de zero. O espaço de Hough foi construído para um valor de raio igual ao raio da circunferência da imagem original. Nota-se que o valor máximo (mais claro) desse espaço coincide com o centro da circunferência presente na imagem. As outras circunferências no espaço de Hough correspondem aos centros das possíveis circunferências passando por cada um dos pontos da imagem original. Esse efeito destaca-se mais na imagem que combina o espaço de Hough com a imagem original.

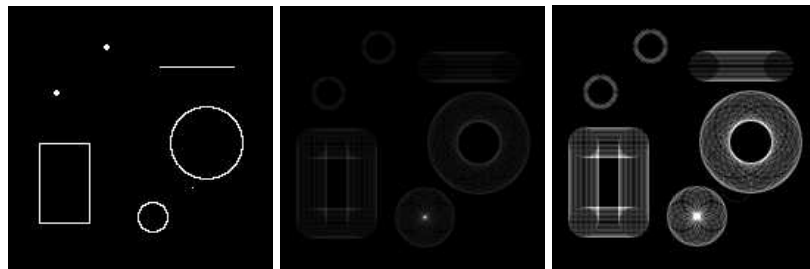


Figura 3: Exemplo de uma imagem (esquerda), seu respectivo Espaço de Hough (centro) e uma imagem composta pela adição da imagem original com o Espaço de Hough

A Figura 3 ilustra o cálculo do espaço de Hough para uma imagem contendo diversos objetos diferentes. O espaço foi calculado para um valor de raio igual ao raio da menor entre as duas circunferências da imagem à esquerda. A imagem ao centro apresenta o espaço de Hough sem ajuste de contraste, e destaca bem a relação entre o valor máximo no espaço de Hough e o centro da circunferência que se desejava detectar. À direita apresenta-se o mesmo espaço de Hough, mas com o contraste realçado. As imagens nas Figuras 2 e 3 ilustram também a influência da discretização na aplicação da transformada de Hough. Como os pontos da imagem representam apenas uma aproximação discreta de uma circunferência real, e o próprio espaço de Hough armazena apenas aproximações discretas para os possíveis centros (x_c, y_c) , não é possível obter resultados exatos utilizando esta técnica diretamente. O método, no entanto, é bastante robusto em relação a diversos tipos de ruído, comuns no processamento digital de imagens.

A extensão da técnica descrita acima, para outras figuras geométricas, é relativamente simples, e envolve a determinação de equações paramétricas para representar a figura que se deseja detectar. A quantidade de parâmetros determina a dimensão do espaço de Hough. Para aplicar a técnica na detecção de circunferências com raio arbitrário, por exemplo, seria necessária uma matriz de três dimensões (x_c, y_c, r) . Elipses arbitrárias gerariam espaços com ainda mais dimensões, inviabilizando, muitas vezes, a aplicação direta de uma extensão simples do algoritmo 1. Soluções que lidam com o problema do tamanho do espaço de Hough incluem as transformadas de Hough Probabilísticas, Aleatórias e Generalizadas [Toennies et al., 1998, McLaughlin, 1998].

3. Implementação da Transformada de Hough para Circunferências

A técnica apresentada na seção 2 foi implementada através de um módulo para o ImageJ, um software livre para apoio ao desenvolvimento de sistemas de processamento de imagens digitais. A implementação, que recebeu o nome de *Hough-Circles*, permite ao usuário escolher o raio da circunferência, a quantidade de circunferências a serem detectadas ou um limiar a ser utilizado na determinação dos pontos do espaço de Hough correspondentes aos centros de circunferências. Todas as figuras de espaços de Hough apresentadas neste artigo foram produzidas através do *Hough-Circles*.

O *Hough-Circles* implementa também duas sugestões, citadas na literatura, para melhorar o desempenho do algoritmo. Uma delas consiste em armazenar os valores de seno e cosseno, utilizados no algoritmo 1, em uma tabela de dispersão (*hash Table*). O ganho em desempenho, no tempo de processamento, ao utilizarmos essa estrutura de dados, é significativo, uma vez que os cálculos de seno e cosseno são repetidos muitas vezes (para um mesmo valor de ângulo). Como o valor de raio é fixo, armazena-se na tabela de dispersão os valores de $r * \cos(\theta)$ e $r * \sin(\theta)$.

O segundo aprimoramento, sugerido por Mark A. Schulze³, é utilizado no cálculo dos valores máximos do espaço Hough. Ao encontrar um ponto de máximo global, o algoritmo marca, além desse ponto, todos os vizinhos que se encontram a uma distância menor ou igual a metade do raio procurado. Dessa forma, os próximos pontos de máximo não incluirão aqueles pontos gerados, possivelmente, por uma mesma circunferência da imagem original, mas cuja “borda” é demasiadamente espessa, ou por problemas inerentes à discretização de números reais.

A Figura 4 mostra o resultado da aplicação do *Hough-Circles* em uma imagem de face humana. Nesse exemplo, um filtro de Canny foi utilizado para extrair as bordas da imagem, mostradas na Figura 4.(b). As Figuras 4.(c) e 4.(d) apresentam, respectivamente, o espaço de Hough e o resultado da detecção das duas circunferências, de raio 15 (em pixels), que mais se destacam no espaço de Hough.

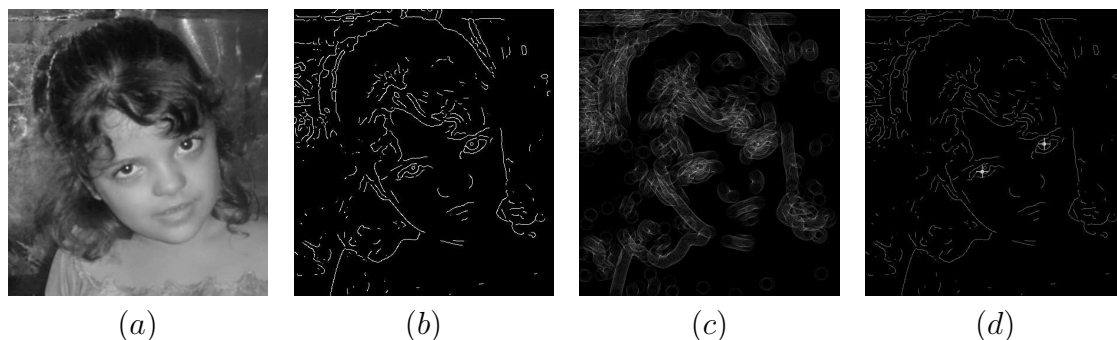


Figura 4: Imagem do rosto de uma criança (a), resultado do processamento através de um detector de bordas de Canny (b), espaço de Hough (c) e centros das duas circunferências detectadas, correspondentes ao centro das duas pupilas na imagem original (d).

³<http://www.markschulze.net/java/hough/>

4. Considerações Finais

Neste artigo, apresentou-se os conceitos fundamentais e uma implementação de um software livre que detecta circunferências de raio fixo, em imagens digitais, utilizando transformadas de Hough. Sugere-se, para o futuro, o aprimoramento dessa implementação para permitir a detecção de elipses arbitrárias, o que possibilitará uma maior flexibilidade no sistema de rastreamento, que atualmente não permite que a distância entre o objeto e a câmera sofra muita variação. Esse aprimoramento permitirá também que os objetos circulares apresentem-se em diferentes ângulos em relação ao dispositivo de captura de imagens, pois sua projeção não precisará se restringir a circunferências.

Referências

- Abramoff, M. D., Magelhaes, P. J., and Ram, S. J. (2004). Image processing with imagej. *Biophotonics International*, 11(7):36–42.
- Grimson, W. E. L. and Huttenlocher, D. P. (1990). On the sensitivity of the hough transform for object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-12(3):255–274.
- Hough, P. V. C. (1959). Machine analysis of bubble chamber pictures. In *Proceedings of the 16th International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation*.
- Hough, P. V. C. (1962). Methods and means for recognizing complex patterns. *U.S. Patent 3.069.654*.
- Kimme, C., Ballard, D., and Sklansky, J. (1975). Finding circles by an array of accumulators. *Commun. ACM*, 18(2):120–122.
- McLaughlin, R. A. (1998). Randomized hough transform: Improved ellipse detection with comparison. *Pattern Recognition Letters*, 19(3):299–305.
- Pistori, H., Neto, J. J., and Costa, E. R. (2003). Utilização de tecnologia adaptativa na detecção da direção do olhar. *SPC Magazine*, 2(2).
- Pistori, H. and Pereira, M. C. (2004). Integração dos ambientes livres weka e imagej na construção de interfaces guiadas por sinais visuais. In *Anais do V Workshop de Software Livre - WSL*, Porto Alegre, RS.
- Storkey, A. J., Hambly, N. C., Williams, C. K. I., and Mann, R. G. (2004). Cleaning sky survey databases using hough transform and renewal string approaches. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 347:36.
- Toennies, K., Behrens, F., and Aurnhammer, M. (1998). Feasibility of hough-transform-based iris localisation for real-time-application. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'02)*, volume 2, pages 299–305.