

Algoritmo Rápido para Cálculo de Centroide de Imagem com Sensores Digitais de Sol do tipo CMOS para aplicação em Pequenos Satélites

Diego A. Coutinho, Fernando F. Ramborger, Antonio A. Ferreira Junior e Evandro C. Vilas Boas

Resumo—Esse trabalho apresenta um algoritmo simples e rápido para cálculo de centroide de imagem com sensores digitais de Sol do tipo CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*). Interpreta-se a imagem como uma matriz de pixel e soma-se as intensidades de linhas e colunas, armazenando-as em vetores. Obtém-se as coordenadas do centroide (x_c , y_c) verificando o índice correspondente ao valor de maior intensidade do vetor linha e coluna, respectivamente. Comparou-se essa abordagem ao algoritmo básico para cálculo de centroide com *thresholding* em termos de tempo de processamento com redução da ordem de 58% e precisão similar.

Palavras-Chave—Algoritmo, centroide de imagem, CMOS, sensor digital de Sol.

Abstract—This work presents a fast image centroiding algorithm for CMOS-based digital sun sensors. The image is interpreted as a pixel matrix. The rows and columns pixels intensities are summed and stored in vectors. The centroid coordinates (x_c, y_c) are obtained by checking the row and column vector index-related higher pixel intensity. This approach was compared to the basic centroiding and thresholding method with a time processing reduction of 58% and similar precision.

Keywords—CMOS-based sun sensor, image centroiding algorithm, digital sun sensor.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de determinação e controle de atitude são responsáveis por determinar o sentido e a direção em que um determinado satélite se encontra. Assim como, controlar a movimentação do satélite de modo a prover o posicionamento alvo em relação à um referencial [1-3]. Nesse processo, pode-se empregar, em conjunto, sensores e atuadores. Os sensores subdividem-se em inerciais e não-inerciais. O giroscópio e o acelerômetro classificam-se como sensores de inércia, relacionando-se respectivamente à velocidade angular e à aceleração. Os sensores não-inerciais determinam a posição angular do satélite em relação à um referencial. Integram essa classe de sensores o sensor de Sol, magnetômetro, sensor de estrela e o sensor de Terra. Os atuadores se diferenciam quanto ao tipo de torque em externo (bobinas de torque magnético e propulsores) e interno (rodas de reação e giroscópio de momentum).

Diego A. Coutinho, Fernando F. Ramborger, Antonio A. Ferreira Junior e Evandro C. Vilas Boas, Laboratório de Cyber Segurança e Internet das Coisas (CS&I Lab.), Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí, e-mail: diego.anestor@gec.inatel.br, fernandoramborger@gec.inatel.br, antonioa@inatel.br, evandro.cesar@inatel.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações - Finatel.

Os sensores de Sol permitem obter o vetor de orientação do satélite (atitude) em relação ao Sol ou qualquer outra fonte de luz que simule o Sol em um ambiente controlado [4-6]. Utilizam-se relações trigonométricas para determinar os ângulos de rotação, conhecidos como ângulos de Euler, dos eixos do plano cartesiano do satélite em relação ao Sol. Dessa forma, pode-se orientar e manter o satélite inerte em uma posição previamente estabelecida por meio dos atuadores. Os sensores de Sol destacam-se por apresentar baixa complexidade e custo de projeto, *hardware* compacto e baixo consumo de energia, sendo amplamente utilizados em pequenos satélites [2]. Classificam-se esses sensores quanto à tecnologia em analógicos e digitais.

Os sensores digitais geralmente utilizam sensores de imagem CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) para a captura de imagens da radiação solar incidente [4-6]. Posiciona-se uma máscara de material opaco com uma ou múltiplas aberturas sobre o plano de detecção [4]. Os raios solares iluminam a superfície da máscara e atravessam-na por meio de abertura(s) se projetando no plano de detecção. Forma-se uma imagem do Sol, cujo centroide permite determinar os ângulos de Euler do satélite em relação ao Sol. Para isso, processa-se a imagem por meio de algoritmos para determinar com precisão as coordenadas do centroide.

Existem alguns algoritmos utilizados para o cálculo dessas coordenadas [4-6, 8-10]. Dentre eles, destaca-se o método básico para cálculo de centroide (*basic centroiding method*, BCM), que relaciona a intensidade dos pixel da imagem. Esse método pode proporcionar maior índice de erro devido à presença de ruído na intensidade dos pixel durante a formação da imagem. Logo, empregam-se algumas técnicas de pré-processamento da imagem para reduzir o ruído e prover maior precisão no cálculo do centroide. Dentre essas técnicas, citam-se o uso de limiar (*thresholding method*, TM) e a filtragem de imagem (*image filtering method*, IFM). O TM estabelece um determinado valor de intensidade como limitante para redefinir a intensidade do pixel. Se o valor for superior ao limiar preserva-se ou atribui-se um segundo valor de intensidade pré-definido. Caso contrário, considera-se a intensidade do pixel igual a zero. Essa técnica sujeita-se a menor ou maior precisão de acordo com o limiar estabelecido. Por outro lado, a filtragem implementa técnicas para remover ou mitigar o ruído relacionando a intensidade do pixel com a de seus vizinhos. Outras abordagens consideram o uso de imagens modelo e figuras geométricas como forma de reduzir o tempo de cálculo das coordenadas do centroide da imagem [5, 9].

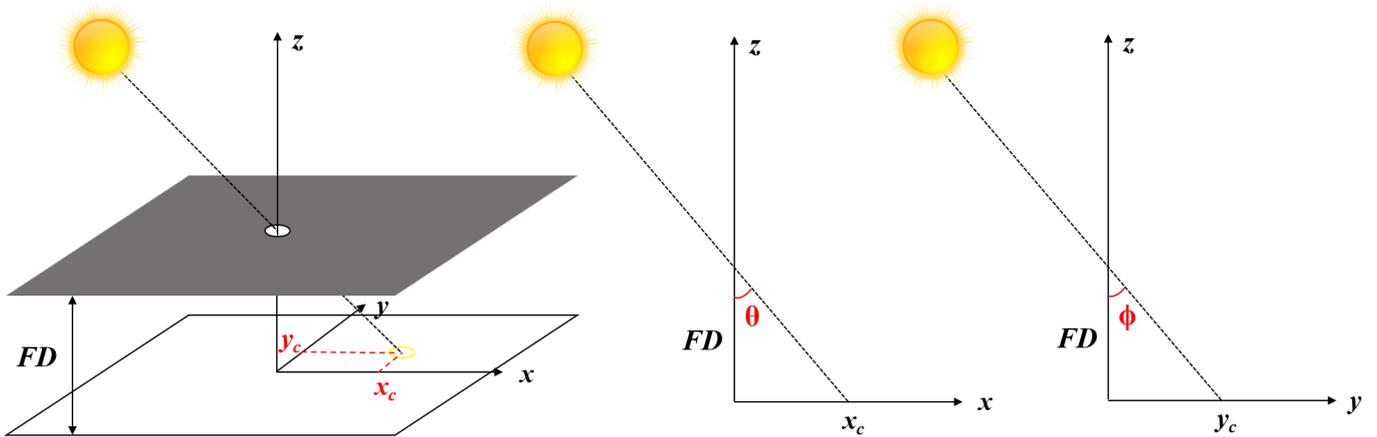


Fig. 1. Princípio de operação de sensores de Sol digitais e relações trigonométricas para cálculo de centroide de imagem.

Esse trabalho propõe uma nova abordagem para o cálculo do centroide que processa diretamente a imagem sem a necessidade de empregar técnicas de pré-processamento como as supracitadas. Obtém-se menor tempo no cálculo das coordenadas do centroide em relação ao algoritmo básico e ao uso do método de limiar (*basic centroiding thresholding method*, BCTM) com precisão similar. Organiza-se o trabalho em cinco seções. Na Seção II, discute-se o princípio de operação de sensores digitais de Sol e explicita-se o algoritmo BCTM. Apresenta-se a nova abordagem e compara-a as técnicas supracitadas em termos de precisão na Seção III. Na Seção IV, avaliam-se o tempo de processamento e cálculo dos ângulos de Euler, considerando o algoritmo BCTM e o proposto nesse trabalho. Discutem-se as principais conclusões e elencam-se trabalhos futuros na Seção V.

II. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE SENSOR DIGITAL DE SOL

Os sensores digitais de Sol integram basicamente uma máscara de material opaco e um plano de detecção [4-9]. O plano de detecção corresponde a matriz de pixel que forma a imagem da luz solar. A máscara pode conter abertura única ou múltiplas de acordo com a abordagem no cálculo e determinação das coordenadas do centroide [4]. Tem-se máscaras de abertura única e circular comumente implementada em pequenos satélites. Assim como, propostas de máscaras com múltiplas aberturas circulares. Verificam-se aberturas em formato de fendas perpendiculares posicionadas próximas ao centro ou a borda da máscara [10-12]. Esse trabalho limita-se aos sensores digitais de Sol com máscara de abertura circular única.

Nesse tipo de sensor, uma parcela dos raios solares que iluminam a superfície da máscara atravessa a abertura circular central e projeta-se sobre uma determinada região do plano de detecção com maior intensidade, como visto na Fig. 1. Por conseguinte, forma-se uma imagem da projeção da luz do Sol sobre o plano de detecção, cujas coordenadas do centroide (x_c , y_c) permitem encontrar os ângulos (θ , ϕ) de incidência dos raios solares em relação aos planos x e y , respectivamente. Entre o plano da máscara e o plano de detecção, tem-se

uma distância focal (FD). Dessa forma, aplicam-se relações trigonométricas para obter θ e ϕ , conforme indicado na Fig. 1:

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_c}{FD}\right) \quad (1)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{y_c}{FD}\right) \quad (2)$$

Em (1) e (2), considerou-se o eixo das coordenadas centralizado em relação ao plano de detecção. Por meio do cálculo desses ângulos, o sistema de determinação e controle de atitude pode ser realimentado para prover a correta orientação do satélite através dos atuadores. Portanto, torna-se necessário obter as coordenadas do centroide com boa precisão. O algoritmo básico para processamento da imagem e cálculo do centroide (BCM) é dado por [4-6]:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (3)$$

$$y_c = \frac{\sum_{j=1}^N y_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (4)$$

sendo x_i e y_j a posição de cada pixel na matriz e I a intensidade dos pixel da imagem. A precisão no cálculo desses valores relaciona-se ao quão bem definida encontra-se a imagem do centroide. Para esse trabalho, empregou-se um sensor de imagem com pixel de dimensão 0,0016 mm e distância focal (FD) igual à 2,3 mm. Dessa forma, o erro de um pixel no cálculo do centroide implica em um erro de 0,0398 graus na determinação de θ e ϕ . Ao realizar o pré-processamento de imagem por meio de um limiar para redefinição dos valores dos pixels, pode-se obter maior precisão no cálculo do centroide por meio de (3) e (4). Na Fig. 2, exemplifica-se o pré-processamento da imagem por meio do método de limiar, comparando-o a imagem originalmente capturada pelo sensor. Verifica-se melhor definição da projeção da luz do Sol. Dado que considerou-se zero a intensidade dos pixel que inicialmente estavam abaixo do limiar.

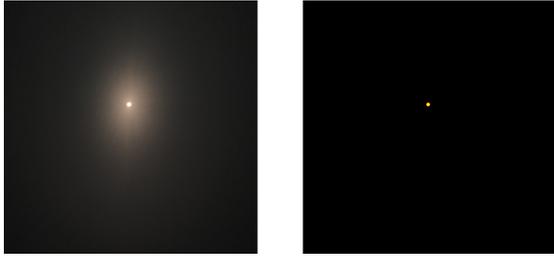


Fig. 2. Imagem capturada pelo sensor e tratada utilizando método de limiar.

III. ALGORITMO PIXELMAX

Nessa seção propõe-se uma nova abordagem para simplificar e reduzir o tempo de cálculo das coordenadas do centroide da imagem capturada pelo sensor, além de eliminar a necessidade de pré-processamento. Compara-se esse algoritmo ao BCTM.

A. Algoritmo PixelMax

O algoritmo PixelMax interpreta a imagem como uma matriz de pixel e acumula as intensidades de cada linha e coluna, armazenando-os em dois vetores distintos, como visto na Fig. 3. Em seguida, avalia o maior valor armazenado e a respectiva posição do vetor que representa os índices de posição do pixel centroide. Em linhas gerais, o algoritmo realiza os seguintes passos:

- Passo 01: Importar a imagem e gerar a matriz de pixel;
- Passo 02: Acumular simultaneamente as intensidades linha a linha e coluna a coluna e armazenar em dois vetores distintos;
- Passo 03: Verificar o maior valor cumulativo do vetor linha obtido no passo 02 e extrair o índice da linha do pixel centroide;
- Passo 04: Verificar o maior valor cumulativo do vetor coluna obtido no passo 02 e extrair o índice da coluna do pixel centroide;
- Passo 05: Utilizar os índices para buscar o pixel centroide e determinar as respectivas coordenadas do centroide;
- Passo 06: Determinar os ângulos θ e ϕ por meio das relações em (1) e (2);

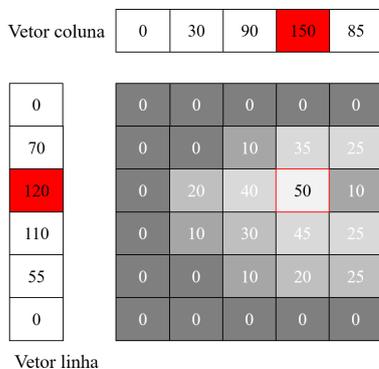


Fig. 3. Ilustração do algoritmo proposto.

Aplicou-se o algoritmo em duas imagens capturadas de uma fonte luminosa posicionada sobre o sensor de imagem

em diferentes posições. Na Fig. 4, verifica-se a imagem e o ponto obtido pelo algoritmo em verde. Para facilitar a visualização, empregou-se um quadrado com vários pixels em tonalidade verde. Contudo, a extremidade superior esquerda desse quadrado é a indicação do pixel centroide. Verifica-se bom grau de precisão no cálculo do centroide por meio da abordagem proposta.



Fig. 4. Cálculo do centroide pelo algoritmo PixelMax.

B. Comparação com o algoritmo BCTM

Para fins de comparação em termos de precisão, aplicou-se o algoritmo PixelMax e o algoritmo básico para cálculo de centroide em um conjunto de quatro imagens distintas, como visto na Fig. 5.

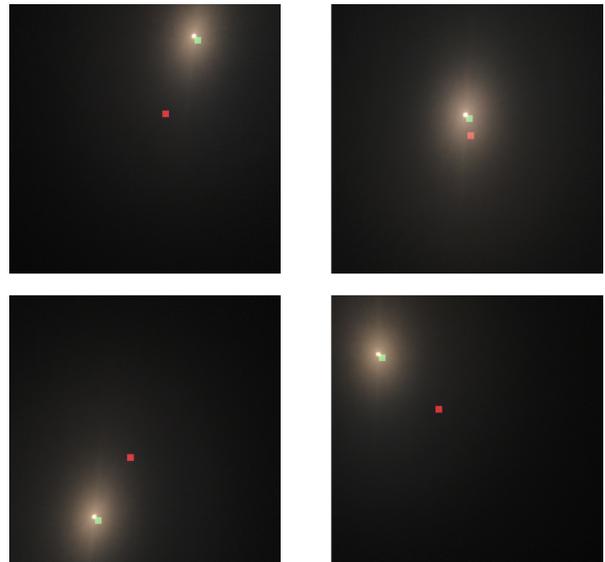


Fig. 5. Cálculo do centroide pelos algoritmos BCM (quadrado vermelho) e PixelMax (quadrado verde).

Nota-se que o algoritmo BCM (quadrado vermelho) apresenta erro considerável no cálculo das coordenadas do centroide, acentuados para posições distante do centro da imagem. Por outro lado, o algoritmo proposto garante a assertividade em diferentes casos. Considerando o pré-processamento da imagem por meio do método de limiar, observa-se que a abordagem em (3) e (4) converge para valores similares ao obtido pelo algoritmo proposto, como pode ser visto na Fig. 6. Para fins de comparação visual, projetou-se o resultado para o algoritmo PixelMax (Fig 5) em conjunto com o resultado obtido para o algoritmo básico após o pré-processamento.

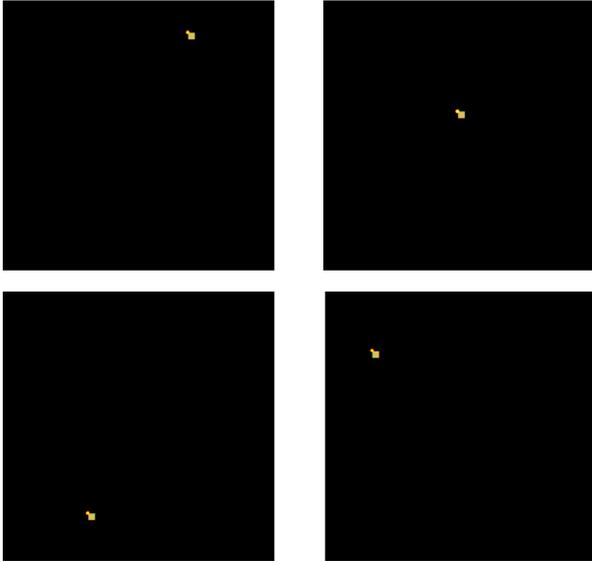


Fig. 6. Cálculo do centroide pelos algoritmos BCTM (quadrado vermelho) PixelMax (quadrado verde) sem pré-processamento.

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO E COMPARAÇÃO DE PRECISÃO DOS ALGORITMOS

Nessa seção, apresenta-se uma análise de desempenho entre o algoritmo BCTM e PixelMax em termos de tempo de processamento computacional e precisão. Para isso, capturaram-se um conjunto de trinta imagens por meio do sensor de imagem. Além disso, estruturaram-se os códigos em linguagem Python de modo que apenas as linhas de códigos dos algoritmos supracitados sejam diferentes. Dessa forma, tem-se o mesmo conjunto de comandos para importação e interpretação da imagem, assim como para o cálculo dos ângulos de Euler. Executaram-se os códigos cinco vezes para o mesmo conjunto de imagens, resultando em 150 interações ao todo. Utilizou-se a biblioteca cProfile do Python para obter os tempos de execução total e médio das interações. Na Tabela I, apresentam-se os tempos de execução de ambos os códigos.

TABELA I

TEMPO TOTAL E MÉDIO (S) DE PROCESSAMENTO DOS ALGORITMOS.

Algoritmo	Tempo total (s)	Tempo médio (s)
BCTM	1658,748	11,058
PixelMax	689,564	4,597

Observa que o algoritmo proposto reduz o tempo de processamento e cálculo dos ângulos de Euler em cerca de 58%, enquanto mantém assertividade em relação ao algoritmo BCTM, como visto na Tabela II por meio da comparação dos valores de θ e ϕ . Além disso, obteve-se simplicidade e facilidade de implementação do algoritmo.

V. CONCLUSÕES

Esse trabalho propôs um algoritmo simples e rápido para cálculo das coordenadas do centroide de imagens capturadas por sensores digitais de Sol do tipo CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*), denominado PixelMax. Esse algoritmo interpreta a imagem como uma matriz de pixel e

soma as intensidades de linhas e colunas, armazenando-as em vetores. Posteriormente, determinam-se as coordenadas do centroide verificando o índice correspondente ao valor de maior intensidade do vetor linha e coluna, respectivamente. Comparou-se essa abordagem ao método básico para cálculo de centroide com pré-processamento de imagem (*basic centroiding thresholding method*, BCTM). O algoritmo PixelMax proveu redução de cerca de 58% no tempo de processamento e cálculo dos ângulos de Euler com precisão próxima ao algoritmo BCTM. Trabalhos futuros compreendem a evolução do algoritmo para reduzir o número de pixel processados e otimizar o tempo de resposta do algoritmo, preservando a simplicidade e facilidade de implementação. Além disso, visa-se realizar um estudo de precisão do algoritmo em ambiente controlado, como explicitado em [4], e comparar os resultados com o algoritmo BCTM.

TABELA II

ÂNGULOS θ E ϕ OBTIDOS POR MEIO DOS ALGORITMOS.

Imagem	Algoritmo BCTM		Algoritmo PixelMax	
	θ	ϕ	θ	ϕ
1	-17,125	-30,787	-17,328	-30,846
2	0,203	-8,398	0,219	-8,253
3	-6,667	20,401	-6,607	20,501
4	-27,423	9,999	-27,349	10,001

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (Finatel) por fomentar esse trabalho e ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) por prover os meios necessários à sua realização.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Ikari *et al.*, "Attitude Determination and Control System for the Procyon Micro-Spacecraft," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 60, no. 3, pp. 181-191, 2017.
- [2] M.J. Sidi, *Spacecraft Dynamics Control*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [3] Y. Yoo, "Attitude Control System Design Verification for CNUSAIL-1 with Solar/ Drag Sail," *International Journal of Aeronautical & Space Sciences*, vol. 17, no. 4, pp. 579-592, 2016.
- [4] G. Rufino e M. Grassi, "Multi-Aperture CMOS Sun Sensor for Microsatellite Attitude Determination," *Sensors*, vol. 9, pp. 4503-4524, 2009.
- [5] Y.-K. Chang e B.-H. Lee, "Development of high-accuracy image centroiding algorithm for CMOS-based digital sun sensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 144, no. 27, pp. 29-37, 2008.
- [6] M. Buonoucore, M. Grassi e G. Rufino, "Aps-basedminiature sun sensor for earth observation nanosatellites," *Acta Astronautica*, vol. 56, pp. 139-145, 2005.
- [7] W.K. Pratt, *Digital Image Processing*, John Wiley and Sons, New York, 1991.
- [8] H. Zhu, S. Sun e "Sun Sensor Based on CMOS APS," *Infrared Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 76-80, 2004.
- [9] L. He e Y. Hu, "A fast algorithm of attitude measurement for APS-based digital sun sensors," in 2006 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006, pp. 39-41, 2006.
- [10] R. Saleem, S. Lee e J. Kim, "A cost-effective micro sun sensor based on black sun effect," in 2017 IEEE SENSORS, pp. 1-3, 2017.
- [11] E. Farian *et al.*, "A Miniaturized Two-Axis Ultra Low Latency and Low-Power Sun Sensor for Attitude Determination of Micro Space Probes," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, no. 5, pp. 1543-1554, 2018.
- [12] C. Jing, T. Liang e Q. Lei, "A new kind of miniature sun sensor design," 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), pp. 219-222, 2016.