



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

GERAÇÃO DE IMAGENS SINTÉTICAS PARA SENSORES DE ESTRELAS

Carolina Mattos Schuindt

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. Márcio Afonso Arimura Fialho e coorientada pelo Dr. Antonio Gil Vicente de Brum.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

GERAÇÃO DE IMAGENS SINTÉTICAS PARA SENSORES DE ESTRELAS

Carolina Mattos Schuindt

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. Márcio Afonso Arimura Fialho e coorientada pelo Dr. Antonio Gil Vicente de Brum.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sobrenome, Nomes.

Cutter Geração de imagens sintéticas para sensores de estrelas / Nome Completo do Autor1; Nome Completo do Autor2. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xvi + 35 p. ; ()

Dissertação ou Tese () – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, AAAA.

Orientador : José da Silva.

1. Palavra chave. 2. Palavra chave 3. Palavra chave. 4. Palavra chave. 5. Palavra chave I. Título.

CDU 000.000



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

RESUMO

Sensores de Estrelas são instrumentos utilizados no cálculo da atitude de um veículo espacial. O objetivo deste trabalho é a geração de imagens sintéticas para o teste de sensores de estrelas autônomos, isto é, sensores capazes de processar uma imagem de um campo estelar, identificar as estrelas presentes nesta e calcular a atitude do veículo espacial sem a necessidade de interferência humana. A motivação para gerar estas imagens é testar, em um ambiente simulado, o software embarcado de um sensor de estrelas em desenvolvimento no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), e também para melhorar o realismo de um simulador de cenas desenvolvido no mesmo instituto. A atitude do veículo espacial pode ser calculada através de relações algébricas e geométricas da posição destas estrelas e de uma modelagem adequada da câmera imageadora. Portanto, dada a atitude simulada do veículo espacial, com auxílio de um catálogo de estrelas, o processo inverso é possível, isto é, calcular a posição das estrelas conforme estas apareceriam no campo de visada de um sensor de estrelas. A partir desta informação é possível construir uma imagem sintética de como o céu deveria ser visto pelo sensor de estrelas a bordo do veículo espacial em determinada atitude. Com base nos princípios explicados até então, foi desenvolvido um software capaz de gerar imagens sintéticas para teste de sensores de estrelas autônomos. A validação do software foi realizada através da comparação entre os resultados obtidos e os resultados esperados (extraídos do PTASE, Programa de Testes de Algoritmos para Sensores de Estrelas, software também desenvolvido no INPE). Uma vez que estas imagens foram validadas, é possível otimizá-las, para se aproximarem mais de como seria uma imagem real. Isto é feito através da inclusão de algoritmos no software, que simulam distorções e ruídos (resultantes da própria óptica do sensor e da eletrônica de aquisição de imagens, respectivamente), fase na qual o projeto se encontra atualmente.

Palavras-chave: Catálogos de Estrelas. Aquisição de Imagens. Óptica.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Fluxograma simplificado de um sensor de estrelas autônomo	4
2.2 Configuração de um APS lateral	7
2.3 Sistema de coordenadas esférico	10
2.4 Sistema de coordenadas geocêntrico equatorial inercial	12
2.5 Sistema de coordenadas de ascensão reta e declinação	13
2.6 Referencial do sensor	15
2.7 Sistema de coordenadas não normalizado da matriz eletrônica	16
2.8 Referencial da matriz eletrônica normalizado	17
3.1 Fluxograma do software	22
3.2 Representação de uma linha de entrada do catálogo adaptado	23
4.1 Comparação entre imagens geradas pelo PTASE e o software desenvolvido	28
4.2 Comparação entre imagens geradas pelo PTASE e o software desenvol-	
vido com marcações do Astrometry.net	28
4.3 Comparação de imagem sintéticas geradas com diferentes giros da atitude	
do sensor	29
4.4 Comparação entre imagem original obtida pelo sensor e imagem sintética	
com efeito de corrente escura	30

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Relação entre CTE e a fração de sinal de saída	5

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APS	–	<i>Active Pixel Sensor</i>
CCD	–	<i>Charge-coupled devices</i>
CTE	–	<i>Charge Transfer Efficiency</i>
ICRS	–	<i>Sistema Internacional de Referência Celeste</i>
MOS	–	<i>Metal-Oxide Semiconductor</i>
SGE	–	<i>Sistema Geocêntrico Equatorial Inercial</i>
V/E	–	Veículo espacial

LISTA DE SÍMBOLOS

A	–	Amplitude
B	–	Brilho
B_{ref}	–	Brilho de referência
b_i	–	Brilho do pixel
mag	–	Magnitude
n	–	Número de pixels na imagem da estrela
p_x	–	Componente no plano x do ponto no sistema de coordenada vetorial-cartesiano
p_y	–	Componente no plano y do ponto no sistema de coordenada vetorial-cartesiano
p_z	–	Componente no plano z do ponto no sistema de coordenada vetorial-cartesiano
$S_{x'}$	–	Coordenada x do sistema normalizado da matriz eletrônica
$S_{y'}$	–	Coordenada y do sistema normalizado da matriz eletrônica
\hat{u}	–	Versor que indica direção o sistema referencial do sensor
\hat{v}	–	Versor que indica direção o sistema referencial do sensor
\hat{w}	–	Versor que indica direção o sistema referencial do sensor
x_c	–	Coordenada x do centroide
x_e	–	Coordenada x do sistema não normalizado da matriz eletrônica
y_c	–	Coordenada y do centroide
y_e	–	Coordenada y do sistema não normalizado da matriz eletrônica
\hat{x}	–	Versor no sistema de coordenadas vetorial-cartesiano
\hat{y}	–	Versor no sistema de coordenadas vetorial-cartesiano
\hat{z}	–	Versor no sistema de coordenadas vetorial-cartesiano
ϕ	–	Longitude
λ	–	Latitude
α	–	Ascensão reta
δ	–	Declinação
σ	–	Desvio Padrão
	–	Média dos dados do sensor

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	1
1.2 Objetivos Específicos	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Sensores de Estrelas	3
2.1.1 Funcionamento de um sensor de estrelas autônomo	3
2.1.2 <i>Charge-coupled devices</i> - CCD	4
2.1.3 <i>Active Pixel Sensor</i> - APS	7
2.2 Catálogos de estrelas	8
2.2.1 Hipparcos	8
2.3 Brilho das estrelas	8
2.4 Sistemas de referência e coordenadas	9
2.4.1 Esfera celeste	9
2.4.1.1 Sistema de coordenadas esférico	9
2.4.1.2 Sistema de coordenadas vetorial-cartesiano	10
2.4.2 Sistemas de coordenadas inerciais	11
2.4.2.1 Sistema Geocêntrico Equatorial Inercial	11
2.4.3 Sistema de coordenadas de ascensão reta e declinação	12
2.4.4 Sistema Internacional de Referência Celeste	13
2.4.5 Referencial do sensor	14
2.4.6 Sistemas de coordenadas associados à matriz eletrônica	15
2.4.6.1 Centroides de estrelas	15
2.4.6.2 Sistema de coordenadas não normalizado	16
2.4.6.3 Referencial normalizado da matriz eletrônica	16
2.4.6.4 Equacionamento para converter coordenadas entre os sistemas da matriz eletrônica e do sensor	17
2.5 Sistemas de representação de atitude do sensor	18
2.5.1 Ângulos de Euler:	18
2.5.2 Matriz de Atitude (ou matriz dos cossenos diretores):	18
2.5.3 Relação entre a matriz de atitude e ângulos de Euler	19
2.6 Ruídos e distorções ópticas	20

2.6.1	Corrente escura	20
3	METODOLOGIA	21
3.1	Linguagem de programação	21
3.2	Estruturação do código	21
3.3	Catálogo de trabalho	23
3.3.1	Cálculo da posição das estrelas na imagem	23
3.3.2	Distribuição do brilho das estrelas na imagem	25
3.3.3	Simulação da corrente escura	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Imagens sintéticas sem adição de efeitos de ruído ou distorções ópticas	27
4.2	Imagens sintéticas com efeitos de corrente escura	29
5	CONCLUSÕES	31
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

Obter a atitude correta e com precisão de um Veículo Espacial (V/E) é extremamente importante para uma missão espacial, seja para exercer o controle deste, seja para garantir que a informação recebidas pela instrumentação da carga útil (FIALHO, 2003). Atualmente, uma das formas mais comuns de calcular a atitude de um veículo espacial é através do uso de dados de sensores de estrelas. Através das relações algébricas e geométricas das estrelas "enxergadas" por estes sensores é possível calcular a atitude do V/E. De especial, interesse para estes trabalho são os sensores de estrelas autônomos, capazes de calcular a atitude do veículo espacial, além de identificar as estrelas contidas em uma imagem (FIALHO, 2003).

Por este motivo vemos muitos esforços no sentido de aprimorar técnicas e instrumentos envolvidos no processo de cálculo de atitude. Exemplos desse esforços são os trabalhos de Carvalho (2001), que desenvolveu um ambiente de simulação para testes de algoritmos de identificação de estrelas e posterior calculo de atitude, e de Fialho (2003), que desenvolveu um ambiente de simulações de sensores de estrelas autônomos.

A motivação para realização deste trabalho, também é contribuir para o avanço da tecnologia no campo de sensores de estrela autônomos. Para isso pretende-se desenvolver um software que gere imagens sintéticas tão próximas quanto possível de imagens reais obtidas pelo sensor de estrelas. Desta maneira, este trablho pretende contribuir para o testes deste sensor em um ambiente simulado e controlado.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um módulo de software capaz de gerar imagens sintéticas o mais próximas possível das imagens reais geradas pelo hardware de um sensor de estrelas, simulando as distorções introduzidas pela óptica deste sensor de estrelas e os diversos tipos de ruído gerados pela sua eletrônica de aquisição de imagens.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Estudar geração de imagens sintéticas (matrizes de atitude, leitura do catálogo de estrelas, posicionamento das estrelas na imagem), para um sensor de estrelas ideal, ou seja, um sensor que não é afetado por ruídos ou dis-

torções óticas.

- b) Desenvolver software de geração de imagens sintéticas considerando um sensor de estrelas ideal.
- c) Estudar formação de imagens em um sensor de estrelas real, ou seja, considerando distorções da óptica e ruídos que afetam a qualidade das imagens geradas por este sensor.
- d) Otimizar software desenvolvido para que as imagens sintéticas geradas se aproximem às imagens reais obtidas com sensores de estrelas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda, de maneira resumida, o estudo de revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento do projeto.

2.1 Sensores de Estrelas

Sensores de estrela são instrumentos importantes de um veículo espacial (V/E) ou sub-orbital uma vez que são utilizados na determinação de atitude destes (FIALHO, 2003). A atitude é a orientação deste veículo num dado referencial. Ela pode ser calculada através de relações algébricas e geométricas entre a posição das estrelas observadas pelo sensor e de uma modelagem adequada da câmera deste. Este processo será descrito em maiores detalhes posteriormente.

Os sensores de estrelas podem ser classificados em duas categorias (FIALHO, 2003):

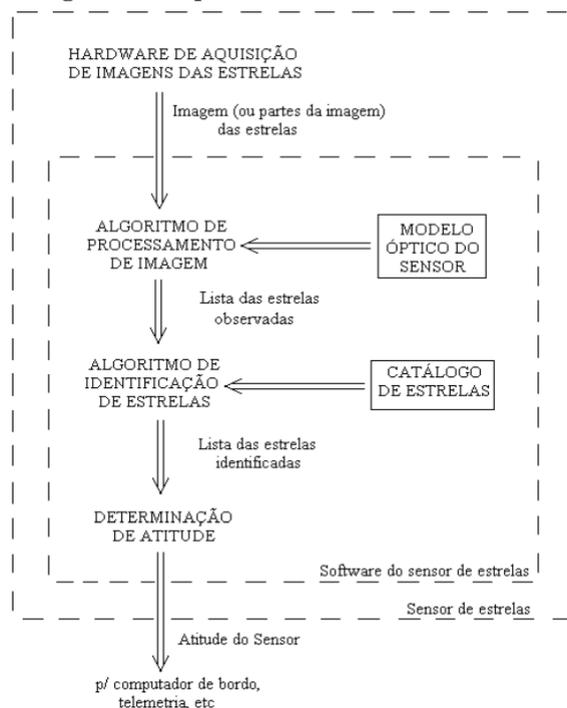
- sensores de estrelas não autônomos: são capazes de processar a imagem observada pelo sensor, de maneira a identificar as estrelas contidas nesta, e enviar as coordenadas das estrelas contidas nesta para o computador de bordo do V/E ou para a terra, onde a atitude será posteriormente calculada.
- sensores de estrelas autônomos: após processar a imagem e identificar as estrelas, estes sensores possuem algoritmos embarcados capazes de calcular a atitude do V/E. Sensores deste tipo são o foco do presente trabalho.

Portanto os componentes essenciais de um sensor são uma câmera (para observação da imagem) e de uma unidade de processamento interna (para processamento da imagem e cálculo da atitude, no caso de sensores autônomos).

2.1.1 Funcionamento de um sensor de estrelas autônomo

Na figura 2.1, retirada de Fialho (2003), é apresentado um fluxograma simplificado de um sensor de estrelas autônomo. O software embarcado de um sensor de estrelas autônomo é composto necessariamente por um algoritmo de processamento de imagem, um algoritmo de identificação de estrelas e de um algoritmo de determinação de atitude. É importante ressaltar que esta visão é simplificada e que cada um destes algoritmos possui diversas etapas intrínsecas a eles mesmos.

Figura 2.1 - Fluxograma simplificado de um sensor de estrelas autônomo



Fonte: Fialho (2003)

Um sensor de estrelas autônomo inclui entre seus vários modos de operação pelo menos os seguintes modos:

- modo de busca: Neste modo o sensor de estrelas deve determinar sua atitude sem informação prévia de sua orientação. É usado quando acabou de ser ligado ou quando o V/E está perdido no espaço.
- modo de rastreamento: Neste modo a atitude determinada anteriormente é utilizada como estimativa para a determinação da nova atitude.

Além disso, existem dois tipos de tecnologia mais comuns utilizadas em sensores de estrelas, que serão descritas a seguir.

2.1.2 *Charge-coupled devices - CCD*

O CCD é um registro de deslocamento analógico (*electronic analog shift register*) inventado em 1970. Entre as principais características vantajosas do CCD estão a alta sensibilidade, *high fill factor* (80% a 100%), formatos grandes (geralmente 1024X1024, mas pode chegar à 4096x4096). Os motivos para a alta sensibilidade do

sensor são a combinação de um alta eficiência quântica líquida (*high net quantum efficiency*), alta fidelidade na leitura do CCD e amplificador de saída com ruído baixo (FOSSUM, 1993).

As dificuldades associadas ao uso do CCD estão ligadas ao próprio funcionamento dos CCDs. Um CCD depende da transferência, através do silício em distância macroscópicas, de carga de um eletrodo MOS para o próximo (FOSSUM, 2020). A questão aqui é que para que o CCD possa ser utilizado para fins científicos a eficiência da transferência de carga (*charge transfer efficiency - CTE*) deve ser próxima de um. Isso ocorre porque a fração de sinal de saída é extremamente afetada pela perda de elétrons durante estas múltiplas transferências. Na tabela 2.1 pode-se observar que conforme aumenta o tamanho da resolução da imagem e mantendo o CTE, a fração de sinal de saída, representando a fidelidade da imagem gerada, pode reduzir significativamente (FOSSUM, 1993).

Tabela 2.1 - Relação entre CTE e a fração de sinal de saída

Tamanho da Matriz	CTE	Fração de sinal na saída
1024x1024	0,999	0,128
	0,9999	0,815
	0,99999	0,980
2048x2048	0,99999	0,960
4096x4096		0,921
8192x8192		0,849

Fonte: Fossum (1993)

A necessidade de se ter uma alta eficiência de transferência de carga pode limitar o uso de CCDs em aplicações espaciais. Já que a radiação presente no espaço pode degradar o CTE em CCDs.

De forma resumida, pode-se dizer que as principais desvantagens de CCDs em comparação com tecnologias mais modernas são as seguintes (FOSSUM, 1993):

- **Radiation softness:** É um dano de deslocamento causado pela irradiação de materiais por partículas energéticas de massa considerável, prótons, nêutrons, partículas alfa e núcleos de átomos mais pesados, por exemplo. Quando estas partículas com alta energia e massa considerável colidem com um átomo do material irradiado, podem desalojá-lo de sua posição

inicial na estrutura cristalina desse material e levá-lo a uma nova posição, intersticial. A consequência disso é que a estrutura cristalina do material (padrão periódico com que os átomos ou moléculas se organizam em um sólido cristalino) é aos poucos destruída. Desta maneira, as propriedades físicas e elétricas do material são alteradas. Como consequência, o funcionamento de dispositivos irradiados pode ser prejudicado. Este tipo de dano é extremamente prejudicial aos CCDs, por reduzir a eficiência de CTE. Concluí-se também que isto será um problema para missões espaciais em Júpiter e Saturno, em algumas órbitas terrestre ou para veículos espaciais que futuramente irão utilizar sistemas de propulsão nuclear (FOSSUM, 1993).

- **Dificuldade de se fabricar CCDs com muitos pixels:** Quanto maior o número de pixels, maior a CTE necessária, devido as velocidades de transferências de carga menores, isto é, *clocks* mais lentos, logo a taxa de leitura é diminuída. Apesar disto, CCDs científicos têm a taxa de leitura muito lenta e a possibilidade de se perder uma coluna inteira devido a defeitos em uma única peça que afete a série inteira e quanto maior o número de pixels, maior as chances de defeitos com este ocorrerem.
- **Incompatibilidade com requisito de instrumentos em miniatura:** Uma das principais desvantagens dos sensores CCDs em relação aos sensores CMOS APS é a necessidade de uma eletrônica de proximidade maior, isto é, mais componentes eletrônicos num circuito com CCD para se obter a mesma função de sensores CMOS APS e consumo maior de energia. As tensões mais elevadas necessárias para o funcionamento de CCDs também podem gerar emissão de radiação infravermelho que podem ser detectadas pelo sensor de imagem e por consequência contaminar a imagem (FOSSUM, 1993).
- **Extensão do alcance espectral:** Ambos os sensores CCDs e CMOS APS são baseados em silício, portanto ambos estão limitados pela resposta espectral do silício (capaz de absorver fótons a partir de $1,1eV$, correspondendo a cerca de $1100nm$, no infravermelho próximo). Para se obter sensibilidade em comprimento de ondas mais longos (fótons menos energéticos) é necessário se empregar outros materiais semicondutores (FOSSUM, 1993).
- **Taxa de leitura limitada:** A taxa de leitura de CCDs são muito lentas para boa parte das aplicações práticas (sensores de estrelas são um

exemplo).

2.1.3 *Active Pixel Sensor - APS*

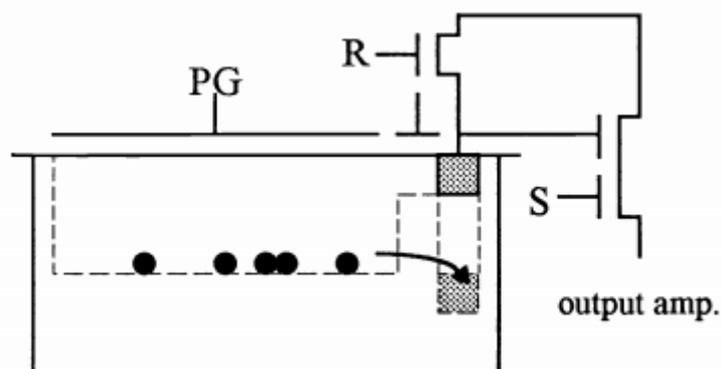
A tecnologia APS é uma alternativa interessante à tecnologia CCD, uma vez que ela mantém as propriedades vantajosas da tecnologia CCD (alta sensibilidade, sinal de alta fidelidade, ao mesmo tempo em que corrige problemas desta. O motivo é que para a tecnologia APS não é necessário que ocorra transferência de carga por distâncias macroscópicas (FOSSUM, 1993). A tecnologia do APS geralmente exige que a transferência de carga seja intra-pixel. Além disso, em cada pixel de um APS existe um ou mais transistores ativos. Isso representa melhoras e funcionalidade de *buffering* (FOSSUM, 2020).

Entre as principais vantagens da tecnologia APS estão a resistência a radiação, opera bem em baixas temperaturas, pode ser fabricado em grandes tamanhos de matriz e melhor compatibilidade com materiais modernos.

Existem duas configurações para os APSs:

- **APS Lateral:** Na figura 2.2 pode-se observar a configuração de um APS lateral. Nesta configuração, parte da área do pixel é utilizada para detecção de luz e armazenamento de sinal, enquanto a outra é utilizada para o(s) transistor(s). As vantagens desta configuração, em relação a configuração vertical, são a fabricação mais simples e a alta compatibilidade com os processos do CMOS e CCD (FOSSUM, 1993).

Figura 2.2 - Configuração de um APS lateral



Fonte: Fossum (1993)

- **APS Vertical:** A vantagem dos APS verticais são o aumento de *fill-factor*, uma vez que a carga do sinal é armazenada abaixo do transistor de saída (FOSSUM, 1993).

2.2 Catálogos de estrelas

Catálogo de estrelas são listas de estrelas e suas propriedades, como magnitude, ascensão reta, declinação, etc. Os dados capturados são dependentes da instrumentação utilizada, desta forma, é comum que catálogos diferentes possuam dados diferentes e até inclusão ou exclusão de estrelas quando comparado com outros catálogos.

Os catálogos de estrelas podem também ser divididos em (FIALHO, 2003):

- **Catálogos fonte:** As informações obtidas através do mapeamento das estrelas na esfera celeste são armazenadas em catálogos estelares. Suas posições são armazenadas em coordenadas angulares no sistema equatorial de coordenadas. O catálogo fonte utilizado neste trabalho foi o Hipparcos.
- **Catálogos de trabalho:** Catálogos menores, adequados a limitações de hardware impostas pelo equipamento utilizado. Contém parte das estrelas do catálogo fonte, respeitando as limitações impostas pelo sensor (ou instrumentação na qual estão sendo utilizados).

2.2.1 Hipparcos

Hipparcos é um catálogo de estrelas compilado com dados obtidos pelo satélite de mesmo nome. Publicado em 1997 e contém listado 118218 estrelas, com dados de alta precisão (ESA, 1997).

2.3 Brilho das estrelas

O brilho das estrelas é definido pela sua magnitude, a qual a escala é invertida, isto é, quanto menor a magnitude de uma estrela, mais forte é o seu brilho (CARVALHO, 2001).

A magnitude de uma estrela é calculada com a fórmula 2.1, onde B é o brilho da estrela e B_{ref} é um brilho de referência (CARVALHO, 2001; FIALHO, 2003).

$$mag = -2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{B}{B_{ref}} \right) \quad (2.1)$$

2.4 Sistemas de referência e coordenadas

2.4.1 Esfera celeste

O conceito de esfera celeste é bastante antigo, quando acreditava-se que os astros estavam fixados em uma abóboda celeste concêntrica à Terra (CARVALHO, 2001; FIALHO, 2003). Hoje sabe-se que isto não ocorre, entretanto este conceito continua sendo útil para indicar a posição dos astros em conforme vistos da Terra quando a profundidade destes não é relevante (FIALHO, 2003; CARVALHO, 2001).

Algumas características da esfera celeste devem ser definidas (FIALHO, 2003):

- Equador: Resultado da projeção do equador terrestre na esfera celeste
- Polos (Norte e Sul) da esfera: Resultado da projeção dos polos da terrestres na esfera celeste
- Eclíptica: Resultado da projeção do plano orbital terrestre na esfera celeste
- Equinócios: Pontos onde a eclíptica e o equador celeste se interceptam
- Solstícios: Pontos de máximo deslocamento ao norte e ao sul na trajetória aparente do Sol
- Polos (Norte e Sul) eclípticos: Pontos que formam a 90 graus do planos da eclíptica

O conceito da esfera celeste pode ser aplicado a outros planetas, até mesmo para o sensor de estrelas, usando-os como centro da esfera celeste (FIALHO, 2003; CARVALHO, 2001).

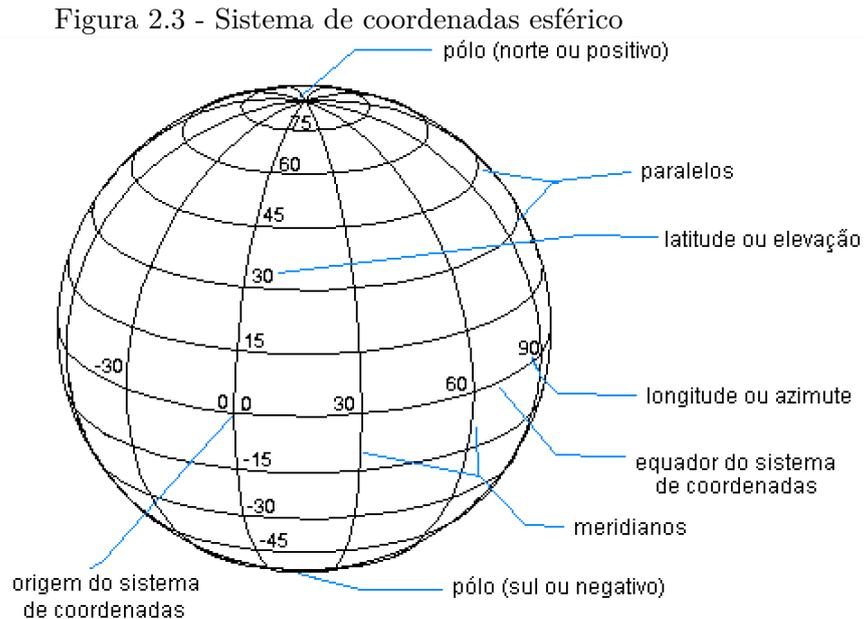
Podemos representar as coordenadas de um corpo na esfera celeste de diversas maneiras. A seguir apresenta-se duas destas.

2.4.1.1 Sistema de coordenadas esférico

Este sistema de coordenadas utiliza de duas coordenadas angulares para descrever a posição de um corpo celeste, a longitude ϕ e a latitude λ .

Para compreender melhor este sistema devemos entender que a esfera celeste pode ser dividida por diversas circunferências. Quando estas circunferências possuem o diâmetro máximo da esfera e passam pelo centro desta, eles são denominados grandes

círculos (FIALHO, 2003). São de particular interesse o grande círculo que constitui o equador (ou círculo fundamental) cuja latitude é zero e os meridianos que são grandes círculos perpendiculares ao equador e que passam pelos polos (localizados perpendicularmente ao equador, com latitudes 90° e -90°) da esfera celeste (FIALHO, 2003). Na figura 2.3, pode-se observar com melhor clareza estas posições geométricas.



Fonte: Fialho (2003)

Desta forma, construímos nosso sistema com latitudes variando de -90° (em direção ao hemisfério sul) a 90° (em direção ao hemisfério norte) e longitudes variando de 0° a 360° a partir de um ponto de referência. Este ponto é definido a partir da interseção entre o equador e um meridiano escolhido arbitrariamente (FIALHO, 2003).

2.4.1.2 Sistema de coordenadas vetorial-cartesiano

Este sistema de coordenadas são representadas por três versores: \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} . O versor \hat{x} aponta para o ponto de referência de coordenadas, o \hat{z} aponta para o polo norte da esfera e o \hat{y} é definido por $\hat{x}\hat{y} = \hat{z}$ Carvalho (2001), Fialho (2003).

É possível calcular as componentes p_x , p_y e p_z a partir da latitude e longitude através das equações 2.2, 2.3 e 2.4, relacionando assim os dois sistemas Carvalho (2001), Fialho (2003).

$$p_x = \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (2.2)$$

$$p_y = \sin \phi \cdot \cos \lambda \quad (2.3)$$

$$p_z = \sin \lambda \quad (2.4)$$

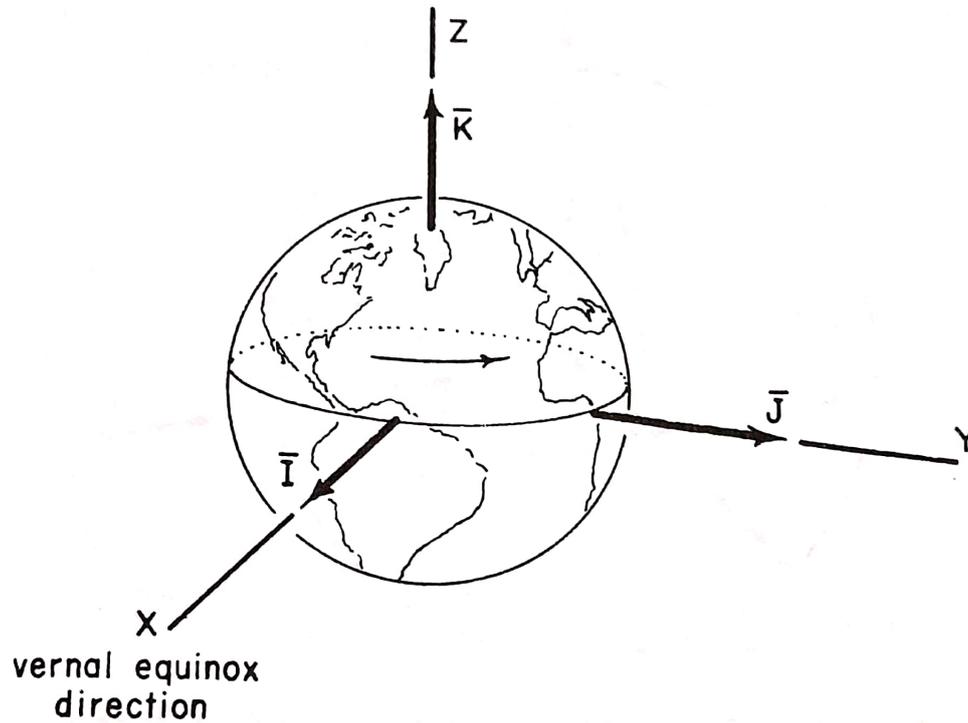
2.4.2 Sistemas de coordenadas inerciais

Um sistema de coordenadas é definido por uma origem, por um plano fundamental, por uma direção principal e a direção do eixo Z (BATE et al., 2016).

2.4.2.1 Sistema Geocêntrico Equatorial Inercial

O Sistema Geocêntrico Equatorial Inercial (SGE) tem origem no centro da Terra, o plano fundamental é o equador, a direção principal (X) é a direção do equinócio vernal e o eixo Z é perpendicular ao plano fundamental e está na direção do polo norte celestial (BATE et al., 2016; SELLERS et al., 2004). Já o terceiro eixo (Y) é perpendicular aos outros dois eixos, completando a regra da mão direita (SELLERS et al., 2004). Pode-se observar uma esquematização deste sistema na figura 2.4. Por ser fixo nas estrelas e não na Terra, isto é, inercial, o SGE não acompanha a rotação da Terra, mas registra essa rotação (BATE et al., 2016).

Figura 2.4 - Sistema de coordenadas geocêntrico equatorial inercial

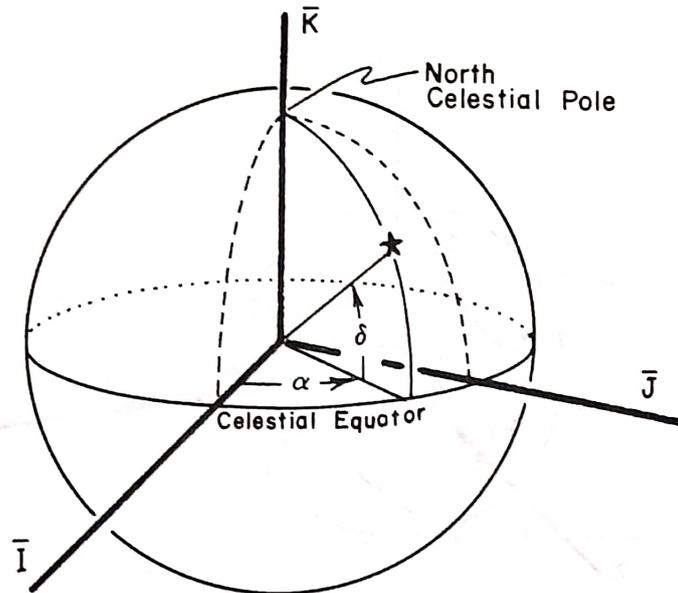


Fonte: Bate et al. (2016)

2.4.3 Sistema de coordenadas de ascensão reta e declinação

Associado ao SGE temos o sistemas de coordenadas de ascensão reta (α) e declinação (δ) (BATE et al., 2016). Este é um sistema esférico de coordenadas, onde a longitude é denominada como ascensão reta e a latitude como declinação (FIALHO, 2003). A posição de um corpo celeste pode então ser definida por estas duas coordenadas angulares, conforme pode ser observado na figura 2.5.

Figura 2.5 - Sistema de coordenadas de ascensão reta e declinação



Fonte: Bate et al. (2016)

O plano fundamental é o equador celeste e o centro do sistema pode ser definido na superfície da Terra (sistema topocêntrico) ou no centro da Terra (sistema geocêntrico) (BATE et al., 2016).

O sentido positivo da declinação é em sentido ao norte, enquanto o negativo é em sentido ao sul, já o sentido positivo da ascensão está a leste do ponto vernal (FIALHO, 2003).

2.4.4 Sistema Internacional de Referência Celeste

Anteriormente, foi explicado que a direção principal do SGE é a direção do equinócio vernal. Entretanto, os movimentos de nutação e precessão da Terra alteram gradualmente a região de interseção entre o equador e os planos orbitais, ou seja gradualmente a posição do ponto vernal é modificada (FIALHO, 2003).

O primeiro esforço para corrigir este problema foi a criação de sistemas similares ao SGE, porém com datas fixas de referência para o ponto vernal (FIALHO, 2003). Um exemplo destes sistemas, bastante utilizado é o FK5. O FK5 definido na época J2000.0 (primeiro de janeiro de 2000, às 12:00 horário universal) e tem como origem o baricentro do sistema solar (FIALHO, 2003).

Atualmente, o sistema mais utilizado, no entanto, é o Sistema Internacional de Referência Celeste (ICRS, sigla em inglês). Este sistema é compatível com o FK5, a principal diferença é que não é mais definido por parâmetros orbitais e sim por medições extragaláticas, o que aumenta sua precisão (IERS, 1997; FIALHO, 2003).

Assim como no trabalho de Fialho (2003), neste trabalho adotamos como referencial um ICRS transladado para um referencial solidário ao sensor. Este referencial em realidade não é inercial, mas iremos desconsiderar qualquer aceleração que o sensor possa sofrer.

Dito isso, para o referencial do sensor é possível converter coordenadas em ascensão reta e declinação para coordenadas cartesianas através das equações 2.5, 2.6 e 2.7 (FIALHO, 2003).

$$p_x = \cos \alpha \cdot \cos \delta \quad (2.5)$$

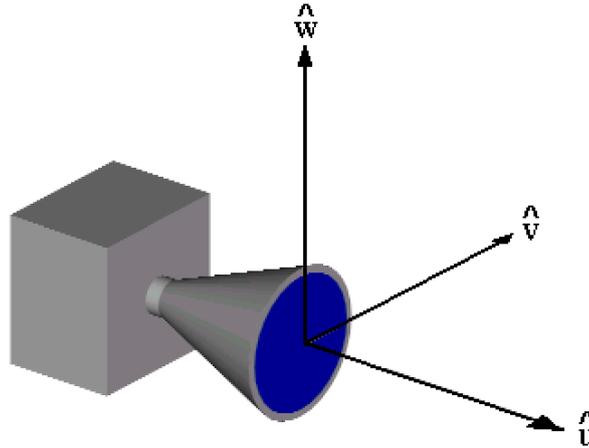
$$p_y = \sin \alpha \cdot \cos \delta \quad (2.6)$$

$$p_z = \sin \delta \quad (2.7)$$

2.4.5 Referencial do sensor

Este trabalho segue o mesmo referencial para o sensor adotado por Fialho (2003), conforme a figura 2.6.

Figura 2.6 - Referencial do sensor



Fonte: Fialho (2003)

Nesse sistema \hat{u} , \hat{v} e \hat{w} são os versores que indicam as direções que compõem o sistema. A direção \hat{u} é concomitante ao eixo principal do sensor e aponta para a região que o sensor está apontado. Os outros versores, \hat{v} e \hat{w} pertencem ao plano da matriz fotodetectora, são perpendiculares entre si e também entre o versor \hat{u} .

2.4.6 Sistemas de coordenadas associados à matriz eletrônica

Até então foram discutidos sistemas de coordenadas no espaço tridimensional, úteis para descrever a posição de um corpo celeste ou V/E no universo a partir de um referencial. No entanto para este trabalho é necessário também entender como descrever a posição das estrelas em uma imagem, ou seja em coordenadas bidimensionais, conforme são "vistas" pelo sensor. Esta modelagem encontra-se bem explicada por Fialho (2003), a seguir encontra-se a descrição deste sistema baseado em seu trabalho.

2.4.6.1 Centroides de estrelas

O centroides (ou centros fotométricos) de uma estrela são as coordenadas do centro desta estrela em uma imagem. Existem diversas maneiras de se calcular estes centroides. Uma delas, bastante simplificada, é a utilização de uma média ponderada (simples) pelo brilho de cada pixel da estrela, conforme as equações 2.8 e 2.9.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (2.8)$$

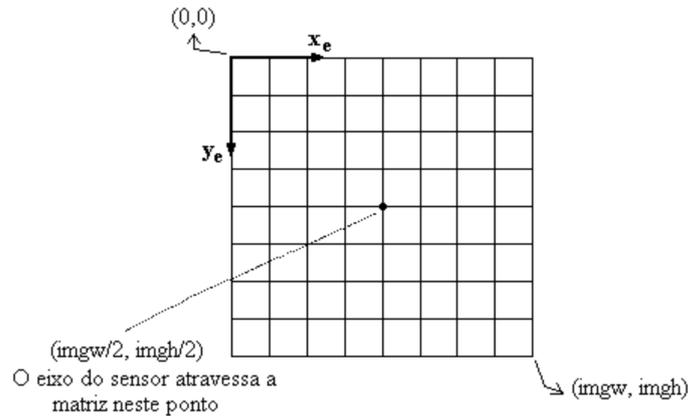
$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (2.9)$$

Nas equações, x_c e y_c (números reais) são a posição calculada do centroide em pixels, x_i e y_i (números inteiros) são a abscissa e a ordenada do pixel, b_i é o brilho do pixel e n o número de pixels pertencentes à imagem da estrela.

2.4.6.2 Sistema de coordenadas não normalizado

Sistema de coordenadas representada por uma matriz, onde o ponto de origem é se encontra no canto superior esquerdo, crescendo verticalmente para baixo e horizontalmente para a direita (FIALHO, 2003) conforme pode ser observado na figura 2.7.

Figura 2.7 - Sistema de coordenadas não normalizado da matriz eletrônica



Fonte: Fialho (2003)

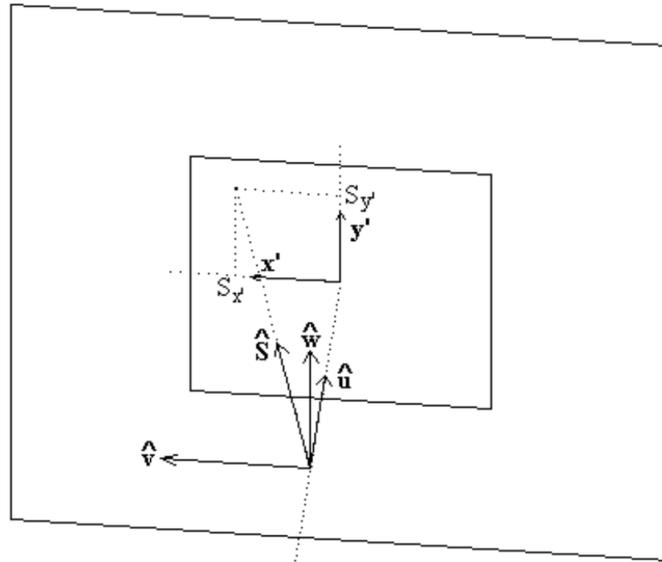
É interessante notar que as coordenadas (x_e, y_e) podem assumir valores fracionários, positivos ou negativos (FIALHO, 2003), isto é importante para a precisão dos cálculos de posição.

2.4.6.3 Referencial normalizado da matriz eletrônica

Este sistema representa a posição $((S_{x'}, S_{y'}))$ de uma estrela no plano normal ao eixo do sensor (\hat{u}) . Isto quer dizer que, dado um versor \hat{S} correspondente a posição de uma estrela e um plano normal ao eixo do sensor, distante em uma unidade da origem do sistema vetorial-cartesiano fixado no corpo do sensor (sistema de coordenadas uvw),

se prolongarmos o versor \hat{S} ele irá atravessar o plano no ponto $((S_{x'}, S_{y'}))$ (FIALHO, 2003). Através da figura figura 2.8 é possível compreender melhor este sistema.

Figura 2.8 - Referencial da matriz eletrônica normalizado



Fonte: Fialho (2003)

2.4.6.4 Equacionamento para converter coordenadas entre os sistemas da matriz eletrônica e do sensor

Fialho (2003) também descreve em seu trabalho o equacionamento necessário para se converter coordenadas entre os sistemas da matriz eletrônica e do sensor, conforme descrito a seguir.

Para calcular as coordenadas das estrelas no sistema normalizado da matriz eletrônica $(S_{x'}, S_{y'})$ podemos usar as equações 2.10 e 2.11 (FIALHO, 2003).

$$S_{x'} = \frac{0,5imgw - x_c}{imgw} \cdot 2S_{x'max} \quad (2.10)$$

$$S_{y'} = \frac{0,5imgw - y_c}{imgw} \cdot 2S_{y'max} \quad (2.11)$$

Onde $S_{x'max} = \tan \frac{fov_w}{2}$ e $S_{y'max} = \tan \frac{fov_h}{2}$

Uma vez calculadas as coordenadas $S_{x'}$ e $S_{y'}$ é possível calcular as componentes do versor posição dos corpos celestes no referencial do sensor através das equações 2.12, 2.13 e 2.14 (FIALHO, 2003).

$$S_u = \frac{1}{\sqrt{1 + S_{x'}^2 + S_{y'}^2}} \quad (2.12)$$

$$S_v = S_{x'} \cdot S_u \quad (2.13)$$

$$S_w = S_{y'} \cdot S_u \quad (2.14)$$

2.5 Sistemas de representação de atitude do sensor

A atitude do sensor pode ser representada por três ângulos (FIALHO, 2003):

- α_s : ascensão reta da direção de apontamento do sensor, no sistema ICRS
- δ_s : declinação da direção de apontamento do sensor, no sistema ICRS.
- ϕ_s : ângulo de giro do sensor, sendo positivo no sentido horário, e nulo quando o versor \hat{v} está contido no plano xy do sistema ICRS e o versor \hat{w} tem componente em z positiva.

2.5.1 Ângulos de Euler:

É uma das formas de representar a atitude do sensor. São os ângulos (Φ, Θ, Ψ) usados para transformar o sistema inercial xyz no sistema de coordenadas do sensor uvw (CARVALHO, 2001; FIALHO, 2003). Estes ângulos podem ser utilizados para expressar a atitude do sensor, assim os ângulos Φ e Θ definem a direção de apontamento e o ângulo Ψ define o ângulo de giro em torno do sensor (FIALHO, 2003).

2.5.2 Matriz de Atitude (ou matriz dos cossenos diretores):

A matriz de atitude apresenta as componentes de um versor do sistema do referencial do versor no sistema de coordenadas inercial. Assim representa-se as componentes \hat{u} , \hat{v} , \hat{w} no sistema de coordenadas inercial como $u_x, u_y, u_z, v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$ (CARVALHO, 2001; FIALHO, 2003). A forma da matriz de atitude é representada na equação 2.15 .

$$M = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \\ w_x & w_y & w_z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Assim, um vetor \vec{S} representado como uma matriz linha $[S_u \ S_y \ S_w]$ no sistema uvw pode ser expressa no sistema xyz conforme a equação 2.16

$$[S_x \ S_y \ S_z] = [S_u \ S_v \ S_w] \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \\ w_x & w_y & w_z \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

As componentes do \hat{S} no sistema uvw podem ser obtidas a partir do sistema xyz usando a equação 2.17.

$$\begin{bmatrix} S_u \\ S_v \\ S_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_u & y_u & z_u \\ x_v & y_v & z_v \\ x_w & y_w & z_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.5.3 Relação entre a matriz de atitude e ângulos de Euler

No trabalho de Fialho (2003) e de Carvalho (2001) é feita a demonstração das relações entre a matriz de atitude e ângulos de Euler.

A matriz de rotação de xyz está representada na equação 2.18

$$M = \begin{bmatrix} c\theta c\phi & c\theta s\phi & -s\phi \\ -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & s\psi c\theta \\ s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\phi \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

A matriz da atitude em termos das coordenadas de atitude do sensor é apresentada na equação 2.19

$$M = \begin{bmatrix} c\alpha_s c\delta_s & s\alpha_s c\delta_s & s\delta_s \\ -s\alpha_s c\phi_s - c\alpha_s s\delta_s s\phi_s & c\alpha_s c\phi_s - s\alpha_s s\delta_s s\phi_s & c\delta_s s\phi_s \\ s\alpha_s s\phi_s - c\alpha_s s\delta_s c\phi_s & -c\alpha_s s\phi_s - s\alpha_s s\delta_s c\phi_s & c\delta_s c\phi_s \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.6 Ruídos e distorções ópticas

Sensores de estrelas tem associados a si ruídos resultantes da eletrônica da aquisição de imagens e distorções, que são consequência da própria ótica do sensor.

Ruídos podem ser classificados em dois grupos (GROUP, 1998):

- Ruído Temporal: São ruídos causados por oscilações de sinal em relação ao tempo. Podendo ocorrer diretamente no pixel, nos amplificadores ou serem causado por fonte de energia defeituosa.
- Ruído de Padrão Fixo: São ruídos que não mudam em relação ao tempo, geralmente causados por defeitos nos pixels, filtros de cor, variação na fabricação dos amplificadores, etc.

2.6.1 Corrente escura

A corrente escura é uma forma de ruído fixo, ou seja, não varia por quadro temporal causado por defeitos nos pixels que fazem os fotodiodos dos pixels vazarem corrente para outros componentes (GROUP, 1998), que, por sua vez, causa um padrão espacialmente randômico nas imagens capturadas pelo sensor (BAER, 2006; GROUP, 1998).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os métodos e dados utilizados para a criação do software gerador de imagens sintéticas.

3.1 Linguagem de programação

Foi escolhido a linguagem de programação Julia para a criação do software gerador de imagens sintéticas. É uma linguagem de programação de código aberto, de alto nível, dinâmica e de propósito geral, entretanto, foi desenvolvida para satisfazer requisitos da computação de alto desempenho numérico e científico, usando compilação dinâmica (mais conhecido como *just-in-time compilation* ou JIT) para alcançar melhores desempenhos. Além disto, a própria linguagem possui um gerenciador de bibliotecas e pacotes integrado.

Devido a forma que foi desenvolvido, Julia possui algumas características interessantes para o desenvolvimento deste software, como fácil prototipagem sem grandes perdas de desempenho, fácil organização do código e fácil acesso a bibliotecas externas (e fácil replicação das bibliotecas).

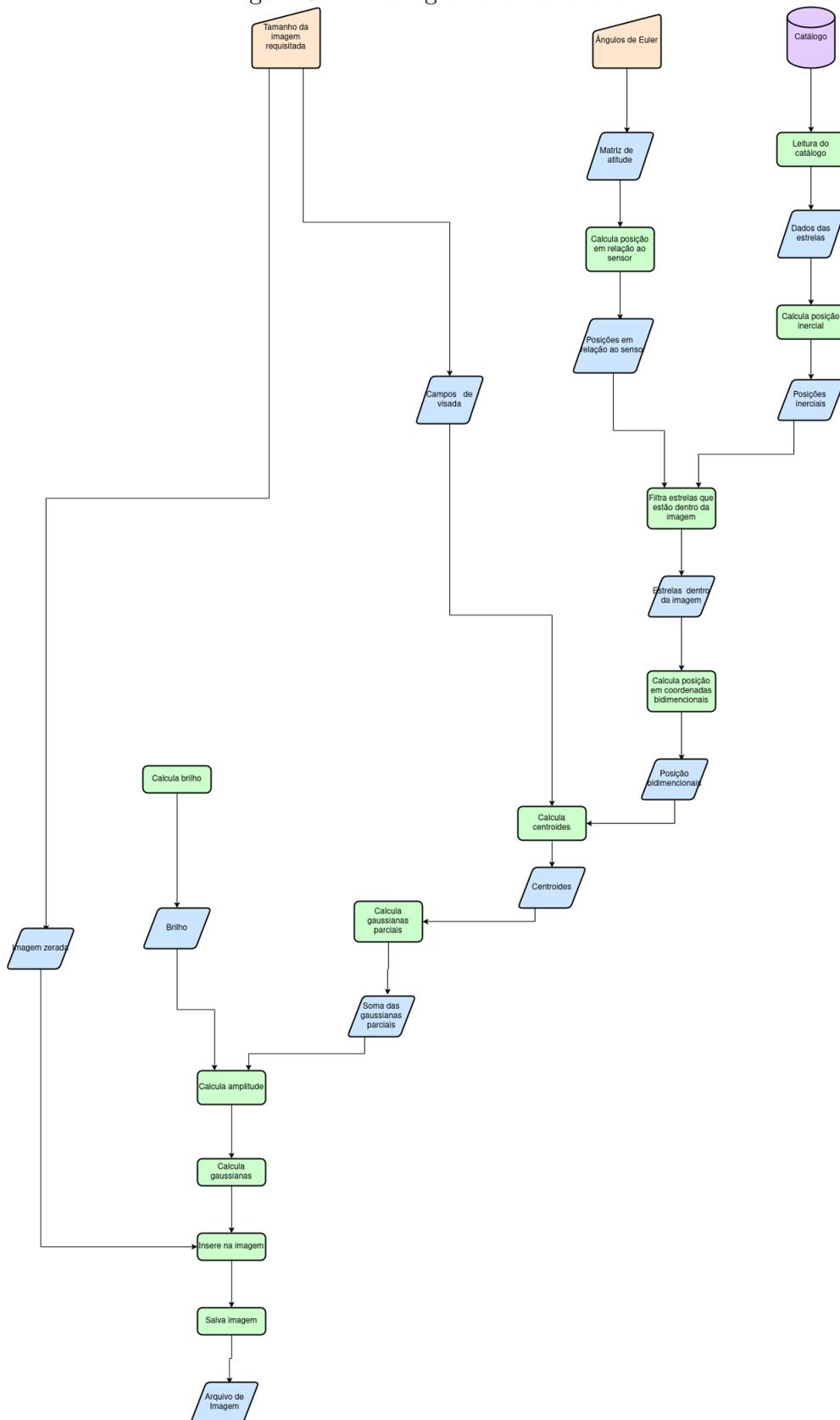
3.2 Estruturação do código

O código recebe três entradas: o catálogo de estrelas utilizado, os ângulos de Euler e o tamanho da imagem, sendo que os dois últimos são entradas manuais, isto é, definida manualmente pelo usuário, como pode ser visto na figura 3.1.

De saída do software, é uma imagem simulada, como mostrado na figura 3.1, uma em binário para alimentar o sensor de estrelas e um para visualização humana.

Na figura 3.1, mostra como os dados são transformados em outros dados através de processos até chegar na saída do software

Figura 3.1 - Fluxograma do software



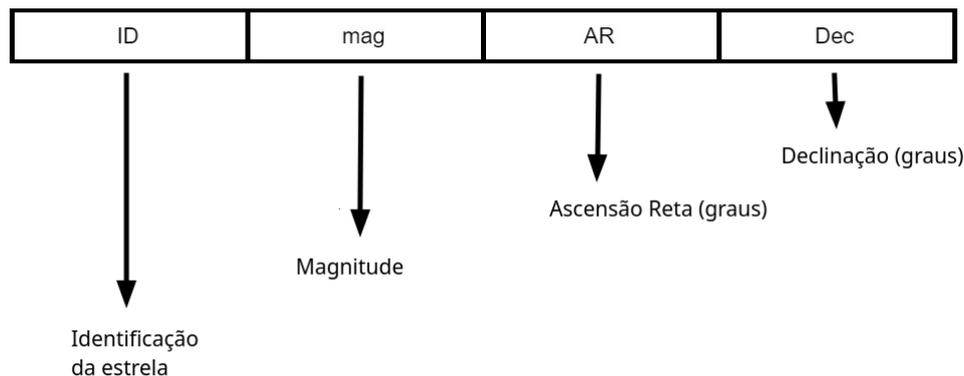
Fonte: Produção da autora

3.3 Catálogo de trabalho

O catálogo de trabalho utilizado é derivado do catálogo Hipparcos. O catálogo, no entanto foi adaptado de forma simplificar sua leitura pelo software desenvolvido. Poucas alterações foram necessárias. A primeira alteração feita foi excluir colunas de dados não utilizados pelo software. Já a segunda, consistiu em excluir linhas com dados faltantes do catálogo original.

Após estas alterações as 118218 estrelas listadas pelo Hipparcos foram reduzidas a 117955 estrelas, ou seja, uma perda de apenas 343 estrelas. Por fim cada linha do catálogo de trabalho gerado apresenta quatro informações: identificação das estrela, magnitude, ascensão reta e declinação. Na figura 3.2 pode-se observar como é estruturada cada linha de entrada do catálogo de trabalho.

Figura 3.2 - Representação de uma linha de entrada do catálogo adaptado



Fonte: Produção da autora

Apesar do catálogo adaptado ter sido utilizado durante o desenvolvimento deste trabalho, foram mantidas funções de leitura capazes de ler o catálogo Hipparcos original. Essa decisão foi tomada para que, em projetos futuros, caso seja interessante o trabalho com outros catálogos, esta transição seja facilitada.

3.3.1 Cálculo da posição das estrelas na imagem

Uma etapa importante do software é converter as efemérides (dadas em ascensão reta e declinação) das estrelas do catálogo de trabalho em centroides na imagem.

Para isso, primeiramente, é calculado a matriz de atitude do sensor de estrelas conforme os ângulos de Euler associados ao referencial solidário ao sensor, conforme a equação 2.19.

A partir da ascensão reta e declinação fornecidas pelo catálogo, conseguimos calcular o versor de posição das estrelas no referencial inercial, usando as equações 2.5, 2.6 e 2.7.

A partir do versor de posição das estrelas calculado no referencial inercial e da matriz de atitude do sensor de estrelas conseguimos calcular o vetor posição das estrelas no referencial do sensor, conforme a equação 3.1.

$$\begin{bmatrix} S_u \\ S_v \\ S_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha_s c\delta_s & s\alpha_s c\delta_s & s\delta_s \\ -s\alpha_s c\phi_s - c\alpha_s s\delta_s s\phi_s & c\alpha_s c\phi_s - s\alpha_s s\delta_s s\phi_s & c\delta_s s\phi_s \\ s\alpha_s s\phi_s - c\alpha_s s\delta_s c\phi_s & -c\alpha_s s\phi_s - s\alpha_s s\delta_s c\phi_s & c\delta_s c\phi_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O próximo passo é fazer o primeiro teste e eliminar estrelas que não iram aparecer na imagem. Este teste é feito comparando o produto escalar entre o versor inercial da posição das estrelas, \hat{S}_{uvw} e o eixo do sensor, \hat{e}_{sensor} , (primeira linha da matriz de atitude do sensor) com o cosseno da semi diagonal do campo de visada conforme a equação 3.2.

$$\hat{S}_{uvw} \cdot \hat{e}_{sensor} > \cos\left(\frac{fov_d}{2}\right) \quad (3.2)$$

As coordenadas inerciais no referencial do sensor das estrelas que passarem no testes serão convertidas para coordenadas do referencial normalizado da matriz eletrônica. Isso é possível através das equações 3.3 e 3.4, as quais encontramos a partir das equações 2.11 e 2.14.

$$S_{x'} = \frac{S_v}{S_u} \quad (3.3)$$

$$S_{y'} = \frac{S_w}{S_u} \quad (3.4)$$

Conhecendo $S_{x'}$ e $S_{y'}$ e calculando o valor de $S_{x'max}$ e $S_{y'max}$ é possível calcular o valor dos centroides (x_c, y_c) a partir das equações 3.5 e 3.6, obtidas a partir das

equações 2.10 e 2.11.

$$c_x = 0,5 \cdot imgw \cdot \left(1 - \frac{S_{x'}}{S_{x'max}}\right) \quad (3.5)$$

$$c_y = 0,5 \cdot imgh \cdot \left(1 - \frac{S_{y'}}{S_{y'max}}\right) \quad (3.6)$$

3.3.2 Distribuição do brilho das estrelas na imagem

Uma vez calculados os centroides das estrelas que aparecerão nas imagens é necessário simular a distribuição de brilho dessas estrelas na imagem.

Para esta simulação primeiramente foi necessário calcular o brilho das estrelas com base na magnitude destas e de um brilho de referência (escolhido arbitrariamente como 80000 níveis digitais). O cálculo do brilho pode ser feito a partir da equação 3.7 obtida a partir da equação 2.1.

$$B = B_{ref} \cdot 10^{\frac{-mag}{2,5}} \quad (3.7)$$

Finalmente para simular a distribuição de brilho é utilizado uma distribuição gaussiana 2D através da equação 3.8.

$$G(x, y) = A \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x - c_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - c_y)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right], \quad (3.8)$$

Onde A é a amplitude, e σ_x e σ_y os desvios padrão da coordenada x e y , respectivamente

No entanto para utilizamos esta a equação 3.8 precisamos primeiramente encontrar o valor de amplitude da equação. Isto é feito como mostrado na equação 3.10, onde a $G_{parcial}$ é definida na equação 3.9.

$$G_{parcial}(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{(x - c_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - c_y)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right], \quad (3.9)$$

$$A = \frac{B}{\sum G_{parcial}(x, y)} \quad (3.10)$$

3.3.3 Simulação da corrente escura

A simulação da corrente escura foi feita através de uma distribuição log-normal, conforme a equação 3.11.

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.11)$$

Onde x é um número randômico, μ a média dos dados do sensor e σ o desvio padrão dos dados do sensor.

A distribuição log-normal foi escolhida, pois Baer (2006) mostrou resultados satisfatórios quando pesquisava a modelagem e simulação de corrente escura para sensores do tipo CMOS.

Para o sensor que será testado usando as imagens geradas, temos que $\mu = 13,5$ e $\sigma = 0.79$ ¹.

Para gerar o ruído de corrente escura foi gerado uma matriz do mesmo tamanho da imagem gerada a qual cada item possui um numero gerado pela função nativa do Julia para gerar números randômicos. Para cada elemento desta matriz a função de log-normal foi aplicada e a matriz resultante foi somada a matriz de estrelas, gerando assim a imagem final com o ruido de corrente escura.

¹Dados retirados da *datasheet* do sensor

4 RESULTADOS

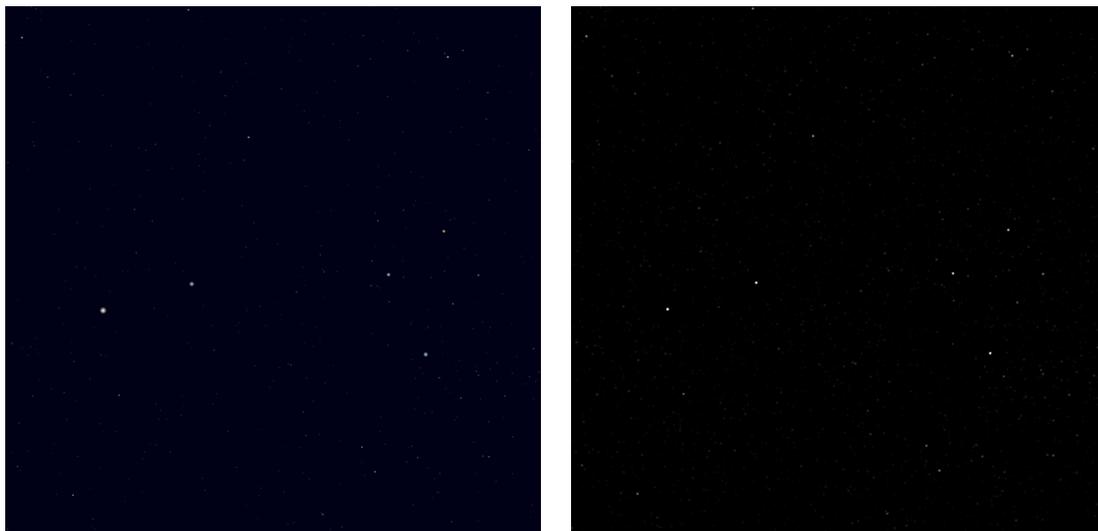
4.1 Imagens sintéticas sem adição de efeitos de ruído ou distorções ópticas

Na primeira etapa do trabalho, foram geradas sintéticas sem adição de efeitos de ruído ou distorções ópticas. O objetivo nesta etapa era testar o cálculo da posição das estrelas e a distribuição de brilho. Para validar os resultados foram feitas comparações com imagens pertencentes a outro software, também desenvolvido no INPE por Fialho (2003), o PTASE (Programa de Testes e Simulação de Algoritmos para Sensores de Estrelas) .

Na figura 4.1 podemos observar uma dessas comparações. Adicionalmente, na figura 4.2 podemos ver as mesmas imagens com anotações do software Astrometry.net. O Astrometry.net é um software desenvolvido sob liderança de David W. Hogg (Universidade de Nova York) e Dustin Lang (Universidade de Toronto)¹. Através dele é possível identificar corpos celestes presentes em uma imagem. Na figura 4.1 podemos perceber que a orientação e disposição das estrelas é praticamente a mesma, as pequenas alterações presentes se devem ao fato que as imagens tem resoluções levemente diferente: a imagem do PTASE, possui 1024x768, enquanto a imagem do software desenvolvido possui resolução de 1024x1024. Na figura 4.2 pode-se observar que as anotações para as principais estrelas presentes na imagem são as mesmas: estão anotadas as estrelas do cruzeiro do sul, Rigil Kentaur e Hadar, por exemplo.

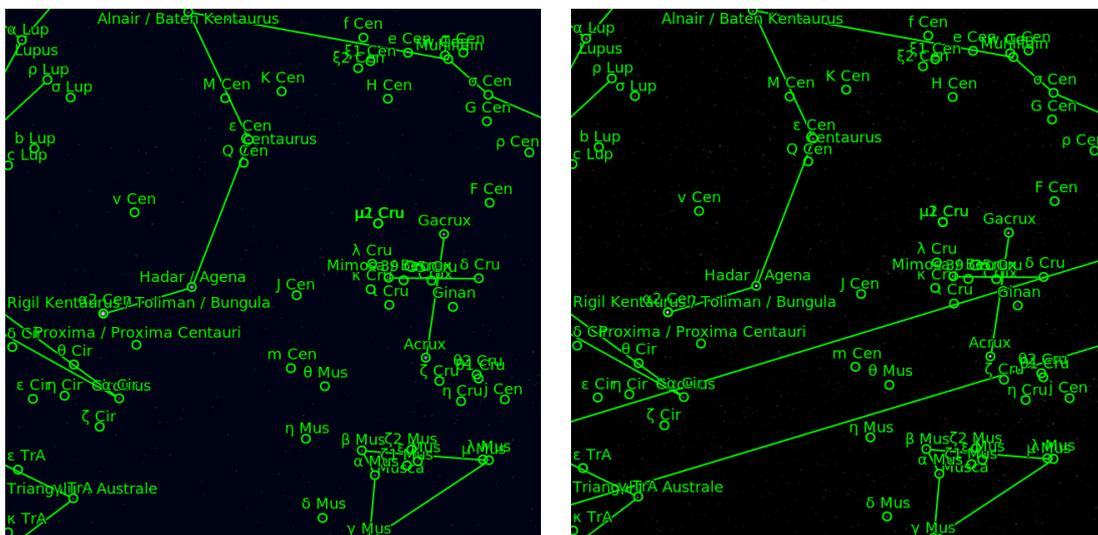
¹Para maiores informações e para utilizar o programa, basta acessar o link: <http://astrometry.net/>

Figura 4.1 - Comparação entre imagens geradas pelo PTASE e o software desenvolvido



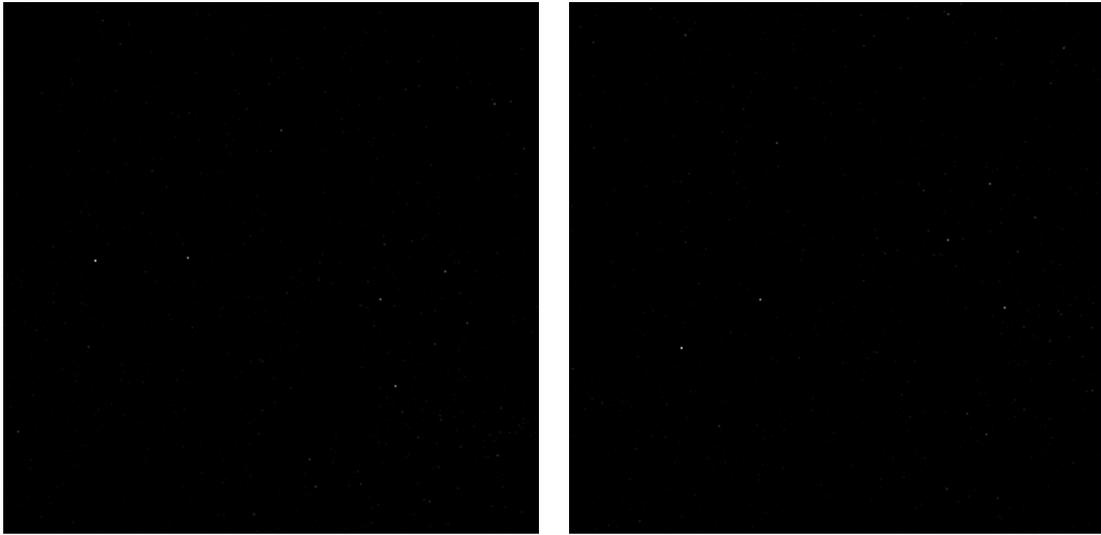
Comparação entre imagem gerada pelo PTASE, a esquerda, e imagem gerada pelo software, a direita. Para ambas as imagens a atitude do sensor é de $\alpha = 203^\circ$, $\delta = -60^\circ$ e $\phi = 0^\circ$

Figura 4.2 - Comparação entre imagens geradas pelo PTASE e o software desenvolvido com marcações do Astrometry.net



Comparação entre imagem gerada pelo PTASE, a esquerda, e imagem gerada pelo software, a direita. Para ambas as imagens a atitude do sensor é de $\alpha = 203^\circ$, $\delta = -60^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ e com marcações do Astrometry.net (<http://astrometry.net/>)

Figura 4.3 - Comparação de imagem sintéticas geradas com diferentes giros da atitude do sensor



Imagens sintéticas geradas para a atitude do sensor

Outro teste importante em relação a posição das estrelas na imagem é referente ao giro do sensor (ϕ_s). Quando temos um giro positivo, devemos observar a imagem girando no sentido anti-horário. Já quando o sensor tem um giro negativo a imagem deve girar no sentido horário. Na figura 4.3 podemos observar que o software passa no teste: quando o giro do sensor é $\phi = -15^\circ$ a imagem gira no sentido horário, já quando o giro do sensor é $\phi = 15^\circ$ a imagem gira no sentido anti-horário.

Uma vez concluída esta etapa, como foram obtidos resultados satisfatórios, foram obtidas as primeiras imagens com ruído, cujos resultados são mostrados a seguir.

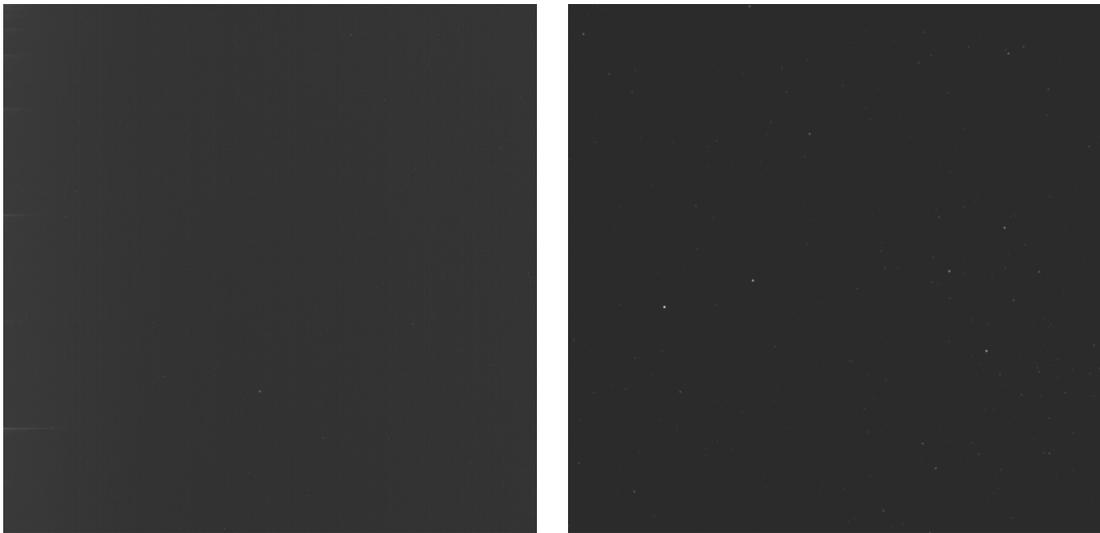
4.2 Imagens sintéticas com efeitos de corrente escura

Na figura 4.4 podemos observar uma imagem obtida pelo sensor em desenvolvimento no INPE, a esquerda e uma imagem com efeito de corrente escura, a direita. Visualmente percebemos que de fato ao aplicar o algoritmo da corrente escura na imagem sintética obtida ela clareia, o que era esperado. Isto significa que o algoritmo está cumprindo sua função.

Em comparação com a imagem original, no entanto, percebemos que ele poderia ser um pouco mais clara, se aproximando assim ainda mais da imagem original. Isto ocorre, porque o algoritmo utiliza uma média dos dados do sensor e um desvio padrão destes dados também fornecido pelo fabricante. No entanto sabe-se que cada sensor

tem sua própria média de dados e desvio padrão destes. Existe, também no INPE, trabalho cujo objetivo é obter esse modelo matemático do sensor para pesquisas futuras. Desta maneira, muito em breve estes resultados poderão ser calibrados com maior precisão. Outra alternativa para conseguir imagens ainda mais próximas é tentar variar o desvio padrão utilizado na distribuição log-normal, afim de obter um resultado ainda mais satisfatório. De fato alguns testes neste sentido já foram realizados, porém ainda não se obteve nenhum resultado satisfatório.

Figura 4.4 - Comparação entre imagem original obtida pelo sensor e imagem sintética com efeito de corrente escura



5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi desenvolvido um software capaz de gerar imagens sintéticas que se aproximam de imagens reais obtidas por um sensor de estrelas. Algumas otimizações podem ser realizadas, conforme sugerido na seção a seguir, no entanto, o resultado é bastante satisfatório dentro do período de desenvolvimento e atende os objetivos do trabalho.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- a) Otimizar o código, de modo a incluir mais simulações de ruído e distorções óticas nas imagens sintéticas.
- b) Obter as curvas de dados próprias das imagens do sensor sendo desenvolvido no INPE, para então empiricamente ajustar os parâmetros do algoritmo a fim de aproximar as imagens sintéticas ainda mais próximas das reais.
- c) Criar uma interface de linha de comando afim de facilitar o uso da ferramenta em ambientes não gráficos e automatização.
- d) Criar uma interface gráfica afim de facilitar a visualização das imagens geradas pelo usuário, para que estas fiquem ainda mais próximas de imagens reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAER, R. L. A model for dark current characterization and simulation. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Sensors, Cameras, and Systems for Scientific/Industrial Applications VII**. [S.l.], 2006. v. 6068, p. 606805. 20, 26
- BATE, R. R.; MUELLER, D. D.; WHITE, J. E.; SAYLOR, W. W. **Fundamentals of astrodynamics**. [S.l.]: Courier Dover Publications, 2016. 11, 12, 13
- CARVALHO, G. B. **Levantamento de Técnicas de Identificação de Estrelas e Desenvolvimento de um Ambiente de Simulação e Testes para Análise de seus Desempenhos em Aplicações Espaciais**. Tese (Doutorado) — Master Thesis, (INPE-8307-TDI/766), 2001. 1, 8, 9, 10, 18, 19
- ESA. The hipparcos and tycho catalogues. ESA Publications Division, 1997. 8
- FIALHO, M. A. Ambiente de simulações e testes de algoritmos para sensores de estrelas autônomos. **Undergraduate Work in Electronic Engineering, ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos Brazil**, 2003. 1, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 27
- FOSSUM, E. R. Active pixel sensors: Are ccds dinosaurs? In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors III**. [S.l.], 1993. v. 1900, p. 2–14. 5, 6, 7, 8
- _____. The invention of cmos image sensors: A camera in every pocket. In: IEEE. **2020 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)**. [S.l.], 2020. p. 1–6. 5, 7
- GROUP, H.-P. C. Noise sources in cmos image sensors. 1998. 20
- IERS. Definition and realization of the international celestial reference system by vlbi astrometry of extragalactic objects. IERS, 1997. 14
- SELLERS, J. J.; ASTORE, W. J.; GIFFEN, R. B.; LARSON, W. J. **Understanding space: An introduction to astronautics**. [S.l.]: Primis, 2004. 11

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.