

شبیه‌سازی تصاویر آسمان شب با مدل روزنه ایده‌آل برای حسگر ستاره

امیرعلی نیک‌خواه^{۱*}، فرشاد سمیه‌ئی^۲ و جعفر روشنی‌یان^۳
۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*تهران، کد پستی: ۱۶۵۶۹-۸۳۹۱۱

nikkhah@kntu.ac.ir

در این مقاله با هدف استفاده در نرم‌افزارهای طراحی و بسترهای تست حسگر ستاره به شبیه‌سازی تصاویر آسمان شب و حسگر ستاره پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا الگوریتمی جامع و دقیق به منظور شبیه‌سازی تصاویر آسمان شب بر اساس مدل روزنه ایده‌آل و استفاده از توابع توزیع نقطه‌ای و گاوس ارائه شده است. سپس به منظور ایجاد واقع‌گرایی بیشتر، منابع خطاهای اتفاقی و سیستماتیک، کشیدگی تصاویر ناشی از دینامیک بالای سکو و همچنین پخش نامتقارن نور پس‌زمینه ناشی از حضور ماه، خورشید و سیارات منظومه شمسی شبیه‌سازی شده است. در نهایت با توجه به اهمیت واقع‌گرایی در رویکرد شبیه‌سازی حل مسئله، استفاده از روش ردیابی دقیق پرتو به عنوان جایگزین روش روزنه ایده‌آل پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: حسگر ستاره، کاتالوگ ستارگان، کره سماوی، روزنه ایده‌آل، ردیابی پرتو

		علائم و اختصارات	
x_s, y_s, z_s	دستگاه مختصات حسگر ستاره	γ	نقطه اعتدال بهاری
x_p, y_p	دستگاه مختصات تصویر	T_0	ایک مرجع
φ, θ, ψ	زوایای غلت، فراز و سمت	T	زمان مشاهده
R_φ	دوران حول محور X_I به اندازه φ	M	ماتریس حرکت مخصوص (3×3)
R_θ	دوران حول محور Y_I به اندازه θ	P	ماتریس حرکت تقدیمی (3×3)
R_ψ	دوران حول محور Z_I به اندازه ψ	N	ماتریس ناوش (3×3)
r, r', r''	بردارهای یکه ستاره در دستگاه بُعدی	A	بردار ابراهای سالیانه (3×1)
α, δ	بُعد و میل ستاره	R	بردار پارالاکس سالیانه (3×1)
α_0, δ_0	بُعد و میل مرکز تصویر	$GAST$	زمان نجومی ظاهری گرینویچ
$C(t)$	ماتریس وضعیت فریم قبلی	X_{Pole}, Y_{Pole}	مختصات لحظه‌ای قطب زمین
$C(t + \delta t)$	ماتریس وضعیت در فریم جاری	X_{RA}, Y_{RA}, Z_{RA}	دستگاه مختصات بُعدی
$\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$	بردار سرعت‌های زاویه‌ای	X_I, Y_I, Z_I	دستگاه مختصات اینرسی
$\tilde{\omega}$	ماتریس ضرب خارجی بردار سرعت زاویه‌ای	X_T, Y_T	دستگاه مختصات مماسی
f	فاصله کانونی		
P	سایز پیکسل آشکارساز		
I_0	بیشینه شدت درخشندگی مرکز هاله ستاره		
I	شدت درخشندگی هاله ستاره		
J_1	تابع بسل مرتبه اول		
k	عدد موج		
λ	طول موج		

۱. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۲. دانشجوی دکتری

۳. استاد

مرجع علاوه بر ستارگان حضور ماه و برخی از سحابی‌ها در تصاویر آسمان شب در نظر گرفته شده است.

سال ۲۰۰۶ اتوآتی و همکاران با توجه به خاصیت بازتاب نور فضاپیماها^۵، از شبیه‌سازی جهت بررسی امکان به‌کارگیری حسگر ستاره به‌عنوان یک سیستم نظارت و مراقبت فضایی استفاده نمودند [۷]. در این مرجع برخلاف اکثر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته زمین به‌عنوان یک جرم آسمانی و دارای حجم در نظر گرفته شده است.

سال ۲۰۱۰ تحقیقات شن و همکاران بر موضوع کشیدگی تصاویر آسمان شب متمرکز بوده و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی امکان مرکزیابی دقیق در این تصاویر را بررسی نموده‌اند [۸]. در ادامه مراجع [۹]، [۱۰] و [۱۱] نیز تأثیر دینامیک بالا (اعم از دوران و نوسان) بر روی تصاویر حسگر ستاره را شبیه‌سازی و بررسی نموده‌اند.

سال ۲۰۱۲، محققان دانشگاه تشینگ‌هوا ایده به‌کارگیری حسگرهای ستاره روزانه^۶ را شبیه‌سازی نموده و امکان استفاده از این گونه حسگرها را در کاربردهای هوایی و تشعشعات قوی پس‌زمینه بررسی نمودند [۱۲]. در همین راستا مراجع [۱۳] و [۱۴] نیز به نتایج تحقیقات ترویدیل و همکاران جهت شبیه‌سازی حسگرهای ستاره روزانه می‌پردازند.

یکی از آخرین مراجع موجود در این زمینه در آوریل ۲۰۱۷ ارائه گردیده است. این مرجع به شبیه‌سازی تصاویر حسگر ستاره نصب شده بر روی کشتی با استفاده از داده‌های ورودی INS پرداخته است [۱۵]. بدین ترتیب طی نزدیک به پنج دهه گذشته پژوهش‌های متنوعی در زمینه شبیه‌سازی آسمان شب و حسگر ستاره انجام شده که عمده این شبیه‌سازی‌ها مبتنی بر مدل روزنه^۷ ایده‌آل و تابع توزیع نقطه‌ای (PSF) و یا گاوس بوده و جهت واقع‌نمایی بیشتر به فراخور برخی از منابع مختلف نویز شبیه‌سازی گردیده است.

در این راستا و در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه هدف از ارائه این مقاله، توصیف الگوریتمی جامع و دقیق جهت شبیه‌سازی حسگر ستاره است. برای این منظور ابتدا کره سماوی و دوربین حسگر ستاره کالیبره با امکان تولید تصاویر تصادفی و متوالی شبیه‌سازی و سپس خطاها و اعوجاجات تصاویر آسمان شب، تولید تصاویر دارای کشیدگی و تصاویر حاوی پخش نامتقارن نور شرح داده خواهد شد.

شبیه‌سازی حسگر ستاره

به‌طور کلی در حل مسائل سیستمی، طراح باید از بین دو رویکرد حل کاملاً تحلیلی مسئله یا شبیه‌سازی یکی را انتخاب نماید [۲]. این انتخاب با در نظر گرفتن میزان پیچیدگی روش تحلیلی و سودمندی

a	شعاع روزنه
ϑ	زاویه بین محور روزنه و امتداد مرکز روزنه و نقطه
x_0, y_0	مختصات مرکز ستاره در دستگاه تصویر
PSF	تابع توزیع نقطه‌ای
σ_{PSF}	عرض RMS یک‌بُعدی گاوسی
Df	خطای تعیین فاصله کانونی
Dx, Dy	خطای تعیین موقعیت نقطه اصلی تصویر
φ_x, φ_y	ناهم‌ترازی آشکارساز حول محورهای x و y
φ_z	چرخش آشکارساز حول محور اپتیکی
K_1, K_2, K_3, K_4	ضرایب اعوجاج شعاعی
x_c, y_c	مختصات مرکز تصویر
d	فاصله ستاره از مرکز تصویر
T_e	زمان تابش نور

مقدمه

امروزه تعیین وضعیت یکی از مهم‌ترین وظایف بخش ناوبری هر وسیله پرنده خودمختار^۴ یا غیرخودمختار است. برای این منظور معمولاً مجموعه‌ای از حسگرهای کم‌دقت (نظیر ژيروسکوپ، حسگر خورشیدی، مغناطیس‌سنج و ...) در کنار یکدیگر استفاده می‌گردند. لیکن هزینه‌های تلفیق این سامانه‌های مجزا، مانعی عمده در تحقق هدف ساخت فضاپیماها و ماهواره‌های کوچک‌تر، ارزان‌تر و سریع‌تر است.

از سویی دیگر حسگر ستاره در مقایسه با سایر حسگرهای تعیین وضعیت، به‌طور آشکار دقیق‌ترین حسگر مورد استفاده است. امروزه دقت بالای این حسگرهای (۳ تا ۱۰ ثانیه قوسی [۱]) استفاده از آن‌ها در مأموریت‌های دقیق و طولانی مدت را کاملاً توجیه‌پذیر و بعضاً الزامی کرده است.

در این راستا و به‌منظور کاهش هزینه‌ها و ریسک‌های بالای تست‌های فضایی، استفاده از شبیه‌ساز حسگر ستاره و تست‌های آزمایشگاهی روشی مرسوم است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تاریخچه این‌گونه شبیه‌سازی‌ها به اواسط دهه ۷۰ میلادی بازمی‌گردد. یکی از اولین منابع موجود در این زمینه مقاله وینتر و وایزملر است که در آن ابتدا آشکارسازی از نوع CCD شبیه‌سازی شده و سپس نتایج آن جهت تعیین دقت الگوریتم مرکزیابی و تأثیر آن بر طراحی حسگر ستاره بررسی گردیده است [۲]. از آن زمان تاکنون تمرکز اصلی شبیه‌سازها بر تست‌های آزمایشگاهی، بهینه‌سازی طراحی و تست عملکرد الگوریتم‌های مرکزیابی بوده و مراجع [۳]، [۴] و [۵] نیز بر همین موضوع تمرکز دارند. مرجع [۶] نیز از تصاویر شبیه‌سازی شده حسگر ستاره به‌عنوان بستر تست آزمایشگاهی و در کنار تصاویر زبیتی استفاده نموده است. در این

5. Albedo
6. Daytime Star Tracker
7. Pinhole

4. Autonomous

گیرد. لیکن مختصاتی که از کاتالوگ ستارگان استخراج می‌گردد، مختصات متوسط ستاره نسبت به اپک مرجع بوده و بنابراین می‌بایست با اعمال تصحیحاتی به موقعیت حقیقی ستاره در لحظه مشاهده تبدیل شوند ([۱۷] و [۱۸]). لذا برای این منظور و پیش از ورود به مبحث انتقال از مختصات ستارگان از دستگاه مختصات بُعدی متوسط در اپک مرجع به مختصات حقیقی ستاره در لحظه مشاهده، می‌بایست تعاریف زیر را مدنظر داشت [۱۷].

- محل متوسط (MP^{15}): عبارت از موقعیت ستاره نسبت به یک سیستم خورشیدمرکز^{۱۶} بوده و مرجع‌های آن استوا و نقطه اعتدال بهاری (γ) متوسط است.
- محل حقیقی (TP^{17}): عبارت از موقعیت ستاره نسبت به یک سیستم خورشیدمرکز می‌باشد که مرجع‌های آن استوا و γ حقیقی در زمان مشاهده است.
- محل ظاهری (AP^{18}): عبارت از موقعیت ستاره نسبت به یک سیستم زمین‌مرکز^{۱۹} و مرجع‌های آن استوا و γ حقیقی در زمان مشاهده است.
- محل مشاهده شده (OP^{20}): عبارت از موقعیت ستاره نسبت به سیستمی است که مبدأ آن نقطه‌ای واقع بر روی سطح زمین^{۲۱} بوده و مراجع آن افق و قائم فیزیکی آن محل باشد.
- زمینی متوسط (AT^{22}): دستگاه مختصاتی که مبدأ آن مرکز ثقل زمین بوده و مراجع آن استوا و نصف‌النهار گرینویچ متوسط می‌باشد.
- زمینی لحظه‌ای (IT^{23}): دستگاه مختصاتی که مبدأ آن مرکز ثقل زمین بوده و مراجع آن استوا و نصف‌النهار گرینویچ لحظه‌ای می‌باشد.

بدین ترتیب برای تعیین وضعیت با استفاده از حسگر ستار با صرف‌نظر از ابیراهی روزانه، پارالاکس ژئوسنتریک و انکسار، انتقال از دستگاه بُعدی متوسط در اپک مرجع (مختصات ارائه شده در کاتالوگ‌های ستاره) به مختصات حقیقی ستاره در لحظه مشاهده (مختصات مشاهده شده ستاره در عکس) می‌بایست مطابق بلوک دیاگرام شکل یک و رابطه زیر عمل نمود.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{AP_T} = R + A + NPM \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{MP_{T_0}} \quad (1)$$

همچنین در صورت نیاز به تعیین موقعیت می‌بایست این

نهایی آن از یک سو و نیاز به تأیید صحت و تقسیم نتایج شبیه‌سازی از سوی دیگر، معمولاً به سمت شبیه‌سازی گرایش دارد. علی‌الخصوص زمانی که تأثیر فرآیندهای تصادفی وارد حل مسئله شده و در کنار یک شبیه‌سازی با درجه بالایی از واقع‌گرایی و تکنیک‌های گرافیک کامپیوتری، ابزاری مناسب در اختیار طراح قرار می‌دهند. در نهایت طی پروسه طراحی و توسعه محصول، همواره نتایج شبیه‌سازی جهت تأمین داده‌های تست و پیاده‌سازی توابع پردازش سیگنال در دسترس بوده و به همین دلیل معمولاً شبیه‌سازی روشی مناسب‌تر برای حل مسائل سیستمی است. از این رو در ادامه الگوریتمی جامع جهت شبیه‌سازی تصاویر حسگر ستار ارائه خواهد گردید.

کاتالوگ ستاره

در ناوربری نجومی اساس محاسبات بر مبنای زمان مشاهده و موقعیت معلوم ستارگان بر روی کره سماوی است. از این رو در اولین گام شبیه‌سازی تصاویر حسگر ستاره، نیاز است تا یک کاتالوگ ستاره مناسب تهیه و ضمن قرائت اطلاعات مربوط به آن، داده‌های مورد نیاز استخراج گردد. بدین منظور پس از بررسی منابع موجود و هم‌سو با نتایج مرجع [۱۶]، کاتالوگ هیپارکوس به‌عنوان کاتالوگ مینا در این پژوهش انتخاب گردید.

تغییرات مختصات سماوی ستارگان

در کاتالوگ‌های ستاره، مختصات ستارگان معمولاً در دستگاه بُعدی و نسبت به اپک مرجع (غالباً $J2000.0$) ارائه می‌گردد. این موضوع به این دلیل است که دستگاه بُعدی واسط بین دستگاه‌های سماوی و زمینی بوده و مختصات ستارگان در این سیستم نسبت به زمان ثابت است. لیکن این نکته بدان مفهوم نیست که دستگاه مختصات بُعدی کاملاً ثابت بوده و مشمول هیچ‌گونه تغییری نمی‌گردد. در حقیقت حداقل چهار حرکت، ستارگان نسبت به یکدیگر (حرکت مخصوص^۸)، حرکات دستگاه مختصات نسبت به ستارگان (حرکات تقدیمی^۹ و ناوش^{۱۰})، جابجایی‌های ظاهری ستارگان به سبب پدیده‌های فیزیکی (انکسار^{۱۱}، ابیراهی^{۱۲}، پارالاکس^{۱۳}) و حرکت دستگاه مختصات نسبت به زمین صلب (حرکت قطبی^{۱۴}) بر روی سیستم بُعدی اثر می‌گذارند [۱۷].

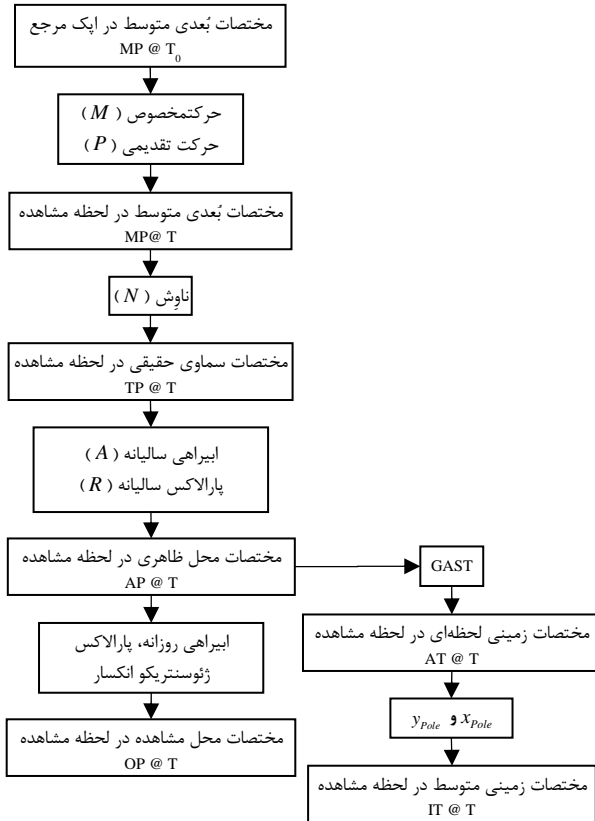
از سوی دیگر در مدل‌های ریاضی مربوط به نجوم ژئودتیک، لازم است تا مختصات ستارگان در لحظه مشاهده مورد استفاده قرار

15. Mean Place
16. Heliocentric
17. True Place
18. Apparent Place
19. Geocentric
20. Observed Place
21. Topocentric
22. Average Terrestrial
23. Instantaneous Terrestrial

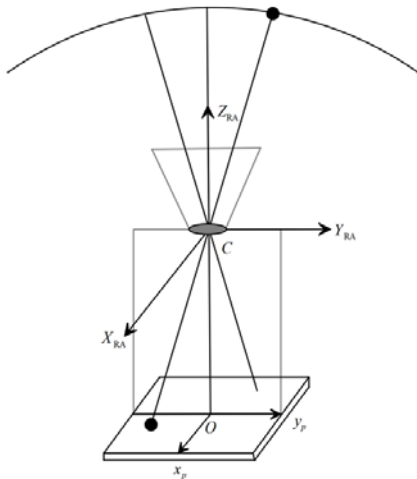
8. Proper Motion
9. Precession
10. Nutation
11. Refraction
12. Aberration
13. Parallax
14. Polar Motion

قرار می‌گیرد. همچنین برای سادگی فرض می‌گردد که محور اپتیکی دوربین از مرکز هندسی صفحه کانونی عبور می‌نماید [۲۱].

از سویی دیگر فرض می‌شود که مبدأ سیستم مختصات جهانی بر مرکز عدسی شیئی منطبق بوده و محور Z_{RA} سیستم جهانی بر محور اپتیکی دوربین منطبق باشد. همچنین مبدأ سیستم مختصات تصویر بر مرکز هندسی صفحه عکس منطبق بوده و محورهای مختصات آن (x_p, y_p) به موازات محورهای X_{RA} و Y_{RA} سیستم مختصات جهانی باشند.



شکل ۱- تبدیلات بین دستگاه‌های مختصات مورد استفاده در نجوم



شکل ۲- ساختار اپتیکی یک دوربین حسگر ستاره

محاسبات تا محاسبه مختصات زمینی لحظه‌ای در لحظه مشاهده (روابط ۲ و ۳) ادامه یابد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{AT_T} = R_3(GAST) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{AP_T} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IT_T} = R_1(y_{Pole})R_2(x_{Pole}) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{AT_T} \quad (3)$$

امروزه به منظور محاسبه تغییرات در مختصات سماوی ستارگان و همچنین تبدیل تقویم روزمره به تاریخ ژولیان و بلعکس^{۲۴}، الگوریتم‌های متعددی ارائه گردیده که با توجه به کثرت استفاده و اعتبار مراجع ارائه دهنده الگوریتم، در این پژوهش از الگوریتم‌های SOFA^{۲۵} استفاده شده است. در عمل جهت اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده در محیط متلب R2016a، نتایج با نرم‌افزار پورتال اقیانوس‌شناسی نیروی دریایی آمریکا مقایسه و از صحت آن اطمینان حاصل گردید.

مدل روزنه

حسگر ستاره از نظر ساختاری شامل یک دوربین حساس است که به کمک بخش اپتیکی، پرتو ستارگان را جمع‌آوری نموده و با استفاده از یک آشکارساز، تصویر تشکیل شده را به صورت رقومی وارد بخش پردازشگر می‌نماید. روش معمول جهت شبیه‌سازی این سامانه استفاده از مدل روزنه ایده‌آل است که تا به امروز در اکثر قریب به اتفاق مراجع استفاده گردیده است. این مدل توصیفی ریاضی از ارتباط پرسپکتیو بین مختصات سه‌بُعدی ستاره و تصویر آن بر روی صفحه آشکارساز بوده و از روزنه ایده‌آل (فاقد عدسی) استفاده می‌نماید [۱۹]. لذا مدل روزنه ایده‌آل به طور کلی شامل اعوجاجات هندسی و یا تاری^{۲۶} ناشی از عدسی‌ها نبوده و به نوعی یک تقریب مرتبه اول است. بدین ترتیب فرآیند تصویربرداری حسگر ستاره شامل دو مرحله انتقال مراکز ستاره‌ها از دستگاه اینرسی (بُعدی) به دستگاه مختصات حسگر و سپس نگاهت پرسپکتیو از دستگاه حسگر به دستگاه مختصات تصویر می‌باشد [۲۰].

برای این منظور مطابق شکل ۲ در ساده‌ترین حالت ممکن فرض می‌گردد امتداد محور اپتیکی^{۲۷} سیستم بوده و کاملاً بر صفحه کانونی (آشکارساز) عمود است؛ به گونه‌ای که آشکارساز دقیقاً در این صفحه قرار داشته و سمت حساس آن به سمت عدسی شیئی

۲۴. تاریخ ژولیان عبارت از تعداد روزهای طی شده از ظهر اول ژانویه سال ۴۷۱۳ قبل از میلاد حضرت مسیح می‌باشد. این تاریخ یک مقیاس زمانی پیوسته برای تمامی مقاصد عملی ارائه می‌نماید که همواره مثبت است. به عنوان مثال در این تقویم اپک مرجع J2000.0 به صورت $J2000.0 = JD\ 2451545.0 = 2000\ January\ 1.5\ UT$ نشان داده می‌شود.

25. Standards of Fundamental Astronomy

26. Blurring

27. Boresight

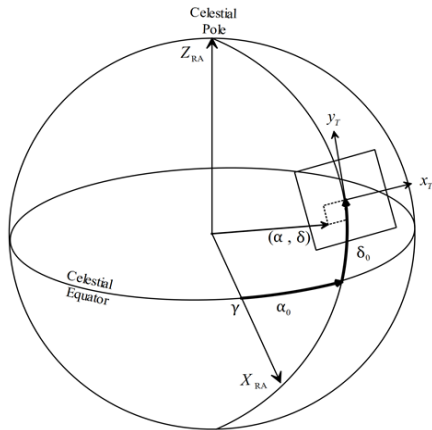
$$\begin{aligned} x_T &= \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta \sin \delta_0} \\ y_T &= \frac{\sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) - \cos \delta_0 \sin \delta}{\cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta \sin \delta_0} \end{aligned} \quad (4)$$

سپس انتقال از مختصات حسگر ستاره $(x_T, y_T, f)^T$ به مختصات تصویر با اطلاع از فاصله کانونی (f)، ابعاد پیکسل تصویر (p) و نگاشت پرسپکتیو امکان‌پذیر می‌باشد. در این روش محل هر ستاره بر روی صفحه کانونی با استفاده از تقاطع اشعه اصلی آن ستاره با صفحه کانونی تعیین می‌گردد [21].

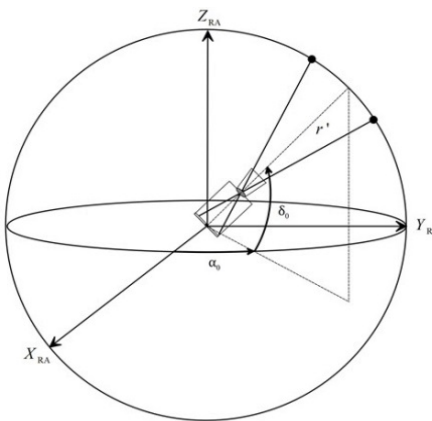
$$x_p = f \left(\frac{x_T}{p} \right), \quad y_p = f \left(\frac{y_T}{p} \right) \quad (5)$$

در حالت کلی‌تر مطابق شکل ۴ اگر دستگاه مختصات تصویر نسبت به سیستم مختصات اینرسی با زوایای غلت (ϕ)، فراز (θ) و سمت (ψ) دوران نموده باشد.

$$r' = R_\theta R_\phi R_\psi r, \quad r = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (6)$$



شکل ۳- نگاشت مختصات کروی (α, δ) به صفحه مماسی



شکل ۴- بُعد (α_0) و میل (δ_0) موقعیت مرکز تصویر در آسمان

ابتدا با استفاده از بردار r' نرمال شده، بُعد (α_0) و میل (δ_0) موقعیت مرکز تصویر در آسمان تعیین می‌گردد.

بدین ترتیب در هر لحظه موقعیت ستارگان با استفاده از کاتالوگ ستاره (در این پژوهش کاتالوگ هیپارکوس)، بر روی کره سماوی معلوم بوده و تنها نیاز است تا مختصات ستاره‌های واقع در میدان دید حسگر از کره سماوی به صفحه مماس بر کره در محل مرکز تصویر انتقال یابد. لیکنپیش از ورود به مبحث شبیه‌سازی ابتدا چهار دستگاه مختصات مورد استفاده در این بخش توصیف می‌شوند.

دستگاه مختصات اینرسی (I): دستگاه مختصات اینرسی مورد استفاده در حسگرهای ستاره همان دستگاه بُعدی مربوط به کاتالوگ ستاره است (X_{RA}, Y_{RA}, Z_{RA}) . مبدأ مختصات این سیستم در خورشید بوده و محور Z_I آن از قطب شمال سماوی می‌گذرد. محور X_I به سمت نقطه اعتدال بهاری (γ) و محور Y_I به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که سیستم راست‌گرد باشد. لازم به ذکر است که در عمل برای سادگی محاسبات مبدأ از مرکز خورشید به مرکز زمین منتقل شده و لذا اطلاق سیستم اینرسی به آن، با اغماض همراه بوده و تنها در بازه‌های زمانی کوتاه می‌توان آن را اینرسی فرض نمود.

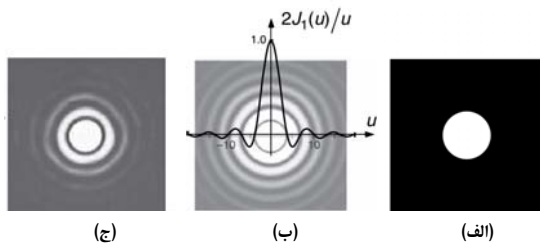
دستگاه مختصات تصویر (P): مرکز این دستگاه در نقطه اصلی 28 صفحه آشکارساز بوده و محورهای x_p و y_p در داخل صفحه آشکارساز، عمود بر یکدیگر و در امتداد اضلاع آشکارساز است. دستگاه مختصان مماسی (T): صفحه اولیه این دستگاه مماس بر کره سماوی در محل برخورد محور اپتیکی دوربین حسگر با کره سماوی (محل مرکز تصویر) بوده و محورهای x_T و y_T آن به موازات محورهای x_p و y_p دستگاه مختصات تصویر می‌باشند.

دستگاه مختصات حسگر ستاره (S): محورهای x_s و y_s این دستگاه منطبق بر محورهای x_T و y_T دستگاه مختصات مماسی بوده و محور z_s آن عمود بر صفحه مماسی و در امتداد محور اپتیکی دوربین حسگر ستاره است.

با این تعاریف در این پژوهش ابتدا از مدل روزنه ایده‌آل استفاده شده و برای سادگی فرض گردیده است که سیستم کاملاً کالیبره است، به این معنی که محور اپتیکی دوربین حسگر از مرکز هندسی صفحه آشکارساز عبور کرده و عمود بر آن است. همچنین صفحه آشکارساز دقیقاً به موازات صفحه مماسی و منطبق بر صفحه کانونی بوده و فاصله کانونی (f) کاملاً معلوم است. علاوه بر این مبدأ سیستم مختصات تصویر بر مرکز هندسی صفحه آشکارساز منطبق بوده و محورهای مختصات آن به موازات محورهای x_T و y_T باشند. بدین ترتیب در هر لحظه موقعیت بُعدی ستارگان بر روی کره سماوی (α, δ) معلوم بوده و نیاز است تا موقعیت ستاره‌های واقع در میدان دید به صفحه مماسی انتقال یابد. این مسئله مطابق شکل ۳ با اطلاع از مختصات بُعدی محل مرکز تصویر (α_0, δ_0) و رابطه ۴ قابل حل است [22].

هاله ستاره

تابع توزیع نقطه‌ای^{۳۰}، توصیفی دوبعدی از توزیع نور یک منبع نور نقطه‌ای در صفحه کانونی بودهو برای یک سیستم اپتیکی با روزنه دایره‌ای به شکل الگوی پراش^{۳۱} حاصل از تئوری فرن‌هوفر است [۲۴]. در حسگر ستاره نیز با فرض روزنه دایره‌ای، پاسخ آشکارساز به نور ستاره به شکل الگوی پراش می‌باشد. این پاسخ در حالت کانونی منجر به تصویر مراکز ستاره‌های واقع در بینهایت تنها بر روی یک پیکسل آشکارساز می‌گردد. لیکن برای غلبه بر قضیه نمونه‌برداری نایکوئیست و حصول دقت مرکزی‌یابی زیر پیکسل، سیستم تصویربرداری به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد که هاله هر ستاره برحسب میزان قدر بر روی چند پیکسل به‌صورت ناکانونی^{۳۲} تصویر گردد ([۹] و [۲۵]). در این حالت الگوی پراش، یک نقطه نورانی در وسط به همراه تعدادی از حلقه‌های تیره و روشن هم‌مرکز در اطراف آن خواهد بود که در مجموع هاله ستاره نامیده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶- (الف) روزنه دایره‌ای (ب) خروجی تابع توزیع نقطه‌ای (ج) الگوی واقعی پراش فرن‌هوفر [۲۶]

شدت این الگوی پراش ناشی از روزنه دایره‌ای به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۷]:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 \quad (13)$$

I_0 بیشینه شدت درخشندگی مرکز الگوی هاله ستاره^{۳۳}، J_1 تابع بسل مرتبه اول، $k = 2\pi/\lambda$ عدد موج، λ طول موج، a شعاع روزنه و θ زاویه بین محور روزنه و خط واصل مرکز روزنه و نقطه است.

از سویی دیگر هر چند که هاله ستاره به‌کندی و با فاصله نسبتاً زیاد از مرکز به صفر میل کرده و حلقه‌های بیرونی بخش قابل توجهی از شدت کل الگو را دارا می‌باشند، لیکن توابع توزیع جایگزین نظیر گاوس [۸] و لورنتس [۲۸] نیز می‌توانند با تقریب مناسب جایگزین تابع توزیع نقطه‌ای شوند. لذا یک معیار جایگزین برای اندازه‌گیری

30. Point Spread Function

31. Airy Disk

32. Defocus

۳۳. محاسبه I_0 با توجه به مشخصات آشکارساز و قدر ستاره هدف و مقایسه آن با روشنایی و قدر یک ستاره مینا (نظیر Vega) و رابطه $I_0 = I_{ref} 10^{0.4(m_{ref}-m)}$ صورت می‌گیرد که در آن m قدر ستاره هدف بوده و m_{ref} و I_{ref} به ترتیب قدر و درخشندگی ستاره مینا است.

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \frac{r'_2}{r'_1} \quad (7)$$

$$\delta_0 = \tan^{-1} \frac{r'_3}{R_H}, \quad R_H = \sqrt{r_1'^2 + r_2'^2} \quad (8)$$

سیس جهت تبدیل وضعیت از شکل ۴ به ۵، ابتدا کره سماوی را به همراه دوربین دوران داده تا محور اپتیکی دوربین با محور Z_{RA} هم‌راستا شده و در نهایت همانند قبل عمل می‌گردد.

$$r'' = R^{-1}r' \quad (9)$$

همچنین در صورت نیاز به تصاویر متوالی، در هر مرحله ابتدا کاتالوگ ستاره به‌روز رسانی شده و سپس جهت به‌روزرسانی بردار وضعیت حسگر، با فرض کوچک بودن سرعت‌های زاویه‌ای، ماتریس وضعیت در فریم جاری ($C(t+\delta t)$) با استفاده از ماتریس وضعیت فریم قبلی $C(t)$ و رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۳]:

$$C(t+\delta t) = C(t)[I + \tilde{\omega} \delta t] \quad (10)$$

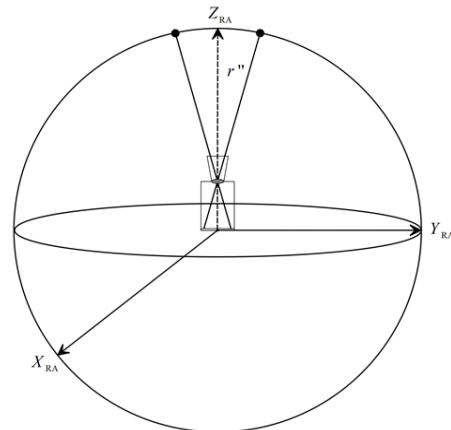
که در آن $\tilde{\omega}$ ماتریس ضرب خارجی بردار سرعت زاویه‌ای $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ است.

$$\tilde{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

لیکن در صورتی که سرعت‌های زاویه‌ای بزرگ باشند می‌توان با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل اولر، زوایای اولر در فریم جاری و ماتریس وضعیت متناظر را به‌صورت زیر محاسبه نمود.

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}_{t+\delta t} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} \omega_x + (\omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi) \tan \theta \\ \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi \\ (\omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi) \sec \theta \end{bmatrix} \delta t \quad (12)$$

در نهایت با استفاده از وضعیت فریم جاری مختصات مرکز تصویر محاسبه شده و روند انتقال مراکز ستاره‌های واقع در میدان دید از دستگاه مختصات بُعدی به دستگاه مختصات تصویر انجام می‌شود.



شکل ۵- نحوه انتقال محور اپتیکی دوربین از وضعیت اولیه به محور Z_{RA}

سایز هاله ستاره، چشم‌پوشی از حلقه‌های بیرونی و تخمین بخش مرکزی با استفاده از مدل گاوسی و رابطه ۱۴ است [۸].

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_{PSF}^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_{PSF}^2}\right) \quad (14)$$

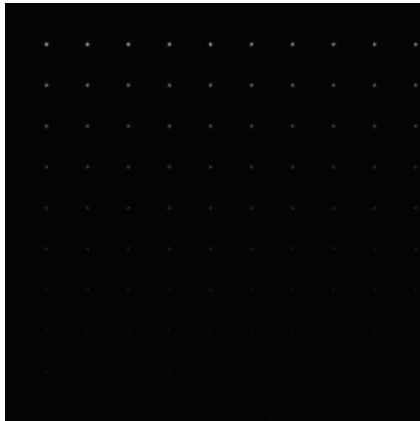
که در آن x_0 و y_0 مختصات مرکز ستاره و σ_{PSF} عرض RMS یک‌بُعدی گاوسی است. شکل ۷ شبیه‌سازی ستاره‌ها از قدر ۲- تا ۹/۷ را با گام ۱/۰ و استفاده از توابع توزیع نقطه‌ای و گاوس نشان می‌دهد.

مدل‌سازی خطا

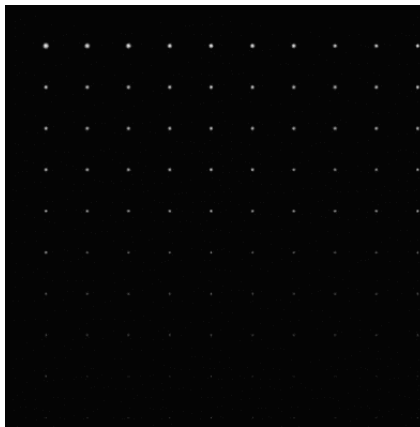
دقت عملکرد حسگرهای ستاره به پارامترهای متعددی نظیر حساسیت آشکارساز، میدان دید دوربین، دقت پارامترهای اپتیکی، دقت مرکزیابی، آستانه تشخیص ستاره، دقت به‌روز رسانی کاتالوگ، مانور پذیری، کالیبراسیون و ... بستگی دارد ([۹] و [۲۵]). لذا به‌منظور شبیه‌سازی دقیق و صحیح تصاویر حسگر ستاره، شناخت و اعمال این منابع خطا اعم از اتفاقی و سیستماتیک از اهمیت بسزایی برخوردار است. در حسگرهای ستاره خطاهای اتفاقی عمدتاً وابستگی عمیقی به آشکارساز دارند [۲۹]. این منابع خطا که به‌صورت قطعی قابل محاسبه و جبران‌سازی نبوده و تنها با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال و کمیت‌های آماری قابل حذف و یا بیان می‌باشند، عبارت از نویزهای ضربه‌ای^{۳۴}، جریان تاریک^{۳۵}، بازخوانی^{۳۶}، کوانتیده شدن سیگنال^{۳۷}، تنظیم مجدد^{۳۸}، غیریکنواختی^{۳۹} و پس‌زمینه^{۴۰} می‌باشند ([۳۰] و [۳۱]). در این پژوهش با توجه به کیفیت الگوریتم پیشنهادی مرجع [۳۱]، از آن جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. این شبیه‌ساز بر محیط MATLAB R2016a بر روی پردازنده Intel Core i7 با 8 گیگابایت رم و ویندوز 10 (64 بیتی) انجام شده است.

بدین ترتیب شکل ۸ - الف نمایی از آسمان شب با میدان دید ۸ درجه، ابعاد صفحه آشکارساز 512×512 پیکسل و سایز پیکسل ۱۵ میکرون را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۸ - ب تصویر متناظر از نرم‌افزار Starry Night برای همان میدان دید و زمان را نشان می‌دهد. همچنین برای شبیه‌سازی قابلیت تولید تصاویر بازگشتی توسط الگوریتم ارائه شده در روابط ۱۰ و ۱۲ بر اساس دوربین مورد استفاده در شکل ۸ با فرض $\omega = [0 \ 0 \ 10]^T$ درجه بر ثانیه و گام زمانییک ثانیه تصاویر متوالی شبیه‌سازی گردید که نتیجه ۴ تصویر اولیه آن در شکل ۹ و مختصات مربوط به دو ستاره از آن تصاویر در دستگاه مختصات تصویر در جدول یک نمایش داده شده است.

-
- 34. Shot noise
 - 35. Dark current noise
 - 36. Read noise
 - 37. Quantization noise
 - 38. Reset noise
 - 39. Non uniformity noise
 - 40. Background noise

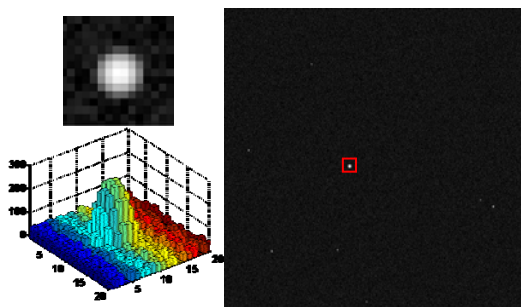


الف - تابع توزیع نقطه‌ای

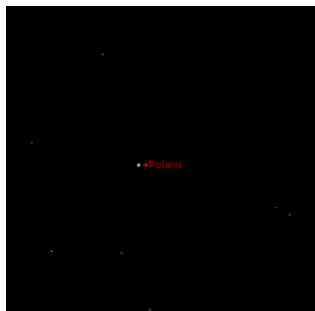


ب - تابع توزیع گاوس

شکل ۷- هاله تولید شده برای ستاره‌های نوعی از قدر ۲- تا ۹/۷



الف - خروجی الگوریتم پیشنهادی



ب - خروجی نرم‌افزار Starry Night

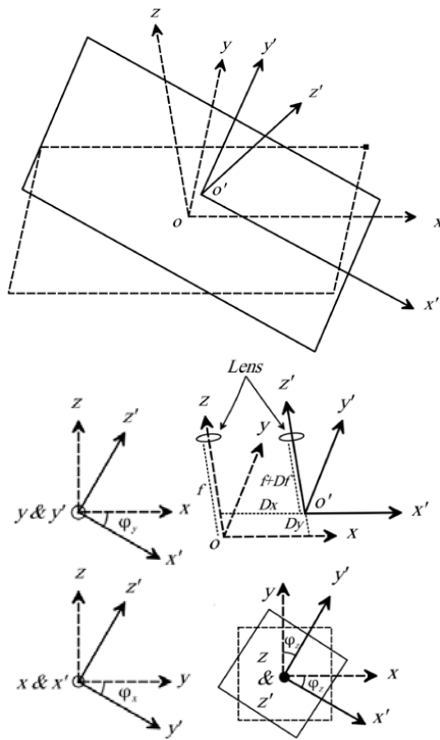
شکل ۸- شبیه‌سازی با الگوریتم پیشنهادی و تابع توزیع گاوس

در مرحله دوم تأثیر اعوجاجات شعاعی مطابق با رابطه ۱۶ به شبیه‌سازی اعمال گردیده،

$$\begin{aligned} x_u &= x_f + (x_f - x_c)(K_1 d^2 + K_2 d^4 + \dots) \\ y_u &= y_f + (y_f - y_c)(K_1 d^2 + K_2 d^4 + \dots) \\ z_u &= z_f \\ d &= \sqrt{(x_f - x_c)^2 + (y_f - y_c)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن (x_c, y_c) مختصات مرکز تصویر است. در نهایت تأثیرات ناشی از ناهم‌ترازی (اعوجاجات مماسی)، چرخش آشکارساز و عدم تعیین دقیق نقطه اصلیه صورت زیر اعمال می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_U = R_3(\varphi_z) R_2(\varphi_y) R_1(\varphi_x) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_u + \begin{bmatrix} Dx \\ Dy \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

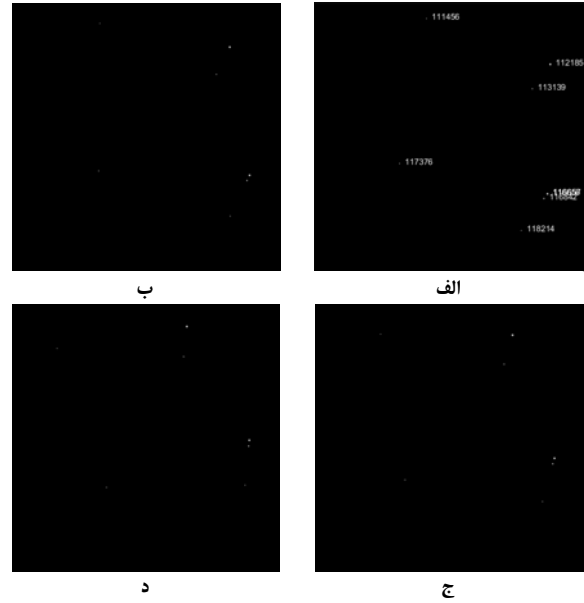


شکل ۱۰- منابع خطاهای سیستماتیک

لذا در الگوریتم پیشنهادی جهت شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای کالیبراسیون، ابتدا تأثیر خطای فاصله کانونی بر روی دستگاه حسگر ستاره از طریق رابطه زیر اعمال می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_f = \begin{bmatrix} \frac{f+Df}{f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f+Df}{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ Df \end{bmatrix} \quad (18)$$

در مرحله دوم تأثیر اعوجاجات شعاعی مطابق با رابطه ۱۶ به شبیه‌سازی اعمال گردیده،



شکل ۹- شبیه‌سازی تصاویر متوالی

جدول ۱- موقعیت دو ستاره تصاویر شکل ۹

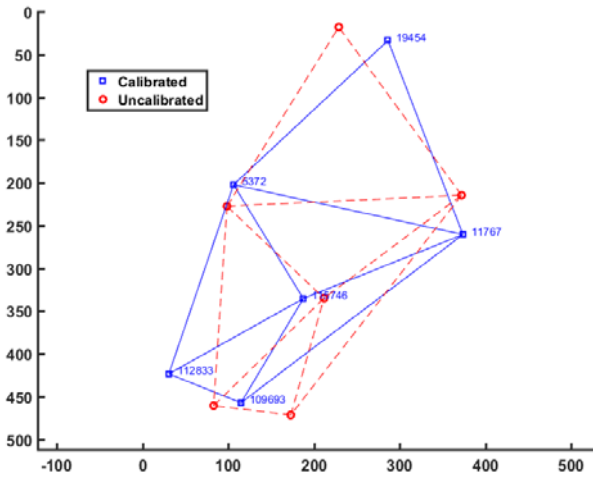
شناسه	۱۱۲۱۸۵		۱۱۸۲۱۴	
شکل	Y_{ccd}	X_{ccd}	Y_{ccd}	X_{ccd}
الف	۱۱۶.۲۱۴۷	۴۴۸.۲۹۸۱	۳۹۳.۰۶۷۸	۴۳۴.۷۰۱۱
ب	۸۴.۲۸۹۷	۴۱۵.۰۱۳۷	۴۱۵.۸۴۲۶	۴۰۷.۵۰۲۳
ج	۵۹۶.۰۷۲	۳۷۶.۶۱۰۶	۴۳۳.۵۲۱۵	۳۷۷.۷۴۲۵
د	۴۳۰.۰۴۲	۳۳۴.۵۶۱۰	۳۴۵.۸۱۶۸	۳۴۶.۳۸۵۴

از سویی دیگر خطای سیستماتیک بایاس مؤثری را به تصویر اضافه می‌نماید که در صورت شناخت مناسب، با استفاده از کالیبراسیون قابل حذف و یا تخمین هستند. منابع این خطاهای سیستماتیک عبارت از خطای تعیین دقیق فاصله کانونی (Df)، ابیراهی^{۴۱} و اعوجاجات عدسی‌ها، عدم تعیین دقیق موقعیت نقطه اصلی ($[Dx \ Dy]^T$)، ناهم‌ترازی^{۴۲} صفحه آشکارساز حول محور x و y دستگاه تصویر (به ترتیب φ_x و φ_y) و چرخش آشکارساز حول محور اپتیکی (φ_z) می‌باشند (شکل ۱۰).

لذا در الگوریتم پیشنهادی جهت شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای کالیبراسیون، ابتدا تأثیر خطای فاصله کانونی بر روی دستگاه حسگر ستاره از طریق رابطه زیر اعمال می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_f = \begin{bmatrix} \frac{f+Df}{f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f+Df}{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ Df \end{bmatrix} \quad (15)$$

41. Aberration
42. Misalignment



شکل ۱۲- شماتیک تأثیر پارامترهای کالیبراسیون بر روی موقعیت ستاره‌ها

جدول ۳- مقایسه موقعیت ستاره‌ها در دو حالت شکل ۱۲

غیر کالیبره		کالیبره		ID	ردیف
Y_{ccd}	X_{ccd}	Y_{ccd}	X_{ccd}		
۳۵/۹۸	۵۵/۲۲۷	۹۶/۱۰۵	۳۴/۲۰۲	۵۳۷۲	۱
۹۰/۳۷۱	۶۳/۲۱۴	۵۴/۳۷۳	۶۶/۲۶۰	۱۱۷۶۷	۲
۷۴/۲۲۸	۰۱/۱۸	۱۴/۲۸۶	۶۹/۳۳	۱۹۴۵۴	۳
۷۷/۱۷۲	۶۱/۴۷۱	۶۸/۱۱۴	۳۵/۴۵۷	۱۰۹۶۹۳	۴
۷۵/۸۲	۷۶/۴۶۰	۵۴/۳۰	۵۷/۴۲۳	۱۱۲۸۳۳	۵
۴۶/۲۱۱	۱۷/۳۳۵	۳۷/۱۸۷	۵۶/۳۳۵	۱۱۵۷۴۶	۶

کشیدگی تصویر

از آنجایی که هاله ستاره تصویری پیوسته از ستاره در صفحه آشکارساز و در طول زمان است. طولانی شدن زمان نورگیری یا دینامیک بالای وسیله می‌تواند توزیع نور ستاره را از حالت ایده‌آل خارج نماید. این وضعیت منجر به کشیدگی تصویر ستاره می‌گردد که تابعی از زمان نورگیری، سرعت زاویه‌ای حسگر و پارامترهای آشکارساز است. لذا می‌بایست میزان درخشندگی در کل بازه زمانی نورگیری با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردد.

$$I(x, y) = \frac{I_0}{T_e} \int_{T_0}^{T_0+T_e} PSF(t) dt \quad (21)$$

بدین ترتیب در شبیه‌سازی فرآیند تصویربرداری حسگر ستاره با دینامیک بالا تنها کافی است که تجمع هاله‌های تولید شده در هر بازه زمانی dt جایگزین محاسبه انتگرال گردد (رابطه ۱۶).

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^k I(x, y, i) = \frac{I_0}{k} \sum_{i=1}^k PSF(i) \quad (22)$$

لذا در هر بازه کوتاه dt وضعیت حسگر ستاره ثابت فرض شده و تصویر آن لحظه در آشکارساز ثبت می‌گردد. بدین ترتیب ثبت متوالی تصاویر، کشیدگی ستاره را تداعی می‌نماید (شکل ۱۳).

$$\begin{aligned} x_u &= x_f + (x_f - x_c)(K_1 d^2 + K_2 d^4 + \dots) \\ y_u &= y_f + (y_f - y_c)(K_1 d^2 + K_2 d^4 + \dots) \\ z_u &= z_f \\ d &= \sqrt{(x_f - x_c)^2 + (y_f - y_c)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

که در آن (x_c, y_c) مختصات مرکز تصویر است. در نهایت تأثیرات ناشی از ناهم‌ترازی (اعوجاجات مماسی)، چرخش آشکارساز و عدم تعیین دقیق نقطه اصلی به صورت زیر اعمال می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_U = R_3(\varphi_z) R_2(\varphi_y) R_1(\varphi_x) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_U + \begin{bmatrix} Dx \\ Dy \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

شکل ۱۱ تصویری شبیه‌سازی شده از آسمان شب را برای یک دوربین کاملاً کالیبره و سپس همان دوربین در حالت غیرکالیبره نشان می‌دهد. پارامترهای عدم کالیبراسیون در جدول ۲ و مختصات ستاره‌ها در هر دو حالت کالیبره و غیر کالیبره در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای عدم کالیبراسیون مورد استفاده در شکل ۱۱ - ب

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	Df	۰/۰۰۱ متر
۲	Dx	۱۰ پیکسل
۳	Dy	-۱۰ پیکسل
۴	φ_x	۰/۰۵ درجه
۵	φ_y	-۰۵/۰ درجه
۶	φ_z	۱۵ درجه
۷	K_1	$-۵۳۲/۱ * ۱۰^{-۴}$
۸	K_2	$-۶۵۶/۹ * ۱۰^{-۸}$
۹	K_3	$-۲۴۵/۷ * ۱۰^{-۱۱}$
۱۰	K_4	۰



ب - غیر کالیبره



الف - کالیبره

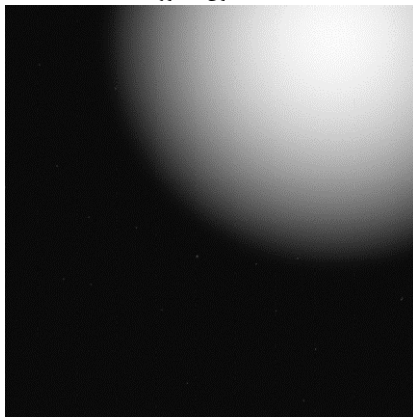
شکل ۱۱- نمایش تأثیر پارامترهای کالیبراسیون بر روی تصویر آسمان شب

در این حالت زمانی که خورشید به صورت کامل در میدان دید قرار می‌گیرد، حسگر ستاره به صورت خودکار به حسگر خورشیدی تبدیل شده و همانند این حسگر اقدام به تعیین وضعیت دوبعدی می‌نماید. لیکن مشکل اصلی زمانی است که خورشید به اندازه‌ای به میدان دید حسگر ستاره نزدیک است که تنها منجر به پخش نامتقارن نور در پس‌زمینه شده لیکن برای مشاهده مستقیم به اندازه کافی نزدیک نباشد.

در عمل به منظور شبیه‌سازی، هر چند میزان روشنایی ناشی از ماه و یا بازتاب زمین بسیار کمتر از خورشید است، لیکن به دلیل نزدیکی به حسگر ستاره تأثیر این اجرام در مواردی بسیار بیشتر از خورشید بوده و در مواردی منجر به بسته شدن میدان دید حسگر می‌گردند. بدین ترتیب در صورتی که زاویه ورود خورشید، ماه و یا زمین کمتر از زاویه عبور بافل باشد، می‌بایست هاله مربوط به جرم سماوی با توجه به قدر مربوطه شبیه‌سازی شده و تأثیرات مربوط به آن (اعم از حضور مستقیم و یا پخش نامتقارن نور) در نویز پس‌زمینه آشکارساز لحاظ گردد. در این پروسه تأثیر سایر سیارات منظومه شمسی به مراتب کمتر بوده و این اجرام سماوی اغلب تنها نقش اسپایک را در الگوریتم شناسایی ستاره ایفا می‌نمایند.



الف - بدون حضور ماه



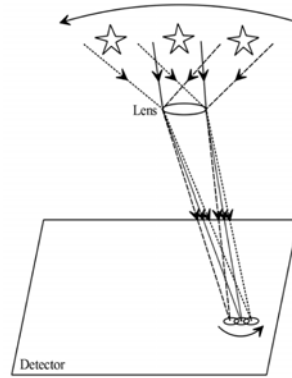
ب - در حضور ماه

شکل ۱۶ - شبیه‌سازی حضور ماه در میدان دید حسگر ستاره

شکل ۱۴ نمونه‌ای از تصویر تولید شده با رابطه ۱۹ و مقادیر $\omega = [1 \ -2 \ 5]^T$ درجه بر ثانیه و $T_e = 1$ ثانیه را نمایش می‌دهد.

پخش غیریکنواخت نور پس‌زمینه

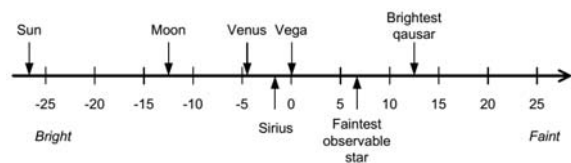
همان‌گونه که در بخش مدل‌سازی خطای حسگر ستاره مشاهده گردید نور پس‌زمینه آسمان می‌بایست به‌عنوان بخشی از خطای شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. در این راستا در مواردی نور ضعیف ستارگان تحت تأثیر منابع قوی‌تر (نظیر نور ماه، خورشید، سیارات منظومه شمسی و حتی نور بازتاب زمین) قرار گرفته (شکل ۱۵) و این موضوع منجر به پخش غیریکنواخت نور پس‌زمینه در تصاویر آسمان شب و در مواردی حتی منجر به اشباع کامل میدان دید حسگر می‌گردد.



شکل ۱۳ - شماتیک تولید هاله ستاره در حسگر با دینامیک بالا



شکل ۱۴ - شبیه‌سازی کشیدگی تصویر آسمان شب ناشی از دینامیک بالا و یا زمان نورگیری زیاد



شکل ۱۵ - قدر برخی از اجرام سماوی

نتیجه‌گیری

مراجع

- [1] SUN, T., XING, F., and YOU, Z., "Research on dynamic Performance of Star Tracker," *Instrumentation*, Vol. 1, 2015, p. 3.
- [2] Winter, D.P. and Wisemiller, E.M., "Simulation of a Ccd Star Tracker," *Winter Simulation Conference Proceedings*, 1975, pp. 51–58.
- [3] Nardell, C.A., "Image Processing, Simulation and Performance Predictions for the Micromak Star Tracker," *Proc. SPIE*, Vol. 5916, 2005, p. 59160U–59160U–12.
- [4] Tappe, J. A., Kim, J.J., Agrawal, B.N., Approved, F., and B. No, O. M., Development of Star Tracker System for Accurate Estimation of Spacecraft Attitude, Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2009.
- [5] Hua-Ming, Q., Hao, L. and W. Hai-Yong, "Design and Verification of Star-Map Simulation Software Based on CCD Star Tracker," *2015 8th Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Auto*, 2015, pp. 383–387.
- [6] Yang, J., Liang, B., Zhang, T., Song, J. and Song, L., "Laboratory Test System Design for Star Sensor Performance Evaluation," *J. Comput*, Vol. 7, No. 4, 2012, pp. 1056–1063.
- [7] Ettouati, I., Mortari, D., and Pollock, T., "Space Surveillance Using Star Trackers, Part I: Simulations," *Adv. Astronaut. Sci.* Vol. 124, No. II, 2006, pp. 2073–2087.
- [8] Shen, J., Zhang, G., and Wei, X., "Simulation analysis Of Dynamic Working Performance for Star Trackers." *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis*, Vol. 27, No. 12, 2010, pp. 2638–47.
- [9] Ma, L., Hu, C., Wang, X., and Dai, D., "Advances And Accuracy Performance of the Star Trackers," *ISPD 2013 - Fifth Int. Symp. Photoelectron. Detect. Imaging*, Vol. 8908, 2013, p. 89080M.
- [10] Zhao, X.F., Bin Liu, G., and Liu, C.S., "Algorithm Design and Implementation of Dynamic Star Simulator," *Adv. Mater. Res*, Vol. 722, 2013, pp. 187–193.
- [11] X. Wei, W. Tan, J. Li, and G. Zhang, "Exposure time optimization for highly dynamic star trackers," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, pp. 4914–4931, 2014.
- [12] Li, Z., Liang, B., Zhang, T., and Zhu, H., "Image Simulation for Airborne Star Tracker Under Strong Background Radiance," *CSAE 2012 - Proceedings, 2012 IEEE Int. Conf. Comput. Sci. Autom. Eng*, Vol. 1, 2012, pp. 644–648.
- [13] Truesdale, N.A., Dinkel, K.J., Dischner, Z.J.B., Diller, J.H. and Young, E.F., "Daystar: Modeling And Test Results of A Balloon-Borne Daytime Star Tracker," *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, 2013.
- [14] Truesdale, N. and et al. "Daystar: Modeling The Daytime Performance of A Star Tracker For High Altitude Balloons," *51st AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo.*, 2013, pp. 1–11.
- [15] Sun, C., Liu, H., Zhang, X., and Yu, Q., "An INS Data Based Approach to Star Image Simulation for Ship-Borne Star Sensor," *Selected Papers of the Chinese Society for Optical Engineering Conferences held October and November 2016*, 2017, p. 102552J–102552J.

همان‌گونه که مرور مراجع نشان می‌دهد روش معمول جهت شبیه‌سازی حسگر ستاره استفاده از مدل روزنه ایده‌آل است که تا به امروز در اکثر قریب به اتفاق مراجع استفاده شده است. این تکنیک به همراه سایر بخش‌های جانبی آن مشتمل بر اعمال تغییرات مختصات سماوی ستارگان، تولید هاله ستاره، مدل‌سازی خطا، تولید کشیدگی در تصاویر آسمان شب و پخش غیریکنواخت نور پس‌زمینه در این مقاله ارائه گردید. لازم به ذکر است که نمونه اولیه تصاویر حاصل از این شبیه‌سازی در مرجع [۳۳] جهت بررسی عملکرد الگوریتم مرکزبایی استفاده گردیده است.

از سویی دیگر مطابق بررسی‌های صورت گرفته تا به امروز تنها مرجع [۳۳] از روشی غیر از روزنه ایده‌آل (تکنیک ردیابی پرتو و خروجی نرم‌افزار Zemax) جهت شبیه‌سازی و برآورد عملکرد بخش اپتیک حسگر ستاره تحت شرایط مختلف دمایی استفاده کرده است. ردیابی پرتو تکنیکی برای تولید تصویر با ردیابی مسیر پرتوهای ساطع شده از شیء (در اینجا ستاره) تا صفحه تصویر و شبیه‌سازی و بررسی اثر برخورد پرتو با تمامی اجزای مختلف سیستم اپتیکی است. این تکنیک قادر به تولید درجه بسیار بالایی از واقع‌گرایی همراه با هزینه محاسباتی بیشتر است. در این بین روش ردیابی دقیق پرتو قادر به مدل‌سازی طیف گسترده‌ای از جلوه‌های اپتیکی مانند انعکاس و انکسار، پراکندگی و اعوجاجات عدسی است.

از منظر مقایسه می‌توان عنوان کرد، روش روزنه، اپتیک را ایده‌آل در نظر گرفته و با استفاده از پارامترهایی نظیر فاصله کانونی و تبدیل پرسپکتیو صرفاً به صورت یک نگاهت هندسی برای پرتو اصلی عمل می‌نماید. در صورتی که روش ردیابی پرتو، تمامی پرتوهای ورودی به بخش اپتیک (از نقاط مختلف میدان دید) را بررسی نموده و مسیر هر پرتو از یک سطح به سطح دیگر اجزای اپتیکی را با استفاده از ویژگی‌های هر سطح و زاویه و ارتفاع ورود پرتو، مسیر پرتو تا سطح بعدی و در نهایت صفحه تصویر دنبال می‌نماید. این موضوع منجر می‌گردد تا بسیاری از خصوصیات و ویژگی‌های بخش اپتیک نظیر اعوجاجات و ابیراهی‌ها با توجه به ذات سیستم به تصاویر تولیدی اعمال گردند. در حالی که در روش روزنه ایده‌آل می‌بایست این خطاها با استفاده از مدل‌های ریاضی تقریبی و بدون توجه به ذات سیستم به تصاویر اعمال گردد که در نهایت منجر به کاهش دقت شبیه‌سازی و نتایج خواهد شد.

بدین ترتیب با توجه به اهمیت واقع‌گرایی در رویکرد شبیه‌سازی حل مسئله، استفاده از روش ردیابی پرتو برای پرتوهای ساطع شده از میدان دید حسگر و شبیه‌سازی دقیق تصاویر آسمان شب متناسب با مشخصات اپتیک اعم از جنس و شعاع انحنای سطوح شکست عدسی‌ها، فواصل بین عدسی‌ها، طول موج نور ستاره و ... به‌عنوان روش بهینه شبیه‌سازی پیشنهاد می‌گردد.

- [25] Liebe, C. C., "Accuracy Performance of Star Trackers - A Tutorial," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 38, No. 2, 2002, pp. 587-599,
- [26] Lipson, S. and H. Lipson, *Optical physics*. 1995.
- [27] Ajoy Ghatak, Optics. ata McGraw Hill Publishing Company Limited, 2005.
- [28] Diego, F. "Throughput of Astronomical Instruments," no. December, 1985, pp. 1209-1214.
- [29] Katake, A.B., "Modeling, Image Processing and Attitude Estimation of High Speed Star Sensors," Texas A&M University, 2006.
- [30] Huffman, K.M., and et al. "Designing Star Trackers To Meet Micro-Satellite Requirements," Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [31] Knutson, M., Miller, D., and Lim, S., Fast Star Tracker Centroid Algorithm for High Performance CubeSat with Air Bearing Validation, No. June. 2012.
- [32] Arbabmir, M. V., Mohammadi, S.M., Salahshour, S., and Somayehee, F., "Improving Night Sky Star Image Processing Algorithm for Star Sensors," *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 31, No. 4, 2014, pp. 794-801.
- [33] Liu, H.B., Tan, J.C., Yang, J.K., Li, X.J., and Fan, Q.C., "Method for Thermo-optic Analysis in a Star Sensor," *Def. Sci. J.*, Vol. 60, No. 3, 2010, pp. 276-281.
- [16] Roshanian, J., Yazdani, Sh., Hoseini, S.M., and M. Ebrahimi, "Star Catalog Criteria Selection and Mission Catalog Update for a Typical Star Tracker," *Jouranl of Space Science and Technology*, vol. 5, No. 4, 20013, pp. 1-8.
- [17] Thomson, D. B., Introduction to Geodetic Astronomy, No. 217. Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick, 1981.
- [18] Krakiwsky, E. J., U. of N. B. D. of S. Engineering, and D. E. Wells, "Coordinate Systems in Geodesy," No. 217, 1971, p. 119.
- [19] Glassner, A. An Introduction to Ray Tracing, vol. 8. 1989.
- [20] G. Zhang, Star Identification: Methods, Techniques and Algorithms. Springer, 2017.
- [21] C. Rafael Gonzalez and R. Woods, "Digital image processing," Pearson Educ. 2002.
- [22] J. Kovalevsky, P. K. Seidelmann, I. Committee, F. Academy, and U. S. N. Observatory, Fundamentals of astrometry. Cambridge University Press, 2004.
- [23] D. Titterton and J. L. Weston, Strapdown inertial navigation technology, Vol. 17. IET, 2004.
- [24] Murray, L., "Smart Optics: Wavefront Sensor-Less Adaptive Optics-Image Correction Through Sharpness Maximisation," *NUI Galw*, 2006.