نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هشتم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۹

Vol.8, No.1, Spring 2020

۲۳ -۳۸

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2

[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]

[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

# بهبود دقت جستجوی بهترین خط جاروب جهت تبدیل مختصات از فضای زمین به فضای تصویر در تصاویر پوشبروم

**سیده شهرزاد آهویی نژاد[۱]، محمدجواد ولدان زوج[۲*]، مجتبی جنتی[۳]**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فتوگرامتری وسنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد گروه فتوگرامتری وسنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دکتری گروه فتوگرامتری وسنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲

## چکیده

برخلاف یک تصویر فریم‌تایپ، انتقال نقاط از فضای شئ به فضای تصویر برای یک تصویر آرایه خطی، یک روند سرراست و مستقیم نیست. در اینگونه تصاویر مساله جستجوی بهترین خط جاروب به منظور حصول به پارامترهای توجیه خارجی قابل اطمینان درصورت استفاده از مدل شرط همخطی، تبدیل مختصات از فضای شئ به فضای تصویر را از نظر محاسباتی پیچیده‌تر میکند. در طول سالیان اخیر، چندین روش جستجوی بهترین خط جاروب توسط محققان مختلف ارائه شده است. در این مقاله، سعی بر بهبود دو روش جستجوی متوالی فضای تصویر و پنجره جستجوی نصف‌کننده میباشد. روش‌های پیشنهادی برای جستجوی بهترین خط جاروب، شامل سه مرحله اصلی است. در مرحله اول با در اختیار داشتن پارامترهای توجیه خارجی سنجنده، طی یک فرآیند جستجو مطابق روش جستجوی متوالی یا روش پنجره جستجوی نصف کننده برای هر نقطه یک تخمین از زمان اخذ آن یا سطر تقریبی نقاط بدست می‌آید. در مرحله دوم خطوط جاروب صحیح همسایه، در فضای تصویر محاسبه می‌شوند. در نهایت، در مرحله سوم خطوط جاروب صحیح همسایه به منظور تعیین بهترین خط جاروب در سطح زیرپیکسل درونیابی می‌شوند. نتایج تجربی حاصل از پیاده سازی روش‌های پیشنهادی بر روی دو دسته داده آزمایشی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده های اسپات و رپیدآی از منطقه زنجان و شیراز، نشان می‌دهد که این روش نسبت به دو روش جستجوی متوالی و پنجره جستجوی نصف کننده از بهبود دقت ۱۳٪ در نقاط واقعی و ۳۰٪ در نقاط شبیه‌سازی شده برخوردار است.

کلید واژه‌ها : جستجوی بهترین خط جاروب، انتقال مختصات از فضای زمین به تصویر، تصویربرداری آرایه خطی.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران – دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۱

*Email: valadanzouj@kntu.ac.ir*

## ۱- مقدمه

سیستم‌های تصویربرداری پوشبروم خطی[1]، در سکوهای ماهواره‌ای و هوایی، امروزه بطور وسیع قابل استفاده بوده و قادر به اخذ تصاویر با قدرت تفکیک بالا و کاربرد وسیع در زمینه سنجش از دور و فتوگرامتری هستند [۱،۲و۳].

در مقایسه با سیستم‌های تصویربرداری با آرایش سطحی[2]، سیستم‌های تصویربرداری با آرایش خطی، مزیت‌های متمایزی را فراهم کرده‌اند. یکی از مزیت‌های اصلی و مهم این نوع سیستم تصویربرداری آن است که حجم بالای مورد نیاز در تصاویر اخذ شده توسط عملیات‌های فتوگرامتری هوایی سنتی، توسط این تکنولوژی به راحتی تولید میشود[۱]. هم‌چنین سنسورهای رقومی پوشبروم خطی مزیت عمده استخراج داده بصورت نزدیک به آنی[3] را در بسیاری از کاربردها دارا بوده و باعث ارجحیت در هزینه و کارایی در مقایسه با سنسورهای فیلم‌مبنا هستند [۴]. بر اساس نیاز به ماموریت و برداشت‌های زمینی، سنسورهایی با آرایش خطی میتوانند مشاهدات تصویری پیوسته از محدوده وسیعی را فراهم کنند. علاوه بر موارد فوق، به عنوان مهم‌ترین تفاوت این سنسورها با سنسورهای فیلم‌مبنا، میتوان به کالیبراسیون راحت و وزن سبک آنها اشاره کرد.

فرآیند تشکیل تصویر در سیستم‌های تصویربرداری با آرایش خطی به گونه‌ای است که با حرکت سکوی دوربین در جهت پرواز، هر خط سنسور عمود بر جهت پرواز، اسکن شده و یک به یک ذخیره میشود تا کل صحنه در تصویر تشکیل شود (شکل (۱)). به عبارت دیگر، سنسورهای پوشبروم خطی، تصویر را خط به خط با توالی زمانی اخذ میکنند. هر تصویر از این نوع سنسورها تنها یک خط اسکن است و تشکیل تصویر وابسته به حرکت سکوی تصویربرداری است [۲].

تصاویر آرایه خطی، پتانسیل بالایی برای اندازه گیری و تفسیر کلی سطح زمین بصورت جامع دارند. معرفی سنسورهای خطی رقومی در حوزه فتوگرامتری هوایی و فضایی باعث ایجاد زمینه‌های تحقیقاتی چالش برانگیزی برای متخصصین فتوگرامتری بدلیل هندسه جدید آنها و دسترسی به داده‌های طیفی وسیع، شده است [۵]. تصویرسازی نقاط سه‌بعدی در فضای شئ به صفحه دوبعدی تصویر نقش اساسی در کاربردهای فتوگرامتری نظیر بازنمونه برداری اپی پلار[4]، تولید تصاویر ارتو[5]، تولید نقشه و اندازه‌گیری استریو تصاویر اپی‌پلار مبنا دارد. در تکنولوژی تصویربرداری خطی، هر خط جاروب دارای شش پارامتر توجیه خارجی است و موضوع تبدیل مختصات در این نوع تصاویر وضعیتی پیچیده خواهد داشت.

از آنجایی‌که خطوط مختلف جاروب در تصاویر پوشبروم در لحظات مختلفی از زمان اخذ میشوند، پارامترهای توجیه خارجی متناظر با یک نقطه دلخواه زمینی بطور صریح معلوم نبوده و بر این اساس معادلات شرط همخطی نمیتواند بطور مستقیم اعمال شود [۳]. در اینصورت مختصات نقطه تصویری بصورت دقیق توسط مدل‌های دقیق ریاضی سنسور (مثل معادله شرط هم خطی) بدست نخواهد آمد مگر آنکه پارامترهای توجیه خارجی قابل قبول و قابل اعتمادی در اختیار باشد. بنابراین، جستجوی بهترین خط جاروب[6] به عنوان یک موضوع پر اهمیت بر کارآمدی محاسبات تبدیل مختصات زمینی به تصویری مطرح شده است [۱]. هسته اصلی مسأله تصویرسازی از فضای شئ به فضای تصویر برای یک تصویر پوشبروم، تعیین زمان اخذ تصویر یا بطور معادل تعیین خط جاروب متناظر می‌باشد [۳].

---

[1] *Linear array Pushbroom sensors*
[2] *Area array sensors*
[3] *Near real time*
[4] *Epipolar resampling*
[5] *Ortho photo*
[6] *Best Scanline Search*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

**شکل ۱ : فرآیند تشکیل تصویر در سنسورهای خطی رقومی در حالت عمودی**

## ۱-۱- کارهای انجام شده در حوزه جستجوی بهترین خط جاروب

بر طبق پژوهش‌های انجام شده در حوزه جستجوی بهترین خط جاروب طی سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۶ روش‌های موجود را میتوان به طور کلی به دو دسته روش‌های جستجو بر مبنای فضای تصویر و روش‌های جستجو بر مبنای فضای شئ مطابق شکل(۲)، تقسیم‌بندی کرد.

**شکل ۲: دسته بندی روشهای جستجوی بهترین خط جاروب در تصاویر خطی [ ۶]**

از جمله روش‌های فضای تصویر میتوان به روش نیوتن-رافسون [۹]، جستجوی تکراری در فضای تصویر، جستجوی متوالی بهینه در فضای تصویر [۱۱]، جستجوی پنجره نصف کننده [۸]، و جستجوی سخت به نرم خط جاروب[۳] اشاره نمود. در روش‌های مذکور، موقعیت مکانی نقطه زمینی به ازای پارامترهای توجیه خارجی یک سطر دلخواه به فضای تصویر منتقل میشود و در یک فرآیند تکراری، خط جاروب متناظر با نقطه زمینی براساس انطباق معادلات شرط همخطی جستجو میشود. در نتیجه، در هر تکرار لازم است مختصات نقطه زمینی به فضای تصویر منتقل شده و معادلات شرط همخطی بررسی شود که این امر موجب افزایش زمان محاسبات این الگوریتم‌ها می‌گردد. به منظور کاهش هزینه محاسباتی، در برخی روش‌ها نظیر روش نیوتون-رافسون از فرم ساده شده معادلات شرط همخطی استفاده شده، و در روش‌های دیگری نظیر



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

جستجوی تکراری در فضای تصویر، جستجوی متوالی بهینه در فضای تصویر و جستجوی پنجره نصف کننده، گام جستجو بهینه سازی شده است. اما از آنجاییکه پارامترهای وضعیتی سنجنده همواره رفتار یکنواخت ندارند، در برخی مواقع ممکن است روش‌های فوق منجر به همگرایی کم‌دقت شوند *[۶]*.

از جمله روش‌های فضای شیء میتوان به روش ایجاد شبکه زیر-نمونه در سیستم مختصات زمینی *[۱۰]* و جستجوی خط جاروب براساس صفحه پرسپکتیو مرکزی خط جاروب اشاره نمود *[۱و۵]*. بدلیل آنکه در این روش‌ها جستجو در فضای شیء انجام میشود، سرعت این الگوریتم‌ها در قیاس با روش-های فضای تصویر بالاتر است. اما در این روش‌ها خطوط جاروب زمینی به صورت ایده آل و موازی با یکدیگر و در فواصل مساوی فرض میشوند، که این شرایط همواره صادق نیست و در برخی مواقع ممکن است روش‌های فوق به درستی همگرا نشوند *[۶]*.

اگرچه همه الگوریتم‌های موجود، در جهت بهبود روش‌های با روند تکراری بر اساس معادلات شرط همخطی تلاش میکنند و کاهش تعداد تکرار توسط روش‌های گوناگون بهینه‌سازی حاصل شده است، کارایی جستجو به دلیل حجم محاسباتی بالای هر تکرار از معادلات شرط همخطی همچنان قابل قبول نیست *[۵]*. با توجه به توضیحات فوق، این مقاله، با هدف یافتن زمان اخذ هر نقطه زمینی در تصویر که معادل سطر نقطه در نظر گرفته میشود و برای تبدیل مختصات از فضای زمین به فضای تصویر مورد استفاده است، سعی بر بهبود سرعت و دقت دو روش پرکاربرد جستجوی متوالی و پنجره جستجوی نصف کننده دارد.

## ۲- روش پیشنهادی

در ادامه، مدل مراکز تصویر چندگانه به عنوان مدل مورد استفاده جهت ترفیع فضایی، روش جستجوی متوالی فضای تصویر، روش پنجره جستجوی نصف کننده، خلاصه ای از روش‌های هیبرید و نیوتون رافسون و روش‌های پیشنهادی جستجوی بهترین خط جاروب به منظور افزایش دقت دو روش مذکور به همراه روابط مربوطه آمده است.

### ۲-۱- مدل مراکز تصویر چندگانه در ترفیع فضایی

ترفیع فضایی، عملیات بدست آوردن پارامترهای توجیه خارجی سنجنده در لحظه تصویربرداری است. در مورد تصاویر آرایه خطی فضایی، از لحظه ۱ تا $n$ بطور ممتد تصویربرداری انجام میشود و هر خط، یک تصویر است. همچنین مسیر حرکت ماهواره یک بیضی را طی میکند که زمین در یکی از کانون‌های آن است بنابراین، مسیر حرکت ماهواره قسمتی از بیضی است و یک وابستگی بین خطوط بر اساس معادله مسیر وجود دارد *[۷]*. معادله شرط همخطی در تصاویر پوشبروم آرایه خطی بصورت رابطه(۱) می‌باشد.

در رابطه(۱)، $(X_k, Y_k, Z_k)$مختصات زمینی نقطه زمینی $k$ ام، $m_{11}^t,\dots,m_{33}^t$ المان‌های ماتریس دوران بر اساس زوایای امگا، فی، کاپا۱ در لحظه $t$ و $(X_S^i, Y_S^i, Z_S^i)$ پارامترهای مداری سنجنده در لحظه $t$ ام می‌باشد. پارامترهای موقعیتی $(X_S^i, Y_S^i, Z_S^i)$ و وضعیتی سنجنده $(\omega_S^i, \varphi_S^i, \kappa_S^i)$ توسط مدل مراکز تصویر چندگانه بدست می‌آیند و در معادله شرط همخطی جایگذاری می‌شوند.

در مدل مراکز تصویر چندگانه *(MPC)*[۲] فرض می‌شود اگر بتوان مسیر حرکت ماهواره را مدل کرد، ارتباط بین پارامترهای توجیه خارجی بر اساس همان مدل برقرار خواهد شد. به عبارت دیگر، اگر یکی از خطوط به عنوان خط مرجع (خط اول یا آخر یا خط مرکزی) فرض شود و پارامترهای توجیه خارجی این خط در اختیار باشد، در این مدل، میتوان پارامترهای توجیه خارجی بقیه خطوط را نسبت به این خط در صورت داشتن معادله حرکت ماهواره بدست آورد (رابطه (۲)).

---

[1] *Omega,Phi,Kappa*
[2] *Multiple Projection Centre*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

$$x_k = -f\,\frac{m_{11}^t(X_k - X_S^i) + m_{12}^t(Y_k - Y_S^i) + m_{13}^t(Z_k - Z_S^i)}{m_{31}^t(X_k - X_S^i) + m_{32}^t(Y_k - Y_S^i) + m_{33}^t(Z_k - Z_S^i)}$$

$$y_k = -f\,\frac{m_{21}^t(X_k - X_S^i) + m_{22}^t(Y_k - Y_S^i) + m_{23}^t(Z_k - Z_S^i)}{m_{31}^t(X_k - X_S^i) + m_{32}^t(Y_k - Y_S^i) + m_{33}^t(Z_k - Z_S^i)}$$

رابطـه(۱)

$$X_S^i(t) = X_0 + X_1(t_i) + X_2(t_i)^2 + \ldots$$
$$Y_S^i(t) = Y_0 + Y_1(t_i) + Y_2(t_i)^2 + \ldots$$
$$Z_S^i(t) = Z_0 + Z_1(t_i) + Z_2(t_i)^2 + \ldots$$
$$\omega_S^i(t) = \omega_0 + \omega_1(t_i) + \omega_2(t_i)^2 + \ldots$$
$$\varphi_S^i(t) = \varphi_0 + \varphi_1(t_i) + \varphi_2(t_i)^2 + \ldots$$
$$\kappa_S^i(t) = \kappa_0 + \kappa_1(t_i) + \kappa_2(t_i)^2 + \ldots$$

رابطــه(۲)

در معادلات حرکت ماهواره (رابطـه(۲))، $X_S^i$ تـا $\kappa_S^i$ پارامترهای توجیـه خـارجی خـط $i$ ام، $X_0$ تـا $\kappa_2$ ضرایب مجهول معادلات و $t_i$ زمان اخذ خط اسکن $i$ ام (معادل با شماره سطر) هستند. معمولا در معادلات فوق جملات تا درجه دوم را استفاده میکنند مگر آنکه مسیر حرکت ماهواره دارای اغتشاشـات بیشـتری باشـد. ایـن معادلات بهترین معادلاتی هستند که میتوان بـه مسـیر حرکت ماهواره بـرازش داد کـه نـوعی پلـی نومیـال بـر اساس زمان‌اند. پس اگر موقعیت و وضعیت خط مرکزی و پارامترهـای مشـتق اول و دوم معلـوم باشـد، میتـوان پارامترهای توجیه خارجی هر خط را نسبت به این خط بدست آورد. بـه عبـارت دیگـر ۱۸ پـارامتر فـوق یکبـار محاسبه شده و با داشتن زمان تصویر برداری هر خط و جایگذاری در معادلات، پارامترهای توجیه خارجی خـط مورد نظر بدست می آید [۷].

### ۲-۲- روش جستجوی متوالی فضای تصویر

جستجوی متوالی فضای تصویر می‌تواند بـه عنـوان ابتدایی‌ترین روش توسعه داده شده و استفاده شده برای حل مسأله جستجوی بهترین خـط جـاروب در تصـاویر ماهواره‌ای آرایه خطی در نظر گرفته شود. همانطور کـه در شکل(۳) نشان داده شده، بر اسـاس ایـن معیـار کـه مختصات نقطه تصـویری محاسـبه شـده توسـط مـدل ریاضی سنسور باید از نظـر تئـوری برابـر بـا مختصـات کالیبره شده آشکارساز متناظر تصویری‌اش باشد، فرآیند جستجو بصـورت متـوالی در فضـای تصـویر بـر اسـاس محاسبات و تایید مختصات‌ها از فضای زمین بـه فضـای تصویر در یک روند تکراری در طول یک بـازه مشـخص انجام میشود. اگرچه، یک صـحنه تصـویر شـامل تعـداد زیادی از خطوط جـاروب میباشـد، همـانطور کـه قابـل تصور است چنین روشی بسیار زمان‌بر و نامناسب بـرای استفاده‌های کاربردی و عملی خواهد بود [۱و۵].

مطابق روش جستجوی متـوالی در فضـای تصـویر، نقطه زمینی به ازای همه زمانهـا بـه فضـای تصـویر بـر طبق معادلات شرط همخطی برگردانده میشود و زمانی که مولفه $x$ کمترین مقدار (نزدیکترین مقدار به صفر) را دارد به عنوان زمان نقطه و سطر متناظر با آن به عنوان بهترین سطر جاروب برای نقطه زمینی در نظـر گرفتـه خواهد شد. در شـکل(۳)، در زمانهـای $i$ و $i+1$ علامـت مولفه $x$، مثبت است و در زمانهـای $i+3$ و $i+4$ علامـت



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

مولفه $x$، منفی شده است. لذا زمان اخذ نقطه تصویری بین دو زمان $i+3$ و $i+1$ است زیرا بین این دو زمان تغییر علامت در مولفه $x$ رخ داده و زمان اخذ نقطه زمینی بر روی تصویر در این بازه که مولفه $x$ حتما صفر شده است، میباشد. بنابر توضیحات فوق بطور مثال زمان $i+2$ زمان اخذ نقطه زمینی و معادل بهترین سطر جاروب متناظر با آن بدست خواهد آمد.

**شکل ۳: جستجوی متوالی فضای تصویر *[۱]***

### ۲-۳- روش پنجره جستجوی نصف کننده

روش جستجوی پنجره نصف کننده *[۸]* که در ترمیم تصاویر ارتو[1] با موفقیت به کار گرفته شده، بدلیل بهبود کارایی جستجو از نظر سرعت و دقت، مورد توجه قرار گرفته است. اولین گام این روش انتخاب یک محدوده یا فاصله تصویری بین اولین و آخرین خط جاروب به عنوان پنجره جستجوی اولیه میباشد (شکل(۴)). سپس بصورت تکراری پنجره جستجو با مقایسه سه جفت نقطه از مختصاتهای عکسی که از معادله شرط همخطی محاسبه میشوند، با استفاده از پارامترهای توجیه خارجی خطوط اول، وسط و آخر از پنجره جستجو، نصف خواهد شد (شکل(۵)). در نهایت، جستجوی متوالی در پنجره نصف کننده نهایی با یک حد آستانه انجام خواهد گرفت.

### ۲-۴- روش هیبرید *[۶]*

الگوریتم هیبرید جستجوی بهترین خط جاروب، برخلاف روشهای پیشین، مبتنی بر جستجو و تکرار نیست و خط جاروب متناظر با نقطه زمینی در یک فرآیند سه مرحله‌ای به صورت قطعی تعیین میگردد. در مرحله نخست، با درنظر گرفتن تغییرات سرعت و وضعیت سنجنده در بازه زمانی اخذ تصویر و وضعیت هندسی خطوط جاروب زمینی، خط جاروب متناظر با نقطه زمینی با دقت بالایی در فضای شیء تقریب زده میشود. در مرحله دوم، خطوط جاروب صحیح همسایه در فضای تصویر تعیین میشوند. در نهایت، در گام سوم با درونیابی خطوط جاروب صحیح همسایه، خط اسکن دقیق نقطه زمینی در سطح زیرپیکسل محاسبه میشود.

[1] *Ortho rectification*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

**شکل ۴: پنجره جستجوی اولیه در روش پنجره جستجوی نصف کننده**

**شکل ۵: تکرار دوم روش پنجره جستجوی نصف کننده**

### ۲-۵- روش نیوتون رافسون *[۹]*

همانطور که میدانیم فرم کلی معادلات شرط هم‌خطی بصورت رابطه(۱) می‌باشد. اولین گام در این روش، تعیین شماره خط اسکن نقطه تصویری است. با توجه به پوشبروم بودن سنجنده، قسمت اول رابطه(۱) بصورت رابطه(۳) بازنویسی می‌شود.

در گام دوم، روش نیوتون رافسون به منظور حل غیرخطی بودن، رابطه(۳) اعمال میشود؛ سپس زمان اخذ نقطه عکسی متناظر با نقطه زمینی، طی روند تکراری توسط حدآستانه گذاری بدست می‌آید.

رابطه(۳)

$$f(t_n)=m_{11}^{t}(X_i-X_t^c)+m_{12}^{t}(Y_i-Y_t^c)+m_{13}^{t}(Z_i-Z_t^c)=0$$



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

### ۲-۶- تشریح روش‌های پیشنهادی

روش‌های پیشنهادی برای جستجوی بهترین خط جاروب، شامل سه مرحله اصلی است. در مرحله اول توسط انجام عملیات ترفیع فضایی و با در اختیار داشتن پارامترهای توجیه خارجی سنجنده، طی یک فرآیند جستجو مطابق روش جستجوی متوالی یا پنجره جستجوی نصف کننده برای هر نقطه یک تخمین از زمان اخذ آن یا سطر تقریبی نقاط در نظر گرفته می‌شود. در مرحله دوم خطوط جاروب صحیح همسایه با توجه به خط جاروب تخمین زده شده در مرحله اول، در فضای تصویر محاسبه می‌شوند. در نهایت، در مرحله سوم خطوط جاروب صحیح همسایه به منظور تعیین بهترین خط جاروب در سطح زیرپیکسل درونیابی میشوند. فلوچارت و روند کلی روش‌های پیشنهادی در شکل(۶) ارائه شده است.

شکل ۶: فلوچارت کلی روش‌های پیشنهادی به منظور بهبود دقت روش‌های جستجوی بهترین خط جاروب



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

**۱) تقریب بهترین خط جاروب در فضای تصویر**

در مرحله نخست، بهترین خط جاروب برای نقاط مورد نظر با استفاده از روش پنجره جستجوی نصف‌کننده و یا روش جستجوی متوالی فضای تصویر به عنوان تقریبی مناسب از بهترین خط جاروب نقاط محاسبه می‌شود.

**۲) تخمین خطوط جاروب همسایه در فضای تصویر**

در صورت استفاده از روش جستجوی متوالی فضای تصویر در روش پیشنهادی، جهت تقریب اولیه بهترین خط جاروب، یک سطر تقریبی حاصل می‌شود. در این مرحله، به ازای یک سطر ماقبل، مابعد و سطر حاصل از مرحله اول، مقدار مؤلفه $x$ از لحاظ تغییر علامت بین سه مقدار فوق بررسی میشود. زیرا با توجه به طبیعت خطی بودن سنجنده مقدار مولفه $x$ باید صفر باشد لذا پیدا کردن بازه‌ای که در آن تغییر علامت رخ دهد، محل صفر شدن مؤلفه $x$، امکان پذیر خواهد بود.

همچنین در صورت استفاده از روش پنجره جستجوی نصف کننده در روش پیشنهادی، جهت تقریب اولیه بهترین خط جاروب، دو مقدار تقریبی به عنوان بهترین خط جاروب برای نقطه حاصل می‌شود. این دو مقدار تقریبی به عنوان خطوط جاروب همسایه در فضای تصویر جهت درونیابی در سطح زیرپیکسل برای مرحله بعد استفاده می‌شوند. در روش پنجره جستجوی نصف‌کننده، به ازای این دو سطر مؤلفه‌های $x$ مقایسه میشود و سطری که کمترین مؤلفه $x$ را دارد به عنوان بهترین خط جاروب انتخاب می‌شود.

**۳) درونیابی در سطح زیرپیکسل**

در آخرین مرحله، بهترین خط جاروب متناظر با هر نقطه زمینی توسط میانگین وزندار بین دو خط جاروبی که در آنها مؤلفه $x$ تغییر علامت می‌دهد، محاسبه خواهد شد (رابطه(۴)).

$$t_{final} \equiv x_{final} = \frac{\left(t_1 \times \frac{1}{|x_1|}\right) + \left(t_2 \times \frac{1}{|x_2|}\right)}{\left(\frac{1}{|x_1|} + \frac{1}{|x_2|}\right)} \qquad \text{رابطه(۴)}$$

در رابطه (۴)، مقادیر $t_1$ و $t_2$ مقادیر زمان‌ها یا خطوط تقریبی حاصل از مرحله دوم و مقادیر $x_1$ و $x_2$ مقادیر مولفه $x$ تصویری به ازای زمان‌های $t_1$ و $t_2$ می‌باشد که به عنوان وزن در میانگین وزندار لحاظ می‌شوند.

**۴) ارزیابی دقت**

در این پژوهش، مطابق تحقیقات پیشین روش ارزیابی دقت الگوریتم جستجوی بهترین خط جاروب، در فضای تصویر انجام میشود. با در اختیار داشتن تعداد مناسبی از نقاط تست که مختصات زمینی و عکسی آنها معلوم است، توسط الگوریتم جستجوی بهترین خط جاروب، این نقاط از فضای شیء به فضای تصویر منتقل شده و در نهایت توسط خط جاروب بدست آمده از الگوریتم و خط جاروب معلوم برای آنها، ارزیابی دقت و برآورد خطا محاسبه می‌گردد.

**۳- داده‌های مورد استفاده**

در این پژوهش، از تصویر سنجنده‌های اسپات[1] در منطقه زنجان و رپیدآی[2] در منطقه شیراز استفاده شده است. همچنین با دراختیار داشتن نقاط کنترل حقیقی و شبیه سازی شده، به ارزیابی نتایج پرداخته شده است.

نقاط کنترل حقیقی نقاطی هستند که در تصویر اسپات، توسط دستگاه تعیین موقیت جهانی *(GPS)*[3] دو فرکانسه[4] با دقت یک متر و در تصویر رپیدآی توسط استفاده از نقشه ۱:۲۰۰۰ با دقت یک متر استخراج شده اند. همچنین نقاط کنترل شبیه سازی شده نقاطی هستند که بطور کامل در معادلات شرط همخطی صدق میکنند و عاری از هرگونه خطاهای احتمالی در روند استخراج آنها هستند. برای تهیه این دسته از نقاط، در بازه سطر و ستون تصویر و بازه ارتفاعی منطقه بصورت

[1] *SPOT3*
[2] *RapidEye(MS)*
[3] *Global Positioning System*
[4] *Dual frequency*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

رندم نقاطی با توزیع مناسب انتخاب میشوند ($r,c,Z$ معلوم به ازای هر نقطه) سپس با دراختیار داشتن پارامترهای توجیه داخلی و خارجی سنجنده و معادلات شرط همخطی این نقاط دارای مختصات مسطحاتی زمینی($X,Y$) نیز می‌شوند.

در جدول(۱)، مشخصات سنجنده‌ها و نقاط کنترل آمده است. لازم به ذکر است بدلیل نیاز به پارامترهای توجیه خارجی سنجنده‌ها، عملیات ترفیع فضایی توسط مدل مراکز تصویر چندگانه انجام گردیده است.

**جدول ۱: مشخصات سنجنده و داده‌های مورد استفاده**

| نام سنجنده و مأموریت | ابعاد تصویر *(row & column)* | فاصله کانونی *(m)* | ابعاد *CCD* *(μm)* | تعداد نقاط کنترل حقیقی | تعداد نقاط کنترل شبیه سازی شده |
|---|---|---|---|---|---|
| *SPOT3 (HRV)* | ۶۰۰۰*۶۰۰۰ | ۱,۰۸۲۰ | ۱۳ | ۳۵ | ۳۵ |
| *RapidEye (MS)* | ۱۲۰۰۰*۱۱۹۸۰ | ۰,۶۳۳۰ | ۶,۵ | ۳۲ | ۳۲ |

## ۴- ارائه نتایج و بحث

به منظور ارزیابی روش‌های پیشنهادی سه پارامتر خطای جستجوی بهترین خط جاروب *(RMSE)*[۱]، زمان اجرای الگوریتم و هزینه محاسباتی از لحاظ برآورد بیشترین تعداد استفاده از معادلات شرط همخطی به ازای هر نقطه درنظر گرفته شد و نتایج روش‌های پیشنهادی با چهار روش نیوتون رافسون، جستجوی متوالی، روش پنجره جستجوی نصف کننده در فضای تصویر و روش تعیین بهترین خط جاروب هیبرید در فضای شیء برآورد و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج در جدول (۲) الی (۵) ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول(۲) که با استفاده از نقاط شبیه‌سازی شده حاصل شده است، شاهد بهبود چشمگیر دقت توسط هر دو روش پیشنهادی هستیم. همانطور که قابل ملاحظه است، با استفاده از این نقاط در روش‌های اصلی پنجره جستجوی نصف کننده و روش جستجوی متوالی فضای تصویر، دقتی برابر ولی در زمانهای متفاوت حاصل شده است. همچنین در روش‌های پیشنهادی نیز این نتیجه صادق است. پارامتر زمان نیز در مورد روش‌های پیشنهادی در مقایسه با زمان روش‌های اصلی تغییر قابل توجهی نداشته است لذا میتوان گفت در زمان مشابه با زمان مورد نیاز در روش‌های اصلی، دقت حاصل از روش‌های پیشنهادی بطور چشمگیری بهبود یافته است. این موضوع بسیار حائز اهمیت است زیرا صرف زمان کم و حصول به دقتی قابل قبول و مناسب در بین روش‌های موجود دارای ارجحیت میباشد. به همین دلیل استفاده از روش پیشنهادی مبتنی بر پنجره جستجوی نصف کننده با دارا بودن دقت معادل و زمان مورد نیاز کمتر نسبت به روش پیشنهادی مبتنی بر جستجوی متوالی فضای تصویر ارجح‌تر است.

از جمله بهترین روش‌های جستجوی بهترین خط جاروب، روش نیتون رافسون و روش هیبرید هستند که به عنوان مبنای مقایسه قرار گرفتند. علاوه بر موارد فوق، دقت روش‌های پیشنهادی با استفاده از نقاط شبیه سازی شده، نسبت به روش هیبرید دارای بهبود دقت و نسبت به روش نیوتون رافسون دارای دقتی با اختلاف اندک می‌باشد.

[۱] *Root Mean Square Error*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

**جدول ۲: ارزیابی روش‌های پیشنهادی و چهار روش موجود به ازای ۳۵ نقطه کنترل شبیه سازی شده برای سنجنده *SPOT***

| روش‌ها | فضای جستجو | معادلات مورد استفاده | زمان تقریبی روش (ثانیه) | زمان تقریبی روش پیشنهادی (ثانیه) | خطای تقریبی روش (RMSE) | خطای تقریبی روش پیشنهادی (RMSE) | بیشترین تعداد تکرار معادلات شرط همخطی | روند جستجو |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **پنجره جستجوی نصف کننده [۸]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۱,۸۸ | ۱,۹۶ | ۰,۳۰ | ۵,۴۹۸e-۸ | ۱۵ | تکراری |
| **جستجوی متوالی فضای تصویر** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۶۵,۹۰ | ۶۶,۷۹ | ۰,۳۰ | ۵,۴۹۸e-۸ | ۶۰۰۰ | تکراری |
| **نیوتون رافسون [۹]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بازنویسی شده | ۱,۸۷ | - | ۴,۶۹۰e-۹ | – | ۴ | تکراری |
| **روش هیبرید [۶]** | فضای عارضه | معادلات افاین، پروژکتیو و شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۳,۱۶ | - | ۱,۱۲۳e-۷ | – | ۳ | غیر تکراری |



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

جدول۳: ارزیابی روش‌های پیشنهادی و چهار روش موجود به ازای ۳۵ نقطه کنترل حقیقی برای سنجنده *SPOT*

| روش‌ها | فضای جستجو | معادلات مورد استفاده | زمان تقریبی روش (ثانیه) | زمان تقریبی روش پیشنهادی (ثانیه) | خطای تقریبی روش (RMSE) | خطای تقریبی روش پیشنهادی (RMSE) | بیشترین تعداد تکرار معادلات شرط همخطی | روند جستجو |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **پنجره جستجوی نصف کننده [۸]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۱,۹۱ | ۱,۷۸ | ۰,۸۷ | ۰,۷۱ | ۱۵ | تکراری |
| **جستجوی متوالی فضای تصویر** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۶۹,۳۰ | ۶۹,۸۱ | ۰,۷۶ | ۰,۶۵ | ۶۰۰۰ | تکراری |
| **نیوتون رافسون [۹]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بازنویسی شده | ۱,۷۸ | _ | ۰,۶۴ | _ | ۴ | تکراری |
| **روش هیبرید [۶]** | فضای عارضه | معادلات افاین، پروژکتیو و شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۳,۵۳ | _ | ۰,۶۴ | _ | ۳ | غیر تکراری |

با توجه به نتایج جدول(۳)، با استفاده از نقاط کنترل حقیقی، هر دو روش پیشنهادی باعث بهبود میزان خطا (*RMSE*) در زمان تقریبا مشابه نسبت به روش‌های اصلی پنجره جستجوی نصف کننده و جستجوی متوالی فضای تصویر شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر جستجوی متوالی فضای تصویر در این حالت به دقتی معادل روش‌های نیوتون رافسون و هیبرید انجامیده است. با این حال تعداد تکرار معادلات شرط همخطی در روش پیشنهادی مبتنی بر جستجوی متوالی فضای تصویر در مقایسه با روش نیوتون رافسون و روش هیبرید بسیار قابل ملاحظه است اما روش پیشنهادی مبتنی بر پنجره جستجوی نصف کننده با کاهش چشمگیر تعداد تکرار معادلات شرط همخطی، دقتی با اختلاف اندک نسبت به روش نیوتون رافسون و



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

روش هیبرید ارائه میدهد.

با توجه به نتایج جدول(۴) که با استفاده از نقاط شبیه سازی شده‌ی داده‌های سنجنده رپیدآی میباشد، میتوان به بهبود دقت روش‌های پیشنهادی نسبت به روش نیتون رافسون و روش هیبرید اشاره کرد.

**جدول ۴: ارزیابی روش‌های پیشنهادی و چهار روش موجود به ازای۳۲ نقطه کنترل شبیه سازی شده برای سنجنده *RapidEye***

| روش‌ها | فضای جستجو | معادلات مورد استفاده | زمان تقریبی روش (ثانیه) | زمان تقریبی روش پیشنهادی (ثانیه) | خطای تقریبی روش (RMSE) | خطای تقریبی روش پیشنهادی (RMSE) | بیشترین تعداد تکرار معادلات شرط همخطی | روند جستجو |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **پنجره جستجوی نصف کننده [۸]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۱,۸۲ | ۱,۷۱ | ۰,۲۹ | ۷,۶۳۵e-۸ | ۱۴ | تکراری |
| **جستجوی متوالی فضای تصویر** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۷۴۸,۶۴ | ۷۴۷,۸۴ | ۰,۲۹ | ۷,۶۳۵e-۸ | ۱۲۰۰۰ | تکراری |
| **نیوتون رافسون [۹]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بازنویسی شده | ۱,۹۵ | __ | ۵e-۲,۰۹ | _ | ۴ | تکراری |
| **روش هیبرید [۶]** | فضای عارضه | معادلات افاین، پروژکتیو و شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۹,۱۲ | _ | ۰,۰۰۰۱ | _ | ۳ | غیر تکراری |



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

جدول ۵: ارزیابی روش‌های پیشنهادی و چهار روش موجود به ازای۳۲ نقطه کنترل حقیقی برای سنجنده *RapidEye*

| روش‌ها | فضای جستجو | معادلات مورد استفاده | زمان تقریبی روش (ثانیه) | زمان تقریبی روش پیشنهادی (ثانیه) | خطای تقریبی روش (RMSE) | خطای تقریبی روش پیشنهادی (RMSE) | بیشترین تعداد تکرار معادلات شرط همخطی | روند جستجو |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **پنجره جستجوی نصف کننده [۸]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۱,۷۰ | ۱,۷۲ | ۱,۰۲ | ۰,۹۱ | ۱۴ | تکراری |
| **جستجوی متوالی فضای تصویر** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۷۵۹,۹۳ | ۷۵۹,۰۴ | ۱,۰۲ | ۰,۹۱ | ۱۲۰۰۰ | تکراری |
| **نیوتون رافسون [۹]** | فضای تصویر | معادلات شرط همخطی بازنویسی شده | ۱,۷۴ | – | ۰,۹۰ | – | ۴ | تکراری |
| **روش هیبرید [۶]** | فضای عارضه | معادلات افاین، پروژکتیو و شرط همخطی بر اساس مدل مراکز تصویر چندگانه | ۸,۶۸ | – | ۰,۹۰ | – | ۳ | غیر تکراری |

در جدول(۵) نتایج ارزیابی روش‌های پیشنهادی با استفاده از داده‌های سنجنده رپیدآی قابل مشاهده است. طبق نتایج فوق، در صورت استفاده از روش‌های پیشنهادی شاهد بهبود دقت نسبت به روش‌های اصلی و رسیدن به دقتی معادل روش‌های نیوتون رافسون و روش هیبرید هستیم. همچنین در اینجا ارجحیت روش پیشنهادی مبتنی بر پنجره جستجوی نصف کننده نسبت به روش پیشنهادی مبتنی بر جستجوی متوالی فضای تصویر بدلیل صرف زمان کمتر و دقت معادل نتیجه می‌شود.

### ۴-۱- ارزیابی نتایج

بر اساس جداول (۲) الی (۵) و با مقایسه پارامترهای زمان، متوسط خطا و تعداد تکرار معادلات شرط همخطی، روش پیشنهادی مبتنی بر پنجره جستجوی نصف کننده، هم با نقاط کنترل واقعی و هم با نقاط کنترل شبیه سازی شده دارای بهبود دقت و



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

کاهش خطا (خصوصا در نقاط شبیه سازی شده) در زمان تقریبا مساوی نسبت به روش پنجره جستجوی نصف کننده میباشد. همچنین نتایج فوق در مورد روش پیشنهادی مبتنی بر جستجوی متوالی نیز صادق است. روش پیشنهادی مبتنی بر جستجوی متوالی، نسبت به روش جستجوی نیوتون رافسون و روش تعیین بهترین خط جاروب هیبرید با استفاده از نقاط کنترل واقعی به دقتی تقریبا معادل انجامیده است. لازم به ذکر است روش جستجوی نیوتون رافسون از بهترین روش‌های موجود در فضای تصویر و روش هیبرید از بهترین روشهای موجود در فضای شیء هستند که مبنای مقایسه قرار گرفتند.

همانطور که ملاحظه میشود، در صورت استفاده از نقاط شبیه سازی شده، روش‌های پیشنهادی مبتنی بر هر دو روش، و همچنین روش‌های اصلی آنها دارای دقتی کاملا معادل هستند ولی روش پنجره جستجوی نصف کننده و روش پیشنهادی مبتنی بر پنجره جستجوی نصف کننده زمان محاسباتی را بطور چشم‌گیری کاهش داده اند که این موضوع بسیار حائز اهمیت است. این کاهش زمان را میتوان ناشی از کاهش چشمگیر تعداد تکرار معادلات شرط همخطی دانست.

بطور کلی بهبود دقت در روش‌های پیشنهادی، در نظر گرفتن همسایه‌های حقیقی یا به عبارت دیگر در نظر گرفتن گام پیوسته در روند جستجو است که در روش هیبرید هم باعث کاهش زمان و افزایش دقت شده است ولی در روش‌های جستجوی متوالی فضای تصویر و جستجو بر مبنای پنجره جستجوی نصف کننده لحاظ نشده بودند لذا این روش‌ها در سطح پیکسل بهترین خط جاروب را تعیین می‌کردند، حال آنکه در روش‌های پیشنهادی به سبب وارد کردن همسایه های حقیقی و گامهای جستجوی پیوسته، دقت تعیین بهترین خط جاروب به زیرپیکسل دست یافت. در پایان میتوان گفت با توجه به نتایج بدست آمده، در صورت مناسب بودن دقت پارامترهای توجیه خارجی، روش پیشنهادی وابسته به نوع سنجنده و پوشش توپوگرافی منطقه نیست.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، دو روش جهت بهبود دو الگوریتم از تحقیقات پیشین به منظور انتقال مختصات از فضای شیء به فضای تصاویر سنسورهای آرایه خطی پیشنهاد شده است. در روش‌های پیشنهادی بهترین خط جاروب متناظر با نقطه زمینی مطابق الگوریتم‌های جستجوی متوالی فضای تصویر و پنجره جستجوی نصف کننده، در فضای تصویر مورد جستجو قرار گرفته و در نهایت توسط معیار میانگین وزندار خط جاروب در سطح زیرپیکسل تعیین می‌شود. نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده که در جداول (۲) الی (۵) آورده شده اند، نشان دهنده بهبود دقت و کاهش خطا با صرف زمان مشابه در مقایسه با روش‌های جستجوی متوالی و پنجره جستجوی نصف کننده می‌باشد.

در روش‌های فضای تصویر که روش جستجوی متوالی به عنوان ابتدایی‌ترین و اولین روش توسعه داده شده در حوزه جستجوی بهترین خط جاروب می‌باشد، الگوریتم‌ها دارای روند تکراری و استفاده از معادلات شرط همخطی در هر تکرار به ازای هر نقطه می‌باشند که این موضوع باعث افزایش زمان و وجود مشکلاتی مانند همگرایی الگوریتم‌ها خواهد شد. لذا بایستی بدلیل افزایش کارایی الگوریتم‌های موجود مبتنی بر فضای تصویر، با تکیه بر تکنیک‌هایی مانند آنچه در روش روش نیوتون رافسون و یا پنجره جستجوی نصف کننده مورد استفاده قرار گرفته، به توسعه روش‌هایی پرداخت که تعداد تکرارها را به ازای هر نقطه به حداقل برساند. همچنین توسعه الگوریتم‌ها در فضای شیء به گونه‌ای که از روند جستجوی بهترین خط جاروب به روند تعیین بهترین خط جاروب بصورت قطعی روی آورده شود، ضمن لحاظ کردن پارامترهای وضعیتی و موقعیتی سنجنده به همراه تاثیرات آنها می‌تواند جزء تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. زیرا موارد فوق و دقت بالا در تولید محصولاتی اعم از ارتوفتو، ارتوفتوی



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

واقعی و بازنمونه برداری اپی پلار بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

## مراجع

[1] Wang, Mi, Fen Hu, Jonathan Li, and Jun Pan, "A fast approach to best scanline search of airborne linear pushbroom images," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp. 1059-1067, 2009.

[2] Zhang, Aiwu, Shaoxing Hu, Xiangang Meng, Lingbo Yang, and Hanlun Li, "Toward high altitude airship ground-based boresight calibration of hyperspectral pushbroom imaging sensors," Remote Sensing , pp. 17297-17311, 2015.

[3] Shen, Xiang, Guofeng Wu, Ke Sun, and Qingquan Li. , "A Fast and Robust Scan-Line Search Algorithm for Object-to-Image Projection of AirbornePushbroom Images," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp. 565-572, 2015.

[4] Tempelmann, Udo, Anko Börner, Bruce Chaplin, Ludger Hinsken, Borys Mykhalevych, Scott Miller, Utz Recke, Ralf Reulke, and Robert Uebbing, "Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 airborne digital sensor," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing , pp. 552-559, 2000.

[5] Wang, Mi, and Fen Hu, "A fast object-to-image best scanline search algorithm for airborne linear pushbroom image processing," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.

[6] The Evaluation Of M. Jannati,The Performance Of Rigorous and Interpolative Models in Reconstructing The Epipolar Geometry Of Linear Pushbroom Imagery,Master Thesis ,KNT University of Technology, 2012.

[7] M. J. V. Zoej, Photogrammetric evaluation of space linear array imagery for medium scale topographic mapping,PHD Thesis, University of Glasgow, 1997.

[8] Liu, Jun, and Dong-hong Wang, "Efficient orthoimage generation from ADS40 level 0 products," Journal Of Remote Sensing-Beijing, p. 247, 2007.

[9] Chen, L-C., and J-Y. Rau, "A unified solution for digital terrain model and orthoimage generation from SPOT stereopairs," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, pp. 1243-1252, 1993.

[10] Shin, Dongseok, and YoungRan Lee, "Geometric correction of push-broom type high resolution satellite images," ISPRS symposium Technical Commission, pp. 85-89, 1998.

[11] Habib, A.F., K.I. Bang, C.J. Kim, and S.W. Shin, "True orthophoto generation from high resolution satellite imagery", Innovations in 3D Geo Information Systems (A. Abdul-Rahman, S. Zlatanova, and V. Coors, editors), Heidelberg, Germany: Springer, pp. 641–656, 2006.



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

*Journal of Geospatial Information Technology*
**Vol.8 No.1, Spring 2020**

***Research Paper***

# *Accuracy improvement of Best Scanline Search Algorithms for Object to Image Transformation of Linear Pushbroom Imagery*

***Seyede Shahrzad Ahooei Nezhad [1], Mohammad Javad Valadan Zoej [2]*, Mojtaba Jannati [3]***

*1- MSc Student in Photogrammetry Department of Geomatics, Faculty of Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology*
*2- Professor in Remote Sensing and Photogrammetry Department of Geomatics, Faculty of Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology*
*3- PHD Graduated Student in Remote Sensing Department of Geomatics, Faculty of Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology*

***Abstract***

*Unlike the frame type images, back-projection of ground points onto the 2D image space is not a straightforward process for the linear pushbroom imagery. In this type of images, best scanline search problem complicates image processing using Collinearity equation from computational point of view in order to achieve reliable exterior orientation parameters. In recent years, new best scanline search methods have been proposed to use in respective applications. This article tries to improve two previous methods named image space sequential search and bisecting window search. The proposed approach has a three-stage procedure. At first, considering exterior orientation parameters of reference line, approximate time for ground point is estimated with a high precision using sequential search and bisecting window search. In the second stage, the neighboring scanlines of the ground point are determined in image space. Finally, in the third stage the best scanline is calculated with a subpixel precision by interpolating the neighboring scanlines. Experimental results from two different datasets show that the proposed method outperforms the two foresaid existing methods which results in 13% accuracy improvement using real ground points and 30% accuracy improvement using simulated ground points.*

***Key words:*** *Best Scanline Search, Pushbroom imaging, Object to image back-projection.*

***Correspondence Address:*** *Photogrammetry and Remote Sensing Group, Faculty of Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
***Tel :*** *+98 21 88877071*
***Email :*** *valadanzouj@kntu.ac.ir*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.1.2.2 ]
[ DOI: 10.29252/jgit.8.1.23 ]