



سنجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال هشتم، شماره اول، بهار ۱۳۹۵
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.8, No. 1, Spring 2016

۱۹-۲۶



روشی جدید برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم مبتنی بر مدل پارامترهای مداری

مجتبی جنتی^۱، محمدجواد ولدان زوج^{۲*}، علی محمدزاده^۳، علیرضا صفدری‌نژاد^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۴. کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۲/۲۷

چکیده

در تصاویر نرمال که براساس هندسه اپی‌پلار بازنمونه‌برداری شده‌اند، نقاط متناظر در زوج تصویر در راستای یک سطر یا ستون‌اند و پارالاکس قائم نخواهند داشت. این ویژگی تصاویر نرمال را به‌منزله پیش‌نیاز اصلی طیف وسیعی از کارهای فتوگرامتری نظیر تناظریابی، مثلث‌بندی هوایی خودکار، تولید مدل رقومی زمین، تولید ارتوفوتو، و برجسته‌بینی مطرح کرده است. در این مقاله، روش جدیدی مبتنی بر استفاده از مدل پارامترهای مداری برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی براساس تصحیح پارامترهای توجیه خارجی مدل پارامترهای مداری در فضای شیئی توسعه یافته است. از مزایای این مدل می‌شود به امکان تصحیح اثر دید غیرقائم سنجنده به‌واسطه تعبیرپذیری فیزیکی پارامترهای مدل و امکان پیاده‌سازی روند پیشنهادی، با استفاده از دیگر مدل‌های مطرح در حوزه تصحیح هندسی تصاویر ماهواره اشاره کرد. طبق نتایج حاصل از ارزیابی دقت تصاویر نرمال تولیدشده به روش پیشنهادی در سطح نقاط چک مستقل، متوسط پارالاکس x باقی‌مانده در سطح مدل ۰/۷۳ پیکسل حاصل شد که بر کارایی مدل پیشنهادی دلالت دارد.

کلید واژه‌ها: بازنمونه‌برداری اپی‌پلار، تصاویر خطی پوش‌بروم، مدل پارامترهای مداری.

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، کدپستی ۱۹۴۳۳-۱۹۹۶۷. تلفن: ۰۹۱۲۱۰۵۶۸۱۱

۱- مقدمه

در نتیجه، تئوری اپی پلار کلاسیک در مورد تصاویر پوشش دار ماهواره‌ای کاربردی نیست (Kim, 2000; Morgan, 2004; Wang et al., 2011). براساس دسته‌بندی (Wang et al., 2011)، مدل‌های اپی پلاریتی موجود را می‌شود به دو گروه دسته‌بندی کرد: (۱) مدل‌هایی برای یافتن منحنی‌های اپی پلار در فضای تصویر براساس تناظریابی تصاویر، و (۲) مدل‌هایی برای استفاده از هندسه اپی پلار براساس یک مدل ریاضی مشخص برای سنجنده. پرکاربردترین مدل مورد استفاده در دسته نخست برازش منحنی است که اواخر دهه ۱۹۸۰ برای بازآرایی منحنی‌های اپی پلار تقریبی تصاویر پوشش دار سنجنده SPOT پیشنهاد شد (Su, 2002). از مهم‌ترین فعالیت‌های دسته دوم هم می‌شود به مدل‌های اپی پلاریتی مبتنی بر مدل فیزیکی سنجنده‌های خطی پوش بروم (Gupta and Hartly, 1997; Kim, 2000; Bang et al., 2003; Habib et al., 2005b; Morgan et al., 2006) مدل‌های اپی پلاریتی مبتنی بر تبدیل افاین سه‌بعدی (Ono et al., 1999; Morgan, 2004; Habib et al., 2006) و مدل‌های اپی پلاریتی مبتنی بر مدل توابع کسری (Jaehong, 2006; Zhao et al., 2008; Wang et al., 2011) اشاره کرد. تعریفی که براساس مدل فیزیکی سنجنده برای منحنی‌های اپی پلار تصاویر خطی پوش بروم ارائه شده است (Alrousan et al., 1997)، از دیگر تعاریف مقبولیت بیشتری دارد (Kim, 2000; Morgan, 2004; Wang et al., 2011) و می‌تواند برای تصاویر فریم نیز گسترش یابد (Wang et al., 2011). تلاش‌های بسیاری در زمینه مطالعه هندسه اپی پلار تصاویر خطی، براساس مدل فیزیکی سنجنده، صورت پذیرفته که مهم‌ترین دستاورد آنها استخراج رابطه ریاضی هندسه اپی پلار تصاویر خطی بر مبنای مدل مراکز تصویر چندگانه (Gupta and Hartly, 1997; Kim, 2000; Bang et al., 2003; Habib et al., 2005b; Zhao et al., 2008) و مدل ساده‌شده

هدف از فرایند بازنمونه برداری اپی پلار تصاویر پوشش دار تولید تصاویر تصحیح شده‌ای است که فقط در راستای یکی از محورهای تصویر دارای پارالاکس باشند (Wang et al., 2011). به آنها تصاویر نرمال گفته می‌شود که شرایط مناسبی برای تناظریابی خودکار تصاویر پوشش دار، تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین و اندازه‌گیری‌های استریو فراهم می‌آورند (Cochran, 1995; Ono et al., 1999; Hashimoto, 2000; Bang et al., 2003; Lee et al., 2003; Morgan, 2004; Kornus et al., 2006). بازنمونه برداری اپی پلار تصاویر فریم فرایند مشخص و شناخته شده‌ای دارد (Zhang, 1998; Torr, 2002) زیرا مدل فیزیکی سنجنده به سادگی تعریف می‌شود (Kraus, 1993; Wang et al., 2011) و خطوط اپی پلار حاصل از این تصاویر خطوطی مستقیم‌اند (Ono et al., 1999; Morgan, 2004; Habib et al., 2005a,b). با وجود این، سنجنده‌های خطی پوش بروم، به‌منزله سنجنده‌های پیشرو در تصویربرداری ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا، با اصول تصویربرداری متفاوت خود شناخته می‌شوند که در قیاس با سنجنده‌های فریم متداول، ساختار فیزیکی متمایز و پیچیده‌تری دارند. به طوری که این تصاویر از اتصال مجموعه‌ای از خطوط جاروب یک‌بعدی تشکیل می‌شوند که در راستای عمود بر مسیر حرکت سنجنده گرفته شده‌اند (Wolf and Dewitt, 2000). به سبب این طبیعت پیچیده، بازنمونه برداری اپی پلار این تصاویر با دو مشکل اساسی مواجه است. از یکسو، تعریف ارتباط هندسی دقیق فضای شیء و فضای تصویر دشوار است (Morgan, 2004; Habib et al., 2005b; Morgan et al., 2006) و تاکنون مدل ریاضی یکتایی با مقبولیت عام از سوی محققان و کمیته‌های تخصصی برای تصحیح هندسی این تصاویر مورد پذیرش قرار نگرفته است (McGlone, 1996; Toutin, 2006). از دیگر سو، خطوط اپی پلار حاصل مستقیم نیستند بلکه منحنی شکل‌اند (Gupta and Hartly, 1997;

هندسی تصاویر خطی در قیاس با مدل‌های غیرفیزیکی، نظیر مدل توابع کسری و مدل افاین سه‌بعدی (McGlone, 1996; Valadan Zoej, 1997; Toutin, 2005b; Habib et al., 2006)، تاکنون برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی براساس این مدل‌ها مدلی پیشنهاد نشده است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بر بازسازی منحنی‌های اپی‌پلار در فضای تصویر و بررسی ویژگی‌های هندسی این منحنی‌ها (Kim, 2000; Morgan, 2004, Habib et al., 2005a) معطوف بوده است. در این پژوهش، روش جدیدی برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم با استفاده از مدل پارامترهای مداری ولدان‌زوج (۱۹۹۷) پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی براساس تصحیح پارامترهای توجیه خارجی مدل پارامترهای مداری در فضای شیئی توسعه یافته و از مزایای این مدل می‌شود به امکان تصحیح اثر دید غیرقائم سنجنده به‌واسطه تعبیرپذیری فیزیکی پارامترهای مدل و امکان پیاده‌سازی روند پیشنهادی با استفاده از دیگر مدل‌های تصحیح هندسی تصاویر ماهواره اشاره کرد.

۲- مبانی تئوری

۲-۱- هندسه اپی‌پلار تصاویر خطی

بر مبنای هندسه اپی‌پلار، در یک زوج تصویر پوشش‌دار، هر نقطه در فضای شیء و مراکز تصویر متناظر آن صفحه‌ای به نام اپی‌پلار تشکیل می‌دهند (Schenk, 1990). به فصل مشترک این صفحه با صفحات در برگیرنده تصاویر، خطوط اپی‌پلار گفته می‌شود (Cho et al., 1992). هنگام بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر فریم، پارامترهای وضعیتی دو تصویر به‌گونه‌ای تصحیح می‌شوند که پارالاکس قائم نقاط متناظر در زوج تصویر پوشش‌دار حذف شود (Cho et al., 1992; Zhang et al., 1995). با در نظر گرفتن پارامترهای توجیه خارجی جدید، تقاطع همه صفحات مشترک در خطوط اصل بین مراکز تصویر با صفحات در برگیرنده تصاویر اپی‌پلار خطوطی موازی

سنجنده‌های پوش‌بروم (Lee and Park, 2002) بوده است. براساس این مدل‌ها نیز، ویژگی‌های هندسی منحنی‌های اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم بررسی شده است (Kim, 2000; Morgan, 2004; Habib et al., 2005b). با توجه به میدان دید باریک و سرعت و وضعیت نسبتاً ثابت سنجنده‌های خطی پوش‌بروم در بازه زمانی کوتاه ثبت تصویر (Morgan, 2004; Habib et al., 2005b)، هندسه تصویربرداری این سنجنده‌ها را می‌شود بسیار شبیه به تصویربرداری موازی دانست (Morgan, 2004). بر همین اساس، چندین مدل برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی با قدرت تفکیک مکانی بالا، براساس هندسه تصویربرداری موازی، پیشنهاد شده است (Ono et al., 1999; Morgan et al., 2006; Jaehong et al., 2004a,b). به دلیل میدان دید بسیار باریک این سنجنده‌ها، نخست، مدل تصویربرداری پرسپکتیو سنجنده به مدل تصویربرداری موازی تبدیل می‌شود (Okamoto, 1991; Okamoto, 1999; Ono et al., 1999; Morgan, 2004; Fraser and Yamakawa, 2004) و سپس، پارامترهای هندسه اپی‌پلار تصاویر پوشش‌دار محاسبه می‌شود (Morgan, 2004). در زمینه امکان‌سنجی تولید خودکار مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از مدل‌های اپی‌پلاریتی مبتنی بر مدل تصویربرداری موازی نیز مطالعاتی صورت پذیرفته است (Morgan, 2004; Habib et al., 2004). در نهایت، اقبال روزافزون تولیدکنندگان و کاربران تصاویر ماهواره‌ای به مدل توابع کسری عرصه تحقیقات در زمینه هندسه اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم را به استفاده از این مدل ریاضی سوق داد (Zhao et al., 2008; Wang et al., 2011; Jaehong, 2011). تحقیقات در این زمینه، افزون بر آشکارسازی ویژگی‌های هندسه منحنی‌های اپی‌پلار تصاویر خطی براساس مدل توابع کسری (Zhao et al., 2008)، مدل‌هایی برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر پوشش‌دار با استفاده از این مدل ریاضی را نیز به‌همراه داشته است (Wang et al., 2011; Jaehong, 2011).

با وجود پتانسیل بالای مدل‌های فیزیکی تصحیح

سه بردار \vec{I}_1 ، \vec{I}_2 و \vec{n} برای نقاط متناظر ثبت شده در تصاویر پوشش دار صفر نخواهد بود ($\vec{I}_1 \times \vec{I}_2 \times \vec{n} \neq 0$). از دیدگاه هندسی، در صورتی که شرط ارائه شده در رابطه (۱)، به ازای همه نقاط متناظر از تصاویر پوشش دار برقرار باشد، پارالاکس قائم همه نقاط متناظر به صورت هم زمان حذف می شود (Morgan, 2004).

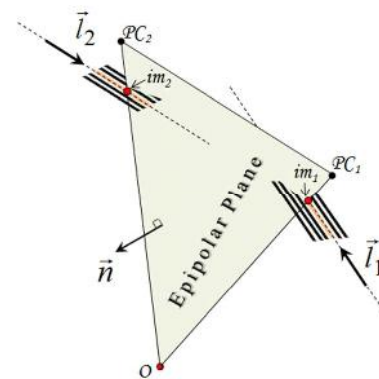
$$\vec{I}_1 \times \vec{I}_2 \times \vec{n} = \vec{0} \quad \text{رابطه (۱)}$$

ناگفته نماند که تأمین این شرط در بازه زمانی ثبت تصویر، شرایط لازم برای تولید تصاویر نرمال است. اما اگر هدف از تولید تصاویر نرمال فقط فرایند برجسته بینی باشد، حفظ ترازوی محورهای اصلی سیستم اپتیکی و ثبات در اندازه باز هوایی تصاویر پوشش دار نیز ضروری خواهد بود (Habib et al., 2005a).

۲-۲- مدل پارامترهای مداری ولدان زوج

در تشکیل صحنه ای با هندسه تصویربرداری خطی در سکوها ماهواره ای، شرایط فیزیکی خاصی حکم فرما است که با تعریف چهار سیستم مختصات سه بعدی و ارتباط لحظه ای میان آنها، می شود هندسه حاکم بر لحظه ثبت تصویر را مدلسازی کرد. سیستم مختصات زمینی یا GCS، سیستم مختصات ایده آل مداری ماهواره یا ORF، سیستم مختصات سکوی ماهواره یا PRF و سیستم مختصات سنجنده یا SRF، چهار سیستم مختصات مطرح در مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره ای اند (Valadan Zoej, 1997). از نظر تئوری، سیستم GCS سیستمی زمین مرکز و Space fixed در نظر گرفته می شود که حرکت ماهواره ها را در چنین سیستم مختصاتی می شود با پارامترهای کپلری تشریح کرد (Seeber, 2003). سیستم مختصات ORF نیز، با مبدائی منطبق بر مرکز ثقل ماهواره، سیستمی دست راستی است که راستای محور سوم در آن هم جهت با بردار موقعیت ماهواره و جهت گیری محور اول آن منطبق بر راستای بردار سرعت لحظه ای ماهواره در سیستم GCS است (شکل ۲) (Valadan Zoej, 1997).

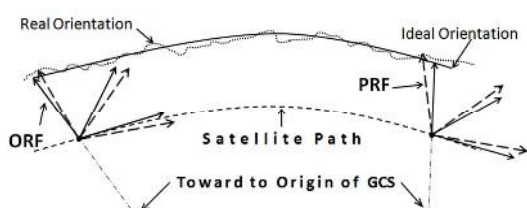
تولید خواهند کرد (Morgan, 2004). در سنجنده های خطی پوش بروم، در هر لحظه فقط یک سطر از صحنه تصویر گرفته می شود که با ترکیب حرکت سنجنده، همراه با نمونه برداری های منظم زمانی، تصویر پیوسته ای از سطح زمین به دست می آید (Valadan Zoej, 1997; Poli, 2005). مطابق شکل ۱، با در نظر گرفتن مراکز تصویر مربوط به سطر ثبت نقطه زمینی O در هریک از تصاویر پوشش دار (PC_1 و PC_2)، می شود صفحه ای پلار را برای آن نقطه ترسیم کرد. بدیهی است که صفحه مورد نظر، در دست کم یک نقطه، آرایه های خطی متناظر با مراکز تصویر PC_1 و PC_2 را قطع خواهد کرد (نقاط im_1 و im_2). در شکل ۱، بردار نرمال به صفحه ای پلار با \vec{n} و بردار هادی خط برازش یافته به آرایه خطی سیستم اپتیکی در سیستم مختصات شیئی با \vec{I} نشان داده شده است. \vec{I}_1 و \vec{I}_2 به ترتیب، بردار مربوط به سطر ثبت کننده نقطه O در تصویر اول و دوم هستند.



شکل ۱. هندسه ای پلار در تصاویر با هندسه تصویربرداری خطی Cross Track و تکنولوژی پوش بروم

در تصاویر پوشش دار Cross Track، هیچ تضمینی برای هم صفحه بودن دو بردار \vec{I}_1 و \vec{I}_2 به ازای نقاط متناظر وجود ندارد (Kim, 2000; Morgan, 2004). به عبارت دیگر، ضرب خارجی

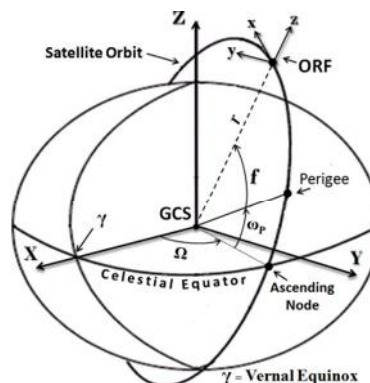
این سیستم است. از این رو، سیستم PRF به منظور مدلسازی شرایط اغتشاش تعریف شده است (Valadan Zoej, 1997). این سیستم هم‌مبدأ با ORF است که به بدنه سکوی ماهواره قفل شده است. انتظار می‌رود که این سیستم مختصات در حالتی که اغتشاشی در وضعیت سکو وجود نداشته باشد، بر ORF کاملاً منطبق باشد (شکل ۳) (Valadan Zoej, 1997).



شکل ۳. ارتباط بین سیستم‌های ORF و PRF
منبع: (Poli, 2005)

بخش انعطاف‌پذیر در طراحی مدل OPM، مدلسازی و برقراری ارتباط بین دو سیستم ORF و PRF است. این ارتباط به وسیله ماتریس‌های دوران سه‌بعدی که قابلیت تغییر زوایای دوران به نسبت زمان دارند، مدلسازی می‌شود (Valadan Zoej, 1997). در نهایت، SRF نیز سیستمی دست‌راستی است که مبدائی منطبق بر مرکز تصویر سیستم اپتیکی سنجنده دارد. راستای محور Z در SRF هم‌جهت با امتداد محور اصلی سیستم اپتیکی، و راستای محور y هم‌جهت با راستای چیدمان آشکارسازها در فضای تصویر تعریف می‌شود، به گونه‌ای که جهت‌گیری مثبت محور y هنگام حرکت نزولی ماهواره به سمت شرق جغرافیایی معطوف باشد (Valadan Zoej, 1997).

ساختار معادله شرط هم‌خطی مورد استفاده در مدل پارامترهای مداری، در مدلسازی تصاویر ماهواره‌ای با هندسه تصویربرداری خطی، به صورت رابطه (۳) است (Valadan Zoej, 1997).



شکل ۲. ارتباط بین سیستم GCS و ORF
منبع: (Valadan Zoej, 1997)

در مدل OPM، ارتباط میان سیستم‌های GCS و ORF با پارامترهای کپلری مدار ماهواره تعیین می‌شود (Valadan Zoej, 1997). با توجه به اینکه از دیدگاه ناظر زمینی در سیستم مختصات زمین ثابت، مشاهده پارامترهای مربوط به موقعیت و وضعیت لحظه‌ای ORF متأثر از دوران وضعی زمین است اگر هدف از مدلسازی هندسی برقراری ارتباط بین فضای تصویر و سیستم مختصاتی زمین ثابت باشد، باید موقعیت و وضعیت سیستم ORF همراه با تأثیر دوران زمین برآورد شود (Valadan Zoej, 1997). از این رو در طراحی مدل OPM، پارامتر بعد نقطه گرهی صعودی (Ω) مدار ماهواره به منظور مدلسازی اثر دوران زمین، وابسته به زمان (t) در نظر گرفته می‌شود. حرکت مداری سیستم ORF نیز با وابسته کردن پارامتر آنامولی واقعی (f) نسبت به زمان مدلسازی می‌شود (Valadan Zoej, 1997) (رابطه ۲).

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_1 t$$

$$f = f_0 + f_1 t \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، f_0 و Ω_0 پارامترهای مربوط به موقعیت مرجع از صحنه تصویر (سطر مرجع)، f_1 و Ω_1 میزان تغییرات زمانی f و Ω در بازه زمانی گرفتن تصاویرند.

سیستم ORF سیستمی ایده‌آل است و به علت بروز اغتشاش، سکوی ماهواره آماده تغییر وضعیت در برابر

(Poli, 2005). بنابراین، مختصات ماتریسی تصاویر خام اطلاعات کاملی از چگونگی آرایش و مختصات متریک آشکارسازها در مقابل سیستم SRF ندارند (Poli, 2005). در حالت ایده آل، به علت چگونگی چیدمان آرایه های خطی در فضای تصویر، موقعیت متریک هر آشکارساز در سیستم SRF صرفاً دارای مؤلفه y است و مؤلفه x آن صفر در نظر گرفته می شود (Poli, 2005). از سوی دیگر، هنگام ثبت هر سطر از تصویر، موقعیت و وضعیت لحظه ای سنجنده فقط در منطقه زیر پوشش همان سطر از تصویر در فضای زمین تأثیر می گذارد (Valadan Zoej, 1997; Toutin, 2006). به عبارت دیگر، اگر هر سطر از تصویر در موقعیت و وضعیت خود در لحظه تصویربرداری قرار گیرد، فضای زیر پوشش زمینی آن معادل واقعیت ثبت شده خواهد بود. این امر مستلزم تعیین صحیح پارامترهای توجیه خارجی برای هر سطر از تصویر خطی است (Valadan Zoej, 1997). اگر پارامترهای کپلری و اغتشاشات وضعیتی سنجنده مغایر با مقادیر واقعی در نظر گرفته شود، موقعیت زمینی متناظر با هر پیکسل از تصویر خام به شکل دیگری در فضای تصویر ثبت خواهد شد (Konecny et al., 1987). به عبارت جامع تر، در صورت تعیین نادرست پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM، باید جهت ثبت مناطق زمینی مشابه با واقعیت ثبت شده در هر پیکسل از تصویر خام اولیه، شکل و مختصات آشکارسازها در فضای تصویر نسبت به سیستم SRF تغییر کند (Konecny et al., 1987). تحقیقات پیشین نشان داده اند که می شود آثار تعیین نادرست پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM را به کمک اعمال تصحیحات، به موقعیت متریک نقاط در فضای تصویر مدلسازی کرد (Konecny et al., 1987).

در روش استفاده از پارامترهای اضافی، فقط پارامترهای مجهول در روند ترفیع فضایی مدل OPM پارامترهای اضافی در فضای تصویرند. پارامترهای توجیه خارجی نیز به صورت تقریبی و نزدیک به مقادیر واقعی تعیین شده اند و با نقش مقادیر ثابت در روند حل

$$\begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix}_{GCS} = \lambda [R_{Orbital}] \times [R_{Attitude}] \times [R_{Pointing}] \times \begin{pmatrix} x = 0 \\ y \\ -c \end{pmatrix}_{SRF}$$

رابطه (۳)

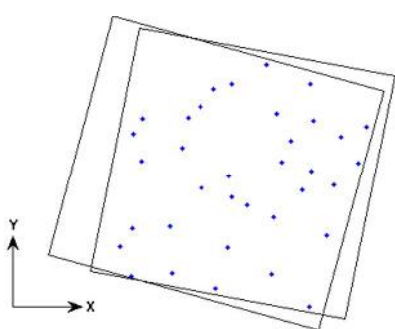
در این رابطه، $(x = 0, y)$ مختصات نقاط در فضای تصویر خطی پوش بروم در سیستم SRF؛ c فاصله اصلی سیستم اپتیکی؛ $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ مختصات لحظه ای مرکز تصویر در سیستم GCS که با پارامترهای کپلری تعیین می شود؛ $[X, Y, Z]^T$ مختصات نقاط زمینی در سیستم GCS؛ λ ضریب مقیاس؛ $[R_{Pointing}]$ ماتریس دوران سه بعدی برای موازی کردن سیستم SRF با سیستم PRF به کمک زوایای نشانه روی سنجنده؛ $[R_{Attitude}]$ ماتریس دوران سه بعدی برای موازی کردن سیستم PRF با سیستم ORF که مسئولیت مدلسازی اغتشاشات در وضعیت سنجنده را، بدون تأثیرگذاری بر موقعیت لحظه ای ماهواره، برعهده دارد؛ $[R_{Orbital}]$ نیز ماتریس دوران سه بعدی برای موازی کردن سیستم ORF با سیستم GCS به وسیله پارامترهای کپلری است. در این ساختار مدلسازی، ماتریس $[R_{Orbital}]$ و بردار $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ وابسته به زمان اند و $[R_{Pointing}]$ ساختار مستقل از زمان خواهد داشت. ماتریس $[R_{Attitude}]$ نیز، متشکل از سه ماتریس دوران سه بعدی حول سه محور مختصاتی است که زوایای دوران در ساختار هر یک از این ماتریس ها با چندجمله ای های وابسته به زمان بیان می شود.

۲-۳- استفاده از پارامترهای اضافی در مدل OPM

در تصویر خطی پوش بروم خام از دیدگاه هندسی، صرف نظر از چگونگی شکل و چیدمان آرایه های خطی به نسبت سیستم SRF، هر سطر از تصویر، پس از ثبت در فضای تصویر، در ساختار منظم ماتریسی ای به صورت متوالی ذخیره سازی می شود (Gupta and Hartly, 1997).

جدول ۱. مشخصات مجموعه تصاویر پوشش‌دار

مجموعه داده		اصفهان
سکو		SPOT-1
سنجنده		HRV
تاریخ اخذ		Aug 1987 Jun 1987
زاویه دید (درجه)		24.7° W 20.84° E
قدرت تفکیک مکانی در نادر		10 m
نسبت باز به ارتفاع		0.974
تعداد نقاط کنترل		35



شکل ۴. توزیع نقاط کنترل در سطح تصاویر پوشش‌دار

پارامترهای توجیه خارجی هر تصویر، با هدف تطبیق پارامترها با شرایط تصویربرداری اپی پلار، (۳) به کارگیری روش استفاده از پارامترهای اضافی در مدل OPM برای برآورد ضرایب پارامترهای اضافی، جهت انتقال موقعیت نقاط در فضای تصویر به هندسه تعریف شده، با پارامترهای توجیه خارجی جدید، و در نهایت، (۴) بازنمونه‌برداری اپی پلار تصاویر و تولید تصاویر نرمال. این موارد چهار بخش اصلی از روش پیشنهادی است که در ادامه، هر بخش تشریح خواهد شد.

۳-۲-۱- ترفیع فضایی تصاویر پوشش‌دار

در نخستین گام تولید تصاویر نرمال، پارامترهای توجیه خارجی مدل مداری صلب تصاویر پوشش‌دار، طی فرایند ترفیع فضایی و به کمک نقاط کنترل تعیین میشود. در مدل صلب مداری، پارامترهای ماتریس $[R_{Attitude}]$ در ساختار مدل OPM حضور ندارند و وضعیت سیستم SRF به کلی به پارامترهای مداری وابسته است.

دستگاه معادلات حضور دارند (Safdarinezhad, 2012). ساختار معادله شرط هم‌خطی در روش استفاده از پارامترهای اضافی در فضای تصویر به صورت رابطه (۴) است.

$$\begin{pmatrix} x = \bullet + \Delta x \\ y + \Delta y \\ -c \end{pmatrix}_{SRF} = \frac{1}{\lambda} [R_{Pointing}]^T \times [R_{Attitude}]^T \times [R_{Orbital}]^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix}_{GCS}$$

رابطه (۴)

نمادگذاری در رابطه (۴) همانند رابطه (۳) است و $(\Delta y, \Delta x)$ چندجمله‌ای‌های دوبعدی از مختصات سطر (r) و ستون (c) ماتریسی در سیستم مختصات تصویر رقومی‌اند (رابطه ۵).

$$\begin{aligned} \Delta x &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} r^i c^j \\ &= a_0 + a_1 r + a_2 c + a_3 r c + a_4 r^2 + a_5 c^2 + \dots \\ \Delta y &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} r^i c^j \\ &= b_0 + b_1 r + b_2 c + b_3 r c + b_4 r^2 + b_5 c^2 + \dots \end{aligned}$$

رابطه (۵)

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

تصاویر پوشش‌دار مورد استفاده در این پژوهش تصاویر خام سطح IA منطقه اصفهان است که به وسیله سنجنده HRV ماهواره SPOT-1 گرفته شده است. اطلاعات هندسی این تصاویر و تعداد نقاط کنترلی موجود در جدول ۱ آمده است. توزیع نقاط کنترلی در فضای تصاویر و چگونگی پوشش تصاویر استریو در شکل ۴ نشان داده شده است.

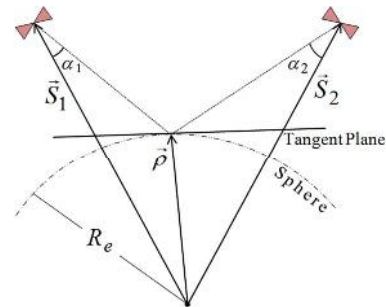
۳-۲- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، تولید تصاویر اپی پلار در چهار گام اصلی صورت گرفته است: (۱) ترفیع فضایی تصاویر پوشش‌دار به کمک نقاط کنترل، برای برآورد پارامترهای توجیه خارجی دقیق مدل OPM، (۲) تصحیح

۳-۲-۲- تصحیح پارامترهای توجیه خارجی

در این مرحله، پارامترهای توجیه خارجی هر تصویر به گونه‌ای تصحیح می‌شوند که اگر سنجنده فرضی در آن شرایط موقعیتی و وضعیتی قرار می‌گرفت، تصاویر پوشش دار خودبه خود به صورت نرمال شده گرفته می‌شدند. این فرایند شامل شش گام (الف-ج) است که در ادامه، به تفکیک تشریح خواهند شد.

الف) در نخستین گام، مطابق شکل ۵، پارامترهای صفحه‌ای در فضای شیئی مماس بر نقطه‌ای از یک کره تعیین می‌شود. شعاع کره مورد نظر معادل با شعاع متوسط زمین در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵. نمایش شماتیک صفحه مماس بر کره

بردار نقطه تماس صفحه با کره و همچنین، بردار نرمال بر صفحه مورد نظر ($\vec{\rho}$)، تابعی از بردار موقعیت ماهواره‌ها (\vec{S}_1 و \vec{S}_2) هنگام گرفتن سطر مرجع تصویر ($t=0$)، زوایای نشان‌روی رول سنجنده (α_1 و α_2) و همچنین، شعاع میانگین زمین (R_e) است (رابطه ۶).

$$\vec{\rho} = R_e \times \frac{\frac{\vec{S}_1}{|\vec{S}_1|} \alpha_2 + \frac{\vec{S}_2}{|\vec{S}_2|} \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

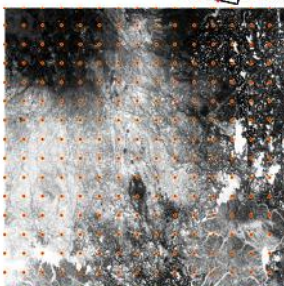
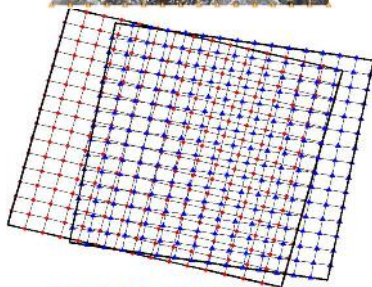
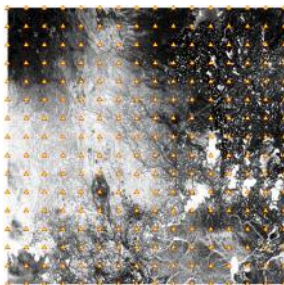
از آنجاکه طول بردار شعاعی موقعیت لحظه‌ای ماهواره را به نسبت GCS (R_s)، با استفاده از پارامترهای کپلری می‌شود تعیین کرد (Valadan Zoej, 1997; Seeber, 2003)، در ساختار مدل OPM، بردار موقعیت ماهواره ($\vec{S}(t)$) برای هر لحظه (t) مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\vec{S}(t) = [X_s, Y_s, Z_s]^T = [R_{Orbital}] \times [0, 0, R_s]^T$$

رابطه (۷)

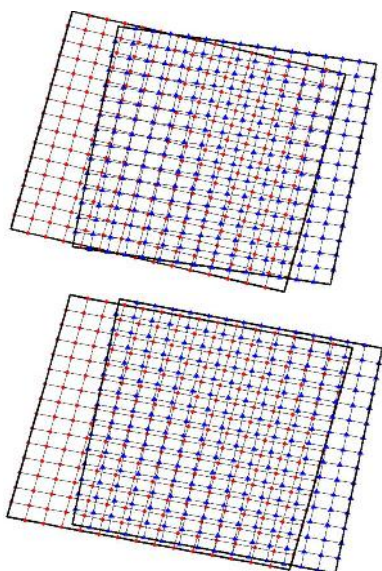
پس از برآورد ضرایب مربوط به معادله صفحه مورد نظر، در مراحل بعدی از این صفحه به‌منزله فصل تقاطع پرتوهای تصاویر پوشش دار استفاده خواهد شد. مزایای تعریف این صفحه: (۱) نزدیکی به منطقه زمینی زیر پوشش تصاویر پوشش دار و (۲) جلوگیری از تقاطع پرتوهای تصویر با صفحات $Z = const.$ در سیستم GCS هستند.

ب) در گام دوم، شبکه منظمی از نقاط در فضای تصویر برای هریک از تصاویر پوشش دار تولید می‌شود و موقعیت حاصل از تقاطع هر نقطه از این شبکه با صفحه تولیدشده در گام (الف) تعیین می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶. نمایش شماتیک گام دوم (الف) شبکه نقاط در تصویر نخست، (ب) شبکه‌های حاصل از تقاطع پرتوهای تصویری با صفحه تعریف شده در فضای شیئی، (ج) شبکه نقاط در تصویر دوم

تولیدشده در فضای شیء (شکل ۸-الف)، پس از اعمال دوران‌های یادشده، به شکل ۸-ب تبدیل خواهد شد.



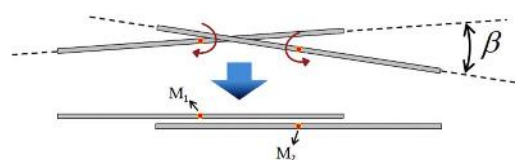
شکل ۸. ساختار شبکه اولیه و شبکه تصحیح شده پس از اعمال دوران‌های گام (ج). (الف) شبکه اولیه تولیدشده در فضای شیء، (ب) شبکه تصحیح شده پس از اعمال دوران

با در نظر گرفتن مختصات جدید زمینی برای نقاط تصویری، انتظار می‌رود سنجنده فرضی که چنین شبکه‌هایی را در تقاطع با صفحه مماس بر زمین تولید کند، شرط مطرح شده در رابطه (۱) را با دقت مناسبی، به‌ازای همه نقاط متناظر از تصاویر پوشش‌دار تأمین کند. اگر هدف از تولید تصاویر نرمال استفاده در فرایندهای برجسته‌بینی نباشد، انجام دادن گام‌های (ت) و (ج) ضروری نیست و می‌شود از آنها صرف‌نظر کرد.

ت) تأمین شرط یادشده در رابطه (۱) قیدی برای ثبات اندازه باز هوایی در بازه زمانی گرفتن تصویر محسوب نمی‌شود. از آنجاکه در مرحله ترفیع فضایی تصاویر (بخش ۳-۲-۱) از مدل مداری صلب استفاده شده است، انتظار تغییر وضعیت زمانی سیستم SRF نسبت به سیستم ORF وجود ندارد. در چنین شرایطی، اگر دو سنجنده پوش بروم: (۱) باز هوایی ثابتی در زمان دریافت تصاویر پوشش‌دار داشته باشند و (۲) قید

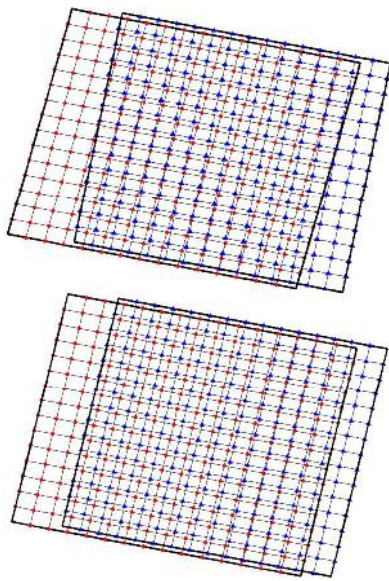
در این مرحله، مختصات ایده‌آل نقاط در فضای تصویر $(x = 0, y)$ به‌منزله مختصات متریک تصویری و شماره سطر در سیستم مختصات تصویر رقومی (r) به‌منزله پارامتر زمان (t) در مدل OPM در نظر گرفته شده است. در نهایت، فهرستی از (۱) مختصات متریک تصویری $(x = 0, y)$ ، (۲) مختصات پیکسلی نقاط (r, c) و (۳) مختصات زمینی برآوردشده برای هر نقطه در صفحه تولیدشده در گام (الف) خروجی این مرحله خواهند بود.

پ) در گام‌های (پ) و (ت)، مختصات زمینی برآوردشده برای هر نقطه در فضای تصویر، طی روندی سیستماتیک تصحیح می‌شود. براساس نتایج به‌دست‌آمده از گام (ب)، مختصات‌های زمینی تولیدشده برای نقاط واقع در هر سطر از تصاویر پوشش‌دار، در امتداد یک خط خواهند بود. در این مرحله، با محاسبه مراکز ثقل، موقعیت‌های زمینی برآوردشده برای نقاط واقع در هر سطر از تصاویر پوشش‌دار (M) نزدیک‌ترین سطرهای زمینی از تصاویر پوشش‌دار براساس فاصله بین مختصات مراکز ثقل شناسایی می‌شوند. در ادامه، با برآورد زوایای بین سطرهای نزدیک به هم از تصاویر پوشش‌دار (β) ، این سطرها با یک دوران به مرکزیت مرکز ثقل هر سطر، موازی می‌شوند (شکل ۷). محور دوران یادشده عمود بر صفحه برآوردشده در مرحله (الف) است و هر سطر به اندازه نیمی از زاویه (β) در دو جهت مخالف دوران می‌یابد.



شکل ۷. موازی کردن سطرهای تصاویر پوشش‌دار در فضای شیء

هدف از انجام دادن گام (پ) موازی کردن سطرهای زمینی اخذ شده به‌وسیله تصاویر پوشش‌دار، در بازه زمانی دریافت تصویر است. طی این مرحله، شبکه اولیه

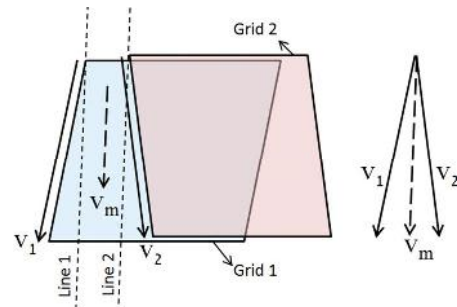


شکل ۱۰. ساختار شبکه تولیدشده در گام (پ) و شبکه تصحیح شده، پس از اعمال تصحیحات گام (ت). (الف) شبکه تولیدشده در گام (پ). (ب) شبکه تصحیح شده پس از اعمال تصحیحات گام (ت)

انتظار می رود که پارامترهای توجیه خارجی به دست آمده در گام (ث): (۱) بیان کننده شرایط موقعیتی و وضعیتی سنجنده هایی فرضی، برای دریافت تصاویر نرمال از منطقه زیر پوشش تصاویر پوشش دار باشند و (۲) مقادیر این پارامترها به نسبت پارامترهای توجیه خارجی واقعی هر تصویر، انحراف بالایی نداشته باشند.

ج) ترازوی محورهای اصلی سیستم اپتیکی در تصویربرداری پوشش دار یکی از شرایط لازم در روند تولید تصاویر نرمال به شمار می آید. از آنجاکه در تصویربرداری Cross Track، سنجنده تحت زاویه رول (ω) حول محور اول سیستم SRF دوران می کند، تصاویر گرفته شده ماهیت متقارب خواهند داشت. در روند تصحیح پارامترهای توجیه خارجی، برای موازی کردن سیستم اپتیکی سنجنده های فرضی، پارامتر دورانی مرتبط با جهت گیری سنجنده در ساختار ماتریس $[R_{Pointing}]$ تصحیح خواهد شد. مطابق شکل ۱۱، با در نظر گرفتن پارامترهای توجیه خارجی محاسبه شده در گام (ث)، تغییر در زاویه رول (ω) از پارامترهای

یادشده در رابطه (۱) را تأمین کنند، دو سنجنده مسیره های موازی در جهت حرکت ماهواره را جاروب خواهند کرد. به بیان دیگر، در این حالت شبکه های نقاط زمینی تولیدشده در گام (پ) در راستای حرکت سنجنده موازی می شوند. برای این کار، مطابق شکل (۹) مؤلفه های بردار هادی مربوط به خطوط جاروب شده هر سنجنده در مسیر حرکت (V_1 و V_2) به کمک مختصات نقاط در شبکه های زمینی تعیین می شود. سپس با در نظر گرفتن میانگین بردارهای هادی (V_m) و مختصات گوشه ای از شبکه زمینی هر تصویر، معادلات خطوط مرجع (Line 1, 2) برآورد می شود.



شکل ۹. روند شماتیک موازی سازی شبکه زمینی در جهت حرکت سنجنده

بدیهی است که با تعیین مختصات حاصل از تقاطع خطوط مربوط به هر سطر از شبکه زمینی با خط مرجع، امکان برآورد تصحیح لازم میسر خواهد بود. در این مرحله، شبکه تصحیح شده در گام (پ) (شکل ۱۰-الف) پس از فرایند یادشده در این گام، به شکل ۱۰-ب تبدیل خواهد شد.

ث) به منظور اعمال نخستین سطح تصحیح پارامترهای توجیه خارجی، برای ترفیع فضایی، از این موارد استفاده می شود: (۱) مختصات نقاط در شبکه های زمینی تصحیح شده و (۲) مختصات دست نخورده تصویر متناظر با هر نقطه زمینی. در این مرحله، نیمی از نقاط هر شبکه به منزله نقاط کنترل و نیمی دیگر به منزله نقاط چک در فرایند ترفیع فضایی به کار می روند.

تصویر دیگر، براساس فاصله مکانی بین مرکز ثقل سطرهای شبکه زمینی شناسایی می شود و سپس، (۲) مطابق شکل ۱۱-ب، زوایای $O_{(t)}$ به کمک بردار موقعیت ماهواره‌ها در زمان دریافت سطرهای نزدیک به هم تعیین می شود. زوایای $O_{(t)}$ نیز همانند $\theta_{(t)}$ برای هر تصویر و به ازای همه سطرهای استفاده شده در تولید شبکه زمینی محاسبه می شود. مقدار عددی تصحیح لازم برای زاویه نشانده روی مربوط به هر سطر از شبکه زمینی $(\alpha_{(t)})$ مطابق رابطه (۹) به دست می آید.

$$\alpha_{(t)} = \theta_{(t)} + \frac{\pi}{2} - O_{(t)} \quad \text{رابطه (۹)}$$

به سبب ماهیت وابسته به زمان زوایای $\alpha_{(t)}$ ، با برازش یک مدل چندجمله‌ای زمانی (رابطه ۱۰) به زوایای محاسبه شده $\alpha_{(t)}$ ، مقادیر تصحیح زوایای نشانده روی به شکل وابسته به زمان تعیین خواهد شد. شایان ذکر است که در روند برآورد ضرایب چندجمله‌ای، علامت زوایای $\alpha_{(t)}$ باید مخالف با علامت زاویه نشانده روی سنجنده‌های فرضی در نظر گرفته شود.

$$\alpha_{(t)} = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

با محاسبه ضرایب چندجمله‌ای $(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$ ، این ضرایب مستقیماً در ساختار ماتریس دوران حول محور اول $(R_1(\omega))$ از ماتریس $[R_{Attitude}]$ جایگزین می شوند. باید گفت ترتیب ضرب ماتریس‌های دوران در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ مطابق رابطه (۱۱) است.

$$[R_{Attitude}] = R_3(\kappa) \times R_2(\varphi) \times R_1(\omega) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در رابطه (۱۱)، R_1, R_2 و R_3 به ترتیب، ماتریس‌های دوران سه بعدی حول سه محور اول (x) ، دوم (y) و سوم (z) هستند. مطابق رابطه (۱۱)، در ساختار $[R_{Attitude}]$ ، ماتریس دوران $R_1(\omega)$ نزدیک‌ترین دوران به سیستم SRF پس از اعمال ماتریس دوران $[R_{Pointing}]$ است.

۳-۲-۳- برآورد تصحیح‌ها در فضای تصویر

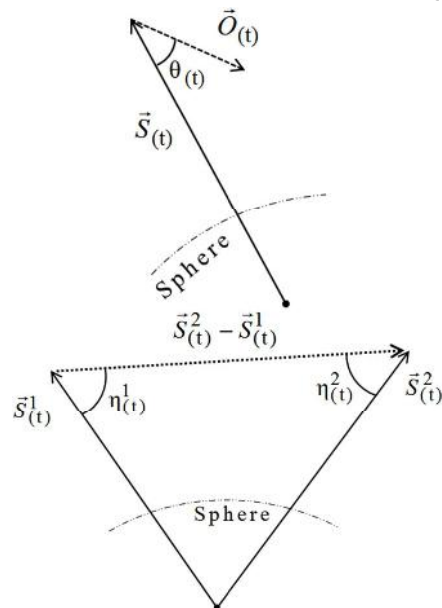
دو سنجنده فرضی با پارامترهای توجیه خارجی جدید، به خودی خود تصاویری بدون پارالاکس قائم خواهند

توجیه خارجی، به دلیل دوران بردارهای \vec{I} در صفحات اپی پلار، در تأمین شرط رابطه (۱) برای سنجنده‌های فرضی خللی ایجاد نخواهد کرد.

در این مرحله طی دو سطح، مقادیر تصحیح لازم برای زوایای نشانده روی سنجنده‌های فرضی تعیین خواهد شد. در سطح نخست، مطابق شکل ۱۱-الف، زوایای حاده بین بردار محور اصلی سیستم اپتیکی $(\vec{O}_{(t)})$ و بردار موقعیت مرکز تصویر $(\vec{S}_{(t)})$ تعیین می شوند $(\theta_{(t)})$. بردارهای $\vec{S}_{(t)}$ از طریق رابطه (۷) و بردارهای $\vec{O}_{(t)}$ از طریق رابطه (۸) محاسبه خواهند شد.

$$\vec{O}_{(t)} = [R_{Orbital}] \times [R_{Attitude}] \times [R_{Pointing}] \times [0, 0, -c]^T \quad \text{رابطه (۸)}$$

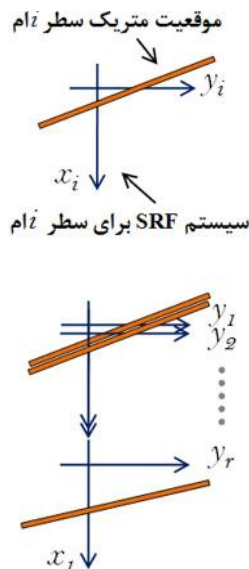
زوایای $\theta_{(t)}$ برای هر تصویر و به ازای همه سطرهای استفاده شده در تولید شبکه زمینی محاسبه می شوند.



شکل ۱۱. نمای شماتیک از چگونگی تعیین زوایای $\theta_{(t)}$ و $O_{(t)}$.
(الف) تعیین زاویه $\theta_{(t)}$ و (ب) تعیین زاویه $O_{(t)}$

برای برآورد سطح دوم از تصحیحات لازم برای زوایای نشانده روی: (۱) برای هریک از سطرهای شبکه زمینی، نزدیک‌ترین سطر از شبکه زمینی مربوط به

متوالی مختصات‌های متریک متناظر با هر سطر از تصاویر خام مطابق شکل ۱۲-ب است.



شکل ۱۲. نمای شماتیک از موقعیت متریک هر سطر از تصویر و ایده چیدمان متوالی سطرها در فرایند بازنمونه برداری.

(الف) موقعیت متریک ثابت نقاط یک سطر از تصویر خام در SRF و (ب) ایده چیدمان متوالی مختصات متریک متناظر سطرهای تصویر خام در سیستم SRF

مطابق شکل ۱۲-ب، با در نظر گرفتن سیستم SRF مربوط به نخستین سطر از تصویر خام به منزله سیستم مختصات مرجع در فضای متریک، برای ایجاد مدل ارتباط سراسری بین فضای متریک و تصویر رقومی ساختار رابطه (۱۲) به شکل رابطه (۱۳) تصحیح می‌شود.

$$x'' = PS \times (r - 1) + \Delta x \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$y'' = y' = y + \Delta y$$

در رابطه (۱۳)، PS اندازه پیکسل در فضای تصویر، r شماره سطر تصویر رقومی و (x'', y'') مختصات متریک نقاط تصویری پس از چیدمان متوالی مطابق شکل ۱۲-ب خواهد بود. انتظار می‌رود که در چیدمان جدید تصویر در فضای متریک، موقعیت‌های موازی با محور y در سیستم متریک مرجع خطوط اپی پلار را تولید کنند.

کرد. از این رو، برای دریافت تصاویری مشابه تصاویر خام اولیه، لازم است آرایش آشکارسازها در فضای تصویر به صورت مناسب تغییر داده شود. بدیهی است که در چنین شرایطی، به دلیل پویایی اختلافات میان پارامترهای توجیه خارجی واقعی هر تصویر و پارامترهای سنجنده‌های فرضی، مختصات متریک مربوط به محل ثبت نقاط تصویری نیز ماهیتی پویا داشته باشند. برای حل این موضوع، از پارامترهای اضافی در مدل OPM جهت یافتن مدل تصحیح کننده در فضای تصویر $(\Delta y$ و $\Delta x)$ استفاده شد. این روش با لحاظ کردن پویایی یادشده، اقدام به تعیین مختصات متریک ثبت هر پیکسل از تصاویر پوشش دار، با در نظر گرفتن پارامترهای توجیه خارجی جدید می‌کند. در این بخش، با در نظر گرفتن پارامترهای توجیه خارجی جدید برای هر تصویر و نقاط کنترلی استفاده شده در بخش (۳-۲-۱)، ساختار و ضرایب Δy و Δx برآورد می‌شوند.

۳-۲-۴- بازنمونه برداری اپی پلار

مدل ریاضی پایه در روند بازنمونه برداری اپی پلار پارامترهای اضافی $(\Delta y$ و $\Delta x)$ به دست آمده در بخش (۳-۲-۳) خواهند بود. بدیهی است که پس از برآورد ضرایب Δy و Δx ، موقعیت متریک مربوط به ثبت هر پیکسل از هر سطر از تصاویر خام (x', y') را می‌شود به کمک رابطه (۱۲) برآورد کرد.

$$x' = 0 + \Delta x \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$y' = y + \Delta y$$

از آنجاکه هر سطر از تصاویر پوشش بروم از سیستم مختصات تصویری ویژه‌ای تبعیت می‌کند، رابطه (۱۲) صرفاً برای برقراری ارتباط بین مختصات متریک و رقومی هر سطر از تصویر معتبر خواهد بود. شکل ۱۲-الف نمایی شماتیک از موقعیت متریک سطر i ام از تصویر خام را در سیستم SRF نشان می‌دهد. ایده پیشنهادی در این مقاله، به منظور ایجاد مدلی معتبر برای سراسر تصویر جهت ارتباط بین سیستم متریک و رقومی، چیدمان

ضرایب تصحیح در فضای تصحیح در گام سوم، در این مرحله از ۱۸ نقطه کنترل زمینی استفاده شد که به این ترتیب، دقت ترفیع تصاویر چپ و راست، به ترتیب، ۰/۸۱ و ۱/۱۰ پیکسل در فضای تصویر حاصل شد. دقت تقاطع فضایی دو تصویر در سطح نقاط چک نیز در جدول ۲ گزارش شده است.

در گام بعد، با موازی‌سازی تصویر سطرها و ستون‌های دو تصویر روی صفحه‌ای در ارتفاع میانگین منطقه، تصحیحات لازم در فضای تصویر برآورد شد. دقت این تصحیح‌ها برای تصاویر چپ و راست، به ترتیب، ۰/۱۲ و ۰/۱۸ پیکسل به دست آمد. ساختار چندجمله‌ای مورد استفاده برای دو تصویر چپ و راست در جدول ۳ گزارش شده است. در این جدول، حضور و نبود هر ترم در ساختار چندجمله‌ای مورد استفاده برای مؤلفه‌های x و y تصاویر چپ و راست، به صورت جداگانه و به ترتیب، با مقادیر یک و صفر مشخص شده است.

در تصاویر پوشش‌دار Cross Track که پوشش مشترک با دوران سنجنده حول محور اول تأمین می‌شود، پارالاکس y متناسب با تغییرات ارتفاع صحنه خواهد بود (Poli, 2005). بدیهی است که در این حالت، میانگین پارالاکس x نقاط متناظر در تصاویر نرمال‌شده شیفت سیستماتیک دو صحنه به یکدیگر را مشخص می‌کند و انحراف معیار پارالاکس x این نقاط نیز، معیاری آماری از دقت فرایند بازنمونه‌برداری اپی‌پلار خواهد بود. بنابراین، به منظور ارزیابی دقت مدل پیشنهادی در بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم، پس از پیاده‌سازی مدل و تولید تصاویر نرمال (شکل ۱۴)، پارالاکس x باقی‌مانده در سیستم مختصات تصویر رقومی پس از حذف شیفت سیستماتیک دو صحنه، در ۱۰۰ جفت نقطه متناظر با توزیع مناسب در

رابطه (۱۳) مدل ارتباطی از سیستم مختصات تصویر رقومی به سیستم مختصات مرجع در فضای متریک است. از آنجاکه در روند بازنمونه‌برداری نیاز به مدل معکوس ارتباطی از سیستم مختصات مرجع در فضای متریک به سیستم مختصات تصویر رقومی است، به سهولت می‌شود مدل معکوس این ارتباط را، با تولید شبکه‌های مجازی در دو فضای تصویر رقومی و متریک به کمک رابطه (۱۳)، و برآزش مدل‌های ساده‌ای همچون چندجمله‌ای‌های دوبعدی، برآورد کرد.

۴- نتایج

در گام نخست، با انتخاب ترکیب‌های متنوعی از نقاط کنترل، پارامترهای توجیه خارجی دو تصویر برآورد شد و دقت تقاطع فضایی تصاویر در سطح نقاط چک مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج ارزیابی دقت تقاطع فضایی تصاویر به‌ازای تعداد گوناگون نقاط کنترل

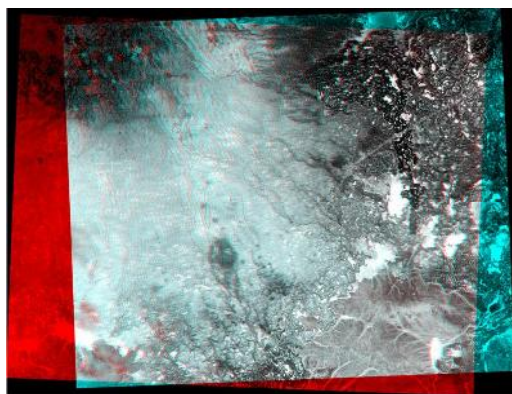
# GCPs	# CHKs	σ_{pl} (m)	σ_H (m)
۴	۳۱	۱۱/۱۳	۵/۴۵
۵	۳۰	۱۰/۸۴	۵/۷۴
۱۳	۲۲	۱۱/۰۰	۶/۲۱
۱۸	۱۷	۹/۵۷	۶/۴۶
۲۰	۱۵	۱۰/۹۶	۵/۸۷

آن‌طور که از نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) برمی‌آید، مدل ریاضی مورد استفاده به‌ازای تعداد کم نقاط کنترلی نیز توان تأمین دقت‌های هندسی مطلوبی را دارد. بنابراین، نقاط کنترلی محدودی برای ترفیع فضایی تصاویر کافی به نظر می‌رسد اما با توجه به لزوم برآورد

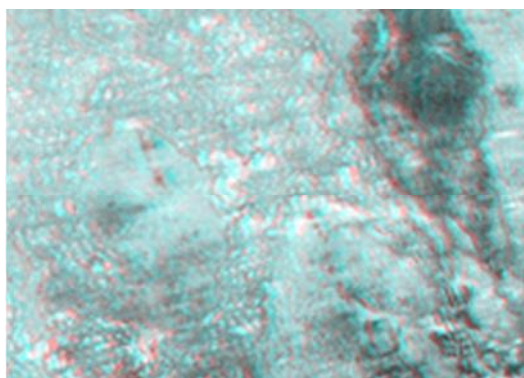
جدول ۳. ساختار چندجمله‌ای بهینه حاصل برای تصاویر چپ و راست

Image	1	y	y ²	y ³	y ⁴	X	x.y	x.y ²	x.y ³	x ²	x ² .y	x ² .y ²	x ³	x ³ .y	x ⁴	
Left	x	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0
	y	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Right	x	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
	y	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0

تصویر آنالگلیف تولیدشده با استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۱۵، و بخشی از آن با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۱۶ به نمایش درآمده است.

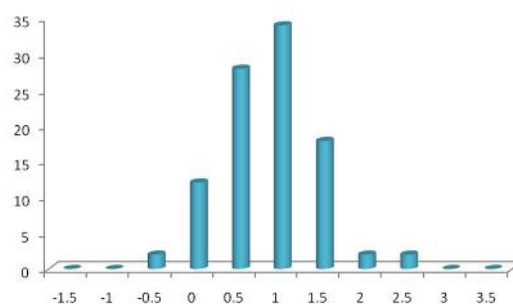


شکل ۱۵. تصویر آنالگلیف تولیدشده به روش پیشنهادی

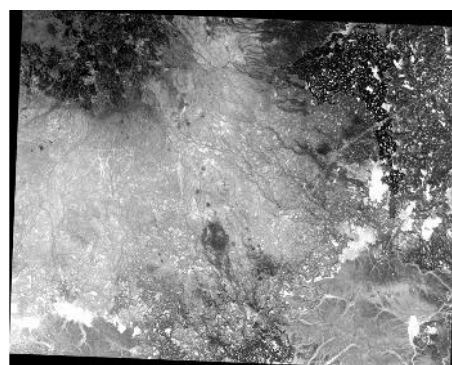
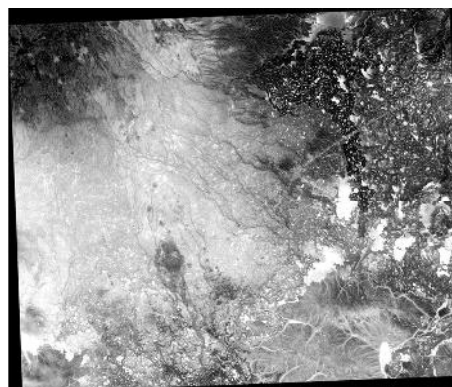


شکل ۱۶. بخشی از تصویر آنالگلیف تولیدشده به روش پیشنهادی با بزرگنمایی بیشتر

سطح تصاویر نرمال، اندازه گیری شد. بر این اساس، دقت روش پیشنهادی ۰/۷۳ پیکسل به دست آمد. هیستوگرام مقادیر مربوط به پارالاکس x باقی مانده در سیستم مختصات تصویر رقومی در شکل ۱۳ به تصویر کشیده شده است که شکل هیستوگرام اتفاقی بودن این خطاهای باقی مانده را بیان می کند.



شکل ۱۳. هیستوگرام مقادیر مربوط به پارالاکس x باقی مانده در سیستم مختصات تصویر رقومی



شکل ۱۴. نمایش شمانیک تصاویر نرمال حاصل از مدل پیشنهادی. (الف) تصویر نرمال شده راست، و (ب) تصویر نرمال شده چپ

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، روشی جدید برای بازنمونه برداری اپی پلار تصاویر خطی پوش بروم براساس مدل فیزیکی پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی، با مبنای قرار دادن مدل پارامترهای مداری ولدان زوج (۱۹۹۷)، پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM به گونه ای تعیین می شوند که افزون بر نزدیکی به پارامترهای واقعی تصاویر پوشش دار، شرایط هندسی لازم برای گرفتن تصاویر اپی پلار را داشته باشند. براساس نتایج، به ازای استفاده از ۱۸ نقطه کنترل زمینی در مرحله ترفیع فضایی،

با توجه به استفاده از مدل پارامترهای مداری ولدان زوج (۱۹۹۷)، لازم است تصاویر پوشش‌دار مورد استفاده از نظر هندسی بدون هرگونه تصحیح باشند. با توجه به اینکه برخی از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا، نظیر IKONOS، به صورت خام عرضه نمی‌شوند، این ویژگی یکی از نقاط ضعف مدل پیشنهادی به شمار می‌آید. توسعه مدل برای استفاده از تصاویر تصحیح شده ممکن است همچون موضوعی مطالعاتی مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- Alrousan, N., Cheng, P., Petrie, G., Toutin, T. & Zoej, M.J.V., 1997, **Automated DEM Extraction and Orthoimage Generation from SPOT Level 1B Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(8): 965-974.
- Bang, K.I., Jeong, J.S., Kim, K. & Cho, W., 2003, **Automatic DEM Generation Using IKONOS Stereo Imagery**, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, Toulouse, France, 21-25 July, 7: 4289-4291.
- Cho, W., Schenk, T. & Madani, M., 1992, **Resampling Digital Imagery to Epipolar Geometry**, IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(B3): 404-408.
- Cochran, S.D., 1995, **Adaptive Vergence for the Stereo Matching of Oblique Imagery**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50(4): 21-28.
- Fraser, C.S. & Yamakawa, T., 2004, **Insights into the Affine Model for High-Resolution Satellite Sensor Orientation**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58 (5-6): 275-288.
- Gupta, R. & Hartley, R.I., 1997, **Linear Pushbroom Cameras**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19(9): 963-975.
- دقت مستطحاتی و ارتفاعی حاصل از تقاطع فضایی تصاویر پوشش‌دار SPOT-1، به ترتیب، ۹/۵۷ و ۶/۴۶ متر حاصل به دست آمد. میانگین پارالاکس قائم باقی‌مانده در ۱۰۰ جفت نقطه متناظر در سطح تصاویر نرمال تولیدشده نیز ۰/۷۵ پیکسل به دست آمد که مؤید کارایی مدل پیشنهادی در تولید تصاویر نرمال است.
- تاکنون هیچ روشی برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم براساس مدل‌های فیزیکی تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای ارائه نشده است بنابراین، روش پیشنهادی به منزله سنگ بنای تحقیقات آتی در این زمینه اهمیت بسیار زیادی خواهد داشت.
- در قیاس با روش‌های مبتنی بر استفاده از مدل‌های غیرفیزیکی، همچون مدل افاین سه‌بعدی و مدل توابع کسری، یکی از مزایای این روش برآزش سراسری بهتر مدل و امکان استفاده از داده‌های ناوبری ثبت‌شده به وسیله سنجنده، به علت استفاده از مدل پارامترهای مداری ولدان زوج (۱۹۹۷)، است. افزون بر این، به دلیل تفسیرپذیری فیزیکی پارامترهای این مدل، می‌شود زوایای دید سنجنده را برحسب نیاز تصحیح کرد که این امر موجب تسهیل در برجسته‌بینی، اندازه‌گیری و تفسیر مدل سه‌بعدی حاصل می‌شود. از دیگر سو، با توجه به معلوم بودن ارتباط ریاضی تصاویر نرمال تولیدشده و تصاویر خام، می‌شود پس از یافتن نقاط متناظر در تصاویر نرمال، مختصات این نقاط را به فضای تصاویر خام بازگرداند و سپس، طی فرایند تقاطع فضایی، ارتفاع دقیق آنها را در فضای شیء محاسبه کرد و به تولید مدل رقومی منطقه پرداخت.
- مهم‌ترین دستاورد این پژوهش روند پیشنهادی برای تولید تصاویر نرمال است که با استفاده از دیگر مدل‌های فیزیکی و غیرفیزیکی مورد استفاده در حوزه تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای امکان پیاده‌سازی دارد. بر این اساس، یکی از پیشنهادها مطرح‌شده در حوزه تحقیقات آتی، در این زمینه، چه بسا پیاده‌سازی و ارزیابی دقت روش پیشنهادی با استفاده از دیگر مدل‌های مورد استفاده در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای باشد.

- Habib, A.F., Kim, E.M., Morgan, M. & Couloigner, I., 2004, **DEM Generation from High- Resolution Satellite Imagery Using Parallel Projection Model**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35, (B1), 393–398.
- Habib, A.F., Morgan, M., Jeong, S. & Kim, K.O., 2005a, **Analysis of Epipolar Geometry in Linear Array Scanner Scenes**, The Photogrammetric Record, 20(109): 27–47.
- Habib, A.F., Morgan, M., Jeong, S. & Kim, K., 2005b, **Epipolar Geometry of Line Cameras Moving with Constant Velocity and Attitude**, Electronics and Telecommunications Research Institute Journal, 27 (2): 172–180.
- Hashimoto, T., 2000, **DEM Generation from Stereo AVNIR Images**, Advances in Space Research, 25 (5): 931–936.
- Jaehong, O.H., 2011, **Novel Approach to Epipolar Resampling of HRSI and Satellite Stereo Imagery-Based Georeferencing of Aerial Images**, Ph.D. Dissertation, Ohio State University.
- Jaehong, O.H., Shin, S.W. & Kim, K., 2006, **Direct Epipolar Image Generation from IKONOS Stereo Imagery-Based on RPC and Parallel Projection Model**, Korean Journal of Remote Sensing, 22 (5): 451–456.
- Kim, T., 2000, **A Study on the Epipolarity of Linear Pushbroom Images**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66 (8): 961–966.
- Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H. & Kruck, E., 1987, **Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 53(9): 1223-1230.
- Kornus, W., Alamús, R., Ruiz, A. & Talaya, J., 2006, **DEM Generation from SPOT-5 3-Fold along Track Stereoscopic Imagery Using Autocalibration**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60 (3): 147–159.
- Kraus, K., 1993, **Photogrammetry**, Dümmler Verlag, Bonn., Vol. 1, p. 397.
- Lee, H.Y., Kim, T., Park, W. & Lee, H.K., 2003, **Extraction of Digital Elevation Models from Satellite Stereo Images through Stereo Matching Based on Epipolarity and Scene Geometry**, Image and Vision Computing, 21 (9): 789–796.
- Lee, H.Y. & Park, W., 2002, **A New Epipolarity Model Based on the Simplified Pushbroom Sensor Model**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34 (4): 631–636.
- McGlone, C., 1996, **Sensor Modeling in Image Registration, Digital Photogrammetry: An Addendum** (C. W. Greve, editor), American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 115-123.
- Morgan, M., 2004, **Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes**, Ph.D. Dissertation, University of Calgary, Canada, 187p.
- Morgan, M., Kim, K., Jeong, S. & Habib, A., 2004a, **Indirect Epipolar Resampling of Scenes Using Parallel Projection Modeling of Linear Array Scanners**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B3): 508–513.
- Morgan, M., Kim, K., Jeong, S. & Habib, A., 2004b, **Epipolar Geometry of Linear Array Scanners Moving with Constant Velocity and Constant Attitude**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35, (B3), 52–57.
- Morgan, M., Kim, K., Jeong, S. & Habib, A., 2006, **Epipolar Resampling of Spaceborne Linear Array Scanner Scenes Using Parallel Projection**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72 (11): 1255–1263.
- Okamoto, A., Akamatu, S. & Hasegawa, H., 1992, **Orientation Theory for Satellite CCD Line-Scanner Imageries of Hilly Terrains**, IAPRS International Archives of Photogrammetry and

- Remote Sensing, 29(B2): 217-222.
- Okamoto, A., Ono, T. & Akamatsu, S. , 1999, **Geometric Characteristics of Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery**, Proceedings of the ASPRS 1999 Annual Conference, 17-21 May, Portland, Oregon (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland), unpaginated CD-ROM.
- Ono, T., Honmachi, Y. & Ku, S., 1999, **Epipolar Resampling of High Resolution Satellite Imagery**, Joint Workshop of ISPRS, WG I/1, I/3 and IV/4 Sensors and Mapping from Space.
- Poli, D., 2005, **Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors**, Ph.D. Dissertation, University College London, United Kingdom.
- Safdarinezhad, A.R., 2012, **Using Additional Parameters in Orbital Parameters Model for Improvement of Precision of Geometric Correction of Satellite Images**, M.sc. thesis, p. 155.
- Schenk, T., 1990, **Computation of Epipolar Geometry**, Technical Notes in Photogrammetry, No. 5, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University.
- Seeber, G., 2003, **Satellite Geodesy**, Walter de Gruyter, Berlin, p. 589, ISBN 3-11-017549-5.
- Su, J.Y., 2002, **Study of SPOT Epipolar Image Polynomial Fitting Based on Matching Constraint**, Remote Sensing Information, 10 (4): 11-14.
- Torr, P.H.S., 2002, **Bayesian Model Estimation and Selection for Epipolar Geometry and Generic Manifold Fitting**, International Journal of Computer Vision, 50 (1): 35-61.
- Toutin, T., 2006, **Comparison of 3D Physical and Empirical Models for Generating DSMs from Stereo HR Images**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(5): 597-604.
- Valadan Zoej, M.J., 1997, **Photogrammetric Evaluation of Space Linear Array Imagery for Medium Scale Topographic Mapping**, Ph.D. Thesis, University of Glasgow, 303p.
- Wang, M., Hub, F. & Li, J., 2011, **Epipolar Resampling of Linear Pushbroom Satellite Imagery by a New Epipolarity Model**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66: 347-355.
- Wolf, P.R. & Dewitt, B.A., 2000, **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**, 3/e. McGraw-Hill, Toronto, 608p.
- Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O. & Luong, Q., 1995, **A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry**, Artificial Intelligence Journal, 78: 87-119.
- Zhang, Z.Y., 1998, **Determining Epipolar Geometry and Its Uncertainty: A Review**, International Journal of Computer Vision, 27 (2): 161-195.
- Zhao, D., Yuan, X.X. & Liu, X., 2008, **Epipolar Line Generation from IKONOS Imagery Based on Rational Function Model**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (B4): 1293-1297.