

اصلاح عدم توازی در سیستم‌های مختصات شیئی و بردارهای نرمال سطح در روش‌های فتومتری به کمک تخمین کمترین مربعات

علیرضا صفدری نژاد، سید عبدالله کیانژاد تجنکی و عطیه گنجعلی

چکیده

فتومتری یک روش شناخته شده به منظور بازسازی سه‌بعدی اشیاء به کمک تصاویر اخذ شده در شرایط نورپردازی متفاوت است. در این روش، با معلوم بودن راستای منابع نوری، بردارهای نرمال سطح بصورت مشبک و متراکم از طریق درجات روشنی ثبت شده در تصاویر بازیابی می‌گردند. با تبدیل هر بردار نرمال به اختلاف ارتفاع در دو راستای متعامد، تخمین همزمان مولفه‌های ارتفاعی برای شبکه متراکم از طریق حل یک دستگاه معادلات خطی، فرامعین و ناسازگار صورت می‌پذیرد. هم‌راستا نبودن سیستم‌مختصات بازیابی بردارهای نرمال سطح و شبکه متراکم بازسازی سه‌بعدی موجب بروز خطای سیستماتیک در روند تخمین نقشه ارتفاعی مشبک می‌گردد. استفاده از روش‌های کالیبراسیون آزاد در تعیین راستای منابع نوری یکی از عوامل بروز عدم توازی در سیستم‌های مختصات شیئی و بردارهای نرمال سطح است. در این مقاله، روندی متوالی و تکراری به منظور برآورد و اعمال زاویه چرخش مناسب به بردارهای نرمال سطح پیشنهاد شده است. در هر تکرار از این روش، سهمی از چرخش لازم به منظور ایجاد توازی دو سیستم مختصات شیئی و بردارهای نرمال سطح از طریق برازش یک تبدیل هندسی به باقیمانده‌های برآورد شده در روند بازسازی سه‌بعدی شناسایی می‌گردد. نتایج بکارگیری روش پیشنهادی در آزمون‌های مختلف حاکی از بهبود محسوس دقت در بازسازی سه‌بعدی بوده است.

کلید واژه‌ها

فتومتری، بازسازی سه‌بعدی، بردار نرمال سطح، بردار باقیمانده‌ها، تخمین کمترین مربعات

۱- مقدمه

استفاده از تصویربرداری با هدف بازیابی اطلاعات سه‌بعدی از اشیاء و پدیده‌ها یک راهکار شناخته شده در فنون نقشه‌برداری محسوب می‌شود. تاکنون، دو رویکرد اصلی به منظور بازیابی سه-

مقاله در مردادماه ۱۴۰۲ دریافت شد؛ در آذرماه بازنگری و سپس پذیرفته گردید.

گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش، تفرش

{afdarinezhad , kianejad , geo97.ganjali}@tafreshu.ac.ir

نویسنده مسئول : علیرضا صفدری نژاد

بعدی سطح شامل روش‌های فتوگرامتری (یا روش‌های SfM^۱) و روش‌های فتومتری (یا روش‌های SfS^۲) توسعه یافته‌اند [۱]. اساس کار در روش‌های فتوگرامتری اخذ تصاویر توأم با اختلاف منظر و بازیابی عمق بر اساس ثبت پارالاکس در این تصاویر است [۱] تا [۳]. در روش‌های فتومتری نیز تمایز در شدت نور بازتاب شده از سطوح سه‌بعدی به دلیل تفاوت در زاویه بین بردار نرمال سطح و راستای تابش نور، مبنای بازیابی بردار نرمال سطح قرار دارد [۱]. در این روش‌ها، تصاویری از یک صحنه سه‌بعدی با دوربینی از منظر ثابت اخذ شده که تفاوت آنها در موقعیت نورپردازی توسط منابع نوری با هندسه تابشی معلوم است [۴]. بازیابی متراکم بردارهای نرمال به ازای تمامی پیکسل‌های تصویر، نتیجه بکارگیری این تکنیک‌ها خواهد بود. وجود خاصیت بازتابندگی لامبرتی برای

^۱ Structure from Motion

^۲ Structure from Shading

صفحات که از بازتابندگی لامبرتی برخوردارند، از طریق روش‌های فتوگرامتری تعیین می‌گردند. این صفحات کارکردهای دیگری نیز همچون تعیین روند کاهش شدت منابع نور نقطه‌ای با فاصله‌گرفتن از چشمه را برخوردارند [۹]، [۱۲] تا [۱۴]. در دسترس بودن حداقل سه سطح مستوی با جهت‌گیری معلوم پیش شرط بازیابی راستای منابع نوری در این روش کالیبراسیون هندسی است [۶] و [۱۲]. گوی (های) صیقلی ابزار دیگری بمنظور تعیین راستا یا موقعیت منابع نوری در سامانه‌های فتومتری محسوب می‌شوند [۸]. با شناسایی موقعیت لکه‌های نورانی ایجاد شده از منابع نوری در سطح گوی، امکان بازیابی راستای تابش نور محقق می‌گردد. معلوم بودن شعاع گوی امکان تعیین موقعیت و شناسایی بردار نرمال سطح گوی در محل لکه‌های نوری را فراهم می‌آورد. بکارگیری همزمان چند گوی نیز امکان ایجاد هندسه متقاطع را جهت تعیین موقعیت منابع نور نقطه‌ای تامین می‌سازند [۸] تا [۱۰]، [۱۳]. راهکارهای دیگری نیز بر پایه اندازه‌گیری موقعیت دوربین و منابع نوری به کمک تجهیزات نقشه‌برداری برای کالیبراسیون سامانه‌های فتومتری استفاده شده است. در این روش‌ها نیز، بکارگیری و برآورد تبدیلات هندسی مناسب به منظور انتقال و دوران مشاهدات نقشه‌برداری به مرجع سیستم مختصات بازسازی سه‌بعدی نیازمند استفاده تصاویر اخذ شده از سامانه، نقاط کنترلی و محاسبات فتوگرامتریک خواهد بود [۱۵].

در مقابل روش‌های هندسی، رویکردهای جایگزین مختلفی توسعه یافته است. خود-کالیبراسیون بر پایه مشاهدات شدت روشنی از سطح شی، در زمره روش‌های سنتی و پایه در این زمینه تلقی می‌شود [۶]. اصلاح رادیومتریکی تصاویر (در صورت لزوم) با هدف تصحیح اثرات غیرخطی و استفاده از روش‌های مبتنی بر جبرخطی، ساختار روش‌های سنتی در این زمینه را شکل می‌دهند [۶]، [۱۱] و [۱۶]. با اینحال رویکردهای نوظهور برپایه استفاده از یادگیری عمیق شبکه‌های عصبی با معماری‌های مختلف نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۷] تا [۲۰]. علیرغم موفقیت‌های چشم‌گیر اجرایی در استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، عدم شفاف بودن سازوکار یک شبکه عصبی از منظر بازتولید روش شناخت و حل مساله، محدودیت‌های مربوط به طراحی یک شبکه تعمیم‌پذیر، وابستگی نتایج به کیفیت و حجم نمونه‌های آموزشی، زمان و هزینه‌های مرتبط با آموزش پارامترهای بسیار زیاد در شبکه‌های عصبی عمیق و افزونگی پارامترهای مجهول از محدودیت‌های بکارگیری سازوکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی است [۲۱].

رویکردهای نوین دیگر مبتنی بر فناوری^۲ NeRF نیز در زمره روش‌های بازیابی سه‌بعدی قرار داشته که بر پایه پردازش معکوس تصاویر اخذ شده در سامانه‌های فتومتری بنا شده است. هرچند که سازوکار روش‌های مبتنی بر NeRF بر استفاده از شبکه‌های

سطح و عدم امکان بازیابی بردار نرمال سطح برای بخش‌های واقع شده در سایه، محدودیت‌های اجرای روش‌های فتومتری قلمداد می‌شوند [۵] و [۶]. با اینحال تراکم بالا در بردارهای نرمال بازیابی شده و همچنین عدم وابستگی به روش‌های تناظریابی از ویژگی‌های جذاب روش‌های فتومتری هستند [۳] و [۵].

پس از برآورد میدان برداری ایجاد شده از بردارهای نرمال سطح، بطور معمول هر بردار مبنای تشکیل دو معادله در روند بازسازی سه‌بعدی سطح خواهد بود [۷]. در این رویکرد، سیستم مختصات شی موازی با سیستم مختصات تصویری در نظر گرفته شده و مولفه‌های بردار نرمال سطح برای هر پیکسل به اختلاف ارتفاع در دو راستای موازی با محورهای سیستم مختصات تصویری تفکیک می‌گردند. اختلاف ارتفاع در هر راستا به مثابه یک مشاهده مربوط به تفاوت مولفه ارتفاعی پیکسل‌های مجاور و هم‌راستا تلقی شده و تجمیع تمامی معادلات ایجاد شده در قالب یک دستگاه معادلات فرامین، امکان برآورد همزمان تمامی مولفه‌های ارتفاعی متناظر با بردارهای نرمال سطح را فراهم می‌آورد [۷] و [۸].

در روش‌های فتومتری معلوم بودن راستای تابش حداقل سه منبع نور، پیش شرط بازیابی بردارهای نرمال سطح است [۱] و [۶]. چشمه‌های نور نقطه‌ای با واگرایی شعاعی و پرتوهای موازی تولید شده توسط چشمه‌های نور قرارگرفته در بینهایت، دو شکل متمایز از منابع نور بکارگرفته شده در رویکردهای فتومتری محسوب می‌شوند [۶] تا [۹]. در زمان استفاده از چشمه‌های نوری نقطه‌ای، واگرایی پرتوهای نوری منجر به وابستگی راستای تابش نور به موقعیت سه‌بعدی گشته و در این شرایط تدقیق بازسازی سه‌بعدی سطح در روندی تکراری به اجرا می‌رسد [۱۰]. بعبارت بهتر، بردارهای نرمال اولیه با فرض توازی در پرتوهای نوری محاسبه شده و در ادامه پس از بازسازی سه‌بعدی، موقعیت‌های سه‌بعدی برآورد شده مبنای اصلاح راستای تابش نور قرار می‌گیرند. سپس، راستاهای اصلاح شده منابع نوری در هر موقعیت سه‌بعدی منجر به اصلاح بردارهای نرمال سطح می‌گردد. این روند تا زمان ثبات در محتوای سه‌بعدی بازسازی شده ادامه می‌یابد [۸] و [۱۰].

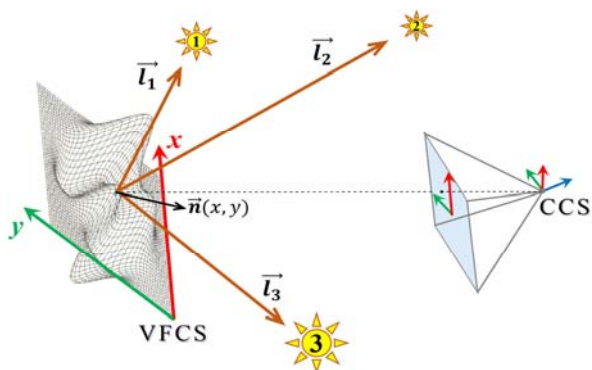
تعیین راستاهای تابش نور در سامانه‌های فتومتری یک اقدام کالیبراسیونی محسوب شده که راهکارهای مختلفی به منظور برآورد آن‌ها توسعه یافته است [۱]، [۶]، [۹] و [۱۰]. این اقدامات به دو شکل کالیبراسیون هندسی و خود-کالیبراسیون^۱ به اجرا می‌رسند [۳]، [۶] و [۱۱]. کالیبراسیون هندسی نیازمند طراحی میدان آزمون و اقدامات مرتبط با آن بوده، اما در روش‌های خودکالیبراسیونی، عناصر هندسی نامعلوم در خلال بازیابی بردارهای نرمال سطح و عموماً بدون نیاز به میدان آزمون با ویژگی‌های معلوم، شناسایی می‌شوند [۱] و [۶].

بکارگیری سطوح مستوی با جهت‌گیری معلوم یکی از ابزارهای کالیبراسیون سامانه‌های فتومتری قلمداد می‌شود. بردار نرمال این

نرمال سطح و راستای تابش نور است [۱]. با فرض وجود خاصیت بازتابندگی لامبرتی برای سطح، صرفنظر از موضع مشاهده سطح، شدت بازتاب نیز تابعی از شدت نور رسیده و ضریب بازتابندگی سطح خواهد بود [۶]. بر این اساس، اندازه‌گیری شدت نور بازتابی از سطح هنگام تغییر در موضع نوردهی ارتباط معناداری با جهت‌گیری سطح خواهد داشت. از این رو، در سامانه‌های فتومتری با فرض معلوم بودن راستای تابش نور و خاصیت بازتاب لامبرتی سطح، بازیابی بردارهای نرمال سطح از طریق شدت‌های ثبت شده در تصاویر اخذ شده به اجرا می‌رسد [۱]. مطابق با شکل (۱)، شدت روشنی ثبت شده برای موقعیت (x, y) بصورت رابطه (۱) با شدت و راستای منابع نوری مرتبط می‌گردد [۱]، [۶] و [۸].

$$m_i(x, y) = r_i(x, y) \times \frac{\langle \vec{l}_i \cdot \vec{n}(x, y) \rangle}{\|\vec{n}(x, y)\|} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، m_i شدت ثبت شده در تصویر نام (هنگام نورپردازی محیط توسط منبع نوری نام) برای موقعیت (x, y) است. جهت و بزرگی بردار \vec{l}_i به ترتیب راستا و شدت نور منبع نوری نام را نشان می‌دهد. $r_i(x, y)$ ضریب بازتابندگی موقعیت (x, y) در طول موج نور تابیده شده توسط منبع نوری نام بوده و $\vec{n}(x, y)$ بردار نرمال سطح است. در این رابطه $\bullet <$ نیز نماد ضرب داخلی دو بردار می‌باشد. در صورت تشابه در شدت و رفتار طیفی منابع نوری مورد استفاده در یک سامانه فتومتری، مقدار عددی $\|\vec{l}_i\| \times r_i(x, y)$ برای تمامی منابع نوری یکسان بوده و در این شرایط با معلوم بودن بردار یکه در راستای منابع نوری، امکان تخمین همزمان مولفه‌های بردار نرمال سطح و کمیت $\|\vec{l}_i\| \times r_i(x, y)$ از طریق اندازه‌گیری حداقل ۳ مقدار $m_i(x, y)$ میسر خواهد بود [۱] و [۶]. این رویکرد با فرض ترازوی در پرتوهای نور تابیده از منابع نوری طراحی شده و در زمان بکارگیری منابع نوری نقطه‌ای با تغییراتی در ساختار مدل‌سازی هندسی اصلاح می‌گردد [۱۰].



شکل (۱): مدل مفهومی یک سامانه فتومتری بمنظور بازیابی راستای بردارهای نرمال سطح

عصبی است؛ اما سازوکار اجرایی در آن ماهیتی متمایز را با روندهای مرسوم برخوردار است. در این سامانه‌ها علاوه بر وجود تمایز در راستای منابع نوری هنگام اخذ تصویر، وجود تصاویر از مناظر متفاوت نیز لازم است [۲۲].

بطور معمول سیستم‌مختصات شیء در سامانه‌های فتومتری موازی و یا منطبق با سیستم‌مختصات تصویری تعیین می‌شود. از این رو، راستای انتشار نور و یا موقعیت سه‌بعدی منابع نوری نیز در این سیستم‌مختصات تعیین می‌گردند. سازوکار اجرایی در برخی از روش‌های کالیبراسیون مانند بکارگیری صفحات با جهت‌گیری معلوم و یا گوی (های) صیقلی [۸] بنحوی طراحی شده که راستای انتشار نور در سیستم‌مختصات دوربین (CCS) برآورد می‌شوند. اما در روش‌های خود-کالیبراسیونی احتمال تعیین راستای منابع نوری در یک سیستم‌مختصات دلخواه و متمایز با سیستم‌مختصات تصویری وجود دارد [۶]، [۷] و [۱۶].

عدم ترازوی در سیستم مختصات مربوط به بازیابی بردارهای نرمال سطح (VFCS) و سیستم مختصات تصویری، یک منبع خطای سیستماتیک در روند بازسازی سه‌بعدی خواهد بود. نامعلوم بودن ارتباط هندسی میان این دو سیستم‌مختصات در هنگام بکارگیری روش‌های کالیبراسیون منابع نوری می‌تواند زمینه بروز خطاهای سیستماتیک را در روند بازسازی سه‌بعدی ایجاد سازد. در این مقاله خطای سیستماتیک باقیمانده در روند بازسازی سه‌بعدی سطح ناشی از عدم انطباق یا ترازوی سیستم‌های مختصات ذکر شده از طریق اعمال یک ماتریس دوران به بردارهای نرمال سطح جبران می‌شود. عناصر دورانی مرتبط نیز از طریق باقیمانده‌های برآورد شده در روند بازسازی سه‌بعدی به کمک روش کمترین مربعات محاسبه می‌شوند. به عبارت بهتر، روش پیشنهادی یک راهکار جبرانی در زمان وقوع عدم ترازوی در سیستم‌مختصات‌های CCS و VFCS محسوب شده که عموماً در زمان بکارگیری روش‌های خود-کالیبراسیون مبتنی بر روش‌های جبرخطی مورد نیاز خواهد بود. بکارگیری کالیبراسیون هندسی و همچنین استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در حوزه عملکرد این روش نیست. با اینحال، استفاده از این روش در زمان عدم رخداد خطای سیستماتیک منجر به تخریب نتایج بازسازی سه‌بعدی نشده و اجرای آن می‌تواند بعنوان یک اقدام مکمل در روند بازسازی سه‌بعدی از طریق بردارهای نرمال سطح استفاده گردد.

۲- روش‌شناسی

در یک سامانه فتومتری، دوربین عکسبرداری در موقعیتی ثابت اقدام به اخذ تصویر از صحنه در شرایط نوردهی متفاوت (بیش از سه منبع نوری) می‌نماید (شکل ۱). از منظر تئوری، شدت نور رسیده به واحد سطح در هر موقعیت سه‌بعدی وابسته به زاویه بین

و راستای منابع نوری در سامانه‌های فتومتری است. در این روش‌ها، ارتباط نسبی میان راستای منابع نوری و بردارهای نرمال سطح از طریق تحلیل درجات روشنی ثبت شده در تصاویر اخذ شده برآورد می‌گردد. منظور از ارتباط نسبی، نبود الزام در بازیابی راستای منابع نوری و بردارهای نرمال سطح در یک سیستم مختصات از پیش تعیین شده است. در ادبیات فتوگرامتری نیز از این واژگان برای مفاهیم مشابهی استفاده می‌شود [۲۳]. بکارگیری روش تجزیه به مقادیر سینگولار در جبرخطی یکی از روش‌های رایج در این زمینه بوده که توضیح مختصری از آن در ادامه ذکر شده است [۶] و [۱۱].

با در نظر گرفتن ماتریس $M_{p \times k}$ بعنوان ماتریس مشاهدات شدت نور ثبت شده برای یک شئی در سامانه فتومتری (p تعداد موقعیت‌های (x, y) واقع شده بر روی شئی مورد نظر و k تعداد منابع نوری است)، بردارهای نرمال سطح و راستای منابع نوری از طریق روشی مبتنی بر تجزیه به مقادیر سینگولار تعیین می‌گردد [۱۱]. مطابق با رابطه (۴)، ماتریس M به سه ماتریس $U_{p \times p}$ ، $\Sigma_{p \times k}$ و $V_{k \times k}$ تجزیه شده که پس از حذف اثر مقادیر سینگولار چهارم به بعد، این ماتریس بصورت تقریبی قابل بازیابی خواهد بود [۶].

$$M_{p \times k} = U_{p \times p} \times \Sigma_{p \times k} \times V_{k \times k} \approx U_{p \times 3} \times \Sigma_{3 \times 3} \times V_{3 \times k} \quad (۴)$$

صرفنظر کردن از اثر مقادیر سینگولار چهارم و بعد از آن با فرض سه‌بعدی بودن فضای گسترش یافته ناشی از ضرب داخلی بردارهای نرمال سطح و راستای منابع نوری بوده که انتظار می‌رود در حالت ایده‌آل منجر به صفر شدن مقادیر سینگولار چهارم و بعد از آن گردد [۶]، [۱۱] و [۱۶]. در این شرایط، دو ماتریس $\hat{N} = U_{p \times 3} \times \Sigma_{3 \times 3}^{\frac{1}{2}}$ و $\hat{L} = \Sigma_{3 \times 3}^{\frac{1}{2}} \times V_{3 \times k}$ به ترتیب بعنوان ماتریس اولیه از بردارهای نرمال سطح و راستای منابع نوری برآورد شده که حاصلضرب آنها تقریبی از ماتریس M را بازسازی می‌نماید (رابطه ۵) [۶].

$$M \approx \hat{M} = \hat{N} \times \hat{L} \quad (۵)$$

روش تشریح شده تنها پاسخ مساله کالیبراسیون راستای منابع نوری و بازیابی بردارهای نرمال سطح نبوده و تمامی حالت‌های رابطه (۶) نیز که در آن A هر ماتریس دلخواه و معکوس‌پذیری با ابعاد 3×3 باشد؛ در زمره پاسخ‌های این مساله قلمداد می‌شود [۶].

$$M \approx \hat{M} = \hat{N} \times A \times A^{-1} \times \hat{L} \quad (۶)$$

بازیابی صحیح بردارهای نرمال سطح و راستای منابع نوری منوط به تعیین عناصر ماتریس A بوده که اینکار نیازمند دانش خارجی بیشتر در مورد بازتابندگی سطح یا شدت منابع نوری است [۶]. برای اینکار نیاز به ۱- حداقل شش پیکسل از سطح مبنای کالیبراسیون با بازتابندگی معلوم (یا مشابه) در یکی از تصاویر اخذ

دسترسی به بردارهای نرمال سطح در قالب یک شبکه منظم، امکان بازسازی سه‌بعدی سطح را فراهم می‌آورد. این اقدام با محاسبه اختلاف ارتفاع در دو راستای عمود برهم به کمک مولفه‌های بردار نرمال به اجرا می‌رسد [۷]. با در نظر گرفتن مولفه‌های بردار نرمال به شکل $\vec{n}(x, y) = [n_x, n_y, n_z]^T$ ، اختلاف ارتفاع در دو راستای متعامد به صورت رابطه (۲) قابل برآورد خواهد بود.

$$\begin{aligned} \Delta h_x(x, y) &= -\Delta x \frac{n_x}{n_z} \\ \Delta h_y(x, y) &= -\Delta y \frac{n_y}{n_z} \end{aligned} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $[\Delta x, \Delta y]$ گام‌های نمونه‌برداری در شبکه منظم از بردارهای نرمال سطح بوده که در صورت انتخاب مقدار یک برای آنها، واحد مقادیر ارتفاعی در روند بازسازی سه‌بعدی پیکسل خواهد بود. اختلاف ارتفاع در هر راستا برای هر سلول از شبکه منظم به مثابه یک مشاهده، ارتباط میان مولفه ارتفاعی هم‌راستا و مجاور را در شبکه منظم برقرار می‌سازد (رابطه ۳).

$$\begin{aligned} \Delta h_x(x, y) + v_x(x, y) &= z(x + \Delta x, y) - z(x, y) \\ \Delta h_y(x, y) + v_y(x, y) &= z(x, y + \Delta y) - z(x, y) \end{aligned} \quad (۳)$$

مقادیر $z(x, y)$ ، $v_x(x, y)$ و $v_y(x, y)$ نیز به ترتیب مولفه ارتفاعی و باقیمانده‌های مربوط به مشاهدات اختلاف ارتفاع در موقعیت (x, y) هستند. تعداد معادلات قابل نگارش به منظور برآورد همزمان تمامی مولفه‌های ارتفاعی شبکه منظم حداکثر دوبرابر تعداد مجهولات بوده و صرفاً سلول‌های مرزی منجر به کاهش اندک در تعداد معادلات می‌شوند. کمبود رتبه ماتریس ضرایب مجهولات ناشی از نقص در تعریف مبداء ارتفاعی نیز بطور معمول از طریق اعمال قیود داخلی و یا با معلوم فرض کردن مولفه ارتفاعی یک سلول از شبکه منظم جبران می‌شود. راهکارهای مختلفی به منظور تعیین راستای منابع نوری در سامانه‌های فتومتری توسعه یافته است. کالیبراسیون مستقیم با روش‌های هندسی کارآمدترین دسته از این راهکارها تلقی شده که نیازمند میدان آزمون با ویژگی‌های هندسی مشخص و اقدامات متعدد کالیبراسیونی است [۱]، [۹] تا [۱۲]. استفاده از گوی‌های صیقلی و صفحات با بازتابندگی یکنواخت و جهت‌گیری معلوم دو رویکرد مرسوم در طراحی میدان آزمون برای روش‌های هندسی تلقی می‌شود. در صورت تعیین پارامترهای هندسی این اشیاء از طریق دوربین اخذ تصاویر فتومتری، بازیابی راستای منابع نوری در سیستم مختصات CCS صورت می‌پذیرد. روش پیشنهاد شده در این مقاله تأثیری در نتایج چنین کالیبراسیون‌های هندسی نداشته و صرفاً در زمانی استفاده از روش‌های کالیبراسیونی با احتمال بروز عدم توازی در سیستم مختصات‌های CCS و VFCS قابل استفاده خواهد بود. کالیبراسیون آزاد یا خود کالیبراسیون دسته دیگری از روش‌های برآورد همزمان میدان برداری نرمال‌های سطح

سیستم‌مختصات بازیابی راستای منابع نوری و بردارهای نرمال سطح خواهد بود.

معادلات ارائه شده در رابطه (۳) با فرض توازی در محورهای دو سیستم‌مختصات بازسازی سه‌بعدی سطح (CCS) و بازیابی بردارهای نرمال (VFCS) بنا شده است. عدم توازی این دو سیستم مختصات بروز خطاهای سیستماتیک را در روند بازسازی سه‌بعدی به‌دنبال دارد. به‌عبارت بهتر، عدم هم‌راستا بودن مقادیر اختلاف ارتفاع جهت‌دار با راستای محورهای سیستم‌مختصات CCS، منجر به عدم انطباق مدل ریاضی در رابطه (۳) با مقادیر مشاهداتی شده که این موضوع بروز خطای سیستماتیک را در مقادیر باقیمانده به‌دنبال خواهد داشت. در این شرایط می‌بایست با اعمال زاویه چرخش مناسب به بردارهای نرمال سطح، دو سیستم‌مختصات CCS و VFCS موازی گردند. چرخش بردارهای نرمال سطح از طریق اعمال یک ماتریس دوران سه‌بعدی بصورت رابطه (۸) اعمال می‌گردد.

$$\vec{n}_r(x, y) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \vec{n}(x, y) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، بردار نرمال چرخش یافته است. با جاگذاری مولفه‌های بردار نرمال چرخش یافته در رابطه (۲)، مقادیر اختلاف ارتفاع‌های دوران یافته محاسبه خواهند شد. از منظر تئوری، عدم انطباق مدل مشاهداتی ارائه شده در رابطه (۳) با مقادیر اختلاف ارتفاع جهت‌دار اولیه عامل بروز خطای سیستماتیک در بردارهای باقیمانده بوده که این مقدار معادل با تفاضل میان اختلاف ارتفاع‌های اولیه (محاسبه شده توسط بردارهای نرمال اولیه) و دوران‌یافته (محاسبه شده توسط بردارهای نرمال چرخش یافته) خواهد بود. از این رو، تخمین زاویه چرخش بین دو سیستم مختصات CCS و VFCS از طریق مدل مشاهداتی رابطه (۹) قابل برآورد خواهد بود. در این رابطه مقادیر باقیمانده بدست آمده از روند بازسازی سه‌بعدی نقش مقادیر مشاهداتی را برای معادلات مربوط با تفاضل میان اختلاف ارتفاع‌های اولیه و دوران یافته ایفا می‌کنند.

$$\begin{bmatrix} v_x(x, y) \\ v_y(x, y) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \Delta h_x(x, y) \\ \Delta h_y(x, y) \end{bmatrix} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، زاویه چرخش بین دو سیستم‌مختصات CCS و VFCS بوده که از طریق حل یک دستگاه معادلات فرامعین غیرخطی قابل برآورد خواهد بود. در این روش، راستای محور سوم (Z) دو سیستم‌مختصات CCS و VFCS هم‌راستا فرض شده و از ماتریس دوران صرفاً با هدف ایجاد توازی در محورهای X و Y استفاده شده است. این تصمیم به دلیل تاثیرپذیری اندک بردار باقیمانده‌ها از چرخش‌های حول دو محور دیگر اتخاذ شده است. دلیل این موضوع مربوط به یکسان بودن محتوای شدت نور ثبت شده از اشیاء سه‌بعدی در شرایط اعمال برخی از تبدیلات هندسی

شده در سامانه فتومتری و یا ۲- مشخص بودن شدت حداقل شش منبع نوری (یا مشابه بودن شدت آنها) در تصاویر اخذ شده لازم است [۶]. آگاهی از این شرایط امکان افزودن قیودی را برای طول بردارهای نرمال و یا راستای منابع نوری به شکل یکی از دو معادله ارائه شده در رابطه (۷) تامین می‌سازد.

$$\begin{aligned} \hat{n}(x, y) \times A \times A^T \times \hat{n}(x, y)^T &= cte \\ \hat{l}_i \times A \times A^T \times \hat{l}_i^T &= cte \end{aligned} \quad (7)$$

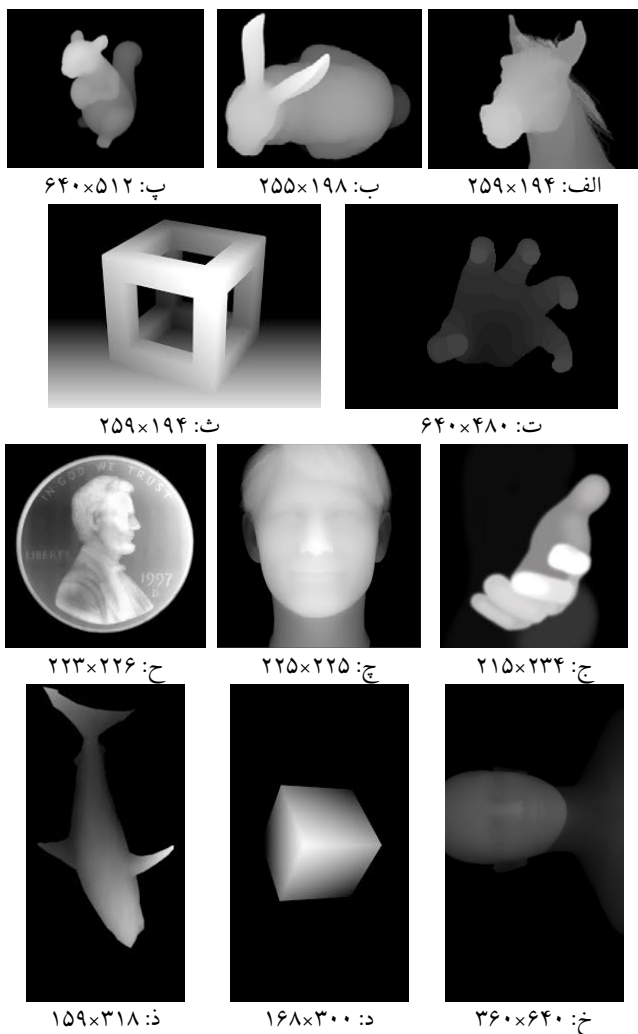
در رابطه (۷)، بردار نرمال برآورد شده برای یک پیکسل منتخب از سطح مبنای کالیبراسیون با بازتابندگی معلوم (یک سطر منتخب از \hat{N}) و \hat{l}_i یک ستون منتخب از ماتریس \hat{L} (بردار راستای منبع نوری) با شدت معلوم می‌باشند. ماهیت متقارن ماتریس $A^T A$ یا $A A^T$ تعداد عناصر مجهول را به شش پارامتر تقلیل داده و از این رو در اختیار داشتن حداقل شش معادله قید (در صورت عدم وجود همبستگی خطی) برای برآورد عناصر ماتریس $A^T A$ کافی خواهد بود. با اینحال باید توجه داشت که بازیابی نه عنصر ماتریس A از طریق شش عنصر از ماتریس $A^T A$ پاسخ یکتایی نداشته و سه درجه آزادی برای آن متصور است.

در روش کالیبراسیون آزاد، بردارهای ویژه ماتریس $M^T M$ (بردارهای سطری ماتریس V) تبیین‌کننده راستای منابع نوری و به تبع آن جهت‌گیری محورهای سیستم مختصات مربوط به بردارهای نرمال سطح هستند. ماتریس کواریانس میان درجات روشنی تصاویر اخذ شده از یک شیء در شرایط نورپردازی متفاوت است. از این رو، کشیدگی در توزیع نمونه‌های واقع در یک فضای ویژگی k -بعدی تشکیل شده توسط درجات خاکستری ثبت شده در سطح مبنای کالیبراسیون، تعیین‌کننده راستای بردارهای ویژه آن خواهد بود. در این شرایط، عوامل موثر بر بازیابی راستای منابع نوری و بردارهای نرمال سطح به موقعیت مکانی نقاط در سیستم‌مختصات CCS وابستگی نداشته و این موضوع قیدی مبنی بر الزام هم‌راستایی دو سیستم‌مختصات CCS و VFCS تامین نمی‌سازد. به همین دلیل هنگام استفاده از روش‌های اینچنینی در کالیبراسیون آزاد عدم توازی این دو سیستم‌مختصات امری محتمل خواهد بود. رخداد این پدیده ناشی از فرض بازتاب لامبرتی برای سطح سه‌بعدی در هنگام بکارگیری سامانه‌های فتومتری است. در این شرایط موضع مشاهده سطح سه‌بعدی تأثیری در شدت نور دریافت شده از آن نداشته و تمامی مواضعی که قادر به مشاهده سطح باشند (بدون تغییر در نواحی پنهان)؛ شدت‌های یکسانی از نور بازتاب شده توسط سطح را دریافت داشته و تمایز محسوسی در بازیابی راستای منابع نوری و بردارهای نرمال سطح نخواهند داشت. امکان وجود تمایز در موضع مشاهده سطح سه‌بعدی و عدم تغییر در بازیابی راستای منابع نوری و بردارهای نرمال سطح در روش‌های کالیبراسیون آزاد به مثابه چرخش یا انتقال سیستم‌مختصات بازیابی سه‌بعدی سطح نسبت به

۳- نتایج و بحث

عملکرد روش پیشنهادی در دو سطح بکارگیری در داده‌های شبیه‌سازی شده و همچنین دو مجموعه داده واقعی مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفته است [۲۶]. داده‌های شبیه‌سازی شده اشکال هندسی متنوعی بوده که بردارهای نرمال سطح آنها در قالب یک شبکه منظم تولید شده است. سپس با اعمال ماتریس دوران به بردارهای نرمال سطح، ضمن رصد اثرات آن در بازسازی سه‌بعدی، توانایی روش پیشنهادی در بازیابی میزان چرخش و همچنین اصلاح اثرات ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده‌های واقعی مورد استفاده نیز بردارهای نرمال سطحی بوده که از طریق روش تجزیه به مقادیر سینگولار از تصاویر اخذ شده در شرایط نورپردازی متفاوت بدست آمده‌اند.

شکل (۳) تصاویر عمق مربوط به اشکال هندسی مورد استفاده را بمنظور تولید میدان بردارهای نرمال سطح از طریق محاسبه مشتقات جهتی نشان می‌دهد. میدان برداری تولید شده از این اشکال در گام‌های ده درجه‌ای و در بازه $[0 \sim 360]$ دوران یافته و در هر گام، از روش پیشنهادی برای بازیابی تصاویر عمق استفاده شده است.

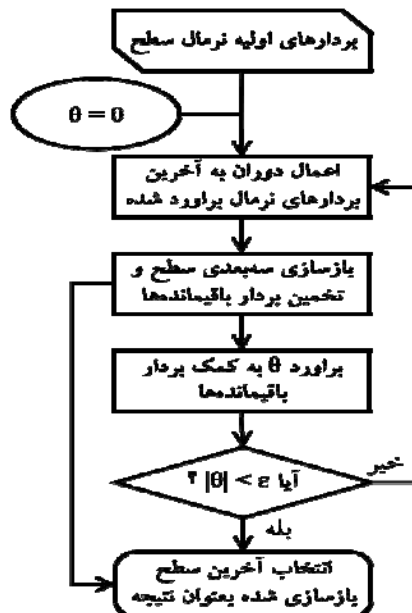


شکل (۳): تصاویر عمق مورد استفاده به منظور بازیابی شبکه بردارهای نرمال سطح در ارزیابی روش پیشنهادی

بوده که در اصطلاح GBRA^۱ نامیده می‌شوند [۲۴]. اعمال تبدیلات هندسی به صورت رابطه (۱۰) به بردارهای نرمال منجر به بازسازی سطح با حفظ یکپارچگی و بدون تغییر در مولفه‌های بردار باقیمانده می‌گردد [۶]، [۲۴] و [۲۵].

$$\hat{N} = \hat{N} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \alpha & \beta & \lambda \end{bmatrix} \quad (10)$$

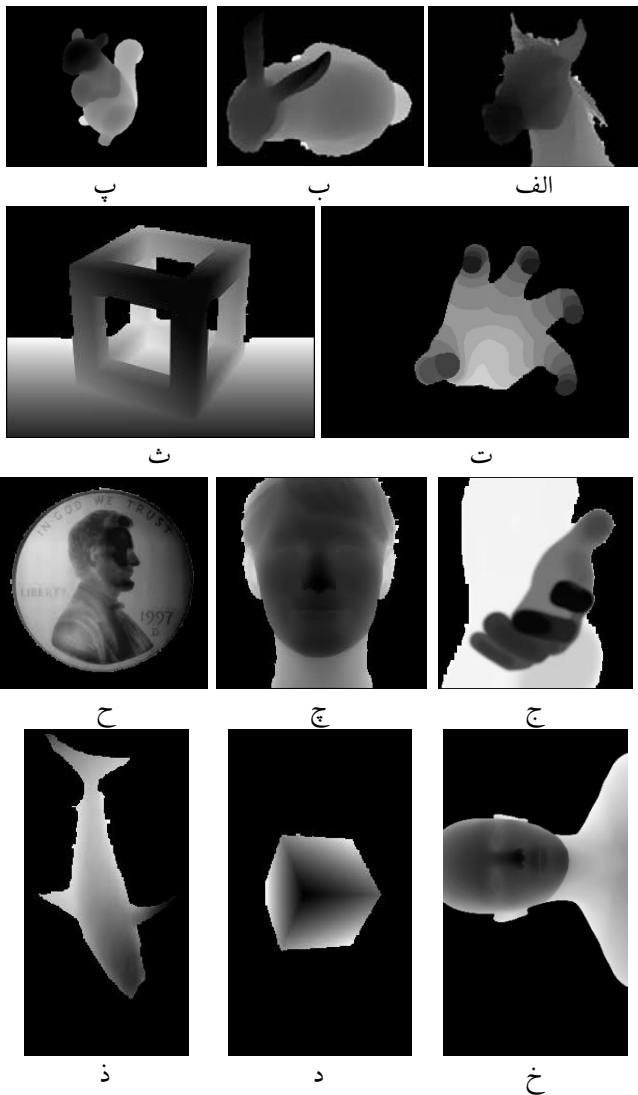
در رابطه (۸)، α, β, λ ضرایبی بوده که اعمال آن به ماتریس \hat{N} سبب چرخش و کشیدگی صفحه Xoy از سیستم مختصات VFCS نسبت به محورهای اول (X) و دوم (Y) می‌گردد. تمامی ترکیبات ممکن از این تبدیل بعنوان GBRA شناخته می‌شوند [۲۴]. در این شرایط مقادیر باقیمانده حساسیتی نسبت به این تبدیلات هندسی نداشته و از این رو امکان بازیابی چرخش‌های موثر در چنین تبدیلاتی وجود ندارد. نتایج تجربی کسب شده در روند این اجرای این تحقیق نیز نشان داد که اعمال چرخش حول محورهای اول و دوم به بردارهای نرمال باکندی در روند بازیابی و حتی با عدم امکان بازیابی روبرو خواهد بود. با این وجود، عدم توازی محورهای X و Y در دو سیستم مختصات CCS و VFCS مستقیماً بروز خطاهای سیستماتیک را بدنبال داشته و عدم اصلاح آن درستی و صحت هندسی بازسازی سه‌بعدی را مخدوش می‌سازد. به منظور افزایش دقت بازیابی زاویه دورانی θ ، در روش پیشنهادی و مطابق با فلوجارت ارائه شده در شکل (۲) روندی تکراری به منظور برآورد و اصلاح عدم توازی سیستم‌های مختصات CCS و VFCS طراحی شده است.



شکل (۲): روندنمای اجرای روش پیشنهادی به منظور اصلاح اثر عدم توازی سیستم‌های مختصات CCS و VFCS در بازیابی سه‌بعدی سطح

^۱ Generalized Bas Relief Ambiguities

درجه‌ای نیز حاکی از بازیابی محتوای تصاویر عمق به شکل نگاتیو است. شکل (۵)، نتیجه بازسازی سه‌بعدی سطح برای تصاویر عمق ارائه شده در شکل (۳) را هنگام اعمال زاویه چرخش ۱۸۰ درجه‌ای به بردارهای نرمال سطح نشان می‌دهد.



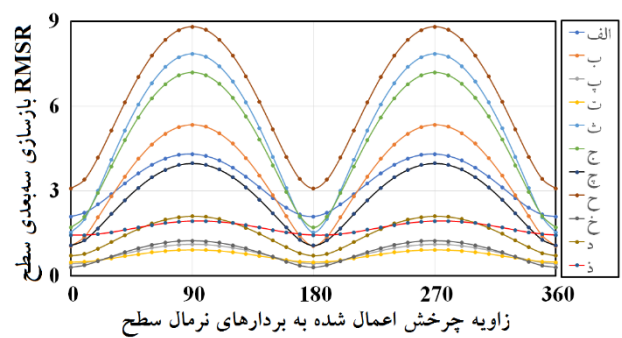
شکل (۵): نتایج بازسازی سه‌بعدی به کمک بردارهای نرمال سطح پس از چرخش به میزان ۱۸۰ درجه

با مقایسه تصاویر ارائه شده در شکل‌های (۳) و (۵) ماهیت نگاتیو تصاویر بازسازی شده هنگام استفاده از بردارهای نرمال سطح پس از دوران ۱۸۰ درجه‌ای مشهود است. بزرگترین مقادیر باقیمانده مربوط به زوایای چرخش ۹۰ و ۲۷۰ درجه‌ای بوده که اثر چرخش ۹۰ درجه‌ای بردارهای نرمال سطح در بازسازی سه‌بعدی نیز در شکل (۶) نمایش یافته است. محتوای عمق بازسازی شده در تصاویر شکل (۶) معنادار نبوده و درک صحیحی از شکل سه‌بعدی را ایجاد نمی‌سازند. چرخش‌های ۹۰ و ۲۷۰ درجه‌ای بیشترین آسیب را در روند بازسازی سه‌بعدی بوجود آورده و اعمال زوایای چرخش حداقل زوایای چرخش خاص (۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه‌ای) منجر به بازسازی سه‌بعدی در شرایط بهتر می‌گردد.

تصاویر عمق ارائه شده در شکل (۳) تنوع کافی از منظر پیچیدگی و جزئیات را برخوردار بوده و به نظر می‌رسد این موضوع مانع از بروز وابستگی نتایج به الگو و توزیع بردارهای نرمال سطح گردد. بردارهای نرمال سطح در تصاویر عمق ارائه شده در شکل (۳) به کمک هسته‌های ساده مشتق‌گیری جهتی تولید شده‌اند.

داده‌های واقعی استفاده شده در این تحقیق نیز دو مجموعه داده اخذ شده توسط سامانه‌های فتومترتری مربوط به یک توپ و یک برگ بوده که توسط منابع نوری مختلف نورپردازی شده‌اند. تصاویر عمق آنها بعنوان مبنای مقایسه در دسترس بوده و نتایج بازیابی عمق در آنها به کمک بازیابی بردارهای نرمال سطح از روش تجزیه به مقادیر سینگولار [۶] در دو سطح بکارگیری روش پیشنهادی و روش سنتی محور ارزیابی لحاظ شده است.

در اولین ارزیابی ریشه میانگین مربعات باقیمانده‌های (RMSR^۱) تخمین مولفه ارتفاعی هنگام وجود چرخش در بردارهای نرمال سطح به ازای هر یک از تصاویر عمق ارائه شده در شکل (۳)، تولید و در قالب نمودارهای شکل (۴) ترسیم شده است. با توجه به انتخاب عدد یک بعنوان گام نمونه‌برداری $[\Delta x, \Delta y]$ در رابطه (۲) در روند بازسازی سه‌بعدی و همچنین محاسبه بردارهای نرمال سطح از طریق مشتق‌گیری جهتی در تصاویر عمق، واحد مولفه‌های ارتفاعی بازسازی شده هم واحد با تصاویر عمق متناظر خواهد بود. به دلیل نامعلوم بودن واحد درجات روشنی در تصاویر عمق مورد استفاده از معرفی واحد برای شاخص RMSR صرف‌نظر شده است.

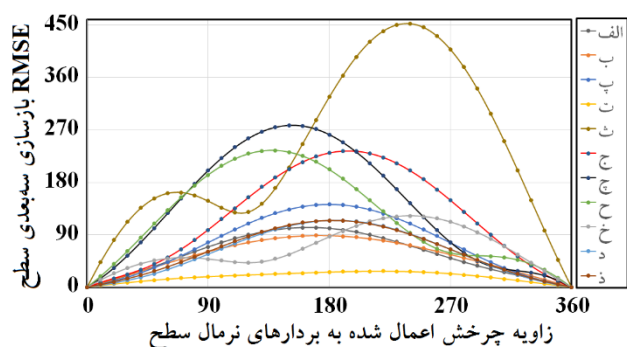


شکل (۴): اثر چرخش بردارهای نرمال سطح در بردار باقیمانده‌های بازسازی سه‌بعدی سطح

رفتار متناوب و مشابه میان نمودارهای شکل (۴) یک ویژگی جالب در این شکل تلقی شده که علیرغم تمایز در بزرگی RMSRها از یک هماهنگی برخوردارند. در تمامی نمودارها، بیشترین مقادیر باقیمانده‌ها در زوایای چرخش ۹۰ و ۲۷۰ درجه ایجاد شده و بزرگی باقیمانده‌های ایجاد شده در زاویه چرخش ۱۸۰ درجه با زمان عدم وجود چرخش برابری می‌کند. این بدان معناست که چرخش ۱۸۰ درجه‌ای در بردارهای نرمال سطح اثر محسوسی در افزایش بزرگی مقادیر در بردار باقیمانده‌ها ندارد. نتایج بازسازی سه‌بعدی سطح در مورد زاویه چرخش ۱۸۰

^۱ Root's Mean of Square Residuals (RMSR)

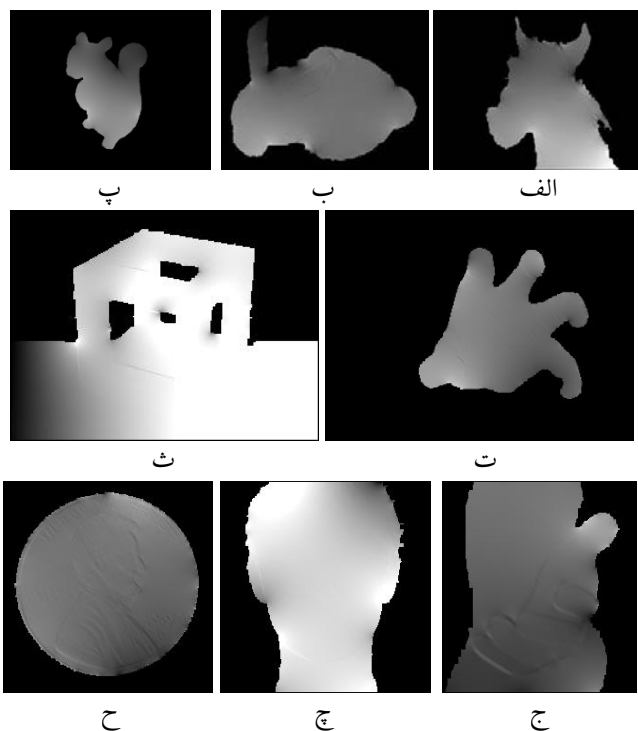
می‌دهد. لازم به یادآوری است که واحد شاخص RMSE نیز همانند RMSR هم واحد با تصاویر عمق متناظر می‌باشد.



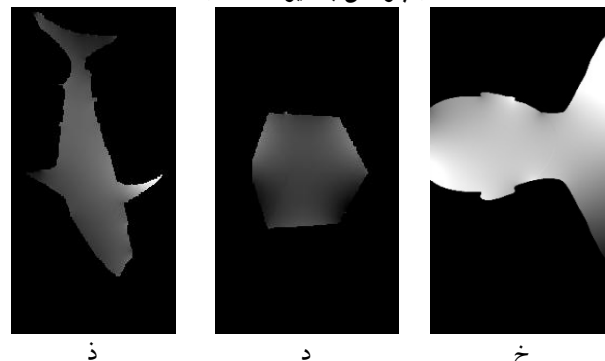
شکل (۷): اثر چرخش بردارهای نرمال سطح در صحت بازسازی سه‌بعدی سطح

نمودارهای شکل (۷) برخلاف شکل (۴) حاکی از عدم وجود رفتار متناوب در مقادیر RMSE بوده و علیرغم کاهش RMSRها در مجاورت زاویه چرخش ۱۸۰ درجه، مقادیر RMSE در این زوایا روند کاهشی از خود نشان نمی‌دهند. بدیهی است که در زمان عدم وجود چرخش در بردارهای نرمال (زوایای صفر و ۳۶۰ درجه)، اختلاف مدل‌های سه‌بعدی بازسازی شده و مورد انتظار کمینه گردد. لازم به ذکر است که به دلیل رفع نقص در تعریف مبداء ارتفاعی از طریق اعمال قید قطعی مبنی بر ثابت انگاشتن مولفه ارتفاعی اولین پیکسل هنگام بازسازی سه‌بعدی، تمایز در مبداء ارتفاعی میان سطح سه‌بعدی بازسازی شده و سطح مورد انتظار محتمل خواهد بود. از این رو، RMSEها پس از کسر میانگین از مقادیر تفاضل بین مدل‌های سه‌بعدی مورد انتظار و بازسازی شده محاسبه شده‌اند.

افزایش سازگاری دستگاه معادلات مربوط به بازسازی سه‌بعدی هنگام اعمال چرخش ۱۸۰ درجه‌ای به بردارهای نرمال سطح نشان‌دهنده وجود حداقل دو پاسخ در فضای جواب برای مسئله وجود چرخش در بردارهای نرمال سطح است. از این رو، احتمال حذف اثر چرخش در بردارهای نرمال سطح با همگرایی روش پیشنهادی به چرخشی با ۱۸۰ درجه اختلاف نسبت به چرخش مورد انتظار وجود خواهد داشت. این موضوع از طریق ارزیابی بصری نتایج بازسازی سه‌بعدی سطح به‌سادگی قابل کشف است. در صورت برآورد نادرست زاویه چرخش، مدل سه‌بعدی نیز بصورت نگاتیو برآورد شده و جبران آن از طریق چرخش مجدد بردارهای نرمال سطح به میزان ۱۸۰ درجه میسر خواهد بود. نمودارهای شکل (۸) اختلاف زاویه چرخش برآورد شده هنگام بکارگیری روش پیشنهادی را نسبت به چرخش مورد انتظار برای تصاویر عمق شکل (۳) نشان می‌دهد.



شکل (۶): نتایج بازسازی سه‌بعدی به کمک بردارهای نرمال سطح پس از چرخش به میزان ۹۰ درجه

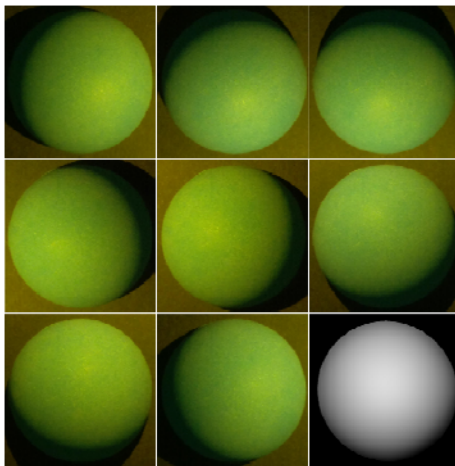


شکل (۶): نتایج بازسازی سه‌بعدی به کمک بردارهای نرمال سطح پس از چرخش به میزان ۹۰ درجه

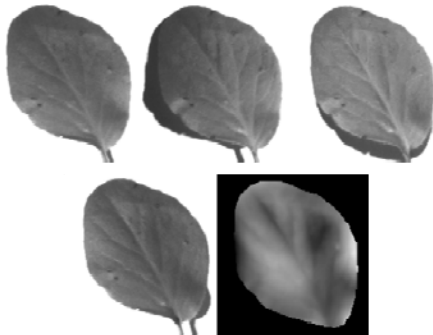
مطابق با مبانی نظری در حوزه تخمین کمترین مربعات، ارزیابی بزرگی باقیمانده‌های برآورد شده در روند بازسازی سه‌بعدی یک سنجه داخلی از میزان انطباق مقادیر مشاهداتی با ساختار مدل‌سازی ریاضی است [۲۷]. از این رو، کاهش مقادیر RMSR هنگام اعمال زوایای چرخش ۱۸۰ درجه‌ای حاکی از افزایش انطباق مشاهدات با ساختار مدل‌سازی ریاضی در روند بازسازی سه‌بعدی است. با اینحال، صحت بازسازی سه‌بعدی از طریق شاخص‌های خارجی قابل اندازه‌گیری بوده که در دومین ارزیابی صورت گرفته، میزان اختلاف بین سطح بازسازی شده و سطح مورد انتظار در قالب شاخص ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE^۱) برآورد شده است. نمودارهای شکل (۷) تغییرات شاخص RMSE مربوط به بازسازی سه‌بعدی را هنگام بکارگیری بردارهای نرمال سطح پس از اعمال زوایای چرخش مختلف نشان

^۱ Root's Mean of Squared Errors (RMSE)

منابع نوری نشان می‌دهد. در رویکرد سنتی به ازای هر موقعیت از سطح سه‌بعدی، درجات روشنی واقع در سایه شناسایی و حذف می‌گردد. سپس، بردار نرمال سطح برای آن موقعیت به کمک بردارهای مربوط به راستای منابع نوری غیرموثر در وقوع سایه برآورد می‌شود [۱]. لازم به ذکر است که در روند بازسازی سه‌بعدی داده‌های واقعی نیز گام نمونه‌برداری $(\Delta x, \Delta y)$ در رابطه (۲) معادل با یک انتخاب شده و از این رو واحد مولفه‌های ارتفاعی پیکسل خواهند بود.



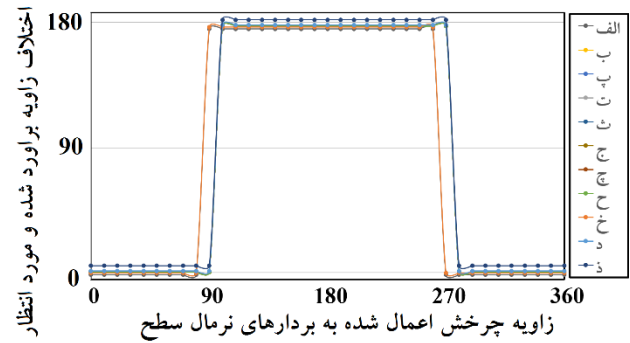
الف: مجموعه داده اول (توپ)



ب: مجموعه داده دوم (برگ)

شکل (۹): نمایی از مجموعه داده‌های اخذ شده به روش فتومتری به منظور بازسازی سه‌بعدی

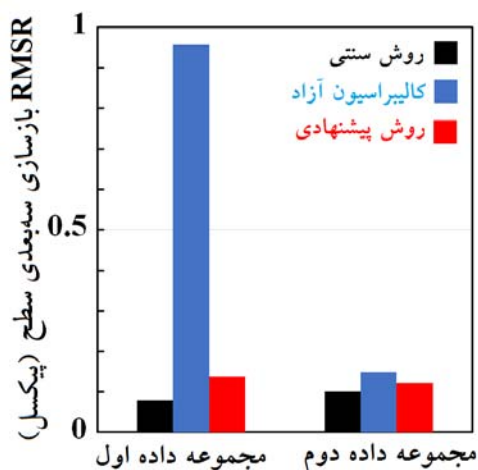
در روند ارزیابی داده‌های واقعی، بازسازی سه‌بعدی با سه رویکرد متفاوت به اجرا رسیده است. نخست، رویکرد سنتی با معلوم بودن راستای منابع نوری به اجرا رسیده است. سطح سه‌بعدی بازسازی شده و راستاهای منابع نوری در این مرحله بعنوان مبنا جهت مقایسه با دو رویکرد دیگر انتخاب شده‌اند. در رویکرد دوم، راستای منابع نوری از طریق کالیبراسیون آزاد بدست آمده و از آن‌ها در برآورد بردارهای نرمال سطح و سپس بازسازی سه‌بعدی استفاده شده است. در رویکرد آخر نیز، از روش پیشنهادی به منظور برآورد و اعمال چرخش به بردارهای نرمال سطح (بدست آمده از رویکرد دوم) جهت اصلاح روند بازسازی سه‌بعدی استفاده شده است. شکل (۱۰)، تصویر افقی از راستای منابع نوری در سه رویکرد ذکر شده را نشان می‌دهد. علت نمایش تصویر افقی از



شکل (۸): اختلاف زاویه چرخش برآورد شده و زاویه مورد انتظار در روش پیشنهادی

از نمودارهای شکل (۸) نکات مختلفی قابل استنباط می‌باشد. نخست آنکه در صورت اعمال چرخش در بازه ۹۰ تا ۲۷۰ درجه‌ای به بردارهای نرمال سطح، زاویه چرخش بازیابی شده با اختلاف ۱۸۰ درجه‌ای بازیابی می‌گردد. تکرار این موضوع در تمامی تصاویر عمق، قطعیت وقوع آن را به اثبات می‌رساند. ماهیت غیرخطی معادله مرتبط با برآورد زاویه چرخش (رابطه ۷) و فرض صحیح مبنی بر عدم آگاهی از مقدار اولیه این زاویه در روند تخمین کمترین مربعات، منجر به همگرایی دستگاه معادلات به نزدیکترین جواب شده است. نکته دوم آنکه، تخمین زاویه چرخش در روش پیشنهادی برای هیچ یک از تصاویر عمق و در هیچکدام از زوایای چرخش اعمال شده به بردارهای نرمال منجر به واگرایی دستگاه معادلات نشده است. در تمامی آزمایش‌ها مقدار اولیه زاویه چرخش معادل صفر درجه انتخاب شده است. این موضوع نوید بخش وجود اطمینان در تخمین زاویه چرخش در روش پیشنهادی در زمان عدم آگاهی از مقدار اولیه آن بوده و نگرانی در مورد چگونگی کشف مقدار اولیه را مرتفع می‌سازد. از دیگر نکات قابل استنباط در نمودارهای شکل (۸) وجود اختلافات اندک بین زوایای چرخش برآورد شده و زوایای مورد انتظار است. میانگین و انحراف معیار این اختلافات (صرفنظر از اختلافات ۱۸۰ درجه‌ای) به ترتیب معادل با ۰٫۶ و ۱٫۶ درجه بودند. به نظر می‌رسد، ماهیت گسسته تصاویر عمق و نویز موجود در آنها، ناسازگاری و فرامعین بودن دستگاه معادلات مرتبط با بازسازی سطح و تخمین زاویه چرخش و همچنین تمایزات مربوط به نحوه تشکیل معادلات در پیکسل‌های مرزی، دلایل بروز این اختلافات اندک هستند [۲۶].

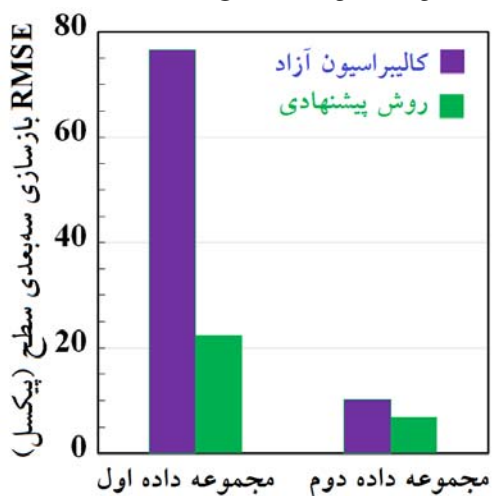
تا این مرحله، کفایت روش پیشنهادی در بازسازی سه‌بعدی هنگام وجود چرخش در بردارهای نرمال سطح در یک روند شبیه‌سازی به اثبات رسید. در مرحله دوم از روند ارزیابی، از داده‌های واقعی اخذ شده توسط روش‌های فتومتری برای سنجش کارآمدی روش پیشنهادی استفاده شده است. برای این منظور مطابق با شکل (۹) از دو مجموعه داده فتومتری برای بازسازی سه‌بعدی استفاده شده که در آنها بردارهای یکه مربوط به راستای منابع نوری معلوم است. آخرین تصویر از هر مجموعه داده در شکل (۹)، سطح سه‌بعدی بازسازی شده را به روش سنتی و به کمک بردارهای معلوم راستای



شکل (۱۱): مقایسه RMSR مربوط به بازسازی سه‌بعدی در مجموعه داده‌های فتومتری

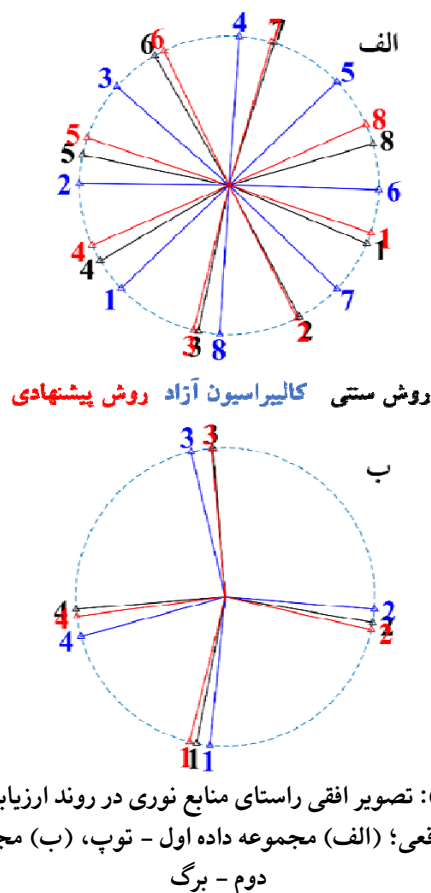
افزایش شاخص RMSR در زمان بکارگیری روش کالیبراسیون آزاد در نمودارهای شکل (۱۱) مشهود است. با توجه به اختلاف زاویه چرخش بزرگتر در مجموعه داده اول (شکل ۱۰) شدت RMSR در این مجموعه داده برای روش کالیبراسیون آزاد بیشتر بوده است. این موضوع در نتایج شبیه‌سازی نیز تایید شده بود (شکل ۴). نتایج بکارگیری روش پیشنهادی نیز حاکی از کاهش شاخص RMSR بوده که مقادیر نزدیک به روش سنتی را بوجود آورده است.

ارزیابی و مقایسه شاخص RMSR یک سنجه داخلی از میزان سازگاری دستگاه معادلات در بازسازی سه‌بعدی است. در ادامه و با هدف ارزیابی خارجی، نتایج بازسازی سه‌بعدی در روش‌های پیشنهادی و کالیبراسیون آزاد با نتیجه روش سنتی مقایسه شده‌اند. برای این منظور پس از محاسبه تفاضل سطوح سه‌بعدی (بدست آمده از روش پیشنهادی و کالیبراسیون آزاد) از سطح مبنا (بدست آمده از روش سنتی) از شاخص RMSE برای کمی‌سازی میزان اختلافات استفاده شده است. نمودارهای میله‌ای ارائه شده در شکل (۱۲) این شاخص را نشان می‌دهند.



شکل (۱۲): مقایسه RMSE بازسازی سه‌بعدی نسبت به سطح مبنا در مجموعه داده‌های فتومتری

راستاهاى منابع نوری بی‌تأثیر بودن روش پیشنهادی در مولفه سوم بردارهای نرمال سطح و راستای منابع نوری بوده است.



شکل (۱۰): تصویر افقی راستای منابع نوری در روند ارزیابی به کمک داده‌های واقعی؛ (الف) مجموعه داده اول - توپ، (ب) مجموعه داده دوم - برگ

مطابق با شکل ۱۰، در روش کالیبراسیون آزاد راستای منابع نوری با چرخش نسبت به مقادیر صحیح برآورد شده‌اند. اجرای روش پیشنهادی توانسته با برآورد زاویه چرخش مناسب جهت‌گیری راستای منابع نوری را به جهت‌گیری صحیح نزدیک سازد. جهت‌گیری صحیح، راستای بکارگرفته شده در روش سنتی بوده که از طریق اقدامات کالیبراسیونی بدست آمده است. باید توجه داشت که چرخش اعمال شده در روش پیشنهادی منجر به تغییر در زاویه نسبی میان راستای منابع نوری نمی‌گردد. تنوع در جهت‌گیری بردارهای نرمال سطح، کیفیت رادیومتریکی تصاویر اخذ شده و پالایش صحیح مشاهدات شدت روشنی از منظر عدم وقوع سایه عوامل موثر بر برآورد صحیح زاویه نسبی میان راستای منابع نوری در روش کالیبراسیون آزاد هستند [۶] و [۱۱].

مقایسه شاخص RMSR در سه رویکرد بازسازی سه‌بعدی به‌عنوان دومین گام از روند ارزیابی روش پیشنهادی در مورد داده‌های واقعی انتخاب شده است. نمودارهای میله‌ای ارائه شده در شکل (۱۱) امکان مقایسه این شاخص در هر سه رویکرد را بردار دو مجموعه داده فراهم آورده است.

مطابق با نمودارهای شکل (۱۲)، تنظیم جهت‌گیری بردارهای نرمال سطح از طریق برآورد و اعمال زاویه چرخش توانسته سطح سه‌بعدی نزدیکتری را نسبت به سطح مورد انتظار تولید سازد. این موضوع منجر به بهبود محسوس در دقت بازسازی سه‌بعدی هنگام بکارگیری روش پیشنهادی شده است. لازم به یادآوری است که به ازای تصاویر اخذ شده از یک شیء سه‌بعدی، یک جواب واحد برای بردارهای نرمال سطح و راستای منابع نوری در روش کالیبراسیون آزاد وجود نخواهد داشت (رابطه ۶) [۷]، [۱۱]، [۱۶] و [۲۵]. به عبارت بهتر، سطوح سه‌بعدی متنوعی ظرفیت آنرا داشته که با جهت‌گیری مناسب در منابع نوری و موقعیت دوربین، تصاویر مشابهی را تولید سازند [۲۴] و [۲۸]. این ابهام (نقص و یا لقی) در بازیابی بردارهای نرمال سطح در روش کالیبراسیون آزاد (GBRA) موجب شده که سطوح سه‌بعدی بازسازی شده لزوماً قابل مقایسه نباشند. یافتن سطح سه‌بعدی مورد انتظار از میان تمامی جواب‌های ممکن در کالیبراسیون آزاد نیازمند دسترسی به اطلاعات خارجی از ضریب بازتابندگی سطح و یا شدت منابع نوری است [۶]. در روند ارزیابی خارجی و محاسبه شاخص‌های RMSE، ابهام موجود در بردارهای نرمال سطح بدست آمده از کالیبراسیون آزاد از طریق انتخاب نمونه‌هایی با بازتابندگی یکسان در تصاویر اخذ شده از روش فتومتر برطرف شده است. روش انجام اینکار در [۶] تشریح شده است. این اقدام موجب شده که سطح سه‌بعدی بازسازی شده، نزدیکترین سطح سه‌بعدی از میان سطوح ممکن به سطح مورد انتظار باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تکراری به منظور کاهش اثر خطاهای سیستماتیک موجود در بردار باقیمانده‌های مربوط به بازسازی سه‌بعدی در روش‌های فتومتری پیشنهاد شد. این روش با اعمال چرخش تدریجی به بردارهای نرمال سطح، سیستم‌مختصات آنها را با سیستم‌مختصات شیء هم‌راستا می‌سازد. از بین سه چرخش محتمل بین دو سیستم‌مختصات سه‌بعدی، روش پیشنهادی تنها قادر به شناسایی چرخش حول محور سوم بوده و چرخش‌های حول دو محور اول و دوم به دلیل اثرگذاری بر ابهام ذاتی بازسازی سه‌بعدی در سامانه‌های فتومتری (GBRA) در اغلب شرایط با الگوی پیشنهادی در این تحقیق قابل بازیابی نخواهد بود. استفاده از این روش هنگام بکارگیری کالیبراسیون آزاد در روش‌های فتومتری می‌تواند با افزایش سازگاری دستگاه معادلات مربوط به بازسازی سه‌بعدی، دقت بهتری را در بازسازی جزئیات مکانی فراهم آورد. زاویای چرخش تدریجی در این روش از طریق تخمین کمترین مربعات غیرخطی برآورد شده که حساسیت اندکی نسبت به تعیین مقادیر اولیه دارند. بنا بر نتایج کسب شده از آزمایش‌های این تحقیق، استفاده از این روش هنگام بازسازی سه‌بعدی از طریق میدان برداری نرمال‌های سطح در زمان وجود عدم قطعیت بر هم‌راستا بودن سیستم‌های مختصات شیء و بردارهای نرمال سطح توصیه می‌گردد. در بدترین حالت و در زمان عدم وجود چرخش در سیستم‌های مختصات مذکور، این روش تاثیری بر روی نتایج بازسازی سه‌بعدی نخواهد داشت.

در ادامه این بخش، چند نتیجه تجربی کسب شده در مسیر اجرای این تحقیق ارائه شده است. در روش پیشنهادی صرفاً از یک زاویه چرخش حول محور سوم از سیستم‌مختصات سه‌بعدی برای ایجاد توازی در سیستم‌مختصات‌های CCS و VFCS استفاده شده است. این زاویه چرخش موجب تغییر در مولفه سوم از بردارهای نرمال سطح نمی‌گردد. این موضوع با حفظ بزرگی شیب در بردارهای نرمال سطح، صرفاً قادر به تغییر جهت در شیب آنها خواهد بود. به عبارت بهتر در این روش، محور سوم از دو سیستم مختصات CCS و VFCS هم‌راستا تصور شده است. از منظر هندسی، توازی دو سیستم‌مختصات سه‌بعدی با سه زاویه دورانی تامین می‌گردد. در آغاز این تحقیق، ایده بکارگیری یک ماتریس دوران سه‌بعدی با هدف امکان ایجاد چرخش بردارهای نرمال سطح حول هر سه محور از سیستم‌مختصات سه‌بعدی در دستورکار قرار داشت. پیاده‌سازی این ایده نشان داد که به دلیل وجود GBRA در بازسازی سه‌بعدی، برآورد زاویای چرخش حول محورهای اول و دوم در بیشتر مواقع به کندی (با تعداد تکرارهای زیاد) و یا به شکل نادرست اتفاق می‌افتد. به عبارت بهتر، فضای جواب محدودی در هنگام استفاده از ماتریس دوران سه‌بعدی وجود نداشته و این موضوع احتمال شناور شدن روند همگرایی

مراجع

- [13] Wei, M., Song, Z., Nie, Y., Wu, J., Ji, Z., Guo, Y., Xie, H., Wang, J. and Wang, F.L., "Normal-Based Bas-Relief Modelling via Near-Lighting Photometric Stereo," Computer Graphics Forum, Vol. 39, 2020, pp. 204–219, DOI: [10.1111/cgf.13754](https://doi.org/10.1111/cgf.13754).
- [14] Ma, L., Guo, S., Pei, X., Tang, L. and Qian, R. "An efficient calibration model for fringe projection profilometry using inclined Lambertian plane based on photometric stereo," Measurement, Vol. 212(112684), 2023, DOI: [10.1016/j.measurement.2023.112684](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112684)
- [15] Horowitz, I. and Kiryati, N., "Depth from gradient fields and control points: Bias correction in photometric stereo," Image and Vision Computing, Vol. 22(9), 2004, pp. 681–694, DOI: [10.1016/j.imavis.2004.01.005](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.01.005)
- [16] Yuille, A., Snow, D., Epstein, R. "Determining Generative Models of Objects Under Varying Illumination: Shape and Albedo from Multiple Images Using SVD and Integrability," International Journal of Computer Vision, Vol. 35, pp. 203–222, 1999, DOI: [10.1023/A:1008180726317](https://doi.org/10.1023/A:1008180726317).
- [17] Chen, G., Han, K., Shi, B., Matsushita, Y. and Wong, K. Y. K., "Self-calibrating deep photometric stereo networks," In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019, pp. 8739–8747, DOI: [10.1109/CVPR.2019.00894](https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00894).
- [18] Chen, G., Han, K., Shi, B., Matsushita, Y. and Wong, K. Y. K., "Deep photometric stereo for non-lambertian surfaces," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 44(1), pp. 129–142, 2020, DOI: [10.1109/TPAMI.2020.3005397](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3005397).
- [19] Logothetis, F., Mecca, R., Budvytis, I. and Cipolla, R., "A CNN Based Approach for the Point-Light Photometric Stereo Problem," International Journal of Computer Vision, Vol. 131, pp. 101–120, 2023, DOI: [10.1007/s11263-022-01689-3](https://doi.org/10.1007/s11263-022-01689-3).
- [20] Yang, R., Wang, Y., Liao, S. and Guo, P., "DPPS: A deep-learning based point-light photometric stereo method for 3D reconstruction of metallic surfaces," Measurement, Vol. 210(112543), 2023, DOI: [10.1016/j.measurement.2023.112543](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112543)
- [21] Ju, Y., Lam, K., Xie, W., Zhou, H., Dong, J., Shi, B., "Deep Learning Methods for Calibrated Photometric Stereo and Beyond: A Survey", arXiv, 2022, DOI: [10.48550/arXiv.2212.08414](https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.08414).
- [22] Yang, W., Chen, G., Chen, Ch., Chen, Zh., Wong, K. K., "PS-NeRF: Neural Inverse Rendering for Multi-view Photometric Stereo," arXiv, 2022, DOI: [10.48550/arXiv.2207.11406](https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.11406).
- [23] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications, Wiley Publishing, 2007.
- [24] Belhumeur, P. N., Kriegman, D. J. and Yuille, A. L., "The bas-relief ambiguity," Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and
- [1] Ackermann, J. and Goesele, M., "A Survey of Photometric Stereo Techniques," Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision: Vol. 9: No. 3–4, pp. 149–254, 2015, DOI: [10.1561/06000000065](https://doi.org/10.1561/06000000065).
- [2] McGlone, J. Chris, *Manual of Photogrammetry – Sixth Edition*, ASPRS, 2013.
- [3] Karami, A., Menna, F. and Remondino, F., "Combining Photogrammetry and Photometric Stereo to Achieve Precise and Complete 3D Reconstruction," Sensors, Vol. 22(8172), 2022, DOI: [10.3390/s22218172](https://doi.org/10.3390/s22218172).
- [4] Zhang, R., Tsai, P.S., Cryer, J. E. and Shah, M., "Shape-from-shading: a survey," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21(8), Aug. 1999, pp. 690–706, DOI: [10.1109/34.784284](https://doi.org/10.1109/34.784284).
- [5] Zhang, Y., Gibson, G., Hay, R., Bowman, R.W. and Padgett, P. E., "A fast 3D reconstruction system with a low-cost camera accessory," Scientific Reports, Vol. 5(10909), 2015. DOI: [10.1038/srep10909](https://doi.org/10.1038/srep10909).
- [6] Hayakawa, H., "Photometric stereo under a light source with arbitrary motion," Journal of Optical Society of America A, Vol. 11, 3079–3089, 1994.
- [7] Basri R. and Jacobs, D., "Photometric stereo with general, unknown lighting," Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, Kauai, HI, USA, 2001, DOI: [10.1109/CVPR.2001.990985](https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990985).
- [8] Xie, W., Nie, Y., Song, Z. and Wang, C. C. L., "Mesh-Based Computation for Solving Photometric Stereo With Near Point Lighting," IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 39, no. 3, pp. 73–85, 2019, DOI: [10.1109/MCG.2019.2909360](https://doi.org/10.1109/MCG.2019.2909360).
- [9] Xie, W., Dai, Ch. and Wang, C. C. L., "Photometric stereo with near point lighting: A solution by mesh deformation," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, USA, 2015, pp. 4585–4593, DOI: [10.1109/CVPR.2015.7299089](https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299089).
- [10] Chen, Q., Peng, N., Lu, N., Tao, W., Zhao, H., "Mesh-Based Semi-Calibrated Photometric Stereo with Near Quasi Point Lights," Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2022, DOI: [10.1007/s12204-022-2414-9](https://doi.org/10.1007/s12204-022-2414-9).
- [11] Shi, B., Matsushita, Y., Wei, Y., Xu, C. and Tan P., "Self-calibrating photometric stereo," IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco, CA, USA, 2010, pp. 1118–1125, DOI: [10.1109/CVPR.2010.5540091](https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5540091).
- [12] Angelopoulou, M.E., Petrou, M., "Uncalibrated flatfielding and illumination vector estimation for photometric stereo face reconstruction," Machine Vision and Applications, Vol. 25(5), 2014, pp. 1317–1332, DOI: [10.1007/s00138-014-0609-2](https://doi.org/10.1007/s00138-014-0609-2).

- Pattern Recognition, San Juan, PR, USA, 1997, pp. 1060–1066, DOI: [10.1109/CVPR.1997.609461](https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609461).
- [25] Ji, Z., Sun, Xi., Zhang, Y. W., Ma, W. and Wei, M., "Normal manipulation for bas-relief modeling," Graphical Models, Vol. 114(101099), 2021, DOI: [10.1016/j.gmod.2021.101099](https://doi.org/10.1016/j.gmod.2021.101099).
- [26] Chen, Q., Ren, Y., Zhao, Z., Tao, W. and Zhao, H., "Error Analysis of Photometric Stereo with Near Quasi-Point Lights," Computer Graphics Forum, Vol. 41(6), pp. 149–165, 2022, DOI: [10.1111/cgf.14516](https://doi.org/10.1111/cgf.14516).
- [27] Ghilani, C., Wolf, P., 2006. Adjustment Computations Spatial Data Analysis, fourth ed. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.
- [28] Hernandez, C., Vogiatzis, G., Brostow, G. J., Stenger, B. and Cipolla, R., "Non-rigid Photometric Stereo with Colored Lights," IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, Brazil, 2007, pp. 1–8, DOI: [10.1109/ICCV.2007.4408939](https://doi.org/10.1109/ICCV.2007.4408939).



علیرضا صفدری نژاد دانش‌آموخته مقطع دکترای مهندسی نقشه‌برداری در گرایش سنجش از دور از دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی است. ایشان در حال حاضر عضو هیئت علمی گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه تفرش بوده و علاقمندی‌های پژوهشی وی فتوگرامتری، تناظریابی خودکار، تشخیص الگو در فضاها با ابعاد بالا و سری‌های زمانی است.



سیدعبدالله کیانزاد تجنکی دانش‌آموخته مقطع دکترای مهندسی نقشه‌برداری در گرایش فتوگرامتری از دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی است. ایشان در حال حاضر عضو هیئت علمی گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه تفرش بوده و علاقمندی‌های پژوهشی وی فتوگرامتری، مدلسازی سه‌بعدی از طریق اسکن‌های لیزری و طبقه‌بندی داده‌های لیدار هوایی است.



عطیه گنجعلی دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری در گرایش فتوگرامتری از دانشگاه تفرش است. علاقمندی‌های پژوهشی وی فتوگرامتری، ویدئوگرامتری و توسعه‌ی راهکارهای خودکار به‌منظور تولید ویدئوهای سه‌بعدی است.