نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال پنجم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۶

Vol.5, No.4, Winter 2018

۵۳-٦٦

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

بهبود دقت اسکنر سه‌بعدی نگاشت فرینج با استفاده از روش فتومتریک استریو

علی ابذل [1*]، محمد سعادت سرشت [2]

۱- دانشجوی دکتری گرایش فتوگرامتری دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹

چکیده

روش اندازه‌گیری نگاشت فرینج با شیفت فاز از یک الگوی نوری بهره می‌گیرد که در یک راستا توسط درجات خاکستری بصورت سینوسی کددهی و در جهت دیگر تکرار شده است. در این مقاله به بررسی اثرات هندسی سطح اشیاء بر دقت بازسازی سه بعدی توسط این روش پرداخته می‌شود. خطای انعکاس داخلی در سطوح مقعر، تغییرات شدید ویژگی‌های بازتابشی سطح در لبه‌های تیز و کاهش نسبت سیگنال به نویز در سطوح شیب دار از جمله تاثیرات هندسی سطوح بر دقت بازیابی فاز در روش نگاشت فرینج می‌باشد. سامانه ارائه شده در این مقاله از روش فتومتریک استریو برای طبقه بندی پیکسل‌های تصویر بر اساس خصوصیات هندسی آنها برای انتخاب جهت مناسب الگو در روش نگاشت فرینج استفاده می‌کند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که این راهکار ساده و سریع، توانسته است تا دو برابر (از ۵۸ میکرون به ۲۸ میکرون) دقت بازسازی سه بعدی سطح را بخصوص در لبه‌ها، سطوح شیب دار و مقعر افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها: نگاشت فرینج با شیفت فاز، فتومتریک استریو، خطای انعکاس داخلی.

* نویسنده مکاتبه کننده: دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه تهران

تلفن : ۸۸۰۰۸۸۴۱

Email: ali.abzal@ut.ac.ir

[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

۱- مقدمه

اندازه‌گیری سه بعدی یکی از حوزه‌های مورد توجه صنایع مختلف نظیر کنترل کیفیت، مهندسی معکوس، پزشکی و غیره می‌باشد. در سالهای اخیر در مقایسه با روش‌های تماسی مکانیکی روش‌های تصویر مبنای فعال رواج قابل توجهی یافته اند. تکنیک مثلث بندی با خطوط لیزر [۱] و یا استفاده از نور سفید [۲] برای بازسازی سطح عوارض از جمله این روش‌ها می‌باشند. در میان این روش‌ها، روش نگاشت فرینج[1] به‌روش شیفت فاز به‌دلیل حدتفکیک بالا و دقت بالای نتایج بیش از سایر روش‌های نور ساختاریافته مورد توجه کاربران قرار گرفته است [۳]. اما در روش شیفت فاز، استخراج فاز با اندکی نویز فرکانس بالا همراه می‌باشد که موجب می‌گردد بخشی از جزئیات کوچک از دست برود [۴]. تلفیق داده‌های این روش با روش‌هایی که نتایج پایدارتری نسبت به نویز فرکانس بالا دارند می‌تواند داده‌های دقیق تری را نتیجه دهد. به‌همین علت داده‌های به‌دست آمده از روش فتومتریک استریو[2] برای تلفیق با داده‌های مثلث‌بندی با نور ساخت یافته توسط محققین پیشنهاد شده است [۵، ۶، ۷ و ۸]. تکنیک فتومتریک استریو برای اولین بار توسط [۹] معرفی گردید. در این روش با استفاده از تصویربرداری ثابت از یک منظر بهمراه منابع نوری از جهات مختلف به محاسبه بردارهای نرمال می‌پردازد. اما خطای فرکانس پایین در نتایج این داده کاملا مشهود است. این خطا ناشی از عوامل بسیاری نظیر جنس سطح، بازتابش سطح، رنگ، و تابع دو طرفه بازتاب[3] می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. به همین علت در تکنیک‌های هیبریدی از داده‌های مثلث بندی اسکنر به‌عنوان داده هندسی مبنا استفاده می‌شود. در عین حال اگر فرض شود داده‌های اسکن نیز حامل خطای قابل توجهی باشد، این خطا به محصول نهایی منتقل خواهد شد.

روش‌های مبتنی بر نگاشت فرینج برای اندازه‌گیری سطوح ضعف‌هایی دارند که بخشی از آن مربوط به خصوصیات فیزیکی سطح عارضه و بخش دیگر به خصوصیات هندسی عارضه مربوط می‌شود. بافت، رنگ، براقی سطح که باعث تغییر در بازتابش می‌شود، خصوصیات فیزیکی عارضه هستند که موجب اختلالاتی در شدت الگوی نوری بازتابش شده از سطح عارضه می‌شود. همچنین سطوح مقعر، لبه‌های محدب تیز و نیز سطوح شیب دار عواملی هستندکه موجب کاهش دقت داده های روش نگاشت فرینج می‌گردند. در روش پیشنهادی توسط [۱۲]، برای کاهش اثر رنگ سطح عارضه و جذب نور پروژکتور توسط نواحی تیره از طیف مادون قرمز بهره گرفته شده است که موجب افزایش هزینه تمام شده سیستم گردد. همچنین [۱۳] برای کاهش تداخل رنگ های الگوی نگاشت یافته با رنگ عارضه روشی را برای انتخاب نوارهای رنگی یک الگوی نوری ارائه نموده است. برای جلوگیری از سطوح براقی که موجب ایجاد نواحی اشباع در تصویر می‌گردند، [۱۴] از فیلترهای پلاریزاسیون بهره گرفته است که موجب می‌گردد از خطای انعکاس داخلی در سطوح مقعر نیز جلوگیری می‌شود. اما استفاده از چندین فیلتر پلاریزاسیون مستلزم تکرار فرایند اندازه‌گیری و نیز هزینه بر نمودن سامانه نهایی می‌باشد. همچنین در [۱۵، ۱۶ و ۱۷] درجات خاکستری در نواحی که بواسطه سیقلی بودن سطح پیکسل های اشباع بوجود آید، با تغییر محدوده دینامیکی توسط دوربین و یا نگاشت توسط پروژکتور تعدیل می‌گردد. بنابراین میزان نسبت سیگنال به نویز در این نواحی افزایش می‌یابد. این روش اگرچه بهبود قابل توجهی در نتایج ایجاد می‌کند اما مستلزم محاسبات برای یافتن نواحی اشباع در تصویر و نیز تغییرات سخت افزاری در دوربین یا پروژکتور است که هم هزینه محاسباتی و هم هزینه سخت افزاری را

[1] Fringe projection technique
[2] Photometric stereo
[3] BRDF

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از الگوهای خارج از فوکوس [۱۸] توسط محققین برای مهار خطاهای ناشی از خصوصیات فیزیکی سطح در بازتابش الگوی نوری پیشنهاد شده اند. همچنین برای کاهش خطای ناشی از خصوصیات هندسی استفاده از الگوی نوری با زاویه چرخش بهینه پیشنهاد توسط [۱۹ و ۲۰] شده است. اگر چه محاسبه این زاویه بهینه خود متضمن صرف زمان قابل توجهی خواهد بود، استفاده از الگوی نوری با یک زاویه مشخص برای تمام پیچیدگی سطح یک عارضه با جزئیات بالا ممکن است کافی نباشد. از سوی دیگر الگوی فرینج در یک جهت کددهی شده است و لازم است برای تناظریابی دو بعدی از خط اپی پلار در هندسه استریو استفاده شود. بنابراین در صورتیکه جهت الگوی بدست آمده با خط اپی پلار هم راستا باشد، خطای بالای تناظریابی نتیجه را به‌شدت تحت تاثیر خود قرار خواهد داد.

ایده اصلی این مقاله انتخاب جهت مناسب (افقی یا عمودی) الگوی نوری فرینج برای هر پیکسل تصویری می‌باشد تا خطاهای بوجود آمده بواسطه هندسه سطح عارضه به میزان قابل توجهی کاهش یابد. با استفاده از داده‌های نرمال بدست آمده توسط تکنیک فتومتریک استریو می‌توان پیکسل‌های متعلق به سطح عارضه را به کلاس‌های سطوح شیب دار، نواحی با انحنای بالا و لبه‌ها طبقه‌بندی نمود. همچنین برای هر ویژگی هندسی یک معیار برای انتخاب جهت الگوی افقی یا عمودی تعیین می‌گردد. در نهایت مختصات سه بعدی برای تمام پیکسل‌های سطح عارضه بر اساس اطلاعات بازیابی شده توسط الگوهای فرینج تابیده شده محاسبه می‌گردد. اضافه شدن سامانه فتومتریک استریو به روش اندازه‌گیری سه بعدی با نگاشت فرینج تنها به تعداد محدودی دیود نوری ارزان قیمت که در اطراف دوربین تعبیه شده است منجر می‌شود. همچنین به تعداد همان منابع نوری به تصاویر مورد نیاز برای اندازه‌گیری تصویر اضافه می‌گردد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد این تلفیق توانسته خطاهای ناشی از هندسه عارضه بر روش نگاشت الگوی فرینج را کاهش قابل توجهی دهد.

در بخش بعدی اثرات زاویه الگوی فرینج بر اندازه‌گیری سطوح عوارض با جزئیات هندسی مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین در بخش سه، روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. تعیین معیارهای طبقه‌بندی در بخش چهار شرح داده شده و بخش پنج، نتایج آزمایشات ارائه می‌گردد. در انتها نیز بخش شش به نتیجه‌گیری اختصاص می‌یابد.

۲- طرح مسئله

دقت محاسبه فاز در روش نگاشت فرینج وابستگی قابل توجهی به هندسه سطح عارضه و جهت نوارهای الگو دارد. در این بخش سه وضعیت هندسی که موجب بروز خطا در محاسبات فاز توسط روش نگاشت فرینج می‌گردد، بررسی می‌شود. نواحی مقعر، لبه‌های تیز و یا پله‌ای و سطوح با شیب بالا از جمله خصوصیات هندسی سطوح هستند که در مواجه با جهت‌های مختلف الگوی تابانده شده دقت‌های متفاوتی از اسکن را نتیجه می‌دهد. همچنین در ادامه نشان داده می‌شود که با انتخاب جهت مناسب عمودی یا افقی الگو بهبود قابل توجهی در داده‌ها حاصل شده است. سطوح مقعر باعث ایجاد خطای انعکاس داخلی[1] می‌گردد که ناشی از نوردهی غیر مستقیم به سطح می‌باشد. این عامل منجر به خطا در کددهی پیکسل‌ها و در نتیجه محاسبه فاز می‌شود. شکل (۱) تاثیر جهت الگو را بصورت بصری در دقت اندازه‌گیری یک ناحیه مقعر ایجاد شده با دو صفحه روبروی هم با زاویه ۶۶ درجه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در نواحی عمیق تر تعقر خطای ناشی از انعکاس داخلی در محاسبه فاز و در نهایت مختصات سه بعدی نقاط بیشتر می‌باشد.

تغییرات شدید در جهت بردار نرمال در لبه‌های تیز و یا

[1] Inter-reflection

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-13]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

ناپیوستگی سطوح در لبه‌های پله ای موجب خطا در اندازه‌گیری توسط روش نگاشت فرینج می‌گردد. همچنین شکل (۱) تفاوت داده‌های سه بعدی به‌دست آمده از دو الگوی افقی و عمودی در لبه‌های تیز محدب را نشان می‌دهد. علت وجود خطا در سطوح ناپیوسته ایجاد اختلال در فرایند بازیابی فاز[1] می‌باشد. این اختلال ناشی از تغییرات شدید درجات خاکستری در مرز لبه است که بواسطه تغییر شدید جهت بردار نرمال در راستای عمود بر نوارهای الگو رخ می‌دهد. در شکل (۱-ح) به وضوح مشاهده می‌شود که خطای مذکور در داده‌های سه بعدی مربوط به حالتی که الگو در جهت مخالف تابانده شده است، تقریبا وجود ندارد.

در صورتی که نرمال بر سطح منطبق بر محور نوری پروژکتور باشد، الگوی تابیده شده به سطح در متراکم ترین وضعیت خود ظاهر می‌شود و بیشترین نسبت سیگنال به نویز در داده‌های فاز را نتیجه خواهد داد. سطوح با شیب زیاد که نرمال آن با محور نوری پروژکتور زاویه چشم گیری می‌سازد باعث کشیدگی الگو در آن راستا می‌گردد. اگر راستای شیب در راستای عمود بر نوارهای الگوی فرینج باشد باعث کاهش کنتراست الگو شده و کاهش نسبت سیگنال به نویز داده‌های فاز در روش نگاشت فرینج را به دنبال خواهد داشت(شکل ۲-ب). شکل (۲-د) نشان می‌دهد که چگونه الگوی تابیده شده در جهت افقی کنتراست بهتر و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز بهتری دارد.

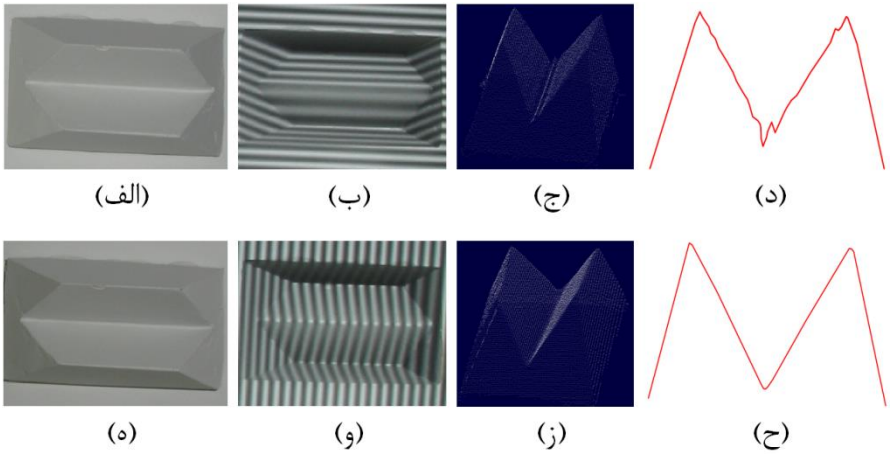
برای ارزیابی تاثیر جهت الگو در سطوح شیب دار، یک صفحه به داده‌های سه بعدی صفحه ای محاسبه شده توسط الگوهای افقی و عمودی برازش داده شده است. مقدار خطای کمترین مربعات[2] خروج از صفحه که نشانگر نویز اندازه‌گیری است در حالتی که نوارهای الگوی تابیده شده عمود بر جهت شیب می‌باشد ۰/۰۵۸ میلیمتر و در حالتی که الگو در راستای شیب باشد به ۰/۰۲۸ میلیمتر می‌رسد که حدود دو برابر بهبود دقت را نشان می‌دهد.

۳- سامانه پیشنهادی

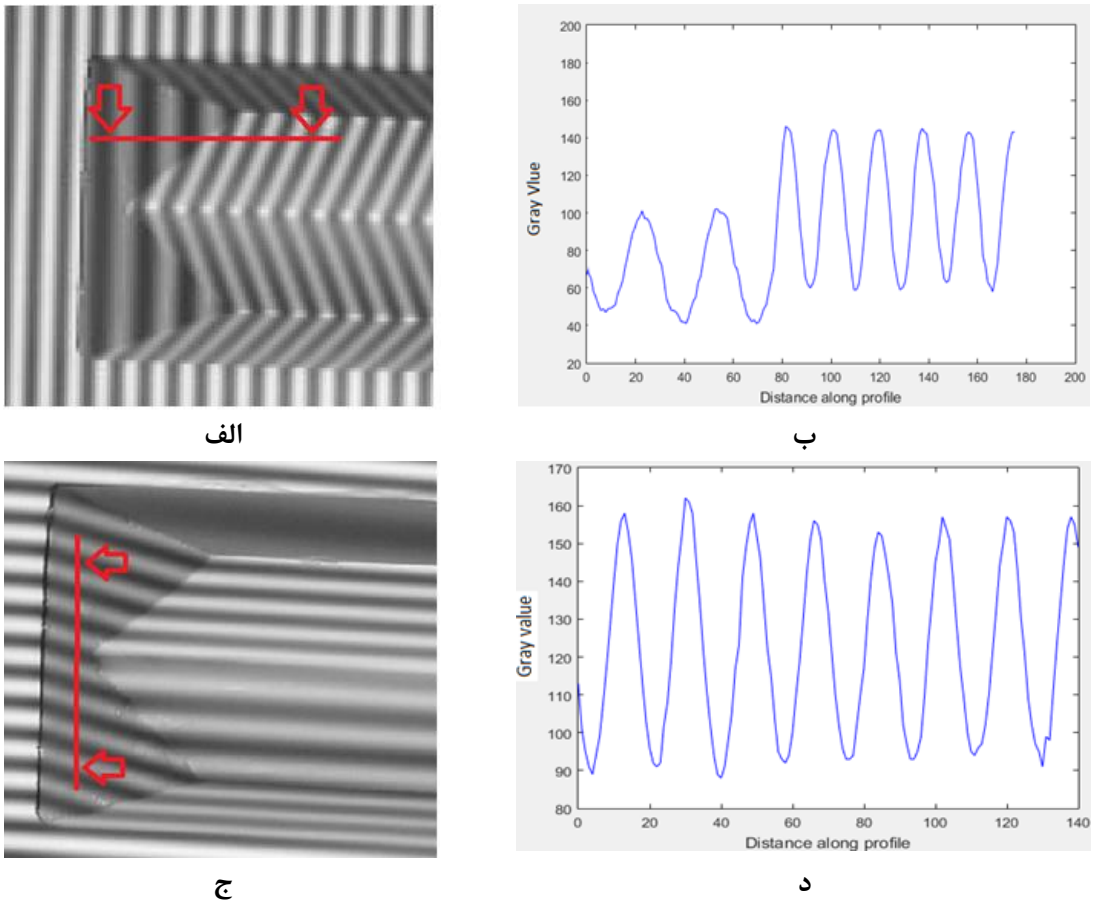
ساختار کلی سامانه پیشنهادی در شکل (۳) مشاهده می‌شود. این اسکنر شامل یک دوربین کنون *sx110* و یک پروژکتور رقومی *DLP* با یک باز منطقی در دو راستای محور X و محور Y برای مثلث بندی استریو می‌باشد که در شکل (۳-الف) در ناحیه قرمز رنگ قرار گرفته است. روش نگاشت فرینج از طریق شیفت فاز برای محاسبه فاز هر پیکسل دوربین از رابطه های (۱ و ۲) استفاده می‌کند. مقدار فاز مطلق هر پیکسل توسط روش بازیابی فاز طول موج چندگانه[3] محاسبه شده است [۲۱].پارامترهای توجیه داخلی و توجیه خارجی دوربین و پروژکتور به‌عنوان یک سامانه مثلث بندی استریو توسط جعبه ابزار توسعه یافته توسط بوگت[4] [۲۲]، محاسبه شده است. برای تناظر یابی میان پیکسل‌های دوربین و پروژکتور از فاز مطلق بازیابی شده بعلاوه هندسه اپی پلار بهره گرفته شده است. بنابراین مختصات سه بعدی هر نقطه از سطح شیئ با استفاده از مثلث بندی استریو بین دوربین و پروژکتور محاسبه می‌گردد. برای حذف نواحی سایه از پارامتر B در رابطه (۳) بهره گرفته شده است [۲۳]. دوربین شش تصویر از الگوی فرینج را ثبت می‌کند و برای کاهش خطای غیر خطی بر شدت درجات خاکستری پروژکتور در محاسبه فاز، از الگوریتم سه مرحله‌ای دوگانه[5] استفاده می‌شود [۲۴]. برای بازیابی فاز نیز ۲۱ تصویر در هر کدام از جهت الگوها و نیز ۶ تصویر نیز برای روش فتومتریک استریو اخذ می‌گردد. زمان کلی برای اسکن هر صحنه ۳۵ ثانیه می‌باشد.

[1] Phase unwrapping
[2] Root Mean Square Error
[3] Multiple wavelength
[4] Bouguet
[5] Double three step method

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-01-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]



شکل ۱: اندازه‌گیری فاز در روش نگاشت فرینج توسط الگوی افقی و عمودی. (الف) تصویر شیئ مورد آزمون. (ب) یکی از تصاویر با الگوی افقی. (ج) ابر نقطه سه بعدی که توسط الگوی افقی محاسبه شده. (د) مقطع عرضی از (ج). (ه) تصویر از همان شیئ ولی با نوردهی متفاوت. (و) یکی از تصاویر با الگوی عمودی. (ز) ابر نقطه سه بعدی که توسط الگوی عمودی محاسبه شده. (ح) مقطع عرضی از (ز).



شکل ۲: افزایش نسبت سیگنال به نویز توسط تغییر جهت الگو. (الف) یکی از تصاویر شامل الگوی عمودی. (ب) مقطع عرضی در راستای خط قرمز رنگ در (الف). (ج) یکی از تصاویر شامل الگوی افقی. (د) مقطع عرضی در راستای خط قرمز رنگ در (ج).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

رابطه (۱)

$$I_i = A_{(x,y)} + B_{(x,y)} \cos\left(\varphi_{(x,y)} + \frac{2\pi i}{N}\right), \quad i = 1,\ldots,N$$

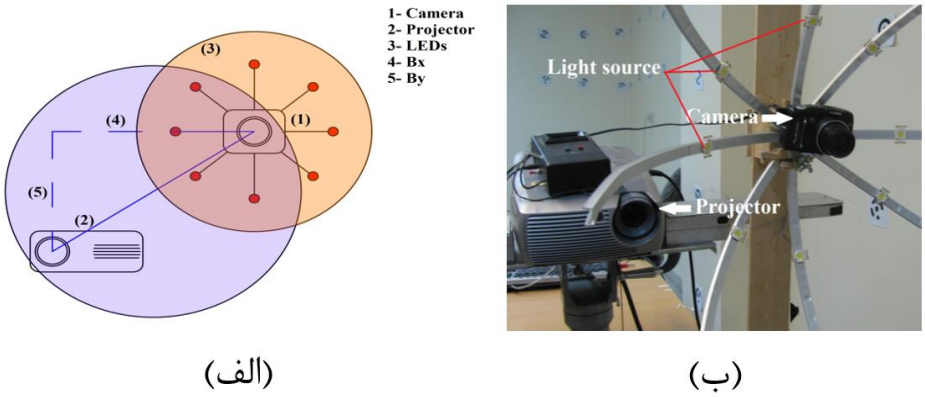
در معادله بالا I_i درجات خاکستری تصویر می‌باشد، A درجه خاکستری پس زمینه، B درجه خاکستری مدولاسیون، φ مقدار فازی است که در معادله (۲) محاسبه می‌شود و $2\pi i / N$ میزان شیفت فاز می‌باشد.

رابطه (۲)

$$\varphi_{(x,y)} = \arctan\left[\sum_{i=1}^{N} I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \Big/ \sum_{i=1}^{N} I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right)\right]$$

رابطه (۳)

$$B_{(x,y)} = \frac{2}{N}\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right)\right]^2 + \left[\sum_{i=1}^{N} I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right)\right]^2}$$



شکل ۳: ساختار سامانه اسکنر. (الف) ساختار شماتیک سامانه تلفیقی. (ب) تصویر سامانه واقعی.

برای محاسبه بردار نرمال سطح شیئ به روش فتومتریک استریو از تعدادی منابع نوری در اطراف دوربین استفاده شده است که در شکل (۳-الف) در ناحیه آبی رنگ قرار دارد. روش فتومتریک استریو به‌عنوان یک روش ارزان و دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار پایین [۶] به روش اندازه‌گیری نگاشت فرینج اضافه شده است تا بتوان ویژگی‌های هندسی سطح عارضه را به‌دست آورد. بر اساس مبانی روش فتومتریک استریو، درجات خاکستری پیکسل‌های تصویر از یک سطح لامبرتین[1] به زاویه نور فرودی و آلبدوی[2] سطح وابسته است. مقدار کسینوس‌هادی نور فرودی با حاصلضرب داخلی نرمال بر سطح و راستای منبع نوری برابر است (رابطه ۴). در این معادله بایستی جهت منابع نوری معلوم باشد که از یک گوی براق برای تعیین آن بهره گرفته شده است[۲۵].

رابطه (۴)

$$I_i = k_d s_i^T n \Rightarrow k_d n = S^{-1} I, \qquad n = \frac{S^{-1}}{\left\| S^{-1} I \right\|}$$

در معادله بالا I درجه خاکستری یک پیکسل تصویری، k_d مقدار آلبدو، S جهت منبع نوری، n بردار نرمال سطح و i تعداد تصاویر روشن شده توسط منابع نوری می‌باشند. طبق رابطه (۴) حداقل تصاویر برای محاسبه بردار نرمال سطح سه عدد می‌باشد. اما برای حذف نواحی سایه و اشباع که موجب خطا در محاسبه بردار نرمال می‌شوند از روش پیشنهادی توسط [۲۶] با شش منبع نوری استفاده شده است.

مدل خطی فتومتریک استریوی بکار گرفته شده در این

[1] Lambertian
[2] Albedo

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

تحقیق با پیش فرض سطوح لامبرتین ساده ترین مدل می‌باشد و پارامترهای مختلفی نظیر انعکاس داخلی، جنس سطوح، بازتابش سطح و تابع توزیع دوطرفه بازتاب بر نتایج آن تاثیر می‌گذارند. افرادی نیز برای کاهش اثر این پارامترها مدل‌های پیچیده تری را پیشنهاد نموده‌اند [۱۰ و ۱۱]. اما از یک سو همان‌طور که در بخش بعدی اشاره خواهد شد، روش فتومتریک استریو تنها برای انتخاب جهت الگوی مناسب فرینج استفاده می‌شود و داده‌های آن هیچگاه بطور مستقیم با داده‌های مثلث‌بندی استریو ادغام نخواهد شد. از سوی دیگر خطاهای اشاره شده آن‌قدر قابل توجه نیستند که تاثیر آن منجر به انتخاب اشتباه جهت الگو گردد. در بخش بعدی نحوه استفاده از داده‌های فتومتریک استریو برای انتخاب الگوی مناسب تشریح می‌گردد.

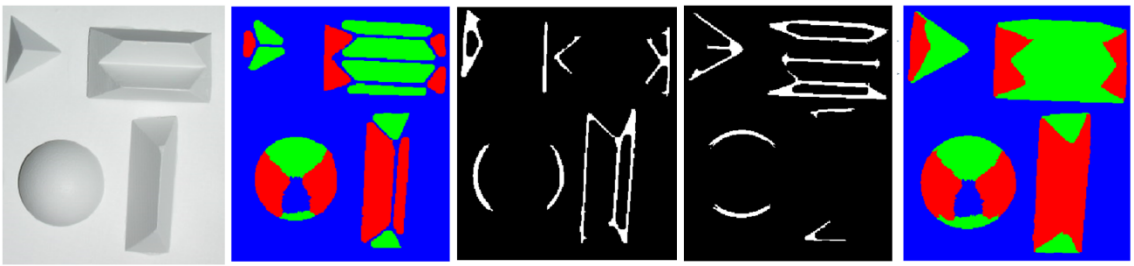
۴- طبقه بندی هندسی سطح شیئ بر اساس نرمال

برای انتخاب جهت مناسب الگوی فرینج، از خصوصیات هندسی سطح عوارض برای هر پیکسل تصویری توسط روش فتومتریک استریو استفاده می‌شود. داده حاصل از روش فتومتریک استریو نرمال سطوح می‌باشد. این داده‌های نرمال برای هر پیکسل تصویری محاسبه می‌شود که در دو راستای محور x، (Nx) و محور y، (Ny) می‌باشد. می‌توان سطوح با شیب بالا را از این داده‌ها استخراج نمود. بنابراین پیکسل‌هایی که شیب قابل توجهی در دو راستای محورها داشته باشند$(|Nx|>0.1, |Ny|>0.1)$ از سایر پیکسل‌ها جدا می‌گردند. با اعمال یک اپراتور مشتق بر روی داده‌های نرمال می‌توان انحنای سطح در دو راستای محور x، (Cx) و محور y، (Cy) را نیز برای هر پیکسل محاسبه نمود [۲۷]. بنابراین می‌توان سطوح با انحنای بالا در دو راستای محور نیز از سایر پیکسل‌ها جدا نمود $(|Cx|>0.1, |Cy|>0.1)$. البته ممکن است تعدادی از پیکسل‌ها که در کلاس سطوح با شیب زیاد قرار گرفته‌اند نیز در کلاس سطوح با انحنای زیاد نیز طبقه بندی گردند که البته بدلیل راستای یکسان برای استراتژی انتخاب جهت الگو تفاوتی نخواهد نمود. بر اساس نتایج آزمون‌هایی که در بخش ۲ به آن اشاره شد استراتژی محاسبه سه بعدی نقاط در روش نگاشت فرینج با شیفت فاز به صورت زیر می‌باشد:

- نواحی با مقدار نرمال بالا در راستای محور x، $(Nx>0.1)$ و انحنای بالا $(Cx>0.1)$ بایستی توسط الگوی فرینج افقی محاسبه به مختصات سه‌بعدی گردند.
- نواحی با مقدار نرمال بالا در راستای محور y، $(Ny>0.1)$ و انحنای بالا $(Cy>0.1)$ بایستی توسط الگوی فرینج عمودی محاسبه مختصات سه‌بعدی گردند.
- نواحی با نرمال پایین و انحنای پایین در راستای دو محور $(Nx, Ny, Cx, Cy<0.1)$ بایستی توسط میانگین هر دو الگوی افقی و عمودی محاسبه مختصات سه بعدی گردند.

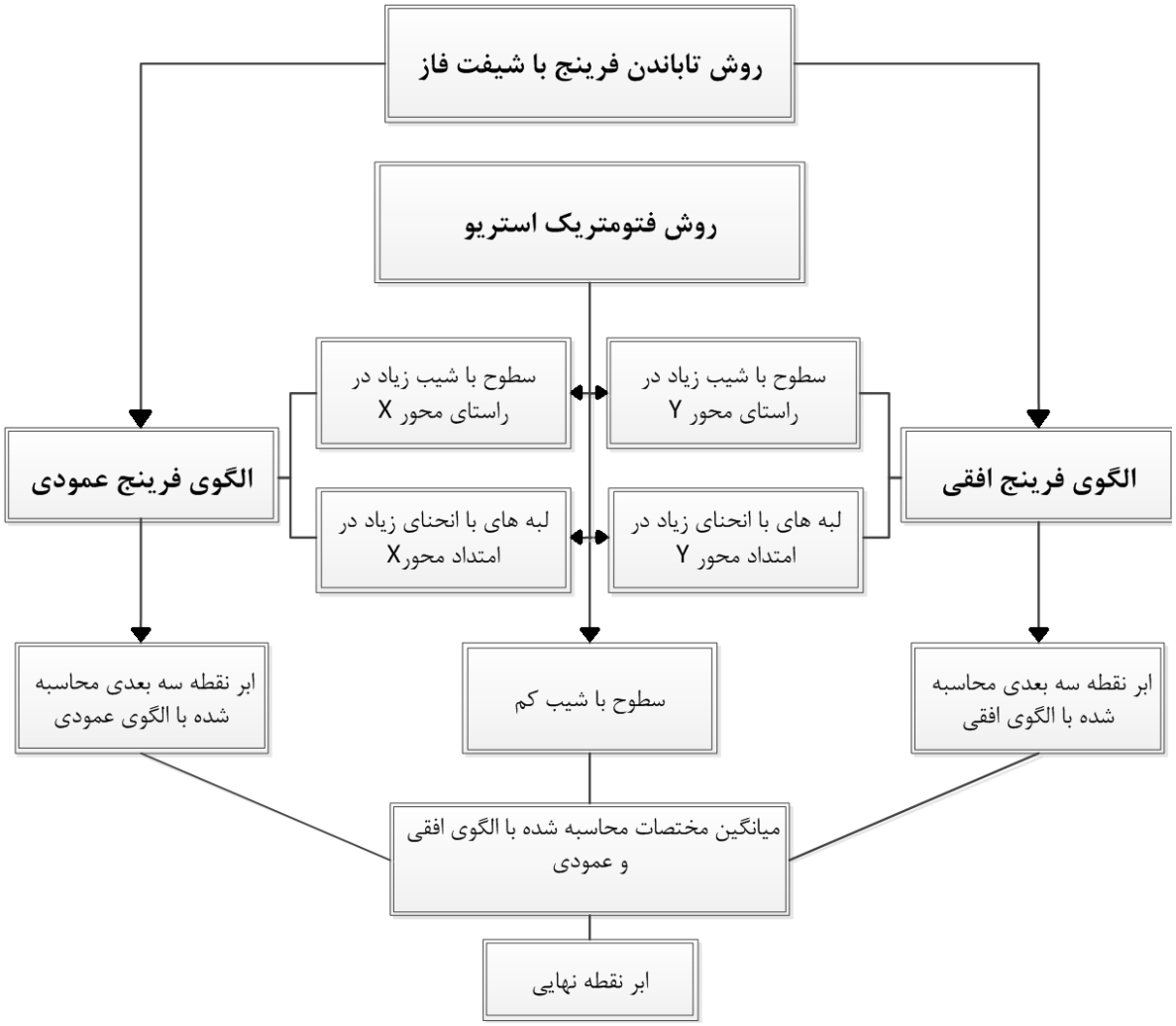
شکل (۵) روندنمای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. الگوریتم ارائه شده بر روی یک شیئ آزمون واقعی از جنس پلاستیک فشرده آزموده شده است. شکل (۴) نتایج طبقه‌بندی بر روی شیئ آزمون را با رنگ‌های مختلف نشان می‌دهد. بدیهی است که بخش مرکزی سطوح با انحنای بالا به‌طور اشتباه در طبقه سطوح با نرمال کم قرار بگیرد(شکل ۴-ب). چرا که جهت نرمال آن با محور نوری دوربین اختلاف چندانی ندارد. از این‌رو در ترتیب الگوریتم پیشنهادی، استخراج پیکسل‌های متعلق به انحنای بالا (شکل ۴-ج و د) نسبت به استخراج پیکسل‌های متعلق به نرمال بالا تقدم داده شده‌است تا پیکسل‌های انحنای بالا به اشتباه در طبقه پیکسل‌های با انحنای کم قرار نگیرند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]



(الف) (ب) (ج) (د) (ه)

شکل ۴: طبقه بندی هندسه سطح. (الف) تصویری اخذ شده از شیئ آزمون. (ب) طبقه بندی سطوح به سه کلاس شیب زیاد در جهت محور X، شیب زیاد در جهت محور Y و کم شیب. (ج) نواحی با انحنای بالا در راستای محور Y. (د) نواحی با انحنای بالا در راستای محور X. (ه) نتیجه طبقه بندی هندسی



شکل ۵: فرایند محاسبه ابر نقاط توسط سامانه اندازه‌گیری پیشنهادی

۵- آزمون‌ها و ارزیابی

توسط سامانه اسکنر پیشنهادی از شیء آزمون که در شکل (۶) نشان داده شده، ابر نقاط متراکم به‌دست آمده است. براحتی می‌توان خطای انعکاس

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

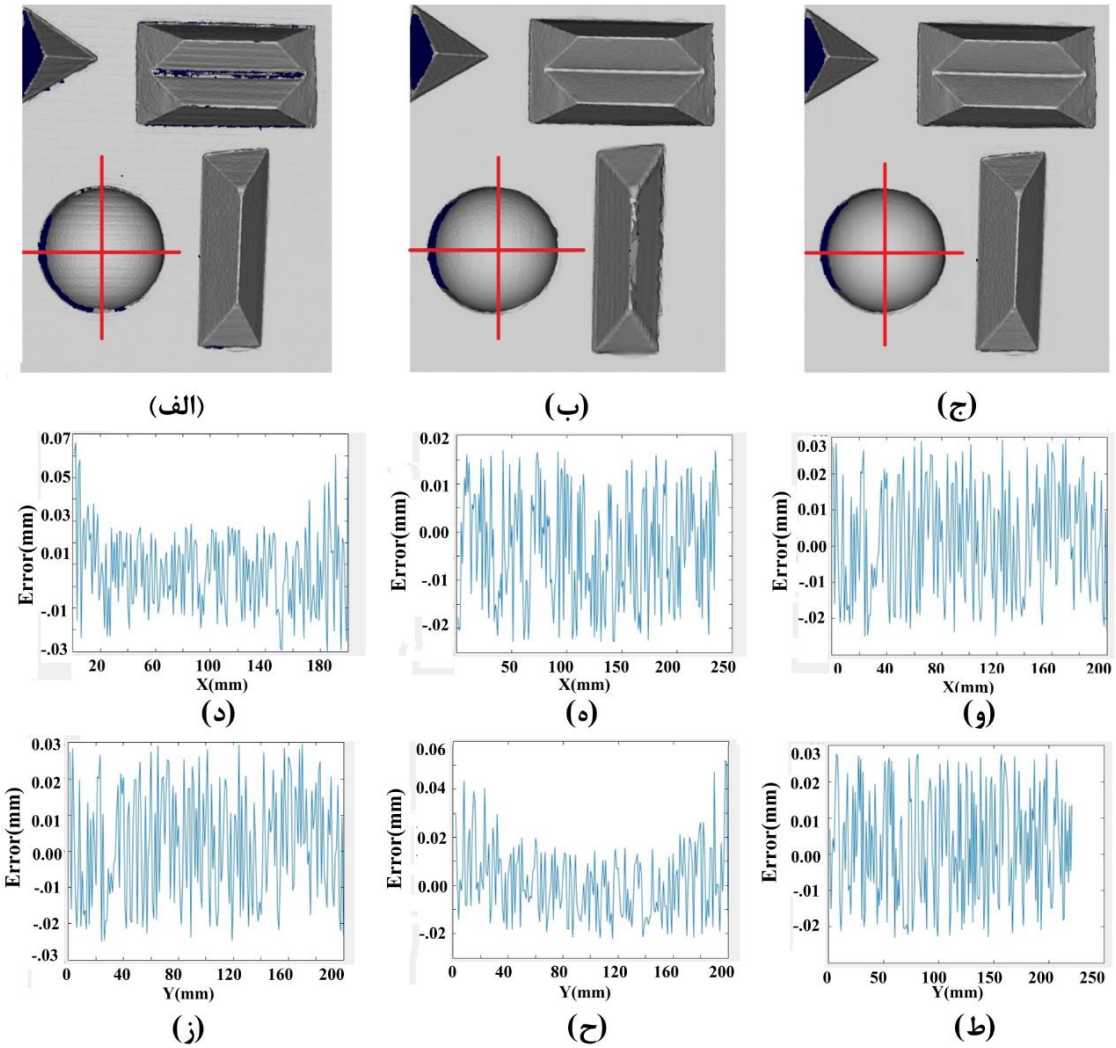
داخلی را در سطوح مقعر برای حالتی که توسط الگوی فرینج افقی اندازه‌گیری شده است، مشاهده نمود. همانطور در لبه‌ها و سطوح اسکن شده نویز قابل توجهی مشاهده می‌شود. درحالی که این نویز توسط الگوی عمودی اسکن شده، مشاهده نمی‌شود. اطلاعات راهنمایی که توسط روش فتومتریک استریو به‌دست آمده امکان انتخاب هوشمندانه را برای الگوهای افقی و عمودی فراهم می‌آورد. بنابراین می‌توان از مزایای اسکن توسط هر دو برای اندازه‌گیری بهره‌مند گردید(شکل ۶-ج). نیمکره ای که در شیئ آزمون قرار دارد برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی به‌کار گرفته شده است. مقاطع عرضی عمود برهم در این نیمکره که توسط الگوهای فرینج متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند با منحنی دایره ایده‌آل مقایسه می‌گردند. میزان خطای باقیمانده برای مقاطع افقی و عمودی مربوط به نیم کره‌ای که با الگوی افقی محاسبه شده است (شکل ۶-الف) به ترتیب ۵۸ میکرون و ۲۸ میکرون می‌باشد. همچنین میزان خطای باقیمانده برای مقاطع افقی و عمودی مربوط به نیم کره‌ای که با الگوی عمودی محاسبه شده است (شکل ۶-ب) نیز به ترتیب ۵۷ میکرون و ۲۸ میکرون می‌باشد. نیز علاوه بر کمتر بودن خطای باقی‌مانده‌ها در حالاتی که مقطع عرضی عمود بر راستای الگوی فرینج است، در طول این دو مقطع خطاها به‌صورت همگن توزیع شده اند و در جهت دیگر در نواحی انتهایی مقاطع به‌دلیل نزدیکی شیب سطح به راستای عمود الگوی فرینج نویز افزایش یافته است. در حالتی که توسط روش پیشنهادی شیئ آزمون اندازه‌گیری شده‌است، خطاها در هر دو مقطع افقی و عمودی همگن و برابر ۲۸ میکرون می‌باشد.

به‌منظور نشان دادن کارآیی روش پیشنهادی، یک شیئ با پیچیدگی هندسی اندازه‌گیری شده است. این شیئ یک مجسمه فرشته است که جزئیات بالایی دارد. تصویر حاوی پیکسل‌های طبقه بندی شده به لبه‌ها و شیب سطوح در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود. در شکل (۷-ج) و شکل (۷-د) نواحی نویزی لبه‌ها و سطوحی که با الگوی فرینج هم راستا شده‌اند با پیکان و دایره قرمز رنگ مشخص شده است. در حالی که نویزهای علامت‌گذاری شده در نتایج اندازه‌گیری توسط روش پیشنهادی مشاهده نمی‌شود شکل (۷-ه).

۶- نتیجه‌گیری

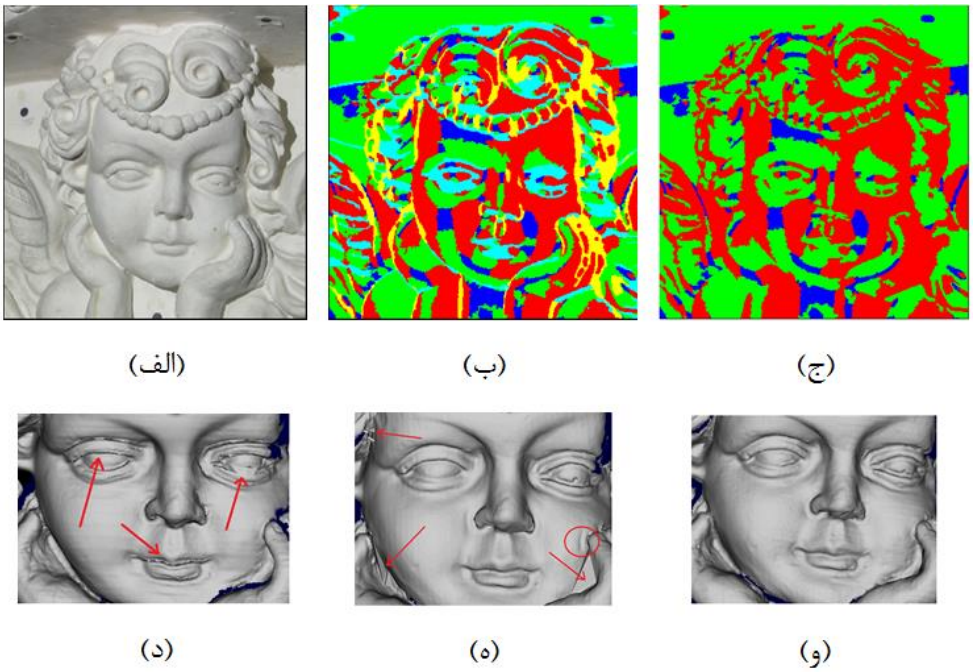
در این مقاله به ارائه یک روش جدید جهت کاهش خطاهای روش نگاشت فرینج با شیفت فاز پرداخته شد که بعلت پیچدگی‌های هندسی سطوح اشیاء بوجود می‌آید. با اضافه کردن روش فتومتریک استریو به این روش می‌توان پیش از محاسبات مختصات سه بعدی برای هر پیکسل مقدار شیب و نیز میزان انحنای سطح را برآورد نمود. بنابراین استراتژی محاسبه مختصات سه‌بعدی می‌تواند بر اساس اطلاعاتی که از روش فتومتریک استریو فراهم می‌گردد، بنا نهاده می‌شود. کارآمدی این روش توسط آزمایشاتی که ترتیب داده شده مورد آزمون قرار گرفته است. بنابراین نشان داده شد که تلفیق روش نگاشت الگوی فرینج و روش فتومتریک استریو داده‌های با بهبود دقت دو برابری (از ۵۸ میکرون به ۲۸ میکرون) را در مواجه با لبه‌ها و سطوح مقعر و نیز سطوح شیب‌دار نتیجه می‌دهد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]



شکل ۶: نتایج آزمون و بررسی. (الف) مدل سه بعدی با استفاده از الگوی فرینج افقی. (ب) مدل سه‌بعدی با استفاده از الگوی فرینج عمودی. (ج) مدل سه‌بعدی با استفاده از روش پیشنهادی. (د-ط) خطای حاصل از مقایسه داده اندازه‌گیری در راستای مقاطع عرضی مشخص شده با دایره ایده آل.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]



شکل ۷: ارزیابی کیفیت. (الف) تصویری از مجسمه. (ب) طبقه‌بندی سطوح و لبه‌ها. (ج) ادغام سطوح و لبه‌ها با جهت الگوی مشابه. (د) مدل سه بعدی به‌دست آمده با الگوی فرینج افقی. (ه) مدل سه بعدی بدست آمده با الگوی فرینج عمودی. (و) مدل سه بعدی به‌دست آمده با روش سه بعدی. جهت فلشها در (د) و (ه) نشان‌دهنده مشکلات بازسازی سه بعدی به علت جهت نامناسب الگوی نگاشت یافته می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

مراجع

[1] [1] A. Abzal, M. Varshosaz, and M. Saadatseresht, "Development of a new laser triangulation system based on an optical frame of reference", The Photogrammetric Record 26, 293-306, 2011.

[2] [2] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems", Pattern recognition 37, 827-849, 2004.

[3] [3] S. S. Gorthi, and P. Rastogi, "Fringe projection techniques: whither we are?", Optics and lasers in engineering 48, 133-140, 2010.

[4] [4] M. Servín, J. A. Quiroga, and M. Padilla, Fringe pattern analysis for optical metrology: theory, algorithms, and applications, John Wiley & Sons, 2014.

[5] [5] D. G. Aliaga, and Y. Xu, "Photogeometric structured light: A self-calibrating and multi-viewpoint framework for accurate 3d modeling," in Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.

[6] [6] P. F. Gotardo, T. Simon, Y. Sheikh, and I. Matthews, "Photogeometric Scene Flow for High-Detail Dynamic 3D Reconstruction," in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015.

[7] [7] Z. Lu, Y.-W. Tai, F. Deng, M. Ben-Ezra, and M. S. Brown, "A 3D imaging framework based on high-resolution photometric-stereo and low-resolution depth", International journal of computer vision 102, 2013.

[8] [8] D. Nehab, S. Rusinkiewicz, J. Davis, and R. Ramamoorthi, "Efficiently combining positions and normals for precise 3D geometry," in ACM transactions on graphics, 2005.

[9] [9] R. J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", Optical engineering 19, 191139-191139, 1980.

[10] [10] M. Liao, X. Huang, and R. Yang, "Interreflection removal for photometric stereo by using spectrum-dependent albedo", in Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011.

[11] [11] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Shape from interreflections," International Journal of Computer Vision 6, 173-195, 1991.

[12] [12] B. Fu, and R. Yang, "Robust near-infrared structured light scanning for 3D human model reconstruction," in SPIE MOEMS-MEMS International Society for Optics and Photonics, 89790A-89790A-89796, 2014.

[13] [13] C. Je, S. W. Lee, and R.-H. Park, "High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging," in European Conference on Computer Vision, 2004.

[14] [14] B. Salahieh, Z. Chen, J. J. Rodriguez, and R. Liang, "Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects," Optics express 22, 10064-10071, 2014.

[15] [15] J. Jeong, and M. Y. Kim, "Adaptive imaging system with spatial light modulator for robust shape measurement of partially specular objects," Optics express 18, 27787-27801, 2010.

[16] [16] D. Li, and J. Kofman, "Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement," Optics express 22, 9887-9901, 2014.

[17] [17] H. Lin, J. Gao, Q. Mei, Y. He, J. Liu, and X. Wang, "Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement," Optics express 24, 7703-7718 (2016).

[18] [18] Y. Xu, L. Ekstrand, J. Dai, and S. Zhang, "Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing," Applied optics 50, 2572-2581, 2011.

[19] [19] B. Li, and S. Zhang, "Structured light

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

system calibration method with optimal fringe angle," Applied optics 53, 7942-7950, 2014.

[20] [20] Y. Wang, and S. Zhang, "Optimal fringe angle selection for digital fringe projection technique," Applied optics 52, 7094-7098, 2013.

[21] [21] S. Zhang, "Phase unwrapping error reduction framework for a multiple-wavelength phase-shifting algorithm," Optical Engineering 48, 105601-105601-105608, 2009.

[22] [22] J.-Y. Bouguet, "Camera calibration toolbox for matlab", 2004.

[23] [23] L. Lu, J. Xi, Y. Yu, Q. Guo, Y. Yin, and L. Song, "Shadow removal method for phase-shifting profilometry," Applied optics 54, 6059-6064, 2015.

[24] [24] P. S. Huang, Q. J. Hu, and F.-P. Chiang, "Double three-step phase-shifting algorithm," Applied optics 41, 4503-4509, 2002.

[25] [25] Nam, G. and M.H. Kim, "Multispectral photometric stereo for acquiring high-fidelity surface normals," IEEE computer graphics and applications, 34(6), 57-68, 2014.

[26] [26] J. Sun, M. Smith, L. Smith, S. Midha, and J. Bamber, "Object surface recovery using a multi-light photometric stereo technique for non-Lambertian surfaces subject to shadows and specularities," Image and Vision Computing 25, 1050-1057, 2007.

[27] [27] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, "Machine vision", McGraw-Hill New York, 1995.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.5, No.4, Winter 2018

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir at 15:05 +0430 on Sunday April 29th 2018]

Accuracy Improvement of Fringe Projection 3D Scanner Using Photometric Stereo Method

Ali Abzal *[1], Mohammad Saadatseresht [2]

1- Ph.D student of Photogrammetry in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- Associated professor in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

Fringe projection (FP) technique uses a fringe pattern in a determined direction to measure the three-dimensional shape of the object. This paper surveys the effects of the object surface geometry on the accuracy of the three-dimensional reconstruction. Inter-reflection in concave areas, a significant change of phase in step edges, and lower signal to noise ratio in slope areas are the object geometry effects on the phase retrieval process. We proposed an FP technique that uses a photometric stereo to classify the image pixels based on the geometric properties of the object surface for selection of appropriate pattern direction. Experiments demonstrate that our low-cost integrated system can improve the measurement's accuracy of the objects with complex geometry from 58 microns to 28 microns.

Key words: Fringe Projection, Photometric Stereo, Inter reflection erreor, Geometry.

Correspondence Address: Photogrammetry student in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Tel: +98 21 61114256
Email: ali.abzal@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.5.4.53]