

## بهبود دقت اسکنر سه بعدی نگاشت فرینج با استفاده از روش فتومتریک استریو

علی ابذل<sup>۱\*</sup>، محمد سعادت سرشت<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری گرایش فتوگرامتری دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران  
۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران

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

### چکیده

روش اندازه گیری نگاشت فرینج با شیفت فاز از یک الگوی نوری بهره می گیرد 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 می شود. خطای انعکاس داخلی در سطوح مقعر، تغییرات شدید ویژگی های بازتابشی سطح در لبه های تیز و کاهش نسبت سیگنال به نویز در سطوح شیب دار از جمله تاثیرات هندسی سطوح بر دقت بازیابی فاز در روش نگاشت فرینج می باشد. سامانه ارائه شده در این مقاله از روش فتومتریک استریو برای طبقه بندی پیکسل های تصویر بر اساس خصوصیات هندسی آنها برای انتخاب جهت مناسب الگو در روش نگاشت فرینج استفاده می کند. نتایج آزمایشات نشان می دهد 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 لبه ها، سطوح شیب دار و مقعر افزایش دهد.

**کلیدواژه ها:** نگاشت فرینج با شیفت فاز، فتومتریک استریو، خطای انعکاس داخلی.

\* نویسنده مکاتبه کننده: دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه تهران

تلفن : ۸۸۰۰۸۸۴۱

## 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 یافته‌اند. 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<sup>۱</sup> به‌روشنی 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 دقیق‌تری را نتیجه دهد. به‌همین علت داده‌های به‌دست آمده از روش فتومتریک استریو<sup>۲</sup> 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 کاملاً مشهود است. این خطا ناشی از عوامل بسیاری نظیر جنس سطح، بازتابش سطح، رنگ، و تابع دو طرفه بازتاب<sup>۳</sup> می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. به‌همین علت در تکنیک‌های هیبریدی از داده‌های مثلث بندی اسکنر به‌عنوان داده هندسی مبنا استفاده می‌شود. در عین حال اگر فرض شود داده‌های اسکنر نیز حامل

خطای قابل توجهی باشد، این خطا به محصول نهایی منتقل خواهد شد.

روش‌های مبتنی بر نگاشت فرینج برای اندازه‌گیری سطوح ضعیف‌هایی 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 هستند که موجب کاهش دقت داده‌های 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 رنگ‌های 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 پیکسل‌های 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

<sup>1</sup> Fringe projection technique

<sup>2</sup> Photometric stereo

<sup>3</sup> BRDF

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 اندازه گیری سطوح عوارض با جزئیات هندسی مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین در بخش سه، روش پیشنهادی ارائه می گردد. تعیین معیارهای طبقه بندی در بخش چهار شرح داده شده و بخش پنج، نتایج آزمایشات ارائه می گردد. در انتها نیز بخش شش به نتیجه گیری اختصاص می یابد.

## 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 می گردد، بررسی می شود. نواحی مقعر، لبه های تیز و یا پله ای و سطوح با شیب بالا از جمله خصوصیات هندسی سطوح هستند که در مواجهه با جهت های مختلف الگوی تابانده شده دقت های متفاوتی از اسکن را نتیجه می دهد. همچنین در ادامه نشان داده می شود که با انتخاب جهت مناسب عمودی یا افقی الگو بهبود قابل توجهی در داده ها حاصل شده است. سطوح مقعر باعث ایجاد خطای انعکاس داخلی<sup>۱</sup> می گردد که ناشی از نوردهی غیر مستقیم به سطح می باشد. این عامل منجر به خطا در کدهای پیکسل ها و در نتیجه محاسبه فاز می شود. شکل (۱) تاثیر جهت الگو را بصورت بصری در دقت اندازه گیری یک ناحیه مقعر ایجاد شده با دو صفحه روبروی هم با زاویه ۶۶ درجه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در نواحی عمیق تر تعفر خطای ناشی از انعکاس داخلی در محاسبه فاز و در نهایت مختصات سه بعدی نقاط بیشتر می باشد.

تغییرات شدید در جهت بردار نرمال در لبه های تیز و یا

افزایش می دهد. 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 کدهای 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 به شدت تحت تاثیر خود قرار خواهد داد.

ایده اصلی این مقاله انتخاب جهت مناسب (افقی یا عمودی) الگوی نوری فرینج برای هر پیکسل تصویری می باشد تا خطاهای بوجود آمده بواسطه هندسه سطح عارضه به میزان قابل توجهی کاهش یابد. با استفاده از داده های نرمال بدست آمده توسط تکنیک فتومتریک استریو می توان پیکسل های متعلق به سطح عارضه را به کلاس های سطوح شیب دار، نواحی با انحنای بالا و لبه ها طبقه بندی نمود. همچنین برای هر ویژگی هندسی یک معیار برای انتخاب جهت الگوی افقی یا عمودی تعیین می گردد. در نهایت مختصات سه بعدی برای تمام پیکسل های سطح عارضه بر اساس اطلاعات بازیابی شده توسط الگوهای فرینج تاییده شده محاسبه می گردد. اضافه شدن سامانه فتومتریک استریو به روش اندازه گیری سه بعدی با نگاشت فرینج تنها به تعداد محدودی دیود نوری ارزان قیمت که در اطراف دوربین تعبیه شده است منجر می شود. همچنین به تعداد همان منابع نوری به تصاویر مورد نیاز برای اندازه گیری تصویر اضافه می گردد. نتایج بررسی ها نشان می دهد

<sup>1</sup> Inter-reflection

شیب باشد به  $0.28$  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 رابطه‌های (۱ و ۲) استفاده می‌کند. مقدار فاز مطلق هر پیکسل توسط روش بازیابی فاز طول موج چندگانه<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> [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 شیئی 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<sup>۵</sup> 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.

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<sup>۱</sup> 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، تقریباً 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 برآزش داده شده است. مقدار خطای کمترین مربعات<sup>۲</sup> خروج از صفحه که نشانگر نویز اندازه‌گیری است در حالتی که نوارهای الگوی تابیده شده عمود بر جهت شیب می‌باشد  $0.058$  میلیمتر و در حالتی که الگو در راستای

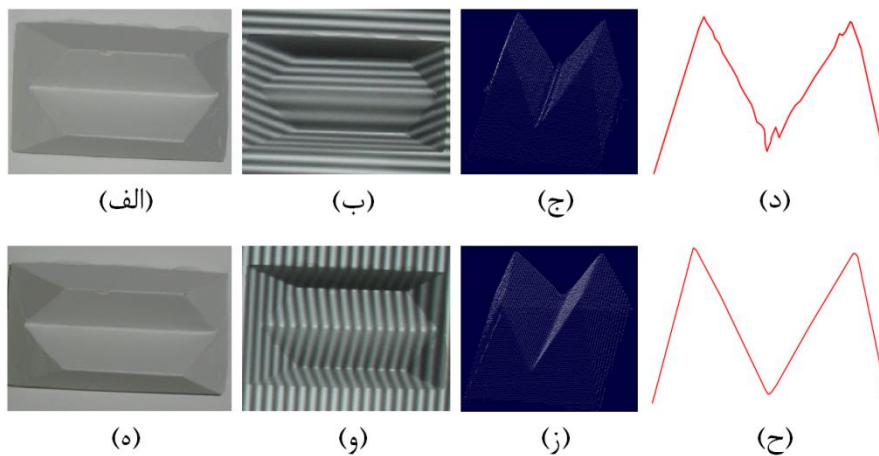
<sup>3</sup> Multiple wavelength

<sup>4</sup> Bouguet

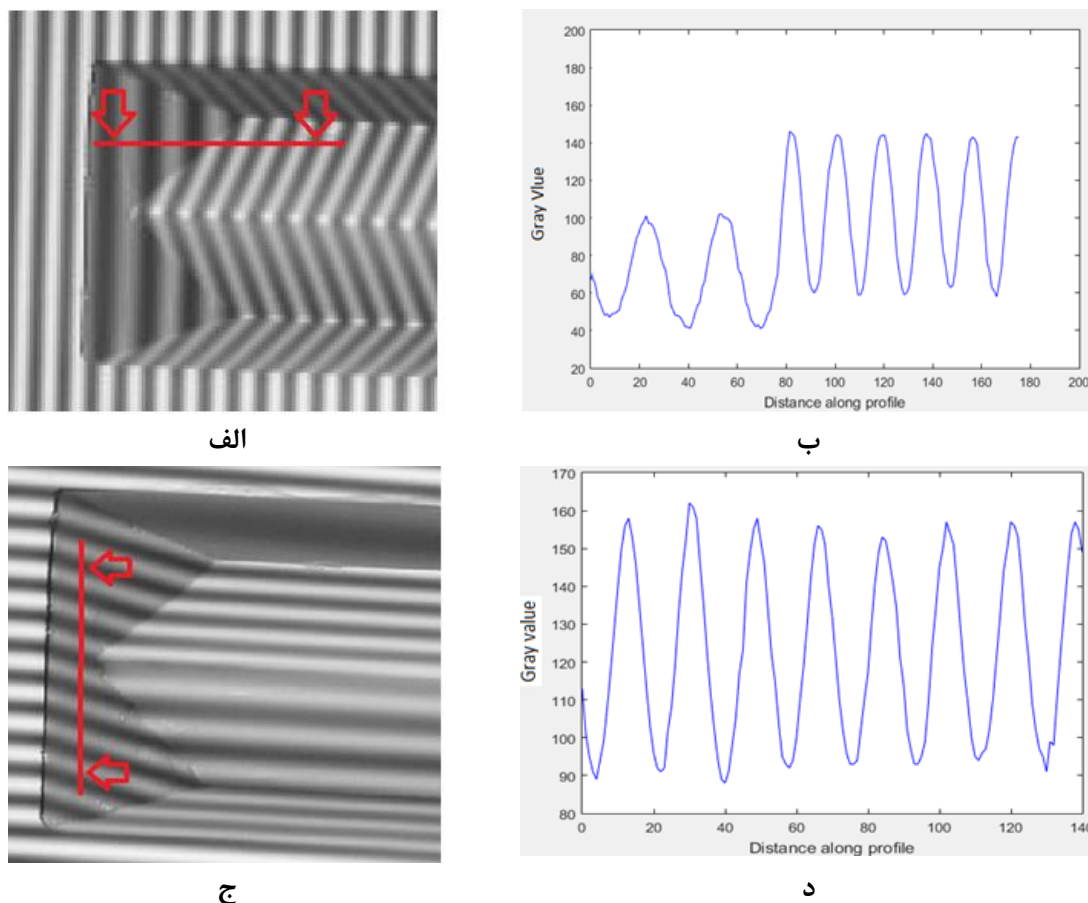
<sup>5</sup> Double three step method

<sup>1</sup> Phase unwrapping

<sup>2</sup> Root Mean Square Error



شکل ۱: اندازه گیری فاز در روش نگاشت فرینج توسط الگوی افقی و عمودی. (الف) تصویر شیئی 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 شیئی 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).

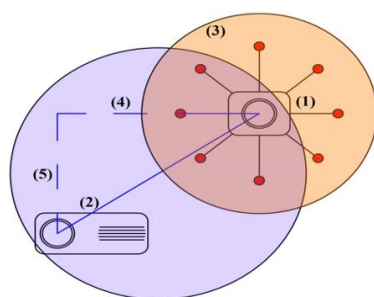
$$\varphi_{(x,y)} = \arctan \left[ \frac{\sum_{i=1}^N I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right)}{\sum_{i=1}^N I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right)} \right] \quad (1) \text{ رابطه}$$

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

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

$$B_{(x,y)} = \frac{2}{N} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^N I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \right]^2} \quad (3) \text{ رابطه}$$

رابطه (۲)



(الف)

1- Camera  
2- Projector  
3- LEDs  
4- Bx  
5- By



(ب)

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

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)

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

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 می باشند. طبق رابطه (۴) حداقل تصاویر برای محاسبه بردار نرمال سطح سه عدد می باشد. اما برای حذف نواحی سایه و اشباع که موجب خطا در محاسبه بردار نرمال می شوند از روش پیشنهادی توسط [۲۶] با شش منبع نوری استفاده شده است.

مدل خطی فتومتریک استریوی بکار گرفته شده در این

برای محاسبه بردار نرمال سطح شیئی به روش فتومتریک استریوی از تعدادی منابع نوری در اطراف دوربین استفاده شده است که در شکل (۳-الف) در ناحیه آبی رنگ قرار دارد. روش فتومتریک استریوی به عنوان یک روش ارزان و دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار پایین [۶] به روش اندازه گیری نگاشت فرینج اضافه شده است تا بتوان ویژگی های هندسی سطح عارضه را به دست آورد. بر اساس مبانی روش فتومتریک استریوی، درجات خاکستری پیکسل های تصویر از یک سطح لامبرتی<sup>۱</sup> به زاویه نور فرودی و آلبدوی<sup>۲</sup> سطح وابسته است. مقدار کسینوس هادی نور فرودی با حاصلضرب داخلی نرمال بر سطح و راستای

<sup>1</sup> Lambertian

<sup>2</sup> Albedo

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 شیفیت فاز به صورت زیر می‌باشد:

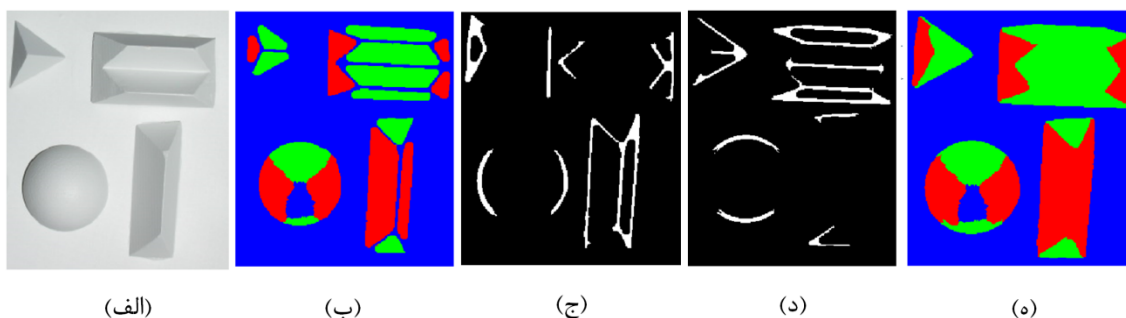
- نواحی با مقدار نرمال بالا در راستای محور  $x$  ( $Nx > 0.1$ ) و انحنای بالا ( $Cx > 0.1$ ) بایستی توسط الگوی فرینج افقی محاسبه مختصات سه بعدی گردند.
- نواحی با مقدار نرمال بالا در راستای محور  $y$  ( $Ny > 0.1$ ) و انحنای بالا ( $Cy > 0.1$ ) بایستی توسط الگوی فرینج عمودی محاسبه مختصات سه بعدی گردند.
- 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 شیئی آزمون واقعی از جنس پلاستیک فشرده آزموده شده است. شکل (۴) نتایج طبقه‌بندی بر روی شیئی 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.

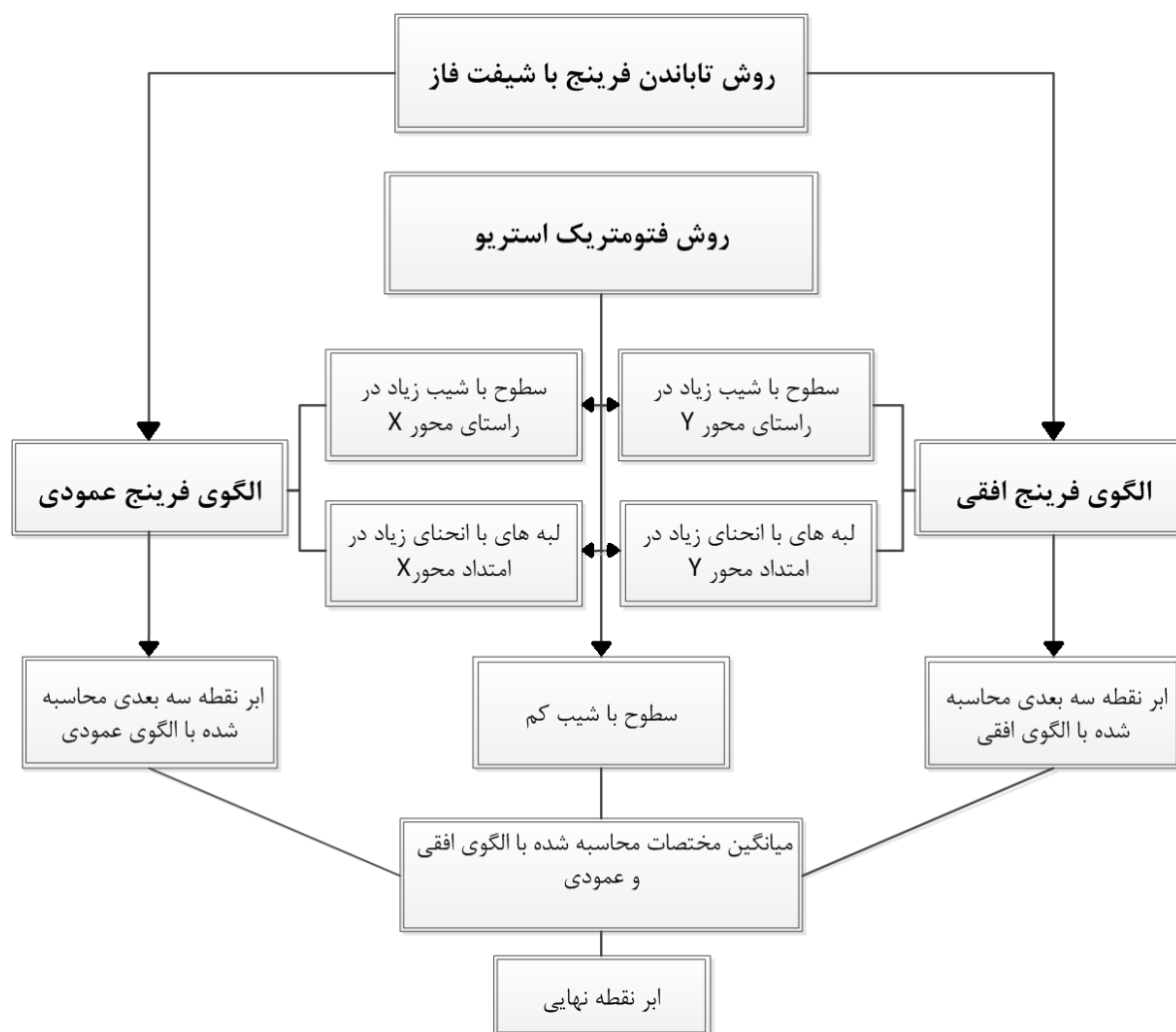
تحقیق با پیش فرض سطوح لامبرترین ساده ترین مدل می‌باشد و پارامترهای مختلفی نظیر انعکاس داخلی، جنس سطوح، بازتابش سطح و تابع توزیع دوطرفه بازتاب بر نتایج آن تاثیر می‌گذارند. افرادی نیز برای کاهش اثر این پارامترها مدل‌های پیچیده تری را پیشنهاد نموده‌اند [۱۰ و ۱۱]. اما از یک سو همان‌طور که در بخش بعدی اشاره 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 آن قدر 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 شیئی 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



شکل ۴: طبقه بندی هندسه سطح. (الف) تصویری اخذ شده از شیء 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 اندازه گیری پیشنهادی

شکل (۶) نشان داده شده، ابر نقاط متراکم به دست آمده است. براحتی می توان خطای انعکاس

### ۵- آزمون ها و ارزیابی

توسط سامانه اسکنر پیشنهادی از شیء آزمون که در

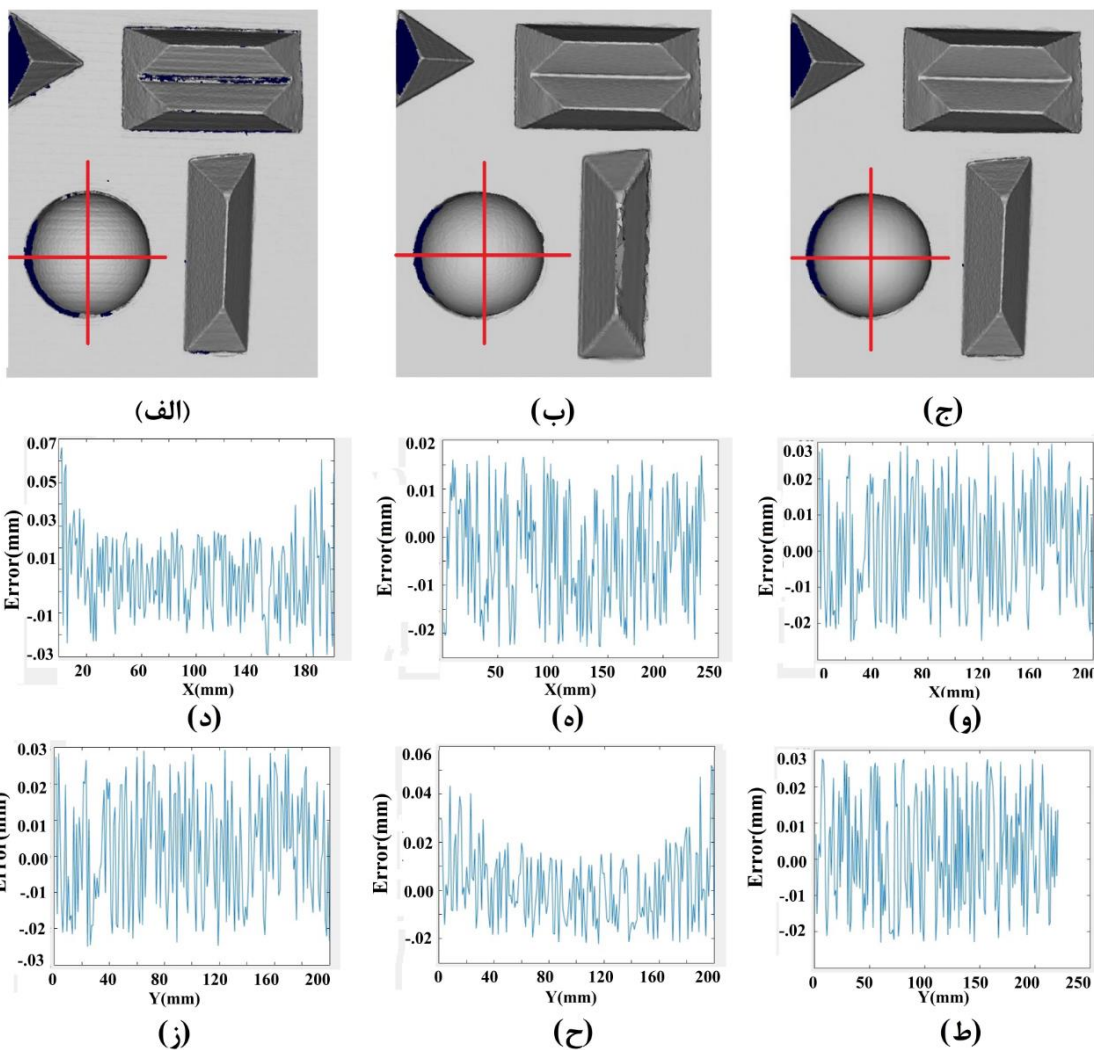


عمودی همگن و برابر ۲۸ میکرون می‌باشد. به‌منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، یک شیء با پیچیدگی هندسی اندازه‌گیری شده است. این شیء یک مجسمه فرشته است که جزئیات بالایی دارد. تصویر حاوی پیکسل‌های طبقه‌بندی شده به لبه‌ها و شیب سطوح در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود. در شکل (۷-ج) و شکل (۷-د) نواحی نویری لبه‌ها و سطوحی که با الگوی فرینج هم راستا شده‌اند با پیکان و دایره قرمز رنگ مشخص شده است. در حالی که نویرهای علامت‌گذاری شده در نتایج اندازه‌گیری توسط روش پیشنهادی مشاهده نمی‌شود شکل (۷-ه).

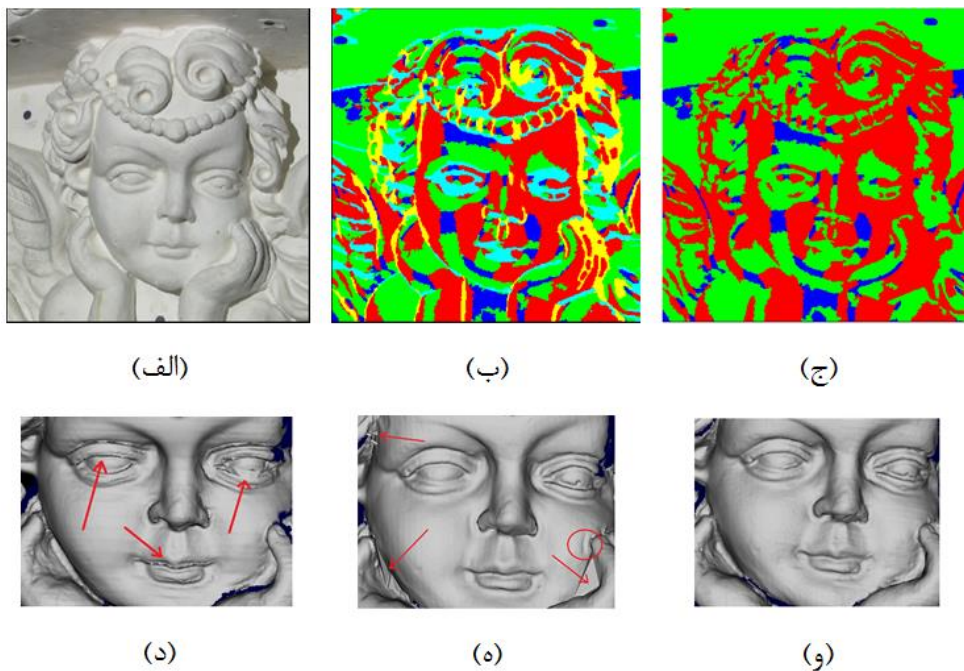
#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه یک روش جدید جهت کاهش خطاهای روش نگاشت فرینج با شیفت فاز پرداخته شد که بعلاوه پیچیدگی‌های 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 مواجهه با لبه‌ها و سطوح مقعر و نیز سطوح شیب‌دار نتیجه می‌دهد

داخلی را در سطوح مقعر برای حالتی که توسط الگوی فرینج افقی اندازه‌گیری شده است، مشاهده نمود. همانطور در لبه‌ها و سطوح اسکن شده نویر قابل توجهی مشاهده می‌شود. درحالی که این نویر 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 شیء 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 شده‌اند و در جهت دیگر در نواحی انتهایی مقاطع به‌دلیل نزدیکی شیب سطح به راستای عمود الگوی فرینج نویر افزایش یافته است. در حالتی که توسط روش پیشنهادی شیء آزمون اندازه‌گیری شده‌است، خطاها در هر دو مقطع افقی و



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



شکل ۷: ارزیابی کیفیت. (الف) تصویری از مجسمه. (ب) طبقه بندی سطوح و لبه ها. (ج) ادغام سطوح و لبه ها با جهت الگوی مشابه. (د) مدل سه بعدی به دست آمده با الگوی فرینج افقی. (ه) مدل سه بعدی دست آمده با الگوی فرینج عمودی. (و) مدل سه بعدی به دست آمده با روش سه بعدی. جهت فلشها در (د) و (ه) نشان دهنده مشکلات بازسازی سه بعدی به علت جهت نامناسب الگوی نگاشت یافته می باشد.

## 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

- 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.



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

Ali Abzal <sup>\*1</sup>, Mohammad Saadatesresht <sup>2</sup>

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 error, 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