



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم و تحقیقات و فناوری

## دانشگاه تفرش

دانشکده ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری

تولید مدل سه‌بعدی از سطح عوارض بدون بافت به کمک یک سیستم  
نور ساختاریافته متشکل از لیزر خطی و تصاویر استریو

### اساتید راهنما

آقای دکتر روح اله کریمی

آقای دکتر علیرضا صفدری نژاد

### دانشجو

محسن شیخی

زمستان ۱۳۹۸

تاریخ: ۲۹/۱۱/۹۸  
شماره: ۴۹/۱۵۹۷



دانشگاه قزوین  
اداره تحصیلات تکمیلی

### صور تجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

شماره دانشجویی: ۹۶۳۱۹۱۰۰۳

نام و نام خانوادگی: محسن شیخی

رشته تحصیلی/گرایش: نقشه برداری - فتوگرامتری

عنوان پروژه: تولید مدل سه بعدی از سطح عوارض بدون بافت به کمک یک سیستم نور ساختاریافته متشکل از لیزر خطی و تصاویر

استریو

تاریخ دفاع: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰

تعداد واحد: ۶

درجه:

عالی (۱۹-۲۰)  خیلی خوب (۱۸-۱۸/۹۹)  خوب (۱۶-۱۷/۹۹)  متوسط (۱۴-۱۵/۹۹)  مردود (کمتر از ۱۴)

نام و نام خانوادگی	سمت	رتبه	محل اشتغال	محل امضاء
دکتر روح اله کریمی	استاد راهنمای اول	استادیار	دانشگاه تفرش	
دکتر علیرضا صفدری نژاد	استاد راهنمای دوم	استادیار	دانشگاه تفرش	
-	استاد مشاور	-	-	-
دکتر سید عبدالله کیانزاد	داور داخلی	استادیار	دانشگاه تفرش	
دکتر علی محمد فتوحی	داور خارجی	استادیار	دانشگاه تفرش	
دکتر سید عبدالله کیانزاد	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	دانشگاه تفرش	

مدیر گروه: دکتر بهزاد به نیان

امضاء و مهر:

تاریخ:

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه: دکتر علی حسین میرزایی

امضاء و مهر:

تاریخ:

۲۹/۱۱/۹۸





به نام خدا

## تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: ۹۹/۰۱/۳۰

اینجانب محسن شیخی به شماره دانشجویی ۹۶۳۱۹۱۰۰۳ دانشجوی رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه تفرش بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و ماخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه تفرش می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه تفرش ممنوع است.

نقل مطالب با ذکر منابع بلامانع است.

نام و نام خانوادگی دانشجوی  
امضا  
محسن شیخی

## تقدیم به

برادر عزیزم که شوق دانستن و جستجو را در من بیدار کرد، استقامت در تلاش را به من آموخت و در تمام این سال‌ها با فراهم کردن آرامش فکری و آسایش روحی، بسیاری از دشواری‌ها را بر من آسان نمود.

## تقدیر و تشکر

خداوند مهربان را سپاس می‌گوییم که مرا نیرو بخشید تا نگارش پایان‌نامه پیش رو را به اتمام برسانم. بر خود لازم می‌دانم کمال تقدیر و تشکر خود را نثار کسانی کنم که در این مسیر پرفراز و نشیب لحظه‌ای از راهنمایی، پشتیبانی و تشویق من دریغ نکردند.

از اساتید بردبار و بزرگووارم؛ جناب آقای دکتر روح‌اله کریمی و دکتر علیرضا صفدری‌نژاد نهایت تشکر را دارم که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند و با حسن خلق و فروتنی پذیرای تمامی دغدغه‌ها و پرسش‌های بی‌پایانم بودند. آموختن یک کار تحقیقاتی مؤثر در کنار کار گروهی بدون راهنمایی‌ها و پیگیری‌های اساتید عزیز هرگز امکان‌پذیر نبود.

در پایان از دوست بسیار عزیزم آقای بهنام قاسم‌زاده که در روند انجام این پژوهش مرا یاری کردند خالصانه تشکر می‌نمایم.

## چکیده

در این پایان‌نامه یک سامانه‌ی ساده مبتنی بر تکنیک نور ساختاریافته به منظور تولید ابرنقاط سه‌بعدی از سطوح بدون بافت طراحی و پیشنهاد شده است. این سامانه متشکل از دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای بوده که در آن برای تولید محتوای سه‌بعدی، از نور بازتاب شده از فصل تقاطع صفحه‌ی لیزر و عارضه‌ی سه‌بعدی، تصاویر استریو اخذ می‌گردد. هیچ‌گونه کنترلی در مورد نحوه‌ی جاروب سطح عارضه توسط لیزر صفحه‌ای وجود نداشته و پارامترهای لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر از قبل مشخص نیست. با معلوم بودن پارامترهای کالیبراسیون داخلی و ارتباط نسبی دوربین‌های استریو، فیلم‌های اخذ شده توسط دوربین‌ها بعد از یافتن فریم‌های همزمان، طی فرایند بازنمونه‌برداری اپی‌پلار، نرمال‌سازی می‌شوند. در ادامه و در هر جفت فریم همزمان، موقعیت نقاط متناظر واقع در یک مقطع سه‌بعدی از عارضه شناسایی می‌گردد. در بازسازی مختصات نقاط واقع شده در هر مقطع سه‌بعدی، یک قید آماری مبتنی بر هم‌صفحگی تمام نقاط واقع در فصل مشترک صفحه‌ی لیزر و عارضه اعمال می‌گردد. این قید با هدف صفر شدن دترمینان ماتریس کواریانس تمامی نقاط سه‌بعدی واقع در صفحه‌ی لیزر طراحی شده است. بکارگیری این سامانه به همراه قید ذکر شده توانسته دقت بازسازی سطح را تا ۶۰ درصد نسبت به زمان عدم بکارگیری قید ارتقاء بخشد.

## واژه‌های کلیدی:

بازسازی سه‌بعدی، سیستم نور ساختاریافته، لیزر صفحه‌ای، سطوح بدون بافت، ماتریس کواریانس.



## فصل اول: کلیات پژوهش

۱	۱-۱ مقدمه.....	۱
۲	۲-۱ طرح مسئله و ضرورت تحقیق.....	۲
۵	۳-۱ اهداف پژوهش.....	۵
۷	۴-۱ ساختار پایان نامه.....	۷

## فصل دوم: مروری بر مبانی پژوهش و تحقیقات مرتبط

۸	۱-۲ مقدمه.....	۸
۹	۲-۲ روش‌های تولید داده‌های سه‌بعدی از سطح اشیاء.....	۹
۱۰	۱-۲-۲ روش‌های مبتنی بر نیاز به تماس با جسم.....	۱۰
۱۱	۲-۲-۲ روش‌های مبتنی بر عدم نیاز تماس با جسم.....	۱۱
۱۱	۱-۲-۲-۲ تکنیک‌های غیرفعال.....	۱۱
۱۳	۲-۲-۲-۲ تکنیک‌های فعال.....	۱۳
۱۴	۳-۲-۲-۲ تکنیک‌های ترکیبی.....	۱۴
۱۵	۳-۲ سیستم‌های نور ساختاریافته.....	۱۵
۱۵	۱-۳-۲ سامانه‌های نور ساختاریافته با یک دوربین.....	۱۵
۱۶	۲-۳-۲ سامانه‌های نور ساختاریافته با بیش از یک دوربین.....	۱۶
۱۶	۳-۳-۲ سامانه‌های نور ساختاریافته با بیش از یک وسیله تصویر کننده.....	۱۶
۱۷	۴-۳-۲ سامانه‌های نور ساختاریافته با الگوی نوری.....	۱۷
۱۸	۵-۳-۲ سامانه‌های نور ساختاریافته با الگوی لیزری.....	۱۸
۱۹	۴-۲ مثلث‌بندی در تصاویر.....	۱۹
۲۲	۵-۲ انواع سامانه‌های نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر.....	۲۲
۲۳	۱-۵-۲ روش‌های هندسه ثابت.....	۲۳
۲۴	۲-۵-۲ روش‌های مبتنی بر هندسه دینامیک.....	۲۴
۲۶	۶-۲ کالیبراسیون سیستم‌های نور ساختاریافته.....	۲۶
۲۷	۱-۶-۲ کالیبراسیون دوربین.....	۲۷
۳۰	۷-۲ روش‌های استخراج مرکز خط لیزر.....	۳۰
۳۱	۱-۷-۲ روش تقریب گوسین.....	۳۱
۳۲	۲-۷-۲ روش مرکز جرم.....	۳۲
۳۲	۱-۷-۲ روش درون‌یابی خطی.....	۳۲
۳۲	۲-۷-۲ روش تقریب سهمی‌وار.....	۳۲

۳۳	۱-۷-۲ روش آشکارسازهای Rioux و Blais .....
۳۳	۸-۲ تولید تصاویر نرمال (بازنمونه‌برداری اپی‌پلار).....
۳۴	۱-۸-۲ هندسه اپی‌پلار .....
۳۵	۲-۸-۲ فرایند تولید تصویر نرمال .....
۳۸	۱-۲-۸-۲ نمونه‌برداری مجدد تصویر .....
۴۱	۲-۲-۸-۲ روندنمای سلسه‌مراتبی تولید تصویر نرمال .....
۴۴	۹-۲ تحقیقات مرتبط با سامانه‌های نور ساختاریافته.....
۴۴	۱-۹-۲ تحقیقات مرتبط با طراحی سامانه‌های نور ساختاریافته .....
۴۹	۲-۹-۲ تحقیقات مرتبط با استخراج مرکز خط لیزر .....
۵۳	۱۰-۲ جمع‌بندی .....

## فصل سوم: طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم نور ساختاریافته مبتنی بر دو دوربین و یک لیزر

### صفحه‌های آزاد

۵۶	۱-۳ مقدمه.....
۵۸	۲-۳ سازوکار طراحی سامانه پیشنهادی.....
۵۹	۳-۳ قطعات بکاررفته در سامانه پیشنهادی.....
۶۱	۴-۳ نحوه کالیبراسیون دوربین‌های تصویربرداری.....
۶۲	۱-۴-۳ تصویربرداری (فیلمبرداری) از میدان آزمون شطرنجی .....
۶۴	۵-۳ توجیه نسبی دوربین‌های تصویربرداری و اعمال مقیاس.....
۶۵	۶-۳ تولید پارامترهای تولید تصویر نرمال.....
۶۵	۷-۳ جاروب شیء توسط لیزر و یافتن جفت فریم‌های متناظر.....
۶۷	۸-۳ یافتن نقاط متناظر در جفت فریم‌های متناظر.....
۶۸	۱-۸-۳ اعمال ماسک روی شیء.....
۶۹	۹-۳ تقاطع یافتن همزمان تمام نقاط واقع در یک مقطع از صفحه لیزر.....
۶۹	۱-۹-۳ اثبات و بکارگیری قید در روند تقاطع همزمان .....
۷۵	۲-۹-۳ حذف نقاط پرت.....

### فصل چهارم: ارزیابی و نتایج

۷۸	۱-۴ مقدمه.....
۷۸	۲-۴ برآورد پارامترهای کالیبراسیون دوربین.....
۷۹	۱-۴ ضرورت بکارگیری سامانه‌های نور ساختاریافته در تولید مدل سه‌بعدی از اشیاء بدون بافت.....
۸۱	۲-۴ کفایت و ضرورت قید بکارگرفته شده در روند تولید مدل سه‌بعدی.....

### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸۶

۸۷..... ۱-۵ نتیجه گیری

۸۷..... ۲-۵ پیشنهادها

۹۰ منابع و مراجع

۹۳ Abstract

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمایی از مجسمه با ویژگی بدون بافت بودن..... ۳
- شکل ۲-۱: تصویر اخذشده از مقطع لیزر..... ۵
- شکل ۳-۱ (الف) جسم بدون بافت، ب) نمونه تصویر اخذ شده از جسم، پ) مدل تهیه شده از جسم توسط نرم افزار Agi soft Metashape Pro. Ver. 1.5.2..... ۶
- شکل ۱-۲-۱: یک نمونه دستگاه CMM..... ۱۰
- شکل ۲-۲-۲: تهیه تصاویر همگرا از نقاط در یک سیستم مختصات محلی..... ۱۲
- شکل ۳-۲-۳: بازسازی سه بعدی به کمک تکنیک غیرفعال..... ۱۲
- شکل ۴-۲-۴: نمای شماتیک از تکنیک نور ساختاریافته در بازسازی سه بعدی..... ۱۴
- شکل ۵-۲-۵: سامانه نور ساختاریافته متشکل از یک دوربین و یک پروژکتور..... ۱۶
- شکل ۶-۲-۶: سامانه‌ی نور ساختاریافته با بیش از یک دوربین..... ۱۶
- شکل ۷-۲-۷: نمونه سامانه‌ی نور ساختاریافته با بیش از یک وسیله تصویر کننده..... ۱۷
- شکل ۸-۲-۸: نمونه الگوهای کددار (الف) باینری، ب) خاکستری، پ) فازشیفت، ت) ترکیبی از فازشیفت با خاکستری..... ۱۸
- شکل ۹-۲-۹: نمونه‌ای از سامانه نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲-۱۰: اصول مثلث بندی با لیزر..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲-۱۱: سیستم اسکنر با منبع نوری لیزر..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲-۱۲: بازسازی سه بعدی از طریق یک دوربین و صفحه لیزر..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲-۱۳: سیستم نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر با هندسه ثابت..... ۲۴
- شکل ۱۴-۲-۱۴: سیستم نور ساختاریافته مبتنی بر هندسه دینامیکی مستقل..... ۲۵
- شکل ۱۵-۲-۱۵: نمونه‌ای از سامانه نور ساختاریافته مبتنی بر هندسه دینامیکی تعاملی..... ۲۶
- شکل ۱۶-۲-۱۶: محل تقریبی پیک خط لیزر در مقطع پیکسلی از یک لیزر خطی..... ۳۰
- شکل ۱۷-۲-۱۷: هندسه اپی پلار در یک جفت تصویر استریو..... ۳۴
- شکل ۱۸-۲-۱۸: هندسه تولید تصویر نرمال..... ۳۶
- شکل ۱۹-۲-۱۹: درونیایی درجه خاکستری به روش نزدیکترین همسایه..... ۳۹
- شکل ۲۰-۲-۲۰: درونیایی درجه خاکستری بر اساس روش دو خطی..... ۴۰
- شکل ۲۱-۲-۲۱: درونیایی درجه خاکستری بر اساس روش دو مربعی..... ۴۰
- شکل ۲۲-۲-۲۲: مراحل اصلی تبدیل تصویر خام (پیکسلی) به تصویر نرمال..... ۴۱
- شکل ۲۳-۲-۲۳: نمای سامانه نور ساختاریافته..... ۴۵
- شکل ۲۴-۲-۲۴: محل تقاطع صفحه لیزر با محور دوران..... ۴۶
- شکل ۲۵-۲-۲۵: تشخیص سایه‌ها با بکارگیری الگوهای قرمز و آبی..... ۴۷

- شکل ۲-۲۶: رنگ سبز مابین دو الگوی قرمز و آبی..... ۴۷
- شکل ۲-۲۷: نمونه الگوهای باینری استفاده شده..... ۴۸
- شکل ۲-۲۸: داده‌های سه بعدی تولید شده و تغییر رنگ آن‌ها بر اساس تغییر عمق..... ۴۸
- شکل ۲-۲۹: الف) تصویر اخذ شده، ب) تصویر تعدیل شده، پ) نوار استخراج شده در سه مقطع..... ۴۹
- شکل ۲-۳۰: الگوی نواری تابیده شده روی یک کتری، الف) الگوی اخذ شده در حالت low exposure ب) الگوی اخذ شده در حالت high exposure پ) الگوی اخذ شده با بهبود پیشنهادی..... ۵۰
- شکل ۲-۳۱: توزیع درجات خاکستری به صورت آله..... ۵۲
- شکل ۲-۳۲: تأثیر خصوصیات سطح، الف) تغییر ناگهانی شکل، ب) تغییر ناگهانی بازتاب و پ) نوار در لبه شی..... ۵۳
- شکل ۳-۱: ساختار سامانه نور ساختاریافته پیشنهادی..... ۵۹
- شکل ۳-۲: سامانه پیشنهادی نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر خطی آزاد..... ۶۱
- شکل ۳-۳: نحوه شماره گذاری زمینه شطرنجی..... ۶۳
- شکل ۳-۴: نمونه‌ای از فریم‌های اخذ شده جهت کالیبراسیون دوربین..... ۶۳
- شکل ۳-۵: مراکز شناسایی شده شبکه توسط نرم افزار Matlab R2015a..... ۶۴
- شکل ۳-۶: نمونه‌ای از جفت فریم متناظر دوربین چپ (تصویر سمت چپ تصویر خام و تصویر سمت راست تصویر نرمال شده است)..... ۶۶
- شکل ۳-۷: نمونه‌ای از نقاط متناظر واقع در صفحه‌ی لیزر در یک جفت فریم چپ و راست..... ۶۸
- شکل ۳-۸: ماسک اعمال شده روش شی بدون بافت (بادکنک)..... ۶۸
- شکل ۴-۱: الف) نمونه‌ای از تصاویر همپوشان اخذ شده از شی (بادکنک)، ب) ابرنقطه تولید شده توسط نرم افزار Metashape..... ۸۰
- شکل ۴-۲: ابرنقطه تولید شده به کمک سامانه‌ی نور ساختاریافته..... ۸۱
- شکل ۴-۳: ابرنقاط بدست آمده به همراه سطح برازش یافته در دو حالت الف) بکارگیری قید، ب) عدم بکارگیری قید..... ۸۲
- شکل ۴-۴: الف) هیستوگرام بردارهای خطای برازش سطح در حالت بکارگیری قید، ب) هیستوگرام بردارهای خطای برازش سطح در حالت عدم بکارگیری قید..... ۸۳
- شکل ۴-۵: الف) نمونه تصویر از سطح بادکنک بعد از افزودن بافت، ب) مدل سه بعدی تولید شده از بادکنک در محیط نرم افزار Metashape..... ۸۴

صفحه

## فهرست جداول

جدول ۱-۴: پارامترهای برآورد شده کالیبراسیون دو دوربین.....	۷۹
جدول ۲-۴: گزارش آماری از دقت برازش سطح در دو حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید.....	۸۲
جدول ۳-۴: گزارش آماری از دقت برازش سطح به ابرنقاط حاصل از نرم افزار Metashape و سامانه نورساختاریافته.....	۸۴

فصل اول

کلیات پژوهش

## ۱-۱ مقدمه

امروزه تولید مدل سه‌بعدی بخش مهمی در زمینه مهندسی به شمار می‌رود؛ یکی از مباحث بروز و چالش‌برانگیز در زمینه تولید مدل سه‌بعدی، تولید مدل سه‌بعدی از سطوح اجسام بدون بافت است. مهم‌ترین چالش در مورد این اشیاء، عدم امکان اجرای موفقیت‌آمیز تکنیک‌های تناظریابی است. از همین رو روش‌های بینایی ماشین (تصویرمبنا) بکار گرفته می‌شود. روش‌های ماشین بینایی به دلیل ویژگی‌هایی همچون سرعت بالا، عدم تماس با جسم، تولید مدل سه‌بعدی از اجسام متحرک و ارائه اطلاعات کیفی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱-۴]. ماشین بینایی نقش مهمی در زندگی انسان‌ها و بسیاری از موجودات دارد؛ وجود این سیستم توانایی تعامل موجودات با محیط اطراف را برقرار می‌کند. بینایی ماشین شاخه‌ای از علوم کامپیوتر است که به‌عنوان یک ابزار مهندسی برای استخراج اطلاعات سه‌بعدی در ابزارهای دیجیتال، شبکه‌های کامپیوتری، مهندسی معکوس، علوم رباتیک، فتوگرامتری و... کاربرد دارد. به‌عبارت دیگر ماشین بینایی شاخه‌ای از علم مهندسی است که به رشته‌های علوم کامپیوتری و علم نورشناسی ارتباط دارد. در دهه‌های اخیر با افزایش کیفیت دوربین‌ها، کاهش هزینه‌ی آن‌ها و افزایش توانایی پردازش در کامپیوترها، ماشین بینایی در حال توسعه است..

با توجه به ظهور تکنولوژی‌های جدید و ارائه روش‌های کارآمد و متنوع در زمینه تولید مدل سه‌بعدی از اجسام بدون بافت، روش‌های نور ساختاریافته یکی از روش‌هایی است که علیرغم سابقه بکارگیری آن در ماشین بینایی هنوز مورد توجه بسیاری از کاربران است. کم هزینه بودن، اجزای ساده، هندسه ساده و مستحکم بودن از جمله ویژگی‌هایی است که روش نور ساختاریافته را میتوان به‌عنوان روشی بهینه از نظر ساختار تلقی نمود. ساختار این سیستم‌ها شبیه فتوگرامتری است با این تفاوت که در روش‌های نور ساختاریافته علاوه بر دوربین تصویربرداری از لیزر و پروژکتور هم جهت تولید مدل سه‌بعدی استفاده می‌شود [۵]. در بخش بعدی مسئله‌ای که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته تشریح خواهد شد.

## ۲-۱ طرح مسئله و ضرورت تحقیق

تولید مدل‌های سه‌بعدی از سطوح بدون بافت یک چالش در فرایندهای فتوگرامتری بشمار می‌رود. سطوحی همچون پوست، دیواره‌های باستانی، بدنه‌ی خودرو و هواپیماها را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از سطوح بدون بافت برشمرد که تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق و قابل اعتماد از آن‌ها صرفاً با اخذ تصاویر



همپوشان و بکارگیری تکنیک‌های SfM<sup>۱</sup> ممکن نیست [۶-۱۰]. مهم‌ترین چالش در مورد این اشیاء، عدم امکان اجرای موفقیت‌آمیز تکنیک‌های تناظریابی است.



شکل ۱-۱: نمایی از مجسمه با ویژگی بدون بافت بودن

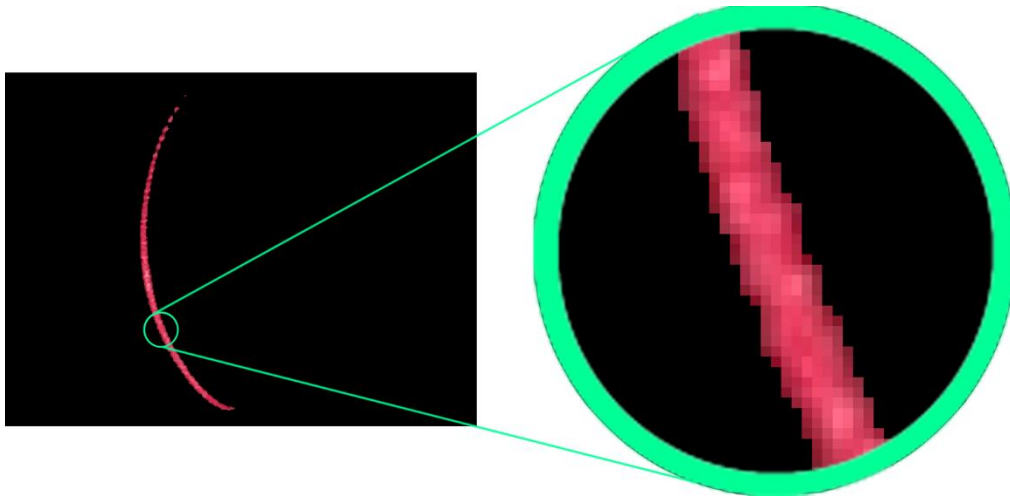
همان‌طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌کنید، با قطعیت کامل نمیتوان نقاط متناظر را در این نوع اجسام یافت. به‌منظور غلبه بر این چالش، راهکارهایی مبتنی بر تکنیک‌های نور ساختاریافته توسعه‌یافته است. به‌طور کلی دو رویکرد: ۱- تاباندن بافت به سطوح بدون بافت به کمک ویدئوپروژکتور با هدف تسهیل در فرایند تناظریابی [۴، ۱۰] و ۲- بکارگیری الگوهای نوری با هندسه‌ی معلوم (صفحه) توسط لیزر با هدف تقاطع یافتن با پرتوهای تصویری [۲، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲]، راهکارهای مرسوم در این حوزه بشمار می‌روند. در رویکرد اول، دانش به هندسه‌ی الگوهای تابیده شده ضروری نبوده و این الگوها صرفاً با ایجاد تمایز در محتوای رادیومتریکی مناطق بدون بافت در تصاویر همپوشان، نتایج دقیق‌تری را در فرایند تناظریابی تأمین می‌سازند؛ اما در رویکرد دوم، از الگوهای ساده‌ای همچون لیزرهای صفحه‌ای برای تولید محتوای سه‌بعدی استفاده می‌شود. این لیزرها قادرند نور را به‌صورت صفحه‌ای و با ضخامت اندک منتشر ساخته که در برخورد با عوارض، سطح مشترک میان صفحه‌ی لیزر و عارضه را نورانی می‌سازند [۲، ۸]. به‌طور معمول تاباندن نور چنین لیزرهایی به سطوح بدون بافت در یک محیط تاریک انجام‌شده و از الگوی نوری تولیدشده روی سطح سه‌بعدی عوارض تصویربرداری می‌شود.

از نقطه‌نظر تئوری و در صورت معلوم بودن پارامترهای توجیه خارجی دوربین و پارامترهای هندسی

<sup>۱</sup> Structure from motion

صفحه‌ی لیزر، تقاطع امتداد پرسپکتیو هر نقطه‌ی نورانی ثبت‌شده از عارضه در فضای تصویر با صفحه‌ی لیزر، مختصات سه‌بعدی آن نقطه را در فضای شیء بازسازی می‌نماید [۲، ۸]. بر این اساس، معلوم بودن پارامترهای هندسی صفحه لیزر بخشی از محتوای لازم به‌منظور بازسازی سه‌بعدی فضای شیء بوده که گاهاً برآورد آن‌ها جزئی از فرایند کالیبراسیون یک سیستم نور ساختاریافته متشکل از لیزرهای صفحه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد. از آنجاییکه هر بار تاباندن یک صفحه لیزر، صرفاً امکان تولید محتوای یک مقطع سه‌بعدی از شیء را فراهم می‌آورد؛ از جاروب سطح سه‌بعدی توسط صفحه‌ی لیزر به‌منظور تولید مقاطع سه‌بعدی متعدد و تراکم استفاده می‌شود [۱]. بدیهی است که در چنین شرایطی معلوم بودن پارامترهای لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر در تمامی موقعیت‌های تابش لیزر به‌منظور تولید محتوای سه‌بعدی ضروری خواهد بود. این موضوع مستلزم کالیبراسیون لحظه‌ای پارامترهای صفحه‌ی لیزر بوده که شرایط آن در ساخت یک سامانه‌ی نور ساختاریافته به طرق مختلف تأمین می‌گردد. مواردی همچون: ۱- وجود صفحات کالیبراسیونی در محیط مدل‌سازی سه‌بعدی و الزام به تابش همزمان صفحه‌ی لیزر به شیء و صفحات کالیبراسیونی در هنگام ثبت تصویر [۸] و ۲- بکارگیری ترکیبی از لیزرهای صفحه‌ای ثابت و متحرک به‌صورت متقاطع [۱]، نمونه‌هایی از راهکارهای توسعه‌یافته در این زمینه محسوب می‌شوند.

از دیدگاه تئوری، صفحه‌ی لیزر عاری از ضخامت پنداشته می‌شود؛ اما ضخامت لیزرهای صفحه‌ای با فاصله گرفتن از چشمه‌ی نور به تدریج افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، حد تفکیک بالا در دوربین‌های عکس‌برداری نیز باعث شده که تصویر ثبت‌شده از صفحه‌ی لیزر با ضخامتی بیش از یک پیکسل ظاهر گردد. به همین جهت، یافتن بهترین مکان نورانی در فضای تصویر به‌منظور لحاظ شدن آن موقعیت در معادلات صفحه‌ی لیزر یک چالش در بکارگیری لیزرهای صفحه‌ای در سامانه‌های نور ساختاریافته محسوب می‌شود. شکل ۱-۲ نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده همراه با لیزر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲: تصویر اخذشده از مقطع لیزر

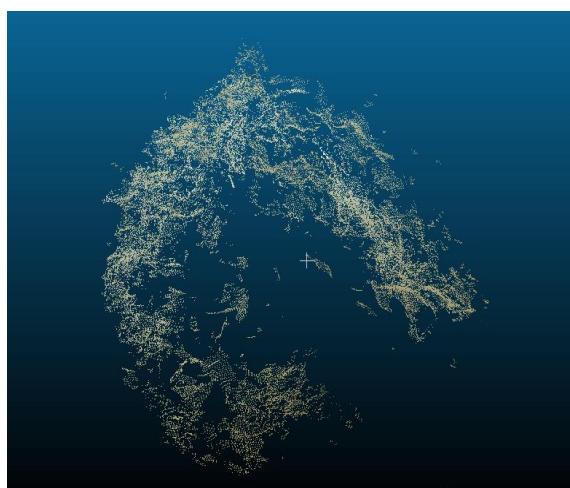
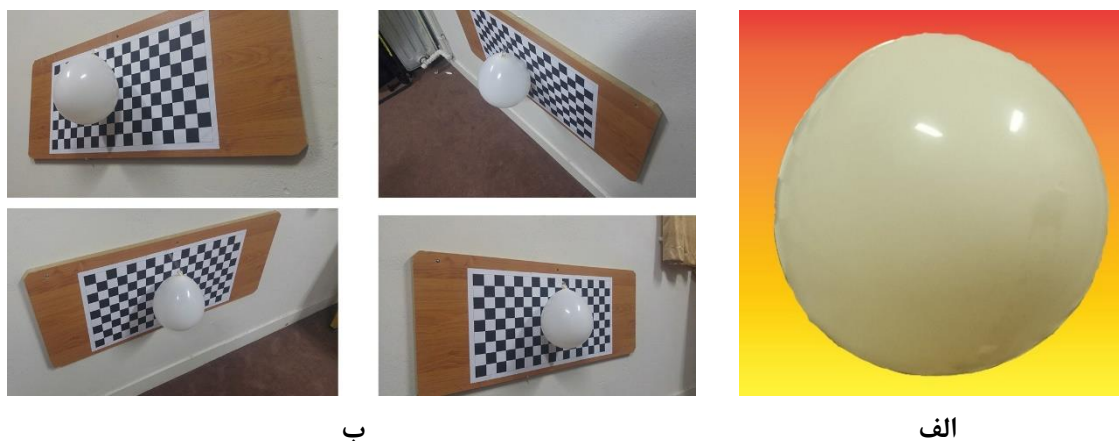
مطابق شکل ۱-۲، مقطع لیزر با ضخامتی بیشتر از یک پیکسل ثبت شده و تشخیص موقعیت دقیق مرکز لیزر یکی از چالش‌های سامانه‌های نور ساختار یافته می‌باشد. از سوی دیگر، بواسطه‌ی عواملی همچون:

- ۱- تفاوت در رفتار بازتابی و وضعیت توپوگرافی سطح اشیاء، ۲- تفاوت در حساسیت رادیومتریکی دوربین‌های تصویربرداری، ۳- زاویه‌ی تقاطع صفحه‌ی لیزر با سطح، ۴- موقعیت نسبی صفحه‌ی لیزر و دوربین تصویربرداری و ۵- فاصله‌ی چشمه‌ی نور لیزر تا شیء، مسئله‌ی یافتن بهترین موقعیت خط لیزر در فضای تصویر را با عدم قطعیت‌های بیشتری روبرو می‌سازد. بدیهی است که عدم تشخیص صحیح موقعیت صفحه‌ی لیزر در فضای تصویر، مستقیماً در فرایند بازسازی سه‌بعدی ناشی از تقاطع صفحات لیزر و پرتوهای تصویری اثرگذار خواهد بود. از سوی دیگر از دیدگاه تئوری مقطع لیزر در مکان هندسی یک صفحه قرار دارند، اما تمامی پژوهش‌ها به‌منظور غلبه بر این چالش وابسته به فرایندهای پردازش تصویری بوده‌اند. براین اساس شرایط هندسی حاکم بر قرارگرفتن نقاط واقع در مقطع لیزر روی یک خط، با بکارگیری الگوریتم‌های پردازش تصویری فراهم نمی‌شود. بنابراین در این تحقیق هدف برقرار کردن شرط هندسی قرارگیری نقاط واقع در یک مقطع لیزر در صفحه‌ی لیزر بوده و تا حد امکان عدم استفاده از فرایندهای پردازش تصویری در دستور کار قرار دارد. در بخش بعدی اهداف پژوهش به‌طور مفصل تشریح خواهد شد.

### ۱-۳ اهداف پژوهش

هدف از این پژوهش را میتوان استفاده از رویکرد جدید به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی از اجسام بدون بافت تعریف کرد. اجسام بدون بافت با توجه به اینکه با روش‌های SfM، مدل سه‌بعدی آن‌ها با نقص مواجه

بوده و قابلیت مدل سازی ندارند؛ روش های دیگری همچون روش های نور ساختاریافته، به منظور مدل سازی اجسام بدون بافت توسعه پیدا کرده اند. نمونه ای از یک جسم بدون بافت و مدل تهیه شده از آنرا در شکل ۳-۱ مشاهده می نمایید.



شکل ۳-۱: الف) جسم بدون بافت، ب) نمونه تصویر اخذ شده از جسم، پ) مدل تهیه شده از جسم توسط نرم افزار Agi soft Metashape Pro. Ver. 1.5.2

همان طور که در شکل ۳-۱ کاملاً مشهود است، مدل سه بعدی تهیه شده هیچ شباهتی با واقعیت نداشته و دلیل اصلی آن ناتوان بودن روش های SfM در تناظریابی<sup>۱</sup> می باشد. تناظریابی به یافتن نقاط با ویژگی های یکسان در تصاویر همپوشان اطلاق می شود. بر این اساس یکی از اهداف این پژوهش تولید مدل

<sup>۱</sup> Matching

سه‌بعدی از اجسام بدون بافت مبتنی بر یک روش ساده و کم هزینه می‌باشد.

همان‌طور که در بخش پیشین مطرح شد، ضخامت لیزر نیز یکی چالش‌های اساسی در روش‌های نور ساختاریافته بوده که روش‌های توسعه یافته مبتنی بر فرایندهای پردازش تصویری بوده‌اند. یکی دیگر از اهداف اصلی این پژوهش، کاهش عدم قطعیت‌های محتمل در بکارگیری روش‌های پردازش تصویری، به‌منظور غلبه بر چالش ضخامت لیزر می‌باشد.

## ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

با این مقدمه ساختار ارائه‌ی مطالب در این پایان‌نامه مشتمل بر پنج فصل بوده که در فصل اول مقدمه‌ای در رابطه با تولید مدل سه‌بعدی، تعریف مسئله، ضرورت و اهداف تحقیق بیان شده است. فصل دوم به مروری بر مبانی پژوهش و تحقیقات مرتبط اختصاص دارد. فصل سوم چگونگی طراحی فیزیکی سامانه نور ساختاریافته و روش پیشنهادی تولید مدل سه‌بعدی از اجسام بدون بافت تشریح شده است. ارزیابی و بررسی سامانه پیشنهادی در فصل چهارم بیان شده است. در انتها، فصل پنجم مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادات به‌منظور تحقیقات آتی می‌باشد.

## فصل دوم

### مروری بر مبانی پژوهش و تحقیقات مرتبط

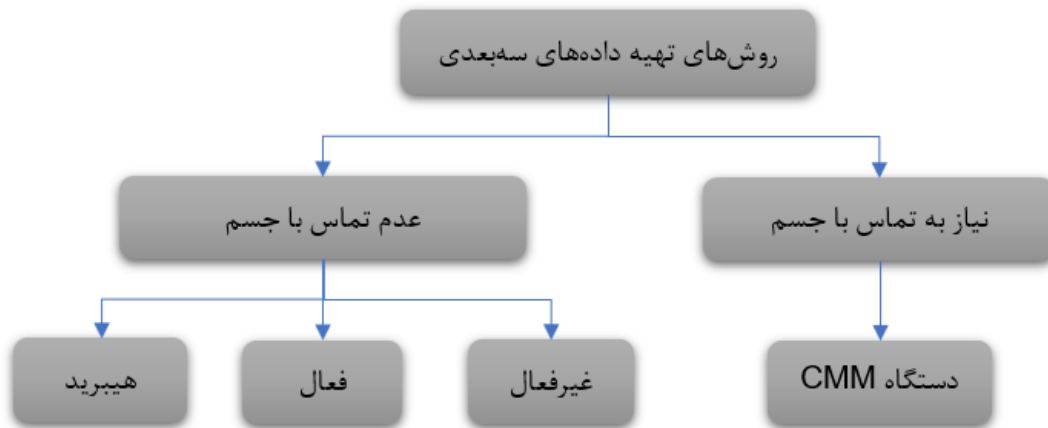
## ۱-۲ مقدمه

نقشه‌برداری جهت استخراج اطلاعات سه‌بعدی شاخه‌ای از بینایی ماشین است. امروزه با پیشرفت و گسترش سیستم‌های بینایی ماشین، علاقه و انگیزه برای نقشه‌برداری سه‌بعدی افزایش یافته است. کاربردهای بسیار وسیعی در زمینه‌های مختلف از جمله: در قسمت کنترل کیفیت محصولات تولیدی کارخانجات صنعتی، مهندسی معکوس، بازسازی صورت انسان برای کاربردهای انیمیشن، هدایت ربات‌ها و... دارد [۱۳]. به علت کاربردهای وسیع ذکر شده، استخراج اطلاعات سه‌بعدی از سطوح اجسام و بازسازی آن‌ها یکی از مهم‌ترین موضوعات در سیستم بینایی ماشین محسوب شده و تحقیقات زیادی در این حوزه به‌ویژه قسمت خودکار کردن این فرایند انجام گرفته است.

در این فصل روش‌های تولید مدل سه‌بعدی تشریح شده و مزایا و محدودیت‌های هر یک مورد بررسی قرار گرفته است. تمرکز این بررسی بر روش نور ساختاریافته به‌عنوان روش اصلی در این پژوهش استوار بوده و تحقیقات مرتبط با آن‌ها با تأکید بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه این فصل چگونگی تولید تصویر نرمال بواسطه‌ی نیاز آن در سامانه‌ی پیشنهادی به‌طور مفصل تشریح شده است.

## ۲-۲ روش‌های تولید داده‌های سه‌بعدی از سطح اشیاء

یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در انتخاب روش بهینه در تهیه داده‌های سه‌بعدی از سطح اشیاء، امکان یا عدم امکان تماس با جسم در روند اندازه‌گیری است. از این رو تفکیک این روش‌ها در قالب دو گروه روش‌های مبتنی بر نیاز به تماس با جسم و روش‌های مبتنی بر عدم نیاز به تماس با جسم است. طبقه‌بندی روش‌های تهیه داده‌های سه‌بعدی از سطح اشیاء طبق نمودار ۱-۲ زیر است [۱۴].



نمودار ۱-۲: روش‌های تولید داده‌های سه‌بعدی

### ۱-۲-۲ روش‌های مبتنی بر نیاز به تماس با جسم<sup>۱</sup>

روش‌های مبتنی بر نیاز به تماس با جسم، روش‌هایی هستند که برای اندازه‌گیری نیاز به تماس مستقیم با جسم را دارند. در این روش‌ها معمولاً یک بازوی متحرک بر روی جسم حرکت می‌کند. با توجه به اینکه مختصات نوک بازو در یک سیستم مختصات معلوم مشخص است؛ همزمان با حرکت بر روی جسم مختصات تمام نقاط روی جسم مشخص خواهد شد. دستگاه CMM<sup>۲</sup> از جمله این سیستم‌ها است [۱۵، ۱۶]. شکل ۱-۲ یک نمونه دستگاه CMM را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲- یک نمونه دستگاه CMM

<sup>1</sup> Contact with Object

<sup>2</sup> Coordinate measuring machine



## ۲-۲-۲ روش‌های مبتنی بر عدم نیاز تماس با جسم<sup>۱</sup>

روش‌های مبتنی بر عدم نیاز به تماس با جسم، روش‌هایی می‌گویند که نیاز به تماس با جسم را ندارد. با توجه به محدودیت‌هایی که در بسیاری از کاربردها وجود دارد و نمی‌توان با جسم تماس برقرار کرد این روش‌ها در عمل کاربردهای بیشتری رادارند. به این دلیل که در این روش‌ها از نور یا لیزر استفاده می‌شود اغلب به روش‌های نوری هم معروف هستند؛ بنابراین نور یا لیزر نیاز اصلی این روش‌ها هستند که به سه دسته کلی می‌توان تقسیم‌بندی کرد [17]:

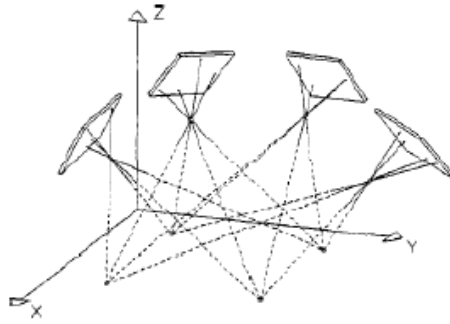
### ۱-۲-۲-۲ تکنیک‌های غیرفعال<sup>۲</sup>

روش‌های غیرفعال، به روش‌هایی گویند که منبع انرژی خاصی نیاز ندارند و از نور محیط برای اندازه‌گیری سطوح و استخراج داده‌های سه‌بعدی سطح اشیاء استفاده می‌کنند. این روش‌ها در علوم مهندسی نقشه‌برداری به فتوگرامتری معروف بوده و همان‌طور که از نام آن مشاهده می‌گردد، به معنی اندازه‌گیری کیفی و کمی اشیاء از طریق تصاویر اخذشده از آن‌ها است. در این روش‌ها، ایده اصلی از ساختار دید دوچشمی انسان گرفته شده است، که به جای چشم‌ها از دوربین‌ها استفاده می‌شود، در این راستا اگر تصاویر بافاصله کمتر از ۳۰۰ یا ۱۰۰ متر تهیه شوند، عموماً در حیطه کار فتوگرامتری برد کوتاه در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

در فتوگرامتری برد کوتاه برای استخراج داده‌های سه‌بعدی سطح اشیاء، از زوایای مختلف تصاویر به صورت همگرا (شکل ۲-۲) از شیء تهیه می‌گردد و از طریق تقاطع شعاع‌های نور متناظر، موقعیت سه‌بعدی نقاط موردنظر به دست می‌آید. امروزه در دسترس بودن دوربین‌های دیجیتال و داده‌های تصویر دیجیتال مفاهیم جدید را برای کاربردهای فتوگرامتری برد کوتاه تولید کرده است [۱۹].

<sup>1</sup> Non – Contact with Object

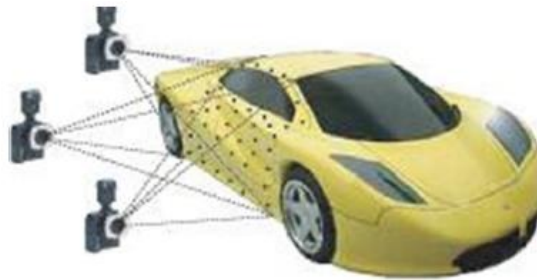
<sup>2</sup> Passive



شکل ۲-۲- تهیه تصاویر همگرا از نقاط در یک سیستم مختصات محلی

در این روش‌ها اگر هدف مدل‌سازی شیء متحرک باشد از چند دوربین همزمان از شیء عکسبرداری صورت می‌گیرد اما اگر جسم ثابت باشد با استفاده از یک دوربین از جهات مختلف از شیء تصویربرداری می‌شود. مشکل اساسی که در فتوگرامتری برد کوتاه<sup>۱</sup> وجود دارد مشکل تناظریابی نقاط متناظر در تصاویر است. منظور از تناظریابی که یکی از مباحث اصلی در فتوگرامتری است به این معنا که نقاط مشترک در حداقل دو تصویر شناسایی (تناظریابی نقاط با روش‌های متنوعی همچون SIFT<sup>۲</sup>) و با همدیگر تطبیق داده شوند.

در این سیستم‌ها چون تناظریابی به صورت خودکار انجام می‌پذیرد برای جسم‌هایی با بافت یکسان دچار مشکل هستند. در فتوگرامتری برد کوتاه به وسیله تارگت گذاری روی شیء برای حل این مشکل اقدام نموده‌اند در نتیجه این روش‌ها به روش‌های مبتنی بر تارگت شناخته می‌شوند (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- بازسازی سه‌بعدی به کمک تکنیک غیرفعال

مواردی نظیر موارد زیر را می‌توان به عنوان مشکلات موجود در استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه

غیرفعال دانست:

<sup>1</sup> Close range photogrammetry

<sup>2</sup> Scale Invariant Feature Transform

- ناتوان در تعیین موقعیت در مناطق یکنواخت و بدون بافت
- نیاز به تارگت گذاری به منظور افزایش دقت و سرعت اندازه گیری نقاط عکسی
- مشکلات فراوان در تولید ابر نقاط سه بعدی از سطح به طور خودکار
- مشکلات اجرایی در مدل سازی اشیاء بزرگ (ساختمان ها، سازه های صنعتی، تاریخی و ...)
- نیاز به پس پردازش های متنوع جهت بازسازی سه بعدی و تعیین موقعیت
- گسترش منطقه ی مورد کاوش از طریق تعیین پارامترهای توجیه خارجی تصاویر متوالی (ترفیغ تصاویر الزامی است).
- لزوم تأمین نور مناسب در محیط اندازه گیری (عکسبرداری)

## ۲-۲-۲-۲ تکنیک های فعال<sup>۱</sup>

روش های فعال به روش هایی اطلاق می شود که از نور یا لیزر استفاده می کند در نتیجه نیازی به نور محیط نداشته و در محیط تاریک هم قابل استفاده هستند. این نوع سیستم ها برای تولید نور یا لیزر نیاز به یک منبع انرژی دارند از جمله این سیستم ها می توان به لیزر اسکنر اشاره کرد که امروزه در حال توسعه است.

اندازه گیری لیزر اسکنر<sup>۲</sup> بر این اصل استوار است که مختصات هر نقطه روی سطح شیء با مشخص بودن مختصات محل ارسال لیزر، اندازه گیری طول فاصله مابین نقطه ارسال پالس و نقطه مورد نظر بر روی سطح شیء و اندازه گیری زاویه ارسال موج نسبت به یک جهت معین قابل محاسبه می باشد. قابلیت های خوب لیزر اسکنر، سبب گسترش استفاده از آن در سال های اخیر گردیده است. از جمله قابلیت های آن می توان به تهیه نقاط سه بعدی به صورت مستقیم، ارائه نتایج در مدت زمان کم، توانایی استخراج داده های سه بعدی از روی سطوح نامنظم با شکستگی ها و برجستگی های غیرمعمول، اشاره نمود [۲۰، ۲۱].

مواردی همچون موارد زیر جزء معایب این سیستم ها هستند:

- نسبت به فتوگرامتری برد کوتاه قدرت تفکیک پایین تری دارند چون تنها اطلاعات هندسی را برداشت می کند.

<sup>1</sup> Active

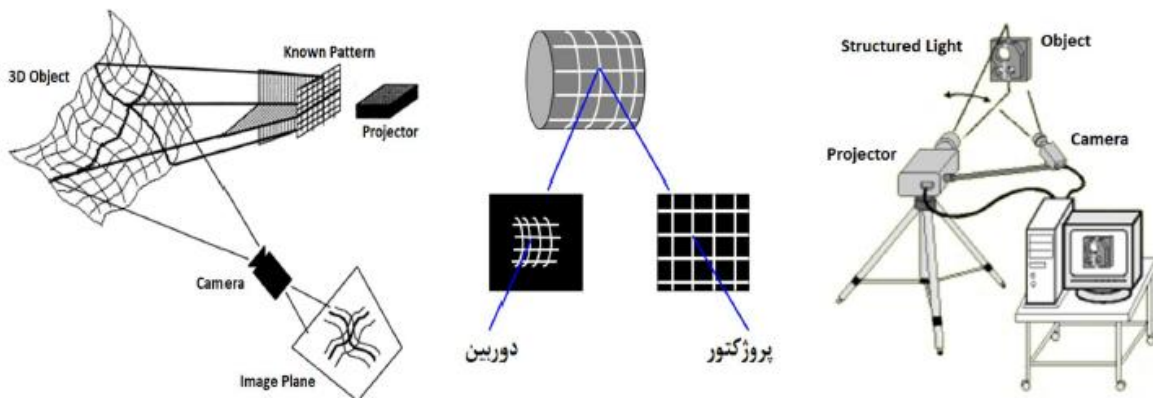
<sup>2</sup> Laser Scanner

- همچنین برای اجسامی که متحرک هستند مناسب نیستند.
- هزینه بسیار بالای سیستم‌های لیزر اسکنر
- حجم سنگین داده‌ها و پردازش
- الزام به تارگت‌گذاری در سطح عارضه جهت هم مرجع سازی دقیق

### ۳-۲-۲-۲ تکنیک‌های ترکیبی<sup>۱</sup>

روش‌های ترکیبی، به روش‌هایی گویند که ساختار همانند ساختار روش‌های غیرفعال دارند ولی به جای استفاده از نور محیط نور یا لیزر موردنیاز خود را توسط یک منبع تولید می‌کنند. یکی از این روش‌ها که در سال‌های اخیر گسترش یافته روش نور ساختاریافته می‌باشد. این روش شبیه فتوگرامتری برد کوتاه است با این تفاوت که یک دوربین همراه با پروژکتور یا لیزر به منظور تمایز در سطح شیء، استفاده خواهد شد.

روش نور ساختاریافته<sup>۲</sup> بر اساس الگوی نوری که بر روی شیء تابیده می‌شود و تصویری که توسط دوربین گرفته می‌شود داده‌های سه‌بعدی سطح شیء قابل استخراج است. در واقع الگوی نوری<sup>۳</sup> تصویر شده، بافت مجازی بر روی سطح شیء ایجاد می‌کند که سبب تشخیص و تفکیک آسان‌تر نقاط در فضا عکس می‌گردد. در این راستا شکل ۲-۴، نمای شماتیک از تکنیک نور ساختاریافته در بازسازی سه‌بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- نمای شماتیک از تکنیک نور ساختاریافته در بازسازی سه‌بعدی

<sup>1</sup> Hibryd

<sup>2</sup> Structure Light

<sup>3</sup> Pattern Light

بنابراین روش نور ساختاریافته زمانی که قابلیت نصب تارگت روی سطح جسم امکان پذیر نباشد و یا شیء بافت یکسانی داشته باشد می تواند یک روش جایگزین فتوگرامتری برد کوتاه باشد. این روش به سرعت مورد توجه قرار گرفت و در کارهای مختلف از جمله: بازسازی شیء به صورت سه بعدی، هدایت ربات ها، کنترل کیفیت و مهندسی معکوس، مورد استفاده قرار گرفت [۴].

## ۳-۲ سیستم های نور ساختاریافته

سیستم های نور ساختاریافته به منظور تولید مدل سه بعدی از اجسام بدون بافت مورد استفاده قرار می گیرند. به منظور استفاده از روش نور ساختاریافته معمولاً یک یا چندین الگوی نوری را بر روی شیء تابانده شده سپس از شیء تصویربرداری می شود. همان طور که قبلاً بیان شد دو رویکرد: ۱- تاباندن بافت به سطوح بدون بافت به کمک ویدئوپروژکتور با هدف تسهیل در فرایند تناظریابی [۴, ۱۰] و ۲- بکارگیری الگوهای نوری با هندسه معلوم (صفحه) توسط لیزر با هدف تقاطع یافتن با پرتوهای تصویری [۲, ۸, ۹, ۱۱, ۱۲] راهکارهای مرسوم در این حوزه بشمار می روند.

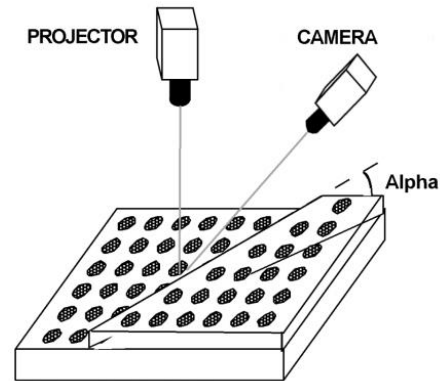
سیستم های نور ساختاریافته به روش های گوناگونی پیاده سازی و طراحی شده است؛ که تفاوت آنها در تعداد دوربین ها، سیستم تصویرکننده (لیزر، پروژکتور)، نحوه کدگذاری الگو می باشد. سیستم های نور ساختاریافته را بر اساس تعداد دوربین و نوع سیستم تصویرکننده میتوان به صورت زیر طبقه بندی نمود.

- سامانه های نور ساختاریافته با یک دوربین
- سامانه های نور ساختاریافته با بیش از یک دوربین
- سامانه های نور ساختاریافته با یک سیستم تصویر کننده
- سامانه های نور ساختاریافته با الگوی لیزری
- سامانه های نور ساختاریافته با الگوی نوری

### ۱-۳-۲ سامانه های نور ساختاریافته با یک دوربین

این سیستم های از یک دوربین و معمولاً از یک پروژکتور استفاده می کنند. این نوع سیستم ها هر نقطه را فقط از طریق دو پرتو نوری بازسازی می کنند؛ دیده نشدن قسمت های از سطح سه بعدی و پوشش داده نشدن سطح جسم سه بعدی توسط الگوی نوری عواملی هستند که استخراج کامل مدل سه بعدی از جسم

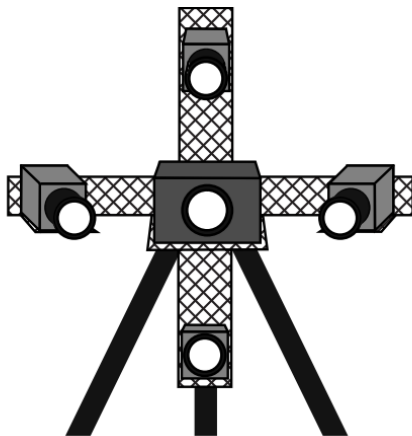
را سلب می‌کنند. این مشکل با چرخش شیء و تصویربرداری متعدد از وجه‌های مختلف، یا چرخش سیستم حول شیء حل می‌کنند [۲۲-۲۴]. شکل ۲-۵ نمونه‌ای از این نوع سیستم‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۵: سامانه نور ساختاریافته متشکل از یک دوربین و یک پروژکتور برگرفته از [۲۳، ۲۴]

### ۲-۳-۲ سامانه‌های نور ساختاریافته با بیش از یک دوربین

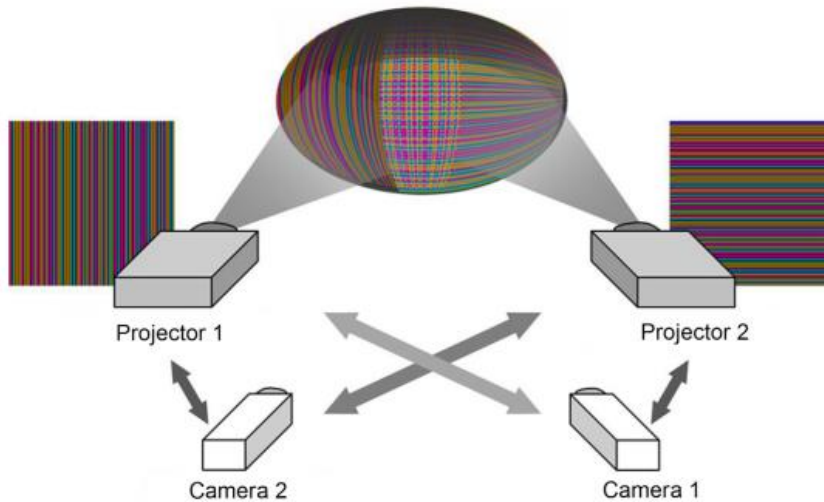
سیستم‌های نور ساختاریافته با بیش از یک دوربین، معمولاً از وسیله تصویر کننده فقط برای ایجاد بافت مجازی بر روی سطح شیء استفاده می‌کنند. از آنجاییکه در سیستم‌های تجاری دوربین‌ها و پروژکتورها نسبت به هم ثابت بوده نیازی به کالیبراسیون لحظه‌ای ندارند؛ اما در سیستم‌هایی که نسبت به هم ثابت نبوده نیاز به کالیبراسیون قبل از بهره‌برداری از این سیستم‌ها وجود دارد [۲۵]. شکل ۲-۶ نمونه‌ای از این نوع سیستم‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۶: سامانه‌ی نور ساختاریافته با بیش از یک دوربین برگرفته از [۲۵]

### ۲-۳-۳ سامانه‌های نور ساختاریافته با بیش از یک وسیله تصویر کننده

این نوع سیستم‌ها معمولاً برای تصویرکردن از پروژکتور یا لیزر استفاده می‌کنند به دلیل اینکه از چند جهت الگوی نوری روی جسم تصویر شده، مشکل مناطق سایه در آن‌ها به ندرت دیده می‌شود. در بعضی از این سیستم‌ها به منظور تفکیک الگوهای نوری از همدیگر، الگوی نوری هر کدام از پروژکتورها در یک باند خاص منتشر می‌شود [۲۶]. شکل ۲-۷ نمونه‌ای از این نوع سیستم‌ها را نمایش می‌دهد.

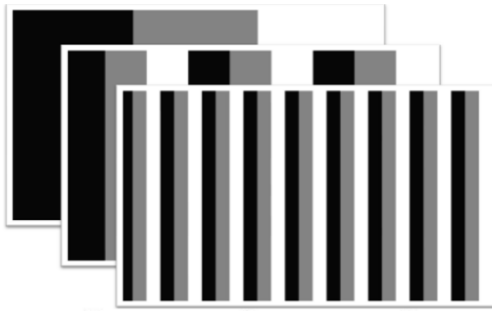


شکل ۲-۷: نمونه سامانه‌ی نور ساختاریافته با بیش از یک وسیله تصویر کننده برگرفته از [۲۶]

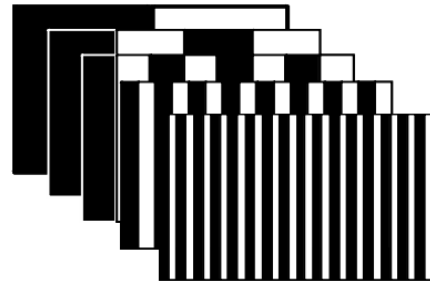
### ۲-۳-۴ سامانه‌های نور ساختاریافته با الگوی نوری

در سیستم‌های نور ساختاریافته با الگوی نوری، با استفاده از پروژکتور یک الگوی نوری ساختاریافته بر روی شیء تابیده شده و توسط دوربین تصویربرداری انجام می‌گیرد. به‌طور معمول الگوهای تابیده شده متفاوت بوده و بر اساس کاربرد و نوع الگو ممکن است یک یا مجموعه‌ای از الگوها به‌طور متوالی بر روی شیء تابیده شده و به ازای هر الگو یک تصویر اخذ گردد. در این سامانه‌ها به دلیل آنکه با یک الگوی تمامی سطح شیء پوشش داده می‌شود، میتوان برای اجسام متحرک مورد استفاده قرار بگیرد.

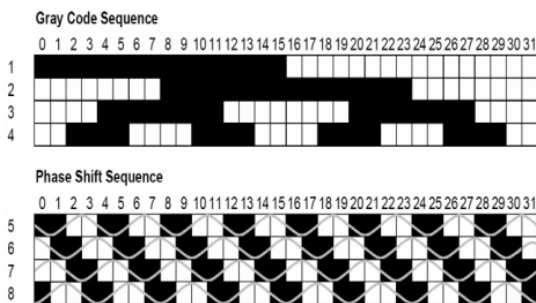
همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، به‌دلیل آنکه الگوی نوری تصویر شده توسط پروژکتور معمولاً دارای یک طرح منظم و تکراری است، بنابراین به‌منظور اجتناب از تشخیص نادرست نقاط متناظر، از الگوی کدگذاری شده استفاده می‌کنند. الگوهای باینری، الگوهای خاکستری، انتقال فاز، ترکیبی از انتقال فاز با الگوهای خاکستری، نوارهای رنگی و... نمونه‌هایی از الگوهای کدگذاری شده می‌باشند. نمونه‌ای از الگوهای کدگذاری شده در شکل ۲-۸ ارائه شده است [۲۷].



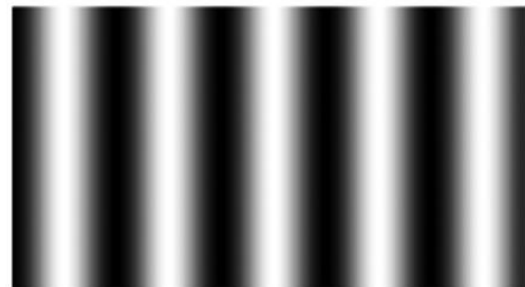
ب



الف



ت



پ

شکل ۲-۸: نمونه الگوهای کددار الف) باینری، ب) خاکستری، پ) فازشیفت، ت) ترکیبی از فازشیفت با خاکستری برگرفته از [۲۸]

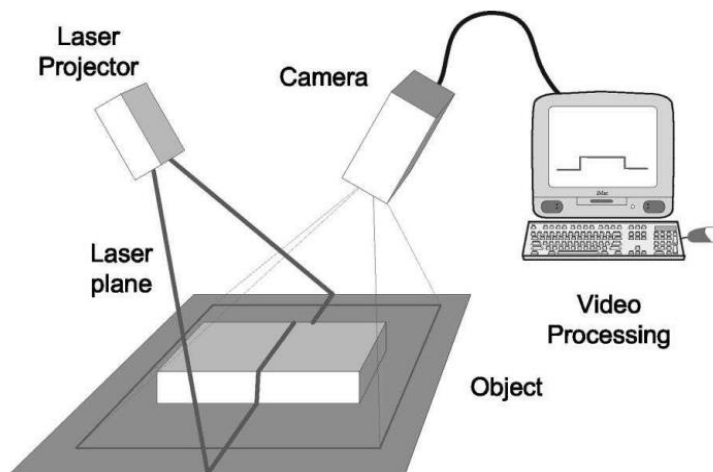
### ۲-۳-۵ سامانه‌های نور ساختاریافته با الگوی لیزری

در سیستم‌های نور ساختاریافته با الگوی لیزری، لیزر صفحه‌ای روی شیء تابیده و بوسیله دوربین با زاویه و فاصله معلوم (ثابت) تصویر اخذ می‌گردد. به منظور تولید مدل سه‌بعدی تمام سطح شیء به دو صورت می‌توان عمل نمود. در روش اول، شیء روی یک صفحه دوران کننده قرار گرفته و با زاویه و سرعت یکنواخت دوران نموده تا زمانیکه تمام سطح شیء اسکن شود. نقطه مقابل آن، روش دوم مبتنی بر ثابت بودن شیء و دوران سیستم لیزر بوده تا سطح سه‌بعدی جسم به صورت کامل اسکن شود. در هر دو حالت باید دوران به صورت یکنواخت و یا اینکه زاویه دوران مشخص و معلوم باشد. در این نوع سیستم‌ها نیازی به کدگذاری الگو نبوده، زیرا به ازای هر بار تابیده شدن مقطع لیزر یک تصویر اخذ می‌گردد. با توجه به باریک بودن لیزر اما هنوز چالش تشخیص مرکز صحیح نوار لیزر وجود دارد. به طور معمول از روش‌های پردازش تصویر جهت پیدا کردن مرکز لیزر استفاده می‌گردد. اما به علت آنکه نوار لیزر در یک صفحه قرار دارد؛ از نقطه نظر هندسی تمامی نقاط سه‌بعدی واقع در فصل مشترک مقطع لیزر و شیء باید در معادله صفحه (مقطع لیزر)



صدق کنند. از سوی دیگر، در این روش‌ها جهت تولید مدل سه‌بعدی کامل شیء تعداد تصاویر بسیار بالایی نیاز بوده در نتیجه برای اشیای متحرک مناسب نیست.

در میان روش‌های نور ساختاریافته به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی اجسام، مثلث‌بندی با لیزر یکی از روش‌هایی است که استفاده از آن روبه افزایش است. با این حال محدودیت موجود در این روش‌ها، نیاز به ثابت بودن لیزر و یا مشخص بودن معادله صفحه لیزر است. به‌عبارت بهتر، اساس این رویکرد معلوم بودن معادله صفحه لیزر جهت بازسازی مختصات در فرایند اسکن کردن برای تمامی نقاط واقع در مقطع لیزر می‌باشد. همچنین مثلث‌بندی با لیزر یک روش تصویرمبنا محسوب شده و پردازش تصویر یکی از بااهمیت‌ترین مراحل در فرایند تولید ابرنقاط سه‌بعدی در این تکنیک می‌باشد. به‌طور معمول پردازش تصویر به‌منظور پیدا کردن مرکز خط لیزر بکاربرده می‌شود. شکل ۲-۹ نمونه‌ای سامانه نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر را نمایش می‌دهد [۲۹].

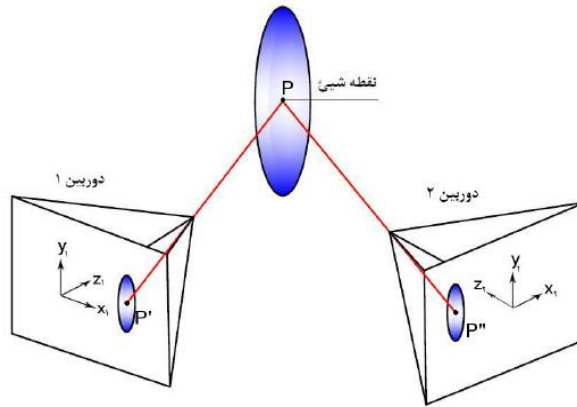


شکل ۲-۹: نمونه‌ای از سامانه نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر برگرفته از [۲۹]

## ۲-۴ مثلث‌بندی در تصاویر

در این بخش به تشریح مثلث‌بندی و کاربرد آن در تولید مدل سه‌بعدی پرداخته خواهد شد. اخذ تصویر از یک نقطه مورد اندازه‌گیری بوسیله دو دوربین تصویربرداری، یک مثلث به رأس‌های نقطه مورد اندازه‌گیری و دو مرکز پرسپکتیو دوربین‌های تصویربرداری ایجاد می‌سازد که به عنوان مثلث‌بندی در تصاویر شناخته می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۲-۱۰ می‌بینید نقطه  $P$  به‌عنوان نقطه مورد اندازه‌گیری در دو منظر متفاوت (دو دوربین) است. در صورتیکه توجیه نسبی بین دو دوربین مشخص باشد با داشتن مختصات دویبعدی

تصویری نقاط می‌توان شعاع‌های  $PP'$  و  $PP''$  را معلوم دانست و در نهایت مختصات سه‌بعدی نقطه  $P$  را با استفاده از تقاطع این دو خط محاسبه کرد.

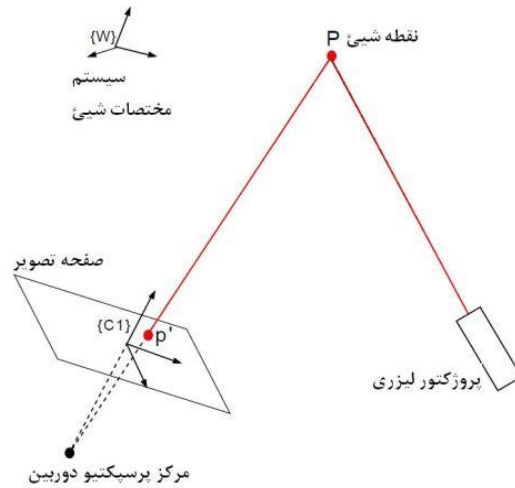


شکل ۲-۱۰: اصول مثلث‌بندی با لیزر

مشخص شدن وضعیت دو دوربین در این روش از طریق یک فرایند استاندارد کالیبراسیون دوربین امکان‌پذیر خواهد بود. روش‌های متعددی برای کالیبراسیون دوربین توسط [۳۰-۳۲] ارائه شده است. همچنین در [۳۳] عملکرد روش‌های مختلف و دقت آن‌ها را مقایسه نموده است. اما مهم‌ترین چالش این است که چگونه می‌توان نقطه  $P$  را منحصربفرد در دو تصویر یافت. به عبارت بهتر چگونه می‌توان اطمینان حاصل نمود که نقاط  $P'$  و  $P''$  دقیقاً متناظر نقطه  $P$  در فضای زمین هستند. این چالش به تناظریابی موسوم است که حل آن در سیستم‌هایی که از چند دوربین به‌عنوان سنجنده بهره می‌گیرند مشکلات فراوانی دارند. از سوی دیگر تکنیک‌های دیگری که در زمینه تشخیص نقاط توسعه پیدا کرده‌اند از روش‌های ماشین بینایی کمک می‌گیرند. به این معنا که الگوی نوری در هندسه‌های متفاوت (نقاط، صفحات، خطوط ضربدری، خطوط موازی و غیره) روی شیء تابیده شده و بر این اساس نقطه روشن شده در فضای سه‌بعدی توسط دو دوربین براحتی قابل تشخیص و تفکیک می‌گردد.

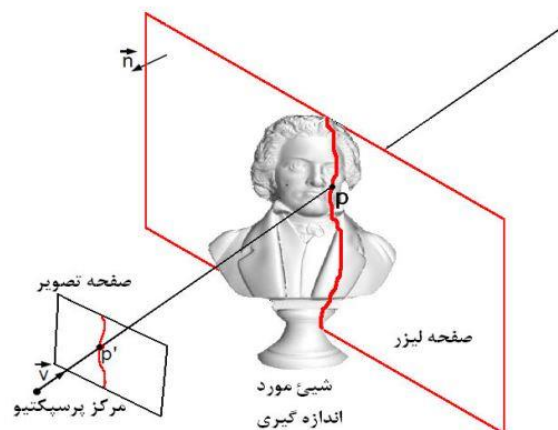
با معلوم بودن هندسه منبع نوری تاباننده الگو، منبع نوری می‌تواند جایگزین دوربین دوم در مثلث‌بندی شود. این فرایند در بسیاری از سیستم‌ها موسوم به فاصله‌یاب‌های مثلث‌بندی یافت می‌شوند. شکل ۲-۱۱ نشان می‌دهد که چگونه در مثلث‌بندی یک منبع نوری لیزری جایگزین یک دوربین می‌گردد. در این شیوه اندازه‌گیری پروژکتور لیزری علاوه بر تولید بافت متمایز و قابل تشخیص در تصویر اخذشده توسط دوربین به همراه خود معادله صفحه لیزر را در بازسازی نقاط سه‌بعدی دخیل می‌کند. بر این اساس

با محاسبه مدل دوربین در فرایند کالیبراسیون و نیز مشخص بودن معادله صفحه یا خط لیزر در فضا، مختصات سه بعدی نقطه P از تقاطع خط یا صفحه‌ی لیزر با خط  $PP'$  قابل محاسبه است. (شکل ۲-۱۱)



شکل ۲-۱۱: سیستم اسکنر با منبع نوری لیزر برگرفته از [۳۴، ۳۵]

به منظور تعیین نمودن معادله صفحه لیزر بایستی این صفحه نورانی به شکلی در فضا بازسازی گردد. این امر به صورت‌های مختلف توسط افراد [۹، ۱۳، ۱۴، ۲۷] پیشنهاد گردیده است. همان طور که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌شود صفحه لیزر یک مقطع را در سطح شیء مورد اندازه‌گیری روشن نموده است. جهت محاسبه مختصات سه بعدی نقاط روشن شده، مسئله مثلث بندی به محاسبه تقاطع پرتوی تصویری (V) با صفحه لیزر محدود می‌گردد.



شکل ۲-۱۲: بازسازی سه بعدی از طریق یک دوربین و صفحه لیزر برگرفته از [۱]

بنابراین جهت محاسبه مختصات سه بعدی نقاط بایستی معادله صفحه لیزر را با معادله پرتوی نوری  $PP'$  قطع داد. معادله پرتوی نوری متعلق به نقطه  $P$  معادله خطی است که وضعیت آن در فضا توسط پارامترهای توجیه داخلی دوربین معلوم می‌گردد و معادله آن همان معادله شرط هم‌خطی در روابط فتوگرامتری می‌باشد. از سوی دیگر معادله صفحه لیزر معادله صفحه نورانی است که بایستی این معادله در لحظه اسکن نسبت به دوربین معلوم باشد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f \frac{X}{Y} \\ -f \frac{Y}{Z} \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

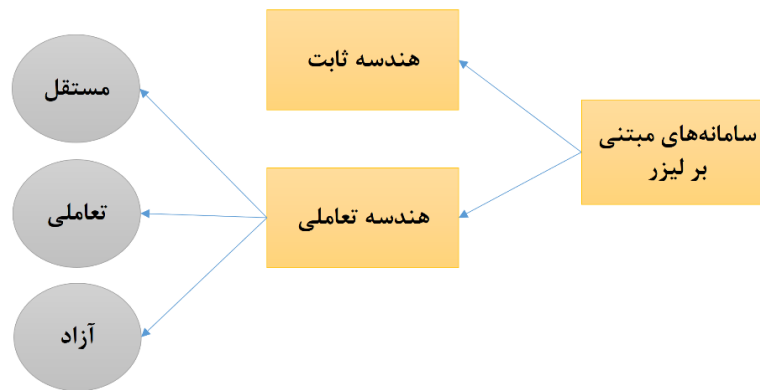
$$AX + BY + CZ + D = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{xZ}{f} \\ \frac{yZ}{f} \\ \frac{-Df}{-Ax - By + Cf} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

در روابط بالا معادله (1-2) معادله شرط هم‌خطی مربوط به نقطه‌ای است که مختصات تصویری آن  $(x,y)$  و مختصات شیء آن  $(X,Y,Z)$  می‌باشد. لازم به ذکر است که در این روابط سیستم مختصات شیء منطبق بر مرکز پرسپکتیو دوربین بوده و تمامی پارامترهای دوران و انتقال برابر صفر می‌باشد. سمت چپ رابطه (2-2) معادله صفحه لیزر با سه پارامتر مستقل  $(A,B,C)$  و یک پارامتر وابسته  $D$  می‌باشد. به منظور بازسازی مختصات سه بعدی نقطه  $P$  توسط رابطه (2-2) از تقاطع صفحه با پرتوی منتشرشده از معادله شرط هم‌خطی حاصل خواهد شد. تعیین معادله صفحه لیزر در سامانه‌های نور ساختاریافته یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی این سامانه‌ها بشمار می‌رود؛ که ویژگی‌های آن‌ها از جمله کم هزینه بودن، سرعت بالا، تولید مدل دقیق و تکرارپذیری را تحت‌الشعاع خود قرار می‌دهد [36].

## ۵-۲ انواع سامانه‌های نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر

همان‌طور که بررسی شد، به منظور محاسبه مختصات محل تقاطع لیزر و شیء توسط سیستم نور ساختاریافته، معادله صفحه لیزر نسبت به دوربین در سیستم مختصات شیء باید مشخص باشد تا مختصات نقاط واقع در فصل مشترک لیزر و شیء از طریق مثلث‌بندی بازسازی شوند. عامل اصلی در تنوع سیستم‌های

نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر، نحوه تعیین معادله صفحه لیزر در حین فرایند اسکن می‌باشد؛ چراکه اصول کلی در بازسازی سه‌بعدی مختصات نقاط واقع در فصل مشترک لیزر و شیء بر مبنای مثلث‌بندی با لیزر بوده که در تمام روش‌ها مشترک است. بر این اساس طبقه‌بندی کلی در رابطه با سامانه‌های موجود مبتنی بر لیزر پرداخته که این طبقه‌بندی مبتنی بر نحوه تعیین صفحه لیزر (ثابت یا متحرک بودن) در این سامانه‌ها می‌باشد (نمودار ۲-۲).

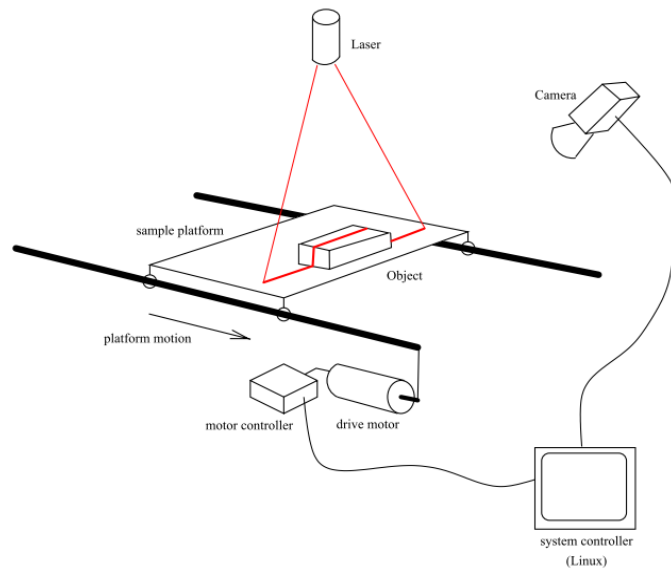


نمودار ۲-۲: طبقه‌بندی سیستم‌های نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر

## ۲-۵-۱ روش‌های هندسه ثابت

در روش‌های نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر با هندسه ثابت، دوربین و صفحه لیزر نسبت به هم ثابت بوده و در فرایند تصویربرداری موقعیت آن‌ها نسبت به همدیگر تغییر نخواهد کرد. به‌منظور برآورد معادله صفحه لیزر کفایت تمامی اجزاء سیستم نسبت به همدیگر صرفاً یکبار کالیبره شوند. وضعیت قرارگیری لیزر و دوربین نسبت به هم ثابت شده و تمامی مراحل تصویربرداری با فرض اینکه همه پارامترهای دوربین و لیزر نسبت به هم ثابت هستند انجام می‌شود. برای تولید مدل سه‌بعدی کامل شیء لازم است تا به نحوی خط لیزر شیء را جاروب کند زیرا خط لیزر بکارگرفته شده در سیستم در هر بار تاباندن لیزر تنها یک مقطع از شیء را برداشت می‌نماید. در این نوع سیستم‌ها به‌منظور برداشت تمامی سطح جسم دو رویکرد وجود دارد. ۱- شیء در مقابل سیستم جابجا شود ۲- سیستم در اطراف شیء حرکت کند. به همین جهت به‌منظور چرخاندن شیء یا سیستم نیاز به یک سخت‌افزار اضافی نظیر میزگردان یا بازوهای متحرک و ... بوده که هزینه سیستم را افزایش خواهد داد [۳۷]. همان‌طور که در شکل مشهود است دوربین و پروژکتور لیزری نسبت به همدیگر کاملاً ثابت بوده و جهت تولید مدل سه‌بعدی کامل سطح لازم است که شیء در زیر سیستم به صورت افقی جابجا شود. لازم به ذکر است که جابجایی شیء دینامیکی محسوب شده اما در

حقیقت ثابت بودن دوربین نسبت به صفحه لیزر مفهوم هندسه ثابت را نمایان می‌کند (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳: سیستم نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر با هندسه ثابت برگرفته از [۳۸]

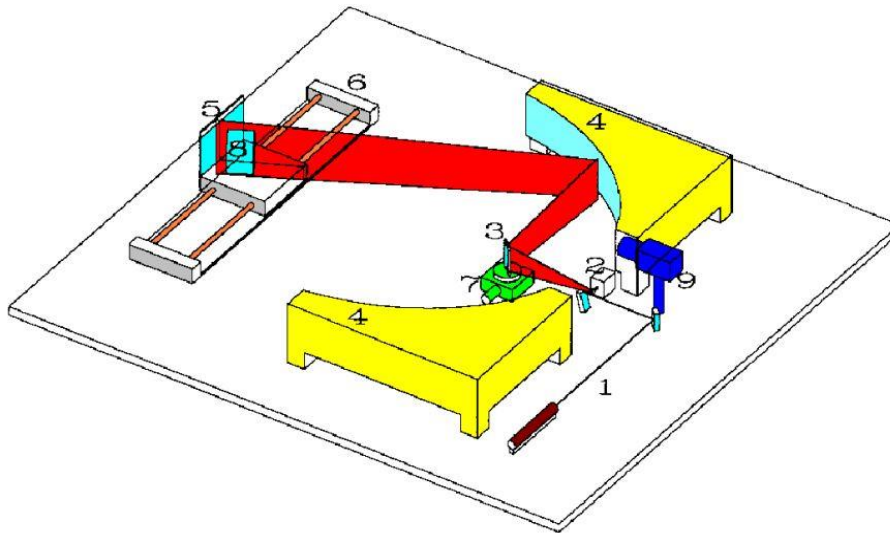
## ۲-۵-۲ روش‌های مبتنی بر هندسه دینامیک

در روش‌های تولید مدل سه‌بعدی مبتنی بر هندسه دینامیک، هدف تولید مدل سه‌بعدی کامل از سطح جسم بوده که این سیستم‌ها به صورت پویا طراحی شده‌اند. به این صورت که در هر لحظه از اسکن صفحه لیزر در فضا متحرک بوده و سطح موردنظر توسط صفحه لیزر جاروب می‌شود. بدین منظور سه استراتژی کلی در طراحی این سیستم‌ها وجود دارد که هندسه دینامیکی مستقل، تعاملی، آزاد نامیده می‌شوند.

### • سیستم‌های مبتنی بر هندسه دینامیکی مستقل

در سیستم‌های مبتنی بر هندسه دینامیکی مستقلاً استفاده از یک وسیله سخت‌افزاری خودکار پارامترهای وضعیت صفحه لیزر را اندازه‌گیری نموده و به سیستم به صورت لحظه‌ای معرفی می‌نماید. معمولاً صفحه نورانی لیزر در یک قالب مشخص و سرعت یکنواخت حرکت می‌کند بنابراین پارامترهای جابجایی به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند. در این نوع سیستم‌ها به طور معمول پروژکتور لیزری یا لیزرهای صفحه‌ای روی یک موتور گرداننده قرار گرفته که حول یک محور مشخص در حال دوران بوده یا نور آن توسط یک آینه گردان منحرّف و به سطح شیء تابانده می‌شود. سیستم‌های مبتنی بر هندسه دینامیکی به منظور تولید مدل سه‌بعدی از اجسام بزرگ با محدودیت روبرو نبوده زیرا قادرند با جابجا شدن سامانه، یک وجه از شیء را اسکن نموده و وجوه

دیگر را در استقرارهای بعدی اسکن نمایند. شکل ۲-۱۴ یک سیستم مبتنی بر هندسه دینامیکی را نشان می‌دهد [۳۹].

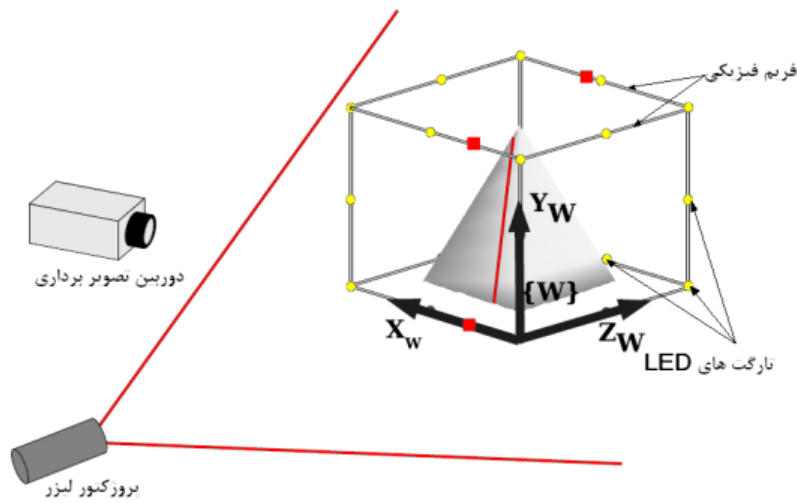


شکل ۲-۱۴: سیستم نور ساختار یافته مبتنی بر هندسه دینامیکی مستقل برگرفته از [۳۹]

مسیر (۱) نور نقطه‌ای لیزر که در مسیر به یک آینه برخورد کرده و به سمت یک لنز استوانه‌ای منحرف می‌شود. (۲) نور نقطه‌ای لیزر توسط لنز استوانه‌ای به صورت یک خط درمی‌آید و به یک آینه هدایت می‌شود. (۳) نور خطی لیزر توسط یک آینه منحرف شده و سپس به سمت یک آینه بیضی شکل هدایت می‌شود. (۴) نور لیزر با برخورد به آینه بیضی شکل منحرف شده و به سمت شیء هدایت می‌شود. (۵) شیء مورد نظر با چرخش آینه (۳) و جابجایی خط لیزر بر روی آن اسکن می‌شود [۳۹].

#### • سیستم‌های نور ساختار یافته مبتنی بر هندسه دینامیکی تعاملی

در روش‌های مبتنی بر هندسه تعاملی، به صورت لحظه‌ای پارامترهای معادله صفحه‌ی لیزر در فضا مشخص، و در درون سیستم و فضای تصویر برآورد می‌شود. به همین جهت با استفاده از شروط هندسی خاصی، امکان تعیین وضعیت صفحه لیزر بدون بکارگیری ابزار اضافی اندازه‌گیری و تنها با استفاده از پردازش تصاویر اطلاعات کافی اخذ گردد. بر همین اساس در [۴۰, ۴۱] جهت برآورد معادله صفحه لیزر از تکنیک‌های متنوعی استفاده نموده‌اند (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵: نمونه‌ای از سامانه نور ساختاریافته مبتنی بر هندسه دینامیکی تعاملی توسط [۴۰]

### • سیستم‌های نور ساختاریافته مبتنی بر هندسه دینامیکی آزاد

این سامانه متشکل از دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای بوده که در آن برای تولید محتوای سه‌بعدی، از نور بازتاب شده از فصل تقاطع صفحه‌ی لیزر و عارضه‌ی سه‌بعدی، تصاویر استریو اخذ می‌گردد. سیستم‌های مبتنی بر هندسه دینامیکی آزاد، لیزر صفحه‌ای به صورت آزادانه و بدون هیچ محدودیتی روی جسم تابانده می‌شود. لازم به ذکر است که مشتمل بر دو دوربین بوده و ارتباط نسبی آن‌ها ثابت می‌باشد. در این سیستم‌ها بر خلاف سیستم‌های قبل هیچ‌گونه قید خاصی برای لیزر اختصاص نمی‌یابد. به عبارت بهتر هیچ‌گونه کنترلی در مورد نحوه‌ی جاروب سطح عارضه توسط لیزر صفحه‌ای وجود نداشته و پارامترهای لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر از قبل مشخص نیست. بر این اساس مزیت متمایز این سامانه نسبت به سامانه‌های پیشین، آزادانه بودن لیزر در فضا است. به طور مفصل در فصل چهارم نمونه‌ای از این سامانه طراحی و پیاده‌سازی شده است.

### ۲-۶ کالیبراسیون سیستم‌های نور ساختاریافته

مشاهدات عکسی به طور معمول تحت تأثیر خطاهای تدریجی و اتفاقی بوده که جهت حذف خطاهای اتفاقی



از روش کمترین مربعات<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. به‌منظور حذف خطاهای تدریجی از قبیل اعوجاج شعاعی<sup>۲</sup> و مماسی<sup>۳</sup> عدسی، مقدار اختلاف مرکز عکسی<sup>۴</sup> با مرکز تصویر<sup>۵</sup>، اختلاف مقیاس در دو جهت و عدم قائم بودن محورها روش‌های مختلفی ارائه شده است. در فتوگرامتری کلاسیک خطاهای یادشده بعد از توجیه داخلی و به صورت پیش‌پردازش، با توجه به روابط کالیبراسیون، مرحله به مرحله حذف می‌شوند. در فتوگرامتری نوین خطاهای تدریجی همراه با پردازش داده‌ها به‌منظور تولید داده‌های سه‌بعدی، تصحیح می‌شوند که آن را سلف کالیبراسیون<sup>۶</sup> می‌نامند. در نتیجه می‌توان گفت که کالیبراسیون پروسه‌ای است که خطاهای سیستماتیک بوجود آمده در فرایند تصویربرداری را پالایش نماید.

## ۲-۶-۱ کالیبراسیون دوربین

دوربین‌های تصویربرداری در دو حالت لنز ثابت یا لنز خودکار ساخته و طراحی شده‌اند. در دوربین‌های لنز ثابت یک حالت برای زوم و فوکوس و قطر دریچه شاتر طراحی شده است. در نقطه مقابل آن، دوربین‌های با حالت خودکار، فوکوس و زوم آن‌ها به صورت لحظه‌ای و خودکار بر اساس تغییر فاصله تنظیم می‌شود. لنزهای خودکار نسبت به لنزهای ثابت گزینه‌های بیشتری را به‌منظور تصویربرداری شفاف دارند؛ زیرا با هر فاصله از شیء، فوکوس و زوم خود را تنظیم خواهند نمود؛ اما لنزهای خودکار به دلیل تغییر فوکوس مستلزم برآورد پارامترهای کالیبراسیون در هر لحظه تصویربرداری می‌باشد. تصاویر اخذشده از دوربین‌ها در زمینه تولید مدل سه‌بعدی به علت اعوجاجات تصویری بدون انجام کالیبراسیون مناسب نخواهد بود در نتیجه انجام کالیبراسیون دوربین امری بدیهی است. بر این اساس معمولاً فوکوس لنزهای خودکار را برای فاصله مشخصی تنظیم و پارامترهای کالیبراسیون را محاسبه می‌کنند.

به‌طور کلی کالیبراسیون در فتوگرامتری به دو دسته آزمایشگاهی و محیطی تقسیم می‌شوند. روش‌های آزمایشگاهی نیازمند تجهیزات خاصی است و بکارگیری چنین روش‌هایی در مورد دوربین‌های غیر متریک مقرون به‌صرفه نبوده و عموماً مختص دوربین‌های متریک است. بر این اساس روش کالیبراسیون محیطی راهکار رایج در مورد دوربین‌های غیرمتریک محسوب شده که از طریق فرایند سلف

<sup>1</sup> Least square

<sup>2</sup> Radial distortion

<sup>3</sup> Tangential distortion

<sup>4</sup> Principle point

<sup>5</sup> Projection center

<sup>6</sup> Self calibration

کالیبراسیون صورت می‌پذیرد. تفاوت عمده بین کالیبراسیون دوربین‌های متریک و غیرمتریک در مقادیر پارامترهای آن‌ها بوده که در دوربین‌های متریک تا مدت‌ها در هر پروژه قابل استفاده بوده ولی در دوربین‌های غیرمتریک، این مقدار بایستی در بازه‌های زمانی کوتاه مدتی بروزرسانی شوند [۴۲، ۴۳].

### • روش سلف کالیبراسیون

روش سلف کالیبراسیون به منظور کالیبراسیون دوربین تصویربرداری، مبتنی بر سرشکنی دسته اشعه است. سرشکنی دسته اشعه حل همزمان همه دسته اشعه‌ها (همه معادلات شرط هم‌خطی) در یک شبکه فتوگرامتریک است. به عبارت بهتر سرشکنی دسته اشعه به‌طور همزمان و طی یک فرایند سرشکنی کمترین مربعات تمامی دسته اشعه‌ها و پارامترهای هندسه داخلی و پارامترهای اضافی را برآورد می‌کند. بطور معمول، پارامترهای اضافی شامل پنج پارامتر توصیف‌کننده اعوجاج شعاعی و خارج از مرکزیت و دو پارامتر اضافی Affine می‌باشند [۴۳].

معادلات شرط هم‌خطی بین فضای شیء و فضای تصویر به همراه حذف خطاهای سیستماتیک به

صوت زیر می‌باشد [۴۴].

$$F_p = \begin{pmatrix} x_p - x_0 + \Delta x + c \frac{r_{1,1}(X_p - X_o) + r_{1,2}(Y_p - Y_o) + r_{1,3}(Z_p - Z_o)}{r_{3,1}(X_p - X_o) + r_{3,2}(Y_p - Y_o) + r_{3,3}(Z_p - Z_o)} \\ y_p - y_0 + \Delta y + c \frac{r_{2,1}(X_p - X_o) + r_{2,2}(Y_p - Y_o) + r_{2,3}(Z_p - Z_o)}{r_{3,1}(X_p - X_o) + r_{3,2}(Y_p - Y_o) + r_{3,3}(Z_p - Z_o)} \end{pmatrix} = 0 \quad (3-2)$$

در رابطه‌ی (۳-۲)، بردار موقعیت سه‌بعدی نقطه  $p$  در فضای تصویر،  $(x_0, y_0)$  بردار

موقعیت دوبعدی مرکز تصویر در سیستم مختصات عکسی،  $(\Delta x, \Delta y)$  بردار تصحیحات اعمال شده به

موقعیت اندازه‌گیری شده در فضای تصویر به منظور کاهش خطاهای سیستماتیک تصویر (اعوجاجات

شعاعی، مماسی و ...)، مقادیر  $r_{i,j}$  عناصر ماتریس دوران سه‌بعدی  $R_{\omega, \phi, \kappa}$  میان فضای زمین و تصویر،  $[X_p,$

$Y_p, Z_p]^T$  مختصات سه‌بعدی نقطه در فضای شیء و  $[X_o, Y_o, Z_o]^T$  نیز مختصات مرکز تصویر در سیستم

مختصات شیء می‌باشند [۴۴].

بمنظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون معمولاً از صفحات شطرنجی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی

استفاده می‌شود. سپس از صفحه شطرنجی بوسیله دوربین تصویربرداری صورت می‌گیرد. در مرحله بعد

نقاط مراکز شبکه شطرنجی شناسایی و اندازه‌گیری می‌شوند. ممکن است از تارگت‌های کددار بجای صفحه

شظرنجی نیز استفاده شود. سپس با برقراری ارتباط بین فضای شیء و زمین بوسیله روابط (۲-۳)، پارامترهای کالیبراسیون بروش سلف کالیبراسیون برآورد خواهند شد. لازم به ذکر است که مختصات نقاط در فضای شیء، پارامترهای توجیه نسبی (خارجی) و پارامترهای کالیبراسیون همزمان محاسبه می‌شوند.

#### • اعمال پارامترهای کالیبراسیون داخلی

بردار تصحیحات اعمال شده به موقعیت اندازه‌گیری شده در فضای تصویر به منظور کاهش خطاهای سیستماتیک تصویر معمولاً از ۱۰ پارامتر در فتوگرامتری رقومی برد کوتاه بکار گرفته می‌شود. پارامترهای کالیبراسیون به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۴۵]:

- توجیه داخلی دوربین<sup>۱</sup>  $c, xp, yp$
- پارامتر اعوجاج شعاعی<sup>۲</sup>  $k1, k2, k3$
- پارامتر اعوجاج مماسی<sup>۳</sup>  $p1, p2$
- پارامتر عدم تعامد<sup>۴</sup>  $b1, b2$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{meas} - xp \\ y_{meas} - yp \end{bmatrix} \quad (۴-۲)$$

مختصات اندازه‌گیری شده تصویری  $(x_{meas}, y_{meas})$  با پارامترهای توجیه داخلی به نقطه اصلی منتقل خواهد شد (رابطه (۴-۲)). مقدار انتقال داده شده مرکز تصویر به مرکز اصلی می‌باشد؛ و مقدار  $(\Delta x, \Delta y)$  از رابطه (۵-۲) بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + x \cdot \frac{dr}{r} + p1 \cdot (r^2 + 2x^2) + p2 \cdot x \cdot y + b1 \cdot x + b2 \cdot y \\ y + y \cdot \frac{dr}{r} + p1 \cdot (r^2 + 2y^2) + p2 \cdot x \cdot y \end{bmatrix} \quad (۵-۲)$$

ازجاییکه مقدار  $r$  و  $dr$  از روابط (۲-۶) و (۲-۷) قابل محاسبه است.

<sup>1</sup> Camera interior orientation

<sup>2</sup> Radial distortion parameters

<sup>3</sup> Decentering distortion parameters

<sup>4</sup> Affinity, non-orthogonality parameters

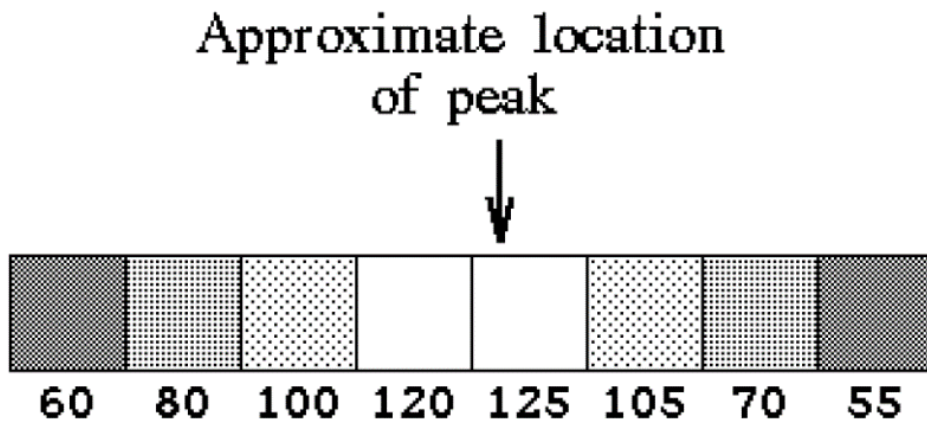
$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (۶-۲)$$

$$dr = k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5 + k_3 \cdot r^7 \quad (۷-۲)$$

بر این اساس و با اعمال مقدار کالیبراسیون برای هر نقطه تصویری میتوان مقدار تصحیح شده آن را در فضای شیء تقاطع داد و آن را به صورت آنی بدون خطاهای سیستماتیک بازسازی نمود. روش سلف کالیبراسیون روشی بهینه جهت اعمال کالیبراسیون به مشاهدات تصویری است [۴۶].

## ۷-۲ روش‌های استخراج مرکز خط لیزر

یکی از عوامل بااهمیت در سامانه‌های نور ساختاریافته، که در دقت و صحت بازسازی مختصات نقاط مؤثر بوده نحوه استخراج نقاط متعلق به مقطع خط لیزر می‌باشد. رویکرد پرکاربرد، فرایندهای پردازش تصویری است. از نقطه نظر تئوری خط یک‌بعدی و نقطه بدون بعد محسوب می‌شود اما در عمل در تصویر به صورت یک خط یک‌بعدی یا یک نقطه نورانی شکل نخواهند گرفت. زمانیکه لیزر یا پروژکتور لیزری یک صفحه نورانی را به روی شیء می‌تاباند یک نوار را روی آن روشن می‌سازد. بر این اساس زمانی مرکز خط لیزر در حد زیر پیکسل قابل دستیابی خواهد بود که با ضخامت بیشتر از یک پیکسل تابانده شده باشد با توجه به توان تفکیک دوربین و مقیاس عکسبرداری، با احتمال بالایی خط لیزر روی تصویر بیش از یک پیکسل را به خود اختصاص خواهد داد [۳۶].



شکل ۱۶-۲: محل تقریبی پیک خط لیزر در مقطع پیکسلی از یک لیزر خطی

اگر پیکسل حاوی بیشینه شدت روشنایی متعلق به خط لیزر در جهت عمود آن به عنوان مرکز خط لیزر در نظر گرفته شود دقت مدل‌سازی سیستم برابر ابعاد پیکسل در مقیاس عکس خواهد بود که در

اغلب موارد دقیق و مطلوب نیست. براین اساس روش‌هایی به‌منظور استخراج مرکز درست خط لیزر توسعه پیدا کرده‌اند که همگی بهره گرفته از فرایندهای پردازش تصویری می‌باشد. در این روش‌ها شدت انرژی نور لیزر به‌عنوان پارامتر مهمی در دقت استخراج مرکز خط لیزر بشمار می‌رود. لازم به ذکر است اگر توان لیزر بالا باشد در برخورد با سطوح نفوذپذیر تاحدی در آن نفوذ نموده و دوربین بازتاب آن را از درون شیء اخذ می‌کند که منجر به خطا در استخراج پیک خط لیزر خواهد شد [۴۷].

روش‌هایی که مبتنی بر پردازش تصویر بوده به‌صورت مفصل در ادامه بررسی شده‌اند. در تمامی روابطی که در زیر تحت عنوان روش‌های استخراج مرکز خط لیزر بیان می‌شود  $f(x)$  مقدار درجه خاکستری در نقطه  $x$  می‌باشد و  $f(x \pm 1)$  درجات خاکستری همسایگی قبل و بعد آن است. در این روش‌ها استخراج مرکز خط لیزر با دقت زیر پیکسل تنها در یک جهت یعنی محور  $X$  و یا  $Y$  انجام می‌شود. بدیهی است در صورت رخداد خط لیزر بصورت مورد در فضای تصویر، نرمال‌سازی دورانی قبل از اجرای تکنیک‌های ذکر شده لازم خواهد بود. بعد از یافتن بهترین موقعیت لیزر فرایند معکوس نرمال‌سازی انجام خواهد شد.

## ۲-۷-۱ روش تقریب گوسین<sup>۱</sup> [۴۸]

این روش در زمره روش‌های استخراج بیشینه یک‌بعدی به‌شمار می‌رود. به عبارت بهتر تنها در یک بعد بیشینه خط لیزر را در ابعاد زیر پیکسل جستجو می‌کند. در بعد دیگر تنها مختصات در حد ابعاد پیکسل تصویر خواهد بود. فرض این روش این است که توزیع درجات خاکستری خط لیزر در راستای عمود بر آن بسیار نزدیک به یک منحنی گوسی است. لازم به ذکر است که در عمل چنین نیست چراکه هر پیکسل موجود در CCD دوربین‌ها دارای حساسیت یکسانی نیستند و نیز آگاهی چندانی درباره ساختار درونی پیکسل‌ها و اینکه چه اثرات و اعوجاجاتی روی این مقدار ثبت شده می‌گذارد وجود ندارد. باین حال در این روش فرض شده که این اثرات با یک توزیع گوسین قابل مدل‌سازی است. در صورتیکه محل بیشینه خط لیزر در حد پیکسل در یک جهت مثلاً محور  $X$  وجود داشته باشد میزان انحراف ( $\delta$ ) از مقدار مرکز پیکسل بیشینه درجه خاکستری از رابطه (۲-۸) قابل محاسبه است.

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{\ln(f(x-1)) - \ln(f(x+1))}{\ln(f(x+1)) - 2\ln(f(x)) + \ln(f(x-1))} \quad (۲-۸)$$

<sup>1</sup> Gaussian Approximation

۲-۷-۲ روش مرکز جرم<sup>۱</sup>[۴۸]

این روش مانند روش تقریب گوسین تک بعدی محسوب می شود و توزیع درجات خاکستری لیزر در راستای عمود بر آن را گوسی فرض نموده و موقعیت انحراف زیر پیکسل از رابطه (۹-۲) محاسبه می گردد.

$$\hat{\delta} = \frac{(f(x+1) - f(x-1))}{(f(x-1) + f(x) + f(x+1))} \quad (9-2)$$

این روش قابلیت برآورد مرکز جرم برای درجات خاکستری بیش از سه پیکسل متعلق به مرکز لیزر را در محاسبات خود دخالت می دهد؛ که به روابط COM5 و COM7 شناخته شده که در روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۱) قابل مشاهده است.

$$\hat{\delta}_{com5} = \frac{2f(x+2) + f(x+1) - f(x-1) - 2f(x-2)}{f(x-2) + f(x-1) + f(x) + f(x+1) + f(x+2)} \quad (10-2)$$

$$\hat{\delta}_{com7} = \frac{3f(x+3) + 2f(x+2) + 2f(x+2) - f(x-1) - 2f(x-2) - f(x-1)}{f(x-3) + f(x-2) + f(x-1) + f(x) + f(x+1) + f(x+2) + f(x+3)} \quad (11-2)$$

۲-۷-۱ روش درون یابی خطی<sup>۲</sup>[۴۸]

این روش مبتنی بر توزیع درجات خاکستری قبل و بعد از بیشینه شدت مقطع لیزر می باشد. بر این اساس اگر سه پیکسل با بیشینه ی درجه خاکستری خط لیزر در راستای عمود بر آن در نظر گرفته شود میتوان نوشت:

$$\text{اگر } f(x+1) > f(x-1)$$

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{(f(x+1) - f(x-1))}{(f(x) - f(x+1))} \quad (12-2)$$

۲-۷-۲ روش تقریب سهمی وار<sup>۳</sup>[۴۸]

روش تقریب سهمی وار به منظور استخراج مرکز خط لیزر، مبتنی بر استفاده از بسط سری تیلور در همسایگی بیشینه خط لیزر است. براین اساس موقعیت بیشینه در  $f(x+\delta)$  با مشاهده تابع  $f(x)$  در نزدیکی آن مقدار

<sup>1</sup> Center of mass

<sup>2</sup> Linear Approximation

<sup>3</sup> Parabolic Approximation

$\delta$  به شیوه زیر قابل محاسبه است.

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{(f(x-1) - f(x+1))}{(f(x+1) - 2f(x) + f(x-1))} \quad (13-2)$$

## ۲-۷-۱ روش آشکارسازهای Rioux و Blais [۴۸]

در تحقیق [۴۸] دو فیلتر مرتبه ۴ و مرتبه ۸ خطی ارائه شده و در [۴۹] مرتبه ۲ ارائه نموده که این فیلترها در روابط زیر نمایش داده شده‌اند.

$$\begin{aligned} g_{2(x)} &= f(x-1) + f(x+1) \\ g_{4(x)} &= f(x-2) + f(x-1) + f(x+1) + f(x+2) \\ g_{8(x)} &= f(x-4) + f(x-3) + f(x-2) + f(x-1) \\ &\quad + f(x+1) - f(x+2) - f(x+3) - f(x+4) \end{aligned} \quad (14-2)$$

براین اساس اگر  $f(x-1) > f(x+1)$ :

مقدار  $\delta$  از رابطه (۱۵-۲) قابل محاسبه است:

$$\hat{\delta} = \frac{g(x)}{g(x) - g(x+1)} \quad (15-2)$$

## ۲-۸ تولید تصاویر نرمال (بازنمونه‌برداری اپی‌پلار)<sup>۱</sup>

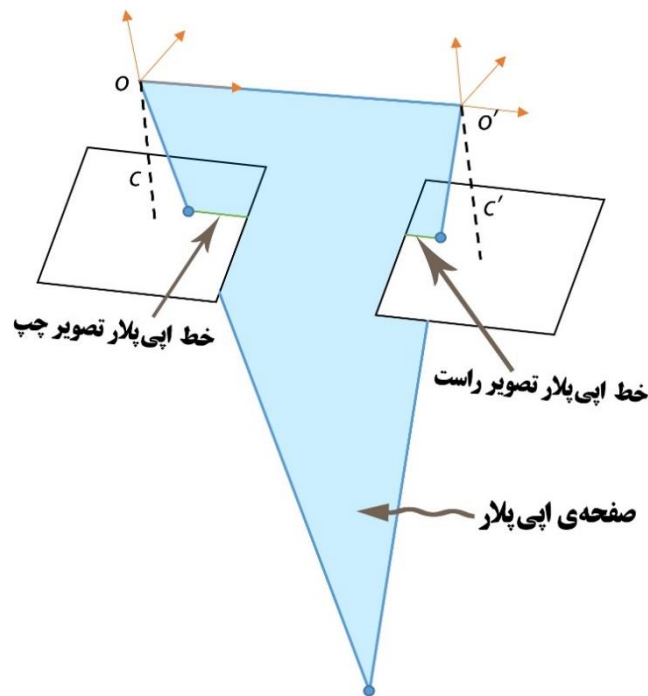
در گذشته بمنظور تولید مدل سه‌بعدی از تصاویر همپوشان، دستگاه‌هایی همچون استرسکوپ مورد استفاده قرار می‌گرفت. در این دستگاه‌ها با جستجوی یک نقطه متناظر، امکان دید سه‌بعدی در محدوده‌ی همان نقطه فراهم می‌گردید. به این ترتیب تنها بمنظور تفسیر مورد استفاده قرار می‌گرفت. در دهه‌های اخیر بمنظور توجیه نسبی تصاویر دستگاه‌های آنالوگ برای تولید مدل سه‌بعدی به صورت سراسری توسعه پیدا کردند. در این سیستم‌ها حداقل ۵ نقطه بمنظور توجیه نسبی تصاویر و نقطه دیگری برای کنترل مورد نیاز بود. بر این اساس قابلیت دید سه‌بعدی در تصاویر آنالوگ فراهم گردید؛ اما با توسعه دوربین‌های رقومی و تصاویر رقومی نیاز به تولید مدل سه‌بعدی در سیستم‌های کامپیوتری بیشتر از قبل احساس شد. امروزه در

<sup>۱</sup> Epipolar resampling

فتوگرامتری، تصاویر به طور مستقیم توسط دوربین‌های رقومی بدست می‌آید. در اینجا بود که بحث تصاویر نرمال مطرح شد. به این ترتیب یک روش که بطور سراسری تصاویر همپوشان را در حالت سه‌بعدی در صفحه تخت کامپیوتر مشاهده نمود پیشنهاد گردید. به فرایندی که پارامترهای توجیه نسبی تصاویر استریو نسبت به هم صفر شود و با اعمال یک انتقال صرفاً در یک نقطه امکان دید سه‌بعدی فراهم شود، تولید تصویر نرمال گفته می‌شود. در این تصاویر قسمت همپوشان به صورت سراسری در حالت سه‌بعدی قابل دیدن است. چگونگی تولید تصاویر نرمال و ویژگی‌های آن در ادامه تشریح شده است.

## ۲-۸-۱ هندسه اپی‌پلار

شکل ۲-۱۷ یک جفت تصویر استریو در هندسه اپی‌پلار با مراکز تصویر  $(O, O')$  را نمایش می‌دهد. صفحه‌ی اپی‌پلار از تصویر کردن مراکز تصاویر استریو با نقطه شیء  $P$  ایجاد می‌شود. خطوط اپی‌پلار از تقاطع صفحه‌ی اپی‌پلار با صفحه تصاویر استریو ایجاد می‌شود (خطوط بارنگ سبز).



شکل ۲-۱۷: هندسه اپی‌پلار در یک جفت تصویر استریو

همان‌طور که در شکل ۲-۱۷ مشاهده می‌شود خطوط اپی‌پلار جفت تصویر موازی خطوط اسکن هستند. اما در بیشتر موارد دو محور دوربین نه موازی و نه عمود بر باز عکسبرداری هستند. در ادامه تصاویر



به موقعیتی تبدیل می‌شوند که خطوط اپی‌پلار موازی محور  $x$  سیستم مختصات تصویری شوند. تصاویر تبدیل شده به این شرایط هندسی اپی‌لار را تصاویر نرمال می‌نامند. تصاویر نرمال شده باید موازی باز عکسبرداری و از فاصله کانونی یکسانی برخوردار باشند. بنابراین به منظور تولید تصاویر استریو با شرایط هندسی ذکر شده، فرایند بازنمونه‌برداری اپی‌پلار صورت گرفته که در ادامه تشریح می‌گردد [۵۰].

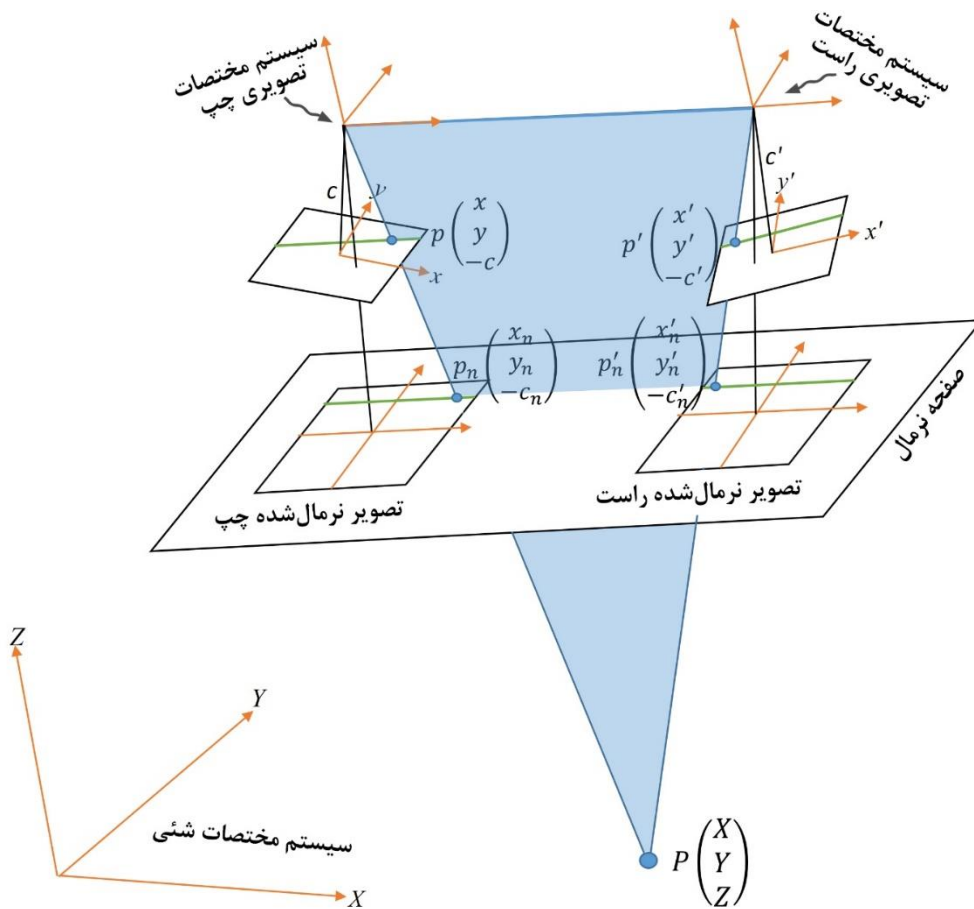
## ۲-۸-۲ فرایند تولید تصویر نرمال

تولید تصاویر نرمال یک امر مهم در فرایند تناظریابی و تولید مدل سه‌بعدی در تصاویر رقومی محسوب می‌شود. همان‌طور که بیان شد، در سیستم‌های کامپیوتری بمنظور دید سه‌بعدی به صورت سراسری تصاویر نرمال بکار گرفته می‌شود. از سوی دیگر تصاویر نرمال با تسهیل در روند تناظریابی، مزایای کاهش فضای جستجو و ابهامات تناظریابی را فراهم می‌سازد. بازنمونه‌برداری اپی‌پلار به فرایندی اطلاق شده که طی آن به کمک تبدیلات پروجکتیو دوبعدی، تصاویر استریوی اولیه به نسخه‌ی پالایش شده‌ای تبدیل می‌گردند. برخی از ویژگی‌های هندسی تصاویر اپی‌پلار (نرمال شده):

- موازی بودن خطوط اپی‌پلار،
- توازی محورهای اصلی تصاویر نرمال شده،
- هم‌مقیاس شدن تصاویر نرمال شده،
- موازی شدن محورهای  $x$  سیستم مختصات عکس‌های نرمال شده با محور باز عکسی بین دوربین‌ها،
- عدم وجود نقاط حاصل تقاطع میان صفحات عکسی نرمال شده با محور باز عکس‌برداری

هستند [۵۰، ۵۱]. شکل ۲-۱۸ هندسه‌ی تشکیل تصاویر نرمال شده را در یک زوج تصویر استریو نشان

می‌دهد.



شکل ۲-۱۸: هندسه تولید تصویر نرمال

به منظور تولید تصاویر نرمال پارامترهای وضعیت و انتقال (سه دوران و سه انتقال) هر کدام از تصاویر مورد نیاز بوده که در مرحله توجیه نسبی محاسبه می‌گردد. با مبنا قرار دادن معادله‌ی شرط همخطی به عنوان رابطه‌ی متریک و هندسی ارتباط سه بعدی فضای شیء و تصویر (رابطه‌ی (۲-۱۶))، ارتباط هندسی میان تصویر خام با تصویر نرمال از طریق رابطه‌ی (۲-۱۸) و برعکس ارتباط هندسی میان تصویر نرمال شده با تصویر خام متناظر از طریق رابطه (۲-۲۱) برقرار می‌گردد [۵۰، ۵۲].

$$F = \begin{bmatrix} x - x_o + \Delta x + c \frac{r_{1,1}(X - X_o) + r_{1,2}(Y - Y_o) + r_{1,3}(Z - Z_o)}{r_{3,1}(X - X_o) + r_{3,2}(Y - Y_o) + r_{3,3}(Z - Z_o)} \\ y - y_o + \Delta y + c \frac{r_{2,1}(X - X_o) + r_{2,2}(Y - Y_o) + r_{2,3}(Z - Z_o)}{r_{3,1}(X - X_o) + r_{3,2}(Y - Y_o) + r_{3,3}(Z - Z_o)} \end{bmatrix} = 0 \quad (2-16)$$

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{\omega\varphi\kappa} = R_{\omega} \times R_{\varphi} \times R_{\kappa} \quad (17-2)$$

در رابطه‌ی (۱۶-۲)،  $[x, y, -c]^T$  بردار موقعیت سه‌بعدی یک نقطه در فضای تصویر،  $(x_0, y_0)$  بردار موقعیت دوبعدی مرکز تصویر در سیستم مختصات عکسی،  $(\Delta x, \Delta y)$  بردار تصحیحات اعمال شده به موقعیت نقاط در فضای تصویر به منظور کاهش اثر خطاهای سیستماتیک تصویر (اعوجاجات شعاعی، مماسی و ...)، مقادیر  $r_{ij}$  در رابطه (۱۶-۲) عناصر ماتریس دوران سه‌بعدی  $R_{\omega, \varphi, \kappa}$  میان فضای زمین و تصویر (رابطه (۱۷-۲))،  $[X, Y, Z]^T$  مختصات سه‌بعدی نقطه در فضای شیء و  $[X_o, Y_o, Z_o]^T$  نیز مختصات مرکز تصویر در سیستم مختصات شیء می‌باشند.

$$x_n = -c_n \frac{m_{1,1}x + m_{2,1}y - m_{3,1}c}{m_{1,3}x + m_{2,3}y - m_{3,3}c} - \Delta x + x_o \quad (18-2)$$

$$y_n = -c_n \frac{m_{1,2}x + m_{2,2}y - m_{3,2}c}{m_{1,3}x + m_{2,3}y - m_{3,3}c} - \Delta y + y_o$$

$$x = -c \frac{m_{1,1}x_n + m_{1,2}y_n - m_{1,3}c_n}{m_{3,1}x_n + m_{3,2}y_n - m_{3,3}c_n} - \Delta x + x_o \quad (19-2)$$

$$y = -c \frac{m_{2,1}x_n + m_{2,2}y_n - m_{2,3}c_n}{m_{3,1}x_n + m_{3,2}y_n - m_{3,3}c_n} - \Delta y + y_o$$

در رابطه‌ی (۱۸-۲)،  $[x_n, y_n, -c_n]^T$  مختصات یک نقطه در فضای تصویر نرمال شده متناظر با  $[x, y, -c]^T$  در فضای تصویر خام و  $m_{ni,j}$  درایه‌های ماتریس دوران سه‌بعدی رابطه (۱۸-۲) در حالت تبدیل تصویر خام به تصویر نرمال و  $m_{i,j}$  درایه‌های ماتریس دوران سه‌بعدی رابطه (۱۹-۲) در حالت تبدیل تصویر نرمال به تصویر خام می‌باشند.

$$M = R_{\omega, \varphi, \kappa} \times R_{\omega_n, \varphi_n, \kappa_n}^T \quad (20-2)$$

در رابطه (20-2) ماتریس  $M$  ضرب دو ماتریس دوران است که ماتریس اول دوران حاصل از توجیه نسبی بوده، و ماتریس دوم دوران بمنظور تولید تصویر را انجام می‌دهد.  $M$  یک ماتریس دوران متعامد است که تصویر خام را به تصویر نرمال تبدیل می‌سازد. از آنجاییکه در رابطه (20-2) ماتریس  $R$ ، ماتریس دوران محاسبه شده از توجیه نسبی است؛ بر این اساس برای هر دو تصویر متناظر استریو باید محاسبه گردد. پارامترهای دورانی تصویر نرمال شامل  $\kappa$  حول محور  $Z$ ،  $\varphi$  حول محور  $Y$ ،  $\omega$  حول محور  $X$ ، در روابط (21-2) قابل محاسبه است.

$$\kappa_n = \tan^{-1} \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$\varphi_n = -\tan^{-1} \frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}}$$

$$\omega_n = \frac{\omega' + \omega''}{2}$$

$$R_{\omega_n \varphi_n \kappa_n} = R_{\omega_n} \times R_{\varphi_n} \times R_{\kappa_n} \quad (21-2)$$

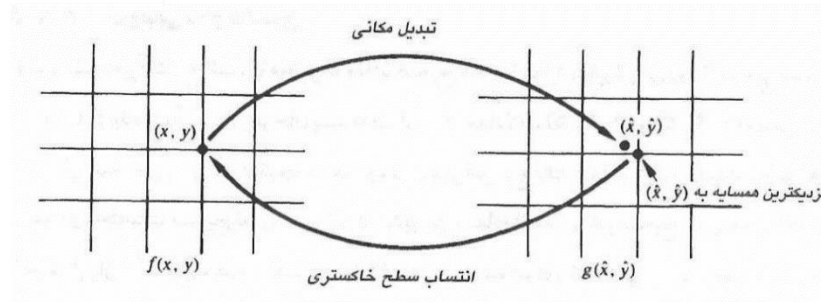
ازجاییکه  $\Delta Z = Z'' - Z'$ ،  $\Delta Y = Y'' - Y'$ ،  $\Delta X = X'' - X'$  است. ماتریس دوران  $R_{\omega_n \varphi_n \kappa_n}$  یک ماتریس ترکیبی است که نخستین چرخش مربوط به محور  $Z$  بوده و به دنبال آن چرخش حول محور  $X$  و  $Y$  انجام می‌شود [50].

## ۲-۸-۱-۲ نمونه برداری مجدد تصویر

پس از اعمال یک تغییر هندسی از تصویر نرمال به تصویر خام (پیکسلی)، اکنون مشکل تعیین مقدار درجه خاکستری محل پیکسل جدید در تصویر نرمال شده است؛ بنابراین باید مقادیر درجه خاکستری در فضای تصویر خام به موقعیت درست در فضای تصویر نرمال منتقل شوند. این روش به عنوان نمونه‌گیری مجدد شناخته می‌شود. به عبارت بهتر چیدمان پیکسل‌های تصویری خام به گونه‌ای تغییر داده شود که منطبق بر سیستم مختصات فضای تصویر نرمال باشد. چندین روش به منظور تغییر چیدمان پیکسل‌های تصویر می‌باشد.

- روش نزدیکترین همسایه (Nearest Neighbor resampling): در این روش عملاً هیچ‌گونه محاسباتی انجام نمی‌شود. در واقع مقدار درجه خاکستری، پیکسل نزدیک به موقعیت نقطه در

تصویر انتخاب می‌شود.



شکل ۲-۱۹: درونیابی درجه خاکستری به روش نزدیکترین همسایه

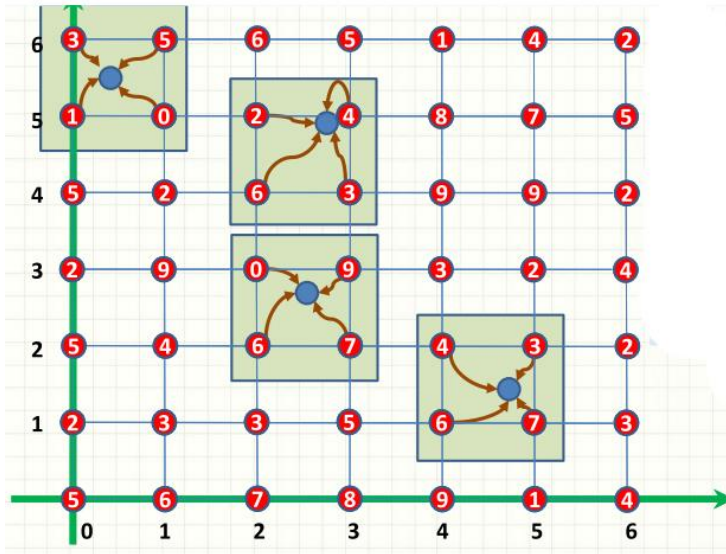
براین اساس در این روش درجه خاکستری به موقعیت نقطه در شبکه منظم تصویر اصلی نسبت داده می‌شود. از آنجاییکه این روش بدون محاسبات بوده، سریع‌ترین روش نمونه‌برداری محسوب می‌شود. همچنین به دلیل استفاده از مقادیر حقیقی درجه خاکستری تصویر، ارقام جدیدی که ممکن است غیرواقعی باشد را تولید نمی‌نماید. مهم‌ترین عیب این روش این است گاهی بعضی از مقادیر تکرار شده و رزولوشن کاهش پیدا می‌کند.

به عبارت دیگر گرچه روش درونیابی نزدیکترین همسایه پیاده‌سازی ساده‌ای دارد، اما اغلب با تولید اثرات نامطلوبی نظیر اعوجاج دادن لبه‌های مستقیم در تصاویر با توان تفکیک بالا، مشکل ایجاد می‌کند [۵۳].

• **درونیابی دو خطی (Bilinear Interpolation):** این نوع درونیابی برای داده‌های دوبعدی بکار گرفته می‌شود. اگر هدف برآورد مقدار  $f$  در نقطه  $(p, q)$  باشد آنگاه باید مشخص شود که این نقطه در بین کدام چهار نقطه شبکه قرار گرفته است (شکل ۲-۲۰). سپس با توجه به مقدار تابع در این چهار نقطه، مقدار تابع در نقطه  $(p, q)$  تقریب زده شود. در این درونیابی، تابع درونیاب به صورت تابع دوخطی در رابطه (۲۲-۲) است.

$$F(p, q) = ax + by + cxy + d \quad (22-2)$$

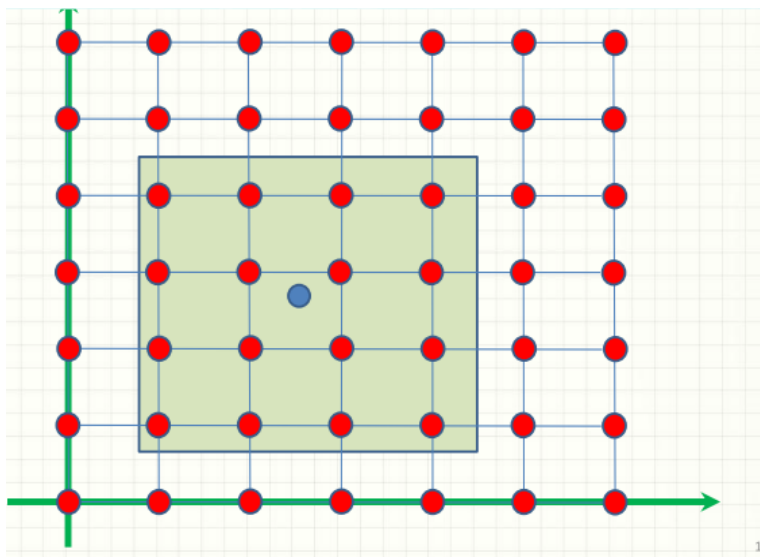
در رابطه (۲۲-۲)، ضرایب  $a, b, c, d$  ضرایب تابع بوده که با استفاده از چهار نقطه همسایه در یک دستگاه ۴ معادله ۴ مجهول برآورد می‌شوند.



شکل ۲-۲۰: درونیابی درجه خاکستری بر اساس روش دو خطی

با توجه به محاسبات بیشتر این روش نسبت به روش قبلی، زمان بیشتری را نیاز دارد. علاوه بر این، این روش درونیابی موجب تولید تصویر نرم‌تری می‌شود. بر این اساس لبه‌ها بارزتر نسبت به روش قبل تولید می‌شوند [۵۴، ۵۵].

- روش درونیابی دومربعی (Bi-Cubic): همانند درونیابی دوخطی است، با این تفاوت که بجای استفاده از چهارنقطه همسایگی از شانزده نقطه همسایگی استفاده می‌کند.



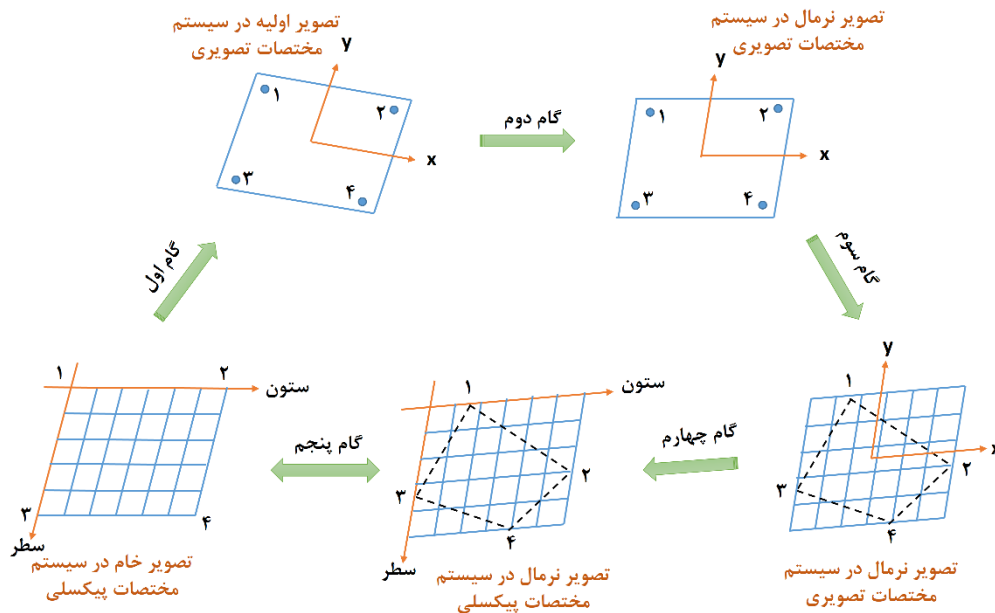
شکل ۲-۲۱: درونیابی درجه خاکستری بر اساس روش دو مربعی

در این درونیابی، تابع درونیاب به صورت رابطه (۲-۲۰) است [۵۶, ۵۷].

$$F(p, q) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} a_{ij} x^i y^j \quad (2-23)$$

### ۲-۲-۸-۲ روندنمای سلسه‌مراتبی تولید تصویر نرمال

روشی که در بخش قبل مورد بحث قرار گرفته است، تبدیل بین تصویر خام به تصویر نرمال است. پارامترهای کالیبراسیون دوربین در طی فرایند کالیبراسیون (بخش ۲-۶) تعیین می‌شود. هنگام بازنمونه‌برداری مجدد مقادیر درجه خاکستری تصویر نرمال جستجو خواهند شد. بنابراین تولید تصویر نرمال در چهار مرحله انجام می‌شود (شکل ۲-۲۲) [۵۰].



شکل ۲-۲۲: مراحل اصلی تبدیل تصویر خام (پیکسلی) به تصویر نرمال

- **گام اول:** پارامترهای تبدیل بین فضای تصویر خام (سیستم مختصات پیکسلی) و فضای تصویری (سیستم مختصات تصویری) در فرایند کالیبراسیون محاسبه شده است. در تصاویر دیجیتال به منظور تبدیل سیستم مختصات پیکسلی و سیستم مختصات تصویری از رابطه (۲-۲۴) امکان پذیر است [۵۸].

$$X_{Image} = (X_{Pixel} - CenterX) \times X_{Ps} \quad (2-24)$$

$$Y_{Image} = (Y_{Pixel} - CenterY) \times Y_{Ps}$$

در رابطه (۲-۲۴)،  $(X_{Pixel}, Y_{Pixel})$  مختصات در فضای پیکسلی،  $(X_{Image}, Y_{Image})$  مختصات در فضای تصویری،  $(X_{Ps}, Y_{Ps})$  اندازه پیکسل‌های تصویری می‌باشد. همچنین  $CenterX$  و  $CenterY$  از رابطه (۲-۲۵) قابل محاسبه است [۵۸].

$$CenterX = \left( \frac{nX_{pixel}}{2} \right) - 0.5 \quad (۲۵-۲)$$

$$CenterY = \left( \frac{nY_{pixel}}{2} \right) - 0.5$$

در رابطه (۲-۲۵)،  $nX_{pixel}$  و  $nY_{pixel}$  به ترتیب تعداد پیکسل‌های تصویری در ستون‌ها و سطرهای تصویری است.

- **گام دوم:** در این مرحله سیستم مختصات برای تصویر نرمال تعریف می‌شود. به منظور به حداقل رساندن کاهش وضوح تصویر (بهینه‌سازی اندازه)، ابتدا چهار گوشه فضای تصویر پیکسلی به فضای تصویری تبدیل می‌شود (رابطه (۲-۲۴)). سپس چهار گوشه در فضای تصویر نرمال محاسبه می‌شود (رابطه (۲-۱۸)).

- **گام سوم:** در این گام شبکه‌ای با دامنه محور  $X$ ها از کمینه  $x$  گوشه، با فاصله اندازه پیکسل تصویر، تا ماکزیمم  $x$  گوشه و دامنه محور  $Y$ ها از بیشینه  $y$  گوشه، با منفی فاصله اندازه پیکسل تصویر، تا کمینه  $y$  گوشه ایجاد می‌شود. براین اساس شبکه‌ی تولید شده در فضای تصویر نرمال با استفاده از رابطه (۲-۱۹) به فضای تصویری تبدیل می‌شود. این امر به دلیل اختصاص دادن درجه خاکستری به شبکه‌ی فضای تصویر نرمال انجام می‌شود.

- **گام چهارم:** از آنجاییکه شبکه بدست آمده در فضای سیستم مختصات تصویری می‌باشد بنابراین شبکه با استفاده از معکوس رابطه (۲-۲۴) به فضای پیکسلی تبدیل می‌شود (رابطه (۲-۲۶)).

$$X_{Pixel} = \frac{X_{Image}}{X_{Ps}} + CenterX \quad (۲۶-۲)$$

$$Y_{Pixel} = \frac{Y_{Image}}{Y_{Ps}} - CenterY$$

- **گام پنجم:** در ادامه با بکارگیری یکی از روش‌های نمونه‌برداری مجدد توضیح داده شده در بخش قبل، درجه خاکستری متناظر با موقعیت تصویر نرمال اختصاص داده می‌شود. همان‌طور که بیان



شد، مختصات‌های تصویری بوسیله پارامترهای کالیبراسیون برآورد شده پالایش شدند در نتیجه نمیتوان درجه خاکستری متناظر با آن پیکسل را پیدا نمود؛ بنابراین باید مختصات‌های تصویری بوسیله پارامترهای معکوس کالیبراسیون به فضای توأم با خطای سیستماتیک بازگشته، و درجه خاکستری متناظر با آن پیکسل در موقعیت درست تصویر نرمال قرار بگیرد. به این منظور شبکه‌ای منظم از مختصات‌های اندازه‌گیری شده تصویری به اندازه پیکسل تولید می‌شود. به ازای هر نقطه از شبکه یک نقطه بدون خطای سیستماتیک با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون برآورد خواهد شد (رابطه (۲-۵)). به این ترتیب شبکه‌ای از مختصات‌های تصویری توأم با خطای سیستماتیک و مختصات‌های متناظر تصحیح شده آن ایجاد شد. در نهایت پارامترهای معکوس کالیبراسیون در یک فرایند تکراری به روش کمترین مربعات برآورد می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_{corr} - xp) \\ (y_{corr} - yp) \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

در رابطه (۲-۲۶)،  $x_{corr}$ ،  $y_{corr}$  مختصات‌های تصحیح شده تصویر و پارامترهای دیگر مشابه نام‌گذاری در رابطه (۲-۴) است.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ G_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + x \cdot \frac{dr}{r} + p1 \cdot (r^2 + 2x^2) \cdot 2 \cdot p2 \cdot x \cdot y + b1 \cdot x + b2 \cdot y \\ y + y \cdot \frac{dr}{r} + p1 \cdot (r^2 + 2y^2) \cdot 2 \cdot p2 \cdot x \cdot y \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

در رابطه (۲-۲۸) نیز پارامترهای آن مشابه نام‌گذاری در رابطه (۲-۴) است. با توجه به رابطه‌ی (۲-۲۸) به‌عنوان فرم غیرخطی معادلات معکوس کالیبراسیون، معادلات خطی‌سازی شده در رابطه (۲-۲۹) محاسبه شده است.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ G_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{oi} \\ G_{oi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_p} & \frac{\partial F}{\partial y_p} & \frac{\partial F}{\partial k1} & \frac{\partial F}{\partial k2} & \frac{\partial F}{\partial k3} & \frac{\partial F}{\partial p1} & \frac{\partial F}{\partial p2} & \frac{\partial F}{\partial b1} & \frac{\partial F}{\partial b2} \\ \frac{\partial G}{\partial x_p} & \frac{\partial G}{\partial y_p} & \frac{\partial G}{\partial k1} & \frac{\partial G}{\partial k2} & \frac{\partial G}{\partial k3} & \frac{\partial G}{\partial p1} & \frac{\partial G}{\partial p2} & \frac{\partial G}{\partial b1} & \frac{\partial G}{\partial b2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta x_p \\ \delta y_p \\ \delta k1 \\ \delta k2 \\ \vdots \\ \delta b1 \\ \delta b2 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

$$= [dl_i]_{4 \times 1} + [b_i]_{4 \times 3} \times [\delta_i]_{3 \times 1} = 0$$

دستگاه معادلات رابطه‌ی (۲-۲۹) غیرخطی بوده و در روند تکرار به همگرایی می‌رسد. بدین وسیله مختصات‌های تصویری بوسیله پارامترهای معکوس کالیبراسیون محاسبه شده در رابطه (۲-۲۹) به فضای قبل از پالایش تبدیل می‌شوند، در نتیجه می‌توان درجه خاکستری متناظر با آن پیکسل را جستجو نمود.

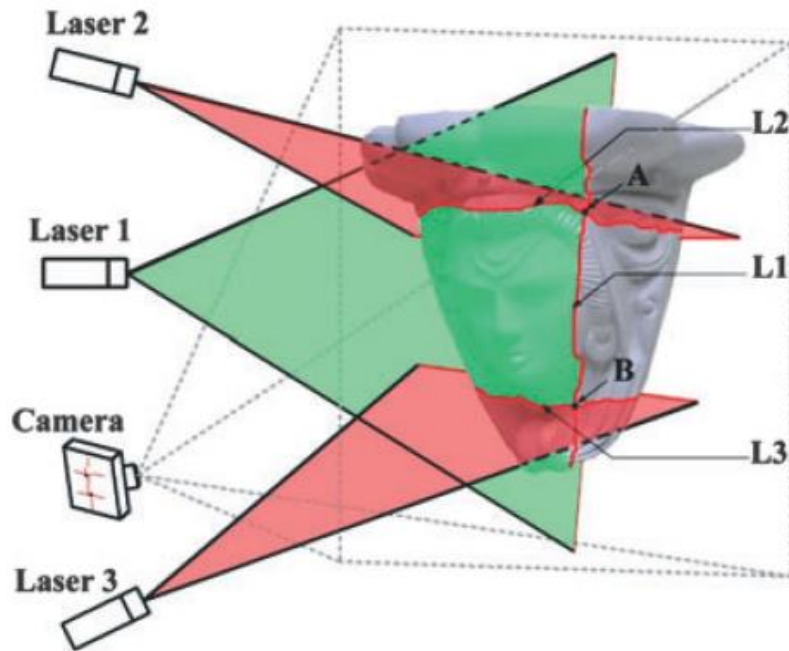
در نهایت بعد از تبدیل تصویر خام به تصویر نرمال و اعمال یک انتقال در جهت سطرها، تمامی سطرهای دو تصویر متناظر همدیگر خواهند بود. این ویژگی در زمینه تناظرابی نقاط، تنها پارامتر سطر آن‌ها در روند این پژوهش بکار گرفته شده است [۵۰].

## ۹-۲ تحقیقات مرتبط با سامانه‌های نور ساختاریافته

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تولید مدل سه‌بعدی با بهره‌گیری از روش‌های نور ساختاریافته انجام شده است. در این قسمت نگاهی اجمالی به پژوهش‌های مرتبط در رابطه با طراحی سامانه‌های نور ساختاریافته و استخراج مرکز خط لیزر می‌شود.

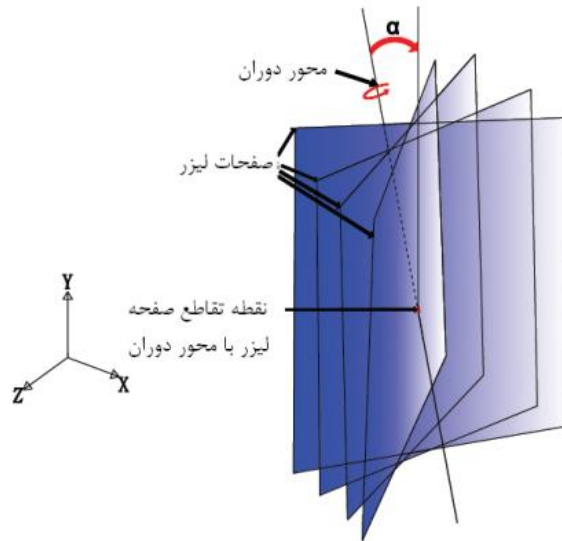
### ۲-۹-۱ تحقیقات مرتبط با طراحی سامانه‌های نور ساختاریافته

ابدل و همکاران در سال ۱۳۸۹، بر اساس تحقیق [۵۹] یک سامانه نور ساختاریافته طراحی و پیاده‌سازی نموده است. این سامانه مبتنی بر سه لیزر با الگوی خطی و یک دوربین به منظور تولید مدل سه‌بعدی (ابر نقاط سه‌بعدی) طراحی شده است. در این تحقیق با جایگزینی یک قاب نوری بجای یک قاب فیزیکی بسیاری از محدودیت‌های سیستم‌های موجود را برطرف نموده است. این قاب نوری توسط دو الگوی لیزر با الگوی خطی ثابت افقی ایجاد گردیده است. این سامانه مطابق طبقه‌بندی سامانه‌های نور ساختاریافته موجود که در بخش اول فصل دوم به آن اشاره شد در رده اسکنرهای دینامیک تعاملی قرار می‌گیرد. این سیستم شامل یک دوربین و سه لیزر با الگوی خطی است که یکی از لیزرها به صورت عمودی و متحرک و دو لیزر دیگر به صورت افقی، نسبت به دوربین ثابت می‌باشند. از تقاطع دو خط لیزر ثابت در بالا و پایین در فضای تصویر با خط لیزر عمودی که حول یک محور در حال دوران است، پارامترهای وضعیت صفحه لیزر در فضا و در هر مرحله از اسکن معلوم می‌گردد از این رو نیازی به ابزارهای اضافی برای تعیین وضعیت صفحه لیزر در فضا نبوده و فرایند اسکن و مرتبط نمودن خطوط اسکن همگی تنها در فضای تصویر حل می‌شود. شکل ۲-۲۳ هندسه سامانه نور ساختاریافته را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۳: نمای سامانه نور ساختار یافته

همان‌طور که گفته شد، برای اینکه بتوان نقاط موجود بر یک خط روشن شده را توسط صفحه لیزر تعیین مختصات نمود بایستی علاوه بر مختصات نقاط تصویری، معادله صفحه لیزر نیز معلوم باشد. توسط دو صفحه لیزر ثابت افقی که وضعیت این دو نسبت به دوربین طی فرایند کالیبراسیون معلوم شده است میتوان هر نقطه روی این خطوط افقی لیزر را تعیین مختصات سه‌بعدی نمود. از آنجاییکه مختصات سه‌بعدی همه نقاط روی خطوط افقی قابل تعیین است میتوان مختصات سه‌بعدی محل تقاطع لیزرهای افقی را با لیزر عمودی محاسبه نمود. به‌منظور تعیین معادله صفحه لیزر نیاز به نقطه سومی است که با دونقطه معلوم دیگر تشکیل معادله صفحه لیزر را بدهند. براین اساس تقاطع محور دوران لیزر عمودی با صفحه لیزر به عنوان نقطه سوم در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲-۲۴).



شکل ۲-۲۴: محل تقاطع صفحه لیزر با محور دوران

با معلوم شدن معادله صفحه لیزر در فضا نسبت به دوربین، مختصات تمامی نقاط روشن شده توسط لیزر دوران کننده عمودی در فضای سه بعدی، از روابط تقاطع مثلث بندی با لیزر تعیین می گردند. در این سامانه به منظور استخراج خط لیزر از الگوریتم های پردازش تصویری بهره گرفته شده است.

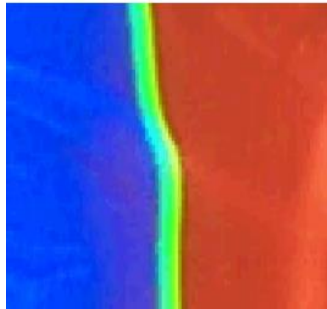
ارزیابی دقت نقاط برداشت شده توسط اسکنر نشان داده است که بیشترین خطا در راستای محور  $Z$  ها، برابر با  $0/4$  میلی متر بوده است؛ و دقت در راستای محور  $X$  و  $Y$  ها در حد  $0/2$  میلی متر برآورد شده است. با این وجود به منظور کاهش خطا در راستای  $Z$  باید از شیء فاصله گرفت که باعث افزایش مناطق پنهان و محدودیت در این سیستم خواهد شد. همچنین معلوم بودن پارامترهای صفحه لیزر در سیستم های تعاملی یک محدودیت محسوب می شود [۱].

آقای روچینی و همکاران در سال ۲۰۰۱ یک سامانه نور ساختاریافته مشتمل بر یک پروژکتور با قدرت تفکیک  $760 \times 1024$  پیکسل و یک دوربین با قدرت تفکیک  $960 \times 1440$  پیکسل طراحی نمود. در این سامانه به منظور غلبه بر چالش تناظریابی نقاط، مفاهیم الگوهای باینری را بکار گرفته است. در این پژوهش به منظور تولید الگو از دو رنگ آبی و قرمز بجای رنگ سفید و سیاه استفاده نموده و برای تعیین لبه مابین آن ها یک نوار باریک سبز رنگ مابین این دو رنگ قرار داد که این ایده موجب تشخیص راحت سایه ها خواهد شد.



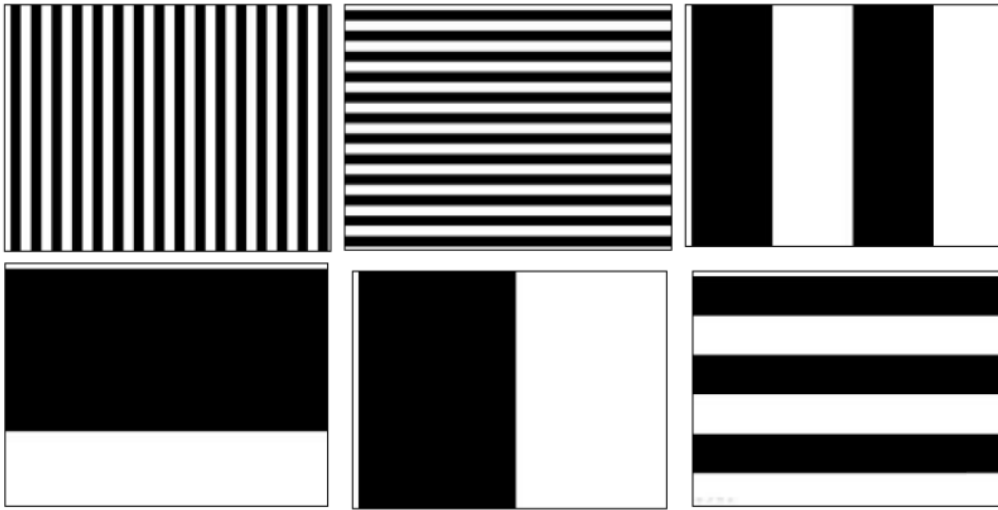
شکل ۲-۲۵: تشخیص سایه‌ها با بکارگیری الگوهای قرمز و آبی

در شکل ۲-۲۶ نمای رنگ سبز مابین دو الگوی قرمز و آبی را نمایش می‌دهد [۱۴].



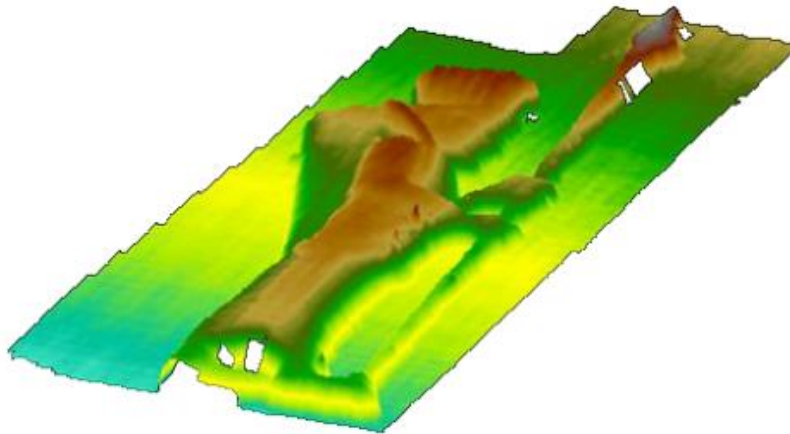
شکل ۲-۲۶: رنگ سبز مابین دو الگوی قرمز و آبی

آقای اکبری در سال ۱۳۹۵ بمنظور حل چالش تناظریابی در سطوح بدون بافت از الگوهای کددار استفاده نموده است. روش نور ساختاریافته به علت ۱- امکان نصب تارگت روی سطح شیء وجود نداشته و ۲- امکان تعیین نقاط متناظر به صورت خودکار با دانسیته بالا وجود نداشته باشد (به دلیل بافت یکسان سطح شیء)، به عنوان یک روش راهگشا با امکان اتوماتیک سازی فرایند مدل سازی سه بعدی در این پژوهش بکار گرفته شده است. در این پژوهش با استفاده از الگوهای کددار به صورت خودکار تناظریابی انجام گرفته است.



شکل ۲-۲۷: نمونه الگوهای باینری استفاده شده

هدف از این تحقیق، طراحی، ساخت و ارزیابی مدل‌سازی سه‌بعدی اشیاء با بافت یکسان بدون نیاز به تارگت‌گذاری با روش نور ساختاریافته می‌باشد. برای این منظور از یک دوربین و یک پروژکتور برای تصویر کردن الگوی کددار بهره گرفته شده است. در این پژوهش از یک مجسمه به ابعاد  $120 \times 50$  سانتی-متر با بافت یکسان استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که روش پیشنهادی قادر است با دقت متوسط  $\pm 100$  میکرون اطلاعات سه‌بعدی را استخراج نماید [۱۰].

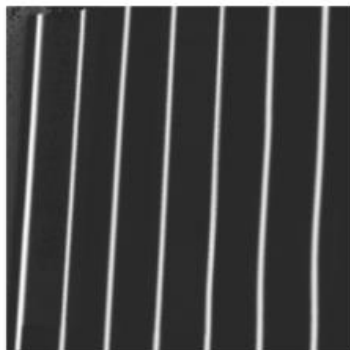


شکل ۲-۲۸: داده‌های سه‌بعدی تولیدشده و تغییر رنگ آن‌ها بر اساس تغییر عمق

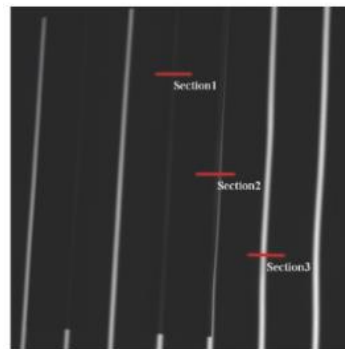
## ۲-۹-۲ تحقیقات مرتبط با استخراج مرکز خط لیزر

دقت در استخراج مرکز نوار از یک تصویر گرفته شده، عامل تعیین کننده دقت داده‌های سه بعدی است. به همین جهت تاکنون روش‌هایی جهت استخراج مرکز نوار برای فراهم نمودن دقت بالا توسعه داده شده است.

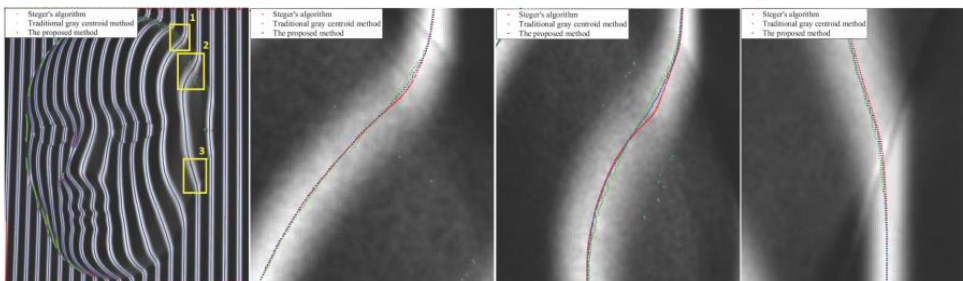
آقای چن و همکاران در سال ۲۰۱۹، تحقیقی جهت بهبود دقت استخراج مرکز نوار در یک سیستم اندازه‌گیری نور ساختاریافته انجام دادند. سیستم پیشنهادی بر اساس یک دوربین و یک پروژکتور بوده است. فرایند جهت بدست آوردن مرکز نوار دقیق و کارآمد در دو گام ارائه شده است. علت تخریب نوار لیزر انحنای (پیچیدگی شیء)، نویز تصادفی، نور محیط و بازتاب است. در گام اول توزیع درجات خاکستری تصویر شده بر اساس ضریب تخریب نوار لیزر تنظیم و تعدیل می‌شود. ضریب تخریب نوار بر مبنای تاباندن تصاویر با درجه خاکستری هموزن بر روی شیء محاسبه می‌شود. هدف از پالایش درجه خاکستری، از بین رفتن اعوجاج درجه خاکستری ناشی از سطح جسم است. [۲].



ب



الف

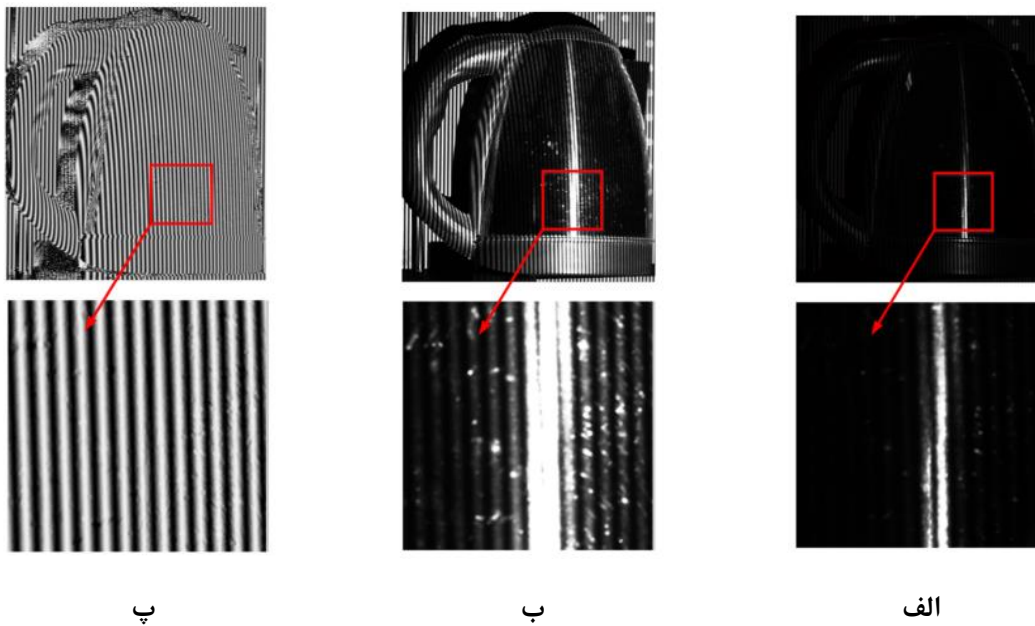


پ

شکل ۲-۲۹: الف) تصویر اخذ شده، ب) تصویر تعدیل شده، پ) نوار استخراج شده در سه مقطع

در گام دوم مختصات مراکز نوار از درجه خاکستری‌های تعدیل‌شده با یک روش پردازش تصویری استخراج می‌گردد (شکل ۲-۲۹-پ). روش پیشنهادی توانست که مشکل اشباع کم و اعوجاجات بازتاب را به‌طور مؤثر مرتفع نماید [۲].

آقای ژاشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۷ جهت بهبود اعوجاج ناشی از بازتاب سطح عوارض در استخراج مرکز نوار، روش مطابقت بین فاز و شدت نور را پیشنهاد دادند. سامانه‌های نور ساختاریافته با روش الگوهی کدگذاری به‌منظور اندازه‌گیری اشیاء با دامنه تغییرات بازتابندگی بالا، معمولاً دارای اعوجاج بوده که موجب نتایج نادرست خواهد شد. ابتدا در نقشه فاز الگوی نوار اخذشده، اشباع و کنتراست کم توسط الگوریتم فاز-شیفت<sup>۱</sup> و الگوریتم Multiexposure بهبود پیدا می‌کند. سپس برای از بین بردن تأثیر بازتاب نوارها نرمال می‌شوند. سرانجام با تلفیق تصویر نرمال شده و نقشه فاز، تصویر بهبود داده‌شده بدست می‌آید [۱۲].



شکل ۲-۳۰: الگوی نواری تابیده شده روی یک کتری، الف) الگوی اخذ شده در حالت low exposure (ب) الگوی اخذ شده در حالت high exposure (پ) الگوی اخذ شده با بهبود پیشنهادی

در تحقیق آقای ژو و همکاران در سال ۲۰۱۴ روشی به‌منظور بهبود دقت اندازه‌گیری سامانه نور ساختاریافته که الگوی نواری تصویر شده روی شیء به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی اخذ می‌گردد، ارائه شده است. بر اساس ارزیابی نتایج حاصل از استخراج مرکز نوار، با شناسایی و حذف خطای بزرگ در استخراج

<sup>۱</sup> Phase-Shift Algorithm



مرکز نوار، بهبود دقت حاصل شده است. از دو پارامتر به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان نتایج استخراج مرکز نوار استفاده می‌شود. پارامتر اول انرژی متوسط نوار است که از طریق یک روش آماری برای تحلیل و برقراری رابطه بین دقت استخراج و نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. بدیهی است که وجود نویز در تصاویر با الگوهای نواری یکی از عوامل اصلی در کاهش دقت است. در تحقیقات [۶۰-۶۲] تأثیر نویز را در نتایج استخراج بررسی نموده‌اند. در اینجا، یک روش آماری ساده ارائه شده است که می‌تواند تأثیر نویز در نتایج استخراج را برای انواع پروفیل‌های نواری معمولی و روش‌های استخراج بررسی کند. فرض می‌شود که نویز از توزیع گاوسی با مقدار متوسط صفر پیروی می‌کند و افزایشی است. بنابراین می‌توان رابطه انرژی بین نوار تابیده شده و نوار اخذ شده را تعریف کرد

$$E_c = kE_p + kE_a + n \quad (۳۰-۲)$$

در رابطه (۳۰-۲)،  $E_c$  انرژی نوار اخذ شده شامل دو پارامتر  $E_p$  انرژی نوار تصویر شده و  $E_a$  انرژی نور محیط،  $n$  نویز تصویر و  $k$  ضریب بازتاب است.

$$E = E_c + kE_a \quad (۳۱-۲)$$

در رابطه (۳۱-۲)،  $E$  انرژی نوار بدون انرژی محیط است. یک  $E$  بزرگ‌تر بدان معنی است که CCD انرژی بیشتری از نوار تصویر شده دریافت می‌کند؛ یعنی می‌توان مطرح نمود که کیفیت نوار اخذ شده بهتر است. در مقابل اگر انرژی نوار اخذ شده توسط دوربین کم باشد، دقت استخراج نوار به راحتی در اثر نویز تأثیر می‌پذیرد. میانگین انرژی نوار از رابطه (۳۲-۲) محاسبه خواهد شد.

$$\rho = \frac{E}{W} \quad (۳۲-۲)$$

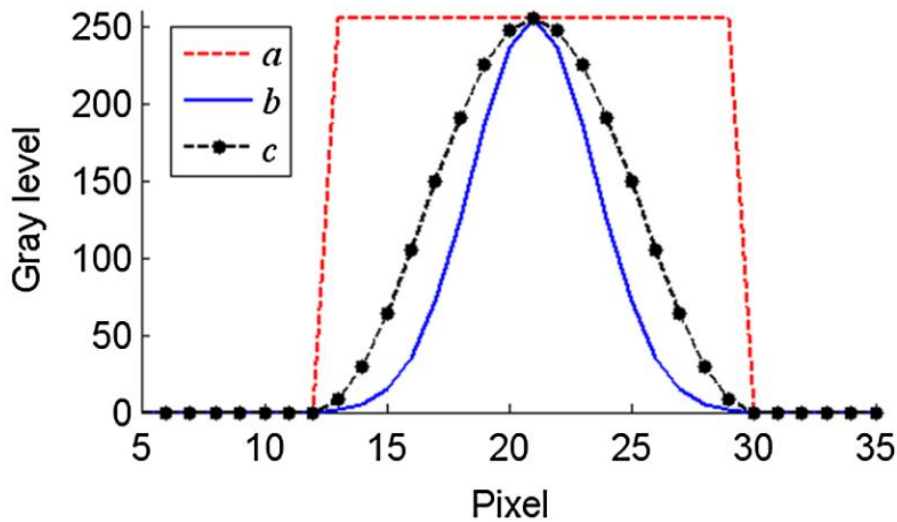
در رابطه (۳۲-۲)،  $\rho$  متوسط انرژی نوار و  $W$  عرض نوار است. هرچه مقدار  $\rho$  بیشتر، اطمینان از نتایج استخراج نیز بالاتر خواهد بود.

در سیستم نور ساختاریافته در حالت ایده آل توزیع درجه خاکستری نوارهای تصویر شده متقارن هستند که به دو نوع توزیع باینری<sup>۱</sup> و چندخطی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. توزیع باینری به صورت منحنی  $a$

<sup>۱</sup> Binary distribution

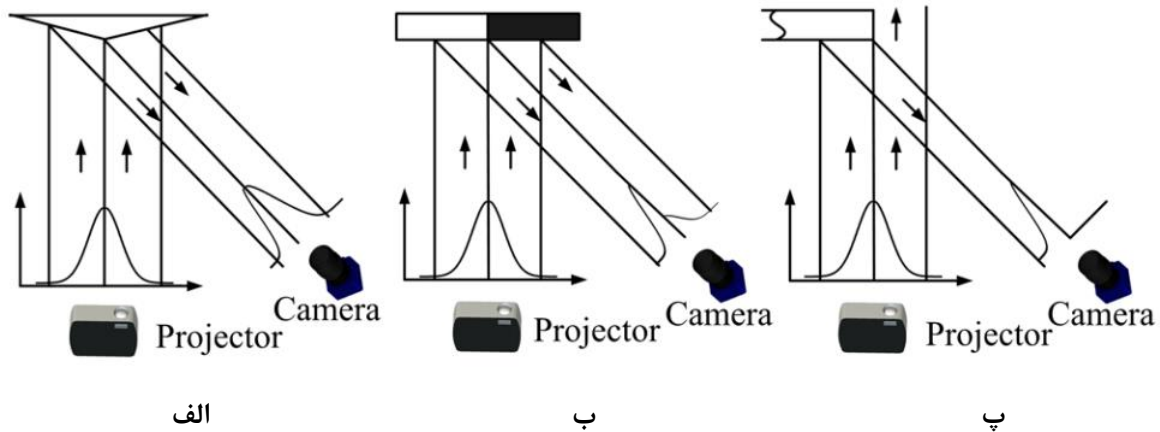
<sup>۲</sup> Multigray distribution

در شکل ۳۱-۲ نشان داده شده است. این توزیع عملکرد بهتری در برابر نویز با فرکانس بالا دارد. توزیع چندخطی به طور معمول از توزیع گوسی و سینوسی به ترتیب منحنی b و c در شکل ۳۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳۱-۲: توزیع درجات خاکستری به صورت ایده آل

همان طور که در شکل ۳۱-۲ مشهود است، ویژگی نزدیک بودن به میانگین در این توزیع در مقایسه با حالت باینری آشکارتر است. اگر جسم موردنظر یک صفحه منعکس کننده ایده آل باشد توزیع درجات خاکستری نوارها به صورت متقارن خواهد بود. نتایج استخراج مرکز نوار زمانی که نوار اخذ شده متقارن باشد دقت بالایی قابل دستیابی است. در صورتیکه اجسام برای اندازه گیری دلخواه بوده در نتیجه توزیع درجات خاکستری متقارن نخواهد بود. برخی عوامل دیگر مانند تغییر ناگهانی شکل، بازتاب های متفاوت از جسم به دلیل توپوگرافی سطح و تغییر ناگهانی بازتاب وجود دارد که منجر به توزیع نامتقارن جدی می شود. (همان طور که در شکل ۳۲-۲ این عوامل نمایش داده شده است.)



شکل ۲-۳۲: تأثیر خصوصیات سطح، الف) تغییر ناگهانی شکل، ب) تغییر ناگهانی بازتاب و پ) نوار در لبه شی

با این حال توزیع نامتقارن به ناچار دقت استخراج را برای روش‌های استخراج کاهش می‌دهد. بنابراین پارامتر دوم درجه نامتقارن<sup>۱</sup> بودن توزیع درجه خاکستری نوار بوده که یک روش جدید بمنظور اصلاح نامتقارن بودن نوار ارائه داده است. اعتبارسنجی این روش توسط آزمایشات در این پژوهش اثبات شده است [۶۳].

## ۱۰-۲ جمع‌بندی

در این فصل با توضیح روش‌های تولید مدل سه‌بعدی، مزایا و محدودیت‌های هرکدام از روش‌ها بحث و بررسی شد. براین اساس به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی از اجسام بدون بافت روش‌های ترکیبی (نور ساختاریافته) نسبت به سایر روش‌های تولید مدل سه‌بعدی از قابلیت و توانایی بیشتری برخوردار هستند. ۱-سرعت بالا ۲- کم‌هزینه بودن ۳- ساختار ساده ۴- مناسب برای اجسام متحرک ۵- امکان اتوماسیون بالا و... از جمله عوامل برجسته نسبت به روش‌های دیگر به شمار می‌روند. در ادامه انواع سیستم‌های نور ساختاریافته به ویژه روش مبتنی بر لیزر، نحوه کالیبراسیون (دوربین، لیزر) و همچنین نحوه استخراج مرکز خط لیزر به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. اصل طبقه‌بندی روش نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر، بر اساس نوع لیزر و دوربین (ثابت یا متحرک) صورت گرفته که در روش‌های ذکر شده هدف تولید مختصات سه‌بعدی نقاط است. صفحه‌ی لیزر به‌علت تولید نور متمایزکننده جهت تناظریابی و استخراج نقاط به همراه

<sup>1</sup> Asymmetric degree

تصویر اخذشده شرایط لازم به منظور تولید مختصات سه بعدی بر اساس مثلث بندی با لیزر فراهم می‌سازد. از همین رو سیستم‌های نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر به سه گروه هندسه ثابت هندسه تعاملی و هندسه آزاد تقسیم می‌گردند. در سیستم‌های با هندسه ثابت با ثابت بودن صفحه لیزر نسبت به دوربین، به پایداری سیستم افزوده و همچنین به منظور تولید مدل سه بعدی از تمام سطح شیء باید سیستم و شیء نسبت به هم جابجا شوند یا دوران یابند. در ضمن این جابجایی بایستی کاملاً دقیق و قابل اندازه‌گیری باشد به نحوی که بتوان مؤلفه‌های آنرا به راحتی جهت محاسبه میزان جابجایی مقاطع لیزر و مرتبط سازی آن‌ها کنار یکدیگر مورد استفاده قرار داد. به منظور تولید مدل سه بعدی از سطح با روش هندسه دینامیک، شیء به صورت وجه به وجه اندازه‌گیری می‌شود و نیازی به جابجایی شیء و سیستم نسبت به هم ندارد. چراکه این جابجایی به درون ساختار هندسی سیستم یعنی صفحه لیزر منتقل می‌شود. بنابراین در این روش تنها هر وجه از شیء را با یک استقرار و دوران لیزر می‌توان برداشت نمود. تعیین میزان جابجایی و یا دوران صفحه لیزر یا توسط سخت افزار مستقل بوده (هندسه مستقل) و یا در درون تصویر اخذ شده توسط دوربین برآورد و بکار گرفته می‌شود (هندسه تعاملی). اگرچه سیستم‌های با هندسه مستقل دارای ساختمان ساده‌ای هستند؛ اما با افزودن سخت‌افزار، به منظور معرفی پارامترهای جابجایی سیستم تصویربرداری به صورت لحظه‌ای، هزینه سیستم افزایش یافته و ساخت و بکارگیری چنین سخت‌افزاری برای همگان ممکن نیست. در نقطه مقابل، سیستم‌های تعاملی با هدف حل پارامترهای معادله صفحه لیزر به صورت لحظه‌ای در درون خود سیستم ابداع شده است؛ و استفاده از سخت‌افزار اضافی را در روند تولید مدل سه بعدی حذف می‌نماید. در نقطه مقابل دو تکنیک ذکر شده، روش هندسه آزاد مبتنی بر آزادانه بودن لیزر در این تحقیق نیز وجود داشته که در آن موقعیت و وضعیت دوربین‌ها ثابت بوده اما لیزر بدون هیچ‌گونه محدودیتی در موقعیت‌های دلخواه مقاطع خطی را روی جسم منتشر می‌نماید. بر این اساس در این روش نیازی به مشخص بودن معادلات صفحه نبوده و تنها با ثابت بودن دو دوربین نسبت به هم می‌توان مقاطع سه بعدی را تولید نمود. نکته حائز اهمیت در تمامی روش‌های ذکر شده دقت استخراج مرکز لیزر است. روش‌های توسعه یافته به منظور یافتن مرکز خط لیزر، مبتنی بر پردازش تصویر بوده که به تفصیل آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هر کدام از این روش‌ها با فرض خاصی از نحوه توزیع درجات خاکستری در راستای عمود بر خط لیزر به استخراج محل بیشینه در حد زیر پیکسل پرداخته‌اند. اما در این تحقیق با اجتناب از روش‌های پردازش تصویری از یک روش نوآورانه جهت پیدا کردن خط لیزر استفاده نموده که به طور مفصل در فصل بعد مورد

بررسی قرار گرفته است. از همین رو در فصل آینده طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم نور ساختاریافته جهت تولید مدل سه‌بعدی از اجسام بدون بافت پرداخته است. سیستم طراحی شده مبتنی بر سیستم نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر با روش هندسه آزاد می‌باشد.

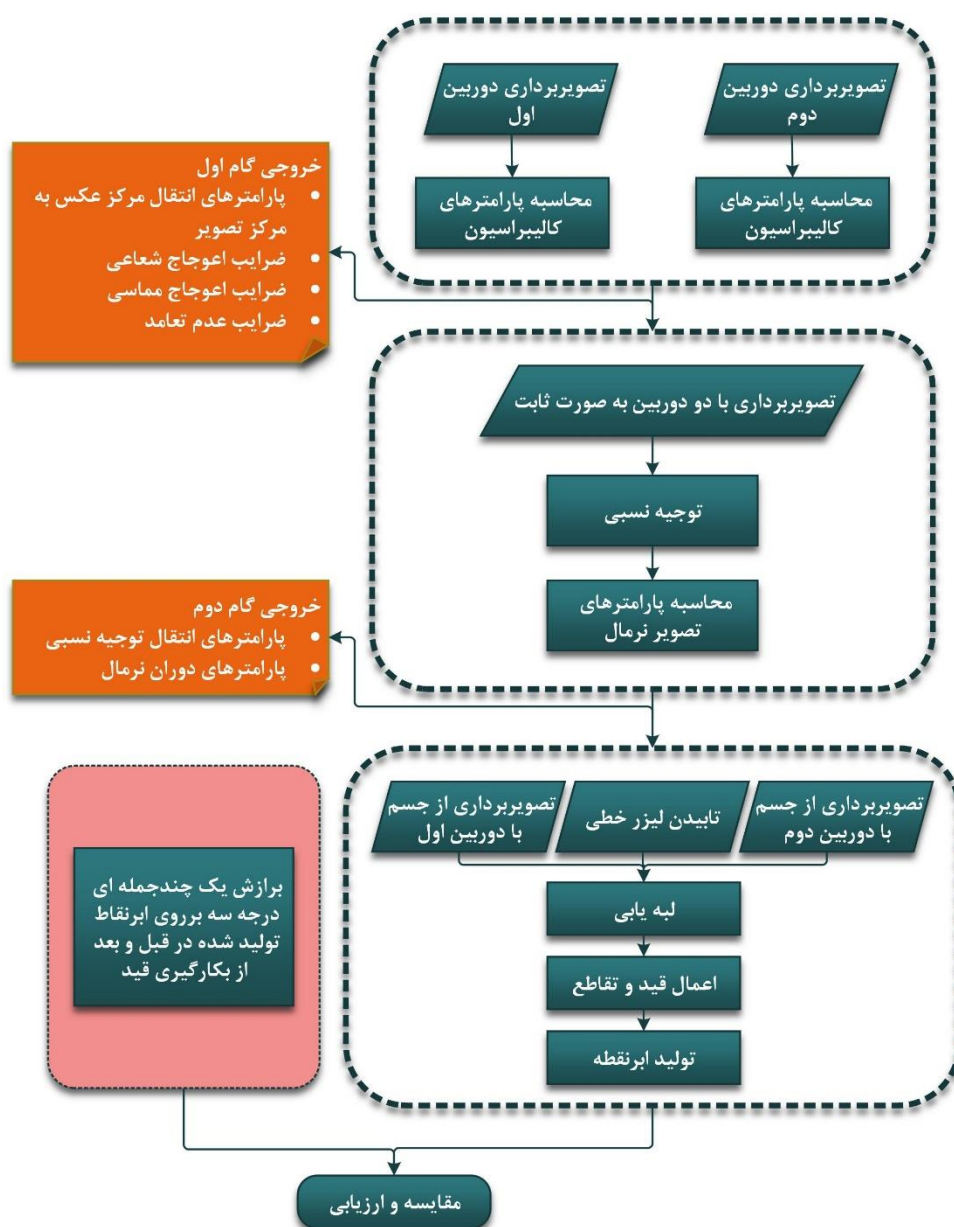
## فصل سوم

طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم نور ساختاریافته  
مبتنی بر دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای آزاد

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل به طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم نور ساختاریافته ساده مبتنی بر لیزر پرداخته شده است. سیستم پیشنهادی متشکل از دو دوربین فیلمبرداری با وضعیت نسبی معلوم و یک لیزر صفحه‌ای آزاد در فضا به منظور تولید مدل سه‌بعدی از اشیاء بدون بافت طراحی شده است. این سیستم مطابق طبقه‌بندی سیستم‌های مبتنی بر لیزر که در فصل قبل بدان اشاره شد جزء سیستم‌های هندسه آزاد محسوب می‌شود. این سیستم شامل دو دوربین با ارتباط نسبی ثابت و یک لیزر صفحه‌ای آزاد است؛ لغت آزاد به این معنا که لیزر به صورت آزادانه و دلخواه در فضا جابجا می‌شود. به عبارت بهتر برخلاف روش‌های مبتنی بر لیزر مستقل و تعاملی، نیازی به معلوم بودن پارامترهای صفحه لیزر نیست.

فرایند کلی سیستم پیشنهادی بر اساس سه گام اصلی می‌باشد؛ که در گام اول به تصویربرداری از میدان آزمون تارگت‌گذاری شده پرداخته سپس پارامترهای کالیبراسیون دوربین‌های تصویربرداری چپ و راست به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. در ادامه به منظور توجیه نسبی، به صورت همزمان با دوربین‌ها در حالت کاملاً ثابت از میدان آزمون تارگت‌گذاری شده (زمینه شطرنجی) تصویربرداری می‌شود. خروجی در این گام پارامترهای لازم به منظور تولید تصویر نرمال تولید خواهد شد. در گام سوم، لیزر خطی روی جسم بدون بافت در فضای نسبتاً تاریک (جهت آشکارسازی لیزر در تصاویر) به منظور تولید مقاطع سه‌بعدی فیلمبرداری تابیده می‌شود. از نقطه نظر تئوری بعد از تقاطع نقاط واقع روی مقطع لیزر، باید بر روی مکان هندسی یک صفحه قرار بگیرند؛ در صورتیکه به دلایل بیان شده در فصل اول در مکان هندسی یک صفحه قرار نخواهند گرفت. براین اساس در این پژوهش یک قید مطلق بمنظور قرارگیری نقاط روی مقطع خط لیزر در مکان هندسی صفحه لیزر پیشنهاد گردید. نهایتاً به منظور ارزیابی سیستم پیشنهادی با برازش دادن یک سطح در دو حالت بکارگیری قید و عدم بکارگیری قید مورد بررسی قرار خواهد گرفت. روند کلی در فلوجارت زیر قابل مشاهده است.



### نمودار ۳-۱: فلوچارت روند پژوهش

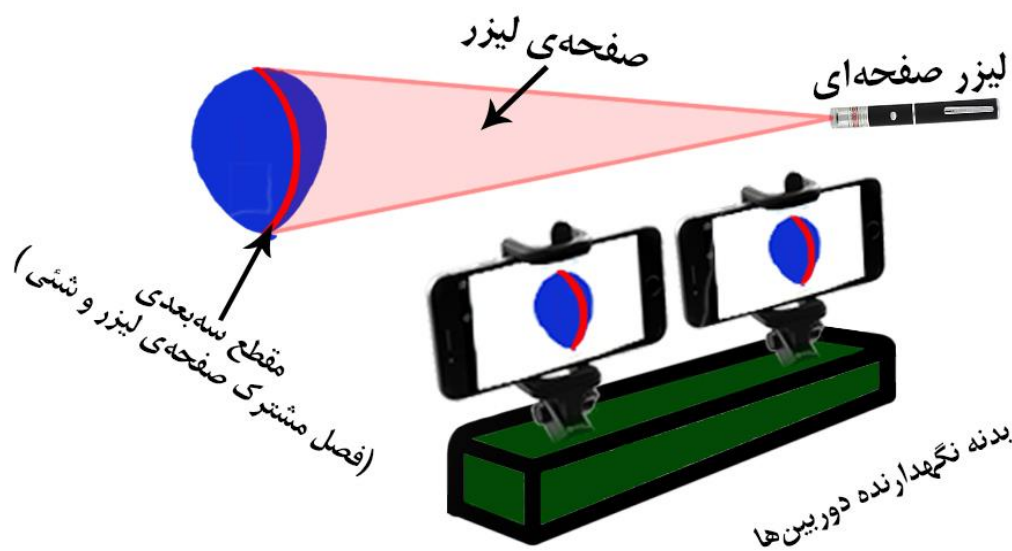
در ادامه به بیان اصول کلی چگونگی طراحی و پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی پرداخته و نحوه استخراج مرکز لیزر تشریح می‌گردد.

## ۳-۲ سازوکار طراحی سامانه پیشنهادی

همان‌طور که در بخش مقدمه بدان اشاره شد، در این تحقیق یک سیستم نور ساختاریافته ساده به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی از سطوح بدون بافت طراحی شده است. در این سامانه، برخلاف سامانه‌های مرسوم



نور ساختاریافته مبتنی بر صفحات لیزر، هیچ قید حرکتی خاصی برای صفحه‌ی لیزر لحاظ نشده است. به عبارت بهتر، در سازوکار طراحی این سامانه، الزامی به مشخص بودن پارامترهای صفحه‌ی لیزر وجود نداشته و کاربر می‌تواند بعد از روشن شدن دوربین‌های استریو، آزادانه به کمک یک لیزر صفحه‌ای، سطح سه‌بعدی عارضه را جاروب نماید. شکل ۱-۳ ساختار این سامانه‌ی نور ساختاریافته را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: ساختار سامانه نور ساختاریافته پیشنهادی

همان‌طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، اجزای سخت‌افزاری این سامانه متشکل از دو دوربین تصویربرداری، یک بدنه به‌منظور ثابت نگه‌داشتن دوربین‌ها و یک لیزر صفحه‌ای است. کاربر در این سیستم نور ساختاریافته در هر لحظه با جهت‌گیری دلخواهی، صفحه‌ی لیزر را به سطح شیء تابانده و فصل مشترک صفحه‌ی لیزر و شیء را نورانی می‌سازد. تصویر این فصل مشترک توسط دو دوربین ثبت می‌گردد. به‌منظور تأمین نرخ بالا در اخذ تصاویر استریو، از دوربین‌های فیلم‌برداری بجای دوربین‌های عکسبرداری استفاده شده است.

### ۳-۳ قطعات بکار رفته در سامانه پیشنهادی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، قطعات بکاررفته در این سیستم شامل دو دوربین با ارتباط نسبی معلوم و یک لیزر خطی به همراه یک بدنه به‌منظور ثابت نگه‌داشتن دوربین‌ها می‌باشد در این سامانه، از

دوربین‌های تلفن همراه برای اخذ فیلم استفاده شده است؛ و باید از حالت فیلمبرداری حرفه‌ای<sup>۱</sup> برخوردار باشند. زیرا تنها بعضی از دوربین‌های تلفن همراه امکان تعیین حالت فوکوس دستی<sup>۲</sup> را دارند. لازم به ذکر است که حالت فوکوس دوربین‌ها، در زمان اخذ فیلم از شیء با زمان برآورد پارامترهای کالیبراسیون باید برابر باشند علاوه بر این باید دارای حافظه کافی به منظور اخذ فیلم باشد. چراکه در چنین سیستمی برای تولید یک مدل سه‌بعدی کامل از شیء، برای اخذ فیلم زمان و حجم زیادی صرف خواهد شد. ویژگی مهم دیگر، توان تفکیک مکانی مشابه در این دوربین‌ها بوده تا تشخیص جزئیات نزدیک به هم قرار داشته باشند. از سوی دیگر دوربین‌های تصویربرداری باید از  $\text{fps}^3$  نسبتاً یکسانی برخوردار باشند.

برای تأمین نرخ بالا در تولید مقاطع سه‌بعدی حالت فیلمبرداری انتخاب شده است؛ به منظور تولید این مقاطع، تصاویر استریو در فریم‌های متناظر دو دوربین بکارگرفته می‌شود. به منظور پیدا کردن فریم‌های متناظر، باید دوربین‌ها از  $\text{fps}$  نسبتاً یکسانی برخوردار بوده تا فریم‌های متناظر به درستی تشخیص داده شوند. از آنجاییکه دوربین‌های تلفن همراه معمولاً  $\text{fps}$  هایی متغیر در حد نیم فریم دارند؛ بنابراین یک چالش در زمینه تولید تصاویر متناظر محسوب شده که یک راه‌حل جایگزین برای حل این چالش در بخش‌های بعدی تشریح شده است. بنابراین ۱- تأمین توان تفکیک مکانی مشابه در دوربین‌های انتخاب شده، ۲- امکان ثابت کردن فوکوس در تنظیمات داخلی دوربین و ۳- امکان فیلمبرداری با  $\text{fps}$  نسبتاً یکسان، الزامات فنی انتخاب دوربین‌ها در این سامانه‌ی نور ساختاریافته می‌باشند.

به منظور اینکه قطعات به صورت هندسی دقیق باشند در جانمایی و استقرار هر کدام از قطعات بیشترین دقت ممکن بکاربرده شده است. بخش ثابت بودن دوربین‌ها نسبت به هم مهم‌ترین قسمت این سامانه بوده که دقت زیادی لحاظ شده است. دوربین‌ها نسبت به هم نباید جابجا شوند چراکه ارتباط نسبی دوربین‌ها به هم خواهد خورد. لذا به صورت مستحکم نسبت به هم توسط گیره‌های فلزی ثابت شده‌اند که صرفاً مختص به یک دوربین ساخته نشده و برای دوربین‌های متنوع قابلیت تغییر دارد. صفحه فلزی حاوی دوربین‌ها روی یک صفحه چوبی قرار گرفته است.

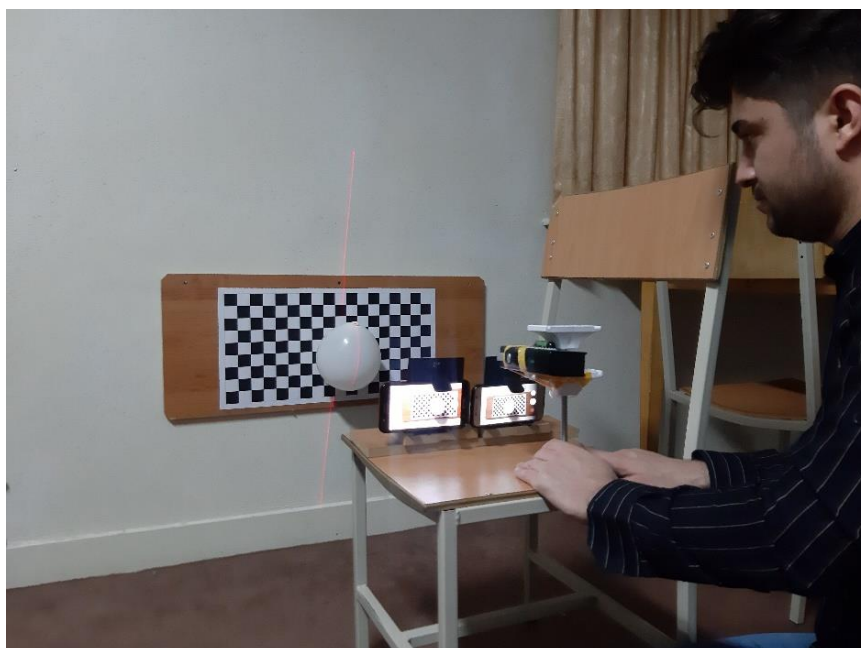
در این تحقیق از دو تلفن همراه با مدل‌های Huawei Y7 prime و Huawei nova 2 plus استفاده

<sup>1</sup> Video Pro

<sup>2</sup> Manual Foucos

<sup>3</sup> Frame per second

شده که هر دو از امکان تنظیم فوکوس به صورت دستی برخوردار هستند. در حالت فیلمبرداری دارای فاصله کانونی حدودی ۱-۲ میلی‌متر و ابعاد پیکسل یک میکرون می‌باشد. لیزر مورد استفاده در این سامانه از نوع لیزر قرمز با الگوی خطی است. فاصله لیزر و دوربین از شیء در حدود ۸۰ سانتی‌متر است. تصویری از سامانه پیاده‌سازی شده در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲: سامانه پیشنهادی نور ساختاریافته مبتنی بر لیزر خطی آزاد

پارامترهای هندسه‌ی داخلی هر دوربین در این سامانه، منفرداً از طریق یک میدان آزمون تارگت‌گذاری شده و به کمک فرایند خودکالیبراسیون برآورد می‌شود در بخش بعدی چگونگی کالیبراسیون دوربین‌ها به تفصیل تشریح گردیده است.

### ۳-۴ نحوه کالیبراسیون دوربین‌های تصویربرداری

همان‌طور که در فصل دوم بخش کالیبراسیون به آن اشاره شد، اندازه‌گیری‌های تصویری به‌طور معمول متأثر از خطاهای تدریجی و اتفاقی خواهد بود. و به‌علت اینکه خطاهای موجود در مشاهدات تصویری به‌طور مستقیم روی نتایج تولید مدل سه‌بعدی تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین اعمال کالیبراسیون (پالایش تصویر) روی دوربین‌های غیرمتریک نتایج دقیق‌تری از مدل سه‌بعدی را تولید خواهد نمود.

به‌طور کلی کالیبراسیون در فتوگرامتری به دو دسته آزمایشگاهی و محیطی تقسیم خواهند شد که

در این تحقیق کالیبراسیون به صورت محلی با استفاده از میدان آزمون شطرنجی انجام شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد خطاهای تصویری مشتمل بر خطاهای اتفاقی و تدریجی بوده که خطاهای اتفاقی از روش کمترین مربعات حذف می‌شود و خطاهای تدریجی شامل خطاهای اعوجاج شعاعی و مماسی عدسی، مقدار اختلاف مرکز عکسی با مرکز تصویر، اختلاف مقیاس در دو جهت و عدم قائم بودن محور با روش سلف کالیبراسیون حذف خواهند شد. در ادامه چگونگی برآورد پارامترهای کالیبراسیون و اعمال آن به تصویر تشریح خواهد شد.

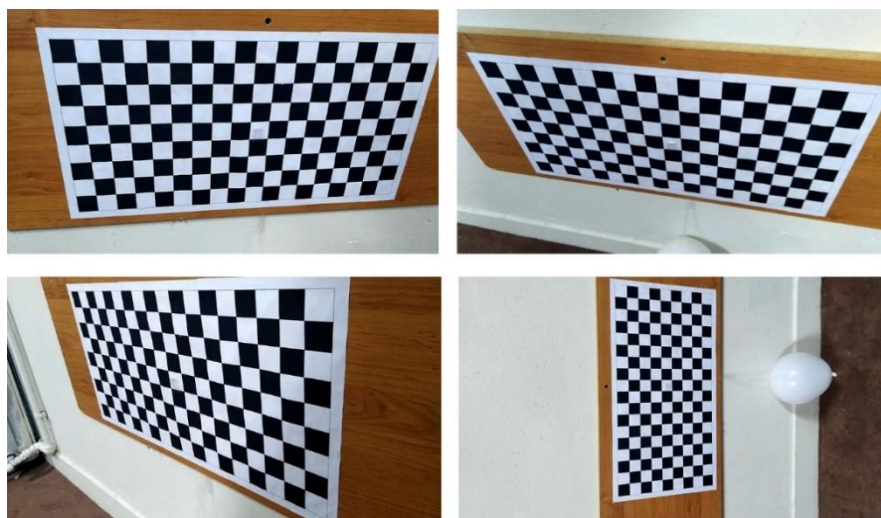
### ۳-۴-۱ تصویربرداری (فیلمبرداری) از میدان آزمون شطرنجی

در این پژوهش به منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون یک صفحه شطرنجی به ابعاد  $270 \times 540$  میلی‌متر با ابعاد شبکه ۳۰ میلی‌متر ایجاد شد. لازم به ذکر است انتخاب این ابعاد برای صفحه‌ی شطرنجی، به منظور قرارگرفتن در تمام ابعاد تصویر بوده تا پارامترهای کالیبراسیون به صورت سراسری در تمام پیکسل‌های تصویر دخالت داده شوند. نحوه شماره‌گذاری نقاط از سمت چپ پایین با شماره یک شروع و به صورت سطری شماره‌گذاری شده‌اند. نحوه شماره‌گذاری تمامی نقاط با حذف نقاط اطراف شبکه در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است.



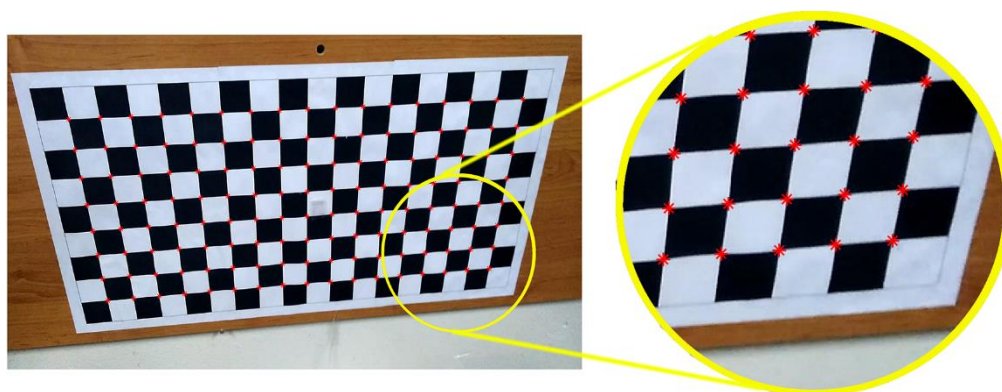
### شکل ۳-۳: نحوه شماره‌گذاری زمینه شطرنجی

سپس توسط دوربین‌ها به صورت جداگانه از زوایای مختلف از صفحه شطرنجی فیلمبرداری می‌شود. از آنجاییکه هر بار فیلمبرداری، فوکوس (تغییر عمق) را تغییر می‌دهد فوکوس دوربین‌ها در حالت دستی (ثابت) در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر تغییر در عمق، تغییر فاصله کانونی به صورت لحظه‌ای را در برخواهد داشت که باعث متغیر بودن پارامترهای کالیبراسیون خواهد شد. در هر صورت دوربین‌های غیرمتریک برخلاف دوربین‌های متریک پارامترهای آن‌ها در هر بار فیلمبرداری باید محاسبه شوند و قابل اعتماد نیستند. اما با ثابت شدن فوکوس (ثابت شدن فاصله کانونی) می‌توان به پارامترهای بدست آمده تا زمان عدم تغییر در تنظیمات داخلی دوربین اعتماد کرد. همان‌طور که مطرح شد به منظور تأمین نرخ بالا در اخذ تصاویر استریو، از دوربین‌های فیلم‌برداری بجای دوربین‌های عکسبرداری استفاده شده است. از همین رو تصاویر از صفحه شطرنجی به صورت فیلمبرداری شده با fps حدود ۳۰ اخذ گردیده است. لازم به ذکر است که دوربین‌های تلفن همراه مقدار fps آن‌ها به طور دقیق ۳۰ نبوده و به اندازه حدود  $\pm 0.5$  فریم جابجایی دارند. نمونه‌ی صفحه شطرنجی و تصاویر اخذ شده در شکل ۳-۵ قابل مشاهده است.



### شکل ۳-۴: نمونه‌ای از فریم‌های اخذ شده جهت کالیبراسیون دوربین

همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌کنید به منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون دوربین از زوایای مختلف فیلمبرداری شده و فریم‌های تصویری از آن استخراج گردیده است.



شکل ۳-۵: مراکز شناسایی شده شبکه توسط نرم‌افزار Matlab R2015a

مراکز شبکه با استفاده از نرم‌افزار متلب شناسایی و مختصات تصویری آن‌ها ثبت شده است (شکل ۳-۵). در ضمن به دلیل کم بودن دقت نقاط اطراف شبکه، این نقاط اندازه‌گیری نشده است. بعد از شناسایی نقاط توسط تابع متلب، با برازش یک مدل ریاضی پروژکتیو بوسیله نقاط چهارگوشه صفحه‌ی شطرنجی، ارتباط بین فضای شیء و فضای تصویر برقرار خواهد شد. این روند به دلیل نسبت دادن شماره نقاط صحیح به نقاط شناسایی شده در تصاویر بوده که به منظور پردازش در نرم‌افزار Australis Ver.6.06 مورد نیاز است. در نهایت مختصات تصویری نقاط اندازه‌گیری شده در فایل‌ی با فرمت icf (فرمت نرم‌افزار Australis) ذخیره خواهد شد [۶۴]. مقادیر برآورد شده پارامترها در فصل بعدی نمایش داده شده است.

### ۳-۵ توجیه نسبی دوربین‌های تصویربرداری و اعمال مقیاس

بعد از کالیبراسیون داخلی هر یک از دوربین‌ها، هر دو دوربین در یک بدنه‌ی از پیش‌ساخته شده نسبت به یکدیگر ثابت می‌شوند. در ادامه، مجدداً با اخذ فیلم همزمان از یک میدان آزمون تارگت‌گذاری شده، پارامترهای ارتباط نسبی دو دوربین به کمک فرایند توجیه‌نسبی دوطرفه با معادلات شرط‌هم‌خطی (توجیه نسبی متشکل از ۵ پارامتر دورانی بین دو دوربین) برآورد می‌شود [۶۵]. ارتباط نسبی دوربین‌ها تا انتهای روند تولید مدل سه‌بعدی ثابت خواهد ماند. لازم به ذکر است که فیلم‌ها به فریم‌های تصویری تبدیل شده و به دلیل ثابت بودن دوربین‌ها، هر کدام از فریم‌ها متناظر همدیگر بوده و تنها از یک جفت فریم به‌منظور برآورد پارامترهای توجیه نسبی بهره گرفته شده است.

نقاط مورد استفاده در توجیه نسبی، نقاط تقاطع شبکه‌ها (بدون نقاط اطراف شبکه) به تعداد ۱۳۶ نقطه بوده است. لازم به ذکر است که در روش توجیه نسبی معادلات شرط‌هم‌خطی نقاط تصویری اندازه‌گیری شده در فضای مدل بازسازی خواهند شد. در این پژوهش مختصات نقاط در فضای شیء هم معلوم

و مشخص است. برای این اساس مقیاس با میانگین تقسیم ماتریس فاصله دوبه‌دوی نقاط سه‌بعدی در فضای شیء و فضای مدل محاسبه می‌گردد. در نهایت با اعمال مقیاس به پارامترهای انتقالی توجیه نسبی با هدف تولید محتوای سه‌بعدی هم‌مقیاس با فضای شیء، تنظیم می‌گردد. بعد از قرارگیری دو دوربین در بدنه دستگاه و با معلوم بودن پارامترهای ارتباط نسبی آن‌ها، تولید تصاویر اپی‌پلار در دستورکار خواهد بود؛ که در بخش بعدی چگونگی تولید تصاویر نرمال و اهمیت آن بحث و بررسی خواهد شد.

### ۳-۶ تولید پارامترهای تولید تصویر نرمال

بعد از برآورد پارامترهای توجیه نسبی هم‌مقیاس با فضای شیء، تولید تصاویر نرمال در دستور کار قرار می‌گیرد. باز نمونه‌برداری اپی‌پلار به فرایندی اطلاق شده که طی آن به کمک تبدیلات پروجکتیو دوبعدی، تصاویر استریوی اولیه به نسخه‌ی پالایش شده‌ای تبدیل می‌گردند. با در نظر گرفتن مبانی تئوری تولید تصاویر نرمال شده، مختصات مراکز تصویر نرمال شده در فضای شیء منطبق با موقعیت مراکز تصویر خام متناظر است. به عبارت بهتر، تنها پارامترهای دورانی این تصاویر با تصاویر خام متفاوت خواهد بود. از سوی دیگر، بکارگیری راهکار توجیه نسبی دوطرفه در برآورد پارامترهای نسبی، منجر به تخمین مقادیر صفر برای پارامترهای دورانی  $\varphi_n$  و  $\kappa_n$  در تصاویر نرمال شده می‌شود. به همین جهت پارامترهای دورانی تصاویر نرمال شده صرفاً محدود به دوران  $\omega_n$  خواهد بود. مقدار پارامتر  $\omega_n$  معادل متوسط مقدار بدست آمده برای این پارامتر در نتایج توجیه نسبی دو دوربین است (رابطه (۲-۲۱) [۵۲]).

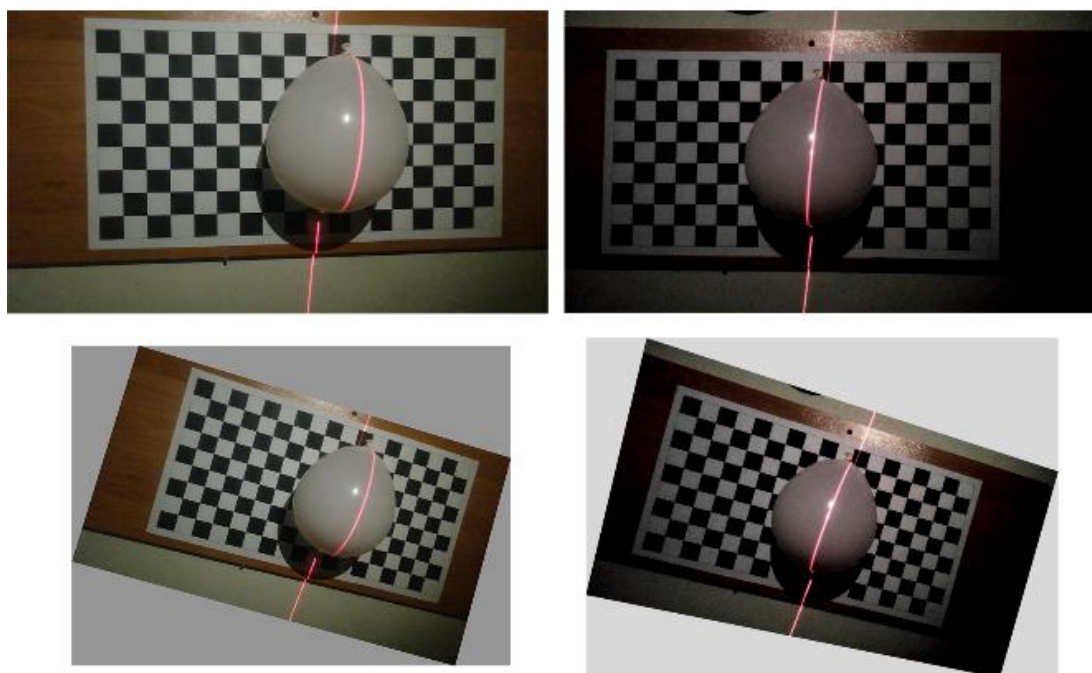
### ۳-۷ جاروب شیء توسط لیزر و یافتن جفت فریم‌های متناظر

در گام بعد بدون جابجایی دوربین‌ها، از شیء همراه با انتشار لیزر صفحه‌ای فیلم‌برداری می‌شود. به عبارت بهتر در هنگام فیلم‌برداری، سطح شیء توسط لیزر صفحه‌ای بدون هیچ محدودیتی توسط کاربر جاروب می‌گردد. آهسته حرکت کردن لیزر و یکنواخت جابجا شدن نکات مهمی در تاباندن لیزر است. لازم به ذکر است که fps دوربین‌های دو تلفن همراه در این پژوهش در حد یک فریم متغیر است. به‌منظور غلبه بر این چالش راهکار آهسته حرکت نمودن لیزر با سرعت یکنواخت بکار گرفته شده است. گرچه این مشکل می‌تواند با بکارگیری دوربین‌هایی با fps حدود ۶۰ مرتفع گردد.

پس از اخذ داده از سیستم نور ساختاریافته معرفی شده در بخش ۳-۲، فیلم‌های بدست آمده به جفت فریم‌های همزمان تفکیک می‌شوند. نرخ بالا در تصویربرداری امکان تولید جفت‌فریم‌های متناظر را

با فواصل زمانی اندک فراهم آورده و این موضوع هنگام جاروب سطح توسط لیزر صفحه‌ای، امکان ثبت تصویر از مقاطع متراکم و نزدیک به یکدیگر را از سطح عارضه فراهم می‌آورد. به منظور پیدا کردن فریم‌های متناظر، از یک کرنومتر در ابتدا و انتهای فیلم‌برداری استفاده شده است. به این صورت که در ابتدا و انتهای روند تصویربرداری با نمایش کرنومتر در فیلم، می‌توان زمان‌های متناظر در دو فیلم دوربین را جستجو نمود. در این پژوهش با اعمال یک معادله خطی می‌توان هر زمان فریم دلخواهی را معرفی نموده و متناظر آن را در فیلم دوربین دوم یافت. بر این اساس می‌توان به تعداد دلخواهی فریم‌های متناظر تولید نمود.

از آنجاییکه بدنه سیستم ثابت و دوربین‌ها جابجا نشده‌اند بنابراین بعد از تولید فریم‌های متناظر، با استفاده از پارامترهای نرمال‌سازی که در بخش قبل برآورد شد، تمامی فریم‌های خام متناظر به تصاویر نرمال تبدیل می‌شوند. در شکل ۳-۶ نمونه‌ای از یک جفت فریم همزمان را در دو حالت خام و نرمال شده نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: نمونه‌ای از جفت فریم متناظر دوربین چپ (تصویر سمت چپ تصویر خام و تصویر سمت راست تصویر نرمال شده است).

مطابق با هندسه‌ی تصاویر استریو، در صورت معلوم بودن پارامترهای نسبی دو دوربین، موقعیت متناظر مرتبط با هر نقطه در یک تصویر را می‌توان در خط اپی‌پلار آن نقطه در فضای تصویر دوم یافت. با موازی شدن خطوط اپی‌پلار در تصاویر نرمال شده، این خطوط هم‌راستا با چیدمان سطرهای تصویری



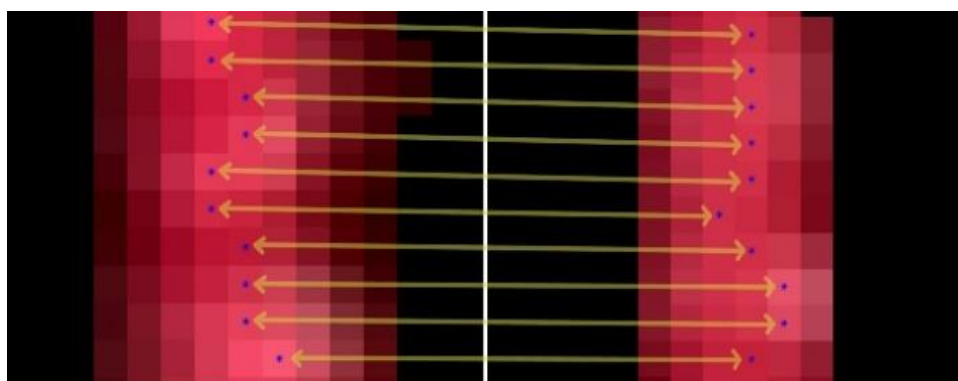
می‌شوند [۵۰]. بنابراین جستجو به منظور یافتن عوارض متناظر به یک جستجوی یک‌بعدی در راستای سطرهای متناظر تصاویر نرمال شده تبدیل می‌گردد.

برای فیلم‌برداری در سیستم نور ساختاریافته پیشنهادی یک محیط تاریک توصیه می‌شود. محیط تاریک تمایز بالاتری میان نور بازتابی از لیزر و پس‌زمینه به وجود آورده و نسبت سیگنال به نویز بالاتری را به منظور آشکارسازی محل نور لیزر در فضای تصویر تأمین می‌سازد. بعد از تولید جفت‌فریم‌های همزمان نرمال شده، یافتن نقاط متناظر حاصل از تقاطع صفحه‌ی لیزر با سطح سه‌بعدی شیء در دستور کار قرار دارد که در بخش بعدی تشریح شده است.

### ۳-۸ یافتن نقاط متناظر در جفت‌فریم‌های متناظر

به ازای هر سطر از یک تصویر نرمال شده، سطری متناظر در تصویر نرمال شده‌ی دوم از جفت فریم‌های همزمان وجود داشته که این موضوع امکان یافتن نقاط متناظر از صفحه‌ی لیزر را به ازای هر سطر از تصاویر استریو فراهم می‌آورد.

برای یافتن نقاط متناظر صفحه‌ی لیزر در تصاویر نرمال شده ابتدا این نواحی به کمک آستانه‌گذاری رنگی در فضای HSI شناسایی می‌شوند. تمایز رنگی نور لیزر و پس‌زمینه‌ی تاریک چالش زیادی برای این فرایند به وجود نمی‌آورد. بعد از یافتن پهنه‌ی نوری در تصاویر، جستجو به منظور یافتن یک زوج نقطه‌ی متناظر به ازای هر سطر متناظر از تصاویر استریو صورت می‌گیرد. در این مرحله، هر سطر از یکی از تصاویر استریو از حیث وجود نور لیزر بررسی شده و در صورت شناسایی آن، مختصات تصویری یک نقطه از پیکسل‌های متأثر از نور لیزر (موقعیت نقطه‌ی توأم با بیشینه‌ی روشنی در باند هم‌رنگ با لیزر) در آن تصویر ثبت می‌گردد. برای تعیین موقعیت نقطه‌ی متناظر در تصویر دوم، سطر متناظر کاوش می‌شود. در تصویر دوم نیز موقعیت بیشینه‌ی روشنی در باند هم‌رنگ با لیزر به عنوان نقطه‌ی متناظر انتخاب می‌شود. شکل ۳-۷ نمونه‌ای از نقاط متناظر واقع در صفحه‌ی لیزر در یک جفت فریم همزمان را نشان می‌دهد.

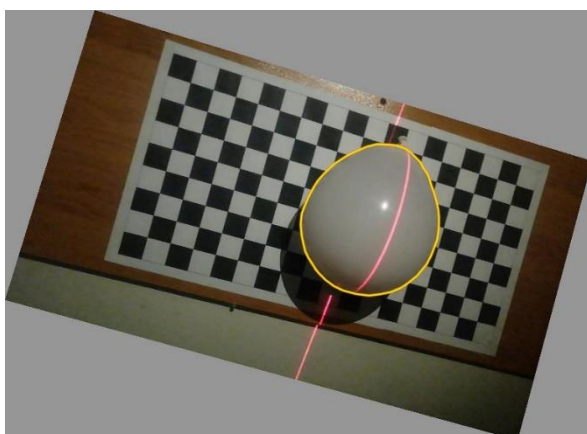


شکل ۳-۷: نمونه‌ای از نقاط متناظر واقع در صفحه‌ی لیزر در یک جفت فریم چپ و راست

به ازای هر جفت نقطه‌ی متناظر در تصاویر استریو و معلوم بودن پارامترهای توجیه نسبی تصاویر نرمال شده، می‌توان موقعیت سه‌بعدی متناظر در فضای شیء را به کمک فرایند تقاطع فضایی محاسبه نمود. دستگاه معادلات غیرخطی مرتبط با فرایند تقاطع فضایی، به ازای هر جفت نقطه‌ی متناظر متشکل از ۴ معادله‌ی شرط هم‌خطی و ۳ مجهول مختصات در فضای شیء می‌باشد [۶۶].

### ۳-۸-۱ اعمال ماسک روی شیء

از انجاییکه لیزر به صورت یک خط روی شیء و عوارض خارج از شیء تابیده می‌شود، به منظور بهینه کردن و افزایش سرعت تولید مدل سه‌بعدی شیء، قسمت خارج از شیء توسط یک ماسک حذف خواهد شد. قبل از جاروب سطح شیء، فیلم‌برداری در حالت روشنایی نور محیط از شیء انجام می‌شود؛ بر این اساس محیط شیء شناسایی و ذخیره خواهد شد و در فرایندهای بعدی تنها محدوده شیء مورد پردازش قرار خواهد گرفت. در شکل ۳-۸ شیء بدون بافت با ماسک اعمال شده نمایش داده شده است.



شکل ۳-۸: ماسک اعمال شده روش شیء بدون بافت (بادکنک)

در شکل سمت چپ بخش‌های خارج از شیء که نیازی به تهیه مدل سه‌بعدی ندارند قابل رؤیت است. بدیهی است که این ماسک باعث کاهش نقاط و افزایش سرعت مدل‌سازی خواهد شد.

### ۳-۹ تقاطع یافتن همزمان تمام نقاط واقع در یک مقطع از صفحه لیزر

پارامترهای صفحه‌ی لیزر در سیستم نور ساختاریافته پیشنهادی مشخص نبوده و نقش آن صرفاً تسهیل فرایند جستجو به منظور یافتن نقاط متناظر در تصاویر استریو است. در این فرایند می‌توان از لبه‌های رنگی تولیدشده توسط ویدئوپروژکتور نیز بجای صفحه‌ی لیزر استفاده نمود. استفاده از لیزرهای صفحه‌ای به واسطه‌ی آزادی عمل بیشتر در مقایسه با ابعاد و حجم ویدئوپروژکتور ترجیح‌پذیر می‌باشند.

هرچند که در فرایند پیشنهاد شده، لیزر صفحه‌ای نقش تسهیل‌کننده برای شناسایی نقاط متناظر را در تصاویر استریو برخوردار است؛ اما تمامی نقاط سه‌بعدی واقع در یک مقطع سه‌بعدی، همگی در مکان هندسی صفحه‌ی لیزر واقع می‌شوند. به عبارت بهتر، هرچند که پارامترهای هندسی و لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر در این سیستم نور ساختاریافته معلوم نیست؛ اما قید قرار داشتن تمامی نقاط واقع در هر مقطع سه‌بعدی در یک صفحه منحصر بفرد، شرایط هندسی حاکم بر این فرایند است. عدم قطعیت‌های مرتبط با انتخاب نقاط متناظر در فرایند پردازشی بخش قبل، احتمال هم‌صفحه نبودن مختصات‌های سه‌بعدی تولیدشده به صورت منفرد را افزایش می‌دهد. در این پژوهش ایده‌ی تشکیل دستگاه معادلات همزمان تقاطع فضایی برای تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی، توأم با قید هم‌صفحه بودن آن‌ها، پیشنهاد شده است.

### ۳-۹-۱ اثبات و بکارگیری قید در روند تقاطع همزمان

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، در این پژوهش ایده‌ی تشکیل دستگاه معادلات همزمان تقاطع فضایی برای تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی، توأم با قید هم‌صفحه بودن آن‌ها، پیشنهاد شده است. به عبارت بهتر، بجای محاسبه‌ی مختصات سه‌بعدی هر نقطه‌ی متناظر از طریق تشکیل یک دستگاه معادلات تقاطع فضایی مجزا، به ازای تمامی نقاط متناظر یافت شده در یک جفت فریم همزمان، یک دستگاه معادلات برای محاسبه‌ی مختصات تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی تشکیل می‌گردد. با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۳-۱) به عنوان فرم خطی‌سازی شده معادلات شرط هم‌خطی تصاویر استریو نسبت به مختصات سه‌بعدی نقطه‌ی نام در فضای شیء، دستگاه معادلات غیرخطی مربوط به برآورد همزمان تمامی

نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی از شیء به صورت رابطه‌ی (۲-۳) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{oi} \\ F'_{oi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial X_i} & \frac{\partial F}{\partial Y_i} & \frac{\partial F}{\partial Z_i} \\ \frac{\partial F'}{\partial X_i} & \frac{\partial F'}{\partial Y_i} & \frac{\partial F'}{\partial Z_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta X_i \\ \delta Y_i \\ \delta Z_i \end{bmatrix} = [dl_i]_{4 \times 1} + [b_i]_{4 \times 3} \times [\delta_i]_{3 \times 1} = 0 \quad (1-3)$$

در رابطه‌ی (۱-۳)،  $F_i$  و  $F'_i$  به ترتیب معادلات شرط هم‌خطی مربوط به نقطه‌ی  $i$ ام در تصاویر اول و دوم از یک جفت فریم هم‌زمان می‌باشند (رابطه‌ی (۲-۱۶)). ماتریس ضرایب مجهولات،  $\delta_i$  بردار تصحیح مجهولات (مختصات سه‌بعدی نقطه‌ی  $i$ ام در فضای شیء) و  $dl_i$  بردار اختلافات میان مشاهدات تصویری نقطه‌ی  $i$ ام و مقادیر تابع شرط هم‌خطی به ازای مقادیر مجهولات نقطه‌ی  $i$ ام می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} dl_1 \\ dl_2 \\ \vdots \\ dl_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ & b_2 & \dots & \vdots \\ & & \ddots & 0 \\ sym. & & & b_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} = dL + B \times \Delta = 0 \quad (2-3)$$

در رابطه‌ی (۲-۳)،  $B$  ماتریس ضرایب مجهولات هم‌زمان تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی از عارضه،  $n$  تعداد نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی،  $\Delta$  بردار مجهولات هم‌زمان تمامی نقاط و  $dL$  بردار اختلافات میان مشاهدات تصویری و مقادیر تابع شرط هم‌خطی به ازای مقادیر تمامی مجهولات هم‌زمان می‌باشند.

دستگاه معادلات رابطه‌ی (۲-۳) غیرخطی بوده و در روند تکرار به همگرایی می‌رسد. حل مستقل نتایج تقاطع فضایی به ازای هر نقطه از مقطع سه‌بعدی (رابطه‌ی (۱-۳)) و یا بکارگیری رویکرد هم‌زمان در برآورد پارامترهای مجهول (رابطه‌ی (۲-۳)) تأثیری در مقادیر مجهول برآورد شده نخواهد داشت. در این پژوهش، بکارگیری یک معادله‌ی قید جدید با هدف مقید ساختن روند برآورد مختصات نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی، در مکان هندسی یک صفحه، جنبه‌ی نوآورانه‌ی فرایند تقاطع فضایی هم‌زمان را به خود اختصاص می‌دهد.

از نقطه‌نظر تئوری، ماتریس کواریانس نقاط سه‌بعدی واقع در یک صفحه، حاوی یک مقدار ویژه‌ی صفر خواهد بود [۶۷، ۶۸]. به عبارت بهتر، انتظار می‌رود که در صورتیکه تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی در مکان هندسی صفحه‌ی لیزر قرار داشته باشند؛ ماتریس کواریانس آن‌ها حداقل یک کمبود در رتبه را برخوردار باشد. بدیهی است که در صورتیکه مقطع سه‌بعدی بر مکان هندسی یک خط سه‌بعدی

قرار داشته باشد؛ فقدان رتبه‌ی ماتریس کواریانس به مقدار عددی ۲ ارتقاء خواهد یافت. بر این اساس، قید بکارگرفته شده در روند برآورد موقعیت‌های سه‌بعدی (رابطه‌ی (۳-۳))، صفر شدن دترمینان ماتریس کواریانس مختصات‌های سه‌بعدی واقع در یک مقطع سه‌بعدی از عارضه است.

با در نظر گرفتن  $[X_i, Y_i, Z_i]^T, i=1, 2, \dots, n$  به‌عنوان تمامی موقعیت‌های سه‌بعدی واقع در یک مقطع سه‌بعدی و  $[\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}]^T$  به‌عنوان بردار مرکز ثقل نقاط سه‌بعدی واقع در مقطع سه‌بعدی، ماتریس کواریانس موقعیت‌های سه‌بعدی از رابطه‌ی (۳-۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} X_i - \bar{X} \\ Y_i - \bar{Y} \\ Z_i - \bar{Z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_i - \bar{X} & Y_i - \bar{Y} & Z_i - \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ sym. & & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

در رابطه‌ی (۳-۳)،  $\sigma_x^2$ ،  $\sigma_y^2$  و  $\sigma_z^2$  به ترتیب واریانس‌های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  بوده و  $\sigma_{xy}$ ،  $\sigma_{xz}$  و  $\sigma_{yz}$  کواریانس‌های دو به دوی مؤلفه‌های مختصاتی می‌باشند. بر این اساس دترمینان ماتریس کواریانس برابر است با:

$$|C| = (\sigma_y^2 \sigma_z^2 - \sigma_{yz} \sigma_{zy}) \sigma_x^2 + (\sigma_{yz} \sigma_{zx} - \sigma_{yx} \sigma_z^2) \sigma_{xy} + (\sigma_{yx} \sigma_{zy} - \sigma_y^2 \sigma_{zx}) \sigma_{xz} \quad (4-3)$$

معادله‌ی قید بکارگرفته شده (صفر شدن دترمینان رابطه‌ی (۳-۳)) پس از ساده‌سازی به صورت رابطه‌ی (۵-۳) خواهد بود.

$$|C| = \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sigma_z^2 + 2\sigma_{xy} \sigma_{xz} \sigma_{yz} - \sigma_x^2 \sigma_{yz}^2 - \sigma_y^2 \sigma_{xz}^2 - \sigma_z^2 \sigma_{xy}^2 = 0 \quad (5-3)$$

در رابطه‌ی (۵-۳)،  $|C|$  نماد عملگر دترمینان می‌باشد. با صفر شدن رابطه‌ی (۵-۳)، ماتریس کواریانس (رابطه‌ی (۳-۳)) کمبود رتبه پیدا کرده و برای تأمین چنین شرایطی می‌بایست موقعیت نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی در مکان هندسی یک صفحه قرار گیرند. از مزایای بکارگیری چنین معادله‌ای، تحمیل برآورد مختصات نقاط سه‌بعدی در یک صفحه صرفاً با بکارگیری یک قید قطعی در حل دستگاه معادلات کمترین مربعات می‌باشد. راهکار جایگزین برای تأمین چنین قیدی، هم‌صفحه لحاظ نمودن زیرمجموعه‌های سه‌عضوی از نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی خواهد بود. به عبارت بهتر، برای هر سه نقطه واقع در مقطع سه‌بعدی یک معادله‌ی قید مبنی بر هم‌صفحه بودن قابل نگارش است؛ اما در صورتیکه بین معادلات قید از نقاط مشترک استفاده نشود؛ تأمین هم‌صفحه‌گی تمامی نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی دچار اختلال می‌گردد. بر این اساس، وجود نقاط مشترک در قیود هم‌صفحه‌گی تضمین‌کننده‌ی قرارگیری تمامی نقاط سه‌بعدی در یک صفحه واحد خواهد بود. در چنین شرایطی هم‌صفحه ساختن تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی

مستلزم بکارگیری تعداد زیادی قید در ساختار دستگاه معادلات مرتبط با حل کمترین مربعات بوده که معادله‌ی پیشنهادی صرفاً با اعمال یک قید پتانسیل انجام آن را برخوردار است.

معادله‌ی ارائه شده در رابطه‌ی (۳-۵) نسبت به مختصات نقاط سازنده‌ی آن غیرخطی بوده و برای بکارگیری در ساختار معادلات کمترین مربعات مقید، نیازمند خطی‌سازی است (رابطه‌ی (۳-۶)).

$$|C| = |C_0| + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial C}{\partial X_i} & \frac{\partial C}{\partial Y_i} & \frac{\partial C}{\partial Z_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta X_i \\ \delta Y_i \\ \delta Z_i \end{bmatrix} = |C_0| + [D]_{1 \times 3n} \times \Delta = 0 \quad (۳-۶)$$

در رابطه‌ی (۳-۶)، بردار  $D$  شامل تمامی مشتقات جزئی مربوط به تمامی مختصات‌های سه‌بعدی واقع در یک مقطع سه‌بعدی است.  $|C_0|$  مقدار دترمینان ماتریس کواریانس به ازای مقادیر مجهول مختصات نقاط در فضای شیء است. بردار  $\Delta$  مشابه نام‌گذاری در رابطه‌ی (۳-۲) شامل تصحیح تمامی مقادیر مجهولات است. رابطه واریانس‌ها به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \\ \sigma_z^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 \end{aligned} \quad (۳-۷)$$

با بسط دادن رابطه (۳-۷)، رابطه (۳-۸) برای واریانس‌ها بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{1}{n} \left[ (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_i - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \right] \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{n} \left[ (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_i - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2 \right] \\ \sigma_z^2 &= \frac{1}{n} \left[ (z_1 - \bar{z})^2 + (z_2 - \bar{z})^2 + \dots + (z_i - \bar{z})^2 + \dots + (z_n - \bar{z})^2 \right] \end{aligned} \quad (۳-۸)$$

از آنجاییکه مشتق  $\bar{x}$  برابر است با:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} [x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n] \\ \bar{x}' &= \frac{1}{n} \end{aligned} \quad (۳-۹)$$

بر این اساس مشتقات جزئی واریانس‌ها برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x^2}{\partial x_i} &= -\frac{1}{n} \left[ \frac{2}{n}(x_1 - \bar{x}) + \frac{2}{n}(x_2 - \bar{x}) + \dots + \left( \frac{2}{n} - 2 \right) (x_i - \bar{x}) + \dots + \frac{2}{n}(x_n - \bar{x}) \right] \\ &= \frac{1}{n} \left[ \underbrace{-\frac{2}{n}(x_1 - \bar{x}) + (x_2 - \bar{x}) + \dots + (x_i - \bar{x}) + \dots + (x_n - \bar{x})}_0 + 2(x_i - \bar{x}) \right] \\ \frac{\partial \sigma_y^2}{\partial y_i} &= -\frac{1}{n} \left[ \frac{2}{n}(y_1 - \bar{y}) + \frac{2}{n}(y_2 - \bar{y}) + \dots + \left( \frac{2}{n} - 2 \right) (y_i - \bar{y}) + \dots + \frac{2}{n}(y_n - \bar{y}) \right] \\ &= \frac{1}{n} \left[ \underbrace{-\frac{2}{n}(y_1 - \bar{y}) + (y_2 - \bar{y}) + \dots + (y_i - \bar{y}) + \dots + (y_n - \bar{y})}_0 + 2(y_i - \bar{y}) \right] \\ \frac{\partial \sigma_z^2}{\partial z_i} &= -\frac{1}{n} \left[ \frac{2}{n}(z_1 - \bar{z}) + \frac{2}{n}(z_2 - \bar{z}) + \dots + \left( \frac{2}{n} - 2 \right) (z_i - \bar{z}) + \dots + \frac{2}{n}(z_n - \bar{z}) \right] \\ &= \frac{1}{n} \left[ \underbrace{-\frac{2}{n}(z_1 - \bar{z}) + (z_2 - \bar{z}) + \dots + (z_i - \bar{z}) + \dots + (z_n - \bar{z})}_0 + 2(z_i - \bar{z}) \right] \end{aligned} \quad (10-3)$$

با توجه به عبارت‌های صفرشده، نتیجه مشتقات واریانس‌ها به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x_i} &= \frac{2}{n}(x_i - \bar{x}) \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y_i} &= \frac{2}{n}(y_i - \bar{y}) \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z_i} &= \frac{2}{n}(z_i - \bar{z}) \end{aligned} \quad (11-3)$$

لازم به ذکر است مشتقات دیگر واریانس‌ها صفر خواهند شد. در ادامه با پرداختن به کواریانس‌ها،

روابط کواریانس‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (12-3)$$

$$\sigma_{XZ} = \sigma_{ZX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Z_i - \bar{Z})$$

$$\sigma_{YZ} = \sigma_{ZY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(Z_i - \bar{Z})$$

با بسط دادن رابطه (۱۲-۳)، رابطه (۱۳-۳) برای کواریانس بدست خواهد آمد.

$$\sigma_{XY} = \frac{1}{n} ((X_1 - \bar{X})(Y_1 - \bar{Y}) + (X_2 - \bar{X})(Y_2 - \bar{Y}) + \dots + (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) + \dots + (X_n - \bar{X})(Y_n - \bar{Y}))$$

$$\sigma_{XZ} = \frac{1}{n} ((X_1 - \bar{X})(Z_1 - \bar{Z}) + (X_2 - \bar{X})(Z_2 - \bar{Z}) + \dots + (X_i - \bar{X})(Z_i - \bar{Z}) + \dots + (X_n - \bar{X})(Z_n - \bar{Z}))$$

$$\sigma_{YZ} = \frac{1}{n} ((Y_1 - \bar{Y})(Z_1 - \bar{Z}) + (Y_2 - \bar{Y})(Z_2 - \bar{Z}) + \dots + (Y_i - \bar{Y})(Z_i - \bar{Z}) + \dots + (Y_n - \bar{Y})(Z_n - \bar{Z})) \quad (۱۳-۳)$$

داریم،  $A_i = (Y_i - \bar{Y})$ ،  $B_i = (Z_i - \bar{Z})$  و  $C_i = (X_i - \bar{X})$  و با در نظر گرفتن رابطه (۹-۳) و مشتق-

گیری از روابط (۱۳-۳) نسبت به مؤلفه‌های  $X$  و  $Y$  و  $Z$ ، روابط (۱۴-۳) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{XY}}{\partial X_i} = \frac{\partial \sigma_{ZY}}{\partial Z_i} &= -\frac{1}{n} \left( \frac{1}{n} A_1 + \frac{1}{n} A_2 + \dots + \left( \frac{1}{n} - 1 \right) A_i + \dots + \frac{1}{n} A_n \right) \\ &= -\frac{1}{n^2} \underbrace{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}_0 + \frac{1}{n} A_i = \frac{1}{n} A_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{XZ}}{\partial X_i} = \frac{\partial \sigma_{YZ}}{\partial Y_i} &= -\frac{1}{n} \left( \frac{1}{n} B_1 + \frac{1}{n} B_2 + \dots + \left( \frac{1}{n} - 1 \right) B_i + \dots + \frac{1}{n} B_n \right) \\ &= -\frac{1}{n^2} \underbrace{(B_1 + B_2 + \dots + B_n)}_0 + \frac{1}{n} B_i = \frac{1}{n} B_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{XY}}{\partial Y_i} = \frac{\partial \sigma_{ZX}}{\partial Z_i} &= -\frac{1}{n} \left( \frac{1}{n} C_1 + \frac{1}{n} C_2 + \dots + \left( \frac{1}{n} - 1 \right) C_i + \dots + \frac{1}{n} C_n \right) \\ &= -\frac{1}{n^2} \underbrace{(C_1 + C_2 + \dots + C_n)}_0 + \frac{1}{n} C_i = \frac{1}{n} C_i \end{aligned} \quad (۱۴-۳)$$

مشتقات جزئی واریانس و کواریانس‌ها نسبت به هر یک از مؤلفه‌های مختصاتی نقاط به ترتیب در

روابط (۱۱-۳) و (۱۴-۳) محاسبه شد. در نهایت با جایگذاری در رابطه (۵-۳) و ساده‌سازی به صورت رابطه

(۱۵-۳) خواهد بود.



$$\begin{aligned} \frac{\partial |C|}{\partial X_i} &= \frac{2}{n}(X_i - \bar{X})\sigma_y^2\sigma_z^2 + \frac{2}{n}[(Y_i - \bar{Y})\sigma_{xz} + (Z_i - \bar{Z})\sigma_{xy}] \sigma_{yz} \\ &\quad - \frac{2}{n}(X_i - \bar{X})\sigma_{yz}^2 - \frac{2}{n}(Z_i - \bar{Z})\sigma_y^2\sigma_{xz}^2 - \frac{2}{n}(Y_i - \bar{Y})\sigma_z^2\sigma_{xy}^2 \\ \frac{\partial |C|}{\partial Y_i} &= \frac{2}{n}(Y_i - \bar{Y})\sigma_x^2\sigma_z^2 + \frac{2}{n}[(X_i - \bar{X})\sigma_{yz} + (Z_i - \bar{Z})\sigma_{xy}] \sigma_{xz} \\ &\quad - \frac{2}{n}(Y_i - \bar{Y})\sigma_{xz}^2 - \frac{2}{n}(Z_i - \bar{Z})\sigma_x^2\sigma_{yz} - \frac{2}{n}(X_i - \bar{X})\sigma_z^2\sigma_{xy} \\ \frac{\partial |C|}{\partial Z_i} &= \frac{2}{n}(Z_i - \bar{Z})\sigma_x^2\sigma_y^2 + \frac{2}{n}[(X_i - \bar{X})\sigma_{yz} + (Y_i - \bar{Y})\sigma_{xz}] \sigma_{xy} \\ &\quad - \frac{2}{n}(Z_i - \bar{Z})\sigma_{xy}^2 - \frac{2}{n}(Y_i - \bar{Y})\sigma_x^2\sigma_{yz} - \frac{2}{n}(X_i - \bar{X})\sigma_y^2\sigma_{xz} \end{aligned} \quad (15-3)$$

قید ارائه‌شده در رابطه‌ی (۳-۶) به صورت دستگاه معادلات رابطه‌ی (۳-۱۶) در فرایند تقاطع فضایی همزمان نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\begin{bmatrix} \Delta \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^T B & -D^T \\ D & 0 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -B^T dL \\ -|C_0| \end{bmatrix} \quad (16-3)$$

دستگاه معادله‌ی ارائه‌شده در رابطه‌ی (۳-۱۶)، در فرایند اکسترمم‌یابی مقید لاگرانژ در یک دستگاه معادله‌ی فرامعین کمترین مربعات تشکیل شده است [۶۹، ۷۰]. در این رابطه، اسکالر  $\lambda_c$  ضریب لاگرانژ مرتبط با فرایند یافتن اکسترمم‌های مقید می‌باشد. با حل تکراری دستگاه معادلات ارائه شده در رابطه‌ی (۳-۱۶)، همزمان تمامی موقعیت‌های واقع در یک مقطع سه‌بعدی از شیء طی فرایند تقاطع فضایی برآورد شده بطوریکه دترمینان ماتریس کواریانس مجهولات صفر خواهد شد. در چنین شرایطی مختصات‌های سه‌بعدی در مکان هندسی یک صفحه برآورد خواهند گشت.

### ۳-۹-۲ حذف نقاط پرت

همان‌طور که قبلاً بیان شد با بکارگیری تصاویر نرمال، سطر متناظر و ستون‌های متناظر از طریق درجه خاکستری بیشینه در آن سطر شناسایی و ذخیره شدند. اگر نقاط روی خط لیزر به صورت تکی با استفاده از معادلات تقاطع بدون بکارگیری قید پیشنهادشده، بازسازی شوند؛ ممکن است نقاط بازسازی شده روی صفحه لیزر یا خارج صفحه لیزر قرار گرفته باشند. گاهاً نقاط بازسازی شده از مرکز ثقل داده‌ها فاصله زیادی دارند، براین اساس در تقاطع همزمان همراه با قید، نقاط با پراکندگی زیاد را باید حذف نمود.

به عبارت بهتر اگر پراکندگی نقاط از صفحه لیزر زیاد باشد، باید نقاط پرت را حذف نمود؛ زیرا زمانیکه قید در تلاش برای هم صفحه نمودن نقاط روی لیزر است نقاط پرت موجب تغییر موقعیت و به هم زدن جهت‌گیری صفحه لیزر می‌شوند. به این منظور نقاط پرت شناسایی و حذف خواهند شد.

پراکندگی داده‌ها با اختلاف هر نقطه نسبت به میانگین نقاط محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر بردارهای اختلاف هر نقطه با مرکز ثقل محاسبه می‌شود. بردار ویژه متناظر با کمترین مقدار ویژه کواریانس اختلاف داده‌ها از میانگین، راستای کمترین پراکندگی را بیان می‌کند. هدف پیدا کردن نقاط با فاصله‌ی زیاد از مرکز ثقل داده‌ها بوسیله بردار ویژه راستای کمترین پراکندگی می‌باشد. به این منظور فاصله هر نقطه نسبت به میانگین در راستای بردار ویژه متناظر با کمترین مقدار ویژه (مقدار ویژه سوم) کواریانس داده‌ها محاسبه می‌شود (رابطه (۱۷-۳)).

$$D = (P - \bar{X}) \cdot \vec{V}_3 \quad (17-3)$$

در رابطه‌ی (۱۷-۳)،  $P$  مختصات نقاط،  $\bar{X}$  مرکز ثقل داده‌ها،  $\vec{V}_3$  بردار ویژه سوم می‌باشد. این رابطه نشان دهنده‌ی مقدار انحراف نقاط از مرکز ثقل داده‌ها می‌باشد. در ادامه به صورت تست تجربی مقدار حدآستانه با اعمال یک ضریب ( $\alpha$ ) در جذر مقدار ویژه سوم تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار ضریب اعدادی بین ۱ تا ۲ انتخاب شده است. هرچه مقدار ضریب کمتر، حذفیات داده‌ها بیشتر خواهد بود. براین اساس مقدار انحراف نقاط اگر از این حد آستانه بیشتر بود حذف خواهند شد.

فصل چهارم

ارزیابی و نتایج

## ۱-۴ مقدمه

امروزه سامانه‌های نور ساختاریافته (اسکنرهای سه‌بعدی) به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی از اشیاء به خصوص اشیاء بدون بافت مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که مطرح شد مهم‌ترین چالش در مورد این اشیاء، عدم امکان اجرای موفقیت‌آمیز تکنیک‌های تناظریابی بوده که با بکارگیری یک سامانه نورساختاریافته مرتفع گردیده است. خروجی نهایی این سامانه‌ها مجموعه‌ای از نقاط هستند که به‌عنوان ابر نقاط شناخته می‌شوند. در این فصل عملکرد سامانه‌ی نور ساختاریافته پیشنهادی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در بخش اول نتایج پارامترهای کالیبراسیون دوربین تشریح شده است. و در بخش ارزیابی سامانه نور ساختاریافته، نخست ضرورت بکارگیری چنین سامانه‌هایی به‌عنوان یک راه‌حل در تولید مدل‌های سه‌بعدی از سطوح بدون بافت مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه‌ی ارزیابی‌های انجام‌شده، کفایت و ضرورت بکارگیری قید ارائه‌شده در بخش ۳-۹ مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۴ برآورد پارامترهای کالیبراسیون دوربین

بعد از اندازه‌گیری مختصات تصویری نقاط با استفاده از نرم‌افزار Matlab Ver.R2015a، نقاط در فایل فرمت مخصوص نرم‌افزار Australis Ver.6.06 به‌عنوان فایل‌های icf ثبت خواهند شد. برای هر دوربین حدود ۴۵ تصویر از زوایای مختلف به‌منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون تصاویر دخالت داده شده‌اند. پارامترهای برآورد شده برای هر دوربین را در جدول ۱-۴ مشاهده می‌کنید.

همان‌طور که در جدول ۱-۴ مشاهده می‌نمایید به‌علت همبستگی بین پارامترها، تا پارامتر دوم اعوجاج شعاعی به‌منظور پالایش تصویر برآورد شده است. پارامترهای محاسبه شده بر روی هر نقطه اندازه‌گیری تصویری اعمال خواهد شد تا آن را به موقعیت بدون خطا انتقال دهد؛ که روابط آن در بخش ۲-۶ به‌طور مفصل بررسی شد.

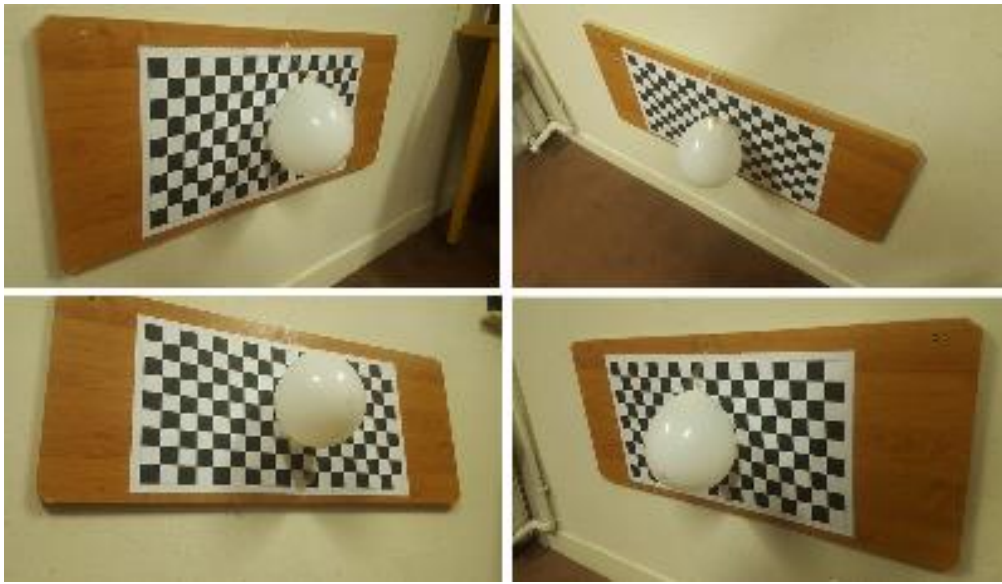
جدول ۴-۱: پارامترهای برآورد شده کالیبراسیون دو دوربین

پارامترهای کالیبراسیون	دوربین چپ	دوربین راست
f	۱/۵۷۱۸	۱/۵۰۰۶
$x_p$	۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۴۸
$y_p$	۰/۰۱۱۵	-۰/۰۰۰۱
$k_1$	-۰/۰۲۹۸۴	-۰/۰۳۰۴۱
$k_2$	۰/۰۷۳۵۸	۰/۰۳۳۱۲
$k_3$	۰	۰
$P_1$	۰	۰
$P_2$	۰	۰
$b_1$	۰	۰
$b_2$	۰	۰

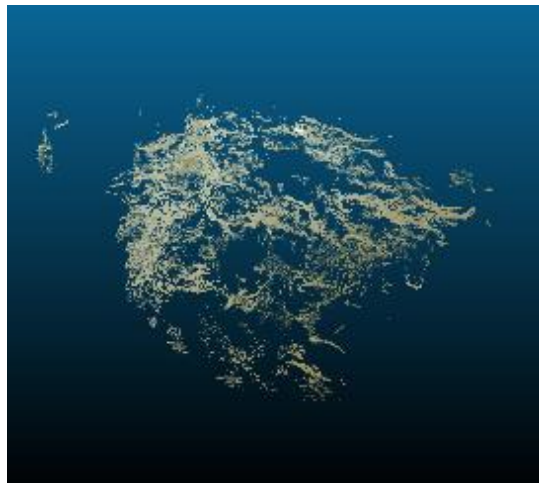
#### ۴-۱ ضرورت بکارگیری سامانه‌های نور ساختاریافته در تولید مدل سه‌بعدی از اشیاء

##### بدون بافت

در گام اول ارزیابی، ضرورت بکارگیری چنین سامانه‌هایی به‌عنوان یک راه‌حل در تولید مدل‌های سه‌بعدی از سطوح بدون بافت مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین سطح یک عارضه‌ی بدون بافت (بادکنک) به‌کمک روش SfM در محیط نرم‌افزار AgiSoft Metashape.Pro.1.5.2 و از طریق ۴۴ تصویر همپوشان مدل‌سازی شده است. نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده و مدل تولیدشده به‌کمک این نرم‌افزار در شکل ۴-۱-الف ارائه شده است.



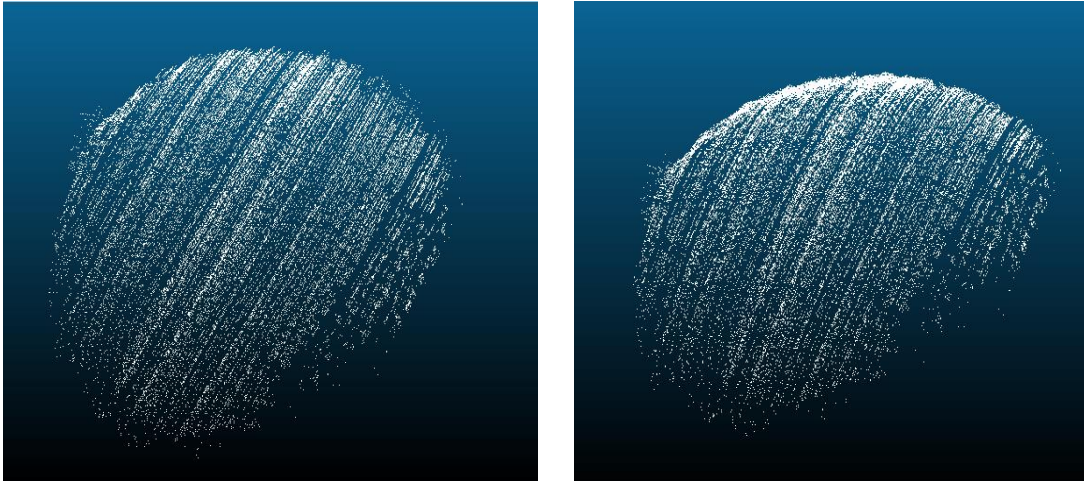
الف



ب

شکل ۱-۴: الف) نمونه‌ای از تصاویر همپوشان اخذ شده از شیء (بادکنک)، ب) ابرنقطه تولیدشده توسط نرم‌افزار Metashape

همان‌طور که در شکل (شکل ۱-۴-ب) مشهود است، عدم موفقیت فرایند تناظریابی در سطوح بدون بافت مستقیماً نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی در چنین نرم‌افزارهایی را مختل می‌سازد؛ که به‌منظور غلبه بر این چالش روش‌های نور ساختاریافته معرفی شد. در همین راستا مدل سه‌بعدی (ابرنقاط) شیء موردنظر توسط سامانه نو ساختاریافته تولید شد که در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۴: ابرنقطه تولیدشده به کمک سامانه‌ی نور ساختاریافته

شکل ۲-۴) ابرنقطه تولیدشده به کمک سامانه‌ی نور ساختاریافته را از سطح بدون بافت نشان می‌دهد. این سطح در مقایسه با مدل سه‌بعدی تولیدشده در محیط نرم‌افزار Metashape از تطابق هندسی بسیار بهتری برخوردار است.

#### ۲-۴ کفایت و ضرورت قید بکارگرفته شده در روند تولید مدل سه‌بعدی

در ادامه‌ی ارزیابی‌های انجام‌شده، کفایت و ضرورت بکارگیری قید ارائه‌شده در بخش ۳-۹ مورد بررسی قرار گرفته است. سطح بادکنک یک سطح صاف، مدل‌پذیر و بدون اغتشاش محسوب می‌شود. بر این اساس و با فرض تبعیت رفتار خطاهای مربوط به تقاطع فضایی از توزیع نرمال، می‌توان<sup>۱</sup> RMSE محاسبه‌شده از باقیمانده‌های برازش یک‌رویه به ابرنقاط بدست آمده در سامانه‌ی نور ساختاریافته را به‌عنوان معیاری از میزان انطباق نتایج با سطوح مدل‌پذیر تلقی نمود. در این راستا، با محاسبه‌ی RMSE بردار باقیمانده‌ی برازش یک چندجمله‌ای دو‌بعدی از درجه‌ی ۳ (رابطه‌ی (۴-۱)) به‌عنوان مدل ریاضی سطح بادکنک، کفایت و میزان انطباق ابرنقاط تولیدی با سطح ایده آل مورد ارزیابی قرار گرفته است. چندجمله‌ای از درجه ۳ به‌صورت تجربی و بر اساس کیفیت برازش این تابع به ابرنقاط سطح بادکنک انتخاب شده است.

$$Z = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} a_{ij} X^i Y^j \quad (1-4)$$

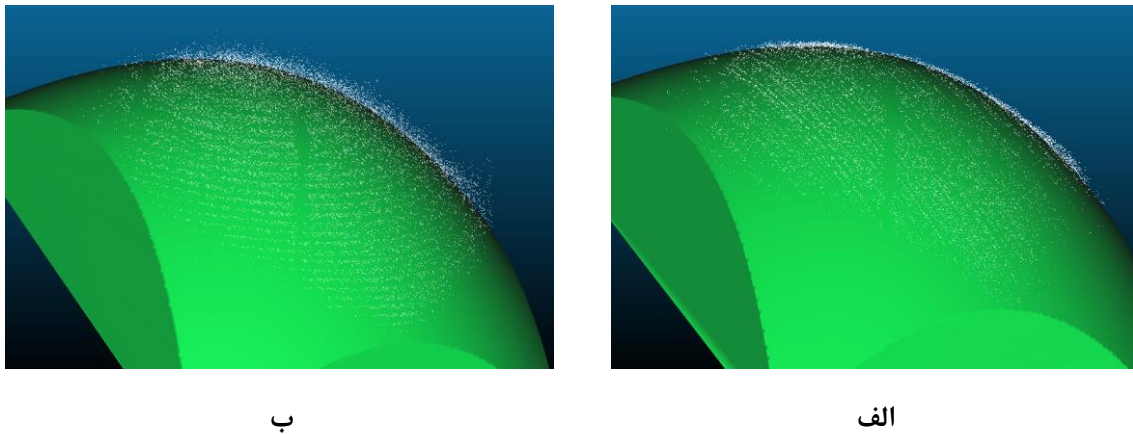
<sup>1</sup> Root mean square error

در رابطه‌ی (۴-۱)، ضرایب چندجمله‌ای بوده که در فرایند تخمین کمترین مربعات برآورد می‌شوند. جدول (۱) گزارشی آماری از شاخص RMSE و دامنه تغییر باقیمانده‌های برازش در دو حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید مطلق پیشنهادی (بخش ۴) را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲: گزارش آماری از دقت برازش سطح در دو حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید

روش	RMSE (mm)	دامنه (میلی‌متر)
عدم بکارگیری قید	۲	۲۶/۱
بکارگیری قید	۰/۸	۱۰/۲

همان‌طور که در نتایج جدول ۴-۲ مشاهده می‌شود، بکارگیری قید مطلق توانسته دقت برازش ابرنقاط را به سطح ایده آل تا ۶۰ درصد بهبود دهد. به عبارت بهتر، دقت برازش سطح قبل از بکارگیری قید دو میلی‌متر بوده که این دقت هنگام استفاده از قید مذکور به کمتر از یک میلی‌متر ارتقاء یافته است. شکل ۴-۳ (الف و ب) نمایی از ابرنقاط بدست آمده در دو حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید را به همراه سطوح برازش یافته نشان می‌دهد. نتایج بصری نیز کاهش سطح نویز در ابرنقاط تولیدشده را نسبت به سطح برازش یافته نشان می‌دهند. در شکل ۴-۳ ابرنقاط با رنگ سفید و سطح برازش یافته با رنگ سبز نمایش یافته‌اند.

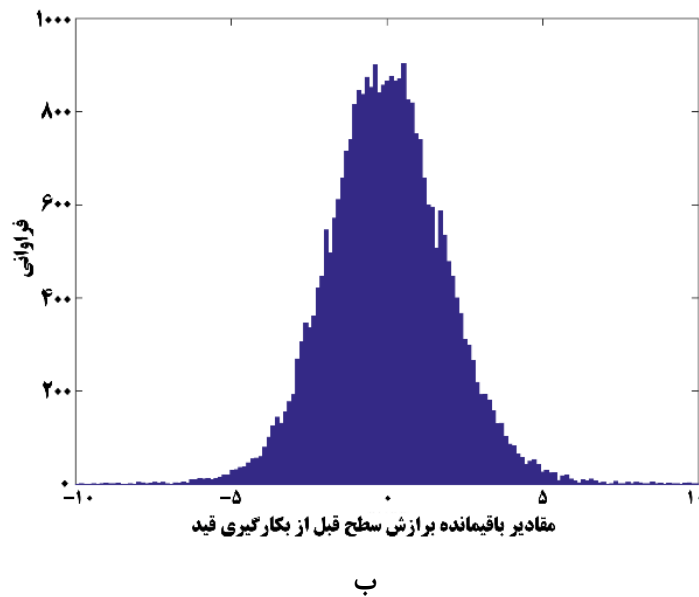
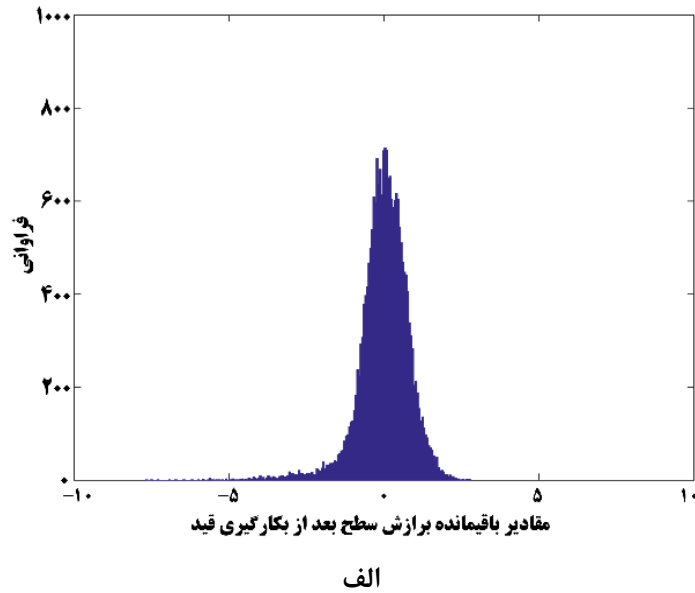


شکل ۴-۳: ابرنقاط بدست آمده به همراه سطح برازش یافته در دو حالت (الف) بکارگیری قید، (ب) عدم بکارگیری قید

شکل‌های (شکل ۴-۴ الف و ب) نیز به ترتیب هیستوگرام بردارهای خطای برازش سطح در حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های (۴-۴ الف و ب) مشاهده می‌شود، هیستوگرام بردارهای خطا در زمان بکارگیری قید علاوه بر تبعیت از رفتار توابع گوسی از تراکم



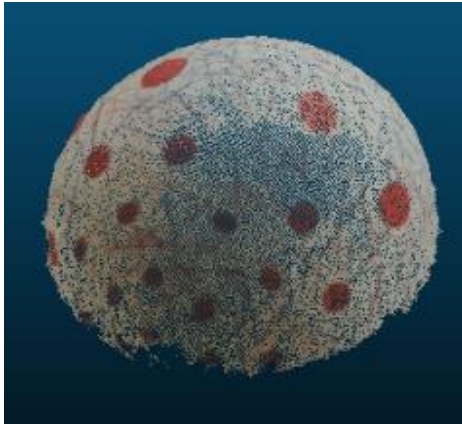
بیشتری نسبت به مقدار صفر برخوردار بوده و در مقایسه با زمان عدم بکارگیری قید، از فشردگی بیشتری برخوردار است.



شکل ۴-۴: الف) هیستوگرام بردارهای خطای برآزش سطح در حالت بکارگیری قید، ب) هیستوگرام بردارهای خطای برآزش سطح در حالت عدم بکارگیری قید

از آنجاییکه در صورت وجود تنوع بافتی در تصاویر همپوشان، بکارگیری روش‌های مبتنی بر SfM توان تولید محتوای سه‌بعدی دقیقی را برخوردارند؛ در آخرین ارزیابی، با افزودن بافت و رنگ به سطح بادکنک، ۴۹ تصویر همپوشان از آن اخذ شد. در ادامه، به کمک نرم‌افزار Metashape مدل سه‌بعدی بادکنک در قالب

یک ابرنقطه تولید گردید. بدین ترتیب انتظار می‌رود به واسطه‌ی افزودن شدن بافت به بادکنک، تناظریابی‌های رادیومتریکی با موفقیت روبرو بوده و ابرنقطه‌ی مطلوبی از سطح بادکنک تولید شود. شکل (شکل ۴-۵-الف) تصویر بافت افزوده شده به سطح بادکنک و شکل (شکل ۴-۵-ب) مدل سه‌بعدی تولید شده از بادکنک در محیط نرم‌افزار Metashape را نشان می‌دهد.



ب



الف

شکل ۴-۵: الف) نمونه تصویر از سطح بادکنک بعد از افزودن بافت، ب) مدل سه‌بعدی تولید شده از بادکنک در محیط نرم‌افزار Metashape

به‌طور موازی، ابرنقطه دیگری از سطح بادکنک توأم با بافت به کمک سامانه‌ی پیشنهادی نور ساختار یافته تولید گردید. بعد از برش ابرنقاط بدست آمده از نرم‌افزار Metashape متناسب با محدوده‌ی تحت پوشش ابرنقاط سامانه‌ی نور ساختار یافته، مجدداً رویه‌ی ارائه شده در رابطه‌ی (۴-۱) به‌طور مجزا به هر ابرنقطه برازش یافت. جدول ۴-۳ گزارشی آماری از دقت برازش سطح به ابرنقاط Metashape و سامانه‌ی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

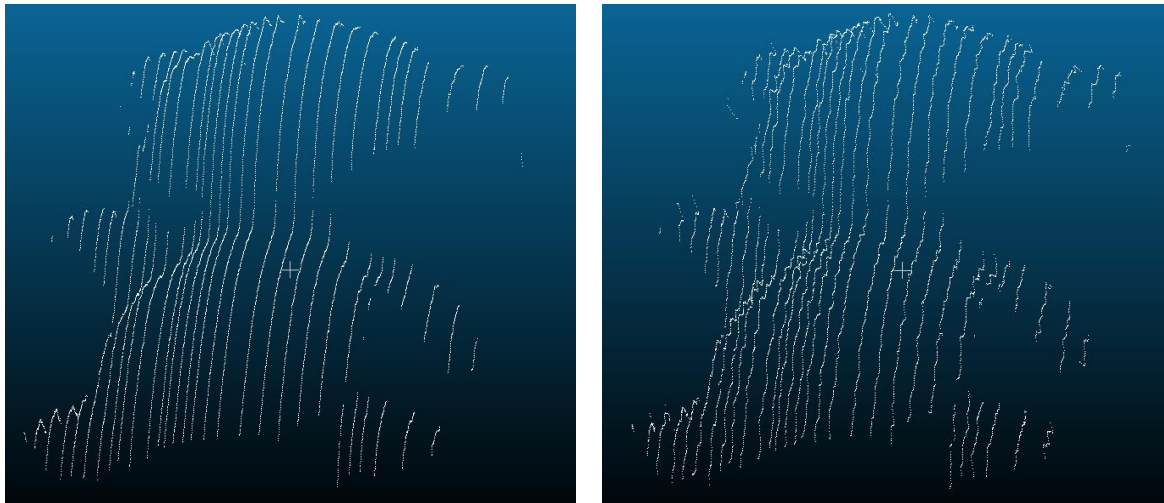
جدول ۴-۳: گزارش آماری از دقت برازش سطح به ابرنقاط حاصل از نرم‌افزار Metashape و سامانه نورساختار یافته

روش	RMSE (mm)	دامنه (میلی‌متر)
ابرنقطه حاصل از Metashape	۱/۱	۷/۴
ابرنقطه حاصل از سامانه نور ساختار یافته	۰/۸	۱۰/۲

مطابق با نتایج گزارش شده در جدول ۴-۳، دقت برازش یافتن سطح در دو ابرنقطه به یکدیگر نزدیک

بوده و این مسئله گواهی بر کفایت روش پیشنهاد شده در این پایان نامه خواهد بود. به عبارت بهتر، سامانه‌ی نورساختاریافته پیشنهادی توانسته با بکارگیری قید مطلق مربوط به قرارگرفتن نقاط هر مقطع سه‌بعدی در مکان هندسی یک صفحه، دقت‌های قابل رقابتی را در مقایسه با زمانی که از تصاویر متعدد برای بازسازی سه‌بعدی استفاده شود، تأمین سازد.

در ادامه با تصویربرداری از یک مجسمه روند تولید مدل سه‌بعدی در این سامانه برای اجسام پیچیده‌تر بصورت بصری مورد بررسی قرار گرفت.



ب

الف

شکل ۴-۶: مدل سه‌بعدی تولید شده از سامانه پیشنهادی، الف) قبل از بکارگیری قید، ب) بعد از بکارگیری قید

همانطور که در شکل مشهود است مدل سه‌بعدی بعد از بکارگیری قید با کاهش نویز قابل توجهی همراه بوده است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

سامانه‌های نور ساختاریافته اگرچه گستره بسیار وسیعی دارد در چند دهه‌ی اخیر سامانه‌های مختلفی معرفی و توسعه داده شده‌اند؛ اما روز به روز نیاز به سیستمی با ساختمان ساده و دقیق‌تر احساس می‌شود. در این پژوهش ضمن بررسی سامانه‌های دیگر، سامانه‌ای با ساختمان ساده و کم هزینه طراحی و پیاده‌سازی نموده است. سیستم پیشنهادی در این پژوهش بسیاری از ضعف‌ها و محدودیت‌های موجود در سیستم‌های گذشته را کاهش داده است. از سوی دیگر برخلاف سیستم‌های موجود در این سیستم نیازی به ثابت بودن لیزر و مشخص بودن معادله صفحه لیزر نمی‌باشد. این سیستم لیزر آزاد را جایگزین لیزرهای ثابت نموده است. ساختمان ساده و کم‌هزینه بودن آن در کنار استحکام هندسی، یک مزیت محسوب می‌شود.

در این پژوهش یک سامانه‌ی نور ساختاریافته ساده متشکل از دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای آزاد طراحی و پیشنهاد شد. با توجه به اینکه یکی از چالش‌های تولید مدل سه‌بعدی در زمینه مهندسی، عدم موفقیت تکنیک‌های تناظریابی در جسم‌های بدون بافت است. این سامانه قادر است از سطوح بدون بافت، ابر نقاط سه‌بعدی به صورت مقاطع متعدد سه‌بعدی تولید نماید. در ساختار طراحی این سامانه بر خلاف سامانه‌های موجود پارامترهای هندسی صفحه‌ی لیزر از قبل مشخص نبوده و کاربر قادر است آزادانه صفحه‌ی لیزر را روی سطح عارضه‌ی سه‌بعدی به منظور تولید مقاطع سه‌بعدی جاروب نماید. قید بکارگرفته شده در روند تقاطع فضایی همزمان تمامی موقعیت‌های واقع در هر مقطع سه‌بعدی از عارضه، توانست که دقت برازش سطح به ابر نقاط سه‌بعدی را برای یک سطح بدون اغتشاش و مدل‌پذیر تا ۶۰ درصد بهبود دهد.

## ۵-۲ پیشنهادها

- ۱- تولید ابرنقطه با ایجاد تنوع در زوایای تقاطع صفحه‌ی لیزر و عارضه به منظور افزایش قیود هندسی حاکم بر روند بازسازی سه‌بعدی
- ۲- بکارگیری قید ارائه شده در این پایان‌نامه در مورد سامانه‌های نور ساختاریافته‌ای که نیازمند کالیبراسیون پارامترهای هندسی لیزر هستند.
- ۳- استفاده از چند لیزر خطی به منظور کاهش مناطق پنهان

## منابع و مراجع

- [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*, vol. 26, no. 135, pp. 293-306, 2011.
- [2] C. B, J. Y, Zhang;, and R. J, Zhang, "Improving the accuracy of stripe center extraction in a structured light measurement system," *Natural Foundation Research Project of Shaanxi Province*, 2019.
- [3] S. S. Gorthi and P. Rastogi, "Fringe projection techniques: whither we are?," *Optics and lasers in engineering*, vol. 48, no. ARTICLE, pp. 133-140, 2010.
- [4] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827-849, 2004.
- [5] S. Van der Jeught and J. J. Dirckx, "Real-time structured light profilometry: a review," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 87, pp. 18-31, 2016.
- [6] S. Hadiyoso, G. T. Musaharpa, and I. Wijayanto, "Prototype implementation of dual laser 3D scanner system using cloud to cloud merging method," in *2017 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 2017, pp. 36-40: IEEE.
- [7] T. T. Nguyen, Q. M. Nguyen, X. G. Liu, and Y. Y. Ziggah, "3D object model reconstruction based on laser scanning point cloud data," in *Int. Symp. Geoinformatics Spat. Infrastruct. Dev. Earth Allied Sci*, 2012.
- [8] S. Winkelbach, S. Molkenstruck, and F. M. Wahl, "Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach," in *Joint Pattern Recognition Symposium*, 2006, pp. 718-728: Springer.
- [9] علی ابدال، مسعود ورشوساز، محمد سعادت سرشت "مدلسازی سه بعدی از طریق تاباندن خطوط لیزر متقاطع"، دهمین همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت، تهران، ۱۳۸۹.
- [10] اکبر جعفری، فرهاد صمدزادگان، محمد سعادت سرشت، حسن امامی "مدلسازی سه بعدی اشیاء با بافت یکسان و بدون تارگت گذاری با استفاده از روش نور ساخت یافته : طراحی، ساخت و ارزیابی"، نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه برداری اطلاعات مکانی، دوره هشتم شماره دو، ۱۳۹۶.
- [11] J. van der Lucht, M. Bleier, F. Leutert, K. Schilling, and A. Nüchter, "STRUCTURED-LIGHT BASED 3D LASER SCANNING OF SEMI-SUBMERGED STRUCTURES," *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [12] Z. Qi, Z. Wang, J. Huang, and Q. Xue, "Improving the quality of stripes in structured-light three-dimensional profile measurement," 2017.

- [13] S. Zhang, "High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 106, pp. 119-131, 2018.
- [14] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno, "A low cost 3D scanner based on structured light," in *Computer Graphics Forum*, 2001, vol. 20, no. 3, pp. 299-308: Wiley Online Library.
- [15] H. Setan and M. S. Ibrahim, "Close range measurement and 3D modeling," 2004.
- [16] F. Tsalakanidou, S. Malassiotis, and M. G. Strintzis, "Face localization and authentication using color and depth images," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, no. 2, pp. 152-168, 2005.
- [17] F. Remondino and S. El-Hakim, "Image-based 3D modelling: a review," *The photogrammetric record*, vol. 21, no. 115, pp. 269-291, 2006.
- [18] S. Walker, "Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 81, no. 4, pp. 273-274, 2015.
- [19] T. Luhmann, "Close range photogrammetry for industrial applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, no. 6, pp. 558-569, 2010.
- [20] J. A. Beraldin, "Integration of laser scanning and close-range photogrammetry—The last decade and beyond," in *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, 2004, vol. 35, no. Part B, pp. 12-23.
- [21] F. Remondino, A. Guarnieri, and A. Vettore, "3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning?," in *Videometrics VIII*, 2005, vol. 5665, p. 56650M: International Society for Optics and Photonics.
- [22] L. Guisser, R. Payrissat, and S. Castan, "PGSD: an accurate 3D vision system using a projected grid for surface descriptions," *Image and vision computing*, vol. 18, no. 6-7, pp. 463-491, 2000.
- [23] Z. Li, Y. Shi, C. Wang, and Y. Wang, "Accurate calibration method for a structured light system," *Optical Engineering*, vol. 47, no. 5, p. 053604, 2008.
- [24] R. A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, and J. Nissano, "Structured light using pseudorandom codes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 3, pp. 322-327, 1998.
- [25] J. Gühring, "Dense 3D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components," in *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, 2000, vol. 4309, pp. 220-231: International Society for Optics and Photonics.
- [26] C. Je, K. H. Lee, and S. W. Lee, "Multi-projector color structured-light vision," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 28, no. 9, pp. 1046-1058, 2013.
- [27] W. Yin *et al.*, "High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system," *Optics express*, vol. 27, no. 3, pp. 2411-2431, 2019.
- [28] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," *Advances in Optics*

- and Photonics*, vol. 3, no. 2, pp. 128-160, 2011.
- [29] F. Blais, "Review of 20 years of range sensor development," *Journal of electronic imaging*, vol. 13, no. 1, pp. 231-243, 2004.
- [30] E. L. Hall, J. B. Tio, C. A. McPherson, and F. A. Sadjadi, "Measuring curved surfaces for robot vision," *Computer*, no. 12, pp. 42-54, 1982.
- [31] O. Faugeras and O. A. FAUGERAS, *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*. MIT press, 1993.
- [32] R. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [33] J. Salvi, *An approach to coded structured light to obtain three dimensional information*. Universitat de Girona, 1998.
- [34] F. Zhou, G. Zhang, and J. Jiang, "Constructing feature points for calibrating a structured light vision sensor by viewing a plane from unknown orientations," *Optics and lasers in Engineering*, vol. 43, no. 10, pp. 1056-1070, 2005.
- [35] J. Forest Collado, *New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners*. Universitat de Girona, 2004.
- [36] علی ابذل "طراحی یک سیستم فتوگرامتری و نورساختاریافته جهت مدلسازی عوارض در فضاهای داخلی و آزمایشگاهی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۹.
- [37] N. Van Gestel, S. Cuypers, P. Bleyes, and J.-P. Kruth, "A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, no. 3-4, pp. 336-342, 2009.
- [38] A. M. McIvor, "Calibration of a laser stripe profiler," in *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No. PR00062)*, 1999, pp. 92-98: IEEE.
- [39] J. Clark, A. Wallace, and G. L. Pronzato, "Measuring range using a triangulation sensor with variable geometry," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 1, pp. 60-68, 1998.
- [40] C. W. Chu, S. Hwang, and S. K. Jung, "Calibration-free approach to 3D reconstruction using light stripe projections on a cube frame," in *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001, pp. 13-19: IEEE.
- [41] M. Takatsuka, G. A. West, S. Venkatesh, and T. M. Caelli, "Low-cost interactive active monocular range finder," in *Proceedings. 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149)*, 1999, vol. 1, pp. 444-449: IEEE.
- [42] J. Park, S.-C. Byun, and B.-U. Lee, "Lens distortion correction using ideal image coordinates," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 987-991, 2009.
- [43] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.



- [44] C. S. Fraser, "Photogrammetric camera component calibration: A review of analytical techniques," in *Calibration and Orientation of cameras in Computer Vision*: Springer, 2001, pp. 95-121.
- [45] F. Clive S, "Photogrammetric Camera Component Calibration: A Review of Analytical Techniques," *Springer Series in Information Sciences*, 2001.
- [46] <http://www.photometrix.com.au/downloads/australis/Image%20Correction%20Model.pdf>.
- [47] S. Jecić and N. Drvar, "The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements," in *4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, 2003.
- [48] D. Naidu and R. B. Fisher, *A comparison of algorithms for sub-pixel peak detection*. University of Edinburgh, Department of Artificial Intelligence, 1991.
- [49] F. Blais and M. Rioux, "Real-time numerical peak detector," *Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp. 145-155, 1986.
- [50] W. Cho, T. Schenk, and M. Madani, "Resampling digital imagery to epipolar geometry," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 29, pp. 404-404, 1993.
- [51] M. F. Morgan, *Epipolar resampling of linear array scanner scenes*. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2004.
- [52] TRAN,; T. Anh,; and Vietnam, "Epipolar Resampling of Stereo Image Base on Airbase in the Digital," *Land Governance and the Environment – Building the Capacity*, 2009.
- [53] R. Olivier and C. Hanqiang, "Nearest neighbor value interpolation," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl*, vol. 3, no. 4, pp. 25-30, 2012.
- [54] K. S. Rani and W. J. Hans, "FPGA implementation of bilinear interpolation algorithm for CFA demosaicing," in *2013 International Conference on Communication and Signal Processing*, 2013, pp. 857-863: IEEE.
- [55] K. A. Kalpoma, K. Kawano, and J.-i. Kudoh, "IKONOS image fusion process using steepest descent method with bi-linear interpolation," *International journal of remote sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 505-518, 2013.
- [56] I. Ashraf, S. Hur, and Y. Park, "An investigation of interpolation techniques to generate 2D intensity image from LIDAR data," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 8250-8260, 2017.
- [57] B. Aiazzi, S. Baronti, M. Selva, and L. Alparone, "Bi-cubic interpolation for shift-free pan-sharpening," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 86, pp. 65-76, 2013.
- [58] U. M. f. Australis. (2004). [http://photometrix.com.au/downloads/australis/Australis7\\_Users\\_Guide.pdf](http://photometrix.com.au/downloads/australis/Australis7_Users_Guide.pdf).
- [59] L. Zagorchev and A. Goshtasby, "A paintbrush laser range scanner," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 101, no. 2, pp. 65-86, 2006.
- [60] L. Qi, Y. Zhang, X. Zhang, S. Wang, and F. Xie, "Statistical behavior analysis

- and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm," *Optics express*, vol. 21, no. 11, pp. 13442-13449, 2013.
- [61] F. Bouchara and S. Ramdani, "Statistical behavior of edge detectors," *Signal, Image and Video Processing*, vol. 1, no. 3, pp. 273-285, 2007.
- [62] C. Steger, "Analytical and empirical performance evaluation of subpixel line and edge detection," ed: IEEE Computer Society Press Los Alamitos, CA, 1998, pp. 188-210.
- [63] Q. Xue, Z. Wang, J. Huang, and J. Gao, "Improving the measuring accuracy of structured light measurement system," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 11, p. 112204, 2014.
- [64] A. A. Al-Kharaz and A. K. Chong, "High accuracy smartphone video calibration for human foot surface mapping," in *2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, 2018, pp. 542-545: IEEE.
- [65] E. E. Elnima, "A solution for exterior and relative orientation in photogrammetry, a genetic evolution approach," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 27, no. 1, pp. 108-113, 2015.
- [66] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter, 2013.
- [67] B. Kathariya, L. Li, Z. Li, J. Alvarez, and J. Chen, "Scalable point cloud geometry coding with binary tree embedded quadtree," in *2018 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2018, pp. 1-6: IEEE.
- [68] A. Nurunnabi, D. Belton, and G. West, "Diagnostic-robust statistical analysis for local surface fitting in 3D point cloud data," *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volumes I-3*, pp. 269-274, 2012.
- [69] C. Wu, S. Agarwal, B. Curless, and S. M. Seitz, "Multicore bundle adjustment," in *CVPR 2011*, 2011, pp. 3057-3064: IEEE.
- [70] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgibbon, "Bundle adjustment—a modern synthesis," in *International workshop on vision algorithms*, 1999, pp. 298-372: Springer.

## 7 Abstract

In this thesis, a simple structured light system is designed to produce the three-dimensional points cloud from the un-textured surfaces. The system consists of two cameras and a planer laser, in which the 3D contents are produced through the stereo images taken from the light reflected by the intersection of a planer laser and the 3D surface of an object. There was no control over how the laser swept through the surface and the instantaneous parameters of the laser plane were not known in advance. Considering the knowledge of the internal camera calibration parameters and the relative orientation of the stereo-pairs, the video captured by the cameras are normalized during the epipolar re-sampling process. Next, in each pair of simultaneous frames, the matched points located at the 3D section of the laser's plane are then identified. During the simultaneous space intersection of the matched points, a constraint is applied to enforce the singularity of the covariance matrix of 3D points lie in the intersection of the laser's plane and the 3D surface of an object to ensure their co-planarity. By applying this statistical constraint, the precision of the surface 3D reconstruction was improved up to 60% in this structured light system

**Key Words:** 3D reconstruction, Structured light systems, Planer laser, Un-textured surfaces, Covariance matrix



**Ministry of Science, Research and Technology**

**Tafresh University**

**Geodesy and geomatic Engineering Department**

**MSc Thesis**

**Title**

**3D model generation of the un-textured object  
surface using a structured light system including a  
linear laser and stereo images**

**Supervisor**

**Dr Roohollah Karimi**

**Dr Alireza Safdarinezhad**

**By**

**Mohsen sheikhi**

**Winter 2020**