نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال ششم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۷

Vol.6, No.1, Spring 2018

۱۱۷-۱۲۹

این مقاله در اولین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به‌عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

کاربرد فتوگرامتری بردکوتاه در سنجش دقیق تغییرشکل بدنه اتومبیل دراثر برخورد با مانع

فرید اسماعیلی [۱*]، حمید عبادی [۲]

۱- دانشجوی دکتری فتوگرامتری دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

۲- استاد دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۳

چکیده

فتوگرامتری بردکوتاه در دهه‌های اخیر در حوزه‌های مختلفی از علوم همچون صنعت، میراث فرهنگی، پزشکی و عمران، در کاربردهای موفقی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به‌عنوان ابزاری جهت سنجش تغییر شکل در قطعات صنعتی، مزیت‌های بسیاری همچون قابلیت اندازه‌گیری بلادرنگ، سهولت در انجام مشاهدات، قابلیت دستیابی به دقت‌های بالا و ایجاد آرشیوی از مشاهدات جهت پردازشهای آتی را دارا می باشد. در این مقاله از فتوگرامتری بردکوتاه برای اندازه‌گیری بدنه یک اتومبیل قبل و بعد از برخود به مانع (تست ضربه) جهت تعیین میزان تغییر شکل بر روی آن، استفاده شده است. برای این کار یک سیستم اندازه‌گیری در قالب اجزاء اصلی طراحی شبکه و ساختار فنی سیستم، برداشت مشاهدات، سرشکنی و محاسبات، طراحی گردیده است. جهت امکان دستیابی به صحت و دقت‌های بالا در جابجایی سنجی، در بخش سرشکنی و محاسبات از متد CPDA که توسط نگارنده معرفی گردیده، در این حوزه استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده قابلیت این روش در دستیابی به دقت کمتر از ۱ میلیمتر در اندازه‌گیری تغییر شکل بدنه اتومبیل می‌باشد. همچنین این روش از نظرهزینه، سرعت و سهولت اندازه‌گیری نسبت به سایر روش‌ها در این حوزه برتری دارد.

کلیدواژه‌ها: فتوگرامتری بردکوتاه، جابجایی سنجی، سنجش تغییر شکل، کالیبراسیون، طراحی شبکه.

*نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی. کد پستی: ۱۹۹۶۷۱۵۴۳۳

تلفن: ۸۸۷۷۰۲۱۸ - ۰۲۱

Email: faridesm@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

۱- مقدمه

استفاده از فتوگرامتری بردکوتاه در کاربرد های صنعتی جهت کنترل کیفیت، مهندسی معکوس، و اندازه‌گیری‌های دقیق متداول می‌باشد [۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶]. با توجه به قابلیت فتوگرامتری بردکوتاه در دستیابی به دقت‌های بالا، اندازه‌گیری‌های دقیق صنعتی همواره یکی از کاربردهای اصلی این روش بوده است [۷ و ۸]. تعیین دقیق میزان تغییر شکل اجسام، موضوعی حساس و پیچیده در زمینه کنترل کیفیت و رفتار جسم در شرایط مختلف می‌باشد. بسیاری از قطعات صنعتی و مصنوعات ساخت بشر با توجه به کاربردهایشان باید بتوانند ضربه و فشارهای مختلف را تحمل کنند. عملکرد این قطعات در مواجه با چنین استرس‌هایی به‌طور مستقیم وابسته به کیفیت طراحی و ساخت آنها می‌باشد. اینکه یک قطعه صنعتی تا چه اندازه بتواند در محل کاربرد خود عملکرد صحیحی داشته باشد مستلزم این است که آزمایش‌های بسیاری را جهت تعیین کیفیت گذرانده باشد.

اتومبیل‌ها یکی از عمومی‌ترین مصنوعات ساخت بشر می‌باشند که با توجه به حساسیت کاربرد آنها، نیازمند گذراندن تست های مختلف کنترل کیفیت هستند. یکی از این تست ها، تست ضربه[1] می‌باشد. در این آزمایش اتومبیل در شرایط کنترل شده به مانع طراحی شده برخورد می کند و عملکرد اجزای مختلف آن در اثر این برخورد ارزیابی می‌گردد. اینکه اتومبیل تا چه حد بتواند در اثر نیروی وارده، مقاومت برشی و خمشی از خود نشان دهد نشانگر کیفیت قطعات ساخته شده اتومبیل می باشد. همچنین بررسی متلاشی شدن قطعات اتصال یافته در اثر وارد شدن ضربه و قابلیت تجهیزات تعبیه شده برای حفظ جان نفرات، معیاری برای تعیین کیفیت ساخت اتومبیل است.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری سازه‌های صنعتی وجود دارند. استفاده از بازو های مکانیکی و CMM[2] ها [۸]، لیزر اسکنر ها [۵] و فتوگرامتری بردکوتاه [۹] متداولترین این روش ها می باشند. اما ماهیت تست ضربه و اینکه عملکرد اجزاء مختلف اتومبیل در برخورد با مانع در کسری از ثانیه باید اندازه‌گیری شوند، منجر به معرفی و به‌کارگیری تکنیک‌های متناسب در این حوزه شده است. پاولُس و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از تکنیک موجکِ مورلت[3] و با اندازه‌گیری مداوم مرکز ثقل اتومبیل حین برخورد با کمک پردازش‌های فرکانس و زمان، مدل ریاضی از تصادف اتومبیل را تولید نموده‌اند [۱۰]. مورالس و همکاران در سال ۲۰۱۵ توانسته اند با کمک یک تکنیک جدید مبتنی بر انطباق ابر نقاط، میزان انرژی تصادف اتومبیل را با تکنیک فتوگرامتری برد کوتاه اندازه گیری نمایند و نقشه‌های متریک جابجایی برای اتومبیل را تولید کنند[۱۱]. به‌صورت تجاری متداولترین روش جهت انجام تست ضربه، استفاده از تکنیک فتوگرامتری (یا به اصطلاح عامیانه خودروسازان روش اپتیک) می‌باشد. به‌طور مثال نمایی از انجام این تست بر روی یکی از محصولات شرکت فورد در سال ۲۰۱۵ (شکل(۱ - الف))، یکی از محصولات شرکت تویوتا در سال ۲۰۱۶ (شکل (۱ - ب))، یکی از محصولات شرکت هوندا در سال ۲۰۱۶ (شکل (۱ - ج)) و همچنین بررسی رفتار سرنشینان حین ضربه (شکل (۱ - د)) در شکل (۱) مشاهده می‌گردند که در تمامی این تست‌ها از روش فتوگرامتری استفاده شده است[۷]. به‌طور مثال در تست ضربه برای اتومبیل هوندا (شکل (۱ – ج)) از ۱۷ دوربین همزمان‌سازی شده استفاده شده است

[1] Crash Test

[2] Coordinate Measuring Machine

[3] Morlet Wavelet

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

(شکل (۱ - ه)) و مختصات تارگتها حین ضربه در هر یکهزارم ثانیه در نقاط مختلف اتومبیل تعیین شده‌اند.

الف ب ج

د ه

شکل ۱ : انجام تست ضربه در اتومبیل‌های مختلف سه شرکت مطرح در این حوزه [۷].

تکنیک اندازه‌گیری به روش فتوگرامتری، روشی غیر مخرب و بدون تماس مستقیم با عارضه است که می‌واند اندازه‌گیری‌های سه بعدی با هزینه و دشواری کم را فراهم آورد[۱۲]. جهت اندازه‌گیری‌های دقیق در تصاویر، تارگت های فتوگرامتری به آسانی می توانند در موقعیت‌های جدا از هم روی یک عارضه و روی دیگر موقعیت‌های مهم قرار داده شده و تصاویر به سرعت و بدون ایجاد اختلال در سایر فعالیت‌ها اخذ شوند. فتوگرامتری بردکوتاه به‌عنوان ابزاری جهت کنترل کیفیت قطعات صنعتی از ویژگی های منحصر به فردی برخوردار است. زمانی که فشار های وارد بر جسم به‌صورت آنی و لحظه ای اتفاق می‌افتد، فتوگرامتری بردکوتاه به عنوان تنها ابزاری است که می‌تواند رفتار جسم را در کسری از ثانیه به‌صورت بلادرنگ مدل‌سازی نماید. همچنین پتانسیل این روش در دستیابی به دقت‌های بالا و سهولت در اندازه‌گیری، فتوگرامتری بردکوتاه را به ابزاری مؤثر در این حوزه تبدیل کرده است.

در این مقاله از فتوگرامتری بردکوتاه جهت اندازه‌گیری بدنه یک اتومبیل قبل و بعد از برخود به مانع برای تعیین میزان تغییر شکل بر روی آن، استفاده شده است. براساس بررسی‌های انجام شده بر روی پژوهش‌ها و روش‌های متداول جابجایی سنجی در تست ضربه، جابجایی‌ها در قالب تعیین مختصات به روش فتوگرامتری با استفاده از مشاهدات دوربین‌های همزمان‌سازی شده با سرعت فریم بالا (۱/۱۰۰۰ ثانیه) در هر اپوک، تعیین می‌گردند[۱۳]. در این مقاله جهت امکان دستیابی به صحت و دقت‌های بالا در جابجایی سنجی، از متد جابجایی سنجی مبتنی بر سرشکنی ترکیبی.فتوگرامتری مبنا یا CPDA[1] که یک روش سرشکنی ترکیبی بین اپوکها می باشد[۱۴]، در این حوزه استفاده شده است. در این روش تأثیر خطاهای سیستماتیک دو اپوک بر روی نتایج کاهش یافته و خطای انطباق مختصات دو اپوک نیز تا حد زیادی بر اساس ماهیت روش حذف می‌گردد. در ادامه ابتدا ساختار سیستم فتوگرامتری بردکوتاهِ پیاده‌سازی شده

[1] Combined Photogrammetry Displacement Adjustment

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

معرفی می‌گردد. سپس پیاده سازی‌ها بر روی اتومبیل قبل و بعد از ضربه توضیح داده شده و نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- معرفی سیستم فتوگرامتری بردکوتاه مورد استفاده

کشف تغییرشکل[1] به معنی اندازه‌گیری دقیق تغییرات در *شکل*، *مقیاس*، *جهت* و *جابجایی* در یک قطعه صنعتی می‌باشد. برای اندازه‌گیری میزان تخریب یک اتومبیل در اثر وارد شدن ضربه به آن با روش فتوگرامتری بردکوتاه، می توان یک سیستم اندازه‌گیری را مطابق نمودار زیر طراحی کرد.

مطابق شکل (۲) در مرحله اول ابتدا باید شرایط خاص اتومبیلِ مورد اندازه‌گیری بررسی و پارامترهای خاص مربوط به آن تعیین گردند. منظور از این پارامترها شرایط غیر قابل تغییری از پروژه است که بر آن اساس باید طراحی‌های قرار گرفته در مرحله ساختار فنی سیستم (شکل(۲)) تعیین تکلیف گردند. سپس ساختار فنی سیستم طراحی و پیاده‌سازی میگردد؛ انجام مشاهدات در هر اپوک انجام می‌گیرند و مشاهدات هر دو اپوک با استفاده از متد CPDA به‌صورت یکجا سرشکن می گردند. برای نقاطی که در اثر ضربه وارد شده دچار تغییر شکل و جابجایی گردیده‌اند، ۲ سری مختصات قبل و بعد از ضربه محاسبه شده و با مقایسه آنها مقدار جابجایی تعیین می‌گردد. در طراحی ساختار مجموعه فوق، از اصول طراحی شبکه‌های فتوگرامتری استفاده شده است که در ادامه جزئیات طراحی اجزاء این سیستم توضیح داده می‌شود.

۲-۱- طراحی ساختار و ابعاد تارگت ها

تارگت های فتوگرامتری در حقیقت نقاط نشانه‌ای هستند که بر روی عارضه نصب می‌شوند. مرکز این تارگت‌ها به‌عنوان نقطه‌ای منحصر به فرد در تصاویر همگرای اخذ شده از عارضه، در قالب مشاهدات عکسی استخراج می‌گردند. جهت ایجاد تمایز بیشتر مرکز تارگت با زمینه آن، از تارگت های بازتابنده به همراه تصویربرداری با نور فلاش در پروژه‌های فتوگرامتری بردکوتاه استفاده می‌گردد. هر یک از تارگت ها در یک سیستم فتوگرامتری جهت اندازه‌گیری تغییر شکل، عملاً نقش یک سنسور ابزار دقیق را ایفا می‌کنند. ابعاد این تارگت‌ها بر اساس رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

رابطه (۱)

$$\text{کمترین قطر تارگت} = \frac{\text{ابعاد سنسور} \times \text{بیشترین فاصله} \times \text{پیکسل } \mathbf{8}}{\text{فاصله کانونی} \times \text{ابعاد تصویر}}$$

در رابطه فوق پارامترهای بیشترین فاصله، دورترین فاصله تارگت تا دوربین؛ ابعاد سنسور، طول افقی صفحه سنسور تصویربرداری (عرض فیلم یا قطعه CCD) ؛ ابعاد تصویر، تعداد پیکسل‌ها در عرض افقی عکس اسکن شده یا قطعه CCD؛ و فاصله کانونی، فاصله کانونی مجموعه عدسی‌ها در لحظه تصویربرداری می‌باشند. بر این اساس مطابق رابطه فوق کمترین قطر تارگت در این پروژه برابر مقدار زیر خواهد بود.

رابطه (۲)

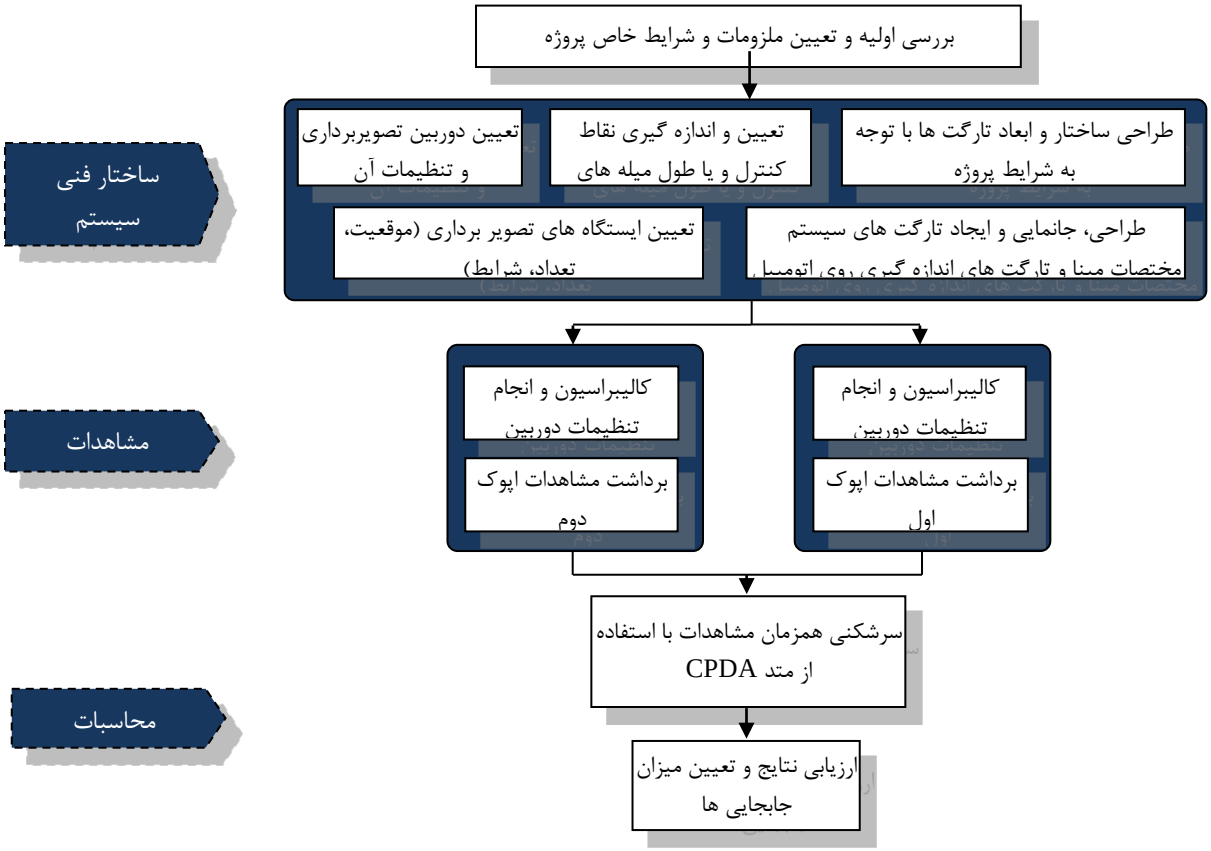
$$\text{کمترین قطر تارگت} = \frac{8 \times 4000 \times 6.40}{4608 \times 4.2} = 10.58\ mm$$

به‌طور کلی با توجه به رنگ زمینه محل نصب تارگت‌ها و فاصله دوربین تا عارضه، ابعاد تارگت باید به نحوی انتخاب گردد که امکان تشخیص مرکز تارگت‌ها در بدبینانه‌ترین شرایط نیز وجود داشته باشد. بنابراین ساخت تارگت‌ها با ابعادی کمی بیشتر از ابعاد محاسباتی (مطابق محاسبات رابطه(۲)) منطقی است. در این پروژه قطر تارگت های نصب شده برابر ۲ سانتیمتر طراحی و پیاده‌سازی گردیده است. همچنین مطابق شکل(۳) از دو مجموعه تارگت‌های کددار و تارگت‌های معمولی استفاده شده است. استفاده از تارگت‌های کد دار جهت اتوماتیک‌سازی فرآیند توجیه خارجی تصاویر می باشد. همچنین استفاده از

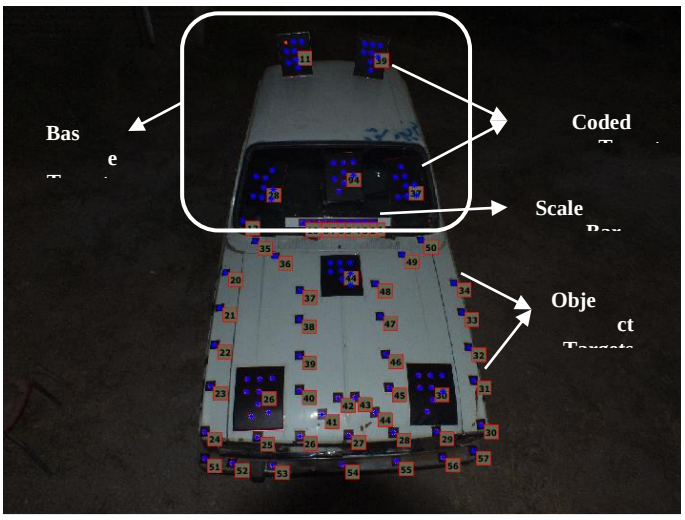
[1] The detection of deformation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

تارگت‌های بازتابنده با رنگ قرمز، با توجه به قید اختلاف رنگ ویژه بین زمینه با داخل تارگت بازتابنده، صحت موقعیت تصویری تارگتهای استخراج شده از تصاویر را افزایش می‌دهد[۹]. لذا در این پژوهش نیز از تارگت‌های بازتابنده قرمز رنگ استفاده شده است.



شکل ۲ : روند پیاده سازی یک سیستم فتوگرامتری برای سنجش تغییر شکل قطعات صنعتی.



شکل ۳: تارگت‌های کد دار و تارگت‌های معمولی با پس زمینه قرمز، میله مقیاس مورد استفاده در پروژه.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

ابعاد و شکل تارگت ها توسط نرم‌افزار اتوکد طراحی گردیده و با کمک دستگاه پلاترِ برشی بر روی برچسب‌های مشکی، بریده شده است. برچسب‌های مشکی بر روی صفحات بازتاب کننده نور قرمز رنگ مونتاژ گردیده‌اند و تارگت های تولید شده به‌صورت برچسبی بر روی سطح اتومبیل چسبانده شده‌اند.

۲-۲- تعیین و اندازه‌گیری نقاط کنترل و یا طول میله‌های مقیاس

در این پروژه جهت قرارگیری اندازه‌گیری ها در مقیاس واقعی، از میله مقیاس[1] برای حل مسأله مقیاس در متد معرفی شده در این مقاله(CPDA) که مستقل از نقاط کنترل می‌باشد، استفاده گردیده است. تارگت های مستقر بر روی این میله آلومنیومی مطابق شکل (۴) نیز طبق طراحی در اتوکد و برش دقیق و صحیح کامپیوتری با دستگاه پلاترِ برشی (متناسب با دقت‌های مورد نیاز در پروژه)، به فاصله ۵ سانتیمتر از یکدیگر قرار داشته و با توجه به اجرای پروژه در مدت زمان یک ساعت، دمای هوا در این مدت ثابت بوده و تقریباً تغییر طولی برای میله در این ۱ ساعت در اثر انبساط یا انقباض وجود نداشته است.

۲-۳- تعیین دوربین تصویربرداری و تنظیمات آن

دوربین تصویربرداری یکی از اجزاء اصلی پروژه های فتوگرامتری می باشد. برای این پروژه مشاهدات توسط دوربین رقومی فوجی فیلم مدل HS20EXR انجام شده است (شکل (۵)). پارامتر های این دوربین و صحت خروجی‌ها و قابلیت آن در پروژه‌های بردکوتاه، قبلاً در چندین پروژه ارزیابی گردیده است [۱۴ و ۱۵].

[1] Scale bar

۲-۴- طراحی، جانمایی و ایجاد تارگت های سیستم مختصات مبنا و تارگت های اندازه‌گیری روی اتومبیل

با توجه به اینکه تست ضربه برای بخش جلویی اتومبیل طراحی گردیده است، لذا تارگت‌های مانیتور کننده میزان جابجایی مطابق شکل (۴) در بخشهای سپر، کاپوت و گلگیر های طرفین بخش جلوی اتومبیل نصب شده اند. نصب تارگتها به گونه ای باید باشد که بتوانند در فواصل کوتاهی بر روی عارضه، تغییر شکل اجزای اتومبیل را اندازه‌گیری نمایند.

Fujifilm Digital Camera FINEPIX HS20EXR

Type
16 Megapixel,1/2-inch EXR **CMOS** with primary color filter - sensor size : 6.40×4.80 mm

Focal Length

f=4.2 - 126mm, equivalent to 24-720mm on a 35mm camera

Number of Recording Pixels

4608 × 3456 (4:3)

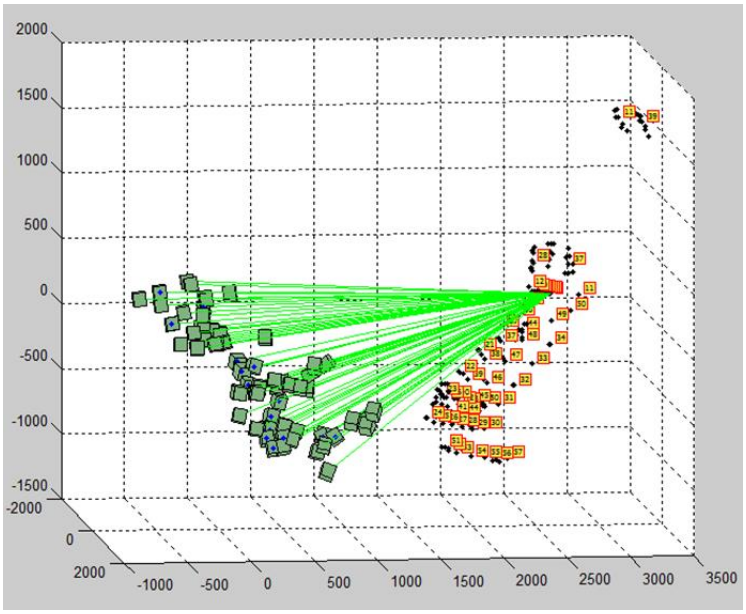
شکل ۴: مشخصات اصلی فنی دوربین مورد استفاده در این پروژه [۱۶].

۲-۵- تعیین ایستگاه های تصویربرداری (موقعیت، تعداد، شرایط)

موقعیت و توجیه دوربین به طوری که هر نقطه برداشت حداقل توسط سه عکس پوشش داده شود، باید تعیین گردد. جهت ایجاد افزونگی در داده‌ها، افزایش درجه آزادی، پوشش مناسب عارضه در تمام جهات و در نتیجه افزایش صحت تعیین مختصات نقاط روی عارضه، افزایش ایستگاه‌های تصویربرداری توجیه پذیر می‌باشد. در این پروژه در اپوک قبل از ضربه،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

در ۳۴ ایستگاه و در اپوک بعد از ضربه در ۳۱ ایستگاه تصویربرداری‌ها صورت گرفته است (شکل (۶)). یک اصل اساسی که بر طراحی شبکه فتوگرامتری حاکم است، این است که اگر زاویه بین محورهای نوری دوربین‌ها به زاویه قائمه نزدیک باشد، نتایج صحیح‌تری حاصل می شود. بنابر این تحدب ایستگاه‌های تصویربرداری و زاویه مناسب آنها نسبت به عارضه باید تا حد ممکن تأمین گردد.



شکل ۵: شبکه فتوگرامتری بردکوتاه پیاده شده، موقعیت ایستگاه‌های تصویربرداری و نقاط روی عارضه نسبت به هم.

با توجه به میدان دید دوربین تصویربرداری، محدوده فاصله دوربین از شئ به نحوی که تارگت‌ها در داخل تصویر پراکندگی مناسبی داشته باشند، از رابطه (۳) تعیین می‌گردد.

رابطه (۳)

$$D_{FOV}^{max} = \frac{D_0 \times \sin(\alpha+\varphi)}{2\sin\alpha} = \frac{4\times\sin(34.4+90)}{2\times\sin(34.4)} = 3.02\ m$$

در رابطه فوق مقدار D_0 بزرگ‌ترین قطر شئ در این پروژه برابر ۴ متر و φ زاویه امتداد دید دوربین با امتداد بزرگ‌ترین قطر شئ است که در کم پوشش‌ترین حالت یعنی تصویربرداری از روبرو، برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. فاصله کانونی حین تصویربرداری نیز ۴.۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است. در رابطه (۳)، α با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

رابطه (۴)

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{0.9\times d_0}{2\,f}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.9\times 6.40}{2\times 4.2}\right) = 34.4°$$

در رابطه (۴) d_0 طول افقی صفحه سنسور تصویربرداری (عرض فیلم یا قطعه CCD) و f فاصله کانونی دوربین حین تصویربرداری می باشد. بر اساس محاسبات، برای اینکه بتوان با دوربین فوجی فیلم با فاصله کانونی ۴.۲ میلیمتر پراکندگی مناسبی از تارگت‌های روی یک اتومبیل را در تصاویر به‌دست آورد، تصویربرداری‌ها از فاصله حدوداً ۳ متری نسبت به عارضه انجام گرفته است.

به‌طور کلی دقت اندازه‌گیری در یک شبکه فتوگرامتری بردکوتاه با تغییر مقیاس تصویربرداری، دقت اندازه‌گیری نقاط عکسی و تعداد تصاویر، تغییر می‌نماید. جهت طراحی شبکه و ارزیابی اولیه از دقت قابل دستیابی در یک شبکه فتوگرامتری بردکوتاه ، از رابطه تجربی زیر [۱۷] می‌توان استفاده کرد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

رابطه (۵)

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{k\bar{2}} S\sigma \rightarrow \bar{\sigma}_c = \frac{0.8}{\sqrt{1}} \times 720 \times 0.3 \times 1.38 \times 10^{-6} = 0.24\ mm$$

در رابطه (۵)، $\overline{\sigma_c}$ متوسط انحراف معیار خطای مختصات XYZ نقاط شئ ای، q فاکتور طراحی یا ضریب استحکام هندسی شبکه می‌باشد. در خصوص پارامتر q ذکر این نکته لازم است که این پارامتر، استحکام یک شبکه همگرا نسبت به شبکه استریو است و مقداری بین ۰.۱ تا ۱ را می‌تواند اختیار کند. پارامتر k تعداد متوسط تصاویر اخذ شده در هر ایستگاه دوربین، S عدد مقیاس برابر با نسبت d (فاصله متوسط دوربین تا شئ) به f (فاصله کانونی دوربین)، و σ دقت متوسط مختصات xy نقاط عکسی می‌باشند. در پیاده‌سازی این تحقیق مطابق رابطه فوق فاکتور طراحی شبکه برابر 0.8، تعداد متوسط تصاویر اخذ شده در هر ایستگاه برابر ۱ تصویر، مقیاس متوسط تصویربرداری ۷۲۰ و دقت تعیین مختصات عکسی مرکز تارگت‌ها، برابر ۰٫۳ پیکسل می باشند. بر اساس محاسبات با چنین شبکه‌ای می‌توان به دقت اندازه‌گیری حدوداً ۰٫۲۴ میلیمتر بر روی عارضه دست یافت.

۲-۶- کالیبراسیون و انجام تنظیمات دوربین

بررسی تأثیر روش کالیبراسیون در دقت جابجایی سنجی توسط نگارنده در پژوهش‌های مختلفی انجام گرفته است [۱۴ و ۱۵]. به طور کلی در حالتی که پراکندگی و تعداد مناسب تارگت‌ها در پروژه وجود داشته باشد، روش سلف‌کالیبراسیون با توجه به اینکه در شرایط اندازه‌گیری های پروژه انجام می گیرد، مناسب‌تر است. دراین پروژه نیز با توجه به عدم محدودیت فضای تصویربرداری و پوشش مناسب تصویر توسط تارگت‌ها، از روش سلف‌کالیبراسیون استفاده شده است. تنظیمات پارامترهای هندسی و رادیومتریکی دوربین تصویربرداری در زمان انجام مشاهدات متناسب با شرایط پروژه انجام می‌گیرد.

۲-۷- برداشت مشاهدات هر اپوک

در این مرحله با مشخص بودن ایستگاه‌های تصویربرداری، برداشت مشاهدات در قالب تصویربرداری همگرا از عارضه انجام می‌گیرد. محل ایستگاه های تصویربرداری نسبت به عارضه در دو اپوک باید تا حد ممکن مشابه یکدیگر باشند.

۲-۸- انجام محاسبات و تعیین مختصات نقاط در سیستم مختصات مبنا و مقایسه نتایج و تعیین میزان جابجایی‌ها

در روشهای معمول جابجایی‌سنجی همچون میکروژئودزی و یا استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS[1])، عموماً جهت اندازه‌گیری تغییرات در موقعیت نقاط به عنوان نماینده‌ای از عوارض، مشاهدات دقیق در دو اپوک مجزا برداشت و سرشکن می گردند. سپس مجموعه نقاط با کمک یک سری از نقاط مشاهده شده که در هر دو اپوک ثابت بوده و جابجا نشده اند، با یک ترانسفورماسیون سه بعدی در یک سیستم مختصات واحد قرار می‌گیرند. در نهایت با مقایسه مختصات نقاط جابجا شده متناظر، میزان جابجایی ها تعیین می‌گردد. اما بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته[۱۴]، چنین ساختار جابجایی سنجی‌ای در فتوگرامتری بردکوتاه، صحت مناسبی در نتایج تعیین جابجایی‌ها به همراه نخواهد داشت. یعنی زمانی که دو اپوک به صورت مجزا و با ساختار شبکه متفاوت و با خطاهای متفاوتی سرشکن می گردند، دقت و صحت تعیین مختصات نقاط مبنا که در هر دو اپوک ثابت بوده‌اند، متفاوت خواهد بود. زمانی که این نقاط به عنوان نقاط پایه جهت انطباق مختصات دو اپوک

[1] Global Positioning System

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

مـــورد اســـتفاده قـــرار مـــی گیرنـــد، عمـــلاً دقـــت جابجایی سنجی وابسته به تفاوت دقت تعیین مختصات این نقاط و محـل قـرار گیـری آنهـا در مجموعـه نقـاط مشاهده شده بوده و نتایج غیر واقعی حاصل می‌گردند.

لذا جهت غلبه بر این مشکل، سرشکنی ترکیبی هـر دو اپوک به‌صورت همزمـان بـا فـرض مشـاهدات مشـترک برای نقاط مبنا (مطابق شکل (۱۷)) در هـر دو اپـوک و مشاهدات مستقل در هر اپوک برای نقـاط جابجـا شـده پیشـنهاد مـی‌گـردد. در ایـن روش شـبکه حاصـل از اپوک اول با توجیـه داخلـی مربوطـه بـه همـراه شـبکه حاصـل از اپـوک دوم بـا توجیـه داخلـی شـبکه دوم به‌صورت همزمان سرشکن می شوند. برای نقـاط ثابـت به‌صورت مشترک بین دو اپوک و برای نقاط جابجا شده بـــا اســـتفاده از تصـــاویر اپـــوک مربوطـــه، تعیین مختصات می‌گـردد (CPDA) [۱۴]. بنـابراین در خروجی این روش یک مجموعه مختصـات بـرای نقـاط ثابت و دو مجموعه مختصات بـرای نقـاط جابجـا شـده همگـــی در یـــک سیســـتم مختصـــات مشـــترک تعیین می‌گردند. این دو مجموعه مختصات نقاط جابجا شده یکی برای اپوک اول و دیگری مربوط به اپوک دوم می‌باشد. با مقایسه مختصـات ایـن نقـاط جابجـا شـده، مقـدار جابجـایی در دو اپـوک حاصـل مـی گـردد. در این حالت برای قرارگرفتن اندازه‌ها در مقیاس واقعی از یک میله مقیـاس مـی تـوان اسـتفاده نمـود. در ایـن تحقیق اندازه‌گیـری و محاسـبات توسـط نـرم‌افزارهـای متلب و استرالیس انجام گرفته است.

۳- پیاده‌سازی و نتایج

جهـت تعیـین پتانسـیل فتـوگرامتری بردکوتـاه در اندازه‌گیری میزان تغییر شکل بدنه یک اتومبیل در اثـر وارد شدن ضربه به آن و پیاده‌سازی و ارزیـابی سـاختار معرفـــی شـــده، اتـــومبیلی مطـــابق شـــکل ۶ انتخاب شده است. تارگت هـای فتـوگرامتری در قالـب دو نوع تارگت کد دار و تارگـت هـای معمـولی (مطـابق شـکل (۶)) بـر روی بدنـه اتومبیـل نصـب گردیـده‌انـد. اندازه‌گیری‌های اپوک اول قبل از ضربه انجام شده است (مطابق شکل (۶ –الف)).

الف ب ج

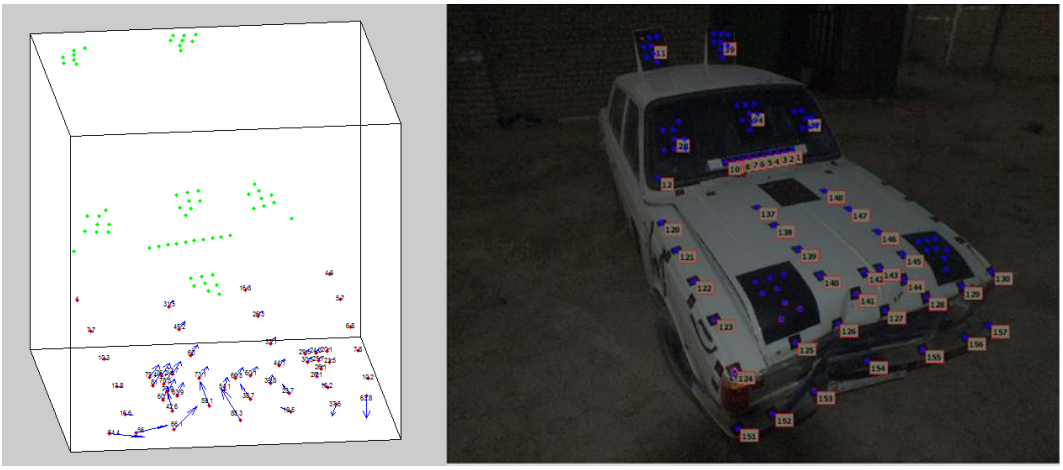
شکل ۶: الف) اپوک اول قبل از ضربه ب) وارد شدن ضربه به اتومبیل ج) اپوک دوم بعد از ضربه.

پـس از وارد شـدن ضـربه (مطـابق شـکل (۶-ب و ج)) بلافاصله اندازه‌گیری‌های اپوک دوم نیز انجام گرفته‌انـد. مشـــاهدات هـــر دو اپـــوک توســـط متـــد CPDA سرشکن گردیده‌اند. نتیجتاً دو مجموعه مختصات بـرای نقاط جابجا شده تعیین گردیده است.

شـکل (۷ – الـف)، نقـاط انـدازه‌گیـری شـده بـر روی اتومبیل در اپوک دوم و شکل (۷ – ب)، بردار جابجـایی بین نقاط تغییر شکل یافته را به همراه میزان جابجـایی آنها نمایش می دهد. در جدول (۱) مختصـات برخـی از نقاط جابجا شده در بخش جلوی اتومبیل قبل و بعـد از وارد شدن ضربه، ارائه گردیـده اسـت. همچنـین میـزان جابجـایی نقـاط در اثـر وارد شـدن ضـربه در سـتون آخر این جدول، محاسبه شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

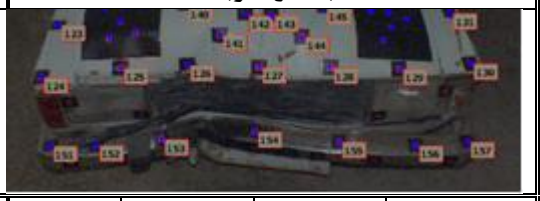
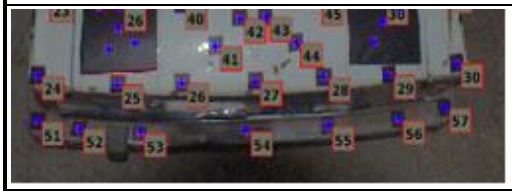
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]



الف ب

شکل ۷: الف) نقاط سرشکن شده بر روی عارضه بعد از ضربه؛ ب) بردار جابجایی نقاط بین اپوک های اول و دوم.

جدول ۱: مختصات برخی از نقاط جابجا شده در بخش جلوی اتومبیل قبل و بعد از وارد شدن ضربه و میزان جابجایی آنها (واحد : میلیمتر)

	بعد از ضربه				قبل از ضربه			
								
مقدار جابجایی	Z	Y	X	شماره نقطه	Z	Y	X	شماره نقطه
۱۶٫۶۲	-۷۱۷٫۴۲	۱۶۸۶٫۲۱	-۴۳۷٫۸۵	۱۲۴	-۷۲۱٫۳۹	۱۶۹۸٫۳۱	-۴۴۸٫۵۴	۲۴
۴۲٫۶۳	-۶۷۹٫۰۳	۱۷۳۶٫۶۹	-۱۹۵٫۹۱	۱۲۵	-۷۱۹٫۴۲	۱۷۲۴٫۱۰	-۱۹۰٫۶۶	۲۵
۵۹٫۱۶	-۶۶۰٫۷۲	۱۸۰۱٫۶۷	-۱٫۵۴	۱۲۶	-۷۰۶٫۲۲	۱۷۶۵٫۴۵	۹٫۹.۳۲	۲۶
۳۸٫۷۱	-۶۶۱٫۳۳	۱۸۳۲٫۷۱	۲۲۲٫۰۵	۱۲۷	-۶۹۱٫۹۳	۱۸۱۳٫۹۱	۲۳۶٫۵۰	۲۷
۲۳٫۷۱	-۶۵۶٫۲۲	۱۸۷۱٫۰۴	۴۴۰٫۸۲	۱۲۸	-۶۷۶٫۸۰	۱۸۶۶٫۹۱	۴۵۱٫۸۴	۲۸
۱۶٫۲۸	-۶۵۶٫۴۲	۱۹۱۳٫۳۵	۶۵۴٫۲۵	۱۲۹	-۶۶۸٫۶۴	۱۹۲۰٫۳۳	۶۶۲٫۴۲	۲۹
۱۰٫۲۷	-۶۳۵٫۰۴	۱۹۷۷/۵۷	۸۸۳٫۵۸	۱۳۰	-۶۳۸٫۶۵	۱۹۸۶٫۵۰	۸۸۷٫۱۵	۳۰
۶۴٫۴۵	-۹۴۶/۴۲	۱۸۱۴/۱۱	-۴۶۱٫۶۲	۱۵۱	-۹۵۲٫۲۵	۱۸۴۸٫۱۶	-۵۱۶٫۰۴	۵۱
۵۶٫۰۱	-۹۳۹٫۰۹	۱۸۵۳٫۵۷	-۳۱۶٫۷۵	۱۵۲	-۹۵۹٫۵۳	۱۸۶۱٫۵۹	-۳۶۸٫۲۷	۵۲
۶۶٫۱۹	-۹۱۴٫۷۳	۱۹۲۵٫۲۴	-۱۱۸٫۸۵	۱۵۳	-۹۵۶٫۹۷	۱۸۹۶٫۷۰	-۱۶۱٫۰۷	۵۳
۸۵٫۳۵	-۸۸۴٫۰۲	۲۰۳۳٫۳۲	۱۷۶٫۷۴	۱۵۴	-۹۳۷٫۲۲	۱۹۷۰٫۹۳	۲۰۰٫۴۷	۵۴
۱۹٫۵۳	-۹۰۶/۶۴	۲۰۳۹٫۵۳	۴۶۳٫۴۰	۱۵۵	-۹۱۷٫۰۵	۲۰۳۷٫۴۲	۴۷۹٫۸۰	۵۵
۳۷٫۵۰	-۹۱۳٫۱۷	۲۰۶۹٫۹۴	۷۱۸٫۰۶	۱۵۶	-۸۹۷٫۶۳	۲۱۰۲٫۳۱	۷۲۸٫۸۸	۵۶
۶۳٫۸۰	-۸۹۸٫۹۰	۲۱۰۶٫۰۷	۸۹۲٫۱۳	۱۵۷	-۸۶۸٫۶۹	۲۱۶۱٫۸۹	۸۹۸٫۶۰	۵۷

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

دقت متوسط تعیین مختصات زمینی نقاط در سرشکنی شبکه به روش CPDA، مطابق جدول (۲)، ۰٫۴۵ میلیمتر بوده است. همانطور که در رابطه طراحی شبکه (رابطه (۵)) محاسبه شده بود، دقت حاصل با دقت پیش بینی شده با اختلاف حدوداً ۰٫۲ میلیمتر مطابقت دارد. با توجه به جدول (۲) حداکثر خطای موجود در تعیین مختصات زمینی نقاط را می توان ۱ میلیمتر متصور بود. به بیان دیگر، با توجه به سرشکنی ترکیبی، مقدار جابجایی های تعیین شده در ستون آخر جدول (۱) با دقت حداقل ۱ میلیمتر می‌توانند بیانگر میزان جابجایی نقاط روی اتومبیل باشند. این در حالی است که در صورت عدم استفاده از متد CPDA و سرشکنی مجزا دو اپوک و انطباق ثانویه آنها، صحت نتایج جابجایی سنجی تا ۱۲ میلیمتر بر روی تارگت‌هایی با بیشترین جابجایی مشاهده می‌گردد. همچنین در این حالت وابستگی بالای صحت نتایج به موقعیت و پراکندگی نقاط مبنا جهت انطباق سیستم مختصات‌های دو اپوک وجود داشته است که از ایرادات عدم استفاده از متد CPDA پیشنهادی می‌باشد.

جدول ۲: دقت مختصات زمینی برآورد شده برای کل نقاط در متد CPDA برای ۲ اپوک بر اساس پارامتر RMSE[1] (ریشه دوم میانگین مربعات خطای برآورد مختصات زمینی نقاط) - (واحد : میلیمتر)

دقت شبکه سرشکنی ترکیبی برای مانیتورینگ جابجایی متد CPDA	
RMSE_X	۰.۳۳۴۹
RMSE_Y	۰.۶۵۵۳
RMSE_Z	۰.۳۶۹۰
میانگینِ سه بُعد	۰.۴۵۳۰

سرعت برداشت مشاهداتِ هر اپوک در روش فتوگرامتری در حدود چند دقیقه در قالب عکسبرداری در یک شبکه محدب از عارضه بوده است. در این پروژه با تصویربرداری بین ۳۱ تا ۳۴ تصویر در هر اپوک، شرط استحکام شبکه فتوگرامتری برای دستیابی به دقت‌های مورد نظر تأمین گردید. با توجه به اینکه روش CPDA پیشنهادی هیچ نیازی به نقاط کنترل نداشته و به کل مستقل از هرگونه مشاهدات میکروژئودزی یا ابزاردقیق می‌باشد، و همچنین به دلیل سهولت اجرا و سرعت سیستم پیشنهادی در کنار قابلیت دستیابی به دقت های زیر یک میلیمتر در جابجایی ها، به‌عنوان یک روش ایده آل برای مانیتورینگ و کنترل کیفیت اتومبیل معرفی می‌گردد. از سایر مزایای این روش می توان به امکان مانیتورینگ یکجا از کل عارضه، عدم نیاز به تماس مستقیم با عارضه، قابلیت جابجایی سنجی تعداد زیادی از نقاط روی عارضه، ارائه مدارک بصری و قابلیت تکرار ارزیابی‌ها، امکان اندازگیری در اتومبیل های نامنظم و پیچیده با درجه آزادی[2] بالا و هزینه کم اشاره کرد. از محدودیت‌های این روش نیز امکان تخریب تارگت‌ها حین ضربه و نیاز به نقاطی بر روی عارضه یا محیط به‌عنوان نقاط مبنا که در اثر ضربه تغییری در آنها حاصل نشود، می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

آنالیز های جابجایی به روش فتوگرامتری معمولاً در پروژه‌هایی وارد عمل می‌شوند که در آنها عارضه مورد نظر یا شرایط محیطی، امکان وجود زمان کافی و یا فضای مناسب برای نصب ابزار دقیق ویا اندازه‌گیری‌های وسیع ژئودتیکی را نمی‌دهند. همچنین استفاده از تصاویر، یک مستندسازی عینی از شرایط عارضه را در زمان اخذ تصاویر ارائه می‌کند. مشکلات زمانی و مکانی اخذ داده و هزینه پروژه نیز از مواردی هستند که روش فتوگرامتری را در مقابل سایر روشها وارد عرصه رقابت می‌کنند.

سیستم فتوگرامتری جهت سنجش تغییر شکل بدنه اتومبیل در اثر وارد شدن ضربه که در این مقاله پیشنهاد گردید، شامل یک دوربین تصویربرداری رقومی

[1] Root Mean Square Error

[2] Degree Of Freedom

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

غیر متریک (فوجی فیلم)، تارگت های بازتابنده کد دار و معمولی، شبکه طراحی شده برای قرارگیری دوربین‌ها و تارگت ها، میله های مقیاس و متد جدید و پیشنهادی CPDA برای سرشکنی در یک سیستم مختصات مشترک بین برداشت‌ها و افزایش صحت خروجی‌ها می‌باشد. در این سیستم انجام مشاهدات از اتومبیل با سهولت، سرعت و دقت بالایی صورت می گیرد به طوری که در این پروژه برداشت هر اپوک در کمتر از ۱۰ دقیقه، و جابجایی سنجی با دقت کمتر از ۱ میلیمتر در ابعاد عارضه انجام گردید.

در این مقاله پتانسیل استفاده از متد CPDA در حوزه و مقیاس صنعتی برای اولین بار مورد ارزیابی قرار گرفت. سیستم معرفی شده بسیاری از محدودیت‌های روش‌های استفاده از ابزار دقیق همچون مشکلات در نصب، تخریب در تست، هزینه بالا و امکان استفاده از تعداد محدود سیستم های ابزار دقیق در یک پروژه را مرتفع می کند. این روش مستقل از هرگونه مشاهده خارجی است و سرعت بالا در پیاده‌سازی و انجام مشاهدات، امکان ارزیابی های سریع بر روی نتایج را بلافاصله پس از وقوع ضربه میسر می‌سازد. فرآیند اتوماتیک محاسبات و توجیه تصاویر نیز بار محاسباتی و زمان لازم جهت دستیابی به نتایج را تا چند دقیقه کاهش می‌دهد. این اتوماتیک سازی سیستم را قادر می‌سازد تا در صورت نصب چند دوربین و تصویربرداری به‌صورت همزمان، بتوان به‌صورت بلادرنگ لحظه برخورد اتومبیل را در کسری از ثانیه مدلسازی نمود.

با توجه به ساختار معرفی شده و دستیابی به دقت‌های زیر ۱ میلیمتر، استفاده از فتوگرامتری بردکوتاه در قالب سیستم معرفی شده برای ارزیابی کیفیت ساخت اجزاء اتومبیل‌ها و اندازه‌گیری‌ها در تست ضربه، پیشنهاد می‌گردد.

تقدیر و تشکر

نگارنده مراتب تشکر خود را از مرکز اسقاط خودروهای فرسوده زنجان بابت در اختیار قرار دادن اتومبیل جهت پیاده‌سازی پژوهش اعلام می‌دارد.

مراجع

[1] C. Fraser, D. Brizzi, and A. Hira, "Vision-based, multi-epoch deformation monitoring of the Atrium of federation square," in 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 2003.

[2] B. R. Clive S. Fraser a, "Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology," ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, p. 268–276, 2000.

[3] C. S. Fraser, A. Woods, and D. Brizzi, "Hyper redundancy for accuracy enhancement in automatic close range photogrammetry," vol. 20, no. 11, 2005.

[4] C. Fraser, "Automated vision metrology: A mature technology for industrial inspection and engineering surveys," in 6th South East Asian Surveyors Congress, Western, 1999.

[5] J. Fryer, H. Mitchell, and J. H. Chandler, Applications of 3D measurement from images. Whittles, 2007.

[6] T. K. Lee and R. Al-Mahaidi, "An experimental investigation on shear behaviour of RC T-beams strengthened with CFRP using photogrammetry," Composite Structures, vol. 82, p. 185–193, 2008.

[7] NHTSA. (2016, Jul.) NHTSA. [Online]. http://www.nhtsa.gov/Research

[8] T. Koutecky, D. Palouˇsek, and J. Brandejs, "Method of photogrammetric measurement automation using TRITOP system and industrial robot," Optik, vol. 124, p. 3705–3709, 2013.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

[9] C. S. Fraser and S. Cronk, "A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64, no. 3, pp. 328-333, May 2009.

[10] H. R. Karimi, K. G. Robbersmyr, and W. Pawlus, "Signal reconstruction, modeling and simulation of a vehicle full-scale crash test based on Morlet wavelets," Neurocomputing, vol. 93, p. 88–99, 2012.

[11] A. Morales, D. Gonzalez-Aguilera, A. I. López, and M. A. Gutiérrez, "Energy Analysis of Road Accidents Based on Close-Range Photogrammetry," remote sensing, vol. 2015-7, pp. 15161-15178, Nov. 2015.

[12] R. Jiang, D. V. Jáuregui, and K. R. White, "Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review," Measurement, vol. 41, no. 8, p. 823–834, 2008.

[13] V. Hansen and E. J. Dutton, "Vehicle to frontal barrier crash test in support of nhtsa's frontal research program," nhtsa r&d-cal-15-006, 2016.

[14] F. Esmaeili, M. Varshosaz, and H. Ebadi, "Displacement measurement of the soil nail walls by using close range photogrammetry and introduction of CPDA method," Measurement, vol. 46, no. 9, p. 3449–3459, Nov. 2013.

[15] F. Esmaeili, M. Varshosaz, and M. Saadatseresht, "Displacement Measurement of Soil Nail Walls using Close Range Photogrammetry," Procedia Engineering, vol. 54, p. 516–524, 2013.

[16] F. Co., "Fujifilm Digital Camera FINEPIX HS20EXR Owner's Manual," 2010.

[17] C. S. Fraser, "Network Design Consideration for Non-Toporgaphic Photogrammetry," Photogrammetric Engineering and remote sensing, vol. 50, no. 8, pp. 1115-1126, Aug. 1984.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.6, No.1, Spring 2018

Determination of Car Body Deformation due to Collision Using Close-Range Photogrammetry

Farid Esmaeili [*1], Hamid Ebadi [2]

1- Ph.D. Student of photogrammetry, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Professor of Geodesy and Geomatics Eng. Faculty, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In recent decades, close-range photogrammetry has been successfully used in various fields including industry, cultural heritage, health and civil engineering. This method as a tool for measuring deformation in industrial parts, has many advantages such as capability of real-time measurement, ease of observation, ability to achieve high accuracy and also capability of creating an archived observations for future processing. In this paper, close-range photogrammetry applied to measure a vehicle's body before and after collision to determine deformation on it. For this purpose, a measuring system is designed based on the core components of network and technical structure, taking observations, adjustment and calculation into account. Combined Photogrammetry Displacement Adjustment method (CPDA) has been applied in this research to achieve high accuracy in the measurement of displacement. The results revealed the ability of this method to achieve an accuracy of less than 1 mm in measuring the deformation of vehicle's body. Also this method is superior to other methods in terms of cost, speed and ease of measurements.

Key words: Close-range Photogrammetry, Displacement Measurement, Deformation Analyse, Camera Calibration, Network Design.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.117]

Correspondence Address: No. 1346, Vali-Asr Street, Mirdamad Crossing, Remote Sensing Dept, Geodesy and Geomatics Engineering. Faculty, K.N.Toosi University of Tech. ,Tehran ,Iran, Postal Code: 1996715433
Tel:. +98 21 88770218
Email: faridesm@mail.kntu.ac.ir