

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

کاربرد فتوگرامتری برد کوتاه در سنجش دقیق تغییر شکل بدنه اتومبیل در اثر برخورد با مانع

فرید اسماعیلی^{۱*}، حمید عبادی^۲

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

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

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

چکیده

فتوگرامتری برد کوتاه در دهه‌های اخیر در حوزه‌های مختلفی از علوم همچون صنعت، میراث فرهنگی، پزشکی و عمران، در کاربردهای موفق مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به عنوان 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 می‌باشد. در این مقاله از فتوگرامتری برد کوتاه برای اندازه‌گیری بدنه یک اتومبیل قبل و بعد از برخورد 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 نظر هزینه، سرعت و سهولت اندازه‌گیری نسبت به سایر روش‌ها در این حوزه برتری دارد.

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

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

۱- مقدمه

استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه در کاربرد های صنعتی جهت کنترل کیفیت، مهندسی معکوس، و اندازه گیری های دقیق متداول می باشد [۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶]. با توجه به قابلیت فتوگرامتری برد کوتاه در دستیابی به دقت های بالا، اندازه گیری های 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 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 مواجهه با چنین استرس هایی به طور مستقیم وابسته به کیفیت طراحی و ساخت آنها می باشد. اینکه یک قطعه صنعتی تا چه اندازه بتواند در محل کاربرد خود عملکرد صحیحی داشته باشد مستلزم این است که آزمایش های بسیاری را جهت تعیین کیفیت گذرانده باشد.

اتومبیل ها یکی از عمومی ترین مصنوعات ساخت بشر می باشند که با توجه به حساسیت کاربرد آنها، نیازمند گذراندن تست های مختلف کنترل کیفیت هستند. یکی از این تست ها، تست ضربه^۱ می باشد. 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 می گردد. اینکه اتومبیل تا چه حد بتواند در اثر نیروی وارد، 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.

روش های مختلفی برای اندازه گیری سازه های صنعتی وجود دارند. استفاده از بازو های مکانیکی و CMM^۲ ها [۸]، لیزر اسکنر ها [۵] و فتوگرامتری برد کوتاه [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 اندازه گیری شوند، منجر به معرفی و به کارگیری تکنیک های متناسب در این حوزه شده است. پاولس و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از تکنیک موجک مورلت^۳ و با اندازه گیری مداوم مرکز ثقل اتومبیل حین برخورد با کمک پردازش های فرکانس و زمان، مدل ریاضی از تصادف اتومبیل را تولید نموده اند [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 نقشه های متریک جابجایی برای اتومبیل را تولید کنند [۱۱]. به صورت تجاری متداولترین روش جهت انجام تست ضربه، استفاده از تکنیک فتوگرامتری (یا به اصطلاح عامیانه خودروسازان روش اپتیک) می باشد. به طور 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 می گردند که در تمامی این تست ها از روش فتوگرامتری استفاده شده است [۷]. به طور مثال در تست ضربه برای اتومبیل هوندا (شکل ۱ - ج)) از ۱۷ دوربین همزمان سازی شده استفاده شده است

^۲ Coordinate Measuring Machine^۳ Morlet Wavelet^۱ Crash Test

یکهزارم ثانیه در نقاط مختلف اتومبیل تعیین شده‌اند.

(شکل ۱-ه) و مختصات تارگتها حین ضربه در هر



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

تعیین میزان تغییر شکل بر روی آن، استفاده شده است. براساس بررسی‌های انجام شده بر روی پژوهش‌ها و روش‌های متداول جایجایی سنجی در تست ضربه، جایجایی‌ها 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 جایجایی سنجی، از متد جایجایی سنجی مبتنی بر سرشکنی ترکیبی فتوگرامتری مینا یا CPDA^۱ 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 برد کوتاه پیاده‌سازی شده

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، تارگت‌های فتوگرامتری به آسانی می‌توانند 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 برد کوتاه به‌عنوان ابزاری جهت کنترل کیفیت قطعات صنعتی از ویژگی‌های منحصر به فردی برخوردار است. زمانی که فشارهای وارد بر جسم به‌صورت آنی و لحظه‌ای اتفاق می‌افتد، فتوگرامتری برد کوتاه به‌عنوان 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 برد کوتاه را به ابزاری مؤثر در این حوزه تبدیل کرده است.

در این مقاله از فتوگرامتری برد کوتاه جهت اندازه‌گیری بدنه یک اتومبیل قبل و بعد از برخورد به مانع برای

^۱ Combined Photogrammetry Displacement Adjustment

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

۲- معرفی سیستم فتوگرامتری برد کوتاه مورد استفاده

کشف تغییرشکل^۱ 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 برد کوتاه، می‌توان یک سیستم اندازه‌گیری را مطابق نمودار زیر طراحی کرد.

مطابق شکل (۲) در مرحله اول ابتدا باید شرایط خاص اتومبیل 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 به صورت یکجا سرشکن می‌گردند. 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 تارگت‌ها

تارگت‌های فتوگرامتری در حقیقت نقاط نشانه‌ای هستند که بر روی عارضه نصب می‌شوند. مرکز این

تارگت‌ها به‌عنوان نقطه‌ای منحصر به فرد در تصاویر همگرایی اخذ شده از عارضه، در قالب مشاهدات عکسی استخراج می‌گردند. جهت ایجاد تمایز بیشتر مرکز تارگت با زمینه آن، از تارگت‌های بازتابنده به همراه تصویربرداری با نور فلاش در پروژه‌های فتوگرامتری برد کوتاه استفاده می‌گردد. هر یک از تارگت‌ها 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)

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

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)

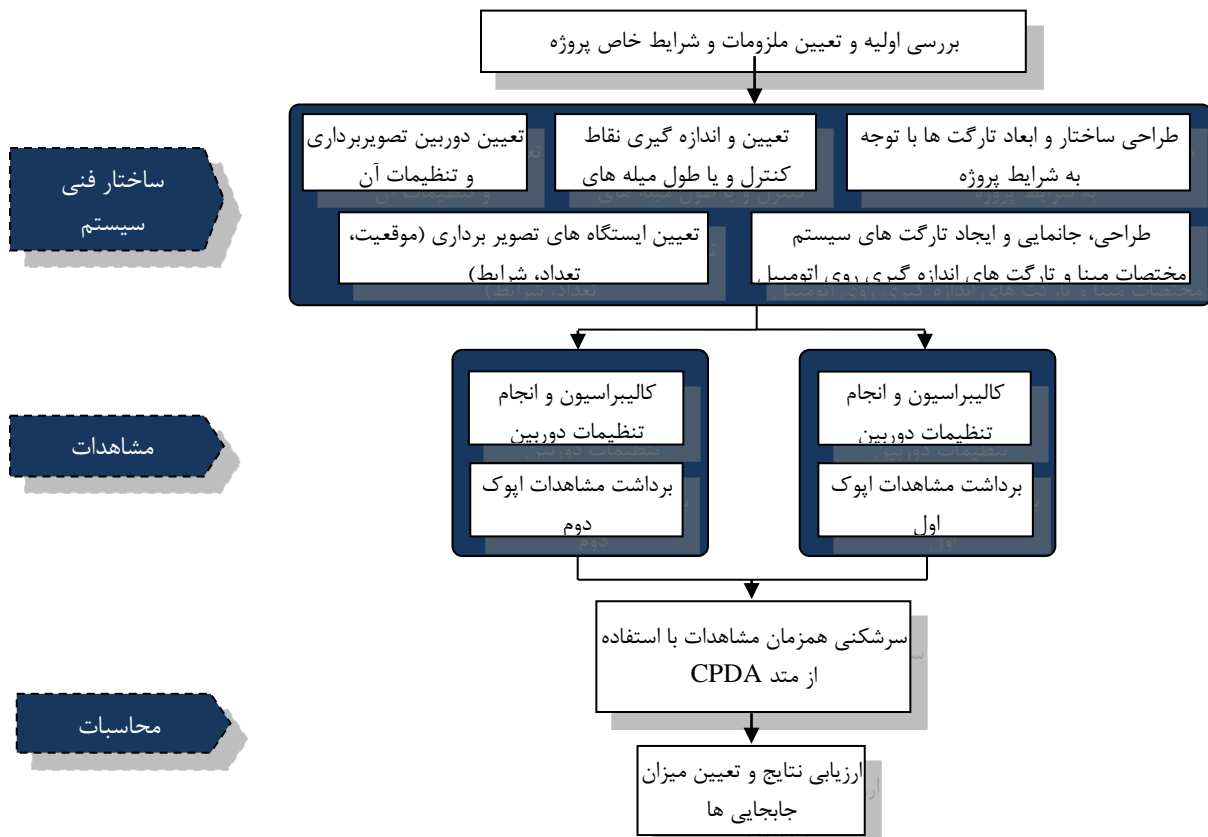
$$\text{کمترین قطر تارگت} = \frac{8 \times 4000 \times 6.40}{4608 \times 4.2} = 10.58 \text{ mm}$$

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 تارگت‌های 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 کددار جهت اتوماتیک‌سازی فرآیند توجیه خارجی تصاویر می‌باشد. همچنین استفاده از

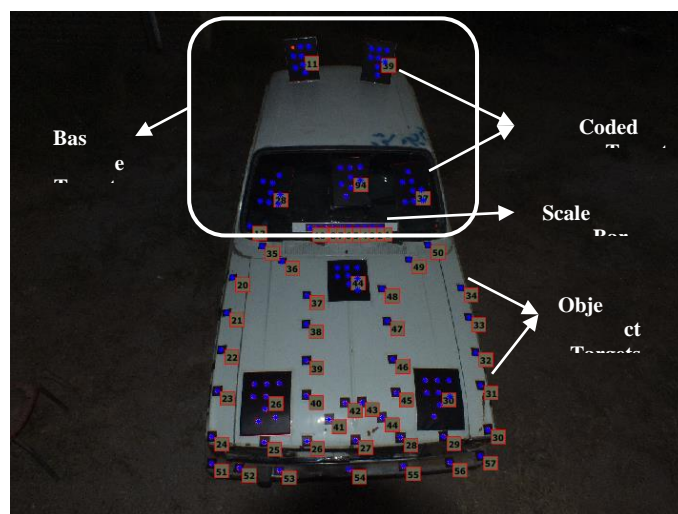
¹ The detection of deformation

تصاویر را افزایش می‌دهد [۹]. لذا در این پژوهش نیز از تارگت‌های بازتابنده قرمز رنگ استفاده شده است.

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



شکل ۲: روند پیاده‌سازی 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.

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

با توجه به اینکه تست ضربه برای بخش جلویی اتومبیل طراحی گردیده است، لذا تارگت های 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 اندازه گیری 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 داده ها، افزایش درجه آزادی، پوشش مناسب عارضه در تمام جهات و در نتیجه افزایش صحت تعیین مختصات نقاط روی عارضه، افزایش ایستگاه های تصویربرداری توجیه پذیر می باشد. در این پروژه در اپوک قبل از ضربه،

ابعاد و شکل تارگت ها توسط نرم افزار اتوکد طراحی گردیده و با کمک دستگاه پلاتر برشی بر روی برجسب های مشکی، بریده شده است. برجسب های مشکی بر روی صفحات بازتاب کننده نور قرمز رنگ مونتاژ گردیده اند و تارگت های تولید شده به صورت برجسبی بر روی سطح اتومبیل چسبانده شده اند.

۲-۲- تعیین و اندازه گیری نقاط کنترل و یا طول میله های مقیاس

در این پروژه جهت قرارگیری اندازه گیری ها در مقیاس واقعی، از میله مقیاس^۱ برای حل مسأله مقیاس در متد معرفی شده در این مقاله (CPDA) که مستقل از نقاط کنترل می باشد، استفاده گردیده است. تارگت های مستقر بر روی این میله آلومینیومی مطابق شکل (۴) نیز طبق طراحی در اتوکد و برش دقیق و صحیح کامپیوتری با دستگاه پلاتر برشی (متناسب با دقت های 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.

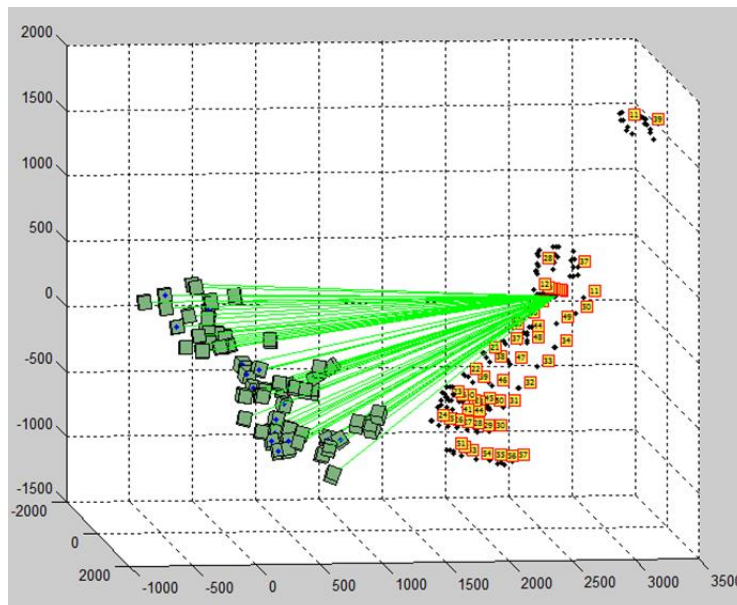
۲-۳- تعیین دوربین تصویربرداری و تنظیمات آن

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 خروجی ها و قابلیت آن در پروژه های برد کوتاه، قبلاً در چندین پروژه ارزیابی گردیده است [۱۴ و ۱۵].

¹ Scale bar

دوربین‌ها به زاویه قائمه نزدیک باشد، نتایج صحیح‌تری حاصل می‌شود. بنابراین این تحذب ایستگاه‌های تصویربرداری و زاویه مناسب آنها نسبت به عارضه باید تا حد ممکن تأمین گردد.

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



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

رابطه (۴)

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

در رابطه (۴) d_0 طول افقی صفحه سنسور تصویربرداری (عرض فیلم یا قطعه CCD) و f فاصله کانونی دوربین حین تصویربرداری می‌باشد. 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 به دست 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.

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

رابطه (۳)

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

در رابطه فوق مقدار D_0 بزرگ‌ترین قطر شیء در این پروژه برابر ۴ متر و φ زاویه امتداد دید دوربین با امتداد بزرگ‌ترین قطر شیء 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 (۵)

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

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 ایستگاه‌های 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^۱)، عموماً جهت اندازه‌گیری تغییرات در موقعیت نقاط به عنوان نماینده‌ای از عوارض، مشاهدات دقیق در دو اپوک مجزا برداشت و سرشکن می‌گردند. سپس مجموعه نقاط با کمک یک سری از نقاط مشاهده شده که در هر دو اپوک ثابت بوده و جابجا نشده‌اند، با یک ترانسفورماسیون سه بعدی در یک سیستم مختصات واحد قرار می‌گیرند. در نهایت با مقایسه مختصات نقاط جابجا شده متناظر، میزان جابجایی‌ها تعیین می‌گردد. اما بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته [۱۴]، چنین ساختار جابجایی‌سنجی‌ای 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 می‌گردند، 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

در رابطه (۵)، $\bar{\sigma}_c$ متوسط انحراف معیار خطای مختصات XYZ نقاط شیئی 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 شیئی) 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 می‌باشند. 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 جابجایی‌سنجی 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 اندازه‌گیری‌های پروژه انجام می‌گیرد، مناسب‌تر است. در این 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

¹ Global Positioning System

تعیین می‌گردند. این دو مجموعه مختصات نقاط جابجا شده یکی برای اپوک اول و دیگری مربوط به اپوک دوم می‌باشد. با مقایسه مختصات این نقاط جابجا شده، مقدار جابجایی در دو اپوک حاصل می‌گردد. در این حالت برای قرار گرفتن اندازه‌ها در مقیاس واقعی از یک میله مقیاس می‌توان استفاده نمود. در این تحقیق اندازه‌گیری و محاسبات توسط نرم‌افزارهای متلب و استرالیس انجام گرفته است.

۳- پیاده‌سازی و نتایج

جهت تعیین پتانسیل فتوگرامتری برد کوتاه در اندازه‌گیری میزان تغییر شکل بدنه یک اتومبیل در اثر وارد شدن ضربه به آن و پیاده‌سازی و ارزیابی ساختار معرفی شده، اتومبیلی مطابق شکل ۶ انتخاب شده است. تارگت‌های فتوگرامتری در قالب دو نوع تارگت کد دار و تارگت‌های معمولی (مطابق شکل ۶) بر روی بدنه اتومبیل نصب گردیده‌اند. اندازه‌گیری‌های اپوک اول قبل از ضربه انجام شده است (مطابق شکل ۶-الف).



ج



ب



الف

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

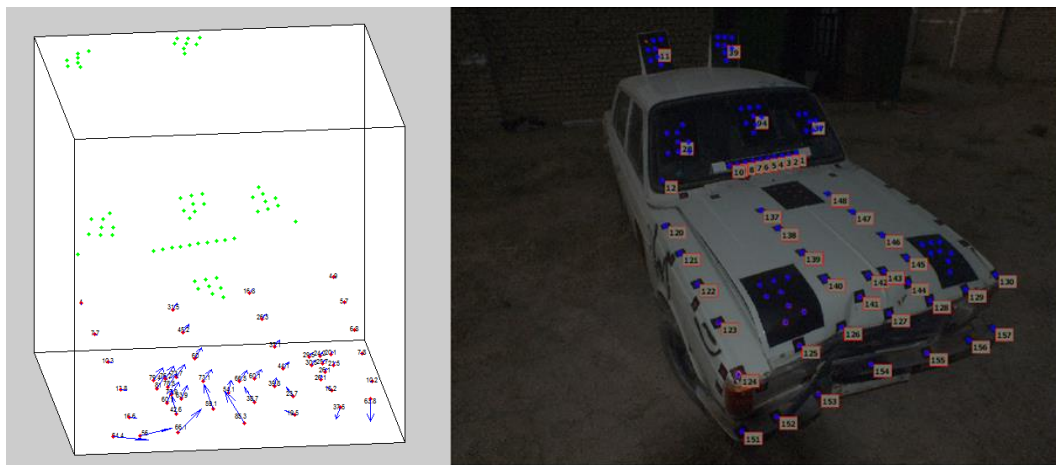
بین نقاط تغییر شکل یافته را به همراه میزان جابجایی آنها نمایش می‌دهد. در جدول (۱) مختصات برخی از نقاط جابجا شده در بخش جلوی اتومبیل قبل و بعد از وارد شدن ضربه، ارائه گردیده است. همچنین میزان جابجایی نقاط در اثر وارد شدن ضربه در ستون آخر این جدول، محاسبه شده است.

مورد استفاده قرار می‌گیرند، عملاً دقت جابجایی سنجی وابسته به تفاوت دقت تعیین مختصات این نقاط و محل قرار گیری آنها در مجموعه نقاط مشاهده شده بوده و نتایج غیر واقعی حاصل می‌گردند.

لذا جهت غلبه بر این مشکل، سرشکنی ترکیبی هر دو اپوک به صورت همزمان با فرض مشاهدات مشترک برای نقاط مبنا (مطابق شکل (۱۷)) در هر دو اپوک و مشاهدات مستقل در هر اپوک برای نقاط جابجا شده پیشنهاد می‌گردد. در این روش شبکه حاصل از اپوک اول با توجیه داخلی مربوطه به همراه شبکه حاصل از اپوک دوم با توجیه داخلی شبکه دوم به صورت همزمان سرشکن می‌شوند. برای نقاط ثابت به صورت مشترک بین دو اپوک و برای نقاط جابجا شده با استفاده از تصاویر اپوک مربوطه، تعیین مختصات می‌گردد (CPDA) [۱۴]. بنابراین در خروجی این روش یک مجموعه مختصات برای نقاط ثابت و دو مجموعه مختصات برای نقاط جابجا شده همگی در یک سیستم مختصات مشترک

پس از وارد شدن ضربه (مطابق شکل ۶-ب و ج)) بلافاصله اندازه‌گیری‌های اپوک دوم نیز انجام گرفته‌اند. مشاهدات هر دو اپوک توسط متد CPDA سرشکن گردیده‌اند. نتیجتاً دو مجموعه مختصات برای نقاط جابجا شده تعیین گردیده است.

شکل (۷-الف)، نقاط اندازه‌گیری شده بر روی اتومبیل در اپوک دوم و شکل (۷-ب)، بردار جابجایی



ب

الف

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)

قبل از ضربه				بعد از ضربه				مقدار جابجایی
شماره نقطه	X	Y	Z	شماره نقطه	X	Y	Z	
۲۴	-۴۴۸,۵۴	۱۶۹۸,۳۱	-۷۲۱,۳۹	۱۲۴	-۴۳۷,۸۵	۱۶۸۶,۲۱	-۷۱۷,۴۲	۱۶,۶۲
۲۵	-۱۹۰,۶۶	۱۷۲۴,۱۰	-۷۱۹,۴۲	۱۲۵	-۱۹۵,۹۱	۱۷۳۶,۶۹	-۶۷۹,۰۳	۴۲,۶۳
۲۶	۹۹,۳۲	۱۷۶۵,۴۵	-۷۰۶,۲۲	۱۲۶	-۱,۵۴	۱۸۰۱,۶۷	-۶۶۰,۷۲	۵۹,۱۶
۲۷	۲۳۶,۵۰	۱۸۱۳,۹۱	-۶۹۱,۹۳	۱۲۷	۲۲۲,۰۵	۱۸۳۲,۷۱	-۶۶۱,۳۳	۳۸,۷۱
۲۸	۴۵۱,۸۴	۱۸۶۶,۹۱	-۶۷۶,۸۰	۱۲۸	۴۴۰,۸۲	۱۸۷۱,۰۴	-۶۵۶,۲۲	۲۳,۷۱
۲۹	۶۶۲,۴۲	۱۹۲۰,۳۳	-۶۶۸,۶۴	۱۲۹	۶۵۴,۲۵	۱۹۱۳,۳۵	-۶۵۶,۴۲	۱۶,۲۸
۳۰	۸۸۷,۱۵	۱۹۸۶,۵۰	-۶۳۸,۶۵	۱۳۰	۸۸۳,۵۸	۱۹۷۷,۵۷	-۶۳۵,۰۴	۱۰,۲۷
۵۱	-۵۱۶,۰۴	۱۸۴۸,۱۶	-۹۵۲,۲۵	۱۵۱	-۴۶۱,۶۲	۱۸۱۴,۱۱	-۹۴۶,۴۲	۶۴,۴۵
۵۲	-۳۶۸,۲۷	۱۸۶۱,۵۹	-۹۵۹,۵۳	۱۵۲	-۳۱۶,۷۵	۱۸۵۳,۵۷	-۹۳۹,۰۹	۵۶,۰۱
۵۳	-۱۶۱,۰۷	۱۸۹۶,۷۰	-۹۵۶,۹۷	۱۵۳	-۱۱۸,۸۵	۱۹۲۵,۲۴	-۹۱۴,۷۳	۶۶,۱۹
۵۴	۲۰۰,۴۷	۱۹۷۰,۹۳	-۹۳۷,۲۲	۱۵۴	۱۷۶,۷۴	۲۰۳۳,۳۲	-۸۸۴,۰۲	۸۵,۳۵
۵۵	۴۷۹,۸۰	۲۰۳۷,۴۲	-۹۱۷,۰۵	۱۵۵	۴۶۳,۴۰	۲۰۳۹,۵۳	-۹۰۶,۶۴	۱۹,۵۳
۵۶	۷۲۸,۸۸	۲۱۰۲,۳۱	-۸۹۷,۶۳	۱۵۶	۷۱۸,۰۶	۲۰۶۹,۹۴	-۹۱۳,۱۷	۳۷,۵۰
۵۷	۸۹۸,۶۰	۲۱۶۱,۸۹	-۸۶۸,۶۹	۱۵۷	۸۹۲,۱۳	۲۱۰۶,۰۷	-۸۹۸,۹۰	۶۳,۸۰

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 ابزار دقیق می‌باشد، و همچنین به دلیل سهولت اجرا و سرعت سیستم پیشنهادی در کنار قابلیت دستیابی به دقت‌های زیر یک میلیمتر در جابجایی‌ها، به‌عنوان یک روش ایده آل برای مانیتورینگ و کنترل کیفیت اتومبیل معرفی می‌گردد. از سایر مزایای این روش می‌توان 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 اندازه‌گیری در اتومبیل‌های نامنظم و پیچیده با درجه آزادی^۲ 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

آنالیزهای 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 و یا 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

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 می‌توان ۱ میلیمتر متصور بود. به بیان دیگر، با توجه به سرشکنی ترکیبی، مقدار جابجایی‌های 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^۱ RMSE (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
میانگین سه بُعد	۰.۴۵۳۰

سرعت برداشت مشاهدات 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،

² Degree Of Freedom

¹ Root Mean Square Error

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 به صورت همزمان، بتوان به صورت 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 برد کوتاه در قالب سیستم معرفی شده برای ارزیابی کیفی 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.

غیر متریک (فوجی فیلم)، تارگت‌های بازتابنده کد دار و معمولی، شبکه طراحی شده برای قرارگیری دوربین‌ها و تارگت‌ها، میله‌های 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 می‌گیرد 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 سیستم‌های ابزار دقیق در یک پروژه را مرتفع می‌کند. این روش مستقل از هرگونه مشاهده خارجی است و سرعت بالا در پیاده‌سازی و انجام مشاهدات، امکان ارزیابی‌های سریع

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. Paloušek, and J. Brandejs, "Method of photogrammetric measurement automation using TRITOP system and industrial robot," *Optik*, vol. 124, p. 3705–3709, 2013.

- [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. Saadatesht, "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-Topographic Photogrammetry," *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, vol. 50, no. 8, pp. 1115-1126, Aug. 1984.



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

Farid Esmacili ^{*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.