عنوان به فارسی:

اندازه گیری مسطح بودن نوار فلزی با استفاده از روش مثلث سازی لیزر

عنوان به انگلیسی:

Metal Strip Flatness Measurement using Laser Triangulation Method

بیان مسئله:

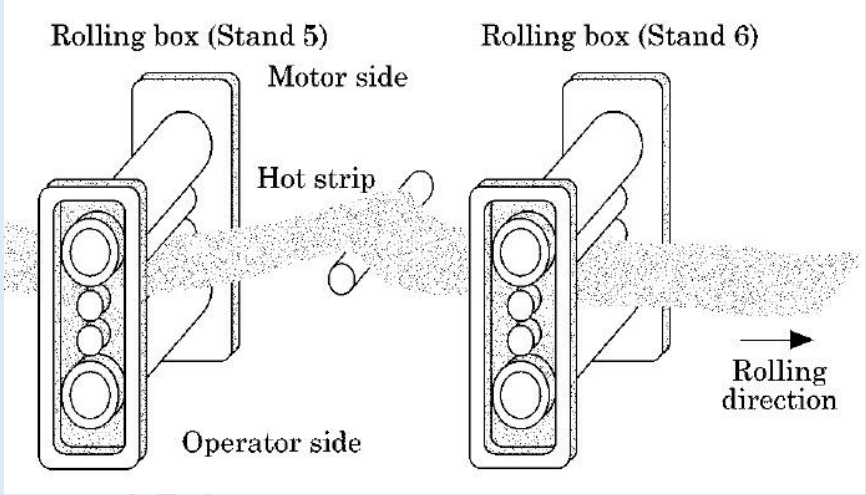
بازسازی سه بُعدی[1] یکی از برجسته ترین زمینه های تحقیقاتی در بینایی ماشین است. طیف گسترده ای از نرم افزار های بازسازی سه بُعدی، ناوبری مستقل[2] را پوشش می دهد. راهنمایی (هدایت)[3]، بازرسی و کنترل کیفیت، مهندسی معکوس، تشخیص شی، تصویربرداری پزشکی و دیجیتال سازی شکل، از جمله موارد دیگر آن است. هدف بازسازی سه بعدی ایجاد یک مدل سه بعدی از اشیای یک صحنه به کمک یک یا چند تصویر دو بعدی از صحنه هست. یکی از کاربردهای اصلی بازسازی سه بُعدی، به دست آوردن اطلاعات ابعادی اشیا یک صحنه است که معمولا شامل اندازه گیری شکل سه بُعدی است. از جمله مهمترین محصولات تولیدی در صنعت فولاد، محصولات مسطح است. این محصولات نوارهای طولانی از فولاد هستند که پس از تولید به طور معمول به صورت کویل[4] جمع آوری می شوند. از محصولات مسطح در صنایع برای تولید محصولات مختلف استفاده می شود، از قوطی ها گرفته تا اتومبیل ها و غیره. در فرایند تولید محصولات مسطح، دو مشکل اصلی کیفیت که به وجود می آیند عبارتند از: مشکل تاج[5] (ضخامت غیر یکنواخت نوار) و نقص پهنایی[6] که این سیستم بازسازی سه بُعدی برای آن ساخته شده است.

صنایع به طور مستمر سعی در تولید محصولات خود با کیفیت برتر دارند. در نتیجه آن ها مواد با کیفیت بالاتر و بدون نقص را می طلبند. گروه اتوماسیون تحقیق و توسعه کارخانه فولاد CSI Planos در سال های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴

[1] 3d Reconstruction
[2] Independent Navigation
[3] Guidance
[4] coil
[5] Header Defect
[6] Width Defect

میلادی به منظور افزایش کیفیت محصولات مسطح خود، با همکاری گروه علوم و مهندسی کامپیوتر دانشگاه اویدو[1]، مطالعات مقدماتی را در مورد مشکل بازرسی همواری[2] انجام داد و توسعه نمونه اولیه صنعتی برای سیستم اندازه گیری همواری در زمان واقعی را آغاز کرد [۳-۱]. هدف اصلی این سیستم بررسی لحظه ای نوار فلزی در طی مراحل ساخت آن برای شناسایی، اندازه گیری و کمک به از بین بردن نقص پهنایی به منظور افزایش کیفیت محصولات مسطح است.

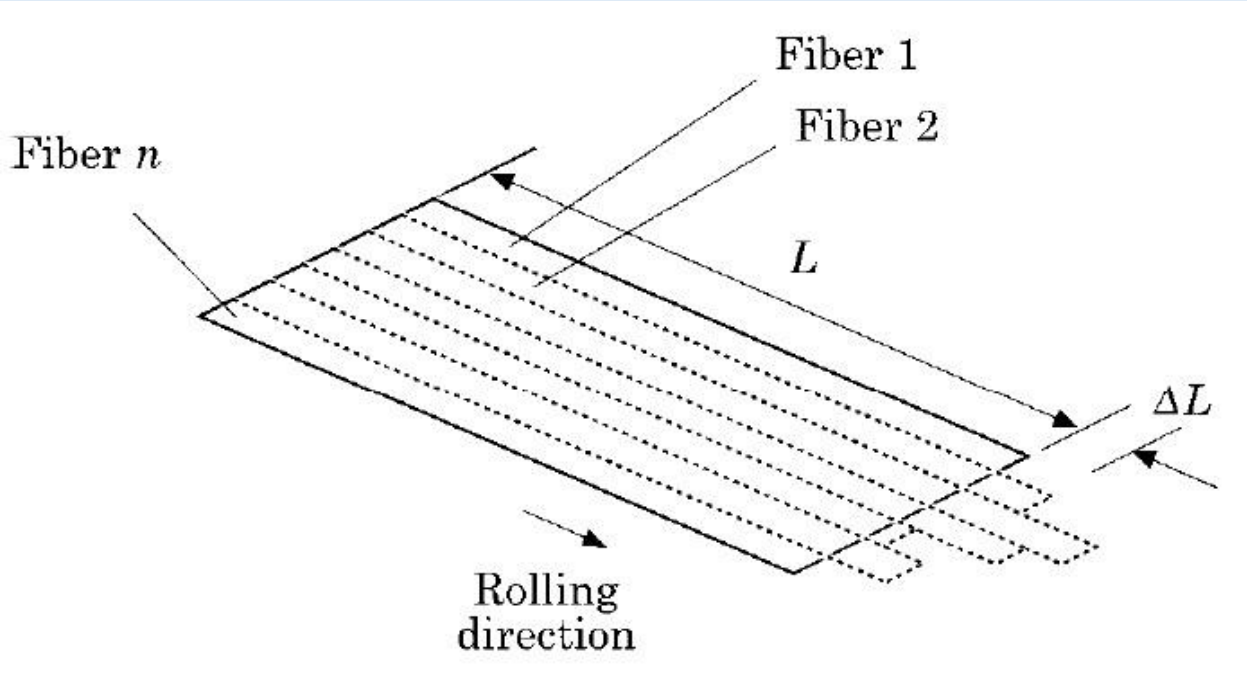
نوارهای تخت از قطعات بزرگ فولادی به نام اسلب[3] به دست می آیند. این اسلب ها در کوره گرم می شوند و وقتی به دمای بالاتر از ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد رسیدند، آن ها از کوره خارج می شوند و از جفت استوانه هایی عبور می کنند که غلطک[4] نامیده می شوند. این غلطک ها فولاد گرم را فشار می دهند، به طوری که نوار به ضخامت دلخواه برسد و طول آن افزایش یابد [۴]. در شکل (۱)، دو مجموعه غلطک و عملکرد آن ها نشان داده شده است.



شکل (۱) روند تولید نوار فلزی [۴]

غلطک های مورد استفاده برای فشار دادن مواد هرگز کامل نیستند، بنابراین با قدرت یکسان به کل قسمت عرضی نوار فشار نمی آورند. در نتیجه، افزایش طول در تمام نقاط مقطع نوار یکسان نخواهد بود. بنابراین، اگر این نوار به عنوان مجموعه ای از چندین الیاف مجاور هم در نظر گرفته شود، اعمال نیروهای مختلف به هر الیاف طولی افزایش های متفاوتی در طول، یک مقدار ΔL برای هر الیاف ایجاد می کند. با این حال، تمام الیاف یک نوار در یک سطح با طول ثابت محصور شده اند که L است [۵] و شکل (۲) این اثر را نشان می دهد.

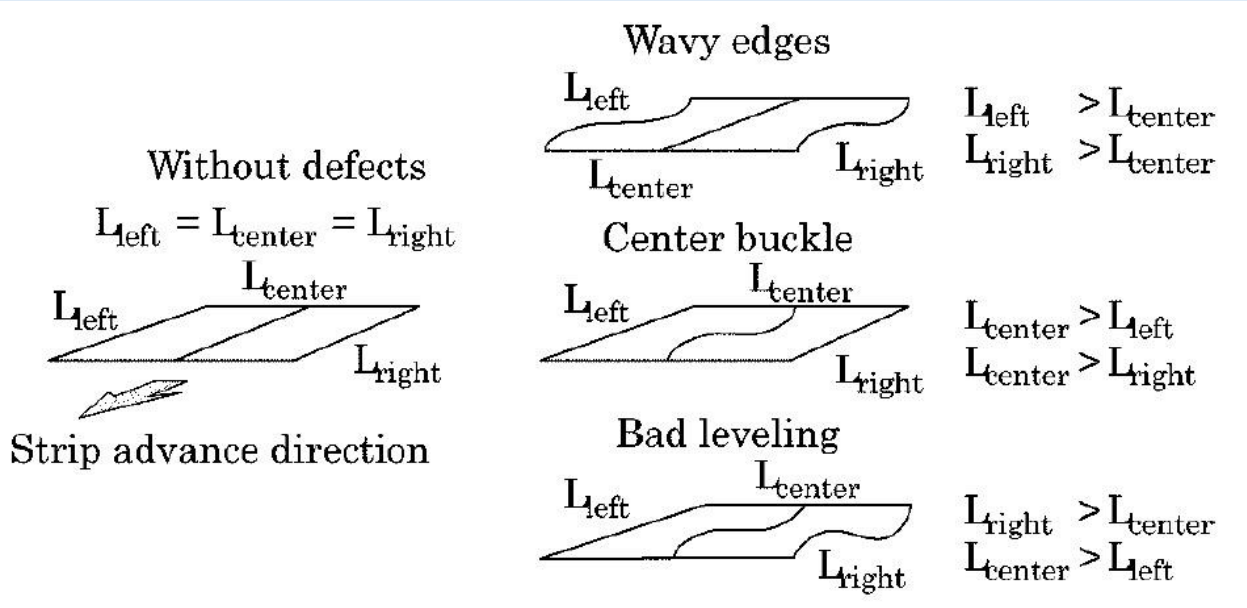
[1] University of Oviedo
[2] Flatness
[3] slabs
[4] rolls



شکل (۲) منشا نقص همواری: طول های مختلف الیاف محصور در یک سطح با طول ثابت [۴]

این تفاوت در اندازه الیاف یک ساختار درونی در نوار فلزی ایجاد می کند که حالتی را در مواد ایجاد می کنند که اصطلاحا به آن اثر نقص نوار فلزی می گویند. این نقص ها بسته به شکل غلطک های تولید کننده آن ها، ممکن است چند نوع باشد. اگر غلطک ها فشار بیشتری در لبه های نوار نسبت به مرکز ایجاد کنند، نقص هایی ایجاد می کنند که لبه های دارای موج[1] نامیده می شوند. با این حال، اگر فشار در مرکز نوار بیشتر از لبه ها باشد، نقص هایی ایجاد می شوند که کمانش مرکزی[2] نامیده می شوند. همین طور اگر نیروها در سراسر خط تماس نوار- غلطک متفاوت باشند، باعث تولید همواری های بد[3] می شوند [۵]. این سه نوع نقص در شکل (۳) نشان داده شده است.

[1] Wave Edge
[2] Center Buckle
[3] bad labeling



شکل (۳) سه نوع نقص نوار فلزی [۴]

نقص های همواری با شاخص هایی به نام I-units اندازه گیری می شوند. این I-units ها با مقایسه طول دو الیاف در هنگام نورد نوار به دست می آیند. یک الیاف به عنوان مرجع، به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود و به طور معمول، الیاف مرکزی و دیگری با آن مقایسه می شوند. می توان مشکل اندازه گیری همواری بودن را به اندازه گیری طولی نوار در هنگام تولید کاهش داد. با این حال، اندازه گیری طول الیاف به دلیل شرایط محیطی در مکانی که سیستم بازرسی باید در آن قرار داشته باشد، برخی از مشکلات را ایجاد می کند. هنگامی که نوار فلزی آخرین جفت سیلندرهای نورد را ترک می کند، در عرض و ضخامت نهایی، از چندین دوش[1] عبور می کند که در امتداد یک مسیر ۱۰۰ متری قرار دارند و به آن جدول خاموش[2] می گویند. در جدول خاموش، دمای نوار فلزی کاهش می یابد. سرانجام، نوار فلزی توسط کویل گیر[3] گرفته می شود که آن را به یک کویل[4] می چرخاند. نقص های مسطح بودن را می توان در حالی تشخیص داد که ابتدای نوار فلزی، به نام سر[5]، آزادانه در امتداد ناحیه خارج شده حرکت می کند تا زمانی که به کوئل برسد. هنگامی که کویلر سر نوار فلزی را می گیرد، به نظر می رسد نقص به دلیل کشش وارد شده در نوار فلزی از بین می رود. بنابراین بهترین مکان برای تشخیص و اندازه گیری نقص صافی، ایجاد امکان

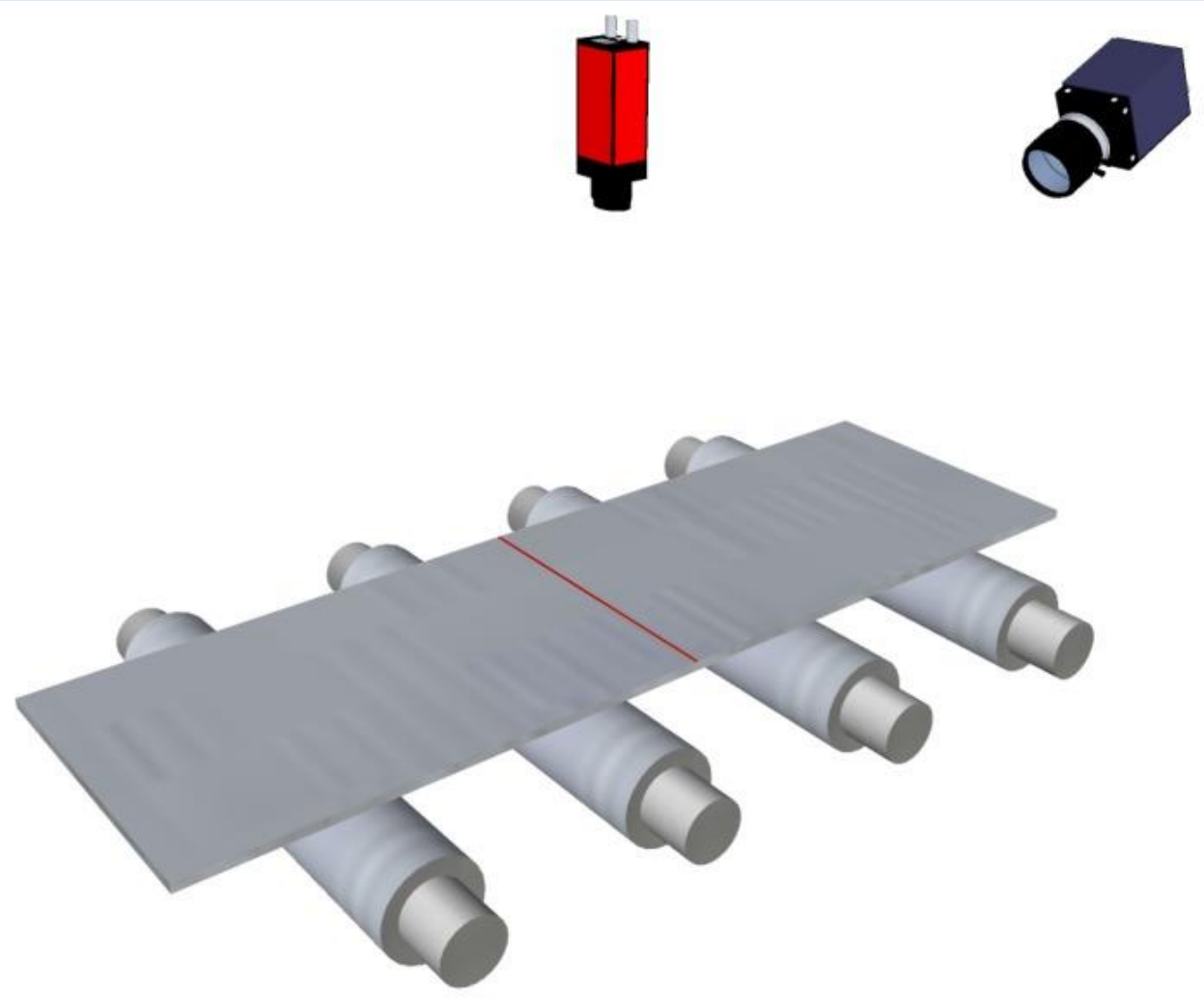
[1] showers
[2] run out table
[3] coiler
[4] coil
[5] head

تولید سیگنال های بازخورد برای اصلاح آن ها بلافاصله بعد از آخرین جفت سیلندرهای نورد است. با این حال، دمای نوار فلزی در این نقطه بیش از ۷۰۰ درجه سانتیگراد است و سرعت آن می تواند به ۱۵ متر بر ثانیه برسد و شرایط اندازه گیری را بسیار نامساعد می کند. علاوه بر این، مقدار زیادی گرد و غبار و بخار وجود دارد. بنابراین، هرگونه تجهیزات اندازه گیری نوری که در این جا نصب شده است، باید توسط پرده هوا محافظت شود تا از گرد و غبار و بخار جلوگیری شود. در اندازه گیری مسطح بودن نوار فلزی باید دو جنبه در نظر گرفته شود [۴، ۵]:

- سیستم باید همیشه نوار فلزی یکسانی را اندازه گیری کند که شامل یک سیستم ردیابی برای جبران اثرات جابجایی های نوار جانبی است.
- طول نمونه نوار فلزی اندازه گیری شده است. تعریف دوره ادغام به اندازه گیری نوار فلزی یا انتخاب طول نمونه بستگی دارد.

مسئله بررسی همواری عمدتا بر اساس اندازه گیری ارتفاع نوار در هر دوره نمونه است. برای اندازه گیری این ارتفاع از روش مثلث سازی نوری و یا همان Laser Triangulation استفاده می شود. در این روش، پرتو لیزر تک رنگ را بر روی سطح نوار فلزی تابانده می شود. این پرتو نور لیزر به لنز دوربین خطی منعکس می شود. بنابراین می توان رابطه ای را بین موقعیت برخورد پرتو لیزر با خط فوتودیود دوربین و ارتفاع نوار فلزی ایجاد کرد. در شکل (۴)، اصل هندسی این روش نشان داده شده است. پرتوی لیزر با زاویه α به سطح نوار می رسد و در همان زاویه منعکس می شود. اگر در نظر گرفته شود که در نقطه A میدان دید عمود بر دوربین است، می توان آن چه را که هنگام افزایش ارتفاع نوار فلزی توسط تغییر طول ΔL اتفاق می افتد، تجزیه و تحلیل کرد [۴، ۵].

www.nn۴e.com – گروه نامیرا



شکل (۴) اصل هندسی برای اندازه گیری مسطح بودن نوار فلزی مبتنی بر مثلث سازی نوری یا لیزری [۵]

وقتی سطح نوار با تغییر طول ΔL ارتفاع خود را افزایش می دهد، پرتوی لیزر به جای نقطه A در نقطه B به نوار فلزی می رسد. این تغییر موقعیت باعث ایجاد جابجایی y در آرایه فوتودیود می شود. از شکل (۴) و با استفاده از روابط مثلثاتی، رابطه بین تغییر ارتفاع نوار فلزی و تغییر مکان پیکسل می بایست با روابط ریاضی محاسبه شود و در این روابط می بایست D که فاصله لنز دوربین تا موقعیت نوار اولیه است و a که زاویه بازتاب است را در نظر گرفت. فاکتور مقیاس k یک ثابت است که نشان دهنده رابطه بین اندازه جسم واقعی و اندازه جسم در آرایه دوربین است. این ثابت به لنز و فاصله دوربین و جسم بستگی دارد [۴، ۵].

اهداف تحقیق:

- ✓ ارائه یک ساختار هندسی بهینه برای اندازه گیری همواری نوار فلزی مبتنی بر Laser Triangulation
- ✓ بررسی لحظه به لحظه نوار فلزی در طی مراحل ساخت آن برای شناسایی، اندازه گیری و کمک به از بین بردن نقص پهنایی به منظور افزایش کیفیت محصولات همواری نوار فلزی
- ✓ بهبود دامنه اندازه گیری نوار فلزی برای میدان دید دوربین جهت تعیین زاویه باریک تر جهت جابجایی جانبی کوتاه تر

فرضیه های تحقیق:

- ✓ تغییر موقعیت پرتوی لیزر در نوار فلزی باعث ایجاد جابجایی در آرایه فوتودیود می شود.
- ✓ اندازه گیری نوار فلزی با رویکرد مثلث سازی پرتوی لیزر به صورت افقی صورت می گیرد و شروع می شود.

سوالات تحقیق:

- ✓ چگونه می توان با روش مثلث سازی لیزری، مسطح بودن نوار فلزی را اندازه گیری کرد؟
- ✓ نقص همواری نوار فلزی چیست و چرا ظاهر می شوند و آن ها چه شکلی هستند؟

www.nn٤e.com – گروه نامیرا

ادبیات و پیشینه تحقیق:

در سال ۲۰۲۰ چنزینگ و همکارانش تشخیص نقص در سطح صفحات نوارهای فلزی با استفاده از روش تفاضل مثلث سازی لیزر ارائه شده است. در این مطالعه یک روش تفاضل مثلث سازی لیزر مبتنی بر تشخیص آنلاین تغییرات در ضخامت دیواره نوارهای فلزی برای شناسایی نقص سطح (سوراخ ها و نازک شدن) توسعه داده شده است. این سیستم یکپارچه یک جفت کاوشگر مثلث سازی لیزر را برای گرفتن داده های سطح نوارهای فلزی استفاده شده است. برای جبران خطاهای اندازه گیری ناشی از انحناهای نامنظم سطح، یک مدل خطای تجربی بر اساس ارزیابی خطا ایجاد شده است.

در سال ۲۰۲۰ یائو و همکارانش روش جدید اندازه گیری مثلث سازی لیزر برای مشخصات روتور پیچ[1] تحت محدودیت های چند عاملی ارائه شده است. به منظور دستیابی به کنترل بهینه فرآیند روتور پیچ، یک روش اندازه گیری جدید با استفاده از مثلث سازی لیزر تحت محدودیت های چند عاملی برای دستیابی به اندازه گیری آنلاین مشخصات روتور پیچ معرفی شده است. این روش شامل یکپارچه سازی یک سیستم حرکتی ۴ محوره است که برای تنظیم پروب لیزر استفاده می شود و با یک حسگر جابجایی لیزر (LDS[2]) برای اندازه گیری مشخصات روتور پیچ استفاده می شود. در مرحله اول، اثر موقعیت پرتوی لیزر بر دقت اندازه گیری به صورت تجربی در رابطه با مدل جبران خطای LDS بهبود یافته تجزیه و تحلیل شد. سپس، با توجه به مشخصات پروفیل های روتور، یک الگوریتم برنامه ریزی اندازه گیری مسیر اندازه گیری لیزر برای مشخصات روتور تحت محدودیت های چند عاملی ایجاد شد. سرانجام، مطالعه مقایسه بین اندازه گیری تماس سنتی به نام P65 و اندازه گیری پیشنهادی نشان می دهد که روش پیشنهادی نه تنها مزایای اندازه گیری تماس سنتی را حفظ کرده است، بلکه عملکرد خوب و دقت اندازه گیری بالایی را نیز نشان داده است.

در سال ۲۰۲۰ ژائو و همکارانش یک روش استاتیک جدید و کم هزینه برای کالیبراسیون سیستم های مثلث بندی لیزر ارائه شده است. برای دستیابی به دقتی مطلوب در ساخت چنین سیستمی معمولا در جایی که پارامترهای سیستم پیدا یا اصلاح می شوند، نیاز به کالیبراسیون دارد. روش های کالیبراسیون سنتی نیاز به استفاده از حرکت دقیق یا جسم سنج با دقت بالا دارند که با هزینه ساخت اضافی و تجهیزات / دستگاه های کمکی همراه هستند و از این رو

[1] screw rotor
[2] laser displacement sensor

هزینه کلی را افزایش می دهند و همچنین از برنامه های گسترده جلوگیری می کنند، به عنوان مثال، به دلیل تحقق شرایط محیطی ممکن است افزایش هزینه هایی وجود داشته باشد. در این پژوهش، یک روش استاتیک جدید برای کالیبراسیون یک سیستم بدون نیاز به حرکت یا یک جسم معیار با دقت بالا پیشنهاد شده است. روش به تهیه داده ها در مورد هدف ترکیب مقیاس دار با برآورد هندسی به عنوان شاخص کیفیت متکی است. بر اساس این روش، سه نسخه از نمونه اولیه ارزان قیمت ساخته شد که به دقت زیر میلی متر دست یافت. اگرچه دقت برای اندازه گیری که اغلب در ساخت پانل های بزرگ استفاده می شود کافی است، اما با کار اضافی که قرار است در آینده انجام شود، دقت بالاتری حاصل می شود. روش پیشنهادی بین دقت و هزینه معامله می کند. این امر با آزمایش اندازه گیری یک قسمت پانل کوچک به عنوان مطالعه موردی-کاربردی دنبال شد. امکان پذیری اثبات شده روش پیشنهادی پتانسیل توسعه کم هزینه، سیستم داخلی خطی (بزرگ یا کوچک) برای بازرسی قطعات ورق فلزی در حین ساخت، به ویژه ساخت اجزای پانل، از جمله از ورق های فلزی و مواد کامپوزیت است.

در سال ۲۰۱۸ لی و همکارانش در یک تحقیق متفاوت با اهداف چندگانه، تحلیل خطا و تصحیح رنگ در اندازه گیری مثلث سازی لیزر ارائه شده است [۹]. این مقاله با هدف بهبود دقت در اندازه گیری مثلث سازی لیزر، تجزیه و تحلیل خطای ناشی از رنگ های مختلف یک سطح اندازه گیری را پیشنهاد می کند و یک روش جبران سازی را پیشنهاد می کند. با بررسی مبانی مثلث سازی لیزر، خطای رنگ از طریق مدل Phong به دست می آید، در حالی که رابطه بین خطای اندازه گیری و رنگ از طریق آزمایش به دست می آید. بر اساس نتایج فوق، یک روش جبران خطای رنگ ارائه شده است که با توجه به خطای رنگ های مختلف، کتابخانه خطاهای رنگی تولید می کند. بنابراین، همبستگی بین خطا و رنگ سطح اندازه گیری نیز محاسبه می شود. داده های تجربی نشان می دهد که این روش می تواند خطا را به ۱۰٪ کاهش دهد و خطای اندازه گیری رنگ را تا ۹۰ μm حفظ کند. علاوه بر این، این روش برای اندازه گیری سطح با رنگ های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است.

در سال ۲۰۱۹ تو و همکارانش یک روش جدید برای مدل سازی اندازه گیری هندسی مثلث بندی جهت اسکن همزمان در مسیر نور باز ارائه شده است. برخلاف بیشتر کارهای اخیر موجود در این زمینه، مختصات سه بُعدی هدف از مدل هندسی استدلال می شود که شامل ۱۴ پارامتر سیستم است. علاوه بر این، می توان عملکرد دقت سیستم را تجزیه و تحلیل کرد و اهمیت ضخامت آینه چرخان را تایید کرد. در این آزمایش، یک سیستم اسکن همزمان ایجاد

شده است. نتیجه آزمایش نشان می دهد که مقدار عدم قطعیت اندازه گیری در فاصله ۰,۵ میلی متر ۰,۷۵ میلی متر و در فاصله ۵ متر ۶,۶۸ میلی متر است. انحرافات استاندارد از نقطه اندازه گیری به صفحه اتصالات در فاصله ۰,۵ متر و ۵ متر به ترتیب ۱,۱۰ میلی متر و ۱۹,۷۳ میلی متر است.

در سال ۲۰۱۵ پوردوز و همکارانش اندازه گیری سه بُعدی اجسام در حرکت بر اساس مثلث سازی لیزر در سطوح چندگانه ارائه شده است. در این مقاله توسعه سیستم های اندازه گیری سه بُعدی مبتنی بر لیزر و کاربردهایی که شامل سه قسمت مختلف در حال حرکت است مورد نظر واقع شده است که شامل یک مفصل زانو در هنگام حرکت پا، تغییر شکل توراکو شکم و پشت در هنگام تنفس و شکل پا در هنگام راه رفتن است. سیستم اول مبتنی بر حسگر تجاری Kinect است، در حالی که سیستم دوم و سوم مبتنی بر روش مثلث سازی صفحه ای لیزر چند منظوره ساخته شده است. در صورت اندازه گیری شکل اطراف شی از چند ماژول اندازه گیری به طور همزمان استفاده می شود. در این موارد یک اصل تعدیل رنگ به منظور جلوگیری از تداخل بین ماژول های اندازه گیری اجرا شد. سیستم های اندازه گیری ارائه شده در داخل بدن مورد ارزیابی قرار گرفتند و قادر به اندازه گیری در زمان واقعی هستند، در حالی که تجزیه و تحلیل دقیق و غیرتهاجمی تغییر شکل شکل را امکان پذیر می کند که دارای پتانسیلی در تشخیص بالینی، کمک به بیمار یا ایجاد مدل های جدید کفش برای راه رفتن است.

در سال ۲۰۱۸ دونادلو و همکارانش روش مثلث سازی لیزری کواکسیال برای نظارت بر ارتفاع در رسوب فلز لیزر (LMD[1]) مورد مطالعه قرار گرفته است. کنترل پارامتر ارتفاع نقش مهمی در روند رسوب فلز لیزر دارد. عدم تطابق بین افزایش ارتفاع رسوب و سرعت رشد فرآیند می تواند باعث ایجاد عدم دقت هندسی و همچنین برخورد شود. در این مقاله روشی مبتنی بر مثلث سازی برای نظارت در خط ارتفاع روی سیستم رسوب فلز لیزر متشکل از یک سر رسوب هم محور، یک ربات انسان نما و یک لیزر فیبر ارائه شده است. دستگاه اندازه گیری با استفاده از یک پرتوی لیزر کاوشگر در داخل سر رسوب گذاری اجرا می شود که بسته به فاصله ایستادن، از طریق نازل به صورت کواکسیال پرتاب می شود و مستقیما روی استخر مذاب متمرکز می شود. موقعیت لکه پروب از طریق یک دوربین کواکسیال به دست می آید و در مقادیر نسبی ارتفاع، تبدیل می شود. این سیستم برای اندازه گیری فاصله بیش از

[1] laser metal deposition

حدود میلی متر در طول رسوب فولاد ضد زنگ AISI 316L نشان داده شده است. این روش مستقل بودن از جهت رسوب را برای انعطاف پذیری بالا امکان پذیر می سازد.

اندازه گیری سطح ذوب برای رشد کریستال CZ با استفاده از سیستم اصلاح مثلث سازی لیزر در سال ۲۰۱۷ زیانگ و همکارانش ارائه شده است. این سیستم برای غلبه بر کمبود سیستم سنتی مثلث سازی لیزر ناشی از سپر حرارتی، از لیزر خطی استفاده می کند. خط لیزر پیش بینی شده به سطح ذوب و پایین سپر حرارتی، دو میله پراکنده تولید می کند که توسط دوربین گرفته می شوند. رابطه بین فاصله پیکسل دو میله و سطح ذوب مطالعه شده است. یک روش بهینه سازی شده برای شناسایی نوار لیزری تطبیقی برای اندازه گیری سریع و دقیق سطح مذاب استفاده می شود. سه آزمایش برای نشان دادن مزایای سیستم انجام شده است. آزمایش کالیبراسیون نشان می دهد که این سیستم دارای وضوح اندازه گیری ۰,۰۷۵۵ میلی متر است. آزمایش دقت اثبات می کند که سیستم عملکرد دقیق اندازه گیری دارد و آزمایش مقاومت نشان می دهد که سیستم با استفاده از فیلتر متوسط کوتاه شده قابل اعتماد و محکم است.

روش گردآوری اطلاعات:

- ✓ مطالعه کتاب ها، مقالات و پایان نامه های معتبر در حوزه همین تحقیق و در کل مطالعه از نوع کتابخانه ای و جمع آوری اطلاهات نیز به صورت مشاهده ای است.

روش تجزیه و تحلیل اطلاعات:

- ✓ استفاده از MATLAB برای پردازش تصاویر و بازسازی سطح

www.nnze.com

مراجع

[1] D. F. Garcia, M. A. Del Rio, J. L. Diaz, and F. J. Suarez. Flatness defect measurement system for steel industry based on a real-time linear image processor. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Volume 3, 1993, Pages 331-336.

[2] D. F. Garcia, M. Garcia, J. L. Diaz, J. R. Arias, J. Garcia. Real-time flatness sensor based on a linear-vision multiprocessor system. 20th International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation (IECON'94), Volume 2, 1994, Pages 872-877.

[3] M. Garcia, D. F. Garcia, J. L. Diaz, and F. J. Suarez. Flatness defects detection in rolling products with real-time vision system. 2nd International Conference on Intelligent Systems Engineering (ISE 94), 1994, Pages 407-412.

[4] D. F. Garcia, M. Garcia, F. Obeso, and V. Fernandez. Real-Time Flatness Inspection System for Steel Strip Production Lines. Real-Time Imaging, Volume 5, Issue 1, 1999, Pages 35-47.

[5] Molleda J., Usamentiaga R., and García D. F. On-line flatness measurement in the steelmaking industry. Sensors (Basel, Switzerland), Volume 13, No. 8, 09 Aug 2013, Pages 10245-10272.

[6] Chengxing Wu, Baijin Chen, and Chunsheng Ye. Detecting defects on corrugated plate surfaces using a differential laser triangulation method. Optics and Lasers in Engineering, Volume 129, June 2020.

[7] Bin Yao, Zhiqin Cai, Jie Lu, and Binqiang Chen. Novel laser triangulation measurement method for screw rotor profile under multi-factor constraints. Measurement, Volume 152, February 2020.

[8] Yihui Zhao, Taufik Bin Mohamed Supri, Song Yang, and Yi Qin. A new static method of calibration for low-cost laser triangulation systems. Measurement, Volume 156, May 2020.

[9] Sansi Li, Xinting Jia, Mengwei Chen, and Yingping Yang. Error analysis and correction for color in laser triangulation measurement. Optik, Volume 168, September 2018, Pages 165-1730.

[10] Dawei Tu, Pan Jin, and Xu Zhang. Geometrical Model of Laser Triangulation System Based on Synchronized Scanners. Mathematical Problems in Engineering, Volume 2019, 2019.

[11] Primož Poredoš, Klemen Povsic, Boštjan Novak, and Matija Jezeršek. Three-Dimensional Measurements of Bodies in Motion Based on Multiple- Laser-Plane Triangulation. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, Volume 35, Issue 2, 2015, Pages 53-61.

[12] Simone Donadello, Maurizio Motta, Ali Gökhan Demir, and Barbara Previtali. Coaxial laser triangulation for height monitoring in laser metal deposition. Procedia CIRP, Volume 74, 2018, Pages 144-148.

[13] Senwei Xiang, Feng Pan, Ke Xiang, and Xuanyin Wang. Melt level measurement for the CZ crystal growth using an improved laser triangulation system. Measurement, Volume 103, June 2017, Pages 27-35.

www.anse.com