

اندازه‌گیری ابعادی قطعات صنعتی با دقت کسری از میلیمتر به صورت آن لاین با تکنیک ماشین بینایی

تهیه و تنظیم: شرکت دیده بنیان پارس

info@didehbonyan.com

چکیده

کنترل ابعادی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در کنترل کیفیت، نیازمند وسایلی است که بتواند با سرعت و دقت لازم اندازه‌های مورد نیاز را استخراج نماید. کنترل ابعادی اشکال پیچیده چیزی نیست که بتوان با روش‌های قدیمی مانند گیج گذاری یا حتی استفاده از سنسورهای الکترونیکی به سادگی و سرعت بالا امکان‌پذیر گردد. تکنیک‌های ماشین بینایی و پردازش تصویر علم جدیدی است که کنترل کیفی خصوصیات ظاهری جسم مانند اندازه، رنگ، شکل و ... را با دقت و سرعت بالا مهیا می‌نماید. در این مقاله پس از بررسی مختصر تجهیزات مورد نیاز برای پیاده‌سازی یک سامانه کنترل کیفیت مبتنی بر بینایی ماشین، به راهکارها و تجهیزات مورد نیاز برای رسیدن به دقت و اعتماد بالا در سامانه پرداخته می‌شود. این راهکارها و تجهیزات شامل مباحث اپتیکی، نورپردازی، اخذ تصویر و نیز نرم‌افزاری می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ماشین بینایی - پردازش تصویر - کنترل کیفیت - کنترل ابعادی

۱- مقدمه

خواندن اطلاعات و تصمیم‌گیری بر روی آن‌ها را بر عهده داشتند.

۲- شرح علمی و عملی سیستم

۱-۲- الزامات اپتیکی

موفقیت سیستم‌های بینایی ماشین در اندازه‌گیری ابعادی هنگامی به صورت خاص آشکار می‌شود که با سیستم‌های باکیفیت اپتیکی یکپارچه گردد.

طراحان سیستم‌های بینایی ماشین در هنگام استفاده از سیستم‌های اپتیکی معمولی با مشکلاتی روبرو بودند که دقت اندازه‌گیری و تکرارپذیری آن را تحت تأثیر قرار می‌داد. مهم‌ترین این عوامل عبارتند از:

- ۱) بزرگ‌نمایی غیرثابت با توجه به فاصله جسم از لنز
- ۲) انحرافات تصویری (image distortion)
- ۳) ایراد ناشی از پرسپکتیو
- ۴) عدم کنتراست مناسب برای تشخیص مطمئن لبه‌ها. [۲]

نرم‌افزارهای پردازش تصویر برای آنکه بتواند به دقت‌های ابعادی بالاتری دست یابد نیازمند تصاویری با کنتراست بالا و نیز حداقل انحراف و از ریخت افتادگی (Distortion) در ساختار تصویر اخذ شده می‌باشند.

همچنین تأثیرات پرسپکتیو باعث تغییر در بزرگ‌نمایی در قسمت‌هایی از جسم می‌شود که دارای فاصله مختلفی نسبت به لنز قرار دارند.

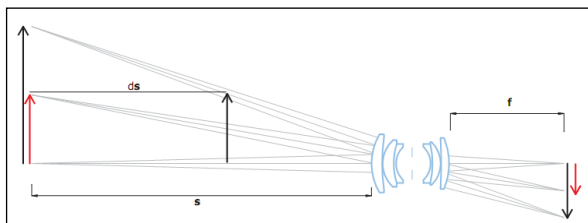
تأثیر پرسپکتیو در اندازه‌گیری ابعادی اجزائی که به طور دقیق در

پیشرفت‌های اخیر در صنعت و مطرح شدن هر چه گسترده‌تر مباحث کیفیت و کیفیت‌گرایی از یک طرف و توسعه روزافزون فناوری‌های نوین به خصوص در زمینه‌ی ابزار دقیق از طرف دیگر، سبب شده است تا تلاش مضاعفی برای بکارگیری روش‌های مکانیزه برای افزایش کیفیت محصول صورت گیرد. در ساخت و تولید مدرن تجهیزات بازرسی و آزمایش غالباً در ارتباط مستقیم با فرآیند تولید قرار می‌گیرند و بدین ترتیب مستقیم و یا غیرمستقیم بر کیفیت محصول تولیدی اثر می‌گذارند. [۱] تکنیک‌های ماشین بینایی و پردازش تصویر این امکان را مهیا کرده‌اند تا بتوان ویژگی‌های مختلف ظاهری مانند رنگ، اندازه، شکل و الگو را به صورت خودکار و بدون درنگ، با دقت بالا تشخیص داد. این تکنیک‌ها توانایی بالایی را برای کاربردهای کنترل ابعادی، به عنوان یکی مهم‌ترین پارامترهای تضمین کیفیت محصولات تولیدی، دارا می‌باشد.

در این مقاله تلاش شده با معرفی و ارائه راهکارهای مناسب، مشکلات و راه‌حل‌های موجود در زمینه کنترل کیفیت ابعادی، بررسی گردد. با پیشرفت‌های اخیر در زمینه بینایی ماشین، قابلیت اعتماد و تکرارپذیری این سیستم‌ها به حدی رسیده است که می‌توان بر توانمندی‌ها و قابلیت‌های این سیستم‌ها تکیه کرد و این سیستم‌ها می‌تواند جایگزین روش‌های قدیمی کنترل کیفیت ابعادی مانند گیج‌ها، شابلون‌ها و نیز پروفایل پروژکتورهایی شود که نیروی انسانی وظیفه

از یک پیچ ۱۰۰ میلیمتری و وضوح و دقت اندازه‌گیری توسط یک لنز Telecentric (بالا) و یک لنز معمولی (پایین) به نمایش در آمده است.

لنزهای معمولی بزرگنمایی متغیری را در شرایط مختلف ارائه می‌کنند به عنوان مثال هنگامی که جسم جابجا می‌شود، اندازه تصویر بدست آمده از جسم بر اساس فاصله جسم تا لنز تغییر می‌کند، به گونه‌ای که اشیاء دورتر، کوچک‌تر و اشیاء نزدیک‌تر، بزرگ‌تر به نظر می‌آیند.

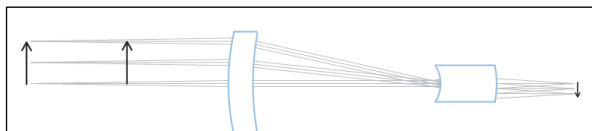


شکل ۳: نمایش تأثیر فاصله جسم بر ابعاد جسم در لنزهای معمولی

مزیت لنزهای Telecentric این است که اندازه تصویر با جابجایی جسم بدون تغییر باقی می‌ماند. البته این خاصیت در محدوده خاص از فاصله جسم تا لنز وجود خواهد داشت که آن را عمق دید (Depth of Field) یا Telecentric range می‌گویند.

این خاصیت به واسطه مسیر خاص شعاع‌های نوری در سیستم نوری روی می‌دهد. به این صورت تنها شعاع‌های نوری از جسم، اخذ می‌شوند که به صورت موازی با محور اصلی سیستم اپتیکی سیر می‌کنند. به همین دلیل قطر لنز جلویی حداقل باید برابر یا بزرگ‌تر از قطر ناحیه مورد نظر باشد.

این اثر اپتیکی از قرارگیری روزنه دریافت نوری، دقیقاً در نقطه کانونی لنز جلویی سیستم اپتیکی حاصل می‌شود، به گونه‌ای که نوری که از روزنه دیافراگم دریافت می‌شود همانند تصویر مجازی اشیایی است که در بینهایت قرار دارند.



شکل ۴: در یک لنز Telecentric کثیر شعاع‌های نوری به صورت موازی سیر می‌کنند

مفهوم Telecentric Depth یا Telecentric Range عموماً به عمقی از فاصله اطلاق می‌شود که وضوح و بزرگنمایی در آن عمق ثابت ماند.

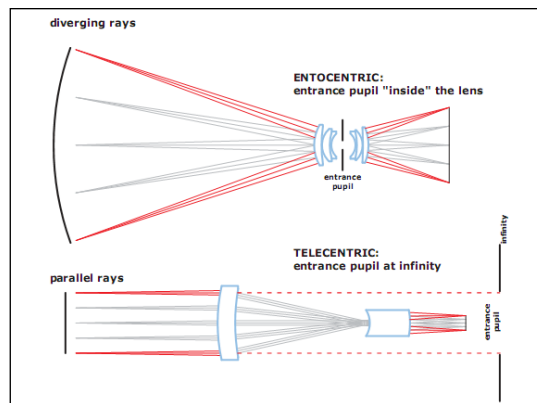
با توجه به اینکه قطر لنز جلویی بنزهای Telecentric حداقل باید برابر یا بزرگ‌تر از قطر ناحیه مورد نظر برای اندازه‌گیری باشد این بنزها اصولاً بزرگ‌تر، سنگین‌تر و همچنین گران‌قیمت‌تر از لنزهای عمومی هستند.

۲) از فرم افتادگی کم (Distorsion)

از فرم افتادگی تصویر یکی از مشکلاتی است که می‌تواند باعث خدشه‌دار کردن دقت اندازه‌گیری شود. حتی در بهترین سیستم‌های اپتیکی اجرا شده نیز امکان وجود اما ریخت افتادگی‌های تصویری وجود دارد، وقتی که حتی یک پیکسل تفاوت ما بین تصویر درست و تصویر مورد

جلوی دوربین قرار نگرفته‌اند و نیز اجسامی که پیچیدگی‌های سه بعدی در شکل آن‌ها وجود دارد می‌تواند دقت اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار دهد.

در این میان لنزهای Telecentric یک گزینه بسیار مفید برای اندازه‌گیری ابعادی مبتنی بر پردازش تصویر می‌باشد. لنزهای Telecentric با کاهش و یا حذف این مشکلات توانسته است به عنوان یک مهره کلیدی برای پیاده‌سازی و توسعه سیستم‌های اندازه‌گیری با دقت بالا تبدیل گردد.

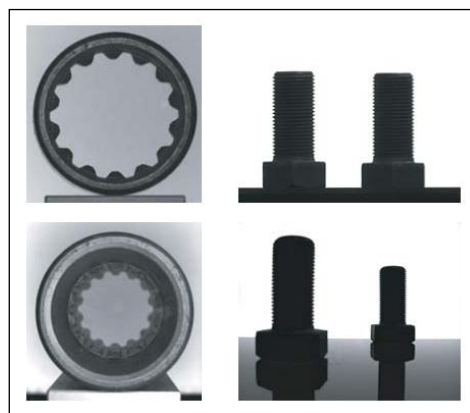


شکل ۱: اصول کار دو نوع لنز معمولی و تله سنتریک

در زیر به توضیح آنکه چگونه لنزهای Telecentric باعث کاهش یا حذف این ایرادات می‌شود، پرداخته خواهد شد:

۱) ثبات در بزرگنمایی

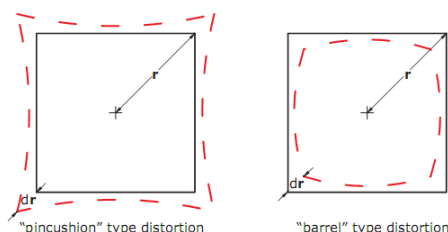
در بسیاری از کاربردهای اندازه‌گیری یک نمای عمود از جسم مورد نیاز است تا یک اندازه‌گیری خطی صحیح صورت گیرد. در بسیاری از موارد قطعات مکانیکی نمی‌تواند در جای صحیح خود در جلوی دوربین قرار گیرد (برای مثال به دلیل ارتعاشات) یا شکل قطعه بر گونه‌ای است که اندازه‌گیری باید در عمق‌های مختلفی صورت گیرد و یا این که ضخامت جسم (و در نتیجه سطح مورد بررسی) متغیر خواهد بود. در نتیجه یک سیستم پردازش تصویر نیازمند رسیدن به ارتباط دقیق و قاطع ما بین ابعاد در تصویر اخذ شده و ابعاد واقعی جسم می‌باشد.



شکل ۲: در شکل‌های سمت چپ، تصویر بدست آمده دیواره داخلی یک جسم سیلندری شکل، توسط یک لنز Telecentric (بالا) و یک لنز معمولی (پایین) به نمایش در آمده است. در شکل‌های سمت راست، تصویر بدست آمده

نیاز وجود داشته باشد.

از ریخت افتادگی (Distortion) به صورت درصد تفاوت مابین فاصله بین یک نقطه از تصویر تا مرکز آن تصویر، در یک تصویر دارای انحرافات از ریخت افتادگی و فاصله همان دو نقطه در یک تصویر بدون انحراف تعریف می‌شود. از ریخت افتادگی دایره‌ای مثبت را، از ریخت افتادگی بالشتکی (pincushion) و منفی آن را، از ریخت افتادگی بشکهای (barrel) نیز می‌گویند. دو نوع از ریخت افتادگی در شکل ۷ نشان داده شده است.

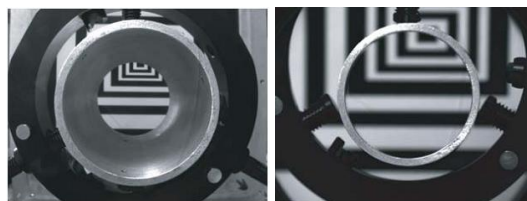


شکل ۷: انواع از ریخت افتادگی دایره‌ای

سیستم های اپتیکی عمومی از ریخت افتادگی ای در بازه‌ی چند درصد تا چند ده درصد را نشان می‌دهند که این کار اندازه‌گیری را به طور قابل توجهی دشوار می‌نماید. این حد انحراف شاید در مصارفی مانند سیستم ها امنیتی با مصارف عمومی بینایی ماشین مشکلی ایجاد نکند ، ولی در کاربرهای اندازه‌گیری ابعادی قابل پذیرش نیست. چشم انسان قادر به حذف انحرافات بین ۱ تا ۲ درصد باشد. لنزهای Telecentric باکیفیت، اصولاً درجه از ریخت افتادگی بسیار کم را در حدود 0.1% نشان می‌دهد.

۳) محدودسازی خطای پرسپکتیو:

هنگام استفاده از لنزهای معمولی ، برای تصویربرداری یک جسم سه بعدی (جسمی که کاملاً تحت نباشد) از آنجایی که اشیاء دورتر کوچکتر دیده می‌شود در نتیجه در اشیائی مانند قسمت داخلی استوانهٔ توخالی، به دلیل آنکه هر مقطعی از جسم که از لنز دورتر می‌شود کوچکتر دیده می‌شود، در نتیجه دایرهٔ ابتدا، بدنهٔ داخلی و دایرهٔ انتهای آن استوانه به طور واضحی قابل مشاهده هستند. در مقابل با استفاده از لنزهای Telecentric ، مرز دایرهٔ انتهایی استوانه قابل مشاهده نیست، زیرا که مرزهای دایره‌های ابتدا و انتها دقیقاً بر روی هم قرار گرفته‌اند.

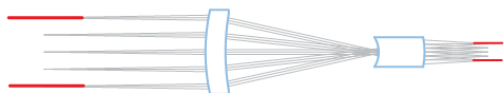


شکل ۸: محدودسازی خطای پرسپکتیو در لنزهای Telecentric

این اثر به واسطه مسیر شعاع‌های نوری ناشی می‌شود؛ در یک لنز معمولی شعاع ای نوری حتی از یک دیواره موازی با محور لنز نیز می‌تواند از لنز عبور کرد و به گیرندهٔ تصویر برسد. این در حالی است که در یک لنز Telecentric اجزاء و قسمت‌هایی از جسم که موازی با محور لنز هستند

به طور کلی حذف و ناپیدا می‌شوند.

به طور کلی می‌توان بیان کرد که لنزهای Telecentric با حذف و عدم نمایش یک بعد، یک تطابق دو بعدی را بین جسم و تصویر ایجاد می‌کنند که برای اندازه‌گیری شکل پروفیل جسم بسیار مناسب است.

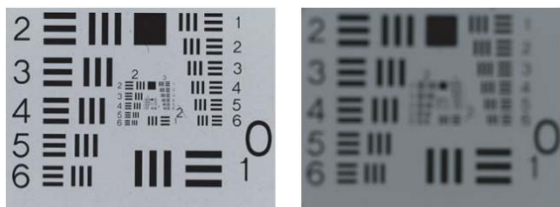


شکل ۹: دریافت شعاع‌های نوری در لنزهای Telecentric و تأثیر آن

بر نمایش ساختار سه بعدی جسم

۴) وضوح مناسب تصویر

لنزهای Telecentric از آنجا که ساختار آن نیاز به اجزاء باکیفیت دارد، عموماً هماهنگی لازم را با دوربین‌هایی با رزولوشن بالا و اندازهٔ پیکسل پایین را دارند، که این موضوع این لنزها را به عنوان گزینه‌ی مناسبی برای کاربردهای اندازه‌گیری ابعادی تبدیل کرده است.



شکل ۱۰: تفاوت کنتراست تصویر در دو لنز مختلف با استفاده از الگوی تست استاندارد

برای انتخاب لنز و دوربین مناسب لازم است ابتدا به بررسی پارامترهای ورودی به لنز و دوربین بپردازیم. انتخاب لنز Telecentric بر اساس بزرگنمایی آن صورت می‌گیرد. بزرگنمایی نسبتی بین ناحیه‌ی واقعی که در تصویر دیده می‌شود (Field of view) و تصویر تشکیل شده بر روی سنسور دوربین است. ناحیه‌ی واقعی تصویر بستگی به ابعاد مورد نیاز برای بررسی دارد و به گونه‌ای باید انتخاب شود که بتواند تمام قطعه را با احتساب جابجایی‌های احتمالی آن در بر گیرد.

به عنوان مثال برای قطعه‌ای با قطر ۲۰ میلی‌متر است، باید تصویر به گونه‌ای باشد که تمام آن در ضلع کمینه‌ی مستطیل تصویر به راحتی قابل رویت باشد. در نتیجه عرض ناحیه‌ی دید بسته به دقت جانمایی قطعه باید مقداری بیشتر از ۲۰ میلی‌متر باشد.

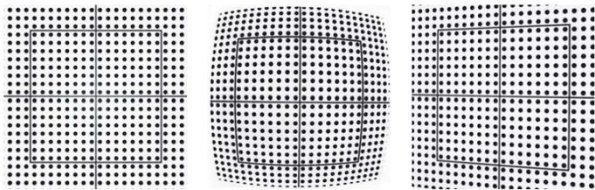
پارامتر دیگر در رابطه‌ی بزرگنمایی، اندازه‌ی تصویر می‌باشد. اندازه‌ی تصویر به اندازه‌ی سنسور اخذ تصویر درون دوربین وابستگی دارد. سنسورهای اخذ تصویر دارای استانداردهای ابعادی خاص هستند که قطر، ضلع کوچک و بزرگ آن‌ها مشخص می‌باشد.

۲-۲- الزامات سامانه اخذ ، انتقال و پردازش تصویر

ابعاد و کیفیت سنسور اخذ تصویر در دوربین‌های تصویربرداری یکی از پارامترهای مهم در دقت اندازه‌گیری یک سامانه بینایی ماشین است. عمومی‌ترین ابعاد سنسور تصویر که در مصارف ماشین بینایی کاربرد دارد،

۲-۱-۳-۱- کالیبره پارامترهای داخلی دوربین

در هنگام استفاده از هر نوع دوربین و لنزی، به خاطر ساختمان درونی آن‌ها، انحرافات را در تصویر بدست آمده ناشی می‌شود که یکی از مهم‌ترین آن‌ها انحراف دایره‌ای تصویر (Radial distortion) می‌باشد که باعث خمیده شدن خطوط صاف موجود در تصویر می‌شود. انحراف دیگر که باید کالیبره گردد، کشیدگی تصویر در قسمت‌های دور از مرکز تصویر می‌باشد. این انحرافات بسته به تکنیک مورد استفاده در غالب ۵ تا ۹ پارامتر تعریف می‌شوند و قابل کالیبره شدن هستند. [۳] در شکل ۱۱، استفاده از یک الگوی نقطه‌ای برای کالیبره پارامترهای داخلی نمایش در آمده است.



شکل ۱۱: استفاده از یک الگوی نقطه‌ای برای کالیبره پارامترهای داخلی

۲-۱-۳-۲- کالیبره پارامترهای خارجی دوربین

پارامترهای خارجی دوربین شامل همه‌ی پارامترهایی است که از موقعیت دوربین نسبت به جسم ناشی می‌شود. به زبان ساده‌تر، تبدیل اندازه‌های بدست آمده از تصویر با واحد پیکسل به واحدهای دنیای واقعی مانند میلی‌متر نیازمند کالیبره پارامترهای خارجی دوربین می‌باشد.

۲-۳-۲- افزایش دقت با محاسبه جزء پیکسل‌ها (Sub-pixel)

آشکارسازی لبه (Edge Detection) یکی از عملیات‌های مهم و پر کاربرد در علم پردازش تصویر می‌باشد و معمولاً برای تشخیص لبه‌های یک شیء از بین چند شیء دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییرات فیزیکی که در محیط واقعی وجود دارد، در تصویر به صورت تغییر رنگ و تغییر شدت روشنایی، به صورت لبه، نمایان می‌شوند. [۴] اهمیت لبه یابی در کاربردهای اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر از آنجا مشخص می‌شود که لبه‌های استخراجی از تصویر متناظر لبه‌هایی جسم می‌باشد که آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کنیم. هر چه این لبه‌ها نمایان‌تر و متمایزتر باشد عملیات لبه برداری را تسهیل و دقت اندازه‌گیری را بالاتر می‌برد.

یک پیکسل کوچک‌ترین واحد فیزیکی در یک تصویر می‌باشد. در سیستم‌هایی با دقت اندازه‌گیری معمولی یک پیکسل به عنوان کوچک‌ترین واحد اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود که پس از کالیبره می‌توان آن را به واحدهای متریک تبدیل نمود.

با وجود آنکه یک تصویر از هزاران پیکسل تشکیل شده است، مرزهای یک جسم، هر چقدر هم صاف باشند، به ندرت ممکن است که به طور دقیق در مرز مابین پیکسل‌های روی سنسور اخذ تصویر فرود آیند.

برای حل این موضوع دانشمندان علم پردازش تصویر بر آن شدند که با استفاده از داده‌های موجود روشی را برای پیدا کردن دقیق‌تر لبه‌ها پیدا کنند. نتیجه‌ی این تحقیقات استفاده از خصوصیات رنگی پیکسل‌های مجاور

ابعاد 480×640 پیکسل (۳/۳ مگاپیکسل) می‌باشد. این ابعاد تصویر برای اکثر سیستم‌های بینایی ماشین کفایت می‌نماید. ولی با توجه به نیازها و انتظارات جدیدی که از یک سیستم بینایی می‌رود، بخصوص در مواردی که تلورانس اندازه‌گیری کمتری مورد انتظار است یا نیاز است سطح بیشتری با همان دقت قبلی تصویربرداری شود باید از رزولوشن‌های بالاتری استفاده نمود. در سال‌های اخیر دوربین‌های مخصوص پردازش تصویر با رزولوشن 3.2×10^6 و 5×10^6 مگاپیکسل به صورت گسترده‌ای به بازار عرضه شده است. دوربین‌هایی با رزولوشن‌های بالاتر نیز به صورت خاص وجود دارد.

یکی از پارامترهایی که در یک دوربین مهم است اندازه‌ی فیزیکی یک پیکسل بر روی تراشه‌ی سنسور اخذ تصویر است. اندازه‌ی هر پیکسل در یک دوربین از حدود 10×10 میکرون شروع شده و با افزایش رزولوشن آن این اندازه تا کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در یک دوربین ۵ مگاپیکسل در حدود $2/2$ میکرون می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین نتایجی که می‌توان از دو پارامتر اندازه‌ی پیکسل در یک دوربین و بزرگنمایی یک لنز استفاده‌شده، به آن رسید، مقدار سطحی از محیط واقعی است که توسط یک پیکسل دریافت می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان به این نتیجه رسید که یک پیکسل متناظر با چه ابعادی در جهان واقعیت می‌باشد. از آنجا که یک پیکسل کوچک‌ترین جزء یک تصویر است، می‌توان دقت اندازه‌گیری را از آن بدست آورد. از این رو داریم:

بزرگنمایی \div اندازه یک پیکسل = اندازه متناظر یک پیکسل در جهان

به عنوان مثال برای یک دوربین ۵ مگاپیکسل با اندازه‌ی پیکسل 4×4 میکرون داریم و با توجه به لنز انتخاب کرده با بزرگنمایی $m=1/8$ داریم:

$$(2) \quad 4/4 \div 1/8 = 4,24 \text{ میکرون}$$

عدد محاسبه‌شده، دقت اندازه‌گیری (Resolution) در هنگام استفاده از این لنز و دوربین خواهد بود. البته در بخش‌های نرم‌افزاری، همانگونه که در قسمت بعدی گفته خواهد شد با استفاده از تکنیک‌های subpixel می‌توان لبه‌ها را با دقتی ۵ تا ۱۰ برابر دقیق‌تر از این مقدار بدست آورد. البته باید در نظر داشت که شرایط قطعه و نورپردازی می‌تواند نقش بسیار مهمی در رسیدن به این دقت داشته باشد.

۲-۳-۲- الزامات نرم‌افزاری

۲-۱-۳-۲- کالیبره نرم‌افزاری

علاوه بر آن که با بهبود تجهیزات اپتیکی می‌توان از ریخت افتادگی تصویر را بهبود بخشید، توسط کالیبره نرم‌افزاری نیز می‌توان این انحرافات را تا حد قابل قبولی کاهش داد. نحوه کار به این صورت است که یک الگوی دقیق را (دقت آن باید حداقل ده درصد اندازه‌گیری باشد) در جلوی دوربین قرار داده می‌شود. این الگو، با ابعاد و توصیف آن، در نرم‌افزار تعریف شده است. نرم‌افزار با محاسبه تفاوت مابین الگوی پیش‌فرض و تصویر اخذشده از همان الگو در جهان واقعی، اقدام به جبران انحرافات و تبدیل به تصاویری خالی از هر گونه تغییر فرم و انحراف می‌نماید.

حفره‌ها (blob) در تصویر افزایش می‌یابد و تلورانس‌ها برای اندازه‌گیری‌ها به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در ادامه به بررسی چند نمونه از تأثیرات این‌گونه لبه یابی بر روی دقت پیدا کردن مرکز یک حفره در تصویر و نیز بدست آوردن قطر حفره پرداخته خواهد شد. [۷]

(۱) پیدا کردن مرکز یک حفره در تصویر:

مرکز یک حفره برای آدرس‌دهی دقیق آن در تصویر استفاده می‌شود. استفاده از دقت جزء پیکسل می‌تواند دقت آدرس‌دهی مکانی حفره را تحت تأثیر قرار دهد. برای یک دایره، به طور کلی این دقت در حدود ۰/۵ معکوس جذر قطر در واحد پیکسل می‌باشد.

$$\text{Sub pixel accuracy of centroid of circle blob} = 0.5/\sqrt{\text{diameter}} \text{ pixels} \quad (۵)$$

جدول ۱- استفاده جزء پیکسل‌ها برای مکان‌یابی حفره

دقت مکان‌یابی	قطر حفره
± ۰/۱۸۳	۱۰ پیکسل
± ۰/۰۶	۱۰۰ پیکسل

هر چه قطر بیشتر باشد دقت پیدا کردن مرکز افزایش می‌یابد.

(۲) بدست آوردن قطر حفره:

قطر یک حفره برای اندازه‌گیری دقیق آن حفره در تصویر استفاده می‌شود. استفاده از دقت subpixel می‌تواند اندازه‌گیری اندازه‌ی حفره را تحت تأثیر قرار دهد. برای یک دایره، به طور کلی این دقت در حدود ۰/۷۸ معکوس مجذور قطر می‌باشد.

$$\text{Sub pixel accuracy of diameter of circle blob} = 0.78/\sqrt{\text{diameter}} \text{ pixels} \quad (۶)$$

جدول ۲- استفاده جزء پیکسل‌ها برای اندازه‌گیری حفره

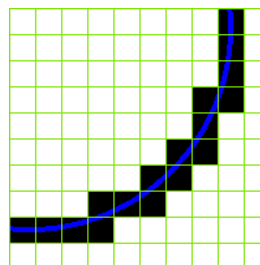
دقت اندازه	قطر حفره
± ۰/۲۴۷	۱۰ پیکسل
± ۰/۰۷۸	۱۰۰ پیکسل

۲-۴- الزامات نورپردازی

تشخیص ضرورت اینکه کامیابی یک سیستم بینایی ماشین بستگی شدیدی به شرایط و روش‌های نورپردازی آن دارد، در حال گسترش است. برای تحقق یک سیستم پایدار، اخذ تصاویری با کنتراست مناسب، ثابت و بدون توجه به تغییرات شرایط نوری اطراف و نیز انعکاس‌های خود جسم، دارای اهمیت بسیار است. تأثیر نورپردازی بر سایر مراحل پردازش تصویر به حدی است که بعضی بر این باورند که ابتدا باید به شرایط نورپردازی ایده آل رسید و سپس اقدام به برنامه‌ریزی و برنامه‌نویسی بر روی تصویر اخذ شده نمود. در سال‌های اخیر با گسترش بکارگیری پردازش تصویر برای کنترل کیفیت قطعات پیچیده‌تر، نورپردازی‌های پیچیده‌تری نیز به کار گرفته شده است. تولیدکنندگان تجهیزات روشنایی تلاش کرده‌اند با طراحی ماژولار تجهیزات نورپردازی، پیاده‌سازی آن‌ها را برای سیستم‌های بینایی ماشین تسهیل نمایند. [۸]

به منظور تبدیل یک پیکسل به پیکسل‌های کوچک‌تر است که آن را subpixel می‌گویند.

در حین عملیات اندازه‌گیری جزء پیکسل (subpixel)، نرم‌افزار سطح رنگ خاکستری در پیکسل‌های هم‌جوار نقطه اندازه‌گیری را بررسی می‌نماید. نرم‌افزار این اطلاعات را برای درون‌یابی و تخمین مکان دقیق مرزها با دقت کسری از یک پیکسل استفاده می‌کند.



شکل ۱۳- مرز لبه پیدا شده با دقت جزء پیکسل [۵]

بهترین برازش لبه‌ها (Best fitting the edges)

به منظور پیدا کردن مکان دقیق یک لبه در عرض یک پیکسل مقدار رنگ خاکستری هر دو طرف هر پیکسل اندازه‌گیری می‌شود. در مثال ساده‌ای که در زیر به نمایش درآمده است. [۶]

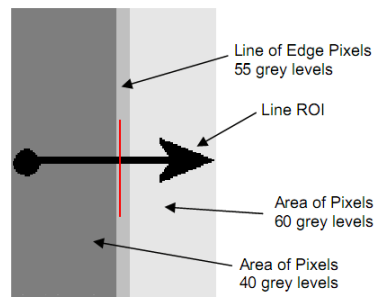
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار رنگ خاکستری مرز لبه، ترکیبی از مقدار رنگ خاکستری سمت یک سمت لبه و مقدار رنگ خاکستری سمت دیگر لبه هست. با مقایسه این دو رنگ امکان بدست آوردن مکان دقیق مرز با دقت کسری از یک پیکسل امکان‌پذیر می‌گردد. این محاسبه یک درون‌یابی است و به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Subpixel location} = (\text{edge grey level} - \text{right grey level}) / (\text{left grey level} - \text{right grey level}) \quad (۳)$$

در مثال بالا اگر مقدار رنگ خاکستری مرز لبه ۵۵، مقدار سمت چپ لبه ۴۰ و مقدار خاکستری سمت راست لبه ۶۰ باشد، با درون‌یابی خواهیم داشت:

$$0.25 = (55 - 60) / (40 - 60) = (-5) / (-20) \quad (۴)$$

در نتیجه مکان دقیق مرز در ۲۵ درصدی عرض یک پیکسل، متمایل به قسمت پر رنگ، بدست آمد. این درون‌یابی از آن جهت به این نتیجه رسیده است که ۲۵ درصد روشنایی در یک طرف و ۷۵ درصد دیگر روشنایی در طرف دیگر لبه قرار دارد.



شکل ۱۴- نحوه پیدا کردن مرز لبه‌ها با دقت جزء پیکسل

در صورت لبه یابی با دقت جزء پیکسل، دقت پیدا کردن اشیاء و

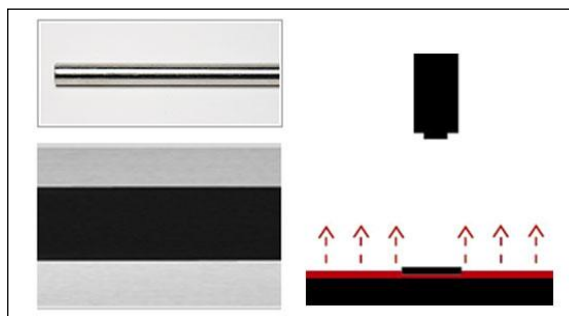
۳- نتیجه گیری

همان گونه که گفته شد دقت اندازه گیری این سیستم ها بستگی به لنز و رزولوشن دوربین استفاده شده دارد. به عنوان مثال رسیدن به دقت اندازه گیری ۵ میکرون، برای قطعه ای با قطر یک میلی متر و با استفاده از دوربین ۵ مگاپیکسل و لنز متناسب با این میدان دید، دقتی دور از دسترس نیست.

۴- مراجع

- [1] خدادادی، م؛ بهبهانی، س؛ رستگارپناه، ف؛ نصیری، م. " استفاده از تک نیک های پردازش تصویر به منظور تشخیص عیوب رایج ورق های فولادی به صورت on-line"، نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، اسفند ۱۳۸۷، بیرجند
- [2] Telecentric Lenses Tutorial, www.opto-engineering.com
- [3] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (1992) 965-998.
- [4] اسجادی، ا؛ فدایی، ر: " پردازش تصویر عملی تصویر با MATLAB"، انتشارات ناقوس، ص: ۱۰۹
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Sub-pixel_resolution, 2011
- [6] Haralick, R.M. and L.G Shapiro. 1992. Computer and Robot Vision. Vol 2. Chapter 20 – Accuracy. AW.
- [7] K. Jensen, D. Anastassiou, Subpixel edge localization and the interpolation of still images, IEEE Transactions on Image Processing 4 (1995) 285-295.
- [8] <http://www.ccs-grp.com>, 2011

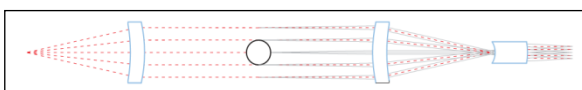
از آنجایی که در بسیاری از سیستم های اندازه گیری، هدف، اندازه گیری کانتور دور جسم و یا اندازه گیری حفره های راه بدر است، نور پس زمینه یکی از پرکاربردترین روش های نورپردازی در اندازه گیری ابعادی است. روش کار بگونه ای است که یک صفحه روشن، با نور غیرمستقیم، از زیر به جسم می تابد و دوربین در بالای جسم لبه های حاشیه ای جسم را می بیند. از آنجایی که سطح روی جسم نوری را دریافت نمی کند، هیچ لبه مزاحمی برای تشخیص لبه ها وجود ندارد. در شکل ۱۵ یک نمونه نورپردازی پس زمینه به نمایش درآمده است.



شکل ۱۵ - استفاده از نورپردازی پس زمینه برای افزایش دقت پیدا کردن لبه های یک جسم براق

در هنگام تصویربرداری بسیار دقیق از یک جسم به خصوص وقتی از یک نور پس زمینه برای نورپردازی جسم استفاده شود، عموماً پیدا کردن مرز بسیار دقیق و قاطع جسم کار آسانی نیست. این اتفاق به این دلیل می افتد که پیکسل های روشن که در پس زمینه هستند تمایل به همپوشانی با پیکسل های تاریکی که در لبه های جسم هستند، دارند. فراتر از این، اگر جسم دارای ساختار سه بعدی باشد، تأثیر دیواره ها می تواند این اندازه گیری را دشوارتر نماید. این اثر به طور قابل توجهی می تواند توسط لنزهای Telecentric کاهش یابد. به این گونه که بدلیل ساختار این لنزها، تنها شعاع های نوری جذب می شوند که دارای راستایی نزدیک به موازی نسبت به راستای لنز دارند و در نتیجه انعکاس ناشی از دیواره جسم نمی تواند دقت اندازه گیری را تحت تأثیر قرار دهد.

برای خلاص شدن کامل از این مشکل می توان به جای نورپردازی پس زمینه توسط یک صفحه نوری از منابع نور Telecentric (collimated illuminators) به همراه لنزهای Telecentric استفاده نمود. با استفاده از این گزینه، از آنجایی که تنها شعاع های نوری موازی تولید شده است تنها شعاع های نوری مورد نیاز به سمت لنز و سنسور تصویربرداری گسیل می شود دیگر هیچ مشکلی در لبه ها و کناره ها پیش نمی آید.



شکل ۱۶ - شعاع های نوری در هنگام استفاده همزمان از سیستم

نورپردازی و لنز Telecentric