

اندازه‌گیری و کنترل کیفی پارامترهای هندسی چرخدنده مارپیچ از طریق پردازش تصویر

مهران محبوب‌خواه^۱ و توحید کریم‌بابازاده ممقانی^۲

چکیده

اندازه‌گیری قطعات صنعتی همانند چرخدنده‌ها می‌تواند به روش‌های تماسی و غیرتماسی انجام بگیرد. در این تحقیق برای بازرسی ابعادی چرخدنده مارپیچ به روش غیرتماسی، از سامانه بینایی ماشین جهت یافتن خطاهای مهم ساخت چرخدنده مانند خطای گام راست و چپ و خطای پروفیل دندانه استفاده شده است. به این منظور، نرم‌افزاری در محیط کتابخانه لب‌ویو نوشته شد. این نرم‌افزار پس از دریافت تصویر و انجام پیش‌پردازش‌هایی مانند بهبود لبه، آستانه‌گیری، حذف نویز و کالیبراسیون تصویر، با انجام عملیات پردازشی نظیر لبه‌یابی و اندازه‌گیری، ابتدا محل چرخدنده را در تصویر شناسایی و سپس پارامترهای هندسی آنرا مشخص می‌کند. از جمله مزایای این سامانه نسبت به ابزارهای مرسوم، کم‌هزینه بودن، سرعت و دقت بالا و اندازه‌گیری بهنگام در خطوط تولید است. سامانه حاضر، توانایی اندازه‌گیری خودکار پارامترهای چرخدنده را بدون نیاز به وارد کردن اطلاعات طراحی دارا می‌باشد. در این مقاله چرخدنده ساده ای هم به روش بینایی ماشین و هم با یک دستگاه دقیق و متداول اندازه‌گیری چرخدنده اندازه‌گیری شده که مقایسه نتایج آن‌ها تفاوت کم ده میکرونی را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها

چرخدنده، بینایی ماشین، آستانه‌گیری، کالیبراسیون تصویر، لبه‌یابی

۱ مقدمه

مارپیچ به دلیل مزایای خاصی که دارند، بیش از نوع ساده در صنعت استفاده می‌شوند. دندانه‌های این چرخدنده برخلاف چرخدنده ساده با محور چرخدنده موازی نیستند، بلکه هر دندانه به شکل مقطعی از مارپیچ است. این قابلیت باعث می‌شود دندانه‌ها به آرامی و به صورت خطی با هم درگیر شوند [۱]. اما همانند سایر قطعات مهندسی، کنترل ابعادی چرخدنده نیز مستلزم انجام اندازه‌گیری و تعیین خطاهای ساخت و سپس مقایسه خطاهای بدست آمده با تolerانسهای ارائه شده در استاندارد مربوطه می‌باشد. خطای پروفیل اینولوت^۱ و خطای گام دایره‌ای^۲ دو مورد از خطاهای مهم چرخدنده مارپیچ است که این تحقیق در پی اندازه‌گیری آن‌ها با استفاده از بینایی ماشین می‌باشد. تعدادی از ابزارهای مرسوم

چرخدنده‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین و پرکاربردترین قطعات مورد استفاده در سامانه‌های انتقال قدرت و حرکت، نقش مهمی را در صنعت ایفا می‌کنند. تأثیر دقت ابعادی چرخدنده بر میزان سروصدا و سایش آن انکارناپذیر است. در این میان چرخدنده‌های

این مقاله در آذرماه سال ۱۳۹۴ دریافت، در خردادماه ۱۳۹۵ بازنگری و در تیرماه همان سال پذیرفته شد.

^۱ دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

رایانامه: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

رایانامه: tohid.k.m@gmail.com

نویسنده مسئول: مهران محبوب‌خواه

¹ Involute profile error

² Circular pitch error

۲-۱ معادلات مربوط به گام و تری

از آنجا که یکی از اهداف این تحقیق تعیین خطای گام چپ و راست به عنوان دو مورد از خطاهای مهم چرخنده است، در الگوریتم بازرسی ابتدا باید مقدار ایده‌آل برای گام محاسبه گردد. روابط زیر به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰].

$$m_t = \frac{d_a}{z + 2(1+x)} = \frac{m_n}{\cos \beta} \quad (1)$$

$$p_t = \pi m_t \quad (2)$$

$$d_p = z m_t \quad (3)$$

$$\alpha_t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) \quad (4)$$

$$d_b = d_p \cos \alpha_t \quad (5)$$

در این روابط، m_n مدول عمودی، α_n زاویه فشار عمودی، β زاویه مارپیج، m_t مدول عرضی، p_t گام دایره‌ای عرضی، d_p قطر دایره گام، α_t زاویه فشار عرضی، d_b قطر دایره مبنا و x ضریب جابجایی پروفیل می‌باشند. در این تحقیق استاندارد ISO 1328:1995 [۱۱] مبنا قرار گرفته است. از این رو برای محاسبه، پارامترهای اسمی مورد نیاز عبارتند از مدول نرمال، زاویه فشار نرمال و ضریب جابجایی پروفیل، که کاربر آن‌ها را به نرم‌افزار معرفی می‌نماید.

۲-۲ معادلات مربوط به شناسایی پروفیل اینولوت

امروزه از منحنی اینولوت به عنوان پروفیل دندانه چرخنده استفاده می‌شود [۹]. منحنی اینولوت، به صورت مکان هندسی نقاط روی انتهای یک خط مستقیم تعریف می‌گردد (خط BT شکل ۱) که بدون لغزش بر روی یک دایره می‌گردد. این دایره، دایره مبنا اینولوت نامیده می‌شود. می‌توان BT را قسمتی از ریسمانی دانست که محکم به دور دیسک D پیچیده شده و همینطور که باز می‌شود نقاط B را اثرگذاری می‌کند. با این توضیح و با توجه به هندسه شکل ۱ مختصات هر نقطه نوعی B بر حسب پارامتر α روی منحنی اینولوت به صورت زیر خواهد بود [۱۰].

$$x = r \cos(\text{inv } \alpha) = r \cos(\theta - \alpha) \quad (6)$$

$$y = r \sin(\text{inv } \alpha) = r \sin(\theta - \alpha) \quad (7)$$

$$r_b = r \cos \alpha, \text{inv } \alpha = \tan \alpha - \alpha \quad (8)$$

$$\tan \alpha = BT / OT = AT / r_b = r_b \theta / r_b = \theta(\text{rad}) = \pi \theta^\circ / 180 \quad (9)$$

که در این معادلات r_b شعاع دایره مبنا، r شعاع دایره دلخواهی است که از منحنی اینولوت می‌گذرد، α زاویه فشار، θ زاویه غلطش و $\text{inv } \alpha$ تابع اینولوت نامیده می‌شود.

پس از ساده سازی و جایگزینی θ بجای $\tan \alpha$ ، خواهیم داشت:

$$\begin{cases} x_i(\theta) = r_b (\cos \theta + \theta \sin \theta) \\ y_i(\theta) = r_b (\sin \theta - \theta \cos \theta) \end{cases} \quad (10)$$

چون خط TP_i در نقطه B بر منحنی اینولوت عمود است، فاصله هر نقطه $P_i(x_i, y_i)$ از نقاط مختلف روی این منحنی به صورت زیر خواهد بود:

برای اندازه‌گیری خطای گام عبارتند از کولیس مرکب، میکرومتر فک بشقابی و کمپراتور گام [۱]. همچنین ماشین CMM مخصوص اندازه‌گیری چرخنده می‌تواند گام و پروفیل اینولوت چرخنده را همزمان اندازه‌گیری کند که بسیار گران قیمت است. بنابراین اندازه‌گیری چرخنده با ابزارهای مرسوم، زمان‌بر و یا پرهزینه است.

تحقیقات متعددی در زمینه استفاده از بینایی ماشین در کنترل ابعادی چرخنده انجام شده است. رابینسون بازرسی پروفیل چرخنده ساده را با استفاده از دوربین CCD ارزان قیمت و تکنیک‌های پردازش تصویر انجام داده و با صحت سنجی با روش‌های مرسوم، خطاهای اندازه‌گیری را تعیین نموده است [۲]. جاد-المولا با طراحی چند الگوریتم پردازش تصویر ساده و پیاده‌سازی در کتابخانه C++، یک سامانه بینایی ماشین برای اندازه‌گیری قطر اندوم، قطر دیدنوم و شمارش تعداد دندانه‌های چرخنده ساده ایجاد نمود، حداکثر خطای اندازه‌گیری در مقاله این پژوهشگر 0.1mm بوده است [۳]. یونس با استفاده از لیزر و تکنیک انسداد نور و پردازش سیگنال‌های مربعی حاصل، ضخامت و تری دندانه و گام دایره‌ای و پروفیل دندانه چرخنده ساده را اندازه‌گیری نمود [۴ و ۵]. خلیلی ضخامت و تری دندانه‌ها را با استفاده از تکنیک بینایی‌ماشین اندازه‌گیری کرد و با استفاده از عملیات ریخت شناختی باینری مرکز هندسی چرخنده را پیدا کرده و آن را به عنوان مرکز دایره گام آن در نظر گرفت [۶]. اوکویاما یک سامانه اندازه‌گیری مبتنی بر پروب‌های نوری غیرتماسی برای اندازه‌گیری خطاهای گام و پروفیل دندانه‌های چرخنده ساده ایجاد کرد. این سامانه دارای دو پروب نوری گسیل‌کننده پرتو لیزر است که معادل پروب ثابت و پروب اندازه‌گیری در کمپراتور گام تماسی مرسوم هستند [۷]. خلیلی با استفاده از تکنولوژی بینایی‌ماشین، پروفیل دندانه را کنترل نمود و با مقایسه دو روش لبه‌یابی شعاعی و حلقوی به این نتیجه رسید که با توجه به شکل هندسی دندانه‌ها، روش حلقوی لبه‌ها را با دقت بالاتری پیدا می‌کند [۸]. در تحقیقات پیشین، اصلاحات دندانه که در طراحی و ساخت چرخنده اعمال می‌شود، از جمله جابجایی پروفیل^۱ و بشک‌های شدن پروفیل^۲ در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر فرض بر این بوده که چرخنده‌ها استاندارد هستند و هیچ‌گونه اصلاحاتی ندارند. همچنین تحقیقات پیشین منحصر به چرخنده‌های ساده بوده و هیچ اشاره‌ای به بازرسی چرخنده‌های مارپیج با استفاده از این تکنولوژی نشده است.

۲ مبانی نظری

در این قسمت برای معرفی پارامترهای مهم چرخنده ساده و ارتباط بین آن‌ها، ابتدا مبانی طراحی آن به اختصار توضیح داده شده است.

¹ Profile shifting

² Profile barreling

مقادیر شدت روشنایی پیکسل‌های امتداد یک مسیر جستجو و شناسایی محل بروز هرگونه اختلاف شدید در این مقادیر، به عنوان یک نقطه-لبه است. در نهایت با انجام محاسبات هندسی مثل برازش منحنی و شمارش تعداد پیکسل‌ها ابعاد مورد نظر جسم قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

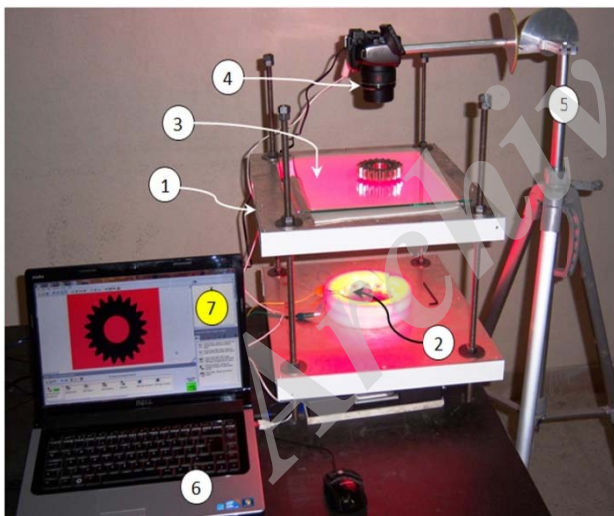
۴ طراحی اجزاء بینایی ماشین

در یک دسته‌بندی کلی می‌توان اجزاء یک سامانه بینایی را در دو گروه سخت افزاری و نرم‌افزاری قرار داد. شکل ۲ نمایی از پیکربندی مربوط به قرارگیری دوربین و چرخنده را در سامانه بینایی طراحی شده نشان می‌دهد.

۴-۱ بخش سخت افزاری سامانه بینایی

همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، این واحد متشکل از یک سازه نگهدارنده تجهیزات نورپردازی (شماره یک)، منبع نور LED و عدسی جمع‌کننده پرتو (شماره دو) و صفحه شیشه‌ای موقعیت دهنده چرخنده است (شماره سه).

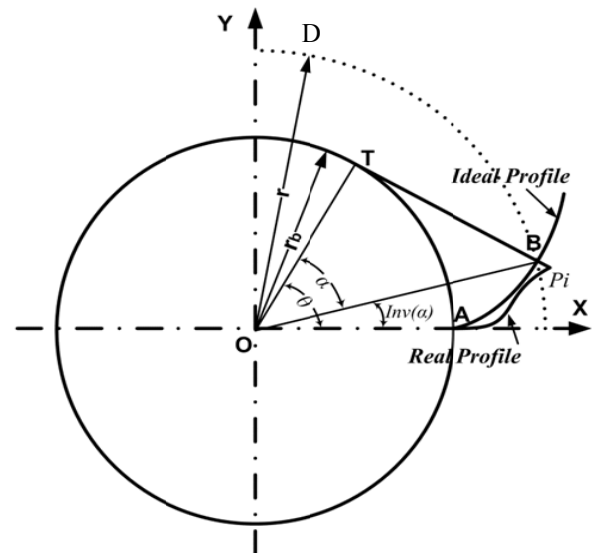
هر چه نیم-پهنای طول موج^۱ وسیع‌تر باشد کنتراست لبه‌ها بیشتر افت می‌کند. در بین لامپهای LED موجود، LED قرمز نیم-پهنای طول موج محدودتری دارد [۱۲]. جهت حصول بیشترین کنتراست، روش نورپردازی از زیر مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲ موقعیت دوربین نسبت به چرخنده

۴-۲ واحد تصویربرداری

این قسمت شامل یک دوربین عکسبرداری و تجهیزات نگهدارنده و موقعیت دهنده آن است. دوربین مورد استفاده دارای سنسور CCD رنگی با قدرت تفکیک 20Mpixel با نام تجاری Canon Powershot SX20IS (شماره چهار) است. جهت تنظیم ارتفاع دوربین نسبت به قطعه در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از سطح قطعه از یک نگهدارنده صلب سه پایه استفاده شده است (شماره پنج).



شکل ۱ اصول تشکیل منحنی اینولوت بر روی دایره مبنا

$$D_i(\theta) = \sqrt{(x(\theta) - x_i)^2 + (y(\theta) - y_i)^2} \quad (11)$$

برای تعیین مقدار θ در کوتاهترین فاصله P_i از منحنی اینولوت که برابر با BP_i لازم است معادله ۱۲ حل شود:

$$\frac{dD_i(\theta)}{d\theta} = 0 \quad (12)$$

از معادله ۱۲ معادله ۱۳ نتیجه می‌شود:

$$r_b - x_i \cos \theta - y_i \sin \theta = 0 \quad (13)$$

حل تحلیلی معادله ۱۳ نسبت به $\sin \theta$ به صورت زیر است:

$$\theta_{min} = \sin^{-1} \left\{ \frac{y_i r_i \pm x_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2 - r_b^2}}{x_i^2 + y_i^2} \right\} \quad (14)$$

در این رابطه علامت منفی x_i مربوط به ماکزیمم $D_i(\theta)$ و علامت مثبت آن متعلق به مینیمم $D_i(\theta)$ است. بنابراین در اینجا از رابطه‌ای که علامت مثبت دارد استفاده می‌شود. به این ترتیب برای تعیین انحراف هر نقطه پروفیل واقعی از پروفیل ایده‌آل، لازم است شعاع دایره مبنا r_b و مختصات نقاطی از پروفیل واقعی تعیین گردد.

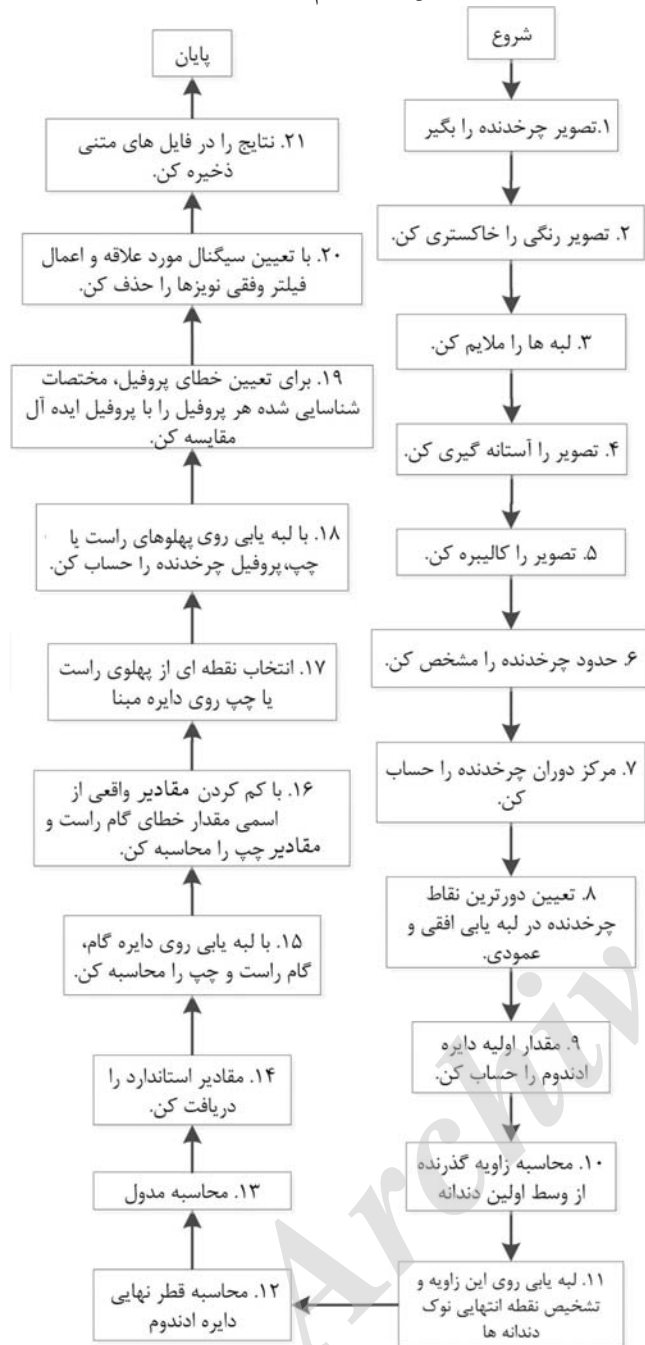
۳ اصول اندازه‌گیری در بینایی ماشین

از آنجا که در کتابخانه نرم‌افزار LabVIEW تنها فضای رنگی RGB و HSL تعریف شده است، در این مقاله نیز تصویر رنگی گرفته شده از چرخنده در فضای RGB فراخوانی شده و با محاسبه صفحه غالب که در تصویر حاضر صفحه قرمز می‌باشد، به تصویر خاکستری تبدیل می‌شود. بطوری که در علم بینایی ماشین مرسوم است، هر پیکسل از تصویر دیجیتال با یک تابع $f(x,y)$ و مختصات نقطه تصویر بوده و تابع f میزان روشنایی آن نقطه است نمایش داده می‌شود [۱۳]. درجات خاکستری تصویر، میزان روشنی و تاریکی هر نقطه از تصویر را نشان می‌دهند.

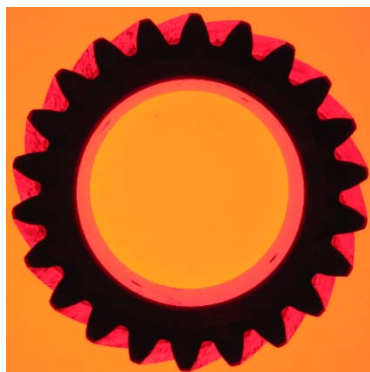
یکی از کلیدی‌ترین عملیات پردازشی بر روی تصاویر، لبه‌یابی است که از آن برای تشخیص ابعاد جسم موجود در تصویر استفاده می‌شود. منطق اولیه حاکم بر کلیه تکنیک‌های لبه‌یابی، مقایسه

¹ Half-width wavelength

شد. شکل ۴ تصویر رنگی اولیه را نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز تصویر خاکستری حاصل از این گام را نشان می‌دهد.



شکل ۳ فلوجارت اندازه‌گیری چرخدنده مارپیچ



شکل ۴ تصویر رنگی اولیه

تصاویر گرفته شده توسط دوربین از طریق کابل USB به واحد پردازشگر انتقال می‌یابد (شماره شش).

۳-۴ واحد پردازشگر تصویر

از یک کامپیوتر شخصی با نام تجاری Asus-K45D و سیستم عامل ویندوز ۷ به عنوان واحد پردازنده تصاویر استفاده شد.

۴-۴ بخش نرم‌افزاری سامانه بینایی

این بخش مهمترین بخش الگوریتم پردازش تصویر بوده و مشتمل بر دو بخش کتابخانه نرم‌افزاری و الگوریتم اندازه‌گیری است.

۵-۴ کتابخانه نرم‌افزاری

کتابخانه یا بسته نرم‌افزاری برای انجام عملیات پردازش تصویر به کار می‌رود. بسته‌های نرم‌افزاری بسیاری از الگوریتم‌های مورد نیاز کار بینایی را فراهم می‌کنند، اما در بیشتر موارد همه توابعی که در یک کاربرد خاص لازم است را دارا نیستند و باید با استفاده از الگوریتم‌های سطح پائین برای کاربرد مورد نظر برنامه‌نویسی نمود. با توجه به سادگی و سهولت برنامه‌نویسی به زبان G و تطابق توابع موجود در کتابخانه لب‌ویو با نیازهای یک کار بینایی صنعتی، این بسته نرم‌افزاری برای برنامه‌نویسی انتخاب شد.

۶-۴ الگوریتم اندازه‌گیری

شکل ۳ فلوجارت اندازه‌گیری چرخدنده را نشان می‌دهد. در این تحقیق اندازه‌گیری پروفیل اینولوت و گام دندانه‌های چرخدنده مارپیچ هدف‌گذاری شد و بر همین اساس الگوریتم اندازه‌گیری طراحی و پیاده‌سازی گردید.

۵ پیاده‌سازی الگوریتم اندازه‌گیری

عملیات پردازش تصویر در این مقاله آن دسته از عملیاتی است که ورودی آن تصویر و خروجی آن صفاتی از اجسام داخل تصویر ورودی مثل نقطه، خط و دایره باشد. بنابراین پیاده‌سازی الگوریتم اندازه‌گیری روی تصویر گرفته شده شامل مراحل است که در ادامه مقاله به آن پرداخته شده است.

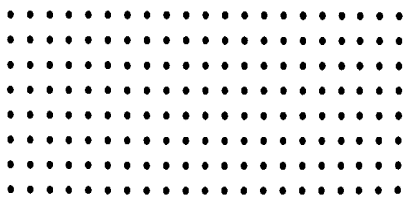
۱-۵ الگوریتم‌های پردازش تصویر

عملیات ۲ تا ۴ و ۶ تا ۸ در فلوجارت شکل ۳ در این دسته قرار می‌گیرند.

۱-۱-۵-۱ استخراج تصویر خاکستری از تصویر رنگی

به علت استفاده از LED قرمز برای روشنایی صحنه، هیستوگرام صفحات قرمز، سبز و آبی نشان داد که بیشترین مقادیر متعلق به صفحه قرمز است. بنابراین برای دستیابی به حداکثر کنتراست در تصویر خاکستری در گام ۲ از فضای RGB صفحه R استخراج

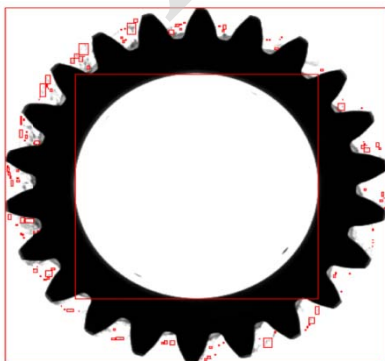
بشکه‌ای یاد می‌شود و بدیهی است که اندازه‌هایی که از چنین تصویری بدست می‌آیند قابل اعتماد نیستند، بخصوص در کار حاضر که دقت‌های اندازه‌گیری در حد میکرون باشند، این نکته حائز اهمیت می‌باشد. از طرف دیگر برای تبدیل واحد اندازه‌های بدست آمده از پیکسل به واحدهای جهان واقعی لازم است یک ضریب تبدیل واحد تعیین شود. برای آموزش الگوی انحرافات تصویر به برنامه و تعیین ضریب تبدیل واحد، لازم است ابتدا تصویری از یک الگوی استاندارد به برنامه معرفی شود. الگوی استاندارد قابل قبول برای کتابخانه لب‌ویو شبکه‌ای از نقاط دایره‌ای شکل است که فواصل معینی دارند (شکل ۷). با معرفی این الگو به برنامه، الگوریتم کالیبراسیون مراکز نقاط شبکه را شناسایی کرده و با توجه به مختصات این نقاط نسبت به هم، الگوی کالیبراسیون را درک می‌کند [۱۴]. سپس با میانبندی دوسویه^۳ تصویر را اصلاح می‌کند. شبکه کالیبراسیون مورد استفاده در این تحقیق دارای نقاطی به قطر 4mm است که در فاصله 4mm از هم قرار دارند. پس از تصویربرداری از شبکه تهیه شده، فایل تصویری آن برای آموزش الگوی انحرافات دوربین به برنامه معرفی گردید.



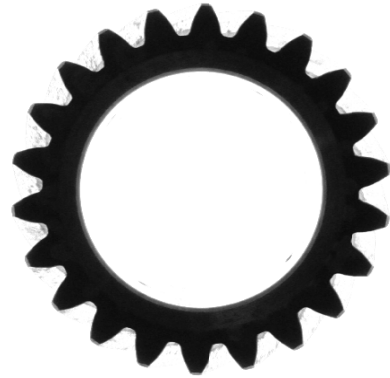
شکل ۷ شبکه کالیبراسیون مورد استفاده

۵-۱-۵- شناسایی چرخدنده در تصویر باینری

اولین پیش‌نیاز برای انجام عملیات بینایی ماشین و تعیین پارامترهای چرخدنده، تعیین موقعیت چرخدنده در تصویر است. از آنجا که تصویر بدست آمده تا قبل از این مرحله، تنها شامل یک پس زمینه تاریک و یک ناحیه روشن (چرخدنده) بوده است، می‌توان یک ناحیه مستطیلی در تصویر تعیین کرد که محصورکننده ناحیه روشن باشد. سوراخ مرکزی هم یک ناحیه روشن است. بنابراین می‌توان آن را در یک ناحیه مستطیلی محصور کرد (شکل ۸).



شکل ۸ شناسایی حدود چرخدنده



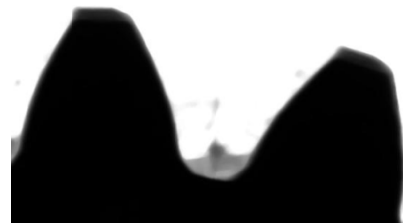
شکل ۵ تصویر خاکستری استخراج شده از تصویر رنگی

۵-۱-۲- ملایم‌سازی لبه‌ها

به دلایل متعدد نظیر نقطه‌ای نبودن منبع نور، تجزیه نور در عدسی دوربین، پخش‌دار بودن لبه قطعه، وجود مارپیچ دندانه‌ها و نویزهای الکترونیکی سامانه تصویربرداری در لبه‌ها به جای سایه کامل، نیم-سایه تشکیل می‌شود و در نتیجه پس از آستانه‌گیری بریدگی‌هایی در لبه‌ها به وجود می‌آید. برای از بین بردن این بریدگی‌ها از فیلتر میانه^۱ استفاده می‌گردد. این فیلتر پائین‌گذر^۲ بوده و بدون تار کردن لبه، تغییرات شدت روشنایی پیکسل‌های داخلی هر ناحیه را ملایم می‌نماید.

۵-۱-۳- آستانه‌گیری تصویر خاکستری

آستانه‌گیری، ابزاری برای انجام عملیات بخش‌بندی است. در این عملیات، با تحلیل هیستوگرام تصویر و تعیین یک حد آستانه، کل تصویر به یک ناحیه قطعه اصلی و یک ناحیه پس زمینه تقسیم می‌شود. در نتیجه تصویر حاصل شامل دو ناحیه است که پیکسل‌های موجود در هر ناحیه شدت روشنایی یکسانی دارند. اینگونه تصاویر را تصاویر باینری می‌نامند. شکل ۶ تصویر بزرگنمایی شده دو دندانه را تا این مرحله نشان می‌دهد. در این شکل سایه‌هایی در ریشه دندانه‌ها دیده می‌شود که چون در محدوده بازرسی اینولوت و دایره گام نیستند اشکالی در تعیین لبه‌های تصویر هدف ایجاد نمی‌کنند.



شکل ۶ تصویر دو دندانه بعد از آستانه‌گیری

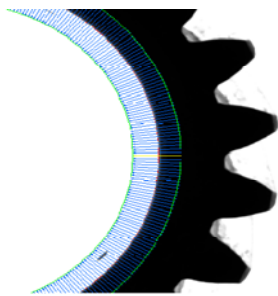
۵-۱-۴- کالیبراسیون

در تصاویر گرفته شده با دوربین از یک طرف ممکن است به دلیل عریض بودن میدان دید لنز دوربین، تصاویر گرفته شده دچار اعوجاج مکانی شوند که در علم اپتیک از آن به عنوان اعوجاج

¹ Median

² Low pass

³ Bilinear



شکل ۹ تصویر باینری حاوی مسیرهای جستجوی شعاعی برای تعیین مرکز دوران را نشان می‌دهد.

۵-۲-۲- الگوریتم تعیین مدول

برای پیاده‌سازی این الگوریتم عملیات زیر طبق گام‌های ۱۲ تا ۱۳ برنامه‌نویسی می‌شود:

- برای تعیین خارجی‌ترین نقاط ناحیه چرخدنده در تصویر، با ترسیم خطوط افقی و عمودی لبه‌یابی محیط چرخدنده به صورت اولیه انجام می‌شود.

- از نقاط بیرونی بدست آمده چهار نقطه خارجی انتخاب و از آن‌ها یک دایره به عنوان دایره اولیه ادندوم برازش می‌شود.

- برای دستیابی به دایره‌ای دقیق‌تر یک مسیر جستجوی دایره‌ای با شعاعی به اندازه ۵ پیکسل کمتر از شعاع لبه ادندوم انتخاب می‌شود. با توجه به مشاهدات، بازه‌ی انتخاب شده‌ی پنج پیکسلی برای تشخیص پیکسل‌های خاکستری کافی می‌باشد.

- لبه‌یابی روی مسیر جستجوی تعیین شده، شمارش تعداد پهلوهای دندانه‌ها و سپس محاسبه تعداد دندانه‌ها (تعداد دندانه‌ها نصف تعداد پهلوهاست) و محاسبه زاویه بین دو دندانه متوالی از طریق رابطه ۱۷:

$$\gamma = 360^\circ / z \quad (17)$$

برای تعیین قطر دقیق ادندوم یک سری مسیر جستجوی خطی که نقطه شروع آن‌ها مرکز دوران چرخدنده و نقطه انتهایی از وسط دندانه‌ها می‌گذرد. سپس لبه‌یابی در امتداد مسیر جستجوی تعیین شده و یک دایره بر z نقطه (تعداد دندانه‌ها) بدست آمده برازش می‌شود و قطر بدست آمده به عنوان قطر نهایی دایره ادندوم معرفی می‌شود. مقدار مدول عرضی از طریق رابطه ۱ بدست می‌آید.

۵-۲-۳- الگوریتم محاسبه خطای گام راست و چپ

این الگوریتم به صورت زیر پیاده‌سازی گردید:

- محاسبه مقدار ایده‌آل برای مدول عرضی، شعاع دایره گام و گام دایره‌ای راست و چپ به ترتیب با استفاده از معادلات ۱، ۳، ۲.

- تعیین یک مسیر جستجوی دایره‌ای به مرکز نقطه دوران و شعاع دایره گام.

- لبه‌یابی روی مسیر جستجوی تعیین شده، ثبت مختصات نقطه لبه‌ها.

- استفاده از مختصات نقاط تعیین شده در گام قبل برای محاسبه مقدار واقعی گام راست و چپ و تعیین انحراف آن‌ها از مقدار ایده‌آل.

۵-۲- الگوریتم‌های بینایی ماشین

این الگوریتم‌ها در گام‌های ۸ تا ۲۰ از فلوچارت شکل ۳ بوده بطوریکه شامل لبه‌یابی و برازش منحنی است که برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف چرخدنده از آن‌ها استفاده می‌شود. الگوریتم لبه‌یابی محل بروز هرگونه اختلاف شدید در شدت روشنایی را به عنوان یک نقطه لبه در نظر می‌گیرد. برای لبه‌یابی در اینجا از عملگر کرنل برای محاسبه قوت لبه استفاده می‌شود. عملگر کرنل یک تقریب موضعی از تبدیل فوریه مشتق مرتبه اول منحنی تغییرات شدت روشنایی پیکسل‌های روی مسیر جستجو است. بنابراین، منحنی تغییرات دامنه پیکسل‌های مسیر جستجو در حوزه فرکانسی بدست می‌آید. به این ترتیب پیک‌هایی که از یک حد آستانه تعریف شده قوی‌تر باشند به عنوان لبه شناخته می‌شوند. سپس با اعمال یک برازش سهموی بر هر یک از پیک‌های لبه، می‌توان به دقت زیر پیکسل دست یافت [۱۴].

۵-۲-۱- تعیین مختصات مرکز دوران چرخدنده

مرکز دوران چرخدنده از این لحاظ اهمیت دارد که در تعیین مسیرهای لبه‌یابی برای اندازه‌گیری گام و تعیین نقاط جستجوی مربوط به پروفیل اینولوت چرخدنده یک نقطه مرجع است. برای پیاده‌سازی این الگوریتم گام‌های زیر باید برنامه‌نویسی شود (شکل ۹):

- فراخوانی مقدار مساحت سوراخ مرکزی چرخدنده

- محاسبه شعاع تقریبی سوراخ مرکزی با استفاده از معادله ۱۵.

$$r_{hole} = \sqrt{A / \pi} \quad (15)$$

که در آن A مساحت سوراخ مرکزی است.

- فراخوانی مختصات مرکز مستطیل محصورکننده چرخدنده که در گام ۸ فلوچارت تعیین شده و تعریف آن به عنوان مبدأ یک دستگاه مختصات اولیه.

- تعیین یک ناحیه جستجوی حلقوی که مرکز آن مبدأ مختصات اولیه است و شعاعهای داخلی و خارجی آن از روابط ۱۶ حاصل می‌شوند.

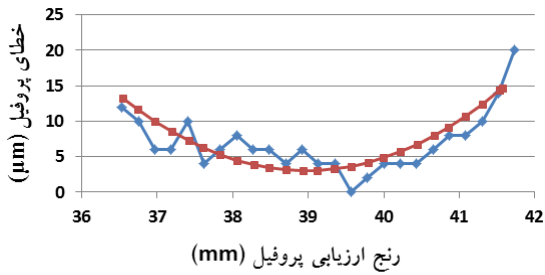
$$r_{out} = r_{hole} + 100, r_{in} = r_{hole} - 100 \quad (16)$$

مقادیر بدست آمده از روابط ۱۶ بر حسب پیکسل هستند. با مطالعه پیکسل‌های تصاویر گرفته شده مشاهده شد جهت پوشش خارج از مرکزی مبدأ اولیه و لنگی سوراخ، عدد ۱۰۰ پیکسل کافی می‌باشد و طبق مشاهدات، خارج از این محدوده فقط روشنایی و تاریکی وجود دارد.

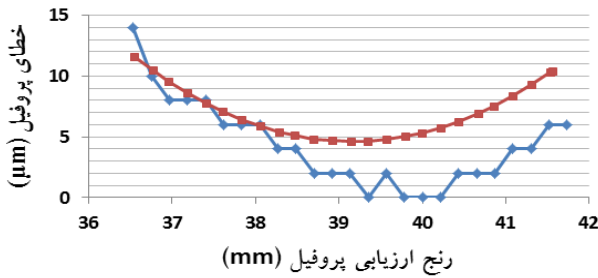
- لبه‌یابی در امتداد یکسری مسیر جستجوی شعاعی در ناحیه جستجوی تعیین شده در مرحله قبل و تعیین مرکز سوراخ. (در الگوریتم لبه‌یابی نقطه لبه‌هایی که انحراف زیادی از دایره برازش شده دارند به طور خودکار از مجموعه نقاط تحت برازش حذف می‌شوند، بنابراین حتی وجود جای خار تأثیر منفی بر دقت لبه‌یابی نخواهد داشت.)

- قرار دادن دستگاه مرجع نهایی روی مرکز سوراخ.

بودن سیگنال مورد علاقه، خارج از مرکزی دایره گام چرخنده و دایره سوراخ مرکزی آن است (شکل ۱۲).



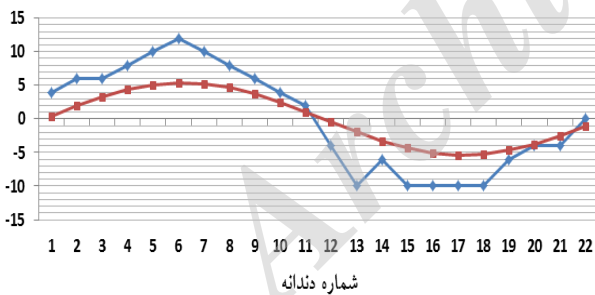
شکل (۱۱-الف) - خطای پروفیل چپ



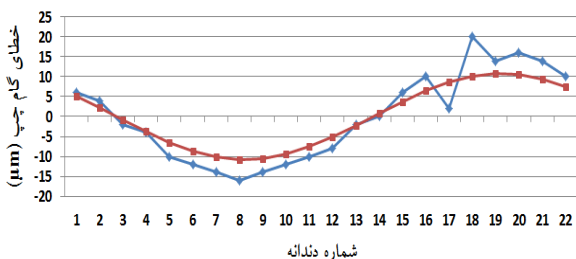
شکل (۱۱-ب) - خطای پروفیل راست

شکل ۱۱ - مقایسه خطای پروفیل چرخنده با روش پردازش تصویر و CGMM

همچنین به عنوان نمونه، خطای پروفیل اینولوت سمت راست و چپ یکی از دندانه‌های چرخنده شماره ۲ با دور روش اندازه‌گیری در شکل ۱۱ نشان داده شده است و خطای گام ۲۲ دندانه نیز با دو روش اندازه‌گیری برای سمت راست و چپ در شکل ۱۲ نمایش داده شده است



شکل (۱۲-الف) - خطای گام راست



شکل (۱۲-ب) - خطای گام چپ

شکل ۱۲ - مقایسه خطای گام چرخنده با روش پردازش تصویر و CGMM

ذخیره مقادیر محاسبه شده در گام ۴ به صورت فایل متنی و نمودار.

۵-۲-۴ - الگوریتم محاسبه انحراف پروفیل دندانه‌ها

این الگوریتم بصورت زیر برنامه‌نویسی شد:

- زاویه فشار، زاویه ماریچج و مدول اسمی چرخنده در صورتی که از کاربر خواسته شود.

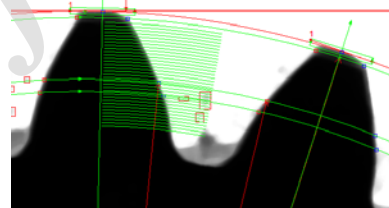
- یک مسیر جستجوی دایره‌ای به شعاع دایره مبنا

- تعیین یک مسیر جستجوی کماتی از شعاع مبنا تا شعاع اندوم انجام می‌شود و در آن همه کمان‌ها فقط یک پهلوی دندانه را قطع کنند و سپس لبه‌یابی روی این مسیرهای جستجو و ثبت مختصات نقطه‌لبه‌ها انجام می‌شود.

- جهت بررسی و مقایسه پروفیل دنده بدست آمده با مقدار نامی بایستی پروفیل بدست به یک مختصات محلی انتقال داده شود، به این منظور ماتریس دوران هر پروفیل با توجه به زوایای بدست آمده در گام ۱۷ ضرب شود.

- انحراف هریک از نقاط هر پروفیل دندانه از پروفیل ایده‌آل با استفاده از معادلات ۱۴ و ۱۱ محاسبه می‌شود.

نتیجه تصویر بزرگنمایی شده از دندانه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ - لبه‌یابی کماتی برای تعیین مختصات نقطه لبه‌های پروفیل

۵-۲-۵ - تعیین سیگنال هدف و اعمال فیلتر وقتی

معمولاً سازندگان چرخنده جهت ایجاد آزادی در ریشه و نوک دندانه‌ها، پهلوه‌های دندانه‌ها را به گونه‌ای می‌تراشند که در نیمه رنج ارزیابی نسبت به پروفیل ایده‌آل قوس بیشتری داشته باشد.

استاندارد ISO-TR10064-1 [۱۵] اثر پروفیل طراحی و میانگین دندانه‌های بشکه‌ای شده را به صورت سهموی در نظر گرفته است.

به همین دلیل نوعی فیلتر وقتی که با استفاده از آن میانگین مربعات خطاها به حداقل خود می‌رسد و منحنی سهموی هدف

بهترین برآزش را از داده‌های اندازه‌گیری شده دارد، اعمال شده است. این فیلتر مبتنی بر میانگین و انحراف معیار داده‌های خطای

پروفیل است، به طوریکه سیگنال‌های آلوده به نویز را که دامنه خاصی دارند را بصورت خطی برش می‌دهد. جهت خطوط برشی

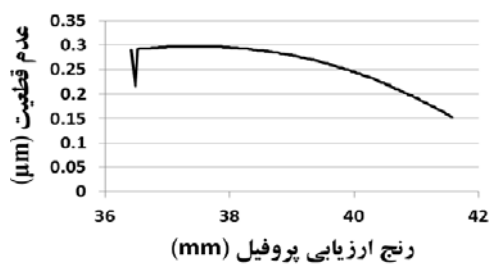
از جهت تحذب سهمی برآزش شده بر داده‌های خام تشخیص داده می‌شود. نتایج داده‌های نهایی بدست آمده به روش پردازش تصویر

در شکل ۱۱ با رنگ قرمز نشان داده شده است. در مورد داده‌های بدست آمده برای گام راست و چپ از یک فیلتر وقتی با سیگنال

مورد علاقه سینوسی استفاده شد. بدیهی است که علت سینوسی

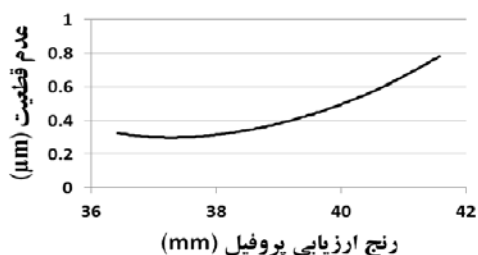
نمونه‌ای از منحنی‌های عدم قطعیت خطای پروفیل در اندازه‌گیری چرخنده ۲ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

عدم قطعیت اندازه‌گیری خطای پروفیل (1L)



شکل (۱۳-الف) - عدم قطعیت پروفیل چپ

عدم قطعیت اندازه‌گیری خطای پروفیل (1R)



شکل (۱۳-ب) - عدم قطعیت پروفیل راست

شکل ۱۳ - عدم قطعیت اندازه‌گیری خطای پروفیل‌های دندانه ۲ چرخنده

۸ نتیجه‌گیری و بحث

در این تحقیق یک سامانه بینایی ماشین برای اندازه‌گیری و بازرسی گام و پروفیل چرخنده مارپیج طراحی و پیاده‌سازی شده و از چرخنده در معرض نور پس‌زمینه تصویربرداری می‌شود. سپس تصاویر گرفته شده توسط نرم‌افزاری که به زبان G و در محیط لب-ویو نوشته شده، پردازش می‌شود و نتایج اندازه‌گیری در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. سامانه اندازه‌گیری قبل از آزمایش کالیبره می‌شود و پس از آن اندازه‌گیری پارامترهای چرخنده انجام می‌شود. جهت ارزیابی صحت سامانه بینایی پیشنهادی، از یک دستگاه CGMM با تفکیک‌پذیری دو میکرون برای اندازه‌گیری پارامترهای چرخنده استفاده شده است. مقایسه نتایج اندازه‌گیری روش بینایی ماشین و دستگاه CGMM، نشان داد نتایج بدست آمده توسط بینایی ماشین تفاوت ناچیزی با این روش داشته و در حد ده میکرومتر می‌باشد. همچنین عدم قطعیت اندازه‌گیری در تکرارهای متعدد کمتر از یک میکرومتر بدست آمد. برای افزایش دقت و عملکرد سامانه، می‌توان از دوربین‌های صنعتی با تفکیک-پذیری بالاتر و دارای قابلیت کلیدزنی اتوماتیک و ارتباط آنلاین با کامپیوتر استفاده کرد.

مراجع

- [1] Galyerand J. F. W., Shotbolt C. R., "Metrology for Engineers", 5th Ed., English Language Book Society /Cassell, London, 1988.

۳-۵ صحه‌گذاری سامانه بینایی پیشنهادی

برای صحه‌گذاری نتایج اندازه‌گیری خطاهای پروفیل و نیز گام‌های راست و چپ چرخنده با بینایی ماشین، از یک ماشین CGMM با نام تجاری HÖFLER EMZ 402 که دارای قدرت تفکیک 2μm است، استفاده شد. همچنین مشخصات اسمی دو چرخنده مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات چرخنده‌های مورد آزمایش

شماره چرخنده	تعداد دندانه	مدول نرمال	زاویه فشار	زاویه مارپیج	ضریب جابجایی پروفیل (mm)
۱	۲۰	۳/۷۵	۲۴°	۰°	۰/۳۰
۲	۲۲	۳	۲۰°	۳۰°	۰/۱۸

۶ تحلیل نتایج بدست آمده

در این قسمت نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای مختلف سه دندانه از هر چرخنده مربوط به جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ حداکثر خطای نتایج اندازه‌گیری پروفیل با روش پیشنهادی مقاله و دستگاه CGMM نمایش داده شده است.

جدول ۲ حداکثر اختلاف نتایج اندازه‌گیری پروفیل با دو روش بینایی ماشین و CGMM بر حسب میکرومتر

شماره چرخنده	پهلوی 1R	پهلوی 1L	پهلوی 2R	پهلوی 2L	پهلوی 3R	پهلوی 3L
۱	۲/۵	۴/۱	۶/۱	۴/۶	۵/۳	۳/۱
۲	۵/۷	۵/۴	۷/۵	۹/۷	۹/۵	۴/۱

۷ تحلیل عدم قطعیت سیستم

در این مقاله برای محاسبه عدم قطعیت سیستم بینایی مورد استفاده، از هر یک از دو چرخنده‌ی معرفی شده در جدول ۱ ده بار (n=10) تصویربرداری شده و توسط سامانه بینایی معرفی شده پردازش بعمل آمده است. داده‌های خطای پروفیل برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری استفاده شده است.

عدم قطعیت استاندارد اندازه‌گیری از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$u = s / n \quad , \quad s = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)]}^{0.5} \quad (18)$$

در این رابطه u عدم قطعیت، s انحراف استاندارد، n تعداد دفعات اندازه‌گیری و \bar{x} میانگین داده‌ها می‌باشد. عدم قطعیت سایر دندانه‌های چرخنده یک و دو نیز به همین ترتیب اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که عدم قطعیت اندازه‌گیری پروفیل‌های و سایر پارامترهای چرخنده زیر یک میکرومتر می‌باشد.



مهران محبوب‌خواه مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی خود در رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید را به ترتیب از دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر، صنعتی شریف و تربیت مدرس به ترتیب در سالهای ۱۳۷۷، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ دریافت کرد. وی از سال ۱۳۸۶ بعنوان

عضو هیأت علمی تمام وقت در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز مشغول فعالیت می‌باشد و هم اکنون با درجه دانشیاری در حوزه‌های پژوهشی طراحی، تحلیل و ساخت ماشین ابزارهای پیشرفته، رباتهای موازی، ابزار دقیق و پردازش تصویر مشغول فعالیت است.



توحید کریم‌بابازاده ممقانی مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود در رشته مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید را به ترتیب از دانشگاه‌های جامع علمی کاربردی و دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران به ترتیب در سالهای ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲ دریافت کرد. وی از سال ۱۳۹۰ بعنوان

مهندس طراح در بخش ابزار سازی شرکت بنیان دیزل تبریز و از سال ۱۳۹۲ به عنوان مربی در دانشگاه آزاد اسلامی مشغول به فعالیت می‌باشد و هم اکنون در حوزه‌های پژوهشی اندازه‌گیری دقیق و پردازش تصویر مشغول به فعالیت است.

- [2] Robinson M. J., "The Accuracy of Image Analysis Method in Spur Gear Metrology", Measuring Science and Technology, Vol. 6, pp. 860-871, 1995.
- [3] Gadelmawla E.S., "Computer Vision Algorithms for Measurement and Inspection of Spur Gears", Measurement, Vol. 44, pp. 1669-1678, 2011.
- [4] A. Younes, "Automatic Measurement of Spur Gear Dimensions Using Laser Light. Part 1: Measurement of Tooth Thickness and Pitch", Optical Engineering, Vol. 44, No. 8, 087201-0872013, 2005.
- [5] Younes M. A., Khalil A. M. and Damir M. N., Automatic measurement of spur gear dimensions using laser light, part2: measurement of flank profile, Optical Engineering, vol. 44 Issue 10, 103603-1036010, 2005.
- [۶] خلیلی، خلیل. «کنترل کیفیت چرخدنده به کمک بینایی ماشین»، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ماشین‌بینایی و پردازش تصویر ایران، انجمن بینایی ماشین و پردازش تصویر ایران. ۲۵ الی ۲۶ بهمن ماه ۱۳۸۵ دانشگاه فردوسی، مشهد.
- [7] Okuyama E., Kiyono S. and Moritoki H., Investigation of an optical noncontact gear geometry measurement system: measurement of pitch errors and tooth profiles, Precision Engineering, Vol.16, pp. 117-123, 1994.
- [۸] خلیلی، خلیل، «کنترل پروفیل چرخدنده ساده به کمک بینایی ماشین»، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، انجمن مهندسان مکانیک ایران ۲۴ الی ۲۶ اردیبهشت ۱۳۸۷ دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
- [9] Budynas and Nisbett., Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.
- [10] Elements of metric gear technology, Kohara Gear Company of Japan, No. 234, 2010.
- [11] ISO 1328-1, cylindrical gears- ISO system of accuracy, part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth. The International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 2013.
- [12] Hornberg A., Handbook of machine vision, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2006.
- [13] Gonzalez R. C., Woods R. E., "Digital Image Processing", 2nd Ed., Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
- [14] NI Vision Concepts Manual, National Instruments Corporation, Austin, Texas, 2008.
- [15] ISO/TR 10064-1, Cylindrical Gears-Code of inspection practice, Part 1: Inspection of corresponding flanks of gear teeth, 1st ed., the International Organization for Standardization, Genève, Switzerland. 1992.