دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی‌تکنیک تهران)

جبران خطاهای هندسی ماشین فرز کنترل عددی سه محوره توسط اصلاح کدهای ماشین‌کاری

ارایه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط:

مهرداد واهبی نوجه‌ده

استاد راهنما:

دکتر بهروز آرزو

دانشکدهٔ مهندسی مکانیک

۱۳۸۶

شماره :
تاریخ :

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی ارشد

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : مهرداد واهبی نوجه ده **دانشجوروزانه**

شماره دانشجویی : 84126018 **دانشکده** : مهندسی مکانیک **رشته تحصیلی** : **ساخت و تولید**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما / استادان راهنما: دکتر بهروز آرزو

عنوان به فارسی : جبران خطاهای هندسی ماشین فرز CNC سه محوره توسط اصلاح کدهای ماشین کاری

عنوان به انگلیسی : Geometrical Error Compensation of 3-axis CNC Machine Tool by G-code Program Modification

نوع پروژه : **کارشناسی ارشد** **کاربردی** ☐ **بنیادی** ☐ **توسعه‌ای** ☐ **نظری**

تاریخ شروع : 85/6/1 **تاریخ خاتمه** : 86/12/14 **تعداد واحد** : ۶

سازمان تأمین کننده اعتبار : معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبر

واژه های کلیدی به فارسی : **جبران خطای هندسی ، کد ماشین کاری، دستگاه فرز سه محوره**

واژه های کلیدی به انگلیسی : **Geometrical error compensation , G-code , 3 axes milling machine tool**

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما / استادان راهنما : دکتر بهروز آرزو

دانشجو : مهرداد واهبي نوجه ده امضا استاد راهنما : تاریخ :

گاه لحظاتی تنگ و طاقت‌فرسا، عرصهٔ تحقیق و مطالعه را بر شاگرد دشوار می‌سازد. لکن درایت، تجربه و تشویق استاد چنین لحظه‌هایی را به خاطراتی خوش بدل خواهد کرد.

بدین وسیله از زحمت‌ها و همراهی‌های بی‌دریغ استاد ارجمندم

جناب آقای دکتر بهروز آرزو

صمیمانه تشکر می‌کنم.

حمایت‌های بی‌نظیر اعضای محترم خانواده و دوستان عزیزم در طول انجام پروژه قابل ستایش و قدردانی است.

تقدیم به

سرایندگان شعر سبز زندگی

پدر و مادر

اعلام منحصر به‌فرد بودن پایان‌نامه

بدین وسیله اعلام می‌گردد که مطالب مندرج در این پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرکی توسط اینجانب و یا فرد دیگری ارائه نشده است.

مهرداد واهبی نوجه‌ده

۸۶/۱۱/۱

چکیده

دقت ابعادی و هندسی قابل دستیابی در قطعه‌های تولید شده توسط ماشین‌ابزار کنترل عددی متاثر از خطاهای حجمی موجود در فضای کاری ماشین است. بخشی از عامل‌های ایجاد کنندهٔ این خطا وابسته به ماشین بوده و بخشی دیگر نیز با فرآیند ماشین‌کاری مرتبط هستند. خطاهای وابسته به فرآیند ماشین‌کاری از طریق تغییر شرایط و پارامترهای ماشین‌کاری و خطاهای وابسته به ماشین‌ابزار نیز توسط روش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قابل کاهش و جبران می‌باشند. خطای هندسی محورهای حرکتی ماشین‌ابزار از جمله خطاهای وابسته به ماشین است که در اغلب ماشین‌های ابزار کنترل عددی موجب کاهش کیفیت ابعادی و هندسی قطعه‌کار می‌گردد. جبران سخت‌افزاری این نوع خطا همواره میسر نبوده و از طرفی هزینه‌های مالی و زمانی سنگینی را به تولید کننده تحمیل می‌کند. جبران نرم‌افزاری نیز بسته به تکنولوژی بکار رفته در ساخت واحد کنترل محدودیت‌هایی را به همراه دارد. جبران خطا از طریق تصحیح کدهای ماشین‌کاری می‌تواند محدودیت‌های روش جبران نرم‌افزاری و دشواری‌های جبران سخت‌افزاری را از میان بردارد. در کار حاضر جبران نرم‌افزاری و غیرهمزمان خطاهای هندسی تکرارپذیر در دستگاه کنترل عددی سه محوره بررسی شده است. روش مدل‌سازی سینماتیکی محورهای ماشین‌ابزار جهت تبدیل بیست‌ویک مولفهٔ خطای هندسی ماشین به بردار خطای حجمی بکار گرفته شده است. مسیر نامی حرکت ابزار از طریق تحلیل کد ماشین‌کاری اولیه استخراج می‌گردد. با نقطه‌گذاری این مسیر در فاصله‌هایی مشخصی و اعمال مقادیر خطای حجمی محاسبه شده در این نقطه‌ها، مسیر واقعی حرکت ابزار بدست می‌آید. اختلاف بین مسیر نامی و مسیر واقعی ابزار از طریق اصلاح کد ماشین‌کاری اولیه و تعیین مسیر معادل کاهش خواهد یافت. نرم‌افزاری تهیه شده که فرآیند تحلیل مسیر ماشین‌کاری و اعمال مقادیر خطاهای هندسی برنامهٔ ماشین‌کاری با خطای جبران شده را به صورت خودکار تولید می‌کند. این نرم‌افزار با دریافت مشخصات هندسی ماشین، مشخصات ابزار، مقادیر بیست‌ویک مولفهٔ خطاهای هندسی محورهای حرکتی و کد ماشین‌کاری اولیه به عنوان ورودی، کد ماشین‌کاری با خطای جبران شده را تولید می‌کند. صحت عملکرد نرم‌افزار توسط شبیه‌سازی کامپیوتری و آزمون تجربی تایید شده است.

فهرست مطالب

پیش‌گفتار ۱

۱- فصل اول: مقدمه ۳

۱-۱- هدف از اجرای پروژه ۵

۱-۲- پیشینهٔ تحقیق ۷

۲- فصل دوم: خطاهای ماشین‌ابزار ۱۲

۲-۱- خطای ناشی از نیروهای براده‌برداری ۱۴

۲-۲- خطای جاماندگی ۱۵

۲-۳- خطای ناشی از تغییرات دما ۱۶

۲-۴- خطای هندسی ماشین‌ابزار ۱۷

۲-۴-۱- خطای موقعیتی ۱۷

۲-۴-۲- خطای عدم مستقیم بودن ۱۸

۲-۴-۳- خطای زاویه‌ای ۱۸

۲-۴-۴- خطای عدم عمود بودن ۱۹

۲-۵- اندازه‌گیری خطاهای هندسی ۱۹

۳- فصل سوم: مدل‌سازی سینماتیکی خطاهای هندسی ماشین ابزار ۲۲

۳-۱- خطای هندسی ماشین‌ابزار ۲۶

۳-۱-۱- خطای موقعیتی ۲۶

۳-۱-۲-خطای عدم مستقیم بودن ۲۷

۳-۱-۳- خطای چرخشی ۲۷

۳-۱-۴- خطای عدم عمود بودن ۲۷

۳-۲- مدل سینماتیکی ۲۸

۳-۲-۱- سینماتیک جسم صلب ۳۰

۳-۲-۲- انتقال جابجایی خالص ۳۰

۳-۲-۳- انتقال چرخشی خالص ۳۱

۳-۲-۴- انتقال مرکب ۳۲

۳-۲-۵- ماتریس انتقال چرخشی با زاویه‌های کوچک ۳۳

۳-۲-۶- ماتریس انتقال همگن و مدل سینماتیکی خطای ماشین‌ابزار ۳۴

۳-۲-۷- خطای رابط و بند ۳۵

۳-۲-۸- بحث تکمیلی خطای زاویه‌ای ۳۷

۳-۲-۹- خطای عدم عمود بودن ۳۹

۳-۳- ترکیب محور در دستگاه‌های سه محوره ۳۹

۳-۳-۱- محور حامل ابزار ۴۰

۳-۳-۲- محورهای حامل قطعه‌کار ۴۳

۳-۳-۳- بردار برآیند خطا ۴۸

٤- فصل چهارم: جبران خطاهای هندسی در مسیر ماشین‌کاری ٤٩

۴-۱- میانیابی ۵۳

۴-۱-۱- روش عددی میانیابی خط راست ۵٤

۴-۱-۲- روش عددی میانیابی دایره ۵۵

۴-۱-۳- الگوریتم بکار رفته جهت میانیابی و ریز نمودن مسیرهای خطی ۵۹

۴-۱-۴- الگوریتم بکار رفته جهت میانیابی و ریز نمودن مسیرهای دایروی ٦۱

۴-۲- محاسبهٔ بردار خطا ٦٤

۴-۲-۱- دستگاه مختصاتی مجازی ٦٤

۴-۲-۲- جبران طول و شعاع ابزار ٦۵

۴-۲-۳- الگوریتم جبران شعاع و طول ابزار ٦٦

۴-۲-۴- مش‌بندی مکعبی فضای ماشینکاری ٦۷

۴-۲-۵- الگوریتم لانه‌یابی ٦۸

۴-۲-۶- الگوریتم میانیابی سه خطی ٦۹

۴-۳- ایجاد مسیر معادل ۷۱

۴-۳-۱- تعیین نقطهٔ معادل ۷۱

۴-۳-۲- الگوریتم بازگشتی جهت تعیین نقطهٔ معادل ۷۱

۴-۳-۳- جبران خطا ۷۲

۴-۴- ایجاد مسیر جدید برای حرکت ابزار ۷۳

۴-۴-۱- مسیرهای خطی ۷۳

۴-۴-۲- مسیرهای دایروی ۷٦

۵- فصل پنجم: نرم افزار ۷۹

۵-۱- فرم‌ها ۸۱

۵-۱-۱- فرم والد نرم‌افزار(*MdiMain*) ۸۱

۵-۱-۲- فرم ویرایش کد ماشین‌کاری (*frmDocument*) ۸۲

۵-۱-۳- فرم دریافت خطاهای هندسی (*frmMachineErrorSetting*) ۸۲

۵-۱-۴- فرم تنظیم‌های اصلی (*frmMainSettings*) ۸۳

۵-۱-۵- محیط شبیه‌سازی دوبعدی (*frmSimulation*) ۸٦

۵-۱-۶- فرم تولید برنامهٔ خروجی (*frmCreatGcode*) ۸۷

۵-۱-۷- فرم فشرده‌سازی (*frmCreatPackedGcode*) ۸۸

۵-۲- ماژول‌ها ۸۹

۵-۲-۱- ماژول تحلیل کد ماشین‌کاری(*MdlTextAnalysis*) ۸۹

۵-۲-۲- ماژول تحلیل مسیر حرکت ابزار(*MdlDiscrete*) ۸۹

۵-۲-۳- ماژول لانه‌یابی(*MdlNesting*) ۹۰

۵-۲-۴- هستهٔ محاسبه و مدل‌سازی سینماتیکی(*MdlKinematicsKernel*) ۹۰

۵-۲-۵- ماژول میانیابی (*MdlInterpolate*) ۹۰

۵-۲-۶- ماژول جبران خطا(*MdlCompenste*) ۹۱

۵-۳- مدیریت و گزارش خطا ۹۱

٦- فصل ششم: ارزیابی عملکرد نرم‌افزار ۹٤

۶-۱- ارزیابی کامپیوتری ۹٦

۶-۱-۱- بخش دریافت و آنالیز کد ماشین‌کاری ۹٦

۶-۱-۲- بخش تجزیه و نقطه‌گذاری مسیر ماشین‌کاری ۹۷

۶-۱-۳- بخش جبران خطا و هستهٔ مرکزی ۱۰۰

۶-۱-۴- بخش فشرده‌سازی فایل خروجی ۱۰۵

۶-۲- ارزیابی عملی ۱۰٦

۶-۲-۱- نمونهٔ اول ۱۰۹

۶-۲-۲- نمونهٔ دوم ۱۱٤

۶-۲-۳- نمونهٔ سوم ۱۱۷

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۲٤

۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۵

۷-۲- پیشنهادها ۱۲۷

۸- پیوست ۱۳۱

۸-۱- ماتریس انتقال همگن ماشین‌ابزار مثال زده شده ۱۳۲

۸-۲- بسط ماتریس انتقال همگن چرخشی ۱۳٤

۸-۳- اطلاعات تبادل شده در نرم‌افزار برای نمونهٔ‌سوم(تست عملی) ۱۳٤

۸-۳-۲- برنامهٔ ماشین‌کاری اولیه ۱۳۵

۸-۳-۳- برنامه ماشین‌کاری با خطای جبران شده (فشرده‌شده) ۱۳۵

۸-۳-۴- برنامه ماشین‌کاری با خطای جبران شده (بدون فشرده‌سازی) ۱۳٦

۸-۳-۵- فایل گزارش ۱۳۷

۹- مراجع ۱٤۰

فهرست جدول‌ها

جدول(٤-١): نمونه‌ای از مقادیر واقعی خطاهای هندسی اندازه‌گیری شده توسط تداخل سنج لیزری[٨]..... ٧٦

جدول(٦-١): نقاط ایجاد شده بروی مسیر خطی سه‌بعدی کاملا با مقادیر بدست آمده از رابطهٔ تحلیلی خط مطابق است. ٩٩

جدول(٦-٢): انطباق محاسبات در مسیر دایروی، m نقاط بدست آمده از ماژول و a نقاط محاسبه شده از رابطهٔ تحلیلی ... ١٠٠

جدول(٦-٣): مشخصات وسیلهٔ اندازه‌گیری..... ١٠٨

جدول(٦-۴): پارامترهای ماشین‌کاری و مشخصات ابزار ١٠٩

فهرست شکل‌ها

شکل(٢-١): تلورانس موقعیت‌دهی خطی(p)، انحراف از نقطهٔ مقصد (d) [٢۴]..... ١٨

شکل(٢-۵): شماتیک مربوط به نحوهٔ کارکرد سیستم‌های اندازه‌گیری تداخل سنج لیزری..... ٢٠

شکل(٢-٢): اندازه‌گیری خطاهای حجمی با استفاده از میلهٔ دو سر کروی..... ٢٠

شکل(٢-٣): طرح دیگری از ابزار اندازه‌گیری از نوع میلهٔ دوسر کروی به همراه انکودر چرخشی[٢۶]..... ٢١

شکل(٢-۴): اندازه‌گیری خطاهای هندسی با استفاده ازانکودر صفحه‌ای ($KGM182$)..... ٢١

شکل(٣-١): خطاهای زاویهای در نقطهٔ p_0 بروی محور X..... ٢٧

شکل(٣-٢): اندازه‌گیری خطای عدم عمود بودن بین دو محور حرکتی[٢٤]..... ٢٨

شکل(٣-٣): (الف):مکانیزم مدار بسته، (ب):مکانیزم مدار باز[٢٨]..... ٢٩

شکل(٣-۴): جابجایی خالص(d) و جابجایی به همراه چرخش(p) ٣٠

شکل(٣-۵): چرخش خالص حول یک محور[٢٨]..... ٣١

شکل(٣-۶): نمایش جسم صلب در فضا..... ٣٢

شکل(٣-٧): شماتیک ساختمان ماشین‌ابزار به همراه رابط(S) و بندهای مربوطه(J)[١٠] ٣۵

شکل(٣-٨): نمونه‌ای از یک رابط صلب شامل پارامترهای خطای هندسی[٢٧]..... ٣۶

شکل(٣-٩): محور یک درجه آزادی و آرایش خطاهای خطی و زاویه‌ای ٣٨

شکل(٣-١٠): نمونه‌ای از پیکره بندی ماشین سه محوره (z محور مستقل و x, y محورهای وابسته می‌باشند.)[٩] ۴٠

شکل(٣-١١): زنجیرهٔ سینماتیکی انتقال مربوط به محور ابزارگیر ۴١

شکل(٣-١٢): زنجیرهٔ سینماتیکی انتقال مربوط به محور ابزارگیر ۴٢

شکل(۳-۱۳): ترکیب سینماتیکی محور یک درجه آزادی حامل قطعه‌کار ٤٤

شکل(۳-۱٤): محور یک درجه آزادی حامل قطعه‌کار و قاب‌های مختصاتی مربوطه ٤٥

شکل(۳-۱۵): محور دو درجه آزادی حامل قطعه‌کار و قاب‌های مختصاتی مربوطه ٤٦

شکل(۳-۱٦): ترکیب خطاهای زاویه‌ای در محور حامل قطعه‌کار ٤٧

شکل(٤-۱): مسیر واقعی حرکت ابزار(R)، مسیر نامی(D) و مسیر معادل یا جبران شده(C) [۳۰] ٥١

شکل(٤-۲): روش DDA جهت میانیابی خط راست[۳۷] ٥٥

شکل(٤-۳): روش DFE جهت میانیابی خط راست[۳۷] ٥٥

شکل(٤-٤): نمایش هندسی الگوریتم میانیابی سادهٔ دایروی[۳۶] ٥٧

شکل(٤-۵): کمان حاصل از الگوریتم سادهٔ میانیابی دایروی به همراه کمان واقعی[۳٦] ٥٧

شکل(٤-٦): میانیابی دایروی تصحیح شده[۳٦] ٥٩

شکل(٤-۷): الگوریتم استفاده شده جهت میانیابی خطی ٦١

شکل(٤-۸): الگوریتم میانیابی مسیر دایروی ٦۳

شکل(٤-۹): معیار خطای وتری جهت نقطه‌گذاری مسیرهای دایروی ٦۳

شکل(٤-۱۰): مسیر ایجاد شده توسط واحد کنترل جهت جبران شعاع ٦٦

شکل(٤-۱۱): مسیر واقعی حرکت ابزار و الگوریتم جبران شعاع ٦۷

شکل(۴-۱۲): مش‌بندی فضای کاری ماشین براساس نقاط داده برداری شده ٦۸

شکل(٤-۱۳): هر کدام از نقطه‌های مقصد ابزار در یکی از المان‌ها قرار می‌گیرند ٦۹

شکل(٤-۱٤): جایگیری هر یک از نقاط مقصد ابزار در مکعب مربوطه، الگوریتم میانیابی سه خطی ۷۰

شکل(۴-۱۵): الگوریتم بازگشتی جهت تعیین نقطهٔ معادل ۷۲

شکل(٤-۱٦): مسیر خطی جبران شدهٔ ابزار قبل و بعد از فشرده‌سازی ۷۵

شکل(٤-۱۷): نمونه‌ای از مسیر دایروی جبران شده، قبل و بعد از فشره‌سازی ۷۷

شکل(۵-۱): پنجرهٔ والد و نوار ابزار تعبیه شده در آن ۸۱

شکل(۵-۲): فرم ویرایش کد ماشین‌کاری ۸۲

شکل(۵-۳): فرم‌های دریافت کنندهٔ خطاهای هندسی ۸۳

شکل(۵-۴): فرم دریافت مختصات نقطه‌های مرجع ۸۵

فهرست جدول‌ها و شکل‌ها

شکل(۵-۵): فرم دریافت مشخصات ابزار ۸۵
شکل(۵-۶): تنظیمات مربوط به بخش نقطه‌گذاری مسیر حرکت ابزار ۸۶
شکل(۵-۷): فرم تعیین پیکره‌بندی ماشین ۸۶
شکل(۵-۸): محیط شبیه‌سازی دوبعدی مسیر حرکت ابزار ۸۷
شکل(۵-۹): فرم تولید برنامهٔ خروجی نرم‌افزار و ایجاد فایل گزارش ۸۷
شکل(۵-۱۰): فرم فشرده‌سازی فایل خروجی ۸۹
شکل(۵-۱۱): چند نمونه از پیغام‌های ارسال شده از بخش‌های مدیریت و گزارش خطا ۹۱
شکل(۵-۱۲): نمای گستردهٔ بخش‌های مختلف نرم‌افزار جبران خطا ۹۲
شکل(۵-۱۳): نحوهٔ ارتباط بین ماژول‌های اصلی، ورودی‌ها و خروجی‌های نرم‌افزار ۹۳
شکل(۶-۱): نمایش نقاط و دستورات حرکتی استخراج شده از متن برنامهٔ ماشین‌کاری ۹۷
شکل(۶-۲): تحلیل مسیر سادهٔ خطی جهت ارزیابی الگوریتم نقطه‌گذاری مسیر ۹۸
شکل(۶-۳): تحلیل مسیر سادهٔ دایروی جهت ارزیابی الگوریتم نقطه‌گذاری مسیر ۹۹
شکل(۶-۴): مثالی از مسیر حرکت ابزار جهت بررسی عملکرد نرم‌افزار ۱۰۱
شکل(۶-۵): مسیر حرکت ابزار در محیط شبیه ساز نرم‌افزار ۱۰۳
شکل(۶-۶): مسیر حرکت نامی، واقعی، قبل و بعد از جبران خطا (بزرگنمایی خطا= ۱۰۰۰) ۱۰۳
شکل(۶-۷): مقادیر خطای حجمی در مسیر حرکت ابزار قبل از جبران خطا ۱۰۴
شکل(۶-۸): مقادیر خطای حجمی در مسیر حرکت ابزار بعد از جبران خطا ۱۰۴
شکل(۶-۹): انحراف ایجاد شده در اثر فشرده‌سازی مسیرهای خطی (تلورانس ۱ میکرون) ۱۰۵
شکل(۶-۱۰): انحراف شعاعی بوجود آمده در اثر فشرده‌سازی مسیر دایروی (انحراف مجاز ۰،۰۱ میلی‌متر) ۱۰۶
شکل(۶-۱۱): اندازه‌گیری خطاهای زاویه‌ای با استفاده از ساعت اندازه‌گیری و خط‌کش کدی ماشین ۱۱۰
شکل(۶-۱۲): میزان انطباق مقادیر خطاهای حجمی محاسبه شده توسط نرم‌افزار و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده بروی قطعه‌کار(نمونهٔ اول) ۱۱۱
شکل(۶-۱۳): استفاده از مفتول‌های واسطه جهت کاهش سطح تماس گیره با قطعه‌کار ۱۱۳
شکل(۶-۱۴): بهبود ایجاد شده در مسیر حرکت ابزار، حاصل از اجرای کد ماشین‌کاری با خطای جبران شده (نمونهٔ اول) ۱۱۳
شکل(۶-۱۵): عملکرد نرم‌افزار در بهبود وضعیت مسیر حرکت ابزار (نمونهٔ اول) ۱۱۴

فهرست جدول‌ها و شکل‌ها

شکل(٦-١٦): نحوهٔ بسته شدن قطعه‌کار و گیرهٔ نگه‌دارنده (نمونهٔدوم) ١١٥

شکل(٦-١٧): میزان انطباق مقادیر خطاهای حجمی محاسبه شده توسط نرم‌افزار و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده بروی قطعه‌کار(نمونهٔ دوم)..... ١١٦

شکل(٦-١٨): مسیر حرکت ابزار قبل و بعد از جبران خطا (نمونهٔ دوم)..... ١١٦

شکل(٦-١٩): تاثیر استفاده از کدهای تصحیح شدهٔ ماشین‌کاری در بهبود مسیر حرکت ابزار(نمونهٔ دوم) ١١٧

شکل(٦-٢٠): نحوهٔ بسته شدن قطعه‌کار و گیرهٔ نگه‌دارنده (نمونهٔسوم)..... ١١٨

شکل(٦-٢١): میزان انطباق مقادیر خطاهای حجمی محاسبه شده توسط نرم‌افزار و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده بروی قطعه‌کار(نمونهٔ سوم)..... ١١٨

شکل(٦-٢٢): مسیر حرکت ابزار قبل و بعد از جبران خطا (نمونهٔ سوم)..... ١١٩

شکل(٦-٢٣): تاثیر استفاده از کدهای تصحیح شدهٔ ماشین‌کاری در بهبود مسیر حرکت ابزار(نمونهٔ سوم)..... ١١٩

شکل(٦-٢٤): دستگاه فرز ٢،٥ محور مدل *DECKEL – FP4MA* ١٢١

شکل(٦-٢٥): دستگاه اندازه‌گیر *DIGIMATIC INDICATOR* ساخت شرکت *Mitutoyo* ژاپن ١٢١

شکل(٦-٢٦): گیرهٔ ساخته شده جهت نگه‌داری و زاویه‌دهی به قطعه‌کار..... ١٢٢

شکل(٦-٢٧): موقعیت‌ها و مقادیر خطای هندسی اندازه‌گیری شده برای نمونهٔاول (ابعاد برحسب میلی‌متر) ١٢٢

شکل(٦-٢٨): موقعیت‌ها و مقادیر خطای هندسی اندازه‌گیری شده برای نمونهٔدوم (ابعاد برحسب میلی‌متر)..... ١٢٣

شکل(٦-٢٩): موقعیت‌ها و مقادیر خطای هندسی اندازه‌گیری شده برای نمونهٔسوم (ابعاد برحسب میلی‌متر)..... ١٢٣

در سال‌های اخیر، پیشرفت سریع و دور از انتظار تکنولوژی کامپیوتر و علوم نرم‌افزاری سرمنشا تحولات خیره کننده‌ای در زمینهٔ فناوری تولید بوده است. توانایی تولید قطعاتی با هندسهٔ پیچیده و دقیق مرهون بکارگیری عملی کامپیوتر در کارگاه‌ها و ماشین‌های ابزار می‌باشد. دستیابی به سرعت، دقت و صحت ابعادی بالا در کنار قیمت تمام شده مناسب، تنها با ورود همه جانبه و فراگیر فناوری نوین به کارگاه‌ها و مجموعه‌های تولیدی میسر گردید. استفاده از اتوماسیون کامپیوتری واژه‌هایی چون خطای‌انسانی را کمرنگ‌تر کرده و در مقابل قابلیت پیگیری و قانونمندی خطاها را افزایش داده است.

در بسیاری از مجموعه‌های تولیدی، استفاده از ماشین‌های ابزار کنترل عددی بخشی از فرآیند تولید قطعات دقیق می‌باشد. تکنولوژی تولید بالا و پیچیدگی فراوان مجموعهٔ پردازشی و کنترلی چنین ماشین‌ابزاری، اغلب باعث تحمیل هزینهٔ تعمیر و نگهداری سنگینی به تولید کننده می‌گردد. پرداخت چنین هزینه‌هایی تنها در صورت نیاز به محدوده‌های بسته‌تر تلورانسی و دقت ابعادی بالا توجیه‌پذیر است.

روش‌های نرم‌افزاری کاهش خطا، از جمله راه‌کارهایی است که در سال‌های اخیر توجه محققین و تولید کنندگان را به خود جلب کرده است. استفاده از چنین روش‌هایی می‌تواند نیاز به تعمیرات سخت‌افزاری گران قیمت را کاهش دهد.

جبران خطاهای هندسی در ماشین‌ابزار کنترل عددی سه محوره موضوعی است که در پایان‌نامهٔ حاضر بدان پرداخته شده است. نرم‌افزاری جهت پس‌پردازش[1] کدهای ماشین‌کاری و تصحیح آنها براساس خطاهای هندسی ماشین‌ابزار و با هدف کاهش تاثیر چنین خطاهایی در صحت ابعادی قطعات تولیدی، تهیه گردیده است. مطالب پایان‌نامه در قالب فصل‌های زیر ارایه شده است:

- فصل اول: مقدمه؛ تشریح اهداف تعیین شده برای پروژه و ارایهٔ پیشینهٔ تحقیق
- فصل دوم: خطاهای ماشین‌ابزار؛ مرور مفاهیم مربوط به خطای ماشین‌ابزار و تشریح خطاهای هندسی
- فصل سوم: مدل‌سازی سینماتیکی خطاهای هندسی؛ شامل روش استفاده شده جهت مدل‌سازی خطاهای هندسی و جزییات تکنیکی مربوطه
- فصل چهارم: جبران خطاهای هندسی در طول مسیر ماشین‌کاری؛ بسط دادن مفاهیم ارایه شده در فصل قبلی و ارایهٔ راه‌کاری جهت تولید مسیر ماشین‌کاری با خطای جبران شده
- فصل پنجم: نرم افزار؛ ارایهٔ چیدمان کلی برنامهٔ کامپیوتری نوشته شده و نحوهٔ تبادل اطلاعات بین بخش‌های مختلف نرم‌افزار
- فصل ششم: ارزیابی عمکرد نرم‌افزار؛ به منظور نشان دادن میزان کارایی الگوریتم‌های استفاده شده به همراه آزمون‌های عملی صورت گرفته برای ارزیابی نرم‌افزار

[1]-Post Processing

فصل اول

مقدمه

دقت ابعادی و هندسی از مهمترین پارامترهای کیفی قطعه کار است که متاثر از دقت ماشین ابزار می‌باشد. نیاز روز افزون به ماشین‌کاری قطعاتی با محدوده‌های تلورانسی بسته‌تر منجر به تحقیقات گسترده‌ای جهت ارتقای سطح کیفی ماشین‌های ابزار گردیده است. فرسایش اجزای متحرک و بروز آسیب‌های ناشی از حوادث ناخواسته، احتمال بروز خطاهای هندسی را تقویت می‌کند. تکنیک‌های طراحی و ساخت به دلیل محدودیت‌های فیزیکی به تنهائی پاسخگوی صحت ابعادی بالا نیستند. از طرفی افزایش دقت و صحت عملکرد ماشین‌ابزار از طریق تعمیر مکانیکی و بکارگیری قطعات دقیق در ساختمان دستگاه، نیازمند صرف هزینهٔ مالی سنگین و زمان توقف زیادی است. از این رو دستیابی به سیستم‌های جبران خطای انعطاف‌پذیر، کم هزینه و کارا عمده چالش تولید کنندگان قطعات دقیق می‌باشد. امروزه برخی از دستگاه‌های پیشرفتهٔ کنترل عددی دارای توابعی جهت جبران خطاهای تکرارپذیر هستند. صرف نظر از هزینهٔ بالای این نوع کنترلرها، کارکرد توابع جبران‌ساز مذکور اغلب به خطاهای خطی محدود بوده و خطاهای زاویه‌ای را شامل نمی‌شوند. روش‌های نرم‌افزاری و شبیه‌سازی

کامپیوتری می‌تواند برآوردی سریع از دقت عملکرد ماشین را ارایه دهد. تشخیص مسیر واقعی حرکت ابزار قبل از انجام عملیات ماشین‌کاری با صرفه‌جویی مناسبی در زمان و هزینه همراه خواهد بود.

۱-۱- هدف از اجرای پروژه

هدف عنوان شده برای پروژه عبارتست از تهیهٔ نرم‌افزاری که با دریافت کد ماشین‌کاری و بیست‌ویک مولفه خطای هندسی، بتواند از طریق تصحیح کدهای ماشین‌کاری اولیه، خطاهای مذکور را در طول مسیر حرکت همراه با میانیابی ابزار جبران نمایند. جهت رسیدن به این مقصود، مراحل زیر باید به درستی طی شود:

- شناخت درست خطاهای هندسی ماشین‌ابزار کنترل عددی، نیز ابزار و روش‌های استاندارد اندازه‌گیری این خطاها
- تحلیل و مدل‌سازی ریاضی خطاهای هندسی در محیط کامپیوتر
- تعمیم خطای مدل شده به مسیر حرکت ابزار و تخمین مسیر واقعی حرکت ابزار در ماشین‌ابزار حاوی خطاهای هندسی
- ارایهٔ راه‌کارهایی جهت جبران خطا در طول مسیر ماشین‌کاری
- تولید کدهای ماشین‌کاری جدید با ساختاری مشابه با کد اولیه و خطای تصحیح شده در متن کد
- ارزیابی عملکرد نرم‌افزار جبران خطا و الگوریتم‌های مربوطه

فرض‌های بکار رفته در پروژهٔ حاضر عبارتند از:

- صلب بودن اجزای ماشین‌ابزار
- عدم پرداختن به نیروهای ماشین‌کاری و تغییر شکل ابزار
- بزرگ بودن خطاهای تکرارپذیر در برابر خطاهای تصادفی
- عدم تحلیل اثر تغییرات دما بروی خطاهای هندسی

برخی از شواهدی که به فرض‌های ذکر شده عینیت می‌بخشد عبارتند از:

- دستیابی به دقت ابعادی بالا، موضوعی است که در فاز **پرداخت** دنبال می‌شود و در چنین عملیاتی ابزار عمق درگیری کمتری دارد. از این رو در چنین شرایطی بحث تغییر شکل ابزار (در صورت تنظیم درست پارامترهای ماشین‌کاری و انتخاب ابزار مناسب) می‌تواند کنار گذاشته می‌شود. نیز مدل‌سازی صحیح فرآیند برش‌کاری و تعیین دقیق سهم ابزار در خطای ایجاد شده (در عملیات برشی سنگین‌تر) نیازمند انجام بررسی جامع و انجام کار پژوهشی مستقلی است.
- وارد ساختن روابط ترمودینامیکی و تحلیل اثر اختلاف دمای اجزای ماشین بروی صحت ابعادی قطعات تولید شده، نیازمند ارایهٔ مدل‌های پیچیده‌تری است که انجام چنین کاری خارج از حوصلهٔ این پایان‌نامه می‌باشد. از طرف دیگر در مورد خطاهای ناشی از تغییرات دمایی باید گفت که جبران غیرهمزمان چنین خطای مستلزم اعمال محدودیت‌های فراوان و فرض‌های ساده کنندهٔ بسیاری است. استفاده از سیستم‌های همزمان[1] جبران خطا، که بتواند اطلاعات دمایی را بصورت پیوسته از ماشین دریافت کند، نتایج بهتری را پدید می‌آورد. از طرفی با کنترل دما از طریق بکار گیری سیستم تهویه و مایع خنک کنندهٔ مناسب می‌توان اثر این خطا را تا حد امکان کاهش داد.
- ماشین‌های کنترل عددی اغلب دارای اسکلتی مناسب می‌باشند و در برابر نیروهای وارده (بخصوص نیروهای ضعیفی که در عملیات پرداخت بوجود می‌آید) مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند. از این رو فرض صلب بودن ساختمان ماشین لطمهٔ موثری در دستیابی به هدف عنوان شده وارد نمی‌کند.

[1]-Online