

Statistický návrh kalibrace robotických paží v procesním inženýrství

Ing. Miroslav Marčaník, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Statistický návrh kalibrace robotických paží v procesním inženýrství

**Statistical design of robotic arms calibration in process
engineering**

Autor: **Ing. Miroslav Marčaník, Ph.D.**

Studijní program: Procesní inženýrství (P3909)

Studijní obor: Nástroje a procesy (3909V013)

Školitel: prof. Dr. Ing. Vladimír Pata

Oponenti: prof. Ing. Ildikó Maňková, CSc.

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

prof. Ing. Ivan Hudec, PhD.

Zlín, prosinec 2024

© Miroslav Marcaník

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2024.

Klíčová slova: *Robotika, kalibrace, neuronová síť, chyby měření, YuMi*

Key words: *Robotics, calibration, neural network, measurement errors, YuM*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-317-1

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na prostorovou kalibraci paží robota pomocí statistických nástrojů.

V dnešní době existuje mnoho speciálních programovacích jazyků, simulací či virtuálních realit (VR), které ve většině případů kalibraci provádí pomocí maticových vztahů. Matematicko – statistické řešení není příliš často řešeno. Využívání lineárních vztahů platí jen v určitých částech v pracovním prostoru robota. Dle předběžných měření jednoznačně plyne, že linearitu paže při polohování nelze předpokládat. Účelem práce je nalezení vhodné metody, která by respektovala opotřebení mechanismu paží v předem definovaných polohách. Dle prvotních měření lze předpokládat, že optimální řešení budou získána pomocí nelineární regresní funkce, která bude exponenciálního typu. Celá tato optimalizační metoda bude hledána pomocí Newtonovy a Markwartelovy metody.

ABSTRACT

The work focuses on the spatial calibration of robot arms using statistical tools. Nowadays, there are many special programming languages, simulations or virtual realities (VR), which in most cases perform the calibration using matrix relations. Mathematical and statistical solutions are not very common. The use of linear relations is valid only in certain parts in the robot workspace. According to preliminary measurements it clearly follows that the linearity of the arm during positioning cannot be assumed. The purpose of this work is to find a suitable method that respects the wear of the arm mechanism in predefined positions. According to the initial measurements, it can be assumed that the optimal solutions will be obtained using a non-linear regression function which will be of exponential type. This whole optimization method will be sought using Newton and Markwartel methods.

OBSAH

ÚVOD.....	6
SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	7
CÍLE PRÁCE	9
1. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	10
1.1 Pouze lineární cyklus.....	10
1.2 Využití pro průmysl pomocí variačního koeficientu.....	12
1.3 Využití pro průmysl a pro vědu.....	14
1.4 Test průměru v obou směrech (ANOVA)	15
1.5 Neuronové sítě.....	18
2. DISKUZE VÝSLEDKŮ	22
3. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	24
ZÁVĚR.....	26
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	28
SEZNAM OBRÁZKŮ	32
SEZNAM TABULEK.....	33
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	34
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	35
OBORNÝ ŽIVOTOPIS.....	36

ÚVOD

Již od začátku se lidstvo zabývá otázkou “Jak zjednodušit a usnadnit práci”. První zmínku s tematikou robot můžeme najít v mytologii Řecka. Avšak první zmínku pojmu robot uvedl až Karel Čapek díky svému bratrovi Josefovi roku 1620 v díle R.U.R.. Skutečný rozmach zaznamenala robotika až ve druhé polovině 20. století. Otcem robotiky bývá často nazýván J. Engelberger. První roboti uměli v podstatě pouze přesun objektu z bodu A do bodu B.

Pro dnešní dobu by byl tento pohyb nevyhovující a robotika se musela přizpůsobit novým požadavkům, jako jsou např. montáže, svařování, stříkání barvou aj. Robot se stal multidisciplinárním inženýrským zařízením. Mechanické inženýrství je odvětví, které se zabývá návrhem jednotlivých mechanických komponentů, ramen, koncových efektorů, kinematikou, dynamikou a analýzou řízení robotů.

Robotické paže se staly klíčovým prvkem v moderním procesním inženýrství, umožňujícím automatizaci a optimalizaci výrobních a montážních procesů. Kalibrace těchto robotických paží je nezbytným krokem pro zajištění přesnosti a spolehlivosti jejich operací.

Cílem této práce je analyzovat a vyhodnotit různé statistické metody a techniky, které lze použít k navrhování a optimalizaci kalibrace robotických paží. Budeme zkoumat, jaké faktory ovlivňují přesnost a spolehlivost kalibrace, a jakým způsobem lze tyto faktory kvantifikovat a analyzovat pomocí statistických nástrojů.

Dále se zaměříme na procesní inženýrství jako konkrétní oblast aplikace, kde je kalibrace robotických paží klíčová pro dosažení požadovaných výsledků a splnění přesných specifikací. Procesní inženýrství se zabývá optimalizací výrobních procesů a maximalizací jejich účinnosti a produktivity, což činí kalibraci robotických paží ještě důležitější v této oblasti.

Tato diplomová práce se bude zabývat jak teoretickými základy statistického návrhu kalibrace robotických paží, tak i praktickými aplikacemi v prostředí procesního inženýrství. Naše analýzy a výsledky budou mít přímý dopad na průmyslovou praxi, poskytující důležité poznatky pro optimalizaci kalibračních procesů a zlepšení výkonu robotických systémů v průmyslovém prostředí.

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Kalibrace robotických paží hraje klíčovou roli v moderních průmyslových aplikacích. Její přesnost a spolehlivost jsou zásadní pro optimalizaci výrobních procesů a zajištění efektivního využití robotických systémů. Proces kalibrace spočívá v nalezení takového nastavení robotické paže, které minimalizuje chyby polohování a umožňuje dosažení požadované přesnosti ve výrobním procesu. V současné době probíhá v oblasti kalibrace významný pokrok, který zahrnuje nejen inovace v oblasti senzorických systémů a algoritmů, ale i aplikaci pokročilých statistických metod a umělé inteligence.

Publikace [1 - 7] se zabývají vylepšením kalibrace robotické paže pomocí korekcí založených na lokálních lineárních neuro-fuzzy modelech. Po standardní kalibraci geometrických parametrů v kinematickém modelu robota stále existují zbytkové chyby mezi naměřenými polohami a polohami predikovanými model.

Studie [8 – 13] se zaměřují na inerciální měřicí jednotku (IMU), která je jádrem inerciálních polohovacích a navigačních systémů. Každá IMU se skládá z nejméně tří akcelerometrů a tří gyroskopů (senzorů úhlové rychlosti).

Dalším možným řešením kinematických parametrů robota se zabývají studie [14 – 18] pomocí nelineární optimalizace nejmenších čtverců. Nelineární optimalizace nejmenších čtverců (NLS - Nonlinear Least Squares) je matematická metoda pro řešení problémů, kdy hledáme hodnoty parametrů modelu tak, aby minimalizovaly kvadratickou chybu mezi pozorovanými daty a hodnotami, které tento model předpovídá. Princip nelineární optimalizace nejmenších čtverců spočívá v nalezení hodnot parametrů modelu, které minimalizují součet čtverců reziduí (rozdílů mezi pozorovanými daty a hodnotami modelu). Základním cílem je najít takový soubor parametrů, aby bylo dosaženo co nejlepší shody mezi modelem a reálnými daty.

Existuje několik algoritmů pro řešení nelineární optimalizace nejmenších čtverců, jako je například Gauss-Newtonova metoda, Levenberg-Marquardtova metoda, metoda konjugovaných 30 gradientů atd. Tyto algoritmy iterativně aktualizují hodnoty parametrů tak, aby se minimalizovala funkce chyby. Nelineární optimalizace nejmenších čtverců je užitečná v situacích, kdy nelze modelovat data lineárním modelem, a umožňuje efektivní odhad parametrů pro složitější nelineární modely.

Další publikace [19 – 22] popisují LIDAR (Light Detection and Ranging) což je technologie vzdálenostního měření, která využívá laserových paprsků k mapování a snímání okolního prostředí. Princip fungování LIDARu je založen na vysílání laserového paprsku do okolí a následném detekování odraženého světla od povrchů objektů. Tímto způsobem lze měřit vzdálenosti od zařízení k okolním objektům, čímž vytváří detailní trojrozměrnou mapu prostředí. Výsledná mapa se nazývá LIDARový snímek nebo point cloud, což je soubor třírozměrných bodů, které reprezentují jednotlivé objekty ve scéně.

V poslední publikace [23 – 26] se zaměřují na využívání umělé inteligence (AI), která hraje klíčovou roli v robotice, jelikož umožňuje robotům provádět úkoly a rozhodovat se podobně jako lidské bytosti, nebo dokonce lépe. AI přináší robotům schopnost učit se ze zkušeností, adaptovat se na nové situace a řešit složité problémy, což z nich činí výkonné a efektivní pomocníky v mnoha odvětvích. Umělá inteligence v robotice otevírá cestu novým možnostem a inovacím. S rychlým pokrokem v oblasti strojového učení a hlubokého učení očekáváme, že bude mít stále větší vliv na to, jak roboti budou interagovat s okolním světem a jak budou plnit své úkoly. Zároveň s tím také vyvstávají etické a společenské otázky, které je třeba řešit, abychom zajistili odpovědné a bezpečné použití těchto technologií.

CÍLE PRÁCE

Cílem této disertační práce je analyzovat a vyhodnotit různé statistické metody a techniky, které lze použít k navrhování a optimalizaci kalibrace robotických paží v procesním inženýrství. Specifické cíle zahrnují:

- Identifikace faktorů ovlivňujících přesnost a spolehlivost kalibrace: Zkoumání, jaké faktory ovlivňují přesnost a spolehlivost kalibrace robotických paží, a jak lze tyto faktory kvantifikovat a analyzovat pomocí statistických nástrojů.

- Vývoj nelineárních regresních funkcí: Implementace nelineárních regresních funkcí pro kalibraci robotických paží, které respektují opotřebení mechanismu paží v předem definovaných polohách. Optimalizace těchto funkcí bude provedena pomocí Newtonovy a Markwartelovy metody.

- Využití neuronových sítí: Návrh a využití neuronových sítí, které budou obsahovat regresní funkce v čase a budou naučeny na řešení regresních úloh pro zpřesnění polohování robotických ramen.

- Praktická aplikace v procesním inženýrství: Aplikace teoretických poznatků a vyvinutých metod v prostředí procesního inženýrství, kde kalibrace robotických paží je klíčová pro dosažení požadovaných výsledků a splnění přesných specifikací.

- Optimalizace výrobních procesů: Přispění k optimalizaci výrobních procesů a maximalizaci jejich účinnosti a produktivity prostřednictvím zlepšení kalibračních procesů a výkonu robotických systémů v průmyslovém prostředí.

Tato práce se bude zabývat jak teoretickými základy statistického návrhu kalibrace robotických paží, tak i praktickými aplikacemi v prostředí procesního inženýrství, přičemž výsledky budou mít přímý dopad na průmyslovou praxi.

1. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Kalibrace robotických systémů, zejména robotických paží, je klíčovým procesem při zajišťování jejich přesnosti a spolehlivosti v průmyslových aplikacích. Proces kalibrace zahrnuje řadu kroků, od měření a nastavení parametrů robotu až po aplikaci statistických a optimalizačních metod, které pomáhají dosáhnout co nejvyšší úrovně přesnosti. V této práci byly použity kombinované metody, které zahrnovaly jak tradiční statistické přístupy, tak i moderní metody založené na umělé inteligenci, konkrétně neuronových sítích. Cílem bylo dosáhnout optimalizace kalibrace robotických paží ve specifických procesních podmínkách.

Robotická ramena jsou dnes často používána ve složitých výrobních procesech, které vyžadují vysokou úroveň preciznosti a spolehlivosti. Proto je správná kalibrace těchto systémů klíčová pro zajištění správné činnosti ve výrobním prostředí, kde jakákoli odchylka může vést ke zvýšení chybovosti, ztrátě materiálů a celkovému snížení efektivity. Tento proces je ještě důležitější v kontextu procesního inženýrství, kde se vyžaduje přesné měření a montáž.

Tato disertační práce se zaměřuje na nalezení nelineární regresní funkce a její implementování do naprogramování robota pro pohyb robotických paží. Obsahuje návrh statistických metod pro kalibraci. Která může být následně využita pro navržení neuronové sítě a bude obsahovat regresní funkci v čase a bude naučena na řešení regresní úlohy. Získáme tím způsob, jak můžeme podstatně zpřesnit polohování robotických ramen a zpřesnit kalibrační model. Dále bylo zjištěno, že opotřebení je různé, čím je nutné v praxi počítat a bude se muset nalézt samostatně pro každou paži zvlášť pomocí regresní funkce, která bude posléze zaimplementována ve vymezených bodech do robota.

1.1 Pouze lineární cyklus

Lineární cyklus robotické paže, která interaguje s odražečem, lze popsat jako pečlivě koordinovaný sled pohybů, jehož účelem je optimalizovat interakci mezi těmito dvěma komponentami. Na začátku cyklu robotická paže začne posunem směrem k odražeči, pohybující se v přímé a stabilní trajektorii, která minimalizuje zbytečné vibrace a zvyšuje přesnost trajektorie. Pohyb z výchozí pozice do koncové značíme +, pohyb zpět neboli z koncové do výchozí značíme -. Jedná se o klasické řešení pomocí normy ČSN ISO 230-2:2015.

Definice hypotéz:

$$H_0: \delta_0 = \delta_{60} = \dots = \delta_{600}$$

$$H_a: \text{NON}$$

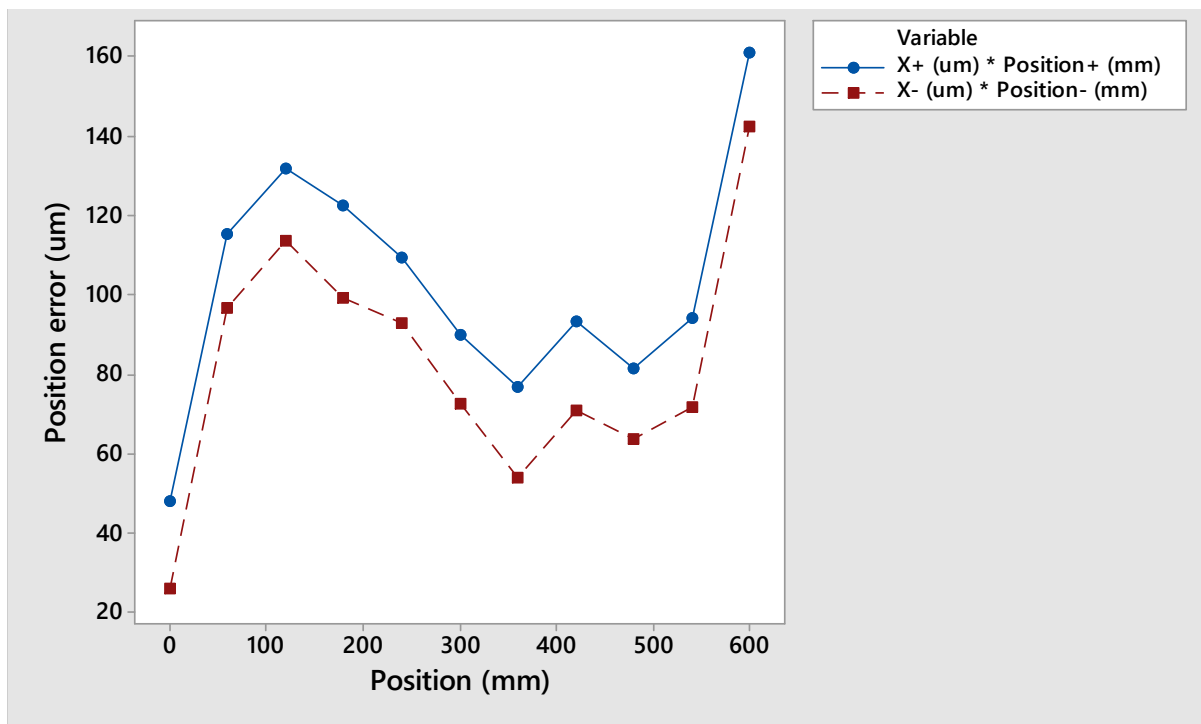
$$1 - \alpha = 0,95$$

H_0 stanovím na 95 % a tvrdím, že na 95 % se rozptyl liší náhodou a 5% se liší v důsledku chyby robota.

Tabulka 1 Důkaz problematických rozptylů pomocí V_x

Variable	Count	Mean	StDev	CoefVar
----------	-------	------	-------	---------

0+	500	48,144	11,573	24,04
0-	500	26,341	10,580	40,16
60+	500	115,560	29,110	25,19
60-	500	97,048	20,913	21,55
120+	500	132,220	12,150	9,19
120-	500	113,980	16,210	14,22
180+	500	122,720	14,380	11,72
180-	500	99,251	12,234	12,33
240+	500	109,710	20,150	18,37
240-	500	93,020	18,121	19,48
300+	500	90,139	11,582	12,85
300-	500	72,848	13,633	18,71
360+	500	77,011	16,516	21,45
360-	500	54,147	12,000	22,16
420+	500	93,339	21,786	23,34
420-	500	71,028	15,400	21,68
480+	500	81,800	22,510	27,52
480-	500	63,671	17,365	27,27
540+	500	94,428	19,721	20,88
540-	500	71,959	14,335	19,92
600+	500	161,190	14,190	8,80
600-	500	142,70	16,800	11,78



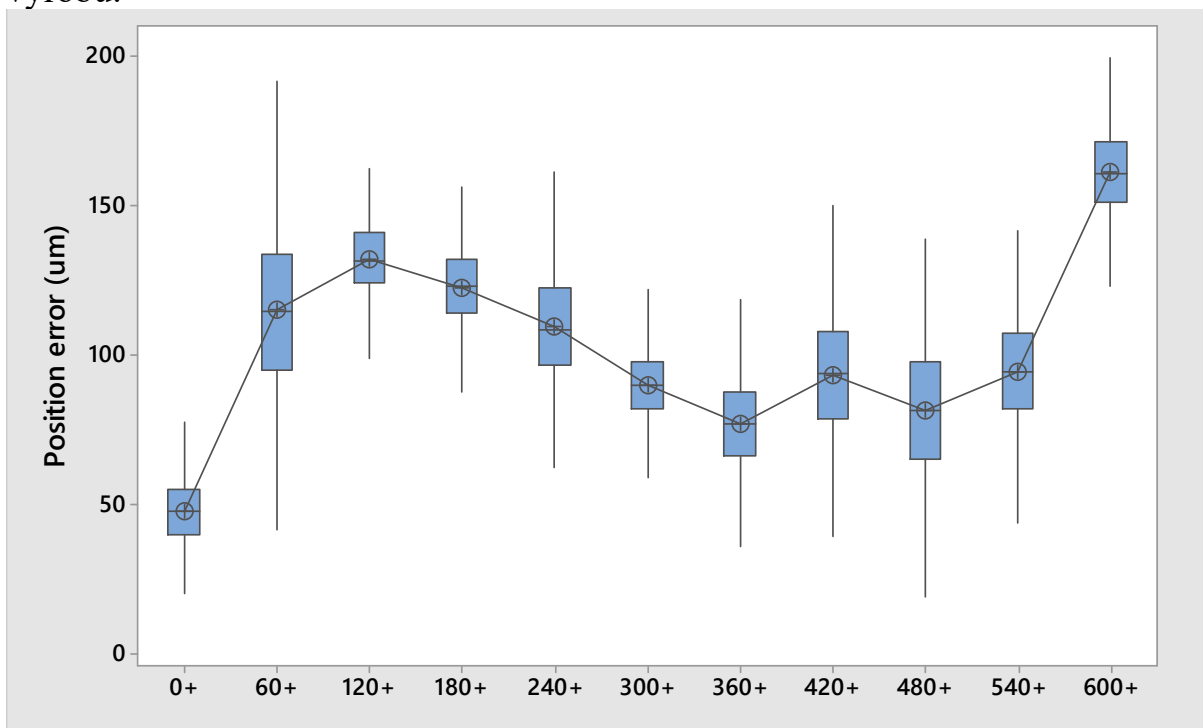
Obr. 1 Graf rozptylu pozičních chyb

Tento graf ilustruje snahu o zpřesnění polohování pomocí lineární aproximace, avšak během analýzy jsme identifikovali několik problémů. Především nebyly provedeny adekvátní testy rozptylu pozičních chyb v různých nastaveních robotické paže, což znamená, že chybí data, která by ukázala, jak se tyto chyby mění v závislosti na poloze paže. Tato informace je zásadní pro přesné hodnocení výkonu celého systému. Kromě toho nebyl proveden test normality, který by potvrdil, zda mají poziční chyby normální rozdělení, což je klíčové pro statistické zpracování dat. Je také důležité zmínit, že křivky pozičních chyb vycházejí z předpokladu linearit, ale tento předpoklad nebyl statisticky ověřen. Proto nelze s jistotou tvrdit, že lineární model přesně popisuje chování systému v celém zkoumaném rozsahu. Tyto nedostatky snižují spolehlivost výsledků a vyžadují další analýzu k ověření a případnému zlepšení modelu polohování.

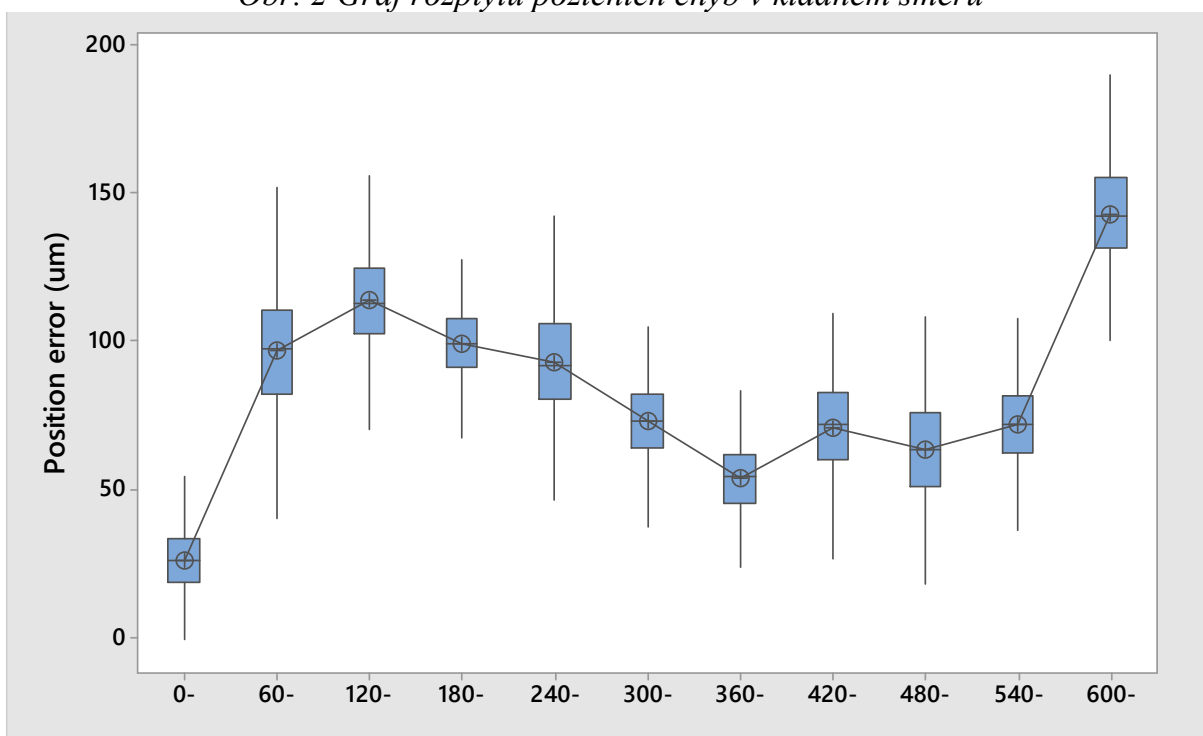
1.2 Využití pro průmysl pomocí variačního koeficientu

Kritický variační koeficient je statistický parametr, který vyjadřuje relativní variabilitu dat vůči jejich průměru a slouží k hodnocení konzistence nebo přesnosti opakovaných měření. Podle Melouna se používá jako nástroj k určení, zda míra variability překračuje přijatelné hranice pro dané experimenty. Variační koeficient je definován jako poměr standardní odchylky k průměru, vyjádřený v procentech. Kritický variační koeficient pak určuje hranici, nad kterou je variabilita nadměrná, a může naznačovat problémy v měřeních, jako jsou technické chyby nebo nevhodné podmínky. Tento parametr je klíčový pro detekci anomálií, které by mohly negativně ovlivnit výsledky výzkumu nebo kvalitu výroby. Pokud variační koeficient přesáhne kritickou hodnotu, je to signál pro nutnost revize procesu či kalibrace systému. Tím přispívá k zajištění přesnosti

a spolehlivosti v mnoha oborech, od vědeckých výzkumů po průmyslovou výrobu.



Obr. 2 Graf rozptylu pozičních chyb v kladném směru

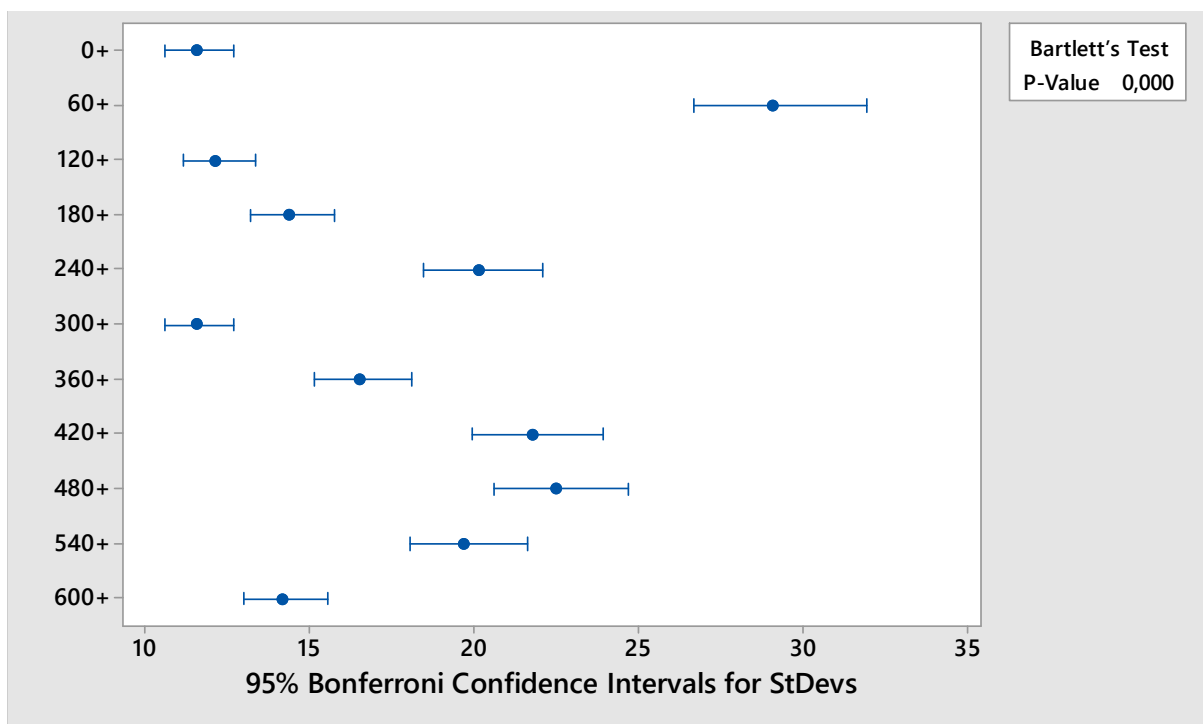


Obr. 3 Graf rozptylu pozičních chyb v záporném směru

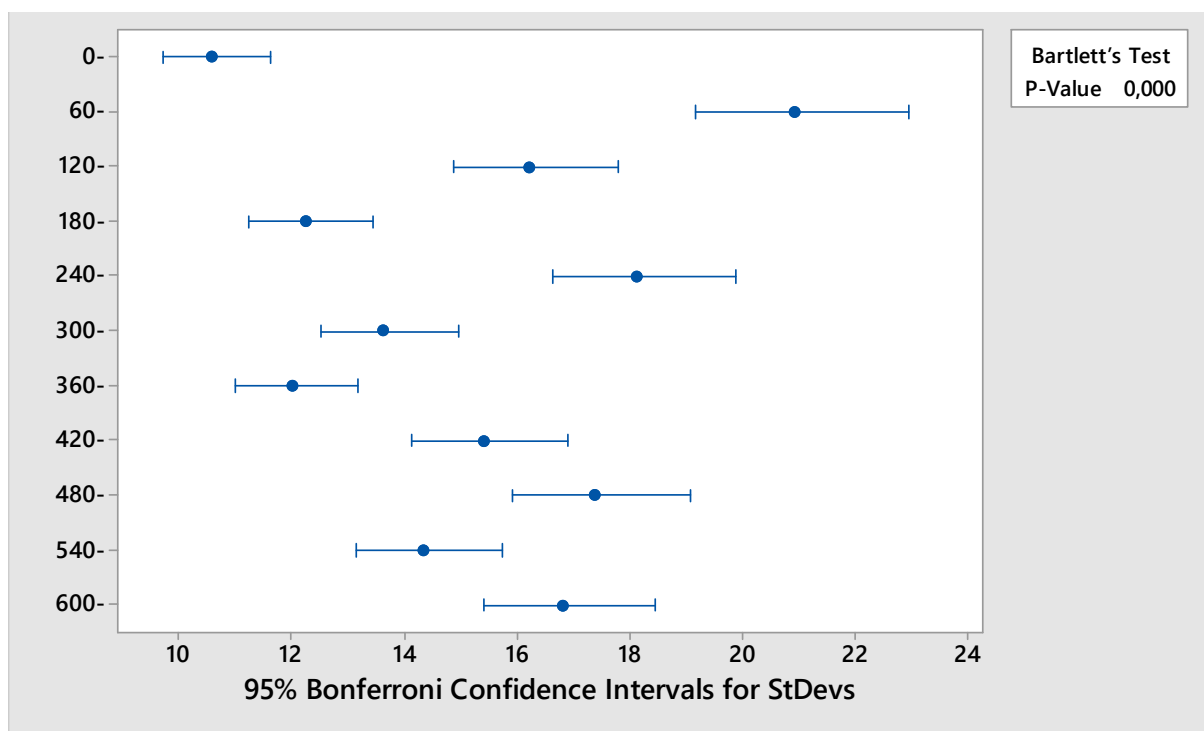
1.3 Využití pro průmysl a pro vědu

Bonferroniho intervaly spolehlivosti jsou statistickým nástrojem používaným k posouzení přesnosti odhadů v rámci více porovnání nebo testů. Tento přístup je uplatňován, aby se korigoval problém více srovnání, což je situace, kdy zvýšení počtu souběžně prováděných statistických testů vede ke zvýšení pravděpodobnosti chybně pozitivního závěru (typu I chyba). Bonferroniho korekce spočívá v nastavení více přísné hladiny významnosti pro jednotlivé testy tak, aby celková pravděpodobnost chyb byla kontrolována.

Tento postup pomáhá zredukovat pravděpodobnost falešně pozitivních závěrů v případě, že se provádí mnoho testů, a zajišťuje, že celková pravděpodobnost udělat alespoň jednu chybu typu I zůstává na akceptovatelné úrovni.



Obr. 4 Graf testu rovnosti průměrů v kladném směru

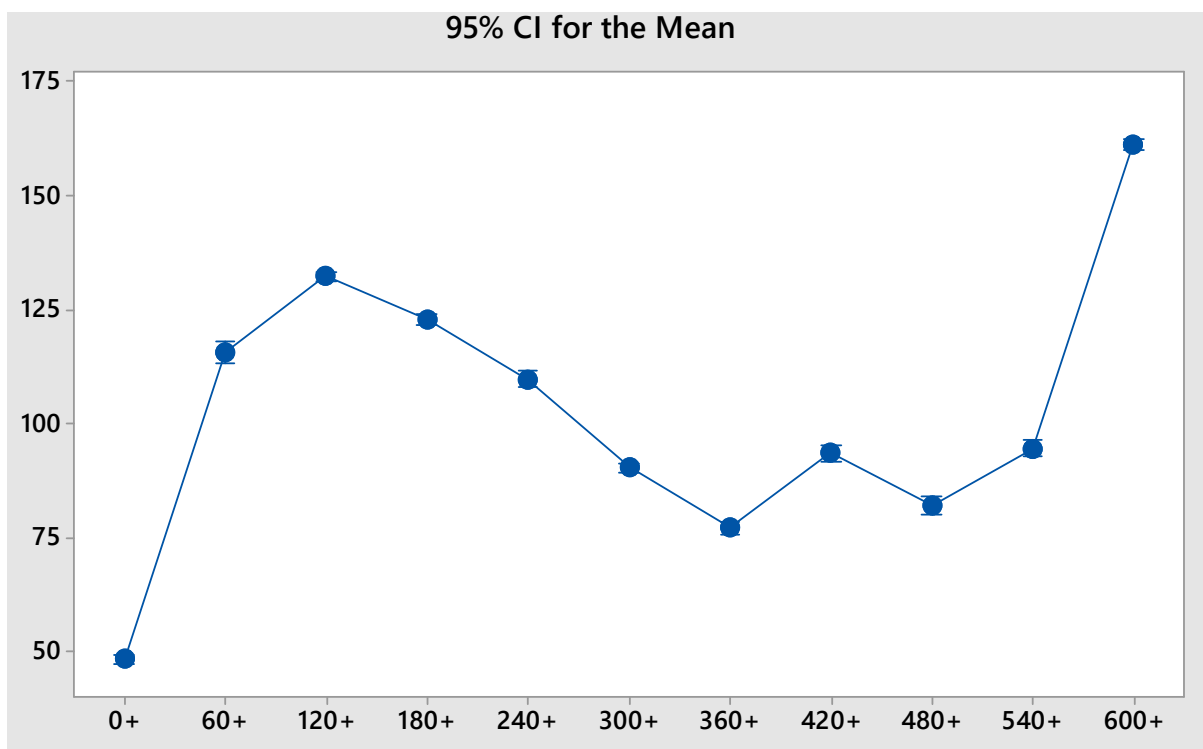


Obr. 5 Graf testu rovnosti průměrů v záporném směru

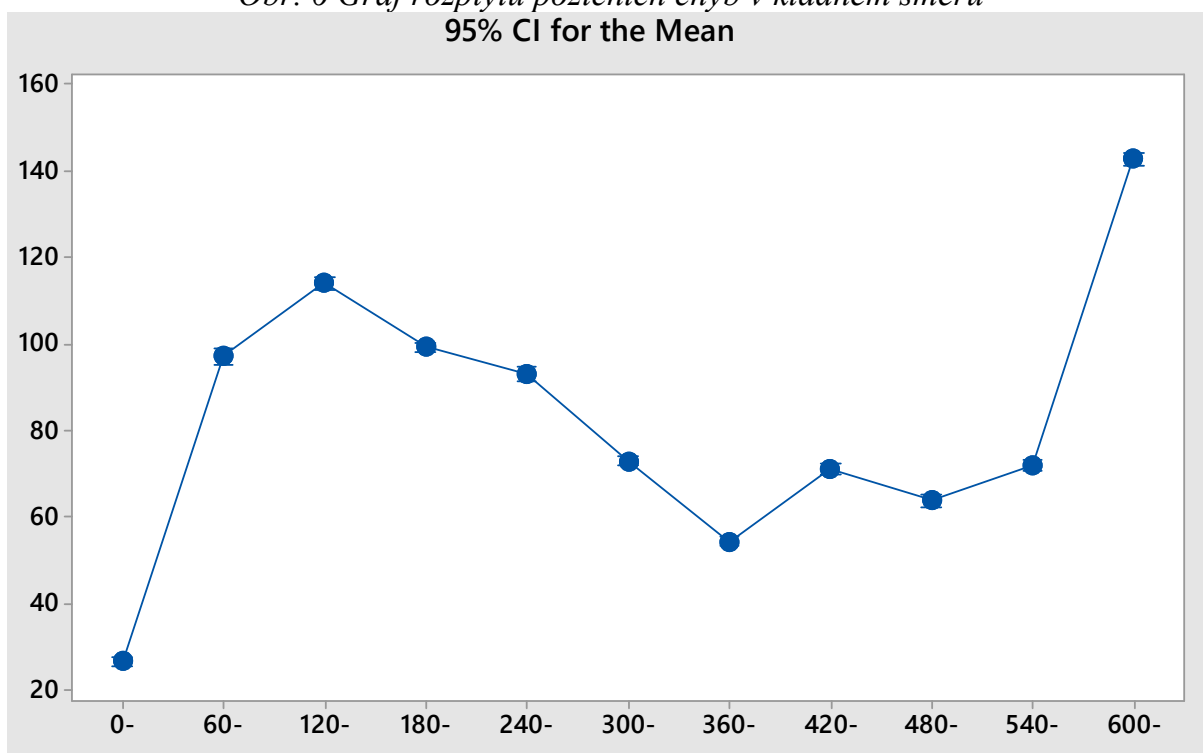
Výsledky těchto grafů poskytují důležité informace, že zamítám hypotézu H_0 , neboli průměry se liší statisticky významně v jednotlivých polohách, protože v každé měřené poloze je rozdílná hodnota průměru a směrodatné odchylky polohové chyby.

1.4 Test průměru v obou směrech (ANOVA)

ANOVA poskytuje robustní způsob k porovnání průměrů napříč různými skupinami a může být klíčová při identifikaci oblastí, které vyžadují zvláštní pozornost nebo optimalizaci v technických a výrobních procesech.



Obr. 6 Graf rozptylu pozičních chyb v kladném směru

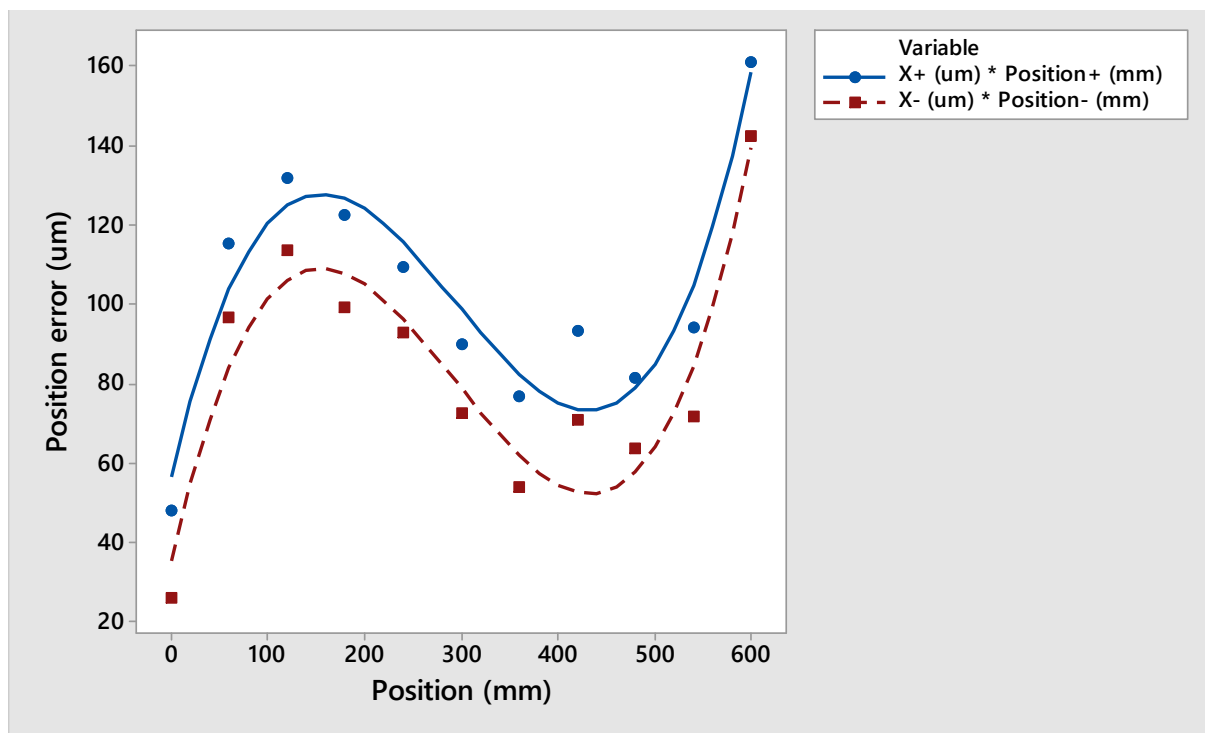


Obr. 7 Graf rozptylu pozičních chyb v záporném směru

Grafy tedy efektivně demonstrují, jak polynomičká regrese může být použita k modelování komplexních vztahů v technických a inženýrských aplikacích. Umožňují důkladné porozumění chybám a jejich rozložení, což je zásadní pro optimalizaci a zlepšení výkonnosti strojních zařízení. Pokud není možné

programově zajistit řešení regresí pozičních chyb v polohách robotické paže, robotická paže je korigována lineárně, což v zásadě přináší řadu nepřesností.

Zpřesnění polohové úchytky s využitím polynomické regrese



Obr. 8 Graf poziční chyby

Graf zobrazuje poziční chyby v mikrometrech (μm) jako funkci pozice v milimetrech (mm) pro dva různé směry (kladný a záporný směr). Na grafu jsou vykresleny dva soubory dat: jedna s modrými body a spojnici, reprezentující kladný směr, a druhá s červenými čtverci a přerušovanou čarou, zobrazující záporný směr. Obě sady dat jsou aproximovány křivkou třetího stupně (polynomem třetího stupně), což naznačuje snahu modelovat složitější vztahy v datech, než by bylo možné lineárním modelem.

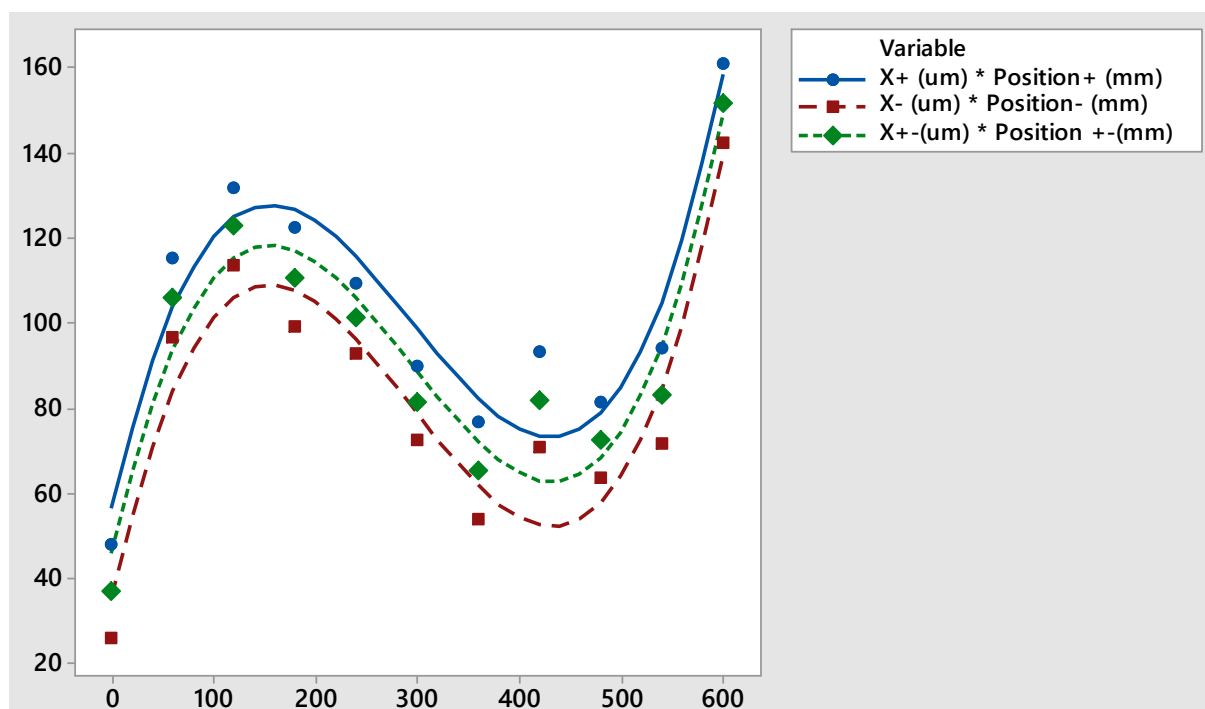
Vhodnost použití polynomu třetího stupně

Využití polynomu třetího stupně v tomto kontextu umožňuje zachytit nejen lineární trend, ale také kvadratické a kubické změny v datech, což je užitečné v situacích, kde data vykazují nelineární trendy a mohou obsahovat body inflexe, které lineární model nedokáže adekvátně popsat.

Regresní triplet

Testování regresního tripletu je součástí komplexního procesu ověřování předpokladů a kvality lineárního regresního modelu. Testy regresního tripletu obvykle zahrnují kontrolu trojice klíčových aspektů: linearitu vztahu, nezávislosti reziduí a homoskedasticity (konstantnosti rozptylů reziduí). Tyto testy

jsou fundamentální pro ověření, že model správně popisuje data a že jeho predikce jsou spolehlivé.



Obr. 9 Graf polynomicke regrese pozicnich chyb robotické paže

Na grafu vidíme polynomickou regresi pozicnich chyb robotické paže v různých polohách na pozitivních a negativních osách. Tento graf demonstruje, jak se pozicní chyby liší v závislosti na směru a pozici pohybu paže, s použitím polynomickeho modelu pro zachycení potenciálně komplexních vzorů chování.

Vzhledem k výrazným změnám v trendu a inflexním bodům na grafu se zdá, že použití polynomu třetího stupně je vhodný

1.5 Neuronové sítě

Neuronové sítě jsou výkonné modely umělé inteligence inspirované strukturou a funkcí biologických mozků. Skládají se z vrstev uzlů nebo "neuronů," které jsou propojeny váženými spojeními. Princip jejich učení, známý jako trénink, zahrnuje několik kroků a konceptů:

M. H. Wang a C. P. Hung ve svém článku "*Extension neural network and its applications*" navrhuji nový typ neuronové sítě nazvaný rozšířená neuronová síť (Extension Neural Network – ENN), která kombinuje teorii rozšíření a neuronové sítě. Tato síť používá rozšířenou vzdálenost (Extension Distance – ED) k měření podobnosti mezi daty a středem klastru, což zajišťuje rychlejší učení než tradiční neuronové sítě a jiné fuzzy klasifikační metody. Experimentální výsledky ukazují, že ENN dosahuje vysoké přesnosti a nižší spotřeby paměti. Navíc, tato metoda umožňuje adaptivní proces pro významné a nové informace a má kratší dobu učení ve srovnání s tradičními neuronovými sítěmi. Autoři prokázali účinnost

ENN na dvou příkladech, což potvrzuje její aplikovatelnost a efektivitu v praxi. [27]

Tabulka 2 Prvotní nastavení systému

Strmost sigmoidy:	1
Moment:	0,90
Rychlost učení:	0,10
Ukončit při chybě <:	0,05
Procent dat pro učení (%) :	70

Podmínky ukončení optimalizace:

- Počet iterací: Maximální počet iterací pro trénování je 10 000.
- Maximální chyba pro učící data: Po ukončení trénování byla maximální chyba u učících dat 0,001.
- Střední chyba pro učící data: Průměrná chyba u učících dat byla $2,909 \cdot 10^{-5}$.
- Maximální chyba pro testovací data: Maximální chyba u testovacích dat byla $2,470 \cdot 10^{-4}$.
- Střední chyba pro testovací data: Průměrná chyba u testovacích dat byla $2,113 \cdot 10^{-5}$.

Statistiky a chyby modelu:

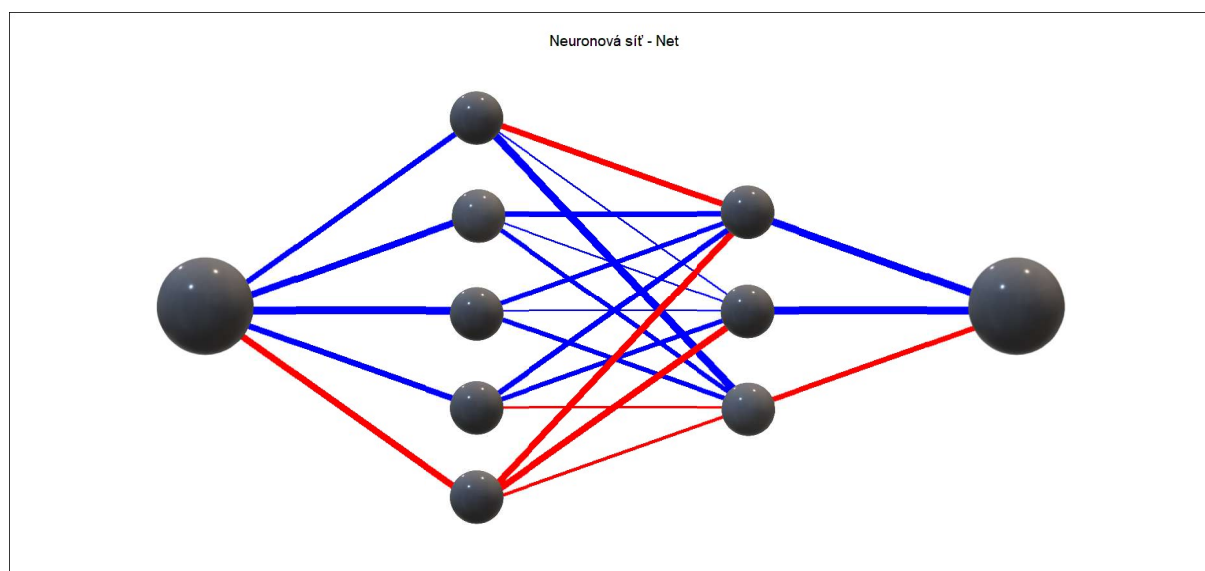
- Celkový součet čtverců: 370 408,865, což reprezentuje celkovou variabilitu v datech.
- Reziduální součet čtverců: 154,095, což je variabilita nevysvětlená modelem.
- Vysvětlený součet čtverců: 370 254,771, což je část variability, kterou model vysvětluje.
- F-statistika: 63 127,432, což je statistika pro testování významnosti modelu.
- F-krit: 1,561, což je kritická hodnota pro porovnání s F-statistikou.
- p-hodnota: 0,000 což indikuje, že model je statisticky významný.

Tabulka 3 Statistiky a chyby modelu

Počet iterací:	10000
Maximální chyba pro učící data:	$1,419 \cdot 10^{-3}$
Střední chyba pro učící data:	$2,910 \cdot 10^{-5}$
Maximální chyba pro testovací data:	$2,470 \cdot 10^{-4}$
Střední chyba pro testovací data:	$2,113 \cdot 10^{-5}$
Celkový součet čtverců:	370 408,865
Reziduální součet čtverců:	154,095
Vysvětlený součet čtverců:	370 254,771
F-statistika:	63 127,432
F-krit:	1,561
p-hodnota:	0

Architektura sítě:

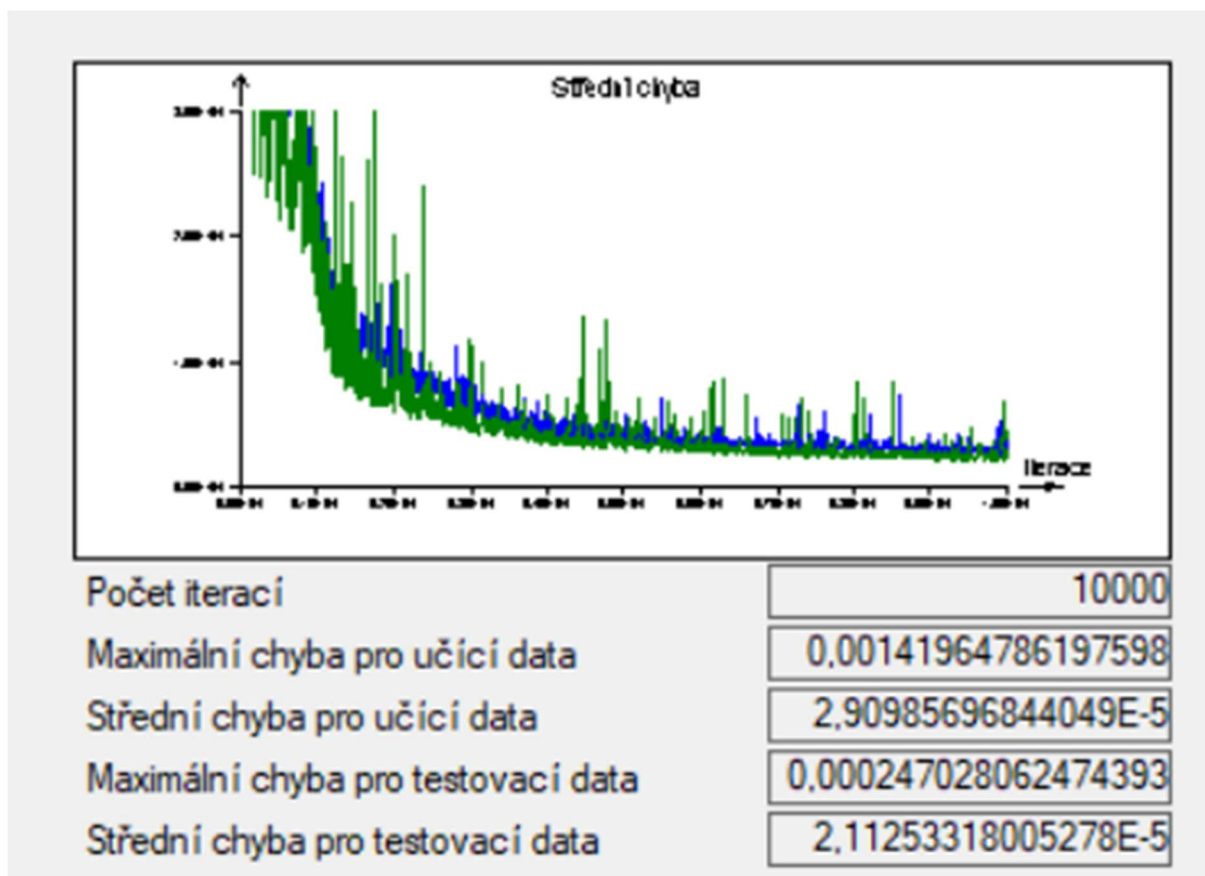
- Vrstva 1: Obsahuje 1 neuron.
- Vrstva 2 (Skrytá): Obsahuje 5 neuronů.
- Vrstva 3 (Skrytá): Obsahuje 3 neurony.
- Vrstva 4: Obsahuje 1 neuron.



Obr. 10 Neuronová síť s hlubokým učení $N[1\{5;3\}1/sig]$

Obr. 27 zobrazuje strukturu neuronové sítě, která je složena ze tří vrstev: vstupní vrstvy, skryté vrstvy a výstupní vrstvy. Vstupní vrstva (Position (mm))

přijímá vstupní data, která jsou následně předávána do skryté vrstvy, kde jsou prováděny složité výpočty a transformace. Spojení mezi jednotlivými neurony (uzly) jsou reprezentována čarami, přičemž tloušťka a barva čar (modrá nebo červená) indikují váhu a typ spojení – silnější čáry představují vyšší váhy, zatímco barvy mohou indikovat pozitivní nebo negativní váhy. Výstupní vrstva (Error+(um)) generuje konečný výstup, který je výsledkem zpracování dat skrze síť. Celkově graf ilustruje, jak neuronová síť propojuje vstupní data s výstupními výsledky skrze vrstvu skrytých neuronů, čímž ukazuje komplexní strukturu a váhy jednotlivých spojení, které jsou klíčové pro predikční schopnosti sítě.



Obr. 11 Graf průběhu střední chyby během tréninkového procesu neuronové sítě

Graf zobrazuje průběh střední chyby během tréninkového procesu neuronové sítě, kde osa x reprezentuje počet iterací a osa y hodnotu střední chyby. Křivky v grafu ukazují, jak se střední chyba snižuje v průběhu času, přičemž zelená křivka reprezentuje střední chybu pro tréninková data a modrá křivka reprezentuje střední chybu pro testovací data. Na začátku tréninkového procesu jsou chyby vysoké, avšak s rostoucím počtem iterací se postupně snižují, což naznačuje, že síť se postupně učí a zlepšuje svou přesnost. Konečné hodnoty střední chyby jsou uvedeny v pravé části obrázku, kde vidíme, že maximální chyba pro tréninková data je $1,419 \cdot 10^{-3}$ a střední chyba pro tréninková data je $2,910 \cdot 10^{-5}$. Maximální chyba pro testovací data je $2,470 \cdot 10^{-4}$ a střední chyba pro testovací data je $2,113 \cdot 10^{-5}$. Celkový počet iterací, během kterých byl trénink prováděn, je 10,000.

2. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Jedním z hlavních přínosů této práce je prokázání, jak významná je role statistických metod při kalibraci robotických systémů. Využití statistických testů jako je Fisher-Snedecorův test, Scottovo kritérium multikolinearity nebo Jarque-Berrův test normality poskytuje hlubší pochopení vnitřní variability a spolehlivosti naměřených dat. Výsledky těchto testů ukazují, že zvolené modely jsou statisticky významné a dobře vystihují analyzované procesy. Například Fisher-Snedecorův test významnosti modelu prokázal vysokou úroveň signifikance s hodnotou F kritéria 19,988.

Polynomická regrese pozičních chyb ukázala, že chyby robotických paží se výrazně liší v závislosti na směru pohybu a poloze ramene. To ilustruje komplexnost robotických systémů a nutnost zahrnutí různých parametrů pro dosažení vysoké přesnosti. Tento výsledek je klíčový, neboť naznačuje, že pozice ramene je jedním z největších zdrojů variability, a proto musí být zohledněna při každém kalibračním postupu.

Dalším důležitým aspektem je analýza reziduí a jejich distribuce. Použití Jarque-Berrova testu normality prokázalo, že rezidua vykazují normální rozdělení, což znamená, že použité statistické modely jsou vhodné pro predikci a analýzu polohových chyb. Tento výsledek je významný, neboť normalita reziduí je jednou ze základních podmínek pro úspěšnou aplikaci lineárních regresních modelů, což je zásadní pro dosažení vysoké přesnosti predikce polohovacích chyb v reálných podmínkách.

Pro porovnání variability polohových chyb v různých pozicích robotického ramene byl použit test ANOVA. Tento test prokázal, že mezi jednotlivými pozicemi existují statisticky významné rozdíly v polohových chybách. ANOVA test je důležitým nástrojem, neboť umožňuje identifikovat pozice, ve kterých dochází k největším odchylkám, a tím zaměřit kalibrační úsilí právě na tyto klíčové body.

Test rozptylu polohových chyb v různých směrech pohybu (kladný a záporný směr) dále potvrdil hypotézu, že rozptyl pozičních chyb není konstantní, což znamená, že různé polohy ramene vykazují různý stupeň přesnosti. Tento poznatek má přímý dopad na průmyslové aplikace, kde je vyžadována vysoká úroveň přesnosti v různých pracovních podmínkách a směrech pohybu.

Na základě provedených testů a analýz bylo potvrzeno, že správně provedená kalibrace robotických paží výrazně zvyšuje jejich polohovací přesnost a spolehlivost. Kalibrace, provedená s využitím laserových měřicích zařízení a koordinátních měřicích strojů, umožnila eliminovat odchylky v polohování a splnit přísné požadavky na přesnost v průmyslových aplikacích. V oblasti procesního inženýrství, kde se vyžaduje vysoká míra automatizace, je tento přínos neocenitelný.

Významnou částí této práce je i aplikace softwarové kalibrace, která umožňuje jemnější ladění a kontrolu nad robotickými pohyby. Využití softwaru umožnilo

zlepšit přesnost měření a následné úpravy parametrů polohování. Tím se snižují náklady na hardwarovou kalibraci a zvyšuje se flexibilita robotických systémů, což je klíčové pro jejich adaptaci v dynamických průmyslových prostředích.

Závěrem diskuze je nutné zdůraznit, že statistické modely, které byly testovány a validovány během tohoto výzkumu, poskytují solidní základ pro další rozvoj v oblasti kalibrace robotických systémů. Kombinace Fisher-Snedecorova testu, Cook-Weisbergova testu heteroskedasticity a Waldova testu autokorelace prokázala, že model je nejen významný, ale také statisticky robustní. Tímto se potvrzuje relevance použitých metod a jejich potenciál pro další aplikace v průmyslu.

Diskuze výsledků jednoznačně prokázala, že aplikace pokročilých statistických metod a důkladné kalibrace mohou výrazně zlepšit přesnost a spolehlivost robotických systémů. Testy ukázaly, že hlavní zdroje variabilit jsou polohové chyby, které je třeba adresovat jak hardwarově, tak softwarově. Výsledky této práce mají přímý dopad na průmyslové aplikace, především v oblasti procesního inženýrství, kde je přesnost robotických systémů klíčovým faktorem pro zajištění efektivní výroby.

Tyto výsledky poskytují pevný základ pro budoucí výzkum a zlepšování kalibračních metod pro robotické systémy v široké škále průmyslových aplikací.

3. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Jedním z hlavních přínosů této práce je zavedení inovativních statistických metod pro zlepšení kalibrace robotických paží, která je klíčová pro moderní procesní inženýrství. Použití pokročilých regresních technik, jako jsou nelineární funkce a neuronové sítě, vede k významnému zlepšení přesnosti a spolehlivosti polohování robotických ramen, což je nezbytné pro komplexní průmyslové úlohy. To přináší nové možnosti pro aplikace robotiky v různých výrobních odvětvích, kde je klíčová preciznost a opakovatelnost.

Práce dále přispívá k vývoji nových nelineárních regresních modelů pro kalibraci robotických systémů. Tyto modely berou v úvahu opotřebení a dynamické změny v mechanice robotických paží v průběhu času. Nelineární regresní funkce poskytují výrazně přesnější predikci polohy než dosud používané lineární modely, což umožňuje průmyslovým robotům pracovat s větší efektivitou a přesností v dlouhodobém horizontu.

Nový přístup k použití neuronových sítí pro kalibraci představuje další klíčový přínos. Neuronové sítě jsou vyškoleny na historických datech, aby předpovídaly polohové chyby robotických paží s vysokou přesností. Tento přístup je zvláště důležitý v prostředí procesního inženýrství, kde je nutné zohlednit složité dynamické procesy a optimalizovat pohyby robotů pro zvýšení produktivity a snížení chybovosti.

Z pohledu praxe přináší práce nové nástroje pro kalibraci, které jsou snadno integrovatelné do stávajících výrobních procesů. Použití vyvinutých metod může zlepšit výkon robotických systémů v různých průmyslových odvětvích, včetně automobilového průmyslu, elektroniky a dalších odvětví, která jsou závislá na vysoké přesnosti automatizovaných procesů.

Díky optimalizaci kalibračních metod přispívá práce také k zefektivnění výrobních procesů. Vyšší přesnost robotických paží vede k nižší zmetkovitosti, rychlejší montáži a větší flexibilitě při přizpůsobení výrobních linek novým produktům. Tyto přínosy mají přímý dopad na konkurenceschopnost firem a jejich schopnost reagovat na změny v poptávce.

Z vědeckého hlediska přináší tato disertační práce důležité poznatky do oblasti robotiky a umělé inteligence, zejména v oblasti využití nelineárních statistických metod a neuronových sítí pro technické aplikace. Vyvinuté algoritmy mohou být dále rozšiřovány a přizpůsobovány pro různé typy robotických systémů, což otevírá nové směry výzkumu v oblasti kalibrace a řízení robotických systémů v dynamických prostředích.

Na základě získaných poznatků lze předpokládat další vývoj ve směru optimalizace kalibrace robotických paží pomocí strojového učení. Tato práce může inspirovat další výzkum na poli samoopravných systémů, kde by robotické

paže byly schopny autonomně upravovat své nastavení v reálném čase na základě senzorických dat. Tímto směrem se může ubírat další vývoj nejen v průmyslové robotice, ale také v autonomních systémech pro kosmický průmysl, zdravotnictví a další pokročilé oblasti.

Tato disertační práce tedy představuje významný krok v oblasti optimalizace kalibrace robotických paží a její přínos spočívá nejen v akademickém přínosu pro další výzkum, ale i v konkrétních aplikacích pro průmysl, kde může přispět ke zlepšení efektivity a přesnosti výrobních procesů. Zároveň poskytuje metodologický základ pro budoucí výzkum a vývoj v oblasti robotiky a procesního inženýrství.

ZÁVĚR

Tato dizertační práce se zaměřila na problematiku kalibrace robotických paží za použití

často vykazují několik inflexních bodů a nelineární trendy. Třetí stupeň polynomu umožňuje flexibilnější přizpůsobení modelu datům, což se projevuje statistických metod, konkrétně nelineární regrese a neuronových sítí. Na základě provedených experimentů a analýz lze formulovat několik zásadních závěrů, které mají významné důsledky pro aplikace v oblasti robotiky a automatizace.

Polynomiální regrese, zejména třetího stupně, se ukázala jako vhodný nástroj pro modelování pozičních chyb robotických paží. Výsledky prokázaly, že jednoduché lineární modely nejsou schopny adekvátně zachytit komplexní chování pozičních chyb, které v lepší přesnosti a spolehlivosti predikcí.

Analýza pozičních chyb ukázala, že ve středních polohách (přibližně mezi 180 mm a 360 mm) jsou chyby relativně nízké a stabilní, což naznačuje konzistentní výkon robotické paže v těchto oblastech. Naopak při dosažení extrémních poloh (například 600 mm) došlo k výraznému nárůstu chyb, což může signalizovat mechanické nebo systémové nedostatky, které vyžadují dodatečnou kalibraci nebo údržbu.

Neuronové sítě se osvědčily jako výkonný nástroj pro predikci pozičních chyb robotických paží. Díky své schopnosti zachytit složité nelineární vztahy v datech poskytují neuronové sítě přesné predikce, které mohou být využity k optimalizaci kalibračních procesů. Grafy porovnávající skutečné a předpovězené hodnoty ukazují, že neuronové sítě jsou schopny velmi dobře přizpůsobit model datům, což se projevuje minimálními chybami předpovědí v širokém rozsahu hodnot.

Statistické analýzy, jako jsou ANOVA a různé testy významnosti, poskytly důležité informace o kvalitě a spolehlivosti modelů. Fisher-Snedecorův test významnosti modelu a Scottovo kritérium multikolinearity potvrdily, že použité modely jsou statisticky významné a korektní. Cook-Weisbergův test heteroskedasticity a Jarque-Berrův test normality ukázaly, že rezidua vykazují homoskedasticitu a mají normální rozdělení, což dále podporuje validitu modelů.

Výsledky této práce mají přímé aplikace v průmyslové robotice, zejména v oblasti přesného polohování a kalibrace robotických paží. Identifikace specifických poloh, kde dochází k nárůstu pozičních chyb, umožňuje cílenou údržbu a kalibraci, čímž se zvyšuje celková přesnost a spolehlivost robotických systémů. Navíc, použití nelineárních modelů a neuronových sítí poskytuje robustní základ pro vývoj pokročilých kalibračních algoritmů, které mohou být implementovány v reálném čase.

Doporučení pro budoucí výzkum zahrnují další zkoumání vlivu různých mechanických a environmentálních faktorů na poziční chyby, jakož i vývoj adaptivních kalibračních metod, které mohou automaticky přizpůsobovat modely na základě aktuálních dat z provozu robotických systémů.

Tato práce prokázala, že použití pokročilých statistických metod a neuronových sítí může významně přispět ke zlepšení kalibračních procesů robotických paží. Výsledky ukazují, že nelineární modely, zejména polynomiální regrese třetího stupně, a neuronové sítě poskytují vysokou přesnost predikcí, což je klíčové pro optimalizaci výkonu a spolehlivosti robotických systémů v průmyslových aplikacích. Další výzkum a vývoj v této oblasti mohou přinést nové inovace a zlepšení, která budou mít široké uplatnění nejen v robotice, ale i v dalších oborech, kde je klíčová přesnost a spolehlivost měření a kalibrace.

Celkově lze konstatovat, že použití pokročilých statistických metod a polynomiálních regresí představuje významný krok vpřed v oblasti kalibrace robotických paží. Tyto metody umožňují přesnější modelování a kompenzaci polohových chyb, což vede k lepší výkonnosti a spolehlivosti robotických systémů. Budoucí výzkum by se měl zaměřit na další zlepšení těchto modelů a jejich aplikaci v různých průmyslových odvětvích, aby se plně využil potenciál robotické automatizace

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FAN, Yunfei, Yilian ZHANG, Huang JIE, Tang YUE, Qingzhen BI a Yuhan WANG. *Calibration for a robotic drilling system with secondary encoders based on a novel enhanced rigid-flexible coupling model*. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application [online]. 2022, 49(6), 1101-1115 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0143-991X. Dostupné z: doi:10.1108/IR-12-2021-0297
- [2] Benes, Petr, Jan Hladik, Jan Pelikan, Zdenek Neusser, Martin Necas, Jiri Sveda, Michael Valasek A Zbynek Sika. *Calibration Of The Robotic Arm With Corrections Using Local Linear Neuro-Fuzzy Models*. Mm Science Journal [Online]. 2022, 2022(5) [Cit. 2023-07-7]. Issn 18031269. Dostupné Z: Doi:10.17973/Mmsj.2022_12_2022160
- [3] TIPARY, Bence a Ferenc Gábor ERDŐS. *A novel, low-cost technique for modelless calibration of a 3-axis parallel kinematic machine*. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application [online]. 2021, 49(1), 168-176 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0143-991X. Dostupné z: doi:10.1108/IR-02-2021-0033
- [4] LYU, Dun, Jian LIU, Shiyu LUO, Shuo LIU, Qunlin CHENG a Hui LIU. *Digital Twin Modelling Method of Five-Axis Machine Tool for Predicting Continuous Trajectory Contour Error*. Processes [online]. 2022, 10(12) [cit. 2023-07-27]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr10122725
- [5] JIANG, Yizhou, Liandong YU, Huakun JIA, Huining ZHAO a Haojie XIA. *Absolute Positioning Accuracy Improvement in an Industrial Robot*. Sensors [online]. 2020, 20(16) [cit. 2023-07-7]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20164354
- [6] CHEN, Geng, Jianzhong YANG, Hua XIANG a Daojiang OU. *New positional accuracy calibration method for an autonomous robotic inspection system*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [online]. 2022, 44(5) [cit. 2023-07-7]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-022-03487-x
- [7] AVRUTOV, V. V., A. N. SAPEGIN, Z. S. STEFANISHIN a V. V. TSISARZH. *Calibration of an Inertial Measurement Unit*. International Applied Mechanics [online]. 2017, 53(2), 228-236 [cit. 2023-07-7]. ISSN 1063-7095. Dostupné z: doi:10.1007/s10778-017-0808-4
- [8] ZHANG, Yinlong, Wei LIANG, Mingze YUAN, Hongsheng HE, Jindong TAN a Zhibo PANG. *Monocular Visual-Inertial and Robotic-Arm Calibration in a Unifying Framework*. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica [online]. 2022, 9(1), 146-159 [cit. 2023-07-7]. ISSN 2329-9266. Dostupné z: doi:10.1109/JAS.2021.1004290

- [9] WU, Jin, Miaomiao WANG, Yi JIANG, Bowen YI, Rui FAN a Ming LIU. *Simultaneous Hand–Eye/Robot–World/Camera–IMU Calibration*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics [online]. 2022, 27(4), 2278-2289 [cit. 2023-07-7]. ISSN 1083-4435. Dostupné z: doi:10.1109/TMECH.2021.3103995
- [10] ZHANG, Yinlong, Wei LIANG, Sichao ZHANG, Xudong YUAN, Xiaofang XIA, Jindong TAN a Zhibo PANG. *High-precision Calibration of Camera and IMU on Manipulator for Bio-inspired Robotic System*. Journal of Bionic Engineering [online]. 2022, 19(2), 299-313 [cit. 2023-07-7]. ISSN 1672-6529. Dostupné z: doi:10.1007/s42235-022-00163-7
- [11] DU, Guanglong, Yinhao LIANG, Chunquan LI, Peter X. LIU a Di LI. *Online Robot Kinematic Calibration Using Hybrid Filter With Multiple Sensors*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement [online]. 2020, 69(9), 7092-7107 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2020.2976277
- [12] ŠKULJ, Gašper, Rok VRABIČ a Primož PODRŽAJ. *A Wearable. IMU System for Flexible Teleoperation of a Collaborative Industrial Robot*. Sensors [online]. 2021, 21(17) [cit. 2023-07-7]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21175871
- [13] CHENG, Guoqing. *Combined linear and non-linear controller design for motor position regulation*. Electronics Letters [online]. 2018, 54(5), 288-289 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0013-5194. Dostupné z: doi:10.1049/el.2017.4814
- [14] LEMBONO, Teguh Santoso, Francisco SUAREZ-RUIZ a Quang-Cuong PHAM. *SCALAR: Simultaneous Calibration of 2-D Laser and Robot Kinematic Parameters Using Planarity and Distance Constraints*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering [online]. 2019, 16(4), 1971-1979 [cit. 2023-07-7]. ISSN 1545-5955. Dostupné z: doi:10.1109/TASE.2019.2918141
- [15] ZHENG, Lingxiang, Zhesi ZHANG, Zhigang WANG, et al. *A multiple closed-loops robotic calibration for accurate surgical puncture*. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery [online]. 2021, 17(3) [cit. 2023-07-7]. ISSN 1478-5951. Dostupné z: doi:10.1002/rcs.2242
- [16] LATTANZI, Luca, Cristina CRISTALLI, Daniele MASSA, Sébastien BORJA, Pierre LÉPINE a Marcello PELLICCIARI. *Geometrical calibration of a 6-axis robotic arm for high accuracy manufacturing task*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2020, 111(7-8), 1813-1829 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06179-9

- [17] ZHAO, Wanda, Alexandr KLIMCHIK, Anatol PASHKEVICH a Damien CHABLAT. *Non-linear stiffness behavior of planar serial robotic manipulators*. Mechanism and Machine Theory [online]. 2022, 172 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0094114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2022.104783
- [18] NAGY, Balázs a Csaba BENEDEK. *On-the-Fly Camera and Lidar Calibration*. Remote Sensing [online]. 2020, 12(7) [cit. 2023-07-7]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12071137
- [19] MUNOZ-BANON, Miguel Angel, Francisco A. CANDELAS a Fernando TORRES. *Targetless Camera-LiDAR Calibration in Unstructured Environments*. IEEE Access [online]. 2020, 8, 143692-143705 [cit. 2023-07-7]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2020.3014121
- [20] ABANAY, Abdelkrim, Lhoussaine MASMOUDI a Mohamed EL ANSARI. *A calibration method of 2D LIDAR-Visual sensors embedded on an agricultural robot*. Optik [online]. 2022, 249 [cit. 2023-07-7]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2021.168254
- [21] FAN, Song, Ying YU, Maolin XU a Longhai ZHAO. *High-Precision External Parameter Calibration Method for Camera and Lidar Based on a Calibration Device*. IEEE Access [online]. 2023, 11, 18750-18760 [cit. 2023-07-7]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2023.3247195
- [22] WANG, Zhe, Junfeng FAN, Fengshui JING, Sai DENG, Mingyang ZHENG a Min TAN. *An Efficient Calibration Method of Line Structured Light Vision Sensor in Robotic Eye-in-Hand System*. IEEE Sensors Journal [online]. 2020, 20(11), 6200-6208 [cit. 2023-07-7]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2020.2975538
- [23] EDWARDS, Stephen D. *The HeartMath coherence model: implications and challenges for artificial intelligence and robotics*. AI & SOCIETY [online]. 2019, 34(4), 899-905 [cit. 2023-07-7]. ISSN 0951-5666. Dostupné z: doi:10.1007/s00146-018-0834-8
- [24] RAJ, Manav a Robert SEAMANS. *Primer on artificial intelligence and robotics*. Journal of Organization Design [online]. 2019, 8(1) [cit. 2023-07-7]. ISSN 2245-408X. Dostupné z: doi:10.1186/s41469-019-0050-0
- [25] WANG, Ding, Fei XIE, Jiquan YANG, Rongjian LU, Tengfei ZHU a Yijian LIU. *Industry robotic motion and pose recognition method based on camera pose estimation and neural network*. International Journal of Advanced Robotic Systems [online]. 2021, 18(3) [cit. 2023-07-7]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: doi:10.1177/17298814211018549
- [26] MUSARAT, Muhammad Ali; IRFAN, Muhammad; ALALOUL, Wesam Salah; MAQSOOM, Ahsen a GHUFRAN, Maria. *A Review on the Way*

Forward in Construction through Industrial Revolution 5.0. Online. Sustainability. 2023, roč. 15, č. 18. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su151813862>. [cit. 2024-03-15].

- [27] WANG, M.H. a HUNG, C.P. *Extension neural network and its applications.* Online. Neural Networks. 2003, roč. 16, č. 5-6, s. 779-784. ISSN 08936080. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(03\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(03)00104-7). [cit. 2024-09-15].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Graf rozptylu pozičních chyb	12
Obr. 2 Graf rozptylu pozičních chyb v kladném směru	13
Obr. 3 Graf rozptylu pozičních chyb v záporném směru	13
Obr. 4 Graf testu rovnosti průměrů v kladném směru	14
Obr. 5 Graf testu rovnosti průměrů v záporném směru	15
Obr. 6 Graf rozptylu pozičních chyb v kladném směru	16
Obr. 7 Graf rozptylu pozičních chyb v záporném směru	16
Obr. 8 Graf poziční chyby.....	17
Obr. 9 Graf polynomicke regrese pozičních chyb robotické paže	18
Obr. 10 Neuronová síť s hlubokým učením $N[1\{5;3\}1/\text{sig}]$	20
Obr. 11 Graf průběhu střední chyby během tréninkového procesu neuronové sítě.....	21

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Důkaz problematických rozptylů pomocí V_x	10
Tabulka 2 Prvotní nastavení systému	19
Tabulka 3 Statistiky a chyby modelu	20

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

VR	virtuální realita
IMU	inerciální měřicí jednotka
NLS	Nonlinear Least Squares
LIDAR	Light Detection and Ranging
AI	umělá inteligence
mm	milimetr
μm	mikrometr
Obr.	obrázek
ENN	Extension Neural Network
ED	Extension Distance

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Publikace Web of Science

1. MARCANÍK, M, M KUBIŠOVÁ, V PATA, M NOVÁK, H VRBOVÁ a J KNEDLOVÁ. *Metrological evaluation of heterogeneous surfaces obtained by water jet cutting technology using artificial intelligence elements*. Journal of Physics: Conference Series [online]. 2022, [cit. 2024-07-7]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/2413/1/012003
2. Marcaník M, Kubišová M, Pata V, Knedlová J, Šuba O, Vrbová H. *Optimizing the Position of a Robotic Arm Using Statistical Methods*. Manufacturing Technology. 2024; 618-625. doi: 10.21062/mft.2024.073.
3. KUBIŠOVÁ, Milena, Vladimír PATA, Dagmar MĚŘÍNSKÁ, Adam ŠKROBÁK a Miroslav MARCANÍK. *Solving the Issue of Discriminant Roughness of Heterogeneous Surfaces Using Elements of Artificial Intelligence*. Materials [online]. 2021, [cit. 2024-07-7]. ISSN 1996- 1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14102620

OBORNÝ ŽIVOTOPIS



europass

Miroslav Marcaník

Datum narození: 15/02/1986 | **Státní příslušnost:** Česká republika | **Pohlaví:** Muž | **Telefonní číslo:**

(+420) 724173581 (Mobilní telefon) | **E-mailová adresa:** marcanik@utb.cz |

Adresa: Lipová 41, 76321, Slavičín, Česko (Domů)

● VZDĚLÁNÍ A ODBORNÁ PŘÍPRAVA

2019 – AKTUÁLNÍ Zlín, Česko

DOKTORSKÉ STUDIUM V OBORU: NÁSTROJE A PROCESY Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Disertační/diplomová/doktorská práce Statistický návrh kalibrace robotických paží v procesním inženýrství

2009 – 2012 Zlín, Česko

MAGISTERSKÉ STUDIUM V OBORU: INŽENÝRSKÁ INFORMATIKA Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Disertační/diplomová/doktorská práce Využití simulačních a optimalizačních metod ve výuce informatiky na základní a střední škole

2006 – 2009 Zlín, Česko

BAKALÁŘSKÉ STUDIUM V OBORU: INŽENÝRSKÁ INFORMATIKA Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Disertační/diplomová/doktorská práce Regulace posuvu pomocí krokového motoru

● PROJEKTY

09/2019 – 12/2019

Projekt: IGA/FT/2019/001

Člen řešitelského kolektivu

01/2020 – 12/2020

Projekt: IGA/FT/2020/004

Člen řešitelského kolektivu

01/2021 – 12/2021

Projekt: IGA/FT/2021/006

Člen řešitelského kolektivu

01/2022 – 12/2022

Projekt: IGA/FT/2022/007

Člen řešitelského kolektivu

02/2021 – 01/2023

JUNG/2020/009

Člen řešitelského kolektivu

01/2023 – 12/2023

IGA/FT/2023/004

Člen řešitelského kolektivu

Mezinárodní mobilita – odborná stáž
Technická univerzita v Košicích

● DIGITÁLNÍ DOVEDNOSTI

C, C++, C# | Microsoft Office | MiniTab | webové technologie (HTML, CSS, JavaScript) | ABB RobotStudio | Roboty (ABB, Staübli, Fanuc, UR) | Síťové systémy (Cisco routery)

● ZNALOST JAZYKŮ

Mateřský jazyk/jazyky: **ČEŠTINA**

Další jazyk(y):

	POROZUMĚNÍ		MLUVENÝ PROJEV		PSANÍ
	Poslech	Čtení	Samostatný ústní projev	Mluvená komunikace	
ANGLIČTINA	B2	B2	B2	B2	C1

Úroveň: A1 a A2: uživatel základů jazyka (začátečník), B1 a B2: samostatný uživatel (mírně pokročilý), C1 a C2: zkušený uživatel (pokročilý)

● ŘIDIČSKÝ PRŮKAZ

Řidičský průkaz: B

Ing. Miroslav Marčaník, Ph.D.

**Statistický návrh kalibrace robotických paží v
procesním inženýrství**

Statistical design of robotic arms calibration in process engineering

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Miroslav Marčaník, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2024

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-317-1

