

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Dotykové měřicí systémy pro měření povrchů

Ondřej Heřman

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Heřman

Inženýrství údržby

Název práce

Dotykové měřicí systémy pro měření povrchů

Název anglicky

Contact measurement systems for surface measurement

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o měřicích systémech pro měření povrchu materiálu. Popsat jednotlivé metody měření s důrazem na dotykové systémy. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

Drsnost, měření, souřadnice, rozměr, tvar

Doporučené zdroje informací

ALLEN, T.: Particle Size Measurement. Vol. 2, Surface area and pore size determination. London, 1997.

BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B.: Drsnost povrchu. Praha, 1989.

Časopisy: Strojírenská technologie, MM průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení – spojování materiálů, Technik.

CHRISTOPH, R., NEUMANN, J., H.: Multisenzorová souřadnicová měřicí technika, měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti, Uherské Hradiště, PRIMA Bilavčák, 2008.

Měření drsnosti povrchu. Český Krumlov, 1981.

Souřadnicové měřicí stroje. České Budějovice, 1985.

Souřadnicové měřicí stroje, špičková technologie pro nejvyšší přesnost, Teplice, Mitutoyo Česko, 2006.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Dotykové měřicí systémy pro měření povrchů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27. 3. 2024

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu, Bc. Ing. Petrovi Hrabě, Ph.D. za jeho vedení, spolupráci a konzultace během zpracování mé bakalářské práce. Zvláště si cením jeho cenných rad, podnětných připomínek a konstruktivní kritiky.

Dotykové měřicí systémy pro měření povrchů

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá dotykovými měřicími systémy s důrazem na jejich aplikační možnosti při měření povrchů materiálů v průmyslu. Zaměřuje se na klíčové aspekty současného průmyslu a zdůrazňuje potřebu přesné charakterizace povrchů. Detailně analyzuje strukturu a funkce měřicích strojů, přiblíží základní principy jejich fungování a zkoumá víceosé měření a multisenzorovou techniku.

Práce sleduje aktuální trendy v oblasti měřicích systémů, včetně digitálních dvojčat a rozšířené reality a poukazuje na jejich význam při minimalizaci škod a prodlev ve výrobních procesech. Dále se zabývá interpretací výsledků měření, jakožto klíčovou oblastí měřicích systémů, charakterizuje podobu výsledků a oblasti jejich využití.

V závěrečné části porovnávám různé typy měřicích systémů s důrazem na efektivitu a přesnost a stanovuji optimální oblast využití. Dotykové měřicí systémy se tak jeví jako klíčový nástroj pro průmyslové měření povrchů materiálů, díky jejich univerzálnosti, schopnosti komplexní analýzy a rychlosti provedení měření. Skrze tuto práci jsem si kladl za cíl přispět k hlubšímu porozumění a optimálnímu využití těchto systémů v průmyslovém prostředí.

Klíčová slova: Měřicí systémy, Dotykové systémy, Multisenzorová měřicí technika, Digitální dvojče, Rozšířená realita

Contact measurement systems for surface measurement

Abstract

This bachelor thesis deals with touch measurement systems with an emphasis on their application possibilities in the measurement of material surfaces in industry. It focuses on key aspects of current industry and highlights the need for accurate surface characterisation. It analyses in detail the structure and function of measuring machines, outlines the basic principles of their operation and explores multi-axis measurement and multi-sensor technology.

The work traces current trends in measurement systems, including digital twins and augmented reality, and highlights their importance in minimizing damage and delays in manufacturing processes. It also examines the interpretation of measurement results as a key area of measurement systems, characterizing the form of the results and their areas of application.

In the final section, I compare different types of measurement systems with an emphasis on efficiency and accuracy and determine the optimal area of application. Thus, touch-trigger measurement systems emerge as a key tool for industrial measurement of material surfaces, due to their versatility, ability for comprehensive analysis and speed of measurement execution. Through this work, I aim to contribute to a deeper understanding and optimal use of these systems in an industrial setting.

Keywords: Measurement systems, Touch systems, Multisensor measurement technology, Digital twin, Augmented reality

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
2.1 Cíl práce	2
2.2 Metodika	2
3 Prvky měřících systémů.....	3
3.1 Konstrukce	3
3.1.1 Portálová konstrukce.....	4
3.1.2 Sloupová konstrukce.....	5
3.1.3 Mostová konstrukce	6
3.1.4 Měřící ramena	7
3.2 Dotykové senzory pro detekci plochy.....	8
3.2.1 Dotykové sondy	9
3.2.2 Skenovací sondy	10
3.3 Snímače polohy	11
3.3.1 Magnetické snímače	11
3.3.2 Optické snímače.....	12
3.3.3 Laserové snímače.....	12
3.3.4 Absolutní a relativní odměřování	12
3.3.5 Přímé a nepřímé odměřování	13
4 Hystereze v měřících systémech.....	14
4.1 Definice hystereze	14
4.2 Příčiny hystereze	14
4.3 Vliv hystereze na přesnost měření	15
4.4 Kompenzační metody pro hysterezi	15
5 Multisenzorová technika	16
5.1 Senzory drsnosti	16
5.2 Senzor teploty.....	17
5.3 Ultrazvukový senzor	17
5.4 Werth Fiber Probe	18
6 Pětiosé měřící systémy	19
6.1 Dostupnost měřící polohy	19
6.2 Zjednodušení upínání	20
6.3 Rychlost měření	20
7 Řízení měřících systémů	21
7.1 Simulace pohybu	22

7.2	Digitální dvojče	23
7.3	Rozšířená realita	24
8	Interpretace výsledků měření	25
9	Porovnání	27
10	Závěr	29
11	Seznam použitých zdrojů	30

Seznam obrázků

Obrázek 1	Portálová konstrukce	4
Obrázek 2	Výložníková konstrukce v provedení duplex	5
Obrázek 3	Mostová konstrukce	6
Obrázek 4	Měřicí rameno	7
Obrázek 5	Porovnání bodového měření a skenování	8
Obrázek 6	Dotyková kinematická sonda	9
Obrázek 7	Princip skenovací sondy	10
Obrázek 8	Schéma magnetického snímače s magnetickou páskou	11
Obrázek 9	Princip optického snímače polohy	12
Obrázek 10	Přímé a nepřímé odměřování	13
Obrázek 11	Grafické znázornění hystereze	14
Obrázek 12	Moduly pro měření drsnosti- zalomený a přímý	16
Obrázek 13	Ultrazvuková sonda Renishaw	17
Obrázek 14	Schéma Werth Fiber Probe	18
Obrázek 15	Změna polohy měření	19
Obrázek 16	Vizualizace upnutí a měření v horizontální poloze	20
Obrázek 17	Manuální ovládání	21
Obrázek 18	Simulace pohybu	22
Obrázek 19	Digitální dvojče v prostředí Silma x4	23
Obrázek 20	3D barevná mapa naměřených hodnot	25
Obrázek 21	Číselný zápis výsledků do protokolu	26
Obrázek 22	Charakteristika průběhu nepřesnosti	27

1 Úvod

V dnešní éře průmyslového inženýrství a technologického pokroku zaujímá měření povrchů materiálů klíčovou roli. Přesná kvantifikace a charakterizace povrchu materiálu jsou nezbytné pro dosažení optimální údržby zařízení a zachování jejich spolehlivosti. S rychlým vývojem měřicích technologií se mění i přístupy k analýze povrchových vlastností, a právě v tomto kontextu získávají dotykové měřicí systémy stále větší pozornost.

Cílem této bakalářské práce je systematicky shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o dotykových měřicích systémech s důrazem na měření povrchů materiálů. První část práce se zaměřuje na klíčové aspekty měřicích systémů a jejich význam v oblasti měření povrchů. Následující kapitoly detailně zkoumají možnosti dotykových měřicích systémů, včetně jejich přínosů a vlivu na přesnost měření. Dále jsou prezentovány klíčové poznatky a aktuální trendy v dynamicky se rozvíjející oblasti dotykových měřicích systémů. Závěrečná část práce obsahuje porovnání různých typů měřicích systémů s ohledem na jejich efektivitu a přesnost.

Měřicí systémy představují klíčový prvek výrobního procesu, neboť slouží nejen k důkladné kontrole výrobků, ale také umožňují monitorování stavu výrobních faktorů, jež ovlivňují efektivitu a produktivitu provozu. Jejich výhoda spočívá v jejich multifunkčnosti využití, jsou schopné provádět kontrolu kde zastanou množství měřidel a zvládnou charakterizovat tvary, které běžná měřidla nemohou adekvátně popsat, a to v krátkém čase a s vysokou přesností.

Rozdělení měřicích systémů lze provést na dvě základní kategorie: bezkontaktní, zahrnující například laserové a kamerové skenery, a kontaktní, kterým se budu detailněji věnovat v rámci této bakalářské práce.

Dotykové systémy, kterým bude práce věnována, operují na základě principu kontaktu sondy s měřeným objektem. Řídící jednotka systematizuje a zaznamenává polohu dotyku, kterou následně zpracovává s využitím specifických algoritmů k dosažení požadovaných hodnot. Díky těmto algoritmům můžeme z jedné sady měření extrahovat více údajů, které mohou být jak rozměrové, tak geometrické povahy. Tento přístup umožňuje komplexní a detailní analýzu měřených objektů s ohledem na jejich různorodé vlastnosti.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je systematicky shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o měřicích systémech určených pro měření povrchu materiálu. Práce se zaměřuje na detailní analýzu funkčních prvků, konstrukce a principů fungování těchto systémů, včetně jejich schopnosti provádět víceosé měření a využití multisenzorové techniky. Dílčím cílem je popsat aktuální trendy v oblasti měřicích systémů, jako jsou digitální dvojčata a rozšířená realita a analyzovat jejich přínosy pro průmyslové procesy. Hlavním cílem práce je přispět k hlubšímu porozumění a optimalizaci využití dotykových měřicích systémů v průmyslovém prostředí.

2.2 Metodika

Práce je zpracována jako systematická literární rešerše, při které byly identifikovány a analyzovány relevantní zdroje týkající se dotykových měřicích systémů. Získané informace byly kategorizovány a syntetizovány podle hlavních témat, jako jsou struktura, funkce a aplikace těchto systémů v průmyslu. Pro ilustraci získaných poznatků byla na konkrétním příkladu využita metoda komparace měřicích ramen s tradičními konstrukcemi souřadnicových měřicích systémů.

3 Prvky měřících systémů

Klíčovým faktorem pro efektivní fungování měřících systémů je jednak konstrukce, která určuje jejich schopnost přesného a opakovaného měření, a jednak použité technologie, jakými jsou spínací sondy a metody snímání polohy.

V následujících kapitolách se budu podrobně věnovat jednotlivým aspektům měřících systémů. Nejprve se zaměřím na konstrukci, která ovlivňuje celkovou stabilitu, přesnost a rozsah měření. Následně popíši různé typy spínacích sond, které jsou klíčovým prvkem při kontaktním měření povrchů. Nakonec se budu věnovat metodám snímání polohy, které umožňují určit přesnou pozici měřených objektů v prostoru. (1)

3.1 Konstrukce

Konstrukce souřadnicových měřících systémů je značně různorodá a volí se především podle použité technologie měření, velikostí měřeného objektu a požadované přesnosti. Mezi typické konstrukce využívající kartézský systém souřadnic patří konstrukce Sloupová, Portálová a Mostová.

Mezi hlavní komponenty konstrukce patří suport, který jakožto přenašeč pohybu jednotlivých os, sám vykonává pohyb a slouží jako vedení pro další části. A proto je klíčovým prvkem konstrukce, který poskytuje stabilitu a podporu pro celý měřicí systém. Pinola, připojená k suportu, slouží k pohybu měřicí hlavy ve vertikálním směru. Most, spojený s pinolou, přenáší svislé a horizontální pohyby do měřicí hlavy, umožňujíc tak flexibilitu a přesné pozicování. Portál, integrovaný do konstrukce, poskytuje pevnou platformu pro celý měřicí systém, což zajišťuje stabilitu během měření. Tato konstrukce je navržena tak, aby poskytovala optimální podporu a pohyblivost pro efektivní a přesné měření. (1; 2)

3.1.1 Portálová konstrukce

Jednou z nejčastějších konstrukcí mezi souřadnicovými měřicími přístroji je portálová konstrukce s pohyblivým portálem, která nabízí optimální kompromis pro středně velké díly. Portál, umístěný v první ose, slouží jako nosná část pro suport, který nese výsuvnou pinolu. Tato kombinace umožňuje plynulý a přesný pohyb ve všech směrech, což je klíčové pro dosažení optimálních měřicích výsledků. Suport s výsuvnou pinolou přispívá k větší flexibilitě v upínání a měření různě tvarovaných dílů.

Hlavní výhodou této konstrukce je schopnost měřit středně velké díly s optimální přesností a efektivitou. Portálová konstrukce s pohyblivým portálem se stává oblíbenou volbou v průmyslových aplikacích, kde je nutné měřit různorodé typy dílů s různými tvary a rozměry. Tato konstrukce je zvláště vhodná pro multisenzorovou techniku a pětiosé měření, což posiluje její výkonnost a flexibilitu. S robustním designem a schopností pohybu v několika osách dokáže efektivně pokrýt širokou škálu měřicích potřeb v průmyslovém prostředí. (1; 3; 4)

Obrázek 1 Portálová konstrukce



Zdroj: <https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/>

3.1.2 Sloupová konstrukce

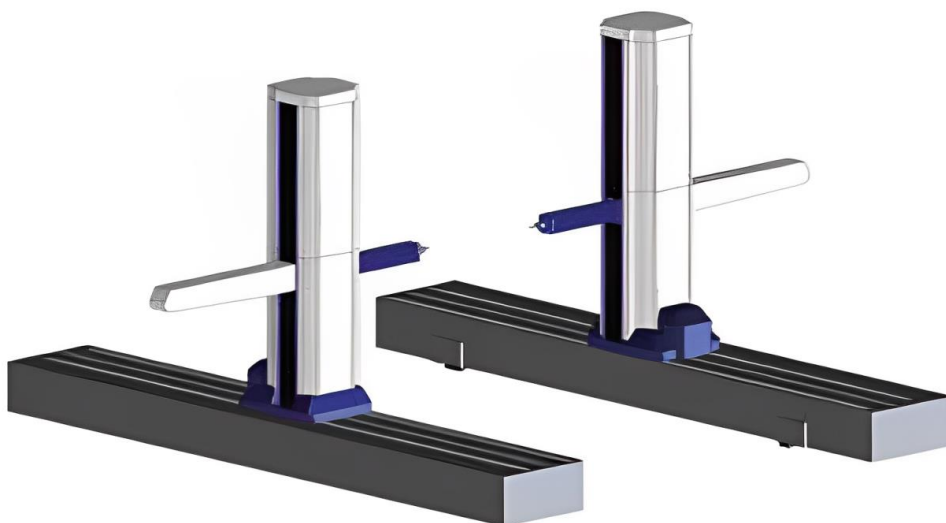
Sloupová konstrukce s křížovým stolem

Sloupová konstrukce s křížovým stolem převládá především u bezkontaktních měřidel, kde měřicí ustrojí dosahuje vyšší hmotnosti. Tato konstrukce využívá křížový stůl, přičemž většina pohybu je prováděna samotným měřeným objektem, a z tohoto důvodu jsou vhodnější pro měření menších dílů, což má za následek snížení hystereze a zvýšení přesnosti měření. (3)

Sloupová konstrukce s výložníkem

Sloupová konstrukce s výložníkem, též známá jako konstrukce s horizontálním ramenem, využívá sloupy k pohybu v ose x. Suport, pohybující se ve směru osy z po sloupu, zajistí výsuvný pohyb ramene ve směru osy y. Tento typ konstrukce bývá často zatěžován momenty, a proto je často vybaven protiváhou k vyvážení. Jednou z nevýhod této konstrukce je omezení možnosti měření ve směru ke sloupu. Aby se překonaly tyto omezení, často se používá ve formě duplexu, kdy jsou dva nezávislé výložníky umístěny naproti sobě. Tato konstrukce se osvědčila především v automobilovém průmyslu při měření karosérií, kde se výrazně uplatňuje při rozměrech až 4 metry mezi sloupy. (1; 5)

Obrázek 2 Výložníková konstrukce v provedení duplex



Zdroj: <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CARB-series.pdf>

3.1.3 Mostová konstrukce

Mostová konstrukce je významný typ měřících strojů, který je využíván zejména pro těžký průmysl. Umožňuje měření dílců o délce až 24 metrů, čímž patří mezi největší a nejvýkonnější měřicí systémy. Využívá pevné sloupky spojené s vodící kolejnici pro pohyb mostu v prvním směru. Na mostě je umístěn suport, který zajišťuje zbývající pohyby a umožňuje tak trojrozměrné měření.

Modularita sloupů poskytuje flexibilitu ve velikosti zařízení, adaptovatelnost na různé velikosti a typy měřených objektů. V těžkém průmyslu hraje klíčovou roli při měření odlitků, svařenců a složitých strojních celků, přinášeje přesné výsledky na velké škále a stávající se nezastupitelným nástrojem pro kontrolu kvality a optimalizaci výrobních procesů. (1)

Obrázek 3 Mostová konstrukce



Zdroj: <https://www.alwaid.cz/mostove-cmm/>

3.1.4 Měřící ramena

Jedná se o zcela odlišnou koncepci, která funguje v Polárním souřadnicovém systému a využívá 6 až 7 rotačních kloubů k polohování měřicího zařízení, které může být kontaktní i bezkontaktní povahy. Hlavní výhodou měřících ramen je vysoká mobilita, díky které je možné umístit rameno k dílu a měřit i bez demontáže samotného měřeného objektu. Pro mobilní operace také většina výrobců ramen implementuje do svých zařízení baterie, pro měření bez potřeby externího zdroje energie. Jejich konstrukce umožňuje snadné ovládání, které je řízeno přímo operátorem. Operátor jej uchopí a tahem umístí na měřící pozici bez nutnosti programování. (6; 7)

Obrázek 4 Měřící rameno

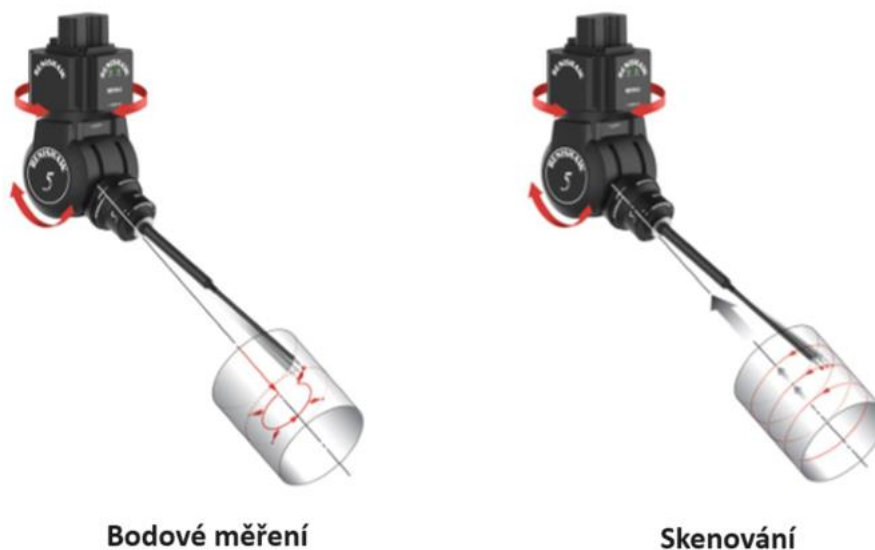


Zdroj: <https://metrologie.cz/merici-technika/podle-znacky/faro/merici-ramena-faro>

3.2 Dotykové senzory pro detekci plochy

Dotykové sondy jsou jedním z hlavních komponentů dotykových měřicích strojů a dělí se na Spínací a Skenování. Spínací funguje na principu spínače, který pokud zaznamená plochu, vyšle signál řídicí jednotce měřicího stroje a ta uloží aktuální pozici. Skenovací sondy neodesílají jednotný údaj o dotyku, ale o vychýlení od požadované polohy. Využívají se především pro popisování složitých tvarů. Hlavní výhodou skenovací sondy oproti sondě spínací je schopnost z jednoho měření vykreslit detailnější popis tvaru součástí díky kontinuálnímu pohybu. Další výhodou je vyšší rychlost, která může činit až $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, což s sebou nese vyšší efektivitu spojenou s časovou úsporou. Vzhledem k množství a rychlosti dat, které nám poskytují skenovací sondy dochází ke zvýšení náročnosti hodnocení dat. (8)

Obrázek 5 Porovnání bodového měření a skenování

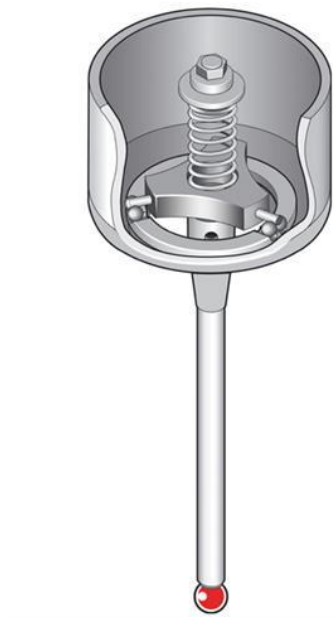


Zdroj: převzato z katalogu Renishaw (9) a upraveno

3.2.1 Dotykové sondy

Dotykové spínací senzory pracují na principu tří kontaktních bodů, kdy vlivem doteku obrobku dochází k vychýlení minimálně jednoho z kontaktů. Vychýlení může být analyzováno kinematickým způsobem (přerušeni obvodu) nebo tenzometrickým (změna odporu materiálu). (3)

Obrázek 6 Dotyková kinematická sonda



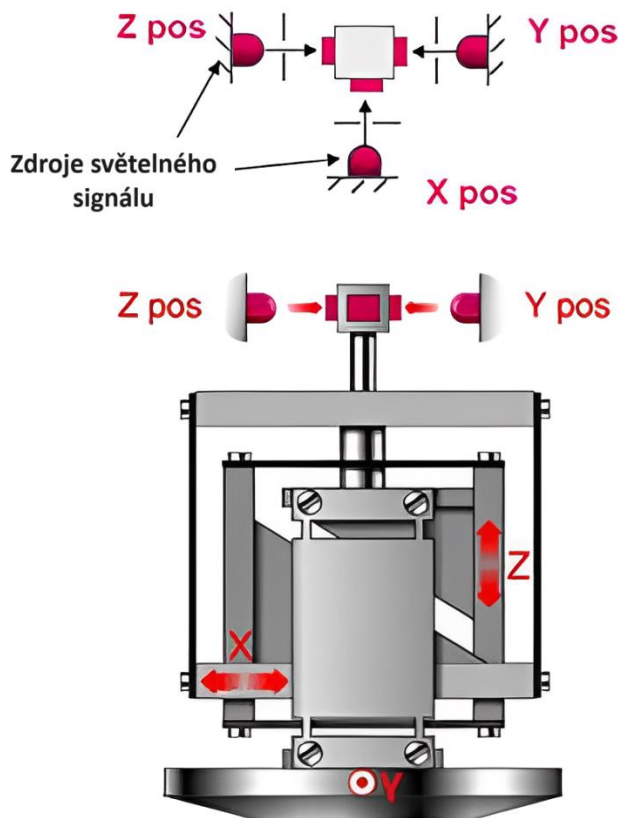
Zdroj: <https://www.renishaw.cz/cs/co-je-sonda--32937>

Tři kontaktní body sice představují optimální strategii pro měření v pěti směrech, ale nezajistí stejnou spínací sílu ve všech směrech. Pokud dojde k vychýlení ve směru jednoho z bodů, síla bude menší než síla v opačném směru z důvodu větší vzdálenosti k ose momentu. Hlavní nevýhodou této technologie je dlouhý pracovní čas, způsobený návraty od kontaktní plochy do výchozí pozice. (3)

3.2.2 Skenovací sondy

Skenovací nebo také měřicí sondy využívají tři světelných signálů, pro každou osu jeden. Světelný signál projde štěrbinou a nasvítí na polohové detektory, které jsou upevněny na pohyblivé části sondy. Polohové detektory slouží k převedení světelného signálu na analogový údaj o vychýlení. Skenovací sondy musí být v trvalém kontaktu s měřeným objektem a v pracovním rozsahu. Nevýhodou této technologie je nejen náročnost na zpracování dosažených dat (až 4 000 bodů za sekundu), ale také náročnost na řízení v průběhu měření. Skenovací sondy slouží především pro složitější operace měření tvaru například kruhovitosti, přímosti, válcovitosti. (8; 9)

Obrázek 7 Princip skenovací sondy

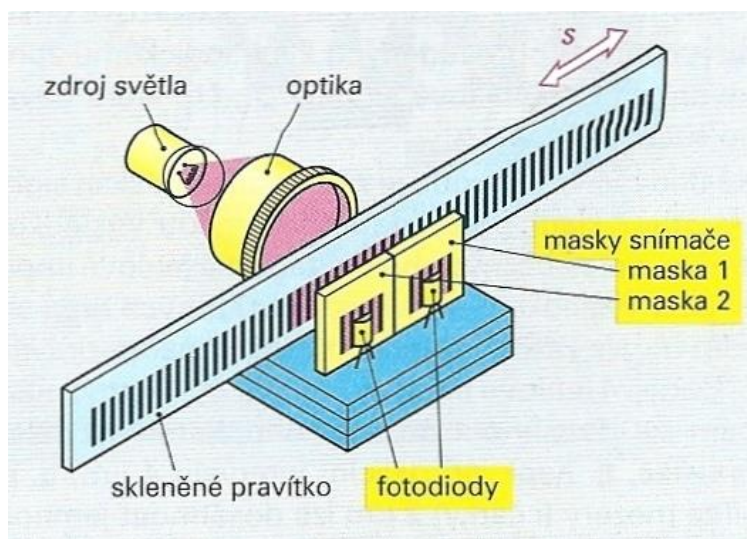


Zdroj: Ing. Pavel Macháček, Souřadnicové Měřicí stroje

3.3.2 Optické snímače

Optické snímače využívají optické principy pro sledování pohybu. Sestávají z LED osvětlení, které osvětluje fotodiodu skrze průsvitnou pásku. K dosažení vyšší přesnosti a detekce směru pohybu se používají minimálně dva páry LED osvětlení a dvě fotodiody pro relativní pohyb. Při absolutním odměřování se vyžaduje více párů, což však zvyšuje prostorové nároky. (10)

Obrázek 9 Princip optického snímače polohy



Zdroj: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/960>

3.3.3 Laserové snímače

Laserové snímače pracují na principu měření rozdílu času mezi vyslaným a přijatým pulsem záření při známé rychlosti světla. Odečítání na délku až desítek metrů bez ovlivnění teplotní roztažnosti, jako je tomu u magnetického a optického snímání, představuje významnou výhodu této technologie. (10)

3.3.4 Absolutní a relativní odměřování

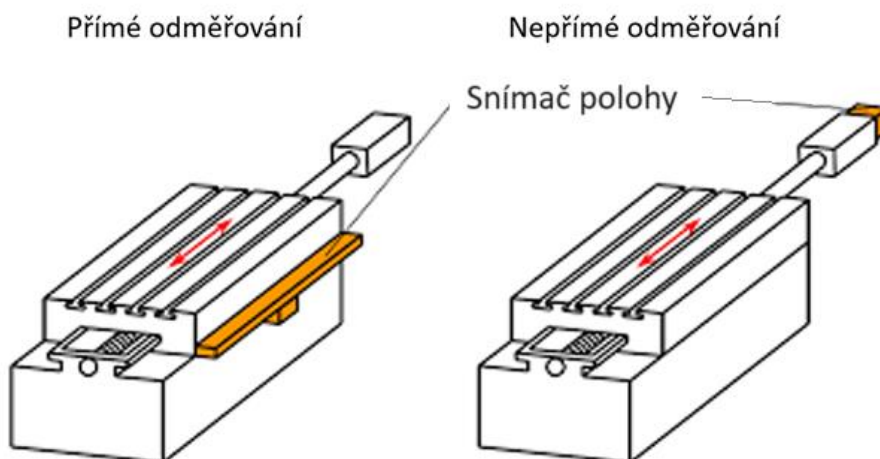
Absolutní odměřování poskytuje přesnou informaci o aktuální poloze bez nutnosti referenčního nájezdu. Naopak relativní odměřování udává pouze údaj o vychýlení z

původní pozice, což může být omezením při potřebě opětovného nájezdu na požadovanou pozici. (10)

3.3.5 Přímé a nepřímé odměřování

Při metodě přímého odměřování je možné přímo získat hodnoty požadované veličiny, což zajišťuje vysokou přesnost v měření. Tento postup nalézá využití zejména při operacích s technicky náročnými a přesnými stroji. Naproti tomu metoda nepřímého odměřování pracuje s převodníky, které transformují naměřená data na konečnou hodnotu požadované veličiny. Tento postup může být náchylný k chybám spojeným s převodem, a je proto častěji využíván při méně náročných měřicích úkolech, jako například při operacích s obráběcími stroji, kde je tolerovatelná určitá míra odchylky.

Obrázek 10 Přímé a nepřímé odměřování



Zdroj: <https://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3672>

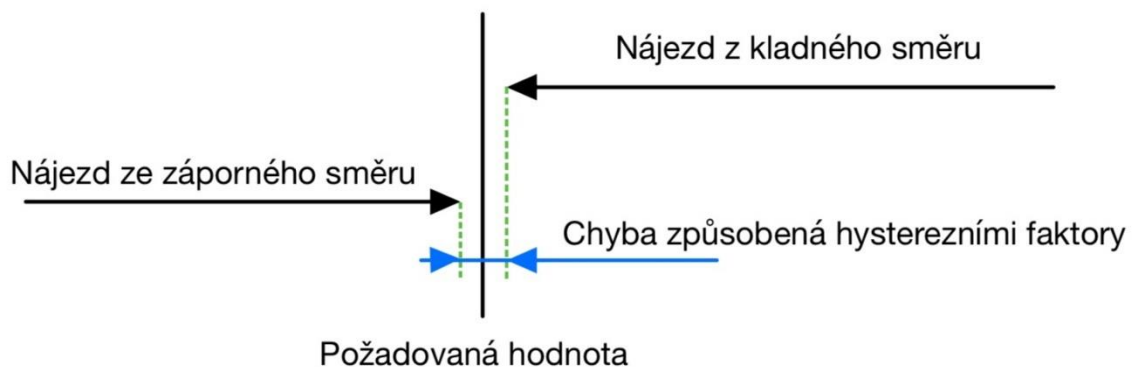
4 Hystereze v měřících systémech

Hystereze představuje fenomén, který je často pozorován v měřících systémech a má značný vliv na přesnost a spolehlivost měření. V této části bakalářské práce se zaměřím na detailní analýzu hystereze v kontextu měřících systémů, přičemž se pokusím identifikovat její základní příčiny, měřicí technologie, a navrhnout vhodné kompenzační metody.

4.1 Definice hystereze

Hystereze se v měřících systémech projevuje jako nesymetrická odezva na změnu vstupní veličiny. Tento jev je způsoben opožděním nebo zpožděním reakce měřícího zařízení v důsledku předešlých změn vstupní veličiny. Tedy, výstup měřícího zařízení se může lišit, závisle na tom, zda bylo předchozí měření prováděno vzestupně nebo sestupně. (11)

Obrázek 11 Grafické znázornění hystereze



4.2 Příčiny hystereze

Existuje několik faktorů, které mohou přispět k vzniku hysterezního efektu v měřících systémech. Faktory jako tření, pružnost materiálů, a dynamika mechanických součástí mohou vytvářet nekonzistenci v odpovědích měřícího zařízení. Elektrické a elektronické komponenty, zejména v případě senzorů a jejich umístění, mohou rovněž hrát klíčovou roli ve výskytu hystereze.

4.3 Vliv hystereze na přesnost měření

Hystereze může mít významný vliv na přesnost a opakovatelnost měření, což může být zvláště problematické v aplikacích, kde jsou vyžadovány konzistentní výsledky. Přesná kvantifikace tohoto vlivu je nezbytná pro zhodnocení celkové přesnosti měřicího systému a navržení efektivních metod, které umožní eliminaci nebo minimalizaci hysterezního efektu.

4.4 Kompenzační metody pro hysterezi

Aby bylo možné efektivně eliminovat nebo minimalizovat vliv hystereze, jsou navrhovány různé kompenzační metody. Patří sem adaptivní algoritmy, které se snaží predikovat a korigovat výstup měřicího zařízení na základě předešlých měření. Mechanické kompenzace, jako jsou precizní ložiska nebo optimalizované konstrukce, mohou také přispět ke snížení hysterezního efektu. (11)

5 Multisenzorová technika

Multisenzorová technika představuje inovativní metodiku měření, kde je kombinováno několik senzorů s cílem získat co nejkomplexnější informace o měřeném objektu. Tento moderní přístup zavádí do měřicích procesů nové dimenze, zvyšuje rychlost měření a umožňuje získat rozsáhlé informace o geometrických a povrchových vlastnostech objektů. Sensory, jako klíčové komponenty multisenzorové techniky, poskytují specifické informace, a jejich kombinace umožňuje měřit široké spektrum vlastností, včetně tvaru, teploty a drsnosti povrchu. (3)

5.1 Sensory drsnosti

Sensory drsnosti umožňují integrovat kontrolu drsnosti povrchu do měřicích cyklů CMM. Tím, že jsou tyto sondy plně začleněny do systému měření, uživatelé mohou využívat výkonných funkcí, které zvyšují rychlost a flexibilitu kontroly. Řídící jednotka poskytuje přístup k měřením ve formátu Ra, RMS a nezpracovaných dat pro externí software, což umožňuje detailní analýzu povrchové kvality. (9)

Obrázek 12 Moduly pro měření drsnosti- zalomený a přímý



Zdroj: <https://www.renishaw.cz/cs/sonda-sfp2-pro-mereni-drsnosti-povrchu-pro-system-revo--10823>

5.2 Senzor teploty

Teplotní senzor zvyšuje flexibilitu měření na měřicím stroji. Automatická výměna a záznam teploty přímo během kontrolního cyklu umožňuje přímou kalibraci měření a automatické začlenění do protokolu, což přispívá k celkové efektivitě procesu.

5.3 Ultrazvukový senzor

Využití ultrazvuku pro jednostranné měření tloušťky součástí při měřicím rozsahu 1 mm až 20 mm s přesností lepší než 25 mikronů je revolučním přínosem. Tato technologie umožňuje měření vnitřních prvků a firma Renishaw přináší inovaci v této oblasti, kde vyloučila potřebu použití spojovacího gelu nebo vodní nádrže, použitím elastické kuličky na konci sondy, což umožňuje měření přímo na CMM. (9)

Obrázek 13 Ultrazvuková sonda Renishaw

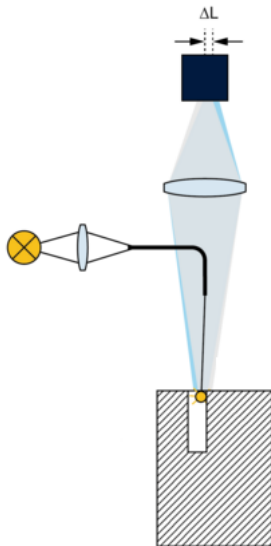


Zdroj: <https://www.renishaw.cz/cs/rup1-ultrasonic-probe-for-the-revo-system--47061>

5.4 Werth Fiber Probe

Werth Fiber Probe je hybridní měřicí technologie, která kombinuje prvky kontaktní sondy s bezkontaktními optickými metodami. Tato technologie využívá skleněnou kuličku jako kontaktní sondu, která je schopna snímat povrchy s vysokou přesností. Pro měření kontaktu však využívá bezkontaktní optické metody, což umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti měření a zároveň minimalizuje opotřebení sondy a měřeného objektu. Werth Fiber Probe je známá svou schopností poskytnout přesné a spolehlivé měření a vzhledem k velikosti skleněné kuličky až 20 μm je vhodná pro měření složitých geometrií a malých detailů. (3; 12)

Obrázek 14 Schéma Werth Fiber Probe



Zdroj: <https://werthinc.com/products/2d-fiber-probe/>

Výměna senzorů

Vyměnitelnost senzorů umožňuje snadné přepínání mezi různými typy senzorů, zatímco zásobník nástrojů automatizuje proces výměny, což výrazně zvyšuje efektivitu měření. Tato funkce eliminuje časové ztráty spojené s ruční výměnou nástrojů a umožňuje neustálý provoz měřicího stroje. Na rozdíl od ruční výměny nenese automatická výměna značná omezení v následné kalibraci měřidla. (9)

6 Pětiosé měřicí systémy

V této části bakalářské práce se detailně zabývám výhodami, které přináší 5osé měřicí systémy v porovnání s tradičními 3osými. Analyzuji klíčové aspekty, jako je dostupnost měřicí polohy, zjednodušení upínání, snížení hystereze a jejich vliv na přesnost, a také zvýšení rychlosti měření, což jsou všechno faktory, jež jsou klíčové pro průmyslová měření.

6.1 Dostupnost měřicí polohy

Jednou z významných výhod pětiosých měřicích systémů je jejich schopnost poskytovat komplexní informace o měřeném objektu. Díky dvěma dodatečným osám pohybu jsou tyto systémy schopny snadno dosáhnout náročných úhlů a poloh, což výrazně rozšiřuje jejich schopnost měřit složité geometrie. Tím se otevírá prostor pro pokročilé měření a analýzu objektů s komplexními tvarovými charakteristikami. (9)

Obrázek 15 Změna polohy měření

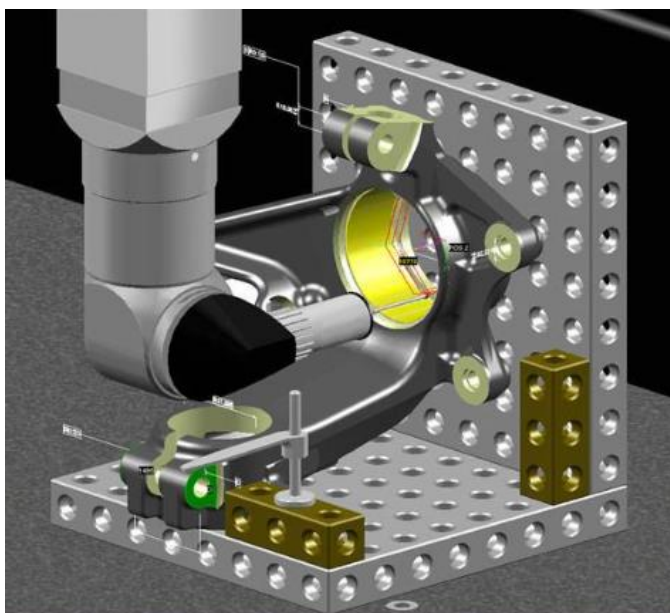


Zdroj: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/a92e6049173741d182297f01cf8d6fd8.pdf>

6.2 Zjednodušení upínání

Pětiosé měřicí systémy přinášejí výhodu v oblasti upínání měřených objektů. Díky větší flexibilitě v pohybu měřicích zařízení může být upínání objektů jednodušší a efektivnější. Například pokud je měřený objekt složitého tvaru, a nelze jej stabilně upnout pro měření ve svisle poloze, umístíme objekt na bok a měříme natočením hlavy nástroje do horizontální polohy. To znamená, že může být snazší zajistit stabilní a opakovatelné upnutí objektů pro měření, což přispívá k celkovému zlepšení procesu a eliminaci potenciálních chyb spojených s nevhodným upínáním.

Obrázek 16 Vizualizace upnutí a měření v horizontální poloze



Zdroj: <https://www.metrologic.group/silma-x4/>

6.3 Rychlost měření

Jedním z nezvratných přínosů, které pětiosé měřicí systémy přinášejí, spočívá v jejich schopnosti dosahovat rychlostí měření až trojnásobně vyšších ve srovnání s tradičními tříosými systémy. Tato výhoda v rychlosti vzniká díky pečlivě optimalizovanému pohybu v prostoru a efektivní redukci nepotřebných pohybů. V důsledku toho dochází ke zkrácení doby potřebné k realizaci jednotlivých měření. Význam této rychlostní výhody je zřejmý nejen v aspektech časové efektivity, ale také v kontextu snížení hystereze a zvýšení přesnosti měření. Optimalizovaný pohyb měřicího systému

přispívá k eliminaci nadbytečných oscilací a nepřesností, což má v konečném důsledku pozitivní vliv na celkovou přesnost a konzistenci měření. (9)

7 Řízení měřících systémů

Ovládání měřících systémů probíhá dvěma způsoby, manuálně a automaticky. Při manuálním ovládání dochází k řízení pomocí joystickového ovladače přímo operátorem měřícího stroje, což může přinést subjektivní chyby do procesu. Rychlost manuálního měření je značně omezena, a proto se manuální měření často využívá pouze tam, kde není potřeba opakovaných měření. Naopak automatické měření je plně řízeno řídicí jednotkou stroje, což eliminuje subjektivní chyby. Tato technologie nabízí výhody v rychlosti a opakovatelnosti procesu při zachování vyšší přesnosti. Automatizace také výrazně usnadňuje následné zpracování a ukládání dat pro případné budoucí použití. (2)

Obrázek 17 Manuální ovládání



Zdroj: <https://kubousek.cz/produkty/3d-souradnicove-merici-stroje/>

Automatické řízení

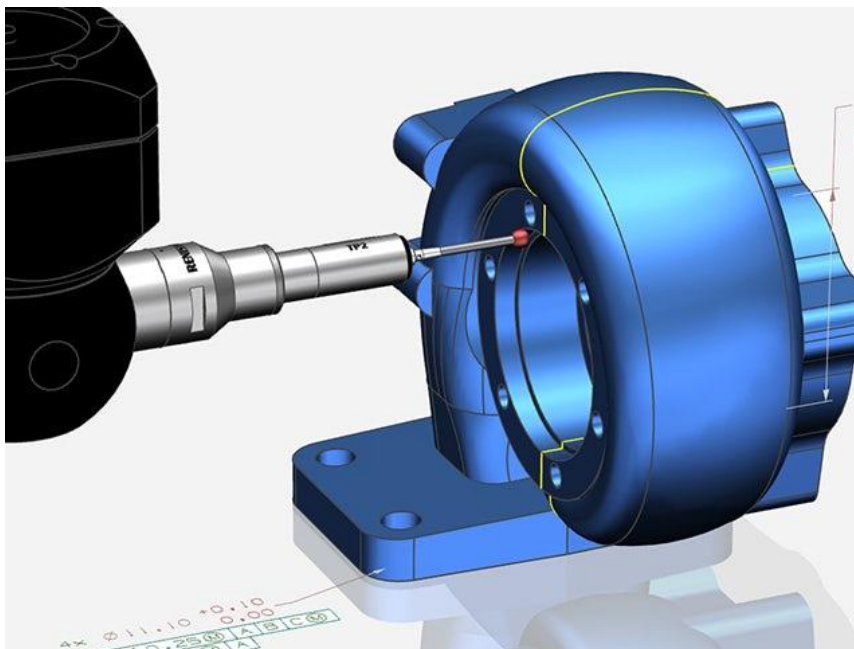
Automatické řízení je způsob řízení, kde je stroj navigován pomocí připraveného měřícího programu specifického pro danou součást. Tento program definuje pohyby a operace sondy v prostoru, stanovuje měřené body a specifikuje požadované parametry měření. Během tvorby programu je klíčové zohlednit geometrii a charakteristiky měřeného objektu. Programátor musí také vzít v úvahu přesnost a opakovatelnost měření. Moderní programy často podporují i funkce automatického generování měřících cyklů a umožňují

vizualizaci měření v 3D prostoru. Díky těmto nástrojům je proces tvorby programu nejen precizní, ale také intuitivní a uživatelsky přívětivý. Před spuštěním samotného programu je nutné určit počátek souřadnicového systému tak, aby odpovídal měřicímu programu. Při nejpřesnějších měřeních se souřadný systém označuje šesti body, kde tři body slouží k určení roviny, další dva k natočení první osy a poslední bod k určení počátku druhé osy. Při sériovém měření je tento postup implementován do programu, ale přibližná pozice musí být určena před spuštěním programu. (2; 13; 14)

7.1 Simulace pohybu

Simulace pohybu slouží k vizualizaci aktuálního pohybu měřicího nástroje v porovnání s měřeným objektem. Tato technika se často využívá k analýze pohybu stroje v digitálním prostředí, což má za cíl optimalizovat trajektorii nástroje a zabránit případným kolizím. Simulace bývá běžně implementována do programovacích softwarů, kde poskytuje uživatelům možnost vizualizovat měření, předem i během měření. (14)

Obrázek 18 Simulace pohybu

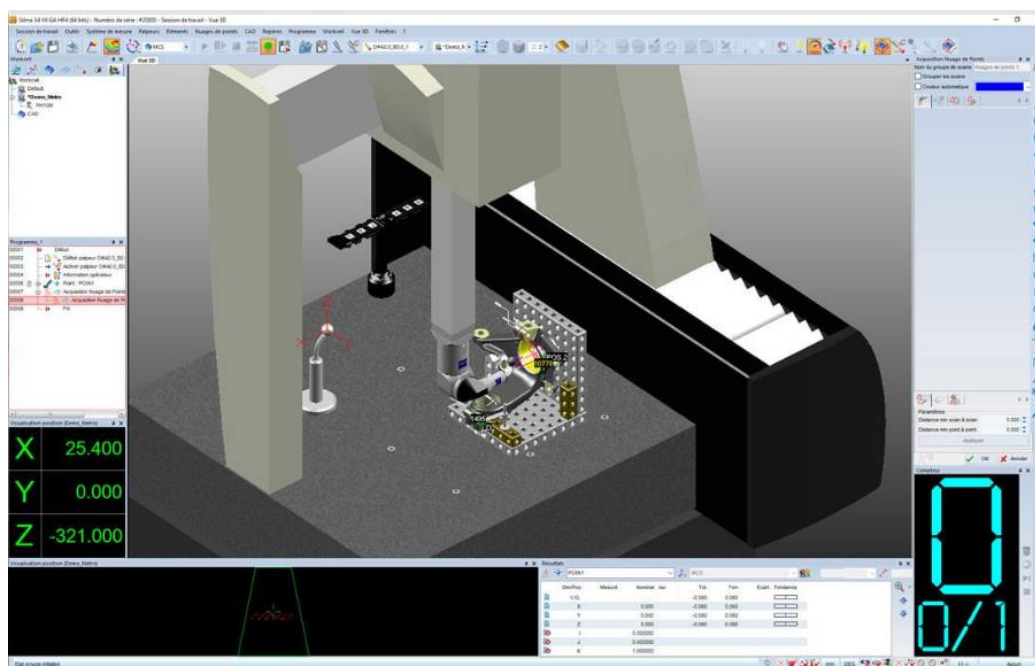


Zdroj: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/manufacturing/part-quality-control/>

7.2 Digitální dvojče

Digitální dvojče představuje rozšířenou formu simulace, kde je využita digitální kopie reálného stroje a podrobuje ji podrobné simulaci. Hlavním cílem digitálního dvojčete je snížit riziko kolizí, které nejsou způsobeny samotným měřicím nástrojem a objektem, ale konstrukcí celého stroje. Kolize mohou vznikat například v důsledku rotačního pohybu nástroje k upínacím prvkům nebo kolize se zásobníkem nástrojů. Aby bylo digitální dvojče efektivní, musí co nejpřesněji odpovídat skutečnosti jak podle vzhledu, tak rozměrů. Tato technologie nachází své uplatnění především u multifunkčních pětiosých měřicích systémů, kde složité pohyby a jejich vzájemné interakce mohou vést k potenciálním kolizím. Digitální dvojče se stává nezbytným nástrojem pro předcházení problémům a optimalizaci bezpečnosti a efektivity měření. (15)

Obrázek 19 Digitální dvojče v prostředí Silma x4



Zdroj: <https://www.metrologic.group/silma-x4/>

7.3 Rozšířená realita

V dnešní době se firmy pohybují v komplexním prostředí, kde dynamika inovací stoupá a životní cykly produktů se zkracují. S rostoucí složitostí produktů a příslušných výrobních procesů je nezbytné hledat nové metody plánování výrobních systémů. Jedním slibným přístupem v této oblasti je koncept digitální továrny/virtuální výroby, což zahrnuje modelování a analýzu počítačových modelů plánované továrny s cílem zkrátit čas a snížit náklady. Tento proces však často zahrnuje rozsáhlé modelování složitých simulačních modelů, které jsou náchylné k chybám a vyžadují časově náročné vyhodnocení výsledků simulace. (16)

V kontextu souřadnicových měřících strojů může technologie rozšířené reality (AR) poskytnout uživatelům vizuální navigaci a informace o měřených bodech. To výrazně usnadňuje identifikaci a definici bodů pro měření a zarovnání objektů. Díky AR mají uživatelé lepší orientaci a porozumění procesu měření, což v konečném důsledku může vést k rychlejšímu a přesnějšímu provedení měření. Využití AR technologie se ukazuje jako zvláště užitečné v situacích, kdy uživatelé například měří objekty po delší době a nemají přesnou představu o tom, které body byly definovány pro zarovnání nebo jaká byla nastavena pozice měřeného objektu. AR funguje jako prostředek pro vizualizaci a zjednodušení procesu měření nejen na souřadnicových měřících strojích. (13; 17)

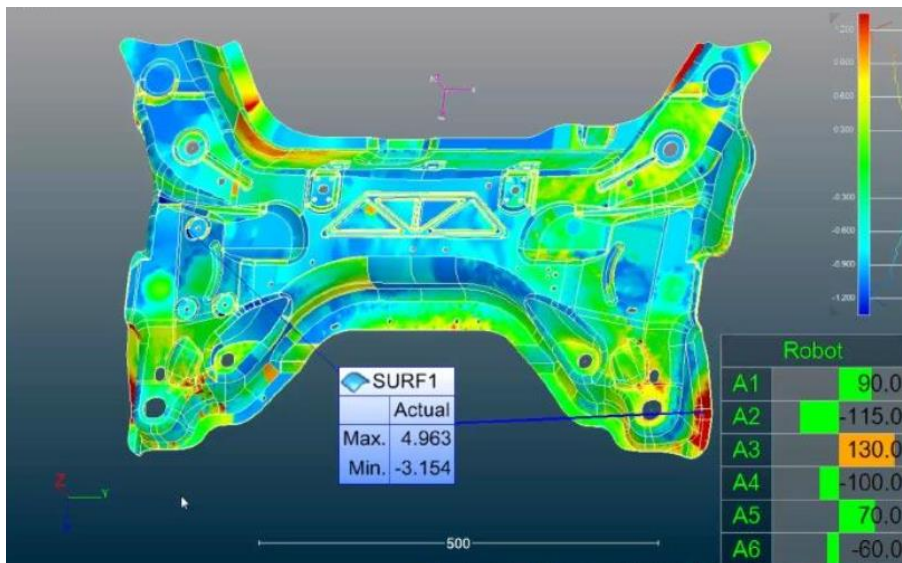
8 Interpretace výsledků měření

Interpretace výsledků měření na souřadnicových měřicích strojích představuje kritický a zásadní krok v celém procesu získávání informací o měřených objektech. Po provedení samotného měření prochází vstupní data komplexním zpracováním a analýzou, což v konečném důsledku umožňuje získat relevantní informace o geometrických vlastnostech a přesnosti měřených objektů. V rámci interpretace výsledků sehrává klíčovou roli zobrazování naměřených dat.

Grafické zobrazení výsledků

Grafická prezentace odchylek od požadované polohy v podobě 3D modelů, barevných map odchylek a povrchových analýz poskytuje uživatelům rychlý a přehledný náhled na klíčové charakteristiky měřených objektů. Tím se zvyšuje schopnost vizualizace a porozumění celého procesu měření. (14)

Obrázek 20 3D barevná mapa naměřených hodnot



Zdroj: <https://www.metrologic.group/metrolog-x4/>

Číselné a tabulkové zobrazení výsledků

Tyto informace poskytují přesné kvantitativní údaje o rozměrech, odchylkách a dalších parametrech, které jsou klíčové pro porovnání s referenčními hodnotami. Statistická analýza, součást celého interpretačního procesu, umožňuje identifikovat trendové vzory a statistické parametry, které hrají klíčovou roli při hodnocení spolehlivosti měření.

Obrázek 21 Číselný zápis výsledků do protokolu

FCFLOC2 Size		MM	Ø 30 +1/-1			DEFAULT	ASME Y14.5	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYL1	30.0000	1.0000	1.0000	29.5365	-0.4635	0.0000		
FCFLOC2		MM	⊕ Ø 4 A B C			DEFAULT	ASME Y14.5	
Feature	AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYL1 (END PT)	X	40.0000			40.4796	0.4796		
	Y	30.0000			31.7606	1.7606		
	TP	0.0000	4.0000	0.0000	3.6494	3.6494	0.0000	0.0000
FCFLAT1		MM	∠ 2			DEFAULT	ASME Y14.5	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
PLN1	0.0000	2.0000		1.3311	1.3311	0.0000		
FCFLOC3 Size		MM	Ø 38 +0.5/-0.5			DEFAULT	ASME Y14.5	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYL11	38.0000	0.5000	0.5000	37.7196	-0.2804	0.0000		
FCFLOC3		MM	⊕ Ø 0.4 A B C			DEFAULT	ASME Y14.5	
Feature	AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYL11 (START PT)	X	65.0000			65.1645	0.1645		
	Z	-25.0000			-25.1314	-0.1314		
	TP	0.0000	0.4000	0.0000	0.4211	0.4211	0.0211	0.0000
#	MM	LOC1 - CYL6						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	54.4957	0.1500	0.1500	54.4422	-0.0535	0.0000		
Y	15.4000	0.1500	0.1500	15.4558	0.0558	0.0000		
D	8.2000	0.3000	0.3000	8.2693	0.0693	0.0000		

Zdroj: <https://advancedinspect.com/cmm-systems/>

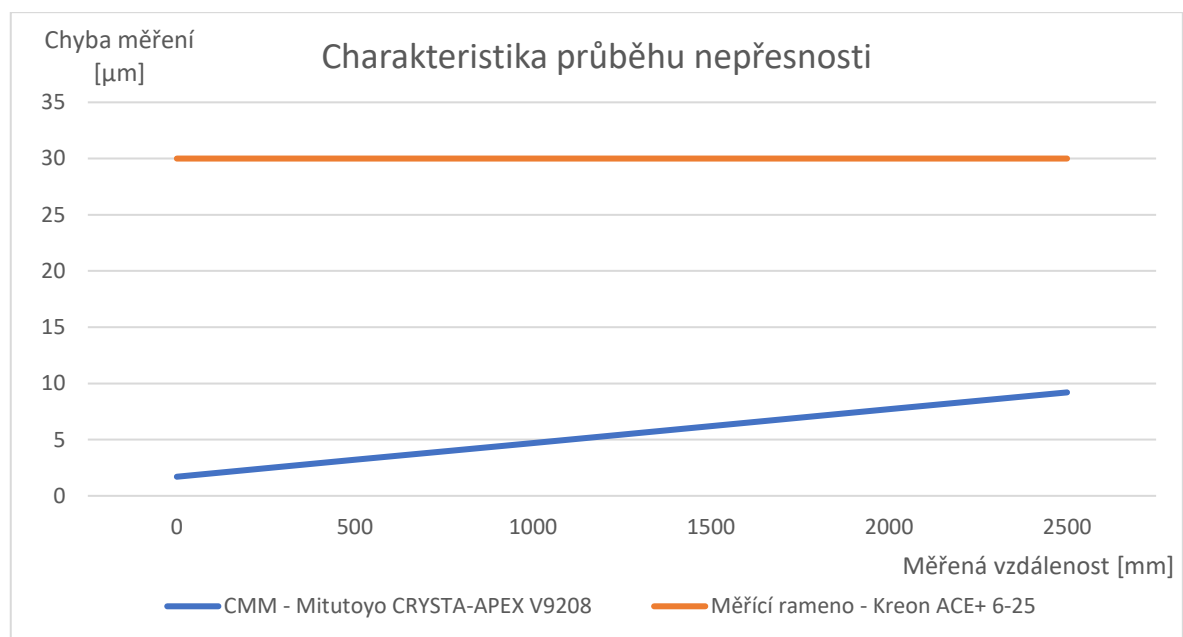
V závěrečné fázi celého měřicího procesu je nezbytný vypracovaný protokol měření. Tento dokument obsahuje podrobné záznamy o provedeném měření, což umožňuje nejen pečlivé sledování jeho vývoje, ale také efektivní komunikaci uvnitř týmu. Protokol slouží jako klíčový nástroj pro předání výsledků zákazníkovi a poskytuje pevný základ pro případné nápravy a zdokonalení výrobního procesu. (14)

V obsahu protokolu výsledků měření nesmí chybět identifikace konkrétního měření a podrobnosti o měřeném dílu. Následné parametry měření detailně specifikují použité nastavení měřicího stroje, což přispívá k transparentnosti a reprodukovatelnosti měření. Vstupní data obsahují naměřené souřadnice, odchylky a další relevantní informace, což zaručuje kompletní zachycení výsledků. (14)

9 Porovnání

Při rozhodování o vhodném měřicím systému je klíčové pečlivě zhodnotit jejich specifika a charakteristiky. Třiosé systémy poskytují dostatečnou přesnost pro jednoduché geometrie, avšak jsou omezeny v pohyblivosti. Naopak pětiosé systémy nabízejí vyšší přesnost díky větší flexibilitě, což je ideální pro složitější tvary. Měřicí ramena, i když přesností zaostávají za CMM, výrazně převažují nad konvenčními měřidly při běžných dílenských měřeních. Důležité je si však všimnout konstantní nepřesnosti měřicích ramen v celém rozsahu měření, což je způsobeno odečty na rotačních kloubech, vedoucí k vyšší nepřesnosti i při měření menších rozměrů. U CMM se setkáváme s rozsahem nepřesnosti, který závisí na měřené délce. (9; 18)

Obrázek 22 Charakteristika průběhu nepřesnosti



Zdroj: sestavil autor z katalogů(7; 18)

Porovnání přesnosti mezi měřicími rameny a CMM je prezentováno v tabulce, kde jsou kategorie navrženy pro srovnání strojů s podobnými vlastnostmi. Zjistíme, že CMM stroje dosahují výrazně vyšší přesnosti, ale s rostoucími rozměry se rozdíl v přesnosti mezi těmito technologiemi snižuje. (19; 20; 21)

Tabulka 1 Porovnání přesnosti Měřících ramen a CMM

Nejpřesnější ve své konstrukci			
	Nepřesnost udávaná výrobcem	Přepočtená nepřesnost na 1300mm	
Mitutoyo LEGEX12128	(0,6x1,5L/1000)μm	2,55	μm
Tomelleri MERCURY 1.3 - 6os	0,015mm	15	μm
Měřidla s běžným rozsahem			
	Nepřesnost udávaná výrobcem	Přepočtená nepřesnost na 2500mm	
Mitutoyo CRYSTA-APEX V9208	(1,7x3L/1000)μm	9,2	μm
Kreon ACE+ 6-25	0,03mm	30	μm
Největší rozsah měření			
	Nepřesnost udávaná výrobcem	Přepočtená nepřesnost na 9000mm	
Mitutoyo CARBstrato 801630D	(40x30L/1000)≤130μm	130	μm
Tomelleri EXPLORER 9.0 - 7os	0,17mm	170	μm

Zdroj: sestavil autor z katalogů (7; 18; 19; 20; 21)

Vzhledem k ceně, přesnosti a rozsahu použití jsou tříosé systémy jsou vhodné pro méně náročné aplikace, zejména v kombinaci s manuálním ovládáním, což jim poskytuje dobrý poměr cena/přesnost. Jejich uplatnění je ideální v kusové výrobě, například při zpracování obrobků. Pětiosé systémy excelují ve složitějších tvarech, přičemž jejich přednosti vynikají při sériovém měření, například v automobilovém a leteckém průmyslu, kde slouží například pro měření karosérií a dalších složitých strojních celků. Měřicí ramena jsou flexibilní a vhodná pro různé aplikace, poskytují relativně přesná a rychlá měření pro kusovou výrobu rozměrově větších výrobků. I když jsou měřicí ramena nejmladší metodou měření, stále se rozvíjí, a očekává se jejich další rozvoj, zejména v oblasti měření větších svařenců.

10 Závěr

V závěru mé bakalářské práce lze shrnout, že celkovým cílem bylo systematicky shromáždit a analyzovat současné poznatky týkající se dotykových měřicích systémů, s důrazem na jejich aplikační možnosti v oblasti měření povrchů materiálů. V této práci jsem se věnoval klíčovým aspektům současného průmyslu, přičemž jsem zdůraznil požadavky na přesnost charakterizace povrchů materiálů s ohledem na rozsah měřicích zařízení a zachování jejich spolehlivosti.

Detailně jsem analyzoval strukturu a funkce měřicích strojů, a podrobně přiblížil základní principy jejich fungování. Další část naší práce byla věnována rozšíření těchto znalostí o víceosé měření a multisenzorovou techniku. Prováděl jsme analýzu možností těchto systémů a zdůraznili jejich přínosy a vliv na přesnost měření. Tyto systémy vynikají v schopnosti provádět kontrolu s vysokou přesností, i při měření dílů s různými tvary nebo různými požadavky na technologii měření.

Následně jsem se zaměřil na aktuální trendy, jako jsou digitální dvojčata a rozšířená realita. Digitální dvojčata slouží k analýze výrobních procesů, přičemž zabrání vzniku škod a minimalizují prodlevy během výrobního procesu. Naopak rozšířená realita poskytuje možnost implementace digitálních prvků do reálného světa, převážně se uplatňující jako informační nosič v průmyslovém provozu.

Následně jsem popsal interpretaci výsledků měření, což představuje jednu z nejpodstatnějších oblastí měřicích systémů. Charakterizoval jsem podobu výsledků a vyzdvihl oblasti jejího využití. V závěrečné části práce jsem provedl komparaci různých typů měřicích systémů, s důrazem na jejich efektivitu a přesnost.

Celkově lze konstatovat, že měřicí ramena jsou spíše flexibilním nástrojem pro měření strojních sestav nežli pro precizní sériovou výrobu. Dotykové měřicí systémy se tak jeví jako klíčový nástroj pro průmyslové měření povrchů materiálů, díky jejich univerzálnosti, schopnosti komplexní analýzy a rychlosti provedení měření. Skrze tuto práci jsem si kladl za cíl přispět k hlubšímu porozumění a optimálnímu využití těchto systémů v průmyslovém prostředí.

11 Seznam použitých zdrojů

- (1) ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN isbn978-80-248-2514-4.
- (2) *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. Liberec [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>. Skripta. Technická univerzita v Liberci, Katedra výrobních systémů a automatizace.
- (3) CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4. přeprac. a rozš. vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
- (4) PETŘKOVSKÁ, Lenka. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD* [online- PDF]. Ostrava, 2013 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_01.pdf. Studijní materiál. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- (5) BRT SERVIS. *Výložníkové měřicí stroje* [online]. c2024 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://brtservis.cz/produkty-wenzel/souradnicove-merici-stroje/>
- (6) HOCKEN, Robert J., Paulo H. PEREIRA a Taylor & Francis eBooks (online SLUŽBA). *Coordinate measuring machines and systems*. 76. Second. London;New York;Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. Dostupné z: doi:10.1201/b11022
- (7) ALWAID. *3D RAMENA KREON ACE A ACE+* [online]. - [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/3d-ramena-ace/>
- (8) RENISHAW. *Skenovací sondy* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/skenovaci-sondy--6656>

- (9) RENISHAW. *REVO®*, *Vysoce výkonný systém pětiosého měření* [online- PDF]. c2022 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/2e44a73b7eea4760b8695e19fff35c0a.pdf>
- (10) NOVÁK, Martin. *Technická měření*. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN isbn978-80-01-06388-0.
- (11) MRÁZEK, Jakub. *Měření přesnosti polohování a kompenzace polohových chyb*. Liberec, 2011. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- (12) WERTH. *Multisensor* [online- PDF]. 2020 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: https://metrologie.cz/files/ckeditor/5_Produkty/5-33_werth/Multisensor_CZ_2020_m.pdf
- (13) TOROK, Jozef, Marek KOCISKO, Monika TELISKOVA a Miroslav JANAK. Increasing of the Work Productivity of CMM Machine by Applying of Augmented Reality Technology. *MATEC Web Conf.* 2016, **68**. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20166802002>
- (14) METROLOGIC GROUP. *Metrolog X4* [online]. c2024 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.metrologic.group/metrolog-x4/>
- (15) KOPEČEK, Pavel. *Digitalni dvojče* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/212330>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Kamil Řehák.
- (16) DANGELMAIER, Wilhelm, Matthias FISCHER, Jürgen GAUSEMEIER, Michael GRAFE, Carsten MATYSCZOK a Bengt MUECK. Virtual and augmented reality support for discrete manufacturing system simulation. *Computers in Industry*. 2005, **56**(4), 371-383. ISSN 0166-3615. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.01.007](https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.01.007)
- (17) METROLOGIC GROUP. *I-Holo* [online]. c2024 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: https://www.metrologic.group/value-added-solutions/#pll_switcher
- (18) MITUTOYO. *CRYSTA-Apex V Series* [online- PDF]. 2020 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CRYSTA-Apex-V-Series-1.pdf>

- (19) KUBOUŠEK. *Měřicí ramena* [online]. - [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://kubousek.cz/produkty/tomelleri-prenosna-merici-ramena/>
- (20) MITUTOYO. *CARB Series* [online- PDF]. 2015 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CARB-series.pdf>
- (21) MITUTOYO. *LEGEX Series* [online- PDF]. 2021 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: https://pim.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/0415-01_LEGEX.pdf