



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Využitelnost optického měření
v hromadné výrobě**

**Usability of optical measurement
in mass production**

Bakalářská práce

2022

Jan Dvořák

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Obrábění, projektování, metrologie

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **486912**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využitelnost optického měření v hromadné výrobě

Název bakalářské práce anglicky:

Usability of optical measurement in mass production

Pokyny pro vypracování:

1. Dotykové a bezdotykové systémy měření - využitelnost, výhody, nevýhody
2. Problematika optických metod měření v hromadné výrobě
3. Tvorba plánu měření a vyhodnocení získaných dat

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem Využitelnost optického měření v hromadné výrobě vypracoval samostatně s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne 29. 7. 2022

.....

Jan Dvořák
Podpis



Poděkování

Rád bych poděkoval rodině, přítelkyni a všem ostatním, kteří mě podporovali po celou dobu studia finančně, časově i psychicky. Na tomto místě bych také rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Šimotovi za cenné rady, připomínky a vedení při práci. Velice si toho vážím.



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Anotace

Jméno autora:	Jan Dvořák
Název diplomové práce:	Využitelnost optického měření v hromadné výrobě
Rozsah práce:	počet str. 63, počet obr. 62, počet tab. 7
Rok zpracování:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Šimota
Zadavatel:	ČVUT v Praze - Fakulta strojní
Klíčová slova:	Kamerový systém, optické měření, hromadná výroba, produktivita, výrobní proces
Abstrakt:	Cílem práce je posouzení aplikovatelnosti bezdotykových měřících zařízení v hromadné výrobě, ve které se neustále zvyšují nároky na rychlost a efektivnost měření. Tato práce analyzuje problematiku a možné aplikace kamerových systémů. Měření probíhá na 5 tvarově různých součástích pomocí stroje ZEISS O-Select a Keyence IM-7000.



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Annotation

Author:	Jan Dvořák
Title of Bachelor' dissertation:	Usability of optical measurement in mass production
Academic Year:	2021/2022
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú 12135 – Department of machining technology, planning and metrology
Supervisor:	Ing. Jan Šimota
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Key words:	Optical system, optical measurement, mass production, productivity, manufacturing process
Annotation:	The aim of the bachelor's dissertation is to assess the applicability of non-contact measuring devices in mass production, in which the demands on speed and efficiency of measurement are constantly increasing. This work analyses the issues and possible applications of camera systems. The measurement takes place on 5 components of different shapes using a ZEISS O-Select and Keyence IM-7000.



Obsah

1	Základní teorie.....	9
1.1	Interakce s materiály.....	9
1.1.1	Polarizace	9
1.1.2	Lom světla	10
1.2	Parametry objektivu.....	11
1.2.1	Numerická aparatura objektivů	12
1.2.2	Hloubka ostrosti	12
1.3	Optické odchyly (aberrace).....	13
1.4	Zpracování obrazu.....	14
1.4.1	Postup tvorby obrazu	15
1.5	Vyhodnocovací metody snímání	16
1.5.1	Guassův prvek	17
1.5.2	Chebyshevovy polynomy.....	17
1.5.3	Vnitřní a vnější tečný prvek	17
1.6	Telecentrické a netelecentrické objektivy	18
1.6.1	Netelecentrický objektiv	18
1.6.2	Telecentrický objektiv	18
1.6.3	Objektový telecentrický objektiv.....	19
1.6.4	Snímací telecentrický objektiv.....	20
1.6.5	Bitelecentrický objektiv.....	20
1.7	Druhy osvitu	20
1.7.1	Backlight – Dolní osvit	20
1.7.2	Self-Illumination – Horní osvit.....	20
1.7.3	Koaxiální osvit.....	21
1.7.4	Prstencový osvit	21
1.7.5	Difuzní přední osvětlení	22
1.7.6	Usměrněné přední osvětlení	22
2	Dotykové a bezdotykové systémy měření	23
2.1	Dotykové snímací systémy	23
2.1.1	Spínací	24
2.1.2	Skenovací.....	25



2.2	Bezdotykové snímací systémy.....	26
2.2.1	Pruhová projekce	26
2.2.2	Laser scanner.....	27
2.2.3	Fotogrametrie	27
2.2.4	Kamerové systémy	28
3	Problematika optických metod měření v hromadné výrobě	30
3.1	Překážky vývoje měřicích přístrojů v hromadné výrobě	30
3.2	Metodika měření.....	31
3.2.1	Zapisování dat	32
4	Tvorba plánu měření a vyhodnocení získaných dat	34
4.1	Měřicí přístroje pro vyhodnocení měření	34
4.1.1	O-select	34
4.1.2	Keyence IM-7000.....	38
4.2	Vyhodnocení měření běžných a komplexnějších tvarů součástí.....	40
4.2.1	Díl 1 – tvarový profil	40
4.2.2	Díl 2 – Malá součást s drážkou	45
4.2.3	Díl 3 – Ozubené kolo a součást složitá pro uchopení.....	48
4.2.4	Díl 4 – Hřídel se závitem	50
4.2.5	Díl 5 – Koncová měrka.....	53
	Závěr.....	56
	Seznam obrázků	57
	Seznam grafů.....	59
	Seznam tabulek	60
	Seznam použité literatury	61



1 Základní teorie

V dnešní době se rychle zvyšují nároky na rychlost a efektivnost měření a neustále roste potřeba překonávat jejich omezení. Míra produktivity výrobního procesu je limitována i rychlostí v kontrolní fázi. Optické přístroje vypadají v současné době jako jedno z nejlepších řešení v sériové výrobě. Dokáží zprostředkovat velké množství dat. Jsou relativně flexibilní pro měření komplexních prvků a nehrozí poškození povrchu materiálu. V této práci se zaměřuji na kamerové systémy, které jsou jedny z hlavních typů optických zařízení.

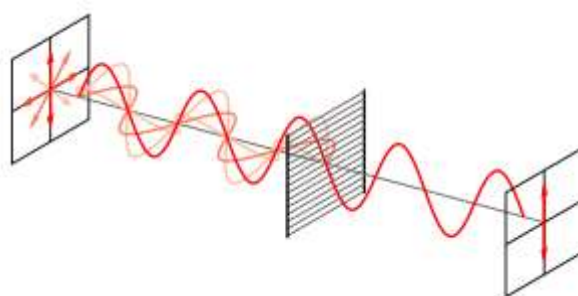
Při svojí práci bych se neobešel bez pochopení několika teoretických poznatků, které jsou popsány v dalších kapitolách bakalářské práce.

1.1 Interakce s materiály

1.1.1 Polarizace

Polarizace je určitá vlastnost elektromagnetických zařízení, ve kterých směr a velikost kmitajícího elektrického pole jsou k sobě vztaženy. Světelné vlny jsou v příčném směru, to znamená, že vibrační elektrický vektor každé vlny je kolmý ke směru šíření vlny. Naopak paprsky nepolarizovaného světla se šíří ve stejném směru jejich elektrických vektorů a oscilují v libovolném směru [1].

Při kruhové polarizaci se elektrický vektor otáčí kolem směru šíření. Světlo může být polarizováno odrazem nebo průchodem filtry [1].



Obr. 1 Polarizace světla [1]

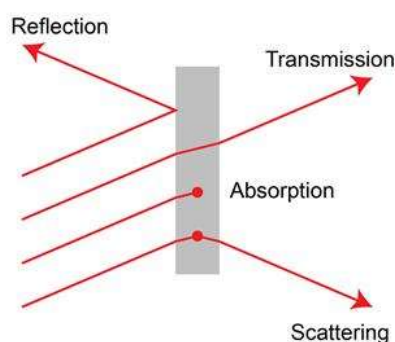


Odraz, absorpce a přenos světla

Světelné paprsky interagují s materiálem různými způsoby. Některé materiály světlo propouští, jiné odrazí nebo rozptylují. Na typ interakce světla má vliv jak materiál, tak i barva (vlnová délka) záření. Spektroskopie nazýváme vědu zabývající se studiem světla. Řeší, jaké složky jsou tzv. viditelného spektra (vstupují do našich očí), a určuje, jaké barvy vnímáme. Látka se projevuje jako modrá, pokud absorbuje červené složky barevného spektra záření [1].

Proces odrazu spočívá v tom, že elektromagnetické záření se vrací buď na hranici mezi dvěma prostředími, např. odraz od povrchu materiálu, nebo se může i šířit uvnitř média, tzv. objemový odraz. Oba procesy jsou provázeny difúzí. Jde o proces odražení jednoho paprsku do několika směrů v prostoru. Tento proces lze nazvat difúzním odrazem a přenosem. Odraz, přenos a rozptyl nemění frekvenci záření. Výjimkou je tzv. Dopplerův jev, který způsobuje změnu frekvence, kde odrážející povrch se pohybuje [1].

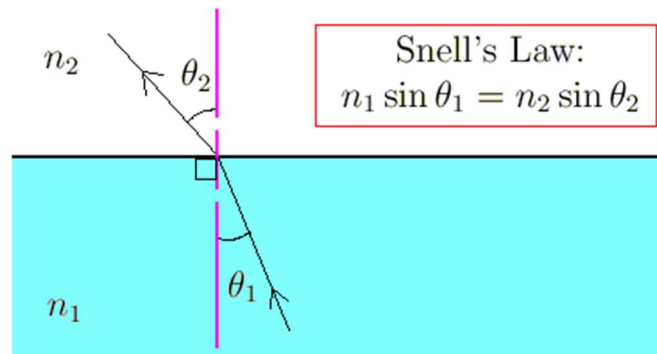
Absorpce se nazývá proces, který přeměňuje zářivý výkon na jiný druh energie, obvykle teplo při interakci s materiálem [1][2].



Obr. 2 Odraz, absorpce a přenos světla [2]

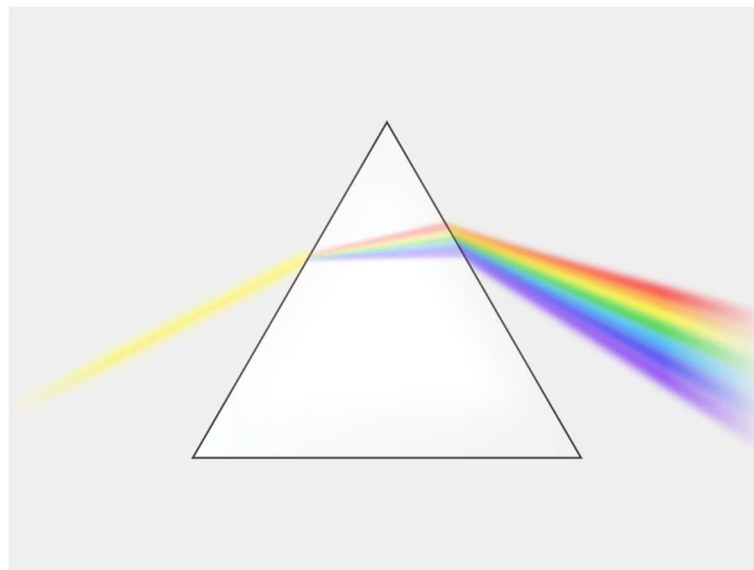
1.1.2 Lom světla

Snellův zákon řeší vlastnosti šíření světla a různých jiných vln skrz různá izotropní média, jako jsou voda, sklo, vzduch nebo jakýkoliv jiný materiál. Nejčastěji se používá vzorec k popisu vztahu mezi úhly dopadu a lomu. V optice se zákon využívá při sledování paprsků, výpočtu úhlů jejich dopadu nebo lomu v experimentální optice slouží k nalezení indexu lomu [1][3].



Obr. 3 Lom světla [3]

Disperze a lámání světla souvisí i s dělením bílého světla do barevného spektra světelných záření, nejčastějším případem bývá světlo průchozí skleněným hranolem. Sklo má vyšší index lomu než vzduch. Takže pokud paprsek bílého světla přicházejícího ze vzduchu do materiálu, který má index lomu jiný, následně vzniká tzv. disperze světla. Vznikají různě barevné složky světla do různých úhlů v prostoru a jsou oddělené. Každá barva představuje jinou frekvenci světla [1].



Obr. 4 Disperze světla [1]

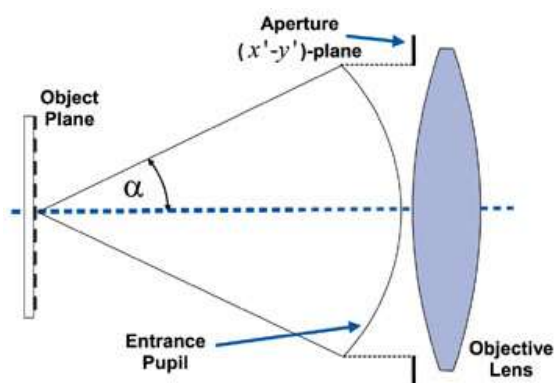
1.2 Parametry objektivu

Často v katalogu objektivu lze nalézt jejich různé parametry, z nichž většina je na první pohled srozumitelná, ale nachází se zde několik z nich, které bych rád uvedl zde do základní teorie. Myslím tím numerickou aparaturu objektivu, hloubku ostrosti a rozlišovací schopnost objektivů.



1.2.1 Numerická aparatura objektivů

Numerickou aparaturou u čoček objektivů se myslí dovednost shromažďovat paprsky světla a dovednost rozlišení jemných detailů objektu v dané vzdálenosti. Obraz se vytváří pomocí procházejících světelných paprsků skrz preparát objektivu. Pomocí úpravy tohoto kuželu aparatury můžu měnit vlastnosti obrazu a zaostření těchto detailů [4].

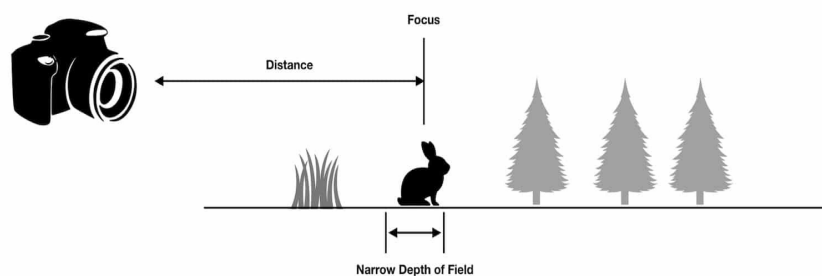


Obr. 5 Numerická aparatura [4]

Na plášti čoček objektivu lze nalézt údaje o zvětšení a velikosti aparatury. Příkladem může být zápis „200/1,5 oil 240/0,18“ – Začíná se zvětšením objektivu, následně se udává číslo velikosti aparatury, následně je uvedena charakteristická vlastnost (v našem případě ponoření do oleje), následuje délka trubice a tloušťka krycího skluzu.

1.2.2 Hloubka ostrosti

Hloubka ostrosti je vzdálenost, která je mezi nejbližším a nejvzdálenějším objektem, které lze zaznamenat v zaostřeném obrazu. Přijatelné zaostření se definuje pomocí vlastnosti kruh zmatku. Kruh zmatku vzniká při působení světelných paprsků kuželem, které při působení nedosáhnou dokonalého zaostření. Dále může mít vliv na hloubku ostrosti ohnisková vzdálenost, vzdálenost od objektu a volba clony. [5] [15]:



Obr. 6 Hloubka ostrosti [5]



1.3 Optické odchylky (aberrace)

Existuje pět základních typů odchylek známých jako Seidelovy aberrace. Jsou ovlivněny geometrií a zakřivením čoček. Tvoří se u aplikace monochromatického světla (světlo o jedné vlnové délce).

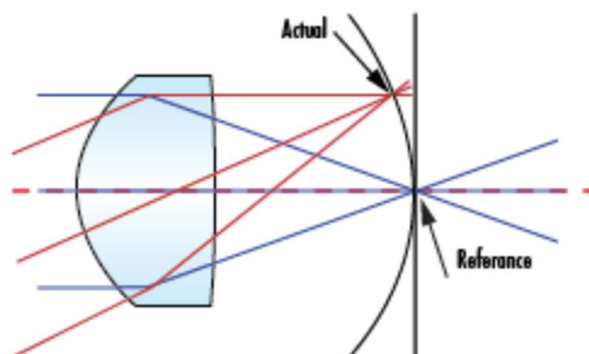
Kulová aberrace – Tato aberrace ovlivňuje paprsky z bodu optické osy. Paprsky pocházející z tohoto bodu směřují do různých směrů a prochází různými částmi čočky. Pokud je čočka kulového (sférického) tvaru, nebo pokud čočka nesplňuje požadavky tvaru, tak aby dokázala všechny paprsky usměrnit, vznikají nepřesnosti při promítání světla skrz čočku objektivu [6].

Astigmatismus – Tato aberrace se týká paprsků vycházejících mimo bod optické osy. Obvykle vzniká u čoček, které nemají přizpůsobený tvar a jejichž plocha v jedné rovině je více zakřivená než u roviny kolmé k ní. Není hladká a světlo neprochází ve všech směrech a rovinách stejně. Paprsky světla, které směřují skrz čočku k bodu objektu, se během procházení čočkou zakřivují a vytváří další nepřesnosti obrazu zvané astigmatismus [6].

Zakřivení pole – Tato odchylka se častěji objevuje u bezdotykových snímacích zařízení. Tato odchylka vzniká při nerovnosti povrchu. Pokud paprsky dopadají na zakřivený povrch, jejich původní směr se mění. Tento proces dělá obtížnější zařízením zaostřit snímáný obraz na celém povrchu objektu.

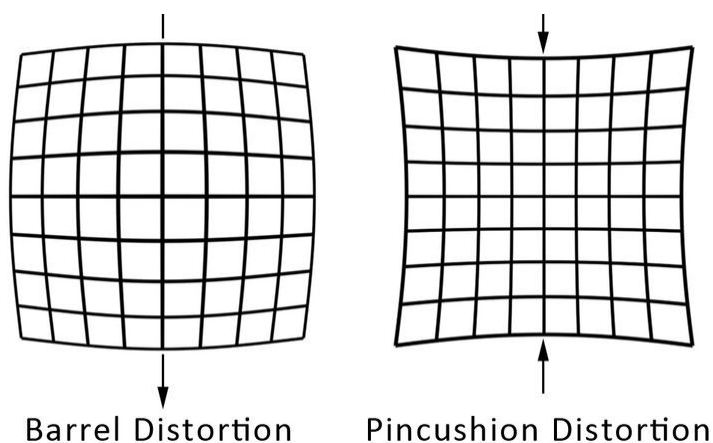


Úpravou vzdálenosti focusu vybíráme vzdálenost bodu a jeho blízkého okolí, kde zařízení dokáže nejlépe objekt zaostřit. Pokud se vzdálenost sníží, zakřivený povrch blíže bude více zaostřený. Pokud se vzdálenost zvýší, bude zaostřená více část povrchu, které je více vzdálená [6].



Obr. 7 Zakřivení pole [6]

Zkreslení – Přestože všechny ostatní odchylky mohou být velmi dobře potlačeny, může nastat, že světlo z bodů na objektu může být shromážděno na rovině obrazu ve špatné vzdálenosti od optické osy. Obraz se zakřivuje, čím více je vzdálená od optické osy. Pokud se vzdálenost v objektivu zvětšuje rychleji, paprsky vytváří tzv. jehelníkové zkreslení, pokud se vzdálenost zvětšuje, pomalu vzniká barelové zkreslení. U jakékoliv čočky najdeme jeden z těchto jevů. Zatím se v současné době nevyrábí čočky, které dokáží tento jev zcela odstranit [6] [15].



Obr. 8 Zkreslení obrazu [6]

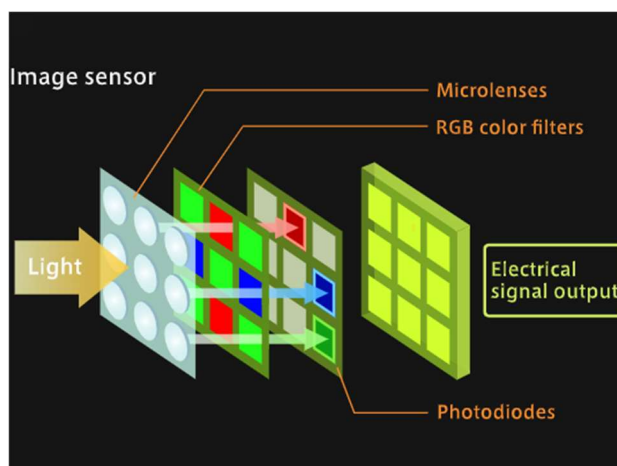
1.4 Zpracování obrazu

Zpracování obrazu znamená konvertování obrazu do digitálního prostředí a aplikování jistých úprav na něm. Pro tuto bakalářskou práci je nejdůležitější popsat CMOS detektor, jenž je na principu konduktorů, které fungují jako elektrické oči. Pomocí fotoelektrického efektu fotodiody vytváří elektrony z detekovaných protonů. Analogový světelný paprsek je přeměněn do diskrétního



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

napětového signálu a postupně vytváří obraz. Tato metoda zpracování obrazu se nejvíce rozšiřuje od roku 2004, kdy postupně nahradila starší CDD technologii. Díky fotodiodě a CMOS tranzistorům dokáže zpracovávat data obrazu efektivněji a levněji [8].



Obr. 9 Zpracování obrazu [8]

1.4.1 Postup tvorby obrazu

Při tvorbě obrazu je spousta faktorů, které ovlivní finální zobrazení. Pro kvalitní a stabilní zobrazení hran potřebujeme obraz s homogenním prostředím. Proto se používá např. zadní osvit pro černobílé snímky. Tvorbu obrazu lze rozdělit do několika kroků, které budou u optických zařízení automatizované.

Pořízení obrazu – Prvním krokem tvorby obrazu je pořízení obrazu. Zdrojový objekt je převeden do hardwarového prostředí pro následující zpracování. Součástí tohoto procesu bereme i změnu měřítka snímku [9].

Vylepšení obrazu – Vylepšením obrazu se myslí proces, který vzniká při změně digitálního zobrazení. Je důležité nastavit více výstupů pro různé velikosti displejů obrazovek. V prostředí počítače můžeme snímku upravit například ostrost. Vylepšené snímky se následně analyzují [9].

Obnova obrazu – Pomocí tohoto procesu lze obrázky, které mají velké nedokonalosti, upravit a přizpůsobit pro následující měření. Nedostatky mohou být ve formě rozmazání při špatném nastavení focusu objektivu kamery. Celková obnova obrazu se následně snaží vrátit původní vlastnosti obrazu co nejblíže k původnímu a zároveň zachovat co nejvhodnější úpravy [9].

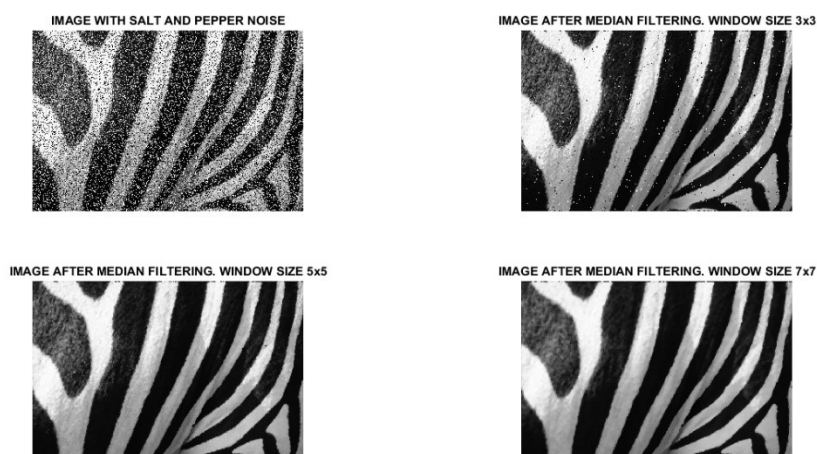


Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Proces přebarvení obrazu – Při tomto procesu je důležité rozumět fyzikálním vlastnostem světla a dalším vědeckým odvětvím týkajících se barev. Barva na obrazu se udává podle materiálu, místa nebo i času pořízeného snímku. Pomocí barev lze více rozlišit prvky obrazu a přizpůsobit snímek pro následující práci [9].

Kompresa a segmentace obrazu – Kompresí souboru i obrazu se myslí zpracování dat, tak aby se vyhodnotily jen podstatné části souboru a aby zároveň nezměnily vizuální zobrazení celého souboru. Díky komprimování se dokáže více snímků spojit do komplexních zobrazení, tak aby daná aplikace byla uzpůsobená co nejvíce pro měření. Následně se důležité části obrazu pomocí segmentace sestaví do formy tvaru nebo křivky pro správné vyhodnocení hranic mezi objekty [9].

Měření a daný obraz lze ovlivnit i filtry pro jeho zpracování. Filtr může upravovat hodnotu šedé barvy na každém pixelu a u kamerových systémů dokonce i operátor dokáže tuto hodnotu měnit. Díky filtrům lze obraz ještě více zlepšit a stabilizovat [10].



Obr. 10 Filtry obrazu [10]

1.5 Vyhodnocovací metody snímání

V moderní inteligentní výrobě se stále zvyšuje u součástí počet složitých tvarových prvků. Především hlavně aditivními technologiemi, a proto se v dnešní době zvyšuje potřeba rychlého a informativního způsobu měření pro dodržení kvality ve výrobě. Topografické měření ploch ovlivňují různé poruchy a otřesy při měření. Proto existují empirické přístupy, které toto měření usměrňují a optimalizují přesné vyhodnocení daných rozměrů a tolerancí. Postupně se tyto technologie vyvíjí směrem strojního učení [11].

V různých moderních měřicích zařízeních máme možnost upravit matematickou metodu pro vyhodnocení prvků součástí [11].



1.5.1 Guassův prvek

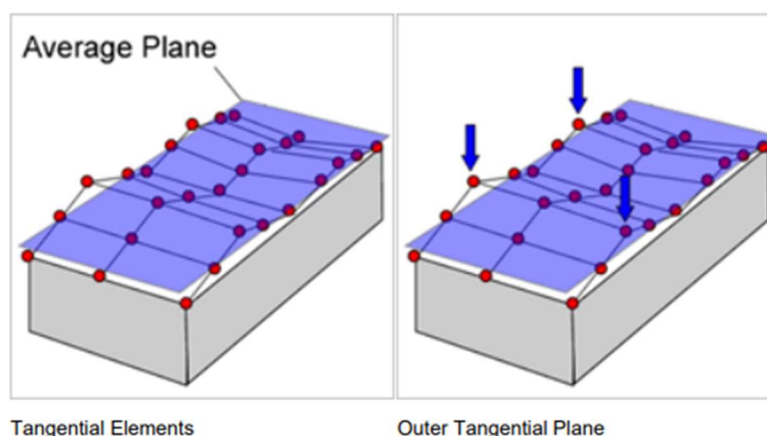
Jde o stochastickou interpolační techniku vhodnou pro předpovědi hodnot šumivého obrazu dat za předpokladu, že model součástí je korelovaný. Poprvé byla vytvořena pro obor geostatiky kolem začátku roku 1950, následně se tato výpočetní metoda aplikovala do výrobního procesu pro vyhodnocení makrogeometrických a mikrogeometrických chyb. V současné době se tato metoda nejvíce vyvíjí ve směru strojního učení [11].

1.5.2 Chebyshevovy polynomy

Chebyshevovy polynomy se používají u většiny matematických a fyzikálních disciplín. Tento algoritmus je přizpůsoben hlavně pro analýzu obrazu, který je na bázi dvourozměrné prostorové funkce. Dva oddělitelné jednorozměrné Chebyshevovy polynomy, které jsou diskrétní a ortogonální, aproximují dvourozměrný signál. Chebyshevovo měření povrchu je vysoce rozšířeno v analýze obrazu a numerické aproximace [12].

1.5.3 Vnitřní a vnější tečný prvek

Vnitřní tečný prvek je založen na nejnižších bodech, které se vztahují k prvku. U kruhu se jedná o body, které jsou co nejbližší k jeho středu. Vnější tečný prvek je založen naopak na nejvýše vzdálených snímaných bodech prvku. U kruhu jde o body, které jsou nejvíce vzdálené od jeho středu. V praxi se tato metoda využívá spíše ke snímání rovinných prvků. Z naměřených hodnot se vyhodnotí průměrná rovina a k ní se vyhodnocují body postavené výše nad rovinou nebo níže pod ní, viz obrázky pod tímto textem [13].



Obr. 11 Vnější a vnitřní tečný prvek [13]



Pro použití těchto matematických hodnot se doporučuje snímání velkého počtu bodů. U měření se také doporučuje vynechání extrémně vychýlených nasnímaných bodů, protože díky nim se může vytvořit nepřesnost výpočtu průměrné hodnoty [13].

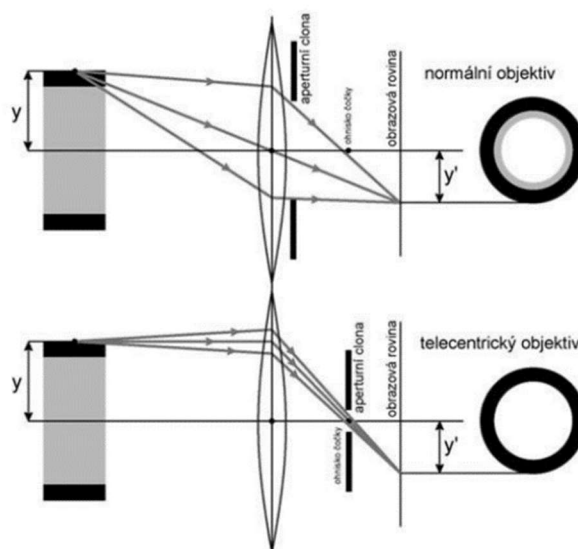
1.6 Telecentrické a netelecentrické objektivy

1.6.1 Netelecentrický objektiv

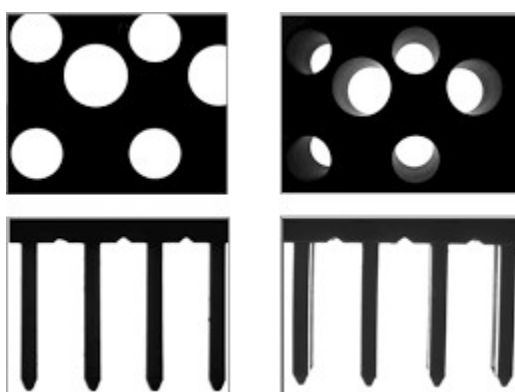
Netelecentrické objektivy se nazývají objektivy, které propouští světelné paprsky do všech směrů a téměř nikdy se nesíří rovnoběžně s osou objektivu. Tudíž rozměry snímaných objektů budou zkreslené. Takové objektivy mohou být takzvaně etnocentrické nebo hypercentrické. Tyto dva druhy se odlišují podle pozice clony objektivu. U etnocentrického jde o pozici uvnitř objektivu, objekty stejné velikosti se zobrazí menší při větší vzdálenosti od objektivu, než ve skutečnosti jsou. U hypercentrického je pozice clony za objektivem a objekty budou větší při větší vzdálenosti od objektivu [14].

1.6.2 Telecentrický objektiv

Telecentrický objektiv je druhem speciálního optického objektivu. Nejvíce se používá u mikroskopických a kamerových systémů. Je navržen tak, že umožňuje průchod světelných paprsků jen v rovnoběžné rovině s osou objektivu. Nejvíce se používají pro snímání objektů, které potřebujeme mít přesně zobrazené na dvourozměrném snímku, tudíž se zásadně nezobrazuje žádné zkreslení a obraz odpovídá objektu v realitě. Telecentrické objektivy se dělí na snímací, objektivové a bitelecentrické. Velikost objektů se u všech typů nezkresluje [14].



Obr. 12 Rozdíl mezi normálním a telecentrickým objektivem [14]



Obr. 13 Rozdíl zobrazení telecentrického a netelecentrického objektivu [15]

1.6.3 Objektový telecentrický objektiv

Objektový telecentrický objektiv pracuje na bázi ortografického promítání, je na principu promítání třírozměrného objektu na dvourozměrný pomocí ortogonálních čar. Ortogonální čáry jsou vždy kolmé k promítacímu povrchu, kam se objekt vykresluje. Tyto objektivy bývají větší, těžší a cenově náročnější než obyčejné objektivy. Obsahuje více součástí než obyčejný objektiv kvůli zprostředkování telecentricity. Jsou osvětlovány zezadu kvůli optimalizování telecentrického efektu většinou pomocí LED záření. Nejvíce se využívá v metrologii [16].

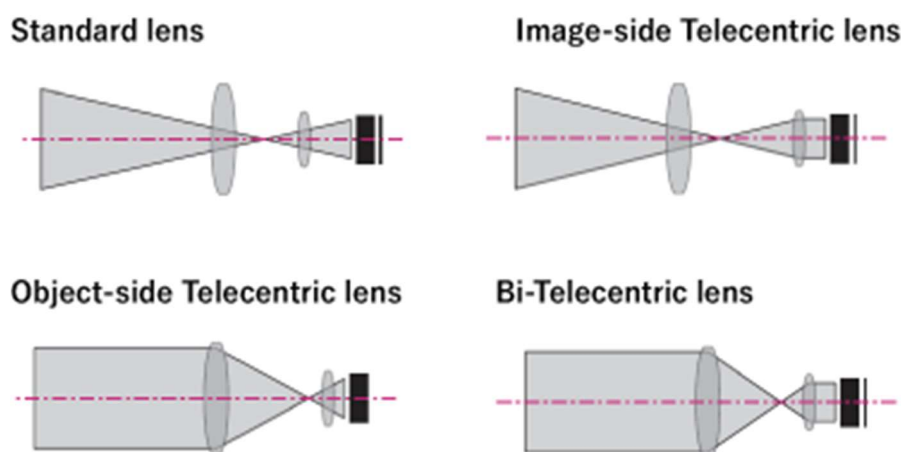


1.6.4 Snímací telecentrický objektiv

U tohoto typu objektivu je clona před čočkou objektivu, díky tomu umožňuje zachycovat objekty bez upravování velikosti obrázků na rozdíl u objektového objektivu. Lépe zpracovává vykreslování pixelů na snímku zachyceném snímacím senzorem. Používají se spíše pro měření elektromagnetické radiace a v místech, kde je potřeba přesné snímání barev [16].

1.6.5 Bitelecentrický objektiv

Zde se clona dává u vstupní i výstupní části čočky. Komerční bitelecentrické objektivy se nejvíce využívají díky nejmenšímu zkreslování obrazu a deformaci křivosti ve velkém rozlišení obrazu [16].



Obr. 14 Typy telecentrických objektivů [17]

1.7 Druhy osvitů

1.7.1 Backlight – Dolní osvit

Dolní osvit se používá pro podsvícení objektu, vytváří kontrast mezi tmavě zobrazeným objektem a světlým povrchem pozadí. Díky němu se přesně rozezná místo hrany a umožňuje přesně zpracovat obraz, definovat hrany a následně přesně vyhodnotit rozměry objektu. Dolní osvit je ovlivněn i výškou měření.

1.7.2 Self-Illumination – Horní osvit

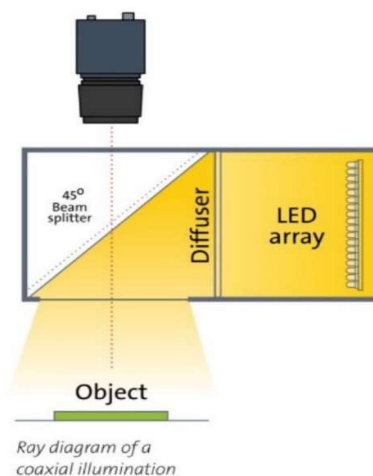
Horní osvit se používá pro průsvit objektu, vytváří kontrast mezi světle zobrazeným objektem a tmavým povrchem pozadí. Jde o další způsob osvětlení. V porovnání, který osvit je efektivnější, hraje spoustu faktorů např. intenzita záření. Ta bývá u horního osvitů menší (cca 5 %) než u dolního osvitů, kde bývá nejvýhodnější intenzita okolo 35 % podle některých vědeckých prací. Horní osvit bývá ale většinou efektivnější a má lepší výsledky zobrazení [15].



Obr. 15 Self-Illumination – Dolní a horní osvit [18]

1.7.3 Koaxiální osvit

Koaxiální osvit zajišťuje kolmý paprsek světla na povrch objektu. Pomocí jakéhokoliv objektivu netelecentrického i telecentrického i s dopomocí vychýlení osy objektu lze zachytit u součástí s velmi velkou odrazivostí světla viditelný obraz. Obvykle u těchto typů povrchů se světlo odráží do všech stran, důsledkem toho objektiv prstencového osvitu nezachytí velké množství světla [18].



Obr. 16 Koaxiální osvit [18]

1.7.4 Prstencový osvit

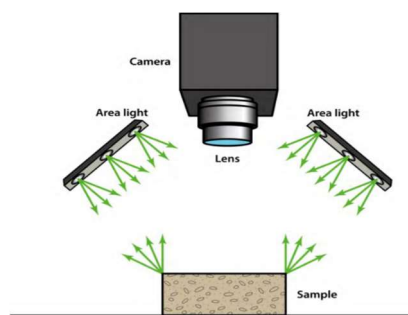
Obvykle na bázi LED osvětlení umožňuje lepší detekci hran u součástí s velkou odrazivostí světla. U některých součástí není ostrá hrana. U takových součástí běžný postup osvětlení nestačí a využívá se právě prstencový osvit. Oproti koaxiálnímu osvitu dosahujeme lepšího kontrastu a lepší ostrost hran.



Obr. 17 Prstencový osvit [27]

1.7.5 Difuzní přední osvětlení

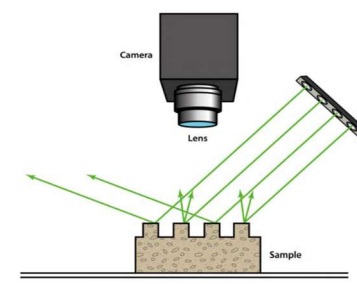
Pomocí tohoto osvětlení dokážeme minimalizovat nadbytečné stíny a odrazy. Paprsky nemají daný směr, díky tomu dosáhneme této minimalizace. Osvětlení se tvoří pomocí akumulování světelných paprsků za difuzorem [18].



Obr. 18 Difuzní přední osvětlení [18]

1.7.6 Usměrněné přední osvětlení

Toto osvětlení je známo i jako „dark field illumination“, čočky nezachycují odrazy paprsků z hladkých povrchů díky navržení tohoto osvětlení. Vytváří šikmé osvětlení utvářející se právě jen na hrubém povrchu ve vysokém kontrastu. Okraje, hrany a jakékoliv hranice prvků součásti se vykreslují v jasné bílé barvě [18].

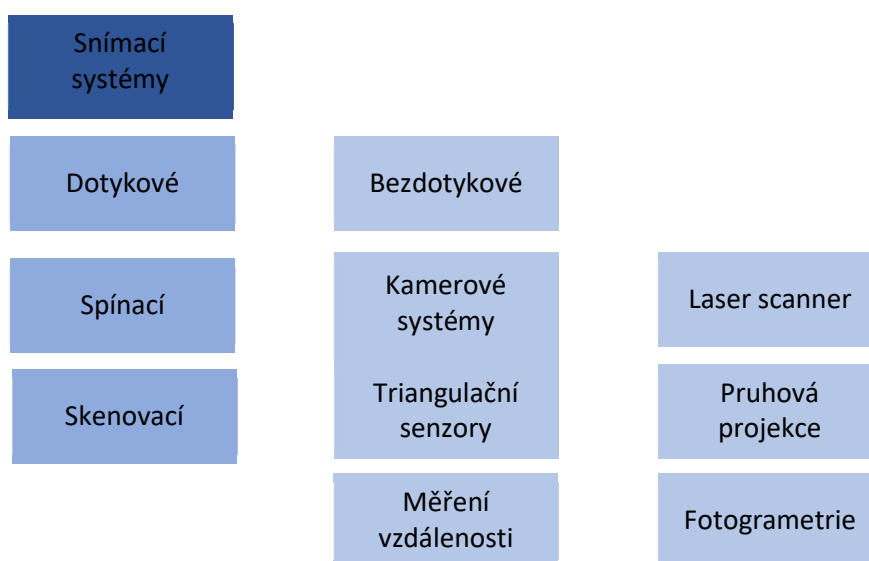


Obr. 19 Usměrněné přední osvětlení [18]



2 Dotykové a bezdotykové systémy měření

V současné době se postupně nahrazují běžné měřicí metody pomocí CMM systémů převážně v sériové výrobě. Výhodou těchto systémů je větší efektivita měření a převážně jejich větší přesnost oproti konvenčním metodám (v řádech μm). Nyní už existuje celá řada těchto systémů a je rozdělena hlavně na bezdotykové a dotykové systémy.



Obr. 20 Rozdělení snímacích systémů

2.1 Dotykové snímací systémy

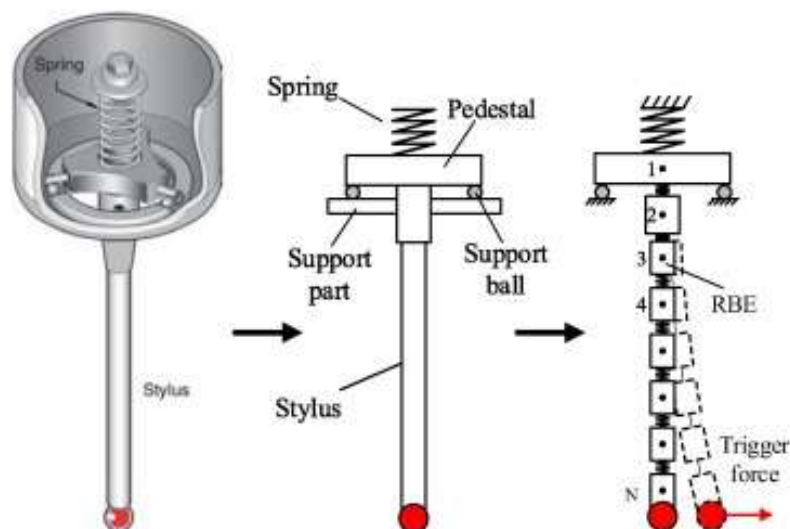
Za pomoci dotyku na měřené součásti se dokáže vyhodnocovat většinu geometrických prvků součásti. Mohou se vyhodnocovat rozměry i rozměrové tolerance vnějších i vnitřních rozměrů, velikosti děr, závitů. Dokáží vyhodnotit i kruhovitost, rovnoběžnost, házení a většiny ostatních geometrických tolerancí, a to s pomocí nasnímaných bodů na součásti. Větší počet snímaných bodů snižuje odchylku chyby měření. Dotykové systémy se dělí na spínací a snímací [28].



Obr. 21 CMM souřadnicové měření [28]

2.1.1 Spínací

Pomocí tohoto systému se zadávají různé geometrické prvky součásti. Na základě snímaných bodů můžeme určovat prvky jako přímka, rovina, válcový povrch apod. Pomocí těchto prvků v určité závislosti mezi sebou lze měřit rozměry dané součásti. Při dotyku sondy na obrobku se vytváří spínací signál, jenž vykonává pohyb ve všech osách souřadnicového systému x, y, z. Vždy přijíždí k povrchu, po dotyku vyjíždí do bezpečné vzdálenosti a poté se přemístí na další místo měřeného bodu. Oproti skenovacímu měření je hlavní výhodou nižší cena. Nevýhodou mohou být delší časové prodlevy mezi měřenými součástmi [19].



Obr. 22 Spínací hlava [19]

Za pomoci rozpínacích systémů utváří sonda při dotyku signál. Rozpínací systém je utvořen trojbodovým uložením s kuličkou nebo talířkem a při měření se měřicí element posune a signál se vůči středu rozpínacího systému přepíše do souřadného systému CMM stroje. Tento pohyb se zaznamenává buď pomocí magnetické indukce, nebo odporu. Existují také sondy tenzometrické. Měření touto sondou je velmi náchylné na pracovní prostředí stroje. Mastnota kuličky, velikost přísuvné síly, pozice dřívku apod. vytváří nepřesnosti při měření. Výhodou je rychlá vyměnitelnost a vyrábí se různé velikosti spínacích elementů pro tvarově různé součásti [19].

2.1.2 Skenovací

Dotykové skenovací stroje fungují na bázi nepřerušeno doteku sondy s materiálem. Při pohybu sonda skenuje až 10000 bodů za sekundu a vyhodnocuje přesnou trajektorii povrchu součásti. Přesnost a rychlost pohybu v praxi se určuje podle povrchu součásti, u zakřivených ploch se jede pomaleji a zadává se více bodů než u lineárních povrchů. Tyto sondy jsou cenově náročnější i z důvodu potřeby algoritmů na převod složitějších dat než u spínacích strojů. Potřebují také zásobník kvůli složitosti měření. Obvykle nestačí jedna konfigurace sondy pro všechny jejich typy. Díky těmto zásobníkům se dosahuje větší flexibility stroje, kratším časům měření a tím i zvýšení efektivity [19][20].



Obr. 23 Snímací hlava [20]

2.2 Bezdotykové snímací systémy

Bezdotykové snímací systémy jsou další kategorií snímacích systémů. Místo užívání dotyku sondy využívají různé typy světleného záření, které zaznamenávají geometrii objektu do přístroje CMM. Měření probíhá na bázi triangulace, a to tzv. buď zadáváním bodů, nebo linií na objektu, z kterých se vyhodnocuje následný rozměr objektu. Nahrazují především dotykové snímací systémy v situacích, kdy není potřeba odbornosti obsluhy, neboť měření se vyhodnocuje velmi jednoduchým způsobem. Využívá se u křehkých výrobků, nemůže nastat kolize měřicího stroje s objektem. Výhody těchto zařízení naopak doprovázejí některé nedostatky. Vlastnosti obrobku týkající se odrazu, barvy a dalších optických vlastností ovlivňují výsledky měření. Stroj je náchylný i na intenzitu okolního osvětlení a snímáním vzniká větší nejistota měření [21].

2.2.1 Pruhová projekce

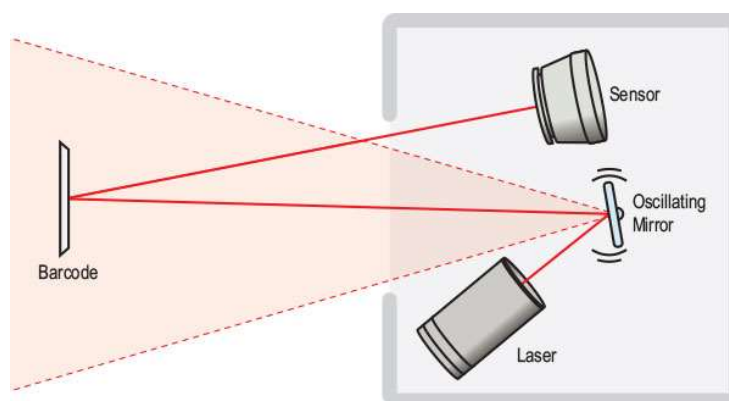
Jedním z typů bezdotykových systémů je pruhová projekce, která se využívá v průmyslových i neprůmyslových odvětvích. Systém nabízí dobrou mechanickou a tepelnou stabilitu. Řízením barev a intenzity záření lze měření přizpůsobit optickým vlastnostem materiálu. Promítáním světelných pruhů na objekt se definují rozměrové a tvarové vlastnosti objektu, které následně zpracovávají v současné době 1–2 digitálními kamery. Parametry, které jsou důležité u toho typu měření, jsou úhel a vzdálenost mezi snímacími kamerami, vzor promítání, lesklost a průhlednost povrchu. Výsledným snímáním objektu se vytváří grafický model součásti v podporujícím softwaru [21] [22].



Obr. 24 Pružová projekce [22]

2.2.2 Laser scanner

Pracuje na principu liniového laserového záření, které zaznamenává objektiv a triangulační senzor fungující jako detekce polohy laserového paprsku, do něhož je pomocí skenujících zrcadel paprsek usměrněn. Laser kopíruje tvar objektu a pomocí principu laserové jednobodové triangulace vyhodnocuje naměřená data. Existuje i dvourozměrové měření pomocí laseru, kde se komplikuje pohyb a tvar zrcadel. Dvourozměrovou linii nalezneme hlavně v mikroskopii, medicíně a kontrole materiálu. Laserové skenování se využívá i u některých 3D tiskáren nebo laserového gravírování [21] [23].



Obr. 25 Laser scanner [23]

2.2.3 Fotogrametrie

Obrazovým senzorem digitální kamera získává nejčastěji fotografické snímky, z kterých se následně pomocí softwaru zpracovávají informace o daném objektu v podobě tvarů, rozměrů i polohy zkoumaného objektu. Fotografie se slučují pomocí podobnosti mezi nimi a dávají dohromady měřenou součást. Snímky musí být snímány z různých poloh v prostoru, aby docházelo k přesnému



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

určení souřadnic prostorových bodů na objektu. Tato metoda dokáže měřit s velkou přesností srovnatelnou s dotykovými snímacími systémy. Díky této metodě nejsme limitováni velikostí pracovního prostředí, neboť snímáme z fotografií libovolně velký objekt. Existují tři druhy fotogrammetrie. Nazývají se univerzální, kombinované a integrované [21].



Obr. 26 Zařízení fotogrammetrie [24]

2.2.4 Kamerové systémy

Kamerový systém je optické zařízení obvykle menších rozměrů pro projektování dané součásti do snímku, který se převede do počítače, následně se měří stanovené rozměry, případně porovnávají se námi předem zadané tolerance. Užívá se telecentrický objektiv a s kombinací horního a zadního osvitu utváří velmi přesnou dvourozměrnou projekci součásti.

Vyhodnocení měření se dá provádět několika způsoby. Nejjednodušším způsobem bývá vybrání křivky povrchu a následně vyhodnocení daného rozměru. Dalším způsobem je zadání bodů na daných křivkách a z nich získání požadovaných rozměrů. Za poslední dobu se rozšiřuje způsob vyhodnocení pomocí softwaru [13] [21].



Obr. 27 Keyence IM 7000 s řídicí jednotkou [27]

Z hlediska historie to byli strojní inženýři Russel Williams Porter a James Harter, kteří vytvořili první komerční kamerový systém pro svoji firmu Jones and Lamson Machine Company. Tím se zahájil vývoj a zlepšování této technologie [21].

Nejvíce se tyto systémy využívají i pro komplexnější tvary, například ozubení a závity, avšak nejběžněji na porovnání zakřivení povrchů mezi díly. Tyto systémy se nejvíce používají v letadlovém průmyslu, ale i u zařízení, jako jsou mechanické hodinky a elektronika [21].

Projektovat obraz lze buď ve vertikálním, nebo horizontálním směru. Lze nastavit velikost obrazu projektování u většiny moderních zařízení. Vertikální je častější případ, který je vhodný hlavně pro ploché a malé součásti. Horizontální poloha snímače se obvykle vyrábí ve větších velikostech, kterých se porovnávají součásti těžkého průmyslu, velké hřídelové součásti a skříně strojů. V dnešní době je většina částí univerzální a lze systém přizpůsobit našim individuálním potřebám pomocí jiných typů částí měřicího stroje [21].



3 Problematika optických metod měření v hromadné výrobě

Pro výrobu vysoce kvalitních dílů v předepsané lhůtě výroby je výzvou z hlediska dodržení produktivity výrobních linek a procesů v hromadné výrobě. Optimálně by kontrola kvality dílů neměla snižovat výrobní rychlost a měla by zároveň kontrolovat díly rychle a přesně. Kontrola dílu by se měla zahrnout do komplexního procesu výroby co nejlépe, aby se dosahovalo co nejmenší odchylky a požadované tolerance. Proto jsou přesná a rychlá měřicí zařízení velmi důležitým faktorem pro kontrolu dílů, aniž by hodně prodlužovala výrobní proces součástí.

3.1 Překážky vývoje měřicích přístrojů v hromadné výrobě

Při používání optických zařízení nalezneme spoustu překážek, které musíme překonat pro kvalitní měření součástí. Dělíme tyto překážky do 5 kategorií: metoda, rychlost, obtížnost sjednocení výrobního systému a kontroly, sledovatelnost a inteligence (Myšleno jako dovednost zařízení dělat rozhodnutí na bázi předchozích měření). Každopádně se řeší spousta dalších bariér při měření, může to být to, jak moc kontrolu měření ovlivní hektičností (hluk, vibrace, teplota, změny tlaku) prostředí.

Metoda je určena právě těmito limitacemi měření. Například limitace může být i v tvorbě obrazu kvůli rozlišení. Numerická aparatura, omezená plocha měření a okolní osvětlení limitují měření také. Rychlostí se nemyslí jen rychlost měření, ale i rychlost dodání kusu pro měření a zprostředkování vyhodnocených dat.

Z hlediska rychlosti představuje největší problém dodržet čas výrobního cyklu součástí. Obvykle se při optickém měření ztrácí čas kvůli velkému objemu snímaných obrazů a zpracování objemného množství dat. Čas měření může tudíž trvat déle než minutu. U řady výrobních procesů by byl takový proces vhodný v řádech sekund.

Dalším problémem může být otázka, jak implementovat dané zařízení do výrobního procesu. Prostředí měření, požadavek na robustnost zařízení, vibrace apod. negativně ovlivňují proces měření. Kalibrování a schvalování výkonu měření je další časovou ztrátou. Z hlediska procesů se analyzují odchylky správnosti měření [25].



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

V dnešní době se kvůli efektivitě vytváří větší nátlak na procesy s umělou inteligencí. Některá optická zařízení tento trend podporují více, některá méně. Umělá inteligence potřebuje obrovské množství dat pro zpracování, ale na druhou stranu zkracuje ztrátové časy při různých úkonech. Mnoho současných zařízení podporovaných umělou inteligencí ještě není otestovaných a jejich užití u řady částí procesů nemusí být zcela objasněné.

3.2 Metodika měření

Bezdotykové snímací systémy se aplikují především u výrobních procesů, kde je velký nátlak na co největší efektivitu a snížení procesních časů. Je řada kontrolních aplikací v různých úsecích výroby, kde tato zařízení lze využít. V důsledku se zvyšuje účinnost výroby a snižují se náklady. Šetří se finance i kvůli menším požadavkům na školení pracovní síly a omezuje se počet chyb vytvořených při měření díky automatickým metodám měření. Snižuje se vliv zkušenosti obsluhy pro vytváření měřených chyb. Zařízení lze aplikovat na různé spektrum použití pro kontrolu dílů běžně obrobených, lisovaných nebo vystřikovaných plastů.

Kontrola prototypů a prvních obrobených dílů – V této fázi se daný díl změří a následně testuje. Optické zařízení od firmy ZEISS i Keyence zajišťují, že měření závisí minimálně na zkušenostech kontrolora. Nominální hodnoty a vyhodnocení měření vycházející ze sledovatelnosti se udává mezinárodními normami [26].

Procesní kontrola vzorků a dílů – U procesů, kde se využívá více automatizace, jsou velmi důležité co nejkratší časy. Moderní bezdotykové systémy dokáží tyto časy zkrátit a zefektivnit automatizované procesy. Už při tvorbě procesů se zkracují doby nastavování a optimalizace systému. Při chodu procesu se následně zvyšuje vytiženost díky přesnosti nastavení zařízení. Kontrolu nemusí provádět jen původní programátor zařízení, ale může ji provádět i jakýkoliv operátor, to v důsledku snižuje pracovní zatížení kvalifikovaného oddělení řízení jakosti. Tato zařízení zajišťují i správu a dokumentaci [26].



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce



Obr. 28 Procesní kontrola a kontrola prototypů [26]

Kontroly před expedicí – Krátké dodací lhůty jsou dalším důležitým faktorem, který šetří náklady a zvyšuje výnosnost procesu. Především se zkracuje potřebná práce k tvorbě protokolů a zpráv měření [26].

Vstupní kontroly – Díky normalizaci měření lze provádět vstupní přejímání polotovarů v kratších časech. Bezdotykové měření podporuje i snížení počtu vad při větším počtu kontrol. Počet rozměrů má malý vliv na čas měření, proto měření zajišťuje vyšší kvalitu [26].



Obr. 29 Kontroly vstupní a výstupní [26]

3.2.1 Zapisování dat

V předchozí kapitole jsem uváděl, že i nastavení správy dat ovlivňuje efektivitu měření a velikost nákladů procesů. Správa dat u těchto kamerových systémů se zrychluje a zefektivňuje několika způsoby.

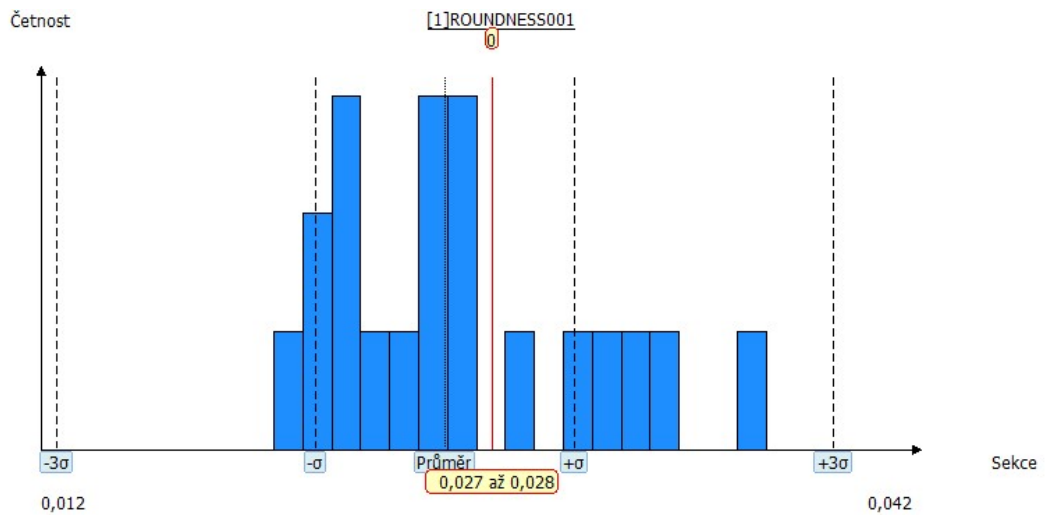
Automaticky vypočítává a zobrazuje důležité statistické hodnoty. Přístroje i bez vyhodnocovacího protokolu barevně signalizují chybnost rozměru. Zelená barva znamená, že rozměr je v pořádku, žlutá znamená, že se blíží k hranici povolené tolerance, a červená znamená, že měřený rozměr je mimo definované toleranční pole. Měřené hodnoty se zpracují v detailním zápisu programu.



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Zapíše maximální a minimální výchylky naměřených bodů a hodnot, jejich průměr, 3sigma, 6sigma, sigma, CP a CPK. Lze spravovat data způsobilosti procesů z hlediska šarže.

Okamžité zpracování dat se pomocí funkcí softwarů Keyence utváří do vývojových grafů a histogramů. Pomocí těchto grafů se provádí ověřování trendu a odchylky [26].



Obr. 30 Histogram kruhovitosti



4 Tvorba plánu měření a vyhodnocení získaných dat

V této části práce je cílem analyzovat a porovnat jednotlivé funkce optických zařízení. Zhodnotit, jestli katalogové parametry (chyba měření, opakovatelnost) opravdu dodržují. Měření probíhá na kamerových systémech Zeiss O-select a Keyence IM-7000. Pro měření bude využito 6 tvarově různých součástí. Na základě výsledků v závěru bude zhodnocena jejich aplikovatelnost v průmyslovém odvětví.

4.1 Měřicí přístroje pro vyhodnocení měření

4.1.1 O-select

Zeiss Industrial Metrology se specializuje na vysoce přesné měřicí systémy. Vyrábí souřadnicově koordinované měřicí přístroje (CMM), topografické měřicí stroje (nelékařské) a zaměřuje se i na optická měřicí zařízení. Vytváří si obvykle vlastní software a měřicí sensorové systémy. Snaží se zajišťovat maximální standardy kvality v odvětví, kde jsou požadavky na vysokou přesnost.

Zeiss O-Select zajišťuje jednoduché a spolehlivé měření 2D dílů. U přístrojů pro kamerové snímání lze stisknutím jednoho tlačítka vyhodnotit charakteristiky a dokumentace výsledků měření v profesionálních protokolech.

Tab. 1 Technické specifikace O-Select

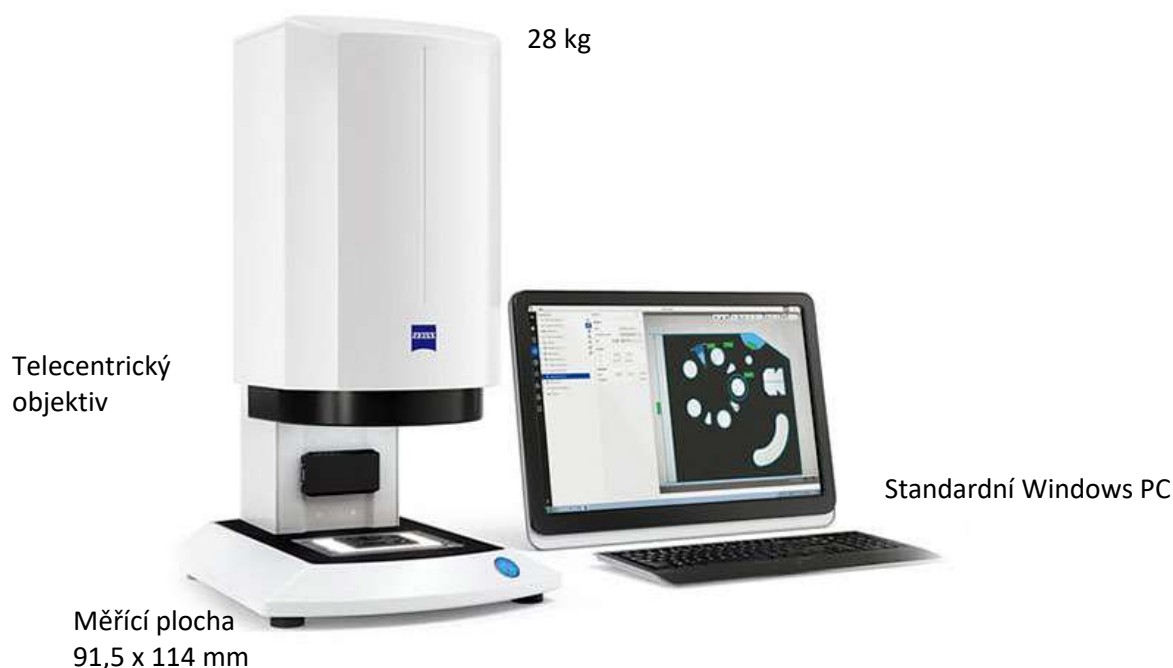
Rozsah měření		
Rozsah měření FOV/Zorné pole	114 × 91,5 mm Maximální pracovní výška: 60 mm	
S motorizovaným zvětšením měřicího pole (Externí přídatný stůl)	214 × 91,5 mm	
S koaxiálním dopadajícím světlem	107 × 55 mm	
Přesnost		
Chyba měření délky MPE podle ISO 10360-7:2011	18–22 °C	4,5 + L/100 μm
	18–26 °C	8,5 + L/100 μm
	18–30 °C	10,5 + L/100 μm
Opakovatelnost měření MPE podle ISO 10360-7:2011	0,9 μm	



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

4.1.1.1 Hardware

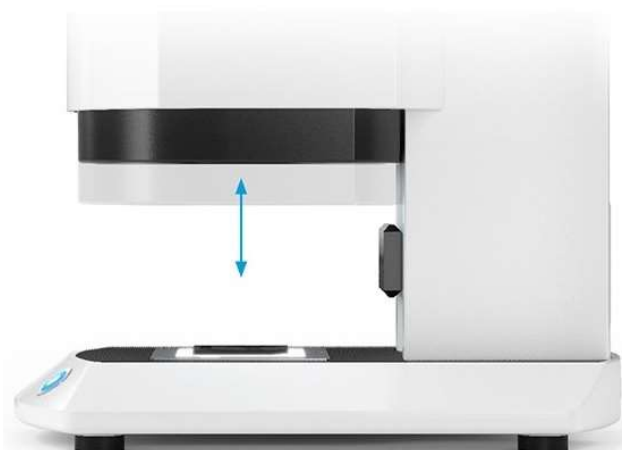
Zařízení je velmi kompaktní, lze ho umístit na pracovní stůl vedle počítače. Váží 28 kg a splňuje požadavky přesnosti podle ISO 10360-7 MPE E (μm) $4,5 + L/100$ a požadavky opakovatelnosti měření $0,9 \mu\text{m}$ podle normy ISO 10360-7. Nejlépe pracuje s počítačem typu Windows PC [27].



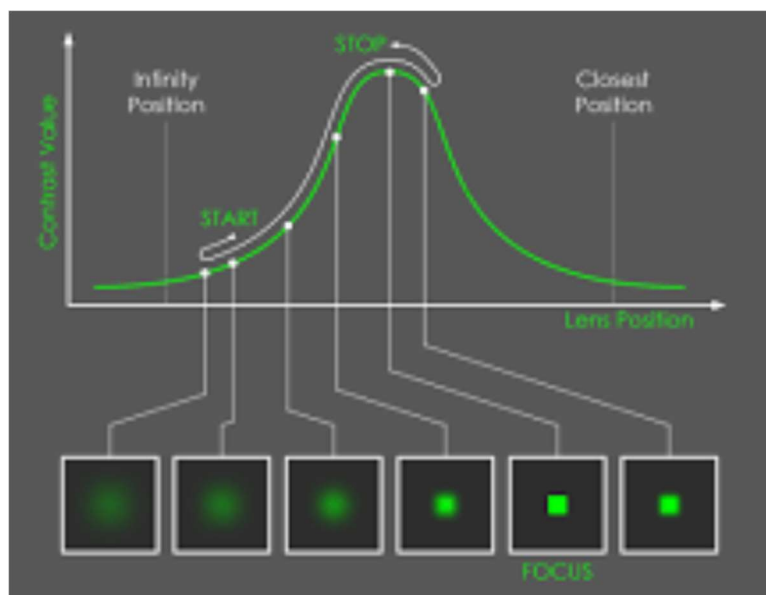
Obr. 31 Zařízení ZEISS O-Select [27]

Velikost plochy – Součást by se měla vejít do plochy měření, avšak lze vytvořit výjimku, kdy měříme jenom část součásti (Lze použít tzv. dávkové měření, avšak přesnost se snižuje, protože musíme pohybovat se součástí.). Naopak u měřeného prvku je nutno mít prvek vždy celý v měřené oblasti. Větší měřicí plochy umožňují měření více dílů najednou.

Autofocus – Focus zajišťuje přesnost měření. Je důležitý, přestože používá telecentrický objektiv. Měření potřebuje obraz, který vypadá dostatečně zaostřeně, proto má zařízení posuvnou hlavu, která se přibližuje, nebo oddaluje od součásti, aby došlo k co nejlepšímu zaostření. Tento proces je automatizovaný.



Obr. 32 Autofocus [27]



Obr. 33 Zaostření obrazu [27]

Příslušenství

O-Select Deska – Hliníkový rám se závitů po obvodu, skleněná deska odolná proti škrábancům nebo deska z plexiskla.

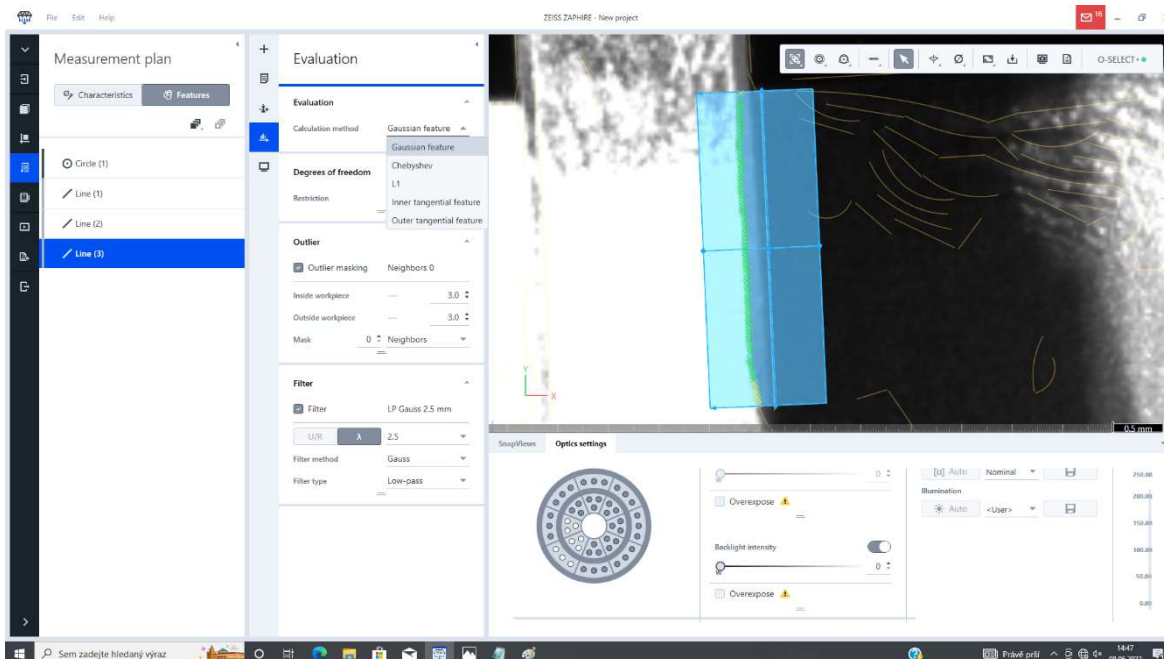
Uchycovací příslušenství – Pro rotační a nerovnoměrné součásti lze zakoupit příslušenství ve formě menších svěráků.

4.1.1.2 Software

U zařízení O-Select byl používán vlastní software **Neo-select**, ale postupně se přechází na software **ZEISS Zaphire** s relativně stejným rozhraním a funkcemi. Sériové měření po nastavení měření probíhá pomocí stisknutí jednoho tlačítka na přístroji, tudíž jsou zde nižší nároky na kvalifikaci operátora stroje. Program je velmi intuitivní a jednoduchý k porozumění.

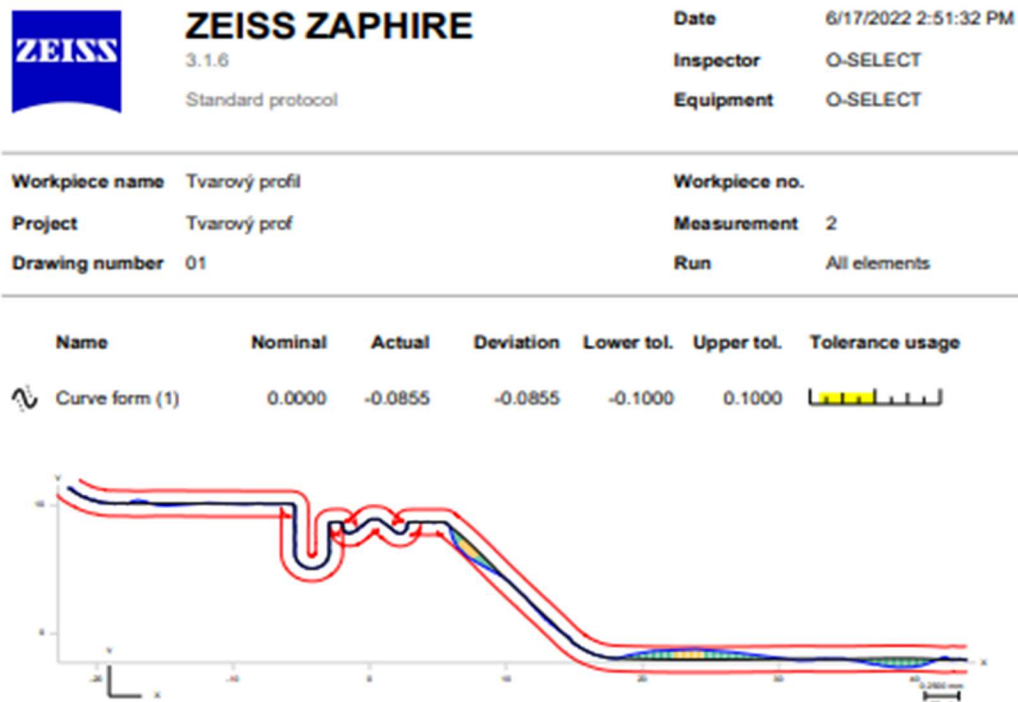


Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce



Obr. 34 Software ZEISS Zaphire

Software pracuje s prvky a následně s nimi vyhodnocuje dané rozměry. Umí vyhodnotit většinu rozměrových veličin (průměr, délka, šířka, tvar křivky) a geometrických charakteristik (kruhovitost, házení, kolmost, rovnoběžnost). Následně vše vyhodnocuje do uživatelsky upravitelných protokolů. Zaznamenává historii měření, porovnává rozměr vůči jmenovitému rozměru součásti, různé statistiky apod.



Obr. 35 Protokol vyhodnocení

Postup měření nám usnadňují různé automatické procesy, které snižují potřebu kvalifikace uživatele, snižují rychlost nastavení programu měření a ulehčují postup měření.

- **Automatická detekce součásti** – Při vložení součásti na desku software prohledá všechny uložené programy a následně navrhne ten nejvhodnější pro danou součást.
- **Automatické osvětlení** – Zajišťování maximálního kontrastu je důležité pro detekování prvků (hran) součásti.
- **Automatický focus** – Lze nastavit automatické zaostření. Není zde zapotřebí manuálního zásahu pro ostrý obraz součásti.
- **Automatická detekce prvků** – Při definování prvků lze použít a automaticky detekovat všechny hrany a okraje prvků. Uživatel už poté pouze zvolí prvky, které chce vyhodnocovat.
- **Automatická detekce charakteristiky** – Uživateli se nabídnou automaticky charakteristiky prvků, které chce vyhodnotit.

4.1.2 Keyence IM-7000

Společnost Keyence se soustředí hlavně na senzory a systémy strojního vidění. Vytváří senzory a měřicí senzory, mikroskopy, optické měřicí systémy, zařízení týkající se bezpečnosti a 3D profilometry. Vytváří si obvykle vlastní software.



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Optické měřicí systémy od společnosti Keyence se zaměřují na malé i větší součásti. Novější řada IM-8000 nemá problém pomocí otočné jednotky měřit různé tvarově složitější prvky na rotačních součástích.

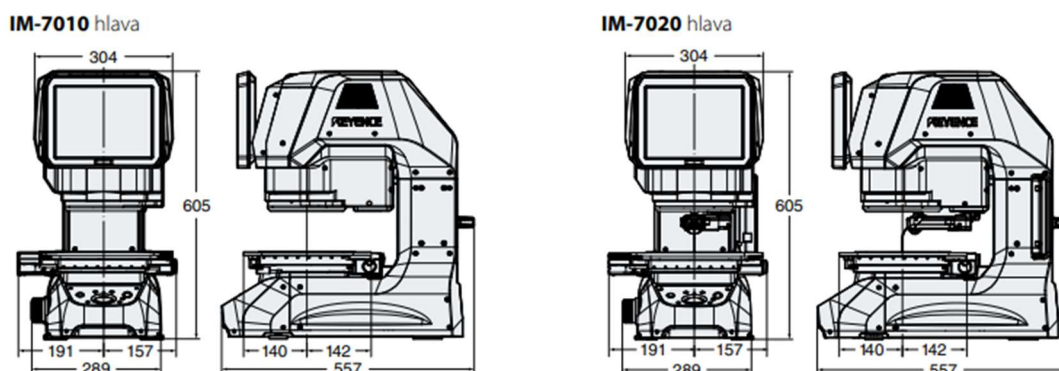
Nabízí celou řadu funkcí jako O-Select a funguje na stejném principu. Operátorovi stroje nabízí měření pouhým stisknutím jednoho tlačítka, automatické rozpoznání polohy a orientace, automatickou úpravu ostření a detekci hran [26].



Obr. 36 Zařízení Keyence IM-7000 [26]

4.1.2.1 Hardware

Firma Keyence nabízí možnost hardwarového rozšíření stroje na základě konkrétních požadavků. Z hlediska hardwaru a technických specifikací se liší napříč tříd strojů řady IM-7000. Největší změny se projevují ve velikosti stolu, typu snímací hlavy a možnosti přidání osvětlujícího prstence pro lepší zaostření snímaného objektu.



Obr. 37 Rozměrové parametry [26]

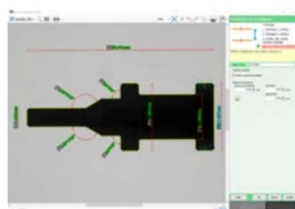


Tab. 2 Technické specifikace Keyence

Technické specifikace zařízení IM-7500 a hlavy IM-7020		
Rozsah měření		
Rozsah měření FOV/Zorné pole	200 × 200 mm (4 × R50)	
Režim s přesným měřením	125 × 125 mm	
Přesnost		
Chyba měření délky MPE podle ISO 10360-7:2011	Režim se širokým zorným polem	7 + 0,02L μm
	Režim měření s vysokou přesností	4 + 0,02L μm
Opakovatelnost měření MPE podle ISO 10360-7:2011	1 μm	

4.1.2.2 Software

Z hlediska softwaru má firma Keyence připravené různé typy modulů, které slouží pro jiný úkon měření dané součásti. IM-H2ECZ slouží jako editor nastavení měření. Modul IM-H2C podporuje možnost importu dat CAD a IM-H1T modul zajišťuje přenos dat pro vyhodnocení protokolů měření z jiných softwarů [26].



IM-H2ECZ



IM-H2C



IM-H1T

Obr. 38 Software Keyence [26]

4.2 Vyhodnocení měření běžných a komplexnějších tvarů součástí

4.2.1 Díl 1 – tvarový profil

Optické měřicí přístroje se využívají i na rychlé měření tvarových profilů, které jsou lehce popsitelné ve dvourozměrném prostředí. V tomto měření byly porovnány metody vyhodnocování tvaru křivek u daných zařízení. Následně byla zhodnocena opakovatelnost měření kruhovitosti díry.



Obr. 39 Tvarový profil

4.2.1.1 Obecné poznatky

Při definování křivky tvarového profilu mají zařízení odlišný způsob zadávání tohoto prvku. O-Select pracuje s definováním kontury prvku a pomocí příkazu pro definování vychýlení křivky lze vyhodnotit odchylku a případné nepřesnosti křivky. Keyence má přímo definovaný příkaz pro snímání a vyhodnocení křivky a uživatelsky se ze subjektivního pohledu jedná o lepší variantu. Lze použít i dxf soubor pro porovnání s nominálními hodnotami součásti, avšak v tomto případě měření bez modelu byl odhad nominálního tvaru křivky přesný.



Obr. 40 Definování křivky

Automatické zaostření probíhá daleko lépe u zařízení O-Select, přestože je zcela automatizován. U zařízení Keyence probíhá zaostření automaticky a následně může programátor obraz doostřit, avšak obraz u menších prvků je relativně dost nezaostřený.



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

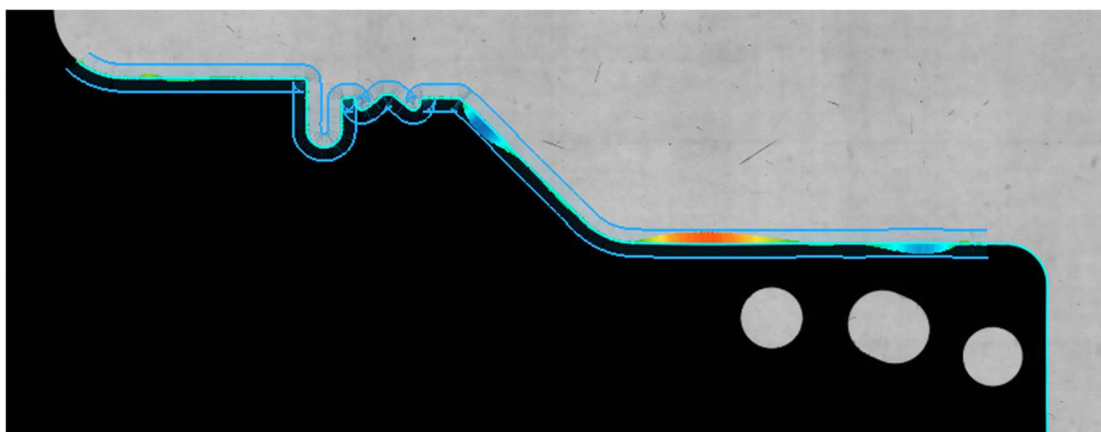
Dalším poznatkem je porovnání algoritmů z hlediska vyrovnání součásti v prostoru. O-Select potřebuje definovat i jiné prvky, kde bylo nutné zadat další prvky na obrobku, aby si dokázal při změně polohy součásti definovat její přesnou pozici. U Keyence vyrovnání tyto prvky nepotřebovalo. Stačila zde definice křivky, a i při změně polohy vyrovnání proběhlo úspěšně.

Obě zařízení dokáží rozpoznat, jestli je díl položen na zadní, nebo přední ploše. Rozpozná rozdíl mezi dílem a dílem k němu zrcadleným. To z hlediska praktického využití nabízí mnoho výhod. Operátor nemůže splést součásti a nedochází k chybným měřením.

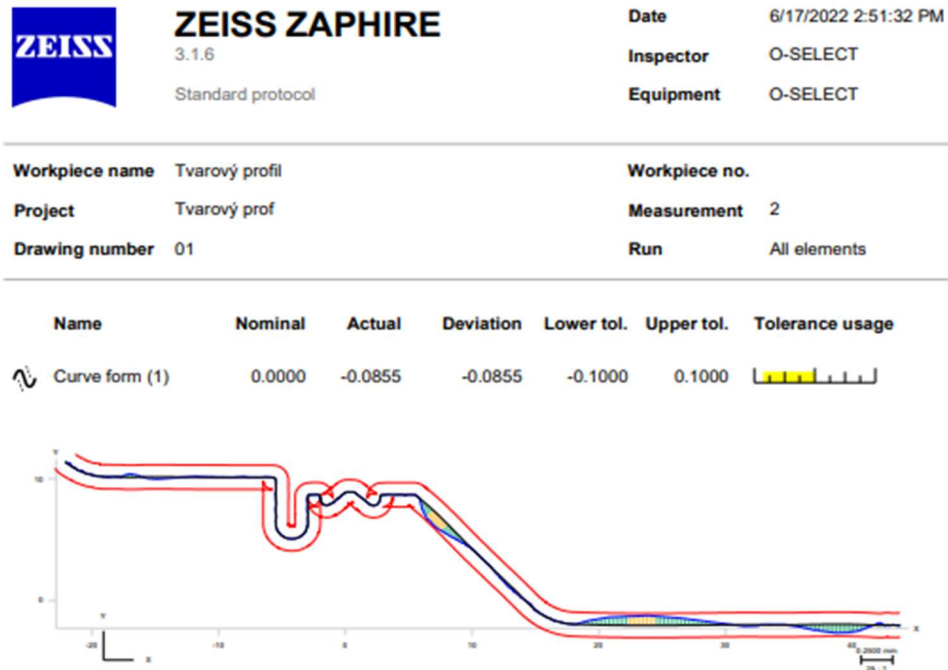
Automatická detekce programu u zařízení O-Select zrychluje nalezení programu měření ve správci souboru počítače. To zrychluje čas a efektivitu měření při hromadné pásové výrobě, neboť operátor nemusí dohledávat program ve správci souborů počítače. Zařízení Keyence IM-7000 takovou funkci nemá.

4.2.1.2 Vyhodnocení tvarového profilu

Při vyhodnocení křivky byla kontura ověřována na několika pozicích součásti a vyhodnocení se lišilo v toleranci odchylky opakovatelnosti, kterou uvádí výrobce. Největší výchylky profilu zůstaly vždy na stejném místě, tudíž docházelo ke konstantnímu měření prvku. Výsledky měření mezi oběma zařízeními byly téměř totožné.



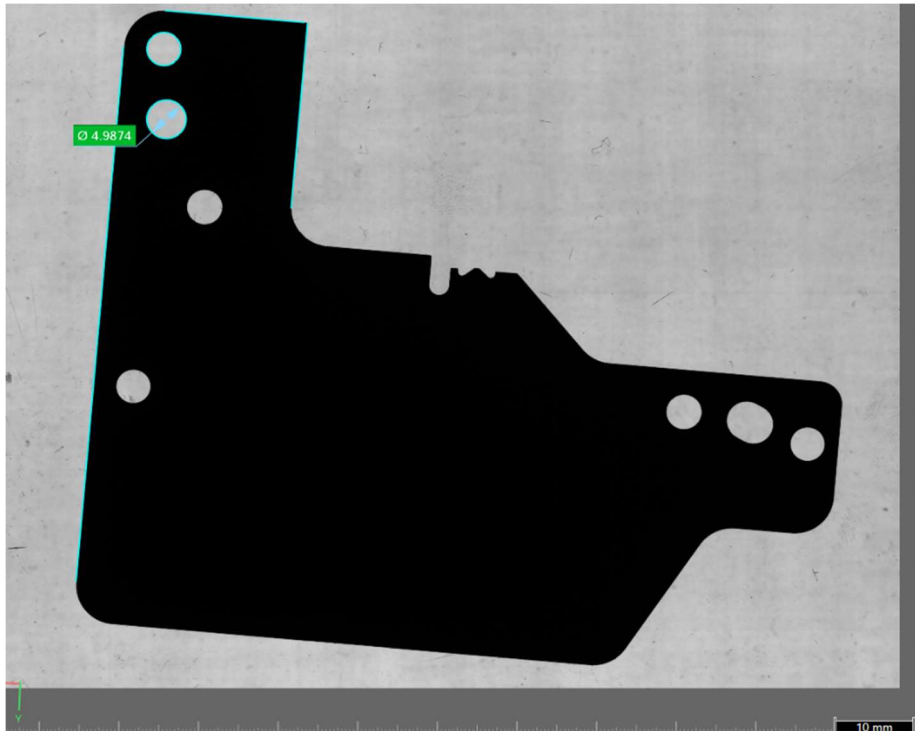
Obr. 41 Definování tvaru křivky



Obr. 42 Vyhodnocení křivky

4.2.1.3 Ověření opakovatelnosti průměru kruhovitosti

Jedním z cílů této práce je porovnání skutečnosti a hodnot, které uvádí výrobce v katalogu zařízení. U O-Select výrobce udává, že odchylka opakovatelnosti je $0,9 \mu\text{m}$ a u Keyence IM-7000 je $1 \mu\text{m}$. Důležité je vzít v potaz i přesnost měření délky a celkových rozměrů. Byla vybrána jedna díra na součásti v pozici, kde je napsán průměr díry na obrázku níže.



Obr. 43 Tvarový profil pozice díry



ZEISS ZAPHIRE

3.1.6

Table protocol

Project Tvarový prof - díra

Date

6/17/2022 3:26:04 PM

Workpiece name Tvarový kus - díra


Inspector

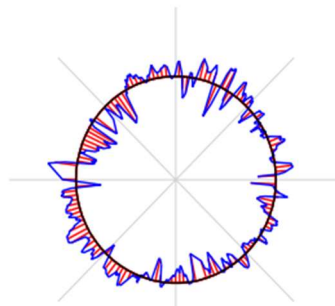
O-SELECT

Drawing number 01

Name	Nominal	Lower tol.	Upper tol.	Workpiece number									
○ Roundness (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0094	0.0096	0.0106	0.0082	0.0098	0.0102	0.0103	0.0102	0.0097	0.0100
○ Roundness (1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0099	0.0102	0.0101	0.0100	0.0095	0.0096	0.0093	0.0100	0.0106	0.0106

Obr. 44 Opakovatelnost kruhovitosti

Name	Nominal	Actual	Deviation	Lower tol.	Upper tol.	Tolerance usage
○ Roundness (1)	0.0000	0.0096	0.0096	0.0000	0.0000	 0.0096

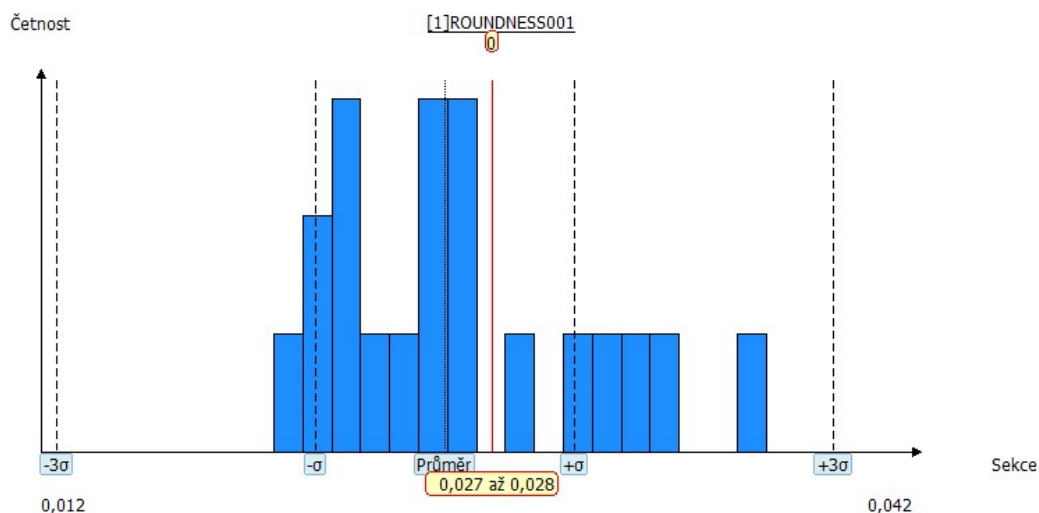


Obr. 45 Vyhodnocení kruhovitosti

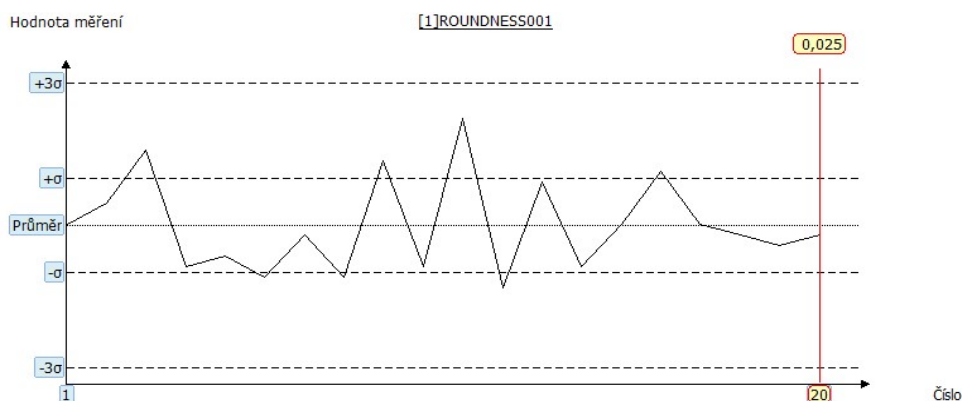


Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Průměrná hodnota tvaru vychází 0,0097 mm a dodržuje hodnotu opakovatelnosti měření, který výrobce uvádí v katalogu zařízení. Toto měření bylo nejvíce vychýleno na hodnotu maxima 0,0106, tudíž hraničně opravdu zařízení dodržuje hodnotu opakovatelnosti.



Obr. 46 Histogram kruhovitosti



Obr. 47 Odchytky výsledků kruhovitosti

Keyence IM-7000 – viz grafy vyhodnoceného měření nad tímto textem udávají průměrnou hodnotu měření mezi 0,027 až 0,028 mm. Podle tohoto grafu určitě došlo k nedodržení tolerance opakovatelnosti měření. Zařízení má dokonce velmi odlišnou průměrnou hodnotu kruhovitosti oproti zařízení O-Select, zde může mít velký vliv zkušenost programátora, ostrost obrazu zařízení a větší opotřebení stroje.

4.2.2 Díl 2 – Malá součást s drážkou

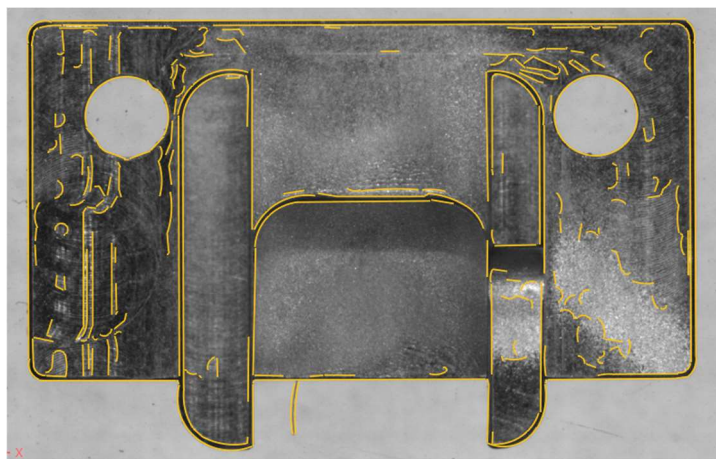
Další otázkou měření je, jestli zařízení dokážou měřit i v přechodových místech součásti. Takovýmto místem může být hrana drážky, která se nachází blízko zaoblení. Hrany, které splývají s povrchem součásti, může být pro dané zařízení obtížné zachytit.



Obr. 48 Součást s drážkou

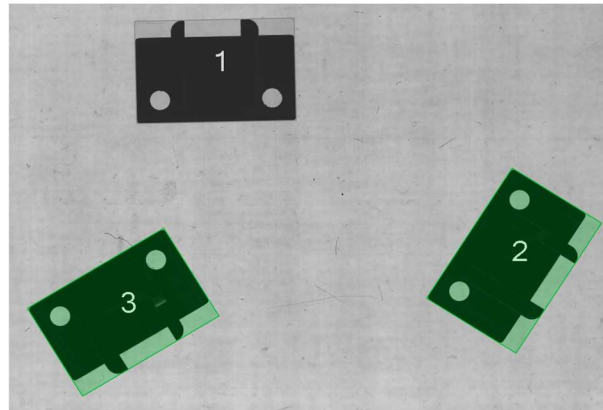
4.2.2.1 Obecné poznatky

Kamerové systémy podporují změnu intenzity spodního a horního osvětlení. To umožňuje zařízením měřit hrany, které nejsou jen na krajích součástí, ale i blíže ke středu v jiné výšce součástí. Pro každý prvek na součásti se typ osvětlení zařízení nastavuje zvlášť. Pro nejpřesnější měření je nejlepší možnost základní, kde je aplikováno pouze spodního osvětlení, protože vytváří nejlepší kontrast černé a bílé. Ověření této funkce bude následovat u samotného měření. Je důležité si uvědomit, že programátor vytváří program měření pro součást daného povrchu, pokud budou tvarově stejné součásti jiného povrchu, nemusí mít zařízení optimální nastavení osvětlení.



Obr. 49 Automatická detekce prvků

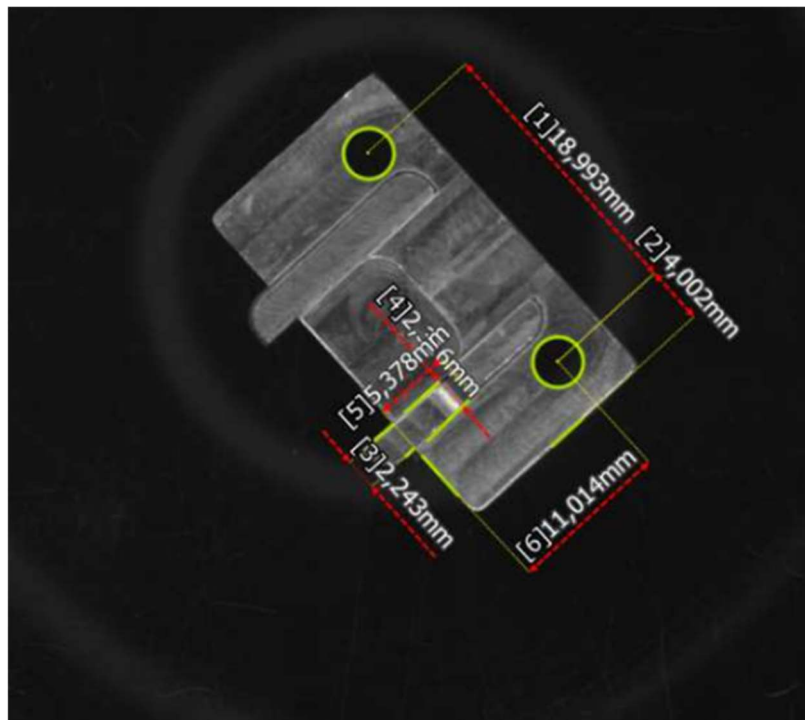
Zařízení umí měřit více součástí najednou. O-Select umí měřit součásti stejného tvaru v různých polohách. Keyence nabízí možnost měřit tvarově odlišné součásti najednou.



Obr. 50 Měření více kusů

4.2.2.2 Ověření přesnosti měření s horním osvitem

Zařízení dokáže manuálně i automaticky měnit osvit a tím si přizpůsobit viditelnost hran na součásti. Výrobci uvádí přesnost měření u zařízení O-Select 4,5 + L/100 μm a u Keyence 7 + L/100 μm . V následujícím měření budou porovnány naměřené rozměry mezi sebou a to, jak moc se od sebe odchylují.



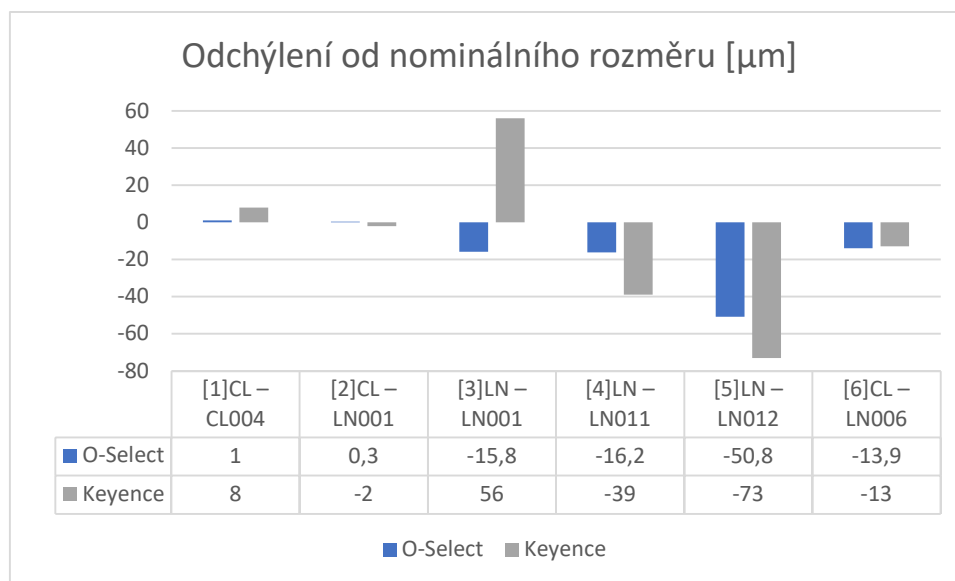
Obr. 51 Definice prvků malé součásti



Tab. 3 Porovnání malé součásti s drážkou

Název položky	[1]CL – CL004	[2]CL – LN001	[3]LN – LN001	[4]LN – LN011	[5]LN – LN012	[6]CL – LN006
Kyence	18,992	4,002	2,244	2,339	5,373	11,013
O-select	18,999	3,9997	2,3158	2,3162	5,3508	11,0139
Nominální h.	19,000	4,000	2,300	2,300	5,300	11,000

Graf 1 Odchýlení od nominální hodnoty u malé drážky

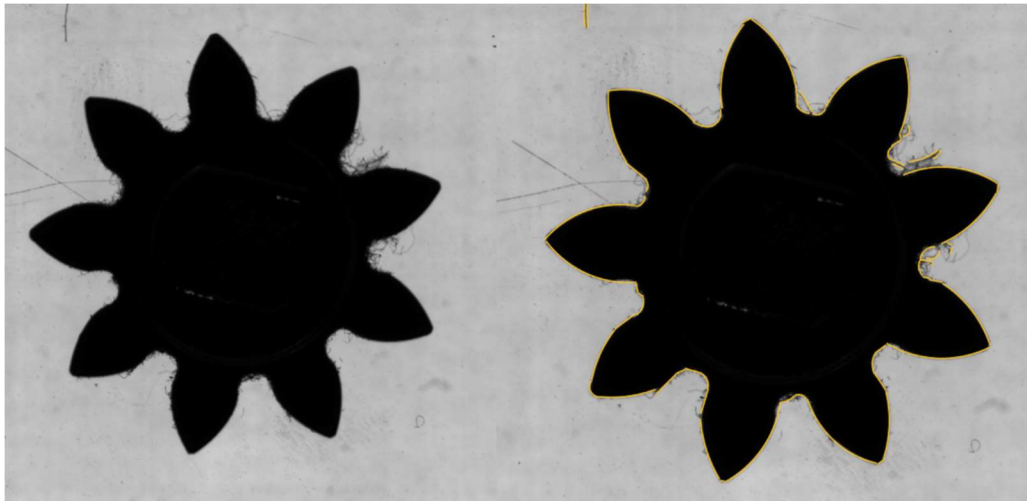


Dané naměřené hodnoty byly zpracovány do této krátké tabulky. Je z nich patrné, že u prvků 1, 2 a 6, které jsou spíše mezi krajními hranami, nedošlo k příliš odlišným výsledkům. Jedná se o odchýlení, které je v rámci měření chyby uvedené v katalogu výrobce. Opačně u prvků 3, 4, 5, které jsou umístěné tak, že se překrývají s povrchem, se můžou vytvořit nepřesnosti měření daleko častěji. Odchylky a výsledky těchto rozměrů se liší až v řádech 0,05 mm. Nemusí se jednat přímo o chybu měření, protože přímo výrobce uvádí, že měřené součásti musí být dvourozměrné a promítaný obraz při různých výškách prvků nemusí být vždy přesný. Definice měřených prvků je těžké zaznamenat. Z tohoto měření se blíže k nominální hodnotě přiblížilo zařízení O-Select, kde vůči nominálním hodnotám se liší pouze o 0,01 mm u prvků 3 a 4. U prvku 5, kde je veliká tolerance na odchýlení kvůli zaoblení, se jedná o odchýlení 0,05 mm.

4.2.3 Díl 3 – Ozubené kolo a součást složitá pro uchopení

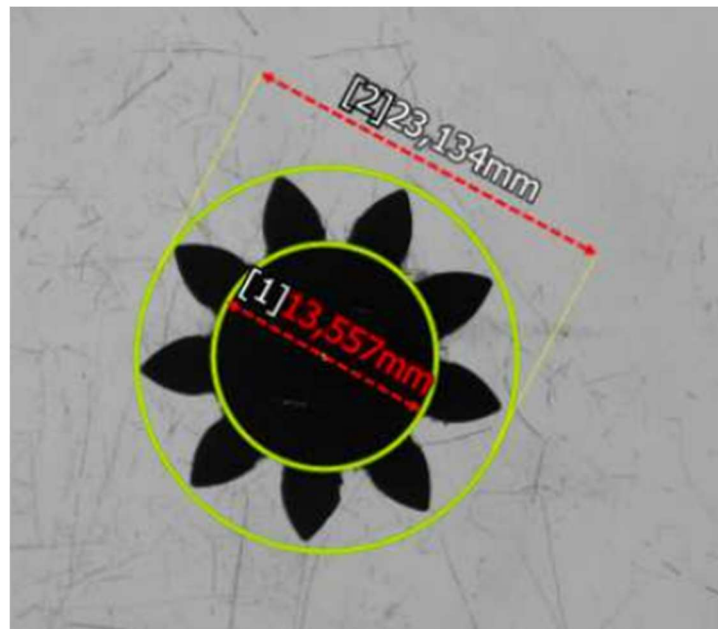
4.2.3.1 Obecné poznatky

U měření ozubeného kola je z fotografií níže patrné, že automatická detekce hran nefunguje správně u součásti, u kterých se vyskytují velké nečistoty. Snímání kontury ozubeného kola v tomto případě není možné. Součást se musí očistit.



Obr. 52 Nečistoty součásti

Z hlediska vyhodnocení patní a hlavové kružnice ozubení jsou postupy odlišné. U zařízení O-Select se hlavová kružnice manuálně prolne minimálně přes 3 vrchní body a patní kružnice se protne přes 3 spodní body ozubení. U zařízení Keyence přímo existuje funkce pro měření ozubení. Díky tomu se přizpůsobí typ osvětlení a detekce hran, protože rovnou pracuje s tvarem ozubení.



Obr. 53 Definice hlavové a patové kružnice

Tato součást je příkladem nevhodného tvaru pro měření. Povrch této součásti není rovinný, tudíž po položení součásti na měřicí desku a nasnímání obrazu vzniká zkreslení. Pro součásti tohoto typu se musí použít uchycovací zařízení např. svěrák.



Obr. 54 Nepřesnosti měření při špatném uchopení

4.2.4 Díl 4 – Hřídel se závitem

Výrobci obou zařízení uvádí, že tvarově složitější prvky a rotační díly nemusí být přímo ideální pro měření těmito zařízeními. Dále uvádí, že existují kamerové systémy, které dokáží měřit prvky trojrozměrné, např. O-Inspect od firmy Zeiss.

Uchycení je zajištěno pomocí plastické hmoty na skleněnou desku. Avšak nejideálnějším způsobem uchycení je svěrák pro dobrou tuhost uchycení součásti.



Obr. 55 Hřídel se závitem

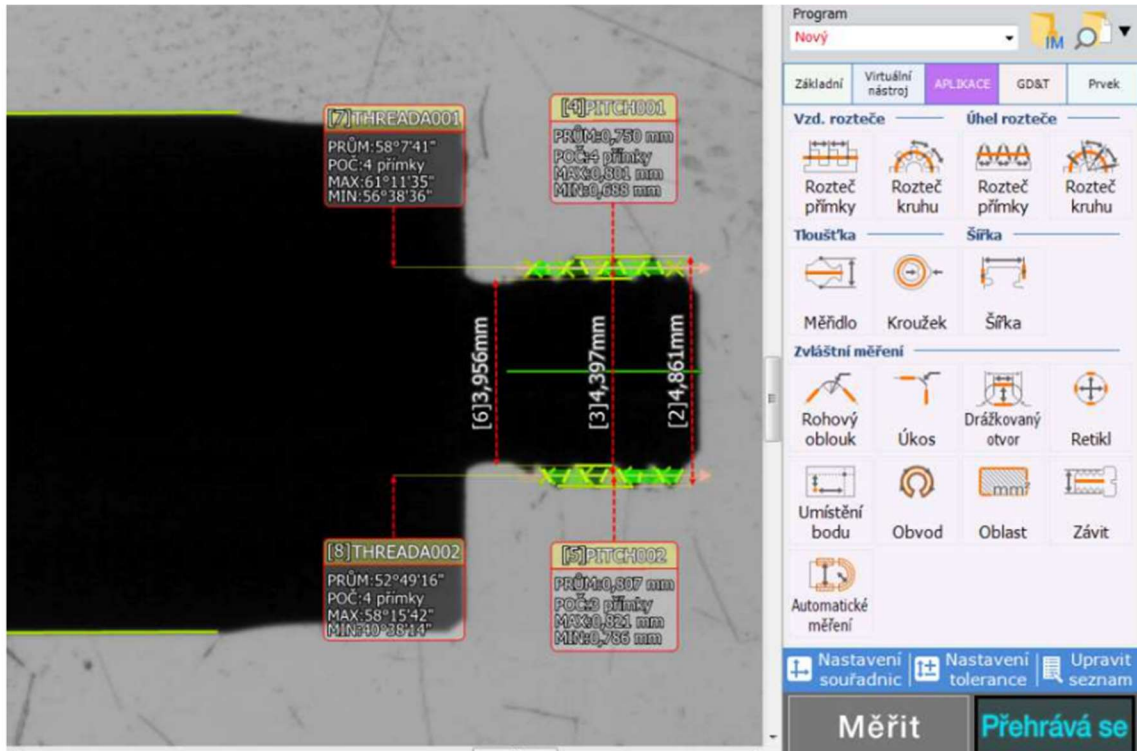
4.2.4.1 Snímání rotačního a složitého tvarové prvku

Cílem této části je porovnat spolehlivost měření tvarově složitějších prvků. Zaměřuje se konkrétně na závit na hřídeli. Závit se v zařízení O-Select dá definovat pomocí propojení vrcholů závitu proložení úsečky pro měření vnějšího průměru a propojení spodních míst závitů pro měření vnitřního průměru závitu. Keyence má svůj vlastní algoritmus, kterým stačí určit oblast, kde se závit

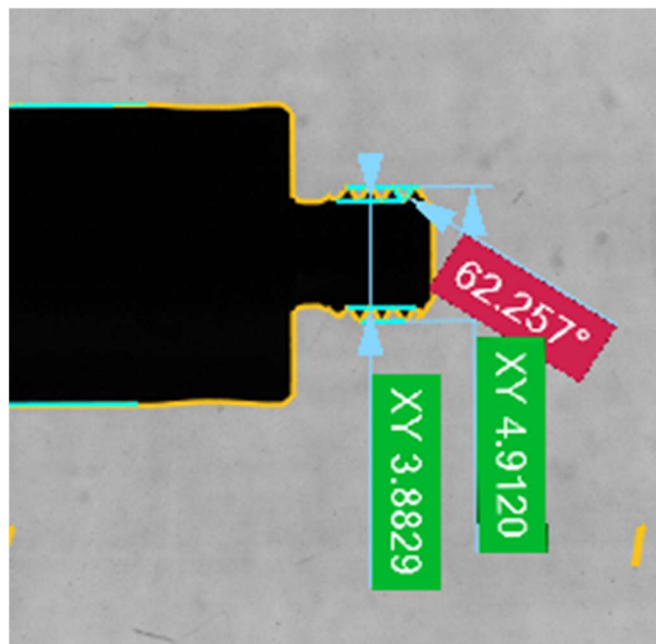


Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

nachází a vyhodnocení proběhne automaticky. Keyence má spoustu dalších definic různých tvarových prvků oproti O-Select, kde se prvky dají definovat všeobecněji prokládáním kružnic, bodů a průmek.



Obr. 56 Keyence detekce závitu



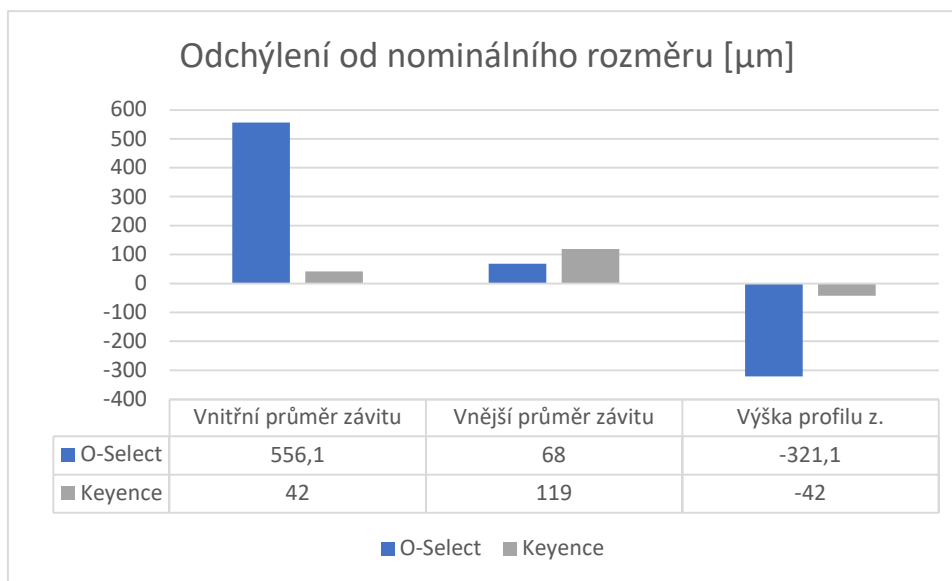
Obr. 57 O-Select detekce závitu



Tab. 4 Porovnání rozměrů závitu

Název položky	Vnitřní průměr z. [mm]	Vnější průměr z. [mm]	Úhel závitu	Výška profilu z. [mm]
Keyence	4,397	4,861	58,10°	0,75
O-select	3,8829	4,912	62,257°	1,0291
Nominální h.	4,439	4,98	60°	0,708

Graf 2 Odchýlení od nominální hodnoty u závitu



Z tabulky je patrné, že měření pomocí zařízení Keyence je přesnější. Je to z toho důvodu, že při prokládání přímek ručním zadáváním u zařízení O-Select nemusí být prvek přesně nastavený. Zde hraje roli kvalifikace a zkušenost programátora, aby měření dokázal vyhodnotit co nejpřesněji. Další výhodou u zařízení Keyence je, že opakující se prvky, např. úhel záběru závitu, se měří ve všech místech závitu a vytváří aritmetický průměr naměřených hodnot. U zařízení O-Select by bylo takové definování příliš pracné.

Cílem této části práce bylo ověřit schopnost měření rozměrů rotačního dílu. Je zvolen nulový horní osvit pro zachování největšího kontrastu. Vyhodnocuje se průměr hřídele a následně se porovná s rozměrem, který uvádí posuvné měřítko. Hodnota naměřená posuvným měřítkem je 11 mm.

Tab. 5 Porovnání průměr hřídele

	Nominální h. [mm]	O-Select [mm]	Keyence [mm]
Průměr hřídele	11	10,91	10,998



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

U toho měření se zařízení Keyence přiblížilo k nominální hodnotě v toleranci chyby měření, kterou má uvedenou v katalogu výrobce. Oproti tomu zařízení O-Select je vychýleno od nominální hodnoty o celých 0,09 mm. Jedná se o aritmetický průměr 5 měření. Vliv na měření má tuhost uchopení. Zařízení si nemusí zcela poradit s uchopením součásti pomocí plastické hmoty. Můžou nastat nepřesnosti z hlediska nepatrného sklonu součásti.

4.2.5 Díl 5 – Koncová měrka

Dalším měření se zabývá šířkou koncové měrky. Tyto rozměry jsou opravdu přesné, tudíž vzniklé výrobní odchylky budou minimální. Katalog uvádí, že přesnost opakovatelnosti měření MPE podle ISO 10360-7:2011 je 0,9 μm . V tomto měření měníme polohu měrky na desce a vyhodnotí se 20 těchto rozměrů. Nominální rozměr šířky měrky je 21 mm. Reference měření je vytvořena pomocí CMM souřadnicového stroje Zeiss Prismo s aktivním snímacím systémem Vast. Referenční šířka měrky je 21,0027 mm



Obr. 58 Koncová měrka

4.2.5.1 Ověření opakovatelnosti měření u měřicího nástroje

Tab. 6 Hodnoty šířky měrky

Šířka měrky Keyence	21,011	21,01	21,011	21,012	21,012
	21,012	21,012	21,013	21,013	21,011
	21,012	21,009	21,011	21,012	21,011
	21,012	21,015	21,014	21,014	21,013

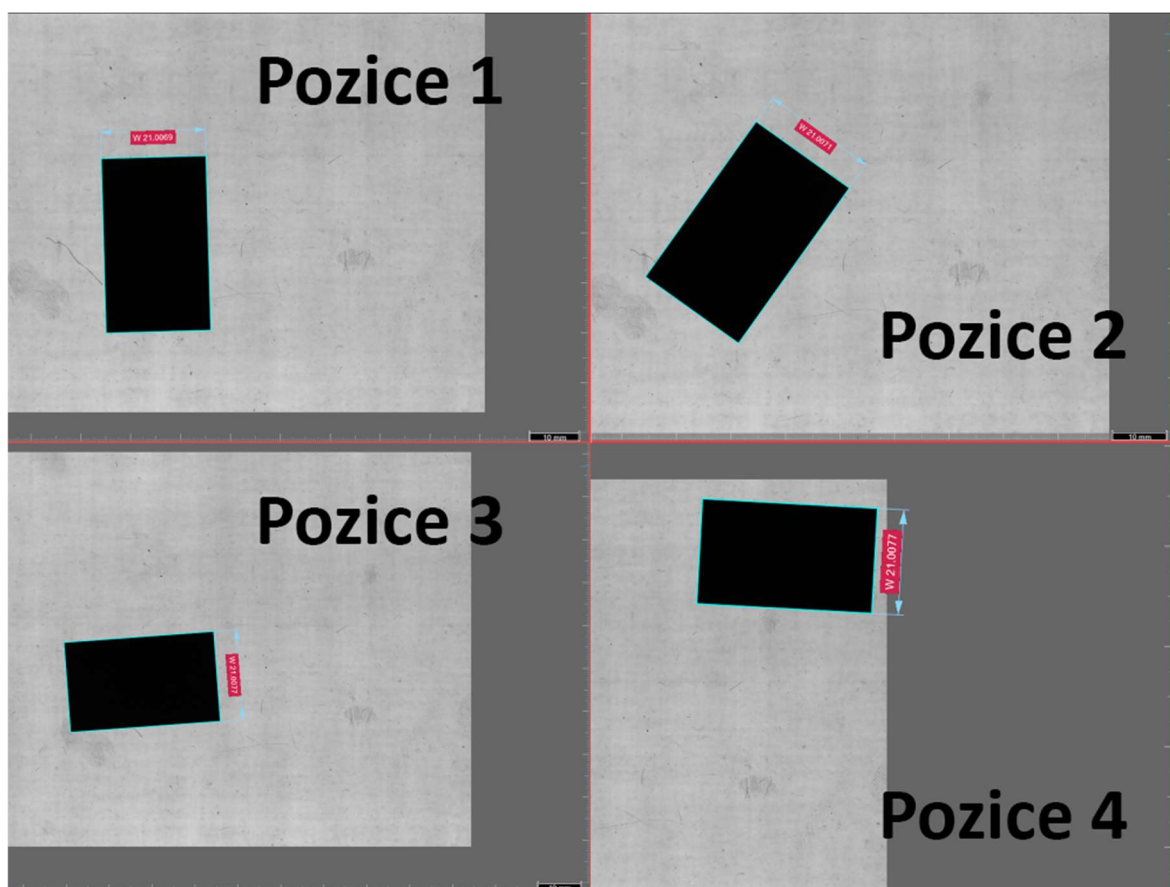


ZEISS ZAPHIRE
3.1.6
Table protocol

Project Koncova-merka
Date 6/15/2022 4:26:10 PM
Workpiece name Koncová měrka
Inspector O-SELECT
Drawing number 01
Measurements Last 10 measurements

		Workpiece number												
	Width (1)	21.0000	-0.0010	0.0010	21.0065	21.0072	21.0070	21.0076	21.0082	21.0079	21.0063	21.0062	21.0075	21.0070
	Width (1)	21.0000	-0.0010	0.0010	21.0065	21.0072	21.0070	21.0076	21.0082	21.0079	21.0063	21.0062	21.0075	21.0070

Obr. 59 Umístění koncové měrky



Obr. 60 Opakovatelnost šířky měrky

Z naměřených hodnot je patrné, že zařízení O-Select se blíží více k nominální hodnotě součásti. Výrobní tolerance koncové měrky podle normy ISO 3650 je $0,06 \mu\text{m}$ a podle katalogu měření výrobce je chyba měření $4,5 + L/100 \mu\text{m}$. Tudíž ani zařízení O-Select se neblíží k nominální hodnotě přibližně o celé $2 \mu\text{m}$. Zařízení Keyence nedodrжуje přesnost měření v řádech desítek μm .

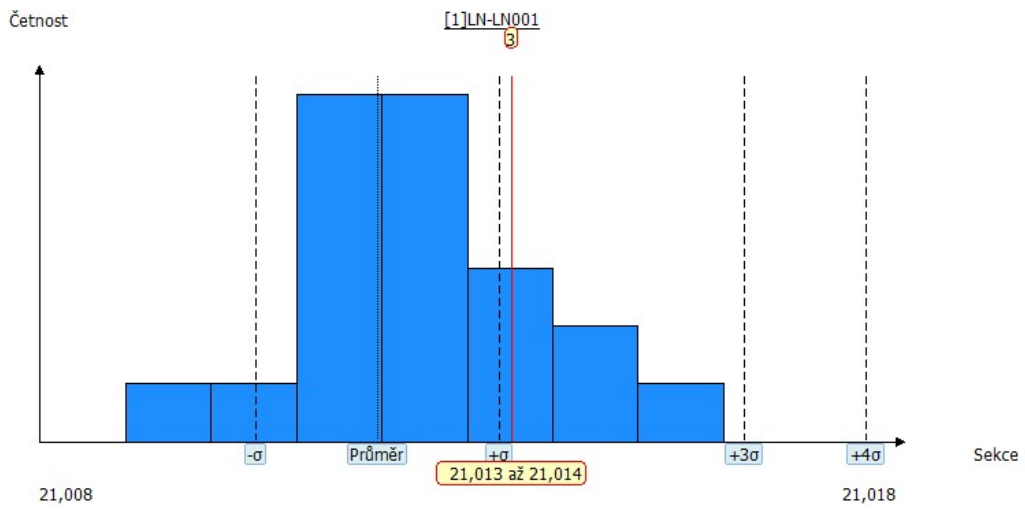
Tab. 7 Hodnoty měrky a data způsobilosti

Průměr	Rozsah	6σ	3σ	σ	CP	CPK
21,012	0,006	0,008591	0,005727	0,004295	23,28101	20,49893

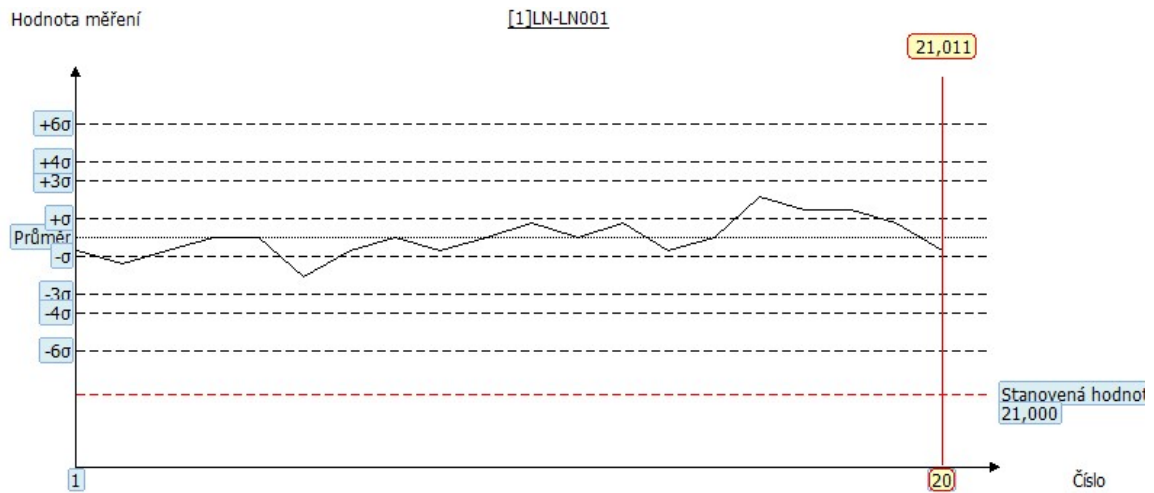
Z hlediska opakovatelnosti měření dodrжуje odchylka u zařízení Keyence maximální vychýlení naměřeného rozměru do $0,9 \mu\text{m}$. Zařízení Keyence chybu opakovatelnosti překračuje až o 300 % oproti hodnotě $1 \mu\text{m}$, který uvádí v katalogu měření. Jako u ostatních měření se může jednat o nepřesné zaostření součásti pomocí automatického zaostření. Vliv tedy má i zkušenost programátora, protože musí obraz manuálně doostřit.



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce



Obr. 61 Histogram měření šířky



Obr. 62 Ochylky měření



Závěr

Z naměřených hodnot a výsledků lze stanovit několik závěrů práce.

Z hlediska dodržení maximální chyby délky a chyby opakovatelnosti měření uvedené v katalogu výrobce je patrné, že pro uživatele, případně programátora není zcela jednoduché maximální odchylky chyby dodržet. Firma uvádí, že není potřeba odbornost člověka, ale není zcela specifikováno, jestli jde o operátora nebo programátora. Z hlediska operátora, jehož prací je pouze stisknutí tlačítka pro spuštění předem vytvořeného programu, není potřeba zvláštní odbornost. Programátorovi, i když mu zařízení pomáhá různými automatickými funkcemi pro osvit, snímání hran a vlastnostmi prostředí, se výsledky odchylují více než je stanovená chyba v katalogu výrobce. U velmi přesných součástí se může programátor pomocí osvit, detekcí hran, volby kalkulační metody a volby strategie snímání bodů přizpůsobit blíže k nominální hodnotě, ale u méně přesných součástí nemá uživatel referenci pro měření a neví jaké nastavení těchto parametrů je nejlepší variantou.

Z hlediska časové náročnosti přípravy měření se jedná při programování zkušeným člověkem o časy maximálně v desítkách minut. Z hlediska operátora, který jen spustí měření a zpracuje výsledky měření lze dosáhnout časů v rozmezí 1-2 minut i u měření více kusů najednou. Pokud součást nevyžaduje upnutí, tyto časy mohou být ještě kratší.

Z hlediska hlavního faktoru využitelnosti těchto zařízení v hromadné výrobě, kde měření probíhá v procesní kontrole vzorků a dílů a proces je z velké části automatizovaný, kde operátor potřebuje změřit díl rychle a nezáleží na detailně přesných hodnotách, lze tato zařízení do chodu efektivně začlenit. V tomto kritériu lze říci, že zařízení O-Select díky automatické detekci programu a rozhraní softwaru vyniká více než zařízení Keyence IM-7000. Pro vstupní, výstupní nebo prototypové kontroly vyniká více zařízení Keyence IM-7000, díky uživatelsky podrobnějším výstupům a specifičtějším funkcím softwarového rozhraní. Každopádně pokud není až tolik nutná efektivita měření, dotykové systémy jsou častěji stále lepší variantou. Je důležité si uvědomit, že nových modelových řad zařízení se tyto funkce neustále doplňují a zlepšují.



Seznam obrázků

Obr. 1 Polarizace světla [1].....	9
Obr. 2 Odraz, absorpce a přenos světla [2].....	10
Obr. 3 Lom světla [3].....	11
Obr. 4 Disperze světla [1].....	11
Obr. 5 Numerická aparatura [4].....	12
Obr. 6 Hloubka ostrosti [5].....	12
Obr. 7 Zakřivení pole [6].....	14
Obr. 8 Zkreslení obrazu [6].....	14
Obr. 9 Zpracování obrazu [8].....	15
Obr. 10 Filtry obrazu [10].....	16
Obr. 11 Vnější a vnitřní tečný prvek [13].....	17
Obr. 12 Rozdíl mezi normálním a telecentrickým objektivem [14].....	19
Obr. 13 Rozdíl zobrazení telecentrického a netelecentrického objektivu [15].....	19
Obr. 14 Typy telecentrických objektivů [17].....	20
Obr. 15 Self-Illumination – Dolní a horní osvit [18].....	21
Obr. 16 Koaxiální osvit [18].....	21
Obr. 17 Prstencový osvit [27].....	22
Obr. 18 Difuzní přední osvětlení [18].....	22
Obr. 19 Usměrněné přední osvětlení [18].....	22
Obr. 20 Rozdělení snímacích systémů.....	23
Obr. 21 CMM souřadnicové měření [28].....	24
Obr. 22 Spínací hlava [19].....	25
Obr. 23 Snímací hlava [20].....	26
Obr. 24 Pružná projekce [22].....	27
Obr. 25 Laser scanner [23].....	27
Obr. 26 Zařízení fotogrammetrie [24].....	28
Obr. 27 Keyence IM 7000 s řídicí jednotkou [27].....	29
Obr. 28 Procesní kontrola a kontrola prototypů [26].....	32
Obr. 29 Kontroly vstupní a výstupní [26].....	32
Obr. 30 Histogram kruhovitosti.....	33
Obr. 31 Zařízení ZEISS O-Select [27].....	35
Obr. 32 Autofocus [27].....	36
Obr. 33 Zaostření obrazu [27].....	36
Obr. 34 Software ZEISS Zaphire.....	37
Obr. 35 Protokol vyhodnocení.....	38
Obr. 36 Zařízení Keyence IM-7000 [26].....	39
Obr. 37 Rozměrové parametry [26].....	39
Obr. 38 Software Keyence [26].....	40
Obr. 39 Tvarový profil.....	41
Obr. 40 Definování křivky.....	41
Obr. 41 Definování tvaru křivky.....	42
Obr. 42 Vyhodnocení křivky.....	43
Obr. 43 Tvarový profil pozice díry.....	44
Obr. 44 Opakovatelnost kruhovitosti.....	44
Obr. 45 Vyhodnocení kruhovitosti.....	44
Obr. 46 Histogram kruhovitosti.....	45



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Bakalářská práce

Obr. 47 Odchylky výsledků kruhovitosti.....	45
Obr. 48 Součást s drážkou	46
Obr. 49 Automatická detekce prvků	46
Obr. 50 Měření více kusů	47
Obr. 51 Definice prvků malé součásti	47
Obr. 52 Nečistoty součásti	49
Obr. 53 Definice hlavové a patové kružnice.....	49
Obr. 54 Nepřesnosti měření při špatném uchopení	50
Obr. 55 Hřídél se závitem	50
Obr. 56 Keyence detekce závitu.....	51
Obr. 57 O-Select detekce závitu.....	51
Obr. 58 Koncová měrka.....	53
Obr. 59 Umístění koncové měrky.....	53
Obr. 60 Opakovatelnost šířky měrky.....	54 _z
Obr. 61 Histogram měření šířky	55
Obr. 62 Ochylky měření.....	55



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

Seznam grafů

Graf 1 Odchýlení od nominální hodnoty u malé drážky	48
Graf 2 Odchýlení od nominální hodnoty u závitu	52



Seznam tabulek

Tab. 1 Technické specifikace O-Select.....	34
Tab. 2 Technické specifikace Keyence	40
Tab. 3 Porovnání malé součásti s drážkou	48
Tab. 4 Porovnání rozměrů závitu	52
Tab. 5 Porovnání průměr hřídele	52
Tab. 6 Hodnoty šířky měrky	53
Tab. 7 Hodnoty měrky a data způsobilosti	53



Seznam použité literatury

- [1] CATTIN, F. *Digital Image Fundamentals. Biomedical Image Analysis* [online]. Basel: University of Basel, 2016 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://miac.unibas.ch/BIA/pdf/BIA-01-Fundamentals.pdf>
- [2] SHARMA, B. K. Raman spectrum & Spectroscopy. In: *Courseware.cutm.ac.in* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://courseware.cutm.ac.in/wp-content/uploads/2020/05/Raman-spectroscopy-2.pdf>
- [3] ASTAR MATH SAND PHYSICS. Snell's Law, Refraction and Total Internal Reflection. *Astarmathsandphysics.com* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://astarmathsandphysics.com/a-level-physics-notes/optics/2931-snell-s-law-refraction-and-total-internal-reflection.html>
- [4] KLAR, A. T., E. ENGEL a S. W. HELL. Super-Resolution a case study on STED. In: *Bwhneurosciences.org* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.bwhneurosciences.org/wp-content/uploads/2020/07/education-Super-Resolution.pdf>
- [5] MATT. What is Shallow Focus? Defintion, Examples & Tutorials. In: *Filmlifestyle.com* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://filmlifestyle.com/what-is-shallow-focus/>
- [6] DERENIAK, E. L. a T. D. DERENIAK. *Geometrical and Trigonometric Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. ISBN 9780511755637.
- [7] JEONG, I. CMOS image sensors: 5 major process techniques. In: *Edn.com* [online]. 20. 1. 2021 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.edn.com/cmos-image-sensor-five-major-process-techniques/>
- [8] KO, J. H. et al. A single-chip image sensor node with energy harvesting from a CMOS pixel array. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2017, Vol. 64, No. 9, Pp. 2295–2307. ISSN 1549-8328.
- [9] BUZZTECH. Fundamental Steps in Digital Image processing. *Buzztech.in* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://buzztech.in/fundamental-steps-in-digital-image-processing/>
- [10] CAPTION SENERGY. Smoothing And Sharpening Filters In Image Processing Ques10. In: *Captionsenergyca.blogspot.com* [online]. 18. 4. 2021 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://captionenergyca.blogspot.com/2021/04/smoothing-and-sharpening-filters-in.html>



- [11] MACULOTTI, G. et al. Gaussian process regression-based detection and correction of disturbances in surface topography measurements. *Quality and Reliability Engineering International* [online]. 2022, Vol. 38, No. 3, Pp. 1501–1518 [cit. 2022-06-12]. ISSN 1099-1638. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/qre.2980>
- [12] KESHAN, H. et al. Accurate and Efficient Evaluation of Chebyshev Tensor Product Surface. *Mathematical Problems in Engineering* [online]. 2017, Vol. 17, No. 134, Pp. 1–10 [cit. 2022-06-12]. ISSN 1563-5147. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320072164_Accurate_and_Efficient_Evaluation_of_Chebyshev_Tensor_Product_Surface
- [13] Carl Zeiss IMT Corporation ZEISS Calypso, Phil Adair, Circle Feature Calculations. Applications tip #3, USA [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://academy.imt.zeiss.com/Software/Calypso/calypso_tips-and-hints
- [14] MORAVSKÉ PŘÍSTROJE A.S. Základní principy strojového vidění - 3 díl. In: *Elektroprumysl.cz* [online]. 8. 8. 2011 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/zakladni-principy-strojoveho-videni-3-dil>
- [15] VISION ONLINE SL. Basic Concepts. *En.visiononline.es* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://en.visiononline.es/knowledge-base/basic-concepts/>
- [16] Telecentric lens. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Telecentric_lens/
- [17] VS TECHNOLOGY. Telecentric Lens. *Vst.co.jp* [online]. © 2020 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://vst.co.jp/en/glossary/telecentric-lens/>
- [18] STEMMER IMAGING AG. Illumination. *Stemmer-imaging.com* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/illumination/>
- [19] YAMIN, L. et al. A dynamic pre-travel error prediction model for the kinematic touch trigger probe. *Measurement*. 2019, Vol. 146, Pp. 689–704. ISSN 1873-412X.
- [20] MITUTOYO AMERICA CORPORATION. Scanning Probe Systems. *Mitutoyo.com* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/cmm-probe-and-change-rack-options/scanning-probe-systems/>



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Bakalářská práce

- [21] GLASSBURN, R. Common Non-Contact Measurement Devices and Methods. In: *3d-engineering.net* [online]. 27. 3. 2019 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://3d-engineering.net/common-non-contact-devices-and-methods/>
- [22] THE FABRICATOR. More from hexagon manufacturing intelligence. *Thefabricator.com* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/company/hexagon-metrology-elgin-il?page=4>
- [23] COGNEX CORPORATION. Laser scanners. *Cognex.com* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/what-is/industrial-barcode-reading/laser-scanners>
- [24] 3D.DIRECTORY. Comet lød 1m. *3d.directory* [online]. © 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.3d.directory/equipment/products/three-d-scanners/engineering-manufacturing-services/4-120-comet-l-d-1m>
- [25] GRASSO, M. et al. In-situ measurement and monitoring methods for metal powder bed fusion: An updated review. *Measurement Science and Technology* [online]. 2021, Vol. 32, No. 11, Pp. 1–66 [cit. 2022-06-12]. ISSN 1361-6501. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/351690116_In-situ_measurement_and_monitoring_methods_for_metal_powder_bed_fusion_An_updated_review
- [26] KEYENCE. *Digitální měřicí systém* [online]. Mechelen: Keyence, 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/landing/measure-sys/pr_im-7500.jsp
- [27] ZEISS O-SELECT. *Digital Measuring Projector* [online]. Oberkochen: Carl Zeiss, 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://www.basstool.com/pdf/literature/zeiss/EN_Brochure_O-SELECT.pdf
- [28] ZEISS O-SELECT. *Metrology Systems* [online]. Oberkochen: Carl Zeiss, 2022 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems.html>