



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

NÁVRH AUTOMATIZOVANÉHO MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ S PRŮMYSLOVÝM ROBOTEM

DESIGN OF MEASUREMENT ROBOTIZED WORKCELL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL TVARDEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Tvardek

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh automatizovaného měřicího pracoviště s průmyslovým robotem

v anglickém jazyce:

Design of measurement robotized workcell

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod do konstrukce a aplikace průmyslových robotů s paralelní kinematickou strukturou (PKS) – rozdíly mezi sériovou a paralelní KS
2. Stručný popis používaných měřicích metod s použitím měřicích sond u souřadnicových měřicích strojů, jejich účel a použití v měření vybraných typů součástí
3. Návrh projektu měřicího RTP (potřebná výkresová dokumentace, popřípadě 3D návrh simulace činnosti)
4. Na základě vlastního projektu částečná realizace RTP v podmínkách společnosti Renishaw
5. Závěr a vyhodnocení vlastností a možností reálného využití nového RTP v praxi (srovnání s jiným provedením)

Cíle diplomové práce:

Cílem je navrhnout v podmínkách ČR zcela unikátní řešení automatizovaného měřicího pracoviště, využívající speciální přístroj Equator (Renishaw) s PKS ve spojení s průmyslovým robotem, za účelem zrychlení a zautomatizování procesu měření vybraných veličin vybrané součásti a možnost následného třídění těchto součástí dle naměřených výsledků. Součástí DP je tedy jak projekt, tak i částečná realizace projektu v podmínkách společnosti Renishaw za podmínek této společnosti.

Seznam odborné literatury:

Roboty a pružné výrobní systémy, studijní opora, vydala FSI VUT v Brně, 2004
Firemní literatura

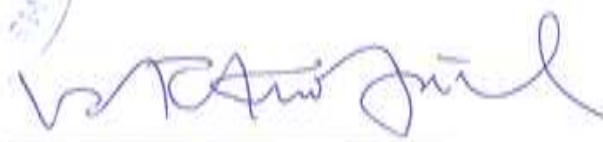
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

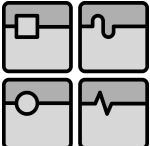
V Brně, dne 23.11.2012



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na použití porovnávacího měřicího přístroje EquatorTM společnosti Renishaw spolu s průmyslovým robotem. Cílem je návrh robotického pracoviště obsahující tyto dva produkty, kde robot figuruje jako manipulátor pro vkládání a následné třídění obrobků na dobré a špatné dle naměřených hodnot z přístroje EquatorTM. EquatorTM využívá paralelní kinematickou strukturu a snímací systém, standardně používaný na souřadnicových měřicích strojích. V první části práce je proto věnována pozornost teoretickému úvodu do paralelních i sériových kinematických struktur, do problematiky souřadnicových měřicích strojů, kde je provedeno rozdělení snímacích systémů do několika základních kategorií a popis jak typických zástupců těchto kategorií, tak dalšího důležitého příslušenství souřadnicových měřicích strojů. Druhá část práce obsahuje charakterizaci přístroje EquatorTM, použitého průmyslového robotu, jejich periferií a příslušenství. Je zde rovněž uvedeno několik příkladů využití automatizace měření v průmyslové praxi. Třetí část je dále věnována projektování robotického pracoviště a obsahuje všechny důležité náležitosti pro realizaci a uvedení pracoviště do provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

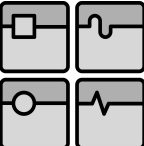
Robotické pracoviště, průmyslový robot, porovnávací měřicí přístroj EquatorTM, paralelní kinematická struktura, sériová kinematická struktura, spínací doteková sonda, skenovací sonda, souřadnicový měřicí stroj, SMS, automatizace, měření, programování

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the use of the Renishaw's EquatorTM gauging system in cooperation with the industrial robot. The target is to design the robotized workcell which contains these two products. Robot acts as a manipulator for inserting and sorting out the workpieces into the "good" and "bad" pallets according to measured results from the EquatorTM. EquatorTM uses a parallel kinematics and probing system which is normally used on coordinate measuring machines. Therefore there is the introduction to the parallel and serial kinematic structures, to the problems of the coordinate measuring machines in the first part of this thesis. It was made a separation of the probing systems into a few basic categories, description of the typical representatives of these categories and of the other important accessories of the coordinate measuring machines, too. The second part of the thesis contains a description of the EquatorTM gauging system, the industrial robot which I used and their accessories. In this part is mentioned a few examples of measurement automation in industry practice, too. The third part devotes to the design of the robotized workcell and contains all the important requirements for the realization.

KEYWORDS

Robotized workcell, industrial robot, EquatorTM gauging system, parallel kinematics, serial kinematics, touch-trigger probe, scanning probe, coordinate measuring machine, CMM, automation, measurement, programming

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TVARDEK, M. *Návrh automatizovaného měřicího pracoviště s průmyslovým robotem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 106 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..

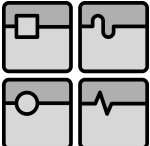
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou diplomovou práci na téma *Návrh automatizovaného měřicího pracoviště s průmyslovým robotem* vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr.. Při psaní této diplomové práce jsem použil pouze odbornou literaturu a zdroje, jež jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů.

V Brně dne 21. 5. 2013

.....

Bc. Michal Tvardek

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

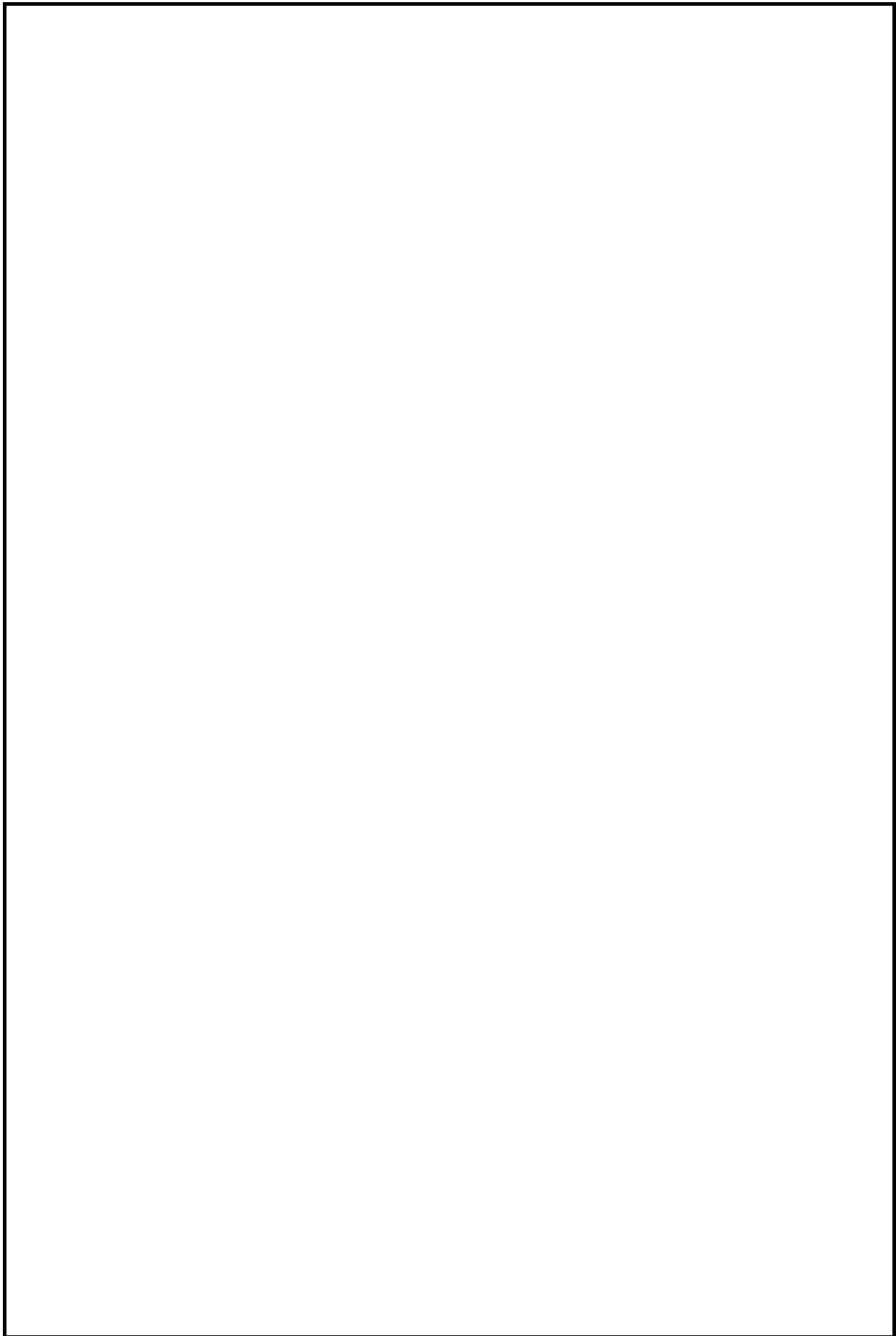
Děkuji tímto panu doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr. za cenné rady a připomínky při vypracování této diplomové práce. Také děkuji všem mým kolegům ze společnosti Renishaw za vstřícnost a podporu. V poslední řadě rovněž děkuji mé rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mě při psaní diplomové práce nemálo podporovali.

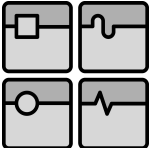
OBSAH

1	ÚVOD	13
2	KINEMATICKÉ STRUKTURY	15
2.1	PARALELNÍ KINEMATICKÁ STRUKTURA (PKS).....	15
	<i>Historie</i>	15
	<i>Konstrukce</i>	16
	<i>Výhody a nevýhody</i>	19
	<i>Aplikace</i>	20
2.2	SÉRIOVÁ KINEMATICKÁ STRUKTURA (SKS).....	23
	<i>Konstrukce a aplikace</i>	23
	<i>Srovnání s paralelní kinematickou strukturou</i>	27
3	SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE A JEJICH SNÍMACÍ SYSTÉMY	29
3.1	SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE (SMS).....	29
	<i>Základní typy souřadnicových měřicích strojů</i>	29
	<i>Konstrukce</i>	29
	<i>Retrofit</i>	30
3.2	SNÍMACÍ SYSTÉMY SOUŘADNICOVÝCH MĚŘICÍCH STROJŮ	30
	<i>Snímací hlavice (hlava)</i>	32
	<i>Sondy</i>	33
	<i>Snímací doteky</i>	37
3.3	OSTATNÍ PŘÍSLUŠENSTVÍ.....	38
	<i>Výměnné zásobníky</i>	38
	<i>Otočné stoly</i>	38
	<i>Kalibrační koule a kalibrace snímacích doteků</i>	39
	<i>Automatizace</i>	39
	<i>Senzory teploty</i>	39
4	RENISHAW EQUATORTM	41
4.1	KONSTRUKCE.....	42
4.2	PRINCIP	42
4.3	SOFTWARE.....	43
	<i>Automation</i>	44
	<i>MODUSTM Organiser</i>	44
	<i>MODUSTM</i>	44
	<i>UCCserver Equator</i>	44
	<i>RenCompare</i>	45
	<i>MODUSTM Reporter</i>	45
5	AUTOMATIZACE V MĚŘICÍCH TECHNIKÁCH A PRŮMYSLOVÉ ROBOTY	47
5.1	AUTOMATIZACE V MĚŘICÍCH TECHNIKÁCH.....	47

	<i>Automatizované měřicí pracoviště firmy Mitutoyo</i>	48
	<i>Souřadnicové měřicí stroje v automatizovaných linkách</i>	49
	<i>Automatizace souřadnicových měřicích strojů dle společnosti Mitutoyo</i>	50
	<i>Měřicí stanice společnosti Amest</i>	51
	<i>Měření pomocí silového senzoru robotu</i>	52
	<i>Optické měření pomocí robotu</i>	52
5.2	KUKA KR 6 R900 SIXX (KR AGILUS)	54
	<i>Pracovní oblast</i>	54
	<i>Řídící jednotka KR C4 compact</i>	56
	<i>Ovládací panel KUKA smartPAD</i>	57
6	PROGRAMOVÁNÍ PŘÍSTROJE EQUATOR™	59
6.1	MĚŘENÁ SOUČÁST	60
6.2	UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK.....	61
	<i>Provizorní přípravek</i>	61
	<i>Pneumatické sklíčidlo</i>	62
	<i>Elektromagnet</i>	63
6.3	SNÍMACÍ DOTEKY	64
6.4	PROGRAMOVÁNÍ	66
	<i>Lokalizace</i>	66
	<i>Měření</i>	67
6.5	VYTVOŘENÍ KALIBRAČNÍHO SOUBORU.....	69
7	PROGRAMOVÁNÍ PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU	71
7.1	ZÁKLADNÍ ÚKONY ROBOTU:	71
7.2	VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ SIGNÁLY	71
7.3	VÝVOJOVÉ DIAGRAMY	73
7.4	DIGITÁLNÍ I/O ROZHŘANÍ.....	76
	<i>SSR (Solid state relay)</i>	76
8	PROJEKTOVÁNÍ	77
8.1	CÍLE A POŽADAVKY	77
8.2	BAZICKÁ BODOVACÍ METODA.....	78
8.3	VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY ŘEŠENÍ.....	80
	<i>Varianta č. 1</i>	80
	<i>Varianta č. 2</i>	82
	<i>Varianta č. 3</i>	85
8.4	VYBRANÁ VARIANTA	87
8.5	BEZPEČNOST	88
9	REALIZACE	89
9.1	BEZPEČNOSTNÍ SENZOR NA DVEŘE	89

9.2	KONCOVÝ EFEKTOR ROBOTU.....	90
9.3	UPÍNACÍ PŘÍPRAVEK.....	92
9.4	KONSTRUKCE.....	92
9.5	OSTATNÍ NAKUPOVANÉ KOMPONENTY.....	92
10	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	94
11	ZÁVĚR.....	96
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	97
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	102
14	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ.....	103
15	SEZNAM PŘÍLOH.....	106



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

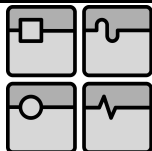
1 ÚVOD

Průmyslové roboty nacházejí své uplatnění ve stále rozšiřujícím se sortimentu aplikací a odvětví průmyslu. Rozmanitost operací a úkonů, které vykonávají, se dokáže zcela přiblížit schopnostem člověka. Rozvojem prochází také schopnost robotů vnímat prostředí, ve kterém pracují, prostřednictvím moderních senzorů. Průmyslové roboty dnes již neodmyslitelně patří mezi hlavní prvky v oboru automatizace. Současná doba nelítostného konkurenčního boje, vysokých nároků na kvalitu výrobků a ekonomické opatrnosti firem ji však sama vyžaduje. Aby mohly být společnosti konkurenceschopné, musí jít s dobou, tudíž musí automatizovat.

Cílem této diplomové práce je návrh automatizovaného měřicího pracoviště, kde místo obsluhy bude figurovat průmyslový robot. Měření bude provádět porovnávací měřicí přístroj EquatorTM, který je pro komunikaci s průmyslovým robotem uzpůsoben. Na trh byl tento přístroj uveden v roce 2011 a za dobu své existence prošel celou řadou vylepšení jak z hlediska hardwaru, tak i softwaru. Až s průmyslovou praxí po celém světě bylo možno implementovat velmi specifické požadavky zákazníka a rapidně zvýšit už tak vysoký potenciál a uživatelskou nenáročnost přístroje EquatorTM. Možnosti použití jsou navíc umocňovány schopností integrace s průmyslovým robotem. Jelikož měření jako takové je velmi citlivá činnost výrobního procesu a z velké části jej ovlivňuje sám lidský faktor, staví se společnosti k této schopnosti integrace s průmyslovým robotem velmi pozitivně.

Je třeba poznamenat, že se nejedná pouze o teoretický návrh. Celé pracoviště se bude realizovat a jeho design bude směřován hlavně pro použití jako veletržní exponát nebo jako prezentace pro zákazníky v prostorech společnosti Renishaw. Obsah seznámí čtenáře se spoustou užitečných informací, týkajících se problematikou robotiky, automatizace a měření.





2 KINEMATICKÉ STRUKTURY

Kinematika je jedním z vědních oborů mechaniky těles. Zabývá se především popisem **pohybu přímočarého a po kružnici**, kde vyšetřuje hlavně polohu, rychlost a zrychlení, a to i v úhlových jednotkách. [22]

Kinematická struktura (KS), jež je určena seskupením rotačních a posuvných os, z velké části ovlivňuje nejen tvar a velikost výsledného pracovního prostoru daného mechanismu, ale také kinematické možnosti tohoto mechanismu, rychlost či zrychlení. Kinematické struktury dnešních mechanismů lze rozčlenit do tří základních skupin:

- Paralelní kinematická struktura (PKS)
- Sériová kinematická struktura (SKS)
- Hybridní (smíšená) kinematická struktura (HKS)

Jak již z názvu vyplývá, hybridní, neboli smíšená kinematická struktura, je kombinací sériového a paralelního typu. V dnešní době lze výše uvedené kinematické struktury pozorovat nejčastěji v oblasti obráběcích strojů, robotů či manipulátorů. Podle mého názoru se o těchto oblastech ve spojení s KS alespoň nejvíce mluví. Tato diplomová práce poukáže na to, že také zástupce měřicí techniky nelze v tomto směru opomíjet. V následujících kapitolách se problematikou kinematických struktur (sériových a paralelních) budu zabývat poněkud podrobněji, převážně z hlediska konstrukce, výhod, nevýhod, použití a typických zástupců. [20]

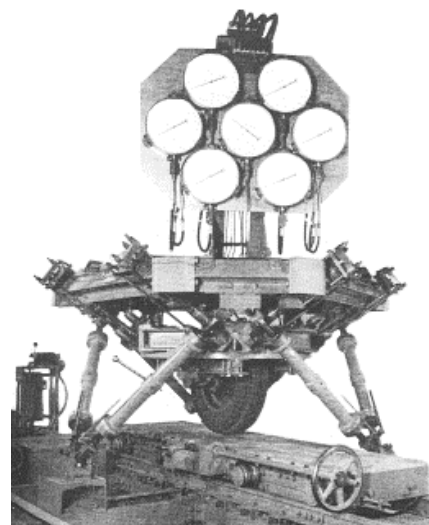
2.1 Paralelní kinematická struktura (PKS)

Typickou vlastností mechanismů s PKS je, že výsledný pohyb je dán součinností všech částí, respektive os, které se navzájem ovlivňují. Přes všechny výhody však paralelní kinematická struktura stále patří mezi méně používaná konstrukční řešení ve výše uvedených strojírenských oblastech. [17] [20]

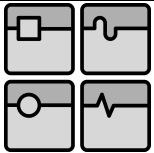
Historie

První myšlenky a teoretické popisy, týkající se paralelních kinematických struktur se zrodily již na konci 19. století. Skutečná realizace však přišla přibližně o 50 let později, kdy se v roce 1949 dostal na světlo světa mechanismus, určen pro zátěžové testy pneumatik (*Obr. 2.1*). Tento mechanismus se dosti podobal dnešním hexapodům a jeho vynálezce byl Eric Gough. V roce 1956 pak vznikla zásluhou pana Altmanna koncepce několika prostorových paralelních převodovek, sloužící k vedení tuhého tělesa po definované dráze.

Obr. 2.1: Mechanismus pro testování pneumatik [18]



Nepřehlédnutelnou a zcela nepochybně důležitou součástí některých dnešních mechanismů s paralelní kinematickou strukturou je tzv. Stewartova plošina (*Obr. 2.2*). Jak již z názvu vyplývá, jejím vynálezce byl D. Stewart, a to v roce 1965, kdy tento koncept



použil při vývoji leteckého simulátoru. Obecně se jedná o mechanismus umožňující nástroji upevněnému na horní plošinu pohyb v šesti stupních volnosti. Ten se v prostoru skládá ze tří posuvných a tří rotačních pohybů. Jak je patrné z obrázku 2.2, mechanismus se skládá ze základny **1**, na které jsou upevněny lineární pohony **2** (hydraulické nebo elektrické). Na opačném konci pohonů je tzv. horní plošina **3**, na kterou se připevňuje nástroj, uzpůsobený pro danou aplikaci. Jelikož se tato diplomová práce z velké části týká automatizovaného robotického pracoviště, musím se zde zmínit i o faktu, že první použití paralelního manipulátoru v robotickém pracovišti se datuje na rok 1979 a zasloužili se o něj pánové McCallion a Phan. Výše popsané mechanismy, stroje a zařízení se staly především jakýmsi základním kamenem či odrazovým můstkem pro dnešní mechanismy tohoto typu. Svůj komerční úspěch zažily až v roce 1994 na veletrhu IMTS v americkém Chicagu. Jako příklad lze uvést stroj společnosti Ingersoll s označením Octahedral Hexapod VOH-1000 (Obr. 2.4). V současnosti se PKS dostaly opět hlavně do fáze výzkumu. Naráželo se na spoustu problémů, vznikajících díky nedostatečně vyvinutému hardwaru a softwaru. Doba jde ovšem rychle kupředu a v budoucnu můžeme očekávat velmi pravděpodobný návrat těchto mechanismů. [18] [19] [20] [24]

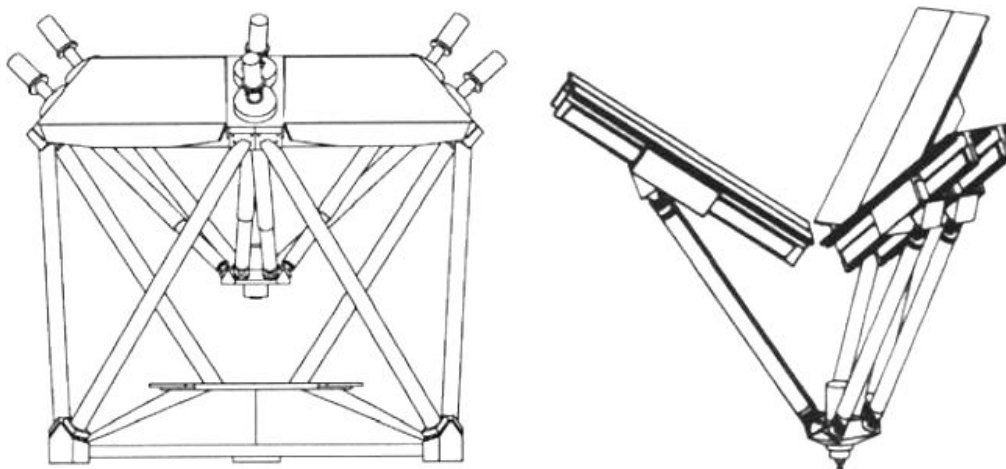


Obr. 2.2: Gough-Stewartova plošina (hexapod H-840) [55]

Konstrukce

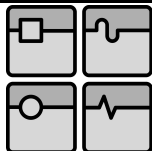
Z konstrukčního hlediska můžeme mechanismy s paralelní kinematickou strukturou rozdělit na dvě základní koncepce:

1. Mechanismy s proměnnou délkou prutů (Obr. 2.3 vlevo)
2. Mechanismy s tuhými pruty (Obr. 2.3 vpravo)



Obr. 2.3: Základní dvě koncepce mechanismů s PKS [20]

Vlastnosti, výhody či nevýhody obou koncepcí jsou popsány na následujících stranách, kde jsou uvedeni i jejich typičtí zástupci. [20]



Hexapod

Jedná se o typického zástupce skupiny mechanismů s proměnnou délkou prutů. Název hexapod je obchodním označením výše popsané Gough-Stewartovy plošiny. Tento název se začal používat především ve spojení s obráběcími stroji. Z toho vyplývá, že hexapody se nejčastěji využívají při obráběcích operacích, konkrétně při vysokorychlostním frézování zápustek a forem, leteckých a jiných složitých součástí z oceli, litiny, slitin mědi (Cu) a hliníku (Al). Kromě obrábění nacházejí uplatnění také v laserových technologiích a montážních operacích. Na obrázku 2.4 je příklad vertikálního obráběcího centra tohoto typu. Jedná se o stroj Octahedral Hexapod VOH-1000. Jeho technické parametry jsou shrnuty v tabulce 2.1. Obecně se dá říci, že hexapody mohou dosáhnout přesnosti polohování 0,01 až 0,005 mm a jsou schopny produkovat obrobky o hmotnosti až 1,5 tuny. [19] [20]



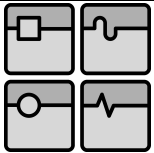
Obr. 2.4: Octahedral Hexapod VOH-1000 [18]

Tab. 2.1: Specifikace stroje Octahedral Hexapod VOH-1000 [18]

Výrobce	Ingersoll
Aplikace	Pětiosé obrábění kontury ze 4 stran
Konstrukce	Gough-Stewartova plošina (hexapod)
Pracovní prostor	1000 x 1000 x 1200 mm ± 15° kolem osy A/B
Maximální hmotnost nástroje	12 kg
Přesnost	0,02 mm
Maximální pojzdová rychlost	30 m/min
Maximální zrychlení	4,8 m/s ²
Výkon vřetena	37,5 kW
Maximální otáčky vřetena	20 000 otáček/min

Linapod

Oproti první koncepci mechanismů s proměnnou délkou prutů má tento typ pruty pevné, jež jsou přes kloubové uložení propojeny s lineárními pohony. U těchto typů strojů si můžeme zcela jistě všimnout (Obr. 2.5) častějšího užití lineárních elektropohonů, jež jsou umístěny přímo na rámu stroje. Jejich použití se tedy stává jednodušším. Na druhém konci prutů se nachází plošina s nástrojem, která je připojena rovněž pomocí kloubů se 2 až 3 stupni volnosti. Typickými představiteli tohoto typu mechanismů jsou například Hexaglide nebo Triaglide. [20]



DIPLOMOVÁ PRÁCE

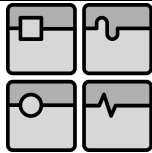


Obr. 2.5: INDEX-Werke V100 – stroj typu Linapod [21]

Velice pěkný stroj tohoto typu má ve svém sortimentu produktů německá společnost INDEX-Werke. Jedná se především o vertikální soustružnické centrum, do kterého se dá zaintegrovat kromě soustružení i mnoho dalších technologických operací. Vřeteno může nést nástroje jak pevné (v případě soustružení), tak poháněné (v případě frézování nebo broušení). Podrobnější specifikace tohoto stroje je uvedena v tabulce 2.2. [21]

Tab. 2.2: Přehled parametrů stroje V100 [21]

Výrobce	INDEX
Aplikace	<ul style="list-style-type: none">• Tříosé obrábění<ul style="list-style-type: none">○ soustružení○ frézování• laserové vytvrzování• laserové svařování• broušení• montáž
Konstrukce	Paralelní mechanismus se 3 stupni volnosti
Pracovní prostor	280 x 280 x 145 mm
Rozměry	1700 x 3000 x 2400 mm
Maximální pojzdová rychlost	60 m/min
Maximální zrychlení	1 g (9,8 m/s ²)
Výkon vřetena	10,5 kW
Maximální otáčky vřetena	10 000 otáček/min
Maximální krouticí moment vřetena	50 Nm
Maximální velikost vřetena	130 mm
Systém nástrojů	8 ÷ 12 nástrojů na válcové stopce o průměru 16 mm (DIN 69880-25 / 69880-30)
Řídicí systém	INDEX nebo Siemens



Tricept

Jedná se o hybridní (smíšený) typ kinematické struktury (HKS). K paralelní kinematické struktuře s proměnnou délkou prutů typu Tripod (obdoba Hexapodu) přibyla ještě speciální otočná hlava, již je možno považovat za zástupce sériové kinematické struktury. Aby popis tohoto stroje, respektive robotu, byl relevantní, je zde třeba uvést, že jde o kinematickou strukturu prostorovou, jelikož HKS rozlišujeme prostorové i rovinné.

Mezi odlišnosti od předešlých koncepcí patří zejména větší pracovní prostor, vyšší tuhost v ose Z a nižší geometrická přesnost. Tricept na obrázku 2.6 se vyznačuje opakovatelností $\pm 0,02$ mm a maximální dosažitelnou rychlostí posuvu přibližně 20 m/min. Mezi hlavní aplikace patří montáž, svařování, řezání laserem či vodním paprskem a obrábění, konkrétně frézování a vrtání. [20]

Obr. 2.6: Tricept společnosti SEF Roboter [20]



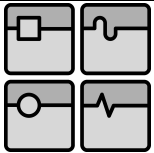
Výše uvedená technická řešení měla jednu společnou vlastnost, a to využití paralelní kinematické struktury v nástrojovém řetězci. Obrázek vlevo vyvrací jakékoliv pochybnosti o tom, že PKS nelze využít také v obrobkovém řetězci. Je zde vyobrazena stolová jednotka společnosti Mikrolar. Tyto jednotky v mnoha velikostních i typových provedeních nacházejí uplatnění jak v obrábění, kde figurují jako upínací stůl pro obrobek, tak například jako letecké simulátory. [43]

Obr. 2.7: Stolová jednotka společnosti Mikrolar [43]

Výhody a nevýhody

Mezi nejdůležitější vlastnosti a **výhody** mechanismů s PKS patří zejména:

- Lepší dynamické vlastnosti (vyšší dosažitelné rychlosti, zrychlení a zpomalení), z důvodu nízké hmotnosti pohybujících se částí
- Vysoká opakovatelnost
- Vysoká tuhost struktury
- Snadná montáž
- Jednoduchý rám, nevyžadující zvláštní přesnost
- Přívodní kabely nemusejí být umístěny na pohyblivém vedení
- Unifikované části
- Ucházející cena
- Pruty s klouby namáhány především na tlak, tah a výjimečně na vzpěr, díky uložení ve sférických ložiscích



- U některých koncepcí umístění pohonů na nepohyblivém rámu – snížení setrvačných hmot pohyblivých skupin

Naopak, pokud bych měl vyjmenovat **nevýhody**, byly by to:

- Vysoké nároky na řízení – neustálá transformace souřadnic (délka prutů → bod v kartézských souřadnicích)
- Malý pracovní prostor vzhledem k velikosti celku
- Vysoké požadavky na uložení jednotlivých prutů (sférická ložiska) a systém odměřování polohy
- Tepelná stabilita
- Problém s kompenzací prostorových geometrických chyb (proměření i zavedení do řídicího systému)
- Nehomogenní tuhost v celém rozsahu pracovního prostoru, především v blízkosti singulárních poloh
- Zvýšením dynamických vlastností klesá tuhost, potřebná k využití těchto vlastností [20] [24]

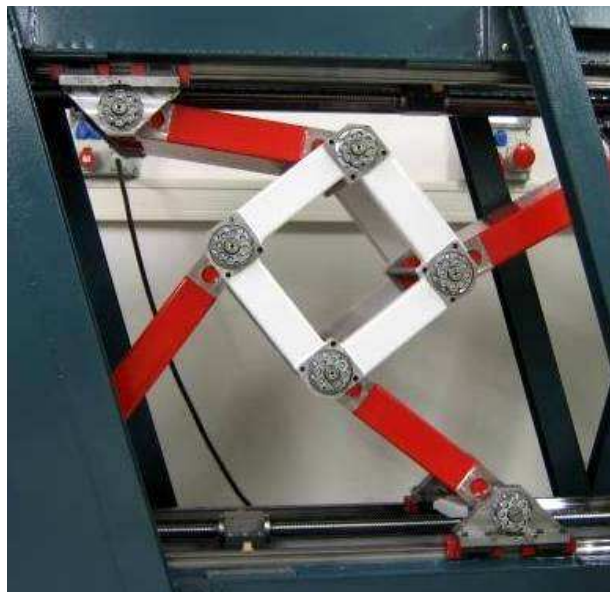
Aplikace

Mechanismy s paralelní kinematickou strukturou nacházejí své největší uplatnění především ve stavbě obráběcích strojů, robotů, manipulátorů a v měřicí technice.

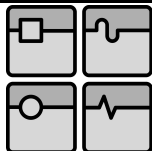
Obráběcí stroje

V konstrukci obráběcích strojů s PKS se využívá nejčastěji hexapodů s pruty s proměnnou délkou a šesti stupni volnosti. Musí zde být zajištěno uložení prutů v kloubech se dvěma až třemi stupni volnosti. Pruty jsou uloženy valivě předepnutě a jejich lineární pohyb zajišťuje kuličkový nebo planetový šroub, který je poháněn rotačním elektromotorem. Dostí zásadní nevýhodou je však fakt, že provozní otáčky šroubu se často blíží kritickým otáčkám. To zapříčiňuje vznik přebytečného tepla, které snižuje předepnutí a tím i přesnost celého stroje. V takových případech se naskytá možnost použití lineárních elektropohonů. U manipulátorů menších velikostí a přesností lze využít i hydraulických pohonů.

Jelikož na současném trhu převládají obráběcí stroje především s osvědčenými konvenčními kinematickými strukturami, nedávají možnost paralelním kinematickým strukturám zažít nějaký extrémní rozmach. Tyto mechanismy nacházejí větší uplatnění spíše v oblasti robotů a manipulátorů. Je možné, že se v budoucnu setkáme s redundantními PKS (Obr. 2.8), které díky většímu počtu pohonů a odměřování dosahují příznivé statické a dynamické tuhosti. [20] [24]



Obr. 2.8: Sliding Star [31]



Roboty a manipulátory

Dá se říci, že v současnosti nacházejí PKS nejrozšířenější uplatnění v oblasti robotů a manipulátorů. Pokud bych měl zmínit přední výrobce, byly by to pravděpodobně společnosti Fanuc, ABB nebo například někomu již méně známá firma Adept Technology.

Na obrázcích 2.9 a 2.10 jsou vyobrazeny produkty dvou výše uvedených výrobců. Jelikož jejich vlastnosti se liší pouze nepatrně, uvádím zde technické parametry jen jednoho z nich. Konkrétně se jedná o robot **M-1iA** japonské společnosti Fanuc. V nabídce této společnosti najdeme i model **M-3iA**, který disponuje možností manipulovat s většími hmotami (až 6 kg). Obě tyto varianty mají buď čtyři, nebo šest os.

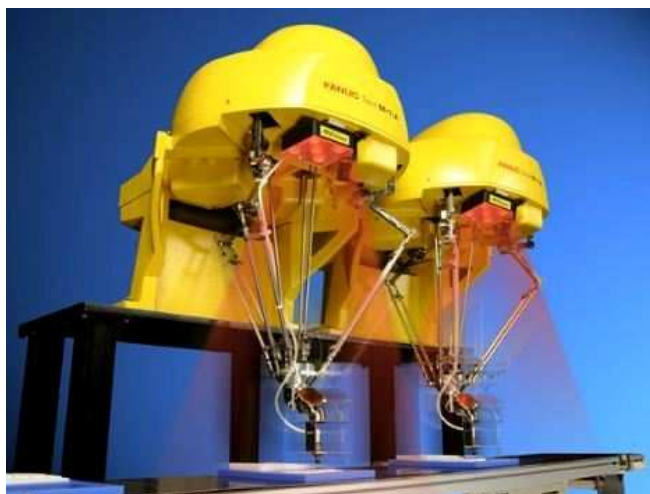
Robot M-1iA je určen zejména pro použití v oblasti elektroniky a pro operace s malými součástkami. Dimenzován je pro manipulaci s díly do 0,5 kg v pracovním prostoru o průměru 280 mm a výšce 100 mm. Svými kompaktními rozměry a pracovním prostorem zcela nahrazuje lidskou pracovní sílu, jelikož jeho šířka odpovídá šířce ramen člověka a pracovní prostor rozevřeně dlaní. Robot nevyžaduje speciální bezpečnostní prvky, jelikož jeho konstrukce mu zabraňuje jakkoliv zasahovat do vnějšího prostředí. Proto je často nasazován ve výrobě přímo vedle lidí. Upevňuje se na stůl, podlahu, strop, kolmo i pod úhlem, a dokonce jej lze integrovat přímo do výrobního stroje. V neposlední řadě je jeho výhodou fakt, že se jeho provozní náklady pohybují dosti nízko. [25] [27]

Typické aplikace M-1iA:

- Třídění dle barev díky vizuálnímu systému iRVision
- Vizuální kontrola
- Zakládání/vykládání do/ze stroje
- Manipulace s malými součástkami
- Sbíráání součástek z běžícího pásu
- Balení a etiketování
- Šroubování, odjehlování, pájení
- Jemná montáž elektronických a mechanických součástek díky silovému senzoru



Obr. 2.10: ABB IRB 360 [26]



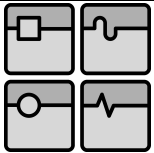
Obr. 2.9: FANUC M-1iA [25]

Základní technické parametry M-1iA:

- Opakovatelnost $\pm 0,02$ mm
- Maximální rychlost 3000°/s
- Hmotnost 20 kg
- Krytí IP20

IP20 = Ochrana před vniknutím pevných těles větších než 12,5 mm a před dotykem prstem

[25] [27] [48]



Měřicí technika

V současnosti paralelní kinematika prorazila i do oblastí, jako je měřicí technika. Jistou novinkou posledních dvou let je porovnávací měřicí přístroj EquatorTM anglické společnosti Renishaw, jež představuje špičku na světovém trhu s měřicími sondami jak pro obráběcí, tak souřadnicové měřicí stroje a dalším sortimentem. Jelikož se tato diplomová práce z velké části týká přímo tohoto přístroje, je mu věnována dostatečná pozornost v kapitole číslo 4. Dodám jen, že přístroj byl poprvé představen veřejnosti na počátku roku 2011. [1]

Zubní lékařství

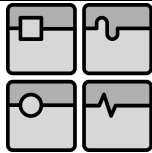
Dentální skener a frézka spolu vytvářejí unikátní CAD/CAM systém pro výrobu zubních můstku či korunek. Oba tyto přístroje využívají mechanismus s paralelní kinematickou strukturou, obchodní označení je Renishaw inciseTM. Skener využívá výhod PKS, konkrétně mechanismu TRIACTTM spolu s osvědčeným snímacím systémem společnosti Renishaw. Jeho princip spočívá v nasnímání odlitého modelu povrchu zubů pomocí skenovací sondy SP25, vytvoření vhodné zubní náhrady prostřednictvím dodávaného softwaru a následné vyfrézování zubní náhrady pomocí laboratorní dentální frézky. Kvalita zubních náhrad je zajištěna speciálními materiály těchto náhrad a ergonomickým softwarem, využívajícím pro pevnostní výpočty metodu konečných prvků. [1] [2]



Obr. 2.11: Renishaw EquatorTM 300 [2]



Obr. 2.12: Dentální CAD/CAM systém Renishaw inciseTM [2]



2.2 Sériová kinematická struktura (SKS)

Sériová kinematická struktura patří mezi nejčastější kinematická řešení v konstrukci strojů, robotů a manipulátorů. Hlavním znakem je fakt, že se výsledný pohyb skládá z na sebe navazujících os a jednotlivé části jsou na sobě nezávislé, což lze považovat za hlavní odlišnost od paralelních kinematických struktur. Vzájemná návaznost na sebe má za následek, že chyby a poddajnost os vzdálených dále od základu závisí na předchozích osách. Rovněž tato skutečnost vyžaduje opravdu vysoké nároky na tuhost a geometrickou přesnost, čehož je docíleno použitím většího množství konstrukčního materiálu. S přibývajícím materiálem nám však samozřejmě narůstá hmotnost a z tohoto důvodu mají sériové kinematické struktury horší dynamické vlastnosti. [17] [20] [24]

Konstrukce a aplikace

Z hlediska použití lze mechanismy se sériovou kinematickou strukturou nalézt v podobných oblastech jako u paralelních struktur. Obecně se dá říci, že dle konstrukce lze mechanismy se sériovou kinematickou strukturou rozdělit na dvě základní oblasti:

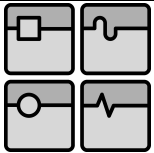
- **Mechanismy pracující v kartézském souřadném systému**
 - Obráběcí stroje
 - Některé koncepce průmyslových robotů
 - Souřadnicové měřicí stroje
- **Mechanismy pracující v nekartézském souřadném systému**
 - Většina koncepcí průmyslových robotů [20]

Obráběcí stroje

U dnešních obráběcích strojů s SKS lze sledovat dva důležité kinematické řetězce. Je to řetězec nástrojový (např. vřetenem s nástrojem) a obrobkový (např. stůl). Minimálně jeden stupeň volnosti vždy náleží pracovnímu vřetenu, ať už se jedná o sklíčidlo pro upnutí obrobku nebo vřetenem s nástrojem. Zbývajících pět stupňů je rozděleno mezi výše uvedené řetězce a způsob tohoto rozdělení se většinou odráží v celkové velikosti stroje. Nejčastěji se konstruuje stroje pracující v kartézském souřadném systému se třemi lineárními a dvěma rotačními osami. Jelikož se tato práce z velké části věnuje měřicí technice ve spojení s průmyslovými roboty, nebudu se nadále podrobněji pohybovat v oblasti obráběcích strojů, ale zaměřím se právě na ta odvětví, která jsou pro tento dokument stěžejní. [20] [23] [24]



Obr. 2.13: Koncepce vertikálního frézovacího centra TAJMAC-ZPS MCFV 1050 [47]



Roboty a manipulátory

Neustále zdokonalující a rozšiřující se oblastí využití sériové kinematické struktury jsou průmyslové roboty a manipulátory. Jedná se o velice rozsáhlý obor a shrnout všechna důležitá fakta, týkající se této problematiky, je z hlediska kapacity jedné diplomové práce příliš. Proto jsem se rozhodl provést pouze krátký, věřím, že výstižný, úvod a zaměřím se především na informace pro čtenáře.

Dle prof. P. N. Beljanina ze [49, str. 27] lze použít následující definici:

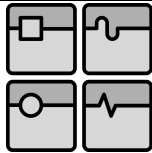
„Průmyslový robot je autonomně fungující stroj – automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí apod.), schopností samovýuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí.“

Průmyslové roboty má většina běžných a nezainteresovaných lidí zafixované pouze jako součást výrobní linky v automobilovém průmyslu, kde se využívají především ke svařování, lakování a manipulaci s karoseriemi. Někdo je dokonce zcela odsuzuje, jelikož je považuje za svou konkurenci na trhu práce. V jednom mají tito lidé pravdu. Automobilový a letecký průmysl tvoří valnou většinu aplikací průmyslových robotů. Postupem času, a není tomu krátce, však nacházejí uplatnění také v jiných odvětvích - v elektronickém a elektrotechnickém průmyslu, kde za nás vyrábějí a montují například televizory. Dále se objevují čím dál častěji i v potravinářském průmyslu, kde mezi hlavní aplikace patří plnění a balení potravinářských výrobků. Farmaceutický průmysl si žádá čisté prostory a už i v nich



můžeme na mnoha místech spatřit průmyslové roboty. V poslední době se dosti využívají k obsluze výrobních strojů a automatizovaných pracovišť. Z předchozích řádků vyplývá, že meze, určující možnost použití průmyslového robotu, se neustále zmenšují. V roce 2011 bylo celosvětově instalováno přibližně 139 000 robotických jednotek, kde největší prodej z hlediska kontinentů zaznamenala Asie. V Evropě má poloviční podíl na těchto instalacích Německo. Mezi přední výrobce průmyslových robotů lze zařadit právě Německo (KUKA), Japonsko (FANUC) nebo například Švýcarsko (ABB). Do roku 1989 patřilo i Československo mezi země, produkující kvalitní robotické technologie.

[7] [9] [49]



Typické aplikace průmyslových robotů:

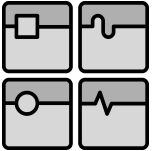
- Manipulace
- Broušení
- Leštění
- Odstraňování otřepů
- Povlakování
- Lepení
- Měření
- Montáž
- Paletizace
- Obrábění
- Tváření
- Řezání
- Svařování [20] [50]

Výhody průmyslových robotů:

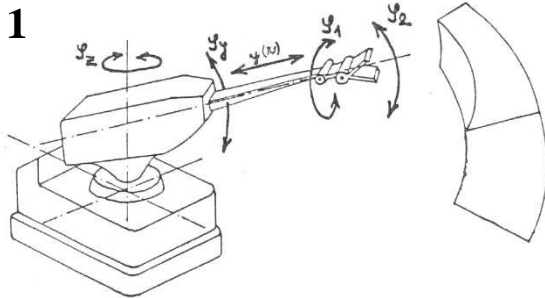
- Univerzálnost
- Rychlost
- Flexibilita
- Opakovatelnost
- Práce v nepříznivém či nebezpečném prostředí
- Rychlá návratnost investice
- Neustálý provoz
- Přesnost [7] [50]

Tab. 2.3: Typy průmyslových robotů dle kinematického uspořádání [8] [49]

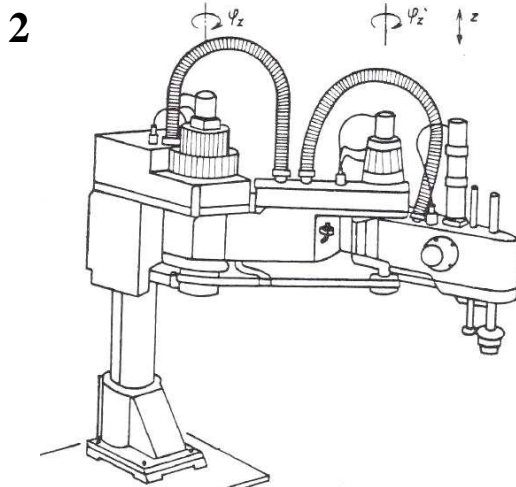
T T T		<ul style="list-style-type: none"> - 3 translační kinematické dvojice (KD) - objekt nemění svou orientaci - kartézský (pravoúhlý) pracovní prostor - jednoduché řízení - stabilní, přesný - nižší pohyblivost v prostoru - manipulační roboty
R T T		<ul style="list-style-type: none"> - 1 rotační a 2 translační KD - cylindrický (válcový) pracovní prostor - jednoduché řízení - masivní konstrukce



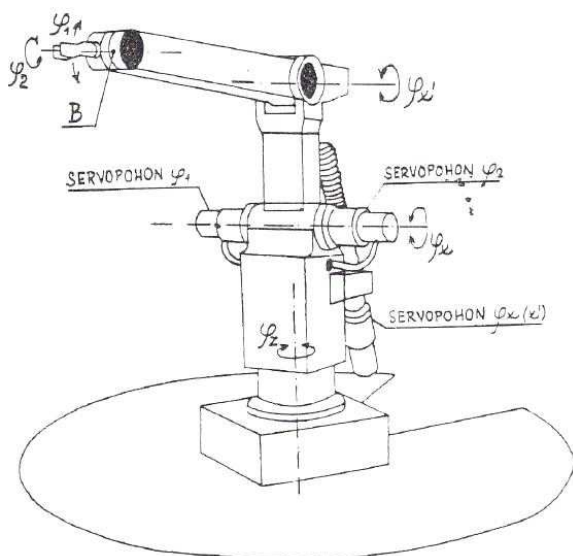
DIPLOMOVÁ PRÁCE

R
R
T

- 2 rotační a 1 translační KD
- sférický (kulový) pracovní prostor 1
- válcový pracovní prostor (SCARA) 2

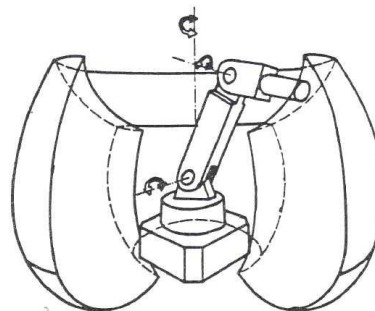


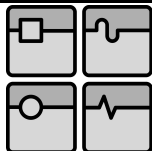
- vyšší pohyblivost
 - menší pracovní prostor
 - složité řízení
- SCARA – pro svislou montáž

R
R
R

- nepoužívanější typ
- 3 rotační KD
- torusový (angulární) pracovní prostor
- vyšší pohyblivost
- skvělá manipulační schopnost
- nižší přesnost
- složité řízení

Pracovní prostor robotů typu RRR





Měřicí technika

Předním a nejrozšířenějším zástupcem měřicí techniky využívající sériovou kinematickou strukturu je v dnešní době souřadnicový měřicí stroj (SMS). Podrobnější výklad o těchto strojích naleznete v následující kapitole číslo 3.



Obr. 2.15: Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo CRYSTA-Apex S 900 [6]

Srovnání s paralelní kinematickou strukturou





Pokud provedeme srovnání s paralelní kinematickou strukturou, můžeme se zmínit především o následujících výhodách a nevýhodách SKS:

Výhody

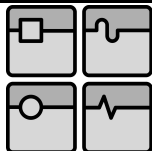
- Přímé odměřování jednotlivých os
- Jednodušší kompenzace chyb
- Vyšší přesnost a tuhost (vysoká výrobní přesnost a použití hmotných částí)
- Nižší nároky na řízení

Nevýhody

- Namáhání na ohyb a krut
- Nízké dynamické vlastnosti (rychlosti a zrychlení) z důvodu vyšších hmotností
- Vyšší cena
- Kumulace chyb a poddajností os v závislosti na vzdálenosti od základu a předchozích osách [24]

 	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 28
 	DIPLOMOVÁ PRÁCE	





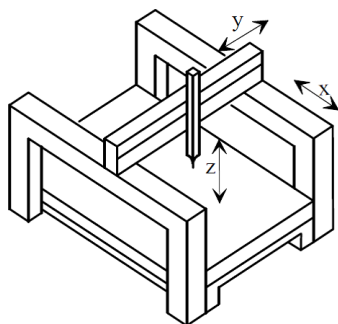
3 SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE A JEJICH SNÍMACÍ SYSTÉMY

3.1 Souřadnicové měřicí stroje (SMS)

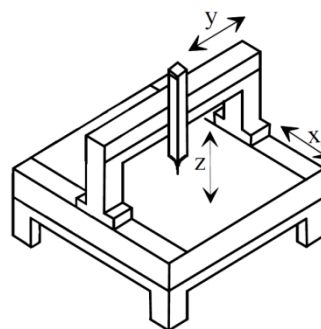
Princip souřadnicového měřicího stroje spočívá v měření bodů v prostoru v daném souřadném systému a pomocí výpočtů určování prvků, skládajících se z těchto bodů. [16]

Základní typy souřadnicových měřicích strojů

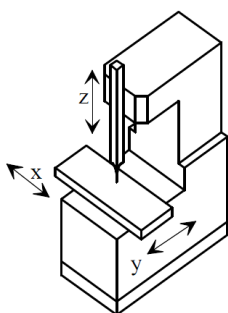
V současnosti existuje několik typů souřadnicových měřicích strojů. Mezi ty nejpoužívanější patří portálový, který se využívá pro většinu standardních aplikací. Další hojně užívanou koncepcí je mostový typ, umožňující snadné měření celých karoserií automobilů. Tyto a další typy jsou znázorněny na obrázcích níže. [16]



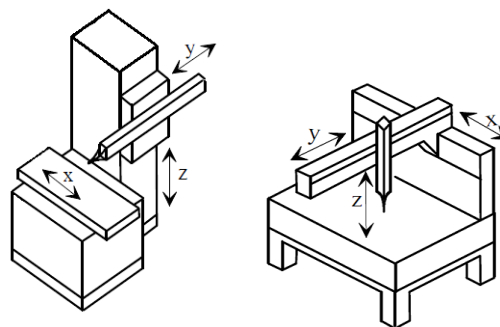
Obr. 3.1: Mostový typ [16]



Obr. 3.2: Portálový typ [16]



Obr. 3.3: Sloupový (stojanový) typ [16]



Obr. 3.4: Výložníkové typy [16]

Konstrukce

Všechny výše uvedené koncepce souřadnicových měřicích strojů se ve své podstatě skládají z podobných stavebních prvků. Nároky na přesnost a tuhost těchto prvků jsou srovnatelné s požadavky na typizované uzly obráběcích strojů. Rám, složený například z portálů, příčniců, stojanů a dalších, je ve většině případů realizován jako svařenec, jenž musí vykazovat vysokou rozměrovou a tvarovou stálost, resp. tuhost. Pro návrh rámu se využívá metody konečných prvků, která daný systém zkoumá jak z hlediska statického, tak dynamického. Další nepřehlédnutelnou a pravděpodobně také nejhmotnější částí je pracovní stůl v podobě granitové desky, která musí být dokonale rovná, čehož se dosahuje velmi přesným broušením a leštěním. Tyto desky disponují závitovými otvory pro upevňování

měřených součástí nebo upínacích přípravků. Některé koncepce strojů mají tyto desky posuvné, většina se však dělá statických. Pinola, část stroje nesoucí snímací systém v podobě snímací hlavice (hlavy), je buď v ocelovém nebo granitovém provedení se čtvercovým či kruhovým průřezem. Základ těchto strojů se klade na antivibrační podložky, které eliminují negativní vlivy z okolního prostředí. Pokud je tento typ ustavení nedostačující, využívá se pneumatického vyvažování pracovního stolu. Posuv jednotlivých os v kartézském souřadném systému je realizován pomocí řízených servomotorů a jednotlivé pohybující se části jsou uloženy na aerostatickém vedení (vzduchových ložiscích), které se vyznačuje minimálním třením a trhavým pohybem či vysokou tuhostí. Většina dnešních strojů používá tento typ vedení, avšak občas lze narazit i na vedení valivé. K řízení výše uvedených pohonů se používá zpětná vazba v podobě optických inkrementálních snímačů, umístěných na všech na sebe kolmých osách. Nejmodernější enkodéry disponují rozlišitelností až 1nm. [16] [28]

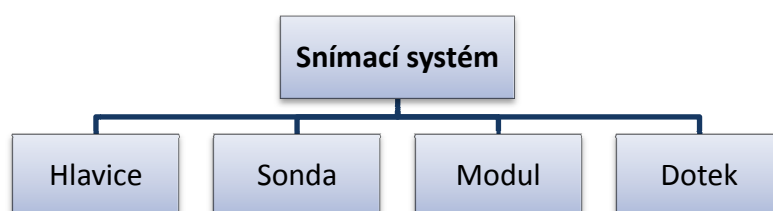
Retrofit

Souřadnicové měřicí stroje podléhají neustálému vývoji techniky a některé ze starších strojů již nesplňují mnohdy náročné požadavky zákazníků na přesnost, výkon či funkce. Ke zvýšení těchto vlastností je možno tyto stroje modernizovat. Princip modernizace u společnosti Renishaw spočívá v nahrazení zastaralého snímacího systému novým, při zachování celé konstrukce stroje. Jedná se především o nahrazení snímací hlavice a sondy, zabudování nové řídicí jednotky, osazení stroje novým odměřovacím systémem v podobě lineárních enkodérů (pravítek) a dalším příslušenstvím. V některých případech se musí nahradit také zastaralé vzduchové hadice či aerostatická ložiska. Součástí těchto balíčků je i zaškolení obsluhy pro nový metrologický software a samozřejmě kalibrace a vystavení certifikátu dle UKAS. Tato kalibrace se provádí pomocí laserových interferometrů a speciální sestavy koncových měrek. [1] [28]

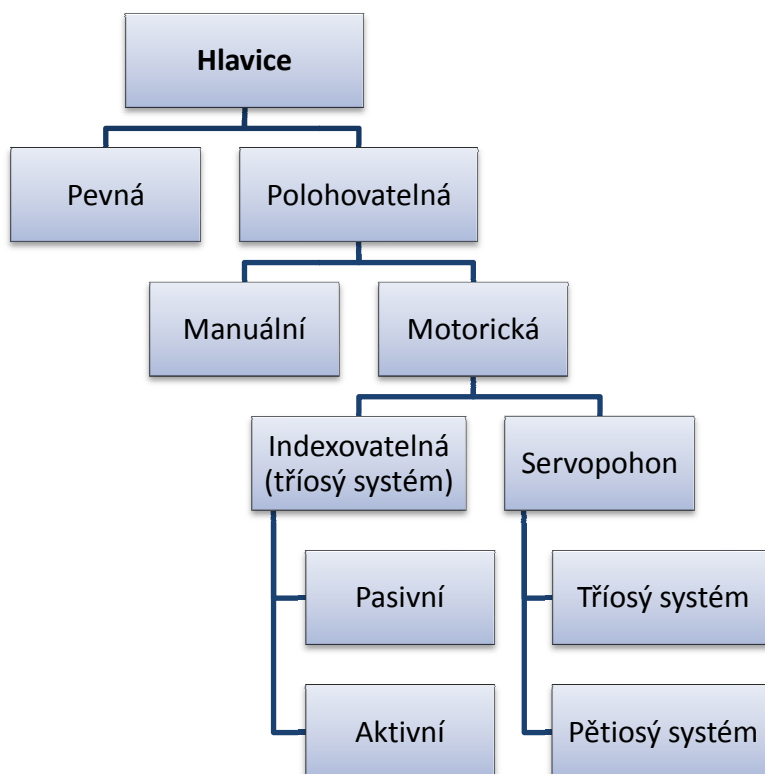
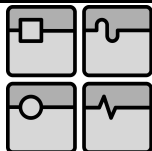
3.2 Snímací systémy souřadnicových měřicích strojů

Základními prvky snímacího systému souřadnicového měřicího stroje je hlavice, někdy též označována jako hlava sondy, sonda, modul sondy a snímací dotek. Hlavice se upevňuje na pinolu stroje, kde způsob upevnění záleží na konstrukčním řešení samotného stroje a hlavice. Dnešní nabídka společností zabývajících se těmito snímacími systémy je natolik obsáhlá, že obecné rozdělení snímacích systémů je poněkud obtížné. Do jisté míry to provést lze, je však třeba mít na paměti, že každá společnost často užívá své vlastní termíny či označení pro jednotlivé prvky těchto systémů. Z tohoto důvodu proto nelze zcela zobecnit termíny popsané na následujících stranách. Musím ještě podotknout, že součástí následujících listů jsou pouze současné technologie, nikterak však technologie budoucí či již nepoužívané.

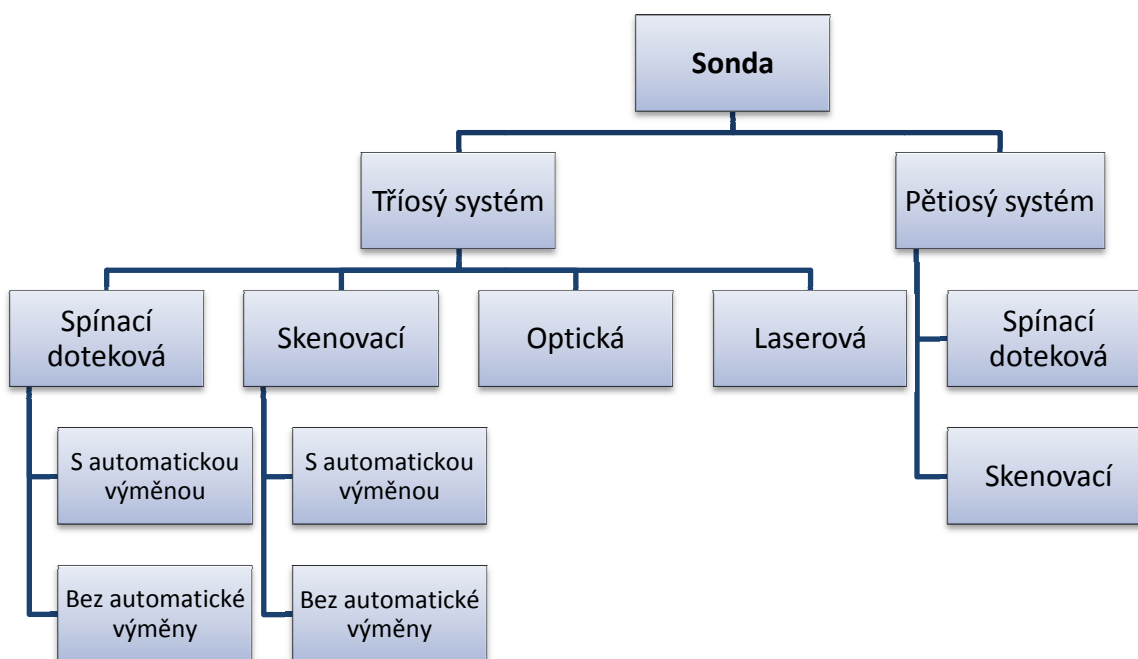
První spínací dotekovou sondu na světě zkonstruoval v 70. letech Sir David McMurtry, zakladatel a nynější generální ředitel společnosti Renishaw v Anglii. [1]



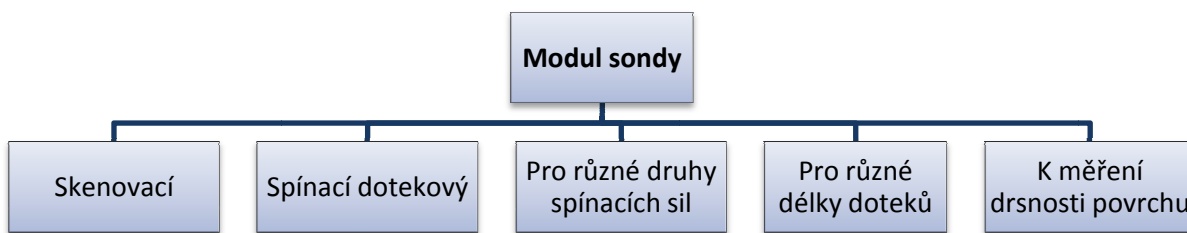
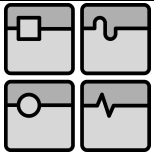
Obr. 3.5: Základní prvky snímacího systému souřadnicového měřicího stroje [1]



Obr. 3.6: Základní rozdělení hlavic souřadnicových měřicích strojů [1]



Obr. 3.7: Základní rozdělení sond souřadnicových měřicích strojů [1]



Obr. 3.8: Základní rozdělení modulů sond souřadnicových měřicích strojů [1]

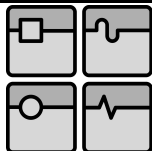
Poslednímu členu snímacího systému souřadnicového měřicího stroje, snímacím dotekům, je věnován celý zvláštní odstavec o několik stran dále.

Snímací hlavice (hlava)

V současnosti se dá za trend považovat pětiosá technologie měření. Ať už se jedná o hlavici REVO[®] (Obr. 3.10) pro skenování i dotekové snímání či PH20[™] (Obr. 3.9) pouze pro dotekové snímání, obě disponují jednou společnou výhodou, a to snížením dynamických vlivů stroje na přesnost měření. Díky možnosti snímat body či skenovat pouze pohybem samotné hlavy ve dvou osách dosahují tyto technologie velmi nízkých spínacích sil a s tím související rychlé odezvy sepnutí signálu. Jedná se tedy o rychlejší (rychlost skenování až 500 mm/s) systémy měření, avšak se zachováním přesnosti a opakovatelnosti. Hlavice PH20[™] využívá standardní spínací dotekové sondy TP20, kdežto systém REVO[®] je naprosto unikátní. Doteky pro REVO[®] jsou duté, vyrobené z uhlíkových vláken. Ze sondy vyzařuje laserový paprsek k zrcátku na opačném konci doteku. Zde dochází k odrazu a při vychýlení k sepnutí signálu a zaznamenání pozice. Výsledné souřadnice jsou poté dány jak pozicí a typem snímacího doteku, ale také natočením hlavy a polohou os souřadnicového měřicího stroje. Obě technologie využívají k pohonu obou os servomotory. REVO[®] na rozdíl od mechanických ložisek hlavice PH20[™] disponuje vzduchovými ložisky. Natočení je řízeno díky vestavěným rotačním enkodérům. Co se týče aplikací, je jasné, že se obě tyto technologie nejvíce využijí při měření složitých tvarových součástí s těžko dosažitelnými geometrickými prvky (lopatky, lopatková kola, sedla ventilů, tělesa čerpadel). Unikátnost hlavy REVO[®] ještě umocňuje možnost použití třech druhů sond, z nichž jedna slouží k měření struktury povrchu (Obr. 3.10). Tato sonda určitě zaujme schopností měřit drsnost povrchu od 0,05 až 6,3 Ra, nebo dále schopností pasivního natáčení kolem své C osy. Lze tedy konstatovat, že při měření struktury povrchu pomocí hlavice REVO[®] obsluha používá šestiosou technologii měření. Dotekem je zde diamantový hrot, který se kalibruje na speciální destičce s drsností povrchu 2 μm. [1] [2]



Obr. 3.9: Renishaw PH20[™] [2]



Obr. 3.10: Měření drsnosti povrchu pomocí systému REVO® [56]

Sondy

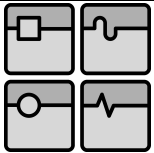
Na následujících řádcích jsou popsány dvě základní technologie shromažďování bodů na souřadnicových měřicích strojích.

Spínací dotekové sondy

Obecným principem této technologie je, že při kontaktu snímacího doteku s měřenou součástí dojde k sepnutí signálu, jenž zastaví pohyb celého souřadnicového měřicího stroje a dojde k odečtení aktuálních souřadnic z odměřovacího systému. Informace o těchto souřadnicích je nadále zpracovávána v příslušném softwaru. Výstupem spínacích dotekových sond je tedy pouze diskretní hodnota. To, jak je tento signál sepnut, už záleží na konkrétním výrobci, sondě a technologii. Nejčastěji se používají tzv. **kinematické** nebo **tenzometrické** sondy. Typickými aplikacemi tohoto druhu sond jsou prizmatické součásti s jednoduchou a jasně definovanou geometrií.

U kinematického typu sond se při doteku s měřenou součástí vychýlí mechanismus, skládající se ze tří válečků, které jsou umístěny po 120°, kde každý z nich je dále zasazen mezi dvojici kuliček. Při vychýlení tohoto mechanismu dojde k rozepnutí elektrického obvodu, resp. změně odporu a zaznamenání aktuální polohy doteku. Zpět do výchozí polohy je mechanismus přestavován pomocí pružiny. Typickým zástupcem je sonda TP20 společnosti Renishaw (Obr. 3.11) s opakovatelností v desetínách mikrometru a možností využití až sedmi výměnných modulů, rozdělených podle velikosti spínacích sil. Tyto moduly se k samotnému tělu sondy upevňují pomocí magnetu, který umožňuje automatickou výměnu v zásobníku. Jistou nevýhodou sond kinematického typu, kterou však lze do jisté míry eliminovat kalibrací, je nehomogenita spínacích sil ve všech směrech snímání. Tato negativní vlastnost se téměř nevyskytuje u tenzometrických sond.

Tenzometrické sondy pracují na podobném principu jako sondy kinematické, avšak namísto výše popsaného mechanismu obsahují tenzometry, které měří velikost spínací síly vznikající při kontaktu s měřenou součástí. Při překročení určité síly dojde k sepnutí signálu a odečtení aktuálních souřadnic. Tento způsob je považován za přesnější, vyznačuje se nižšími spínacími silami a chybami. Zástupcem této skupiny je sonda Renishaw TP200, určena především k měření rozměrů s nízkými tolerancemi. [1] [2] [28]

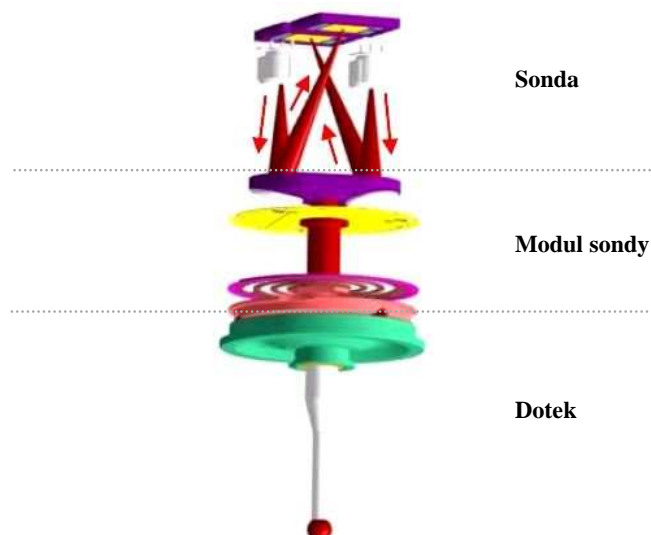


Obr. 3.11: Spínací doteková sonda Renishaw TP20 [1]

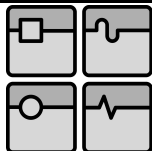
Skenovací sondy

Jedná se o mladší, konstrukčně složitější a dražší typ měřicích sond. Ve většině případů jsou schopny měřit jak diskretním spínáním bodů, tak spojitým skenováním. Možnost kontinuálního skenování je zároveň hlavní odlišností z hlediska funkce od spínacích dotekových sond. Díky této vlastnosti se často využívají pro měření tvarově složitějších součástí, jako jsou například lopatková kola či válce motorů automobilů. Uplatnění nacházejí také při požadavcích na rychlejší a přesnější vyhodnocování geometrických tolerancí na součásti. Princip spočívá v udržování neustálého kontaktu s měřeným povrchem pomocí konstantní přítláčné síly. K dosažení této přítláčné síly vyžadují vazbu na odměřovací systém stroje pro řízení jednotlivých servopohonů.

Sonda SP25M má ve svém těle zabudovaný zdroj záření infračerveného paprsku. Ten je směřován na zrcátka, umístěna v modulu sondy. Tato zrcátka jsou přes soustavu pružin a kinematicko-magnetický spoj spřažena se samotným snímáním dotekem. Při jeho vychýlení dochází ke změně směru odrazu paprsku a jeho zaznamenání pomocí příslušných světlocitlivých prvků. Při skenování se snímací systém snaží udržovat konstantní místo dopadu těchto paprsků. SP25M lze používat se čtyřmi snímacími moduly pro různé délky doteků. Součástí může být také adaptér na výše popsané technologie TP20 a TP200. [1] [2] [28]



Obr. 3.12: Princip funkce skenovací sondy SP25M [57]



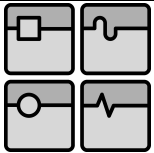
Obr. 3.13: Modulární systém Renishaw SP25M [60]

Optické sondy

Princip činnosti optických sond spočívá ve vyzařování světla na zkoumaný objekt pomocí LED osvětlení, které je integrováno přímo v sondě. Sonda obsahuje také 2D CCD světlocitlivý prvek, jenž snímá obraz dané oblasti. Obraz se následně převádí do speciálního vyhodnocovacího softwaru, kde je dále upravován, laděn a analyzován. Oblasti použití se dají zobecnit na aplikace jako je reverzní inženýrství, měření drobných, měkkých a choulostivých součástí a materiálů. V neposlední řadě také tištěných spojů. Software umožňuje zkoumat průměry děr, hrany, zaoblení a další tvary. Obrovskou výhodou je možnost automatické výměny sondy se standardními spínacími nebo skenovacími typy. Na obrázku níže je vyobrazeno použití optické sondy CMM-V, dodávané společností Hexagon Metrology. [29] [62]



Obr. 3.14: Optické měření pomocí CMM-V [29] [62]

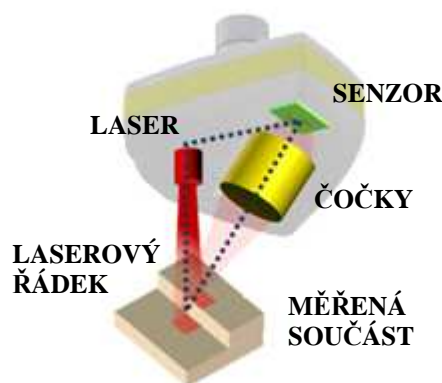


Laserové sondy

Tak jako výše popsaná optika, i laserové sondy je možno implementovat do rozsáhlých komplexních řešení s dotekovými sondami s možností automatické výměny. Většina dnešních snímacích systémů tohoto typu se nazývá řádkové lasery a pracují na principu laserové triangulace (*Obr. 3.15*). Zdroj vyzařuje laserové světlo v podobě řádku na povrch měřené součásti. Jeden řádek umožňuje nasnímat až 900 bodů, které jsou od sebe vzdáleny cca 2,2 μm . Celkový snímací výkon je poté přibližně 70 000 bodů za vteřinu. Precizní optika Nikon tento laserový řádek snímá a následně dochází k softwarovým výpočtům polohy součásti v prostoru. Laserový systém Nikon LC15Dx pracuje s chybou snímání 2,5 μm a jeho oblast použití je velice rozsáhlá. Využívá se jak v reverzním inženýrství, tak při klasické výrobní kontrole součástí různých materiálů (kov, plast, guma, keramika, jíl). Hlavní potenciál lze vidět v měření malých, křehkých, lesklých, lakovaných či měkkých materiálů a součástí, u kterých nelze použít běžné dotekové sondy. Tento snímací systém je kompatibilní s širokou škálou řídicích jednotek. Ve specifikacích výrobce je uvedeno, že ověřenými aplikacemi je:

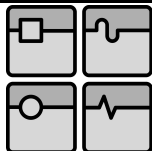
- Medicína (implantáty, protézy)
- Automobilový a letecký průmysl
- Elektrotechnický průmysl (mobilní telefony)
- Měření lopatek turbín

Měřenou součást lze analyzovat pomocí 3D vizualizace a barevných map ve vyhodnocovacím softwaru. [30]



Obr. 3.15: Nikon LC15Dx v praxi a jeho princip [30]

Dá se konstatovat, že bezdotykové měření prozatím nedosahuje takových přesností jako měření dotykové, ale za poslední roky byla tato oblast svědkem velkého pokroku. Nevýhodou bezdotykových snímacích systémů je požadavek na čisté pracovní prostředí. Jednotlivé výhody i nevýhody obou snímacích systémů mohou být využity k vytvoření univerzálního snímacího systému jak s kontaktním, tak bezkontaktním měřením pomocí výměnného zásobníku nebo speciální duální hlavy sondy). [30]



Snímací doteky

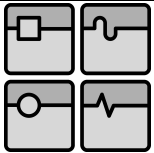
Jelikož oblast snímacích doteků je dosti obsáhlá, je mou snahou zde vystihnout pouze ty základní a nejdůležitější informace. Ty se budou týkat především typů snímacích doteků a materiálů, používaných při jejich konstrukci. V úvodu stojí za zmínku, že **snímací dotek** je část snímacího systému souřadnicového měřicího stroje, která se fyzicky dotýká měřené součásti. Přitom by měl splňovat dva základní požadavky – vysokou tuhost a velmi přesný tvar (okolo 0,1 μm). Nesplnění kvality těchto vlastností značně ovlivňuje přesnost měření. Ke zvýšení celkové přesnosti se rovněž doporučuje dodržovat tři pravidla, jimiž jsou: Nejkratší délka doteku, největší průměr kuličky a minimální počet spojů. V dnešní době je k dispozici celá řada tvarů těchto doteků. Mezi ty nejpoužívanější patří přímý kulový (\varnothing 0,3 až 12 mm), hvězdicový, obecně zalomený, diskový, válcový či polokulový dotek. Z hlediska užívaných materiálů se v konstrukci snímacích doteků vyskytuje keramika, karbid wolframu, titan, uhlíková vlákna, hliník, nerezová ocel, oxid zirkoničitý, nitrid křemíku a rubín. Poslední tři zmiňované zástupci se nejčastěji používají jako aktivní část snímacího doteku, ostatní jako stopka. Každý z nich má své výhody či nevýhody. Nejrozšířenějším je rubín, který je vhodný pro většinu aplikací. Tento typ materiálu vzniká obrobením krystalu, vzniknuvšího zpracováním oxidu hlinitého při teplotách okolo 2000 °C. Při skenování hliníkových součástí však vykazuje negativní adhezivní jev. Pro tyto aplikace se proto využívá doteků z nitridu křemíku. Podobný problém se objevuje také při skenování litiny, kde však dochází k abrazivnímu jevu a následným škrábancům jak na povrchu doteku, tak měřené součásti. V aplikacích měření litinových součástí se tedy využívá materiálu oxidu zirkoničitého. Snímací doteky disponují také velkým množstvím příslušenství (klouby, prodloužení, středy, adaptéry a další). [1] [33] [58]



Obr. 3.16: Typy doteků společnosti Renishaw [33]



Obr. 3.17: Rozmanitost materiálů používaných ke konstrukci snímacích doteků [58]



3.3 Ostatní příslušenství

Výměnné zásobníky

Dnes jsou již takřka nezbytnou součástí souřadnicových měřicích strojů výměnné zásobníky, jelikož ne vždy je jeden snímací systém či konfigurace doteku dostačující pro měření všech typů vyráběných součástí. Tyto systémy jsou jak ruční, kdy musí sama obsluha stroje vyměnit daný komponent snímacího systému, tak automatické, které se, jak již z názvu vyplývá, vyznačují schopností automatické výměny bez nutnosti opětovné kalibrace snímacího doteku. Tento fakt zcela jistě zrychluje nejen proces měření, ale i celkový výrobní proces, jelikož nedochází ke zbytečným vedlejším časům a prostojům, způsobeným kalibrací doteku po každé výměně. Dále je možno zásobníky dělit na stacionární (pevně připevněné ke granitové desce stroje) a pohyblivé. Většina zásobníků je tzv. pasivních, které k výměně využívají pohybu stroje. Na obrázku vpravo je zobrazen zásobník FCR25, který se díky speciálním adaptérovým vložkám stává ještě flexibilnějším, jelikož dokáže mezi sebou v automatickém cyklu vyměňovat komponenty dvou snímacích systémů. [1]



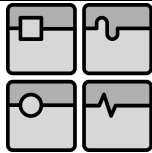
Obr. 3.18: Možnosti výměnného systému FCR25 [59]

Otočné stoly

Jako volitelné příslušenství k souřadnicovým měřicím strojům se dodávají otočné stoly. Tyto stoly se vyrábějí ve velmi přesných rozměrech například až do metrové velikosti průměru. Svou přítomností v pracovním prostoru stroje zvyšují počet os stroje, flexibilitu, možnosti a celkové časy potřebné pro měření. Stoly s odděleným pohonem dosahují ještě větších přesností z toho důvodu, že nedochází k tepelné roztažnosti, způsobené aktivitou pohonu a tím ke snižování přesnosti. Přes všechny výhody jsou otočné stoly často nahrazovány polohovatelnými snímacími systémy souřadnicových měřicích strojů. [29]

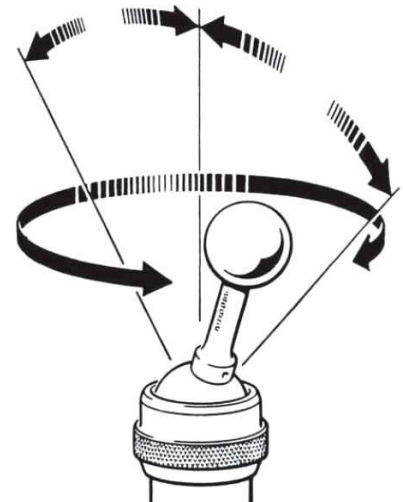


Obr. 3.19: Otočné stoly pro SMS [29]



Kalibrační koule a kalibrace snímacích doteků

Kalibrace snímacích doteků probíhá na extrémně přesné kalibrační kouli s daným průměrem a téměř dokonalým tvarem. Tyto koule se dodávají v několika rozměrových variantách, přičemž volba té správné vždy záleží na dané aplikaci a použitém snímacím systému. Kalibrace spočívá v získávání pozice středu, průměru a tvaru kalibrovaného snímacího doteku pomocí předem definovaných měřicích cyklů. Je pochopitelné, že kalibrace doteků osazených na spínacích dotekových sondách bude poněkud odlišná od skenovacích aplikací, kde je potřeba k získání dostatečných informací většího množství bodů a směrů snímání. [1]



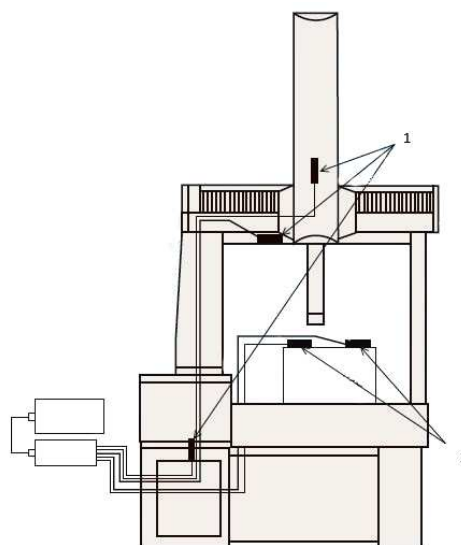
Obr. 3.20: Kalibrační koule Renishaw [1]

Automatizace

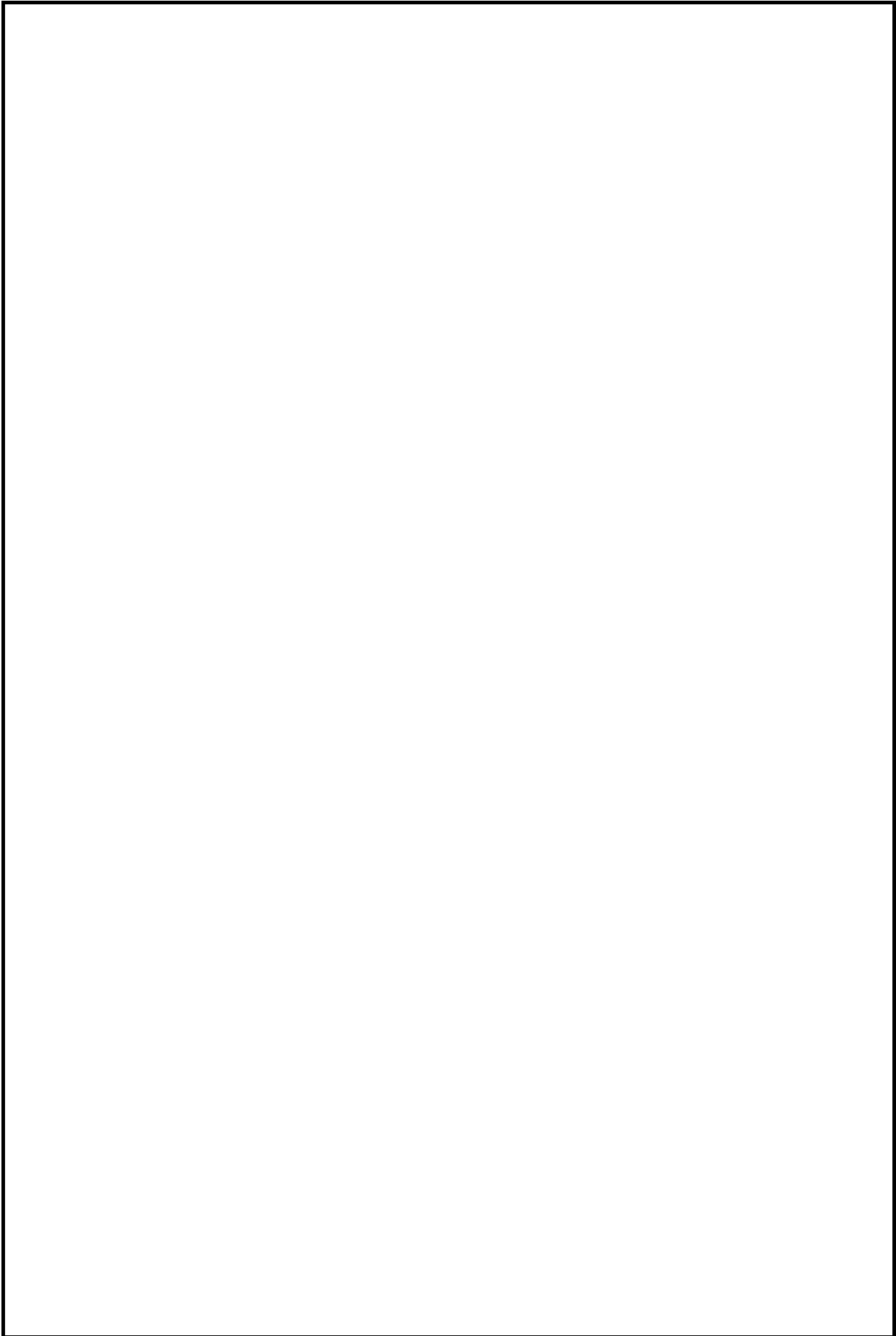
Informace o možnosti použití souřadnicových měřicích strojů v automatických linkách jsou k nalezení v kapitole č. 5 této práce, která se podobné problematice přímo věnuje.

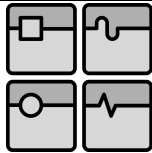
Senzory teploty

Pro získání ještě přesnějších naměřených hodnot se v současnosti u souřadnicových měřicích strojů hojně využívá teplotních senzorů. Ty se aplikují především na rám stroje, odměřovací systém 1 stroje a měřenou součást 2. Díky softwarovému vybavení následně dochází k teplotním kompenzacím jak vlivů deformace stroje, tak teplotní roztažnosti materiálu měřené součásti. [1] [63]



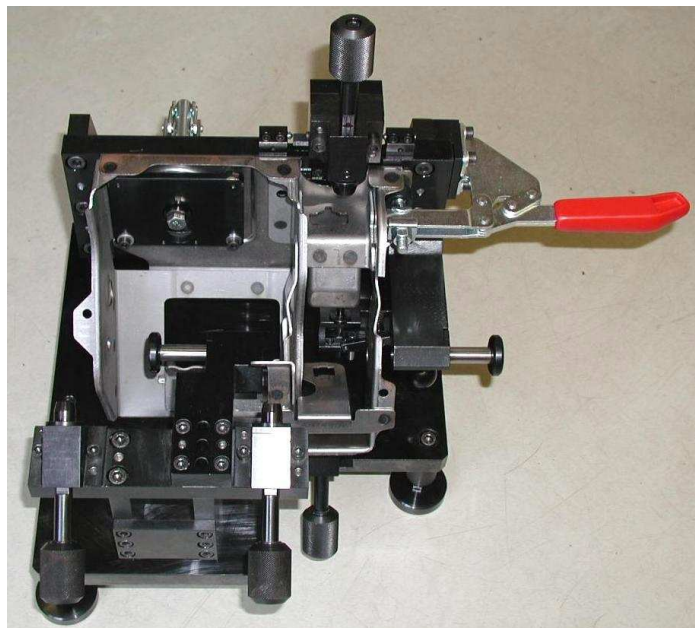
Obr. 3.21: Použití kompenzačních senzorů teploty [63]





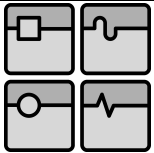
4 RENISHAW EQUATOR™

Slovo „equator“ pochází z anglického jazyka a do češtiny se překládá jako rovník. Název tohoto přístroje tedy přímo naznačuje jeho primární funkci. Jedná se totiž o porovnávací měřicí přístroj. Slovo porovnávací je zde zcela klíčové, jelikož člověk, jenž se alespoň trochu pohybuje ve strojírenství, resp. v měřicích technikách pozná, že Equator™ je osazen sondou SP25M, která se velmi často používá na souřadnicových měřicích strojích. Může se tedy stát, že bude považovat přístroj Equator™ za malý souřadnicový měřicí stroj. V následujících podkapitolách se budu snažit vysvětlit, proč tomu tak není a proč tedy neopomíjet ono důležité slovo **porovnávací**. [1]



Obr. 4.1: Amest KP-189 - mezní kalibr pro kontrolu úplné konzole pedálu [37]

Myšlenka vytvořit přístroj jako je Equator™ se zrodila na základě úspěšně využívané PKS u přístroje Renishaw incise™ (Obr. 2.12). Z předchozích kapitol vyplývá, že paralelní kinematické struktury existují již delší dobu. Společnosti Renishaw se však podařilo využít skutečného potenciálu těchto mechanismů k zacelení do té doby jisté mezery na trhu. Přístroj je primárně určen k použití v dílenských podmínkách, kde by měl nahrazovat konvenční jednoúčelové měřicí přípravky (Obr. 4.1), stanice a ruční měřidla. Jeho velkou výhodou je tepelná stabilita a možnost vytvoření měřicího programu pro takřka jakoukoliv součást. Z tohoto důvodu je návratnost investice při pořízení přístroje Equator™ téměř blesková, jelikož odpadá potřeba vývoje několika speciálních jednoúčelových měřidel. Sekundárním využitím je poté možnost integrace do automatizovaných linek, kde může pracovat jak s průmyslovým robotem, tak s obráběcími stroji, u kterých může docházet například k mezioperační kontrole a automatické korekci nástroje pomocí naměřených výsledků. Přístroj ke své činnosti nevyžaduje stlačený vzduch a je napájen přímo ze své řídicí jednotky. V současnosti je k dispozici ve dvou rozměrových variantách (Obr. 4.2). Za další benefit lze považovat sondu SP25M, jež může snímat body jak jednotlivě, tak stovky a tisíce bodů díky kontinuálnímu skenování, což umožňuje kontrolovat nejen délkové rozměry, ale i tvar. V neposlední řadě se Equator™ vyznačuje vysokou opakovatelností, skvělými dynamickými vlastnostmi a již výše zmiňovanou univerzálností. [1] [2]



Obr. 4.2: Porovnávací měřicí přístroje EquatorTM 300 a EquatorTM 300 EH [2]

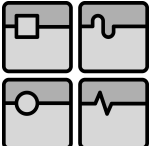
4.1 Konstrukce

Nejen laická, ale i část odborné veřejnosti nazývá EquatorTM hexapodem. Rád bych však tuto nepřesnou formulaci uvedl na pravou míru. Jedná se totiž o mechanismus koncepce **tripod**, jelikož disponuje pouze třemi řízenými osami (servovzpěrami). Poloha každé z nich je softwarově transformována do kartézského souřadného systému. Jedná se o tripod i z toho důvodu, že mechanismus přístroje EquatorTM má tři stupně volnosti (posuv v osách X, Y, Z), kdežto hexapod šest. Pohon těchto tří vzpěr je realizován rotačními DC servomotory přes ozubený převod koncepce pastorek – hřeben. Zpětná vazba je realizována optickým lineárním odměřováním polohy na vzpěrách a rotačními enkodéry v servopohonech. Tyto řízené vzpěry jsou uloženy v Kardanových závěsech (Hookových kloubech). Platforma, nesoucí sondu SP25 spolu s čidlem teploty, se díky výše popsanému trakčnímu systému může volně pohybovat v omezeném pracovním prostoru, který je popsán na obrázku 4.3. Pro zvýšení tuhosti je pohybuující se plošina opatřena ještě třemi páry podpěrných vzpěr, které jsou uloženy ve sférických ložiskách, stejně jako konce poháněných vzpěr. Tohle uložení eliminuje celkové namáhání prutů především na tah a tlak. Veškerá elektronika je zabudována ve spodní a horní litinové základně, jež jsou odděleny uhlíkovými podpěrnými nohami. [1] [2] [24]

4.2 Princip

Jak už bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, princip činnosti přístroje EquatorTM je vybudován na vysoce opakovatelném mechanismu paralelní kinematické struktury. Absolutní přesnost přístroje je ve srovnání se sériovou strukturou nízká, avšak částečně se tento rozdíl eliminuje vytvářením tzv. chybové mapy - individuálně, pro každý vyrobený přístroj. To je momentálně však věcí vedlejší a důležité je pochopit především proces porovnávání.

Na přístroji je možno aplikovat dva způsoby procesu porovnání. U každého z nich se používá tzv. **master součást**, jež slouží jako reference pro měření ostatních dílů. První způsob je jednodušší. Předpokladem je, že máme master součást vyrobenou velmi přesně – se jmenovitými (výkresovými) rozměry. Další postup spočívá ve změření této

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 43
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

součásti v módu *master*, při kterém EquatorTM každému bodu v prostoru přiřazuje předpokládaný jmenovitý bod. Soubor těchto bodů, resp. odchylek je ukládán na pevný disk řídicí jednotky. Zde je důležité poznamenat, že v těchto odchylkách jsou v podstatě zaneseny i všechny okolní vlivy (teplota, rychlost měření, vibrace atd.), působící na měření. Po změření *master* součásti dochází k měření v módu *measure*, kde je výše zmiňovaný soubor porovnáván s aktuálním měřením (aktuálními pozicemi). Výsledkem je odchylka od referenční součásti. Pokud bychom tedy porovnávali *master* součást s *master* součástmi, výsledky budou na jmenovitých hodnotách s chybou, způsobenou opakovatelností přístroje. Tento způsob je však méně používaný z důvodu drahé a v podstatě nemožné výroby stoprocentně přesné *master* součásti.

Existuje proto druhý způsob, využívající absolutní a vynikající přesnosti sériových kinematických struktur. Spočívá ve změření jakékoliv (vyhovující či nevyhovující) součásti na souřadnicovém měřicím stroji, během něhož jsou generována data v podobě skutečných bodů na součásti (odchylek od hodnot z CADu). Tato data jsou uložena do tzv. **kalibračního souboru**, který se dále nahraje do řídicí jednotky přístroje EquatorTM. Další postup je již zcela totožný s prvním způsobem, avšak nyní nedochází k přiřazování předpokládaných jmenovitých bodů pozicím v prostoru, ale jsou načítány skutečné body uložené v kalibračním souboru. Při měření další součásti stejného typu dochází k porovnávání těchto bodů s aktuálními body a výsledkem je skutečná hodnota (skutečné rozměry) součásti deformována pouze o hodnotu opakovatelnosti přístroje ($\pm 0,002$ mm). Tepelná nezávislost přístroje je dána výše popsaným procesem „masterování“, kdy se v podobě odchylek v důsledku teplotní roztažnosti zanáší také vliv teploty okolí a součásti. V praxi by využití této výhody vypadalo tak, že při znatelnější změně teploty okolí dojde k „remasterování“ (opětovnému referování či vynulování) přístroje na *master* součásti a dále by se pokračovalo v měření ostatních vyráběných dílů. [1] [2]

4.3 Software

Řídicí jednotka přístroje EquatorTM má podobu průmyslového počítače a celý tento systém běží na dvou vzájemně propojených operačních systémech:

- **Linux** – vhodný pro řízení v reálném čase
- **Windows** – vhodný pro spouštění aplikací

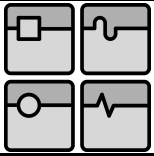
Systém EquatorTM se dodává ve dvou softwarových variantách:

- **MODUSTM Organiser** – pro dílenské pracovníky, bez možnosti vytváření programů
- **MODUSTM Organiser a MODUSTM Equator** – pro programátory

Obě tyto varianty je možno používat v několika jazykových verzích. V důsledku získávání nových zkušeností a snahy neustálého zlepšování a splňování požadavků zákazníků jsou přibližně každý měsíc vytvářeny nové softwarové aktualizace.

Další funkce a možnosti:

- Správce souborů
- Připojení na síť (Ethernet) – sdílení, záloha dat nebo tisk měřicích protokolů
- Použití čtečky čárových kódů
- Diagnostické funkce [1] [2]



Automation

Automation je speciální software vyvinutý společností Renishaw pro aplikace přístroje EquatorTM s robotem. Disponuje mnoha funkcemi, ze kterých se patří zmínit zejména:

- Mapování vstupů a výstupů
- Přiřazení měřicích programů
- Ostatní důležitá nastavení komunikace a správné funkce [2]

MODUSTM Organiser

Speciální uživatelské rozhraní pro správu a spouštění měřicích programů. MODUSTM Organiser je jakousi nadstavbou pro MODUSTM Equator. Jeho prostřednictvím lze vytvořit databáze neomezeného množství měřicích programů, ze kterých lze tyto skripty jednoduše spouštět. Prostředí je určeno především pro obsluhu přístroje, která není obeznámena s metodami programování. [2]

MODUSTM

Renishaw MODUSTM je speciální metrologický software pro vytváření měřicích programů různorodých součástí a běžně se používá například u souřadnicových měřicích strojů. Je postaven na standardních, ověřených a certifikovaných matematických algoritmech výpočtu měřených geometrických prvků a disponuje mnoha unikátními funkcemi, jako je například:

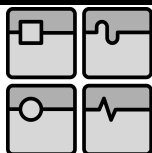
- Podpora pětiosého měření (u CMM)
- Offline programování včetně vizuální simulace a detekce kolizí
- Možnost importu mnoha užívaných formátů CAD modelů
- Tvorba jednoduchých textových, ale i komplexních grafických protokolů
- Uživatelsky definovatelný výstup výsledků

Většiny výše uvedených funkcí využívá i poněkud odlehčená verze tohoto softwaru, **MODUSTM Equator** s tím, že obě verze jsou pouze jakýmsi komunikačním mostem mezi světovými standardy v metrologii. Jedním z nich je protokol I++ DME, jehož funkcí je zabezpečení kompatibility komunikace nejrůznějších řídicích systémů měřicích strojů (serverů) s širokou řadou metrologických aplikací (klientů). Druhým je programovací jazyk DMIS, který pracuje s příkazy pro měření různorodých geometrických tvarů, pro vytváření souřadných systémů, tolerancí a konstruovaných tvarů. Součástí jsou i pokročilejší příkazy pro vytváření podmínek, cyklů apod.

Uživatel během programování vytváří pomocí intuitivního pracovního prostředí textové příkazy v jazyce DMIS. Tyto instrukce jsou při běhu programu zpracovávány a převáděny na příkazy I++, které se následně odesílají do aplikace UCCserver (UCCserver Equator) a odtud již putují do řídicí jednotky stroje nebo přístroje EquatorTM [1] [2] [39]

UCCserver Equator

UCCserver Equator, někdy též nazýván Equator server je software, jehož kořeny rovněž sahají k souřadnicovým měřicím strojům. Jeho hlavní funkcí je čtení I++ příkazů z aplikace MODUSTM, jejich transformace do příslušného formátu, který je následně odeslán do řídicí jednotky přístroje EquatorTM. Rovněž slouží k vytváření snímacích systémů, tzn. snímacích doteků, výměnných zásobníků či kalibračních koulí. [2]



RenCompare

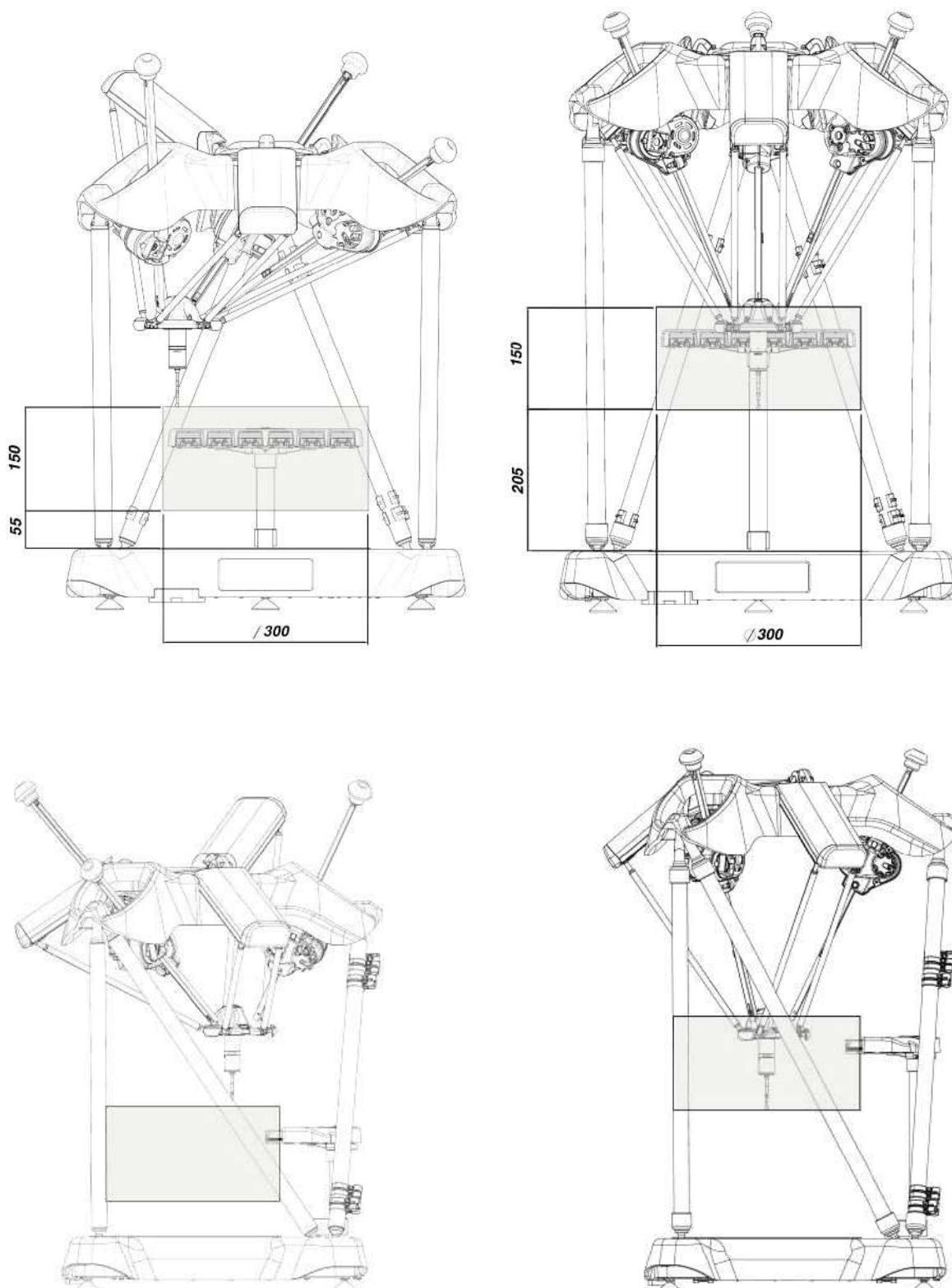
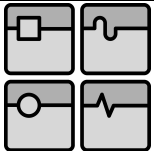
Software, který se stará o samotný proces porovnání. Tento proces je velice precizní, jelikož není srovnáván pouze prvek jako celek (např. průměr kružnice), nýbrž jednotlivé body jej tvořící. Během měření master součásti se data ukládají do zvláštního souboru na pevný disk řídicí jednotky, odkud jsou při měření dalších součástí načtena a použita k vyhodnocení rozdílu. Ten je zaslán do softwaru MODUSTM, kde dojde k vyhodnocení v rámci daného tolerančního pole a identifikace vyhovující nebo nevyhovující součásti. Z výše uvedeného plyne, že RenCompare data jak přijímá, tak odesílá. [2]

MODUSTM Reporter

MODUSTM Reporter slouží k vytváření šablon měrových protokolů, ke správě databází měření a exportu těchto dat například do formátu PDF. Protokoly z aplikace MODUSTM Reporter mohou obsahovat nejen základní textové výstupy, ale také grafické vykreslení tvaru a další. [1] [2]

Tab. 4.1: Technické parametry přístroje EquatorTM 300 [15]

Šířka	570 mm
Výška	700 mm
Hloubka	500 mm
Pracovní prostor (Obr. 4.3)	Rovina XY – \varnothing 300 mm
	Osa Z – 150 mm
Hmotnost	25 kg
Opakovatelnost	\pm 0,002 mm
Požadavek na upnutí	\pm 1 mm
Maximální rychlost snímání bodů	1000 bodů / s
Spotřeba elektrické energie (Eq. + ř. j.)	110 W (maximálně 750W)
Maximální rychlost pohybu	500 mm/s
Maximální zrychlení při pohybu	5000 mm/s ²
Maximální rychlost skenování	100 mm/s
Rozlišení odměřovacího systému	0,0002 mm
Max. hmotnost měřené součásti	25 kg
Napájení	100 ÷ 240 V AC \pm 10 %, 50 ÷ 60 Hz
Rozsah provozní teploty	10 ÷ 40 °C
Rozsah provozní vlhkosti	20 ÷ 80 %
Základní příslušenství	Řídicí jednotka (průmyslový počítač) Monitor (VGA nebo DVI) Klávesnice a myš (USB) Joystick Snímací systém SP25M Výměnný zásobník
Volitelné příslušenství	Signalizační maják Vymezovací deska Digitální jednotka s rozhraním I/O Upínací deska se závity M6, M8 nebo ¼“ Stop tlačítko



Obr. 4.3: Pracovní prostor přístrojů EquatorTM 300 a 300 EH [14]

5 AUTOMATIZACE V MĚŘICÍCH TECHNIKÁCH A PRŮMYSLOVÉ ROBOTY

Jelikož se tato práce z převážné části zabývá automatizací a průmyslovými roboty, pojednám v úvodu této kapitoly právě o těchto pojmech. Dle [46] jsou definice následující:

Automatizace

Pod pojmem automatizace rozumíme návrh a realizaci takových opatření, která jsou schopna samostatně spouštět, zastavovat stroj či řídit a optimalizovat jeho provozní parametry.

Kde, kdy a proč automatizovat?

- V nebezpečných a zdraví ohrožujících prostředích
- Pro zvýšení produktivity
- K získání vyšší jakosti
- Tam, kde je vysoká pravděpodobnost chyby člověka
- Pro udržení konkurenceschopnosti
- Ke snížení výrobních nákladů (mzdy a materiál)
- V oblastech, kde automatizace zvyšuje pohodlí člověka
- Při ochraně životního prostředí [46]

Definice průmyslového robotu je již uvedena v podkapitole č. 2.2, v sekci věnující se průmyslovým robotům a manipulátorům.

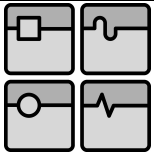
Co se rozvoje týče, urazila automatizace od svého počátku velký kus cesty. Od mechanicky ovládaných strojů pro výrobu jednoho typu součástí, přes realizaci počítačového řízení, využití pružných výrobních systémů a manipulačních zařízení až po dnešní velice komplexní podobu. Tento vývoj se zcela jistě jen tak nezastaví a v budoucnu lze očekávat znatelné zvýšení úrovně jednotlivých typických znaků automatizace. [8]

5.1 Automatizace v měřicích technikách

V této podkapitole jsou shrnuta již stávající řešení automatizovaných měřicích buněk a linek. Cílem těchto pracovišť je především zvýšit produktivitu a přesnost, a zároveň snížit chybu člověka, která se může při konvenčních metrologických postupech zanešt. Následující technologická řešení lze rozdělit na aplikace:

- **S průmyslovým robotem**
- **Bez průmyslového robotu**

Jelikož předpokládám, že čtenář sám logicky pozná, o jakou skupinu se jedná, neprovádím již další rozdělení a uvedení zástupců těchto skupin.



Automatizované měřicí pracoviště firmy Mitutoyo

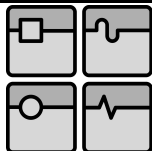
Společnost Mitutoyo již před několika lety přišla s řešením, kde do automatického měřicího cyklu začlenila průmyslový robot Fanuc se svými předními produkty z oblasti metrologie. Časová návratnost pořízení tohoto pracoviště by neměla překračovat jeden kalendářní rok a náklady na měření a provoz jsou oproti konvenčnímu měření sníženy přibližně o 335 %. Na obrázku 5.1 je schematicky znázorněno, jak by takové pracoviště mohlo vypadat. Princip funkce je prostý. Po obrobení jsou délkové či tvarové rozměry součásti změřeny pomocí jednotlivých měřicích přístrojů Mitutoyo a naměřená data analyzována a vyhodnocena v softwaru MeasurLink. Vyhovující součásti jsou dále posílány na expedici, nevyhovující jsou buď opracovány, nebo jsou označeny za zmetky. Pracoviště může být ve výrobním procesu zařazeno jak na konci, jako výstupní kontrola, nebo jako mezioperační kontrola mezi jednotlivými operacemi. Komunikace mezi jednotlivými prvky pracoviště je zajištěna pomocí speciální I/O jednotky. V pracovišti může být zaimplementována spousta přístrojů Mitutoyo. Jediné, co musí splňovat, je schopnost pracovat v automatickém (CNC) režimu. [64]

Možnost použití následujících technologií:

- Souřadnicové měřicí stroje Mitutoyo pro komplexní měření součástí
- Optické systémy Mitutoyo QuickVision[®]
- Mitutoyo Roundtest[®] - měření kruhovitosti, házení aj.
- Mitutoyo Contracer[®] - měření tvarových rozměrů
- Mitutoyo Surftest[®] - měření struktury povrchu
- Laserový mikrometr Mitutoyo [64]



Obr. 5.1: Schéma automatizovaného měřicího pracoviště firmy Mitutoyo [64]



Souřadnicové měřicí stroje v automatizovaných linkách

Určitou výhodou některých souřadnicových měřicích strojů je rovněž jejich schopnost pracovat v automatizovaných linkách či buňkách.

Jako úspěšně realizovaný příklad lze uvést projekt americké společnosti ACE (Automated Cells & Equipment, Inc.). Společnost je certifikovaným dodavatelem automatizovaných řešení s roboty značky Fanuc. Projekt, popsán na následujících řádcích, byl realizován v létě roku 2012 u firmy, specializující se na komplexní výrobu (obrábění, tepelné zpracování a montáž) velmi přesných dílů na zakázku. Příčinou zásahu společnosti ACE byla poptávka na řešení robotického pracoviště pro zvýšení kapacity, efektivnosti a produktivity výroby jedné z produkovaných součástí. Problémem byl fakt, že firma obdržela objemnou zakázku na tento typ součástí a stávající způsob výroby byl již nedostačující. [35]

Situace před řešením společnosti ACE

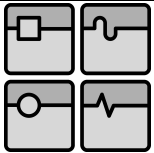
Jedná se o rozměrnou litinovou součást. Polotovar váží přibližně 50 kg a finální produkt má hmotnost okolo 20 kg. Výroba spočívala v obrábění na několika obráběcích strojích a vyžadovala 9 operátorů, pracujících v třisměnném provozu 7 dní v týdnu. Z výše uvedeného plyne, že výroba se den od dne stávala nejen méně efektivní, ale i dražší a samozřejmě náročnější. Proto bylo třeba rychle jednat. [35]

Situace po zásahu společnosti ACE

Robotické pracoviště (*Obr. 5.2*) obsahuje šestiosý průmyslový robot Fanuc. Ten je pojízdný na kolejové trati ve středním sektoru pracoviště, čímž získává ideální prostor k obsluze (zakládání/vykládání obrobku) do/ze tří soustružnických center, souřadnicového měřicího stroje a speciálního jednoúčelového stroje. Po kompletním výrobním procesu je součást transportována na konec tratě, kde je provedena paletizace. Doba výroby jedné součásti nyní činí přibližně 15 minut, kvalita se rapidně zvýšila díky měření mezi jednotlivými operacemi a pracoviště obsluhuje 1 operátor pouze několik hodin denně. [35]



Obr. 5.2: Koncepte robotické buňky společnosti ACE obsahující CMM [35]

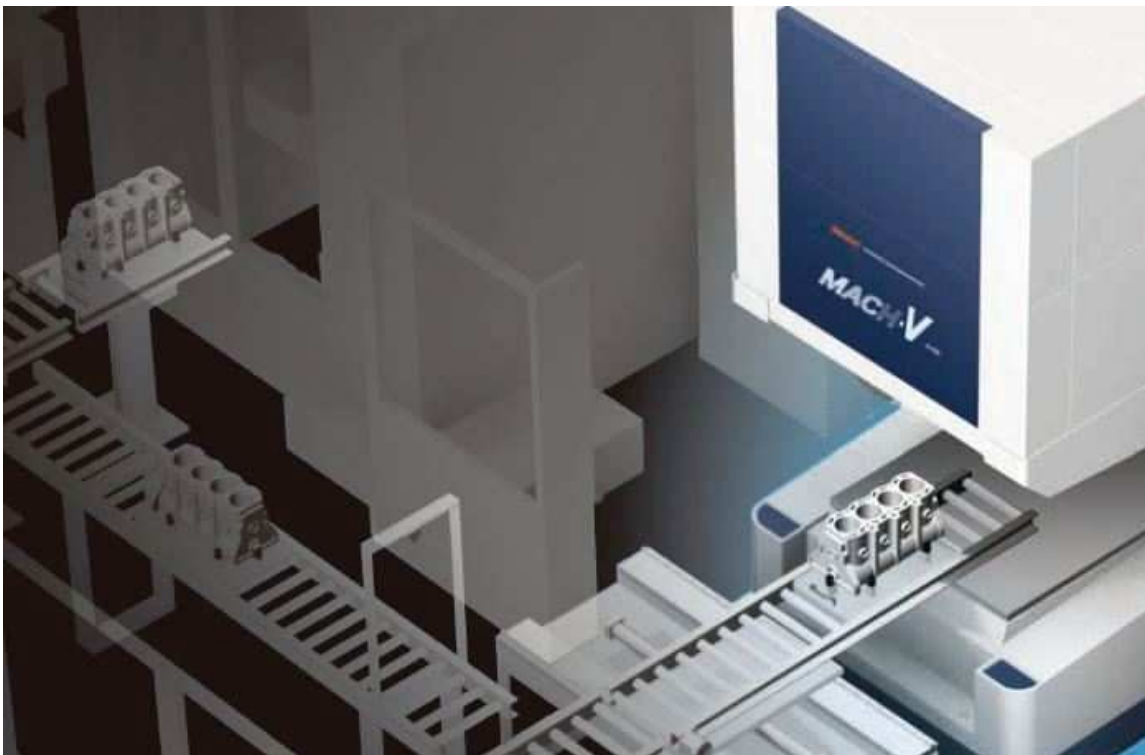


Automatizace souřadnicových měřicích strojů dle společnosti Mitutoyo

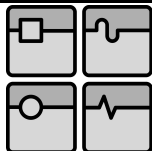
Společnost Mitutoyo disponuje mnoha řešeními, jež se týkají právě problematiky automatizace ve spojení s měřením. Od optických automatizovaných stanic (QV STREAM PLUS), přes vhodně uzpůsobené souřadnicové měřicí stroje (MACH-V), až po automatizované buňky s automatickou korekcí NC programu a znovuzpracováním daného výrobku (CORRECT PLUS). [38]

MACH-V

Jedná se o systém, který obsahuje speciálně uzpůsobený souřadnicový měřicí stroj s vertikálně polohovatelnou pinolou. Podobným systémem je také MACH-3A, který je ovšem horizontální. MACH-V se díky svým vlastnostem řadí mezi velmi unikátní systémy, ať už z hlediska využití v automatizovaných linkách, či samostatně. Koncepce stroje umožňuje snadný přístup v podstatě z jakékoliv boční strany, což výrazně usnadňuje způsob dopravy obrobku do pracovního prostoru měřidla. Nadstandardně vyšší rychlosti a zrychlení posuvu či měření (až 20 mm/s) dodávají tomuto systému velký potenciál pro využití jako samostatné měřicí stanice. Pro srovnání, klasický portálový souřadnicový měřicí stroj má tyto dynamické vlastnosti více než dvakrát nižší. Pokud se ovšem zaměříme na přesnost, je tomu zcela opačně. Pokud bychom měli uvažovat nad integrací v automatizované lince, jistě dojdeme k problému s vlivy teploty a prachu na měření. Co se týče prachu, MACH-V má pohony a systémy odměřování uloženy v izolovaných krytech. Stejně je tomu i u počítače a řídicí jednotky. Díky teplotní kompenzaci nejsou problémem ani teplotní rozdíly prostředí či obrobku. I při chladnutí obrobku ze 40 °C na 20 °C si při aplikování kompenzace stroj udržuje svou chybu měření do 5 μm. Výše uvedených rychlostí a zrychlení bez značného zvýšení nepřesnosti stroj dosahuje díky speciálnímu zdvojenému systému pohonu, který působí v těžišti a zabraňuje vzniku přesnost degradujícímu momentu. [65]

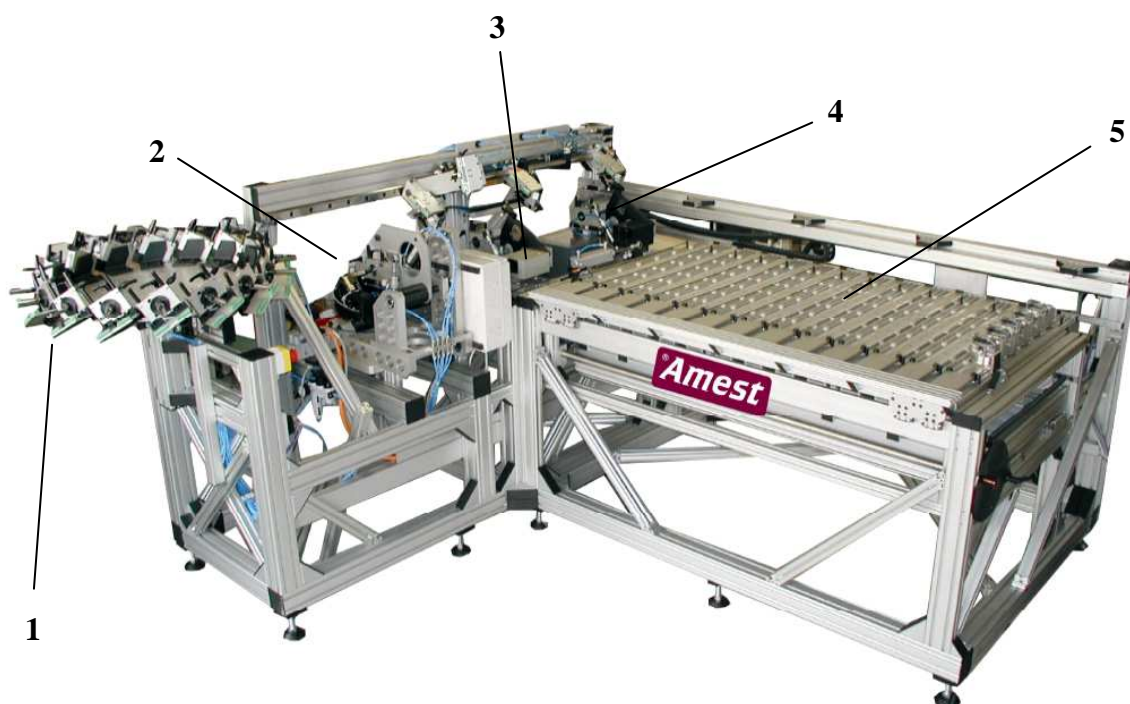


Obr. 5.3: Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo MACH-V v automatizované lince [65]



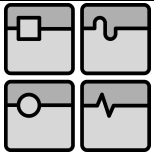
Měřicí stanice společnosti Amest

Amest nabízí mimo jiné i speciální měřicí stanice na kontrolu rozměrů, tvaru, kvality materiálu a hmotnosti dané součásti. Jelikož tyto stanice mohou být vybaveny automatickým podáváním, měřením a následným tříděním, nesmí řešení této společnosti v této práci chybět. Většina měřicích stanic disponuje speciální elektronikou, která průběžně analyzuje měřené hodnoty a na jejich základě řídí technologický proces (korekce či výměna nástroje, seřízení stroje). Největšího uplatnění nacházejí tyto systémy v automobilovém a železničním průmyslu, kde se používají k měření širokého sortimentu strojních součástí. Jako příklad byl vybrán měřicí automat KS-500 pro měření, vážení, značení a třídění pístů spalovacích motorů (Obr. 5.4). [37]



Obr. 5.4: Měřicí automat KS-500 společnosti Amest [37]

Měření jednoho pístu trvá přibližně 20 vteřin, kdy stanice automaticky kontroluje například válcovitost pístu, průměry otvorů pístního čepu, jejich kolmost na osu pístu a další. Z obrázku 5.4 je zřejmé, že písty putují ze vstupního zásobníku 1 do prostoru 2, kde dochází ke kontrole výše zmiňovaných rozměrů. Jejich přesun v rámci celé stanice je zabezpečen pomocí speciálních manipulačních ramen. Po změření dochází k vážení součásti 3 v přesnostech pohybujících se v desetinách gramu. Na základě zjištěné hmotnosti se dále písty označují mikrobodovým popisovacím zařízením 4 a třídí do třinácti hmotnostních kategorií. Celý tento proces se aplikuje z toho důvodu, aby se do jednoho spalovacího motoru montovaly pouze písty z téže kategorie, což výrazně prodlužuje životnost těchto strojů. Třídění do kategorií je zajišťováno pomocí manipulátoru a výstupního zásobníku 5, který je rozdělen právě do třinácti sektorů. Měření je realizováno prostřednictvím speciálních trnů a rychloříditelným portálem a jeho přesnost se pohybuje od 0,15 μm do 1 μm . Měřicí stanice KS-500 je 2460 mm dlouhá, 2318 mm široká a dosahuje do výšky 2200 mm. Obrovskou výhodou je také možnost přestavit stanici pro měření pístů jiných rozměrů. K vyhodnocování a statistickému řízení procesu se využívá software společnosti Amest. [37]

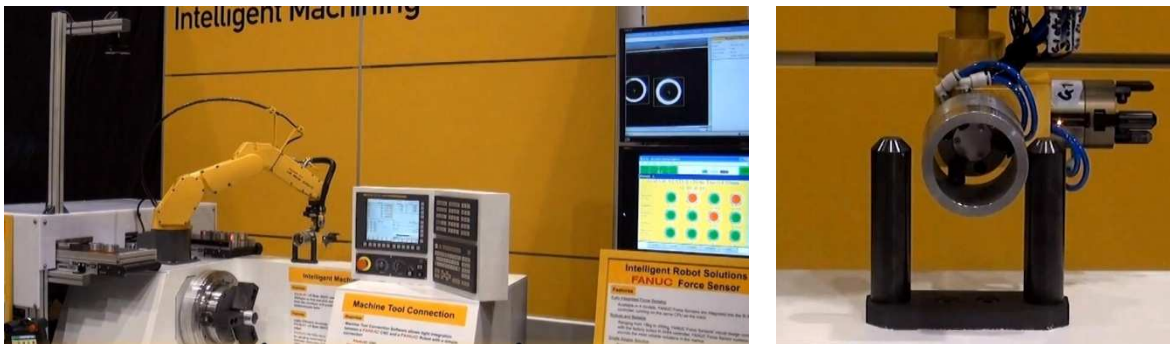


Měření pomocí silového senzoru robotu

Občas se na trhu objeví i poněkud netradiční měřicí metody prostřednictvím automatizační techniky. Příkladem může být kontrola vnějšího průměru soustružené součásti pouze pomocí silového senzoru na robotu. Konkrétně se jedná o senzor s označením FS-15iA, jenž je implementován na robot Fanuc LR Mate 200iC. [36]

Princip

Robot vyjme soustruženou součást ze sklíčidla soustruhu a následně do nich upne neopracovaný polotovár. Dále se přesune ke dvěma pólům, umístěným přímo na šasi obráběcího stroje. Měření je prováděno pomocí silového senzoru, jenž je součástí koncového efektoru robotu a výše popsaných pólů, které jsou od sebe vzdáleny o známou vzdálenost. Prostřednictvím doteku součásti na obou pólech systém vyhodnotí její průměr, porovná jej s tolerančním polem a roztřídí součásti na vyhovující a nevyhovující. [36]



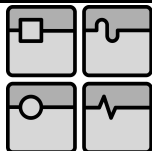
Obr. 5.5: Automatické měření pomocí silového senzoru FS-15iA [36]

Optické měření pomocí robotu

Jak plyne z předchozího příkladu, díky rozvoji automatizační techniky se v dnešní době zvyšuje využití průmyslových robotů jakožto prostředku k samotným technologickým operacím a měření. Na trhu existuje spousta řešení, která se bezdotykovým způsobem měření pomocí průmyslového robotu zabývají. Jejich výhody však lze shrnout do následujících bodů:

- Nízká pořizovací cena vzhledem k rychlé návratnosti investice
- Flexibilní řešení (změna pouhým přeprogramováním robotu)
- Tepelná odolnost (pravidelná kalibrace pomocí kalibrační koule)
- Automatizace, zrychlení a zvýšení výkonnosti procesu
- Snadné využití pro stoprocentní kontrolu
- Náhrada za standardní statické jednoúčelové měřicí stanice a přípravky
- Software pro přípravu měření a analýzu dat

Nejčastější aplikace pocházejí z automobilového průmyslu, kde se pomocí těchto systémů měří především funkční části nebo správná montáž karoserií a jiných dílů automobilů. 3D skener WLS400A (Obr. 5.6) je možno používat jak v automatickém (pomocí průmyslového robotu), tak ručním režimu. Jedná se o sofistikovaný měřicí systém, skládající se z digitální kamery a LED (Light Emitting Diode) osvětlení. Princip spočívá v promítnutí náhodného obrazového modelu na měřený objekt a jeho následném snímání pomocí kamery. Speciální software dále vytvoří 3D síť bodů, která se dále zkoumá a analyzuje z hlediska rozměrových vlastností. [40] [41] [42]

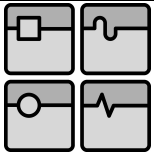


Obr. 5.6: Měření pomocí skeneru WLS400A – Hexagon Metrology [41]



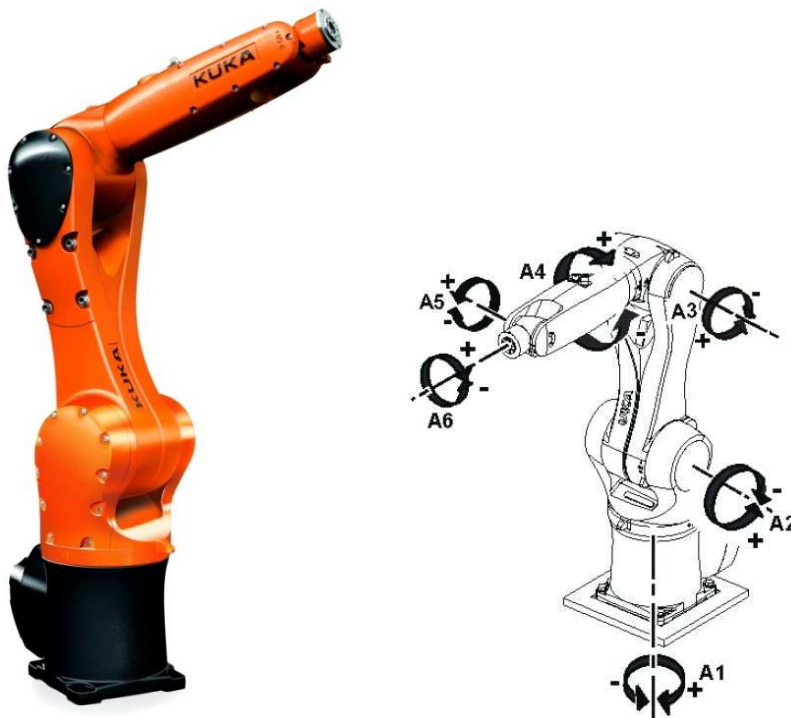
Obr. 5.7: Bezdotykové měření karoserie automobilu – řešení společnosti KUKA [61]

Z předchozích stran je evidentní, že použití průmyslových robotů v automatizaci měření je stále častěji objevující se jev. Jelikož je přístroj Equator™ relativně technologickou novinkou, nelze spekulovat o tom, že by konstruktéři ze společnosti Renishaw i s tímto druhem aplikace nepočítali. Schopnosti a technické parametry přístroje Equator™ již byly v této práci shrnuty. Lze tedy považovat za nezbytné, uvést zde také specifikace použitého průmyslového robotu KUKA KR 6 R900 sixx. Je mu věnována následující kapitola č. 5.2.



5.2 KUKA KR 6 R900 sixx (KR AGILUS)

Průmyslový robot značky KUKA s označením **KR 6 R900 sixx**, někdy též nazývaný KR AGILUS, je sice jeden z řady menších průmyslových robotů, které tato německá společnost produkuje, disponuje však schopností pracovat ve velmi vysokých rychlostech. Dá se rovněž považovat za relativně nový robot, jelikož byl uveden na trh v roce 2012, kdy i na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně v témže roce budil velice kladný ohlas. Jedná se o šestiosý robot s na první pohled poměrně elegantním designem (Obr. 5.8). Jelikož právě tento robot bude použit při realizaci pracoviště, které je navrhováno v této práci, je důležité shrnout jeho specifikace a parametry. [3]

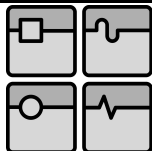


Obr. 5.8: Průmyslový robot KUKA KR 6 R900 sixx [67] [68]

Tento robot lze upevnit nejen standardně na podlahu, ale rovněž na stěnu či strop. Případným kolizím pak zabráňují vestavěné brzdy ve všech osách. Jeho údržba je minimální, jelikož všechny pohony a převody disponují dlouhotrvajícím mazivem. Díky vysoké tuhosti robot dosahuje velice dobré opakovatelnosti a přesnosti v celé pracovní oblasti. V neposlední řadě je zde třeba zmínit i fakt, že veškeré zdroje energií a přenosu dat jsou ke koncovému efektoru vedeny vestavěnými přívodními kabely a vodiči v těle robotu. Jedná se jak o prvky sběrníkové, tak pneumatické. [3] [67] [68]

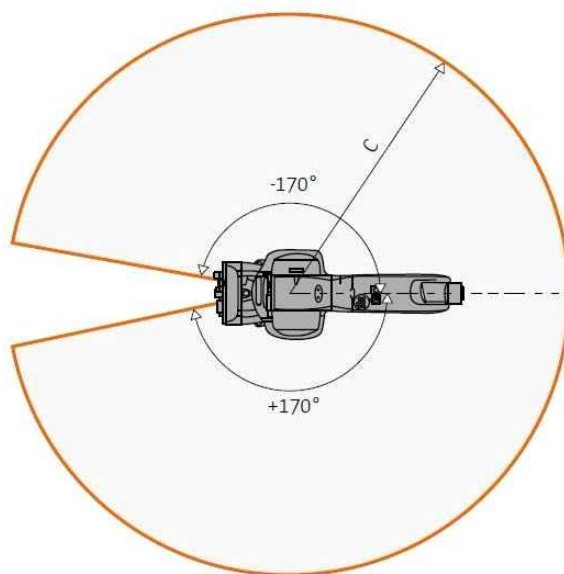
Pracovní oblast

Pracovní oblast robotu je samozřejmě omezena délkou jednotlivých ramen a možnostmi natočení jednotlivých os. Jestliže se zaměříme na maximální dosah robotu při pohledu shora (Obr. 5.9), zjistíme, že se jedná o kruhovou výseč o poloměru 901,5 mm (rozměr C) a středovém úhlu 340°. Z toho plyne, že pohyb osy 1 je omezen na $\pm 170^\circ$. Nejvyššího bodu ve svislé ose lze dosáhnout ve výšce 1 276 mm od upínací plochy (Obr. 5.10 – rozměr A). Robot lze polohovat i 344 mm pod úroveň této upínací plochy. Zbývající rozměry pracovní oblasti jsou shrnuty v tabulce 5.1 a na obrázku 5.10. [3] [67] [68]

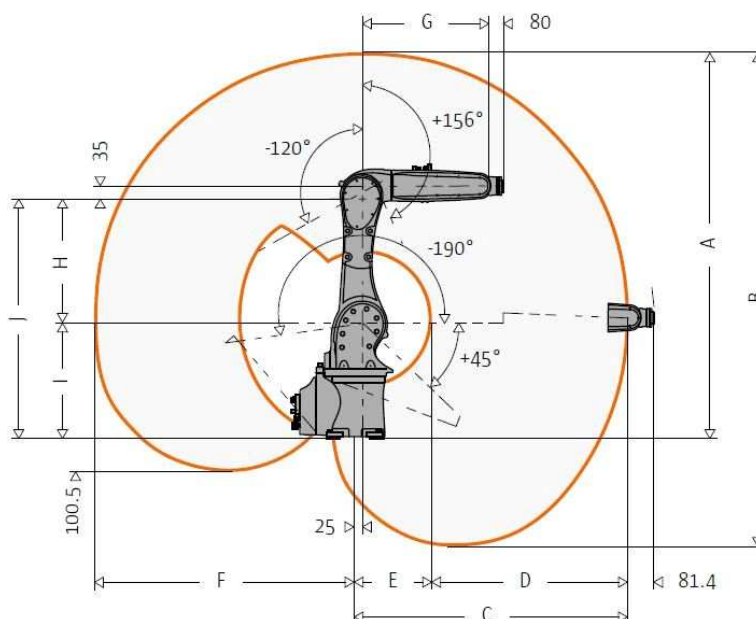


Tab. 5.1: Pracovní oblast robotu KR AGILUS v číslech [67]

A	1 276 mm
B	1 620 mm
C	901,5 mm
D	656 mm
E	245,5 mm
F	851,5 mm
G	420 mm
H	455 mm



Obr. 5.9: Pracovní oblast robotu – horní pohled [67]



Obr. 5.10: Pracovní oblast robotu – boční pohled [67]

Tab. 5.2: Specifikace průmyslového robotu KUKA KR 6 R900 sixx [3] [48] [67] [68]

Počet os	6	
Maximální zátěž	6 kg	
Maximální dosah	901 mm	
Hmotnost	52 kg	
Řídicí systém	KR C4 compact	
Stupeň ochrany	IP 54 (Ochrana před prachem, stříkající vodou v jakémkoliv směru a doteku s jakoukoliv pomůckou)	
Opakovatelnost v poloze	± 0,03 mm	
Rozměry příruby robotu	(209 x 207) mm	
Ovládací panel	KUKA smartPAD	
Provozní teplota	(±5 až +45) °C	
Rozsah jednotlivých os	Osa 1	±170°
	Osa 2	+45°/-190°
	Osa 3	+156°/-120°
	Osa 4	±185°
	Osa 5	±120°
	Osa 6	±350°

Řídicí jednotka KR C4 compact

KR C4 compact je menší variantou řídicí jednotky KR C4. Při téměř polovičních rozměrech však disponuje většinou funkcí jako její „větší sestra“. Díky kompaktním rozměrům nachází uplatnění především v omezených prostorech. Schopnost variabilní konfigurace dělá z jednotky KR C4 všestranný řídicí systém. Díky regulaci funkce ventilátoru a snížení energetické spotřeby v pohotovostním režimu až o 95% se stává také energeticky úspornou. Další z obrovských výhod je schopnost řízení nejen robotu KUKA, ale také externích os. V podstatě se jedná o systém vhodný pro řízení celého procesu, jelikož zajišťuje ovládání bezpečnosti, logických funkcí, pohonů robotu a umí používat programovací jazyk CNC strojů (tzv. G-kód) a PLC jednotek. Typy sběrnic:

- PROFINET
- EtherNet / IP
- PROFIBUS
- DeviceNet
- EtherCAT [3] [67]



Obr. 5.11: Řídicí jednotka KR C4 compact [67]

Tab. 5.3: Specifikace řídicí jednotky KR C4 compact [3] [48] [67]

Rozměry (V x Š x H)	(271 x 483 x 460) mm
Procesor	Vícejádrový
Hmotnost	33 kg
Paměť	HDD, možnost připojení i SSD
Stupeň ochrany	IP 20 (Ochrana před vniknutím pevných těles větších než 12,5 mm)
Napájení	208 až 230 V AC ($\pm 10\%$), 49 až 61 Hz
Rozhraní	USB, Ethernet, DVI-I

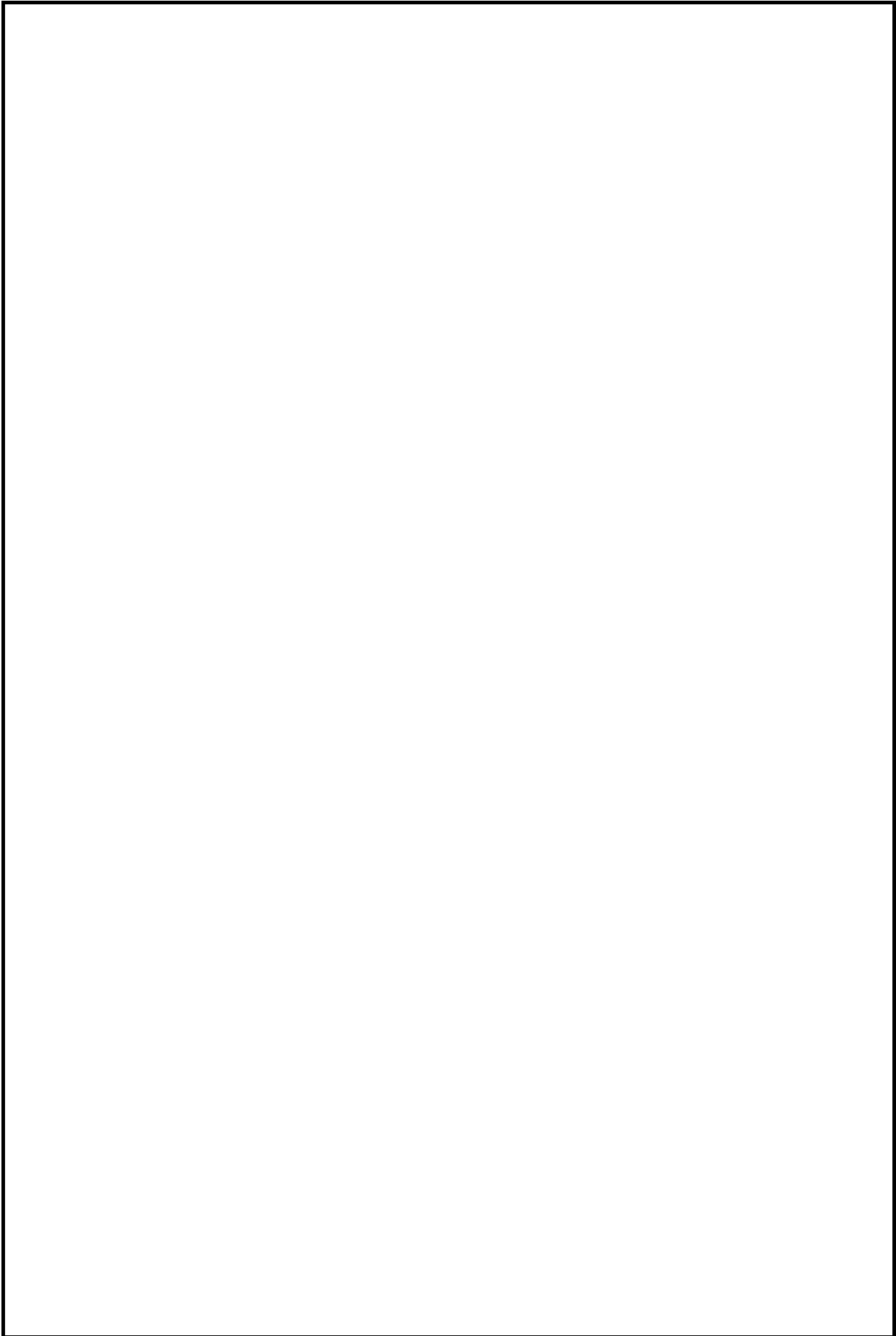
Ovládací panel KUKA smartPAD

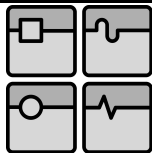
K programování průmyslového robotu KUKA KR 6 R900 sixx je využíván moderní a, dle mého názoru, dobře ergonomicky stavěný ovládací panel s označením KUKA smartPAD (Obr. 5.12). Jelikož jsme v době, kdy je světový trh zahlcen tzv. „chytrými telefony“, nebude trvat dlouho a průmyslové roboty budou programovatelné z jim podobných přístrojů, pravděpodobně také bezdrátově. KUKA smartPAD můžeme považovat za přechodovou technologii mezi dnes již zastaralými ovládacími panely se spoustou tlačítek a jiných ovládacích prvků a budoucími bezdrátovými technologiemi.

SmartPAD je zcela jistě uživatelsky příjemný, jeho obsluha je jednoduchá. Hmotnost dosahuje 1,1 kg a jeho rozměry jsou (80 x 330 x 260) mm. Jeho uživatel je neustále informován o probíhajících operacích díky speciálním interaktivním dialogům, objevujícím se na obrazovce. Když už byla zmíněna obrazovka, je třeba vyzdvihnout fakt, že se jedná o dotykovou a antireflexní technologii. Display má velikost 8,4“ a pracuje s rozlišením (600 x 800) pixelů. Z obrázku 5.12 je patrné, že nechybí nouzové stop tlačítko, přepínač módů, 6D myš nebo tlačítka pro řízení jednotlivých os robotu. Fyzicky zde chybí klávesnice, která je však nahrazena virtuální klávesnicí na dotykové obrazovce. Práci nám může dosti usnadnit přítomnost USB portu, přes který můžeme exportovat a importovat data, nebo možnost odpojení panelu přímo za chodu a jeho použití u jiného robotu. [3] [67]



Obr. 5.12: Ovládací panel KUKA smartPAD [67]





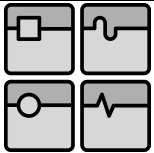
6 PROGRAMOVÁNÍ PŘÍSTROJE EQUATOR™

Na základě získaných zkušeností autora této diplomové práce lze konstatovat, že příprava na prezentaci přístroje Equator™ nespočívá pouze v samotném programování, ale v dalších krocích jemu předcházejících, které zde nelze opomenout. Po obdržení součásti a výkresové dokumentace je důležité nejprve analyzovat tvar, materiál a rozměry součásti. Dalšími důležitými informacemi jsou kromě výše uvedených charakteristik hlavně rozměry, které je třeba měřit a maximální čas měření, který zákazník požaduje.

Znalost výše uvedených informací nám zcela jistě usnadňuje následnou volbu vhodné orientace součásti v pracovním prostoru, typ upínacího přípravku a konfigurace měřicích doteků. Je však třeba mít na paměti, že tyto tři poslední uvedené prvky spolu souvisí, mají mezi sebou pevné vztahy a navzájem se ovlivňují. Chci tím říct, že pokud změním orientaci součásti, budu pravděpodobně muset řešit i jiný upínací přípravek a odlišné konfigurace doteků.

Proces programování přístroje Equator™:

- *Co je důležité mít k dispozici?*
 1. Výkresovou dokumentaci, přinejlepším také 3D model součásti
 2. Fyzický vzorek součásti (pokud není, je zde možnost vytvořit program tzv. offline – nutno mít 3D model)
 3. **Požadavky na měření:** Co všechno je třeba měřit?
Jaký má být maximální čas měření?
Jakým způsobem se součást měří nyní?
- *Hlavní kroky:*
 1. **Analýza výkresu** – pochopení všech požadovaných rozměrů a tolerancí, získání představy o způsobu upnutí, vyrovnání součásti a použitých snímacích doteků
 2. **Příprava 3D modelu** – pokud je k dispozici, je třeba analyzovat model, zda jeho souřadný systém souhlasí se způsobem vyrovnání, získaným v kroku č. 1. Pokud ne, musí se provést odpovídající posunutí či natočení souřadného systému
 3. **Volba upínacího přípravku** – většinou se jedná o provizorní upínací přípravky stavebnicových typů, sklíčidla nebo svěráky. Možným řešením je rovněž použití upínacího přípravku zákazníka (*podkapitola č. 6.2*)
 4. **Volba snímacích doteků** (*podkapitola č. 6.3*)
 5. **Kalibrace snímacích doteků** (*podkapitola č. 6.3*)
 6. **Programování** (*podkapitola č. 6.4*)
 7. **Vytvoření kalibračního souboru** (*podkapitola č. 6.5*)



6.1 Měřená součást

Z obrázku 6.1 je patrné, že se jedná o rotační soustruženou součást menších rozměrů. Materiálem je ocel, což nám umožňuje použití magnetického způsobu upínání (*kapitola 6.2*). Součást se momentálně měří konvenčními metodami, jako jsou ruční měřidla (posuvná měřítka, mikrometry, kalibry) či výškoměry. Zautomatizováním procesu měření se jistě dosáhne vyšší přesnosti měření, protože eliminujeme chybu operátora.

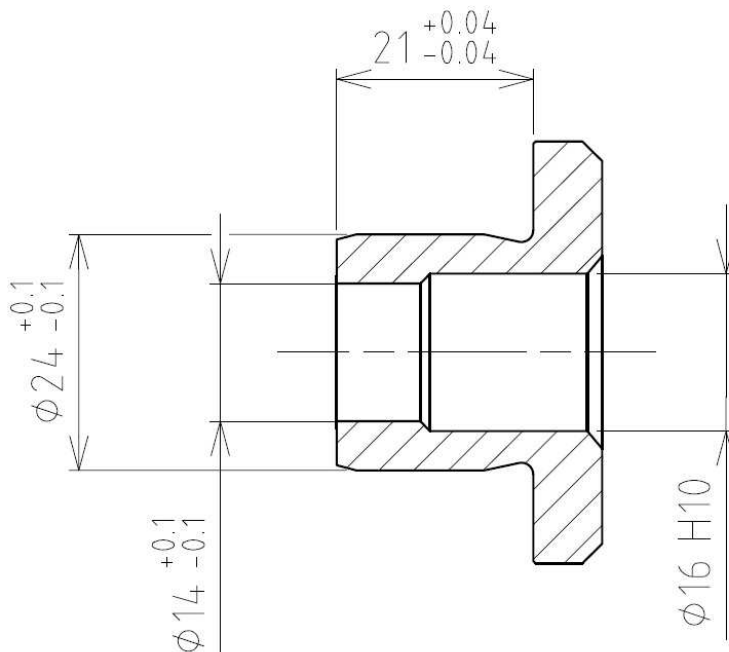


Obr. 6.1: Měřená součást (foto autor DP)

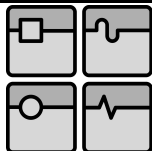
Požadované rozměry k měření (Obr. 6.2):

- $\text{Ø } 24 \pm 0,1$
- $\text{Ø } 14 \pm 0,1$
- $\text{Ø } 16 \text{ H}10$
- Výška $21 \pm 0,04$

Co se týče času měření, není zde striktně dán. Jelikož se jedná o měření využívané při prezentacích, není třeba tento čas hnát do extrémně nízkých hodnot. Na druhou stranu, je nutné také ukázat výrazný potenciál přístroje EquatorTM, proto se výsledný čas bude odvíjet od těchto faktů. Na obrázku 6.2 je autorem této diplomové práce nakreslena část výkresové dokumentace měřené součásti pouze s měřenými rozměry dle originální předlohy výkresu od zákazníka.



Obr. 6.2: Zjednodušený výkres součásti s vyznačením měřených rozměrů



6.2 Upínací přípravek

Velmi důležitým krokem během přípravy měřicího programu je volba upínacího přípravku. Tento krok nám nemůže být ani z části lhostejný, jelikož pokud měřený díl neupneme dostatečně pevně a kvalitně, může se nám to zanedlouho vrátit v podobě nepřesných či zkreslených naměřených hodnot a špatné opakovatelnosti měření. Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, upínací přípravek však nelze brát jako samostatnou složku pracovního prostoru. Způsob upnutí součásti nám ovlivňují jak požadované rozměry ke kontrole, tak snímací doteky. Při volbě přípravku musíme mít proto neustále na paměti existující vazbu mezi těmito elementy.

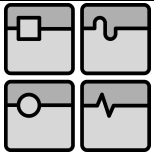
Provizorní přípravek

Jelikož je součást rotačního tvaru (*Obr. 6.1*), bylo jako upínací přípravek zvoleno univerzální sklíčidlo společnosti KOMEG (*Obr. 6.3*). Tato společnost má ve své produktové řadě kromě tohoto sklíčidla i široký sortiment upínacích prvků stavebnicového typu. Jak je patrné z obrázku 6.3, sklíčidlo je tříčelistové, s výměnnými čelistmi pro upínání jak za vnější, tak vnitřní průměr. Orientace byla volena taková, aby se osa součásti shodovala s osou z měřicího přístroje. Zvolená orientace je optimální, poněvadž ke všem kontrolovaným rozměrům je snadný přístup a je usnadněna i volba snímacího doteku tím, že touto orientací se jeho výběr zúžil pouze na tzv. přímé doteky. Přípravek je umístěn ve střední části upínací desky přístroje Equator™ pomocí dvou šroubů a podložek M6. V poslední řadě je třeba zmínit, že sklíčidlo je pouze manuální, takže pro vyjmutí či upnutí součásti je třeba použít speciálního klíče. To si však odporuje s využitím přípravku v automatickém cyklu. Tento přípravek byl proto použit pouze při programování, ladění a testování měřicího programu.



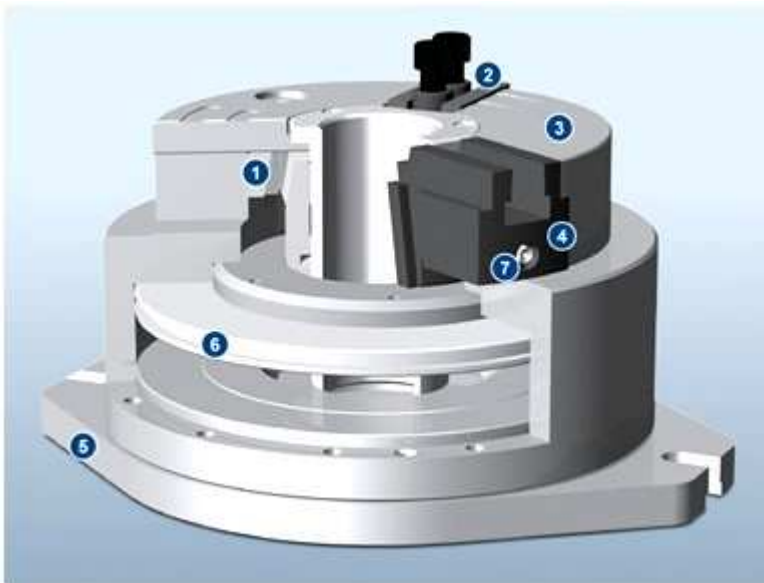
Obr. 6.3: Provizorní upínací přípravek – sklíčidlo (foto autor DP)

Finální upínací přípravek musí být uzpůsoben pro automatický režim. Jakýkoliv zásah člověka degraduje úroveň automatizace tohoto měřicího pracoviště. Proto je třeba nechat provizorní přípravek stranou a zvolit něco vhodnějšího. Jako ideální se v tomto případě jeví použití buď pneumaticky ovládaného sklíčidla, nebo elektromagnetu. Z toho důvodu jsou níže popsána obě technická řešení. Volba optimálního finálního přípravku je provedena až při samotné realizaci robotického pracoviště (*podkapitola č. 9.3*).



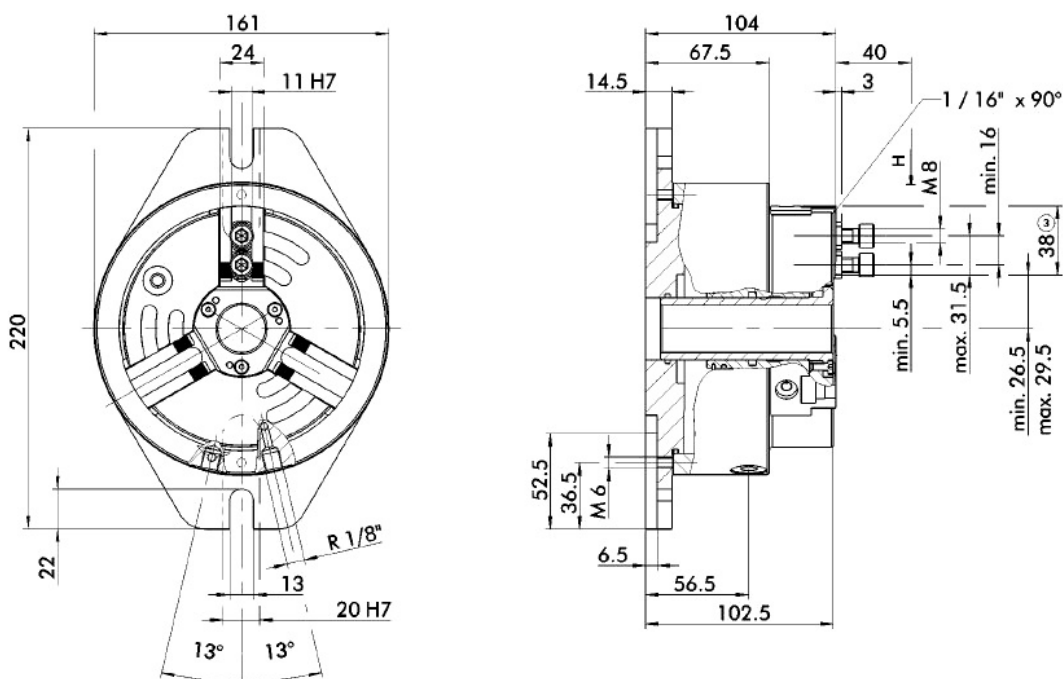
Pneumatické sklíčidlo

Jako první možnost technického řešení bylo zvoleno sklíčidlo společnosti Schunk s označením ROTA TPS 125-26/K, což je varianta s upevněním přes konzolovou desku. Jak už z nadpisu vyplývá, jde o sklíčidlo ovládané pneumaticky. Při změně tlaku vzduchu se válcový píst pohybuje nahoru nebo dolů. Jeho pohyb je mechanicky omezen. Tento válcový píst přenáší pohyb přes klín a hák na píst sklíčidla, který je spojen se základnou čelistí a svým přestavováním ovládá pohyb čelistí. [10]



- 1 – Píst sklíčidla
- 2 – Základna čelistí
- 3 – Šasi
- 4 – Vedení čelistí
- 5 – Upínací deska
- 6 – Pneumatický pohon
- 7 – Mazací čep

Obr. 6.4: Princip sklíčidel ROTA TPS [10]



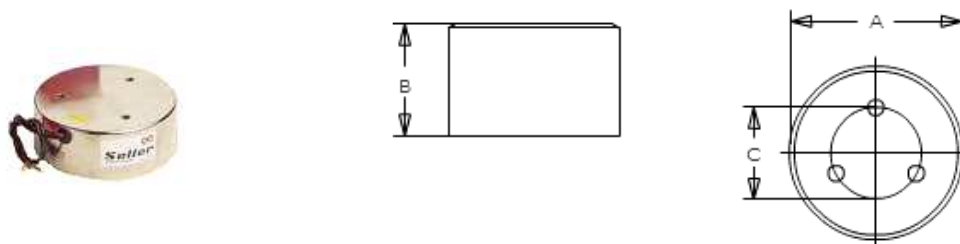
Obr. 6.5: Rozměry sklíčidla ROTA TPS 125-26/K [10]

Tab. 6.1: Parametry sklíčidla ROTA TPS 125-26/K [10]

Maximální upínací síla (při 6 bar)	22 kN
Počet čelistí	3
Ovládání	Pneumatické
Maximální výška čelistí	40 mm
Hmotnost	12 kg
Čas přestavení (při 6 bar)	0,35 s
Pracovní tlak	6 bar
Průměr sklíčidla	130 mm

Elektromagnet

Druhou variantou je použití elektromagnetu. Z konstrukčního hlediska je elektromagnet složen z vnitřního jádra, na kterém je navinuta cívka v podobě vodičů. Ty jsou při průchodu elektrického proudu cívkou schopny vytvořit magnetické pole. [12]



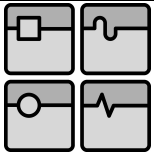
Obr. 6.6: Elektromagnet Selter [11]

Jako zástupce je zde uveden kruhový elektromagnet společnosti Selter (Obr. 6.6). Tento elektromagnet nese označení 63.11.003, jeho napájení je 24 V DC a dodává se s 20 cm dlouhým kabelem s výstupem na boku elektromagnetu. Je způsobilý pracovat maximálně při teplotách do 60 °C. [11]

Tab. 6.2: Parametry elektromagnetu Selter 63.11.003 [11]

Označení	63.11.003
Rozměr A	56 mm
Rozměr B	30 mm
Upínání	3x M5
Rozměr C	40 mm
Příkon	8 W
Upínací síla	31 daN
Hmotnost	0,44 kg
Napájení	24 V DC

Jako možná varianta se zde nabízí také použití **permanentního magnetu**. Tato varianta byla zavrhnuta hned ze začátku, z důvodu zajištění bezpečnosti. Existuje zde jisté riziko, že při vyjímání součásti z prostoru přístroje Equator™ může dojít ke zvednutí celé upínací desky a k následným kolizím. Je samozřejmé, že i tohle riziko se dá eliminovat, avšak použití automatizovaného upínacího přípravku jakýmkoliv způsobem je pro oko zákazníka více zajímavé.



6.3 Snímací doteky

Jelikož se jedná o relativně jednoduchou součást, byla zde snaha na základě volby, umístění a orientace upínacího přípravku vymyslet takovou konfiguraci doteku, aby dostatečně splňovala požadavky na všechny kontrolované rozměry.

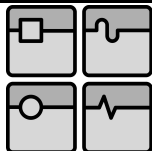
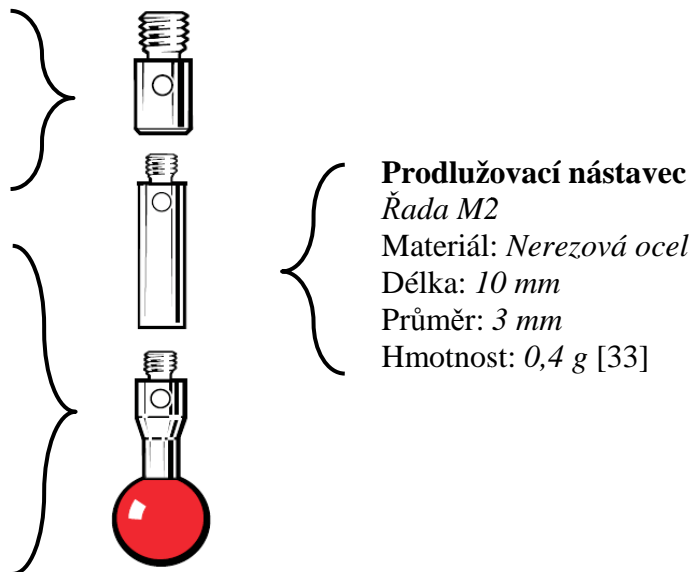
Vznikal jediný problém, a to, jak bez kolize změřit průměr 16 H10 ze směru menšího čela na průměru 24 mm (*Obr. 6.2*). Nabízela se varianta použití dvě konfigurace doteků s tím, že jedna by obsahovala dotek v podobě disku a druhá klasickou kuličku. Tím by se využil potenciál automatického výměnného zásobníku EQR-6, ale vzato z opačného hlediska, prodloužil by se čas měření. Jakkmile jsem chtěl použít dotek s širokého sortimentu společnosti Renishaw, aniž bych použil jakýkoliv prodlužovací nástavec, narazil jsem na dva problémy. Buď neměl dotek dostatečnou délku, aby dosáhl v rámci pracovního prostoru přístroje EquatorTM na všechny požadované rozměry, nebo rozdíl mezi průměrem kuličky a stopky (dříku) byl roven nebo menší než 2 mm, což se přesně rovná i rozdílu mezi průměrem 16 H10 a dírou o průměru 14 mm.

Z předchozího odstavce vyplývá, že byla hledána taková varianta, aby délka konfigurace byla dostatečně dlouhá, a zároveň aby rozdíl mezi průměrem kuličky a dříku nad ní byl větší než 2 mm. Optimálního řešení bylo dosaženo při použití kuličky o průměru 6 mm spolu s 10 mm dlouhým prodlužovacím nástavcem o průměru 3 mm. Nesměl být však opomenut adaptér ze závitu M3 na závit M2, jelikož výše uvedené komponenty jsou řady M2 a držák doteku SH25-2 řady M3. [1]



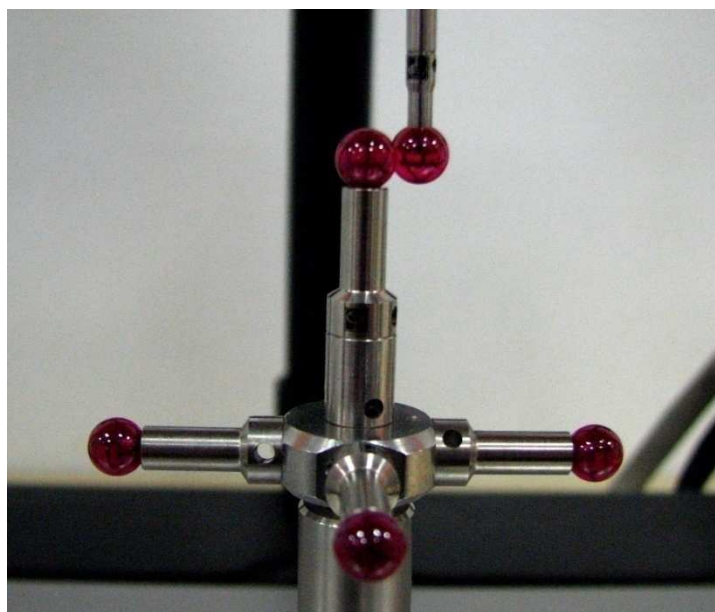
Obr. 6.7: Finální konfigurace snímacího doteku (foto autor DP)

Konfigurace doteku se kromě komponent zobrazených na obrázku 6.8 skládá z tzv. držáku doteku s označením SH25-2 (*Obr. 6.7 – černá část*). Tato část se již přímo připojuje k modulu SM25-2 sondy SP25M. Správná orientace je zde zabezpečena pomocí systému drážek a kuliček. Ty jsou rozmístěny na čelech obou spojovaných součástí tak, aby poloha držáku doteku byla opakovatelná a nezaměnitelná. Tuhost spoje je zajištěna pomocí magnetu a díky magnetu jsou také tyto komponenty vyměnitelné v zásobníku EQR-6. [1]

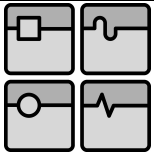
**Závitový adaptér***M3 (vnější) na M2 (vnitřní)*Materiál: *Nerezová ocel*Délka: *5 mm*Hmotnost: *0,6 g [33]***Dotek***Řada M2*Materiál kuličky: *Rubín*Průměr kuličky: *6 mm*Délka: *10 mm*Materiál stopky: *Nerezová ocel*Průměr stopky: *2,5 mm*Ef. pracovní délka: *10 mm*Hmotnost: *0,9 g [33]***Prodlužovací nástavec***Řada M2*Materiál: *Nerezová ocel*Délka: *10 mm*Průměr: *3 mm*Hmotnost: *0,4 g [33]*

Obr. 6.8: Specifikace jednotlivých částí finálního snímacího doteku [33]

Jakmile je konfigurace doteku sestavena, je třeba provést jeho kalibraci, při které se vyhodnocuje průměr, tvar a poloha středu tzv. aktivní části snímacího doteku (rubínové kuličky). Hodnoty se získávají spínacím dotekovým snímáním i skenováním prostřednictvím zaběhnutých kalibračních algoritmů v softwaru UCC server Equator, kde jsou i nadále uloženy a systém je používá při vypočítávání polohy měřených bodů nebo při polohování snímacího doteku v daném souřadném systému. Kalibrace doteků na přístroji Equator™ se provádí na speciální kalibrační kouli vyrobené rovněž z rubínu. Tento kalibrační artefakt má průměr 6 mm a pro zajištění flexibility při jakékoliv konfiguraci doteku se dodává v provedení tzv. kalibrační hvězdy. Upevňuje se přímo na jakoukoliv upínací desku přístroje Equator™ díky speciálním adaptérům se závity M6, M8 a 1/4“.



Obr. 6.9: Kalibrace doteku (foto autor DP)



6.4 Programování

Měřicí programy pro EquatorTM se tvoří v softwaru Renishaw MODUSTM, jenž je popsán v podkapitole 4.3 této práce. Ve své podstatě se nejčastěji tvoří dva programy pro jednu součást a jedno upnutí. Tyto programy lze nazvat:

- **Lokalizace**
- **Měření**

Na úvod je třeba podotknout, že se zde nebudu příliš zabývat významem každého řádku a příkazu v programu, avšak popíšu, k čemu každý z těchto programů slouží a co je jejich obsahem. Jejich zdrojový kód je součástí příloh této práce a je psán tak, aby se v něm člověk jednoduše orientoval. Lze v něm rozeznat jednotlivé bloky. Budu se snažit tyto oddíly stručně popsat na následujících řádcích.

Lokalizace

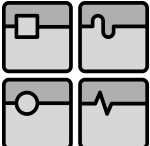
Tento program není součástí automatického cyklu robotického pracoviště. Jeho význam je prostý – slouží k počáteční lokalizaci součásti v pracovním prostoru přístroje EquatorTM. Jedná se tedy pouze o vyrovnání součásti v prostoru s tím, že součást může být upnuta kdekoli v pracovním prostoru. Důležité je však dodržení jediné podmínky, a to je stejná orientace součásti. Vyrovnání je prováděno postupně, aby bylo zajištěno korektní měření nejdůležitějšího prvku, což je válec. Konečný počátek souřadného systému je určen polohou středu válce a polohou horního čela. Jelikož se jedná o homogenní rotační součást, není třeba určovat dvě osy, ale jen jednu. Ta je dána již zmiňovaným válcem. Po vyrovnání uloží souřadný systém, který dále je dále vyvolán v hlavním měřicím programu.

Program obsahuje tyto bloky příkazů:

- Základní nastavení (název, jednotky, výstup, souřadný systém a mód)
- Volba snímacího doteku
- Nastavení měřicích parametrů (přiblížení, odskok a vyhledávání)
- Výzva pro obsluhu pro ruční najetí na jasně definované, a zároveň natolik unikátní místo u součásti, aby nedošlo k omylu a následné kolizi
- Simulace měření bodu a vložení počátku souřadného systému do tohoto bodu
- Měření a vyrovnání
 - Kružnice (počátek X, Y)
 - Rovina (osa Z, počátek Z)
 - Válec (osa Z, počátek X, Y)
- Uložení souřadného systému
- Konec programu

Součástí skriptu jsou také výše neuváděné tzv. přejezdové body (začínající GOTO), které polohují dotek na jasně definovaná místa v kartézském souřadném systému. Jejich přítomnost je důležitá, aby se dotek bez kolize pohyboval od jednoho měřeného prvku k dalšímu.

Závěrem je ještě třeba poznamenat, že opětovné spuštění tohoto programu bude nutné pouze tehdy, jestliže dojde ke změně upínacího přípravku nebo k jeho přemístění v pracovním prostoru přístroje EquatorTM.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 67
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Měření

Jedná se o hlavní měřicí program, jenž obsahuje všechny důležité náležitosti, které můžeme sledovat i u klasických souřadnicových měřicích strojů. Tyto náležitosti lze shrnout v základních čtyřech krocích. Jsou to:

- **Nastavení**
- **Vyrovnání**
- **Měření**
- **Vyhodnocení**

Přílohy této práce obsahují zdrojový kód k tomuto programu, proto se pokusím z části popsat bloky příkazů, jenž jednotlivé výše uvedené kroky obsahují.

Nastavení

Lze zde zahrnout základní šablonu příkazů, kterou MODUSTM používá a která na začátku musí být. Ta obsahuje nastavení názvu výstupního protokolu, jednotek, módu měření, databází pro výstupy a v poslední řadě vyvolání souřadného systému stroje.

Dalším krokem v této části je volba snímacího doteku. V případě využití více doteků se zde provede jejich načtení a v průběhu měření se jen volí ten požadovaný.

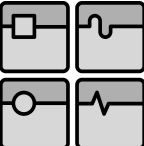
Každý dotek má své vlastní výchozí nastavení. Týká se převážně měřicích vzdáleností, rychlostí, zrychlení, a to jak pro pohyb, tak pro dotekové snímání i skenování. Jelikož mně výchozí nastavení nevyhovovalo, musely být do kódu přidány příkazy s novým nastavením. Součástí je také příkaz FLY, který dělá pohyb stroje mezi jednotlivými polohami plynulejším, jelikož dotek po aktivaci tohoto příkazu nejezdí z bodu do bodu, ale mezi jednotlivými body se snaží jet po zaoblené trajektorii.

Vyrovnání

Vyrovnání se dá považovat za nejdůležitější krok v procesu měření. Pokud nebude vyrovnání korektní, o to více budu mít zkreslené výsledky měření. Proto je třeba této části věnovat dostatečnou pozornost.

Součást v prostoru má 6 stupňů volnosti. Vyrovnáním těchto šest stupňů omezíme tak, aby byla poloha a orientace součásti fixována. Jelikož se jedná o rotační součást bez drážek, žebrování apod., byl zvolen následující způsob vyrovnání:

- Posuv v ose Z omezím bodem na horním čele, do kterého vložím počátek souřadného systému v ose Z.
- Posuv v osách X a Y omezím válcem, který je měřen šesti body (tři body na průměru ve dvou rovinách). Nyní mám tedy počátek souřadného systému ve středu válce a ve výšce horního čela.
- Rotace v prostoru je omezena rovněž výše uvedeným válcem, kde osu válce ztotožním s osou Z přístroje. Tím je omezena rotace okolo os X a Y. U složitějších součástí bych musel řešit ještě rotaci okolo osy Z, ale jelikož se jedná o jednoduchou součást, nemusím nyní tento problém řešit.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 68
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Před samotným vyrovnáním si můžete ve zdrojovém kódu všimnout příkazu, který vyvolává souřadný systém uložený v programu **Lokalizace**. To znamená, že se dotek při vyrovnávání již pohybuje v souřadném systému součásti.

Měření

Blok měření obsahuje příkazy pro měření všech požadovaných rozměrů, a pokud jsou potřeba, nechybí zde ani přejezdové body mezi jednotlivými měřenými prvky. U přístroje Equator™ je důležité vložit před tuto část příkaz COMPARE/ON, který aktivuje proces porovnání. Důležité je také mít všechny měřené body a směry snímání na jmenovitých hodnotách. Při měření se snažím demonstrovat oba způsoby snímání – skenování i spínací dotekové snímání. Na obrázku 6.10 je příklad bloku měření kružnice.

```

1 $$<MEAS_CIRCLE name = "CircleD16">
2 P (PArc4)=PATH/ARC,CART,0,0,-18,0,0,1,8,0,360,1,0,0
3 MODE/PROG,MAN
4 F (CircleD16)=FEAT/CIRCLE,INNER,CART,0,0,-18,0,0,1,16
5 MEAS/CIRCLE,F (CircleD16),4
6 PAMEAS/DISTANCE,0.2,SCNVEL,MMPS,20,P (PArc4),-1,0,0
7 ENDMES
8 $$<\MEAS_CIRCLE = CircleD16>

```

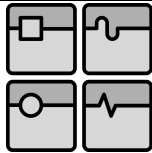
Obr. 6.10: Zdrojový kód bloku měření kružnice

Funkce jednotlivých řádků na obrázku 6.10:

- Řádky 1 a 8, obsahující na začátku \$\$ program ignoruje, jsou to pouze poznámky, neboli komentáře.
- Řádek 2 obsahuje definici kruhové dráhy, která má střed v bodě $[X, Y, Z] = [0, 0, -18]$, normála směřuje do +Z, poloměr je 8 mm, skenování začne v bodě $[X, Y, Z] = [8, 0, -18]$ a opíše 360° proti směru hodinových ručiček
- Řádek 3 znázorňuje mód měření
- V řádku 4 je definována jmenovitá vnitřní kružnice s polohou středu a normálou popsány v řádku 2 a průměrem 16 mm
- Řádek 5 není při skenování aktivní. Nachází uplatnění pouze při spínacím dotekovém měření
- Řádek 6 dává pokyn k měření kruhové dráhy definované v řádku 2. Skenovací rychlost je 20 mm/s a frekvence snímání bodů je 0,5 mm
- Řádek 7 obsahuje příkaz pro ukončení měření a výpočet kružnice

Vyhodnocení

V této části se definují jednotlivé typy tolerancí dle výkresové dokumentace. Následuje vyhodnocení požadovaných tolerovaných rozměrů s využitím těchto tolerancí. Na konci jsou příkazy COMPARE/OFF a ENDFIL, které ukončí proces porovnání a celý měřicí program.



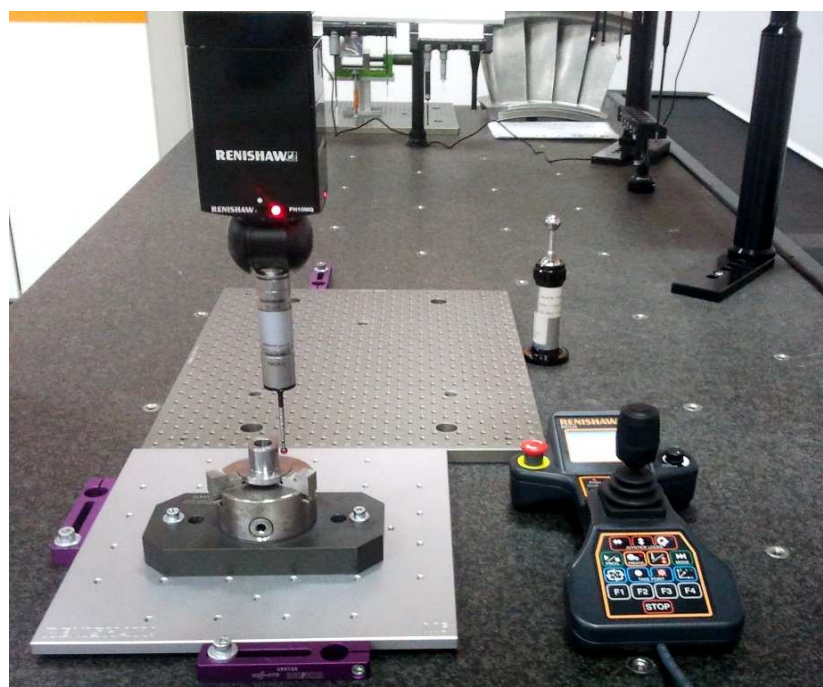
6.5 Vytvoření kalibračního souboru

Posledním důležitým krokem je vytvoření tzv. kalibračního souboru, o němž se zmiňuji v kapitole číslo 4. To spočívá ve změření součásti, kterou budu používat jako master součást, stejným programem na souřadnicovém měřicím stroji.

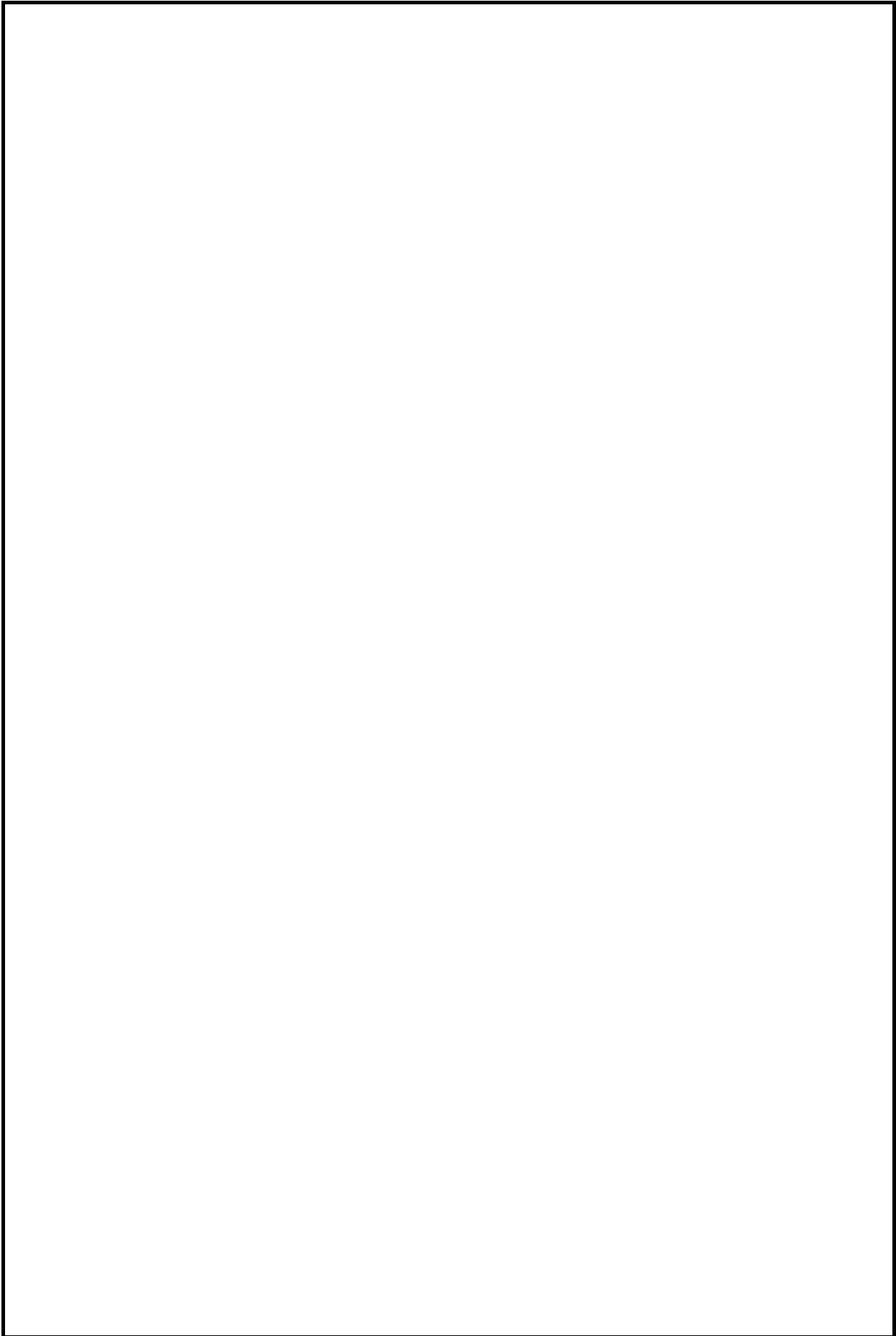
Musí zde být dodržena určitá kritéria:

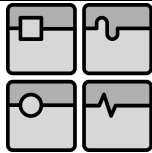
- Stejná metodika měření
- Zvýšení frekvence snímání bodů při skenování (množina nasnímaných bodů musí být u CMM minimálně desetkrát vyšší než při skenování na přístroji Equator™)
- Totožná pozice a normála snímání měřených bodů
- Změna příkazu *COMPARE/ON* na *COMPARE/ON,CAL*
- Zajištění snížení rychlostí pohybu, skenování a spínacího dotekového měření (CMM nedosahuje takových dynamických vlastností jako Equator™ a při zanedbání nebo opomenutí tohoto faktu může dojít k nehodě či nepřesnému měření)
- Import souboru do řídicí jednotky přístroje Equator™

Soubor nám následně bude zajišťovat, že výsledky, které z přístroje Equator™ získáme, jsou skutečné výsledky součásti, znehodnocované pouze o hodnotu opakovatelnosti přístroje. Výše uvedený způsob vytvoření kalibračního souboru platí pro software Renishaw MODUS™. V současnosti již existují nebo jsou vyvíjeny způsoby užívané i v ostatních, běžně užívaných metrologických softwarech.



Obr. 6.11: Měření master součásti na CMM (foto autor DP)





7 PROGRAMOVÁNÍ PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU

Programování průmyslového robotu by nemělo probíhat tak, že si do rukou vezmeme ovládací panel a začneme bezhlavě zadávat příkaz za příkazem. Mělo by mu předcházet alespoň krátké, avšak neméně kvalitní zamyšlení se nad danou problematikou, nad danou aplikací. Po provedení analýzy daného problému bychom měli být schopni popsat, co, jak, kdy a za jakých podmínek bude robot provádět. Měli bychom mít zcela jistě i určitou představu o skladbě programu. K tomuto účelu nám slouží tzv. vývojové diagramy.

Po prvotní analýze problému, který řeším v této práci, jsem dospěl k závěru, že pro úspěšnou realizaci této aplikace bude třeba naprogramovat průmyslový robot k několika základním úkonům. Jedná se především o úkony manipulační.

7.1 Základní úkony robotu:

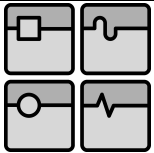
- **Manipulační**
 - Uchopení součásti z neroztříděné palety a její položení do upínacího přípravku v pracovním prostoru přístroje Equator™
 - Uchopení součásti v pracovním prostoru přístroje Equator™ a její následné položení do palety pro vyhovující nebo nevyhovující součásti
 - Uchopení master součásti z místa jí určeného v robotické buňce a položení do upínacího přípravku v pracovním prostoru přístroje Equator™
 - Uchopení master součásti v pracovním prostoru přístroje Equator™ a její položení na místo jí určené v robotické buňce
 - Přeskládání roztříděných součástí z výstupních palet do vstupní palety

- **Ostatní**
 - Ovládání upínacího přípravku binárním signálem
 - Monitorování zavření dvířek obsluhy
 - Monitorování vzniku chyby přístroje Equator™
 - Monitorování komunikačního spojení s přístrojem Equator™

7.2 Vstupní a výstupní signály

Komunikace mezi robotem a měřicím přístrojem Equator™ spočívá v přenosu několika důležitých vstupních a výstupních binárních signálů. K realizaci se používá speciální externí digitální I/O rozhraní (*podkapitola 7.4*), které je přes USB kabel spojeno s řídicí jednotkou přístroje Equator™. Equator™ se zde chová jako „slave“ a je ovládán robotem, který figuruje jako „master“. Z pohledu robotu dochází k přenosu následujících signálů:

- **Vstupní (Inputs – I)**
 - „Tlukot srdce“ (anglicky Heart beat)
 - Bezpečná pozice (anglicky Safe position)
 - Chyba (anglicky Error)
 - Připraven na robot (anglicky Ready for robot service)
 - Připraven na měření (anglicky Ready for inspection)
 - Zaneprázdněn (anglicky Busy)
 - Dobrá součást (anglicky Good part)
 - Špatná součást (anglicky Bad part)

**• Výstupní (Outputs – O)**

- Mimo prostor Equatoru (anglicky Clear of gauge)
- Stop
- Master mód (anglicky Master mode)
- Součást mimo Equator (anglicky Unloaded)
- Začátek měření (anglicky Gauge cycle start)
- Reset
- Program bit 0 (anglicky DMI select bit – 0)
- Program bit 1 (anglicky DMI select bit – 1)

Tab. 7.1: Specifikace vstupů a výstupů robotu [34]

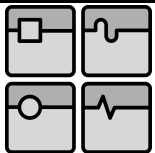
Název	I / O	Funkce
„Tlukot srdce“	I	Pulzující signál pro zajištění bezpečnosti. Equator™ komunikuje s robotem přes software Automation. Pokud tento software běží bez problému, vysílá neustále signál pulzující nahoru a dolů o frekvenci přibližně 2 až 3 Hz. Paralelně běžící podprogram <i>Kontrola_Spojeni</i> se stará o monitoring tohoto signálu.
Bezpečná pozice	I	Jestliže se robot pohybuje v prostoru přístroje Equator™, musí být zajištěno, aby poloha snímacího systému byla v tzv. bezpečné pozici. Bezpečná pozice je dána bodem, který je dán průnikem rovin X, Y, a Z. Tento signál je sepnut v hodnotě 1, jestliže se snímací systém nachází za tímto bodem.
Chyba	I	Signál je sepnut, jakmile se objeví jakákoliv chyba ze strany přístroje Equator™. Pro další spuštění procesu je vyžadován signál <i>Reset</i> .
Připraven na robot	I	Signál, dávající informaci robotu, že Equator™ je v bezpečné pozici a čeká na zásah robota, tj. vložení nebo vyjmutí součásti.
Připraven na měření	I	Signál je sepnut, když probíhá vkládání součásti do prostoru přístroje Equator™. Jakmile začne měření, je nastaven na hodnotu 0.
Zaneprázdněn	I	Signál informuje robot, že je Equator™ v pohybu. Děje se tak buď při najíždění do bezpečné pozice, nebo při samotném měření.
Dobrá součást	I	Signál se sepne po ukončení měření do hodnoty 1, jestliže jsou všechny měřené rozměry v toleranci.
Špatná součást	I	Signál se sepne po ukončení měření do hodnoty 1, jestliže je alespoň jeden měřený rozměr mimo toleranční pole.
Mimo prostor Equatoru	O	Jedná se o bezpečnostní signál. Jestliže má hodnotu 1, znamená to, že robot je někde v bezpečné zóně mimo prostor přístroje Equator™. Signál lze uzpůsobit do automatického cyklu tak, že před pracovní prostor přístroje Equator™ vytvoříme teoretickou hranici. Při

		překročení této hranice Equator™ ví, že je v jeho pracovním prostoru robot a že se nemá pohybovat. Jakmile dojde k překročení této hranice během měření, běh programu se zastaví a pracoviště bude ve stavu <i>Chyba</i> .
Stop	O	Signál k okamžitému přerušení vykonávané operace. Pro další spuštění procesu je vyžadován signál <i>Reset</i> .
Master mód	O	Signál, informující software přístroje Equator™, zda se bude měřit master součást nebo se jedná o porovnávací měření.
Součást mimo Equator	O	Po skončení měření Equator™ pošle signál, zda je součást dobrá nebo špatná. Jakmile robot tuto součást vyjme z upínacího přípravku a polohuje se mimo prostor přístroje Equator™, je sepnut signál, informující Equator™, že není upnuta žádná součást.
Začátek měření	O	Jakmile robot vloží součást k měření do prostoru přístroje Equator™ a odjede do bezpečné pozice mimo jeho pracovní prostor, signál <i>Začátek měření</i> se sepne a začne měření.
Reset	O	Signál, nutný pro resetování vzniklé chyby. Software Automation dále nabízí tři možnosti, do jakého stavu se má robotické pracoviště resetovat: <ul style="list-style-type: none"> • Stav 1 (zásah robotu před měřením) – robot vloží součást a začne měření; vyžaduje zaslání signálu <i>Začátek měření</i> • Stav 2 (měření) – součást je vložena v upínacím přípravku a začne měření • Stav 3 (po měření) – součást je vložena v upínacím přípravku a čeká na zásah robota, který ji vloží do palety se špatnými kusy
Program bit 0	O	Signál přidružen danému měřicímu programu.
Program bit 1	O	Signál umožňuje přidružení dalších dvou měřicích programů.

7.3 Vývojové diagramy

Vývojové diagramy ve své podstatě graficky interpretují chod určitého obecného procesu, ať už je to program z hlediska informatiky, či postup při řešení určité situace. K vytvoření vývojového diagramu je třeba znát k tomu určené symboly. Tyto symboly jsou standardizované a je jich celá řada, ve většině případů však zcela postačí umět několik základních, kterými lze názorně daný proces popsat. [5] [13]

Program robotu je podle mého názoru lepší dělit na tzv. hlavní rutinu a podprogramy. Programování se tím stává přehlednější a snižuje se tím pravděpodobnost poněkud stresujícího hledání konkrétního řádku či příkazu v předlouhých zdrojových kódech. Program robotu se tedy skládá z jednoho **hlavního programu (H)** a několika **podprogramů (P)**. Jejich názvy a základní principy jsou zřejmé z tabulky 7.2. Jednotlivé příkazy budou dále podrobně popsány ve formě komentářů přímo v jednotlivých zdrojových kódech programů robotu.



Tab. 7.2: Přehled programů robotu

Název	H / P	Funkce
Robot_Equator_Hlavni	H	Hlavní program běží ve smyčce, kde se počet opakování rovná počtu měřených součástí, respektive součástí v neroztříděné paletě. Proto zde musí být aplikována proměnná Součást , která čítá počet již změřených součástí. Po roztřídění všech součástí se volá podprogram, který přeskládá díly zpět do výchozí palety. Program musí zajišťovat pravidelné měření master součástí, a to vždy na začátku cyklu. Jeho úlohou je rovněž vyvolávání daných podprogramů, které jsou popsány níže v téhle tabulce. Paralelně s ním běží monitorovací podprogramy <i>Kontrola_Chyba</i> a <i>Kontrola_Spojeni</i> . V průběhu realizace pravděpodobně dojde i k začlenění programu pro kalibrace snímacího doteku. (<i>Obr. P4.1, P4.2, P4.3, P4.4</i>)
Equator_Vlozit	P	Zajišťuje pohyb robotu s již uchopenou součástí do prostoru přístroje Equator TM . Po dosažení požadované pozice je přestaven koncový efektor robotu a součást položena do upínacího přípravku, který je potřeba ještě určitým příkazem aktivovat. Poté následují příkazy pro pohyb robotu z pracovního prostoru přístroje Equator TM pryč. (<i>Obr. P4.5</i>)
Equator_Vyjmout	P	Obsahuje příkazy pro pohyb robotu do prostoru přístroje, kde je třeba uchopit součást. Před samotným uchopením je nutno mít zajištěno, aby byl koncový efektor ve správném přestavení, a zároveň se musí deaktivovat upínací přípravek. Po uchopení následuje pohyb robotu z prostoru Equatoru TM . (<i>Obr. P4.6</i>)
Master_Vyjmout	P	Účelem je vyjmout master součást z místa pro ni určeného. To je realizováno pomocí několika příkazů pro pohyb robotu. Po dosažení požadované pozice musí dojít k přestavení koncového efektoru robotu a uchopení součástí. Dále následuje pohyb do prostoru. Před uchopením součásti musí být zajištěno správné přestavení koncového efektoru tak, aby nedošlo ke kolizi. (<i>Obr. P4.7</i>)
Master_Vlozit	P	Vložení master součásti na místo jí určené probíhá ve sledu několika kroků. Nejprve je třeba polohovat robot na dané místo, přestavit koncový efektor, kdy dojde k uvolnění součásti a následný odjezd robotu do prostoru. (<i>Obr. P4.8</i>)
Soucast_Vyjmout	P	Má za úkol postarat se o vyjmutí součástí pro měření z neroztříděné palety. Obsahuje čítač neroztříděných součástí, aby byla zajištěna informace o počtu zbývajících součástí v paletě. Jeho jedna větev se využije i v podprogramu Preskladat_Soucasti . (<i>Obr. P4.11, P4.12</i>)

Soucast_Vlozit	P	Tento podprogram slouží pro vložení součásti buď do palety s dobrými, nebo špatnými kusy. Obsahuje čítač, který kontroluje počet již rozříděných kusů a polohy jednotlivých míst v obou paletách (<i>Obr. P4.9, P4.10</i>)
Preskladat_Soucasti	P	Po změření a rozřídění všech součástí je třeba nepřerušit automatický cyklus. Proto musí robot tyto součásti přeložit zpět do výchozí (nerozříděné) palety. Program využívá i jedné větve podprogramu <i>Soucast_Vyjmout</i> . (<i>Obr. P4.13, P4.14</i>)
Vychozi_Pozice	P	Podprogram obsahující příkazy, jež polohují robot do dané pozice v prostoru. Tato pozice musí co nejméně bránit přímému výhledu na Equator™ a mohla by obsahovat výchozí pozice natočení jednotlivých os robotu. (<i>Obr. P4.15</i>)
Kontrola_Chyba	P	Běží paralelně s hlavním programem a monitoruje případný vznik jakékoliv chyby ze strany přístroje Equator™. K monitorování využívá digitální vstup Chyba . Jestliže vznikne chyba, zastaví běh programu a vypíše chybu. (<i>Obr. P4.16</i>)
Kontrola_Spojeni	P	Běží paralelně s hlavním programem a monitoruje stav komunikace mezi robotem a přístrojem Equator™. Využívá k tomu digitální vstup Tlukot srdce , který vysílá Equator™. Jestliže dojde ke zpomalení či přerušení tohoto signálu, zastaví běh programu a vypíše chybu. (<i>Obr. P4.17</i>)

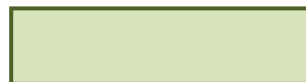
Poznámka:

Ve vývojových diagramech jsou od sebe barevně odlišeny podprogramy, vstupy, výstupy, proměnné a ostatní prvky. Barevné provedení je následující:

- **Podprogramy**



- **Digitální vstupy**



- **Digitální výstupy**



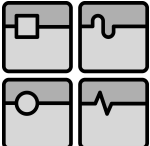
- **Proměnné**



- **Ostatní**



Ve vývojových diagramech je spousta přejezdových bodů, pozic či poloh. Tyto polohy jsou popsány pouze obecně a definovány budou až v samotném kódu programu robotu.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 77
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

8 PROJEKTOVÁNÍ

8.1 Cíle a požadavky

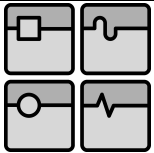
Cílem je navrhnout automatizované měřicí pracoviště s průmyslovým robotem. Co se týče měřicí techniky, bude zde využít v předchozích kapitolách popsany porovnávací měřicí přístroj EquatorTM. Robotizovanou obsluhu tohoto přístroje má na starosti průmyslový robot KUKA KR 6 R900 sixx. Před samotnou realizací je třeba provést několik grafických návrhů a z nich vybrat optimální variantu. Dále je potřeba vybrat vhodného dodavatele všech vyráběných dílů a specifikovat ostatní nezbytné prvky robotického pracoviště, jako je například bezpečnostní senzor na dveře, pneumatické komponenty, upínací přípravek, koncový efektor robotu, spojovací materiál (šrouby apod.) a další.

Pracoviště se bude realizovat v prostorech společnosti Renishaw s. r. o. v Brně a jeho primárním účelem bude sloužit jako výstavní exponát na veletržních akcích nejen v České republice, ale například také na Slovensku, v Rakousku či v Maďarsku. Sekundárním účelem je dále použití tohoto pracoviště na prezentacích přístroje EquatorTM pro zákazníky společnosti Renishaw. Realizací a následnou obsluhou navrhovaného pracoviště získá autor této práce rovněž nemalé zkušenosti převážně z oblasti programování souřadnicových měřicích strojů či průmyslových robotů KUKA. Autor se seznámí například také se zapojováním jednodušších pneumatických a elektronických obvodů.

Z výše uvedených cílů je jistě patrné, že celková koncepce pracoviště, vzhled a uspořádání jednotlivých částí se bude odvíjet poněkud jiným směrem. Nejedná se o zcela průmyslové řešení automatizované buňky, proto jsou hlavní požadavky na koncepci z větší části stanoveny z hlediska marketingu.

Požadavky pro návrh automatizovaného měřicího pracoviště:

- Pracoviště musí být kompaktní objekt
- Snaha o minimální zastavěný prostor
- Robot by měl třídit obrobky pomocí naměřených výsledků z přístroje EquatorTM
- Jednoduchá konstrukce
- Možnost rozebrání a sestavení pracoviště s minimálními zásahy do programů robotu
- Bezpečnost vzhledem k obsluze i zákazníkům
- Stejná výška stolů
- Veškerá kabeláž by měla být co nejvíce zakryta
- Rovné plochy krytování pro grafiku bez přebývajících koutů, rohů a výstupků
- Ergonomicky dobře řešené pracoviště (snadné uvedení do provozu, obsluha a údržba)
- Snaha o nízké pořizovací náklady nakupovaných a vyráběných komponent
- Možnost snadné manipulace s robotem a řídicími systémy (konstrukce na kolečkách)



8.2 Bazická bodovací metoda

Pro výběr optimální varianty řešení byla použita jedna z multikriteriálních metod hodnocení, konkrétně bazická bodovací metoda. Multikriteriální metody hodnocení nacházejí uplatnění především při výběru nejvhodnější varianty projektu, dodavatele nového stroje či zařízení. Metody hodnotí objekt z technicko-ekonomického hlediska. U bazické bodovací metody dochází k rozčlenění těchto hledisek na část technickou τ a část ekonomickou ϵ . Přesto však mezi nimi jistá vazba zůstává. Postup spočívá v několika hlavních krocích. Nejprve se zvolí jasná kritéria, vlastnosti, typické, unikátní a rozhodující pro daný zkoumaný objekt. Určí se bodovací stupnice, která hodnotí danou vlastnost z hlediska kvality či kvantity. Dále je třeba určit důležitost jednotlivých vlastností, na základě které se poté pomocí matematických výpočtů provede číselné vyjádření jednotlivých variant, určující jejich optimalitu. [4]

Jednotlivé vlastnosti, které budeme hodnotit, označíme jako T_1, T_2 až T_n ,

kde: n = počet vlastností (zpravidla 1 až 100)

Hodnota každé vlastnosti je vyjádřena třídítkem t_1, t_2 , až t_j ,

kde: j = rozsah stupnice třídítku

Dle [4] je vhodné třídítky označit jako:

- $t_1=0$ – nevyhovující
- $t_2=1$ – velmi slabé
- $t_3=2$ – vyhovující
- $t_4=3$ – dobré
- $t_5=4$ – velmi dobré
- $t_6=5$ – výborné

Procentuální vyjádření vlastnosti:

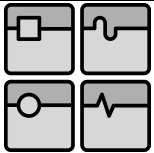
$$p_T[\%] = \frac{100}{t_j} \quad (1.1)$$

Význam jednotlivých vlastností dle důležitosti určuje koeficient g_n , pro který platí:

$$0 < g_n \leq 1 \quad (1.2)$$

Technický stav hodnocené varianty dle různých hledisek je dán vzorcem:

$$(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_n) = (g_1 \cdot t_1, g_2 \cdot t_2, \dots, g_j \cdot t_j, \dots, g_n \cdot t_n) \quad (1.3)$$



8.3 Výběr optimální varianty řešení

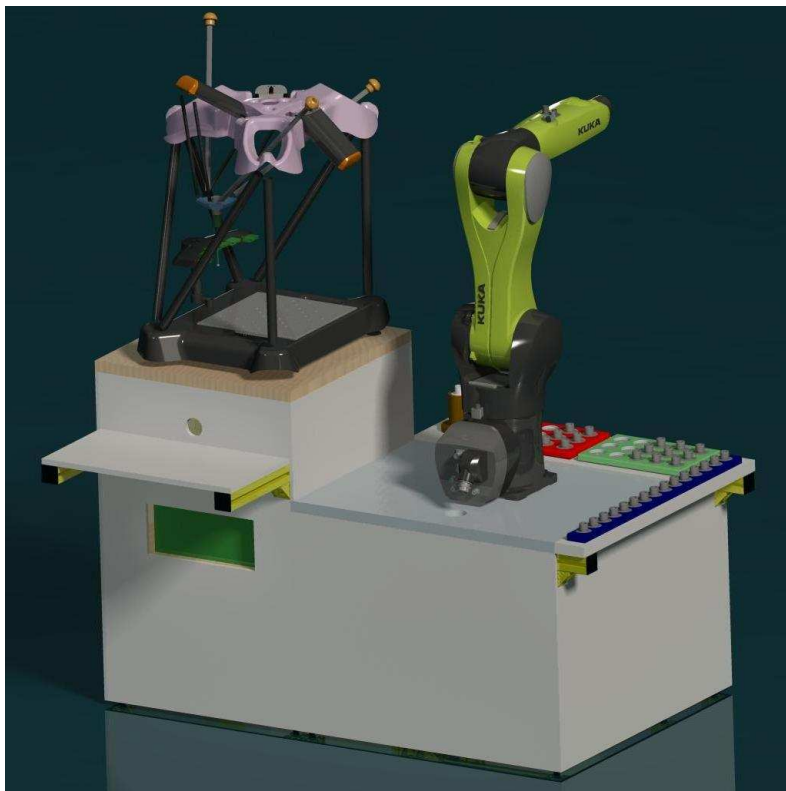
Varianta č. 1

První vzniknuvší varianta koncepce automatizovaného měřicího pracoviště s průmyslovým robotem. Variantu lze považovat za „základní kámen“ pro všechna nadcházející řešení. Tato koncepce vznikla především pro získání představy, jaké jsou velikostní poměry mezi jednotlivými prvky pracoviště. Po variantě č. 1 dochází k rozšíření a upřesnění některých z požadavků na design a celkovou funkci.

Z obrázků 8.1 a 8.2 je patrné prostorové uspořádání. Celá konstrukce je vytvořena z hliníkových profilů o délce strany 30 mm a jejich příslušenství. Tyto profily tvoří dvojici dvouúrovňových stolů, na kterých se nachází jak měřicí přístroj Equator™, tak průmyslový robot KUKA. Ve spodní úrovni jsou umístěny řídicí jednotky obou zařízení spolu s kabeláží a ostatním nezbytným příslušenstvím. Equator™ je k desce stolu připevněn pomocí šroubů stejně jako robot. Dále můžeme spatřit tři barevně odlišené palety, ve kterých jsou měřené součásti. Princip činnosti je následující:

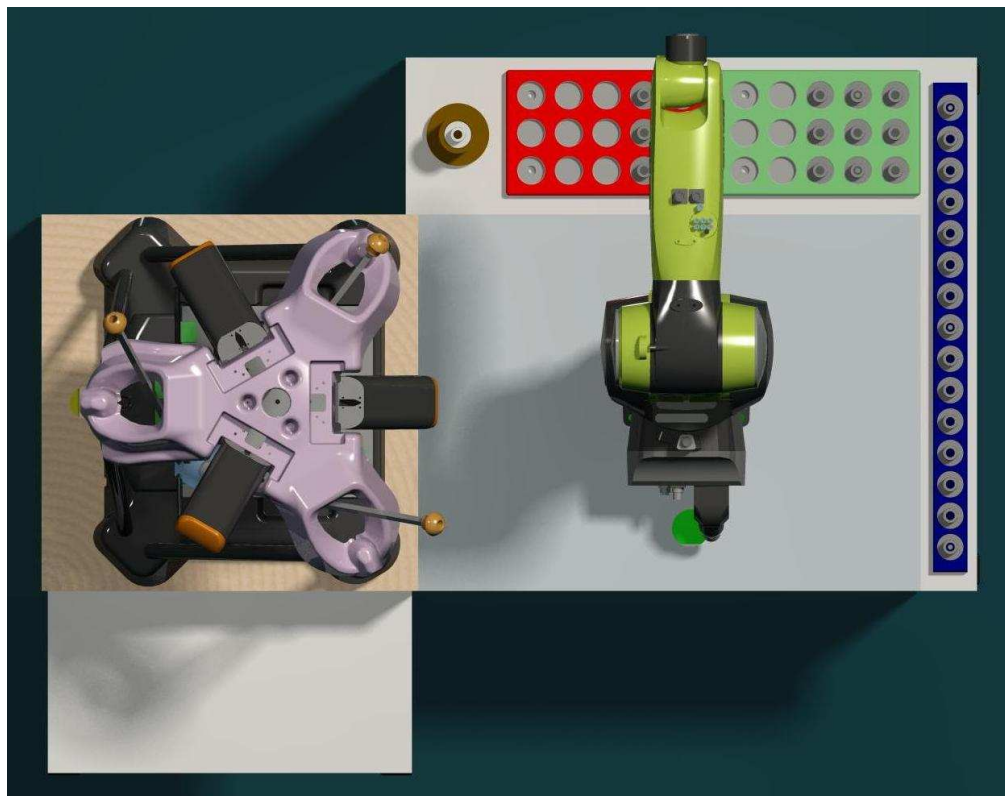
- Robot vyjme součást z jednořadé podlouhlé palety (modrá)
- Vloží součást ke změření do pracovního prostoru přístroje Equator™
- Po získání naměřených výsledků je součást umístěna buď do zelené, nebo červené palety se zkontrolovanými kusy

Tento cyklus se neustále opakuje, dokud nedojde k vyprázdnění modré palety a následnému přetřídění všech součástí zpět. Předtím, než se vše rozběhne zase od začátku, se kalibruje snímací dotek a dochází k měření „master“ součásti pro zreferování měřidla k aktuálním podmínkám.



Obr. 8.1: Varianta č. 1 – Pohled z perspektivy

Celá konstrukce je zakryta pomocí dřevěných či plastových panelů, nařezaných na odpovídající rozměry. Na tyto panely bude po sestavení pracoviště nalepena grafika (loga, obrázky). Co se týče ovládání a obsluhy, k umístění příslušných periférií (myš, klávesnice, joystick, smartPAD, monitor) slouží pracovní deska u stolu přístroje EquatorTM. Pracoviště nedisponuje žádnými bezpečnostními prvky, z čehož jednoznačně vyplývá, že nesplňuje požadavky na bezpečnost a že z největší pravděpodobností tato varianta nebude realizována. Svůj záměr však splnila dokonale, jelikož bylo potřeba udělat první krok a získat onu zmiňovanou představu o rozmístění.

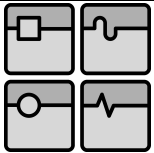


Obr. 8.2: Varianta č. 1 – Pohled shora

Tab. 8.2: Hodnocení varianty č. 1

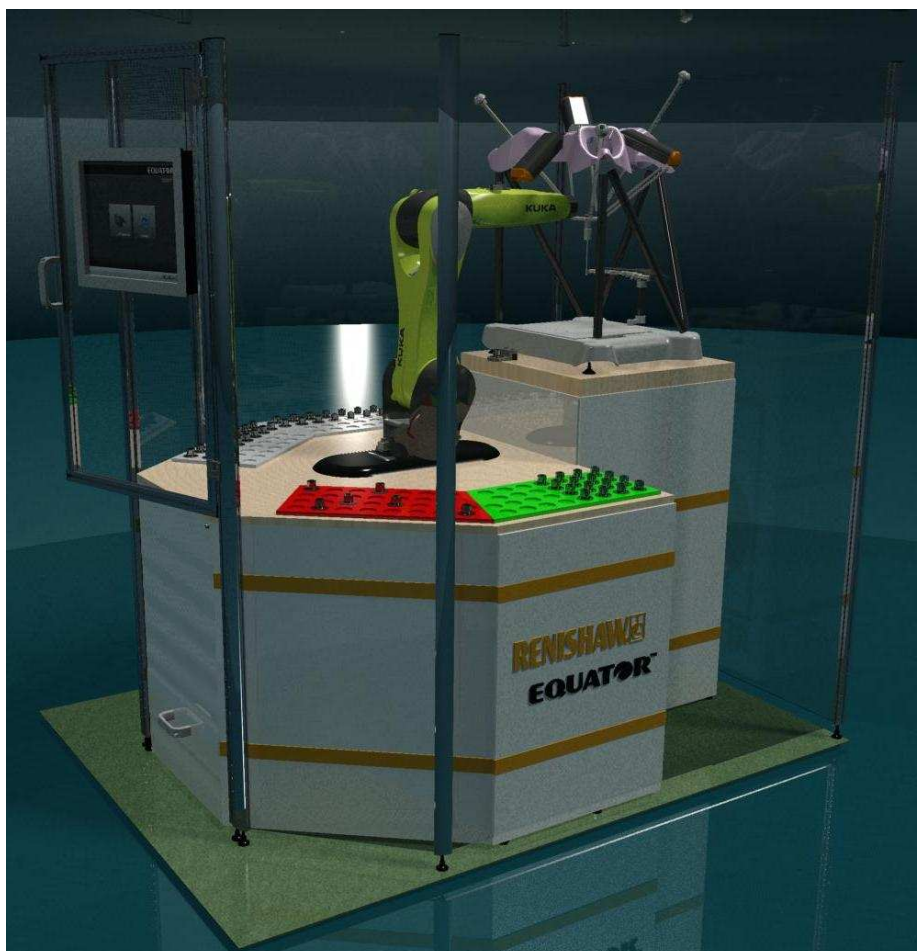
n	VLASTNOST	OZNAČENÍ	VARIANTA 1			
			t_j	g_n	p_T	τ_n
1	Bezpečnost	T_1	1	1	100	1
2	Kompaktní objekt	T_2	2	0,5	50	1
3	Jednoduchost montáže	T_3	4	0,4	25	1,6
4	Stejná výška stolů	T_4	2	0,1	50	0,2
5	Míra zakrytí kabelů	T_5	2	0,5	50	1
6	Jednoduché rovné plochy	T_6	2	0,3	50	0,6
7	Ergonomie	T_7	3	0,8	33,3	2,4
8	Pojízdná konstrukce robotu	T_8	1	0,5	100	0,5
9	Náklady na realizaci	T_9	4	0,5	25	2

K vyplnění výše uvedené tabulky 8.2 byly použity vzorce (1.1) až (1.4) dle [4]. Celková technická hodnota varianty číslo 1 činí **0,229**.

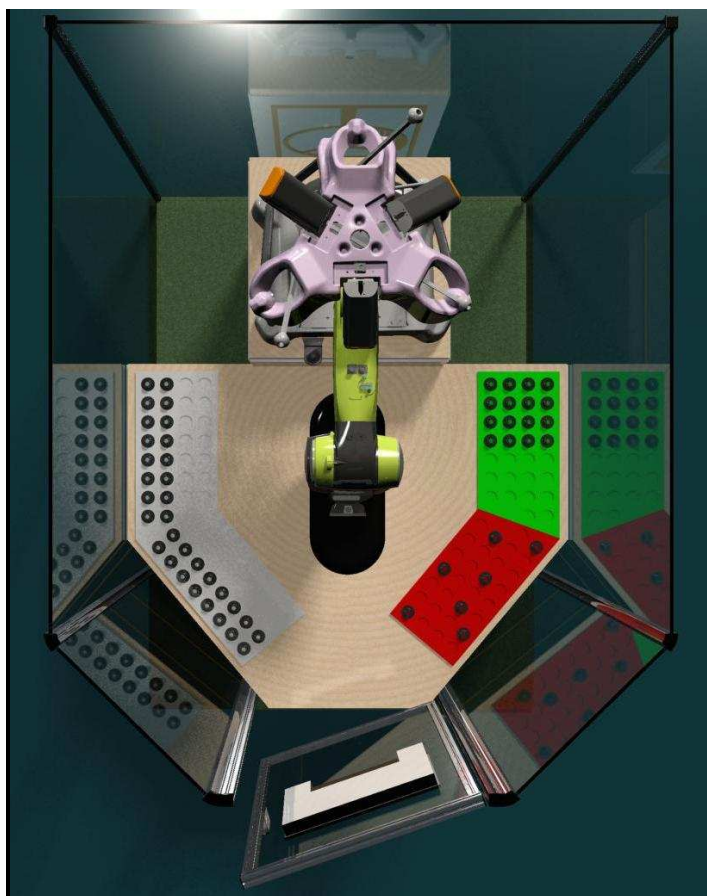
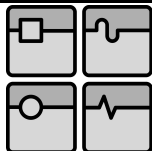


Varianta č. 2

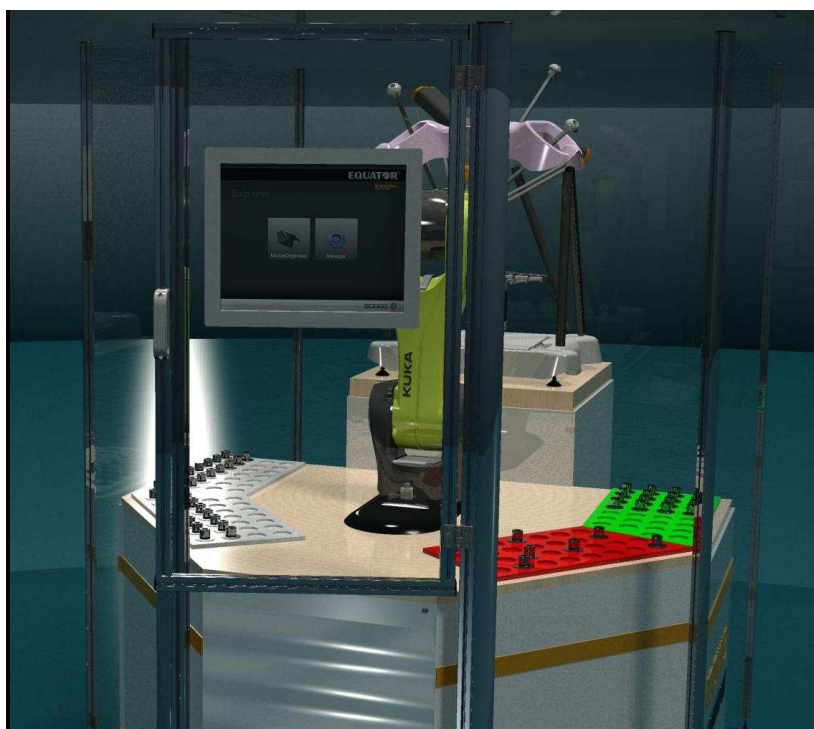
Z obrázku 8.3 je zřejmé, že varianta číslo 2 je poněkud propracovanější než varianta předchozí. Princip funkce zůstává stejný. Funkci neroztřídně (původně modré) palety nyní zastává paleta šedá. Pracoviště je zabezpečeno skleněnými zdmi, jež mohou být ve výsledku realizovány také z plexiskla. Snadný přístup do prostoru pro obsluhu umožňují dvířka v přední části pracoviště. Tato dvířka jsou opatřena bezpečnostním senzorem, přímo zapojeným do bezpečnostního okruhu řídicí jednotky robotu. Přesný typ tohoto senzoru je upřesněn v kapitole číslo 9 této práce. Při otevření dveří musí dojít k zastavení pohybu robotu, aby nedošlo ke zranění obsluhy. Součástí dvířek je také dotykový monitor pro ovládání přístroje EquatorTM, který výrazně zvyšuje celkovou ergonomii pracoviště. Pro rychlé uvedení do provozu je nepochybně důležité i umístění obou řídicích jednotek. Proto zde byla umístěna ještě druhá dvířka pod úrovní stolu v přední části pracoviště. Z obrázku níže je patrné, že se jedná o posuvný typ dvířek (nahoru – dolů). Nic však nebrání tomu, aby při finální realizaci byla použita klasická otevírací dvířka s panty. Požadavek zakrytí kabelů robotu zcela splňuje umístění robotu na nižší konstrukci oproti úrovni stolu s paletami. Tato konstrukce obsahuje pojízdná kolečka, která slouží ke snadné manipulaci s robotem. Po dojetí na určité místo se musí konstrukce stabilizovat výškově přestavitelnými nožkami. Pro vyšší tuhost se k vozíku navíc upevní boční zpevňovací rám rovněž s výše uvedenými nožkami. Poloha pojízdné části k stacionární části (stůl přístroje EquatorTM) je zabezpečena opět pomocí hliníkových profilů. Pro snadné ovládání je zde také uvažován dotykový monitor, připevněný na vnější bezpečnostní konstrukci.



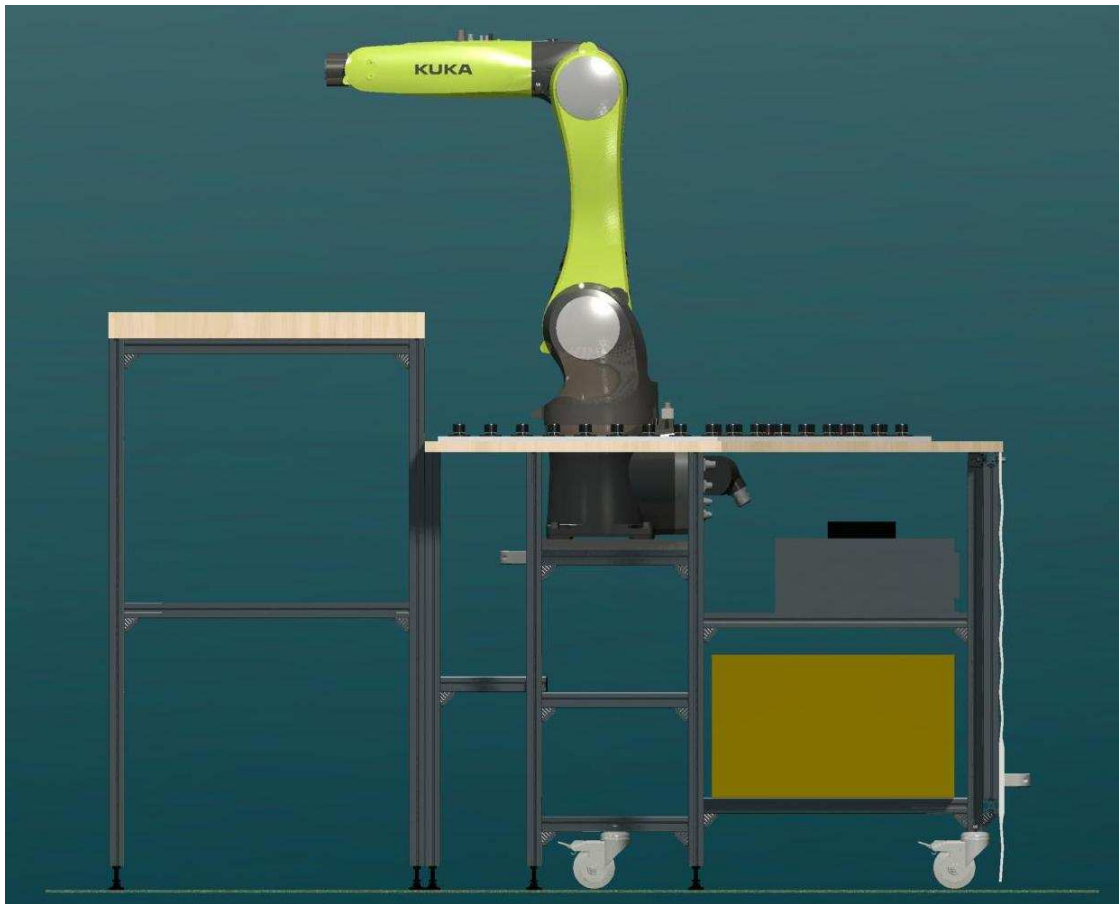
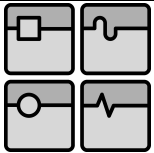
Obr. 8.3: Varianta č. 2 – Pohled z perspektivy



Obr. 8.4: Varianta č. 2 – Pohled shora



Obr. 8.5: Varianta č. 2 – Pohled zepředu

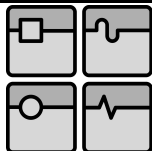


Obr. 8.6: Varianta č. 2 – Pohled na vnitřní konstrukci zleva

Tab. 8.3: Hodnocení varianty č. 2

n	VLASTNOST	OZNAČENÍ	VARIANTA 1			
			t_j	g_n	p_T	τ_n
1	Bezpečnost	T_1	4	1	25	4
2	Kompaktní objekt	T_2	4	0,5	25	2
3	Jednoduchost montáže	T_3	4	0,4	25	1,6
4	Stejná výška stolů	T_4	2	0,1	50	0,2
5	Míra zakrytí kabelů	T_5	4	0,5	25	2
6	Jednoduché rovné plochy	T_6	3	0,3	33,3	0,9
7	Ergonomie	T_7	5	0,8	20	4
8	Pojízdná konstrukce robotu	T_8	4	0,5	25	2
9	Náklady na realizaci	T_9	3	0,5	33,3	1,5

K vyplnění výše uvedené tabulky 8.3 byly použity vzorce (1.1) až (1.4) dle [4]. Celková technická hodnota varianty číslo 2 činí **0,404**.



Varianta č. 3

Po konzultaci se specialistou z oblasti stavby pracovišť z hliníkových profilů vznikla ještě třetí varianta, která disponuje několika změnami oproti variantě číslo 2. Celkový koncept je dosti podobný, avšak namísto profilů s délkou strany 30 mm jsou použity vhodnější, 45 mm profily. Vylepšena je rovněž stabilita celé konstrukce díky robustnějším rohovým spojkám a většímu vyztužení všech nosných konstrukcí. Koncepce vozíku byla z větší části změněna. Namísto koleček a výškově přestavitelných nožek u varianty číslo 2 zde byla zvolena speciální kolečka, která lze sešlápnutím pedálu jednoduše přestavit na stabilní nožky. Kromě této změny došlo také k přepracování vozíku z hlediska rozměrů. Z obrázku 8.7 je patrné, že vnější konstrukce pracoviště zajišťující bezpečnost, disponuje třemi zamykatelnými dveřními systémy pro zvýšení celkové ergonomie pracoviště. Z důvodu obtížnosti montáže a realizace ochranné bariéry z plexiskel u varianty číslo 2 byl celý koncept obměněn. U varianty číslo 3 jsou uvažovány plexiskla menších rozměrů, která umožňují snadnou montáž a zabudování do profilů. Pro jejich zajištění je třeba použít speciální profilové vložky, které jsou standardním příslušenstvím těchto systémů. Pro snadnou obsluhu je součástí pracoviště dotykový monitor.



Obr. 8.7: Varianta č. 3 – Pohled z perspektivy



Obr. 8.8: Varianta č. 3 – Konstrukce



Obr. 8.9: Varianta č. 3 – Detail pojízdného vozíku

Tab. 8.4: Hodnocení varianty č. 3

n	VLASTNOST	OZNAČENÍ	VARIANTA 1			
			t_j	g_n	p_T	τ_n
1	Bezpečnost	T_1	5	1	20	5
2	Kompaktní objekt	T_2	5	0,5	20	2,5
3	Jednoduchost montáže	T_3	4	0,4	25	1,6
4	Stejná výška stolů	T_4	2	0,1	50	0,2
5	Míra zakrytí kabelů	T_5	4	0,5	25	2
6	Jednoduché rovné plochy	T_6	3	0,3	33,3	0,9
7	Ergonomie	T_7	5	0,8	20	4
8	Pojízdná konstrukce robotu	T_8	5	0,5	20	2,5
9	Náklady na realizaci	T_9	2	0,5	50	1

K vyplnění výše uvedené tabulky 8.4 byly použity vzorce (1.1) až (1.4) dle [4]. Celková technická hodnota varianty číslo 3 činí **0,438**.

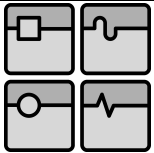
Tab. 8.5: Technické hodnoty jednotlivých variant

VARIANTA	τ
1	0,229
2	0,404
3	0,438

8.4 Vybraná varianta

Vybraná varianta číslo 3 se dle technických hodnot, získaných pomocí bazické bodovací metody, jeví jako varianta nejvhodnější.

Převažujícím konstrukčním prvkem jsou hliníkové profily o délce strany 45 mm. Výhodou není pouze jejich vynikající tuhost, ale především možnost postavit si z nich a jim určeného příslušenství takřka cokoliv. Pro grafický návrh robotického pracoviště byla použita online webová CAD knihovna [32] spolu se softwarem MTpro 3.4 [52], dodaným společností Bosch Rexroth. Pracoviště se skládá z několika samostatných částí, které jsou ve výsledku smontovány dohromady a tvoří jeden kompaktní celek. Porovnávací měřicí přístroj EquatorTM 2 je umístěn na speciální desce 16, která je usazena na konstrukci z hliníkových profilů 23. Tato deska disponuje vyfrézovanými otvory pro opakovatelné umístění přístroje. Konstrukce je opatřena výškově přestavitelnými nohama 28 a příslušnými spojovacími prvky. Ke konstrukci 23 je dále přimontována zpevňující konstrukce 27, určena pro usazení horních desek 17 s paletami 3, 4, 5 a, jak už z předchozího označení vyplývá, ke zvýšení stability pojízdného vozíku 24 s robotem KUKA 1. Pro vozík 24 byly vyrobeny speciální poličky 25 a 26, které jsou připevněny pomocí spojovacího materiálu řady M8. Na těchto poličkách se nacházejí řídicí jednotky pro EquatorTM 21 a robot 20 včetně příslušné kabeláže. Součástí je rovněž Renishaw I/O jednotka 22, jež zabezpečuje komunikaci mezi robotem 1 a měřicím přístrojem 2. Průmyslový robot 1 je připevněn k nosné desce 30 pomocí spojovacího materiálu řady M10. Tato deska je součástí přední části vozíku 24, ke kterému je přišroubována spojovacím materiálem řady M8 a M12. K dosažení vyšší tuhosti vozíku 24 jsou použity úhelníky 45x90, kdežto u zpevňující konstrukce převládají rychlospojky. Samozřejmostí u této konstrukce jsou výškově přestavitelné nožky 28 a u vozíku kombinace pojízdného kolečka a nožky 29. Obě výše uvedené konstrukce jsou zakryty deskami

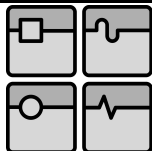


o příslušných rozměrech **18** a **19**. Tyto krycí desky jsou rovněž určeny pro nalepení grafiky **11**. Z bezpečnostních důvodů je výše popsán celek obehnan ze všech stran hliníkovou konstrukcí **12**, která je vybavena plexisklem **14**. Pro snadné uvedení pracoviště do provozu a následnou obsluhu jsou součástí této konstrukce **12** tři dveřní systémy. Dvířka **9** jsou určena pro přístup obsluhy do prostoru řídicích jednotek. Dveře **8** a **10** slouží přímo ke vstupu operátora do prostoru pracoviště. Aby byly splněny bezpečnostní předpisy, jsou dveře **8** a **10** opatřeny magnetickými senzory **6** pro kontrolu uzavření těchto dveří. Robot **1** je ovládán panelem smartPAD a Equator™ přes dotykový monitor **7**. Princip funkce pracoviště je následující:

- 1) Robot **1** uchopí master součást **15**, přesune ji do upínacího přípravku měřicího přístroje Equator™ **2**, kde dojde k referenčnímu měření
- 2) Po změření je master součást umístěna opět do jí určeného stojánu
- 3) Dále dochází k manipulaci a měření všech součástí **13** z neroztříděné palety **3** a jejich třídění do palety s dobrými **5** nebo špatnými **4** kusy dle naměřených hodnot
- 4) Po změření všech součástí dojde k jejich přeskládání zpět do palety **3**
- 5) Následně dojde ke kalibraci snímacích doteků měřicího přístroje a celý cyklus se opakuje

8.5 Bezpečnost

Bezpečnost strojních zařízení a v podstatě jakéhokoliv technického řešení je v dnešní době velmi striktně analyzována a vyžadována. Existují příslušné normy a vyhlášky zabývající se touto problematikou. Tato diplomová práce neobsahuje podrobnou analýzu rizik vztahující se na řešený problém. Autor práce však tento fakt bral v úvahu a při vypracování návrhu a realizaci měla bezpečnost nejvyšší prioritu. Tuto skutečnost dokazuje i koeficient významnosti g_n u požadavku na bezpečnost pracoviště (*podkapitola 8.2*), použitého v multikriteriální metodě hodnocení jednotlivých variant. Jak už bylo v práci několikrát zmiňováno, primárním účelem realizace automatizovaného pracoviště tohoto typu je jeho prezentační využití. Proto musí splňovat především požadavky na bezpečnost jak vůči obsluze, tak vůči zákazníkovi a ostatním návštěvníkům veletrhu či předváděcí akce. Z tohoto důvodu je celé pracoviště opatřeno mechanickým způsobem zabezpečení – konstrukcí s průhledným plexisklem. Tento způsob eliminuje či zcela vylučuje jakoukoliv možnost kolize robotu s přihlízejícím člověkem. Jelikož je však tato konstrukce vybavena dvěma dveřními systémy, bylo třeba zabezpečit naprosté zastavení činnosti robotu v případě otevření jakýchkoliv z těchto dveří. Byl zvolen magnetický bezpečnostní senzor společnosti Euchner, který je napojen přímo na speciální bezpečnostní okruh řídicí jednotky KR C4 compact. Podrobnější informace o tomto senzoru lze najít v následující kapitole číslo 9 této práce. Dalším bezpečnostním prvkem tohoto pracoviště je nouzové stop tlačítko (angl. Emergency stop) na ovládacím panelu robotu, při jehož stisknutí v jakékoliv nepředvídatelné situaci dojde rovněž k zastavení činnosti robotu. Ze strany porovnávacího měřicího přístroje Equator™ v porovnání s průmyslovým robotem hrozí řádově nižší nebezpečí vůči člověku. Dosah přístroje je dán jeho paralelní kinematickou strukturou, respektive délkou jednotlivých servovzpěr, které omezují pohyb přístroje pouze uvnitř vlastní konstrukce. Pravděpodobnost vzniku kolize měřicího přístroje s robotem je eliminována příslušnými podmínkami v programech robotu a softwaru Automation. Robot nesmí vstoupit do prostoru měřicího přístroje, pokud snímací systém přístroje Equator™ není v bezpečné pozici, a zároveň nesmí dojít k měření či jinému pohybu přístroje, když se v jeho pracovním prostoru nachází průmyslový robot.



9 REALIZACE

9.1 Bezpečnostní senzor na dveře

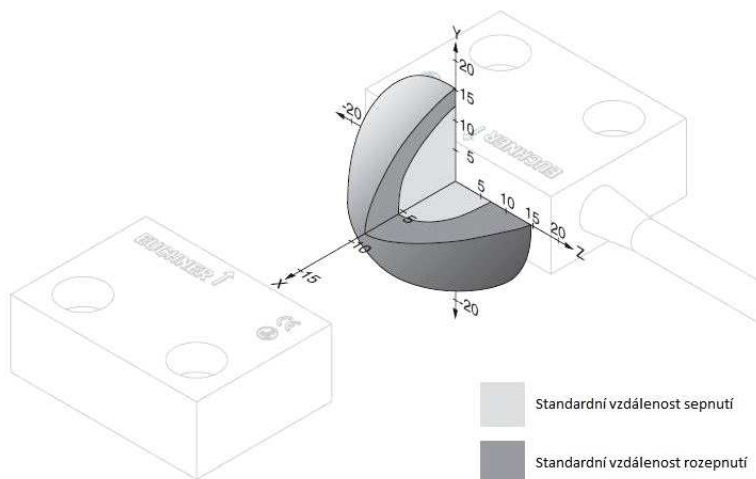
Pro udržení úrovně zabezpečení pracoviště bylo třeba zvážit, jaký bezpečnostní prvek použít. Hlavní pozornost byla věnována oblastem možného přístupu člověka do pracovního prostoru robotu – dveřím. V dnešní době existuje celá řada bezpečnostních systémů, používaných právě v průmyslové praxi. Jedním z výrobců takových systémů je i německá společnost Euchner, mající zastoupení také v České republice.

Z hlediska principu funkce nabízí společnost bezpečnostní spínače magnetické, elektronické či elektromechanické. Tyto spínače mohou být mnohdy zabudovány přímo do pantu či kliky dveří. [51]

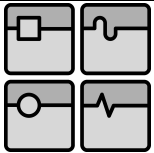


Obr. 9.1: Bezpečnostní systém CMS-R-BZP [51]

Pro aplikaci, zpracovávanou v této diplomové práci, byl vybrán magnetický bezpečnostní spínač s označením CMS-R-BZB-SC výše uvedené společnosti, spolu s jemu odpovídajícím aktuátorem se dvěma permanentními magnety a označením CMS-M-BH (Obr. 9.1). Aktuátor bude upevněn na pohyblivé a spínač na stacionární části dveřního systému. Velikost obou těchto komponent je 36 x 26 x 13 mm. Velkou výhodou je možnost připojení přívodního kabelu přímo do bezpečnostního obvodu řídicí jednotky KR C4 compact. To znamená, že zde není nutnost použití přídatného bezpečnostního relé. Kabel je k čtecí hlavičce upevněn pomocí závitu M8. [51] [69]



Obr. 9.2: Vzdálenosti sepnutí a rozeznutí systému CMS-R-BZP [69]



9.2 Koncový efektor robotu

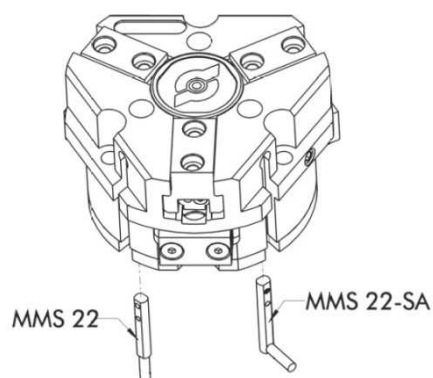
Po konzultaci s obchodním zástupcem společnosti Schunk v ČR byl pro danou aplikaci vybrán vhodný koncový efektor robotu. Hlavním kritériem pro volbu byla velikost a tvar součásti, se kterou se bude manipulovat (viz podkapitola č. 6.1). Jelikož se jedná o rotační součást malých rozměrů a nízké hmotnosti, byl zvolen koncový efektor s označením JGZ 40 (Obr. 9.3), jenž je pro takový typ dílců vhodný. [10] [70]



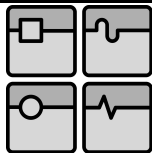
Obr. 9.3: Koncový efektor Schunk JGZ 40 [70]

Jedná se o tříčelistový centrický koncový efektor s kompaktními rozměry. Efektor je pneumatický. To znamená, že k vyvození pohybu jeho aktivní části (pístu) je potřeba dodávat stlačený vzduch. Výrobce uvádí, že tento stlačený vzduch musí být filtrován (10 μm) a vysušen. K samotnému koncovému efektoru bylo třeba nechat vyrobít přírubu pro jeho upevnění k průmyslovému robotu a tři prsty, jejichž tvar a velikost závisí na místě uchopení dílce. V tomto případě se jedná o průměr 24 mm (Obr. 6.2). Společnost Schunk ke svým produktům nabízí širokou řadu příslušenství. Mezi tímto příslušenstvím nechybí ani senzory na detekci koncových poloh (Obr. 9.4). Senzory zobrazené na obrázku níže, konkrétně typ MMS 22-SA, jsou použity u upínacího přípravku. Koncový efektor obsahuje pouze jeden, avšak programovatelný typ s označením MMSK-P 22-S-PNP. [10] [70]

Funkční mechanismus efektoru JGZ 40 je umístěn v lehkém pouzdře (1) ze slitiny hliníku. Jednotlivé ocelové čelisti (4) jsou vedeny v T-drážkách (2). Tento typ vedení výrazně zvyšuje únosnost těchto čelistí, respektive možnost připevnit delší uchopovací prsty. Princip funkce je postaven na tom, že stlačený vzduch pohybuje pístem v těle efektoru směrem nahoru a dolů. Píst ve své horní části disponuje systémem klínů (3), které převádějí pohyb nahoru a dolů na pohyb kolmý (do boku), který pohybuje čelistmi. Na obrázku 9.3 je mimo výše uvedené části zobrazen i prostor pro zabudování snímačů (5). V tabulce 9.1 jsou poté shrnuty doplňující technické parametry a specifikace vybraného koncového efektoru. [10] [70]

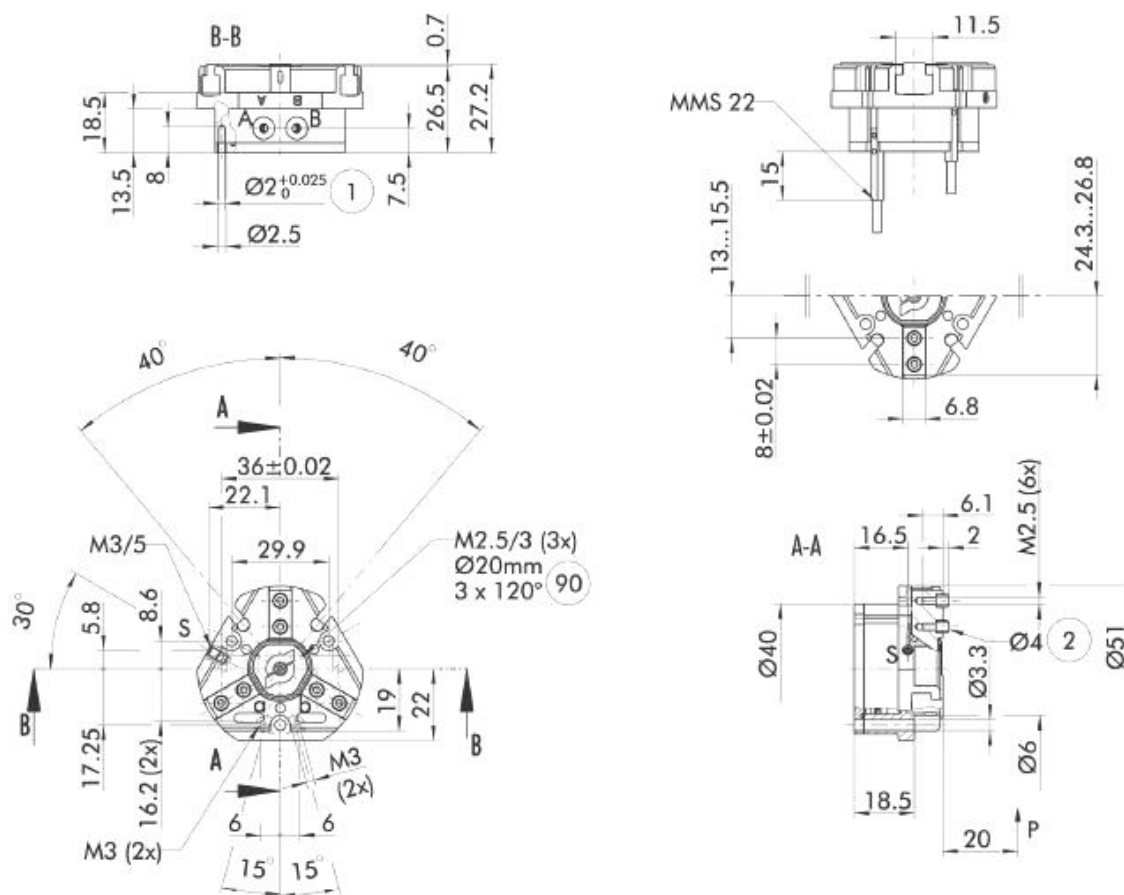


Obr. 9.4: Senzory na detekci koncových poloh [70]



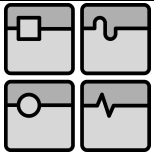
Tab. 9.1: Přehled parametrů koncového efektoru JGZ 40 [10] [70]

Zdvih	2,5 mm
Upínací síla	255 N
Povolovací síla	270 N
Hmotnost	0,12 kg
Doporučená hmotnost upínané součásti	1,25 kg
Spotřeba vzduchu (upnutí-povolení)	5 cm ³
Minimální / maximální pracovní tlak	2 / 8 bar
Doporučený pracovní tlak	6 bar
Čas upnutí / čas povolení	0,02 s / 0,03 s
Maximální délka prstu	50 mm
Maximální hmotnost jednoho prstu	0,1 kg
Minimální / maximální operační teplota	-10 °C / 90 °C
Opakovatelnost	0,01 mm



Obr. 9.5: Rozměry koncového efektoru JGZ 40 [70]

Při realizaci bylo zjištěno, že hmotnost sklíčidla činí 0,162 kg. Po přičtení hmotnosti měřené součásti (0,11 kg) a montážní příruby (0,286 kg) zjistíme, že celková hmotnost koncového efektoru nepřekročí 0,6 kg. Tato hodnota se zdaleka neblíží maximální udávané nosnosti robotu KUKA, která je 6 kg (viz podkapitola 5.2).



9.3 Upínací přípravek

Jako upínací přípravek bylo nakonec zvoleno pneumatické sklíčidlo. Jedná se v podstatě o zcela stejný uchopovací systém, jaký je použit pro zabezpečení funkce koncového efektoru. Není zde proto nezbytně nutné tento systém znovu popisovat. Je však třeba zmínit, že sklíčidlo zůstává nezměněno (Schunk JGZ 40), avšak bylo třeba nechat vyrobit přírubu pro jeho snadné připevnění na upínací desku přístroje EquatorTM. Kromě uvedené příruby bylo třeba pořídit i jiný typ uchopovacích prstů, jelikož na měřicím přístroji bude součást upínána za její největší průměr (Obr. 6.2), který je 42,9 mm. U upínacího přípravku jsou také použity senzory na detekci koncových poloh. Fotografie přípravku se nachází v příloze této diplomové práce. [10]

9.4 Konstrukce

Jak již bylo uvedeno o několik stran výše, hlavním konstrukčním prvkem pro stavbu pracoviště jsou hliníkové profily. Dodavatelem byla společnost GF Machinery, partner společnosti Bosch Rexroth. Použity byly profily o délce strany 45 mm a dané příslušenství.

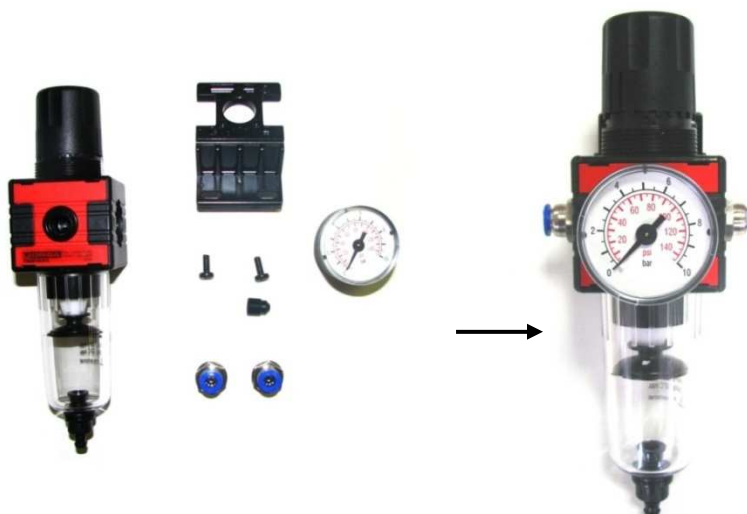
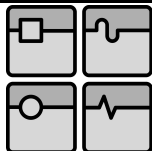
9.5 Ostatní nakupované komponenty

Kromě výše uvedených komponent bylo během realizace pracoviště třeba pořídit také jiné důležité díly.

- **Šrouby, podložky a matice řady M6 až M12** – pro upevnění desek a robotu k hliníkové konstrukci
- **Polyuretanové hadice** (ø 4 a 6 mm) – dobrá pružnost a odolnost
- **Šroubení a rychlospojky** (pro hadice s ø 4 a 6 mm) – jednoduchá a rychlá montáž, kleštiny vyrobeny z nerezové oceli, kvalitní těsnění šroubení pomocí O-kroužku, max. tlak 10 bar, nespočet tvarových typů (redukce, T a Y rozdvojky) [66]

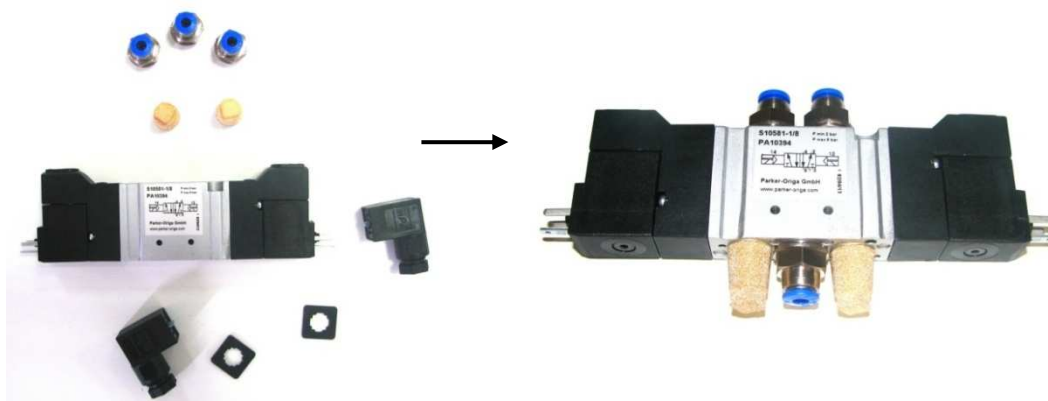


Obr. 9.6: Hadice, šroubení a rychlospojky (foto autor DP)



Obr. 9.7: Jednotka na úpravu stlačeného vzduchu (filtr, redukční ventil, manometr) před a po montáži (foto autor DP)

- **Jednotka na úpravu stlačeného vzduchu (filtr, redukční ventil, manometr):** Jelikož pneumaticky ovládané prvky realizovaného pracoviště vyžadují určitý pracovní tlak a danou kvalitu stlačeného vzduchu, bylo třeba zakoupit regulátor s filtrem. Součástí této jednotky (Parker-Origa) je rovněž manometr se stupnicí od 0 do 10 bar. Regulátor je membránový a je řízen pomocí pružiny, která je přestavována otočným ventilem. Maximální výstupní tlak je 8 bar, což splňuje požadavky výše uvedeného koncového efektoru a upínacího přípravku. Na obrázku 9.7 je vyobrazena tato jednotka a příslušenství jak v dodaném demontovaném stavu, tak po montáži.
- **Rozváděcí ventil (Obr. 9.8):** Z předchozích stran této diplomové práce vyplývá, že ke správné a zamýšlené funkci pracoviště je třeba určitým způsobem ovládat jak koncový efektor, tak upínací přípravek. Jelikož výše uvedený robot KUKA disponuje integrovanými rozváděcími ventily ve svém rameni, bylo třeba zabezpečit způsob řízení pouze pro upínací přípravek. Byl zvolen dvoupolohový pěticestný šoupátkový ventil Parker-Origa s elektrickým ovládaním (24 V DC) a rozsahem pracovního tlaku 1,5 až 8 bar. Jednotlivé cesty ventilu jsou opatřeny závitem, tudíž bylo rovněž důležité zajistit nákup příslušných šroubení. [66]



Obr. 9.8: Rozváděcí ventil Parker-Origa před a po montáži (foto autor DP)

10 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V následujících tabulkách 10.1 a 10.2 je provedeno ekonomické zhodnocení realizace pracoviště. V úvahu jsou brány nejen nakupované či vyráběné komponenty, ale také energie potřebné ke správnému chodu pracoviště.

Tab. 10.1: Náklady na nakupované a vyráběné komponenty pracoviště

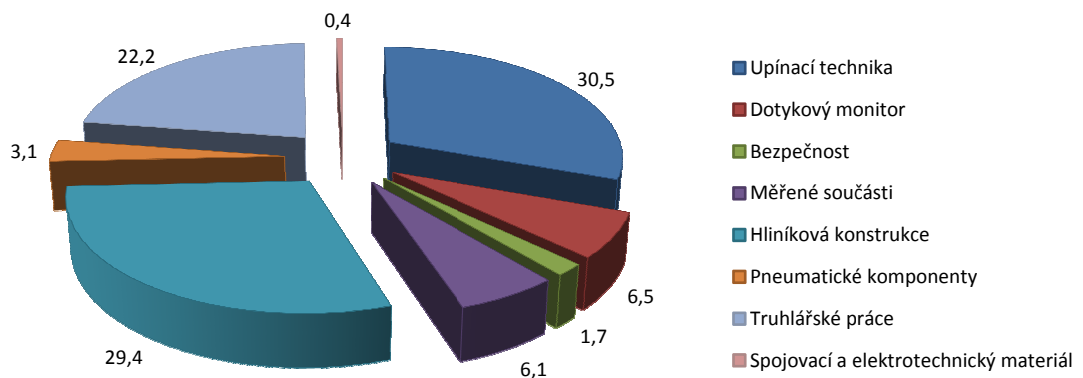
Komponenta		Cena v Kč
Koncový efektor robotu (SCHUNK)	Centrické chapadlo	10 914,-
	Senzor koncové polohy	1 887,-
	Uchopovací prsty a příruba na robot KUKA	11 750,-
Upínací přípravek (SCHUNK)	Centrické chapadlo	10 914,-
	Senzory koncových poloh	2 805,-
	Uchopovací prsty a příruba k upnutí na Equator™	11 750,-
Monitor	Dotykový monitor NEC	8 840,- *
	Montážní rámeček ELO	1 880,- *
Bezpečnostní senzory (EUCHNER)		2 843,- *
Měřené součástky		10 000,-
Hliníková konstrukce - základ		48 257,-
Hliníková konstrukce – ochranná vnější konstrukce		*
Truhlářské práce a materiál (palety, desky, poličky)		36 400,-
Truhlářské práce a materiál (kryty konstrukce)		*
Plexisklo		*
Pneumatické komponenty		5 100,-
Ostatní (spojovací a elektrotechnický materiál)		685,-
Celkové náklady		164 025,-

* Poznámka: Bude zakoupeno a implementováno ve druhé fázi realizace.

Tab. 10.2: Náklady na provoz pracoviště

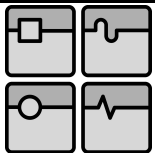
Spotřeba	Cena	El. energie	Stlačený vzduch	Náklady za 8 hodin
		4,64 Kč / kWh	5 Kč / m ³	
Equator TM		0,75 kW (maximum)	-	27,84 Kč
Řídicí jednotka přístroje Equator TM				
KR 6 R900 sixx		-	-	0 Kč
KR C4 compact		2 kW	-	74,24 Kč
Monitor		0,021 kW	-	cca 0,78 Kč
Upínací přípravek		-	5 cm ³ / 2 zdvihy (čas cyklu 0,75 min)	0,016 Kč
Koncový efektor		-	5 cm ³ / 2 zdvihy (čas cyklu 0,75 min)	0,016 Kč
Celkové náklady				103 Kč^{**}

**** Poznámka:** Zaokrouhleno na celé číslo.



Obr. 10.1: Graf vyjadřující procentuální podíl nakupovaných komponent

Tato kapitola má za úkol poskytnout čtenáři určitou představu o výši nákladů na realizaci části projektu zpracovávaného v této diplomové práci. Rovněž obsahuje přibližný odhad nákladů spojených s provozem celého automatizovaného měřicího pracoviště s průmyslovým robotem. Jelikož se jedná o technické řešení především pro prezentační účely, není obsahem kapitoly odhad návratnosti této investice. Pokud však bude budoucí prezentace pracoviště jednou z příčin zakoupení porovnávacího měřicího přístroje EquatorTM zákazníkem, lze již v tomto momentě považovat investici za navrácenou. Autor práce také očekává nárůst zájmu o řešení automatizovaných měřicích pracovišť s přístrojem EquatorTM.



11 ZÁVĚR

V první části této diplomové práce byl proveden teoretický úvod týkající se hned několika oblastí. Jelikož projekt měřicího pracoviště s průmyslovým robotem disponuje porovnávacím měřicím přístrojem EquatorTM, jenž je založen na kinematické struktuře paralelního typu, věnuje se první kapitola právě této problematice. Především se zaměřuje na dva nejčastější typy kinematických struktur, popisuje jejich rozvoj z pohledu historického, uvádí základní konstrukční provedení, typické zástupce a shrnuje jejich výhody, nevýhody i aplikační použití. Druhá kapitola zasvětí čtenáře do problematiky měření pomocí souřadnicových měřicích strojů. Poté, co je proveden popis funkce a základních konstrukčních částí souřadnicového měřicího stroje, následuje úsek, který se podrobněji věnuje srdci těchto strojů, za které lze považovat snímací systém. Je zde vypracováno rozdělení a popis jednotlivých částí snímacího systému dle současných technologií a možností. Třetí kapitola v podstatě navazuje na kapitolu předchozí a důkladně shrnuje všechny důležité informace a poznatky z oblasti hardwaru i softwaru o porovnávacím měřicím přístroji Renishaw EquatorTM. Je zde zevrubný popis konstrukčního řešení, vysvětlení principu porovnávací funkce, představení programového vybavení a shrnutí technických parametrů. Poslední problematikou, která byla začleněna do teoretické části, je souhrn některých současných řešení, kde dochází ke střetu průmyslového měření a automatizace. Několik stran má za úkol seznámit čtenáře s řešeními jak s průmyslovým robotem, tak bez něj. Na konci této kapitoly je proveden popis použitého průmyslového robotu KUKA a jeho příslušenství. Druhá část práce se již přímo věnuje návrhu projektu měřicího pracoviště s průmyslovým robotem. Součástí je několik samostatných kapitol, z nichž každá je neméně důležitá pro úspěšnou finální realizaci pracoviště. První z těchto kapitol se věnuje programování porovnávacího měřicího přístroje EquatorTM. Je zde podrobně popsán postup, který autor této práce dodržoval při vytváření měřicího programu. Obsahem je především volba upínacího přípravku, snímacího doteku a metodiky měření. Výstupem této kapitoly je kompletní měřicí program daných rozměrů dané součásti. Následující kapitola se zaměřuje na druhou nejdůležitější část pracoviště, za kterou lze považovat průmyslový robot. Jsou zde popsány nejdůležitější digitální vstupní a výstupní signály, základní úkony robotu a Renishaw I/O jednotka. Součástí je také podrobný rozbor a popis autorovy představy o jednotlivých programech robotu. Výstupem kapitoly je návrh jedenácti vývojových diagramů pro programy robotu a zapojení I/O jednotky. Dalším obsahem praktické části je již samotný grafický návrh pracoviště. Nejprve bylo třeba si stanovit základní požadavky a cíle, které by mělo pracoviště splňovat. Dále je zde krátce popsán princip bazické bodovací metody (metody multikriteriálního hodnocení), dle které byla následně volena optimální varianta. Součástí práce jsou celkem tři varianty řešení koncepce měřicího pracoviště s průmyslovým robotem. Podrobný grafický návrh vybrané varianty a potřebná výkresová dokumentace jsou součástí příloh diplomové práce. Poslední strany se věnují samotné realizaci a ekonomickému zhodnocení. Jsou zde popsány hlavní nakupované komponenty, které se v pracovišti implementovaly či implementovat budou. Jedná se především o upínací přípravek, koncový efektor, bezpečnostní senzor, spojovací a pneumatické prvky a další. V ekonomickém hodnocení byly shrnuty náklady na realizaci a provoz tohoto projektu. Z celkového pohledu lze konstatovat, že cíle, stanovené v zadání práce, byly splněny. Bohužel, z důvodů delších lhůt projektování, schvalování investice a dodávek jednotlivých komponent nebylo v silách autora práce realizovat kompletní pracoviště tak, jak je v této práci navrženo. Aktuální stav realizace je patrný z příloh této práce a je třeba poznamenat, že se na něm stále usilovně pracuje a v brzké době by se mělo objevit na některém z tuzemských veletrhů. Vlastnosti a možnosti reálného využití jsou zmíněny již v předchozích kapitolách.

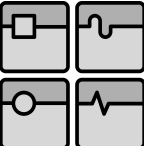
12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Renishaw: zvyšování efektivity výroby a zdravotní péče* [online]. © 2001-2013 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz>
- [2] *Renishaw: enhancing efficiency in manufacturing and healthcare* [online]. © 2001-2013 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com>
- [3] *KUKA průmyslové roboty* [online]. © 2013 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/
- [4] KOLÍBAL, Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. *Robotické systémy vyšších generací: Studijní opora* [online]. 2005 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.uvssr.fme.vutbr.cz>
- [5] *Programujte.com - web o programování, webdesignu, počítačové grafice, databázích, elektrotechnice a designu* [online]. © 2003–2012 [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://programujte.com/>
- [6] *Mitutoyo America Corporation / Mitutoyo America Corporation* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.mitutoyo.com/>
- [7] *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, Březen 2012, č. 3. ISSN 1212-2572.
- [8] *Automatizace a automatizační technika: automatické systémy*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 2000, 166 s. ISBN 80-722-6249-1.
- [9] *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, Říjen 2012, č. 10. ISSN 1212-2572.
- [10] *SCHUNK GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.cz.schunk.com>
- [11] *Selter Magnetic Systems* [online]. [2012] [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.selter.es/eng>
- [12] *FyzWeb - Bizarní krámy* [online]. [2013] [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/bizarni_kramy/mag1.php
- [13] ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E). *Systems and software engineering — Vocabulary*. Geneva (Switzerland): ISO, 2011. Dostupné z: http://pascal.computer.org/sev_display/24765-2010.pdf
- [14] *Equator 300 and Equator 300 extended height – working volumes*. Renishaw, [2012], 1 s. H-5504-9083-01-A. Technical information – EQ33 & EH33 working volumes. Katalogový list. Equator EQ33-EH33 working volumes.pdf (elektronická podoba textu)

- [15] *Měřicí systém Equator 300*. Renishaw, 2011. 4 s. H-5504-8210-01-A. Katalogový list – měřicí systém Equator 300
- [16] *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. [2011] [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/rp1_skripta.pdf
- [17] KARGER, Adolf a Marie KARGEROVÁ. *Základy robotiky a prostorové kinematiky*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 265 s. ISBN 80-010-2183-1.
- [18] *Parallel Robots, Hexapods, Stewart platforms - ParalleMIC* [online]. © 2000–2012 [cit. 2012-11-15]. Dostupné z: <http://parallemic.org/>
- [19] Stewart platform. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001-2012 [cit. 2012-11-15]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform
- [20] MRÁZ, Petr. *Průmyslové roboty v praxi* [online]. [2007] [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Aplikace_Robotu.pdf
- [21] *INDEX-Werke GmbH & Co. KG - Home* [online]. [2012] [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: <http://www.index-werke.de>
- [22] *Fyzika :: MEF* [online]. © 2006 - 2013 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [23] ŠVÉDA, Jiří a Jan SMOLÍK. *Nové kinematické struktury strojů* [online]. [2009] [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/11_nove_kinematicke_struktury_stroju.pdf
- [24] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [25] *Průmyslové roboty, robotizace, automatizace FANUC Robotics Czech - Robotics* [online]. © 2009 [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://www.fanurobotics.cz/>
- [26] *ABB - technologie pro energetiku a automatizaci* [online]. © 2012 [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/>
- [27] *Ai magazine: automotive industry*. Žilina: LEADER press, s. r. o., 2012, roč. 5, č. 1. ISSN 1337-7612.
- [28] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: část I* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>

		Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 99
		DIPLOMOVÁ PRÁCE	

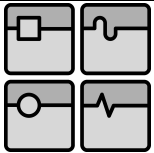
- [29] *Úvod / Hexagon Metrology s.r.o. - Česká republika a Slovensko* [online]. © 2012 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://www.hexagonmetrology.cz/>
- [30] *Nikon Metrology - 3D Scanning - 3D Inspection - CMM - Articulated Arms - Computed tomography - Large Scale Inspection* [online]. © 2013 [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: <http://www.nikonmetrology.com>
- [31] *Deptofmech [Odbor mechaniky a mechatroniky]* [online]. 2012 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <http://www.mechatronics.cz>
- [32] *Bosch Rexroth* [online]. [2013] [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www13.boschrexroth-us.com/partstream/>
- [33] *Doteky a příslušenství*. Renishaw, 2012. 106 s. H-1000-3208-15-A. Technické parametry. Katalog.
- [34] *EZ-IO package Software version 3.0*. Renishaw, [2013]. 30 s. H-5923-8500-01-A. EZ-IO package – user guide. Uživatelská příručka.
- [35] *FANUC Certified Servicing Integrator / Autocells.com* [online]. © 2013 [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: <http://www.autocells.com/>
- [36] *LR Mate 200iC Intelligent Machining Robot -- FANUC Robotics Industrial Automation - YouTube* [online]. 23.12.2011 [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=66c6IUD9Brc>
- [37] *Amest s.r.o.* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.amest.cz/>
- [38] *Mitutoyo: Startseite* [online]. © 2013 [cit. 2013-01-04]. Dostupné z: <http://www2.mitutoyo.de/>
- [39] *Topmes* [online]. [2013] [cit. 2013-01-15]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/>
- [40] *KUKA Industrial Robots* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.kuka-robotics.com>
- [41] *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Publishing, 2011 [cit. 2013-05-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/archiv-rok-clanky.html?issue=12&volume=2011>
- [42] *QMC - Home of Flexible Robotic Measurement Systems. QMC supports every phase of the product development cycle.* [online]. 2013 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <https://www.qmc.com/>
- [43] *Mikrolar - Custom Hexapods* [online]. [2013] [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.mikrolar.com/>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 100
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [44] Solid State Relays (SSRs) vs Electromechanical Relays (EMRs). In: *Crydom - Solid Statements Newsletters* [online]. © 1996 - 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.crydom.com/en/Tech/Newsletters.shtml>
- [45] *Metodický portál RVP - Modul Články* [online]. [2013] [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: http://clanky.rvp.cz/wp-content/upload/prilohy/2804/parove_srovnvani.pdf
- [46] *Automatizace a automatizační technika 1: systémové pojetí automatizace*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012, 217 s. ISBN 978-80-251-3628-7.
- [47] *TAJMAC-ZPS, a.s.* [online]. © 2012 [cit. 2013-01-26]. Dostupné z: <http://www.zps.cz/>
- [48] *BONEGA* [online]. [2008] [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: http://www.bonega.cz/go.asp?odkaz=elektro/vzdelani/clanky/kryti_ip.htm
- [49] KOLÍBAL, Zdeněk. *Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. PRAm*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 189 s. ISBN 80-214-0526-0.
- [50] *Roboty a manipulátory: Učební text VOŠ a SPŠ Kutná Hora* [online]. [2008] [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf
- [51] *Euchner* [online]. © 2010 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.euchner.cz/>
- [52] *MTpro 3.4* [program na DVD-ROM]. Ver. 3.4.0.1. Stuttgart: Bosch Rexroth AG, 2012. Planning software for assembly systems
- [53] Solid State Relays - Developer Zone - National Instruments. *National Instruments: Test, Measurement, and Embedded Systems* [online]. © 2012 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/4125/en>
- [54] INTEGROVANÉ SPÍNACÍ MODULY (SOLID STATE RELEAY). In: *Ústav mechatroniky a technické informatiky (MTI) | Ústav mechatroniky a technické informatiky* [online]. [2013] [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.mti.tul.cz/files/vke/menice.pdf>
- [55] *PI Leader in: Precision Nano-Positioning & Piezo Engineering, NanoAutomation, Piezo Stage, Hexapod, PZT, Piezo Actuator, Transducer: Sub-Nanometer Resolution, Metrology, Photonic Packaging Automation, Piezo Linear Motor, Steering Mirror, Translation Rotation Stage, MicroPositioning, Hexapods, Capacitance Sensor* [online]. © 1996-2012 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.physikinstrumente.com>
- [56] *Fully automated surface finish measurement on your CMM*. Renishaw, 2009. 2 s. H-1000-2278-02-A. REVO[®] SFP1 surface finish probe system. Leták (elektronická podoba textu)
- [57] SP25M Technical Paper. In: *SP25M* [online]. © 2001-2013 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/sp25m>

		Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 101
		DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [58] *Precision styli*. Renishaw, 2008. 60 s. H-1000-3304-01-A. For reliable, highly accurate results. Brožura.
- [59] *SP25 User Guide*. Renishaw, [2012], 78 s. H-1000-5104-04-A. Uživatelská příručka (elektronická podoba textu)
- [60] SP25M Scanning Performance Data. In: *SP25M* [online]. © 2001-2013 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/sp25m>
- [61] *Catalog of ideas 2011/12*. Augsburg: KUKA, [2011]. 180 s. Katalog
- [62] *CMM-V Vision Probing for the CMM*. Hexagon Metrology, 2007, 3 s. Brožura (elektronická podoba textu)
- [63] CRYSTA-Apex S Series. In: *Mitutoyo America Corporation / Mitutoyo America Corporation* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.mitutoyo.com/Images/003/315/2097_CRYSTA_ApexS.pdf
- [64] Automated Measurement Cell Technology. In: *Mitutoyo America Corporation / Mitutoyo America Corporation* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.mitutoyo.com/Images/003/305/1980_AMC.pdf
- [65] In-line CNC Coordinate Measuring System MACH Series. In: *Mitutoyo America Corporation / Mitutoyo America Corporation* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://www.mitutoyo.com/Images/003/318/2085_MACH.pdf
- [66] *FLUIDTECHNIK BOHEMIA, s.r.o.* [online]. © 2006-2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.fluidbohemia.cz/>
- [67] Specifikace | KR 6 R900 sixx. In: *KUKA průmyslové roboty* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/res/sps/f776ebab-f613-4818-9feb-527612db8dc4_PB0001_KR_AGILUS_en.pdf
- [68] KR AGILUS sixx. In: *KUKA průmyslové roboty* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_KR_AGILUS_sixx_en.pdf
- [69] Non-Contact Safety Systems CMS. In: *Euchner* [online]. © 2010 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.euchner.cz/data/pdf/produkty/bezpecnost/systemy/readhead-cms/kat_Euchner_readheads_CMS-E-BR,ER,FR.pdf
- [70] JGZ 40. In: *SCHUNK GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/JGZ_40_DE.pdf

**13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

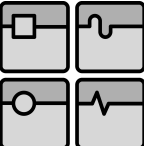
g_n [-]	–	koeficient vyjadřující význam jednotlivých vlastností
p_T [%]	–	procentuální vyjádření hodnocené vlastnosti
t_j [-]	–	třídník, vyjadřující hodnotu jednotlivých hodnocených vlastností
T_n [-]	–	n hodnocených faktorů, vlastností či parametrů
τ [-] [%]	–	technická hodnota varianty
τ_n [-]	–	technický stav hodnocené varianty dle různých hledisek
H	–	hlavní program
I	–	inputs (v překladu vstupní)
O	–	outputs (v překladu výstupní)
P	–	podprogram
KD	–	kinematická dvojice
KS	–	kinematická struktura
CMM	–	coordinate measuring machine (v překladu souřadnicový měřicí stroj)
HKS	–	hybridní (smíšená) kinematická struktura
PKS	–	paralelní kinematická struktura
SKS	–	sériová kinematická struktura
SMS	–	souřadnicový měřicí stroj
SSR	–	solid state relay (v překladu polovodičové relé)

14 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Mechanismus pro testování pneumatik [18].....	15
Obr. 2.2: Gough-Stewartova plošina (hexapod H-840) [55]	16
Obr. 2.3: Základní dvě koncepce mechanismů s PKS [20]	16
Obr. 2.4: Octahedral Hexapod VOH-1000 [18]	17
Tab. 2.1: Specifikace stroje Octahedral Hexapod VOH-1000 [18].....	17
Obr. 2.5: INDEX-Werke V100 – stroj typu Linapod [21].....	18
Tab. 2.2: Přehled parametrů stroje V100 [21]	18
Obr. 2.6: Tricept společnosti SEF Roboter [20]	19
Obr. 2.7: Stolová jednotka společnosti Mikrolar [43]	19
Obr. 2.8: Sliding Star [31]	20
Obr. 2.9: FANUC M-1iA [25]	21
Obr. 2.10: ABB IRB 360 [26].....	21
Obr. 2.12: Dentální CAD/CAM systém Renishaw incise TM [2].....	22
Obr. 2.11: Renishaw Equator TM 300 [2]	22
Obr. 2.13: Koncepce vertikálního frézovacího centra TAJMAC-ZPS MCFV 1050 [47].....	23
Obr. 2.14: Průmyslový robot KUKA KR 1000 titan [61]	24
Tab. 2.3: Typy průmyslových robotů dle kinematického uspořádání [8] [49].....	25
Obr. 2.15: Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo CRYSTA-Apex S 900 [6].....	27
Obr. 3.1: Mostový typ [16]	29
Obr. 3.2: Portálový typ [16].....	29
Obr. 3.3: Sloupový (stojanový) typ [16].....	29
Obr. 3.4: Výložníkové typy [16].....	29
Obr. 3.5: Základní prvky snímacího systému souřadnicového měřicího stroje [1].....	30
Obr. 3.6: Základní rozdělení hlavice souřadnicových měřicích strojů [1]	31
Obr. 3.7: Základní rozdělení sond souřadnicových měřicích strojů [1]	31
Obr. 3.8: Základní rozdělení modulů sond souřadnicových měřicích strojů [1]	32
Obr. 3.9: Renishaw PH20 TM [2].....	32
Obr. 3.10: Měření drsnosti povrchu pomocí systému REVO [®] [56]	33
Obr. 3.11: Spínací doteková sonda Renishaw TP20 [1]	34
Obr. 3.12: Princip funkce skenovací sondy SP25M [57]	34
Obr. 3.13: Modulární systém Renishaw SP25M [60].....	35
Obr. 3.14: Optické měření pomocí CMM-V [29] [62]	35
Obr. 3.15: Nikon LC15Dx v praxi a jeho princip [30]	36
Obr. 3.17: Rozmanitost materiálů používaných ke konstrukci snímacích doteků [58].....	37
Obr. 3.16: Typy doteků společnosti Renishaw [33]	37
Obr. 3.19: Otočné stoly pro SMS [29].....	38
Obr. 3.18: Možnosti výměnného systému FCR25 [59]	38
Obr. 3.20: Kalibrační koule Renishaw [1]	39
Obr. 3.21: Použití kompenzačních senzorů teploty [63]	39
Obr. 4.1: Amest KP-189 - mezní kalibr pro kontrolu úplné konzole pedálu [37]	41
Obr. 4.2: Porovnávací měřicí přístroje Equator TM 300 a Equator TM 300 EH [2]	42
Tab. 4.1: Technické parametry přístroje Equator TM 300 [15].....	45
Obr. 4.3: Pracovní prostor přístrojů Equator TM 300 a 300 EH [14].....	46
Obr. 5.1: Schéma automatizovaného měřicího pracoviště firmy Mitutoyo [64]	48
Obr. 5.2: Koncepce robotické buňky společnosti ACE obsahující CMM [35]	49
Obr. 5.3: Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo MACH-V v automatizované lince [65].....	50
Obr. 5.4: Měřicí automat KS-500 společnosti Amest [37]	51

Obr. 5.5: Automatické měření pomocí silového senzoru FS-15iA [36].....	52
Obr. 5.6: Měření pomocí skeneru WLS400A – Hexagon Metrology [41].....	53
Obr. 5.7: Bezdotykové měření karoserie automobilu – řešení společnosti KUKA [61]	53
Obr. 5.8: Průmyslový robot KUKA KR 6 R900 sixx [67] [68]	54
Tab. 5.1: Pracovní oblast robotu KR AGILUS v číslech [67].....	55
Obr. 5.9: Pracovní oblast robotu – horní pohled [67].....	55
Obr. 5.10: Pracovní oblast robotu – boční pohled [67]	55
Tab. 5.2: Specifikace průmyslového robotu KUKA KR 6 R900 sixx [3] [48] [67] [68].....	56
Obr. 5.11: Řídící jednotka KR C4 compact [67]	56
Tab. 5.3: Specifikace řídicí jednotky KR C4 compact [3] [48] [67]	57
Obr. 5.12: Ovládací panel KUKA smartPAD [67].....	57
Obr. 6.2: Zjednodušený výkres součásti s vyznačením měřených rozměrů.....	60
Obr. 6.1: Měřená součást (foto autor DP).....	60
Obr. 6.3: Provizorní upínací přípravek – sklíčidlo (foto autor DP).....	61
Obr. 6.4: Princip sklíčidel ROTA TPS [10]	62
Obr. 6.5: Rozměry sklíčidla ROTA TPS 125-26/K [10].....	62
Tab. 6.1: Parametry sklíčidla ROTA TPS 125-26/K [10]	63
Obr. 6.6: Elektromagnet Selter [11]	63
Tab. 6.2: Parametry elektromagnetu Selter 63.11.003 [11].....	63
Obr. 6.7: Finální konfigurace snímacího doteku (foto autor DP).....	64
Obr. 6.8: Specifikace jednotlivých částí finálního snímacího doteku [33].....	65
Obr. 6.9: Kalibrace doteku (foto autor DP)	65
Obr. 6.10: Zdrojový kód bloku měření kružnice	68
Obr. 6.11: Měření master součásti na CMM (foto autor DP).....	69
Tab. 7.1: Specifikace vstupů a výstupů robotu [34]	72
Tab. 7.2: Přehled programů robotu.....	74
Obr. 7.1: Digitální I/O rozhraní pro Equator™ (foto autor DP).....	76
Tab. 8.1: Párové porovnání požadavků na pracoviště a určení koeficientů g_n	79
Obr. 8.1: Varianta č. 1 – Pohled z perspektivy	80
Obr. 8.2: Varianta č. 1 – Pohled shora.....	81
Tab. 8.2: Hodnocení varianty č. 1.....	81
Obr. 8.3: Varianta č. 2 – Pohled z perspektivy	82
Obr. 8.4: Varianta č. 2 – Pohled shora.....	83
Obr. 8.5: Varianta č. 2 – Pohled zepředu.....	83
Obr. 8.6: Varianta č. 2 – Pohled na vnitřní konstrukci zleva.....	84
Tab. 8.3: Hodnocení varianty č. 2.....	84
Obr. 8.7: Varianta č. 3 – Pohled z perspektivy	85
Obr. 8.8: Varianta č. 3 – Konstrukce	86
Obr. 8.9: Varianta č. 3 – Detail pojízdného vozíku	86
Tab. 8.4: Hodnocení varianty č. 3.....	87
Tab. 8.5: Technické hodnoty jednotlivých variant	87
Obr. 9.1: Bezpečnostní systém CMS-R-BZP [51].....	89
Obr. 9.2: Vzdálenosti sepnutí a rozepnutí systému CMS-R-BZP [69].....	89
Obr. 9.3: Koncový efektor Schunk JGZ 40 [70]	90
Obr. 9.4: Senzory na detekci koncových poloh [70]	90
Tab. 9.1: Přehled parametrů koncového efektoru JGZ 40 [10] [70]	91
Obr. 9.5: Rozměry koncového efektoru JGZ 40 [70].....	91
Obr. 9.6: Hadice, šroubení a rychlospojky (foto autor DP).....	92
Obr. 9.7: Jednotka na úpravu stlačeného vzduchu (filtr, redukční ventil, manometr)	93

před a po montáži (foto autor DP)	93
Obr. 9.8: Rozváděcí ventil Parker-Origo před a po montáži (foto autor DP)	93
Tab. 10.1: Náklady na nakupované a vyráběné komponenty pracoviště.....	94
Tab. 10.2: Náklady na provoz pracoviště	95
Obr. 10.1: Graf vyjadřující procentuální podíl nakupovaných komponent	95

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 106
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

15 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: **CD-ROM**

Příloha č. 2: **Výkresová dokumentace**

Příloha č. 3: **Zdrojový kód měřicích programů přístroje Equator™**

Příloha č. 4: **Vývojové diagramy programů robotu**

Příloha č. 5: **Fotodokumentace realizovaného pracoviště**

Příloha č. 6: **Zapojení I/O jednotky**

Příloha č. 7: **Schéma zapojení a komunikace**

Příloha č. 8: **Princip funkce SW Renishaw Automation**

Příloha č. 9: **Rozšířená 3D obrazová dokumentace vybrané varianty**

Příloha č. 10: **Nákres pneumatického obvodu**