

Konstrukce manipulátoru se dvěma stupni volnosti v Cardanově uspořádání

Jakub Zezula

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Zezula**
Osobní číslo: **T16047**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Konstrukce manipulátoru se dvěma stupni volnosti v Cardanově uspořádání**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma
2. Navrhněte konstrukci V 3D CAD programu
3. Zjistěte základní vlastnosti konstrukce ovlivňující dynamické chování
4. Zhodnoťte navržené řešení

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **ÚŘEDNÍČEK, Z.:** Robotika, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Zlín 2012
2. **SHIGLEY, J.E., MISCHE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.:** KONSTRUOVÁNÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ
3. **PYTEL, A., KIUSALAAS, J.:** Mechanics of Materials
4. **Dále dle zadání vedoucího BP**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Maloch, CSc.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2018

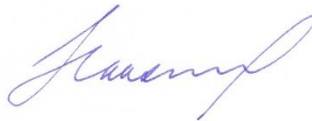
Termín odevzdání bakalářské práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 28. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

⁴¹ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně pasudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

⁴² zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

⁴³ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k větší výdělku dosaženému školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí manipulátoru se dvěma stupni volnosti v Cardanově uspořádání. Cílem práce je konstrukce jednoduchého manipulátoru, který může být určený například k práci v laboratoři. Může být použit na různé činnosti, například k měření, nebo k manipulaci s materiálem. V teoretické části je popsáno základní rozdělení manipulátorů, jejich motorů a také kinematika robotů. Praktická část je zaměřena na samotnou konstrukci CAD v software Solidworks, v níž jsou vytvořeny modely a následně i výkresová dokumentace.

Klíčová slova: Manipulátor, robot, model, motor, návrh modelu,

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the construction of a manipulator with two DoF in a cardan layout. The aim of the thesis is to construct a simple manipulator, which can be used for example in laboratory work. It can be used for various activities, such as measuring or manipulating material. The theoretical part describes the basic distribution of manipulators, their motors and also the robot kinematics. Practical part is focused on the CAD design in Solidworks software, where models and then drawing documentation are created.

Keywords: manipulator, robot, model, engine, model design

Rád bych poděkoval především panu Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc. za odborné vedení, cenné podněty a rady při vypracování bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PRŮMYSLOVÉ ROBOTY	13
1.1 DEFINICE	13
1.2 MANIPULÁTORY	13
1.2.1 Sériové roboty	13
1.2.2 Paralelní roboty	13
1.2.3 Kombinované roboty.....	13
1.3 ČÁSTI ROBOTŮ	13
1.3.1 Článek	14
1.3.2 Kloub.....	14
1.3.3 Manipulátor	14
1.3.4 Zápěstí	14
1.3.5 Koncový efektor.....	14
1.3.6 Snímač.....	14
1.3.7 Řídící jednotka	14
1.3.8 Akční člen	15
1.4 POHONY	15
1.4.1 Servopohony se stejnosměrnými motory.	15
1.4.2 Pohony s elektricky komutovaným napětím	16
1.4.3 Pohony s asynchronními pohony	16
1.4.4 Pohony se synchronními motory.....	16
1.4.5 Pohony s krokovými motory	17
1.5 SNÍMAČE POLOHY.....	18
1.5.1 Snímače polohy motoru	18
1.6 CHARAKTERISTIKY ROBOTŮ	20
1.6.1 Dosažitelnost	22
1.6.2 Manipulovatelnost.....	22
1.6.3 Přesnost	23
1.6.4 Mobilnost	26
1.6.5 Zrychlení	26
1.6.6 Poddajnost	26
1.6.7 Nosnost.....	26
1.6.8 Mnemotechničnost	27
1.6.9 Ekonomičnost.....	27
1.6.10 Dynamika	27
2 STRUKTURA A PARAMETRY SERVO SYSTÉMŮ ROBOTŮ	28
2.1 KONCEPCE STRUKTUR SERVO SYSTÉMŮ	28
2.2 STATICKE ZATÍŽENÍ MANIPULÁTORU	30
2.3 VYVAŽOVÁNÍ SIL TÍŽE	31
3 KINEMATIKA ROBOTY	36

3.1	MATICE OTOČENÍ	36
3.2	HOMOGENNÍ SOUŘADNICE A TRANSFORMAČNÍ MATICE.....	41
3.3	HOMOGENNÍ TRANSFORMAČNÍ MATICE VÍCE POHYBŮ	43
3.4	VLIVY NEPŘESNOSTI MODELU	44
4	SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
5	VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	48
6	NÁVRH MANIPULÁTORU	49
6.1	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MANIPULÁTORU.....	49
7	KONSTRUKCE MANIPULÁTORU	50
7.1	VÝPOČTY	50
7.1.1	Namáhání ramene manipulátoru	50
7.1.2	Pero	52
7.1.3	Ozubené kolo	53
7.2	PRVKY MANIPULÁTORU.....	53
7.2.1	Sloup manipulátoru	53
7.2.1.1	Svařenec spodního uložení	55
7.2.1.2	Svařenec čepu	55
7.2.1.3	Ozubené kolo	56
7.2.1.4	Distanční kroužek	57
7.2.1.5	Čelist sloupu	57
7.2.1.6	Hřídel	58
7.2.1.7	Ozubené kolo	58
7.2.2	Sestava ramene manipulátoru	59
7.2.2.1	Protikus čelisti.....	59
7.2.2.2	Deska uchycení koncového efektoru	60
8	TECHNICKÉ PARAMETRY NAVRŽENÉHO MANIPULÁTORU	61
8.1	ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MANIPULÁTORU	61
8.2	HMOTNOSTI SESTAV	61
8.3	POLOHA TĚŽIŠTĚ	61
8.4	MOMENTY SETRVAČNOSTI	61
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK.....	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

V současné době je ve všech průmyslových odvětvích kladen velký důraz na zvyšování efektivity výroby, s čímž se pojí zkracování strojních časů, urychlování přesunu výrobků a polotovarů mezi jednotlivými výrobními stanicemi. Výrazným nástrojem k dosažení vyšší efektivity je automatizace výroby.

Pod pojmem automatizace výroby, nelze chápat jenom zlepšování jednotlivých výrobních stanic, nýbrž všechny procesy, spojené s tokem materiálu výrobou, od naskladnění surovin nebo polotovarů až po balení, paletizaci a uskladnění hotových produktů.

Automatizace výrobních procesů nepřináší jenom úsporu času, ale i zpřesnění a zkvalitnění výrobku. Vhodným výstupním měřicím zařízením lze i zefektivnit celkovou zmetkovitost výrobku.

Robotizace také značně oprostuje pracovníka od fyzicky namáhavé a monotónní práce, čímž tvoří lepší pracovní podmínky v podniku. V neposlední řadě také zvyšuje bezpečnost práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRŮMYSLOVÉ ROBOTY

Průmyslové roboty se začaly využívat v praxi od druhé poloviny 20. století. Nejprve se využívaly hlavně jako mechanické manipulátory, později i jako svařovací automaty. Dnes se využívají prakticky ve všech odvětvích. V letectví, jako letecké simulátory, v lékařství, kosmonautice a podobně. Robotika je poměrně mladou vědní disciplínou, která spojuje mnoho technických oborů (mechanika, elektrotechnika aj.).

1.1 Definice

„Průmyslový robot“ je oficiálně definovaný podle normy ISO 8373:1994 jako: „Automatický říditelný, programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách.“

1.2 Manipulátory

V současné době lze manipulátory rozdělit podle kinematických struktur takto:

1.2.1 Sériové roboty

U sériových robotů, (též seriálních), se výsledný pohyb skládá z na sebe nezávislých pohybů (elementárních) jednotlivých členů. Každá část se může pohybovat nezávisle na druhé.

1.2.2 Paralelní roboty

U paralelních robotů jsou jednotlivé části řazeny vedle sebe, tím pádem výsledný pohyb vzniká součinností všech částí. Každá jednotlivá část ovlivňuje pohyb všech ostatních částí.

1.2.3 Kombinované roboty

Kombinované roboty jsou různými kombinacemi sériových a paralelních robotů. Jsou to kupříkladu chodící stroje, mechanické ruky a podobně.

1.3 Části robotů

Kinematickým spojením jednotlivých článků pomocí kloubů vzniká kinematický řetězec.

1.3.1 Článek

Každé tuhé těleso robota tvoří článek, nebo též rameno. Jednotlivé články se mohou vůči sobě pohybovat. Pokud se vůči sobě dva a více článků nemůže pohybovat, považují se z kinematického hlediska za jeden článek.

1.3.2 Kloub

Za předpokladu, že jsou dva články spojeny, ale mohou se vůči sobě pohybovat a tento pohyb můžeme vyjádřit jednou souřadnicí, tvoří články kloubové spojení. Toto spojení může být buď rotační, nebo translační.

1.3.3 Manipulátor

Tělo manipulátoru vznikne spojením jednotlivých článků přes klouby. Pokud zavedeme řídicí systém a připojíme zápěstí s úchopnou hlavicí, stává se manipulátor robotem.

1.3.4 Zápěstí

Kloub mezi posledním členem (ramenem) a koncovým efektem nazýváme zápěstí. Často bývá sférické a skládá se z tří rotačních kloubů a osami protínajícími se v jednom bodě. Tomuto bodu říkáme bod zápěstí.

1.3.5 Koncový efektor

Koncový efektor slouží k provádění požadované činnosti robota a bývá posledním členem kinematického řetězce. Zbytek manipulátoru slouží především pro polohování efektoru.

1.3.6 Snímač

Úlohou snímače, nebo též sensoru, je detekce a sběr informací o vnitřních a vnějších stavech, které se následně odesílají do řídicí jednotky.

1.3.7 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka sesbírá a zpracuje informace ze snímačů. Následně se na základě těchto informací naplánuje geometrie pohybu robota. Přes tuto jednotku robot také komunikuje s okolím. Řídicí jednotka obsahuje procesor a software.

1.3.8 Akční člen

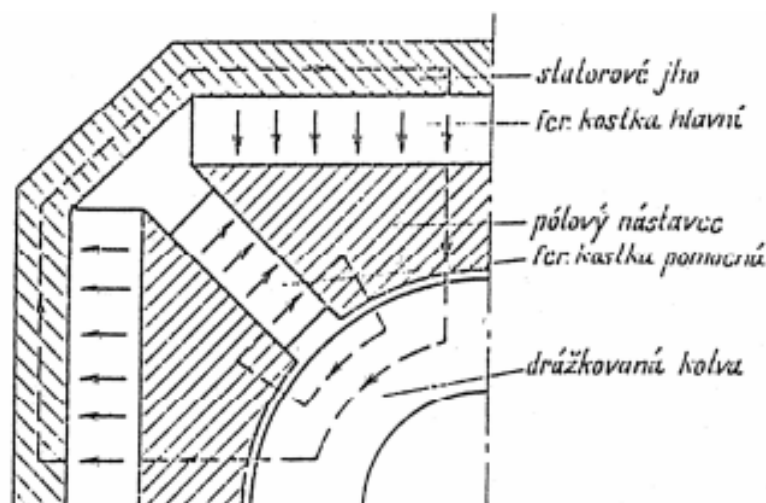
Funkcí akčního členu je pohánět celého robota, poskytovat mu dostatečný výkon na provedení všech operací. Člen musí být dobře říditelný a může být elektrický, pneumatický nebo hydraulický.

1.4 Pohony

1.4.1 Servopohony se stejnosměrnými motory.

Stejnoseměrnému proudu byl v počátcích elektrifikace kladen větší potenciál, než střídavému proudu, proto byly i první rozvodné sítě na stejnosměrný proud. Stejnoseměrná dynamo byla jedna z prvních elektrických přístrojů používaných v praxi. Stejnoseměrný motor je zároveň dobře regulovatelný, to znamená, že jeho otáčky lze plynule měnit změnou přiváděného napětí.

Pro servopohony se využívá hlavně stejnosměrných motorů s buzením permanentními magnety ve statoru. Pro tyto magnety se používá převážně magneticky tvrdých materiálů, a to feritů a spékaných materiálů ze vzácných hornin, např. sloučeniny neodymu, železa a bóru nebo samarium-kobaltu. Aktivní částí stejnosměrného motoru je stator se jhem, permanentní magnet a pólovými nástavci z měkkého železa pro koncentraci magnetického toku do vzduchové mezery, rotor (kotva) s vinutím, který je tvořen cívkami, uloženými v drážkách, ty jsou vyvedeny na komutátor. Komutátor spolu s uhlíkovými kartáči a kartáčovými drážkami tvoří tzv. sběrací ústrojí.



Obr. 1 Řez stejnosměrným motorem [5]

1.4.2 Pohony s elektricky komutovaným napětím

Pohony s komutovaným napětím jsou vhodné pro polohové servomechanismy, kvůli ne-složitému řízení rychlosti napětím na kotvě. Má však i jisté nevýhody. Ty plynou z použití kluzného kontaktu mezi akumulátorem a sběracími kartáči. Sběrací ústrojí se musí pravidelně udržovat (čištění komutátoru a výměna zabroušených kartáčů). Mezi lamelami komutátoru je při vyšších otáčkách i vyšší napětí, které při větších proudech způsobuje jiskření. Další nevýhodou je i to, že všechny ztráty vzniknou v rotoru. Kvůli konstrukci servomotorů, která je uzavřená, bez možnosti přístupu čerstvého vzduchu, chlazení probíhá přes stator a kostru, nakonec i přes hřídel se spojkou, což má neblahý vliv na případně připojené přesné mechanismy, určené například k polohování zařízení.

1.4.3 Pohony s asynchronními pohony

Tento typ pohonu je nejrozšířenějším mezi pohony pracovních strojů. Asynchronní motor s pohonem nakrátko je robustní, přesto má jednoduchou konstrukci a je spolehlivý. Asynchronní motory se vyrábí v unifikovaných řadách a v příznivých cenových relacích.

V posledních letech se stále více využívá výkonová elektronika, čímž se vyřešila nevýhoda těchto motorů, kterou je regulace otáček.

Asynchronní motory bývají osazovány snímači otáček a případně i polohy.

1.4.4 Pohony se synchronními motory

Jsou to elektrické stroje, jejichž rotory se otáčejí souběžně s otáčkami točivého magnetického pole statoru. Stator bývá stejný jako stator u asynchronních motorů (listěný, s drážkami pro uložení statorového vinutí). Tento stator mívá zpravidla třífázové vinutí, které je rozloženo do drážek statoru. Podle konstrukčního řešení může být dvoupólové nebo třípólové.

Rotor bývá hladký, případně s přiznanými póly, ty mohou obsahovat budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem. Budící proud se může přivádět do vinutí rotoru bezkontaktně, rotačními transformátory, nebo za pomoci kluzných kartáčů a kroužků.

Synchronní motory s buzením permanentními magnety se používají zejména u servopohonů. Jejich konstrukce se podobá elektricky komutovanému motoru.

Pro výrobu permanentních magnetů se používá tvrdých feritů, které jsou levnější, mají však horší magnetické vlastnosti, nebo vzácných zemin, například samarium – kobalt – nebo neodým – železo – bor.

Rozdíl mezi synchronním motorem a motorem s elektrickou komutací je v použitém principu snímání polohy rotoru za účelem řízení tranzistorovým měničem. U synchronních motorů je potřeba získávat trvalou informaci o poloze rotoru, naproti tomu u elektricky komutovaných motorů stačí snímat polohu diskrétně po 60° . Jedním z nepoužívanějších rotorů je selsyn (resolver).

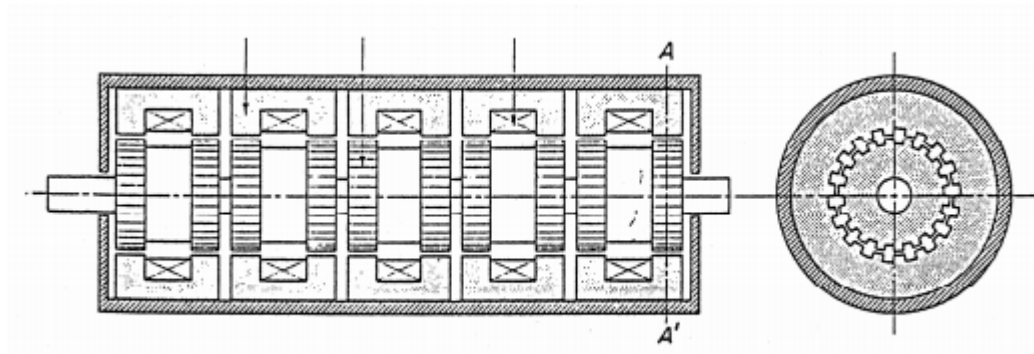
Dalším snímacím prvkem synchronních elektromotorů je snímač teploty statorového vinutí (termistor). Zabraňuje přetěžování motoru a slouží také jako elektromagnetická brzda, která zabezpečuje klidový stav motoru bez napájení. Muže zabrzdit motor v případě havárie, kterou může být výpadek síťového napájecího napětí, nebo porucha regulátoru.

Synchronní servomotory s permanentními magnety se nejčastěji používají pro polohové servomechanismy výrobních strojů, robotů a v jiné technice automatizace. Výhodou vůči asynchronním motorům jsou jejich menší rozměry a hmotnost, při stejném výkonu. Můžeme je také lépe chladit, čímž nevzniknou takové ztráty v rotoru. Oproti motorům elektricky komutovaným mají rovnoměrnější chod bez momentových pulsací. Pro polohovou zpětnou vazbu při řízení servopohonu lze využít snímač polohy rotoru.

1.4.5 Pohony s krokovými motory

Nejjednoduššími akčními členy pro převod digitálního signálu na polohu, respektive úhel natočení rotoru jsou krokové motory. Nejjednodušeji si lze krokový motor představit jako synchronní stroj, kde místo točivého pole, které je generováno třífázovým sinusovým napájecím napětím statorového vinutí, je generováno magnetické pole, postupným napájením jednotlivých magnetických pólových dvojic, které jsou umístěny po obvodu rotoru a statoru, stejnosměrným proudem. Počet stabilních poloh (kroků) je dán počtem umístěných pólových dvojic po obvodu.

Tento typ pohonu můžeme nastavit přesnou polohu, aniž bychom potřebovali zpětnou vazbu od odměřování polohy, stačí zajistit, aby byl každý zadaný krok motorem vykonán.



Obr. 2 Axiální pětifázový reluktanční krokový motor [5]

Krokové motory se používají například jako pohony digitálních hodin, pohony tiskáren a plotrů. V průmyslu především jako pohony manipulátorů, robotů, bezobslužných výrobních strojů a podobně.

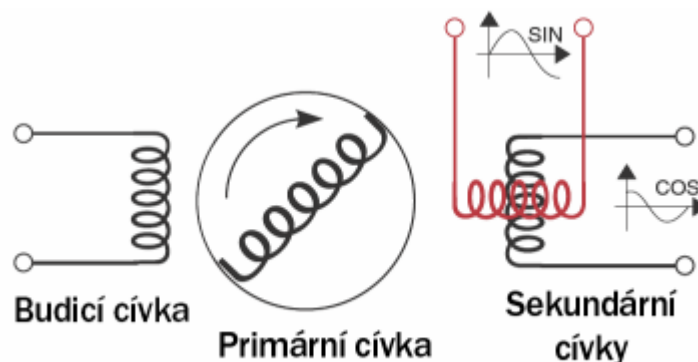
1.5 Snímače polohy

1.5.1 Snímače polohy motoru

Resolver

Tento druh pohonu se používá hlavně u analogových řídicích jednotek. Sestává se z budící cívky, z cívky umístěné v rotoru a ze dvou sekundárních cívek, které jsou umístěny ve statoru. Tyto sekundární cívky jsou oproti sobě umístěny natočením o 90° .

Budící cívku budí externí zdroj napětí. Dále tato cívka indukuje napětí do cívky v rotoru. Sekundární cívky mají kvůli vzájemnému pootočení o 90° sinusový i kosinusový průběh výstupního napětí, ten bývá závislý na natočení rotoru. Resolvery nám dokážou říci přesné informace o rychlosti a poloze rotoru.



Obr. 3 Elektrické schéma resolveru [6]

Rotační inkrementální snímače

Tyto snímače jsou vlastně elektromechanické převodníky, převádějící rotaci na sekvence elektrických digitálních impulzů. Většinou jsou zkonstruovány pomocí kotouče se značkami a snímací částí. V závislosti na přítomnosti/nepřítomnosti značky se mění výstup snímací části.

Rotačních inkrementálních senzorů se nejčastěji používají dva typy, optický detektor (kotouč s otvory) nebo Hall snímač (kotouč s permanentními magnety).

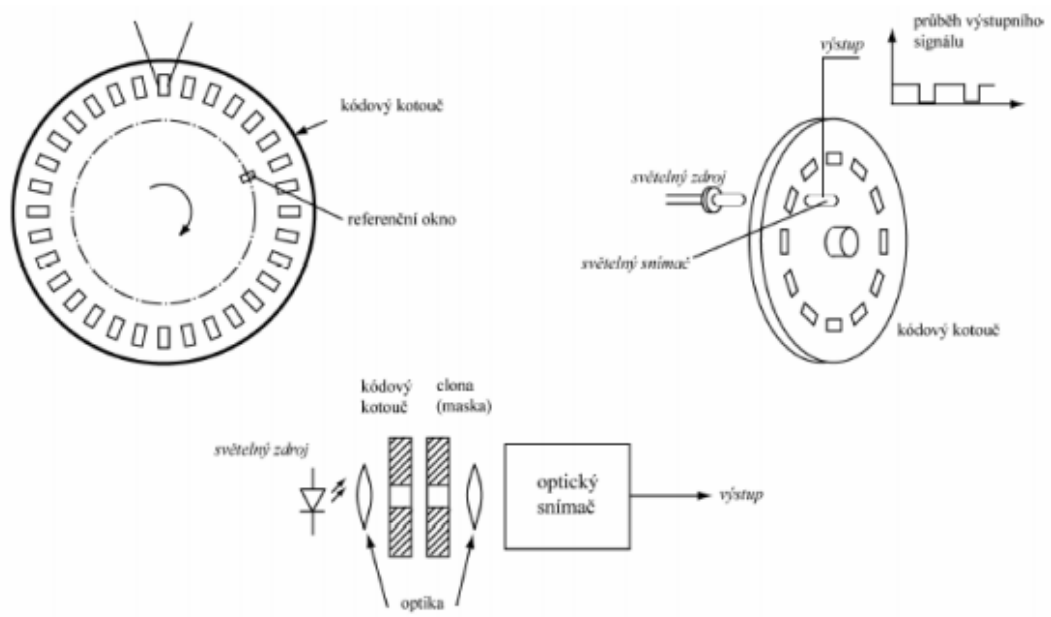
Optický snímač

Optický snímač pracuje na jednoduchém principu a to clonění světelného paprsku mezi fotocitlivým detektorem a zdrojem světla, kterým bývá dioda. Fotocitlivý detektor bývá tvořen fototranzistorem nebo fotodiodou.

Jako clona se používá rotující disk, upevněný na hřídeli, vedoucí ze snímače. Na tomto disku jsou po obvodu štěrbin, kterými může světlo procházet, nebo disk světlo cloní. Pokud se disk otáčí, světlo střídavě prochází, nebo neprochází v pravidelném intervalu. Výstupním signálem fotocitlivého prvku pak bývají elektrické impulzy. Čítač inkrementuje tyto pulzy, a na základě toho se určí výsledné natočení. Počet štěrbin rozmístěných po obvodu disku nám pak určuje přesnost snímání, nebo rozlišení.

Jako snímače směru rychlosti a polohy používáme dvoukanálové snímače. Mají dva výstupní kanály A a B se dvěma optickými soustavami. Výstupní kanály jsou od sebe posunuty o 90 elektrických stupňů. Podle sekvence stavů, které generují oba kanály, lze rozpoznat směr otáčení.

Připojením jednoho kanálu, za dvoukanálový snímač vznikne snímač tříkanálový. Tento kanál nazýváme jako nulový a je označován písmenem Z. Tímto kanálem lze zjistit referenční, neboli nulová, poloha snímače. Tato poloha má signál ve fázi kanálu A. Impulz dostaneme vždy jednou za otáčku.



Obr. 4 Princip činnosti optického inkrementálního snímače [7]

Snímač založený na Hallově jevu

Druhým typem snímače, který je schopen snímat rychlost a polohu je snímač, jehož princip je založen na Hallově jevu. Hallův jev vzniká tehdy, když protéká proud vodičem, ten se nachází v magnetickém poli, jež je na tento vodič kolmé. Dojde zde k vychýlení volných nosičů elektrického proudu z podélného směru a nosiče jsou vytlačovány směrem k okraji. Příčina výchylky je elektromagnetická Lorentzova síla. Na krajích vodiče nám vznikne rozdílný potenciál, který je kolmý k směru proudu.

1.6 Charakteristiky robotů

Vzhledem k tomu, že robot je složitý systém, který má více subsystémů, koná se hodnocení jeho vlastností ve více oblastech. Charakteristiky robotů mají význam z hlediska porovnání vlastností různých systémů jako i z hlediska definování požadavků na systémy projektování. Vlastnosti průmyslového robota určují charakteristiky:

Mechanické:

- Geometrické
 - Dosažitelnost
 - Manipulovatelnost

- **Přesnost**
 - **Polohování, orientace**
- **Kinematické**
 - **Mobilita**
 - **Zrychlení**
- **Statické**
 - **Poddajnost**
 - **Nosnost**

Algoritmické

- **Řídící**
 - **Mnemotechničnost**
 - **Ekonomičnost**
 - **Dynamiku**

V důsledku nelinearit jsou vlastnosti manipulačních systémů různé v různých bodech pracovního prostoru. Společné metody k popisu a zkoumání charakteristik jsou elementární operace. Jsou to z pohledu určení charakteristik různé pohybové úkoly, které jsou nezávislé na konkrétní konstrukci.

Při hodnocení se uplatní dvě úlohy zkoumání vlastností:

- analýza možností provedení konkrétní elementární operace v určitém bodě; vlastnost se zkoumá na základě analýzy geometrie, přesnosti, kinematiky, statiky nebo algoritmů sestavení pohybů
- sestavení globálního ohodnocení vlastnosti, zahrnující celou skupinu výsledků provedení elementární operace určitého typu; vlastnost se hodnotí pomocí integrování elementárních operací a konfigurací manipulačního systému

Základní technické parametry (související s konstrukcí výkonného systému) jsou:

- nosnost - maximální hmotnost předmětů včetně hlavice přemístěných při zadaných podmínkách (rychlost, vysunutí ruky ...)
- počet os pohybu - počet možných pohybů vzhledem k základnímu systému
- chyba polohování - přesnost polohování, opakovaná přesnost polohování
- pracovní zóna – prostor

1.6.1 Dosažitelnost

Dosažitelnost se ohodnocuje velikostí (objemem) pracovního prostoru $V(D_0)$. Při analýze dosažitelnosti jsou zkoumány tři úlohy:

- Určení velikosti $V(D_0)$
- Určení pro daný vektor r , jestli patří bod P do pracovního prostoru
- Určení úhlu ϕ , který zabezpečuje polohování v bodě P – inverzní kinematická úloha

Používá se označení:

Pohybový prostor - prostor, který obsáhnou pohybující se části robota kromě koncového efektoru

Maximální prostor - pohybový prostor zvětšený o prostor, který obsáhne koncový efektor a obrobek

Vymezený prostor - část maximálního prostoru ohraničená limitujícími prostředky vytvářejícími hranice, který nesmí ani v případě neočekávané poruchy robota

Operační prostor - část vymezeného prostoru, který se skutečně využívá při provádění naprogramovaných pohybů

Pracovní prostor - množina poloh vůči souřadnému systému základny, které může dosáhnout referenční bod zápěstí

1.6.2 Manipulovatelnost

Určuje možnost orientace chapadla v pracovním prostoru. Charakterizovaná je úhlem nebo koeficientem úhlu servisu. Pro každý bod z pracovního prostoru je možné určit úhel ψ , který ohraničuje interval úhlů, pod kterými se hlavička může přiblížit k danému bodu. Může jít při tom o prostorový nebo rovinný úhel.

$$k = \frac{\psi}{\psi_{max}}, \quad \text{přičemž } k \in (0,1) \quad (1)$$

kde:

k – koeficient úhlu servisu [-]

ψ – úhel natočení hlavičky k danému bodu [°]

ψ_{max} – maximální úhel natočení hlavičky [°]

Pro prostorový úhel je koeficient úhlu servisu:

$$k = \frac{\psi}{4\pi}, \quad (2)$$

kde:

k – koeficient úhlu servisu [-]

ψ – úhel natočení hlavice k danému bodu [°]

π – Ludolfovo číslo

pro rovinný

$$k = \frac{\psi}{2\pi}, \quad (3)$$

kde:

k - koeficient úhlu servisu [-]

ψ – úhel natočení hlavice k danému bodu [°]

π – Ludolfovo číslo

1.6.3 Přesnost

Manipulační systém má v závislosti na použité koncepci různou citlivost na změny a nepřesnosti. Chyby v systému jsou:

- Statické
 - nepřesnost výroby, rozměry členů, vůle
 - nepřesnost regulačních obvodů (zatížení, řízení ...)
 - nepřesnost snímačů
 - kvantování
 - řídicích členů
 - snímačů
 - motorů
 - nepřesnosti výpočtu
 - nepřesný model
 - nesprávný algoritmus výpočtu

- Dynamické
 - kvalita servosystému
 - pružnost kinematického schématu
 - nepřesnost modelu
 - struktura
 - koeficienty

Odchytky od požadovaného pohybu způsobují:

1. Technologické nepřesnosti zhotovení členů

- jiné rozměry členů než jsou použity při výpočtech
- rozměry lze určit měřením členů, což však je možné jen pro unikátní systémy. Obecně je třeba počítat s konstrukčními rozměry. Sumární chyba se počítá lineární teorií přesnosti. Efekt působení každé prvotní chyby lze určit nezávisle od působení jiných prvotních chyb a výsledná chyba je superpozicí prvotních chyb.

2. Pohyb se uskutečňuje při pohybu více členů manipulačního systému, každý se svým programem pro servosystém. Dělení pohybů mezi členy manipulačního systému je dané programem. Realizace programu je však vždy s určitou přesností. Chyby ve všech etapách převodů - výpočtových hodnot zobecnění souřadnic na realizované hodnoty jsou chybami řízení. Chyby technologické a chyby řízení tvoří podstatnou složku chyb manipulátorů. Jak technologické tak i chyby řízení jsou náhodné a určují se nezávisle pro každý člen.

3. Podstatným faktorem odchylek od vypočtených trajektorií jsou pružné vlastnosti manipulátoru. Vliv tohoto faktoru se zkoumá ve statickém a dynamickém režimu. V prvním případě je chyba funkcí zatížení. Velikost chyb závisí na parametru manipulátoru - pružnosti členy a pohonů a od jejich konfigurace. Pokud se vychází z předpokladu, že statické chyby deformace jsou malé, lze použít princip superpozice - nezávisle vypočítat velikost deformace jednotlivých elementů manipulátoru od každé síly a pak je spočítat.

4. Podstatný vliv na přesnost mají vůle v kinematických dvojicích. Celková vůle je

$$v_c = v_z + v_e = uv_z, \quad (4)$$

kde:

v_c – celková vůle [mm]

v_z – vůle, která existuje již v novém manipulátoru [mm]

v_e – vůle vzniklá opotřebením [mm]

uv_z – koeficient úměrnosti režimu a době provozu mechanismu [-]

Zvláštnost přesnosti jako charakteristiky:

- přesnost se hodnotí jako ohodnocení se statistickým charakterem
- pro určení přesnosti se předpokládá provedení několika elementárních operací:
- polohování
- orientace
- pohyb se zadanou rychlostí nebo zrychlením.

Dynamické chyby ovlivňuje:

- pružnost a vůle
- nepřesnost identifikovaných matematických modelů systémů
- omezenost výkonů.

Pokud lze považovat systém za absolutně tuhý a bez vůle, existují ještě další faktory:

- síly potřebné k zajištění programového pohybu nemohou být realizovány absolutně přesně stávajícími technickými prostředky. Reálné vlastnosti výkonných částí systému jsou ohraničené.
- struktura dynamických rovnic vždy jen zhruba popisuje skutečné charakteristiky reálného mechanického systému, její pružné a tlumící vlastnosti
- koeficienty nemohou být určeny absolutně přesně.

Technologické a řídicí chyby je třeba sledovat pro skupinu robotů. Pro konkrétního robota jsou technologické chyby konstantní, a tudíž představují systematickou chybu polohování. Ostatní chyby řízení představují náhodné chyby. Střední chybu určíme provedením více měření - představuje systematickou chybu v dané konfiguraci φ . Často se používá „Zóna rozptylu“. Poloměr zóny rozptylu r představuje náhodnou složku této chyby. Rozměr zóny rozptylu se používá jako charakteristika - opakovatelnost. Pro zónu rozptylu platí:

- forma zóny rozptylu nemusí být kruh
- rozměry zóny mohou být různé pro různé konfigurace
- nelze vyloučit možnost závislosti chyby řízení a tedy opakovatelnosti od režimu pohybu, který se použije k provedení operace polohování.

1.6.4 Mobilnost

Při zadané trajektorii, lze nalézt optimální konfiguraci manipulačního systému z hlediska přesnosti. Soubor těchto konfigurací určuje optimální zákon řízení z hlediska přesnosti. Při tom zůstane ještě jeden volný parametr - rychlost. Pokud se určí zákon řízení, vycházející ze souboru $\varphi(t)$ konfigurací optimálních z hlediska přesnosti, může se ukázat, že potřebné hodnoty $\varphi'(t)$ leží za hranicemi možností výkonného systému. Pohybová nadbytečnost manipulačního systému při tvorbě pohybu může být použita na plné využití rychlostních rezerv ale na úkor přesnosti. Mobilnost se charakterizuje přípustnými rychlostmi přemístění chapadla, v bodě M určeném vektorem r zajišťující vektor rychlosti v .

1.6.5 Zrychlení

Obvykle průmyslové roboty pracují v periodickém režimu. K určení zrychlitelnosti je třeba znát dynamický model robota. Úkolem je zajistit bodu M v bodě X, pracovního prostoru, zrychlení při známých φ a φ' . Zrychlitelnost závisí na geometrii manipulačního systému, vlastnostech pohonů a momentů setrvačnosti. Při realizaci požadované trajektorie $r(t)$ je třeba zajistit $r'(t)$ a $r''(t)$. Přitom - analýza dosažitelnosti určuje, zda r je realizovatelné

- analýza mobilnosti určuje, zda r' je realizovatelné
- analýza zrychlitelnosti určuje, zda se r'' lze dosáhnout na začátku pohybu.

1.6.6 Poddajnost

Charakterizuje se velikostí deformace kinematického řetězce, která vzniká ve statickém nebo kvazistatickém režimu v důsledku působení vnějších sil. Vzniká v servosystémech a v členech kinetického schématu. Pružné deformace tvoří podstatnou část chyb při polohování. Poddajnost je charakterizována mechanickou impedancí. Poddajnost není vždy jen nechtěnou vlastností. Při tzv. pasivní adaptaci se systém navrhuje s definovanou poddajností.

1.6.7 Nosnost

Nosnost je funkcí hmotnosti, momentu setrvačnosti, statických a dynamických sil působících na robot vyjádřená jako síly a točivé momenty, které mohou působit v různých osách pohybu za určitých specifických podmínek (konfigurace kinematického schématu, rychlosti a zrychlení). Kromě toho, že nosnost charakterizuje podstatnou vlastnost z hlediska možného zatížení systému, je pro bezpečnost práce s robotickým systémem důležité udržení předmětu v každém režimu činnosti.

1.6.8 Mnemotechničnost

Kvalita biotechnických systémů závisí na řadě faktorů: kvalifikaci, trénovanosti a podmínkách práce operátora, složitosti úlohy, technických parametrů stroje určujících říditelnost stroje. Kvantitativní ohodnocení mnemotechničnosti se určuje pro kopírující manipulátory. Charakterizuje kvalitu mechanismu přenosu pohybu rukou operátora na pohyb manipulátoru. Základní ohodnocení mnemotechničnosti je charakterizováno tím, nakolik se liší přemístění chapadla v některém bodě pracovního prostoru od vektoru přemístění řídicího členu. Kritériem je hodnota vztahu přesnosti a času

$$J = D T, \quad (5)$$

kde:

T – čas vykonání operace [s]

D – přesnost [-]

J – mnemotechničnost [-]

Zlepšení jednoho ukazatele vede ke zhoršení druhého.

1.6.9 Ekonomičnost

Ekonomičnost charakterizuje možnost vytvořenou řídicím systémem, dosáhnout požadovanou polohu s minimálním objemem tělesa vytvořeného pohybem všech částí mechanismu při provedení požadovaného přemístění. Je zřejmé, že kritérium má přímý vztah k spotřebě energie.

1.6.10 Dynamika

Charakterizuje možnost vytvořenou řídicím systémem, dosáhnout maximální rychlosti přemístění koncového bodu robota. Předpokládá se při tom pohyb více os. Pokud je tato charakteristika prioritou, pak je v protikladu s požadavkem ekonomičnosti.

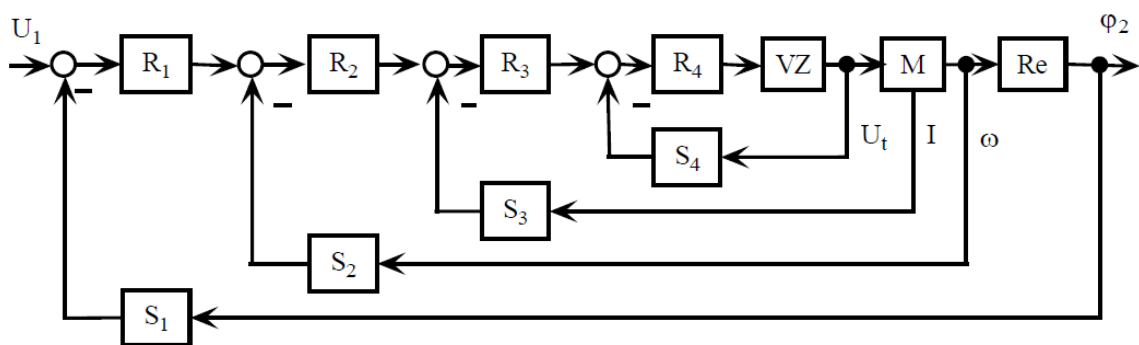
2 STRUKTURA A PARAMETRY SERVOSTYÉMŮ ROBOTŮ

Servosystémy robota musí zajistit požadovanou přesnost a dynamiku. Vyžaduje se, aby zajišťovaly požadovanou kvalitu pohybu po požadované trajektorii. Na jejich vlastnosti jsou tedy kladeny často extrémní požadavky. Požaduje se, aby požadované vlastnosti měly servosystémy i při působení poruchových signálů a změně parametrů. V manipulačních systémech je významná změna zátěžového momentu a momentu setrvačnosti systému.

2.1 Koncepce struktur servosystémů

Strukturní schémata regulačních obvodů servosystémů se volí tak, aby splnily požadavky pro řízení výkonového členu (ochrana proti přetížení), požadavky na řízení procesů (přesnost, dynamika apod.) a požadavky proveditelnosti. Kromě uzavřených regulačních obvodů se zápornou zpětnou vazbou se používají i strukturní schémata s kladnými kompenzačními vazbami jak od vstupních tak i od výstupních signálů. Vytvářejí se tak kombinované struktury, které obsahují uzavřené smyčky a pro některé signály jsou otevřené.

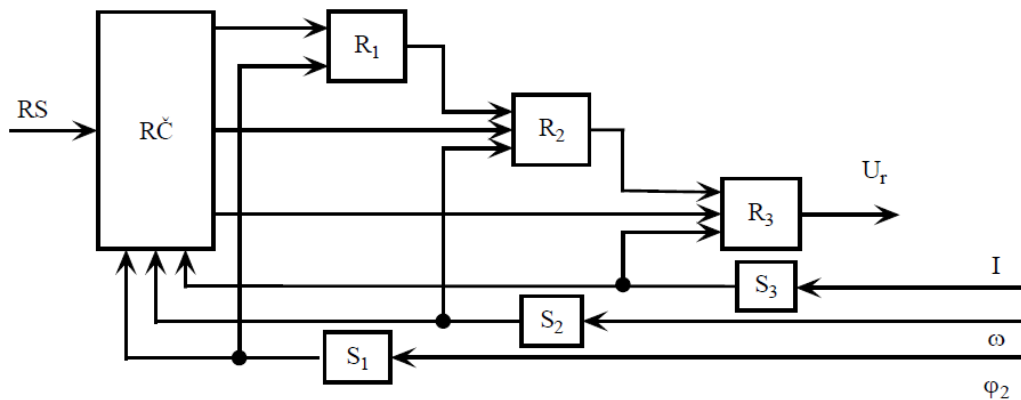
V servosystémech se obvykle používá kaskádní řazení regulátorů



Obr. 5 Kaskádové uspořádání regulátorů [4]

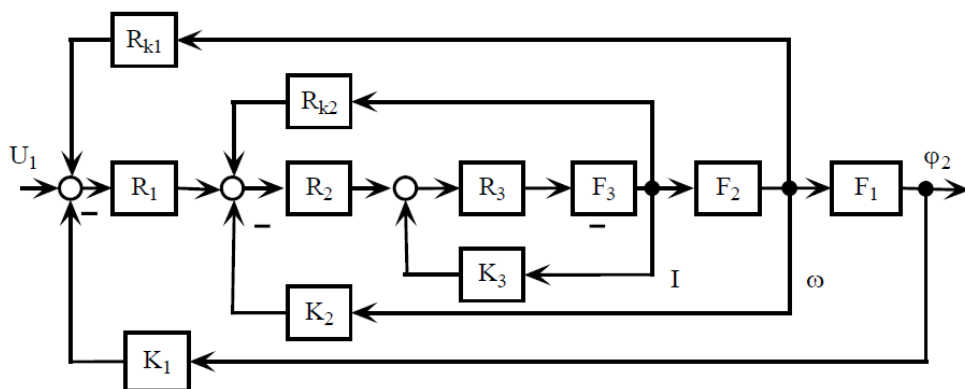
R_i - regulátor polohy, rychlosti, proudu, napětí a podobně S_i jsou příslušné snímače veličin, Re - reduktor, VZ - výkonový zesilovač, M - motor.

V servosystém robotů se vyžaduje vysoká kvalita řízení přechodných procesů. Při řízení součinnosti několika servosystémů při realizaci prostorové trajektorie se vyžaduje, aby všechny servosystémy pracovaly v lineární části charakteristik, aby nedocházelo ke zkreslení požadovaného průběhu stavových veličin.



Obr. 6 Strukturální schéma servosystému s řídicím členem s hierarchickým uspořádáním regulátorů [4]

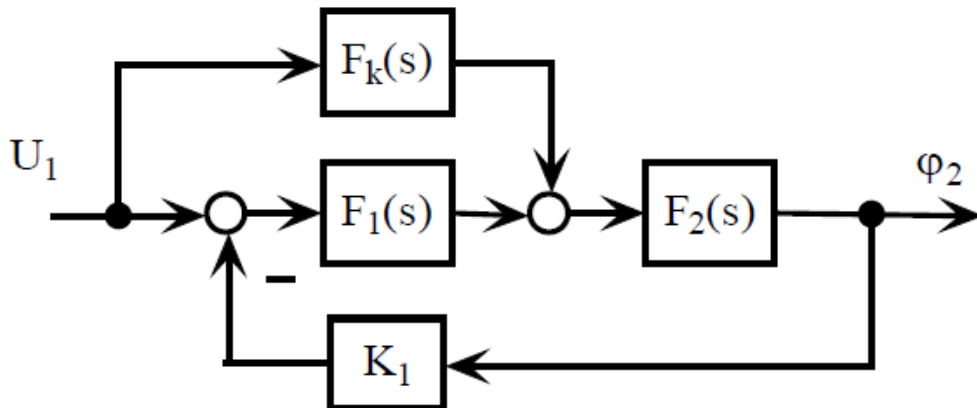
Nezávislou regulaci veličin lze dosáhnout i v systému s kaskádním řazením regulátorů. V tomto případě se používá kompenzace vlivu zpětné vazby vnitřního regulačního obvodu na práci vnějšího regulačního obvodu pomocí kladné zpětné vazby.



Obr. 7 Strukturální schéma servosystému s kaskádním řazením regulátorů s nezávislou regulací stavových veličin [4]

Pokud pro přenosy korekčních členů platí:

V lineární části charakteristik neovlivňují vnitřní regulační obvody odezvy systému. Pokud se nasytí regulátor polohy, pak reguluje regulační obvod rychlosti. V servosystému se využívají i struktury kombinovaného řízení.



Obr. 8: Blokové schéma s kombinovanou strukturou řízení [4]

Výstupní signál bude přesně sledovat vstupní. Kromě toho člen $F_k(s)$ se nevyskytuje v charakteristické rovnici a proto neovlivňuje kvalitu přechodných procesů v uzavřené smyčce. Nevýhodou je, že při realizaci korekčního členu vyžaduje realizovat převrácenou hodnotu přenosu $F_2(s)$, což při reálných soustavách znamená nutnost realizovat derivační členy. I při přibližné realizaci odvozeného přenosu lze dosáhnout zlepšení sledování signálu, je třeba však uvažovat výkonové omezení systému a zajistit vhodné filtrování vysokofrekvenčních šumů.

2.2 Statické zatížení manipulátoru

Pro pohony manipulátorů existují dvě základní koncepce - motory umístěné v kloubech a motory umístěné na základně. První koncepce se vyznačuje jednodušší konstrukcí, vyšší tuhostí pohonů, minimální vůlí a tím, že se nevyskytuje vzájemné ovlivňování pohybů. Druhá koncepce má nižší energetické požadavky, minimální hmotnost a rozměry ramen. Předpokládejme nejnepříznivější zatížení manipulátoru, když všechny členy jsou ve vodorovné poloze. Pro jednoduchost předpokládejme, že všechny členy mají stejnou hmotnost m_0 a délku l , přičemž se předpokládá, že účinek hmoty je soustředěn na konci ramene. Pro každý motor platí $m_M = kM_M$. Na konci robota tedy působí hmota m_0 . V prvním kloubu od konce robota působí hmota

$$m_n = m_0 + klm_0, \quad (6)$$

kde:

m_n - hmotnost jednoho ramene robota [kg]

m_0 - hmotnost na konci robota [kg]

l - délka ramene [mm]

k - tuhost tělesa

V dalších kloubech

$$m_{n-1} = k(km_0l^2 + 3m_0l) + m_0 \quad (7)$$

$$m_{n-2} = k(k^2m_0l^3 + 5km_0l^2 + 5m_0l) + m_0, \quad (8)$$

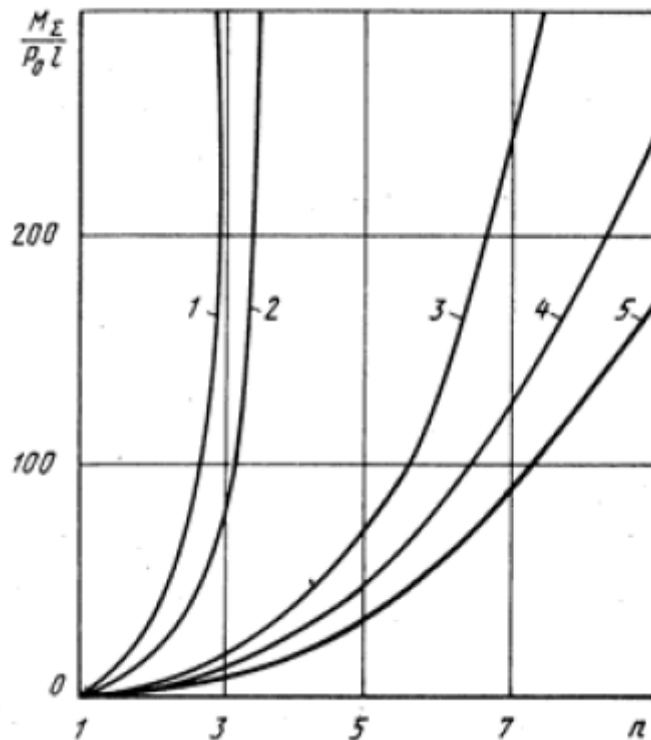
kde:

m_n - hmotnost jednoho ramene robota [kg]

m_0 - hmotnost na konci robota [kg]

l - délka ramene [mm]

k - tuhost tělesa



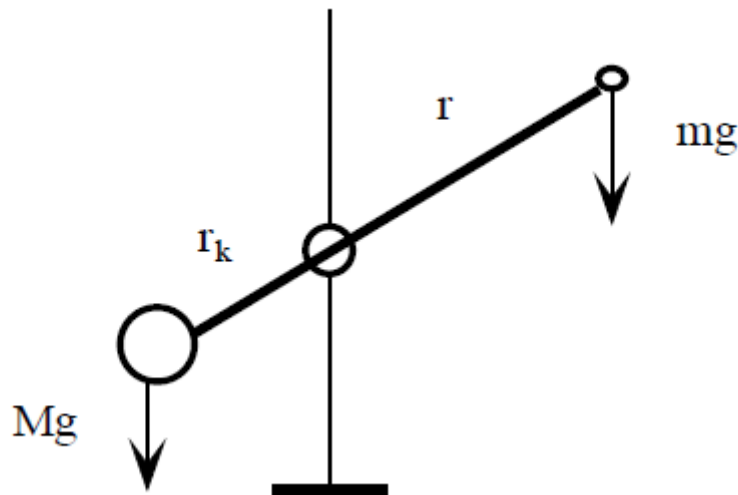
Obr. 9: Závislost celkového momentu motoru robota na počtu os pohybu [4]

Závislosti 1 - 4 jsou pro roboty s motory umístěnými v kloubech, přičemž 1 je pro krokové motory, 2 - stejnosměrné motory, 3 - pneumatické motory, 4 - hydraulické motory. Křivka 5 je pro případ, kdy motory jsou umístěných na základně.

2.3 Vyvažování sil tíže

Pro provedení určité činnosti je nutná statická a dynamická síla nebo moment. Statické síly jsou zvyšovány silami tíže. Tyto síly zvyšují zatížení systému a zmenšují regulační rozsah.

Síly tíže mohou způsobit i úraz, jestliže po vypadnutí energie systém se dále pohybuje působením tíže. Problém samovolného pohybu lze odstranit použitím brzd, použitím samo-svorných převodovek nebo použitím motorů s definovanou polohou i bez napájení. Pokud se udělají opatření, aby síly tíže neovlivňovaly pohyby systému, pak to umožňuje použít ve výkonném systému robota motory menšího výkonu, snižuje se energetická náročnost celého systému a dosáhne se nezávislost požadovaných momentů od směru pohybu. Úplné odstranění působení sil tíže při mechanismech však obvykle není možné. Síly závisí na konfiguraci a od připojeného břemene. Pro snížení vlivu sil tíže se používají pasivní a aktivní systémy. Při pasivních se používá vyvážení systému



Obr. 10: Pasivní kompenzace sil tíže [4]

Musí platit

$$Mgr_k = mgr, \quad (9)$$

kde:

mg - hmotnost zatížení [kg]

Mg - hmotnost kompenzace [kg]

r – rameno, na kterém působí zatížení [mm]

r_k – kompenzační rameno, na kterém je kompenzační zatížení [mm]

Pro moment setrvačnosti

$$J = mr^2 \left(l + \frac{r_k}{r} \right), \quad (10)$$

kde:

m – celková hmotnost zatížení [kg]

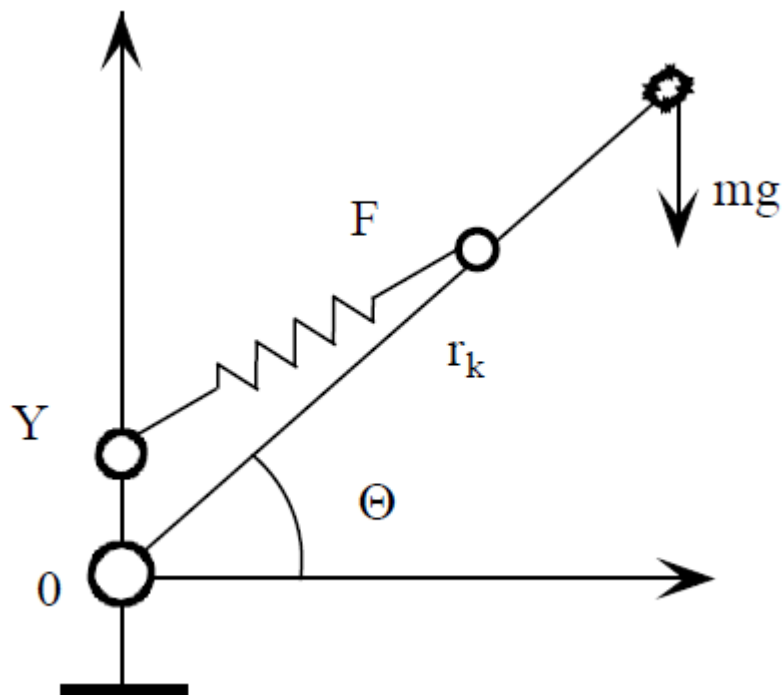
J – moment setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

r – rameno, na kterém působí zatížení [mm]

r_k – kompenzační rameno, na kterém je kompenzační zatížení [mm]

l – vzdálenost od osy otáčení [mm]

Kromě vyvážení hmotou lze dosáhnout vyvážení pneumatickým pohonem, elektrickým pohonem, silami od pružné deformace.



Obr. 11 Kompenzace sil tíže pružinou [4]

Je třeba určit parametry pružiny (koeficient k a počáteční délku d , polohu upevnění), při kterém moment síly pružiny na rameno odpovídá momentu tíže. Moment pružiny je

$$M = kr_k(Y \cos \theta - X \sin \theta) \left(1 - \frac{d}{\sqrt{r_k^2 + X^2 + Y^2} - 2r_k(X \cos \theta + Y \sin \theta)} \right), \quad (11)$$

kde:

M – moment pružiny [$\text{N} \cdot \text{m}$]

k – tuhost pružiny [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]

d – počáteční délka pružiny [mm]

X, Y – poloha upevnění pružiny [mm]

r_k – kompenzační rameno, na kterém je kompenzační zatížení [mm]

θ – úhel natočení ramene [$^\circ$]

tento moment se musí rovnat momentu od tíhy

$$M_m = -mgr \cos \theta, \quad (12)$$

kde:

M_m – moment od tíhy [$\text{N} \cdot \text{m}$]

mg - hmotnost zatížení [kg]

r – rameno, na kterém působí zatížení [mm]

θ – úhel natočení ramene [$^\circ$]

Je zřejmé, že rovnost může nastat jen přibližně. Aby vyvážení bylo stejné pro střední hodnotu polohy $\theta = \pi / 2$ je $X = 0$. Vyvážení bude tím přesnější, čím $Y \ll r_k$. Potom podmínka rovnováhy bude

$$k(r_k - d)Y = mgr, \quad (13)$$

kde:

mg - hmotnost zatížení [kg]

k – tuhost pružiny [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]

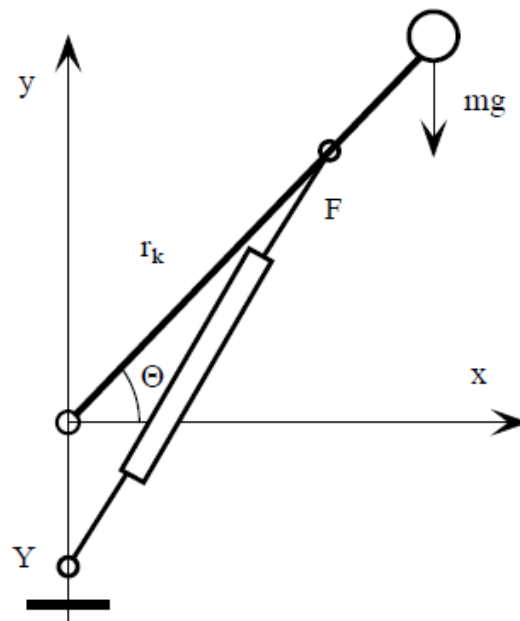
d – počáteční délka pružiny [mm]

Y – poloha upevnění pružiny [mm]

r_k – kompenzační rameno, na kterém je kompenzační zatížení [mm]

r – rameno, na kterém působí zatížení [mm]

Vyvažování je možné aktivní - pomocí silového válce. Síla má konstantní hodnotu nezávislou od řízení daného kloubu, její směr se může měnit. Obvykle se používají pneumatické válce.



Obr. 12 Aktivní vyvažování sil tíže [4]

Pro uvedený případ je moment od síly F

$$M = \frac{Fr_k(X \sin \theta + Y \cos \theta)}{\sqrt{(X - r_k \cos \theta)^2 + (Y - r_k \sin \theta)^2}}, \quad (14)$$

kde:

M – moment od síly F [$\text{N} \cdot \text{m}$]

F – síla působící proti zátěži [N]

X, Y – poloha upevnění pružiny [mm]

r_k – kompenzační rameno, na kterém je kompenzační zatížení [mm]

θ – úhel natočení ramene [$^\circ$]

Rovnováha ve vertikální poloze je možná při podmínce $X = 0$.

Systémy vyvažování se obvykle spojují i s řešením úlohy zvýšení tlumení systému. Obvykle se tlumení systému zvyšuje přídavnými tlumiči připojenými k rovnovážnému systému. Tuto úlohu budeme řešit v jiné části pomocí aktivních tlumících systémů.

3 KINEMATIKA ROBOTA

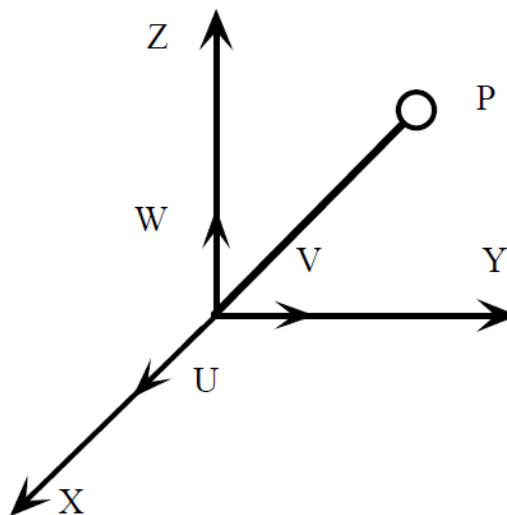
Prostorové rozložení členů a změny konfigurace systému v procesu jeho pohybu vyžadují řešit geometrické, kinematické a dynamické charakteristiky. Pro popis je možno používat různé metody. Nejčastěji se na popis úloh kinematiky používá maticové vyjádření. Názornost vyplývá z geometrické interpretace matice jako transformace vektorů popisující polohy bodového prostoru v různých souřadnicových systémech.

Pro vektor kloubových proměnných $q(t)$ se známými geometrickými vlastnostmi robota se určuje poloha a orientace hlavice vzhledem k základnímu souřadnému systému, což je přímá kinematická úloha. Přímou úlohou je určení polohy a orientace souřadnicového systému akčního členu v absolutním, globálním, systému.

Inverzní kinematická úloha - při známých geometrických parametrech členů se určují všechny možné vektorové členy kloubových proměnných, které zajišťují danou polohu a orientaci akčního členu.

3.1 Matice otočení

První úlohou, kterou je třeba řešit, je přímá úloha kinematiky. Základními úlohami je určení vzájemného vztahu poloh a pohybů souřadnicových systémů. Tím nejjednodušším se jeví otočení.



Obr. 13 Souřadnicové systémy OXYZ a OUVW [4]

Systém OXYZ – je stále fixovaný v prostoru, je absolutním systémem, globálním systémem. Systém OUVW - je spojen s tělesem a otáčí se s ním vůči OXYZ. Bod P lze definovat v libovolném systému.

$$P_{UVW} = |p_U, p_V, p_W|^T \quad (15)$$

$$P_{XYZ} = |p_X, p_Y, p_Z|^T, \quad (16)$$

kde:

P_{UVW} – poloha body v systému OUVW [-]

P_{OXYZ} – poloha body v systému OXYZ [-]

p_U, p_V, p_W – složky vektoru P v systému OUVW [-]

p_X, p_Y, p_Z – složky vektoru P v systému OXYZ [-]

Matice R transformuje P_{UVW} do P_{XYZ}

$$P_{XYZ} = R P_{UVW} \quad (17)$$

pro

$$P_{UVW} = p_U \cdot i_U + p_V \cdot j_V + p_W \cdot k_W, \quad (18)$$

kde:

P_{UVW} – poloha body v systému OUVW [-]

i_U, j_V, k_W – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

Pro složky vektoru P_{XYZ} platí

$$\begin{aligned} p_X &= \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{P} = \mathbf{i}_X \cdot i_U p_U + \mathbf{i}_X \cdot j_V p_V + \mathbf{i}_X \cdot k_W p_W \\ p_Y &= \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{P} = \mathbf{j}_Y \cdot i_U p_U + \mathbf{j}_Y \cdot j_V p_V + \mathbf{j}_Y \cdot k_W p_W \\ p_Z &= \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{P} = \mathbf{k}_Z \cdot i_U p_U + \mathbf{k}_Z \cdot j_V p_V + \mathbf{k}_Z \cdot k_W p_W \end{aligned} \quad (19)$$

kde:

P_{UVW} – poloha bodu v systému OUVW [-]

i_U, j_V, k_W – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

p_U, p_V, p_W – složky vektoru P v systému OUVW [-]

p_X, p_Y, p_Z – složky vektoru P v systému OXYZ [-]

i_U, j_V, k_W – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

i_X, j_Y, k_Z – jednotkové vektory v systému OXYZ [-]

v maticovém zápisu

$$\begin{pmatrix} p_X \\ p_Y \\ p_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{k}_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_U \\ p_V \\ p_W \end{pmatrix} \quad (20)$$

kde:

$\mathbf{i}_U, \mathbf{j}_V, \mathbf{k}_W$ – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

p_U, p_V, p_W – složky vektoru P v systému OUVW [-]

p_X, p_Y, p_Z – složky vektoru P v systému OXYZ [-]

$\mathbf{i}_U, \mathbf{j}_V, \mathbf{k}_W$ – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

$$\mathbf{P}_{XYZ} = \mathbf{R} \mathbf{P}_{UVW} \quad (21)$$

Podobně lze určit Q

$$\mathbf{P}_{UVW} = \mathbf{Q} \mathbf{P}_{XYZ} \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} p_U \\ p_V \\ p_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{i}_U \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_U \cdot \mathbf{j}_Y & \mathbf{i}_U \cdot \mathbf{k}_Z \\ \mathbf{j}_V \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{j}_V \cdot \mathbf{j}_Y & \mathbf{j}_V \cdot \mathbf{k}_Z \\ \mathbf{k}_W \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{k}_W \cdot \mathbf{j}_Y & \mathbf{k}_W \cdot \mathbf{k}_Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_X \\ p_Y \\ p_Z \end{pmatrix} \quad (23)$$

kde:

$\mathbf{i}_U, \mathbf{j}_V, \mathbf{k}_W$ – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

p_U, p_V, p_W – složky vektoru P v systému OUVW [-]

p_X, p_Y, p_Z – složky vektoru P v systému OXYZ [-]

$\mathbf{i}_X, \mathbf{j}_Y, \mathbf{k}_Z$ – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

Vzhledem ke komutativnosti skalárního součinu platí:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T \quad (24)$$

$$\mathbf{Q}\mathbf{R} = \mathbf{E} \quad (25)$$

Transformace \mathbf{P}_{UVW} a \mathbf{P}_{XYZ} jsou ortogonální transformace.

Základním úkolem je otočení systému OUVW kolem základních os systému OXYZ.

Vzniknou matice elementárních otáček $R_{X, \alpha}$; $R_{Y, \phi}$; $R_{Z, \gamma}$. Otočení o úhel α kolem osy OX matice $R_{X, \alpha}$

$$\mathbf{R}_{X,\alpha} = \begin{vmatrix} \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{k}_W \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix} \quad (26)$$

kde:

$\mathbf{i}_U, \mathbf{j}_V, \mathbf{k}_W$ – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

$\mathbf{i}_X, \mathbf{j}_Y, \mathbf{k}_Z$ – jednotkové vektory v systému OUVW [-]

$\mathbf{R}_{X,\alpha}$ – matice otočení o úhel α kolem osy OX [-]

α – úhel natočení kolem osy OX [°]

Otočení o úhel φ okolo OY

$$\mathbf{R}_{Y,\varphi} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{vmatrix} \quad (27)$$

kde:

$\mathbf{R}_{Y,\varphi}$ – matice otočení o úhel φ kolem osy OX [-]

φ – úhel natočení kolem osy OY [°]

Otočení o úhel θ okolo osy OZ

$$\mathbf{R}_{Z,\theta} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (28)$$

kde:

$\mathbf{R}_{Z,\theta}$ – matice otočení o úhel θ kolem osy OZ [-]

θ – úhel natočení kolem osy OZ [°]

Složitější otočení se uskuteční vynásobením příslušných matic. Důležitá je posloupnost násobení matic. Vezměme příklad různé posloupnosti násobení matic:

$$R = R_{X,\alpha} R_{Z,\theta} R_{Y,\varphi} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \Theta & \sin \varphi \sin \alpha - \cos \varphi \sin \Theta \cos \alpha & \cos \varphi \sin \Theta \sin \alpha + \sin \varphi \cos \alpha \\ \sin \Theta & \cos \Theta \cos \alpha & -\cos \Theta \sin \alpha \\ -\sin \varphi \cos \Theta & \cos \varphi \cos \Theta \cos \alpha + \cos \varphi \cos \varepsilon & \cos \varphi \cos \alpha - \sin \varphi \sin \Theta \sin \alpha \end{vmatrix} \quad (29)$$

$$R = R_{X,\alpha} R_{Z,\theta} R_{Y,\varphi} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \Theta & -\sin \Theta & \sin \varphi \cos \Theta \\ \cos \alpha \sin \Theta \cos \varphi & \cos \Theta \cos \alpha & \cos \alpha \sin \Theta \sin \varphi - \cos \varphi \sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \Theta \cos \varphi - \sin \varphi \cos \alpha & \cos \Theta \sin \alpha & \sin \varphi \sin \alpha \sin \Theta - \cos \varphi \cos \alpha \end{vmatrix} \quad (30)$$

kde:

$R_{X,\alpha}$ – matice otočení o úhel α [-]

$R_{Z,\theta}$ – matice otočení o úhel θ [-]

$R_{Z,\varphi}$ – matice otočení o úhel φ [-]

θ – úhel natočení kolem osy OZ [°]

α – úhel natočení kolem osy OX [°]

φ – úhel natočení kolem osy OY [°]

Pro jednodušší zápis nahradíme v dalším cos jen "c" a sin jen "s".

Systém OUVW se může otáčet také kolem vlastních os.

Platí pravidla

- na začátku jsou oba systémy totožné
- pokud se systém OUVW otočí kolem některé osy X, Y, Z násobí se výsledná matice předchozího pohybu zleva odpovídající maticí elementárního pohybu
- pokud se koná pohyb kolem některé osy OUVW, násobí se matice předchozího pohybu zprava odpovídající maticí elementárního pohybu.

Otočení může probíhat i kolem libovolné osy. Jde o otočení systému OUVW, spojeného s pohybem tělesa, kolem vektoru r o úhel φ . Otočení se může realizovat posloupností

$R_{X,\alpha}$, $R_{Y,-\beta}$, $R_{Z,\varphi}$, $R_{Y,\beta}$, $R_{X,-\alpha}$ aby se ztotožnil vektor r s osou OZ, pak bylo provedeno otočení o φ okolo OZ a vrátil se systém do původní polohy.

Výsledná matice je:

$$\mathbf{R}_r = \mathbf{R}_{X,-\alpha} \mathbf{R}_{Y,\beta} \mathbf{R}_{Z,\phi} \mathbf{R}_{Y,-\beta} \mathbf{R}_{X,\alpha} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & s\alpha \\ 0 & -s\alpha & c\alpha \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c\beta & 0 & -s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\beta & 0 & c\beta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{vmatrix} \quad (31)$$

$$|\mathbf{r}| = 1, \quad \mathbf{a} = \sqrt{r_y^2 + r_z^2} \quad (32)$$

$$s\alpha = \frac{r_y}{a}; \quad c\alpha = \frac{r_z}{a}; \quad s\beta = r_x; \quad c\beta = a \quad (33)$$

Po dosazení do předcházejícího vztahu

$$\mathbf{R}_{r,\phi} = \begin{bmatrix} r_x^2 V_\phi + c\phi & r_x r_y V_\phi - r_z s\phi & r_x r_z V_\phi + r_y s\phi \\ r_x r_y V_\phi + r_z s\phi & r_y^2 V_\phi + c\phi & r_y r_z V_\phi - r_x s\phi \\ r_x r_z V_\phi - r_y s\phi & r_y r_z V_\phi + r_x s\phi & r_z^2 V_\phi + c\phi \end{bmatrix} \quad (34)$$

kde:

s – funkce sinus

c – funkce kosinus

r – vektor otočení

θ – úhel natočení kolem osy Z [°]

α – úhel natočení kolem osy X [°]

β – úhel natočení kolem osy B [°]

3.2 Homogenní souřadnice a transformační matice

Matice posunutí nesou informace o posunutí a měřítku.

Zavádějí se proto homogenní souřadnice a transformační matice. Homogenní transformační matice jsou 4x4. Nový vektor p v homogenních souřadnicích $p = |wp_x, wp_y, wp_z, w|^T$. Vyjádření trojrozměrného vektoru v homogenních souřadnicích není jednoznačné. Fyzikální souřadnice jsou s homogenními spojeny následovně

$$p_x = \frac{wp_x}{w}, \quad (35)$$

kde:

w – měřítko [-]

p_X - fyzikální souřadnice [-]

wp_X - homogenní souřadnice [-]

V robotice $w = 1$ vždy, tehdy jsou pochopitelně fyzikální a homogenní souřadnice stejné. Jiné měřítko se používají v grafice.

Homogenní transformační matice obsahují následující submatice

$$\mathbf{T} = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & 1_{1 \times 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{otočení} & \text{posunutí} \\ \text{změna perspektivy} & \text{měřítko} \end{vmatrix} \quad (36)$$

Homogenní matice elementárních otočení

$$\mathbf{R}_{X,\alpha} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{R}_{Y,\varphi} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{R}_{Z,\theta} = \begin{vmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (39)$$

kde:

$\mathbf{R}_{X,\alpha}$ – matice otočení o úhel α [-]

$\mathbf{R}_{Z,\theta}$ – matice otočení o úhel θ [-]

$\mathbf{R}_{Z,\varphi}$ – matice otočení o úhel φ [-]

θ – úhel natočení kolem osy OZ [°]

α – úhel natočení kolem osy OX [°]

φ – úhel natočení kolem osy OY [°]

Pro posunutí v OXYZ o $|d_x, d_y, d_z|^T$ je homogenní matice elementárního posunutí

$$T_{POS} = \begin{vmatrix} 1; & 0; & 0; & d_x \\ 0; & 1; & 0; & d_y \\ 0; & 0; & 1; & d_z \\ 0; & 0; & 0; & 1 \end{vmatrix} \quad (40)$$

kde:

d_x – elementární posunutí v ose X [mm]

d_y – elementární posunutí v ose Y [mm]

d_z – elementární posunutí v ose Z [mm]

Matice změny měřítek

$$T_{MER} = \begin{vmatrix} a; & 0; & 0; & 0 \\ 0; & b; & 0; & 0 \\ 0; & 0; & c; & 0 \\ 0; & 0; & 0; & d \end{vmatrix} \quad (41)$$

kde:

a - ovlivňuje x, b - y, c - z, d - všechny souřadnice [-]

a, b, c - jsou lokální měřítka [-]

d – globální měřítka [-]

Jestliže $0 < d < 1$ - nastane "roztažení" souřadnic [-]

3.3 Homogenní transformační matice více pohybů

Výsledná transformační matice se získá vynásobením matic elementárních otočení a posuvů.

Platí:

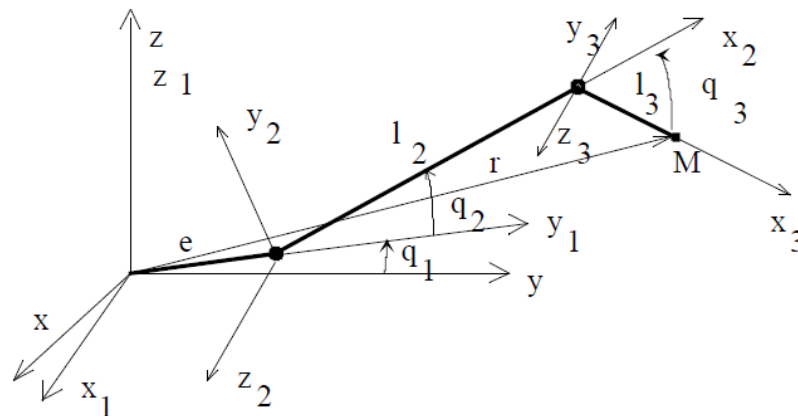
- Na začátku jsou oba systémy shodné, proto transformační matice je E.

- Jestliže se pohyblivý systém OUVW otáčí / posouvá vzhledem k OXYZ předchozí transformační matici třeba násobit zleva homogenní elementární maticí.

- Jestliže se pohyblivý systém OUVW otáčí / posouv vzhledem na jednu z vlastních os, pak se předchozí matice násobí zprava.

Pro popis rotačních a translačních spojení kinematických dvojic je používán maticový výpočet. Vychází se z homogenních transformačních matic popisujících polohu systému souřadnic člena ve vztahu k souřadnicím předchozího člena.

Příklad kinematického schématu, pro který jsou vypočítány složky výsledného vektoru \mathbf{r} v pravouhlém souřadnicovém systému.



Obr. 14 Příklad kinematického schéma [4]

Složky výsledného vektoru polohy koncového bodu jsou:

$$x_{OM} = -l_3 s q_1 c(q_2+q_3) - e s q_1 - l_2 s q_1 c q_2 \quad (42)$$

$$y_{OM} = l_3 c q_1 c(q_2+q_3) + e s q_1 + l_2 c q_1 c q_2$$

$$z_{OM} = l_3 s(q_2+q_3) + l_2 s q_2,$$

kde:

x_{OM}, y_{OM}, z_{OM} – složky výsledného vektoru [-]

l, s, q, c – jednotlivé změny polohy [-]

3.4 Vlivy nepřesnosti modelu

Chyby robotických systémů budou zkoumány v části o charakteristikách robotických systémů. Pokud je model tvořen rovnicemi, pak je zřejmé, že:

- změna délky e (konstrukce) se projeví na X a Y
- změna délky kteréhokoliv ramene (l_2, l_3) se projeví na poloze X, Y, Z
- chyby úhlů q_2 a q_3 se projeví na všech souřadnicích

- chyba úhlu q_1 se projeví na X a Y

Chyba modelu (špatně identifikovány parametry kinematické schémata) ovlivňuje při programovém řízení polohu a orientaci koncového bodu robota. Pokud se má kalibrovat systém, je třeba vycházet z určení e , l_2 , l_3 . Je však třeba určit i vektor konfigurace q_0 neboť také určuje výchozí stav a zároveň nepřesnost modelu.

Řízení systému se uskutečňuje změnou $q_1q_2q_3$.

4 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části jsou popsány základní prvky robotů a interpretovány poznatky z robotiky. Dále jsou zde popsány pohony robotů a manipulátorů, principy jejich činnosti a funkčnosti. V neposlední řadě je popsána kinematika robotů a vysvětleny základní pohyby robota a její kinematické rovnice.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

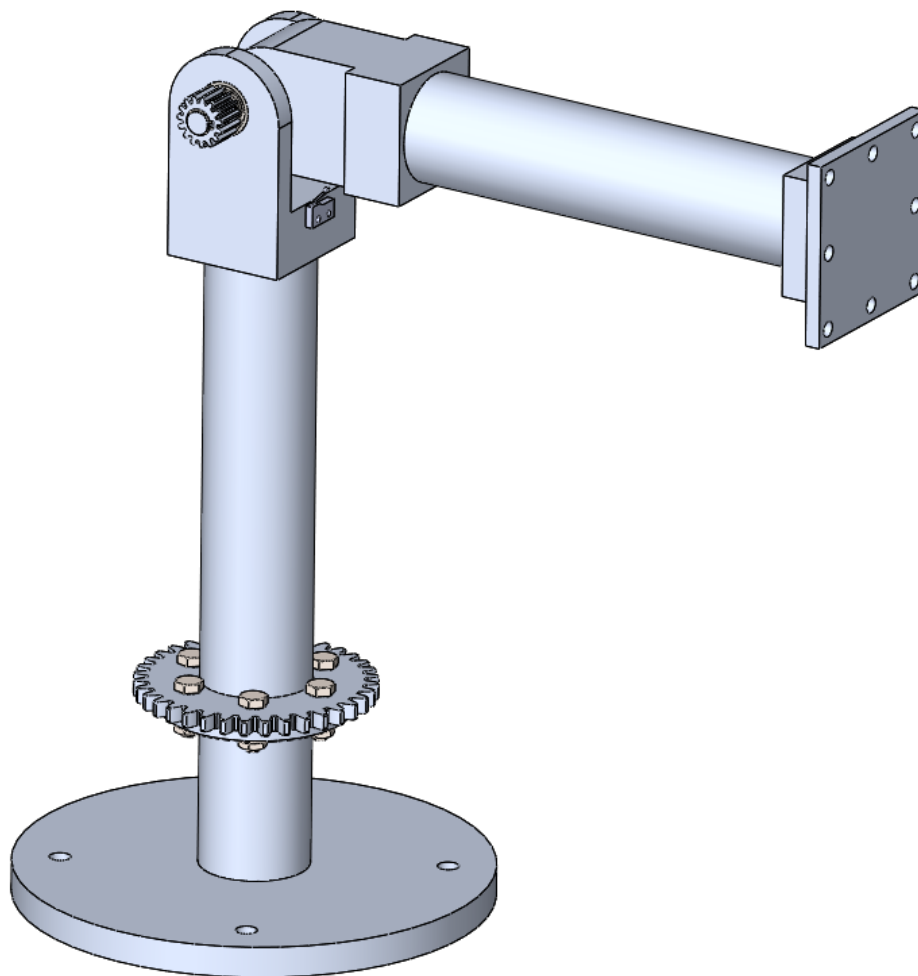
5 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem práce je navržení manipulátoru a zhotovení výkresové dokumentace. Po zvážení všech kritérií byl rozpracován 3D model až na úroveň výrobní výkresové dokumentace. Z 3D modelu byly následně odečteny všechny technické parametry, které jsou důležité pro řízení robotů.

6 NÁVRH MANIPULÁTORU

6.1 Konstrukční řešení manipulátoru

Konstrukce manipulátoru je jednoduchá, vychází z Cardanova uspořádání. Tato konstrukce pracuje ve sférických souřadnicích. Provedení zajišťuje volnost pohybu ve dvou stupních volnosti. Základní sloup manipulátoru je uložen otočně a to s pracovním rozsahem 360° . Na tento sloup je připojeno rameno, které bude ovládáno motorem umístěným přímo v oblasti spojení. Konstrukce se skládá z několika normalizovaných dílů a obrobků, není tedy složitá na výrobu. Další výhodou konstrukce je jednoduchá montáž.



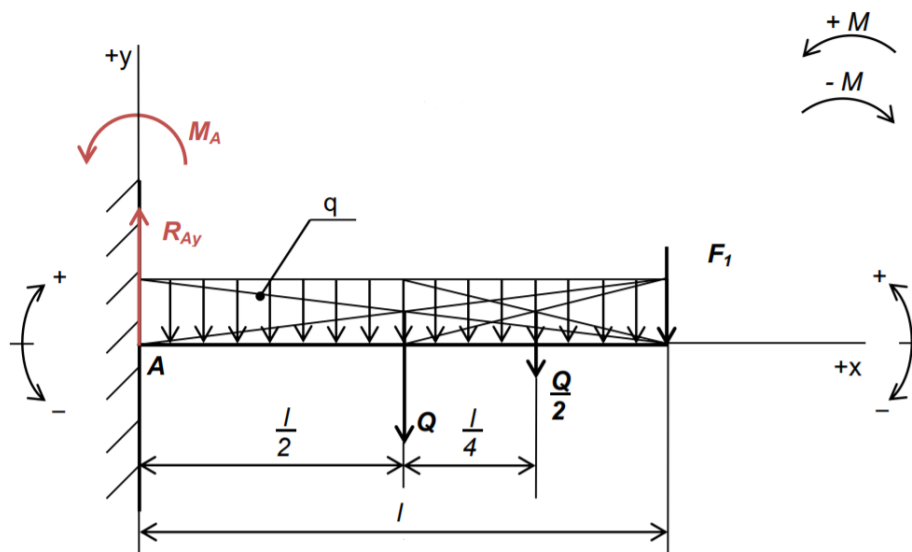
Obr. 15 Celková sestava manipulátoru

7 KONSTRUKCE MANIPULÁTORU

7.1 Výpočty

Zde je ukázán postup výpočtů při navrhování jednotlivých součástí, podobně bylo postupováno i u zbylých výpočtů.

7.1.1 Namáhání ramene manipulátoru



Obr. 16 Reakční a zátěžové síly ramene

Zjištění maximálního zatížení ramene:

Materiál ramene: Al slitina 6061, $R_e = 110 \text{ Mpa}$

Profil ramene: trubka $D = 70 \text{ mm}$, $d = 40 \text{ mm}$, délka ramene: 375 mm

Zátěžná síla: $F_1 = 10 \text{ N}$

Spojitě zatížení: $Q = q \cdot l = 10 \text{ N}$

$$\sum F_y = 0 \quad (43)$$

$$R_{Ay} - Q - F_1 = 0$$

$$R_{Ay} = Q + F_1 = 10 + 10 = 20 \text{ N}$$

$$\sum M_o = 0 \quad (44)$$

$$-F_1 \cdot l + Q \cdot \frac{l}{2} + M_A = 0$$

$$M_A = F_1 \cdot l + Q \cdot \frac{l}{2} = 10 \cdot 375 + 10 \cdot \frac{375}{2} = 5625 \text{ Nmm}$$

$$M_{o1} = 0$$

$$M_{oQ} = -F_1 \cdot \frac{l}{2} - \frac{Q}{2} \cdot \frac{l}{4} = -10 \cdot \frac{375}{2} - \frac{10}{2} \cdot \frac{375}{4} = -2343 \text{ Nmm}$$

$$M_{oA} = -F_1 \cdot l - Q \cdot \frac{l}{2} = -10 \cdot 375 - 10 \cdot \frac{375}{2} = -5625 \text{ Nmm},$$

kde:

F_1 – zátěžná síla [N]

Q – spojité zatížení (zatížení vlastní hmotností ramene) [N]

l – délka ramene [mm]

F_y – síly v ose y [N]

R_{ay} – reakční síla ve směru osy y [N]

M_{o1} – ohybový moment na konci ramene [Nmm]

M_{oQ} – ohybový moment v polovině délky ramene [Nmm]

M_{oA} – ohybový moment na začátku ramene [Nmm]

M_A – ohybový moment v místě A [Nmm]

Zjištění napětí:

$$J_y = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(70^4 - 60^4)}{64} = 542415,6 \text{ mm}^4 \quad (45)$$

$$\sigma_o = \frac{M_{o,max}}{J_y} \cdot z_{max} = \frac{5625}{542415,6} \cdot \frac{70}{2} = 0,363 \text{ Mpa} \quad (46)$$

$$\sigma_{Do} = \frac{R_e}{k} = \frac{110}{3} = 36,66 \text{ Mpa} \quad (47)$$

$$\sigma_o \leq \sigma_{Do}$$

$$0,363 \leq 36,66,$$

kde:

J_y – kvadratický moment průřezu k ose y [mm⁴]

σ_o – napětí [Mpa]

σ_{Do} – maximální dovolené napětí [Mpa]

R_e – mez kluzu [Mpa]

z_{max} – maximální vzdálenost profilu od osy v ose z [mm]

k – koeficient bezpečnosti [-]

Z výsledků, lze usoudit, že ramena jsou dobře nadimenzována pro určené zatížení, případně by byli schopné snést zatížení i mnohem větší.

7.1.2 Pero

Kontrola pera na střih:

Pero ČSN 02 2562 6e7 x 6 x 36

$$F = \frac{M_k}{\frac{d}{2}} = \frac{5625}{\frac{17}{2}} = 661,76 \text{ N} \quad (48)$$

$$\tau_s = \frac{F}{S} = \frac{661,76}{6 \cdot 36} = 3,06 \text{ Mpa} \quad (49)$$

$$\tau_s \leq \tau_{DS},$$

kde:

F – síla působící na obvodě hřídele [mm]

d – průměr hřídele [mm]

M_k – kroutící moment [Nmm]

τ_s – smykové napětí [Mpa]

τ_{DS} – maximální dovolené smykové napětí [Mpa]

S – styčná plocha pera přenášející kroutící moment [mm]

Kontrola pera na otláčení:

$$p = \frac{F}{S_p} = \frac{661,76}{2,5 \cdot 36} = 7,35 \text{ Mpa} \leq p_D, \quad (50)$$

kde:

F – síla působící na obvodě hřídele [mm]

S_p – styčná plocha pera přenášející kroutící moment [mm]

p_D – maximální dovolený tlak působící na pero [Mpa]

p – tlak působící na pero [Mpa]

7.1.3 Ozubené kolo

Modul: 4, počet zubů: 36

$$D = z \cdot m = 4 \cdot 36 = 144 \text{ mm} \quad (51)$$

$$h_a = m = 4 \text{ mm} \quad (52)$$

$$h_f = m \cdot 1,25 = 4 \cdot 1,25 = 5 \text{ mm} \quad (53)$$

$$D_a = D + 2 \cdot h_a = 144 + 2 \cdot 4 = 152 \text{ mm} \quad (54)$$

$$D_f = D - 2 \cdot h_f = 144 - 2 \cdot 5 = 134 \text{ mm} \quad (55)$$

$$D_b = D \cdot \cos 20^\circ = 144 \cdot \cos 20^\circ = 135,31 \text{ mm} , \quad (56)$$

kde:

D_a - průměr kružnice hlavové [mm]

D - průměr roztečné kružnice [mm]

D_b - průměr základní kružnice [mm]

D_f - průměr patní kružnice [mm]

h_a - výška hlavy zubu [mm]

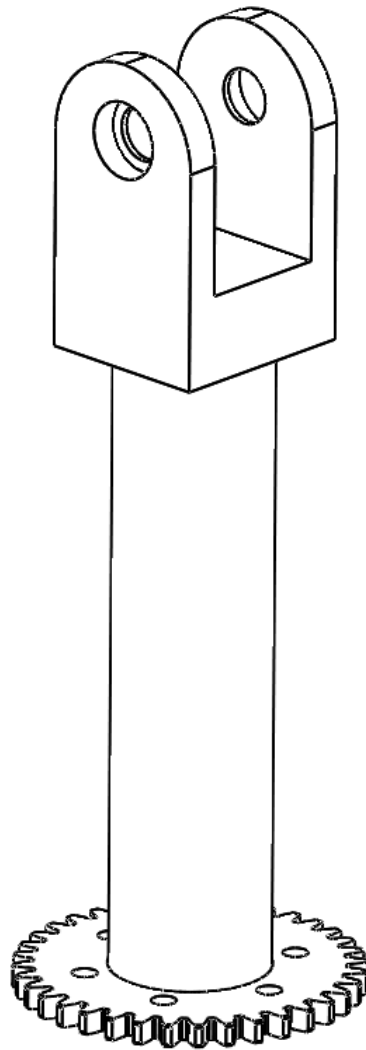
h_f - výška paty zubu [mm]

7.2 Prvky manipulátoru

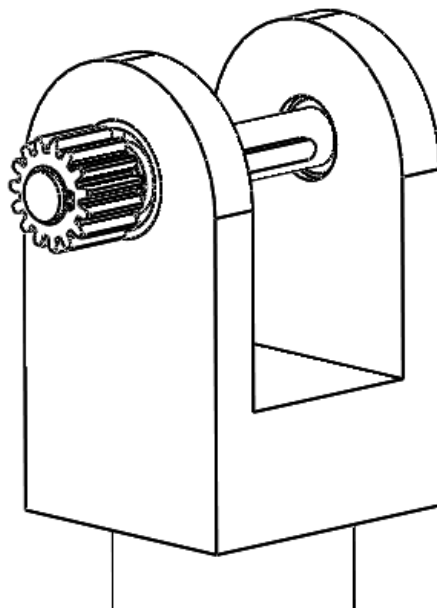
Jsou zde popsány základní prvky, detailní vyobrazení a rozměry jsou uvedeny v příložené výkresové dokumentaci.

7.2.1 Sloup manipulátoru

Sloup, který je hlavním nosným prvkem, je přišroubován přes přírubu k nosnému čepu, který spolu se spodním uchycením tvoří otočný mechanismus. Ve spodním uchycení jsou uloženy ložiska. Spodní uchycení slouží i jako základna celého manipulátoru. Sloup je pohyblivý. Pevnou část tvoří spodní uchycení. Rotaci sloupu na čepu zabezpečují dvě jednořadá kuličková ložiska. Pohyb na rameno sloupu přenáší ozubené kolo. Správnou polohu ložisek zabezpečují pojistné kroužky. Nahoře na sloupu je nasunuta čelist, která zabezpečuje spojení sloupu se zbytkem manipulátoru. Čelist je přivařena. Celý sloup je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



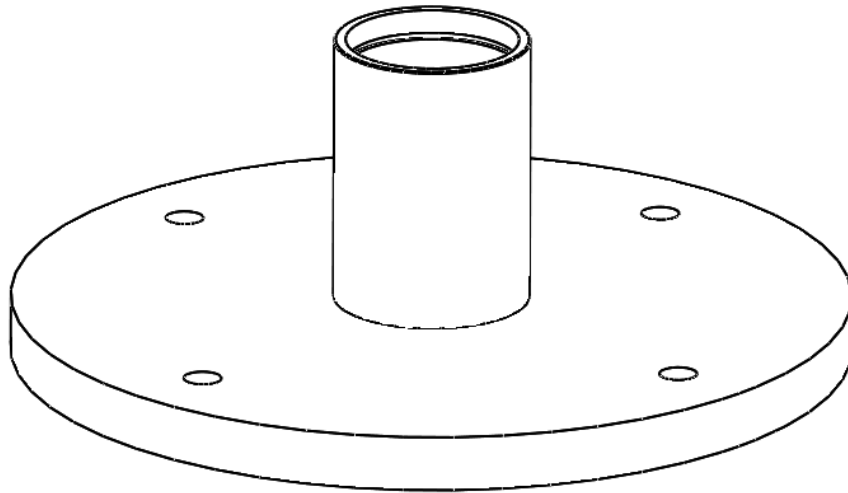
Obr. 17 Sloup manipulátoru



Obr. 18 Detail čelisti sloupu

7.2.1.1 Svařenec spodního uložení

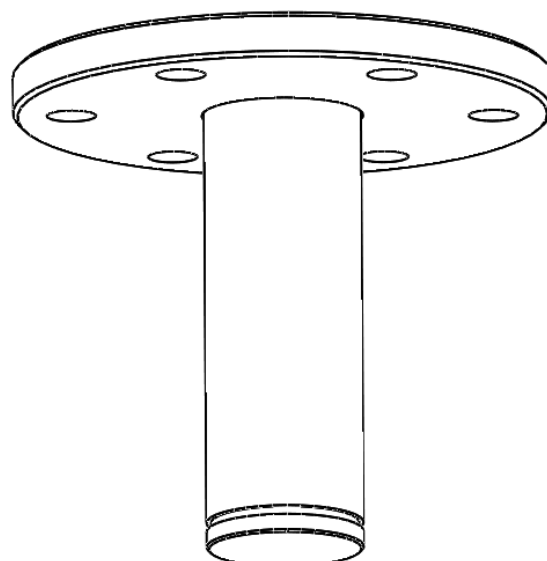
Svařenec bude pevně spojen s podložkou (stojanem, atd.), tudíž se nepohybuje. Leží na něm celá sestava manipulátoru. Je to svařenec kruhové tyče, obrobené na přesný rozměr a plechu, vypáleného a následně obrobeného na přesný rozměr. Celý svařenec je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



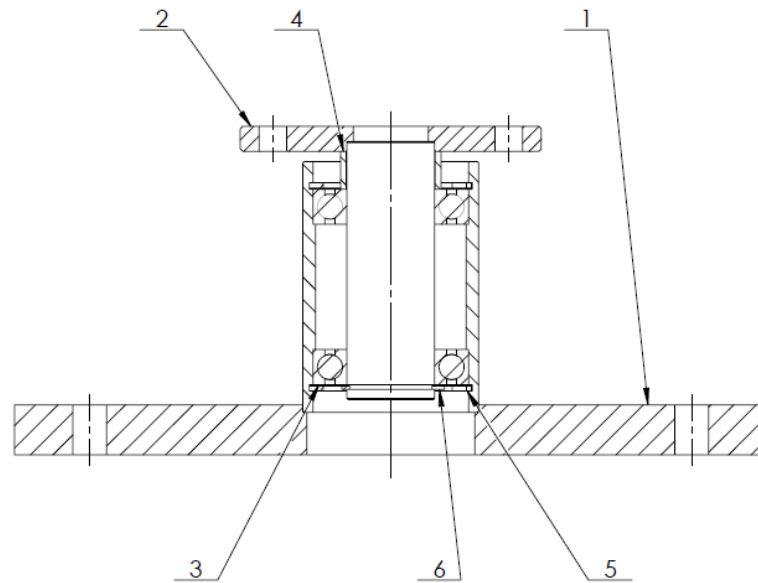
Obr. 19 Svařenec spodního uložení

7.2.1.2 Svařenec čepu

Nasune se na ložiska, distanční kroužek a pojistný kroužek zajistí přesnou polohu na spodním uložení. Přes šroubové spojení se pak příruba spojí se zbývající částí manipulátoru. Celý svařenec je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 20 Svařenec čepu

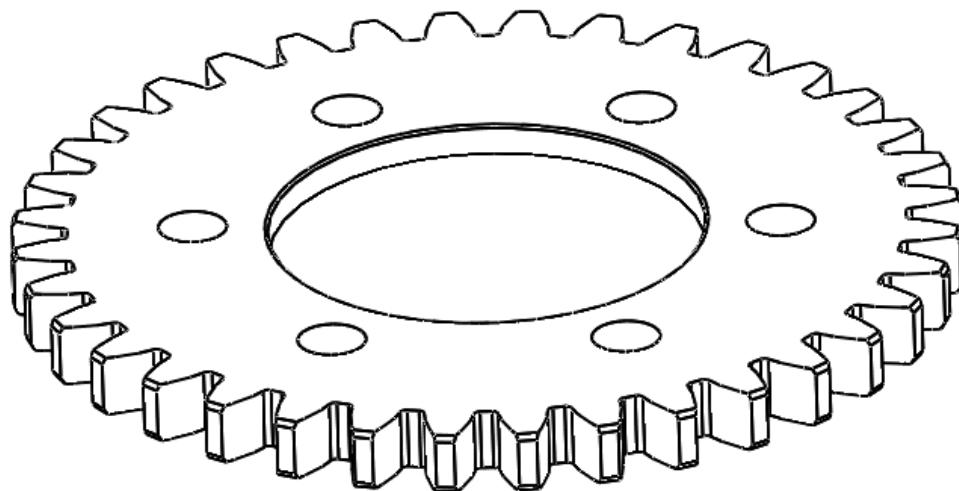


Obr. 21 řez spodním uložením

*1 - svařenec spodního uložení, 2 – svařenec čepu, 3 – ložisko, 5 – pojistný kroužek,
6 – pojistný kroužek*

7.2.1.3 Ozubené kolo

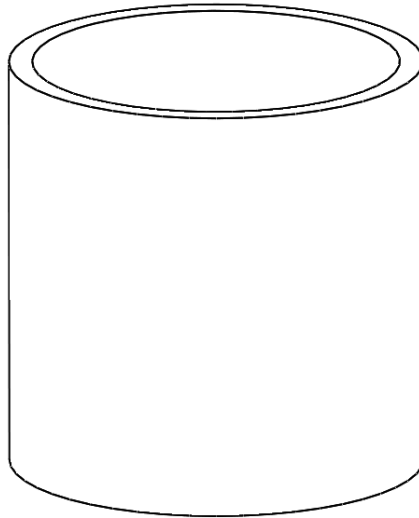
Přenáší pohyb z pohonu na rameno sloupu, zároveň se kolo propojuje s přírubou, při montáži sloupu manipulátoru. Ozubené kolo je vyrobeno z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 22 Ozubené kolo

7.2.1.4 Distanční kroužek

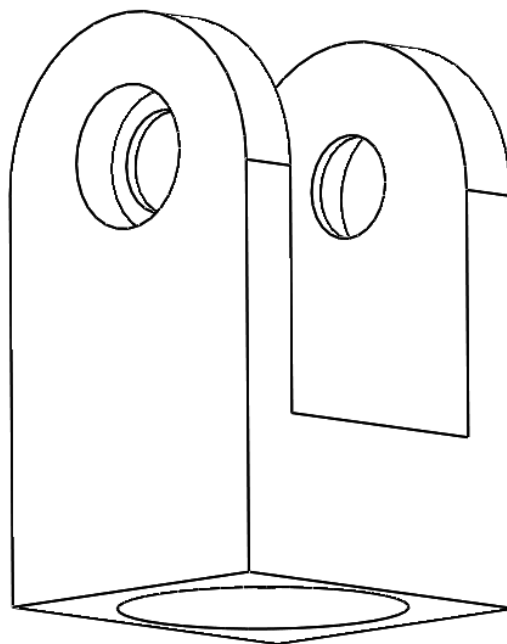
Slouží k vymezení prostoru mezi ložisky. Vymezuji nám také vůli mezi ramenem sloupu a deskou trnu. Je vyroben z oceli S235J.



Obr. 23 Distanční kroužek

7.2.1.5 Čelist sloupu

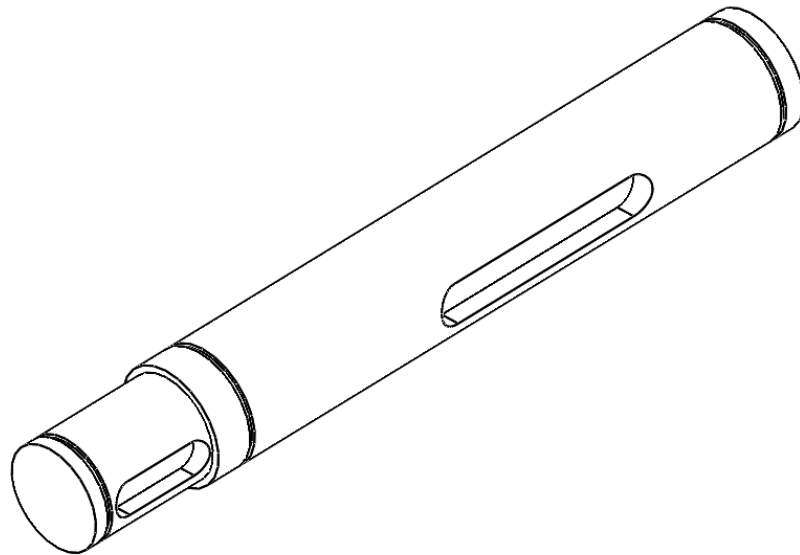
Je zde ukotvena hřídel v kuličkových ložiscích, přes kterou se přenáší pohyb do zbytku sestavy. Zde je také uchycen pohon ramene manipulátoru. Čelist je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 24 Čelist sloupu

7.2.1.6 Hřídel

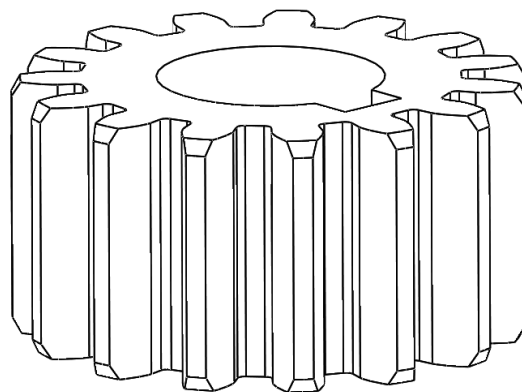
Hřídel slouží jakou spojovací součást a současně také přenáší pohyb z ozubeného kola na rameno manipulátoru. Jsou zde drážky pro pero, přes které se přenáší kroutící moment. Dále drážky pro pojistné kroužky, které zabezpečují hřídel na svém místě a zabraňují vy-
padnutí hřídele z uchycení. Hřídel je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 25 Hřídel

7.2.1.7 Ozubené kolo

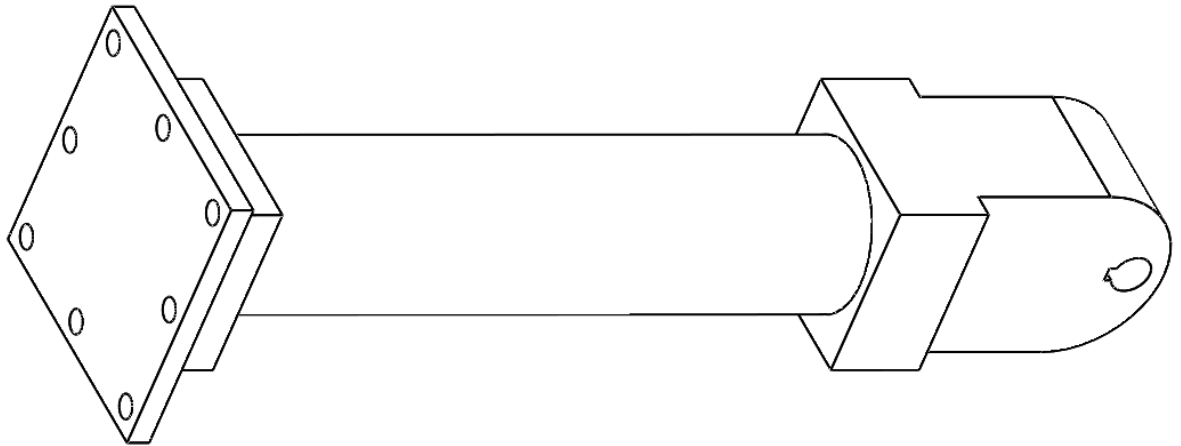
Přenáší moment na hřídel, která přenáší pohyb na rameno manipulátoru. Je vyroben z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 26 Ozubené kolo

7.2.2 Sestava ramene manipulátoru

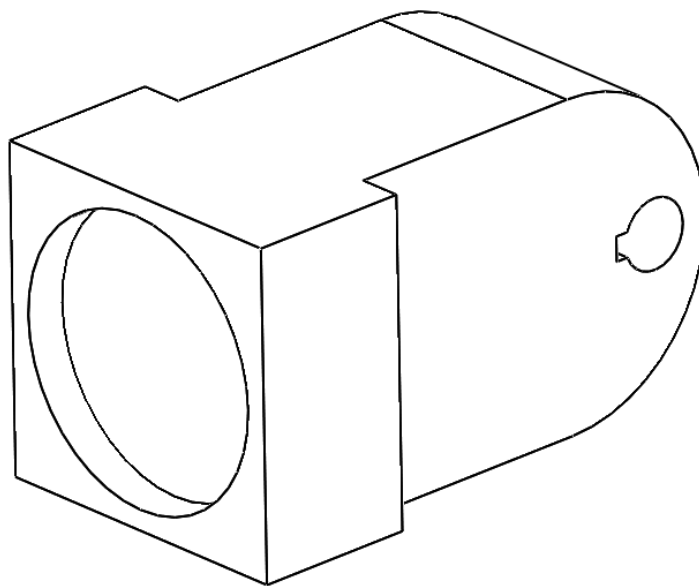
Poslední část manipulátoru, přenášející požadovaný pohyb ke koncovému efektoru. Celý svařenec je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 27 Sestava ramene manipulátoru

7.2.2.1 Protikus čelisti

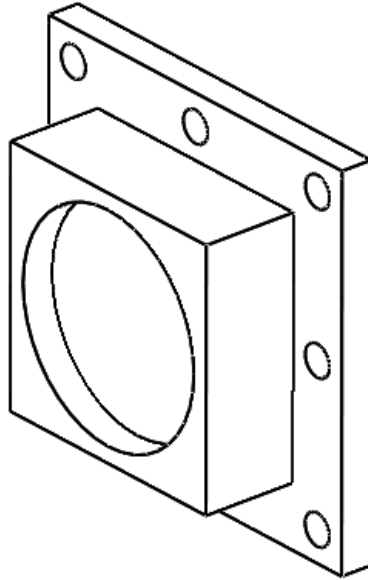
Část kloubu, které přes pera v hřídeli přenáší pohyb na rameno manipulátoru. Je vyroben z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 28 Protikus čelisti

7.2.2.2 Deska uchycení koncového efektoru

Na desku se dá jednoduchým způsobem uchytit požadovaný koncový efektor. Je z hliníkové slitiny EN AW-6061.



Obr. 29 Deska uchycení koncového efektoru

8 TECHNICKÉ PARAMETRY NAVRŽENÉHO MANIPULÁTORU

Abychom mohli s konstrukcí manipulátoru dále pracovat, musíme znát její parametry jako jsou rozměry, hmotnost, souřadnice těžišť či momenty setrvačnosti.

8.1 Základní rozměry manipulátoru

Název sestavy	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]
Sloup	566	300	300
Rameno manipulátoru	120	120	390
Celý manipulátor	906	525	300

Tab. 1 Základní rozměry manipulátoru

8.2 Hmotnosti sestav

Název sestavy	Hmotnost [kg]
Sloup	2,39
Spodní uložení	4,74
Rameno manipulátoru	3,13
Celý manipulátor	10,26

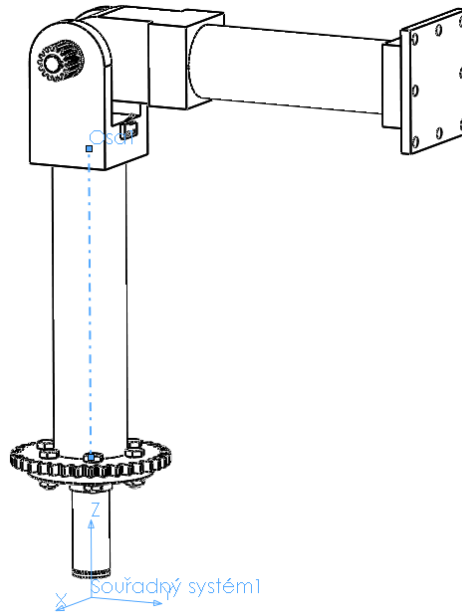
Tab. 2 Hmotnost manipulátoru

8.3 Poloha těžiště

Na jednotlivých výrobních výkresech sestav je uvedena poloha těžiště.

8.4 Momenty setrvačnosti

Ke správnému řízení pohybu manipulátoru, musíme znát momenty setrvačnosti manipulátoru. Momenty se mění v závislosti polohy ramene manipulátoru, je potřeba znát dva okrajové případy polohy ramene.



Obr. 30 Momenty setrvačnosti sestavy v maximální vzdálenosti od osy rotace

Fyzikální vlastnosti

Včetně skrytých těl/součástí
 Zvolte těžiště prvku
 Zobrazit hmotu svaru

Uvádět souřadnice vzhledem k: Souřadný systém1

Fyzikální vlastnosti vybrané součásti
Souřadný systém: Souřadný systém1

Těžiště a momenty setrvačnosti jsou vyneseny v souřadném systému Sestava manipulátoru
* Obsahuje fyzikální vlastnosti jedné či více skrytých součástí/těl.

Hmotnost = 6.27 kilogramů

Objem = 2325686.32 milimetry krychlové

Plošný obsah = 517932.95 milimetry čtvereční

Těžiště: (milimetry)
 X = 0.70
 Y = 85.31
 Z = 424.04

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * milimetry čtvereční)
 Vybrané z těžiště.

$I_x = (0.00, 0.53, 0.85)$	$P_x = 72493.34$
$I_y = (0.01, -0.85, 0.53)$	$P_y = 199520.07$
$I_z = (1.00, 0.01, -0.01)$	$P_z = 263063.80$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * milimetry čtvereční)
 Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

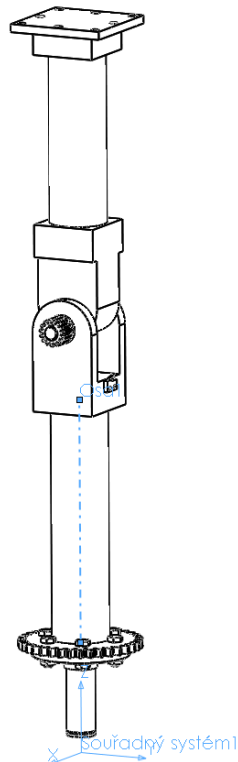
$L_{xx} = 263058.52$	$L_{xy} = -375.39$	$L_{xz} = 469.99$
$L_{yx} = -375.39$	$L_{yy} = 163598.51$	$L_{yz} = 57210.97$
$L_{zx} = 469.99$	$L_{zy} = 57210.97$	$L_{zz} = 108420.19$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * milimetry čtvereční)
 Získány z výstupního souřadného systému.

$I_{xx} = 1436057.22$	$I_{xy} = -0.47$	$I_{xz} = 2333.59$
$I_{yx} = -0.47$	$I_{yy} = 1290973.74$	$I_{yz} = 284010.65$
$I_{zx} = 2333.59$	$I_{zy} = 284010.65$	$I_{zz} = 154049.81$

Nápověda Tisk... Kopírovat do schránky

Obr. 31 Momenty setrvačnosti v maximální vzdálenosti od osy rotace



Obr. 32 Momenty setrvačnosti sestavy v minimální vzdálenosti od osy rotace

Fyzikální vlastnosti

Včetně skrytých těl/součástí
 Zvolte těžiště prvku
 Zobrazit hmotu svaru

Uvádět souřadnice vzhledem k: Souřadný systém1

Fyzikální vlastnosti vybrané součásti
 Souřadný systém: Souřadný systém1

Těžiště a momenty setrvačnosti jsou vyneseny v souřadném systému Sestava manipulátoru
 * Obsahuje fyzikální vlastnosti jedné či více skrytých součástí/těl.

Hmotnost = 6.31 kilogramů
 Objem = 2331394.09 milimetry krychlové
 Plošný obsah = 524258.58 milimetry čtvereční

Těžiště: (milimetry)
 X = 0.42
 Y = 0.00
 Z = 509.49

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * milimetry čtvereční)
 Vybrané z těžiště.

$I_x = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_x = 8439.45$
$I_y = (1.00, 0.00, 0.00)$	$P_y = 377509.71$
$I_z = (0.00, 1.00, 0.00)$	$P_z = 378169.83$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * milimetry čtvereční)
 Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

$L_{xx} = 377509.70$	$L_{xy} = 0.00$	$L_{xz} = 56.83$
$L_{yx} = 0.00$	$L_{yy} = 378169.83$	$L_{yz} = 0.00$
$L_{zx} = 56.83$	$L_{zy} = 0.00$	$L_{zz} = 8439.46$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * milimetry čtvereční)
 Získány z výstupního souřadného systému.

$I_{xx} = 201659.78$	$I_{xy} = 0.00$	$I_{xz} = 1417.05$
$I_{yx} = 0.00$	$I_{yy} = 2017221.04$	$I_{yz} = 0.00$
$I_{zx} = 1417.05$	$I_{zy} = 0.00$	$I_{zz} = 8440.59$

Nápvěda Tisk... Kopírovat do schránky

Obr. 33 Momenty setrvačnosti v minimální vzdálenosti od osy rotace

ZÁVĚR

Manipulátor byl zkonstruován s ohledem na jednoduchost, tudíž bylo použito co nejvíce normalizovaných dílů. Zároveň použité nenormalizované díly byly konstruovány tak, aby jejich výroba nebyla náročná. Byly použity převážně duralové materiály, aby bylo docíleno co možná největší snížení hmotnosti, tím pádem se zlepšila říditelnost manipulátoru, a také i praktické užité vlastnosti, jako je například únosnost. Manipulátor je kompletně navržen v parametrickém 3D modeláři Solidworks, což umožňuje snadnější vytvoření výkresové dokumentace nebo případné konstrukční změny. Do jednotlivých modelů byly zadány i materiálové konstanty. Takto komplexně definované vlastnosti umožňují snadné určení vlastností potřebných k řízení manipulátoru přímo v modeláři. Jednoduchost výroby a následně i sestavení manipulátoru dodává široké uplatnění použití, například i k výuce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Úředníček, Z. Robotika, Zlín 2012. 38 s. ISBN 978 – 80 – 7454 – 223 – 7
- [2] Roboty a manipulátory , Učební text VOŠ a SPŠ, Kutná hora
- [3] Svoboda, P., Brandejs, J. Výběry z norem. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2013. 223 s. ISBN 978-80-7204-828-0
- [4] JURIŠICA L., HUBINSKÝ P., KARDOŠ J. *Robotika*, 2005. Slovenská technická univerzita v Bratislave – Fakulta elektrotechniky a informatiky
- [5] SKALICKÝ, J. Elektrické servopohony. 2. vyd. Brno, 2001. 86 s. ISBN 80-214-1978-4
- [6] MAXON MOTOR, *Resolvery - Snímače - maxon motor ag - UZIMEX: Špičkové technologie do automatizace a robotizace*:
<http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motorag/Snimace/Resolvery.html>
- [7] MACEK J. *Řízení pohybu podvozku mobilního robotu OMR III*. Diplomová práce. Brno. FSI VUT Brno, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2006. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované kreslení
DoF	Degrees of Freedom – stupně volnosti
3D	three dimension – trojrozměrný
tzv.	tak zvaný
např.	například
tzn.	to znamená
[mm]	milimetry
[°]	stupeň
[N]	newton
[s]	sekunda
[kg.m ²]	kilogram na metr čtvereční
[kg]	kilogram
[N.m]	newtonmetr
[N.mm]	newtonmilimetr
[Mpa]	megapascal

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řez stejnosměrným motorem [5].....	15
Obr. 2 Axiální pětifázový reluktanční krokový motor [5].....	18
Obr. 3 Elektrické schéma resolveru [6].....	18
Obr. 4 Princip činnosti optického inkrementálního snímače [7].....	20
Obr. 5 Kaskádové uspořádání regulátorů [4].....	28
Obr. 6 Strukturní schéma servosystému s řídicím členem s hierarchickým uspořádáním regulátorů [4].....	29
Obr. 7 Strukturní schéma servosystému s kaskádním řazením regulátorů s nezávislou regulační stavových veličin [4].....	29
Obr. 8 Blokové schéma s kombinovanou strukturou řízení [4].....	30
Obr. 9 Závislost celkového momentu motoru robota od počtu os pohybu [4].....	31
Obr. 10 Pasivní kompenzace sil tíže [4].....	32
Obr. 11 Kompenzace sil tíže pružinou [4].....	33
Obr. 12 Aktivní vyvažování sil tíže [4].....	35
Obr. 13 Souřadnicové systémy OXYZ a OUVW [4].....	36
Obr. 14 Příklad kinematického schéma [4].....	44
Obr. 15 Celková sestava manipulátoru.....	49
Obr. 16 Reakční a zátěžové síly ramene	50
Obr. 17 Sloup manipulátoru	54
Obr. 18 Detail čelisti sloupu.....	54
Obr. 19 Svařenec spodního uložení	55
Obr. 20 Svařenec čepu.....	55
Obr. 21 Řez spodním uložení.....	56
Obr. 22 Ozubené kolo	56
Obr. 23 Distanční kroužek	57
Obr. 24 Čelist sloupu	57
Obr. 25 Hřídel.....	58
Obr. 26 Ozubené kolo	58

Obr. 27 Sestava ramene manipulátoru	59
Obr. 28 Protikus čelisti.....	59
Obr. 29 Deska uchycení koncového efektoru.....	60
Obr. 30 Momenty setrvačnosti sestavy v maximální vzdálenosti od osy rotace.....	62
Obr. 31: Momenty setrvačnosti v maximální vzdálenosti od osy rotace.....	62
Obr. 32 Momenty setrvačnosti sestavy v minimální vzdálenosti od osy rotace.....	63
Obr. 33 Momenty setrvačnosti v minimální vzdálenosti od osy rotace.....	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní rozměry manipulátoru.....	55
Tab. 2 Hmotnost manipulátoru.....	55

SEZNAM PŘÍLOH

Seznam výkresové dokumentace

Číslo přílohy	Název přílohy	Číslo výkresu
1.	MANIPULÁTOR	BC-01
2.	SPODNÍ ULOŽENÍ	BC-01-01
3.	SVAŘENEC SPODNÍHO ULOŽENÍ	BC-01-01-10
4.	SPODNÍ DESKA	BC-01-01-11
5.	ULOŽENÍ PRO LOŽISKA	BC-01-01-12
6.	SVAŘENEC ČEPU	BC-01-02-10
7.	ČEP	BC-01-02-11
8.	PŘÍRUBA ČEPU	BC-01-02-12
9.	DISTANČNÍ KROUŽEK	BC-01-03
10.	SVAŘENEC SLOUPU	BC-02-10
11.	SLOUP	BC-02-10-01
12.	OZUBENÉ KOLO	BC-02-10-02
13.	ČELIST	BC-02-10-03
14.	SVAŘENEC RAMENE	BC-03-10
15.	RAMENO	BC-03-10-01
16.	ČELIST PROTIKUS	BC-03-10-02
17.	UCHYCENÍ EFEKTORU	BC-03-10-03
18.	HŘÍDEL	BC-04-01
19.	OZUBENÉ KOLO 2	BC-05-01

Seznam modelové dokumentace

Číslo přílohy	Název přílohy
1.	MANIPULÁTOR
2.	SPODNÍ ULOŽENÍ
3.	SVAŘENEC SPODNÍHO ULOŽENÍ
4.	SPODNÍ DESKA
5.	ULOŽENÍ PRO LOŽISKA
6.	SVAŘENEC ČEPU
7.	ČEP
8.	PŘÍRUBA ČEPU
9.	DISTANČNÍ KROUŽEK
10.	SVAŘENEC SLOUPU
11.	SLOUP
12.	OZUBENÉ KOLO
13.	ČELIST PROTIKUS
14.	SVAŘENEC RAMENE
15.	RAMENO
16.	ČELIST
17.	UCHYCENÍ EFEKTORU
18.	HŘÍDEL
19.	OZUBENÉ KOLO 2