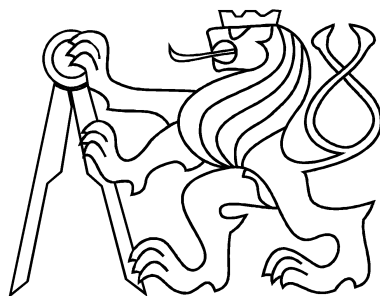


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Plánování trajektorie paralelního robota

Anotační list

Jméno autora:	Jan Kuřina
Název bakalářské práce:	Plánování trajektorie paralelního robota
Anglický název:	Path planning of the parallel robot
Akademický rok:	2016/2017
Obor studia:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor Mechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 35 Počet obrázků: 25 Počet příloh: 1
Klíčová slova:	Paralelní manipulátor, Arduino, Delta robot, kinematika
Keywords:	Parallel manipulator, Arduino, Delta robot, kinematics
Anotace:	<p>Tato práce se zabývá paralelními manipulátory a je zaměřena zejména na paralelní manipulátory typu Delta. V úvodu je popis a význam Delta robotů a také jsou zde definovány základní pojmy a cíle práce. Druhá kapitola obsahuje rozdělení sériových a paralelních kinematických struktur a jejich srovnání. Dále popisuje vývoj paralelních struktur od jejich počátků až do současnosti. Třetí kapitola obsahuje plánování trajektorie. To se skládá z popisu kinematických úloh a jejich řešení a následně jejich demonstrace při praktickém experimentu s modelem Delta robota. V závěru jsou zhodnoceny výsledky a průběh praktické části experimentu s modelem.</p>
Abstract:	<p>This thesis focuses on parallel manipulators and especially Delta type manipulators. In the first part, there is a description and importance of Delta robots and there are also defined basic concepts and objectives of the thesis. Second chapter contains distribution serial and parallel kinematic structures and their comparison. Then it describes progression of parallel structures since their origins until now. Third chapter is about path planning. This includes description of kinematic tasks and their solutions and also their demonstration on practical experiment with Delta robot model. In the conclusion, the results and process of the experiment with the model are evaluated.</p>

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Janu Zavřelovi, Ph.D. za cenné rady a vstřícnost při vypracování bakalářské práce. Také děkuji rodině a přátelům za podporu a motivaci.

Obsah

1 Úvod	8
1.1 Cíle bakalářské práce	8
1.2 Definice základních pojmů	8
2 Vývoj a typy manipulačních robotů	9
2.1 Typy struktur manipulačních robotů	9
2.1.1 Paralelní struktury	9
2.1.2 Sériové struktury	9
2.1.3 Porovnání struktur	11
2.1.4 Pick and Place roboti typu Delta	13
2.2 Historie paralelních robotů	15
2.2.1 Počátky paralelních struktur	15
2.2.2 Paralelní simulátory	17
3 Plánování trajektorie	18
3.1 Stupně volnosti	18
3.2 Inverzní kinematika	19
3.2.1 Příprava a rozbor principu řešení	19
3.2.2 Řešení inverzní kinematiky	23
3.3 Přímá kinematika	25
3.3.1 Příprava a rozbor principu řešení	25
3.3.2 Řešení přímé kinematiky	26
4 Experiment	28
4.1 Použité vybavení	29
4.2 Popis úlohy	29
4.3 Detekce výskytu válečku	31
4.4 Programování trajektorie	32
5 Závěr	33
Seznam literatury	34
Seznam příloh na CD	35

Seznam obrázků

2.1	Schéma delta manipulátoru - převzato z www.stackoverflow.com	9
2.2	Schéma sériového manipulátoru - převzato z www.densorobotics.com	10
2.3	Sériový manipulátor Unimate - převzato z www.ifr.org	10
2.4	Ukázka aplikace sériového robota - převzato z www.toodul.com	11
2.5	Pracovní plocha paralelního robota - převzato z www.mecademic.com	12
2.6	Schéma Delta manipulátoru - převzato z [1]	13
2.7	Stewart platform - převzato z www.grabcad.com	15
2.8	Paralelní sférický robot, patentován 1931 v USA - převzato z [1]	15
2.9	První paralelní průmyslový robot, patentován 1942 v USA - převzato z [1]	16
2.10	Hexapod na testování pneumatik - převzato z [1]	16
2.11	Stewartův návrh leteckého simulátoru - převzato z [1]	17
2.12	Prototyp leteckého simulátoru od Klaus Cappela - převzato z [1]	17
3.1	Popis Delta robota - převzato z [11]	18
3.2	Úhly pohonů a souřadnice efektoru - převzato z [12]	19
3.3	Důležité body robota - převzato z [12]	19
3.4	Základna robota - převzato z [12]	20
3.5	Efektorová plošina	20
3.6	Vektorová smyčka	21
3.7	Průsečíky pro jednu soustavu ramen	23
3.8	Středy virtuálních koulí - převzato z [12]	25
4.1	Model robota - převzato z [13]	28
4.2	Úchyt senzoru a jeho umístění na platformu	29
4.3	Pracovní plocha rozdělená na 9 oblastí	30
4.4	Mapa prohledávaných bodů	30
4.5	Infračervený senzor - převzato z [14]	31

1. Úvod

V této bakalářské práci se budeme zabývat paralelními strukturami a to zejména manipulátory, které se označují jako Delta roboti. Tyto manipulátory mají velký význam v sériové výrobě a umožňují zvyšovat produktivitu a posouvat tak průmyslovou výrobu na vyšší úroveň. Delta roboti jsou dnes těžko nahraditelnou pracovní jednotkou, která vyniká zejména svojí rychlostí, možnostmi aplikace a variacemi užití v mnoha odvětvích průmyslu. Součástí této bakalářské práce je naprogramování praktické úlohy pro model Delta robota a demonstrace jeho použití například pro výukové účely.

1.1 Cíle bakalářské práce

Ze zadání vycházejí tyto cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s plánováním trajektorií robotů.
2. Nastudujte řešení inverzní a přímé úlohy kinematiky.
3. Seznamte se s prostředím programování vývojové desky ARDUINO.
4. Zprovozněte model paralelního robota.

1.2 Definice základních pojmů

- **Přímá kinematika mechanismu**

Přímá kinematika řeší úlohu, kdy známe pohony robota a neznáme polohu koncového efektoru, případně polohu dalších ramen. Přímá kinematika má u sériových robotů jen jedno analytické řešení, ale u složitějších typů paralelních úloh může mít více řešení, nebo řešení nelze nalézt analyticky a musí se řešit numericky. [3]

- **Inverzní kinematika mechanismu**

Inverzní kinematika řeší úlohu, kdy známe polohu koncového efektoru, ale neznáme pohony. Pro trojosý paralelní mechanismus existuje vždy jedno řešení, ale pro víceosý paralelní a sériové mechanismy může existovat i více řešení. [3]

- **Kinematická dvojice**

Kinematická dvojice je tvořena dvěma vzájemně pohyblivě vázanými členy. Členy jsou přitom spojeny tak, že jejich pohyblivost je dána typem vazby mezi nimi. [8]

- **Kinematický řetězec**

Kinematický řetězec je spojení několika členů pomocí kinematických dvojic. Kinematický řetězec je reprezentován strukturou kinematiky, tj. počtem, druhem a uspořádáním členů kinematiky. Kinematický řetězec může být otevřený, uzavřený nebo smíšený, jednoduchý či složený a dále se dělí ještě na rovinný, sférický nebo prostorový. [8]

- **Stupně volnosti mechanismu**

Počet stupňů volnosti mechanismu je mírou pohyblivosti mechanismu. Slouží k určení počtu složek pohybu (translací a rotací), které je koncový efektor mechanismus schopen realizovat. [8]

2. Vývoj a typy manipulačních robotů

2.1 Typy struktur manipulačních robotů

Napříč téměř všemi odvětvími průmyslu je dnes uplatněno mnoho typů robotů a manipulačních zařízení, které vykonávají za člověka práci rychleji, přesněji a efektivněji. Níže jsou popsány a srovnány dva typy manipulačních robotů, jejichž zástupci se na výrobních linkách vyskytují nejčastěji a to ve všech možných konfiguracích.

2.1.1 Paralelní struktury

O paralelní struktury mechanismů se technická veřejnost začala významněji zajímat později než o sériové. Její výhody byly však ihned oceněny a vývoj od té doby velmi postoupil. Paralelní mechanismy jsou tvořeny uzavřeným kinematickým řetězcem, který se dá popsat uzavřenou smyčkou. Ramena jsou obvykle rotační (občas také posuvnou) kinematickou dvojicí upevněny na rámu (základně) a jsou všechna připevněna další kinematickou dvojicí na další článek ramena a poslední články všech ramen jsou připojeny k efektoru¹, který se liší dle aplikace mechanismu. Historie těchto robotů je přiblížena dále. [2] Na obrázku 2.1 je schéma typické konstrukce paralelního manipulátoru.

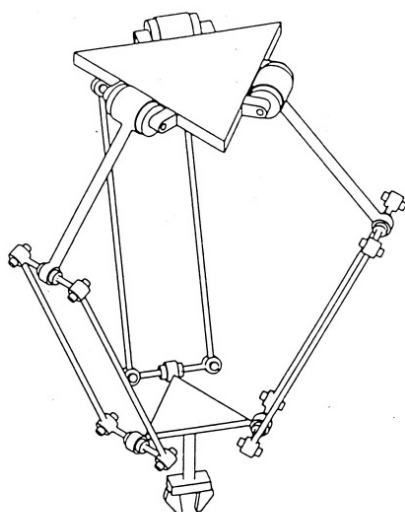


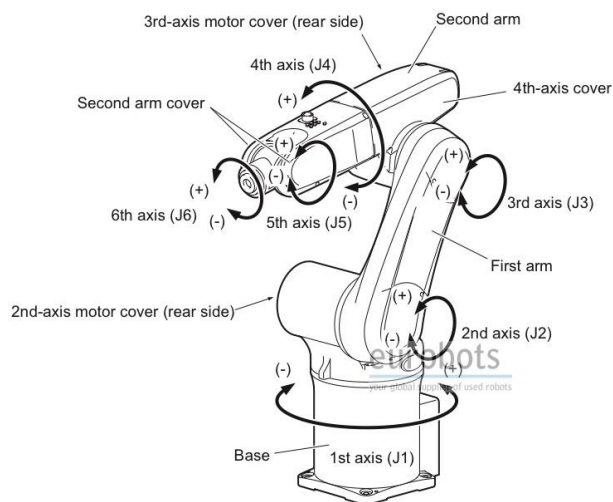
FIG. 1 CLAVEL'S "DELTA" ROBOT

Obrázek 2.1: Schéma delta manipulátoru - převzato z www.stackoverflow.com

2.1.2 Sériové struktury

Další, v dnešní době neméně významný, typ kinematického mechanismu využívaného v průmyslu, je sériová kinematika. Ta byla zavedena díky jednoduššímu řízení dříve než paralelní struktura, přičemž výhody a nevýhody těchto dvou struktur budou diskutovány v další části. Základ sériové struktury tvoří otevřený kinematický řetězec, kde každé rameno je s dalším spojené jedinou kinematickou dvojicí a to obvykle rotační, případně posuvnou. Základna bývá otočná a na konci posledního článku kinematického řetězce (na posledním rameni) je uložen koncový nástroj dle aplikace daného sériového robota. [2] Ukázka sériového manipulátoru se zatím nepřipojeným efektozem na obr. 2.2.

¹Efektorem se zde rozumí akční člen co se týče kontaktu s manipulovaným předmětem (čelisti, přísavka apod.)



Obrázek 2.2: Schéma sériového manipulátoru - převzato z www.densorobotics.com

Počátky sériových manipulátorů se datují do 60. let 20. století, kdy George Devol představil první sériový manipulátor s označením Unimate (obr. 2.3). Tyto manipulátory jsou využívány v oblasti svařování, obrábění, lakování, skládání a kompletování. Pro tyto struktury lze obecně najít jednoznačné analytické řešení co se týče přímé kinematické úlohy, avšak z důvodu nelinearity rovnic pro řešení inverzní kinematické úlohy může být nalezení analytického řešení nemožné a řešení může být více. [2] Na obrázku 2.2 je schéma robota se sériovou kinematikou.



Obrázek 2.3: Sériový manipulátor Unimate - převzato z www.ifr.org

2.1.3 Porovnání struktur

Srovnání a posouzení výhod a nevýhod zmiňovaných kinematik mechanismů lze udělat obecně, přesnější výstup však bude při uvažování určitého užití daného robota, protože není jeden typ kinematiky, který by dominoval ve všech sférách svými výhodami, schopnostmi nebo by například vše ostatní kompenzoval ekonomickou stránkou věci. Budeme zde tedy uvažovat zaměření těchto strojů na manipulaci s objekty a na jejich transport na krátkou vzdálenost v rámci jejich dosahu.

Manipulátory jsou poháněny elektricky, hydraulicky nebo pneumatically². Většina robotů používá stejnosměrné nebo střídavé servomotory či krokové motory kvůli jejich snadnosti řízení, tichému chodu a relativně levným pořizovacím nákladům. Hydraulické pohony nemají konkurenta co se týče rychlosti odezvy a možnosti zatížení. Hodí se proto do průmyslu, kde je potřeba manipulovat s těžkými předměty, ale vyžadují náročnější údržbu. Pneumatické mechanismy jsou levné a jednoduché, ale z jejich funkčního principu nemůžou dosahovat takové přesnosti jako jiné způsoby pohonu a tudíž se nehodí všude. Zmíněné typy pohonů navíc souvisejí s typem mechanismu, při volbě vhodné kombinace pohonu a kinematiky musíme tedy respektovat proveditelnost, nabídku a také vhodnost kinematiky pro daný účel.

Navzdory relativně snadnému programování a řízení robota se sériovou kinematikou mají tato zařízení některé nedostatky, které se nepodařilo v průběhu vývoje odstranit a z jejich principu to ani nikdy nebude možné. [3],[4],[5]

Zápory robotů se sériovou kinematikou:

- Menší přesnost z důvodu sčítání chyb v jednotlivých kinematických dvojicích (několik malých chyb v polohování ramen vyústí ve velkou chybu konečné pozice nástrojového článku)
- Velké ohybové namáhání částí stroje, zapříčiněné tím, že každá další část je nesena částí jí předcházející
- Menší manipulační rychlost z důvodu navazujících částí a následného dynamického účinku
- Složitější výroba z důvodu neopakujících se dílů pro různé části robota

Klady robotů se sériovou kinematikou:

- Velká pracovní oblast
- Nástroj je možné k objektu přiblížit pod různými úhly (obr. 2.4)
- Velmi univerzální využití, pokud se nekladou speciální nároky na některý aspekt výroby (rychlost, přesnost, hmotnost nákladu)



Obrázek 2.4: Ukázka aplikace sériového robota - převzato z www.toodul.com

²Kompresorem stlačený vzduch ovládá píst

Zápory robotů s paralelní kinematikou:

- Obecně obtížnější řešení kinematických úloh
- Omezený pracovní prostor z důvodu mechanické konstrukce (obr. 2.5)

Klady robotů se sériovou kinematikou:

- Vysoká celková tuhost, ramena nesou pouze nástrojovou platformu
- Vysoká manipulační rychlost
- Vyšší přesnost než u sériových robotů
- Možnost manipulace s velkými hmotnostmi (až několik tun)



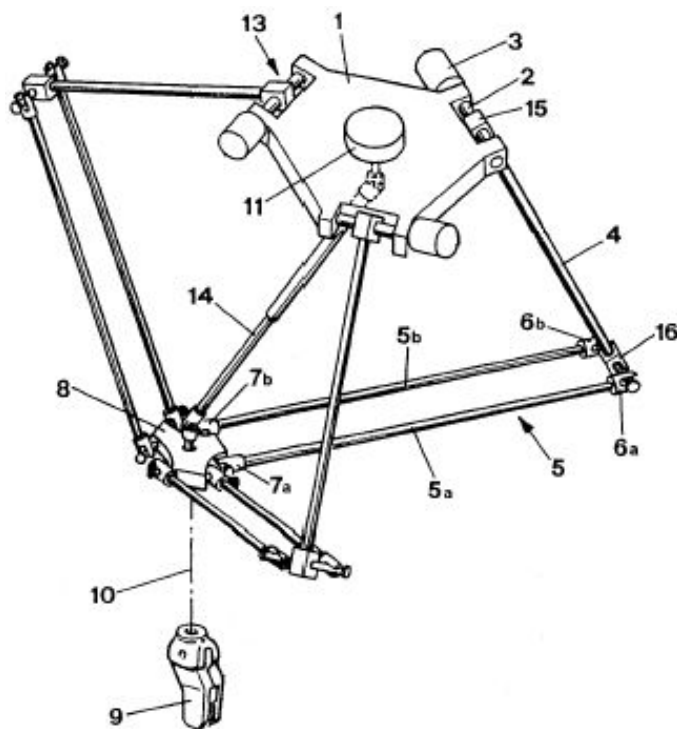
Obrázek 2.5: Pracovní plocha paralelního robota - převzato z www.mecademic.com

2.1.4 Pick and Place roboti typu Delta

Cílem této práce je také plánování trajektorie již vytvořeného Delta manipulátoru. Proto si tento typ manipulátoru popíšeme detailněji.

Vývoj Delta robotů

V 80. letech přišel Reymond Clavel s nápadem využití paralelogramů³ k vytvoření paralelního robota s možnostmi posuvu do všech tří os a také možnostmi rotace. Navzdory některým funkčním shodám s mechanismem Pollarda (patent v roce 1942) je považován nápad Clavela za originální, později v roce 1999 dostává cenu Golden Robot Award, kterou sponzoruje firma ABB, dnes jeden z předních výrobců Pick and Place robotů. [9] Základní myšlenka stojící za Delta paralelním robotem je tedy využití paralelogramů k fixaci orientace výkonné plošiny. Kombinace tří paralelogramů tedy zajišťuje čistě posuvný pohyb koncové plošiny - tři stupně volnosti. Ramena paralelogramů jsou napojena na rotačně uloženou páku pomocí kloubových vazeb. Páky, které zajišťují vlastní pohyb plošiny se ovládají buď rotačními servo motory (střídavé nebo stejnosměrné), nebo pomocí lineárních aktuátorů (méně častý výskyt v aplikacích). Čtvrtá část, která spojuje základnu s efektorovou plošinou je táhlo, které má za úkol zajistit rotaci efektoru. Schéma Delta manipulátoru se všemi popsány částmi je na obr. 2.6. [9]



Obrázek 2.6: Schéma Delta manipulátoru - převzato z [1]

³Paralelogram je zařízení které při pohybu udržuje efektorovou plošinu neustále v rovnoběžné poloze se základnou.

Využití Pick and Place Delta robotů

Automatizované Delta roboty typu Pick and Place výrazně urychlují proces uchopování předmětů a jejich přemístování do nové lokace (např. umístění do dalšího výrobního procesu ve výrobní lince). S tím souvisí zrychlení celkového výrobního procesu, neboť při použití Delta robotů je dosahováno zrychlení až 50G v experimentálních a 12G v průmyslových aplikacích. [6],[9]

S velmi širokou variabilitou zakončení a zpracování úchopu těchto robotů lze upravit Pick and Place roboty pro speciální požadavky. Tím se rozumí například variabilita předmětů co se týče velikosti, tvaru, nebo jejich hmotnosti. Podle těchto parametrů se upraví uchopovací zařízení tak, aby se dosahovalo co největší efektivity práce. [6],[9]

Výhodou Pick and Place systémů je také jejich plynulost práce a zejména možnost využití v širokém spektru napříč různými obory průmyslu (od strojírenství až k potravinářství). Využití najdou nejen tam, kde je lidská manipulace příliš pomalá (to bývá nejčastější důvod zavedení těchto robotů) nebo by byla nemožná z důvodu váhy, ale například v mikroelektronice jsou uplatňovány systémy přesně osazující SMD součástky na plošný spoj. [6],[9]

Z ekonomického hlediska poskytují Pick and Place Delta roboti díky zvýšené produkci významné dlouhodobé úspory pro výrobu. Navíc díky dostupnosti Delta robotů jsou stále častěji instalovány do automatizovaného výrobního procesu.

Možnosti Pick and Place Delta robotů

Pick and Place Delta roboti mohou kromě standardního procesu přemístování předmětů díky vysoké přesnosti velmi účinně předměty vyzvedávat a pokládat do pohybujeících se kontejnerů a zásobníků, pokud je z výrobních důvodů potřeba přesného umístění předmětu v rámci většího celku. Využitelný pracovní prostor běžného manipulátoru je válec o průměru 1 metru a výšce 20 centimetrů (krajní dosažitelné polohy nebývají využity, proto se uvádí jako pracovní prostor válec a ne tvar na obr. 2.5). Nejčastěji a nejefektivněji jsou využívány manipulátory pro hmotnostní rozsah předmětů 10 gramů až 1 kilogram. [7],[9]

Další přídavná schopnost Pick and Place robota může být kontrola kvality nebo i přítomnosti předmětu. Toho se dosahuje například umístěním kamer na uchopovacím zařízení a robot tak může provádět vizuální kontrolu namísto dalšího prvku ve výrobním procesu. Řídící jednotka může tyto údaje zpracovat a určit tak postup pro následující články výrobního procesu. [7],[9]

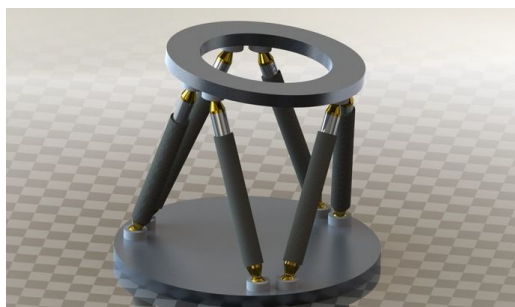
Na stejném principu funguje také třídění produktů, kdy je možné podle zadaných požadavků přesouvat různé předměty na různá místa (například pojízdné pásy) tím stejným Pick and Place robotem bez nutnosti zavedení dalšího stroje do procesu.

Tyto doplňkové možnosti dělají z Pick and Place robota plně automatizovaný stroj, který si dokáže sám najít, správně uchopit a přesně umístit na určené místo nezmetkový výrobek.

2.2 Historie paralelních robotů

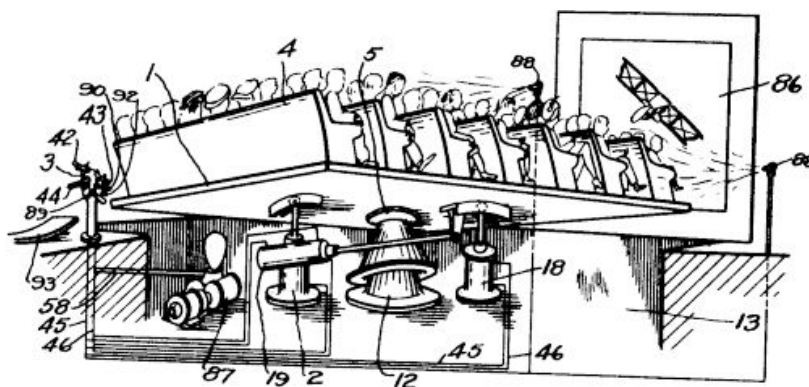
2.2.1 Počátky paralelních struktur

Teoretické práce zabývající se paralelní strukturou mechanismů, zvláště hexapodů⁴, se datují až několik desítek let zpět, kdy se tehdejší vědci zajímali o mnohostěny a tvary jim podobným. Navzdory všeobecnému zájmu o tento typ konstrukce se v této oblasti podařil významnější pokrok pouze dvěma vědcům. Prof. Manfred Husty objevil analytickou metodu pro výpočet 40 řešení přímé kinematiky hexapodu a Dr. Jean-Pierre Merlet byl autor první knihy o paralelních robotech, přičemž do této knihy přispívalo minimum dalších vědců. [1],[3] Jedna z prvních aplikací pochází z dílny Gougha, přičemž tento typ hexapodu bývá označován jako Gough-Stewart platform⁵ (obr. 2.7).



Obrázek 2.7: Stewart platform - převzato z www.grabcad.com

Ještě dříve však o patent na typ pohyblivé plošiny ovládané také písty, avšak se sférickou vazbou uprostřed (obr. 2.8), požádal James E. Gwinnett v roce 1928. Ačkoli neexistují žádné důkazy, že tento paralelní sférický robot byl kdy zhotoven, znamenal tento systém s více stupni volnosti převratný krok vpřed. [1]

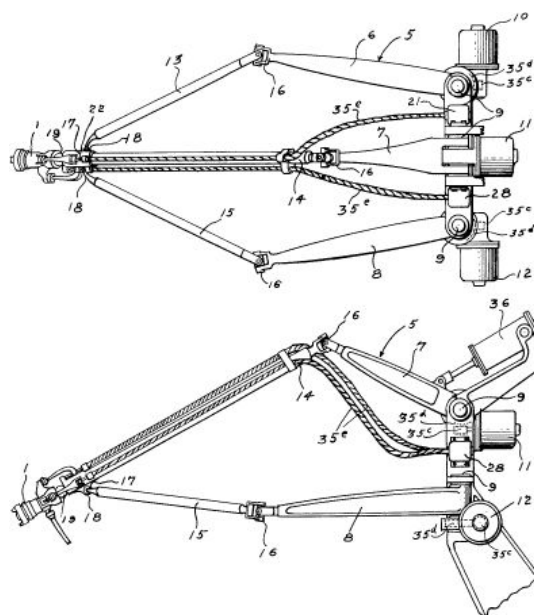


Obrázek 2.8: Paralelní sférický robot, patentován 1931 v USA - převzato z [1]

O deset let později vývoj pokročil a Willard L.V. Pollard zhotovil paralelního robota pro nástřiky barvy (obr. 2.9). Tento robot je, také díky svému vzhledu, považován za první typický průmyslový paralelní robot, jak je známe dnes. Tento vynález disponoval 5 stupni volnosti, měl 3 ramena složená ze dvou částí, přičemž na základně byly umístěny 3 motory, které natáčely první články ramen. Motory tedy ovládaly pozici nástrojové hlavy a otočnými táhly byla ovládána její rotace. Ani tento robot však i přes příspěvek Willard L.G. Pollard juniora, který se zabýval elektrickým řízením, nebyl nikdy uveden do výroby. [1],[3]

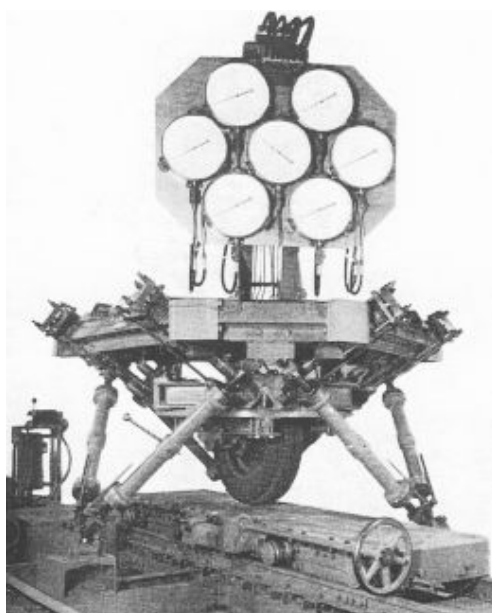
⁴Robot se 6 nezávislými táhly, ovládajícími jeho pohyb

⁵Plošina se 6 stupni volnosti, jejíž náklon je řízen pomocí 6 pístů



Obrázek 2.9: První paralelní průmyslový robot, patentován 1942 v USA - převzato z [1]

O několik let později, v roce 1947, byl sestaven další robot. Tento se stal nejznámějším ve své době a jeho příspěvek průmyslu byl natolik velký, že bylo vyrobeno mnoho kopií sloužící i k jiným účelům než k jakým byl původně postaven. Jedná se o oktahedrání⁶ hexapod s proměnlivou délkou ramen z dílny dr. Eric Gougha (obr. 2.10). Gough byl automobilový inženýr ve společnosti Dunlop Rubber Co. v Anglickém Birminghamu. Univerzální zařízení pro testování pneumatik podléhajícím kombinovanému namáhání bylo poprvé sestrojeno s plnou funkcí v roce 1954. O deset let později byl stroj vylepšen o digitální řízení motorů a elektronický záznam deformací a sil z namáhaných částí. [1]

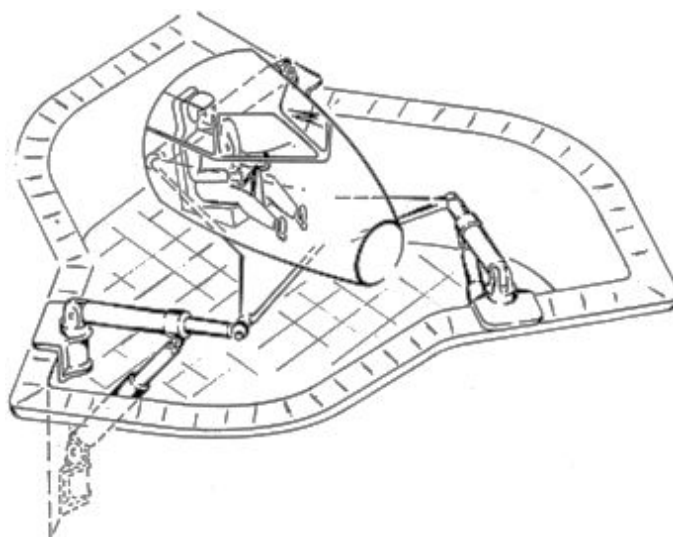


Obrázek 2.10: Hexapod na testování pneumatik - převzato z [1]

⁶Základna byl osmistěn

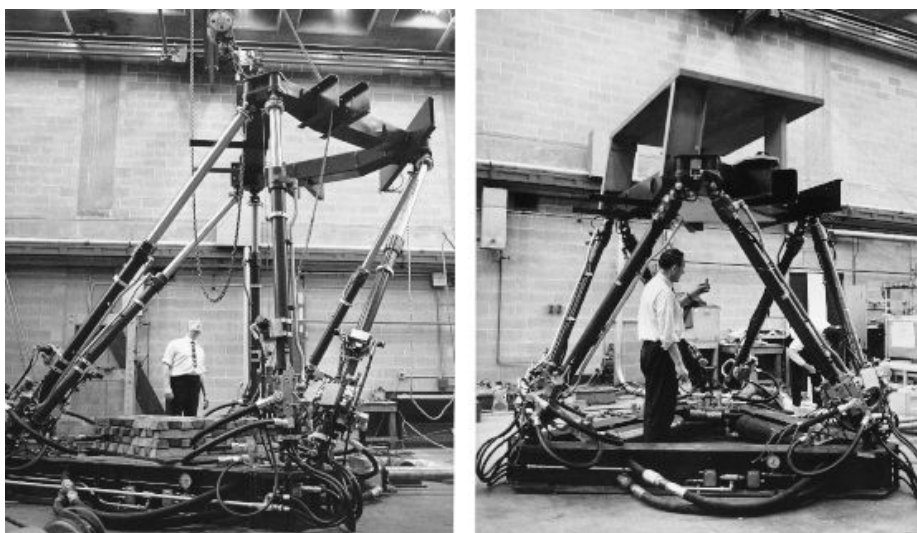
2.2.2 Paralelní simulátory

Pro roboty s paralelní kinematikou byl významný také rok 1965, kdy Stewart nahlédl na možnosti paralelní struktury z jiného pohledu, než čistě průmyslového využití. Ve svých publikacích popisuje kabinu letadla na plošině se 6 stupni volnosti, dohromady sloužící jako letecký simulátor pro výcvik pilotů (obr. 2.11). Stewartova plošina (odlišuje se od dříve zmiňované Gough-Stewartovy plošiny) však zůstala pouze na papíře. I přesto měl tento nový úhel pohledu a další ukázka uplatnění velký přínos co se týče vývoje paralelních robotů. [1],[3]



Obrázek 2.11: Stewartův návrh leteckého simulátoru - převzato z [1]

V roce 1971 americký inženýr Klaus Cappel čelil problému vylepšení vibračního systému na bázi hexapodu od jeho zaměstnavatele. Tento úkol sice nesplnil, ale výsledek jeho práce vyústil v první reálně vyrobený letecký simulátor na bázi hexapodu (obr. 2.12) o který se ihned začala zajímat společnost Sikorsky Aircraft Division of United Technologies. [1]



Obrázek 2.12: Prototyp leteckého simulátoru od Klaus Cappela - převzato z [1]

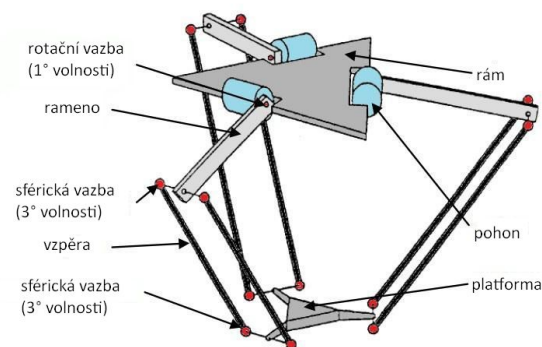
Simulátory poté pronikly do mnoha dalších odvětví mimo letecký průmysl a to zejména do lodního, automobilového, zábavního nebo kosmického průmyslu. Jejich využití sloužilo pro výcvik, testování, manipulaci a další aplikace. [1]

3. Plánování trajektorie

V této části se budeme zabývat plánováním trajektorie a s tím spojené vyřešení kinematických úloh pro model Delta robota, který byl vytvořen jako bakalářská práce Tomášem Havlanem [12]. Jelikož půjde o plánování trajektorie v reálném čase, budeme usilovat o získání řešení analytického, neboť numerické metody se k tomuto účelu řízení v reálném čase nehodí. Pro demonstraci poté naplánujeme trajektorii k úloze, přičemž k tomu využijeme popsání řešení kinematických úloh.

3.1 Stupně volnosti

Před řešením jakékoli kinematiky musíme stanovit počet stupňů volnosti delta robota. Využijeme znalosti typu a počtu kinematických vazeb a počtu těles tvořící tohoto Delta robota (obr. 3.1).



Obrázek 3.1: Popis Delta robota - převzato z [11]

Stupně volnosti následně spočítáme podle vzorce (3.1) [10]:

$$i = 6(n - 1) - \sum_{j=1}^5 j d_j \tag{3.1}$$

i – počet stupňů volnosti soustavy

n – počet členů soustavy (včetně rámu)

d_j – počet kinematických dvojic j -té třídy

$$i = 6(11 - 1) - 5 \cdot 3_{\text{rotační}} - 3 \cdot 12_{\text{sférická}} = 9^\circ$$

Jak lze vidět, napoprvé nám rovnice dala chybný výsledek. Musíme tedy ještě vyloučit parazitní pohyby, které jsou zde zastoupeny rotací vzpěr kolem svých os. Tento pohyb se nekoná a i kdyby se konal, nebyl by pro sledovaný pohyb mechanismu přínosný.

Po úpravě tedy:

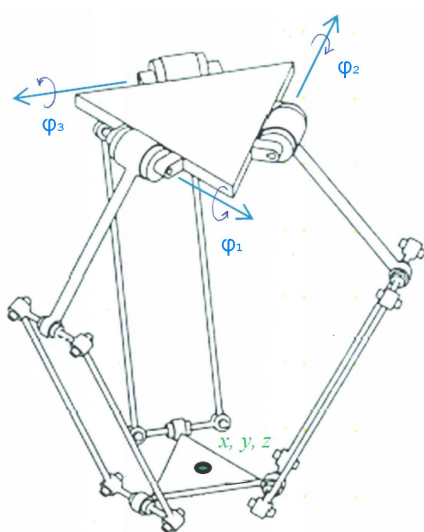
$$i = 9^\circ - 6 \cdot 1^\circ_{(\text{rotace})} = 3^\circ$$

3.2 Inverzní kinematika

3.2.1 Příprava a rozbor principu řešení

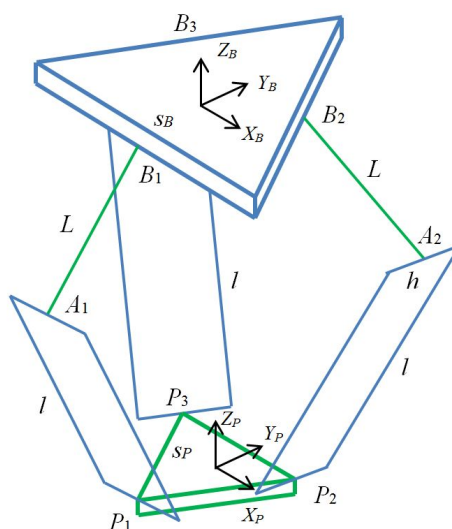
Existuje více způsobů jak řešit inverzní kinematiku. Řešení může být buď pomocí geometrické/trigonometrické metody, kdy se poloha určí využitím průsečíku kružnice a koule o známých poloměrech, nebo se využije numerických metod. Pro využití údajů o poloze a jejich získávání a počítání s nimi v reálném čase uijeme analytické metody při využití trigonometrických závislostí. [12]

Nejdříve si mechanismus popíšeme a zavedeme si souřadnicové systémy, aby bylo možné po dosazení skutečných rozměrů získat číselná řešení. Úloha inverzní kinematiky bude spočívat v získání úhlů pohonů $[\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$ v závislosti na zadané poloze efektoru pomocí kartézských souřadnic $[x, y, z]$, viz obr. 3.2. Následující způsob řešení kinematiky Delta robota byl převzat z [12].



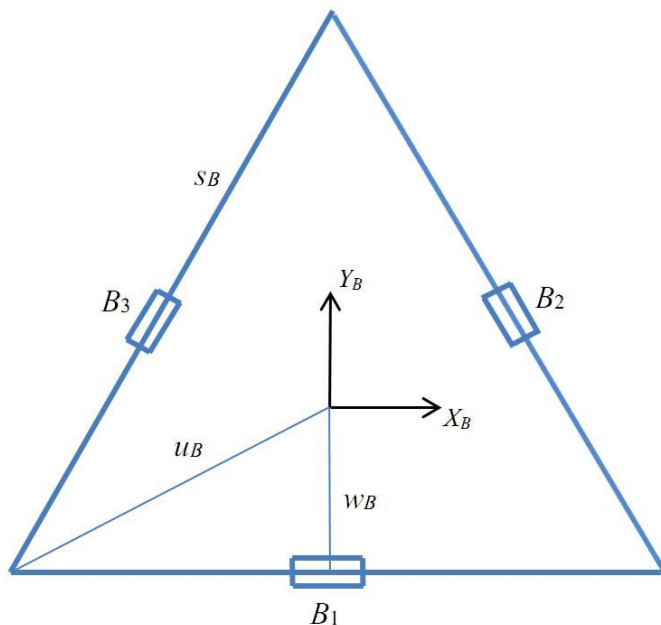
Obrázek 3.2: Úhly pohonů a souřadnice efektoru - převzato z [12]

Pracovní označení všech důležitých bodů robota, přičemž index B náleží základně (z anglického "base") a index P náleží efektorové plošině (z anglického "platform") (obr. 3.3).



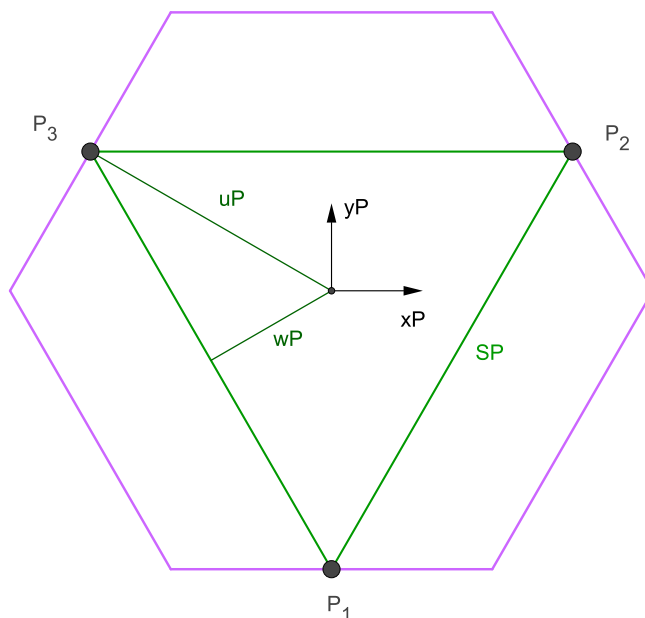
Obrázek 3.3: Důležité body robota - převzato z [12]

Volba souřadnicového systému základny spolu s důležitými rozměry pro definování polohy bodů vzhledem ke geometrickým rozměrům (obr. 3.4). Tento souřadnicový systém bude sloužit také pro vyjádření polohy efektoru (rozhodující je zde absolutní poloha efektoru, tedy poloha vzhledem k nepohyblivé základně).



Obrázek 3.4: Základna robota - převzato z [12]

Volba souřadnicového systému efektorové plošiny a její důležité body (obr. 3.5). Vzhled dle reálné plošiny na modelu:



Obrázek 3.5: Efektorová plošina

Body B_i , které reprezentují středy rotačních vazeb servomotorů mají konstantní souřadnice v souřadnicovém systému základny B a středy rotačních vazeb napojení vzpěr na efektorovou plošinu, body P_i mají konstantní souřadnice vzhledem k souřadnicovému systému plošiny P. Body náležící určitému souřadnicovému systému označujeme z důvodu přehlednosti příslušným levým horním indexem.

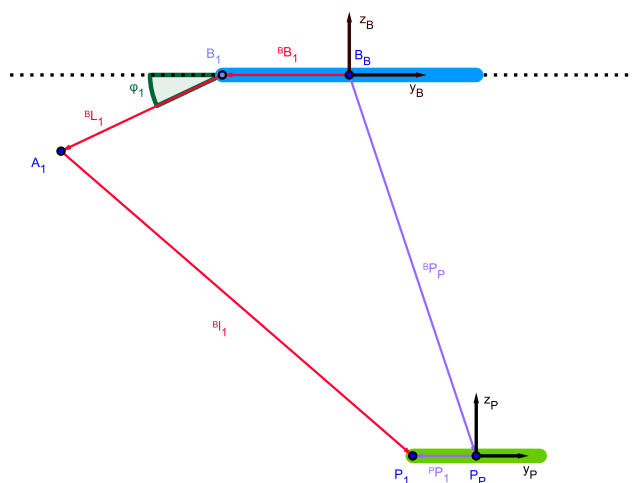
Skutečné rozměry kót označených v nákresech výše byly odměřeny či převzaty z [13]:

kóta	popis	geometrická závislost	velikost [m]
S_B	délka strany trojúhelníka (základna)	-	0.2771
w_B	délka od středu souřadnicového systému B ke straně trojúhelníkové základny	$\frac{\sqrt{3}}{6} S_B$	0.08
u_B	délka od středu souřadnicového systému B k vrcholu trojúhelníkové základny	$\frac{\sqrt{3}}{3} S_B$	0.16
S_P	délka strany trojúhelníka (základna)	-	0.06
w_P	délka od středu souřadnicového systému P ke straně trojúhelníkové plošiny	$\frac{\sqrt{3}}{6} S_P$	0.0173
u_P	délka od středu souřadnicového systému P k vrcholu trojúhelníkové plošiny	$\frac{\sqrt{3}}{3} S_P$	0.0346
L	délka horního táhla	-	0.1341
l	délka spodní vzpěry	-	0.2710
h	vzdálenost mezi vzpěrami paralelogramu	-	0.04

Souřadnice důležitých bodů základny a plošiny:

$$\begin{aligned}
 {}^B B_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B \\ 0 \end{bmatrix} & {}^B B_2 &= \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} w_B \\ \frac{1}{2} w_B \\ 0 \end{bmatrix} & {}^B B_3 &= \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B \\ 0 \end{bmatrix} \\
 {}^P P_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ -u_P \\ 0 \end{bmatrix} & {}^P P_2 &= \begin{bmatrix} \frac{SP}{2} \\ w_P \\ 0 \end{bmatrix} & {}^P P_3 &= \begin{bmatrix} -\frac{SP}{2} \\ w_P \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

K samotnému řešení inverzní kinematiky nám pomohou tři rovnice vektorových smyček, jedna pro každé rameno pohonu. Schéma vektorové smyčky ve 2D pohledu pro mechanismus v obecné poloze na obr. 3.6.



Obrázek 3.6: Vektorová smyčka

Rotace zde nemusí být řešena, jelikož souřadnicové systémy na základně a na plošině nejsou vůči sobě natočené a z principu paralelogramu nikdy nebudou. Výsledné vektorové rovnice tedy budou:

$$\overrightarrow{B B_i} + \overrightarrow{B L_i} + \overrightarrow{B l_i} = \overrightarrow{B P_p} + \overrightarrow{P P_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

Vydeme-li z podstaty konstrukce, vektor $\overrightarrow{B l_i}$ musí mít velikost (délku) odpovídající délkám vzpěr a tedy můžeme vyjádřit jeho velikost jako:

$$l_i = \|\overrightarrow{B l_i}\| = \overrightarrow{B P_p} + \overrightarrow{P P_i} - \overrightarrow{B B_i} - \overrightarrow{B L_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.3)$$

Po umocnění na druhou, abychom se zbavili odmocnin při dalším vyjadřování:

$$l_i^2 = \|\overrightarrow{B l_i}\|^2 = l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

Kartézské souřadnice polohy souřadnicového systému plošiny P vzhledem k souřadnicovému systému základny B jsou tedy zadávané proměnné $[x, y, z]$:

$${}^B P_P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Hodnoty vektorů $\overrightarrow{B B_i}$ a $\overrightarrow{P P_i}$ byly definovány výše (byly definovány body, jejich souřadnice však byly stanoveny vzhledem k příslušnému souřadnicovému systému a složky vektoru jsou tedy shodné se složkami bodu).

Obecně získáme vektor $\overrightarrow{A B}$ když $A = [0, 0, 0]^T$ (střed souřadnicového systému) a $B = [a, b, c]^T$ jako:

$$\begin{aligned} (AB)_x &= B_x - A_x = a - 0 = a = B_x \\ (AB)_y &= B_y - A_y = b - 0 = b = B_y \\ (AB)_z &= B_z - A_z = c - 0 = c = B_z \end{aligned} \quad (3.5)$$

Vektory $\overrightarrow{B L_i}$ jsou závislé na natočení pohonů $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]^T$:

$$\overrightarrow{B L_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ -L \cos \varphi_1 \\ -L \sin \varphi_1 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{B L_2} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \varphi_2 \\ \frac{1}{2} L \cos \varphi_2 \\ -L \sin \varphi_2 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{B L_3} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \varphi_3 \\ \frac{1}{2} L \cos \varphi_3 \\ -L \sin \varphi_3 \end{pmatrix}$$

Nahrazením a dosazením všech známých hodnot do soustavy rovnic vektorových smyček dostaneme tyto výrazy pro vektory $\overrightarrow{B l_i}$:

$$\overrightarrow{B l_1} = \begin{pmatrix} x \\ y + L \cos \varphi_1 + a \\ z + L \sin \varphi_1 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{B l_2} = \begin{pmatrix} x - \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \varphi_2 + b \\ y - \frac{1}{2} L \cos \varphi_2 + c \\ z + L \sin \varphi_2 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{B l_3} = \begin{pmatrix} x + \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \varphi_3 - b \\ y - \frac{1}{2} L \cos \varphi_3 + c \\ z + L \sin \varphi_3 \end{pmatrix}$$

kde:

$$\begin{aligned} a &= w_B - u_P \\ b &= \frac{S_P}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}w_B \\ c &= w_P - \frac{1}{2}w_B \end{aligned}$$

Soustava 3 rovnic (3.6) nyní obsahuje řešení inverzního kinematického problému Delta robota:

$$\begin{aligned} 2L(y+a)\cos\varphi_1 + 2zL\sin\varphi_1 + x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 &= 0 \\ -L(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\cos\varphi_2 + 2zL\sin\varphi_2 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2xb + 2yc - l^2 &= 0 \\ L(\sqrt{3}(x-b) - y - c)\cos\varphi_3 + 2zL\sin\varphi_3 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - 2xb + 2yc - l^2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

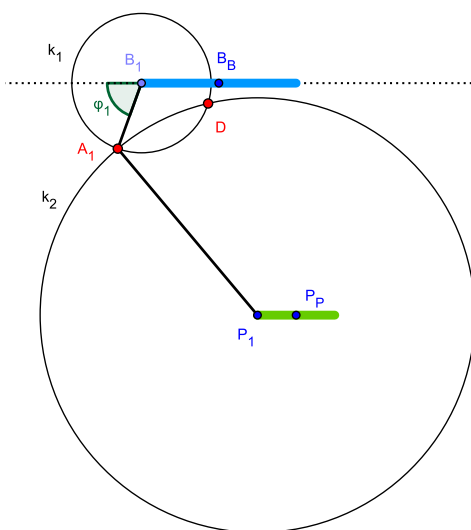
Absolutní pozice kloubů mezi vzpěrami a rameny připojenými k pohonům v souřadnicovém systému B nalezneme

podle rovnice ${}^B A_i = \overrightarrow{B A_i} = \overrightarrow{B B_i} + \overrightarrow{B L_i}$, $i = 1, 2, 3$ (opět využíváme vztahení bodu i vektoru k souřadnému systému B):

$${}^B A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B - L\cos\varphi_1 \\ -L\sin\varphi_1 \end{bmatrix} \quad {}^B A_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L\cos\varphi_2) \\ \frac{1}{2}(w_B + L\cos\varphi_2) \\ -L\sin\varphi_2 \end{bmatrix} \quad {}^B A_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L\cos\varphi_3) \\ \frac{1}{2}(w_B + L\cos\varphi_3) \\ -L\sin\varphi_3 \end{bmatrix}$$

3.2.2 Řešení inverzní kinematiky

Po přípravě uvedené v předchozí kapitole nyní můžeme po užití matematických zákonů analyticky vyjádřit řešení úhlů pohonu. Inverzní kinematická úloha může být vyřešena nezávisle pro každou ze tří soustav spojujících základnu s plošinou (ramena napojené na servomotory + vzpěry). Geometricky vyjádřeno je řešením každé této soustavy průsečík kružnice (k_1) o poloměru L a středem v příslušném středu rotační vazby ${}^B B_i$ a koule (k_2) o poloměru l a středu v napojení vzpěr na efektorovou plošinu ${}^P P_i$. 2D pohled na průsečíky pro jednu soustavu ramen je na obr. 3.7.



Obrázek 3.7: Průsečíky pro jednu soustavu ramen

Analytické řešení lze nalézt pomocí trigonometrie, k čemuž využijeme soustavu tří rovnic (3.6). Tři nezávislé rovnice inverzní kinematické úlohy s vysubstituovanými členy E, F a G mají tvar:

$$E_i \cos \varphi_i + F_i \sin \varphi_i + G_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

kde použité substituce mají tyto tvary:

$$\begin{aligned} E_1 &= 2L(y + a) & E_2 &= -L(\sqrt{3}(x + b) + y + c) \\ F_1 &= 2zL & F_2 &= 2zL \\ G_1 &= x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 & G_2 &= x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(xb + yc) - l^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_3 &= L(\sqrt{3}(x - b) - y - c) \\ F_3 &= 2zL \\ G_3 &= x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(-xb + yc) - l^2 \end{aligned}$$

Rovnice (3.7) se často vyskytuje v kinematikách mechanismů a robotů a je vyřešitelná pomocí substituce tangentou s polovičním úhlem. Zavedeme si tedy proměnnou t_i a pomocí ní vyjádříme $\cos \varphi_i$ a $\sin \varphi_i$:

$$t_i = \tan \frac{\varphi_i}{2} \quad \cos \varphi_i = \frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2} \quad \sin \varphi_i = \frac{2t_i}{1 + t_i^2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

Substituované $\cos \varphi_i$ a $\sin \varphi_i$ nyní dosadíme zpět do (3.7):

$$E_i \left(\frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2} \right) + F_i \left(\frac{2t_i}{1 + t_i^2} \right) + G_i = 0 \quad i = 1, 2, 3$$

Upravíme a zbavíme se zlomků:

$$E_i(1 - t_i^2) + F_i(2t_i) + G_i(1 + t_i^2) = 0 \quad i = 1, 2, 3$$

Roznásobení a příprava rovnice do tvaru $ax^2 + bx + c = 0$:

$$(G_i - E_i)t_i^2 + (2F_i)t_i + (G_i + E_i) = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.9)$$

Z takto připravené kvadratické rovnice (3.9) nyní získáme kořeny pomocí vzorce (3.10):

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.10)$$

$$t_{i1,2} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.11)$$

Hodnotu úhlu φ_i získáme z funkce inverzní k funkci tangens. Vycházíme přitom ze substituce zavedené na začátku (3.8).

$$\varphi_i = 2 \tan^{-1}(t_i) \quad i = 1, 2, 3$$

Z rovnice (3.11) získáme dva kořeny a tedy dostaneme i dvě řešení úhlů φ_i , přičemž oba výsledky jsou správné, jak je vidět na obr. 3.7 (průsečíky A_1 a D). Obecně se však volí řešení všech úhlů tak, aby bylo zalomení kloubu spojujícího rameno a vzpěru směrem ven od osy mechanismu (osa z základny).

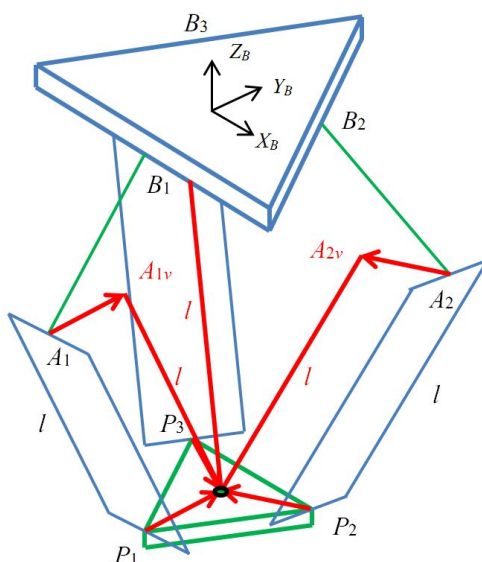
3.3 Přímá kinematika

3.3.1 Příprava a rozbor principu řešení

Přímá, nebo-li dopředná kinematická úloha spočívá ve výpočtu kartézských souřadnic $[x, y, z]$ efektoru (středu efektorové plošiny) ze zadaných úhlů pohonů $[\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$. Přímá kinematická úloha pro paralelní mechanizmy je obecně velmi komplikovaná a vede na soustavu nelineárních rovnic, jejichž řešení je mnoho, ale pouze některé jsou konstrukčně uskutečnitelné. Díky absenci rotace a naklápění plošiny, tedy případ čistě translačního pohybu, je však možné analytické řešení získat relativně snadno. Následující analytické řešení dopředné kinematiky paralelního Delta robota je převzato z [12]. Máme-li úhly pohonů $[\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$, můžeme spočítat vektory pro body spojení ramen a vzpěr $\vec{B}A_i = \vec{B}B_i + \vec{B}L_i$, $i = 1, 2, 3$. Podle obr. 3.8 si definujeme středy 3 virtuálních kulových ploch jako

$${}^B A_{iv} = {}^B A_i - {}^P P_i, \quad i = 1, 2, 3:$$

$${}^B A_{1v} = \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B - L\cos\varphi_1 + u_P \\ -L\sin\varphi_1 \end{bmatrix} \quad {}^B A_{2v} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L\cos\varphi_2) - \frac{S_P}{2} \\ \frac{1}{2}(w_B + L\cos\varphi_2) - w_P \\ -L\sin\varphi_2 \end{bmatrix} \quad {}^B A_{3v} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L\cos\varphi_3) + \frac{S_P}{2} \\ \frac{1}{2}(w_B + L\cos\varphi_3) - w_P \\ -L\sin\varphi_3 \end{bmatrix}$$



Obrázek 3.8: Středy virtuálních koulí - převzato z [12]

Řešení přímé kinematické úlohy Delta robota je pak bod ${}^B P_P$, průsečík těchto tří kulových ploch, jejichž zápis má formát (střed, poloměr):

$$({}^B A_{1v}, l) \quad ({}^B A_{2v}, l) \quad ({}^B A_{3v}, l)$$

3.3.2 Řešení přímé kinematiky

Pro matematické vyřešení úlohy rozebrané v předchozí kapitole jsem využil řešení "Appendix B" z literatury [12], kde je podrobně rozebráno a popsáno ještě další možné řešení a jsou tam také podrobně uvedeny mezikroky a hlubší matematické souvislosti.

Středů 3 kulových ploch si rozepíšeme do jednotlivých souřadnic jako $[x_i \ y_i \ z_i]$, $i = 1, 2, 3$. Poté připravíme soustavu rovnic pro vyřešení hledaných souřadnic x a y (matematický a geometrický základ pro vznik této soustavy k nalezení v [12]):

$$\begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c \\ f \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

kde:

$$\begin{aligned} a &= 2(x_3 - x_1) \\ b &= 2(y_3 - y_1) \\ c &= r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_3^2 + y_3^2 \\ d &= 2(x_3 - x_2) \\ e &= 2(y_3 - y_2) \\ f &= r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3^2 + y_3^2 \end{aligned}$$

Po vyjádření z (3.12) je řešení pro x a y následující:

$$x = \frac{ce - bf}{ae - bd} \quad (3.13)$$

$$y = \frac{af - cd}{ae - bd} \quad (3.14)$$

Zbývající souřadnici z získáme z kvadratické rovnice:

$$Az^2 + Bz + C = 0 \quad (3.15)$$

kde:

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= -2z_n \\ C &= z_n^2 - r_1^2 + (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \end{aligned}$$

Dvě možná řešení souřadnice z poté získáme z (3.15) po dosazení do (3.10):

$$z_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.16)$$

Po zjištění x a y souřadnic dostaneme z kvadratické rovnice dva kořeny - dvě možné řešení pro osu z . Z principu konstrukce Delta robotu vždy volíme zápornou souřadnici z , aby se řešení nacházelo pod základnou a bylo tedy prakticky dosažitelné.

Tento algoritmus selže pouze ve 2 případech [12]:

1. Pokud determinant matice koeficientů a, b, d, e bude nula, tedy:

$$ae - bd = 2(x_3 - x_1)2(y_3 - y_2) - 2(y_3 - y_1)2(x_3 - x_2) = 0 \quad (3.17)$$

Po zjednodušení:

$$(x_3 - x_1)(y_3 - y_2) = (y_3 - y_1)(x_3 - x_2) \quad (3.18)$$

Tento problém eliminujeme vhodným umístěním základny robota v XY rovině, pro symetrický Delta robot je tato skutečnost eliminována automaticky.

2. Algoritmus selže také v případě, pokud by diskriminant pro výpočet souřadnice z byl záporný a tedy souřadnice z by nebylo reálné číslo. Po dosazení za $B^2 - 4AC < 0$:

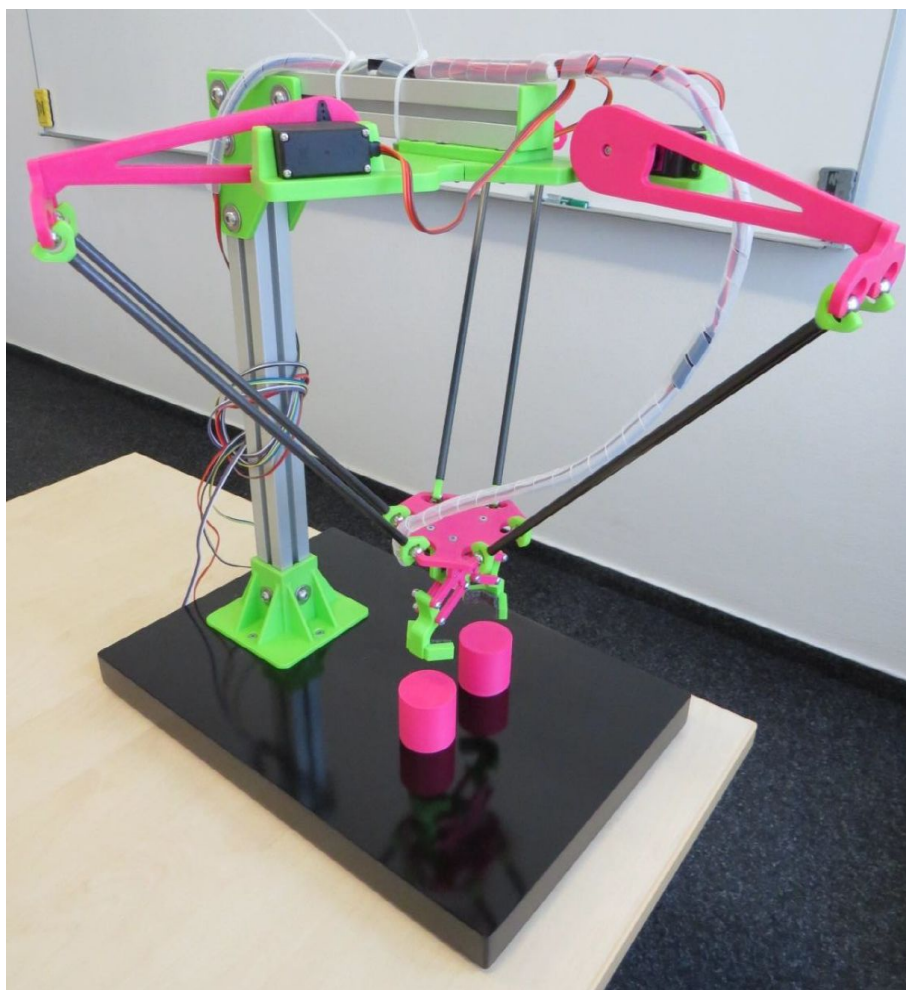
$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 > r_1^2 \quad (3.19)$$

Tento problém však nenastane, dosazujeme-li pouze hodnoty vhodné pro danou konstrukci Delta robotu.

Oba případy selhání jsou tedy při předpokladu symetrické konstrukce Delta robotu a dosazování vhodných hodnot eliminovány a nic nebrání využití této metody pro řešení přímé kinematické úlohy. [12]

4. Experiment

Pro demonstraci výše uvedených vztahů a případnou ukázkou pro studenty, jelikož má tento model sloužit výukovým účelům jsem navrhl úkol, který tento robot bude po naprogramování vykonávat. Jako programovací prostředí jsem zvolil Matlab. Model robota (obr. 4.1) je dílem Tomáše Havlana, přičemž popis, parametry a vlastnosti robota jsou k dispozici z [13].

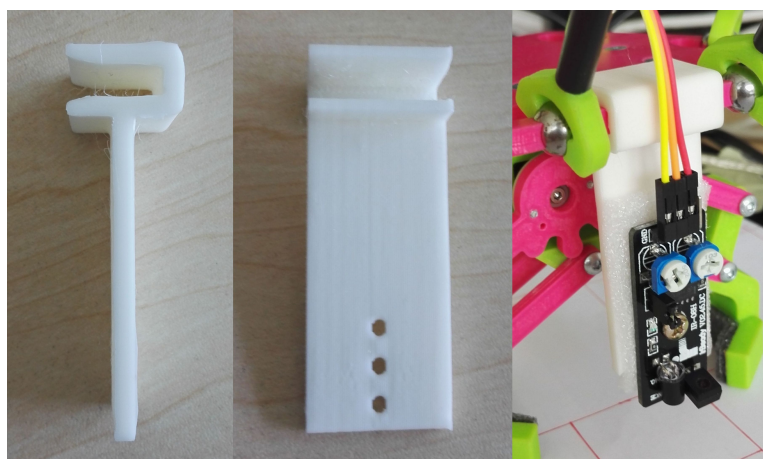


Obrázek 4.1: Model robota - převzato z [13]

4.1 Použité vybavení

Při experimentu bylo využito těchto programů a uvedeného příslušenství:

- Programovací prostředí Matlab 2016b
- Matematický software pro geometrii a algebru Geogebra
- CAD Studio Autodesk Inventor 2018
- Model robota (obr. 4.1), podrobnosti viz [13]
- Válečky o průměru a výšce 4 cm (obr. 4.1)
- Elektronická platforma Arduino, konkrétně deska Arduino Mega 2560
- Infračervený senzor pro detekci překážek IR-08H (obr. 4.5)
- Propojovací kabeláž
- Úchyt senzoru k platformě vytvořený pomocí 3D tisku (obr. 4.2)

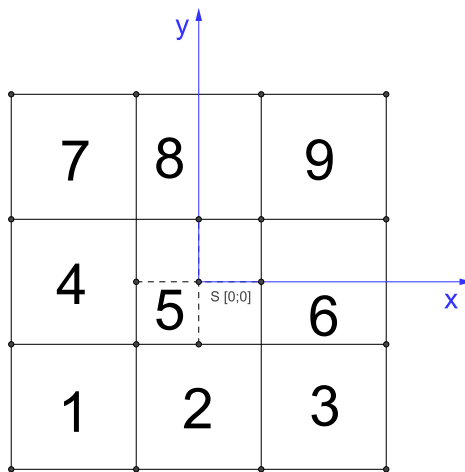


Obrázek 4.2: Úchyt senzoru a jeho umístění na platformu

4.2 Popis úlohy

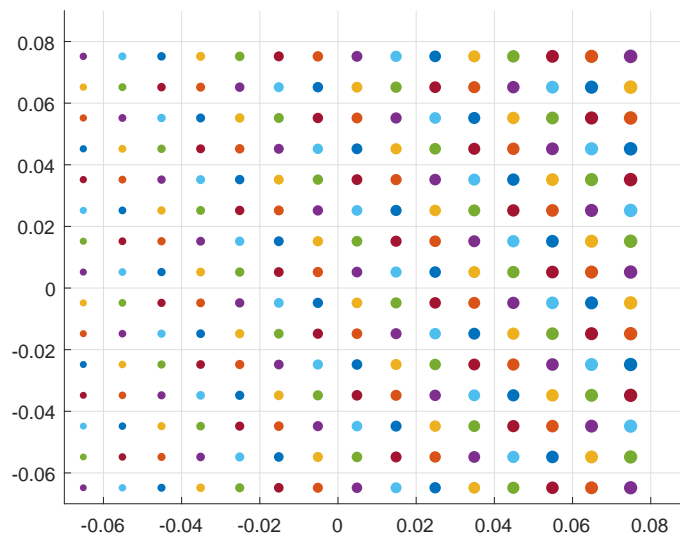
Pro demonstraci plánování trajektorie a využití uvedených vztahů jsem vymyslel úlohu, která se skládá nejprve z naskenování a detekce výskytu válečku na pracovní ploše, která je rozdělena na devět oblastí, ve kterých může být vždy jeden váleček, umístěný v rámci oblasti zcela libovolně. Po naskenování pracovní plochy a výpočtu středu válečku Delta robot postupně začne přemísťovat válečky od středního pole směrem k okraji (prostřední pole tedy musí zůstat volné, je to počáteční odkládací prostor). Po přemístění všech válečků se efektorová plošina vrátí do výchozí polohy.

Pracovní plochu je možné v rámci dosahu robota upravit na žádanou velikost. Pracovní prostor jsem zvolil čtverec o straně 19,5 cm a každé z devíti čtvercových polí má tedy délku strany 6,5 cm (obr. 4.3). Tato pole jsou očíslována od jedné do devíti, přičemž čísla odpovídají pořadí přemísťování v případě výskytu válečků v těchto oblastech (polích). Jako odkládací prostor jsem zvolil oblast číslo 5 a poté 2, kde se v případě výskytu válečků v oblastech 1 i 2 nejdříve uvolní místo.



Obrázek 4.3: Pracovní plocha rozdělená na 9 oblastí

Nejprve tedy proběhne první cyklus, kdy se postupně projdou pozice, které jsou předem vypočítané pomocí funkce využívající vztahy z kapitoly o inverzní kinematice. Tato funkce je na příloženém CD, jejími vstupy jsou kartézské souřadnice a výstupy tvoří úhly pohonů. Pozice záleží na velikosti pole, které zdefinujeme jako pracovní prostor a také na kroku, tedy přesnosti, s jakou chceme toto pole prozkoumávat. Vhodná velikost s ohledem na průměr válečku 4 cm je např. krok 1 cm a méně. Mapa bodů pro krok 1 cm, které robot prochází a zkoumá výskyt válečku, je na obr. 4.4, posloupnost prohledávání znázorněna velikostí bodů.



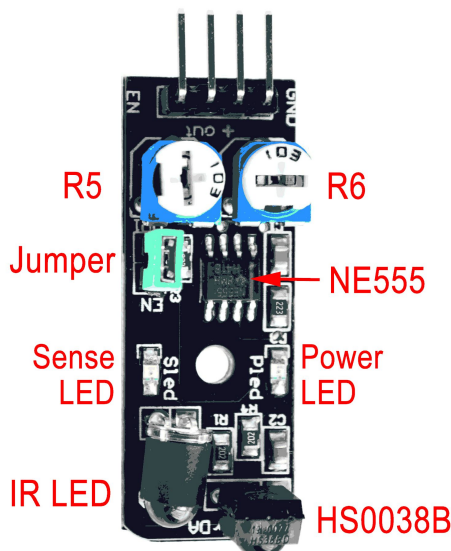
Obrázek 4.4: Mapa prohledávaných bodů

Poté, co je naskenováno pole a výskyt válečků zapsán do matice, vytvoří se matice s x a y hranicemi jednotlivých polí a získané informace o výskytu se pomocí cyklu roztrídí podle jednotlivých oblastí. Aritmetický průměr z nasčítaných hodnot x a y pro každou jednu oblast poté určuje přibližný střed $[x, y]$ válečku v absolutním souřadném systému robota.

Pro takto vypočtený střed válečku se pomocí funkce pro inverzní kinematickou úlohu opět dopočítají úhly pro pohony a může nastat poslední fáze. Tou je najetí nad váleček, snížení platformy na uchopovací výšku, uchopení válečku a jeho přemístění postupně od oblasti číslo 5, přičemž každý další váleček se umísťuje směrem k oblasti číslo 2 s dostatečným rezervním prostorem mezi nimi. To zajišťuje proměnná, která mění souřadnici y každého dalšího válečku v případě úspěšného přemístění.

4.3 Detekce výskytu válečku

Pro detekci válečku jsem zvolil infračervený senzor pro detekci překážek IR-08H (obr. 4.5). Tento senzor je téměř totožný se senzorem KY-032 a budu tedy vycházet z [14], kde je tento senzor popsán.



Obrázek 4.5: Infračervený senzor - převzato z [14]

Senzor má 4 vývody, 2 pro napájení, jeden pro vysílání signálu, jeden pro příjem ovládacího signálu, dva potenciometry pro ovládání frekvence vysílání infračerveného paprsku (R6) a vzdálenost při které se mění vyslaný digitální signál z logické jedničky na nulu a obráceně (R5). Dále je zde spojka pro vývody (Jumper), která určuje, jestli má senzor pracovat pouze po příjmu iniciačního signálu, nebo nepřetržitě. Senzor je řízen integrovaným obvodem NE555, který generuje obdélníkový signál o frekvenci 38kHz, která způsobí záření infračervené LED diody. Odražený paprsek je zachycen detekčním modulem (HS0038B) a zpracovává signál také při frekvenci 38kHz. Senzor má udávanou citlivost dle nastavení potenciometru od 2 do 40 cm, při detekci překážky vyšle do výstupu logickou nulu, není-li detekována překážka je výstupem logická jednička. [14]

Senzor je k plošině připevněn úchytem vytvořeným technologií 3D tisku, model v Inventoru 2018 je na příloženém CD včetně předchozí verze úchytu.

4.4 Programování trajektorie

Pro co nejplynulejší pohyb efektoru jsem použil, pokud měl překonat delší dráhu, rozfázování konečné a počáteční police na několik intervalů. Tyto intervaly byly cyklem se zařazenou pauzou postupně posílány přes řídicí jednotku Arduino Mega 2560 do servomotorů, které ovládaly pohyb ramene a efektor. Jako ukázkou kódu jsem zvolil prohledávací cyklus (všechny potřebné kódy jsou na příloženém CD):

```
1 %Prohledavaci cyklus
2 u=50;
3 n=1;
4 for k=1:pocetbodu %Prohledavaci cyklus
5     if (n*sqrt(pocetbodu))==k-1 %Pokud faze navratu ramene -> rozfazovani pohybu
6         int1=(fi123(k,1)-fi123(k-1,1))/u; %Intervaly
7         int2=(fi123(k,2)-fi123(k-1,2))/u;
8         int3=(fi123(k,3)-fi123(k-1,3))/u;
9         n=n+1;
10        for i=1:u %Cyklus na rozfazovani navratu ramene
11            writePosition(servo_1, (fi123(k-1,1)+i*int1+(u-i)*i/u)/180);
12            writePosition(servo_2, (fi123(k-1,2)+i*int2+(u-i)*i/u)/180);
13            writePosition(servo_3, (fi123(k-1,3)+i*int3+(u-i)*i/u)/180);
14            pause(0.005);
15        end
16    end
17    %Zapis uhlu pro servomotory
18    writePosition(servo_1, fi123(k,1)/180);
19    writePosition(servo_2, fi123(k,2)/180);
20    writePosition(servo_3, fi123(k,3)/180);
21    %Kontrola vyskytu valecku
22    if readDigitalPin(ard,'D8')>0
23        VYSKYT(k)=0;
24    else
25        VYSKYT(k)=1;
26    end
27 end
```

Prohledávací cyklus má počet průběhů odpovídající počtu bodů, přičemž hodnoty úhlů pro jednotlivé police načítá z matice 3 x počet bodů, která byla předtím za pomoci funkce pro inverzní kinematiku naplněna. Každý návrat ramene do záporné hranice y je rozfázován pomocí intervalů, zde na 50 kroků (proměnná u). V příkazu, zapisujícím polohu pro servo je navíc funkce $(i * int_i + (u - i) * i) / u$, která zajišťuje mírné nadzvednutí plošiny při návratu ramene, aby nedošlo ke kolizi s válečkou (funkce zvyšuje výšku efektoru postupně až do poloviny cyklu, poté se vliv funkce snižuje až do konečného bodu, kdy je hodnota této funkce rovna nule).

Průběh mezikroků skenování pole probíhá tak, že po každém posunutí ramene (jeden příkaz pro každé servo) se zkontroluje výstup infračerveného senzoru a pokud je výstup logická jednička, zapíše se do matice VYSKYT hodnotu 0, tedy váleček není přítomný, opačně se do matice VYSKYT na příslušný řádek, souhlasný s řádkem v matici poloh, zapíše hodnotu 1. Po průběhu všech bodů se následně vypočítají středy válečků a proběhne jejich sebrání a přemístění.

5. Závěr

V úvodní části jsme byli seznámeni s programovacím prostředím Matlab a řídicí platformou Arduino, zjistili jsme možnosti jejich komunikace a principy programování. V první kapitole byl uveden stručný náhled na tematiku Delta robotů, cíle práce a základní pojmy, které jsou nezbytné pro porozumění problematice.

V druhé kapitole byly nejdříve rozděleny struktury manipulátorů podle jejich kinematického řetězce na sériové a paralelní. Ty byly poté vyhodnoceny z hlediska vhodnosti aplikace na různé účely dle jejich výhod a nevýhod. Také byly vzájemně porovnány. Následoval přehled využití a výhod Pick and Place robotů jakožto nejčastější aplikace Delta robotů. Poslední část této kapitoly obsahuje historický vývoj paralelních struktur od jejich počátků až do současnosti.

Třetí kapitola obsahuje plánování trajektorie a tedy obě kinematické úlohy (přímou a inverzní) a jejich analytické řešení. Pro demonstraci úspěšného oživení modelu paralelního robota byla navrhována úloha detekce a následného přemístování válečků za pomoci řídicí platformy Arduino Mega 2560. Úloha byla úspěšně naprogramována, avšak možnosti tohoto modelu jsou omezené, neboť při manipulaci s efektem v krajních polohách dochází k poměrně velké nepřesnosti a z tohoto důvodu bylo nutné v oblastech 1,2,3 a 7,8,9 použít rozdílné korekce, aby proběhlo úspěšné sebrání válečku.

Pro další vylepšení robota bych navrhol použít silnější servomotory nebo připevnění pomocné pružiny vedoucí od základny k plošině efektoru. Pružina by pomáhala servomotorům zejména při vychýlení do krajních pozic, kde je působící moment díky velkému rameni pro servomotory příliš velký a tedy způsobuje nepřesné polohování. Mechanické vyztužení modelu, zvláště jeho plastových dílů, které drží servomotory, by také podpořilo celkovou tuhost modelu a v důsledku přesnost chodu.

Závěrem může být řečeno, že všechny cíle, uvedené v kapitole 1, byly v této práci splněny.

Seznam literatury

- [1] BONEV, Ilian. The True Origins of Parallel Robots. [online]. 2003 [cit. 2017-26-03]. Dostupné z: <<http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>>.
- [2] ŠVEJDA, Martin. Kinematika robotických architektur. katedra kybernetiky, FAV, ZČU Plzeň, 2011.
- [3] PAVLICA, Jiří. Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů. Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Brno, 2012.
- [4] BRIOT, Sébastien a Ilian A. BONEV. Are parallel robots more accurate than serial robots? [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <<http://etsmtl.ca/Professeurs/ibonev/documents/pdf/CSME001.pdf>>
- [5] PANDILOV, Zoran a Vladimir DUKOVSKI. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots. University "Sv. Kiriil I Metodij", Faculty of Mechanical Engineering-Skopje, Makedonie. [online]. 2014 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <<http://acta.fih.upt.ro/pdf/2014-1/ACTA-2014-1-19.pdf>>
- [6] Pick and Place Robots. RobotWorx [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <<https://www.robots.com/applications/pick-and-place>>
- [7] Pick and Place Robots. Bastian Solutions [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <<https://www.bastiansolutions.com/solutions/technology/industrial-robotics/industrial-robotic-solutions/pick-and-place>>
- [8] ZÁBRŠA, TOMÁŠ. Implementace strojového vidění pro řízení paralelního systému. Brno, 2012. BP. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. ONDŘEJ ANDRŠ , Ph.D.
- [9] BONEV, Ilian. Delta Parallel Robot — the Story of Success. ParalleMIC [online]. 2001 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <<http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>>
- [10] Brát V.: Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů. Praha: Academia, 1981.
- [11] KOZUBÍK, J. Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.
- [12] WILLIAMS, Ph.D., Robert L. The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions. Ohio University, 2016.
- [13] HAVLAN, Tomáš. 3D prototyping mechanismů. Praha, 2016. BP. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
- [14] IR Sensor for Obstacle Avoidance KY-032 (AD-032) [online]. 2016 [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <http://irsensor.wizocode.com/>

Seznam příloh na CD

Na přiloženém CD se nacházejí tyto adresáře:

- Matlab_programy
 - Obsahuje programy pro vytvoření objektu Arduina v Matlabu, funkce pro přímou a inverzní kinematiku a samotný program pro vyhledávání a sbírání válečků s názvem "program_9_oblasti.m"
- Inventor_uchyt_cidla
 - Obsahuje 3D modely úchytu čidla verze 1 a 2 (finální)
- Videoukázky
 - Obsahuje 2 videoukázky experimentu s použitím kroku 0.01 a 0.0075
- PDF verze BP