



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KINEMATIKA KRÁČEJÍCÍCH ROBOTŮ

ON THE KINEMATICS OF LEGGED ROBOTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Hrubý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Burian, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Tomáš Hrubý

ID: 208640

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Kinematika kráčejších robotů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem studenta je navrhnout algoritmus dopředné chůze kráčejšího robota pavoukového typu, včetně kinematických výpočtů.

1. Nastudujte problematiku kráčejších robotů
2. Odvoďte paralelní kinematiku kráčejšího robota pavoukového typu
3. Vytvořte simulátor vizualizující body dotyku kráčejšího robota s podložkou v závislosti na kloubových souřadnicích
4. Navrhněte algoritmus dopředné chůze tohoto robota a implementujte jej do simulátoru

DOPORUČENÁ LITERATURA:

KÁRNÍK, Ladislav, Radek KNOFLÍČEK a Jozef NOVÁK-MARCINČIN, 2000. Mobilní Roboty. Opava: Máfry Slezsko.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tématem kinematiky kráčejících robotů. Věnuje se seznámení s problematikou mobilních robotů a koncepty řešení lokomoce a stability robotů s rozdílnými počty končetin. Dále jsou v práci rozebrány matematické principy vedoucí k popisu končetin robotů a k popisu jejich pohybu. Tyto principy jsou poté použity pro konkrétní případ šestinohého kráčejícího robota. Je řešen popis končetin vzhledem k souřadnicím a nastavení servomotorů. Následně je navržen dopředný pohyb robota a výsledek je zobrazen v simulaci.

Klíčová slova

Kráčející robot, kinematika, stabilita, končetina, MATLAB, simulace, servomotor

Abstract

This bachelor thesis deals with the topic of kinematics of walking robots. It is aimed at introducing the problems of mobile robots and the concepts of solving locomotion and stability of robots with different numbers of limbs. Furthermore, the thesis discusses the mathematical principles leading to the description of the limbs of robots and to the description of their motion. These principles are then applied to the specific case of a six-legged walking robot. The description of the limbs with respect to the coordinates and the servomotor setup is resolved. Then the forward motion of the robot is modeled and the result is shown in the simulation.

Keywords

Walking robot, kinematics, stability, limb, MATLAB, simulation, servomotor

HRUBÝ, Tomáš. *Kinematika krácejících robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022. 45 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Tomáš Hrubý
VUT ID studenta:	208640
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/2022
Téma závěrečné práce:	Kinematika krácejících robotů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20.května 2022

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Burianovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
ÚVOD	9
1. MOBILNÍ ROBOTIKA.....	10
1.1 VÝZNAM MOBILNÍ ROBOTIKY	10
1.2 POHYB A DRUHY MOBILNÍCH ROBOTŮ	10
1.3 KOLOVÉ ROBOTY	11
1.4 PÁSOVÉ ROBOTY	11
1.5 KRÁČEJÍCÍ ROBOTY	11
1.6 STABILITA ROBOTA	12
1.7 POČET NOHOU ROBOTA	15
1.7.1 <i>Dvounohé roboty</i>	15
1.7.2 <i>Čtyřnohé roboty</i>	17
1.7.3 <i>Šesti a vícenohé roboty</i>	17
1.7.4 <i>Hybridní roboty</i>	17
1.8 SEKVENCE POHYBU	18
1.8.1 <i>Vzory pohybu šestinohého robota</i>	21
2. MATEMATIKA POPISU POHYBU KONČETINY	23
2.1 POPIS ZÁKLADNÍCH POJMŮ	23
2.2 PŘÍMÁ KINEMATIKA	24
2.3 JACOBIHO MATICE	25
2.4 HOMOGENNÍ TRANSFORMAČNÍ MATICE	26
2.5 DENAVIT-HARTENBERG	27
3. ŠESTINOHÝ ROBOT	29
3.1 POPIS MODELU ROBOTA.....	29
3.2 POPIS NOHY ROBOTA	31
3.2.1 <i>Princip činnosti servomotorů</i>	31
3.3 PŘÍMÁ ÚLOHA KINEMATIKY PRO NOHU	32
3.3.1 <i>Řešení jako planární pantograf</i>	33
3.3.2 <i>Zobrazení v programu Linkage</i>	35
3.4 ALGORITMUS CHŮZE	36
3.5 HOMOGENNÍ TRANSFORMACE	38
3.6 ZOBRAZENÍ	39
4. ZÁVĚR.....	42
LITERATURA.....	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Nosný polygon šestinožého robota během střídavé chůze po třech nohou [3]	13
Obr. 2: Nosný polygon rozdělený do několika menších trojúhelníků [3]	14
Obr. 3: Raibertův skákající monopod [6].....	15
Obr. 4: Robot ATLAS humanoidního typu od společnosti Boston Dynamics [11].....	16
Obr. 5: Hybridní robot ANYmal ETH Zurich [4].....	18
Obr. 6: Sekvence chůze (stabilní fáze jen černá) a plížení (stabilní fáze šedá plus černá) [1].....	19
Obr. 7: Sekvence cvalu čtyřnožého robota [1].....	20
Obr. 8: Sekvence trysku čtyřnožého robota [1]	20
Obr. 9: Sekvence ideální tripodové chůze robota [12].....	21
Obr. 10: Sekvence bipodového pohybu šestinožého robota [12].....	21
Obr. 11: Sekvence vlnového pohybu šestinožého robota [1].....	22
Obr. 12: Typy mechanických kloubů [9].....	24
Obr. 13: Dvoudimenzionální model končetiny [1]	25
Obr. 14: Ukázkový model Denavit-Hartenbergovy úmluvy [5]	27
Obr. 15: Fotka šestinožého robota	29
Obr. 16: Pohled ze shora.....	30
Obr. 17: Rozměry robota pohled ze shora	30
Obr. 18: Detail nohy robota	31
Obr. 19: Zobrazení celé nohy robota [19].....	32
Obr. 20: Noha robota ve 2D souřadnicích	33
Obr. 21: Výsledek přímé úlohy kinematiky pro jednu končetinu, program MATLAB	35
Obr. 22: Ukázka 2D nohy v programu Linkage.....	36
Obr. 23: Sekvence dopředné chůze v 10 fázích [13]	37
Obr. 24: Graf natočení servomotorů pro jednotlivé fáze (nohy 1,4,5).....	37
Obr. 25: Graf natočení servomotorů pro jednotlivé fáze (nohy 2,3,6).....	38
Obr. 26: Blokové schéma řešení v programu MATLAB	39
Obr. 27: Fáze 4 pohled shora	40
Obr. 28: Fáze 4 pohled z boku	40
Obr. 29: Trajektorie pohybu shora.....	40
Obr. 30: Trajektorie pohybu z boku.....	41
Obr. 31: Trajektorie pohybu zepředu.....	41
Obr. 32: Trajektorie pohybu 3D pohled.....	41

ÚVOD

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku kinematiky mobilních robotů a seznamuje se základními pojmy v této oblasti robotiky.

Nejprve jednotlivě nastiňuje existující typy mobilních robotů. Poté se blíže věnuje kráčejícím a kolovým, případně pásovým robotům a popisuje jejich rozdíly, výhody a nevýhody. Naznačuje řešení problematiky kinematiky a lokomoce kráčejících robotů s rozdílným počtem končetin a seznamuje s problematikou stability pohybu u jednotlivých robotů.

Druhá kapitola je poté zaměřena na matematické principy, které jsou spojené s popisem končetiny. Jejím výsledkem je odvození obecných vztahů mezi klouby končetiny robota a následně je možno pomocí nich navrhnout jeho pohyb.

Třetí kapitola se zabývá konkrétním řešením popisu šestinohého robota z hlediska pohybu. Zaměřuje se na přímou úlohu kinematiky a odvozením souřadnic robota v závislosti na nastavení servomotorů. Na konec je navržena kinematika dopředného pohybu a výsledek je aplikován a vizualizován v programu MATLAB.

1. MOBILNÍ ROBOTIKA

Následující kapitola se zabývá přehledem problematiky mobilní robotiky.

Popisuje význam tohoto oboru a shrnuje principy a výhody kráčejících robotů v kontextu ostatních řešení pohybu mobilních pozemních robotů.

Dále se věnuje rozdílům v koncepci řešení pohybu kráčejících robotů z hlediska počtu nohou a popisuje principy pohybu čtyřnohého a šestinohého kráčejícího robota.

1.1 Význam mobilní robotiky

Robotika je multioborová disciplína kombinující mnoho odvětví informatiky, elektrotechniky a strojírenství. Patří k velmi perspektivním technickým oborům a oblast mobilní robotiky je v současnosti jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví. Díky pokrokům ve výpočetní technice, miniaturizaci a rozšiřování nových úspěšných algoritmů na principu strojového učení, se vývoj významně zrychlil a dospívá k řešení komplexních, složitých problémů. Stále častěji je vidět, jak jsou přednosti mobilních robotů implementovány v průmyslu i na poli služeb, kde se roboty díky své rostoucí dostupnosti a rychlému vývoji, uplatňují na větším počtu míst.

Spektrum využití je široké. Zahrnuje transport materiálů, mapování, zkoumání prostředí, těžbu, zemědělské a udržovací práce, úklid, až po záchranu lidských životů nebo práci na vesmírné stanici.

1.2 Pohyb a druhy mobilních robotů

Aby byl robot nebo vozidlo uvedeno do pohybu, musí být aplikovaná síla. Studium pohybu, ve kterém se uvažuje působení sil na model, se nazývá dynamika.

Kinematika se zabývá matematikou pohybu bez uvažování sil, které jsou samotnou příčinou vzniku toho pohybu. Uvažuje tedy geometrické vztahy, které se pojí k soustavám systému, zatímco dynamika bere v úvahu energie a rychlosti vztahující se k těmto pohybům.

Existují následující druhy robotů podle možnosti pohybu:

- **Pozemní roboti** – Pohyb je uzpůsoben přesunu po pevné nosné ploše a působící gravitaci. Nejčastější řešení pohybu jsou kola. Další možnosti pohybu jsou: chůze, šplhání, válení, použití pásu nebo například pohyb klouzáním.
- **Vodní roboti** – Tito roboti působí ve vodě, ať už pouze na povrchu vody nebo přímo pod vodou. Největší množství těchto robotů využívá pro svůj pohyb lodní šroub nebo proud vodní trysky.

- **Vzdušné roboty** – Pro stacionární udržení se ve vzduchu je nutné neustálé působení energie. Existují roboti fungující na principu letadel, vrtulníků a vzducholodí. Dalším příkladem mohou být roboticky řízené padáky.
- **Vesmírné roboty** – Design je přizpůsoben fungováním v mikrogravitaci vesmíru. Příklad použití jsou systémy operující při zásobování vesmírné stanice.

1.3 Kolové roboty

Nejčastěji používané a mnohdy nejjednodušší řešení pohybu robota na pevné zemi je pomocí kol. Právě kolo vyniká oproti ostatním druhům pohybu svou účinností.

Tento způsob pohybu spočívá v otáčení kola kolem své osy, které způsobuje valivý pohyb a určité množství bočního skluzu. V ideálním případě rovné podložky s dobrým třením pak každé otočení jednoho kola o poloměru r znamená překonání vzdálenosti $2\pi r$.

U mnohých terénů však již narážíme u klasických kolových robotů na problémy s překonáváním prostředí, které může být nerovné, může způsobit prokluzování vlivem nedostatku tření. Proměnlivost vlastností terénu způsobují obtížný odhad ujeté vzdálenosti. Těžší terén může zapříčinit to, že kolový robot nebude moci toto prostředí překonat.

1.4 Pásové roboty

Pro náročné prostředí je vhodné volit pásové roboty, které využívají tření pásu a případně přídavné rampy. Tyto roboty mají díky velké stykové ploše také nižší měrný tlak na podložku a díky tomu dosahují zlepšení tahových vlastností.

Pásové roboty jsou tedy lépe přizpůsobeny pro pohyb po strmějším povrchu a překonání menších dutin v trati, ale již nejsou natolik rychlé v ideálním rovném prostředí jako kolové roboty. Kromě toho určování polohy robota je složitější, protože kvůli používání skluzu nelze určit polohu robota pouze z pohybu pásu.

1.5 Kráčejíci roboty

Přestože jsou kolové a pásové roboty velmi sofistikované, je mnoho případů, kdy je vhodnější použití lokomoce kráčejíciho robota.

Údajně až polovina pevného povrchu naší planety není dosažitelná pohybem pomocí kol. Asi hlavní důvod spojený s upřednostněním výběru kráčejíciho robota oproti jiným řešením je, že kolové a pásové roboty potřebují kontakt se zemí víceméně po celé dráze pohybu. Pro přesun v drsných terénech, jako jsou lesy a v blízkosti přírodních nebo člověkem způsobených katastrof nebo při průzkumu planet, není vždy možné zaručit, že kolový robot se nezastaví.

Kráčející roboty jsou obvykle všesměrové stroje. Mají možnost měnit směr postavení těla nezávisle na směru svého pohybu, zatímco kolové roboty potřebují pro změnu směru pohybu provést manévrování. Při kontaktu s překážkou se robot s končetinami snadno pohybuje stranou, aby se vyhnul překážce. Kráčející robot tak nemusí otáčet celé své tělo na rozdíl od kolových a pásových robotů. Výjimkou u kolových robotů jsou tzv. holonomické roboty, ty jsou vybaveny všesměrovými koly a mohou se tedy pohybovat v libovolném směru. Neholonomické stroje (typicky např. auto) se mohou pohybovat pouze v podélném směru na podélnou osu stroje.

Kráčející robot napodobuje svým pohybem přírodu a snaží se připodobnit dokonalému pohybu hmyzu anebo savců.

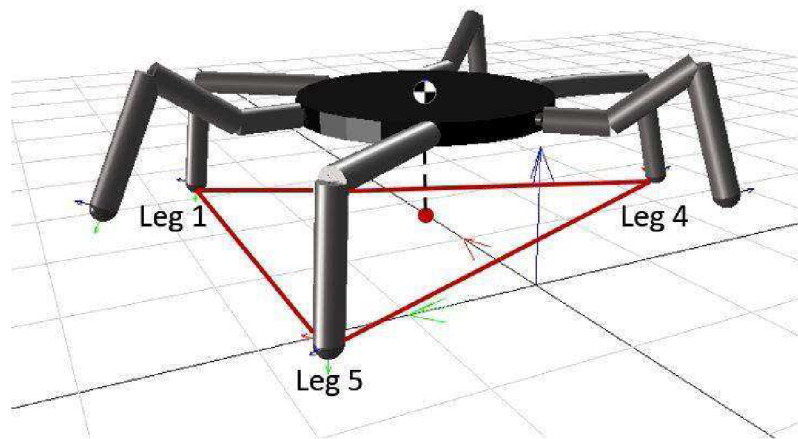
Pro umožnění pohybu je nutné, aby každá končetina měla alespoň dva stupně volnosti: zvednutí a pootočení.

Můžeme definovat dva typy pohybu: statickou a dynamickou chůzi. Statická chůze znamená, že robot je v každém okamžiku ve statické pozici, robot je tedy vždy ve stabilní poloze. Tento typ je možný pro roboty se čtyřmi a více nohami. Pro dynamickou chůzi platí, že v některých fázích pohybu je robot v nestabilní poloze, například se vůbec nedotýká své podložky. Typickým příkladem takového pohybu je skákání nebo běh, při kterém se dostane robot do okamžiku, kdy jsou všechny končetiny ve vzduchu. Výhodou dynamické chůze je především dosažení vyšší rychlosti přesunu robota z místa na místo. Hlavní nevýhodou je však zvýšená náročnost na řízení stroje a vyšší nároky na koncepci designu pohybu, protože robot není schopen zastavit v každém okamžiku dynamického pohybu.

1.6 Stabilita robota

Kolový a pásový robot má z principu svoji stabilitu dosaženou položením na podložku, po které je schopen se pohybovat. Díky tomu, že je těžiště zpravidla umístěno velmi blízko zemi, je stabilita ve většině případů zaručena. To se ale samozřejmě netýká jednokolových a dvoukolových robotů, kde je řešení balancování nezbytnou podmínkou úspěšného návrhu takového robota.

U kráčejících robotů je zajištění stability robota klíčové. Roboti, kteří jsou navrhováni tak, aby udržovali svůj balanc v každém okamžiku, udržují tzv. statickou stabilitu, i když se končetiny zastaví („zamrznou“) na místě. Statická stabilita je zachována, pokud zůstává těžiště robota uvnitř konvexního trupu nosného polygonu, který je definován končetinami, které jsou aktuálně v kontaktu s podložkou viz Obr. 1.

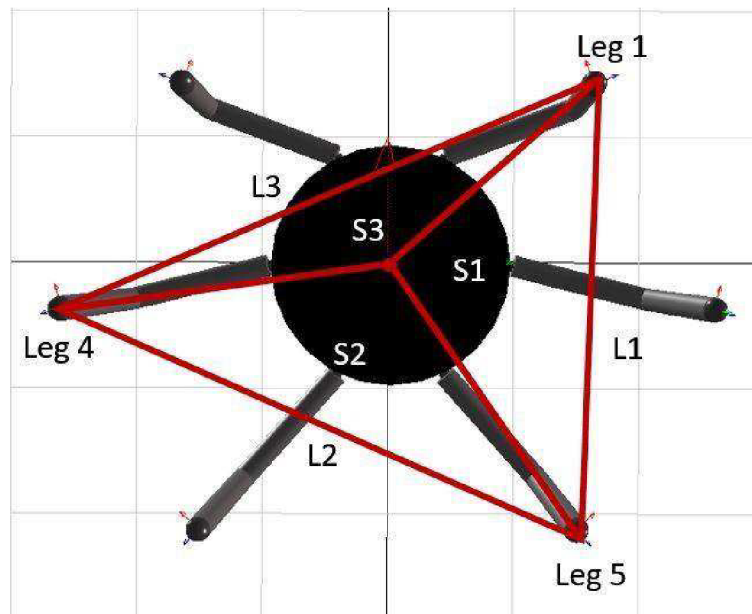


Obr. 1: Nosný polygon šestinohého robota během střídavé chůze po třech nohou [3]

Statická stabilita také spočívá v tom, že se robot nepřevrátí v důsledku zpoždění pohybu nohou nebo např. při poruše napájení.

Dalším důležitým pojmem je rozpětí stability. To je definováno jako minimální vzdálenost od vertikální projekce těžiště robota ke hranici svislého průmětu konvexního trupu nosného polygonu.

Obr. 2 ukazuje nosný polygon rozdělený do tří dalších trojúhelníků, aby bylo možno vypočítat rozpětí stability v daném okamžiku.



Obr. 2: Nosný polygon rozdělený do několika menších trojúhelníků [3]

Plocha S_1 konvexního vzoru mezi první končetinou (Leg 1), pátou končetinou (Leg 5) a projekcí těžiště robota se vypočítá takto:

$$S_1 = \frac{1}{2} |(X_1 - X_c)(Y_5 - Y_c) - (X_5 - X_c)(Y_1 - Y_c)|, \quad (1.1)$$

kde X a Y představují souřadnice x a y , indexy 1 a 5 jsou končetiny Leg 1 a 5, c představuje těžiště. X_1 je tedy vzdálenost první končetiny od osy y .

Vzdálenost mezi dvěma místy kontaktu se zemí Leg 1 a Leg 5 se spočítá takto:

$$|L_1| = \sqrt{(X_5 - X_1)^2 + (Y_5 - Y_1)^2}, \quad (1.2)$$

Plocha trojúhelníka je součin základny a výšky děleno dvěma. Výška h_1 dílčího trojúhelníka s plochou S_1 :

$$h_1 = \frac{2 \cdot S_1}{|L_1|}, \quad (1.3)$$

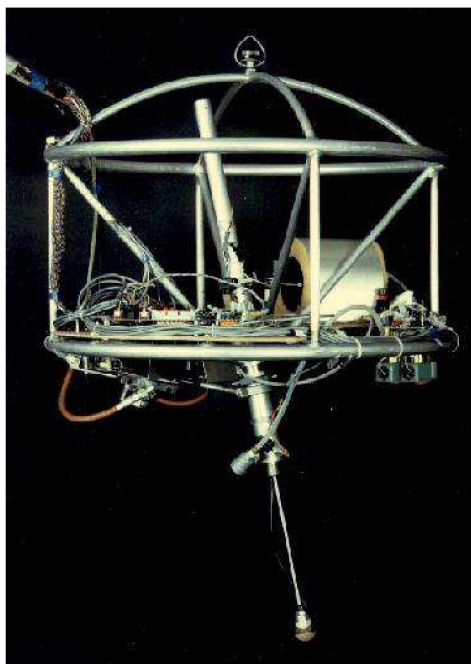
Tento postup se postupně opakuje pro všechny dílčí trojúhelníky. Stabilní rozpětí je poté nejmenší výška dílčího trojúhelníka h_{1-3} , tedy nejkratší vzdálenost mezi polohou projekce těžiště a hranicemi nosného polygonu. U jiných tvarů polygonu probíhají výpočty rozpětí stability obdobně.

Pokud se těžiště robota dostane mimo konvexní trup nosného polygonu během řízeného pohybu, jedná se o dynamickou stabilitu (dynamický pohyb). Během dynamického pohybu si robot udržuje svou stabilitu pomocí řízení pohybu a modelování setrvačnosti. To vyžaduje propracovaný model řízení a zpracování lokomoce. Jak již bylo zmíněno, dynamický pohyb umožňuje maximální rychlost robota.

1.7 Počet nohou robota

Existuje mnoho robotů s odlišným počtem končetin. Nejčastější jsou roboty se čtyřmi nebo šesti končetinami, výjimkou jsou roboty s osmi nebo dvanácti končetinami.

Roboty s jednou, dvěma a třemi končetinami mají rovněž své zastoupení, nicméně pro svůj pohyb musí udržovat dynamickou stabilitu. Příklad skákajícího monopodu podle Marca Raiberta (viz Obr. 3), který používá pro mechanismus nohy kloub neboli lineární pružný aktuátor (LEAP). Ovládání kloubu je realizováno dvěma servomotory.



Obr. 3: Raibertův skákající monopod [6]

1.7.1 Dvounohé roboty

Skupinou robotů, která v poslední době zaznamenává mnoho zásadních úspěchů ve vývoji, jsou roboty s dvěma končetinami. Tyto roboty se svou konstitucí těla snaží přiblížit lidské postavě.

Nejtěžším úkolem v oblasti dvounohých robotů je udržení rovnováhy při pohybu (bipedie) i stání na místě. Řada řešení takového problému spočívá v konstrukci chodidel tak, aby byla větší a přispěla ke stabilitě, avšak takto získaná stabilita je dosažena za cenu

snížení mobility robota. Více pokročilým řešením je použití sensorů jako jsou akcelerometry a gyroskopy. Pomocí sensorů se získává dynamická zpětná vazba způsobem, který je podobný jako u lidí a umožňuje tak aproximovat a reagovat na neustálé změny ve stabilitě robota. Složitost úkolů, které robot vykonává, vede k použití principu mechanického učení. Neustálé učení a vyhodnocování nedostatků v provedení daných pohybů zdokonaluje kinematiku a dynamiku robota.

Kromě chůze se u těchto robotů počítá i s využitím horních končetin, které mohou používat podobně jako člověk k mnoha užitečným činnostem. Díky své vyšší postavě, na rozdíl od většiny ostatních robotů, si pokročilé roboty s vyspělou kinematikou mohou dovolit činnosti do nedávna vyhrazené pouze lidem.

Mezi typické bipedální roboty patří asi v současné době nejpokročilejší robot Atlas od společnosti Boston Dynamics (viz Obr. 4) nebo ikonický robot ASIMO z roku 2000.



Obr. 4: Robot ATLAS humanoidního typu od společnosti Boston Dynamics [11]

1.7.2 Čtyřnohé roboty

Co se týče čtyřnohých robotů, požadujeme-li staticky stabilní pohyb, lze pohyb realizovat pouze jedním způsobem a to tak, že v jednom okamžiku bude nad zemí pouze jedna

končetina. Po dokončení pohybu končetiny dotknutím se podložky se uvede do pohybu cyklicky další končetina. Principem je to, aby vždy končetiny na podložce tvořily trojúhelníkový nosný polygon. Součástí chůze je, že robot musí rovněž přesouvat své těžiště. Z toho vyplývá, že statický pohyb čtyřnohého robota je značně neefektivní, a proto je snaha používat v maximálně možné míře dynamický pohyb.

1.7.3 Šesti a vícenohé roboty

Na rozdíl od chůze savců, kteří spoléhají při běhu na dynamický pohyb s minimem kontaktu se zemí, se u většiny hmyzu vyvinula chůze statická, která udržuje na zemi alespoň tři končetiny.

Jedna z hypotéz o tomto rozdílu v lokomoční strategii spočívá v tom, že statická lokomoce umožňuje hmyzu rychlejší navigaci v trojrozměrném terénu, ve kterém se právě nacházejí.

Šestinohé roboty jsou již z principu schopny staticky stabilního pohybu a v relativně rovném terénu dosahují dobré stability. Návrh robota obvykle imituje mechaniku pohybu hmyzu.

Osminohé roboty jsou konstrukcí velmi podobné šestinohým. Jsou inspirovány pavouky a jinými druhy, například podvodními živočichy jako třeba chobotnice. Osminohé varianty robotů dosahují přidané stability.

1.7.4 Hybridní roboty

V mobilní robotice se nekladou meze v návrhu různých kombinací prostředků umožňujících pohyb robota. Vzniká tak celá škála hybridních robotů kombinujících více principů pohybu v jednom.

Velmi výhodnou kombinací prostředků pohybu se jeví končetiny s koly. Vzniká tak robot, který spojuje výhody obou typů pohybu. Ziskem je tedy rychlost a energetická efektivnost kol a flexibilita a možnosti pohybu nohou. Tato technika pravděpodobně bude sloužit i u vozidel, které se budou používat při průzkumu vesmírných těles. Omezí se tak možnost, že se vozidlo dostane do situace, kdy se nebude moci vlivem zaseknutí v těžkém terénu pohybovat a nebude moci pokračovat ve své misi.

Oblasti robotiky s hybridními roboty zažívají v poslední době rozkvět. A to díky vyřešení řady dílčích problémů v oblasti propojení různých principů lokomoce robotů.



Obr. 5: Hybridní robot ANYmal ETH Zurich [4]

1.8 Sekvence pohybu

Studium způsobů chůze, běhu a pohybu robota obecně vychází z dřívějších pozorování pohybu zvířat, ať už čtyřnohých savců nebo šestinohého hmyzu. Vůbec prvním známým člověkem, který detailně studoval a popsal lokomoci živočichů, byl americký fotograf Eadweard Muybridge. V roce 1872 se mu jako vůbec prvnímu podařilo vytvořit kolekci fotografií běžícího koně. Řada literatury spojená s popisem pohybu robota s končetinami vychází z biologického základu popisu pohybu živočichů, jelikož právě evolučním vývojem bylo dosaženo optimálního poměru chůze mezi rychlostí, spotřebou energie a stabilitou.

Živočich i ideální vícenohý robot má na výběr množství druhů pohybu, které může cyklicky opakovat a měnit podle prostředí a požadavků.

Kráčení robota lze rozdělit do několika synchronizovaných kroků provedených každou jednou nohou. Existují dvě fáze pohybu každé nohy:

- **Fáze přemístování** – fáze, kdy končetina není v kontaktu s podložkou, dochází k přemístění nohy na dané místo
- **Fáze stabilní** – končetina, respektive její koncový bod je na místě kontaktu se zemí a poskytuje stabilitu robotu v momentě, kdy dochází k přemístování ostatních končetin robota

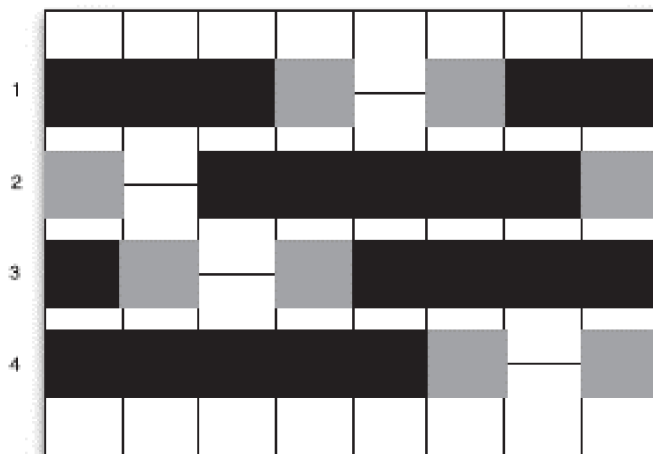
Čas, během kterého je končetina ve fázi přemístování a který zabere dobu jednoho kroku, se nazývá doba cyklu.

Neperiodické pohyby lze u živočichů pozorovat v prostředí drsného a hrubého terénu. Periodická chůze je zase upřednostňována na rovné ploše, která také postrádá větší překážky.

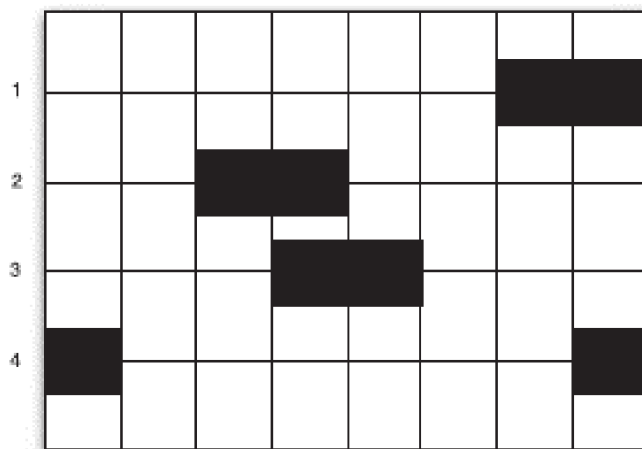
K popisu se používá celá škála způsobů, mezi nejznámější patří Hildebrandovy diagramy. Přehledně popisují podíl každé končetiny na stabilitě robota jako funkci času. Ke každé noze je přidělena vodorovná čára. První a druhý řádek odpovídá přední levé a pravé končetině a takto se postupuje dále vzad. Lichá čísla jsou tedy končetiny vlevo, sudá vpravo. Tmavé oblasti signalizují fázi, ve které byla končetina stabilní na místě. Bílé oblasti značí fázi přemísťování.

Příklady druhů pohybů pro čtyřnohé zvíře, či robota definované podle Eedwarda Muybridge:

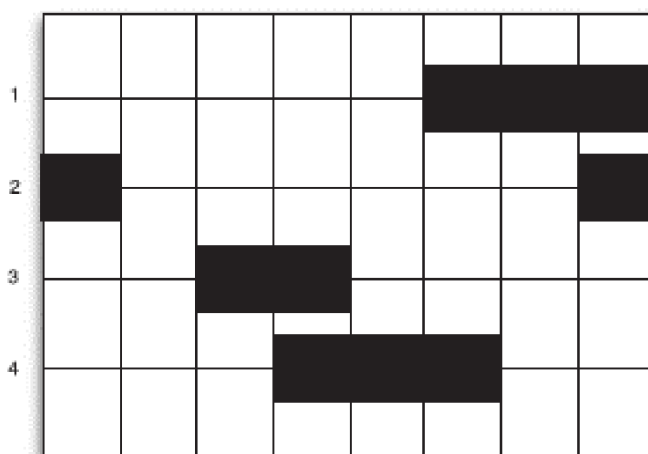
- Chůze
- Plížení se – vždy pouze jedna noha ve fázi přemísťování, jediný pohyb, který je staticky stabilní
- Klus
- Poklus se střídáním postranních nohou
- Drobný klus
- Cval
- Trysk – nejrychlejší
- Odrážení – skoky můžeme najít u australských vačnatců



Obr. 6: Sekvence chůze (stabilní fáze jen černá) a plížení (stabilní fáze šedá plus černá) [1]



Obr. 7: Sekvence cvalu čtyřnohého robota [1]



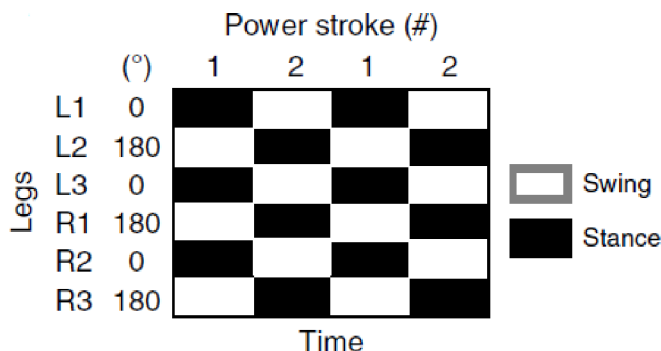
Obr. 8: Sekvence trysku čtyřnohého robota [1]

Jakmile jsou zavedeny vzory kroků, je třeba naplánovat pohyby těla. Zvedání a spouštění končetin v určitém vzoru totiž nemusí nutně způsobit, že těžiště robota se uvede do pohybu vpřed a celý robot se začne posouvat. Kromě výběru, kdy a kde dojde k umístění chodidel, je třeba zvážit, že celé tělo musí být v určitém bodě chůze posunuto dopředu. Existují dvě základní strategie pro plánování pohybů těla robota. Prvním je minimalizovat počet pohybů těla. Druhou alternativou je pohyb těžiště tak, aby byla maximalizována míra stability robota.

1.8.1 Vzory pohybu šestinohého robota

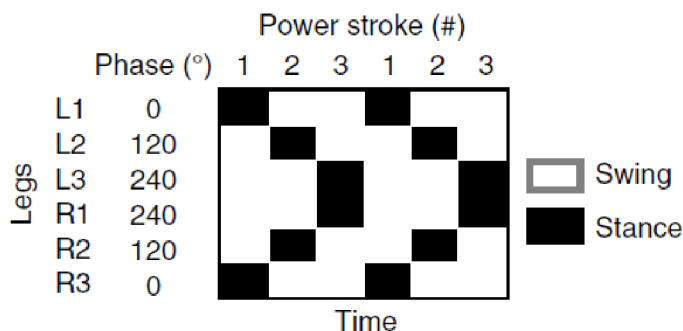
Nejběžnějším typem pohybu u hmyzu i šestinohých robotů je střídání tří nohou na podložce a tří v pohybu. Během chůze se pohybují přední a zadní nohy na jedné straně těla téměř synchronně s prostřední nohou na druhé straně. Tento typ pohybu se často uplatňuje i při běhu, kdy hmyz prodlouží délku kroku a zvětší jeho frekvenci.

Zásadní výhodou volby chůze po šesti nohou se zdá být možnost pohybu i po velmi strmém prostředí bez ztráty stability a spadnutí.



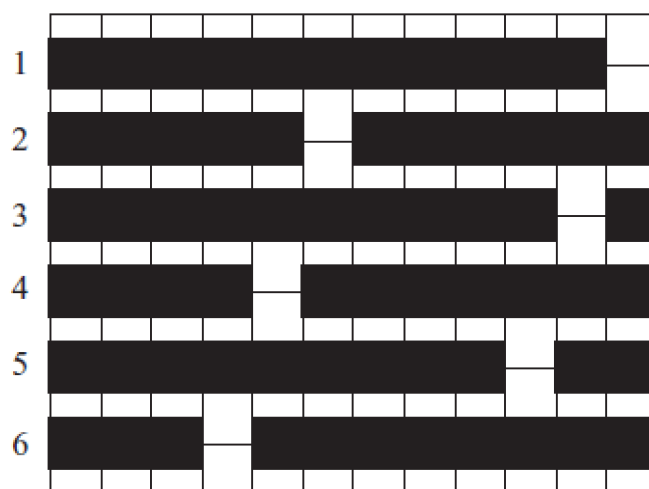
Obr. 9: Sekvence ideální tripodové chůze robota [12]

Po rovné ploše terénu lze uplatnit i bipodové dynamicky stabilní pohyby a dosáhnout tak přidané rychlosti. Pohyb se tak více podobá obratlovcům běžícím klusem. Tento způsob však začíná být výhodnějším až při absenci adheze.



Obr. 10: Sekvence bipodového pohybu šestinohého robota [12]

Dále existuje také tzv. vlnový pohyb, ve kterém je v pohybu vždy jen jedna končetina robota, je jednodušší na implementaci koordinace pohybu za sebou.



Obr. 11: Sekvence vlnového pohybu šestinožného robota [1]

2. MATEMATIKA POPISU POHYBU KONČETINY

Tato kapitola se zabývá popisem matematických principů, které jsou používány ke správnému a efektivnímu návrhu lokomoce jednotlivé končetiny. Popisuje geometrické zákonitosti užívané k mobilní robotice, ale i robotice zabývající se manipulátory u statických robotů.

Zásadní částí je geometrické vyjádření bodů kloubů v prostoru kartézských souřadnic pomocí jacobíanu a popis principu přímé kinematiky, která transformuje kloubové souřadnice robota na souřadnice dané scény.

2.1 Popis základních pojmů

Každá daná končetina má svůj **pevný bod**, který je připevněný k tělu a svůj tzv. **koncový bod**, který se nachází na opačné straně končetiny. U nohou je koncovým bodem bod či plocha končetiny, která přichází do kontaktu s podložkou.

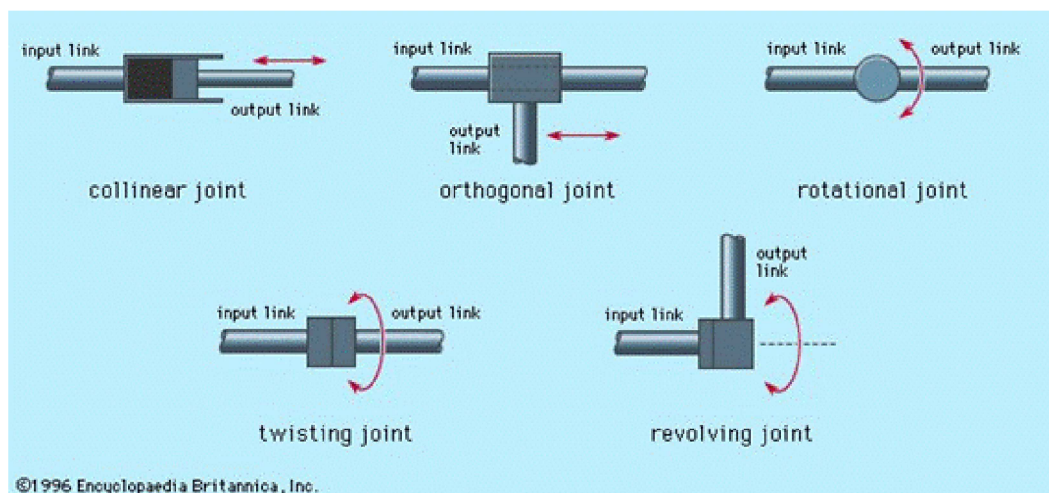
Minimální končetina robota vyžaduje klouby, které jsou schopny poskytnout dostatečný počet stupňů volnosti, aby bylo možno pokrýt trojrozměrný kontaktní prostor mezi nohou a podložkou.

Stupeň volnosti označuje základní směry posunu nebo otáčení, kterými se bod nebo těleso může pohybovat. Bod v dvourozměrném prostoru má dva stupně volnosti, osy x a y . Těleso má tři stupně volnosti (osy x , y a otáčení kolem bodu). V trojrozměrném prostoru má bod tři stupně volnosti a těleso celkem šest (osy x , y , z a otáčení kolem všech tří os).

Většina kloubů, které robot má, nabízí pohyb pouze v jednom stupni volnosti. Díky kombinování většího množství kloubů se dosahuje složitějšího pohybu.

Druhy kloubů:

- P-kloub (Prismatic joint) – posuvný pohyb v podélném směru
- R-kloub (Revolute joint) – rotační v jednom stupni volnosti
- U-kloub (Universal joint) – dva rotační stupně volnosti
- S-kloub (Spherical joint) – sférický kloub umožňuje všechny tři stupně volnosti (např. ramenní kloub člověka)



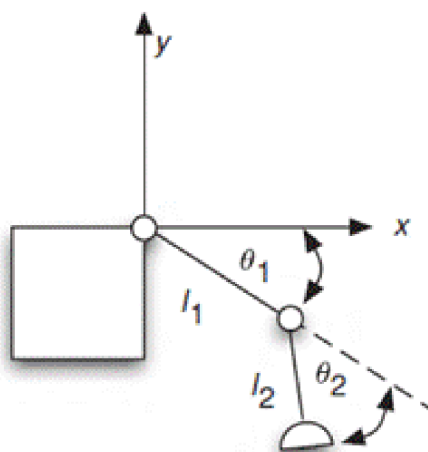
Obr. 12: Typy mechanických kloubů [9]

Klouby lze různě manipulovat a dosahovat tak toho, že se koncový bod dostane na libovolná místa v dosahu manipulátoru nebo končetiny u mobilního robota.

2.2 Přímá kinematika

Přímá kinematika se zabývá výpočtem umístění a orientace koncového bodu vzhledem k nastavení poloh jednotlivých kloubů. Klasickým řešením tohoto problému je použití homogenních souřadnic, které reprezentují polohu každého článku končetiny. Následně se vytvoří homogenní matice, která reprezentuje transformaci ze základního souřadnicového systému do systému, který zahrnuje i koncový bod.

Pro vysvětlení postupu může sloužit jednoduchý dvojrozměrný model nohy neboli planární manipulátor (viz Obr. 13). Noha se skládá ze dvou rotačních kloubů oddělených tuhými končetinami s délkami l_1 a l_2 , úhly kloubů jsou θ_1 a θ_2 . Počátek souřadné soustavy je umístěn tam, kde je noha napojena na tělo robota.



Obr. 13: Dvoudimenzionální model končetiny [1]

Řešení přímé kinematiky pro 2D nohu robota:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = l_1 \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{bmatrix} + l_2 \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Opakem přímé kinematiky je inverzní kinematika, ta zahrnuje určení poloh úhlů θ_1 a θ_2 přes známou pozici koncového bodu. Příklad výpočtu kloubové souřadnice θ_2 :

$$\cos(\theta_2) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, \quad (2.2)$$

Řešení inverzní kinematiky nemusí být pouze jedno. Ne všechny navržené situace mají své řešení, protože se mohou dostat mimo definovaný pracovní prostor končetiny, kam noha může dosáhnout. Na hranicích pracovního prostoru se vyskytuje tzv. singularita. Existence singularity značí, že nelze se do daného bodu dostat v libovolném směru. Singularity se mohou vyskytovat i v uvnitř pracovního prostoru.

2.3 Jacobiho matice

Jacobiho matice neboli jacobíán je matice parciálních derivací vektorové funkce.

Zásadní otázkou je, jak rychle se mají klouby pohybovat. Pro ukázkou použijeme planární manipulátor (viz Obr. 13) z minulé podkapitoly, kde budeme mít derivace x a y jako rychlost koncového bodu v těchto souřadnicích a derivace úhlů θ_1 a θ_2 představující rychlost otáčení kloubů. Následný jacobíán je definován takto:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Jacobiho matice je vhodná pro identifikaci singularit uvnitř pracovního prostoru nohy robota. Pokud se determinant jacobíanu rovná nule, singularity uvnitř pracovního prostoru existují. Singularita existuje při nulovém natočení kloubu $\theta_2 = 0$ radiánů

$$|J(\theta)| = \left| \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \right| = l_1 l_2 |\sin \theta_2|. \quad (2.4)$$

2.4 Homogenní transformační matice

Pro celkový zápis poloh končetiny je vhodné použít popis pomocí tzv. homogenních souřadnic. Homogenní matice je složena z matice rotace a vektoru translace, součástí je i nulový a jednotkový vektor

$$T = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,1} & r_{1,2} & t_x \\ r_{2,1} & r_{2,1} & r_{2,2} & t_y \\ r_{3,1} & r_{3,1} & r_{3,2} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Matice rotace pro dvojrozměrný prostor:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Matice rotace pro trojrozměrný prostor, jednotlivé osy x, y a z:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

Vektor translace je sloupcový vektor, který představuje translační pohyb v osách x, y, z jeho složky jsou t_x , t_y a t_z .

2.5 Denavit-Hartenberg

Nejpoužívanější úmluva sloužící k popisu geometrického uspořádání kloubů robota nebo stacionárního manipulátoru. Tato metoda je založena na vzájemné polohové transformaci.

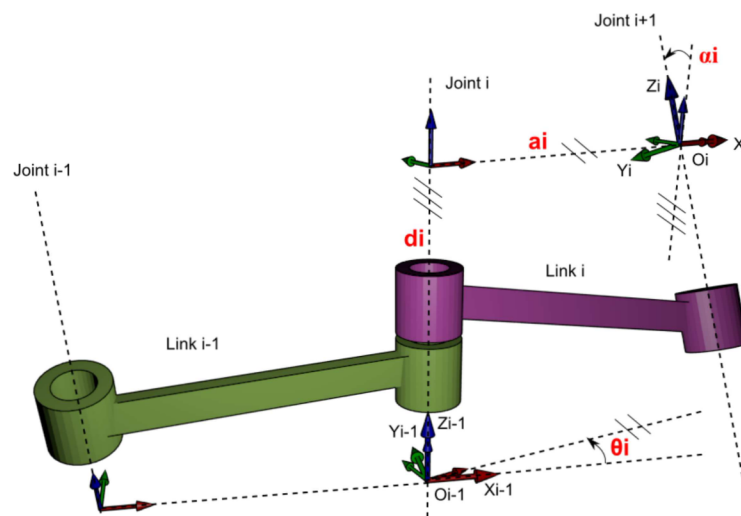
Postup:

- Očíslování kloubů a jejich os rotace a translace
- Zvolení osy z_i podél rotace kloubu Joint $i + 1$ a k ní rovnoběžné osy z_i' podél rotace osy Joint i ,
- Určení počátku O_i (průsečík osy z_i a normály os z_{i-1} a z_i)
- Určení počátku O_i' (průsečík osy z_{i-1} a normály)
- Osy x_i a y_i se volí podle pravotočivého pravidla

V Denavit-Hartenberg je založen na transformaci, která reprezentuje čtyři základní parametry, relativní lokace mezi dvěma místy nastavení kloubů:

- a_i – délka, vzdálenost spoje
- d_i – vzdálenost mezi počátky O_{i-1} a O_i' ,
- α_i – úhel mezi osami z_{i-1} a z_i podél osy x' .
- θ_i – úhel mezi osami x_{i-1} a x_i podél osy z_{i-1}

$$A_i = T_z(\theta_i)R_z(d_i)T_x(a_i)R_x(\alpha_i), \quad (2.10)$$



Obr. 14: Ukázkový model Denavit-Hartenbergovy úmluvy [5]

Kromě úmluvy Denavit-Hartenberg existuje i úmluva Khalil-Kleinfinger, která je její modifikací. Odlišnost této úmluvy je v souřadném systému, který není pevně svázán s ramenem, ale je přímo umístěn na rotační ose kloubu.

3. ŠESTINOHÝ ROBOT

Tato kapitola se zabývá aplikací matematických principů na konkrétní typ šestinochého robota.

Nejprve se soustřeďuje na popis robota, a to na rozmístění noh vzhledem k počátku souřadnicového systému ve středu rámu (těžišti). Následně se zabývá popisem nohy robota a řešením přímé úlohy kinematiky končetiny.

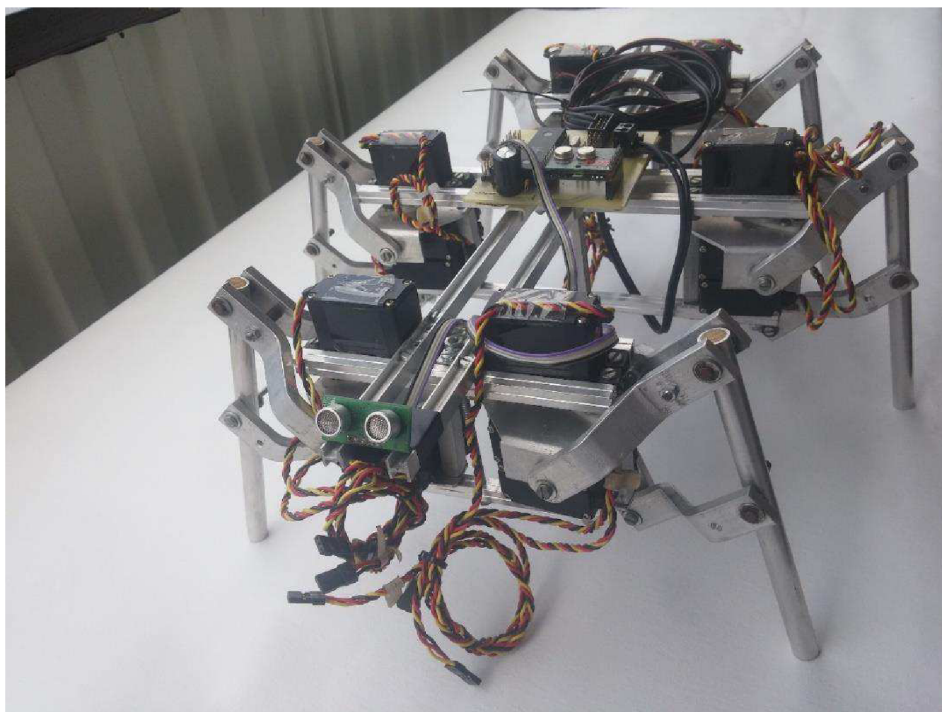
Následně jsou výsledky pozic nohou a přímé úlohy kinematiky dosazeny do homogenní matice pro každou jednotlivou nohu a jsou tak získány pozice koncových bodů noh vzhledem k počátku souřadnic celého robota.

Na konec se kapitola zabývá řešením dopředné chůze a vizualizace sekvence chůze pro daný příklad robota.

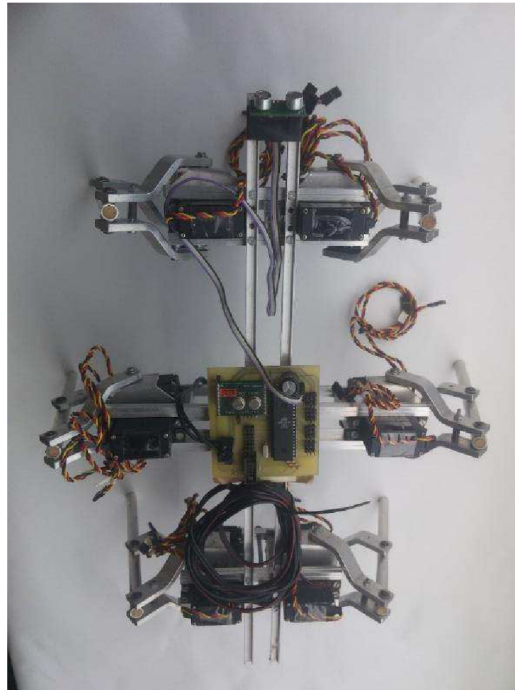
3.1 Popis modelu robota

Pro popis a další výpočty byl zvolen následující šestinohý robot, který vznikl na Ústavu automatizace a měřících technologií Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

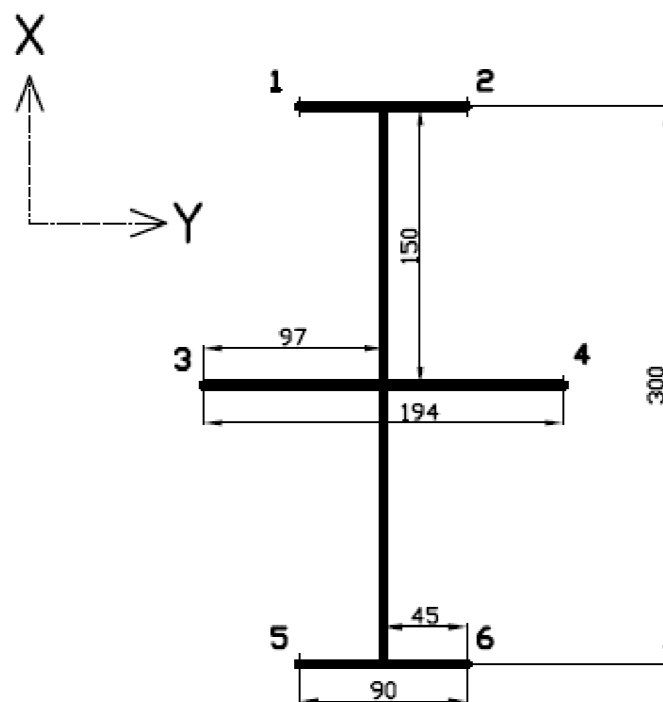
Byl vyroben v rámci několika prací například [13] [15], kde je uvedena jeho dokumentace.



Obr. 15: Fotka šestinochého robota



Obr. 16: Pohled ze shora



Obr. 17: Rozměry robota pohled ze shora

Pro odvozování poloh končetin je nejprve potřeba zavést kartézské souřadnice celého robota. Pro nejsnadnější počítání poloh nohou byl zvolen počátek uprostřed rámu robota, na kterém jsou uchyceny vrchní otočné servomotory, tedy v jeho těžišti.

- Osa X – je natočena ve směru pohybu robota vpřed
- Osa Y – směr do pravé strany (při pohledu shora)
- Osa Z – směřuje z počátku souřadnic do podložky (hodnota z tedy neznačí výšku ale vertikální vzdálenost od prostředku rámu)

Pozice každé nohy bude definována v místě prostředního servomotoru. Všechny nohy mají v ose Z stejnou hodnotu.

3.2 Popis nohy robota

Noha a její princip je modifikací návrhu nohy robota Thing z Laboratory for Perceptual Robotics, University of Massachusetts.

Autorem modifikovaného návrhu je kolektiv: Prof. František Šolc, Jan Vodička, Jiří Chvatík a Ondřej Pouchlý. [13]



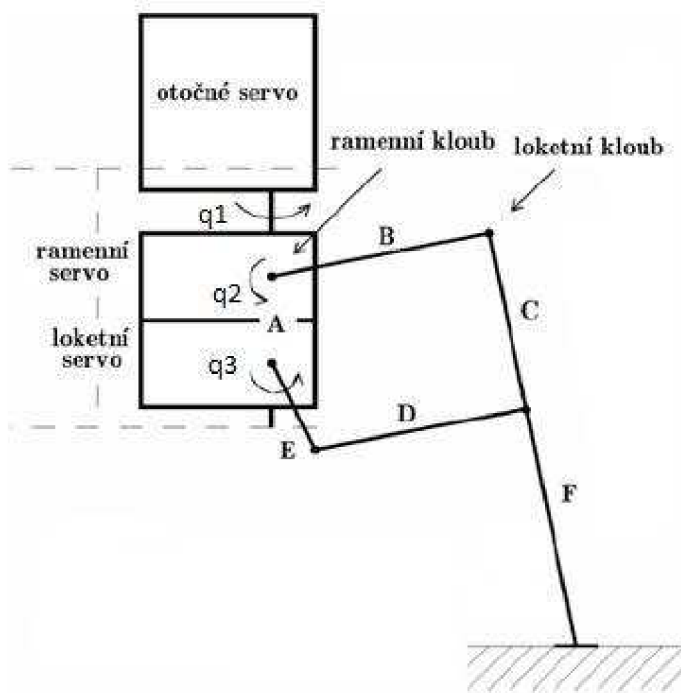
Obr. 18: Detail nohy robota

3.2.1 Princip činnosti servomotorů

Noha se skládá ze tří servomotorů, které jsou umístěny v jedné ose:

- 1.) Vrchní servomotor (otočný) je uchycený přímo v rámu a rotuje celou nohou, umožňuje pohyb vpřed a vzad
- 2.) Prostřední servomotor (ramenní) nadzvedá nohu z podložky
- 3.) Spodní servomotor (loketní) odklání nohu

Jsou použity konkrétně servomotory Hitec HS-475 HB pro otočný a loketní servomotor a Hitec HS-5645 MG dig. pro ramenní.



Obr. 19: Zobrazení celé nohy robota [19]

Tabulka 1 rozměry článků končetiny [19]

Článek nohy	délka [mm]
A	20
B	70
C	60
D	70
E	40
F	85

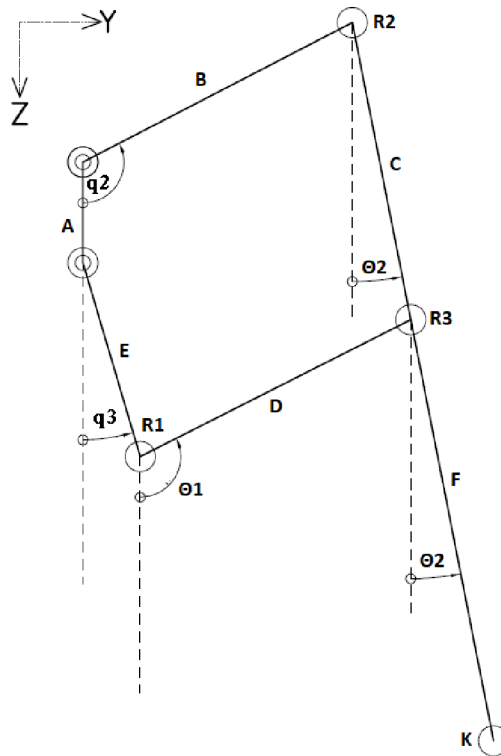
3.3 Přímá úloha kinematiky pro nohu

Cíl přímé úlohy kinematiky je získání pozice koncového bodu (efektoru) v závislosti na tom, jak jsou nastaveny servomotory.

Nejprve je potřeba definovat souřadnice pro nohu. Počátek souřadnice se nachází v místě, kde se nachází prostřední servomotor (ramenní).

Pro zjednodušení výpočtu budeme úlohu počítat ve 2D souřadnicích y, z (souřadnice má směr dolů k podložce). Vliv na pozici efektoru v této dílčí úloze budou mít tedy jen servomotory q_2 a q_3 noha v tomto schématu má tudíž 2 stupně volnosti.

Úlohu lze řešit pomocí popisu Denavit-Hartenberg nicméně je zde nutné provést relativně složitý výpočet závislostí úhlů na sebe z důvodu provázanosti všech článků.



Obr. 20: Noha robota ve 2D souřadnicích

3.3.1 Řešení jako planární pantograf

Při opomenutí článku F, máme systém pěti ramen a pěti kloubů neboli planární pantograf v angličtině známý jako five-bar linkage. [14]

Pomocí této konvence lze pozici koncového bodu dopočítat, jelikož články C a F sdílí stejný úhel θ_2 viz obrázek 20, tak bude výsledná pozice pouze prodloužením článku C.

Vzhledem k tomu že aktivní klouby q_2 a q_3 (servomotory) budou pracovat jen v určitém daném rozmezí není potřeba řešit singularity. Rovnice 3.1 až 3.16 jsou převzaty z práce [14], byly upraveny a doplněny o rovnice pro koncový bod nohy.

Řešení spočívá nejprve v dosažení pozice bodu R3, nejprve cestou přes klouby q_2 , R2, R3 (rovnice 3.1 a 3.2) a následně přes klouby q_3 , R1, R3 (rovnice 3.3 a 3.4)

$$R3_z = B \cos(q2) + C \cos(\theta_2) \quad (3.1)$$

$$R3_y = B \sin(q2) + C \sin(\theta_2) \quad (3.2)$$

$$R3_z = D \cos(\theta_1) + E \cos(q3) + A \quad (3.3)$$

$$R3_y = D \sin(\theta_1) + E \sin(q3) \quad (3.4)$$

Jelikož se jedná o uzavřenou smyčku, musí se rovnice pro R3 souřadnice rovnat:

$$B \cos(q2) + C \cos(\theta_2) - (D \cos(\theta_1) + E \cos(q3) + A) = 0 \quad (3.5)$$

$$B \sin(q2) + C \sin(\theta_2) - D \sin(\theta_1) + E \sin(q3) = 0 \quad (3.6)$$

Dalšími úpravami se postupně dostáváme k rovnicím pro úhly θ_1 a θ_2 souvisejícími s pasívními klouby R1, R2 a R3

Výpočet Pomocných proměnných:

$$K_a = -B \cos(q2) + E \cos(q3) + A \quad (3.7)$$

$$K_b = -B \sin(q2) + E \sin(q3) \quad (3.8)$$

Rovnice velikostí úhlů θ_1 a θ_2 :

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{C^2 - K_a^2 - D^2 - K_b^2}{2D \sqrt{K_a^2 + K_b^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{K_b}{K_a} \right) \quad (3.9)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{-B \cos(q2) + D \cos(\theta_1) + E \cos(q3) + A}{C} \right) \quad (3.10)$$

Rovnice souřadnic kloubů nohy:

$$y_{R1} = B \sin(q2) \quad (3.11)$$

$$z_{R1} = B \cos(q2) \quad (3.12)$$

$$y_{R2} = E \sin(q3) \quad (3.13)$$

$$z_{R2} = E \cos(q3) + A \quad (3.14)$$

$$z_{R3} = B \cos(q2) + C \cos(\theta_2) \quad (3.15)$$

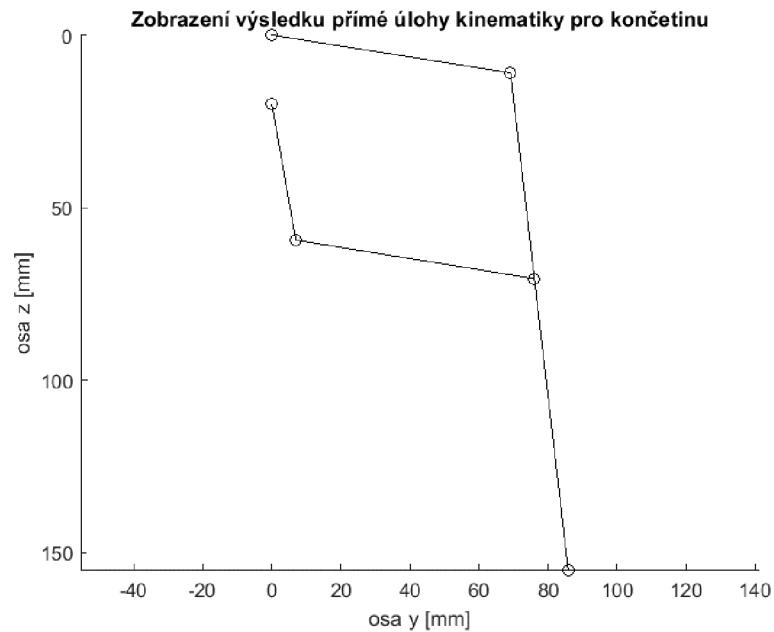
$$y_{R3} = B \sin(q2) + C \sin(\theta_2) \quad (3.16)$$

Výsledná rovnice koncového bodu nohy vzhledem k druhému servomotoru nutná pro další postup:

$$z_K = B \cos(q2) + (C + F) \cos(\theta_2) \quad (3.17)$$

$$y_K = B \sin(q2) + (C + F) \sin(\theta_2) \quad (3.18)$$

Rovnice byly ověřeny v programu MATLAB a pro kontrolu byla zobrazena končetina viz Obr. 21: Výsledek přímé úlohy kinematiky pro jednu končetinu, program MATLAB. Nastavení aktivních kloubů je $q_2 = 81^\circ, q_3 = 10^\circ$.

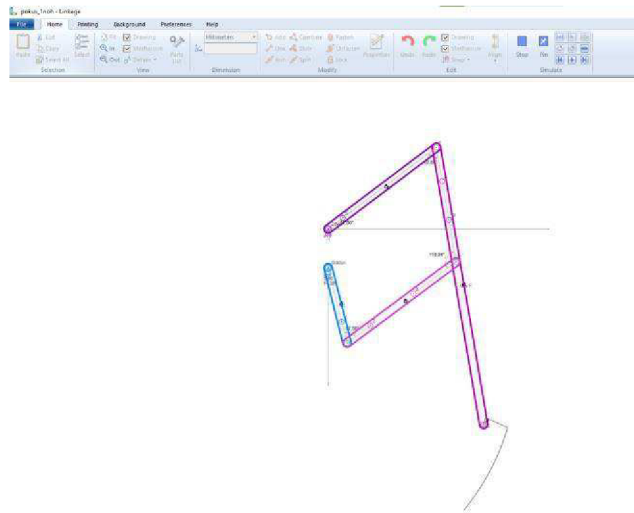


Obr. 21: Výsledek přímé úlohy kinematiky pro jednu končetinu, program MATLAB

3.3.2 Zobrazení v programu Linkage

Pro nezávislou kontrolu výsledných úhlů byl použit program linkage, kde lze simulovat mechanické vazby článků a kloubů. V programu lze nastavovat aktivní klouby a v simulaci je otáčet v předem nastavené rychlosti a rozmezí.

Bohužel nastavení kloubů nelze dále programovat, a tak aplikace slouží pouze pro ověření kinematiky a k orientaci.



Obr. 22: Ukázka 2D nohy v programu Linkage

3.4 Algoritmus chůze

Algoritmus chůze spočívá v rozdělení pohybu na několik fází. Po dosažení poslední fáze se algoritmus vrátí k předem dané fázi a pohyb pokračuje.

Každá fáze tedy obsahuje nastavení všech tří servomotorů do zvoleného úhlu.

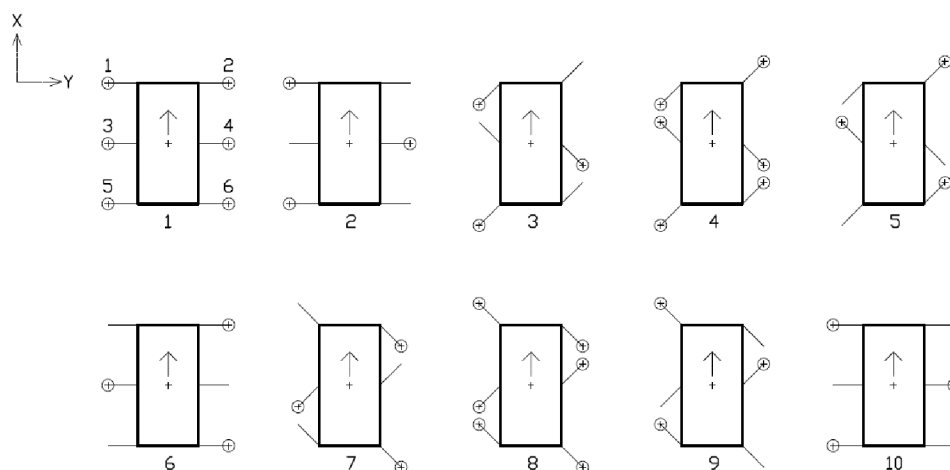
Pro tuto úlohu byla zvolena chůze typu tripod (vysvětleno v kapitole 1.8.1). Z principu chůze vyplývá, že skupina noh 1, 4 a 5 (tzv. levý tripod) a skupina noh 2, 3, 6 (pravý tripod) budou mít shodné časové průběhy nastavení servomotorů, ale budou vzájemně od sebe posunuty.

Fáze 2 pravého tripodu odpovídá 6. fázi levého tripodu. Po dosažení poslední fáze 10 algoritmus přeskočí do 3. fáze a chůze plynule pokračuje. [13]

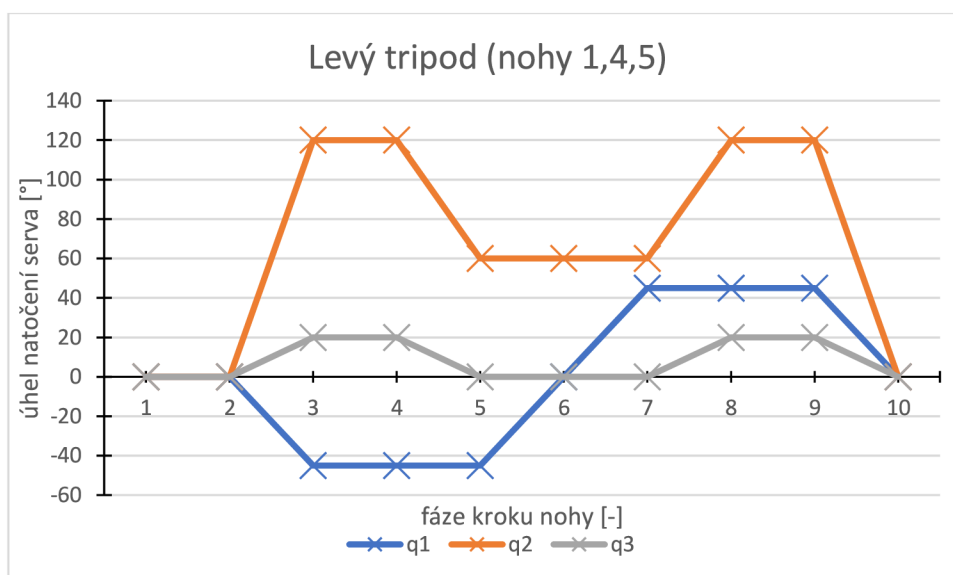
Obr. 23 reprezentuje všech 10 fází sekvence pohybu, vyznačené kroužky na konci nohou značí místa kontaktu s podložkou.

Ke grafům Obr. 24 a Obr. 25 je nutné dodat, že levá strana se od pravé liší v nastavení prvního (otočného) servomotoru q_1 o 180° , je tedy zrcadlově otočen.

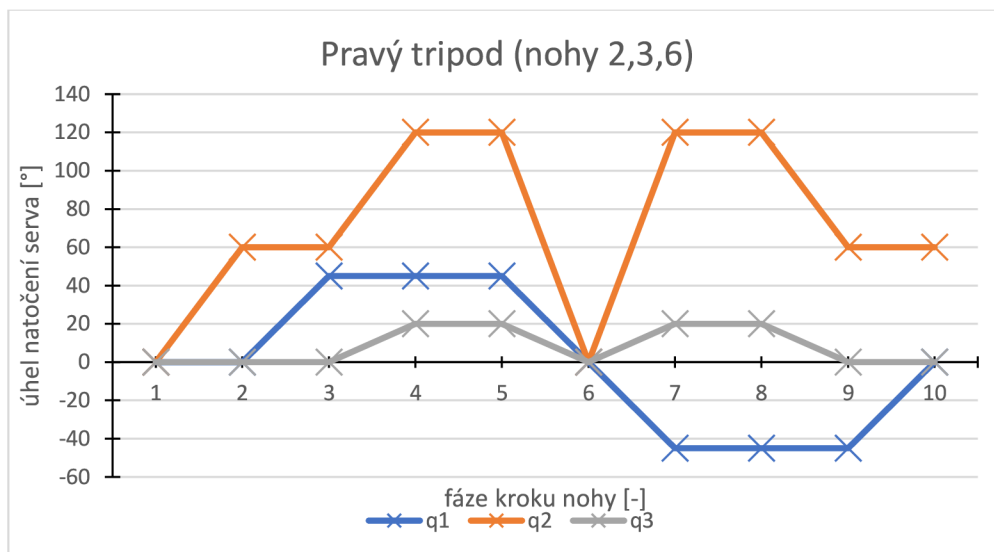
Nastavení velikostí úhlů servomotorů v jednotlivých fázích pohybu bylo převzato z diplomové práce [13], bylo zvoleno jako relativně optimální řešení vzhledem prostorovým možnostem umístění nohy a natočení servomotorů.



Obr. 23: Sekvence dopředné chůze v 10 fázích [13]



Obr. 24: Graf natočení servomotorů pro jednotlivé fáze (nohy 1,4,5)



Obr. 25: Graf natočení servomotorů pro jednotlivé fáze (nohy 2,3,6)

3.5 Homogenní transformace

Transformace slouží k získání pozic koncových bodů noh (efektorů) vůči počátku souřadnic robota. Homogenní matice je součinem matice translace (pozice prostředního servomotoru vůči prostředku rámu robota), matice rotace (nastavení prvního servomotoru) a matice translace (výsledek přímé úlohy kinematiky viz kapitola 3.4).

Homogenní matice se počítá pro každou nohu zvlášť. Výsledkem jsou potom souřadnice x_H, y_H a z_H nacházející se ve čtvrtém sloupci homogenní matice. Tyto souřadnice jsou celkovým výsledkem přímé úlohy kinematiky pro celého robota.

Matice translace - pozice prostředního servomotoru vůči prostředku rámu robota (souřadnice z je pro všechny nohy stejná, x a y se liší):

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Matice rotace otočného servomotoru:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Matice translace - pozice koncového bodu vůči prostřednímu servomotoru:

$$T_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_k \\ 0 & 0 & 1 & z_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Homogenní matice jako součin matic translace a rotace:

$$H = T \cdot R_z \cdot T_k \quad (3.22)$$

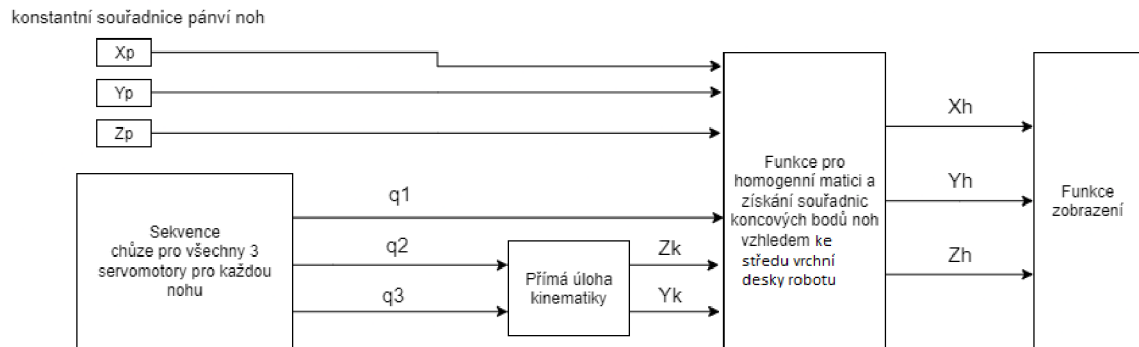
Homogenní matice se souřadnicemi x_H, y_H, z_H , ostatní zbylé členy matice není nutné uvažovat, protože předpokládáme bodový dotyk s podložkou, a tudíž není potřeba znát orientaci dotyku:

$$H = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & x_H \\ \dots & \dots & \dots & y_H \\ \dots & \dots & \dots & z_H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

3.6 Zobrazení

Závěrečná část práce se zabývá zobrazením koncových bodů noh robota v průběhu všech fází sekvence chůze.

V prostředí programu MATLAB byli použity principy vysvětlené v kapitole 3. Vstupem do programu (viz blokové schéma Obr. 26) je pro každou nohu souřadnice druhého servomotoru (označený jako pánve) a sekvence deseti fází nastavení servomotorů. Výstupem je matice souřadnic koncových bodů vůči počátku souřadnic robota.



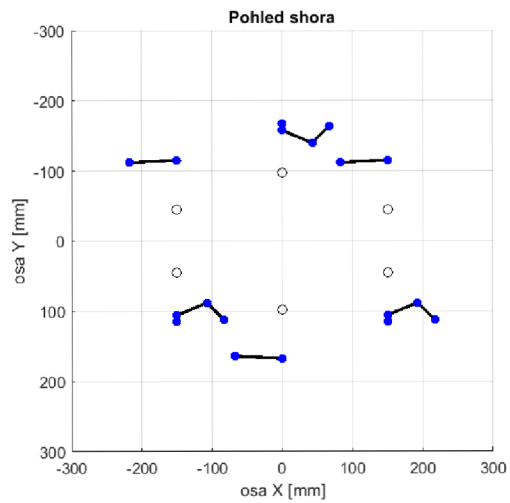
Obr. 26: Blokové schéma řešení v programu MATLAB

Koncové body jsou poté zobrazeny postupně po fázích pro všech šest noh najednou a je tak simulován dopředný pohyb robota.

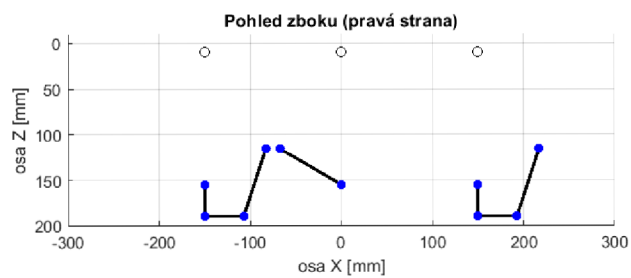
Zobrazení je provedeno z pohledů shora, z boku (z pravé strany pouze pro nohy číslo 2,4,6), zepředu (nohy 1,2,3,4) a z 3D pohledu. Střed rámu robota leží v průniku os x, y, z , pozice prostředních servomotorů jsou vyznačeny prázdnými kolečky a pozice koncových

bodů nohou modrými body, které spojují úsečky vyznačující trajektorii pohybu mezi jednotlivými fázemi pohybu.

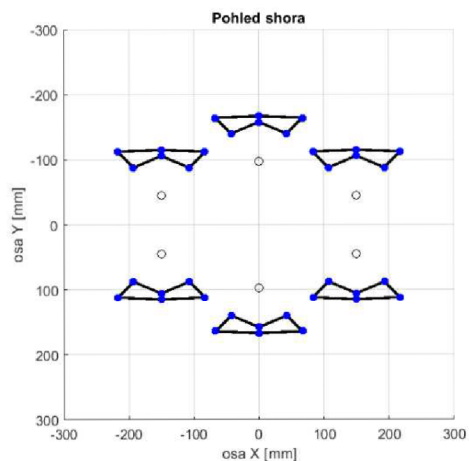
Fáze číslo 4 je vidět u obrázků Obr. 27 a Obr. 28, odpovídají Obr. 23 kapitoly 3.4, při pohledu z boku je vidět že koncové body noh jsou ve stejné rovině, všechny se tedy dotýkají podložky a nohy jsou vykročeny typicky do tripodové chůze.



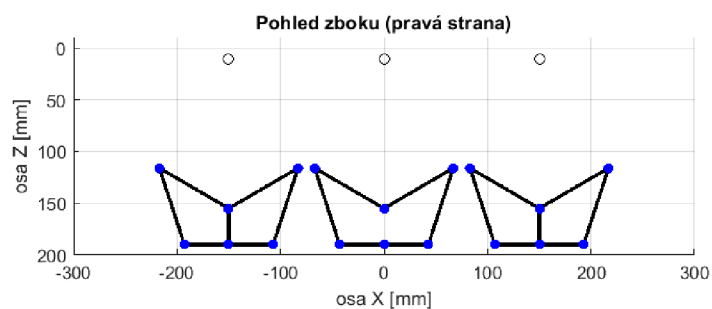
Obr. 27: Fáze 4 pohled shora



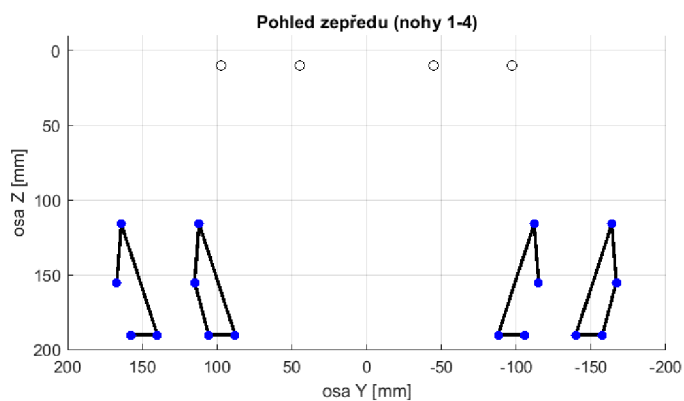
Obr. 28: Fáze 4 pohled z boku



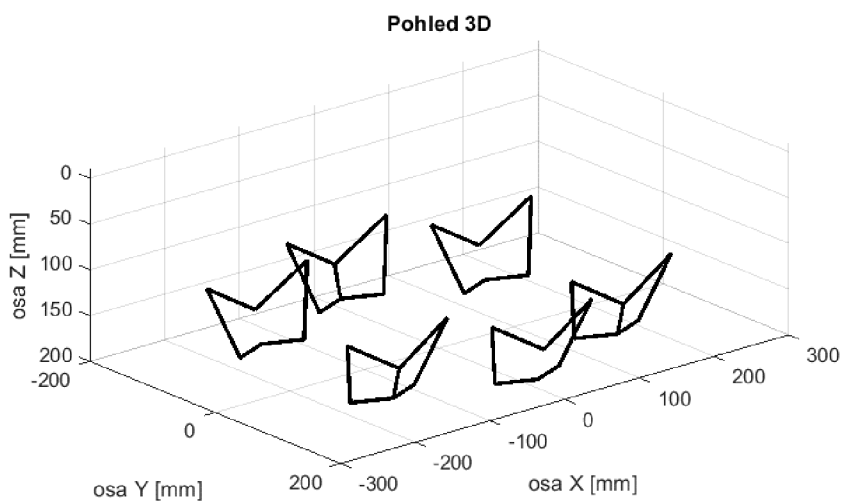
Obr. 29: Trajektorie pohybu shora



Obr. 30: Trajektorie pohybu z boku



Obr. 31: Trajektorie pohybu zepředu



Obr. 32: Trajektorie pohybu 3D pohled

4. ZÁVĚR

Účelem této Bakalářské práce bylo seznámení se s koncepcemi problematiky kinematiky kráčejších robotů, návrh řešení přímé úlohy kinematiky a simulace navrženého pohybu robota.

První část práce se zabývá rešerší, obecným popisem jednotlivých druhů mobilních robotů, nastiňuje rozdíly kolového a pásového robota a srovnává výhody a nevýhody v pojetí způsobu pohybu s roboty, kteří využívají ke svému pohybu končetin.

Dále zkoumá již konkrétněji kráčejší roboty z hlediska jejich pohybu vzhledem k počtu nohou. Je vysvětlen princip stability a jeho zásadní vliv na volbu kráčejšího robota a řešení jeho návrhu.

Následně se kapitola zabývá sekvenčním popisem pohybu kráčejších robotů. K tomuto účelu používá Hildebrandovy diagramy a s jejich pomocí je zde naznačeno několik druhů chůze u čtyřnohého a zejména šestinohého robota.

Druhá část práce seznamuje s obecnými matematickými principy, které jsou spojené s popisem pohybu končetiny robota. Definiuje pojmy jako stupně volnosti, pevný a koncový bod a nastiňuje jaké jsou druhy kloubů pro končetinu. Dále se zabývá přímou úlohou kinematiky a principy vedoucím k jejímu řešení, jako Homogenní transformace a úmluva Denavid-Hartenberg.

Třetí část se věnuje konkrétnímu řešení přímé úlohy kinematiky pro zvoleného šestinohého robota. Tuto úlohu řeší v rámci souřadnic jednotlivých noh a následně pomocí homogenní transformace tyto souřadnice převádí do souřadnic celého robota.

Dále je navržen algoritmus nastavení servomotorů pro dopředný pohyb robota a výsledek je simulován v programu MATLAB tak, aby byly simulovány trajektorie koncových bodů noh robota vzhledem k jeho souřadnicím.

Z Obr. 31 (přední pohled) vyplývá, že dochází k bočnímu smyku a pohyb není efektivní, protože dochází ke snižování adheze (robot ztrácí kontakt s podložkou). Z pohledu z boku (Obr. 30) plyne, že během chůze se rám robota nenaklání a je tudíž celý udržován ve stejné výšce vůči souřadnicím robota.

V budoucnu lze s malými úpravami tento program použít k simulaci i jiných typů pohybu nebo jej lze doplnit o plynulejší pohyb typu spline mezi nastavenými body.

LITERATURA

- [1] DUDEK, Gregory a Michael JENKIN. *Computational principles of mobile robotics: Locomotion* [online]. 2nd. Cambridge: Cambridge University Press, 2010 [cit. 2021-01-03]. ISBN 9781139855495. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/cz/academic/subjects/computer-science/computer-graphics-image-processing-and-robotics/computational-principles-mobile-robotics-2nd-edition?format=AR>
- [2] ASADA, Haruhiko a Jean-Jacques SLOTINE. *Robot analysis and control: KINEMATICS I: GEOMETRY*. 1. Chichester: Wiley, 1986. ISBN 0-471-83029-1.
- [3] GUREL, Canberk. 3. Fundamentals of Hexapod Robot. *Hackaday.io* [online]. 2017 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/21904-hexapod-modelling-path-planning-and-control/log/62326-3-fundamentals-of-hexapod-robot>
- [4] COXWORTH, Ben. Walking robot gets a helpful new set of wheels. *Newatlas.com* [online]. 2020 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://newatlas.com/robotics/anymal-quadruped-robot-wheels/>
- [5] Joint robotics. *Britannica.com* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/joint-robotics>
- [6] 3D One-Leg Hopper (1983-1984). *Ai.mit.edu* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/3D_hopper/3D_hopper.html
- [7] SMUTNÝ, Vladimír. *Robotika: Úvod do kinematiky* [online]. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/kinematika-notecz.pdf>
- [8] kinematika-notecz.pdf. Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC).
- [9] VIDLÁK, Marek. *Článekové roboty* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30309757.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Simeon Simeonov.
- [10] Denavit–Hartenberg parameters[online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/en/Denavit%E2%80%93Hartenberg_parameters
- [11] BOSTON DYNAMICS. Atlas®. [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.bostondynamics.com/atlas>
- [12] RAMDYA, Pavan, Robin THANDIACKAL, Raphael CHERNEY, Thibault ASSELBORN, Richard BENTON, Auke IJSPEERT a Dario FLOREANO. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits. *Nature communications* [online]. 2017, 2017(14494), 1-5 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms14494

- [13] CHVATÍK, Jiří. Šestinohý kráčeující robot. Brno, 2005. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [14] VEČERA, Václav. *Mechanický model paralelního manipulátoru se servy RX64*. Brno, 2022. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [15] KORČUŠKA, Robert, Valentin KÓSA, Matúš KOZOVSKÝ a Ctibor MAZAL. *Šestinohý kráčeující robot*. Brno, 2012. Projekt do předmětu BROB - Základy robotiky. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Vlastimil Kříž.
- [16] MEJZLÍK, Bohumil. *Šestinohý kráčeující robot*. Brno, 2007. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [17] CHROMÝ, Adam, Petr KOVÁŘ, Jaroslav MIKESKA a Martin ZRZAVÝ. *Šestinohý kráčeující robot*. Brno, 2011. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Tomáš Florián.
- [18] VELEBA, Tomáš. *Čtyřnohý kráčeující robot*. Brno, 2007. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [19] HEBEDA, Jiří. *Čtyřnohý kráčeující robot*. Brno, 2006. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Zdrojový kód programu matlab a program linkage je uložen na příloženém CD