

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Model kráčení robotu

Srpen 2015

Ondřej Macek

Abstrakt

Tato práce se zabývá modelováním kráčení robotu. Teoretická část pojednává o mobilních robotech, jejich rozdělení a praktickém využití, struktuře biomechanismů, se zaměřením na dolní končetinu člověka a o chůzi. Praktická část popisuje matematický model Rimless Wheel, fyzikální model téhož v grafickém programovacím prostředí Simulink/SimMechanics a z těchto modelů získané poznatky.

Klíčová slova

Rimless Wheel, chůze, kráčení, model, mobilní roboty, biomechanika, Matlab, Simulink, SimMechanics

Abstract

Macek, Ondřej. *Robot walking model [Model kráčení robotu]*. Pilsen, 2015. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Applied Sciences. Department of Cybernetics. Supervisor: Ing. Martin Švejda

The thesis deals with modeling of robotic walkers. The theoretical part concerns with mobile robots and its real use, with biomechanic structures and biped and quadruped gait. Practical part describes mathematical model of Rimless Wheel and its physical model developed by Simulink/SimMechanics and the results.

Key words

Rimless Wheel, gait, locomotion, model, mobile robots, biomechanics, Matlab, Simulink, SimMechanics

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne 18. srpna 2015

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Švejdovi za vedení bakalářské práce, poskytování cenných rad, za čas věnovaný konzultacím a trpělivost při vypracování této práce.

Děkuji MetaCentru za přístup k výpočetnímu prostředí, ve kterém probíhaly mé výpočty. MetaCentrum je součástí programu "Projects o. Large Infrastructure for Research, Development, and Innovations" (LM2010005).

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam symbolů a zkratk	viii
1 Úvod	1
2 Mobilní roboty	2
2.1 Rozdělení mobilních robotů	3
2.1.1 Kolové mobilní roboty	4
2.1.2 Pásové mobilní roboty	5
2.1.3 Kráčeující mobilní roboty	7
2.1.3.1 Jednonohé skákaující roboty	9
2.1.3.2 Čtyřnohé kráčeující roboty	10
2.1.3.3 Šestinohé kráčeující roboty	11
2.1.3.4 Osminohé kráčeující roboty	12
2.1.3.5 Dvounohé kráčeující roboty	13
3 Biomechanismy	16
3.1 Teorie biomechanismů	17
3.1.1 Klouby	17
3.1.2 Stupně volnosti (DoF)	18
3.1.3 Kostra dolní končetiny	19
3.1.3.1 Kinematika dolní končetiny člověka	22
4 Chůze	24
4.1 Stabilita a rozložení noh	24
4.2 Druhy chůze	26
4.2.1 Čtyřnohá chůze	26
4.2.2 Chůze po dvou nohách	27
4.2.2.1 Compass Gait	28
4.2.2.2 Pánevní rotace	29

4.2.2.3	Náklon pánve	30
4.2.2.4	Ohnutí kolena	30
4.2.2.5	Ohyb kotníku	31
5	Rimless Wheel	32
5.1	Matematický model	33
5.1.1	Pohybová rovnice	33
5.1.2	Krok	34
5.1.3	Výsledky modelu	35
5.2	Model v Simulinku	36
5.2.1	Kontakt se zemí	37
5.2.2	Výsledky simulace	37
5.3	Porovnání modelů	38
6	Závěr	42
A	Zdrojové kódy	43

Seznam obrázků

2.1	Rozdělení robotů podle druhu podvozku	3
2.2	Schéma a obrázek jednokolového robotu Gyrover	4
2.3	Různé konfigurace mobilního robotu MF 3	6
2.4	Schéma a kresba „parního muže“	7
2.5	Jednonohý skákající robot „Hopper“	9
2.6	Konstrukce čtyřnohého robotu typu „savec“	10
2.7	Dva druhy konstrukčních řešení typu „hmyz“	10
2.8	Schéma robotu BigDog od Boston Dynamics	11
2.9	Schéma rozmístění těžiště u šestinohých kráčejících robotů	11
2.10	Šestinohý kráčející robot Ambassador	12
2.11	Robot ROBUG III	12
2.12	Matematický model andropoidu	13
2.13	Robot PIERNUDA	14
2.14	Fotografie robotů WABOT 1 a WABOT 2	14
2.15	Robot ASIMO od firmy Honda	15
3.1	Aplikace Kutzbachovo kritéria mobility	18
3.2	Aplikace Kutzbachovo kritéria na struktury	19
3.3	Příklad (a) mechanismu správně spočítaného a (b), který nelze správně vypočítat Kutzbachovo kritériem	19
3.4	Kostra dolní končetiny člověka	20
3.5	Schématický model dolní končetiny člověka	22
3.6	Úplný kinematický model dolní končetiny člověka	23
4.1	Chůze vola	26
4.2	Klusající kůň	27
4.3	Cválající kůň	27
4.4	Schéma chůze	27
4.5	Schéma běhu	28
4.6	Výchýlení těžiště během jednoho kroku	28

4.7	Pohyb modelu Compass Gait	29
4.8	Pohyb modelu Compass Gait s rotačním vychýlením v kyčli	29
4.9	Pohyb modelu Compass Gait s kyčelní rotací a náklonem	30
4.10	Pohyb modelu Compass Gait s podsazením v kolenou	30
4.11	Pohyb modelu Compass Gait s měkkým došlapem kotníku	31
5.1	Rimless wheel na šikmé ploše	32
5.2	Pohyb inverzního kyvadla při jednom kroku	33
5.3	Inverzní kyvadlo na konci (-) a na začátku (+) kroku	34
5.4	Výsledky výpočtu matematického modelu Rimless Wheel	36
5.5	Noha došlapující na zem	37
5.6	Výsledky simulace modelu v Simulinku	38
5.7	Porovnání matematického modelu a modelu v Simulinku. Sklon svahu $\gamma = -2^\circ$	39
5.8	Porovnání matematického modelu a modelu v Simulinku. Sklon svahu $\gamma = -2^\circ$	40
5.9	Vývoj výchylky těžiště modelu v čase	40
5.10	Počáteční úhlové rychlosti kroků v ustálených cyklech v závislosti na sklonu svahu a počtu noh	41

Seznam symbolů a zkratek

Římské symboly

c	Koeficient tlumení
F	Síla
g	Gravitační zrychlení
I	Matice setrvačnosti
k	Tuhost pružiny
l	Délka nohy
\mathcal{L}	Lagrangian
m	Hmotnost
\mathbf{r}	Polohový vektor
\mathbf{v}	Rychlostní vektor
x, y	Poziční osy: vodorovná X a svislá Y

Řecké symboly

α	Polovina úhlu mezi paprsky rimless wheel
γ	Úhel sklonu podložky
θ	Úhel nohy od vertikály
$\dot{\theta}$	Úhlová rychlost nohy

Indexy

$+$	Těsně po dotyku se zemí
$-$	Těsně před zdvižením ze země

Zkratky

RW	Rimless wheel (kolo bez ráfku)
MM	Matematický model
SM	Model v Simulinku

1

Úvod

Odjakživa se člověk snažil postavit robota, který by za něj vykonával práci. S příchodem počítačů a prvních řídicích jednotek se tento lidský sen stal reálnějším. Dnes máme dostatečně výkonné výpočetní systémy, které jsou schopné řídit složité stroje, robotické manipulátory nebo mobilní roboty. Různé manipulátory, stroje, které v továrnách svařují, lakují, řezou a to všechno s přesností, kterou sám člověk nedokáže, již umíme vyrobit a jsou hojně využívány ve výrobních podnicích. Naopak skupina mobilních robotů je dnes velmi zajímavou oblastí robotiky.

Mobilní roboty najdou své uplatnění zejména v místech, kam člověk nemůže. Buďto z hlediska bezpečnosti nebo vzdálenosti či prostoru. Například na prohledávání sutí se již dnes využívají pásové mobilní roboty, které nesou kameru a polohovací zařízení, díky čemuž operátor ví, kde se robot nachází a co vidí. Podobné kolové nebo pásové roboty jsou často využívány v praxi. Podíváme-li se na přírodu, u většiny živočichů se vyvinuly jako lokomoční prostředek nohy v nejrůznějších podobách. Může se tedy zdát, že nohy jsou nejlepším prostředkem k přesouvání se z místa na místo. Nohy mají ale jednu velkou nevýhodu a tou je složitost. Ať už z hlediska stavby konstrukce nebo jejich řízení, nohy jsou vysoce komplexní systém, který příroda vyvíjela tisíce let.

Učení se od přírody a vytváření modelů kráčejících soustav inspirovaných kráčejícími živočichy je jistě dobrý způsob vývoje umělého kráčejícího systému. Po celém světě jsou vyvíjeny různé modely a reálné kráčející roboty všech možných podob a konstrukcí. My se zaměříme na dvounohé kráčející roboty a na jednoduchý neřízený model Rimless Wheel.

2

Mobilní roboty

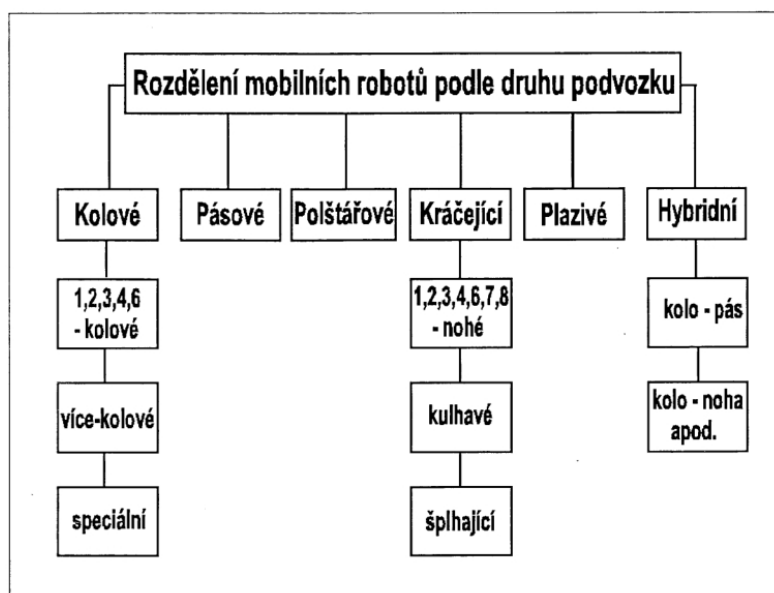
Roboty dnes využíváme ve všech různých odvětvích průmyslu a stále častěji i v běžném životě. Pro jejich přesnost, sílu, vytrvalost nebo citově neovlivněné chování jimi nahrazujeme práce, které jsou nebo v minulosti byly pro člověka namáhavé, a to jak fyzicky, tak i psychicky. Roboty takto namísto lidí přesně svařují, provádějí montážní nebo kontrolní činnosti, dělají povrchové nástřiky součástek nebo provádějí precizní chirurgické operace. Většina takovýchto robotů má ale jednu velkou nevýhodu a tou je špatná mobilita. Pevně umístěné manipulátory mohou pracovat jen v určité oblasti, a to tam, kam dosáhne jejich robotické rameno. Naopak mobilní roboty mohou svoji činnost provádět kdekoliv, kam se díky své mobilitě můžou přesunout. Mobilní roboty, které dnes na univerzitách a ve specializovaných firmách vznikají, jsou z valné většiny jedinečné. Téměř každý výrobek je unikát a vzniká za buďto speciálním účelem nebo, jak tomu převážně bývá, na univerzitách k výuce a výzkumu. Masová výroba mobilních robotů pro výrobní průmysl takřka neexistuje z důvodů [Haltmar, Knoflíček, 2000]:

1. Relativně levná pracovní síla, v opačném případě snaha o nízkou nezaměstnanost
2. Drahé řídicí systémy mobilních robotů, nákladný software a především drahé senzory.

Jedinou kategorií mobilních robotů, které jsou v praxi hojně využívány a vycházejí ze sériové výrobní linky, jsou automatické dopravní vozíky. Ty využívají velké závody pro přepravu materiálu, polotovarů nebo výrobků. Takové dopravní vozíky umí rozpoznat cestu, po které mají jet k cíli, počkat na uvolnění cesty, na které je jiný vozík, nebo samočinně detekovat a zvednout palety pro převoz. Komunikace automatických dopravních vozíků může probíhat buďto centralizovaně z řídicího centra, nebo decentralizovaně, kde se rozhoduje každý vozík zvlášť. [BEEWATEC, 2010]

2.1 Rozdělení mobilních robotů

Výběr vhodného způsobu přemísťování robota se odvíjí od prostoru, kde potřebujeme, aby robot pracoval. Při rovném nebo mírně zvlněném povrchu, kde není mnoho překážek, jsou vhodné kolové nebo pásové mobilní roboty. Při potřebě překonávání překážek nejsou kola vhodná a na řadu přicházejí kráčející mobilní roboty. Zde je vhodné se inspirovat přírodou a uvědomit si, že drtivá většina živočichů používá ke svému pohybu nohy. Výjimkou jsou vodní živočichové, kteří mají většinou ploutve. Počet noh u suchozemských živočichů se různí, ale zřejmě jsou nohy pro pohyb po souši nejlepší možností. S analogií kola se ku příkladu v přírodě vůbec nesetkáme. Jestliže porovnáme kráčející pohyb nohou a pohyb kolového robota, je kráčení mnohem složitější pohyb a je závislý na spolehlivou funkci cév, nervů a svalů, tedy, přeneseně do robotiky, řízení pohonů, navigace a lokomoce. Rozdělení robotů podle druhu lokomočního ústrojí je znázorněno na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Rozdělení robotů podle druhu podvozku

Rozdělení mobilních robotů z hlediska vzoru vzniku:

1. Umělé (nebiologické) soustavy

- inspirace nepochází z přírody, ale odvíjí se od objevu páky a jejího zdokonalení ve formě kladky, kola

Kolové soustavy

Pásové soustavy

2. Biologické soustavy

- evoluční vzor, člověk se snaží napodobit přírodu

Kráčející soustavy

Kulhavé soustavy

Plazivé soustavy

Šplhající soustavy

Létající soustavy

Plovoucí na hladině nebo pod vodou

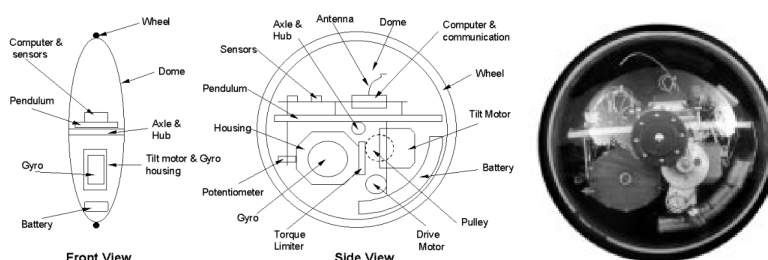
[KÁRNÍK a kol., 2000]

2.1.1 Kolové mobilní roboty

Povětšinou prototypové konstrukce kolových mobilních robotů dnes vznikají na základě požadavků koncového uživatele. Jedná se prakticky o jediný typ mobilních robotů, který je hojně (oproti ostatním typům) využíván v průmyslu. Některými svými částmi se shodují se stacionárními roboty (manipulátory, senzory, apod.), ale oproti nim mají zcela specifické části pro mobilní kolové roboty:

- lokomoční systém
- navigační systém

Prvotním problémem u kolových mobilních robotů je návrh uspořádání kol hnacích, hnaných a směrových. Poněkud speciální kategorií je kategorie jednokolových a dvoukolových mobilních robotů. Tyto roboty s sebou nesou problém nestability, kterou je potřeba vyvažovat, a proto je nutný komplexní řídicí systém a speciální senzory. Takový jednokolový robot byl vyvinut na Carnegie Mellon University, Pittsburgh s názvem „Gyrover“ a je zobrazen na obrázku 2.2. [Tsai a kol., 1999]



Obr. 2.2: Schéma a obrázek jednokolového robotu Gyrover

Tříkolové systémy přinášejí výhodu stability. Nevýhoda je složitější řízení do požadovaného směru. Čtyři kola zajišťují robotu ještě větší stabilitu, zvláště jsou-li poháněna všechna kola. S počtem hnaných kol se ale také zvyšuje konstrukční složitost. Kolové roboty nejsou vhodné do velkého terénu. Například výše zmíněné automatické dopravní vozíky potřebují ke svému pohybu rovný povrch a i menší výškové rozdíly ploch mohou být problém. Roboty s většími koly mohou přejíždět malé překážky, jako třeba prahy, kabely a podobné předměty ležící na podlaze.

Šesti a vícekolové mobilní roboty představují skupinu, která je na pomezí kolových a pásových mobilních robotů. Často jsou řízeny smykem, jako je tomu u pásových podvozků, nebo mají řízena dvě přední a dvě zadní kola. Šestikolové podvozky jsou konstruovány převážně pro venkovní použití, protože dokážou zdolávat členitější terén a nerovnosti.

Výhody kolových robotů:

- Relativně levné pořizovací náklady (oproti ostatním typům podvozků)
- Rychlé
- Dobrá manévrovatelnost
- Lehké
- Jednoduché - kola mají jen málo pohybujících se částí, u kterých hrozí rozbití

Nevýhody kolových robotů:

- I malé překážky bývají problém, kolo musí být alespoň dvakrát tak velké jako překážka, aby jí bylo schopné přejet.

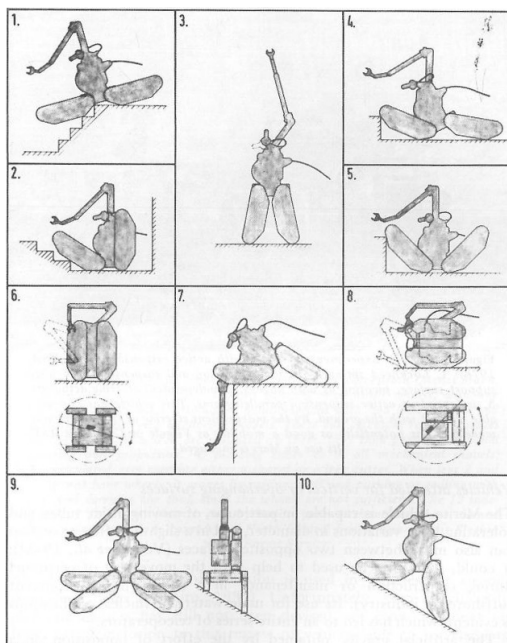
[Calin, 2015]

2.1.2 Pásové mobilní roboty

Pásové podvozky se využívají hlavně ve vnějším prostředí. Bývají využívány pro různé typy tanků, buldozerů, nosičů a jiných konstrukcí. Ve vnitřních prostorech uplatňují svou schopnost jízdy do nebo ze schodů. Pro pásové podvozky platí, že délka pásů a jejich rozvor mají přímý vliv na možnost manévrování. Řízení tohoto druhu podvozku je velmi nepřesné, využívá tzv. řízení smykem, a proto se využívají převážně pro roboty řízené operátorem na dálku.

Jedním z příkladů pásového mobilního robotu je dálkově řízený robot „MF 3“ se čtyřmi pásy, který byl vytvořen v KFA Julich Research Laboratory v Německu.

Lehký, elektricky napájený robot s mohutným ramenem, které unese až 80 kg, je využíváný pro jaderný průmysl. Díky možnosti komunikovat s řídicí deskou až na sto metrů může vykonávat operace, které by byly pro člověka životně nebezpečné. Může se pohybovat maximální rychlostí 30 m/min, je vybaven TV kamerami, reflektory, stereo mikrofony a také senzory pro měření gamma záření a teploty vzduchu. Jeho schopnost překonávat překážky je znázorněna na obr. 2.3. [cyberneticzoo.com, 2014]



Obr. 2.3: Různé konfigurace mobilního robotu MF 3

Výhody pásových robotů:

- Dobrý pohyb po kluzkých a nepevných površích
- Mohou se pohybovat po příkrých svazích, schodištích a přes rozbitý terén
- Mohou nést velké váhy

Nevýhody pásových robotů:

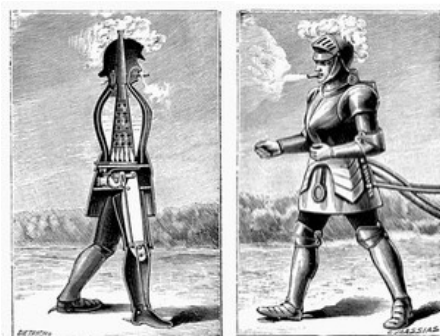
- Nízká rychlost
- Špatná manévrovatelnost
- Krátká životnost spousty malých koleček
- Náročné na údržbu a opravy

[Calin, 2015]

2.1.3 Kráčející mobilní roboty

Kráčející roboty nacházejí významné postavení v technických i netechnických oborech. Svým vzhledem a schopností pohybu můžou napodobovat člověka, zvířata nebo hmyz. Robot, který je podobný člověku nebo zvířeti, může být užitečný v oblasti psychologie a to jak pro člověka, který potřebuje psychologickou pomoc, tak pro výzkum potřeb jednotlivých lidí. Obecně můžeme říct, že lidé smýšlejí o robotovi, který vypadá jako živoucí stvoření, více přátelštěji a osobněji než o robotovi s klasickým strojově-kovovým vzhledem. [Libin, Libin, 2004]

Počátky kráčejících mechanismů můžeme hledat již v osmnáctém století. Tehdejší, na dnešní dobu celkem primitivní, návrhy měly povětšinou kombinaci noh a kol. Jedním z prvních čistě kráčejících robotů je například *The Steam Man*, zobrazený na obr. 2.4, zkonstruovaný Prof. George Moorem v roce 1825. Ten využíval



Obr. 2.4: Schéma a kresba „parního muže“

síly Behrensova parního motoru s otáčkami kolem 3000 ot/min. Tento parní robot měl sílu „deseti mužů“. [cyberneticzoo.com, 2009] Dnešní dokonalejší a podstatně pohyblivější kráčející roboty založené na nejnovějších konstrukcích mohou vykonávat nejrůznější úkoly, jako je například průzkum neznámého terénu, sbírání vzorků nebo jakékoliv úkoly v prostředí, ve kterém se člověk nechce nebo nemůže pohybovat. Podle účelu, k jakému má být robot určen, se odvíjí konstrukce kráčejícího ústrojí, například počet noh a velikost.

Od konstrukce noh se pak odvíjí styl chůze, kterým robot disponuje. Jinak bude chodit dvounohý robot, jehož stabilita není příliš velká, a jinak šestinohý, který se ze stabilní polohy uchyluje jen zřídka. Každá konstrukce má také jiné možnosti pohybovat se v terénu nebo překračovat překážky. K tomu, aby se mohl kráčející robot volně pohybovat v terénu, musí být nutně poháněn motory a tím být napájen. Na druhé straně existují řešení kráčejících robotů, které nejsou aktivně poháněny a využívají například gravitační síly, která je táhne z kopce dolů. Takovéto roboty nemají velké reálné využití, avšak jsou dobré pro studium chůze jako takové a mohou

tím pomoci vylepšení chůze aktivně řízených robotů a úspore energie.

Výhody kráčejících robotů:

- Mohou překračovat relativně vysoké překážky
- Mohou kráčet po schodech (nahoru i dolů)
- Mohou se pohybovat po extrémně členitém povrchu, zdolávat příkré svahy (o pevném podloží) nebo překračovat prohlubně a příkopy
- Mohou nastavovat výšku těla nad povrchem terénu (změnou natažení nebo vysunutí nohy) a tak můžou vyrovnávat nerovnosti povrchu
- Nohy se méně zabořují do terénu a způsobují menší poškození podloží než kolové podvozky

Nevýhody kráčejících robotů:

- Velký počet nezávisle řízených stupňů volnosti
- Velký počet akčních členů
- Složité řídicí systémy
- Potřeba častého rozjezdu a brzdění pohybujících se hmot (oscilující soustava) - nutnost dodávat energii po dávkách do různých míst.
- Výrobní náročnost
- Konstrukční složitost

Konstrukce noh je ze své podstaty složitý mechanismus, který s sebou nese výše uvedené nevýhody. Jde o soustavy kinematických dvojic, které potřebují samostatné řízení pro každý krok. Realizace projektu kráčejícího robotu je po všech stránkách náročnější, než jedná-li se o kolové nebo pásové roboty. Proto jsou kráčející roboty zatím „vědeckou raritou“, která se z laboratoří do praxe bude dostávat pomalu.

Na nohy kráčejícího robotu mohou být navíc opatřeny aktivními přísavkami, které umožní pevné spojení s pevnou plochou. Díky tomuto spojení mohou roboty šplhat po svislých stěnách nebo dokonce stopech. [KÁRNÍK a kol., 2000]

Kráčející, kulhající (modifikace kráčejících), plazivé a šplhající soustavy mají velkou inspiraci v přírodě. Člověk se jimi snaží napodobit přírodní pohybová ústrojí zvířat a lidí, a proto se tyto soustavy řadí do kategorie biorobotických soustav.

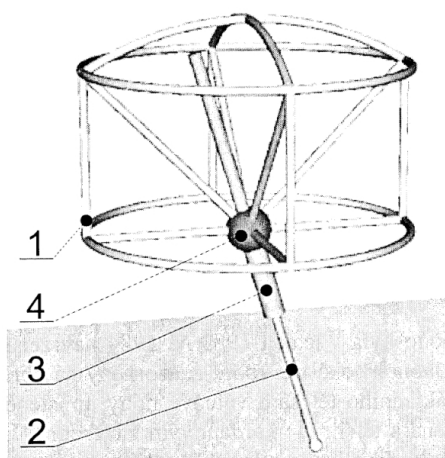
Biorobotika je součástí bioinženýrských oborů a její hlavní úloha je teoreticky řešit konstrukci robotických subsystémů zkonstruovaných na základě běžných vědomostí o stavech a chování živých biologických organismů. [KÁRNÍK, MARCINČIN, 1999]

Typů kráčejících mobilních robotů dnes existuje celá řada. Můžeme je rozdělovat podle nejrůznějších kritérií a jako nejčastější kritérium lze uvést rozdělení podle počtu noh, které robot používá ke svému pohybu. Většina konstrukcí má dvě až osm noh. Největší skupiny tvoří šesti a dvounohé kráčející roboty. O něco menší jsou kategorie čtyřnohých a osminohých robotů a nejmenší skupiny tvoří jednonohé skákající roboty, třínohé, pětinohé a sedminohé roboty. Mizivou skupinu ještě tvoří netypické robotické konstrukce, které mohou mít i více noh.

2.1.3.1 Jednonohé skákající roboty

Výhoda jednonohých skákajících robotů je, že není třeba řešit složité vazby pohybu nohou, jako je tomu u vícenohých kráčejících robotů. Je zde tedy minimální požadavek na vybavení senzory a ostatními prostředky, což má vliv na menší poruchovost celého systému. Samotné řízení už tak jednoduché není. Robot musí při svém kroku, respektive skoku, vyskočit dostatečně vysoko, aby noha volně kývla do nové pozice dříve, než dojde ke kontaktu s povrchem. Musí zde být také dostatečně velký poměr momentů setrvačnosti těla a nohy, aby pohyb nohy během letu příliš neovlivnil orientaci těla.

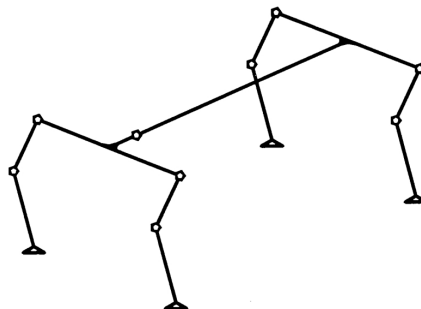
Na univerzitě Carnegie-Mellono byla v letech 1983–84 navržena konstrukce jednonohého skákajícího robota „Hopper“ zobrazeného na obr. 2.5. Skládá se z kruhového těla (1) a válcové nohy (2) umístěné pod středem těla a spojené s tělem kardanovým kloubem (4). V noze je pneumatically válec (3) pracující ve svislém směru, který zajišťuje pohyb robotu. [KÁRNÍK a kol., 2000]



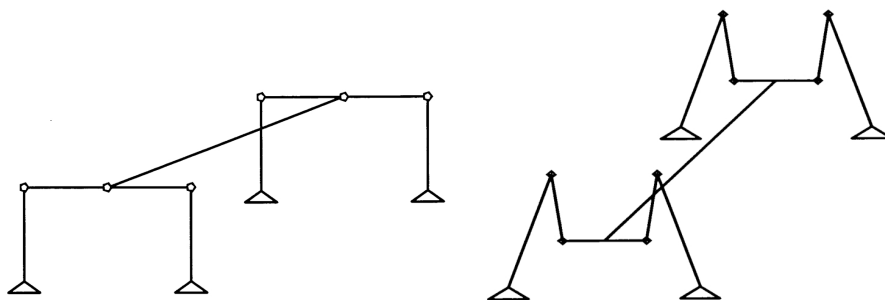
Obr. 2.5: Jednonohý skákající robot „Hopper“

2.1.3.2 Čtyřnohé kráčejíci roboty

Konstrukce čtyřnohých kráčejících mechanismů je většinou inspirována anatomií zvířat. Můžeme je rozdělit na konstrukce typu „savec“ (viz obr. 2.6) a „hmyz“ (viz obr. 2.7) a ostatní. Toto pojmenování vzniklo na základě kinematické stavby noh a ne jejich počtu. Čtyřnohé mechanismy jsou stabilní ve statickém stavu,



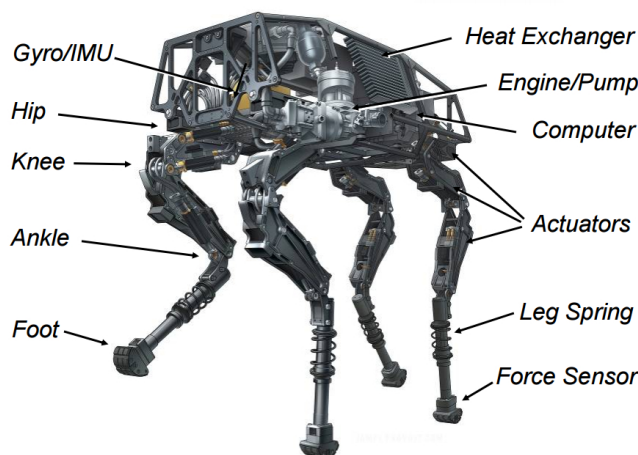
Obr. 2.6: Konstrukce čtyřnohé robotu typu „savec“



Obr. 2.7: Dva druhy konstrukčních řešení typu „hmyz“

ale v okamžiku, kde je jedna noha ve vzduchu, se těžiště nachází nad hranou, nebo v její blízkosti, trojúhelníka vytvořeného ze třech zbývajících noh a to může, z důvodu vychýlení konstrukce v důsledku náhlé překážky nebo prohlubně, robota převážít na nohu vykonávající krok. [KÁRNÍK a kol., 2000]

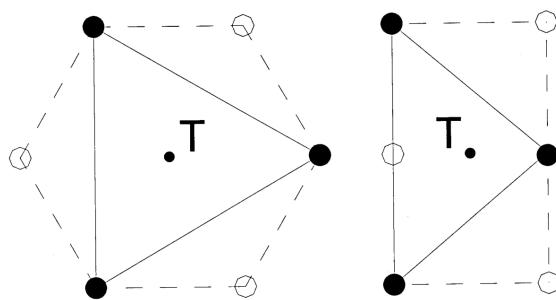
Nejvyvinutějším terénním čtyřnohým robotem v dnešní době je robot „BigDog“ vyvinutý v laboratořích Boston Dynamics, obr. 2.8. Jedná se o robota téměř metr dlouhého a tři čtvrtě metru vysokého, který chodí, běhá, šplhá do i ze svahů a může přenášet těžké náklady. Běhat umí rychlostí 4 mph (6.4 km/h), stoupat svahy o 35°, pohybovat se skrz suť, rozbitý terén, přes vodu i sníh a ke svým 108 kilogramům váhy může přidat ještě 15 kg nákladu. [Raibert a kol., 2008]



Obr. 2.8: Schéma robotu BigDog od Boston Dynamics

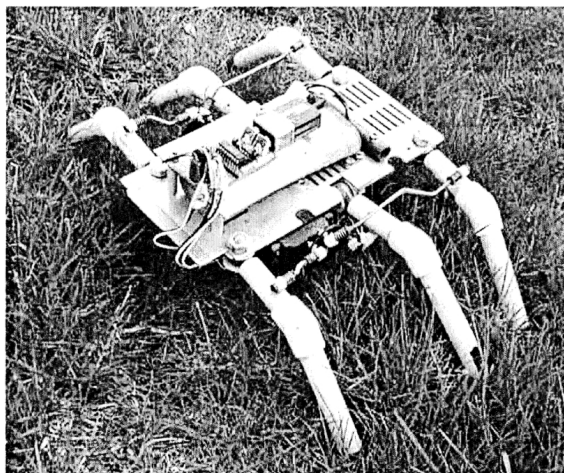
2.1.3.3 Šestinohé kráčející roboty

Zjevně nejpočetnější skupina kráčejících robotů jsou šestinohé kráčející roboty. Existuje celá škála velikostí i hmotností těchto robotů. Od pár centimetrů do několika metrů, od několika gramů po několik tun. Šestinohé kráčející roboty skvěle splňují podmínky statické stability, protože 3 nohy vždy zůstanou v kontaktu s povrchem a na rozdíl od čtyřnohých robotů zůstává těžiště šestinohého robotu, jak je zobrazeno na obr. 2.9, stále uvnitř trojúhelníku vytvořeného body dotyku a to dokonce v blízkosti těžiště tohoto trojúhelníku. Robot je tak vysoce stabilní, nepotřebuje tolik senzorů, které kontrolují stabilitu, a zjednoduší se tím tak i řídicí systém. U těchto robotů můžeme najít paralelu s hmyzem, který má nejčastěji 6 noh (a více). Jako pří-



Obr. 2.9: Schéma rozmístění těžiště u šestinohých kráčejících robotů

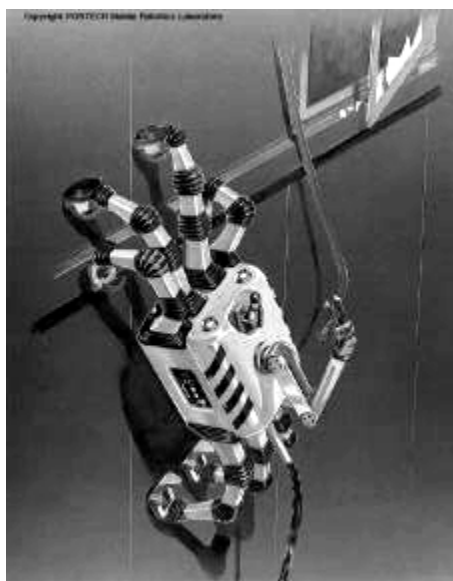
klad šestinohého kráčejícího robotu můžeme uvést robot Ambassador (obr. 2.10), který byl vyvinut v USA na Manalapan High School, Englishtown. Jde o 130 mm vysoký, 300 mm dlouhý 12kg robot, který unese závaží o hmotnosti 1 kg. Jednotlivé klouby robotu jsou poháněny stejnosměrnými servomotory napájenými z 7,2V baterie a může se pohybovat rychlostí 0,6 m/min.



Obr. 2.10: Šestinohý kráčejíci robot Ambassador

2.1.3.4 Osminohé kráčejíci roboty

Osminohé kráčejíci roboty poskytují všechny výhody stability šestinohých robotů, kromě toho jsou vhodné například pro pohyb po kolmých stěnách nebo potrubí. Touto výhodou disponují tím, že čtyři své nohy udržují pevný styk s podložkou a další čtyři se mohou pohybovat. Kdyby jedna noha ztratila kontakt s podložkou, zbylé tři mohou takový výpadek ustát. Robot ROBUG III, obr. 2.11, je příkladem kráčejíciho a šplhajícího robota, který byl vyvíjen v letech 1993 až 1995 na University of Portsmouth, Salford v Anglii. Robot váží 60 kg a je schopen nést náklad vážící až 100 kg a to jak v horizontálním kráčení, tak ve vertikálním šplhání. Díky přísavkám je schopen šplhat po opláštěných budov. Pro pohyb tohoto robota byl modelem krab. Robot má nohy se čtyřmi klouby a pohybuje se do strany rychlostí 0,1 m/s.

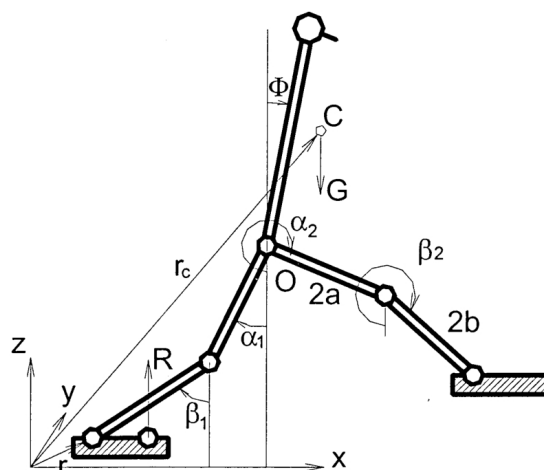


Obr. 2.11: Robot ROBUG III

2.1.3.5 Dvounohé kráčejíci roboty

Dvounohé kráčejíci roboty nacházejí inspiraci v pohybu a konstrukci noh člověka. Dvounohé roboty jsou zřejmě staticky nestabilní. Mohou ale využívat statiky dynamické chůze. Je zde jistá analogie s letadly. Kdyby se letadlo ve vzduchu nepohybovalo určitou rychlostí, spadlo by. Ale jakmile má požadovanou rychlost, může se pohybovat stabilním letem. Řízené dvounohé kráčejíci roboty potřebují z důvodu udržení stability spoustu senzorů, což klade vysoké nároky na řídicí systém. Pohony, které jsou většinou umístěné přímo v kloubech, musí také vyvinout dostatečně velkou hnací sílu.

Návrh těchto robotů většinou vychází z matematického modelu, který je zobrazen na obr. 2.12. Existují však i jiné koncepty, jakým je například robot PIERNUDA (obr. 2.13) vyvíjený od roku 1996 v Mexiku v laboratoři LINDA (Laboratorio de INvestigacion para el desarrollo Academico). Robot je 95 cm vysoký, váží 5 kg, jeho rám je vyroben z lehkých slitin a může kráčet i po schodech. Značné pokroky



Obr. 2.12: Matematický model andropoidu

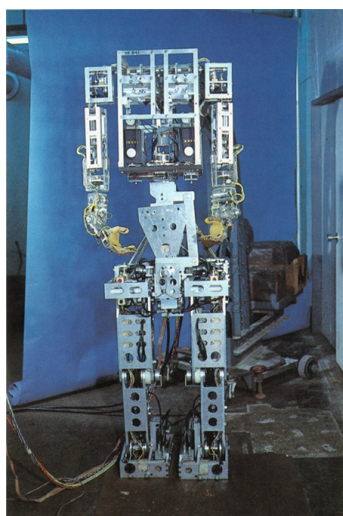
ve vývoji konstrukcí antropomorfních robotů, což jsou roboty, jejichž architektura je koncipována na základě modelování fyzických znaků člověka, se dnes projevují zejména díky výzkumu umělé inteligence a nových, efektivnějších konstrukcí dílčích prvků průmyslových robotů. Díky miniaturizaci pohonů a rozvoji vyspělejších řídicích systémů dnes mají laboratoře mnohem více možností pro konstruování, než jak tomu bylo v předhistorické etapě robotiky, kdy byly snahy vykonstruovat androidního robota podle lidských fyziologických konstrukčních prvků, jako jsou nohy, trup, ramena a ruce.

Jednoho z prvních androidních robotů zkonstruoval profesor Ichiro Kato na Waseda University v Japonsku v roce 1973. Robot WABOT 1, uvedený na obr. 2.14(a),



Obr. 2.13: Robot PIERNUDA

je vybavený dvěma pracovníma rukama po sedmi stupních volnosti a dvěma nohama s pohyblivými chodidly. Robot má dále dva dálkové vizuální receptory - kamery a umí rozpoznávat hlasové příkazy a odpovídat na ně. To vše pouze v japonštině. WABOT 1 umí kráčet dopředu po dvou nohách a při pohybu měnit směr doleva nebo doprava. Při kráčení zachovává stabilitu. Každá z jeho rukou je schopná uchopit předmět a předat ho druhé ruce. Obě jsou osazeny dotykovými snímači, díky kterým robot „cítí“ uchopený předmět. Druhá generace tohoto robota, WABOT 2 z r. 1984, obr. 2.14(b), je schopný číst noty a hrát na elektrických varhanách pomocí prstů na rukou a noh. Také je schopný lépe konverzovat. Oproti jeho předchůdci vypadá více jako člověk, měří 180 cm a váží 90 kg. [Waseda, 2008]



(a) WABOT 1



(b) WABOT 2

Obr. 2.14: Fotografie robotů WABOT 1 a WABOT 2

Asi nejvyspělejším humanoidním robotem v dnešní době je robot ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility) od firmy Honda, na obr. 2.15. Ten byl vyrobený v roce 2000 a od té doby je vyvíjen po znalostní a pohybové stránce. Robot je 130 cm vysoký, váží 50 kg, dokáže uchopit do každé z rukou až 500g náklad a celkově má 57 stupňů volnosti. Postupným vývojem dosáhl možnosti kráčet až 2,7 km/h a běžet až 7 km/h. Umí rozpoznávat pohybuující se objekty, pózy a gesta, zvuky a obličej lidských lidí. Dokáže detekovat i více pohybuujících se objektů zároveň a to díky dvěma kamerám, které mu zprostředkovávají vizuální obraz okolí. Díky těmto funkcím je schopný následovat určitého člověka nebo poslouchat příkazy jen určitých lidí. Slyší na své jméno a rozpozná podle zvuku kolize nebo spadlé předměty. Díky svým pohybovým sensorům ví, v jaké je pozici, propočítává potřebnou délku, rychlost a směr následujícího kroku. Při chůzi plynule mění směr bez zastavení, zachovává stabilitu po celou dobu cyklu jednoho kroku. Dokáže stoupat do schodů i sejít z nich dolů a je schopný běhu, což znamená, že v jednom okamžiku se nedotýká ani jednou nohou země a nachází se celý ve vzduchu. Umí kopnout do míče tak, aby míč letěl požadovaným směrem, a dělá radostná gesta, když se trefí do brány. Je schopný přinést pití v kelímku, který je na tácu. Robot ASIMO od firmy Honda je důležitým milníkem v oblasti vývoje humanoidních robotů. Vzhledem k jeho dynamickým a plynulým pohybům můžeme v několika desetiletích očekávat robota schopného tak plynulé chůze, že ji téměř nerozlišíme od chůze člověka. [HONDA, 2015]



Obr. 2.15: Robot ASIMO od firmy Honda

3

Biomechanismy

Biomechanika jako obor zastřešený bionikou je teoreticko-aplikační vědní obor, který se zabývá studiem struktur biologických objektů, procesů, které na nich probíhají, a jejich chováním. Podle typu objektu, na který se biomechanika aplikuje, ji lze členit na biomechaniku člověka, flóry a fauny.

Bionika je relativně nový obor, který vznikl díky vzájemnému ovlivňování se biologických a technických disciplín. Začala se dívat na živé organismy jako na složité stroje. Organické dynamické systémy v sobě schovávají stavební členy, které mohou být chápány jako analogie k členům technických mechanických struktur. Vědci zabývající se bionikou se soustředují na čtyři základní oblasti:

- Výzkum receptorů, nervových buněk a neuronových sítí s cílem použít nabyté znalosti při konstrukci snímačů, neuronových modelů a umělých kybernetických soustav.
- Rozpoznávání optických a akustických obrazů - pro úlohy navigace, prostorové orientace a jejich praktického použití.
- Učící se mechanismy, ukládání a vybírání informací z paměti, řešení problémů, řízení pohybů a složitého chování živočichů s cílem napodobit nejen fyzické, ale i psychické projevy.
- Biotechnické soustavy - smyslové a pohybové protézy a umělé orgány, systémy typu člověk–stroj, člověk–počítač, člověk–robot.

Mezi nejdůležitější projekty bioniky v oblasti konstrukce robotických zařízení patří výzkum a vývoj biomechanických robotů. Zkoumají se zde jak geometrické charakteristiky koster a svalů, tak neurologické procesy spojené s aktivací svalů před nadcházejícím pohybem. Díky tomu můžeme navrhnout strukturu mechanismu jako analogii ke kostře, která je jeho biologickým příkladem. Mezi zkoumané





geometrické charakteristiky patří ohýbání, roztahování a jiné speciální pohyby končetin.

3.1 Teorie biomechanismů

Teorie biomechanismů zkoumá pohyblivost jednotlivých spojů (kloubů) pohyblivých členů biologického objektu. Při zkoumání mechanické struktury je jejím základem člen. Předpokládá se, že tyto členy jsou nedeformovatelná, neboli tuhá tělesa. Členy jsou spojeny s jinými členy pohyblivými vazbami a vytvářejí kinematické dvojice. Spojením kinematických dvojic v soustavu získáme kinematický řetězec. Tyto bývají často označovány jako posloupnost kloubů, např.: \underline{RRR} , \underline{RPR} .

3.1.1 Klouby

Vazby kinematických dvojic mohou být různého druhu. Jedná se prakticky o jakékoliv spojení dvou těles, přičemž každý kloub přidává na základě jeho konstrukce určitý počet stupňů volnosti, jinými slovy klouby umožňují mechanismu pohyb. Typ kloubu, který je použit pro danou kinematickou dvojici, značí písmenný symbol. Je-li symbol podtržený, znamená to, že je daný kloub aktivně řízen. Neřízené klouby se pohybují pouze pasivně na základě vnějších sil působících na kinematickou dvojici. V tabulce 3.1 jsou uvedeny nejčastěji používané vazby kinematických dvojic s jejich písmennými symboly, počty stupňů volnosti, které přidávají mechanismu, počty vazeb, které poskytují v trojrozměrném prostoru, a jejich schématická značka.

Název	Symbol	DoF	Vazby	Značka
Posuvný	P	1	5	
Rotační	R	1	5	
Cylindrický	C	2	4	
Sférický	S	3	3	

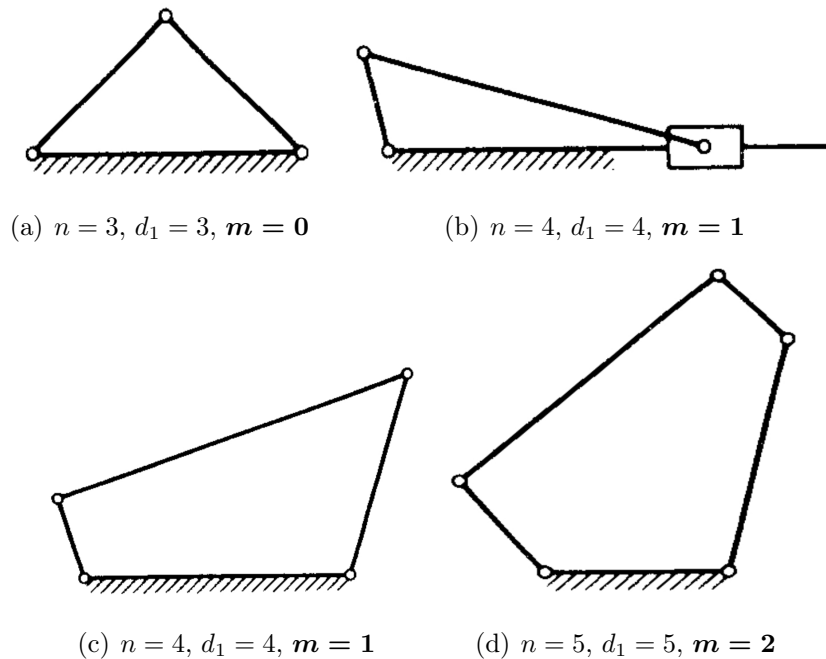
Tab. 3.1: Stupně volnosti vazeb kinematických dvojic

3.1.2 Stupně volnosti (DoF)

Počet stupňů volnosti (ang. Degree of Freedom - DoF) odpovídá počtu vstupních parametrů, které musí být řízeny nezávisle pro dosažení požadovaného cíle daným mechanismem. Berme v úvahu, že každý člen tuhého mechanismu v prostoru, myšleno v trojrozměrném, má šest stupňů volnosti, a to tři translační (posuvné) a tři rotační. Plošný mechanismus má tedy tři stupně volnosti, dva posuvné a jeden rotační. Ve většině případů máme mechanismus ukotven, tedy má základnu a tento člen základny je nehybný. Jestliže jeden ze členů určíme jako základnu, pak je počet stupňů volnosti mechanismu $6(n - 1)$, kde číslo 6 odpovídá maximálnímu počtu stupňů volnosti prostoru. Za každou připojenou vazbu pak ještě musíme odečíst počet stupňů volnosti, které mechanismu v daném prostoru odebírá. Připojíme-li například kloubní spoj, který poskytuje jeden stupeň volnosti, musíme jej odečíst od původního počtu stupňů volnosti a získáme tím počet vazeb, kterými kloubní spoj disponuje, což například v prostoru je $6 - 1 = 5$ vazebních stupňů. Jestliže označíme d_1 vazby s jedním stupněm volnosti a analogicky d_2, d_3, d_4, d_5 , vazby s dvěma, třemi, čtyřmi a pěti stupni volnosti, je pohyblivost mechanismu daná vztahem.

$$m = 6(n - 1) - 5d_1 - 4d_2 - 3d_3 - 2d_4 - 1d_5 \quad (3.1)$$

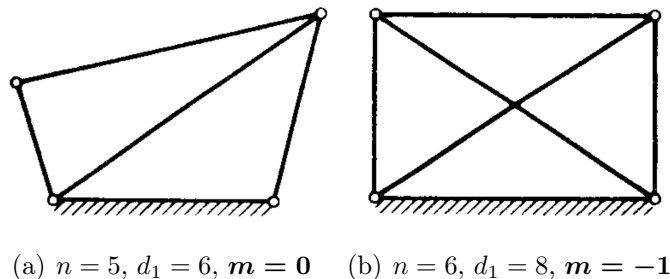
Rovnice (3.1) se nazývá Chebychev–Grübler–Kutzbachovo nebo zkráceně Kutzbachovo kritérium pro pohyblivost prostorových mechanismů. Jestliže pro $m > 0$



Obr. 3.1: Aplikace Kutzbachovo kritéria mobility

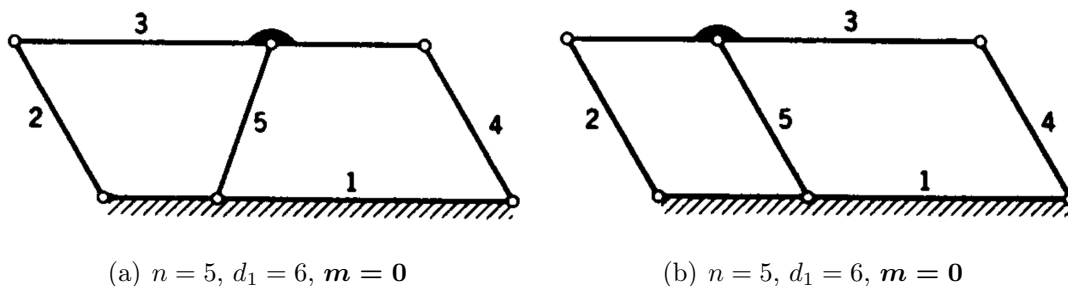
Kutzbachovo kritérium platí, pak mechanismus s $m = 1$ může být řízen jedním

vstupem. Pro $m = 2$ potřebujeme dva nezávislé vstupní parametry. Jestliže $m = 0$, pohyb není možný a jedná se o pevnou strukturu. Poslední možnost je $m < 0$. V takovém případě je mechanismus přeuročený a představuje staticky neurčitou strukturu. Kutzbachovo kritérium nefunguje ve všech případech. V příkladu na obr. 3.3(a)



Obr. 3.2: Aplikace Ktzbachovo kritéria na struktury

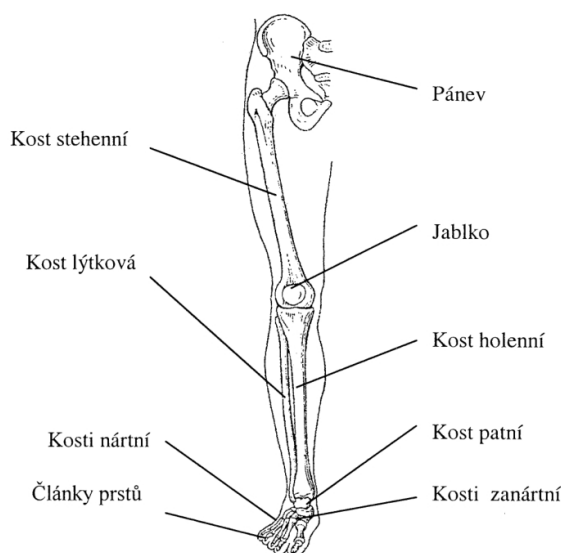
vidíme strukturu, která má zřejmě $m = 0$. Pro ověření ukažme, že počet členů v mechanismu je $n = 5$ a počet stupňů volnosti $d_1 = 6$. Mechanismus je rovinný, takže $3(n - 1) - 2d_1 = 3(5 - 1) - 2 \cdot 6 = 0$. Na vedlejším obrázku 3.3(b) vidíme podobný mechanismus, který má ale členy 2, 5 a 4 rovnoběžné a tím si zachovává jeden stupeň volnosti. Kutzbachovo kritérium ale neuvažuje tyto speciální případy a výpočet provede shodně s příkladem mechanismu z obr. 3.3(a). [Shigley, Uicker, 1981]



Obr. 3.3: Příklad (a) mechanismu správně spočítaného a (b), který nelze správně vypočítat Kutzbachovo kritériem

3.1.3 Kostra dolní končetiny

Abychom se mohli zaměřit na konstrukci noh dvounohého kráčejičího robotu, je dobré se seznámit s kinematickou stavbou dolní končetiny člověka, které jsou hlavní součástí nosného systému celého těla. Jsou složeny z mohutných kostí, které musí vydržet nápor tělesné tíhy, velkých kloubů a svalů, které umožňují pohyb a vyvažování těžiště. Kostra nohy je zobrazena na obr. 3.4 a skládá se z **pletence dolní končetiny** a **kostry volné dolní končetiny**.



Obr. 3.4: Kostra dolní končetiny člověka

Pletenec dolní končetiny tvoří pánevní kost. Ta tvoří spojnici mezi páteří a dolními končetinami. Z hlediska zátěže tvoří převodník mezi dolními končetinami a osovou částí těla. Tato kost zajišťuje pevnou, stabilní, ale i odpruženou základnu pro pružnou páteř. **Kostra volné dolní končetiny** je tvořena třemi částmi:

- **Stehenní kost** – nejmohutnější kost v lidském těle, která se nachází mezi pánví a kolenem. Má prohnutý tvar a na jejím horním konci je ukončena kulovou hlavičkou s rozsahem dvou třetin kulové plochy. Na dolním konci se rozšiřuje do dvou kloubů, vnějšího a vnitřního, kterými se opírá o předkoleno.
- **Holenní kost** – kost s trojbokým profilem a ostrou přední hranou. Horní konec se, podobně jako je tomu u dolního konce stehenní kosti, rozšiřuje do dvou kloubů, kde na každém z jejich konců je malá prohlubeň. Dolní část je silnější a je zakončena kloubovou dotykovou plochou, která spojuje kost se zánártními kostmi. Holenní kost je na palcové straně předkolena.
- **Lýtková kost** – tenká štíhlá kost, která je na horní straně rozšířená do hlavičky s kloubovou plochou a dotýká se tím holenní kosti. Na dolním konci vbíhá svou dotykovou plochou až k nártní kosti. Lýtková kost je na malíkové straně předkolena.

Klouby, na které doléhají kosti kostry volné dolní končetiny, mají mimo jiné díky spojení právě s těmito kostmi následující pohybové schopnosti. Úhly jsou přibližně a jejich hodnoty se odvíjejí od mobilních schopností každého jedince.

A) Kyčelní kloub

- **Přednožení** – 90° při nataženém kolenu, až 150° při uvolněném kolenu.
- **Zanožení** – maximálně 25° až 30°
- **Unožení** – (pohyb směrem ven) 45°
- **Přinožení** – (pohyb dovnitř) 45°, při překřížení noh se označuje jako hyperpřinožení
- **Vnitřní rotace pánve** – 35° až 40°
- **Vnější rotace** – 40° až 50°, mezi oběma pohyby je rozsah asi 90°

B) Kolenní kloub

- **Ohnutí** – aktivní do 120°, pasivní až do 140°
- **Natažení** – pohyb do nulové polohy. Pohyb za tuto hranici se nazývá hyperextenze a může být až 10°. Celkový rozsah ohýbání je max. 160°.
- **Vnitřní rotace předkolena** – do 40°
- **Vnější rotace** – 15° až 30°, při natažení kolena je rotace nulová

Dotyk těla člověka s terénem zajišťuje nejsložitější část nohy a skládá se z 26 kostí:

- **Zánártní kosti** – sedm krátkých kostí ve dvou řadách
- **Nártní kosti** – pět kostí, které se číslují od I do V od strany palce
- **Články prstů** – mají podobnou stavbu, jako kosti ruky, jsou však kratší. Palec má dva články, ostatní prsty po třech. Druhý a třetí článek malíku bývá srostlý

Analýza možných pohybů v kotníku a v prstech:

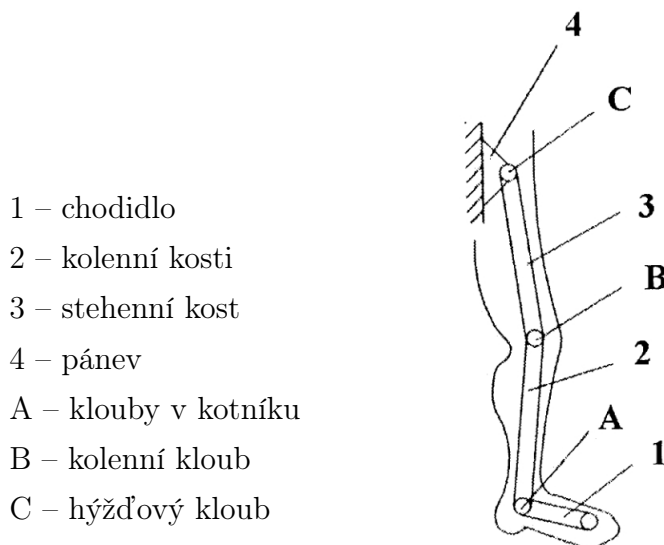
A) Kotník

- **Ohyb** – 20° až 30° směrem k předkolenu, 30° až 50° opačným směrem
- **Pootočení nohy kolem vertikální osy** – 35° až 45° při nataženém kolenu, až 90° při ohnutém kolenu
- **Rotační pohyb okolo podélné osy** – 15° zdvih malíkové hrany se zafixovanou palcovou hranou, 35° zdvih palcové hrany se zafixovanou malíkovou hranou.

[KÁRNÍK, MARCINČIN, 1999]

3.1.3.1 Kinematika dolní končetiny člověka

Dolní končetina člověka představuje, podobně jako většina končetin zvířat, kinematický řetězec tvořený kinematickými dvojicemi založenými výhradně na rotačním pohybu. To je charakteristická vlastnost pro biokinetické řetězce na rozdíl od technických kinematických řetězců, kde se často setkáme s posuvným pohybem. Schéma dolní končetiny člověka s transformací základních částí na členy kinematického řetězce je zobrazeno na obr. 3.5. Horní a dolní kotníkový kloub patří mezi nejdů-



Obr. 3.5: Schématický model dolní končetiny člověka

ležitější klouby nohy. Rotační pohyb kotníku opisuje všechny tři osy, takže tento kloub, vezmeme-li ho jako celek, poskytuje 3 stupně volnosti. Kolenní kloub je největší a nejsložitější kloub v lidském těle. Je tvořený stehenní kostí, kolenní kostí a jablkem a umožňuje kyvný a rotační pohyb, což mu dává 2 stupně volnosti. Hýžd'ový kloub je kulový, se 3 stupni volnosti. Další klouby nohy, nártní a prstní, jsou už jen málo pohyblivé. [KÁRNÍK, MARCINČIN, 1999]

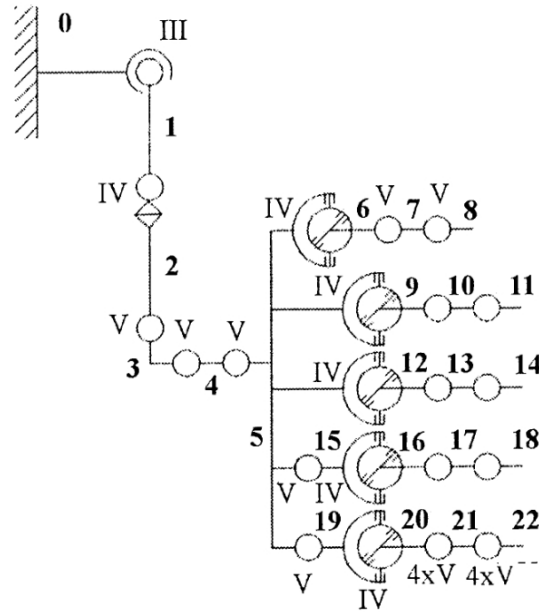
Celkový kinematický řetězec dolní končetiny, zobrazený na obr. 3.6, se skládá z 22 volných členů a pevného rámu - zbytku těla, to přináší $n = 23$ členů. Podle Kutzbachova kritéria (3.1) je pohyblivost posledního členu úplného řetězce m rovna

$$m = 6 \cdot (k - 1) - 5d_1 - 4d_2 - 3d_3,$$

$$m = 6 \cdot (23 - 1) - 5 \cdot 15 - 4 \cdot 6 - 3 \cdot 1,$$

$$m = 30.$$

Ze schématu na obr. 3.6 je zřejmé, že většina pohyblivých členů je umístěna v prstech nohy. Když se ale podíváme na modely dvounohých kráčejších robotů



Obr. 3.6: Úplný kinematický model dolní končetiny člověka

vyvíjené v laboratořích po celém světě (kapitola 2.1.3.5), můžeme si všimnout, že drtivá většina z nich neuvažuje nohu od kotníku dále, podle modelu člověka, tedy nemá prsty. Tím se značně sníží pohyblivost, respektive počet stupňů volnosti, posledního členu řetězce. Často se pro vývoj kráčejících robotů neuvažuje takto složitý model dolní končetiny. Nejsložitější část, chodidlo s prsty, můžeme brát jako jeden dále nedělitelný člen. Jestliže budeme uvažovat takto zjednodušený model, sníží se pohyblivost posledního členu z původních $m = 30$ na

$$m = 6 \cdot (k - 1) - 5d_1 - 4d_2 - 3d_3,$$

$$m = 6 \cdot (6 - 1) - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1,$$

$$m = 8.$$

4

Chůze

Chůze je typ pohybu živočichů, včetně člověka, při kterém se používají končetiny k přesunu po pevném povrchu. Většina živočichů používá několik různých typů chůze, které mění podle dané situace, která je odvislá od struktury terénu, potřebě vyhýbat se překážkám a energetické efektivity. Různí živočichové využívají různého druhu chůze, který se odvíjí od anatomie daného živočicha a evolučních potřeb. Velcí živočichové, jako savci mají čtyři nohy, hmyz mívá šest a více noh. U několika druhů savců se postupně vyvinula schopnost používat k chůzi pouze dvě nohy a speciálně v případě člověka vývoj rovnováhy dospěl až do stavu, kdy jsme schopni skákat pouze po jedné noze¹. Tato výjimečná schopnost zachování rovnováhy je ale vyvážená vysoce komplexním aktivním řízením.

4.1 Stabilita a rozložení noh

Nejmenší počet noh pro zachování statické stability je tři. Totéž ale neplatí pro dynamickou stabilitu, kde chceme vyvinout pohyb. Mohli bychom vyrobit robota se třemi nohami, který my uměl stabilně stát. Jakmile ale bychom po něm chtěli, aby se začal pohybovat kráčivým pohybem, musel by jednu nohu zvednout a tím by přišel o důležitou oporu a dostal by se do nestabilní polohy. Vezměme v úvahu, že robot, aby zachoval stabilitu při chůzi, musí mít alespoň šest noh. Zde nebudeme uvažovat, pětinohé struktury, které nenachází analogii v přírodě a obecně se považují za netypické. Šestinohý robot je schopný udělat kro třemi nohami a další tři použít jako stabilní oporu.

Brouci a pavouci jsou ihned po narození schopni kráčivého pohybu. Díky vyššímu počtu noh nemusí řešit tak složitý problém zachování stability, jako je tomu

¹Při vývoji dětí je jedním z testů, které potvrzují dosažení pokročilých pohybových dovedností dítěte, test schopnosti skákat na jedné noze.

u čtyřnohých savců. Ti ihned po narození nejsou schopni chůze. Několik prvních minut trvá, než se na čtyřech nohách naučí stabilně stát a mnohem víc času jim zabere naučit se chodit bez pádů. Pro člověka s pouze dvěma nohama je tento problém ještě větší. Dvě nohy nejsou schopny sami o sobě zajistit ani statickou stabilitu. Kojencům trvá několik měsíců, než se naučí stát na vlastních nohách bez další opory a než se naučí chodit, později běhat, skákat a stát na jedné noze.

Příroda nám připravila opravdu široké spektrum příkladů v obou extrémech. Například nohy housenky mají pouze jeden stupeň volnosti a to v podélném směru nohy. Housenka nohy vysouvá pomocí hydraulického tlaku vytvořeného stažením článků a jejich povolením, kdy tlak na nohu povolí, jí zase zasune. Mechanicky je noha housenky velmi jednoduchá a používá minimum aktivních svalů pro vyvinutí pohybu. Na druhé straně noha člověka má více než sedm hlavních stupňů volnosti a potřebuje více než patnáct svalových skupin k ovládní osmi hlavních kloubů.

V případě mobilních robotů je minimální počet stupňů volnosti potřebných k pohybu jednotlivých noh roven dvěma, aby mohl robot nohu zvednout a zhoupnout jí dopředu pohybu. Častějším případem jsou nohy se třemi stupni volnosti, které dovolují větší manévrovatelnost. Poslední vývoj v oblasti dvounohých robotů ukazuje, že je výhodou přidat čtvrtý stupeň volnosti do kotníku nohy. Noha pak lépe přilne k povrchu. Obecně se dá říct, že větší počet stupňů volnosti přináší lepší pohyblivost celého systému, avšak každý přidaný kloub zvyšuje váhu robotu a je nutné jej řídit a napájet.

Pro případ vícenohého robota můžeme zjistit počet různých událostí, které může vykonat v rámci kroku. Události noh mohou být *zdvížení* a *došlápnutí* a jejich celkový počet závisí na počtu noh robota [Todd, 1985]. Pro robot s k nohama je celkový možný počet událostí $N = (2k - 1)!$. Pro dvounohý mobilní robot máme

$$N = (2k - 1)! = 3! = 6 \quad (4.1)$$

různých událostí pro krok.

Události:

1. zdvihnutí levé nohy
2. zdvihnutí pravé nohy
3. došlápnutí levé nohy
4. došlápnutí pravé nohy
5. zdvihnutí obou noh najednou
6. došlápnutí obou noh najednou

Počet událostí rychle roste s přibývajícím počtem noh. Například šestinohý robot má teoreticky

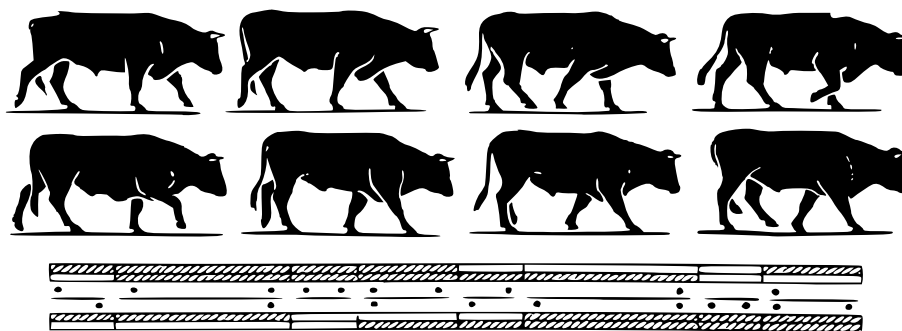
$$N = 11! = 39916800. \quad (4.2)$$

4.2 Druhy chůze

Většinu druhů chůze můžeme považovat za symetrický cyklický vzor pohybů noh. Každý krok nohy tohoto cyklu začíná dotykem nohy a podložky a končí, když se noha po zvednutí se znovu dostane do kontaktu s podložkou. Jednotlivé druhy chůze můžeme porovnat podle jeho tzv. výkonnostního faktoru β , což je část kroku, kdy je noha v pevném dotyku se zemí a tedy nese sama nebo společně s jinými nohama celé tělo. Chůze má výkonnostní faktor větší než 0.5, což u dvounohé chůze znamená, že na začátku, resp. konci každého kroku se dotýkají obě nohy země najednou. Běh má výkonnostní faktor menší než 0.5, to znamená, že se obě nohy, popř. pár nohou, v určité fázi kroku nedotýkají země a celé tělo se pohybuje vzduchem. Této fázi se říká balistická nebo fáze letu.

4.2.1 Čtyřnohá chůze

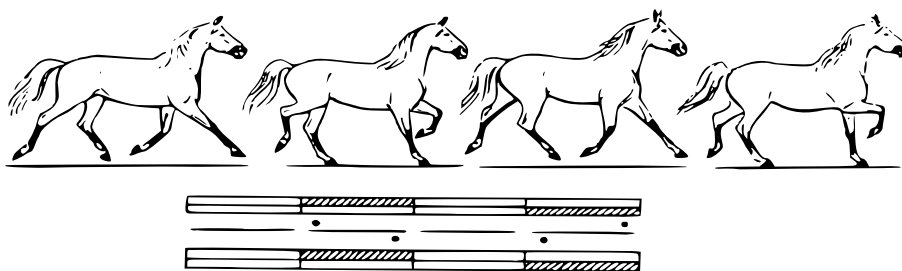
Jednotlivých druhů chůze, které využívají živočichové je nepřeberné množství. Každý druh živočicha má de facto svůj styl chůze. Na obr. 4.1 je zobrazen vůl v osmi stavech cyklu jednoho kroku. Pod náčrtkem zvířete jsou schématicky rozkreslené jednotlivé stavy. Vyšrafované vodorovné pruhy po stranách schématu ukazují, jestli je daná noha v kontaktu se zemí, nevyšrafované znamenají zdviženou nohu. První pruh (shora) představuje levou zadní nohu, druhý levou přední nohu, třetí pravou přední a čtvrtý pravou zadní nohu. Mezi těmito pruhy je kontakt nohy znázorněn



Obr. 4.1: Chůze vola

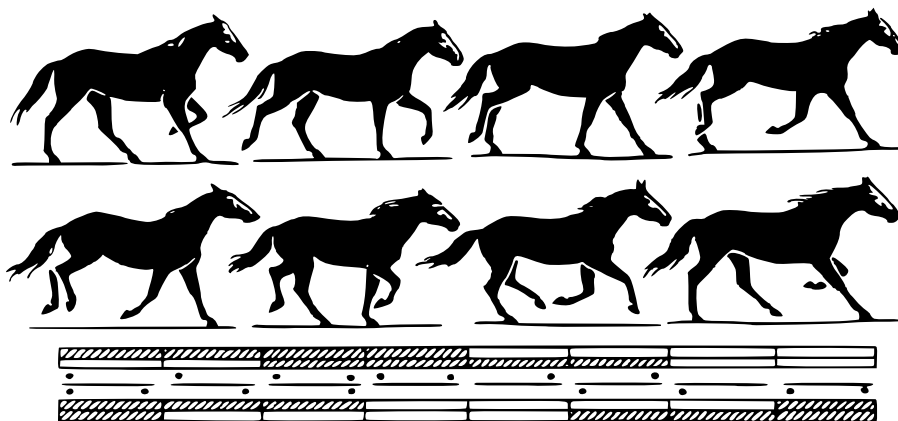
tečkami. Šířky stavů naznačují dobu, kterou živočich v tomto stavu stráví. Úzké stavy, kdy vůl stojí pouze na dvou nohách, jsou zde krátkými přechodnými stavy, déle trvají stavy, kdy je vůl stabilně opřen o své tři nohy a čtvrtou přesouvá dopředu.

Více názorné jsou druhy kráčení koně. Mezi jeho základní pohyby patří krok, klus, cval a trysk. Klus je pohyb koně s průměrnou rychlostí 14–18 km/h. Kůň při klusu střídá dvojici protilehlých noh, levou zadní s pravou přední a pravou zadní s levou přední, ze kterých se odráží, ocitá se ve vzduchu a doskakuje na druhou



Obr. 4.2: Klusající kůň

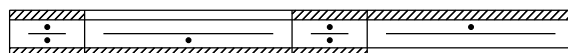
dvojici. Oproti klusu je cval náročnější pohyb. Průměrná rychlost tohoto pohybu je mezi 30–40 km/h a rozlišují se dva typy cvalu. Cval vlevo a cval vpravo. Na obr. 4.3 je znázorněn cval vlevo. Pravá přední noha následuje levou zadní s lehkým fázovým zpožděním, levá přední a pravá zadní noha doplňují první pár ve zbytku cyklu v tomto pořadí. [Collins, Stewart, 1993]



Obr. 4.3: Cválající kůň

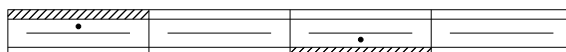
4.2.2 Chůze po dvou nohách

U čtyřnohých živočichů můžeme zkoumat spoustu druhů kráčení. U dvounohých jich tolik není. Mezi základní druhy zde patří chůze a běh. Ostatní pohyby jsou jistým druhem skákání. Schémata kontaktu noh se zemí chůze a běhu jsou na obr. 4.4 a 4.5.



Obr. 4.4: Schéma chůze

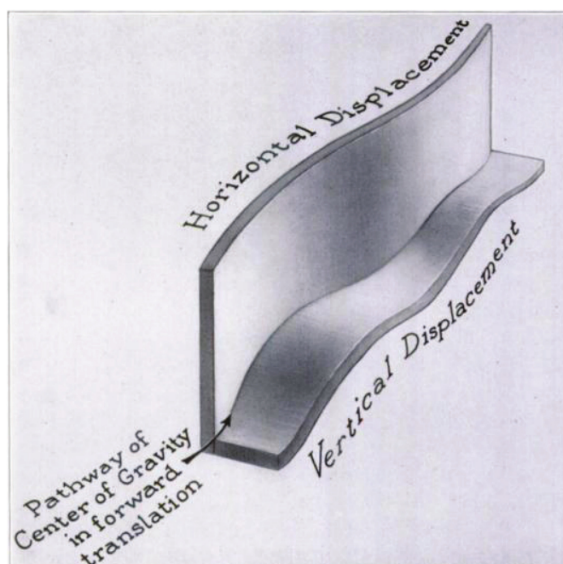
Důležitý aspekt při chůzi po dvou nohách je těžiště. Tělo člověka má těžiště ve výšce 55 procent výšky těla ($\pm 1,25\%$). Při chůzi se ale výška těžiště mění v závislosti na probíhající fázi kroku. Celé tělo se při chůzi rytmicky zvedá a klesá. Můžeme si všimnout, že v závislosti na změně výšky těla se oproti němu mění výška hlavy. Tím



Obr. 4.5: Schéma běhu

se zajistí stabilní výška pro oči a my tak lépe vnímáme okolní prostor. Změna výšky těžiště při konstantně rychlé chůzi opisuje funkci sinus. Toho si můžeme všimnout, například když dítě jde kolem výlohy obchodu a kreslí na ni prstem čáru. Většinou drží ruku stejně vysoko vzhledem k výšce těla a tím na výlohu nenakreslí rovnou čáru, ale sinusoidu opisující fluktuaci těžiště jeho těla. Začíná-li krok zvednutím levé nohy ze země a končí až dalším zvednutím téže nohy, má sinusoida největší amplitudu nachází-li se tělo přesně nad podpůrnou nohou, tj. ve 25 % a v 75 % kroku. S přehoupnutím se přes tuto podporu amplituda klesá až do stavu, kdy se vyměňují podpůrné nohy, tj. 50 % a 100 % kroku. Z toho vyplývá, že za jeden krok těžiště opíše dvě vlny sinusoidy. Celková velikost změny polohy těžiště ve vertikální rovině je u dospělého muže kolem 4,57 cm.

Těžiště se při chůzi pohybuje také laterálně v horizontální rovině. Stejně jako u vertikální roviny rytmicky opisuje sinusoidu. Velikost horizontální změny polohy je u dospělého muže kolem 4,45 cm a frekvence je dvakrát menší, než u vertikální změny, tj. jedna vlna sinusoidy během jednoho kroku. Na obr. 4.6 je znázorněn pohyb těžiště v obou rovinách.

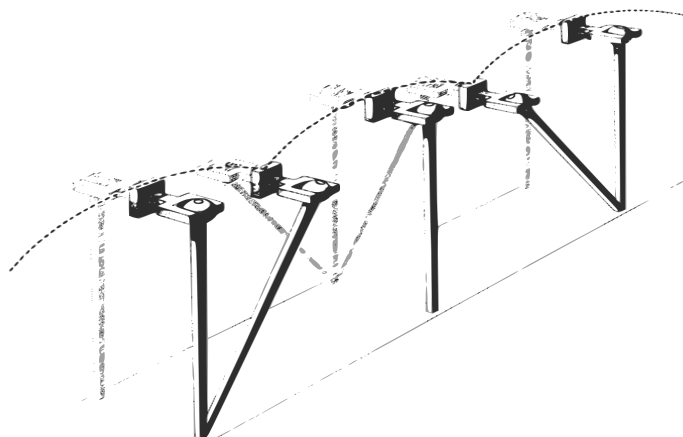


Obr. 4.6: Vychýlení těžiště během jednoho kroku

4.2.2.1 Compass Gait

Jedním z přístupů, kterým lze sledovat chování těžiště při chůzi po dvou nohách, je model nazývaný Compass Gait. Je inspirován kompasem, protože má jen dvě rovné

nohy bez kolenou a chodidel. Umožňuje pouze ohyb nohy v kyčli a její prodloužení. Jak je vidět na obr. 4.7, těžiště modelu opisuje sérii oblouků. Člověk je schopný tento

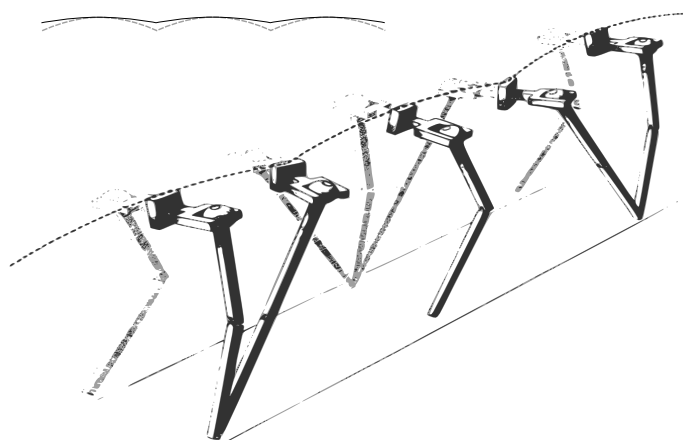


Obr. 4.7: Pohyb modelu Compass Gait

typ pseudo-čůze napodobit, stačí když si zafixuje kolena. Chodit tímto způsobem je ale velice energeticky náročné a průměrné vertikální vychýlení těžiště se dostane na hodnotu 9,53 cm, což je více než třikrát tolik, než je u standardní čůze.

4.2.2.2 Pánevní rotace

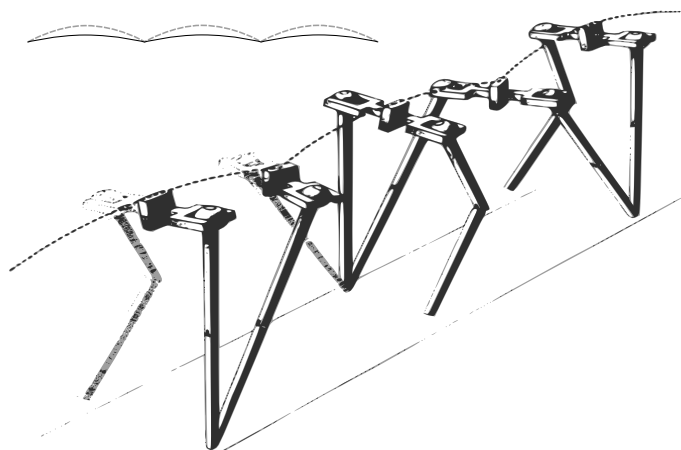
Při běžné čůze rotuje pánev doleva a doprava vzhledem k ose těla. Tato rotace se běžně pohybuje kolem 4° na jednu stranu. Jestliže přidáme tento pohyb do modelu Compass Gait (obr. 4.8), upraví se tím křivka, kterou během kroku opíše těžiště. Toto rotační vychýlení způsobí, že oblouky opisované těžištěm se zploští, což je vidět v horní části obrázku. Čárkovaná čára představuje původní dráhu těžiště modelu, plná s přidanou rotací. Získáme tím pohyb, který je méně náročný.



Obr. 4.8: Pohyb modelu Compass Gait s rotačním vychýlením v kyčli

4.2.2.3 Náklon pánve

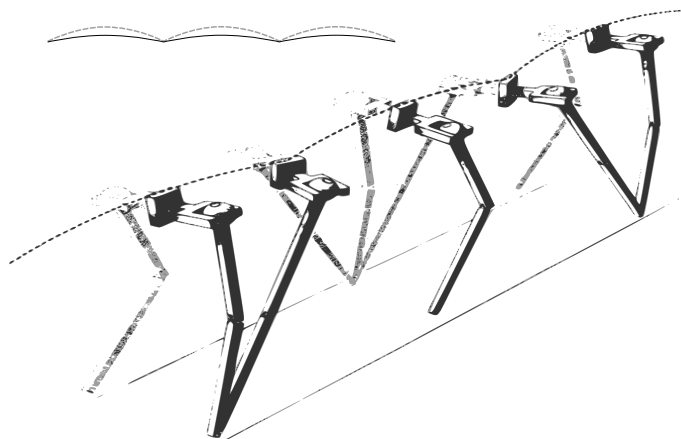
Další běžný pohyb pánve při chůzi člověka je její náklon. Vychýlení probíhá v kyčli nezatížené nohy vzhledem k horizontální rovině směrem dolů, což má za následek protažení nohy. Toto vychýlení se pohybuje zpravidla kolem 5° , ale aby byl tento pohyb možný, musí být možné ohnout nohu v kolenu. Jinak by se kyčel s nohou při stání neměla jak snížit. Výsledný efekt tohoto pohybu je v posunutí těžiště modelu směrem dolů. Jeho dráha je v tomto případě plošší a nižší než původní dráha těžiště bez rotace a náklonu kyčle (obr. 4.9).



Obr. 4.9: Pohyb modelu Compass Gait s kyčelní rotací a náklonem

4.2.2.4 Ohnutí kolena

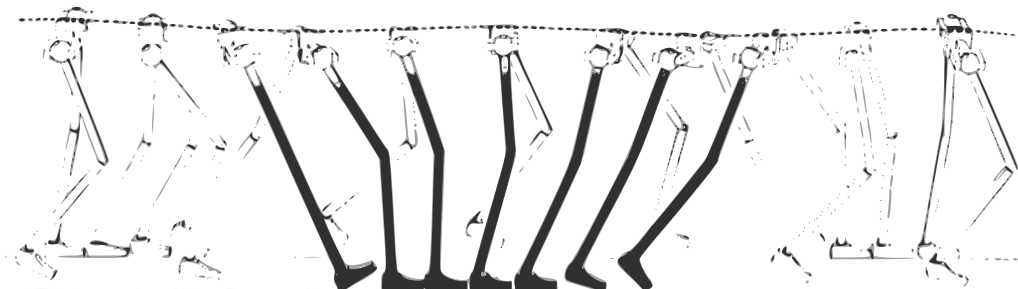
Ohnutí kolena ve fázi kroku, kdy model stojí na obou nohách, pomůže dalšímu snížení dráhy těžiště (obr. 4.10). Noha přijde do kontaktu se zemí při nataženém kolenu. Ve fázi došlapu koleno ohne a to průměrně do úhlu 15° . Koleno je nataženo při zhoupnutí volné nohy dopředu a tím je dodána další energie pro krok.



Obr. 4.10: Pohyb modelu Compass Gait s podsazením v kolenu

4.2.2.5 Ohyb kotníku

Přidáním ohybu do kotníku dosáhneme při jeho natažení v momentě dotyku paty druhé nohy se zemí největšího protažení nohy. Chodidlo tím měkce přilne k zemi dříve a model eliminuje tvrdé dopady. Při odrazu z podpůrné nohy a změni tím dráhu těžiště ze série oblouků na hladkou sinusoidu, jak je zobrazeno na obr. 4.11.



Obr. 4.11: Pohyb modelu Compass Gait s měkkým došlapem kotníku

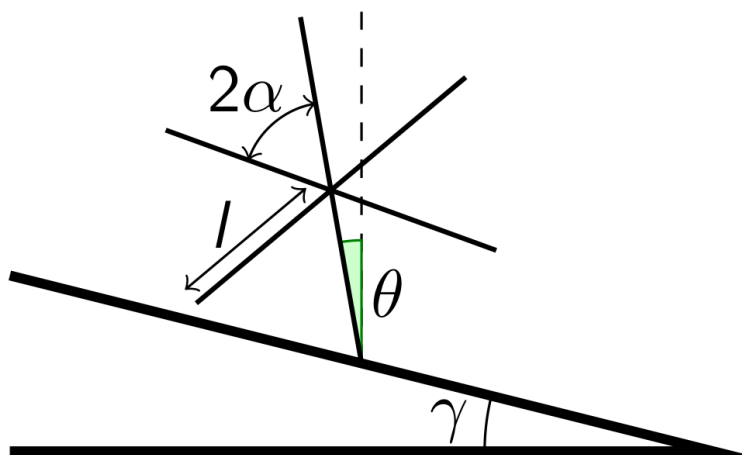
Tyto čtyři základní pohyby přidané k primitivnímu kráčení modelu Compass Gait spolu navíc s laterálním pohybem pánve vytvářejí téměř symetrickou výchylku těžiště ve vertikální a horizontální rovině. Dohromady tyto výchylky pomáhají ke stabilní energeticky úspornější chůzi, která se více podobá kráčení člověka. Vzhledem k patologickým poruchám, které nemusejí být nijak velké a člověka přímo omezovat, má prakticky každý člověk trochu odlišný vzor chůze. Avšak tyto nedostatky, které by mohly vést k nerovnováze nebo vyšší energetické náročnosti chůze, jsou většinou velmi dobře kompenzovány zvětšením jiné části postiženého ústrojí. [dec. M. Saunders a kol., 1953]

5

Rimless Wheel

Kolo bez ráfku (ang. rimless wheel – RW) je asi nejjednodušší příklad, na kterém je možné modelovat jednoduché kráčení. Jedná se od dvourozměrnou analogii Compass Gait popsaný v kapitole 4.2.2.1. Má stabilní chůzi a není potřeba jej jakkoliv řídit. Umí se pohybovat samo pouze využitím gravitace a svahu, po kterém může kráčet. Takový typ pohybu může využít i člověk, například když má zlomenou nohu a chodí o berlích. Na začátku kroku stojí na své zdravé noze, v ruce má berle, kterými míří na zem před sebe. Berlemi se opře a odrazí se (vytvoří počáteční rychlost) vlastní zdravou nohou. Krok pokračuje přehoupnutím těla přes berle dopředu, kde se znovu opře vlastní zdravou nohou. Tím svůj krok ukončí.

Při popisu analogie pohybu RW k chůzi člověka o berlích může být matoucí počet noh každého modelu. RW, na obr. 5.1, má hmotný střed, ve kterém je soustředěna všechna hmotnost a několik paprsků, které jsou vyvedené ze středu. Paprsky mají zanedbatelnou hmotnost a každé dva mezi sebou svírají tentýž úhel. V kontaktu



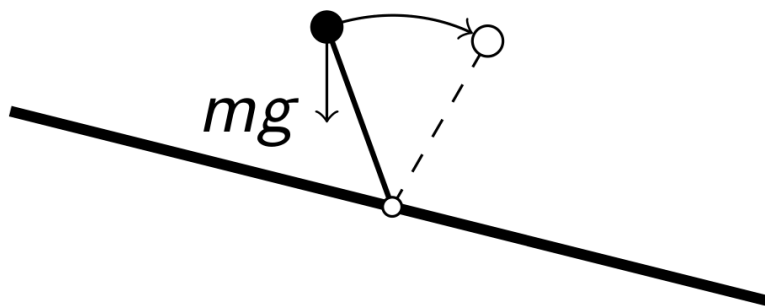
Obr. 5.1: Rimless wheel na šikmé ploše

se zemí jsou vždy ale maximálně dva paprsky a to jen krátce na začátku, resp. konci každého kroku. Během průběhu kroku se země dotýká jen jedna podpůrná noha. Ostatní nohy jsou v tu chvíli bezpředmětné a chování modelu neovlivňují. V každém kroku jsou tedy u RW potřeba tři nohy.

Krok RW začíná, když jsou dvě nohy v kontaktu se zemí. RW získá (z minulého kroku nebo pomocí vnější síly) energii, která jej uvede do pohybu. V tu chvíli se první noha zvedne ze země a dále je při úplném kroku nepotřebná. Druhá noha zůstává v kontaktu se zemí a tvoří rameno inverzního kyvadla. Krok končí, když se třetí noha dotkne země. V tu chvíli jsou v kontaktu se zemí znovu dvě nohy, druhá a třetí, a tím se model dostal do stejného stavu, v jakém byl na začátku popisovaného kroku. K provedení výše popsaného úplného kroku ale RW nemusí mít dostatek počáteční energie. V takovém případě střed na podpůrné noze nedosáhne svislého stavu a začne padat směrem zpět. RW pak nespadne na třetí nohu a spadne zpět na první. Tento neúplný krok končí stejně jako úplný dotykem dvou noh země.

5.1 Matematický model

Při modelování pohybu přenesení těla přes stojící nohu se omezíme na model matematického inverzního kyvadla, obr. 5.2. Tělo člověka nahradíme hmotným bodem a berle podpůrnou tyčí. Veškerá hmotnost je soustředěna ve hmotném bodě a tyč kyvadla je nehmotná.



Obr. 5.2: Pohyb inverzního kyvadla při jednom kroku

5.1.1 Pohybová rovnice

Model má stavové proměnné $q = [\theta, \dot{\theta}]^T$. Použitím Lagrangeovy metody získáme přes Lagrangian (5.1) pohybovou rovnici (5.2).

$$\mathcal{L} = \underbrace{T}_{\text{kinetická}} - \underbrace{U}_{\text{potenciální}} \quad (5.1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = 0 \quad (5.2)$$

Dosadíme do Lagrangianu rovnici pro kinetickou a potenciální energii inverzního kyvadla (5.3) a parciálně zderivujeme podle jednotlivých složek stavové proměnné q . Tím dostaneme pohybovou rovnici inverzního kyvadla (5.5).

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m (l\dot{\theta})^2 - mgl \cos \theta \quad (5.3)$$

$$0 = ml^2 \ddot{\theta} - mgl \sin \theta \quad (5.4)$$

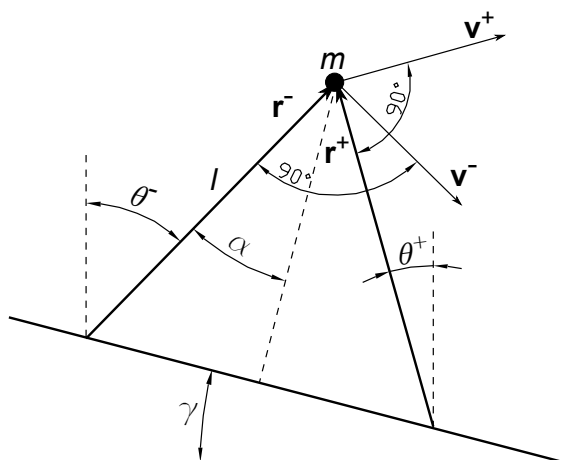
$$\ddot{\theta} = \frac{g}{l} \sin \theta \quad (5.5)$$

5.1.2 Krok

Každý krok kola začíná, když se dva paprsky kola (obě nohy) dotýkají podložky. Probíhá při valení se přes stabilní paprsek kola, kdy se RW otáčí kolem bodu dotyku se zemí, a končí, když se země dotkne následující paprsek. Pro ukončení integrace pohybové rovnice je tedy potřeba získat bod dotyku následující nohy. Takový dotyk nastane, když úhel θ pohyblivé nohy zmenšený o úhel šikmé plochy γ odpovídá polovině úhlu rozteče paprsků kola 2α , neboli (5.6).

$$0 = |\theta - \gamma| - \alpha \quad (5.6)$$

Na konci kroku, kdy následující paprsek kola narazí do země, dojde k úbytku energie. Počáteční energie dalšího kroku tedy není stejná jako energie, se kterou začínal předchozí krok. Označíme-li, jak je zobrazeno na obr. 5.3, předchozí krok symbolem $-$ a krok následující symbolem $+$, můžeme zjistit energii (resp. úhlovou rychlost) pomocí zákona zachování hybnosti, resp. momentů hybnosti (5.7).



Obr. 5.3: Inverzní kyvadlo na konci ($-$) a na začátku ($+$) kroku

$$\mathbf{r}^+ \times m\mathbf{v}^+ = \mathbf{r}^+ \times m\mathbf{v}^- \quad (5.7)$$

Hmotnosti m na obou stranách rovnice můžeme zkrátit

$$\mathbf{r}^+ \times \mathbf{v}^+ = \mathbf{r}^+ \times \mathbf{v}^-$$

vyjádříme si postupně obě stany rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^+ \times \mathbf{v}^- &= \begin{bmatrix} l \cos(\theta^+) \\ l \sin(\theta^+) \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l \cos(\theta^-) \dot{\theta}^- \\ l \sin(\theta^-) \dot{\theta}^- \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ l \cos(\theta^+) & l \sin(\theta^+) & 0 \\ l \cos(\theta^-) \dot{\theta}^- & l \sin(\theta^-) \dot{\theta}^- & 0 \end{bmatrix} \\ &= 0i + 0j + [l \cos(\theta^+) \cdot l \cos(\theta^-) \dot{\theta}^- + l \sin(\theta^+) \cdot l \sin(\theta^-) \dot{\theta}^-]k \\ &= l^2 \dot{\theta}^- [\cos(\theta^+) \cos(\theta^-) + \sin(\theta^+) \sin(\theta^-)]k \\ &= l^2 \dot{\theta}^- \cos(\theta^+ - \theta^-)k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^+ \times \mathbf{v}^+ &= \begin{bmatrix} l \cos(\theta^+) \\ l \sin(\theta^+) \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l \cos(\theta^+) \dot{\theta}^+ \\ l \sin(\theta^+) \dot{\theta}^+ \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ l \cos(\theta^+) & l \sin(\theta^+) & 0 \\ l \cos(\theta^+) \dot{\theta}^+ & l \sin(\theta^+) \dot{\theta}^+ & 0 \end{bmatrix} \\ &= 0i + 0j + [l \cos(\theta^+) \cdot l \cos(\theta^+) \dot{\theta}^+ + l \sin(\theta^+) \cdot l \sin(\theta^+) \dot{\theta}^+]k \\ &= l^2 \dot{\theta}^+ k \end{aligned}$$

a položíme vyjádřené rovnice proti sobě.

$$l^2 \dot{\theta}^+ k = l^2 \dot{\theta}^- \cos(\theta^+ - \theta^-)k$$

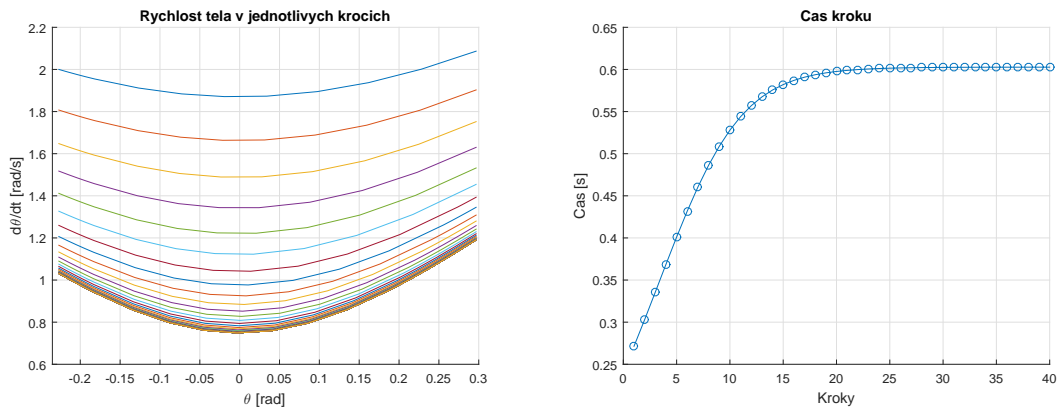
Rozdíl úhlů sil působících na předchozí stabilní paprsek kola na konci předchozího kroku a na následující stabilní paprsek na začátku dalšího kroku je roven úhlu rozteče dvou paprsků, tedy 2α . Pomocí výpočtu (5.8) lze získat počáteční úhlovou rychlost následujícího kroku.

$$\dot{\theta}^+ = \cos(2\alpha) \dot{\theta}^- \quad (5.8)$$

5.1.3 Výsledky modelu

Matematický model RW o dvanácti paprscích dlouhých 1 m byl vypočítán pro 80 kroků se svahem 2° a počáteční rychlostí 2 rad/s. Na grafu obr. 5.4(a) je vidět úhlová rychlost konce kyvadla (těla kráčejičího kola) v závislosti na úhlu naklonění. Vlevo začíná první krok rychlostí 2 rad/s, přičemž rychlost na konci prvního kroku je $\dot{\theta} = 2.087$ rad/s. V důsledku nárazu následující nohy na zem dojde ale ke skokovému snížení počáteční rychlosti pro další krok na $\dot{\theta} = 1.807$ rad/s.

Tímto způsobem se RW zpomaluje až do ustáleného nekonečného cyklu s počáteční rychlostí $\dot{\theta} = 1.031$ rad/s. Na grafu obr. 5.4(b) je zobrazen čas trvání jednotlivých kroků. První kroky trvají jen krátkou dobu, což potvrzuje vyšší úhlovou rychlost (pracovní úhel kyvadla se nemění) a postupným zpomalováním se po 30 krocích dostane na ustálenou hodnotu. Můžeme tedy říct, že za výše uvedených počátečních podmínek se RW dostane do stabilního cyklu za 30 kroků.



(a) Vývoj úhlové rychlosti inverzního kyvadla pro jednotlivé kroky

(b) Délka trvání kroků

Obr. 5.4: Výsledky výpočtu matematického modelu Rimless Wheel

5.2 Model v Simulinku

Ověření platnosti matematického modelu bylo provedeno pomocí grafického programovacího prostředí pro modelování a simulace Simulink a SimMechanics. Model v Simulinku (SM) autor nepojal po krocích, jako matematický model (MM), ale kontinuálně, kdy simulace běží přes několik kroků. Samotné tělo a paprsky kola jsou realizovány pomocí jednoho bloku *Body*, který má dvanáct přípojných bodů reprezentujících konce jednotlivých noh. Tělo má hmotnost 1 kg a v rámci snahy přiblížit tento model jeho matematickému protějšku má matici setrvačnosti

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot 0.0001,$$

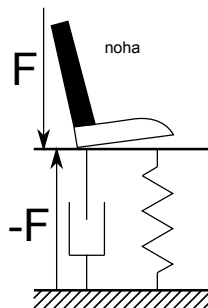
která zajistí rozložení váhy na malém prostoru.

5.2.1 Kontakt se zemí

Nejdůležitější částí SM je kontakt jednotlivých noh a země. Simulink sám o sobě nemá implementované řešení kolizí objektů, bylo tedy nutné si zem pro model vytvořit vlastní. Země při došlapu působí na nohu stejně velkou silou, jakou noha na zem, jen v opačném směru. Působení země v modelu lze tedy realizovat jako silnou pružinu s tlumičem, na kterou noha došlápne (obr. 5.5). Sílu, která působí proti noze získáme pomocí rovnice pro tlumené kmitání (5.9), kde F je působící síla, y je svislý směr působení, k je tuhost pružiny a c je koeficient tlumení.

$$F = -ky - cy \quad (5.9)$$

Hodnoty k a c bylo potřeba zvolit vhodně vzhledem k parametrům modelu



Obr. 5.5: Noha došlapující na zem

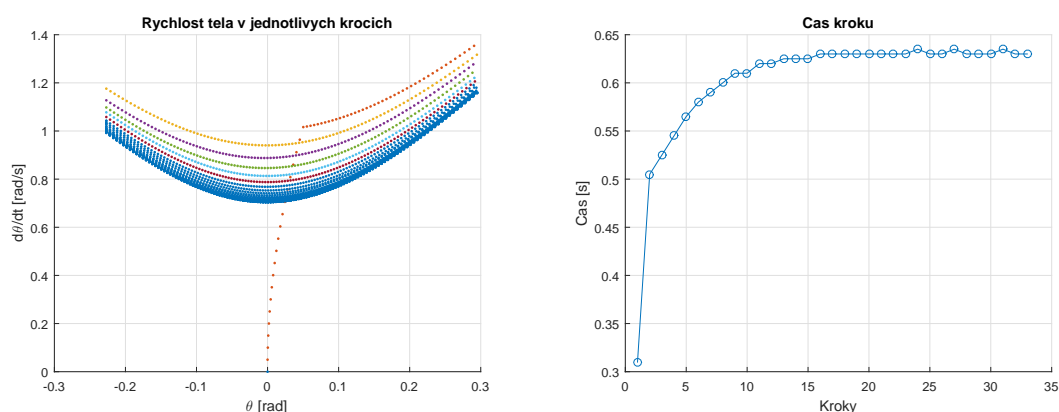
a výpočetnímu výkonu. V ideálním případě, jako je tomu u matematického modelu výše, je země ideálně tvrdá a konstanty pružiny a tlumiče by musely být nekonečně velké. To je samozřejmě nereálné a s vyššími hodnotami konstant se zvyšuje výpočetní náročnost a simulace se tím stává hůře spočitatelnou. Je tedy potřeba trochu ustoupit v přesnosti výpočtů a zvolit reálné hodnoty těchto konstant. Autor došel experimentálně k vhodným hodnotám $k = 10000$ a $c = 3000$.

Výpočet síly působící proti noze ve svislém směru je popsán v příloze A.1. Tato funkce zajistí, že noha nepropadne zemí a je zastavena na její hranici. To ale pro udržení podpůrné nohy na jednom místě nestačí. Je ještě potřeba zajistit fixaci nohy ve vodorovném směru. Tzn. vytvořit dostatečně velké tření. Fixace ve vodorovné ose x je realizována stejným způsobem jako došlap s tím rozdílem, že síla působí v obou směrech osy x (kód A.2). Hodnoty z obou funkcí se následně sečtou ve vektor působících sil, které udrží podpůrnou nohu v místě došlapu.

5.2.2 Výsledky simulace

Základní konfigurace modelu se neshoduje s matematickým modelem, kde se každý krok počítá zvlášť. Zde se tělo modelu na počátku simulace na-

chází ve svislém směru nad podpůrnou nohou, kde je nutné jej rozpohybovat externí silou. Je použita síla 10 N působící na střed RW po dobu 0.1 s ve směru osy x . Z grafu na obr. 5.6(a) je patrný rychlý růst úhlové rychlosti nultého kroku způsobený externí silou, která model urychlí až na úhlovou rychlost $\dot{\theta} = 1.016$ rad/s. Poté se model zrychluje jen působením gravitační síly. Prvních šest kroků je odlišeno barvou a další, které splývají v nižších úhlových rychlostech, jsou všechny modré. Je zde zřejmý stejný účinek země na pohyb modelu. Při každém začátku kroku je úhlová rychlost menší, než byla na konci kroku předešlého. Podobnost je vidět i na grafu obr.5.6(b) trvání jednotlivých kroků. První hodnota časů kroků, která je o polovinu kratší představuje nultý „půlkrok“.



(a) Vývoj úhlové rychlosti inverzního kyvadla pro jednotlivé kroky

(b) Délka trvání kroků

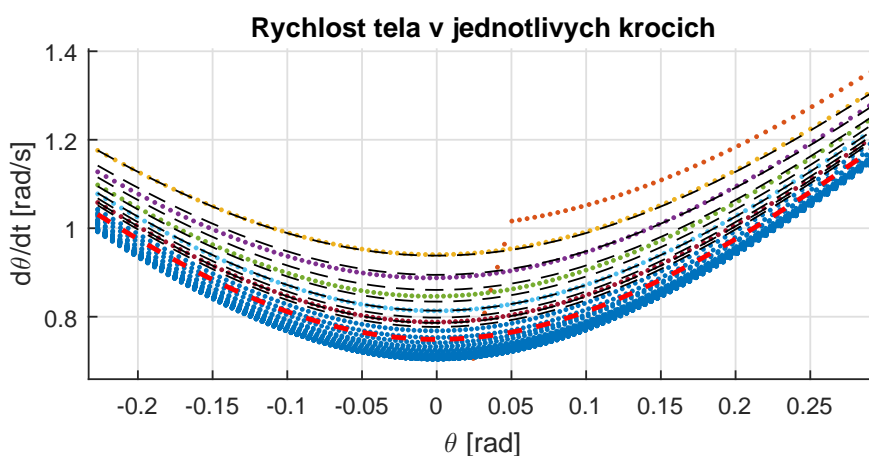
Obr. 5.6: Výsledky simulace modelu v Simulinku

5.3 Porovnání modelů

Důležitý krok je porovnání obou modelů. Jelikož jsou oba modely pojaty jinak, nemůžeme očekávat naprosto stejné výsledky. MM je postaven na dvou rovnicích, diferenciální rovnici inverzního kyvadla a na vztahu pro úbytek úhlové rychlosti z konce kroku na začátek dalšího, SM má uprostřed malé, ale hmotné těleso s nenulovým momentem setrvačnosti a nárazy noh do země také nejsou ideální, což vytváří hlavní rozdíl mezi oběma modely. Spuštění obou modelů se stejnými počátečními podmínkami také není triviální, MM vždy počítá jeden krok od začátku do konce, SM začíná v polovině kroku a první celý krok se provede až po dokončení nultého „půlkroku“. Výhoda MM je, že je u něj možné začít krok s určitou počáteční rychlostí. Porovnání je tedy možné provést způsobem, že spustíme SM a odměříme úhlovou rychlost, se kterou začíná první celý krok, kterou vložíme jako počáteční

podmínku pro MM.

Simulace SM byla spuštěna s 2° klesáním a model byl rozpořbován stejnou externí silou jako v předešlém případě. Na grafu obr. 5.7 jsou vykresleny jednotlivé kroky modelu. Tečky představují naměřená data z SM, kde prvních šest kroků je barevně odlišeno. Černé čárkované křivky zobrazují osm prvních kroků matematického modelu, červená čárkovaná křivka je poslední, v tomto případě osmdesátý, krok. MM byl spuštěn s počáteční úhlovou rychlostí shodnou s rychlostí SM na počátku jeho prvního celého kroku. Z grafu na obr. 5.7 je vidět, že v úhlové rychlosti 1.176 rad/s se pod úhlem $-0,2269 \text{ rad}$ obě čáry přesně překrývají. Další průběh je už trochu odlišný a odvíjí se od rozdílů obou modelů.

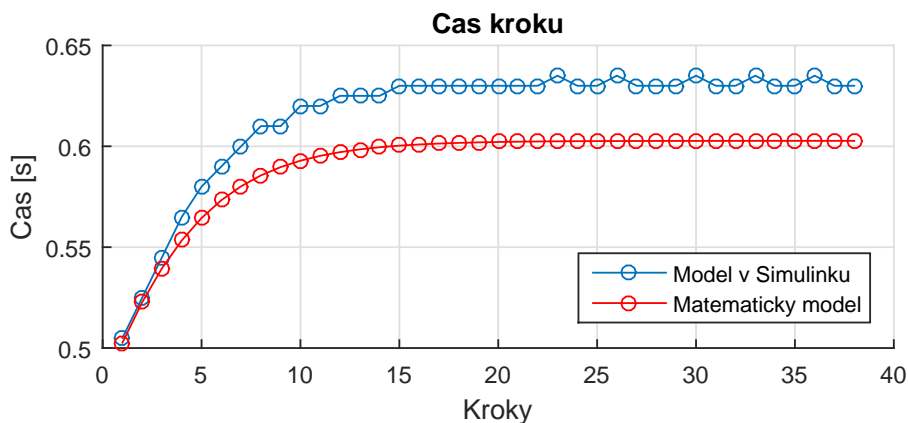


Obr. 5.7: Porovnání matematického modelu a modelu v Simulniku. Sklon svahu $\gamma = -2^\circ$

Z grafu porovnání obou modelů je vidět, že SM nabírá při překlopení středu kola přes podpůrnou nohu vyšší rychlost a dochází k většímu zbrzdění nárazem do země, než jak je tomu u MM. Při stejných počátečních podmínkách se SM ustálí na rychlostně pomalejším cyklu než MM. Výsledný rozdíl rychlostí ale není příliš velký, pohybuje se kolem 0.03 rad/s , oba modely si tedy s touto chybou odpovídají.

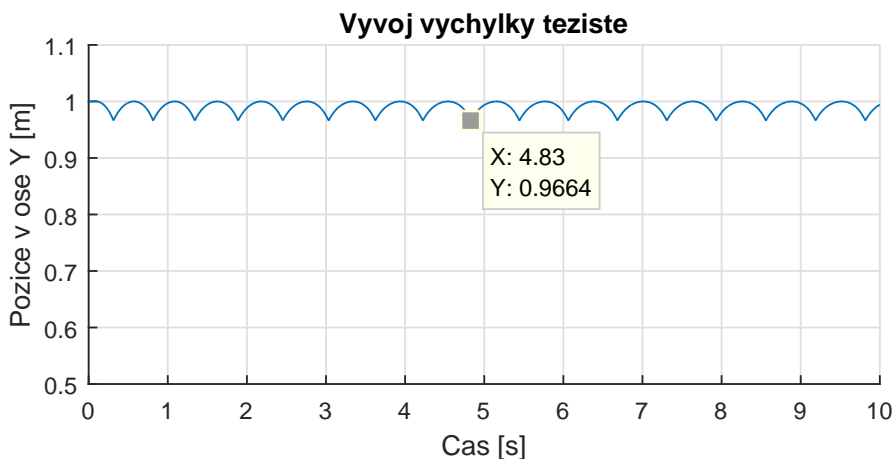
S rozdílem ustálené rychlosti obou modelů souvisí i rozdíl trvání jednotlivých kroků (obr. 5.8). SM, který se ustálí na nižší rychlosti, má i vyšší čas běhu jednoho kroku. Mírné výkyvy hodnoty času SM jsou způsobeny vzorkováním naměřených dat ze simulace.

Podle grafu na obr. 5.9 model RW při svém kráčení vytváří výchylku těžiště ve vertikálním směru. Chová se tedy tak, jak bylo popsáno v kapitole 4.2.2. Vzhledem k tomu, že nevyužívá žádných dalších rotačních a klopných pohybů, opisuje nejméně efektivní oblouky, které byly v této kapitole popsány. Velikost vertikální výchylky je $3,36 \text{ cm}$, což je méně než u průměrného dospělého muže ($4,57 \text{ cm}$). To ale odpovídá skutečnosti, že RW s dvanácti paprsky má rozteč noh



Obr. 5.8: Porovnání matematického modelu a modelu v Simulinku. Sklon svahu $\gamma = -2^\circ$

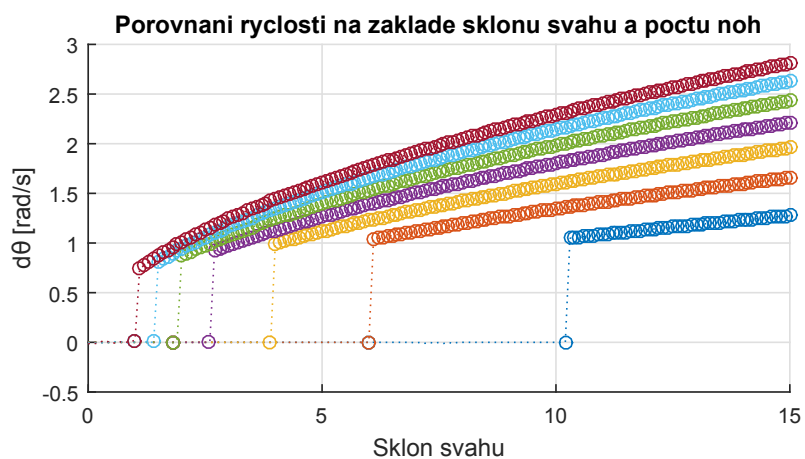
30° , ale úhel svíraný mezi nohami průměrného mužského kroku je kolem 40° a zde platí přímá úměrnost, tedy čím větší úhel, tím větší odchylka.



Obr. 5.9: Vývoj vychylky těžiště modelu v čase

Počáteční úhlové rychlosti ustálených cyklů jsou odlišné pro různé úhly svahu a pro počet noh RW. Graf na obr. 5.10 zobrazuje tyto ustálené rychlosti. Úhly svahu jsou na vodorovné ose a počty noh RW představují jednotlivé barevné křivky. Tmavě modrá: 6 noh, červená: 7 noh, žlutá: 8 noh, fialová: 9 noh, zelená: 10 noh, světle modrá: 11 noh a vínová: 12 noh.

Z grafu můžeme vyčíst minimální hodnoty počátečních rychlostí a svahů, které jsou potřeba, aby se RW dostalo do ustáleného kráčejiho cyklu.



Obr. 5.10: Počáteční úhlové rychlosti kroků v ustálených cyklech v závislosti na sklonu svahu a počtu noh

Tab. 5.1: Potřebná počáteční rychlost RW v závislosti na sklonu svahu a počtu noh

Počet noh	Rychlost [rad/s]	Svah [°]
6	1,0480	10,3
7	1,0410	6,1
8	0,9925	4,0
9	0,9187	2,7
10	0,8640	2,0
11	0,8122	1,5
12	0,7420	1,1

6

Závěr

Cílem této práce byl rozbor modelování kráčejších robotů, vyhledání klíčových oblastí této problematiky a volba vhodné metody pro vytvoření simulačního modelu jednoduchého kráčejšího robotu.

Kráčejší roboty patří do skupiny mobilních robotů, proto jsem vytvořil srovnání mechanismů, kolových, pásových a kráčejších, zmínil jejich výhody, nevýhody a jejich reálné využití. Díky tomu jsem zjistil, že velká část mobilních robotů zatím nenašla průmyslové nebo domácí využití a je vyvíjena jen v rámci výzkumu na univerzitách nebo robotických laboratořích. Do této „laboratorní“ skupiny se řadí zejména kráčejší roboty, které jsou oproti kolovým nebo pásovým mnohem náročnější na realizaci. Složitá konstrukce noh a potřeba dostatečně silných, ale lehkých akčních členů jsou jedny z nejnáročnějších částí vývoje. To vše je nutné ovládat pomocí komplexního řídicího systému.

Příroda je v této oblasti stále na vyšší úrovni a my se v ní můžeme inspirovat a vytvářet lepší a účinnější modely kráčení. Rozbor dolní končetiny člověka ukázal, že člověk používá velmi složitý lokomoční systém, který dnes ještě nikdo neumí vytvořit v takové složitosti a kvalitě. Všechny modely kráčení pracují se zjednodušeným modelem noh s vytvářením jen těch nejdůležitějších pohybů. Na příkladu kráčejšího modelu Compass Gait jsem ukázal, že postupným navyšováním složitosti základního jednoduchého modelu lze dojít až do stavu zhruba srovnatelného pohybu s pohybem těžiště těla člověka.

Získané teoretické poznatky jsem se snažil aplikovat pomocí pasivního kráčejšího modelu Rimless Wheel. Vytvořil jsem jeho matematický model postavený na základech mechaniky inverzního kyvadla a následně fyzikální model v prostředí SimMechanics, který ověřil platnost tohoto matematického modelu. Z obou modelů jsem následně získal některá zajímavá data. Výzkum činnosti těchto pasivních kráčejších robotů je důležitý pro zefektivňování chůze řízených kráčejších robotů.

Příloha A

Zdrojové kódy

Kód A.1: Výpočet působící síly země ve svislém směru

```
1 function F = floor(x, y, dy, c, k, slope)
2     floorLvl = tan(slope) * x;
3     Fy = 0;
4     if (y <= floorLvl)
5         Fy = ((-y + floorLvl) * k) - (dy * c);
6     end
7     if (Fy < 0)
8         Fy = 0;
9     end
10    F = [0 Fy 0]';
11 end
```

Síla působí pouze v kladném směru osy y . Kdyby působila i ve směru záporném, noha stojící na zemi by byla touto silou držena a nemohla by se zvednout. Proměnné x , y a dy představují polohu, resp. rychlost nohy, která je v kontaktu se zemí, c a k jsou hodnoty tlumení a tuhosti pružiny a $slope$ je úhel sklonu země.

Kód A.2: Výpočet působící síly země ve vodorovném směru

```
1 function F = wall(x, y, dx, wall, k, c, slope)
2     floorLvl = tan(slope) * x;
3     Fx = 0;
4     if (y <= floorLvl)
5         Fx = ((-x + wall) * k) - (dx * c);
6     end
7     F = [Fx 0 0]';
8 end
```

Síla zajišťující fixaci nohy ve vodorovném směru osy x . Proměnná dx je rychlost konce nohy v ose x a $wall$ je hodnota pozice kontaktu nohy se zemí v ose x . Ostatní proměnné jsou stejné, jako v kódu A.1.

Literatura

- [BEEWATEC, 2010] BEEWATEC (2010). *Automaticky řízené vozíky*. <http://www.beewatec.cz/files/upload/file/kat-automaticke-rizene-voziky.pdf>.
- [Calin, 2015] Calin, D. (2015). *Wheels vs Continuous Tracks: Advantages and Disadvantages*. <http://www.intorobotics.com/wheels-vs-continuous-tracks-advantages-disadvantages/>.
- [Collins, Stewart, 1993] Collins, J. J. and Stewart, I. N. (1993). Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits. *Springer-Verlag New York Inc.*, Vol. 3:pp 349–392. No. 1.
- [cyberneticzoo.com, 2009] cyberneticzoo.com (2009). *1891-1893 – Steam Man – Prof. George Moore – (Canadian/American)*. <http://cyberneticzoo.com/steammen/1891-1893-steam-man-prof-george-moore-canadianamerican/>.
- [cyberneticzoo.com, 2014] cyberneticzoo.com (2014). *1976 – MF3 Manipulator Vehicle – Köhler (German)*. <http://cyberneticzoo.com/teleoperators/1976-mf3-manipulator-vehicle-kohler-german/>.
- [dec. M. Saunders a kol., 1953] dec. M. Saunders, J. B., Inman, V. T., and Eberhart, H. D. (1953). The major determinants in normal and pathological gait. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, Vol.35(No.3):543–558.
- [Haltmar, Knoflíček, 2000] Haltmar, M. and Knoflíček, R. (2000). Konstrukce kolových mobilních robotů (1. část). *MM – Průmyslové spektrum – Technický měsíčník*, Číslo 1,2:64–65. únor 2000.
- [HONDA, 2015] HONDA (2015). *ASIMO*. <http://asimo.honda.com/>.
- [KÁRNÍK a kol., 2000] KÁRNÍK, L., KNOFLÍČEK, R., and MARCINČIN, J. (2000). *Mobilní roboty*. MÁRFY SLEZSKO, Opava.
- [KÁRNÍK, MARCINČIN, 1999] KÁRNÍK, L. and MARCINČIN, J. (1999). *Biorobotická zařízení*. MÁRFY SLEZSKO, Opava.

- [Libin, Libin, 2004] Libin, E. and Libin, A. (2004). Person-robot interactions from the robopsychologists' point of view: The robotic psychology and robototherapy approach. *Proc. of the IEEE*, Vol. 92:1789–1803. No. 11.
- [Raibert a kol., 2008] Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., and Playter, R. (2008). *BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot*. http://www.bostondynamics.com/img/BigDog_IFAC_Apr-8-2008.pdf.
- [Shigley, Uicker, 1981] Shigley, J. E. and Uicker, J. J. (1981). *Theory of machines and mechanisms*. New York: McGraw-Hill.
- [Todd, 1985] Todd, D. J. (1985). *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Kogan Page, London.
- [Tsai a kol., 1999] Tsai, S.-J., Ferreira, E., and Paredis, C. (1999). Control of the gyrover. a single-wheel gyroscopically stabilized robot. In *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 179–184 vol.1.
- [Waseda, 2008] Waseda, U. (2008). *WABOT -WAseda roBOT-*. http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html.