

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

REŠERŠNÍ STUDIE ŘÍDICÍCH ČLENŮ PRO
ČTYŘNOHÉ KRÁČIVÉ MOBILNÍ ROBOTY
THE STUDY OF CONTROLLERS FOR FOUR-LEGGED WALKING ROBOTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ROMAN KLVAŇA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. VÍT ONDROUŠEK

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(tka): Roman Klvaňa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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

Rešeršní studie řídicích členů pro čtyřnohé kráčivé mobilní roboty

v anglickém jazyce:

The study of Controllers for Four-legged Walking Robots

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o rešeršní studii způsobu řízení kráčivých mobilních robotů, tj. o podání uceleného přehledu na základě dostupných informačních zdrojů. Úkolem je rozčlenění jednotlivých řídicích členů a přístupu do kategorií dle různých kritérií a uvedení zástupců těchto kategorií.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Na základě dostupných zdrojů proveďte rešeršní studii přístupů k řízení chůze kráčivých robotů.
- 2) Uvažte vhodná kritéria pro rozdělení přístupů do skupin. U každé skupiny uveďte jednoho zástupce, zaměřte se na popis funkce, výhody a nevýhody.
- 3) Navrhněte, který z popsaných přístupů, by bylo vhodné použít pro robot Quasimodo na UAI FSI. Objasněte svůj návrh.

Seznam odborné literatury:

vyhledávací databáze (placené VUT) compendex apod.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vít Ondroušek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku
2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je rešeršního charakteru a zaměřuje se na popis různých přístupů ke generování chůze čtyřnohých kráčivých robotů. Je zde popsáno celkem šest různých skupin přístupů. U každého z nich je popsán základní princip fungování a příklad robotu u něhož je daný způsob použit. Závěr práce shrnuje výhody a nevýhody jednotlivých přístupů a na jejich základě je vybrán vhodný způsob generování chůze pro konkrétní čtyřnohý robot Quasimodo.

ABSTRACT

This work is based on literary search and is focused on description of various approaches in walking gait generation for four-legged walking robots. There are six various groups of approaches described in this thesis. Main functional principles as well as one representative robot of each approach is described. The summarize of advantages and disadvantages of each approach is used to appoint an appropriate control approach for robot Quasimodo walking gait generation in the conclusion chapter of this bachelor thesis.

KLÍČOVÁ SLOVA

kráčivá chůze, mobilní robot, čtyřnohý robot

KEYWORDS

walking gait, mobile robot, four-legged

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto způsobem chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Vítu Ondrouškovi, za jeho ochotu a pomoc při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině, za jejich podporu při studiu.

Obsah:

	Zadání závěrečné práce.....	3
	Abstrakt.....	5
	Poděkování.....	7
1	ÚVOD.....	11
2	ROZDĚLENÍ ŘÍDICÍCH ČLENŮ.....	13
2.1	Deduktivní řízení	13
2.1.1	Deduktivní řídicí členy.....	13
2.1.2	Běžná struktura deduktivních řídicích členů.....	14
2.1.3	Řídicí člen dynamické stability.....	15
2.1.4	Algoritmus vzdušného zavěšení.....	18
2.2	Reaktivní řízení.....	18
2.3	Hybridní řízení.....	21
2.3.1	Hybridní DEDS řídicí člen.....	21
2.3.1.1	Architektura DEDS řídicího členu.....	22
2.3.1.2	Báze řízení.....	23
2.3.1.3	Báze řízení pro chůzi vpřed.....	25
2.3.1.4	Řízení chůze vpřed.....	26
2.4	Přístup založený na modelu.....	27
2.5	Řízení založené na chování.....	29
2.5.1	Řízení založeno na chování – u robotu Sleipner III.....	30
2.5.1.1	Architektura chování.....	31
2.5.1.2	Koordinace chování.....	31
2.5.1.3	Kráčivé chování.....	32
2.5.1.4	Poziční chování.....	33
2.5.1.5	Navigační chování.....	34
2.6	Biologicky inspirované řízení.....	35
2.6.1	Centrální generátor vzoru.....	35
2.6.2	Robot Biosbot.....	36
3	VOLBA ŘÍDICÍHO ČLENU PRO ROBOT QUASIMODO.....	39
4	ZHODNOCENÍ TYPŮ ŘÍZENÍ.....	41
5	ZÁVĚR.....	45
	Seznam použité literatury.....	47

1. ÚVOD

Kráčivé roboty jsou jedním z druhů robotů, které se dokáží pohybovat v těžko dostupném terénu. Jejich využití v tomto prostředí neustále stoupá. Pohyby, kterými se po povrchu pohybují, jsou inspirované pohyby zvířat. Protože zvířata se pohybují po povrchu naší planety, která je z velké části pokryta členitým prostředím, které znemožňuje, nebo omezuje použití jiných druhů robotů, jako jsou například kolové, nebo pásové.

K tomu, aby robot mohl vykonávat určitý druh chůze, bylo zapotřebí vyvinout nějaký řídicí systém, který by automaticky řídil tyto pohyby, aniž by musel do tohoto řízení zasahovat člověk. Tyto řídicí systémy se dají rozdělit do několika typů, které poskytují takovou schopnost. Mezi ně například patří deduktivní řízení, které obsahuje moduly, které jsou sériově propojeny. Každý modul se nejprve vyhodnotí, než pošle příkaz k dalšímu modulu. Deduktivní řízení je založené na přístupu snímat, plánovat, konat. Dalším typem je reaktivní řízení, to poskytuje přímé propojení mezi akčními členy robotu a senzory, a pracuje na bázi vrstvené architektury. Tento typ vrstvené architektury se stal základem pro řízení, které je založené na chování. Toto umožňuje do modulu chování, přidat nový typ chování, které se v tomto modulu zařadí ve vertikálním směru, a tím se rozšíří schopnosti robotu reagovat na nové události. Kombinací prvních dvou typů řízení, dostaneme hybridní řízení, které se používá, aby robot okamžitě nejednal, ale zvolil optimální plán akce v krátkém časovém intervalu. Dalším typem je řízení založené na modelu, které plně využívá modelu prostředí a popis dynamiky robotu pro svoji funkčnost. Poslední druh řízení, je biologicky inspirované řízení, které pracuje na bázi neuronových sítí, kde generování pohybu řídí centrální generátor pohybu, podobně jako je to u zvířat.

Tato práce si klade za cíl popsat uvedené přístupy, objasnit jejich hlavní rysy a charakteristiky. Dále se zabývá u každého přístupu popisem vybraného robotu daný přístup uplatňující. V neposlední řadě se snaží o shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých přístupů a na jejich základě pak volí nejvhodnější přístup pro konkrétní čtyřnohý robot Qasimodo.

2. ROZDĚLENÍ ŘÍDICÍCH ČLENŮ

Řídicí architektura robotů poskytuje složení a principy pro navrhování různých druhů specifických řídicích členů robotu. Všechny tyto možné řídicí členy je možno rozdělit do různých základních typů řídicích architektur jako je např. deduktivní, reaktivní, hybridní a na chování založené řízení. Všechny tyto přístupy představují biologicky inspirované systémy, a to v různé míře od pohybu hmyzu až po poznávací schopnosti lidské bytosti [1].

Další možné dělení řídicích členů, které uvedl např. Ridderstorm je na deduktivní řídicí členy, hybridní řídicí členy a na biologicky inspirované řídicí členy [2]. Dále se používá rozdělení na přístupy založený na modelu, na chování a hybridní, jak uvádí např. [5].

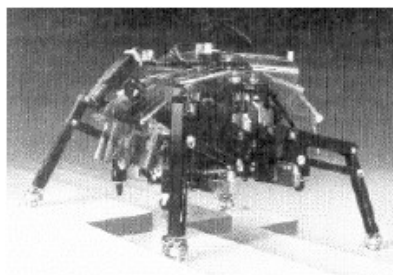
V této práci jsou řídicí členy rozděleny do celkem šesti samostatných skupin a to na deduktivní, reaktivní, hybridní, řízení založené na modelu, řízení založené na chování a biologicky inspirované řízení. K tomuto rozdělení bylo přistoupeno na základě provedené rešeršní studie a jeví se autorovi práce jako nejpřehlednější.

2.1. Deduktivní řízení

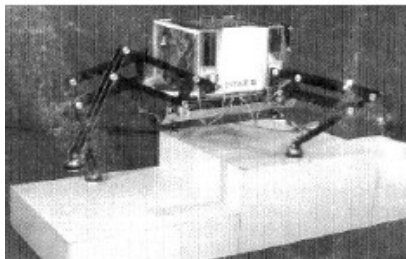
Deduktivní řízení, v tomto typu řízení je kladen důraz na znalosti, ne na reakce. Tedy, deduktivní systémy využívají obsáhlé vnitřní reprezentace a složité logiky řízení pohonů k tomu, aby odvozovaly optimální plány pro akce. Protože deduktivní systémy byly vyvinuty bez starosti o reálný čas odpovědi, musí být složité počítány, a tak jsou typicky neschopny úvahy o reálných situacích, vyžadujících okamžitou odpovědi. Pokud je dostatečná doba a jsou dostatečné informace k udržení přesného modelu světa, deduktivní řízení dovoluje robotu, aby strategicky jednal, vybráním nejlepšího postupu akce pro danou situaci. Nicméně, pokud se robot vyskytuje v narušeném dynamickém prostředí toto je pak nemožné. Reální roboti nejsou téměř nikdy čistě deduktivní. Dřívější umělá inteligence byla založena na modelech z lidského poznání, proto deduktivní systémy se vyvíjely mimo tyto modely. Schopnosti plánování a uvažování, které jsou základní k deduktivnímu řízení, jsou považovány jako rozdílné od vlastnosti lidského poznávání. Proto deduktivní řízení patří mezi biologicky inspirované [1].

2.1.1. Deduktivní řídicí členy

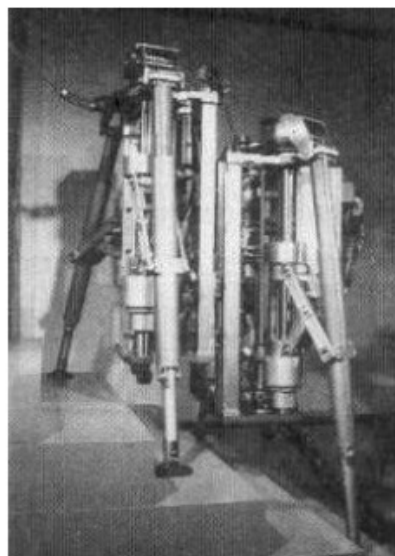
V této části budou popsány deduktivní řídicí členy, které jak uvádí Ridderstorm [2], se dají rozdělit na dvě skupiny, v první skupině jsou hierarchické deduktivní řídicí členy a v druhé skupině jsou hierarchicky, rozdělené deduktivní řídicí členy. Níže bude uvedena, běžná struktura řídicích členů, která byla použita u robotů Titan, tyto řídicí členy patří do skupiny hierarchicky rozdělených deduktivních řídicích členů. Z této struktury vycházejí ostatní řídicí členy, které byly u těchto robotů použity, liší se od sebe drobnými změnami v řízení. Dále bude popsán řídicí člen dynamické stability, pro rozšířenou klusavou chůzi, použitý u robotu Titan IV a algoritmus pro řízení postoje robotu v nerovném terénu.



Robot Titan IV



Robot Titan III



Robot Titan VI

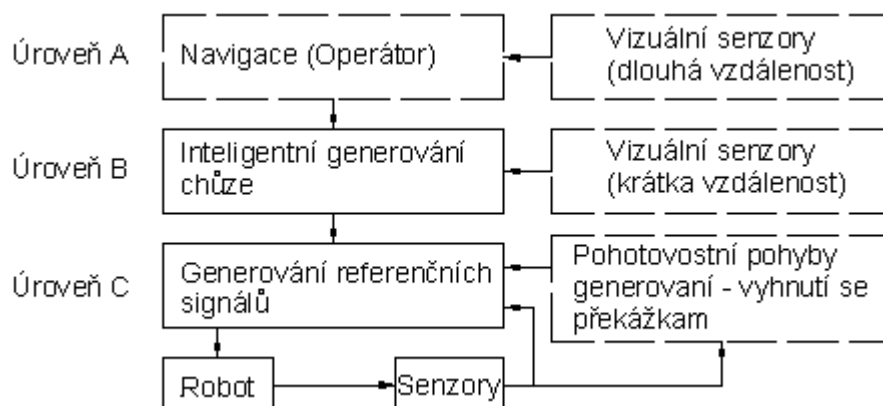
Obr. 1: Roboti Titan, u kterých bylo použito deduktivních řídicích členů[2].

2.1.2. Běžná struktura deduktivních řídicích členů

Struktura těchto řídicích členů (viz. obr. 2), se skládá ze tří úrovní. Každá úroveň provádí jednotlivé úkoly:

- Úroveň A – vykonává globální plánování cesty tím, že dává řídicí příkazy, které jsou výsledným příkazem globální cesty, robot tuto cestu následuje pouze přibližně
- Úroveň B – je inteligentní řídicí systém chůze. Tato úroveň vykonává dvě základní plánovací úlohy a to jsou:
 - Plánování lokální cesty pro trup: cesta je upravována podle lokální mapy terénu, aby se robot mohl vyhnout, nebo přejít přes překážku.
 - Plánování chůze určením parametrů, jako jsou např. noha, která bude ve fázi posuvu, pozice došlapu, přenos trupu a jeho otáčení během kroku. Plánování se uskutečňuje během vykonávání aktuálního kroku a plánuje se krok následující. Předpoklad je, že tento aktuální plán bude přesně dodržen.
- Úroveň C – generuje referenční signály a taky generuje pohotovostní pohyby.
 - Pohotovostní pohyby, přijmutím příkazu ze systému, zabraňují reflexivnímu ovládní např. dojde-li k nárazu do překážky.
 - Plánování je založené na přesném vykonávání aktuálního kroku.

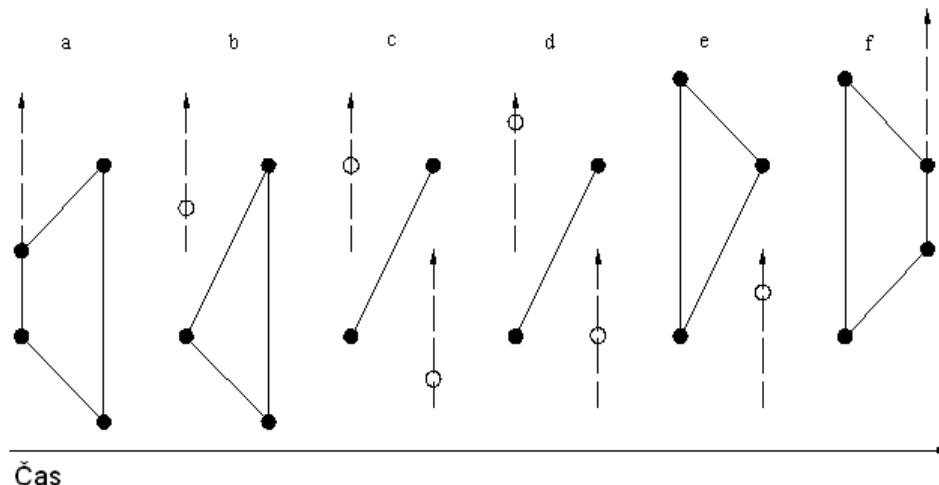
Proto se používá nepravidelná absorpce chůze k zajištění správných pozic došlapu. Ostatní úrovně řídicího členu čekají pokud je to nezbytné, než se tato část zajištění došlapu uskuteční.



Obr. 2: Schéma řídicí struktury použité u robotů Titan [2].

2.1.3. Řídicí člen dynamické stability

Pro tento řídicí člen, byla navržena rozšířená klusavá chůze, aby kombinovala výhody statické a dynamické stability chůze. Cyklus této chůze se skládá ze dvou vln, kde vlna je časový interval od zdvižení přední nohy, až do umístění diagonální zadní nohy (viz. obr. 3). Vždy dochází k oporné fázi, kdy je postoj robotu na čtyřech nohách a nastává když vlna končí a začíná další.



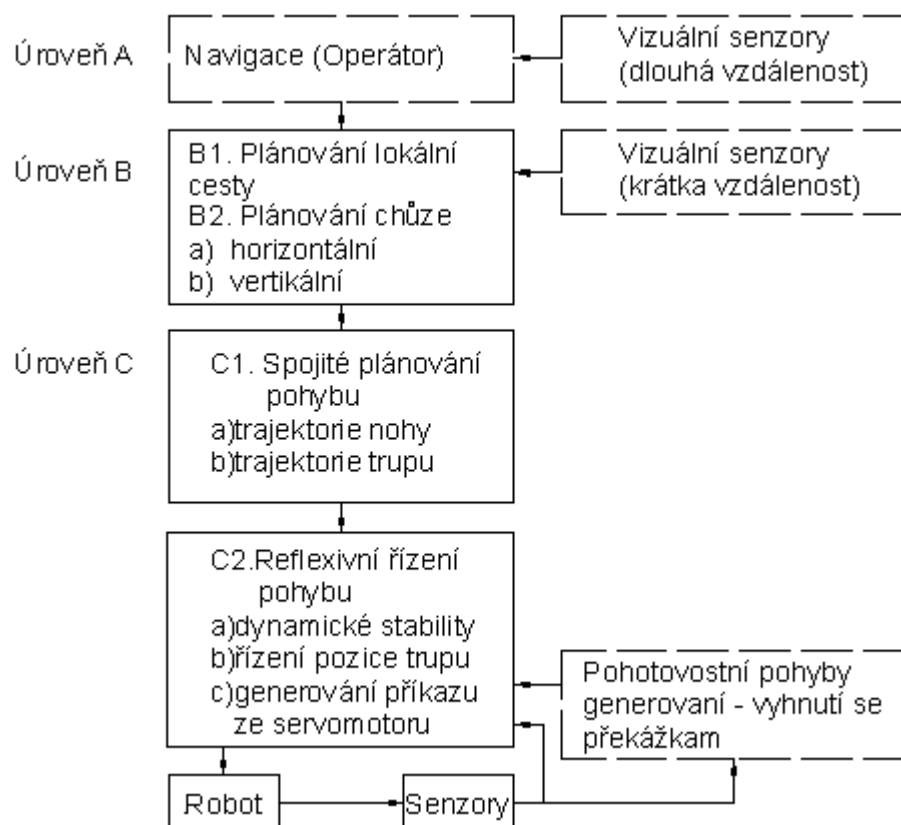
Obr. 3: Znázornění vlny u rozšířené klusavé chůze, kde a-f jsou fáze posuvu[2].

Postup vlny je následující. První fáze vychází z postavení na čtyřech nohách (viz. obr. 3a), v druhé fázi (viz. obr. 3b), je zdvižena přední levá noha a posouvá se směrem dopředu, dochází k postavení na třech nohách, ve třetí fázi (viz. obr. 3c), se zvedá diagonální zadní noha a následuje směr posuvu přední nohy, dochází k postoji na dvou nohách, ve čtvrté fázi tento posuv noh pokračuje (viz. obr. 3d), postoj na dvou

nohách trvá, v páté fázi dochází k umístění přední levé nohy a postoj robotu je na třech nohách (viz. obr. 3e), v poslední fázi dochází k umístění zadní pravé nohy a postoj robotu je opět na čtyřech nohách, (viz. obr. 3f).

U tohoto řídicího členu jsou tři základní změny, od běžné struktury řídicích členů uvedených výše, viz. kap. 2.1.1. Mezi tyto změny patří :

- 1) Generování lokální cesty (viz. obr. 4, B1), produkuje požadovanou rychlost, kromě požadované pozice trupu. Lokální cesta je vždy generována pouze pro určitou vzdálenost.



Obr. 4: Řídicí člen pro rozšířenou klusavou chůzi[2].

- 2) Plánování chůze (viz. obr. 4, B2), se uskutečňuje po uplynutí každé vlny, přičemž tato jedna vlna se plánuje v předstihu. Pohyb trupu je plánován (viz. obr. 2, C1) k udržení dynamické stability, použitím ZMP (z angl. zero moment point, např [2]) kritéria. Dochází zde k plánování horizontální chůze a vertikální chůze.

a) Plánování horizontální chůze

Určitá část naplánované lokální cesty, kterou lze považovat za přímku, lze zajistit během jedné vlny, tudíž horizontální pohyb pak může být plánován následovně:

1. Výběr další nohy k přesunu.
2. Vytváření mapy a hledání prostoru pro místo došlapu. Počáteční poloha hledání je určena z následujících dat:
 - plánovaná pozice trupu, v průběhu další vlny
 - pracovní prostor nohy
 - odhad činitele využití, založený na naplánované lokální cestě
3. Určení pozice trupu během další vlny, použitím předem určeného místa došlapu.
4. Určení rychlosti a činitele využití, které jsou založeny na lokální cestě.

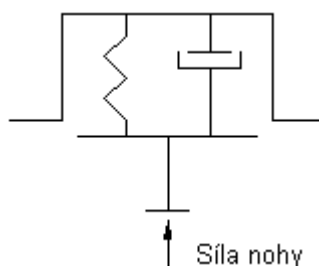
b) Plánování vertikální chůze

1. Přední stopy jsou používány pro odhadnutí výšky terénu. Příčemž odhad je založen na poloze průsečíku průmětu čáry, spojující přední body došlapů s průmětem (plánované) trajektorie těžiště trupu v horizontální rovině.
 2. Požadovaná výška v dalším kroku je pak spočtena na základě předpokladu lineárního průběhu výšky těla robotu nad povrchem pomocí známe aktuální výšky a známé minimální výšky potřebné pro překročení bodu průsečíku určeného v předchozím bodě.
- 3) Plánování pohybu trupu pro udržení dynamické stability. Na úrovni C1 (viz. obr. 2) hierarchicky rozděleného řídicího členu je plánována nepřetržitou přenosovou nožní trajektorii a trajektorii trupu, která udržuje ZMP uvnitř podpůrného mnohoúhelníku (nebo na diagonálním podpůrném pásmu, během postoje na dvou nohách). V plánované trajektorii trupu, se vlny rozdělují na dvě fáze statické stability a jednu fázi dynamické stability. K tomu, aby mohlo být provedeno požadované plánování, jsou důležité následující parametry :
- čas začátku a konce vlny
 - činitel využití a doba trvání fáze
 - orientace, pozice a rychlost pohybu těžiště trupu na začátku vlny
 - požadovaný směr v první fázi následující vlny
 - požadované rychlosti těžiště trupu a bodů došlapu na konci vlny

Zrychlení během vlny je konstantní a může nepřetržitě měnit a ovládat ZMP. Dynamické účinky nožních pohybů jsou zanedbány, a proto dochází k neočekávaným kmitům trupu. Pro potlačení těchto kmitů autoři používají tzv. algoritmus "sky-hook", doslova algoritmus vzdušného zavěšení. Tímto je myšleno, že algoritmus uvažuje pro výpočet pohybu trupu robotu zavěšení těla robotu na nohou kombinací pružin a tlumičů, přestože nejsou fyzicky v konstrukci robotu použity. Blíže je tento algoritmus popsán v další kapitole.

2.1.4. Algoritmus vzdušného zavěšení

Tento algoritmus, jak uvádí Ridderstorm [2], se používá pro potlačení nerovností země. Tato metoda využívá virtuální soustavu zavěšení "pružiny – tlumiče", viz. obr. 5. Poruchy terénu jsou pak tlumeny jednoduchým způsobem, jako u tlumení automobilů. Macdonald[5] u tohoto přístupu k řízení chůze vyčleňuje zvlášť dopřednou a zpětnou vazbu. Řídicí člen dopředné vazby řídí nohy k dosažení vhodných silových rozložení. Tyto silové příkazy, které jsou založeny na silových informacích ze senzorů, jsou potom upravovány v řídicích členech zpětné vazby, které se pokouší udržovat úroveň pozice trupu nastavením virtuálních impedancí, za přítomnosti poruch v prostředí.

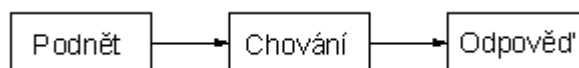


Obr. 5: Aktivní pružnost v noze[5].

Síla působící na nohu, je řízena pouze v oporné fázi a řízení pozice došlapu během fáze posuvu. Přepínání mezi jednotlivým typem řízení, je aktivováno silovými senzory na nohách.

2.2. Reaktivní řízení

Reaktivní řízení je přímo inspirované pevným spojením mezi vstupy senzorů a výstupy motorů v biologických systémech, které umožňují zvířatům reagovat na různé změny podmínek. Podobné schopnosti jsou rozhodující také pro roboty, pro úkoly jako „navigace kolem stěny“ v zalidněné budově. Obvyklá schopnost u tohoto přístupu je reagovat velmi rychle na změny v nestrukturovaném prostředí, to se nazývá reaktivita a naznačuje také spodní vrstvu řídicích členů. Robot nemá čas na to, aby mohl reagovat rychle a zároveň udělat složitější zpracování. Proto, reaktivní systémy jsou definované nedostatky vnitřních modelů a reprezentací, a následně nedostatkem schopností, aby se učily. Jsou schopny udržení krátkodobého stavu, který jim může dovolit vyhnout se opakovaným akcím. Tento krátkodobý stav musí být bezvýznamný v rámci zpracování, aby se nezpomalil čas reakcí systémů. Porovnání je realizováno ve prospěch rychlé časové reakce na úkor složitosti usuzování. Pro prostředí a úkoly, které mohou být přesně popsány, mohou být reaktivní řídicí členy vysoce robustní a vhodně strukturované, schopny optimálního výkonu. Reaktivní řízení je popisováno jako biologický ekvivalent „odpověď na podněty“ (viz. obr. 6).



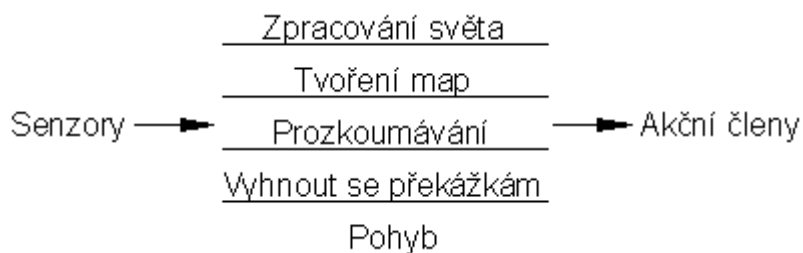
Obr. 6 : Diagram podnět – odpověď (jednoduché chování) [7].

Všechny roboty obsahují reaktivní řídicí členy, jako část řídicího systému, tak si zajišťují schopnosti robotu, aby přežil v životním prostředí a jako nutný základ pro vykonání různých úkolů z jeho vyšší úrovně. Většina reaktivních řídicích členů nenapodobuje určité přírodní systémy, nebo jejich strukturu, ale namísto toho napodobují jejich funkčnost použitím základních principů ohledně reaktivity a adaptace[1].

Jako příklad architektury, která je považována za reaktivní je např. vrstvená architektura (z anglického názvu „Subsumption“), kterou navrhl Brooks[7], kde každá vrstva vykonává určitý typ chování. Přístup představuje čistě reaktivní metodu založenou na chování. Tato metoda byla vyvinuta na základě negativních zkušeností s předchozím přístupem, který využíval architektury „snímání-plánování-jednání“ (z ang. sense-plan-act), která se ukázala ve skutečnosti pro roboty nevhodná. A to z důvodu, že stavění modelů světa a deduktivní používání jednoznačných symbolických reprezentací, bylo přinejmenším překážka, pro včasnou odpověď robotu a při nejhorším vedla pracovníky v robotice špatným směrem. Základní kámen reaktivní robotiky založené na chování, je taková realizace, která poskytuje spojení mezi vnímáním a akcí[7].

Brooks navrhl používat vrstvený řídicí systém, který představuje vrstvená architektura (viz. obr. 7), ale vrstvy nesmějí být seřazené za sebou, jak to do té doby prezentoval tradiční výzkum. Brooks uvedl, že vrstvy mají být seřazené ve vertikálním směru. Jméno vrstvená vyplývá z postupu koordinace, použité mezi vrstvami chování uvnitř architektury. Složitě akce jsou součtem jednoduchých chování. Většina stylů a prezentací vrstvené architektury jsou dogmatické[7]. Principy z tohoto hlediska zahrnují že:

- složité chování nemusí být nutně produktem složitého řídicího systému
- inteligence je tvořena střetem s reálným prostředím
- jednoduchost
- robustnost v přítomnosti chybějících senzorů je cílem návrhu
- plánování je právě způsob jak se vyhnout rozmýšlení co dělat dál
- systém by měl být postaven vrstveně
- žádné reprezentace, složité počítače, žádné široce pásmové komunikace

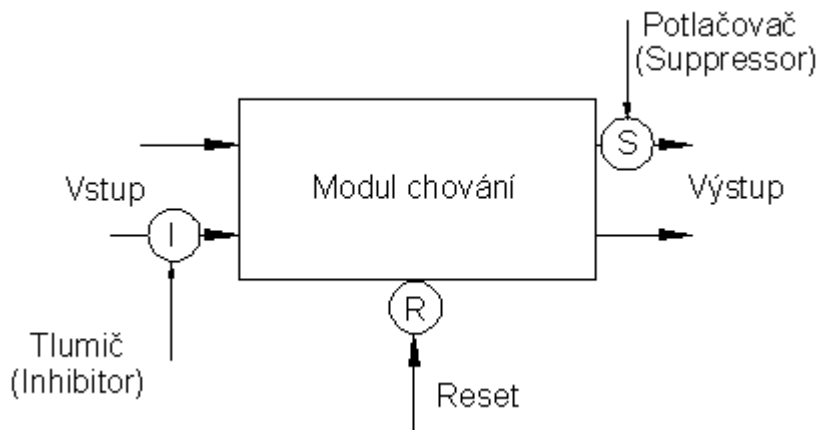


Obr. 7: Vrstvená architektura [7].

Úloha dosažení cíle chování, je ve vrstvené architektuře reprezentována oddělenými vrstvami. Jednotlivé vrstvy pracují k dosažení jednotlivých cílů současně a paralelně[7]. Ve spodní vrstvě, je každé chování reprezentováno použitím rozšířeného

konečného stavu automatu. Rozšířený konečný stav automatu zapouzdřuje jednotlivé typy chování přechodovou funkcí. Podněty, nebo signály mohou být potlačeny, nebo zpožděny ostatním chováním. Také se často používá resetovací vstup, který umožňuje navrácení chování do počínajících podmínek. Každý automat (viz. obr. 8), vykonává akci a je zodpovědný za své vlastní vnímání světa. Neobsahuje globální paměť. U tohoto návrhu, může být každé chování mapováno do vlastního procesoru. V této architektuře není žádný centrální model světa, nebo reprezentace globálními senzory. Požadované vstupy senzorů jsou vedeny přímo k chování. Bylo taky navrženo, osm základních chování, které jsou seřazeny podle priority[15]. Chování s vyšší prioritou je uloženo na nejnižší úrovni, takové seřazení chování může být následující, chování s nejvyšší prioritou je:

- vyhni se kontaktu s předměty (mohou, nebo nemusí být v pohybu)
- toulej se bezcílně dokola bez střetu s předměty
- prozkoumávej prostředí, v rozsahu pokrytí senzorů
- buduj mapu prostředí a plánuj cestu z jednoho bodu do druhého
- zaznamenávej změny ve statickém prostředí
- uvažuj o světě v termínech identifikovaných objektů a vykonej úlohy s těmito objekty
- formuluj a vykonávej plány, které vyžadují změnu stavu světa, požadovaným způsobem
- uvažuj o chování objektů v prostředí a upravuj podle toho plány



Obr. 8: Originální rozšířený stavový automat, použitý ve vrstvené architektuře[7].

Mezi další architektury, které jsou řazeny mezi reaktivní je např. architektura založená na schématu[7] (z ang. schema-base). Reaktivní řízení je tedy typ řízení, u kterého se využívá jednoduchého chování, někdy také bývá označeno jako čistě reaktivní řízení založené na chování. Použití čistě reaktivního řízení bylo realizováno na robotu Genghis, který byl navržen [7] pro manipulaci v neznámém prostředí. U robotu Genghis byla použita právě výše zmíněná přírůstková architektura.



Obr. 9: Robot Genghis[16].

O pár let později, tato vrstvená architektura byla inspirací pro řízení, které je založené na chování. Toto řízení má podobné vlastnosti jako reaktivní, to znamená, že na základě informace ze senzorů robot dokázal jednat, avšak jsou zde patrné rozdíly viz. kap.2.6.

Jak již bylo zmíněno, reaktivní řízení se používá u většiny robotů, aby mohli okamžitě reagovat na změnu dynamického prostředí. Většinou se jedná o odpovědi ze senzorů, které jsou zpracovány přes jednoduché chování, výstup z chování se pak přivádí k akčním členům.

2.3. Hybridní řízení

Hybridní řízení je kombinací nejlepších hledisek reaktivního a deduktivního řízení. Pokouší kombinovat odpověď v reálném čase z reaktivity, s rozumností a optimalizací z deduktivního řízení. Následkem toho hybridní řídicí systém obsahuje nejméně dvě různé části, reaktivní a deduktivní, které se musí ovlivňovat, aby produkovaly spojitý výstup systémové úrovně. Toto je náročné, protože reaktivní část se zabývá okamžitými potřebami robotu jako vyhnout se překážce, proto operuje ve velmi rychlém časovém režimu a používá přímá externí data ze senzorů. Na rozdíl od toho využívá deduktivní část vysoce abstrahované (myšlené) vnitřní symbolické reprezentace světa a operuje v delším časovém režimu. Pokud výstupy reaktivních a deduktivních částí hybridního systému nejsou v rozporu, systém nevyžaduje žádnou další koordinaci. Obě části systému se musí ovlivňovat, pokud chceme, aby prospívaly sobě navzájem. Reaktivní systém musí převyšovat nad deduktivním, pokud prostředí představuje neočekávaný a okamžitý problém. Deduktivní část musí informovat reaktivní, aby vedla robot směrem k optimálním a účinnějším plánům akce. Ovlivňování těchto dvou různých částí systému vyžaduje prostřední část, jehož stavba je typická pro problém hybridních systémů. Tím pádem hybridní systémy jsou často nazývané jako třívrstvé systémy, skládajících se z reaktivní, prostřední a deduktivní vrstvy [1].

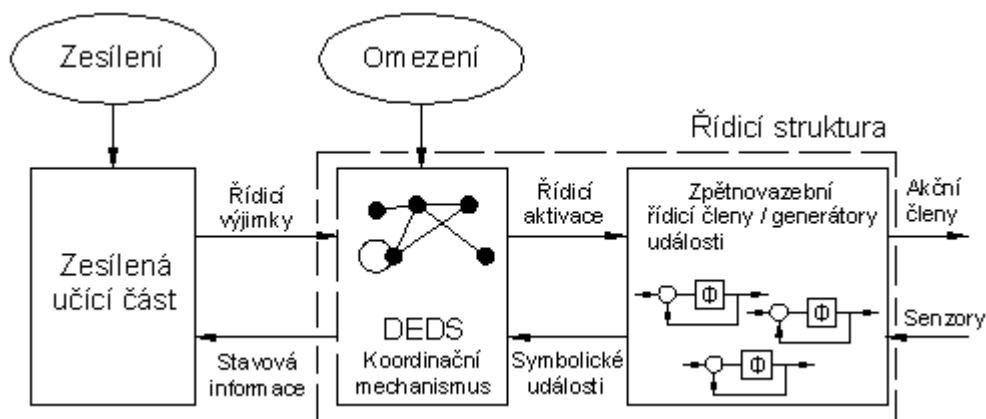
2.3.1. Hybridní DEDS řídicí člen

Systém s diskretními událostmi je dynamický systém, jehož chování je řízeno výskytem diskretních událostí. Ačkoli pouze určité události se mohou vyskytovat v dané

situaci, přesné pořadí, čas a intervaly ve kterých se vyskytují, se jeví jako obecně neznámé. Ve většině případů jsou takové systémy proto nedeterministické a nemohou být řízené off-line, ale spíše požadují on-line řízení mechanismů. Různé druhy mechanismů mohou být formovány tímto způsobem. Hybridní přístup vycházející z paradigmatu Dynamického systému s diskrétními událostmi (DEDS), je k řízení takových systémů, které počítají s reaktivitou v nepřetržité doméně a s automatickou generací strategie řízení v diskrétním rámci. Drasticky snižují množství specifikace systému, který je požadován od návrháře. Řízení je zkonstruované on-line konvergentní aktivací reaktivních řídicích členů v podobě závislých úkolů[5].

2.3.1.1. Architektura DEDS řídicího členu

Hybridní DEDS architektura využívá hierarchickou organizaci řídicích technik k tomu, aby povolovaly efektivní operace ze složitých platform robotu (viz. obr. 10). Je složena ze tří vrstev a pro svou funkčnost kombinuje dva přístupy k řízení, které jsou založené na chování a modelu[5].



Obr. 10: Hybridní architektura DEDS [2].

- Spodní vrstva - Na spodní vrstvě je systém chování konstruován od sady řídicích prvků zpětné vazby, tak že ovládá všechny vstupy senzorů a výstupy akčních členů. Báze řídicího přístupu se používá k odvozování chování, jako je pořadí konvergentních zpětnovazebních řídicích členů. Reprezentace spodní vrstvy jsou výsledné řídicí výjimky, které jsou nedeterministickými konečnými automaty a jsou seřazeny přes sadu řídicích vyrovnaností k dosažení cílené úlohy. Přechody uvnitř konečného automatu jsou řízeny čistě výskytů konvergentních událostí z uzavřených smyček řídicích členů. To efektivně dělí řízení na spojité a diskrétní části, které odpovídají základním řídicím členům. Řídicí architektura může být charakterizována jako dynamický systém s diskrétními událostmi, takové systémy otevírají analýzu velké skupině formálních technik. Zvláště použití DEDS modelu u diskrétních částí, které poskytují široký rozsah metod, k analýze potenciálních systémů chování a automaticky mohou konstruovat rozhraní ke spojitému prvku řízení. Ty zajišťují, že daný soubor omezení chování není porušen během operování robotu. Tyto schopnosti jsou postupně kombinované s lokální schopností potlačení chyb ze spojitého řídicího prvku,

k dosažení předpovídanému chování systému a k řídicí architektuře schopné oslovit autonomní operace složitých mechanismů[5].

- Prostřední vrstva - Kombinace DEDS modelu s bází řízení, vede k hybridní diskrétní řídicí struktuře, která efektivně využívá potenciál z obou technik, a potlačuje jejich nevýhody. Uzavřené smyčky řídicích členů jsou představeny v této architektuře všemi informacemi ze senzorů a vykonávají pohon mechanismů robotu, to umožňuje systému reaktivitu a robustnost s ohledem na lokální odchylky a nejistoty. Koordinační mechanismus DEDS na druhé straně formuje základ pro jednoduché instance řídicích členů. Sjednocením těchto použitých technik pro koordinační mechanismus, může být dosaženo různých typů znalostí, které mohou být použity k tomu, aby vedly k sestavování specifických úloh řídicích strategií. To poskytuje řídicí architektuře automatické programování výjimek, které jsou dány instancí řídicích členů, nebo pokud nastane porucha při dálkovém ovládní systému robotu[5].
- Nejvyšší vrstva - Zesílení učení poskytuje efektivní mechanismus pro učení řídicích instancí pomocí zpožděných zisků. Tato použitelnost je určena pro on-line učící problém, který je často omezen složitostí systémů spodní vrstvy učícího procesu. DEDS architektura tvoří problém zesíleného učení na úrovni řídicích aktivací v symbolickém stavovém prostoru a tak dramaticky snižuje potenciální velikost zkoumaného prostoru. DEDS model může navíc ukládat přechodové pravděpodobnosti, se kterými může dosáhnout zlepšení učebních vlastností v dodatečných úlohách, to může omezovat techniky učení založené na průzkumu k bezpečnému a důležitému chování a můžou se použít pro společné ovlivnění učebního algoritmu způsobem vyjádření jako sekvence omezení[5].

2.3.1.2. Báze řízení

Tento přístup báze řízení byl navrhu pro ovládní ruky se čtyřmi prsty [5], tento stejný přístup byl také použit pro ovládní čtyřnohého robotu Thing [5], viz. obr. 11.

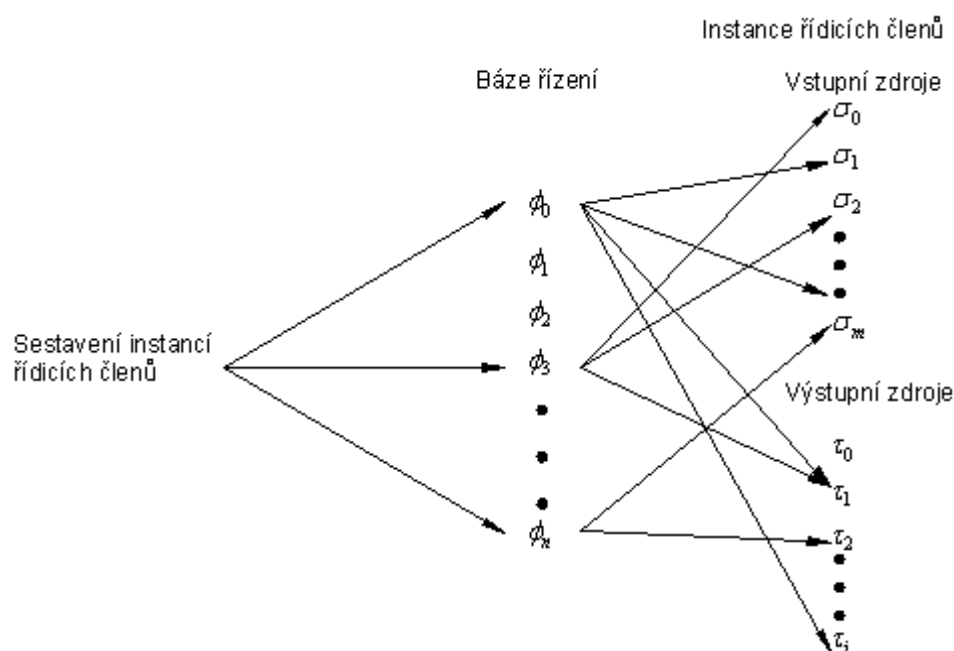


Obr. 11: Robot Thing [5].

Báze řízení je složena z instancí, které aktivují podmnožinu řídicích členů k dosažení referenčních stavů, za předpokladu, že bude splněno funkční omezení. Každý řídicí člen v bázi řízení má vlastnosti stability a konvergence, přes řadu možných plánování. Předpoklad je, že každý řídicí člen dosáhne nového nastavení aktivací konvergentních řídicích členů (viz. obr. 12). Instance řídicích členů určuje, který řídicí člen v bázi řízení bude aktivní. Více řídicích členů může pracovat současně, pokud se nesnaží o dosažení protichůdných cílů, což znamená, že se neovlivňují. Řídicí členy, které nejsou protichůdné, mohou pracovat pouze s vedlejšími řídicími členy. Tyto vedlejší řídicí členy mohou pracovat pouze v nulovém prostoru, což je soubor stavů systémů, ve kterém řídicí členy zůstávají v rovnováze. Vedlejší řídicí členy mohou pouze představovat akce, které nezasahují do vyvážení dominantních řídicích členů [5].

Každý řídicí člen má přiřazen soubor vstupních a výstupních zdrojů. Tyto zdroje mohou být senzory, nebo stupně volnosti robotu. Mohou být také abstrakcí, jako koncové pozice akčních členů. Tento dělený řídicí přístup je sestaven z on-line chování a základní řídicí členy jsou nezávislé na úloze a platformě robotu. To znamená, že řídicí členy mohou být použity pro různé úlohy u různých robotů, pomocí jednoduché změny složených instancí.

Báze řídicího přístupu se podobá technikám založených na chování, ve kterých je požadované chování dosaženo on-line, z vlivů nezávislých na bázi řídicích členů. Ve skutečnosti obsahují velké rozdíly, velký význam je, že řídicí členy v provedení zvyšují bázi řízení, která prokazuje konvergenci - zaručuje dosažení vyvážení ze schopnosti senzorů a rozsahu prostředí, ve kterém mají operovat (je dáno atraktorem). Také vykonávají více obecných podúloh (jako např. kinematická optimalizace), což je v protikladu s více konkretizovanými úlohami chování používaných ve vrstvené architektuře, jako je např. zvednutí nohy. To znamená, že báze řídicích členů je přesný proces s přísnými pravidly, které zaručují správné ovlivnění řídicích členů v daném čase. Návrh specifických úloh řídicích členů může být veden v úrovni instance, protože báze řízení bude obsahovat všechny schopnosti systému[5].



Obr. 12: Instance řídicích členů [4].

2.3.1.3. Báze řízení pro chůzi vpřed

Pohyb robotu může být řízen nastavením třech základních řídicích členů, toto nastavení umožňuje pohyb v neznámém prostředí na rovném povrchu. U tohoto řízení jsou dva hlavní typy pohybu a to čistá rotace a pohyb dopředu. Detailní popis všech typů přesahuje rozsah této práce, proto je v dále uveden pouze příklad pohybu vpřed, viz. obr. 13.

ϕ_0 - řízení pohybu v prostoru

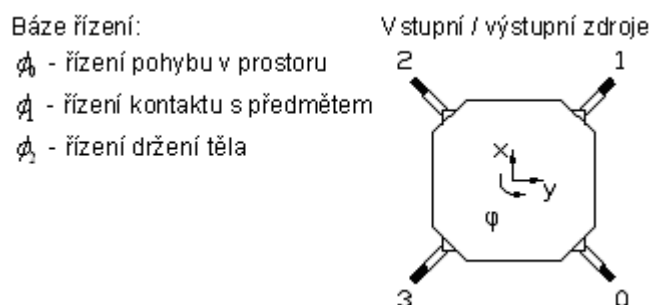
Řízení pohybu v prostoru se používá pro generování robustnosti, reaktivity a pro volný pohyb mezi překážkami, aby nedošlo ke kolizi, přes nastavení prostoru robotu. Nastavení prostoru je dáno symboly: x, y – pozice, ϕ – orientace, určují těžiště robotu. Tento řídicí člen bude pohybovat robotem, aby dosáhl cíle, aniž by narazil do překážky.

ϕ_1 - řízení kontaktu s předmětem

Řízení kontaktu s předmětem se využívá k nastavení dotyku a pohybu noh, které jsou založené na lokálních geometriích prostředí. Taky minimalizují zbytkové síly a momenty působící na těžiště robotu a tím stabilizují robot.

ϕ_2 - řízení držení těla (kinematické podmínky)

Řízení držení těla, optimalizuje postavení kloubové struktury, během zadaného ovlivňování se světem. Dovoluje robotu udržovat nohu v žádoucí poloze, ve které má noha maximální pracovní prostor.

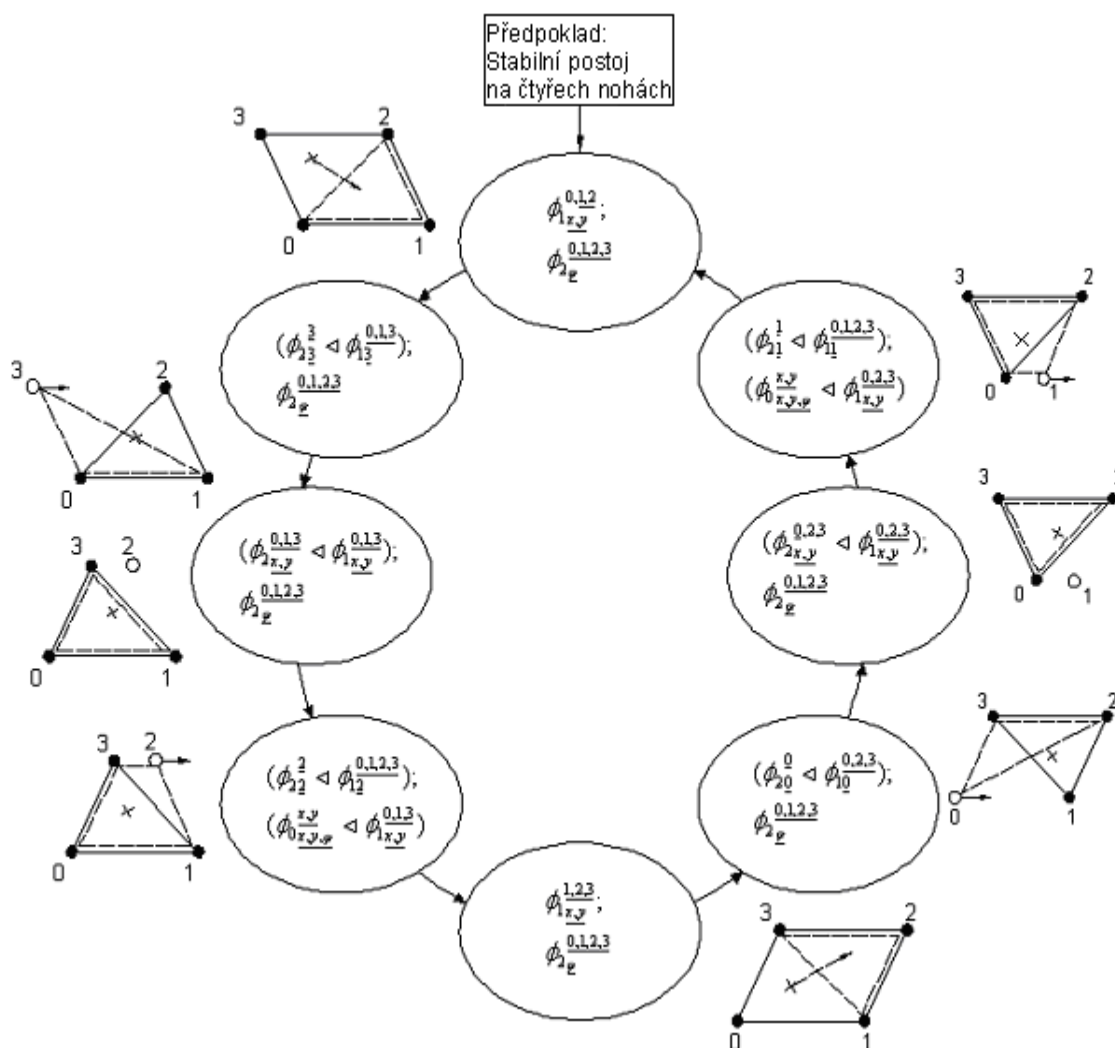


Obr. 13: Označení chůze [4].

Každý příklad těchto řídicích členů nabývá formy $\phi_{i\tau}^{\sigma}$, kde ϕ_i je prvek z báze řízení a horní index σ a dolní index τ označuje vstupní a výstupní zdroje. Tyto zdroje jsou kombinace pozicí noh 0, 1, 2, 3 z pozicí a orientací těžiště robotu. Úloha řízení je dosažena složením těchto řídicích prvků v souvislosti na závislé cestě, což jsou příklady typu konečných stavů koordinačního mechanismu DEDS. Řízení instancí u každého bodu v čase, je ukázáno uvnitř každého stavu jako nastavení asynchronní (“;”), nebo hierarchické (“<”) aktivace řídicích členů vázaných na specifických systémových zdrojích. Stabilita těla a postup vpřed jsou pevně stanoveny explicitně přes aktivaci odpovídajícího řídicího členu.

2.3.1.4. Řízení chůze vpřed

Tato chůze umožňuje robotu pohyb dopředu, řídicí instance řídicích členů pro tuto chůzi viz. obr. 14. Vzájemná poloha noh robotu je ukázaná vedle každého stavu, pro objasnění postupu u této chůze. Využívaný podpůrný mnohoúhelník je vykreslen plnou čarou a přerušovaná čára představuje stabilní postoj, který má nastat. Tento stav musí umožnit dotkový řídicí člen. V této chůzi robot udržuje stabilitu cyklickým pořadím mezi postojem na třech a čtyřech nohách. Pohyb jednotlivých noh je v pořadí 3, 2, 0, 1. Ve stejnou dobu se řízení držení těla pokouší optimalizovat kinematickou konfiguraci noh, které mají řízením kontaktu s předmětem vystavené omezení stability. Jako například ($\phi_{23}^3 < \phi_{13}^{0,1,3}$) aktivuje řízení kontaktu s předmětem ϕ_1 , aby určilo stabilní postoj na třech nohách a to na nohách 0, 1 a 3 posuvem nohy 3. Omezení vystavené z řízení držení těla ϕ_2 , optimalizuje postavení nohy 3 v rozmezí stabilního postoje. Navíc ke stabilizování trupu, tato chůze také zahrnuje dva stavy, které aktivují řízení pohybu v prostoru $\phi_{2\frac{x,y}{x,y,\phi}}$, které vystaví omezení stability z postoje na třech nohách. To umožňuje při chůzi nastavit umístění a orientaci trupu tak, aby souhlasila se směrem požadované cesty, a rovněž umožňuje přejít, nebo obejít překážku [5].



Obr. 14: Postup při chůzi dopředu [5].

2.4. Přístup založený na modelu

V těchto technikách, jednotlivé řídicí práva pro systém jsou odvozena analyticky, založené na kompletním modelu prostředí, interakcemi mezi řídicím systémem a světem. Tyto přístupy dovolují odvození nepřetržitých řídicích strategií pro daný úkol, pevné spojení mezi modelem a řízením způsobuje vysoký výkon, závislý na spodní vrstvě modelu. Stejná platnost analýzy stability je použita k vyčíslení ručně navržených řídicích členů. Spoléhá se na velmi přesné spočtení dynamických účinků na systém. V obou případech omezuje robustnost řídicích postupů v přítomnosti nejistot a neočekávaných situací. Přesné a kompletní modely jsou těžko konstruovatelné pro složité systémy robotů. Navíc otevřená prostředí jsou obecně vysoce nelineární, stochastické a nestacionární a tak je rovněž obtížné vytvořit model. Proto tento přístup má omezenou použitelnost. Používá se na mírně obtížné úkoly a také na dostupnější prostředí, spoléhá se na přesné porozumění se systémem dynamik [4]. Při návrhu

modelu[15] kráčivých robotů se nejčastěji setkáváme s úlohami modelování jako jsou např.:

- přímá a inverzní kinematická úloha
- statická analýza
- analýza dynamiky systému
- modelování pohonů a jejich řízení
- vizualizace stavu a pohybu robotu
- modelování interakce s prostředím
- řízení v reálném čase robotu, generování zdrojového kódu pro řídicí hardware

Kde každá z úloh má různý rozsah složitosti, jemnost modelu a odpovídající náročnost výpočtu a také potřebnou dobu k sestavení a odladění modelu[15].

Příklad přístupu, který využívá pro plánování cesty model, byl použit u DEDES hybridního řídicího členu. Protože pro aplikaci technik spojených s DEDES (viz. kap. 2.3.) je důležité odvodit model diskretních částí ze systému chování. Takový model se může použít k automatickému spojení řídicího koordinačního mechanismu, který nařizuje úlohy omezení. Složitost takového postupu přináší kvalitní výsledky řídicích systémů u testovaných úloh, které jsou velmi závislé na struktuře a složitosti modelu systému. Model může být složen ze všech hledisek fyzických stavů, které jsou pro doménu úlohy velmi důležité. Ostatní detaily prostředí mohou být vynechány, tím se sníží celková velikost modelu prostředí a tím i složitost diskretního modelu systému, pokud pro řídicí systém je přípustné menší časové zpoždění informace[4].

Diskretní stavový prostor je reprezentovaný v kontextu funkčních cílů, které jsou poslány z přístupných nastavení složených řídicích akcí. To vede ke kompaktnímu modelu systému, který je popsán možnými chováními systému robotu v daném prostředí, narozdíl od přesného popisu všech hledisek prostředí používaného v jiných přístupech. Sestavení takového modelu je ulehčeno formálními vlastnosti spojitých řídicích prvků v bázi řízení. V tomto přístupu báze řízení, členy pracují dokud nedosáhnou konvergence a tak poskytují prostředek pro dočasnou abstrakci a pro nastavení události, ve formě aktivace a konvergence řídicího členu. Každý řídicí člen v bázi řízení dělí povrch do souboru oblastí atraktoru, kolem lokálního a optimálního nastavení s ohledem na cíl řídicího členu. Řídicí instance mohou být ukázány jako určité sekvence úlohy z aktivací řídicích členů, které pohybují systémem robotu přes vhodné nastavení řídicích vyváženosti s neočekávanými přechody výskytu konvergentních událostí. To vede k popisu celkového systému chování jako DEDES, kde diskretní stavový prostor je určen velikostí atraktoru řídicího členu. Výsledný model systému chování lze využít pro bázi řízení. Kompaktní model systému je popsán vektorem, který je složen z řady predikátů, udávající informaci o tom zda je, či není dílčí cíl řízení splněn. Mapované diskretní predikátové stavy jsou převedeny na nedeterministický model systému. Přechod v konečných stavových automatech odesílá aktivace a konvergence z akčního členu a tím popisuje všechny možné pohyby systému robotu přes prostor atraktoru. Pokud je obsaženo více řídicích členů a jednotlivé atraktory se překrývají, tak že jeden řídicí člen má pokrytou jednu oblast více než druhý, tak je robot

řízen v rozmezí atraktoru právě tohoto členu, dokud nedojde k překrytí a robot je řízen potom druhým řídicím členem a končí ve společném atraktoru obou řídicích členů[4].

Pro poskytnutí báze řízení a pro nastavení zdrojů robotu se používá predikátový vektor k sestavení diskretních stavových prostorů tak, aby odesílaly informace o splněných parciálních cílech z báze řízení k výstupním zdrojům. V těchto informacích se ve skutečnosti mohou vyskytovat chyby a pak sestavené oblasti atraktoru z potenciálního povrchu jsou kompletně odvozené ze vstupů senzorů, aby se mohlo dosáhnout řídicího cíle nezávisle na akčních členech. Diskretní stavy DEFS modelu tak odesílají predikátové vektory, jejichž hodnota může být odvozena přímo z vnitřních spojitých stavů řídicích členů. Báze řídicích členů, sobě navzájem poskytuje kompletní stavy systému a tím se vyhýbají specifickým tvarům prostředí ze senzorů. Výsledný predikátový model prostoru je tak určen hlavně bází řízení a mechanismy robotu. Použití abstraktních oblastí atraktoru z řídicích členů, pak jednoznačně reprezentuje jejich řídicí cíle v diskretním stavovém prostoru. Toto zajištění je potom důležité, protože stavové informace pro aktuální nastavení řídicích členů jsou obsaženy v DEFS modelu, který potom odesílá tyto informace ve formě chování, k bázi řízení. Takové zajištění a kompaktní velikost modelu dovoluje instancím postup sestavení, ve kterém se zaměří na možnou spolehlivost prostoru a tak sníží jeho vlastní složitost[4].

2.5. Řízení založené na chování

V systémech založených na chování, se řídicí členy robotu skládají z množiny chování, z nichž každý dosahuje a/nebo udržuje určitý cíl. Například „vyhnutí se překážce“ chování udržuje cíl chránící před kolizí s objekty v prostředí. Každé chování je zpracováno prvkem, nebo procedurou řídicích práv, které mohou být zabudovány v softwaru, nebo hardwaru. Každý prvek může vzít vstupy ze senzorů robotu a/nebo z ostatních chování a pošlou výstupy k akčním členům robotu a/nebo k dalšímu chování v systému. Následkem toho je řízení robotu „založeno na chování“ uspořádanou sítí ovlivňujících se chování. Tyto množiny se rozdělují do sítí chování, kde každá síť představuje různou složitost chování[1]. Např. jako u robotu Sleipner III, kde chování je rozděleno do dvou úrovní a v každé síti jsou obsaženy různé cíle řízení robotu viz. kap. 2.5.1.

Systémy založené na chování se liší od ostatních řídicími metodami v jeho přístupu k modularitě, to je způsob, ve které je systém organizovaný a rozdělený. Základní principy pro řízení založené na chování nařizují, že chování má být relativně jednoduché, přidané ve formě vrstev k systému a nemá být zpracované v sériové podobě[1]. Tyto systémy jsou určeny pro konstrukci v podobě zdola nahoru, podobně jako je tomu u reaktivního řízení, avšak rozdíl u řízení, které je založené na chování je, že tyto systémy mají větší schopnosti. Dokáží si ukládat použité reprezentace, které jsou uloženy a rozděleny do modulů chování. Pokud robot potřebuje přímo plánovat, tak to provede v síti chování, než aby používal centrální plánovač[12].

Chování je aktivované jako odpověď na externí a/nebo vnitřní podmínky, to jsou vstupy senzorů a vnitřní stavy. Systém celkově aktivuje veškeré podmnožiny chování tak, že může být využita v rychlosti počítání a ve výsledných dynamikách. Druhé hledisko řízení založené na chování je kritické: jako vícenásobné chování, nebo jsou-li moduly aktivní, dynamiky z ovlivňování nastanou uvnitř systému samy od sebe (z interakcí mezi chováním) a uvnitř prostředí (z interakce chování s venkovním

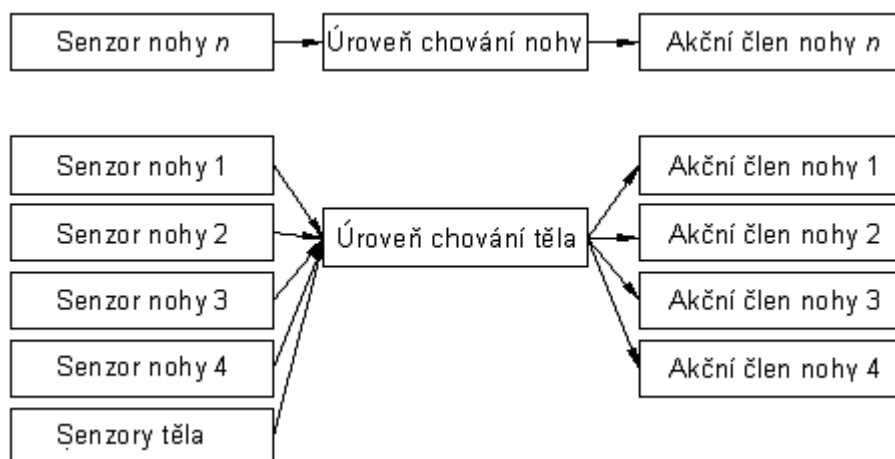
prostředím). Návrháři systémů založených na chování využívají tuto dynamiku, aby vytvořili (ručně nebo automaticky pomocí učení) opakovatelné, stabilní a hlavně inteligentní chování, které se nespolehá na konstrukci „shora – dolů“ a na centralizované řízení[1].

2.5.1. Řízení založeno na chování – u robotu Sleipner III

V následující kapitole bude popsáno řízení založené na chování, které bylo úspěšně použito u robotu Sleipner III. U tohoto robotu bylo zkoumáno, jak tento přístup může řídit a generovat chůzi pro robot se čtyřma nohama v nepravidelném terénu.

Systém je modulární a rozdělený v jeho struktuře, architektura je rozdělena do dvou úrovní, na tělesnou a nožní úroveň chování. Na každé noze je umístěn procesor, který zpracovává toto chování a také minimalizuje komunikaci a kabeláž vedoucí z centrálního počítače k nohám[6].

Robot je vybaven prvky jako jsou akční členy a senzory. Akční členy jsou řízené se třemi stupni volnosti a konfigurace každé nohy je popsána třemi úhly (uhnutím kyčle, ohybem kolena a obdukcí kyčle). Spodní části noh jsou vybaveny dotykovými body. Cílem chování z úrovně těla je pohybovat tělem robotu v prostředí. To je dosaženo výpočtem pohybů ze všech noh, které se vztahují k tělu a potřeby dosáhnout určitého pohybu těla působením všech čtyř noh současně. To znamená, že během pohybu jsou nohy řízeny právě z úrovně noh a na úrovni těla se pouze pohybuje nohama tak, aniž by se změnilo jejich místo došlapu, pouze se tvarují nohy k dosažení stability[6].



Obr. 15: Rozdělení do úrovní chování [6].

Další důležitou součástí robotu jsou senzory. Tyto senzory jsou využívány chováním v nožní úrovni a patří sem:

- senzory pozice nohy – jsou v každém spoji, konfigurace nohy a pozice nohy je vztažena k tělu a je známa
- dotykové senzory se zemí – indikují kontakt se zemí
- dotykové senzory pro nalezení překážky – jsou umístěny v přední části nohy
- senzory pro přetížení nohy

Dále jsou senzory také na úrovni těla, mezi které patří:

- Senzor orientace – náklonoměr, který měří orientaci těla vztaženou ke kolmici (úhel klopení a klonění)

2.5.1.1. Architektura chování

Architektura chování je inspirována Brooksem [7], tedy založena na vrstvené architektuře. Tato architektura je rozdělena do dvou úrovní, jak již bylo uvedeno, na nožní a tělesnou úroveň chování. Chování tedy pracuje na obou úrovních. Úroveň nožního chování vykonává řízení pro každou nohu zvlášť, která je zcela nezávislá na ostatních nohách robotu. Každá noha je tedy řízená jednotlivě, se zajištěním minimální koordinace a komunikace mezi ostatními nohama. Tělesná úroveň chování řídí tělo robotu současným řízením všech čtyř noh, kterými nepohybuje ve smyslu, že by docházelo ke změně pozic místa došlapu, ale pouze tyto nohy tvaruje. Tato úroveň nepotřebuje žádnou znalost z chování na nožní úrovni. Architektura obsahuje tři třídy chování a to kráčivé, poziční a navigační chování. Kráčivé chování se provádí na nožní úrovni, zatímco poziční a navigační chování je vykonáváno na tělesné úrovni[6].

Příklady úkolů, které jsou prováděny v kráčivém chování:

- posuv nohy
- postavení nohy
- stáhnutí nohy zpět, při kontaktu s překážkou

Příklady úkolů v pozičním chování :

- zajištění stability
- udržet určitý postoj těla
- zajištění držení těla v určité výšce nad zemí.

Příklady úkolů v navigačním chování :

- otáčení robotu směrem k cíli
- vyhýbání překážkám

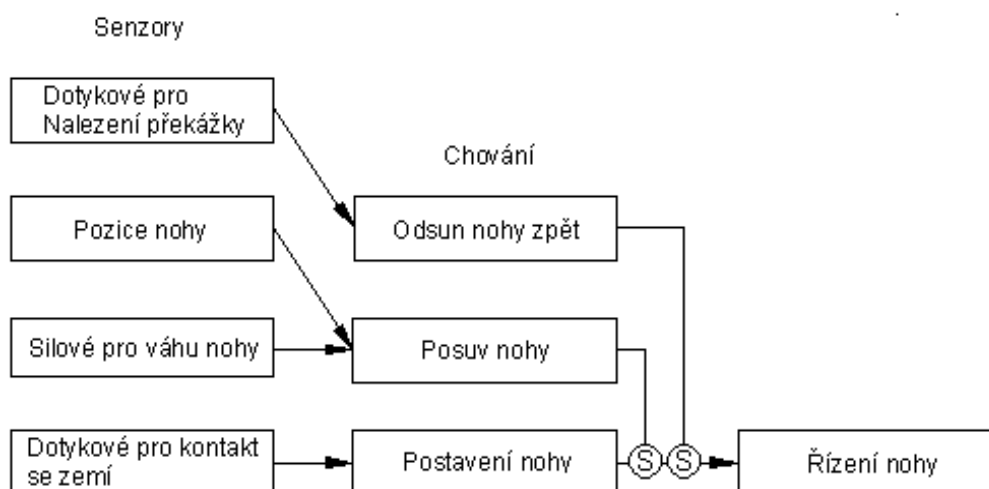
2.5.1.2. Koordinace chování

Všechna chování běží jako oddělené procesy, bez komunikace mezi ostatními chováními. Chování pouze komunikuje s jejich způsobem, jak ovlivnit konfiguraci robotu. Nožní úroveň chování má provádět procesy na dělených procesorech umístěných na každé noze. Chování jsou všechny nezávislé pokusy o řízení akčních členů a celkový řídicí signál je generován od koordinace jednotlivých řídicích signálů. Mechanismus koordinace chování je směsice mezi vrstvenou architekturou[7] a architekturou schématu [7] ve smyslu, že chování je koordinováno z části přes potlačení a částečně přes součet jednotlivých chování. Mezi potenciálně konfliktním chováním je ustálen vztah potlačení, zatímco ostatní chování mohou uvést do chodu určitý pohon. Celkový řídicí signál je potom dán sumou jednotlivých řídicích signálů. Chůze, nebo řazení noh vychází z jednotlivých noh a úroveň chování těla soupeří, aby pohybovala

těmito nohama[6].

2.5.1.3. Kráčivé chování

Zahrnuje všechny pokusy o řízení nohy v potenciálně konfliktním způsobu. Třída kráčivého chování obsahuje zástupce chování, kterými jsou: postavení nohy, posuv nohy, odsun nohy zpět, mezi kterými dochází k potlačení. Vztahy pro potlačení jsou uvedeny viz. obr. 16., kde symbol *S* znázorňuje potlačení (z ang. Suppressor).



Obr. 16: Potlačení vztahů mezi kráčivým chováním [6].

Chování označené jako postavení nohy, udržuje robot v pozici, kde noha je držena na zemi, pokud je sní v kontaktu.

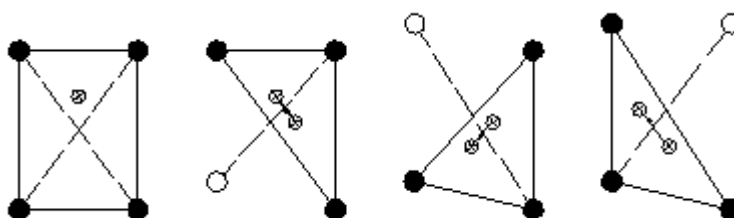
Chování posuvu nohy, potlačuje chování postavení nohy a dochází k přesunu nohy na předem určenou trajektorii. Kde trajektorie fáze posuvu je definována jako umístění stopy na zem ve svislém směru a pak posuv nohy k určenému bodu, který je vztahen k tělu robotu, definován výškou a délkou kroku. Určená trajektorie tímto chováním je pouze jedna část z konečné posuvné fáze nohy. Pohyb nohy je také ovlivněn jiným chováním. Během chůze v před, délka kroku nabývá hodnot větších než nula. Nulová délka kroku, znamená chůzi na místě. Za jistých okolností je tato záporná, nebo nulová délka kroku užitečná např. když noha není schopna provést posuvnou fázi v předem určeném čase např. kvůli překážce, proto je délka kroku nastavena na nulu, takže se robot může otočit a obejít překážku. Chování posuvné fáze je aktivované, když má noha kontakt se zemí, to znamená, že noha může být použita pro opornou fázi a nedojde k pádu robotu. Pro vyhnutí zbytečným posuvným fázím, se používá dvou omezení. První omezení je, že chování posuvné fáze bude aktivované pouze v případě, jestli aktuální stopa je umístěná dostatečně vzadu, tak že délka kroku bude převyšovat určitý limit. Druhým omezením je krátké zpoždění, které bude blokovat aktivaci po jedné dokončené posuvné fázi.

Chování, v tomto případě odsunutí nohy zpět, umožňuje robotu stáhnout nohu zpět jako reflex, když dojde k naražení do překážky dotykovým senzorem umístěným v přední části nohy[6].

2.5.1.4. Poziční chování

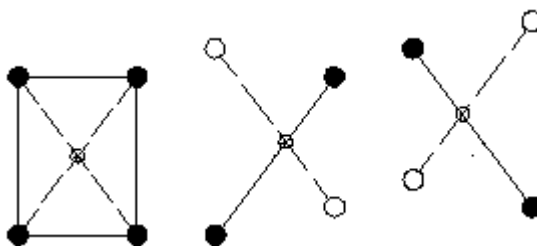
U tohoto chování není třeba žádný potlačující vztah, hlediska pozice se zde nijak mezi sebou neovlivňují. Opět tato třída je rozdělena na více typů chování, jsou to chování pohybu těla, chování pro udržení požadované výšky a chování pro držení těla v určité úrovni.

Chování pohybu těla pohybuje tělem robotu, posunem čtyř noh současně a rovnoměrně s ohledem na tělo robotu. Výsledek je, že tělo robotu se pohybuje, zatímco pozice noh v terénu jsou beze změny. Chování umísťuje těžiště robotu do vhodné pozice vztažené k nohám. Tím zajišťuje, že těžiště je drženo uvnitř trojúhelníku daného dvěma nohami a průsečíkem dvou přímek, které jsou dané diagonálními nohami. Míra stability se může pohybovat v rozmezí 0 až 1, nejvyšší hodnota označuje těžiště uprostřed tohoto trojúhelníku a nejnižší hodnota označuje těžiště umístěné v průsečíku diagonál, viz. obr. 17.



Obr. 17: Pozice těžiště vztažená ke čtyřem nohám, staticky stabilní chůze [6].

Výsledky míry stability, která je větší než nula. Pokud je použit podpůrný trojúhelník daný dvěma předními nohami a průsečíkem diagonálních přímek, tak budou přední nohy v oporné fázi a tím blokují fázi posuvu. Pouze jedné ze zadních noh bude umožněna posuvná fáze. Přesným posunem těžiště a řazením noh, může být dosaženo plíživé chůze, která je vygenerována bez explicitní komunikace mezi chováním.



Obr. 18: Pozice těžiště vztažena ke čtyřem nohám, polostabilní chůze [6].

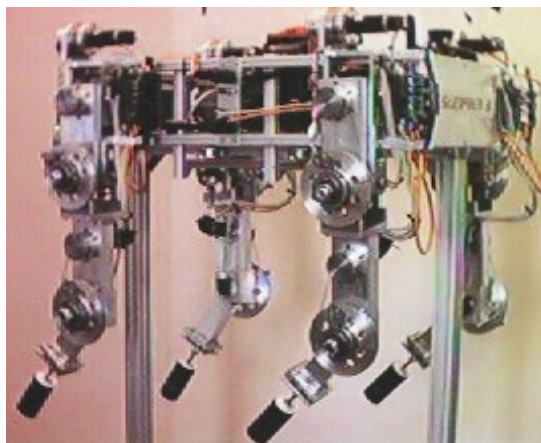
Volná generace chůze viz. obr. 18, může při použití nulové míry stability vytvořit polostabilní dynamickou chůzi. S těžištěm trupu v průsečíku úhlopříček, může být vygenerována klusavá chůze na rovném povrchu s diagonálními nohami se synchronní posuvnou chůzi.

Chování označené udržení výšky, drží tělo robotu ve vhodné výšce nad zemí. Výška těla vztažená k zemi je odhadnuta použitím svislé pozice z aktuálních stop, které mají dotykový kontakt se zemí.

Chování držení úrovně, řídí úhel klopení a úhel klonění, při otáčení těla robotu kolem těžiště, to je koordinováno buď snižováním, nebo zvyšováním výšky noh. Vhodný úhel klopení a klonění je vypočítán pomocí orientačních senzorů společně s odhadem sklonu terénu, na kterém se aktuálně nachází. Úhel klopení je typicky vybrán tak, že sleduje sklon země (faktor klopení je 1), zatímco tělo je horizontálně drženo vzhledem k rotaci kolem podélné osy (faktor klonění je 0).

2.5.1.5. Navigační chování

Navigační chování využívá znalosti o pozici robotu v prostředí. Mezi navigační chování patří např. chování otočení k cíli - otáčí tělo robotu kolem těžiště směrem k určenému cíli, nebo chování otáčení od překážky - chování je aktivované když robot není schopen posuvné fáze, to znamená, že robot naráží nohou do překážky. Jakmile robot rozpozná, že se jedná o překážku, tak se začne otáčet směrem od ní. Pokud překážku objeví např. levá noha, tak se robot bude točit směrem doprava.(případně naopak) Toto chování bude deaktivováno, jakmile bude nalezeno nové místo pro umístění došlapu.



Obr. 19: Robot Sleipner III [6]

U tohoto robotu nebylo zahrnuto chování, které by zvládalo hlediska povrchu země, jako jsou jemná půda, nebo kluzký povrch. Tento přístup v tomto případě zajišťuje bezpečnou chůzi robotu přes hrubý, ale pevný povrch. Přidáním chování ve vrstveném způsobu, se může předložit nová způsobilost robotu. Myšlenkou je řízení robotu jednoduchým distribuovaným chováním a dosáhnout velké rychlosti akčních členů v kombinaci s nízkou hmotnostními nohama. Pádu se může robot vyhnout dostatečně rychlými pohyby noh. Tím může být dosažena dynamická stabilita. Problém je, že chování musí být přiměřeně laděné a přizpůsobeno k terénu. Aby překonali takový problém tak, další práce na tomto robotu zahrnuje implementaci učebního mechanismu a také důmyslnějších senzorů[6].

2.6. Biologicky inspirované řízení

2.6.1. Centrální generátor vzoru

Pohyby zvířat, jako je chůze, běh, cval, jsou založeny na periodickém rytmickém pohybu. Tyto rytmické pohyby jsou řízeny biologickou nervovou sítí, zvanou v tomto případě centrální generátor vzoru (z anglického názvu „central pattern generator“)[10].

Centrální generátor vzoru (dále jen CPG) je složen ze souborů neuronových oscilátorů, které jsou umístěny v míše. Z příkazů neuronů jsou vedeny signály do CPG, kde jsou generovány nevědomě a automaticky rytmické vzory z aktivit nervů. Pohyby u zvířat jsou řízeny těmito rytmickými vzory, které aktivují pohony neuronů. Zpětná informace ze senzorů řídí frekvenci a fázi těchto rytmických vzorů, které jsou generované v CPG, ale pro rytmické pohyby nejsou nutné. CPG taky umožňuje adaptaci vůči změnám prostředí, změnou periodických rytmických vzorů. Například obratlovec, jako je kuň, nebo kočka mohou měnit své pohyby pomocí zvoleného vzoru, vzhledem k dané situaci. Protože stupeň volnosti z fyzických akčních členů je velmi vysoký a zároveň důležitý pro pohyb, koordinace těchto členů jako je mezinožní koordinace, je nutná pro hladký pohyb. Tato koordinace je výsledkem řízení CPG a taky hraje významnou roli u pohybování[10].

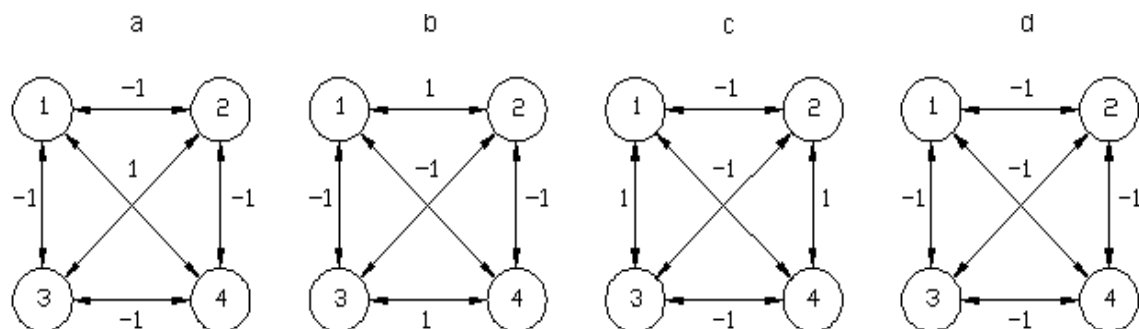
V posledních letech u mnoha výzkumů v robotice, právě použili funkce CPG k řízení pohybu robotu.. Například u robotu BIOSBOT viz, kap. 2.6.1. a to z důvodů výhod, které toto řízení přináší. První výhodou je, že množství výpočtů, které jsou nutné pro řízení pohybu je zmenšeno, následkem koordinace akčních členů, které způsobují rytmické pohyby. A druhou výhodou je, že může dosáhnout vysokého autonomního přizpůsobení v různém prostředí, následkem synaptické přizpůsobenosti, která mění konfiguraci CPG a tím i rytmické vzory[10].

Realizace CPG může být provedena jako analogový CPG řídicí člen, pro koordinaci akčních členů u robotu se čtyřma nohama[3]. Velká řada CPG řídicích členů však byla vyvinuta pomocí digitálních procesorů, které mohou pracovat s vysokou přesností, ale spotřebují velké množství energie a zaberou velkou plochu na čipu. Aby se vyhnuli takovému problému, tak CPG řídicí člen je navržen jako analogový CMOS obvod, který snižuje odběr energie, je levnější a hlavně menší[8].

CPG model se skládá ze dvou částí, z neuronového oscilátoru a neuronové sítě. Neuronový oscilátor může nabývat různých podob, třeba podle toho jestli obsahuje vnitřní neurony. Mezi používané modely oscilátorů patří např. neuronový oscilátor navržený Matsuokem [9]. Model se skládá ze dvou vzájemně propojených neuronů, nazývaných jako flexor a extensor. A toto vzájemné propojení mezi nimi je excitační a inhibiční spojení. Dalším používaným typem je například Amari-Hopfieldův model neuronu [10], který je vhodný pro realizaci CPG modelu jako analogové obvody, kvůli jeho jednoduché přenosové funkci a navíc automaticky generuje periodický vzor[10].

Neuronové síť dosáhneme propojením těchto neuronových oscilátorů. Složený model této sítě je základní prvek pro CPG řídicí člen, který vykonává mezinožní koordinaci pohonů u robotů se čtyřma nohama. Proto je tato složená síť důležitá pro mezinožní koordinaci, aby generovala různé rytmické vzory. Propojení sítě, složené ze čtyřech oscilátorů pro generování vzorů chůze může být provedeno určitými způsoby viz. obr. 20. Kde jednotlivá propojení mezi neurony jsou uvedena hodnotou 1, což

znamená excitační spojení, nebo -1 to znamená inhibiční (potlačující) spojení. Excitační spojení poskytuje šíření signálů do oscilátorů, které jsou tímto způsobem spojené. Inhibiční spojení naopak poskytuje potlačení signálu, aby nedošlo k aktivaci oscilátorů, který pro daný typ chůze není v pořadí. Uvedením vnitřních neuronů a přepínáním jejich ovlivnění mezi neuronovými oscilátory, se dosáhne funkčního přenastavení sítě CPG a potom jsou generovány různé rytmické vzory. Základní struktura neuronové sítě (viz. obr. 20), popisuje sestavení sítě, která generuje periodické rytmické vzory, které odpovídají čtyřem typům chůze.[10].



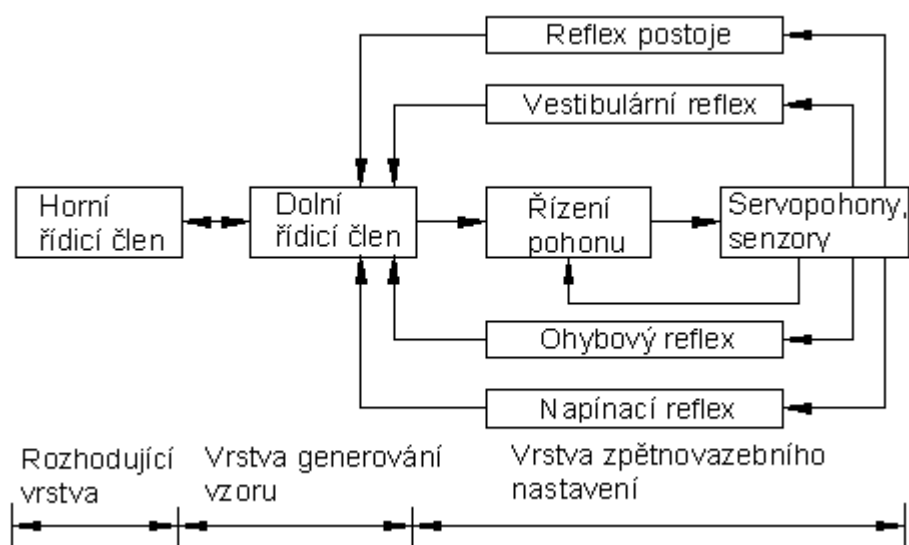
Obr. 20: Sestavení vzoru chůze pro a) klus, b) cval, c) mimochod, d) kráčení[9].

Funkce tohoto spojení mezi excitačním a inhibičním neuronem u klusavé chůze může být vysvětlena následovně, vychází se z postoje na čtyřech nohách. Noha označená jako 1, začne fází posuvu a excitační neuron zároveň umožňuje noze 4, aby byla také ve fázi posuvu, zatímco inhibiční neuron potlačuje signál, aby se nedostal do ostatních noh. Jakmile se tato fáze uskuteční a nohy budou opět v oporné fázi, to samé se opakuje pro nohy 2 a 3.

2.6.2. Robot Biosbot

Robot BIOSBOT je jedním z popsaných druhů robotu, kde řídicí člen byl inspirován právě CPG. Jako model CPG byl použit neuronový oscilátor navržený od Matsuoka a také využíval stejné propojení sítě viz. obr.20 pro generování vzoru[10].

Celkové řídicí schéma pro řízení robotu se čtyřmi nohama viz. obr 23., zahrnuje tři funkční vrstvy, (rozhodující vrstva, vrstva generování vzoru a vrstva zpětnovazebního nastavení), pro realizaci biologického přístupu. Rozhodující vrstva simuluje vyšší nervové centrum, nastavuje a řídí pohyby robotu. Vrstva generování vzoru obsahuje neuronové kmity, které se používají ke generování fázově-uzamknutých rytmických signálů a tím řídí pohony robotu. Zpětnovazební vrstva nastavení je síť zpětných vazeb reflexů, model je založen na zvířecích reflexivních mechanismech tak, aby zlepšil schopnosti robotu pro autonomní adaptaci v neznámém nerovném prostředí.



Obr. 21: Celkové řídicí schéma, založené na biologickém přístupu[11].

Horní řídicí člen je počítač, který funguje jako mozek, rozhoduje jaké chování má použít, to jsou rychlost a směr v případě kráčení. Vzor, který je poslán z počítače aktivuje lokální síť neuronových oscilátorů (tedy CPG), která je umístěna v dolním řídicím členu. A zpětná vazba poskytuje informace ze senzorů a akčních členů[9].

Pohyby robotu byly pouze simulované. Řídicí systém byl navrhnut pomocí matematického modelu v Matlabu a model robotu v programu Adams. Tyto dva programy byly navzájem propojeny. Kde vstupy popisují proměnné, které přichází do Adams a výstupy popisují proměnné, které se vrací zpátky do řídicí aplikace. Řízení robotu definuje pohyb z osmi kloubů (čtyři kolenní a čtyři kyčelní klouby). Funkce pohybu ze čtyř kyčelních kloubů je počítána CPG modelem, přes který se může upravovat chůze robotu, při řízení na členitém povrchu. Funkce pohybu ze čtyř kolenních kloubů je odvozena z řídicího signálu kyčelních kloubů ve stejné noze [11].

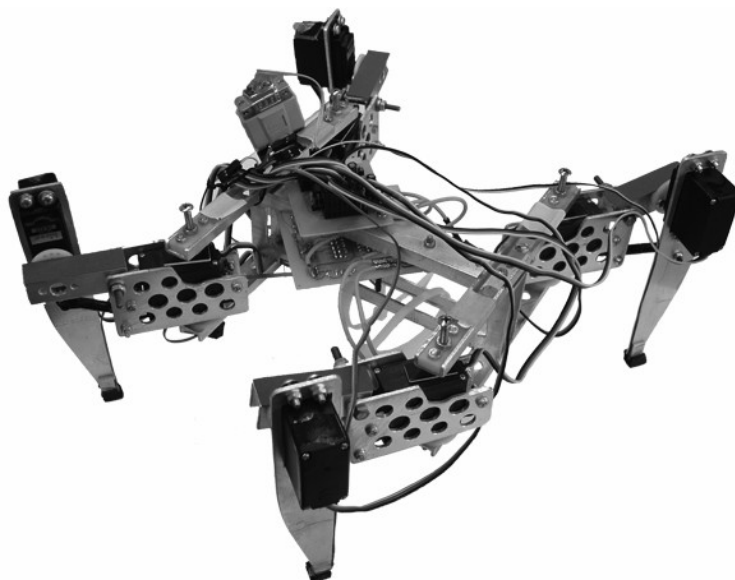


Obr. 22: Robot BIOSBOT [11].

Výsledky simulace ukázaly, že robot je schopen uskutečnit čtyři základní typy chůze, také tento typ chůze měnit za chodu a dokáže se pohybovat v nepravidelném terénu[11].

3. VOLBA ŘÍDICÍHO ČLENU PRO ROBOT QUASIMODO

Robot Quasimodo je čtyřnohý robot, se dvěma stupni volnosti na nohu. Pohyb noh je zajištěn osmi modelářskými servopohony HS 300. Robot je schopen díky malému počtu stupňů volnosti dosáhnout cyklické, dynamicky stabilní chůze, která byla pro jeho pohyb navržena.



Obr. 23: Robot Quasimodo[13].

Vzhledem k tomu, že se jedná o robot určený do vnitřních prostor a je tedy předpokládán pohyb pouze po rovinném terénu, je realizace řídicího členu založeného na CPG zbytečně složitá. Není totiž vyžadováno více navzájem se střídajících stylů chůze.

Případné sestavení modelu robotu, který by zahrnoval dynamický popis, je poněkud složitější, jelikož robot má pouze dva stupně volnosti na nohu, tj. při pohybu dochází ke smýkání po podkladu. Z tohoto důvodu se využití řídicího členu založeného na modelu jeví jako nevhodné.

Z možných variant, která by se dala použít pro generování chůze tohoto robotu, přichází v úvahu řízení založené na chování. Robot by se mohl volně pohybovat po místnosti pomocí řídicího členu, které by měl naprogramovaná určitá primitiva chování. Vzhledem ke konstrukci robotu je tohle řízení vhodnější než předchozí zmíněné, protože nepotřebuje ke své činnosti znát přesný dynamický popis robotu. Další možností může být hybridní řízení. Takové řízení robotu umožňuje řešit složitější situace na úkor časové reakce. Implementace tohoto přístupu však vyžaduje vyšší úsilí.

Na základě této rozvahy lze pro robot doporučit řídicí člen založený na chování, nebo hybridní řídicí člen. To který z těchto přístupů je vhodnější se bude odvíjet od požadovaných schopností robotu a dostupné senzorické soustavy.

4. ZHODNOCENÍ TYPŮ ŘÍZENÍ

Následující kapitola shrnuje výhody a nevýhody, které vyplývají z popsaných druhů řízení a opírají se o provedenou rešeršní práci.

Deduktivní řízení

Výhody:

- schopnost strategického výběru akce na základě předběžného uvažování výskytu možných událostí
- provádění výpočtu umožňuje dosažení precizního chování v případě dostupnosti přesných informací

Nevýhody:

- pro své jednání potřebují čas na výpočty, což znemožňuje reakci na dynamické překážky
- při výskytu neočekávaných událostí může dojít k nepřesným výpočtům, které mohou vést k např. pádu robotu

Vhodnost použití:

- statické prostředí, ve kterém není kladen důraz na reaktivitu

Reaktivní řízení

Výhody:

- schopnost bezprostředně reagovat na vzniklé neočekávané situace a poruchy prostředí
- nezávislost řídicího systému na znalosti prostředí
- umožňuje vyhnout se dynamickým překážkám

Nevýhody:

- není přesně stanoveno který modul chování má být použit v dané situaci
- řídicí systém se spoléhá výhradě na informace ze sensorů, proto je kladen důraz na kvalitu sensorického systému (množství sensorů, kvalita získané informace)
- použití jednoduchých chování může způsobit neschopnost reagovat ve složitějších situacích

Vhodnost použití:

- prostředí kde dochází k dynamickým změnám, např. pohybující se objekty

Hybridní řízení

Výhody:

- přebírá výhody jak z reaktivního tak deduktivního přístupu, tj. schopnost

bezprostředně reagovat na vzniklé neočekávané situace a poruchy prostředí

- nezávislost řídicího systému na znalosti prostředí
- umožňuje vyhnout se dynamickým překážkám
- schopnost strategického výběru akce na základě předběžného uvažování o výskytu možných událostí
- provádění výpočtu umožňuje dosažení precizního chování v případě dostupnosti přesných informací

Nevýhody:

- časové zpoždění, které je potřebné pro zvolení strategie dosáhnutí cíle
- pracnější sestavení hierarchické architektury

Vhodnost použití:

- kombinace statického a dynamického prostředí, kde je kladen důraz jak na reaktivitu, tak na optimální volbu strategie

Řízení založené na modelu

Výhody:

- obsahuje přesný popis prostředí a dynamiky robotu
- schopnost generování modelu během operování robotu

Nevýhody:

- časová náročnost vytvoření modulu robotu a prostředí
- požadované přesnosti modelu nemusí být vždy dosaženo

Vhodnost použití:

- pro málo členitá prostředí, která nejsou náročná na sestavení modelu

Řízení založené na chování

Výhody:

- obsahuje sítě chování, každá síť má jinou prioritu
- schopnost reagovat na změny prostředí
- obsahují paměť, pro uložení chování

Nevýhody:

- obtížné zajištění přesného dosažení cíle a pohotovostního chování, které je výslednou kombinací vnitřních chování
- nepřesné určení chování, které se má v dané situaci použít

Vhodnost použití:

- pro dynamické prostředí, kde dochází ke změnám prostředí

- prostředí kde je potřeba opakovaně řešit určitý problém

Biologicky inspirované řízení

Výhody:

- umožňuje bez složitých výpočtů udržovat vzájemnou koordinaci noh
- adaptace vůči změnám prostředí, pomocí změny rytmického vzoru

Nevýhody:

- realizace pomocí digitálního procesoru, velká spotřeba energie pro přesné výpočty

Vhodnost použití:

- prostředí ve kterém je potřeba měnit typ chůze, tj členitý povrch

5. ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo provést rešeršní studii řídicích členů pro čtyřnohé kráčivé roboty a rozdělit je podle určitých kritérií. Tyto jednotlivé řídicí členy jsou rozděleny podle jejich přístupů k řízení a uvedeny v kapitole 2. Tato kapitola je zaměřena na postup při zpracovávání informací, které vedou robot k optimálnímu rozhodnutí a na architektury, které využívají pro své rozhodování. Podle těchto postupů zpracovávání a architektur, jsou tyto typy řízení rozděleny do šesti skupin. Mezi tyto typy patří, deduktivní řízení viz. kap. 2.1, reaktivní řízení viz. kap. 2.2, hybridní řízení viz. kap. 2.3, řízení založené na modelu viz. kap. 2.4, řízení založené na chování viz. kap. 2.5 a biologicky inspirované řízení viz. kap.2.6. U každého typu řízení, je uveden příklad využití na robotu, který je tímto druhem řízen.

Dalším úkolem této práce bylo doporučit určitý typ řízení pro robot Quasimodo, který byl sestaven na UAI FSI. Volba typu řízení je uvedena v kapitole 3, kde je tento robot stručně popsán. Volba řízení vychází z rešeršní studie, která je uvedena viz. kap. 2. a na základě konstrukce robotu. Optimální řízení, které se pro tento typ robotu jeví jako vhodné, je řízení využívající přístupů na chování, nebo hybridní řízení.

V kapitole 4, jsou uvedeny výhody, nevýhody a vhodnost použití jednotlivých typů řízení. Deduktivní řízení poskytuje složitější volbu akce, pomocí přesně stanoveného postupu. To může být problém v prostředí, kde je potřeba reagovat na určité změny. Reaktivní řízení naopak poskytuje v první řadě okamžité reakce na změnu prostředí, což umožňuje použití v dynamickém prostoru, ale zase má omezenou kapacitu primitivního chování, kterou si nedovede ukládat. Hybridní řízení kombinuje různé techniky přístupů k řízení, takže se dá použít pro složitější úlohy. Realizace takového hybridního řízení může být obtížně sestavitelná. Dalším typem řízení, je přístup založený na modelu. Tento přístup v určitých případech vyžaduje preciznost, pokud chceme sestavit model, který odpovídá skutečnému. Je třeba sestavit popis dynamiky systému robotu a také postihnout vlivy mezi robotem a prostředím, pro úspěšné řízení robotu. Řízení založené na chování zajišťuje reaktivitu a také umožňuje uložení opakovaných akcí, takže se dá použít na složitější úlohy v dynamickém prostředí. Architektura v tomto případě je složitější, chování je rozděleno do sítí s různou prioritou. Posledním uvedeným řízením je biologicky inspirované. Toto řízení poskytuje mezinožní koordinaci, bez složitých výpočtů. Dále poskytuje adaptaci vůči změnám prostředí, pomocí změny rytmického vzoru, který je generován ze sítě neuronových oscilátorů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Paluska, D., Mataric M., Ambrose R.; *Biologically inspired intelligent robots*. [pdf.dokument]. SPIE Press, Vol. PM122, May 2003, Chapter 8 pp. 2 - 4 [cit.1.4.2009]. Dostupné z: <<http://robotics.usc.edu/~maja/publications/biomimetic03.pdf>>
- [2] Ridderström, Ch.; *Legged locomotion: Balance, control and tools-from equation to action*. [pdf. dokument]. Department of Machine Design Royal Institute of Technology, 2003, S-100 44 Stockholm, Sweden. pp.45-90 [cit.12.2.2009]. Dostupné z: <http://www.md.kth.se/~chr/publications/thesis/Ridderstrom_2003_LLC.pdf>
- [3] Still, S., Hepp, K., Douglas, R.; *Neuromorphic Walking Gait Control*. [pdf. dokument]. University of Hawaii at Manoa, Information and Computer Sciences, Honolulu, HI 96822, USA, Institute for Neuroinformatics, Zurich, Switzerland.2005.[cit.18.12.2008].Dostupné z: <http://www2.hawaii.edu/~sstill/TR_NN_gcc_submitted_finaldraft.pdf>
- [4] Huber, M., Grupen, R., Barto, A., Sutton, R., Donahoe, J.; *A hybrid architecture for adaptive robot control*. [pdf. Dokument]. Graduate school of the University of Massachusetts, Department of Computer Science, September 2000.[cit.11.12.2008]. Dostupné z: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.13.4004>>
- [5] Macdonald, W., Grupen, R., Popplestone, R.; *Legged Locomotion over Irregular Terrain using the Control Basis Approach*. [pdf. dokument]. University of Massachusetts, Department of Computer Science, May 1996.[cit.15.4.2009]. Dostupné z: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.40.9545>>
- [6] Pettersson, L., Jansson, K., Rehbinder, H., Wikander, J.; *Behavior-based Control of a Four Legged Walking Robot*. [pdf. dokument]. Department of Machine Design and Department of Mathematics, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden. [cit.25.3.2009]. Dostupné z: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summarydoi=10.1.1.38.8496>>
- [7] Arkin, R.; *Behaviour – based robotics*, MIT 1998 Press, ISBN-10:0-262-01165-4, ISBN-13:978-0-262-01165-5.
- [8] Dongrui, W., Woei W. T., Prahlad, V.; *A comparison of several hardware-realized Central pattern generators*. [pdf. dokument]. Departments of Electrical and Computing Engineering, National University of Singapore 4, Engineering Drive 3, Singapore. [cit.14.12.2008]. Dostupné z: <<http://www-scf.usc.edu/~dongruiw/files/CPG.pdf>>
- [9] Zhao, L., Zheng, H., Zhang, X., Cheng Z.; *Realization of the Biologically-Inspired Dynamic Walking Controller of a Quadruped Robot*. [HTML dokument]. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China, 2003. [cit.19.5.2009]. Dostupné z:

- <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01285713>>
- [10] Kazuki, N., Tetsuya, A., Yoshihito, A.; *An Analog CMOS Central Pattern Generator for Interlimb Coordination in Quadruped Locomotion*. [HTML dokument], IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS, vol. 14, NO.5, SEPTEMBER 2003. [cit.12.5.2009]. Dostupné z : <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01243732>>
- [11] Xu, G., Haojun, Z., Xiuli Z.; *BIOLOGICALLY INSPIRED QUADRUPED ROBOT BIOSBOT: MODELING, SIMULATION AND EXPERIMENT*. [pdf. dokument], 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents, December 13-15, 2004 Palmerstone North, New zeland, 2004. [cit.18.4.2009]. Dostupné z: <http://www.ist.masset.ac.nz/conferences/ICARA2004/files/Papers/Paper45_ICARA2004_261_266.pdf>
- [12] Mataric, M.; *Situated Robotics*. [pdf.dokument]. University of Southern California, Los Angeles, USA, Macmillian Reference Ltd., 2002. [cit.16.5.2009]. Dostupné z: <<http://robotics.usc.edu/~maja/publications/sit-rob.pdf>>
- [13] ONDROUŠEK, V.; Using the Open Dynamics Engine for Walking Robot Simulation. In Simulation Modelling of Mechatronic Systems IV. Mechatronika. Brno: VUT v Brně, 2008. s. 121-130. ISBN: 80-214-3341-8.
- [14] Autor stránky nezveřejněn, *Retired Robots* [online]. Datum vydání neved, 12.10.2000. [cit.4.5.2009]. Dostupné z: <<http://www.ai.mit.edu/projects/genghis/genghis.html>>
- [15] Grepl, R., *Využití nástrojů MATLAB, SIMULINK a SIMMCHANICS při návrhu a optimalizaci mobilních krácejících robotů*. [pdf dokument]. Brno: VUT v Brně, FSI. 13.10.2005. [cit.13.5.2009]. Dostupné z: <http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB05/prispevky/grepl/grepl.pdf>
- [16] Subsumpční architektura, Wikipedia.org [online]. Datum ani autor nezveřejněn. [cit.21.4.2009]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Subsump%C4%8Dn%C3%AD_architektura>