



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH MODELU KRÁČEJÍCÍHO AUTONOMNÍHO MECHANISMU A JEHO SIMULACE POHYBU V OBTÍŽNÉM TERÉNU

DESIGN OF MODEL OF A WALKING AUTONOMOUS MECHANISM AND ITS SIMULATION OF MOVEMENTS
IN DIFFICULT TERRAIN

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Mikuláš Szabari

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2023

KLÚČOVÉ SLOVÁ

kráčajúci robot, mobilný robot, krokové cykly kráčania, konštrukcia kráčajúceho robota, dvojnohý robot, štvornohý robot, šesťnohý robot, simulácia kráčajúceho robota, rezistentný terén, morfológická analýza kráčajúceho robota

KEYWORDS

walking robot, mobile robot, legged robot, autonomous robot, walking gait, design of walking robot, bipedal robot, four-legged robot, hexapod robot, simulation of walking robot, terrain, resistive terrain, morphologic analysis of legged robot

ABSTRAKT

Dizertačná práca sa zaoberá návrhom autonómneho kráčajúceho mechanizmu a jeho simuláciou v ťažkom teréne. Prvá časť práce sa venuje súčasnému stavu, ktorý rozoberá stavbu a krokové cykly kráčajúcich mechanizmov a tiež rezistentný terén. Navažujúca druhá časť kriticky hodnotí súčasný stav a definuje riešený problém. Tretia časť stanovuje konkrétne ciele a vytvára postup práce. Nasleduje riešenie práce, začínajúce štvrtou časťou, ktorá realizuje morfológickú analýzu stavby kráčajúceho mechanizmu a analyzuje rezistentný terén, v ktorom sa mechanizmus pohybuje. Piata časť je venovaná tvorbe modelov kráčajúcich mechanizmov, ich prvotnému testu a voľbe konkrétnej stavby kráčajúceho mechanizmu pre rezistentný terén. Nadväzujúca šiesta časť simuluje pohyb kráčajúceho mechanizmu a rieši jeho optimalizáciu. Simuláciu potvrdzuje prevedený experiment v siedmej časti. Koniec práci je venovaný prínosom, diskusii o výsledkoch a záveru.

ABSTRACT

The first part of the work is devoted to the current state, which discusses the design and step cycles of legged mechanisms and also the resistant terrain. The following second part critically evaluates the current state and defines the solved problem. The third part sets specific goals and creates a work procedure. The solution of the work follows by fourth part, which realizes the morphological analysis of the structure of the legged mechanism and the analysis of the resistant terrain in which the mechanism moves. The fifth part is devoted to the creation of models of legged mechanisms, its initial test and the choice of a specific construction of a legged mechanism for resistant terrain. The following sixth part simulates the movement of the legged mechanism and deals with its optimization. The simulation is confirmed by the experiment performed in the seventh part. The end of the work is devoted to contributions, discussion of results and conclusion.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SZABARI, Mikuláš. *Návrh modelu kráčejiho autonomního mechanismu a jeho simulace pohybu v obtížném terénu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/146678>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček.

POĎAKOVANIE

Chcel by som touto cestou poďakovať môjmu vedúcemu práce doc. Ing. Radku Knoflíčkovi Dr. za ochotu a cenné rady poskytnuté pri vypracovaní tejto dizertačnej práce.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka Dr. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa

.....

Mikuláš Szabari

OBSAH

ÚVOD	13
1 VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A OBECNÉ CIELE	15
2 SÚČASNÝ STAV POZNANIA	17
2.1 Obecná stavba kráčajúcich robotov	17
2.2 Klasifikácia kráčajúceho robota	18
2.3 Stavba kráčajúcich robotov pre ťažký terén	18
2.3.1 Dvojnohý kráčajúci robot	18
2.3.2 Štvornohý kráčajúci robot	20
2.3.3 Šesťnohý kráčajúci robot	21
2.3.4 Špeciálne zakončenia nôh	21
2.3.5 Pohony a zdroje energie kráčajúcich robotov	22
2.4 Krokové cykly robotov	22
2.4.1 Cyklus dvojnohého kráčajúceho robota	23
2.4.2 Cyklus štvornohého kráčajúceho robota	23
2.4.3 Cyklus šesťnohého kráčajúceho robota	25
2.5 Terén	26
2.5.1 Rezistentný terén	26
3 KRITICKÉ ZHODNOTENIE SÚČASNÉHO STAVU VO VEDNOM ODBORE	27
4 DEFINÍCIA PROBLÉMU	29
4.1 Problémová situácia	29
4.2 Formulácia problému	30
4.3 Systém podstatných veličín	30
5 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	33
6 POSTUP RIEŠENIA	35
7 MORFOLOGICKÁ ANALÝZA	37
7.1 Morfologická matica	37
7.2 Hodnotenie kombinácií morfologickej matice	39
7.2.1 Šesťnohé KM	39
7.2.2 Päťnohé KM	40
7.2.3 Štvornohé KM	40
7.2.4 Trojnohé KM	41
7.2.5 Dvojnohé KM	43
7.2.6 Výsledné riešenia	43
7.3 Grafické znázornenie riešení a ich predstavitelia	44
8 ANALÝZA REZISTENTNÉHO TERÉNU	47
8.1 Kvapalný terén	47
8.2 Stlačiteľný granulovaný terén	47
8.3 Nestlačiteľný granulovaný terén	48
8.4 Deformovateľný nespojitý terén	49
8.5 Predpokladaná silové pôsobenie a výber terénu	49
9 SIMULAČNÝ MODEL	53
9.1 Model KM	53
9.1.1 Subsystem nohy	53

9.1.2	Subsystém tela	57
9.1.3	Subsystém vyvažovania	57
9.1.4	Zostavy subsystémov	58
9.1.5	Logika riadiaceho algoritmu	58
9.2	Model odporového terénu	59
9.2.1	Kvapalný terén	59
10	SIMULÁCIA	63
10.1	Prvotná simulácia	63
10.1.1	Výber vhodného KM	65
10.1.2	Simulačný a CAD model vybraného KM	66
10.1.3	Vymedzenie riešených závislých veličín	68
10.2	Návrh pohybu a optimalizácia závislých veličín vybraného KM	68
10.2.1	Adaptácia	68
10.2.2	Genetický optimalizačný algoritmus	71
10.2.3	Metóda jednej vlny	73
11	EXPERIMENT	77
11.1	Experimentálny KM	77
11.1.1	Hardware	77
11.1.2	Software	78
11.2	Experimentálne prostredie	78
11.3	Overenie výsledkov simulácie	78
11.3.1	Adaptácia	78
11.3.2	Genetický algoritmus	79
11.3.3	Metóda jednotnej vlny	81
	DISKUSIA K ZÍSKANÝM VÝSLEDKOM	85
	PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE	87
	Prínos pre vedeckú oblasť	87
	Prínos pre pedagogickú oblasť	87
	Prínos pre prax	87
	Plány do budúcnosti	87
	ZÁVER	89
	ZDROJE	91
	ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK	99
	Zoznam skratiek a symbolov	99
	Zoznam obrázkov	102
	Zoznam tabuliek	104
	PRÍLOHY	105

ÚVOD

V dnešnej dobe sa kráčajúce roboty čoraz viac uplatňujú v reálnych aplikáciách, ktoré prebiehajú v obyčajnom prostredí, ale aj v prostredí, ktoré je pre človeka nebezpečné. Príkladom takéhoto použitia je nasadenie kráčajúceho robota Spot Mini v bývalej černobyľskej jadrovej elektrárni, kde je jeho úlohou preskúmať pozostatky reaktora č. 4 a zistiť rozloženie rádiácie v tomto priestore [1]. Druhým príkladom je robot Digit, ktorého náplňou má byť doručovanie zásielok v urbanistickom prostredí, priamo pred váš dom [2]. Posledným príkladom je robot HRP-5, ktorý je schopný samostatne pripevniť OSB (Oriented Strand Board – preglejka) dosku na stenu a to v normálnom stavebnom prostredí s bežne používaným nástrojmi pre ľudí [3].

Aj napriek takému rýchlemu pokroku, majú kráčajúce roboty stále svoje limity. Na rozdiel od ich biologických vzorov, nie sú schopné kráčať po širšom množstve prírodných terénov. Jedna takáto skupina terénov, ktorej sa výskum venuje okrajovo, je oblasť tzv. rezistentných terénov ako je: plytká voda, piesok, blato, sneh a vysoká tráva. Tieto oblasti použitia sú bežne žiadané po kráčajúcich robotoch, ako podmienka, pre vykonane vojenskej, civilnej a záchranárskej operácie. Preto by mala byť problematika kráčajúcich robotov poriadne preštudovaná pre dosiahnutie efektívneho nasadenia kráčajúcich robotov pohybujúcich sa v týchto terénoch [4].

Pre jednotlivé prírodné terény ako je napr. piesok bol vyvinutý šesťnohý krabí robot HEXY, ktorý je schopný chodiť po suchom aj mokrom piesku, a taktiež dokáže prejsť z pláže do plytkej morskej vody a odolávať prílivu [5]. Piesočnatému terénu sa venovali aj iné články, ktoré riešili zvýšenie trakcie na piesku [6] a efektívnosť pohybu po piesku a iných terénoch [7]. Ďalším z pomedzi rezistentných terénov je sneh. Tejto problematike sa venovala napr. práca o „snehových mačkách“ určených pre kráčajúcich robotov na zvýšenie trakcie [8]. Zmienené články však neriešili terény z pohľadu rezistencie.

Problematike rezistentných terénov sa venovala práca s názvom „Learning Quadrupedal Locomotion over Challenging Terrain“, ktorá pre svoju štúdiu použila štvornohého robota ANYmal a testovala ho v rôznych prírodných terénoch ako blato, piesok, sutina, hustá vegetácia, sneh, tečúca voda a celý rad ďalších prírodných terénov [9]. Ďalšia práca, ktorá sa venovala tejto problematike rieši pohyb dvojnohého robota po granulovanom deformovateľnom teréne ako je piesok, sutina a sneh [10]. Podobným terénom sa venoval aj výskum v NASA, ktorý používal vlastného robota Valkyrie na chodenie po dreve, gume, piesku a penovej podložke [11].

1 VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A OBECNÉ CIELE

Problematika kráčajúcich robotov je široká. V závislosti od stavby a použitia robota sa problémy kráčajúcich robotov líšia. Súčasný výskum sa zaoberá riadením robotov neurónovou sieťou (central pattern generator) [12], efektivitou [13], navigáciou [14], pohybom v ťažkých terénoch [9] a ďalšími oblasťami. Práve pohyb v ťažkých terénoch je problém, ktorý súčasný stav technológie umožňuje riešiť. Vyriešené sú už jednotlivé prírodné terény s nízkym stúpaním, nízkou členitosťou a nízkym odporom (rezistenciou). Tieto vyriešené terény používajú špecifického robota pre jeden konkrétny terén, na rozdiel od ich biologických vzorov (človek, zvierka), ktoré sú univerzálne, teda vedia sa pohybovať vo všetkých druhoch prírodného terénu.

Otvorenými problémami zostávajú terény s vysokým stúpaním, vysokou členitosťou a vysokou rezistenciou. Príkladom týchto terénov sú strmé zasnežené svahy, strmé pieskové svahy a hlbšie rýchlo tečúce potoky so strmými brehmi [4,9].

Riešením týchto terénov sa zlepši kvalita kráčajúcich robotov a rozšíri sa ich použitie. Budú tak schopné priameho pohybu v ťažkom teréne bez nutnosti ho obchádzať, a nezvyšovať tak čas a spotrebovanú energiu na prejde určitej trasy. Tieto roboty nájdu využitie v horskej oblasti s nebezpečenstvom lavín pri hľadaní zasypaných ľudí bez ohrozenia ďalších ľudských životov. Ďalej je to v horskej zasneženej oblasti ako nosiči ťažkých nákladov (zásobovanie). Alebo na vyhľadávanie a prieskum v zemských a mimozemských piesočnatých oblastiach s vysokým stúpaním, kde poveternostné a terénne podmienky neumožňujú iný prieskumný robot. Prípadne na prekročenie močiarov, riek a potokov fungujúcich ako prírodné bariéry.

Obecným cieľom práce sú nové poznatky o kráčajúcich robotoch pohybujúcich sa v ťažkom rezistentnom teréne. Ťažiskom práce je simulačný model, ktorý bude slúžiť na overovanie teórií novo navrhnutých kráčajúcich robotov a na ich hodnotenie. Simulácia sa bude zameriavať na stavbu a pohyb kráčajúcich robotov. Prínosy tejto práce sú:

- experimentálne zmapovanie činiteľov a aspektov ovplyvňujúcich funkčnosť a efektívnosť kráčajúcich robotov v ťažkom rezistentnom teréne;
- simulačný model kráčajúceho robota v ťažkom rezistentnom teréne pre vedecké účely;
- zvýšenie funkčnosti a efektivity reálnych kráčajúcich robotov v rezistentnom teréne.

2 SÚČASNÝ STAV POZNANIA

Vývoju kráčajúcich robotov sa venuje niekoľko väčších firiem (SoftBank [15], Boston Dynamics [16]), ale aj výskumných centier (Dynamic Robotics Laboratory na Oregonskej štátnej Univerzite [17]). Výsledkom vývoja a výskumu kráčajúcich robotov je niekoľko možných riešení majúcich 2, 4 alebo 6 nôh s elektrickým alebo hydraulickým pohonom, s alebo bez akčnej nadstavby. Každé riešenie je niečím špecifické a má radu výhod a nevýhod.

V nasledujúcich podkapitolách bude uvedená obecná stavba robota, jednotlivé riešenia kráčajúcich robotov so zameraných na ťažký terén, krokové cykly, rezistentný terén a okrajovo budú zmienené pohony a zdroje energie.

2.1 Obecná stavba kráčajúcich robotov

Všeobecne sa kráčajúce roboty (subsystémy mobility) skladajú z týchto skupín [18]:

- funkčná skupina karosérie;
- funkčná skupina vonkajších senzorov;
- funkčná skupina vnútorných senzorov;
- funkčná skupina riadenia;
- funkčná skupina podvozku;
- funkčná skupina energetického zabezpečenia;
- funkčná skupina pohonov.

Z mechanickej stránky má význam riešiť predovšetkým skupiny karosérie, podvozku, pohonov a popri prípade aj skupinu vnútorných senzorov, ktorá môže byť priamo vstavaná do podvozku alebo aj iných skupín. Významné skupiny majú takýto popis:

Funkčná skupina karosérie – funkčná, samostatná a konštrukčne viazaná skupina zabezpečujúca ochranu všetkých funkčných skupín subsystémov mobility a ich ochranu pred vplyvmi pracovného prostredia, ako aj ich ochranu pred zásahom nepovolaných osôb. Táto skupina je taktiež predmetom priemyslového designu MSR (mobilný servisný robot) [18].

Funkčná skupina podvozku – funkčná a konštrukčne viazaná skupina zostavená z funkčne rozhodujúcich podskupín reprezentujúcich rám (frame) a vlastný mechanizmus lokomočného ústrojenstva subsystému mobility MSR. Použitý princíp lokomócie výrazne ovplyvňuje konštrukciu skupiny podvozku, ale i celého MSR [18].

Funkčná skupina pohonov – funkčná a konštrukčne viazaná skupina zostavená z pohonných agregátov/jednotiek (hnacie ústrojenstvo) určených pre pohon lokomočného ústrojenstva subsystémov mobility MSR. Z energetického hľadiska je to systém zabezpečujúci dodávku energie MSR pre jeho pohyb, t.j. k prekonávaniu jazdných odporov. Spravidla je to mechanická energia rotačného pohybu, ktorá sa privádza ako konečná forma k lokomočnému ústrojenstvu MSR. Počiatočná forma energie môže byť rôzna, napr. chemická (tepelné motory s vnútorným spaľovaním, chemická energia paliva), elektrická (elektromotor, energia privádzaná z vonku, prípadne akumulovaná), hydraulická (hydromotor) [18].

Funkčná skupina vnútorných senzorov – funkčná, samostatná a konštrukčne viazaná skupina senzorov zabezpečujúcich monitorovanie vybraných vnútorných funkcií a parametrov subsystémov mobility. Táto skupina je súčasťou koncepcie riešenia subsystémov vnútorných senzorov MSR [18].

2.2 Klasifikácia kráčajúceho robota

Do skupiny kráčajúcich robotov patria – všetky MSR (anglicky „walking robots“, kráčajúce MSR), ktorých subsystém mobility je riešený na princípe biomechaniky pohybového ústrojenstva živých organizmov. Modelom pre riešenie mechanizmu lokomócie kráčajúcich MSR sú pohybové schopnosti živočíchov a ich pohybové ústrojenstvo „nohy“, ktoré realizujú pohyb ako výsledok zložitej činnosti skeletového (kostrového) a nervovo svalového systému ich organizmov [18].

Delenie na základe počtu nôh [18]:

- s párnym počtom:
 - dvojnohé;
 - štvornohé;
 - šesťnohé;
 - osemnohé;
 - viacnohé párne;
- s nepárnym počtom:
 - trojnohé;
 - päťnohé;
 - viacnohé nepárne.

Delenie na základe dynamickej stability chôdze [18]:

- statické;
- dynamické.

Delenie na základe typu pohonnej skupiny [18]:

- elektrická;
- hydraulická;
- pneumatická;
- umelé svaly;
- hybridná.

2.3 Stavba kráčajúcich robotov pre ťažký terén

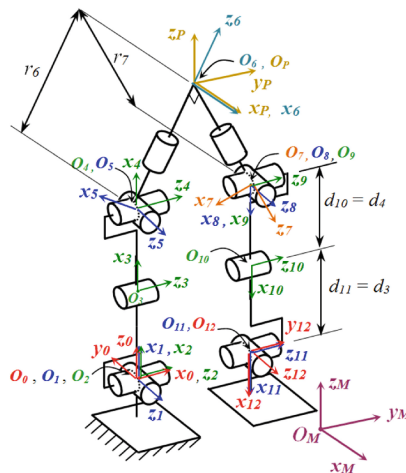
Základným a najdôležitejším údajom kráčajúcich robotov je počet nôh. Roboty určené pre ťažký terén sú rozdelené do skupín na: dvojnohé, štvornohé a šesťnohé. Tieto skupiny sú pritom najpočetnejšie oproti všetkým robotom zmieneným v podkapitole 2.2.

2.3.1 Dvojnohý kráčajúci robot

Biologickými vzormi (modelmi), z ktorých vychádzajú dvojnohé kráčajúce roboty sú ľudia alebo aj pštrosy.

Dvojnohý robot vychádzajúci z ľudského vzoru (humanoid)

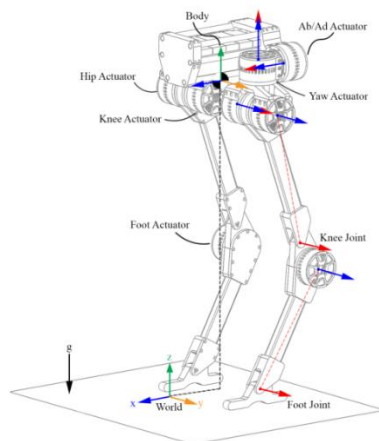
Táto stavba je veľmi rozšírená a často používaná. Najznámejšie roboty používajúce toto riešenie vo výskumnej a vedeckej sfére sú: ASIMO, Atlas, HRP-5, Nao (obr. 1), Valkyrie, Hubo 2+, WANDERER atď. Riešenia sa vyznačujú dynamickou nestabilitou, vertikálnym smerovaním nôh a plošným stykom nôh s podkladom. Samotné prevedenie robotov sa mierne líšia a to v zavesení nôh (závislé/nezávislé). Spoločný majú bedrový kĺb s tromi stupňami voľnosti umožňujúci tri rotácie v priestore: pohyb nohy dopredu/dozadu, do strán a rotáciou okolo vlastnej osi. Nasleduje koleno, ktoré má spravidla jeden stupeň voľnosti a pohybuje predkolením dopredu/dozadu. Posledným spoločným kĺbom je členkový, ktorý má 2 stupne voľnosti a pohybuje špičkou chodidla smerom hore/dole a stranou chodidla smerom hore/dole. Rôzne je uloženie nôh voči základu (telu). HRP-5, Valkyrie, Nao, WANDERER majú uloženie nôh závislé v panve s tromi stupňami voľnosti medzi panvou a základom. Podobne je to aj s robotom Atlasa, ktorý má o jeden stupeň menej a nedokáže nakloniť telo voči panve dopredu/dozadu. S robotom ASIMO a Hubo 2+ je panva spojená s podkladom len pomocou jedného stupňa voľnosti, ktorý dokáže rotovať telo okolo vlastnej osi voči panve [3, 19, 20, 21, 22, 23, 24].



Obr. 1) Dvojnohý mechanizmus (ľudský vzor) [25]

Dvojnohý robot vychádzajúci z pštrosieho vzoru

Stavba sa začala používať v reálnom prevedení len v nedávnej dobe a to výhradne spoločnosťou Agility Robotics, ktorá toto riešenie používa u dvoch svojich robotov Cassie (obr. 2) a Digit. Oba roboty zdieľajú rovnaký subsystém mobility. Ten sa vyznačuje dynamickou nestabilitou, vertikálnym smerovaním nôh a čiarovým stykom s podkladom. Obe nohy sú nezávisle uložené v základe (tele robota). Prvý pohyblivý spoj je bedrový kĺb s tromi stupňami voľnosti. Ten umožňuje pohyb nohy dopredu/dozadu, do strán a rotáciu okolo vlastnej osi. Nasleduje koleno, ktoré má spravidla jeden stupeň voľnosti a pohybuje nohou dopredu/dozadu. Posledným kĺbom je členkový kĺb, ktorý má jeden stupeň voľnosti a dovoľuje nohe pohyb špičky smerom hore a dole [26]. Podobnou stavbou sa zaoberali na IHMC (Institute for Human and Machine Cognition) na Floride, ktorá bola schopná autonómne udržiavať rovnováhu a behať až 16 km/h (10 mph) [27].

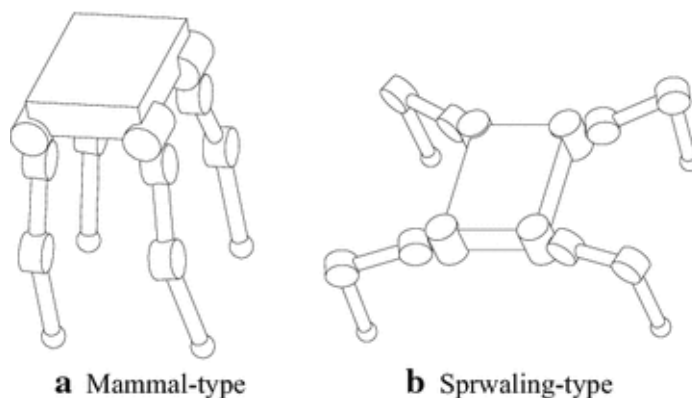


Obr. 2) Dvojnohý mechanizmus (přstrosí vzor) [28]

2.3.2 Štvornohý kráčajúci robot

Do jednej skupiny štvornohých kráčajúcich robotov môžeme zaradiť roboty vychádzajúce priamo z biologických vzorov. Vzormi štvornohých kráčajúcich robotov sú napr. štvornohé cicavce (mammal-type, obr. 3a) ako je pes, kôň alebo gepard ,podľa ktorých boli navrhnuté roboty Spot, Cheetah a LS3 od firmy Boston Dynamics, ale aj ďalšie roboty ako ANYmal, SpaceBok a Mini Cheatah. Všetky tieto tri roboty majú rovnakú kinematickú štruktúru, ktorá je staticky metastabilná (dokáže byť staticky určitá i neurčitá v závislosti od použitého krokového cyklu), má bodový styk nôh a vertikálne smerovanie nôh. Nohy sú rozložené rovnomerne v rohoch obdĺžnika a majú 3 stupne voľnosti. Prvé spojenie nohy a tela je v kĺbe s dvoma stupňami voľnosti a umožňuje rotáciu nohy dopredu/dozadu a do strán. Druhým kĺbom je koleno, ktoré má jeden stupeň voľnosti. Umožňuje predkoleniu pohyb dopredu a dozadu [9, 20, 29, 30].

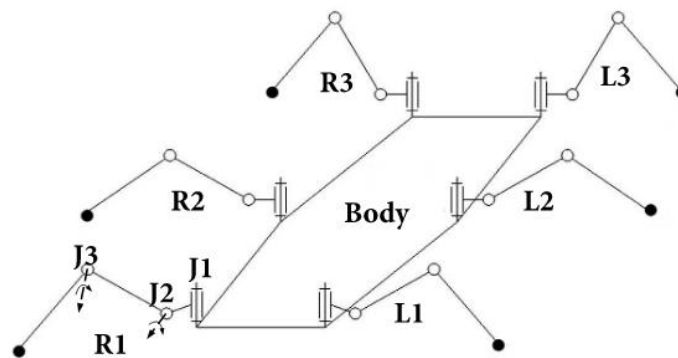
Do druhej skupiny štvornohých kráčajúcich robotov môžeme zaradiť roboty odvodené od biologických vzorov. Tieto roboty vychádzajú zo šesťnohého hmyzu bez dvoch nôh (sprawling-type, obr. 3b). Príkladom takýchto robotov sú: MR4, SILO4 a TITAN XIII. Podobne ako v prvom prípade, sú nohy rozložené rovnomerne v rohoch obdĺžnika, majú bodový styk, majú 3 stupne voľnosti na jednu nohu, ale rozdielne smerovanie nôh, a to horizontálne. Prvé spojenie nohy a tela je v kĺbe s dvoma stupňami voľnosti a umožňuje nohe rotáciu dopredu/dozadu a smerom hore a dole. Druhým kĺbom je koleno, ktoré má jeden stupeň voľnosti. Umožňuje predkoleniu pohyb smerom dopredu/dozadu a do strán, v závislosti od polohy prvého spojenia [31, 32, 33].



Obr. 3) Štvornohý mechanizmus [33]

2.3.3 Šesťnohý kráčajúci robot

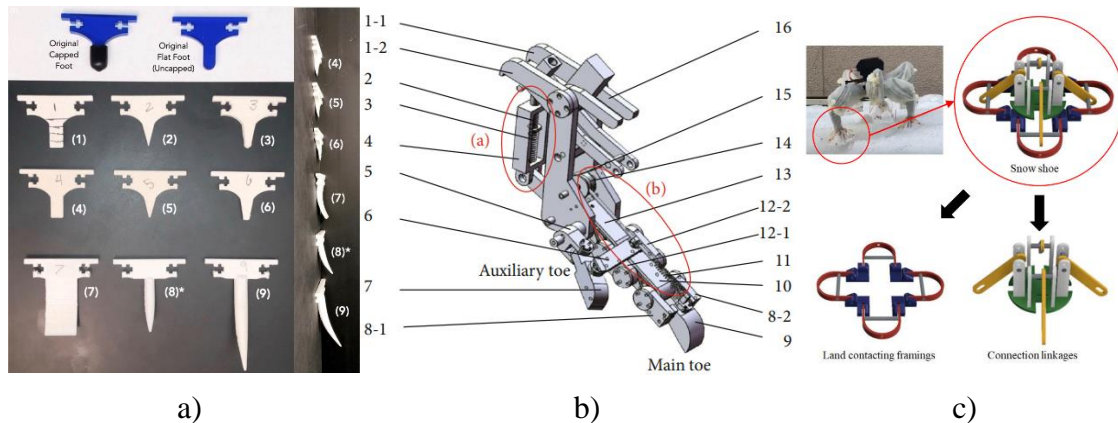
Biologickým vzorom šesťnohých kráčajúcich robotov je hmyz ako napríklad mravec, včela atď., podľa ktorých boli navrhnuté roboty ako HEXY (obr. 4), Messor II, WEBOTS, šesťnohý robot z Firat University a šesťnohý robot z King Mongkut's University of Technology Thonburi. Tento robot je charakterizovaný ako stabilný kráčajúci mechanizmus s bodovým stykom nôh s horizontálnym smerovaním nôh. Nohy sú rovnaké a rovnomerne rozložené po ľavej a pravej strane s orientáciou kolmou na smer pohybu. Nohy sú uložené v tele za pomoci kĺbu, ktorý má dva stupne voľnosti a umožňuje pohyb nohy smerom dopredu/dozadu a smerom dole a hore. Druhým napojeným kĺbom je kĺb, ktorý umožňuje nohe pohyb smerom hore a dole. Špeciálnym šesťnohým robotom je WEBOTS, ktorý má oproti zmienenej kinematike o jeden stupeň voľnosti viac a je schopný rotovať spojovacou časťou predných dvoch nôh okolo priečnej osi a prekonať tak vyššiu prekážku [34, 35, 36, 37, 38].



Obr. 4) Šesťnohý mechanizmus [39]

2.3.4 Špeciálne zakončenia nôh

Rada kráčajúcich robotov, určených pre pohyb v ťažkom teréne, má na koncoch svojich nôh špeciálne zakončenia pre zvýšenie trakcie. Konkrétne štúdie zaoberajúce sa touto problematikou testovali základné geometrické tvary [40] s guľovitým, valcovým a plochým povrchom. Toto zakončenie bolo testované na chôdzi po piesočnatom povrchu so zameraním sa na zamorenie nohy do piesku. Podobnú problematiku riešila aj práca, ktorá mala zakončenie nohy špicaté (obr. 5a) a používala ich pre hlbšie zabodnutie sa do piesku a získanie vnútorného „grip-u“ medzi ľavými a pravými nohami [5]. Prírodnejším riešením sa zaoberala štúdia zakončenia pštrosích nôh (obr. 5b), ktorá vytvorila mechanickú náhradu nohy s vysokou trakciou na piesku [41]. Umelým riešením zakončenia nôh sú takzvané „snehové mačky“ (obr. 5c), ktoré používajú ľudia v snehovom alebo zľadovatennom teréne pre dosiahnutie vyššej trakcie. Tieto robotické snehové mačky boli vylepšené o možnosť rozloženia alebo zloženia sa [8]. Za špeciálne zakončenia nôh by sa dali považovať aj prísavky [42] alebo nohy s chápادلami a prstami [43], avšak tieto riešenia používajú šplhajúce roboty, ktoré nezapadajú do danej tematiky.



Obr. 5) Špeciálne zakončenia nôh: a) špicaté [5]; b) zakončenie pštrosej nohy [8]; c) snehová mačka [41]

2.3.5 Pohony a zdroje energie kráčajúcich robotov

Pohony kráčajúcich robotov sa často zhodujú s pohonmi stacionárnych priemyselných robotov a to z dôvodu rovnakých požiadaviek na pohony. Teda ľahké a výkonné jednotky s vysokým krútiacim momentom a vysokou tuhosťou. Tieto podmienky splňujú elektrické servomotory napojené na harmonickú, cykloidnú alebo planetárnu prevodovku, ktoré sa používajú u kráčajúcich robotov v dnešnej dobe. Jedná sa o najčastejšie používaný pohon u kráčajúcich robotov [19, 21].

Druhým používaným pohonom je hydraulický pohon, ktorý používa menšia skupina kráčajúcich robotov. Využívajú sa najmä lineárne hydraulické pohony pre vyvedenie pohybu. Zvláštnosťou týchto pohonov je zdroj hydraulického tlaku, ktorý vytvárajú hydraulické čerpadlá napojené na spaľovacie motory, namiesto elektromotora a batérie, ktoré sú používané u elektrických pohonov. Hydraulické pohony sa väčšinou používajú na väčších a výkonnejších strojoch ako je BigDog, LS3 alebo WildCat. Roboty používajúce spaľovacie motory požadujú väčší výkon a výdrž, ale majú za to väčšiu hmotnosť a hlučnosť, čo je značná nevýhoda [44, 45, 46].

Z pohľadu stavby kráčajúcich robotov je dôležité rozloženie pohonov v tele alebo nohách robota. V prípade elektrických pohonov je servomotor uložený v blízkosti prislúchajúcej prevodovky, a to pred alebo aj za kĺbom od tela, ktorý poháňa. V niektorých prípadoch je pohon umiestnený aj v predchádzajúcom ramene bližšie pri tele, pomocou prevodov skrz kĺb, čo redukuje hmotnosť (moment zotrvačnosti) rýchlejšie sa pohybujúceho sa ramenu. Tým je docielená menšia spotreba energie používaná na rotačný pohyb nôh. Čo je dôležité u elektrických pohonoch, kde je rozloženie hmotnosti pohonov vo väčšom pomere v nohách než v tele robota. Teda energia minutá na spätné premiestnenie nohy vo vzduchu je vyššia. V prípade hydraulických pohonov nie je potrebný prevod a pohony sú priamo v kĺbe nohy. Ak sa pozrieme na hydraulický pohon z rovnakého hľadiska ako na elektrický, je pomer hmotnosti pohonov v tele a nohách vyrovnaný, ak berieme do úvahy aj hydraulické čerpadlo. Minutá energia na presunutie nohy vo vzduchu je nižšia [46].

2.4 Krokové cykly robotov

Krokové cykly kráčajúcich robotov sú odvodené od prirodzených krokových cyklov ľudí alebo zvierat, kde sa o lokomóciu stará „central pattern generator“ umiestnený v mieche. Tento generátor vytvára rytmický pohyb ako je chôdza, beh a plávanie. „Central pattern generator“

(centrálny generátor pohybu) je neurónový obvod, ktorý je schopný generovať koordinovaný oscilačný signál bez vstupného signálu. Takýto generátor pohybu bol inšpiráciou pre kráčajúceho robota, ktoré použitím neurónovej siete dosiahli lepšie riadenie koordinovanej lokomócie [47].

V nasledujúcich podkapitolách budú uvedené používané krokové cykly dvoj, štvor a šesťnohých kráčajúcich robotov.

2.4.1 Cyklus dvojnóhého kráčajúceho robota [26]

Dvojnóhé roboty používajú, tak ako ich biologické vzory, dva rôzne krokové cykly. V závislosti od rýchlosti sú krokové cykly rozdelené na chôdzu a beh. V prípade zrýchlenia sa pomalá chôdza mení na beh, v prípade spomalenia je zmena opačná.

1. Chôdza

Chôdza má 4 odlišné fázy, tak ako je vidieť v tab. 1. Jednotlivé fázy prebiehajú postupne a v určitom poradí. Poradie dvoch nôh je v tomto prípade jednoznačné, strieda sa ľavá noha s pravou s krátkym kontaktom oboch nôh s podkladom. Tento kontakt predstavuje 1. a 3. fázu. Počas fáz 2. a 4. má kontakt len jedna z nôh a druhá sa presúva na novú pozíciu vo vzduchu.

Tab 1) Chôdza

Fáza \ Noha	1.	2.	3.	4.	1.
L1					
L2					

2. Beh

Na rozdiel od chôdze, beh nemá fázy počas ktorých sú obe nohy v rovnakom momente v kontakte s podkladom. Nohy sa naďalej striedajú, ale už bez spomínaného súčasného kontaktu s podkladom. Ako je vidno v tab. 2, vo fázach 2. a 4. sa chodiaci mechanizmus nedotýka zeme a lieta vo vzduchu.

Tab 2) Beh

Fáza \ Noha	1.	2.	3.	4.	1.
L1					
L2					

2.4.2 Cyklus štvornoého kráčajúceho robota [48]

Aj v prípade štvornohej sústavy, existuje viac ako jeden krokový cyklus. Môžeme ich rozdeliť do dvoch skupín, na stabilné a nestabilné. Rozdiel v týchto cykloch je v počte nôh, ktoré majú v jednej chvíli kontakt s podkladom. V prípade stabilného cyklus je počet nôh 3, v prípade nestabilných cyklov je počet menší ako tri. Pretože stabilné cykly nepoužíva v dnešnej dobe skoro žiaden robot tento cyklus nebude zmienený.

1. Klus (Trot)

Tento krokový cyklus štvornohej sústavy je rozdelený do 4 fáz. V každej fáze sa podkladu dotýkajú minimálne 2 nohy. Premiestňovanie nôh je v tomto prípade po dvojiciach a v určitom poradí. Ak si nohy označíme ako ľavé (L) a pravé (P) po stranách a očísľujeme číslom 1 až 2 odpredu smerom dozadu, tak poradie premiestňovania nôh bude takéto: L1 a P2, P1 a L2. Nohy s rovnakým číslom 1 alebo 2 sa striedajú v kontakte. Napr. noha L1 má kontakt s podkladom zatiaľ čo P1 je vo vzduchu. To isté platí aj pri druhej dvojici L1 a L2. Takže, jednotlivé dvojice sa striedajú v kontakte a sú fázovo posunuté. Grafické zobrazenie krokového cyklu sa nachádza v tab. 3. V tabuľke sú čiernou farbou vyznačené miesta, kde prislúchajúca noha má v danej fáze kontakt s podkladom. Bielou farbou je naznačená časť, kde noha nemá kontakt a tmavomodrou farbou je zobrazené odľahčenie/zatťaženie nohy.

Tab 3) Klus (Trot)

Fáza \ Noha	1.	2.	3.	4.	1.
L1					
L2					
P1					
P2					

2. Bound

Tento krokový cyklus štvornohej sústavy je rozdelený do 4 fáz. Premiestňovanie nôh je po dvojiciach a v určitom poradí. Ak si nohy označíme ako ľavé (L) a pravé (P) po stranách z pohľadu zhora a očísľujeme číslom 1 až 2 spredu smerom dozadu, tak poradie premiestňovania nôh bude takéto: L1 a P1, L2 a P2. Grafické zobrazenie krokového cyklu sa nachádza v tab. 4.

Tab 4) Bound

Fáza \ Noha	1.	2.	3.	4.	1.
L1					
L2					
P1					
P2					

3. Rotary gallop

Tento krokový cyklus štvornohej sústavy je rozdelený do 16 fáz. Premiestňovanie všetkých nôh je postupné a v určitom poradí. Nohy pracujú v pároch a po ľavej nohe vpredu nasleduje pravá noha vpredu, pričom sú v jednom okamihu obe nohy spolu v kontakte. Podobne je to aj pri zadnom páre. Počas striedania párov dochádza k letu a žiadna noha nemá kontakt s podkladom. Ak si nohy označíme ako ľavé (L) a pravé (P) po stranách z pohľadu zhora a očísľujeme číslom 1 až 2 spredu smerom dozadu, tak poradie premiestňovania nôh bude takéto: L1, P1, L2, P2. Grafické zobrazenie krokového cyklu sa nachádza v tab. 5).

Tab 5) Rotary gallop

Fáza Noha	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	1.
L1	■	■	■										■
L2							■	■	■				
P1			■	■	■								
P2									■	■	■		

2.4.3 Cyklus šesťnohého kráčajúceho robota [49]

Šesťnohé roboty používajú, tak ako ich biologické vzory, dva rôzne krokové cykly. V závislosti od rýchlosti sa krokové cykly striedajú. V prípade zrýchlenia sa pomalý krokový cyklus mení na rýchly krokový cyklus, v prípade spomalenia je zmena opačná.

1. Wave

Krokový cyklus „wave“ (vlnová chôdza) je chôdza s postupnou (vlnovou) zmenou nôh a je rozdelená do 12 fáz. V každej fáze sa zeme dotýkajú najmenej tri nohy, maximálne 4 nohy. Zvyšné nohy sú v danej chvíli vo vzduchu a presúvajú sa na novú pozíciu. Premiestňovanie všetkých nôh je postupné a v určitom poradí. Ak si nohy označíme ako ľavé (L) a pravé (P) po stranách a očísľujeme číslom 1 až 3 odpredu smerom dozadu, tak poradie premiestňovania nôh bude takéto: L1, P2, L3, P1, L2, P3. Nohy s rovnakým číslom 1, 2 alebo 3 sa striedajú v kontakte. Napr. noha L1 má kontakt s podkladom zatiaľ, čo P1 je vo vzduchu. Výmena týchto nôh je v rovnakom čase s krátkym kontaktom oboch nôh. To isté platí aj pri ostatných dvojiciach. Takže jednotlivé dvojice sa striedajú v kontakte a sú fázovo posunuté. Grafické zobrazenie krokového cyklu sa nachádza v tab. 6.

Tab 6) Wave

Fáza Noha	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	1.
L1	■	■	■	■	■	■	■						■
L2	■	■	■						■	■	■	■	■
L3					■	■	■	■	■	■	■	■	
P1	■						■	■	■	■	■	■	■
P2			■	■	■	■	■	■	■	■			
P3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

2. Tripod

Krokový cyklus „tripod“ (trojnožka) šesťnohej sústavy je rozdelený do 4 fáz. V každej fáze sa zeme dotýkajú najmenej tri nohy (trojnožka) a maximálne 6 nôh. Zvyšné nohy sú v danej chvíli vo vzduchu a presúvajú sa na novú pozíciu. Premiestňovanie nôh je po skupinách v určitom poradí. Ak si nohy označíme ako ľavé (L) a pravé (P) po stranách z pohľadu zhora a očísľujeme číslom 1 až 3 odhora smerom dole, tak poradie premiestňovania skupín nôh bude takéto: prvá skupina: L1, P2 a L3; druhá skupina P1, L2 a P3. Výmena týchto skupín nôh je v rovnakom čase s krátkym kontaktom oboch nôh. Grafické zobrazenie krokového cyklu sa nachádza v tab. 7.

Tab 7) Tripod

Fáza Noha	1.	2.	3.	4.	1.
L1	■	■	■	■	■
L2	■	■	■	■	■
L3	■	■	■	■	■
P1	■	■	■	■	■
P2	■	■	■	■	■
P3	■	■	■	■	■

2.5 Terén

Súčasnú kráčajúcu robotu sú schopné kráčať a behať po spevnených rovinných a členitých terénoch. Tiež sú schopné sa pohybovať po naklonených povrchoch a svahoch. Čo súčasné roboty stále nedokážu efektívne vykonávať je kráčanie a behanie v rezistentnom teréne (resistive terrain) ako je potok, sneh, blato, prímorská piesková oblasť a vysoká tráva. Tejto problematike sa venovalo niekoľko článkov, ktoré riešili pohyb jednej nohy v rezistentnom granulovanom teréne [4] a tiež článok, ktorý riešil pohyb po blate, snehu, vode a vysokej tráve, čo spadá do oblasti rezistentného terénu [9].

2.5.1 Rezistentný terén

Za rezistentný terén sa pokladá terén, ktorý je zložený z pevnej základovej vrstvy a krycej vrstvy rezistentného kontinua do ľubovoľnej hĺbky [4].

Príkladom rezistentného terénu je v prírode, sneh, blato, piesok, vysoká tráva alebo tečúca voda. Všetky tieto prostredia, pri pohybe robota, vytvárajú určitý odpor, teda rezistenciu. V danom článku je v simulácii rezistentným terénom fluidné prostredie popísané matematickým rovnicami, ktoré najviac vystihujú parametre rezistentného terénu. Experimentálnym prevedením tohto prostredia môže byť fluidné granulované médium, kde hustota granúl a ich podfúkavanie určujú parametre rezistentného terénu. Je tak možné pomocou hustoty granúl a sily podfúkavania nastaviť rôzne rezistentné terény, uvedené vyššie [4].

3 KRITICKÉ ZHODNOTENIE SÚČASNÉHO STAVU VO VEDNOM ODBORE

Výskum v oblasti kráčajúcich robotov trvá už niekoľko desaťročí. Za túto dlhú dobu sa kráčajúce roboty zdokonaľovali. Roboty sú schopné kráčať s menším počtom nôh, väčšou rýchlosťou a čoraz horším terénom. Práve ťažký terén je aktuálnou vedeckou výzvou.

Súčasný výskum sa vedie pohybovať, z pohľadu tvaru terénu, po vodorovných rovných a členitých terénoch, po šikmých rovných a členitých terénoch, a taktiež schodoch [9]. Z pohľadu povrchu a štruktúry terénu sa roboty dokážu pohybovať po klzkom a nestabilnom (mäkkom) povrchu [50]. Všetky doteraz riešené terény boli terény, ktoré nevykazovali odpor pri pohybe kráčajúceho robota v zmysle, že noha alebo telo robota nie je brzdené okolitým prostredím ako sneh, voda, blato, piesok či vysoká tráva. Okolitým prostredím bol doteraz vzduch, ktorý na pohyb robota nemal významný vplyv [4], až na roboty kráčajúce pod vodou [51].

Nájdeného malého počtu zdrojov, ktorý daný problém popisuje, poukazuje na aktuálnosť problému a potrebu ho riešiť. V jednom z nájdených článkov, ktorý sa priamo zameriava na rezistentný terén je predovšetkým riešený matematický popis rezistentného terénu, simulácia pohybu jednonohého robota, reálne prevedenie experimentálneho rezistentného terénu a pohyb jednonohého robota v tomto teréne. Do istej miery sa rieši aj optimalizácia pohybu jednej nohy, za účelom zníženia odporu [4].

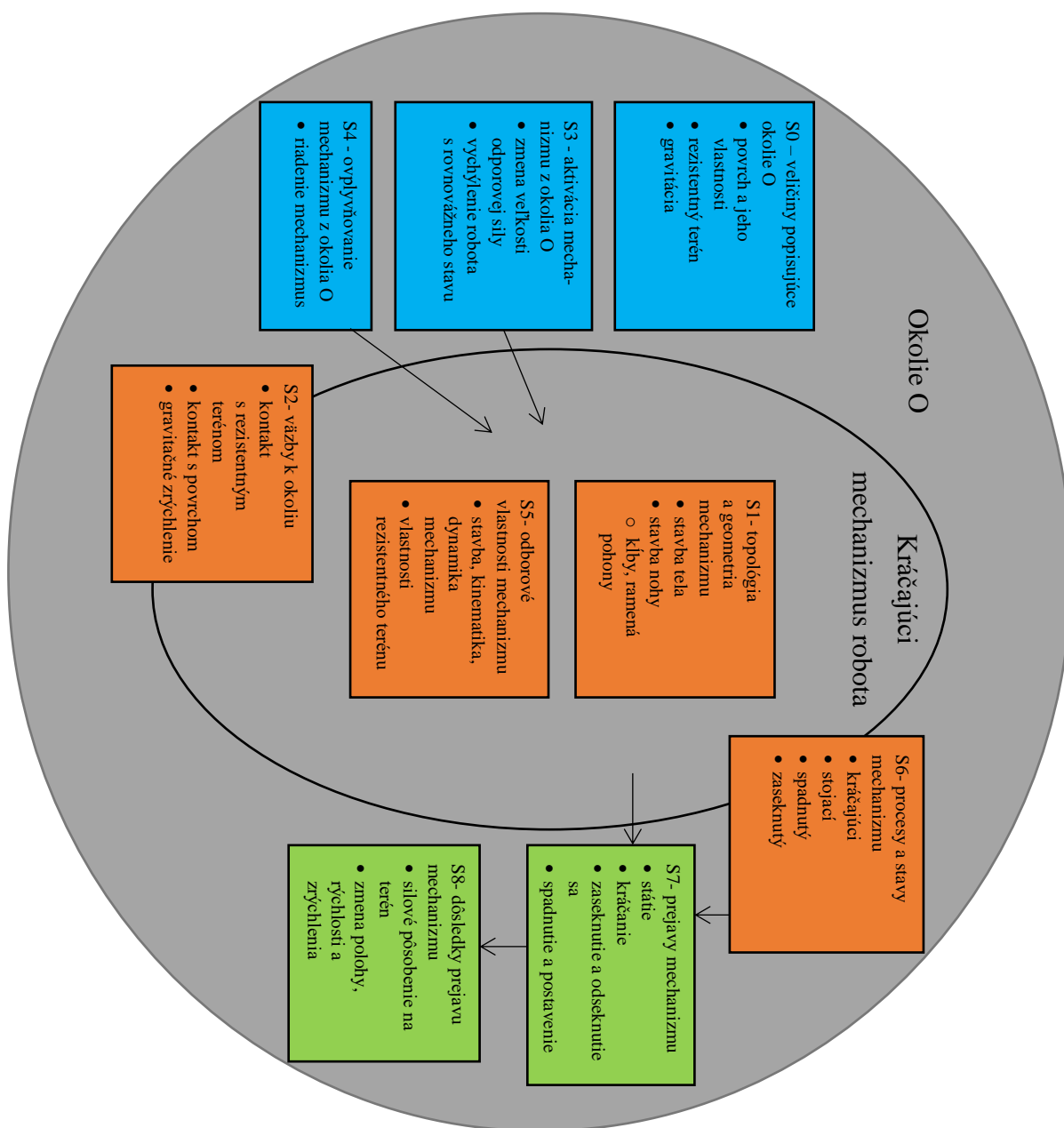
Súčasný výskum sa teda nezameriava na pohyb robota, v rezistentnom teréne, ako celku, ale rieši iba jednu nohu. Taktiež nie je riešený dizajn nohy, ktorý má na odpor vplyv. Nie je pozorované ani hľadisko stability a funkčnosti kráčajúceho robota a ani to, aký kráčajúci robot, poprípade vhodné vlastnosti robota, by boli pre terén vhodné. Teda parametre ako počet nôh, krokový cyklus, zakončenie nohy a ďalšie dôležité parametre. Tiež nie je riešené riadenie robota v rezistentných terénoch, reakcia na zmeny a prechody medzi nimi.

4 DEFINÍCIA PROBLÉMU

V tejto kapitole je popísaná problémová situácia, problém a systém podstatných veličín.

4.1 Problémová situácia

Státie alebo chôdza kráčajúceho robota v rezistentnom teréne je komplexná činnosť, pri ktorej môže dôjsť k zaseknutiu robota na jednom mieste, z dôvodu vysokého odporu, ktorý už robot nedokáže prekonať (nemá dostatok výkonu). Ďalej môže dôjsť k strate trakcie a robot sa tak šmýka po povrchu alebo dôjde k pádu robota. Takisto v prípade dlhodobého pohybu robota v rezistentnom teréne je nutné zaoberať sa spotrebovanou energiou, ktorá je vo väčšine prípadov limitovaná kapacitou batérie. Problémom je teda aj odporová sila a jej vplyv na kráčajúceho robota, ktorú je výhodne zredukovať.



Obr. 6) Systém podstatných veličín

4.2 Formulácia problému

Zaseknutie sa, šmýkanie sa alebo pád kráčajúceho robota v rezistentnom teréne a jeho optimalizácia stavby a pohybu.

4.3 Systém podstatných veličín [52]

Systém podstatných veličín by mal obsahovať všetky veličiny, ktoré popisujú podstatné okolnosti z hľadiska riešenia problému. Je rozdelený do deviatich podmnožín (S0-S8), ktoré sú popísané v bodoch nižšie. Zanedbaním niektorých z podstatných veličín je základná chyba modelovania a vedie k nesprávnym výsledkom. Schéma systému podstatných veličín je na obr. 6.

- S0 – veličiny popisujúce okolie entity

Kráčajúce roboty môžeme zaradiť medzi mobilné roboty. Tieto roboty sú schopné operovať vo voľnom priestore, ako vo vnútri, tak aj vonku. Okolie robota je popísané teplotou, vlhkosťou, radiáciou, osvetlením, tvarom povrchu(terénu) a jeho vlastnosťami, možnými prekážkami, gravitáciou atď. V tejto práci bude popisovať okolie entity len gravitácia, terén, ktorý bude mať rovný povrch s danými vlastnosťami (trenie, pružnosť a tlmivosť) a rezistentným terénom popísaným v podkapitole 2.5.

- S1 – geometria a topológia entity

Stavba kráčajúcich robotov je podrobne popísaná v podkapitole 2.1 Obecná stavba kráčajúcich robotov. V tejto práci sa bude pracovať len so skupinou podvozku (kráčajúci mechanizmus KM), teda robota bude prezentovať telo a niekoľko nôh. Nohy budú ďalej zložené z kĺbov a ramien. Potrebná geometria robota tak vychádza z topológie a určuje všetky potrebné dĺžky a orientáciu ramien a polohu významných bodov.

- S2 – väzby a interakcie s okolím

KM (kráčajúce mechanizmy) sú v neustálom kontakte s okolím, teda s povrchom, po ktorom sa pohybujú za pomoci nôh a v tejto práci sú taktiež v kontakte s rezistentným terénom v oblasti nôh a tela. Koeficient trenia (výsledná trecia sila) medzi povrchom a nohou môže mať premenlivú hodnotu a takisto sa môže meniť miera odporu rezistentného terénu v jednotlivých bodoch kontaktu resp. smeroch pohybu. Takisto na mechanizmus pôsobí neustále gravitácia.

- S3 – aktivácia entity s okolím

KM, ktorý sa pohybuje rezistentným terénom, svojim pohybom zvyšuje alebo znižuje mieru odpor rezistentného terénu. Príkladom je sneh, ktorý po jeho stlačení naberá na hmotnosti a je ťažšie sa nim brodiť alebo aj blato ktoré sa opakovaným kontaktom nabaľuje na konce nôh. Takisto to platí aj v prípade vody, kde pohyb nôh vytvára prúdy vo vode. Nesmieme zabudnúť ani na gravitáciu, ktorá môže spôsobiť pád KM, preto musí byť KM v prípade potreby schopný samo-vyvažovania.

- S4 – ovplyvňovanie entity s okolím

KM je nesamostatný funkčný systém, ktorý je podriadený riadiacemu systému a ten mechanizmus riadi v zmysle povelov pohybu v priestore.

- S5 – odborové vlastnosti štruktúry entity

KM je mechatronický systém, teda spája odbory mechaniky, elektroniky a informačných technológií. Vzhľadom na to, že je práca venovaná hlavne mechanickej časti, je potrebné riešiť odbory ako: stavba tela a nohy, kinematika a dynamika KM, poprípade okrajovo reguláciu a riadenie pohybov. Taktiež je potrebné riešiť vlastnosti rezistentného terénu.

- S6 – veličiny popisujúce procesy a stavy entity

KM sa môže nachádzať v štyroch stavoch: kráčajúci, stojací, spadnutý, alebo zaseknutý, čomu odpovedajú aj prebiehajúce procesy. Pri státi prebieha proces zachovania stálej polohy. Pri kráčaní sa zase proces zmeny polohy. V prípade spadnutia KM je proces obnovy stojaceho stavu: postavením sa späť na nohy, ak je to možné. V prípade zaseknutia je procesom odseknutie, ak je to možné.

- S7 – veličiny popisujúce prejavy entity

KM sa prejavuje stáťím, kráčaním, zaseknutím, odseknutím, padnutím a znova postavením na nohy.

- S8 – dôsledky prejavov na okolie entity a na ňu samotnú

Výsledkom prejavov KM je silové pôsobenie na povrch terénu a rezistentný terén, v ktorom sa KM pohybuje. Výsledkom prejavu je tiež zmena polohy, rýchlosti a zrýchlenia mechanizmu.

5 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavné ciele práce sú určené takto:

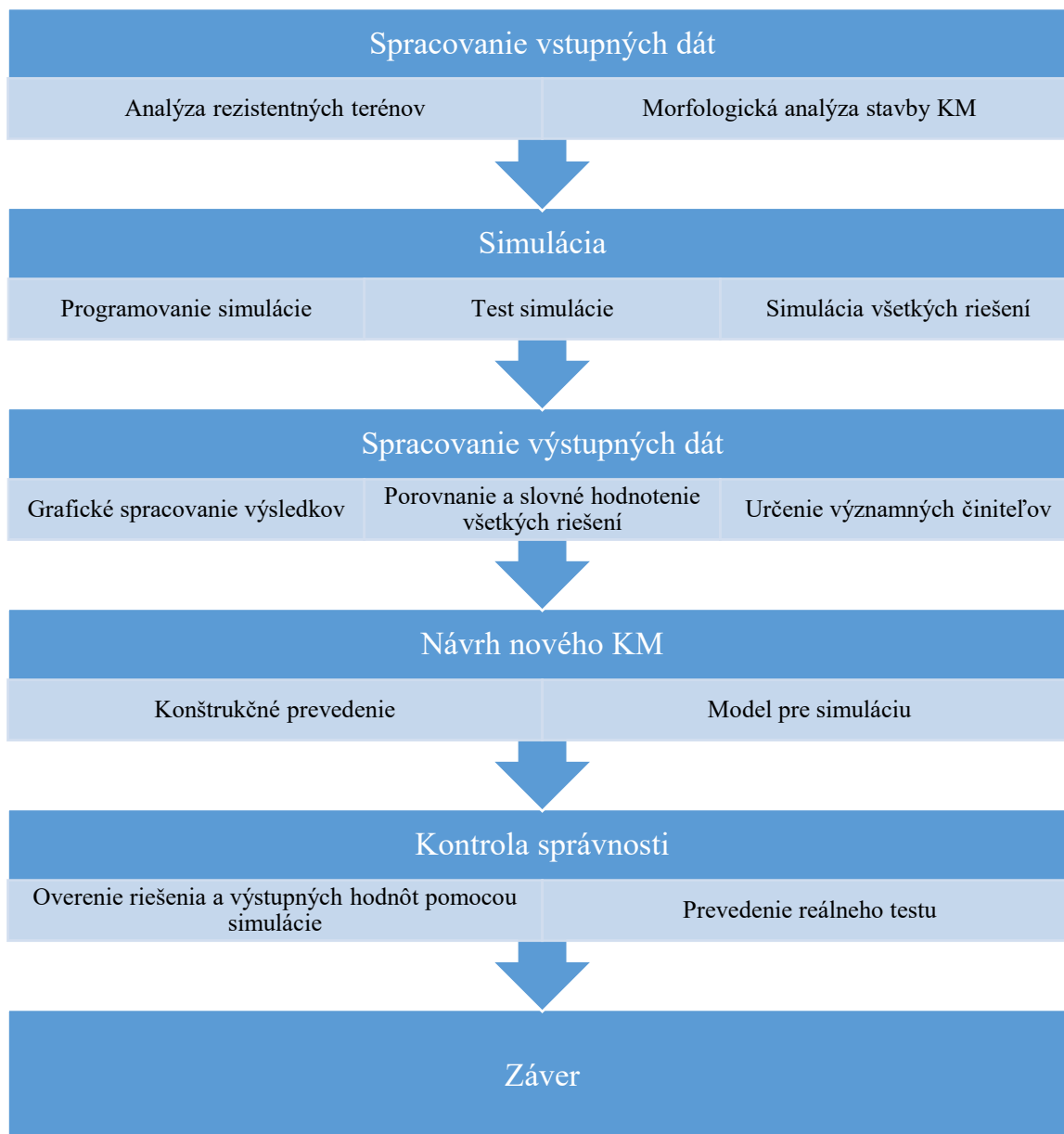
- Štúdia a analýza KM pohybujúcich sa v rezistentnom teréne.
- Nájdenie optimálneho riešenia KM pre určitý rezistentný terénu za pomoci simulácií.

Nasledujúci text špecifikuje postup riešenia práce s čiastočnými fázami a výstupmi k naplneniu hlavných cieľov práce:

- I. Systémový prístup**
Pre riešenie problému bola zvolená všeobecná metóda Jednotného scenára. Na základe tejto metódy bol formulovaný problém a ciele práce. Takisto bola vytvorená podmnožina systému veličín Σ , ktorá je graficky zobrazená na obr. 6.
- II. Analýza rezistentného terénu**
V tejto časti riešenia budú analyzované existujúce typy prírodných terénov, teda sneh, blato, tečúca voda, vysoká tráva a piesok. Pričom vybraný terén bude spracovaný do matematického modelu vhodného pre simuláciu.
- III. Morfológická analýza stavby KM (počet nôh a ich stavba)**
V tejto časti riešenia budú analyzované rôzne novo-vzniknuté a používané kinematické štruktúry a vybrané funkčné riešenia budú spracované ako matematický model pre simuláciu.
- IV. Tvorba simulácie a jej test**
V tejto časti bude vytvorené simulačné prostredie obsahujúce rezistentný terén a KM. Pred vykonaním výsledných simulácií bude realizovaný počiatkový test simulácie a budú kontrolované výstupy zo simulácie.
- V. Simulácia všetkých riešení morfológickej analýzy v rezistentnom teréne**
V tejto časti riešenia budú simulované všetky funkčné kinematické štruktúry z bodu II. v rezistentnom teréne za rozdielnych podmienok.
- VI. Zhodnotenie simulácie a nájdenie významných činiteľov**
V tejto časti riešenia budú zhodnotené výsledky simulácii a určené významné činitele ovplyvňujúce funkčnosť a efektívnosť KM.
- VII. Návrh KM s optimalizovanými významnými činiteľmi**
V tejto časti riešenia bude navrhnutý nový KM podľa predchádzajúcich významných činiteľov.
- VIII. Simulácia novo navrhnutého KM a kontrola určenia činiteľov**
V tejto časti prebehne opakovaná simulácia novo navrhnutého KM a overenie správnosti určenia významných činiteľov a ich vplyv na celkové riešenie.

6 POSTUP RIEŠENIA

Postup riešenia práce je nasledujúci:



7 MORFOLOGICKÁ ANALÝZA

Zmyslom morfolologickej analýzy v tejto dizertačnej práci je nájsť nové a teoreticky funkčné riešenia KM a vymedziť tak rozsah KM vstupujúcich do simulácie v kapitole 9. Oproti existujúcim dvojnohým, štvornohým, poprípade šesťnohým riešeniam, môžu novo navrhnuté riešenia vykazovať lepšiu efektivitu, rýchlosť a stabilitu pri pohybe v rezistentnom teréne.

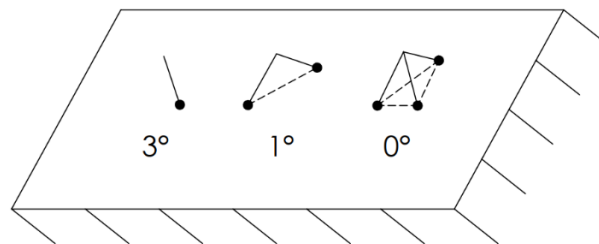
Pre nájdenie týchto nových a komplexných riešení je vhodné použiť morfológickú analýzu. Tá funguje na princípe usporiadania obecných znakov do zostáv takzvaných matíc. Podľa povahy problému je možné použiť dvojrozmernú (2-D tabuľka) alebo trojrozmernú maticu (3-D hranol). Riadky u 2D matice, resp. roviny u 3D matice, predstavujú jednu skupinu obecných znakov tvorenú jedinečnými znakmi. Cieľom je nájsť vertikálnu kombináciu jedinečných znakov výberom z jednotlivých riadkov/rovín obecných znakov. Tieto kombinácie (riešenia) predstavujú optimálne komplexné riešenia. Vznikajú tak všetky možné riešenia, ktoré môžeme rozdeliť na: známe a existujúce riešenia, a doteraz neexistujúcich riešenia [53].

7.1 Morfológická matica

V tomto prípade je morfológická analýza zameraná na nájdenie optimálnych riešení stavby KM. Prvým krokom morfológickej analýzy je vymedzenie tzv. obecných znakov a k nim prislúchajúce jedinečné znaky. Za obecné znaky môžeme považovať všetky možné kritéria rozdelenia KM, ktoré sa týkajú stavby KM. Základným kritériom pre rozdelenie KM je počet nôh. Ďalšie rozdelenia sú zamerané na počet stupňov voľnosti na jednu nohu, smerovanie nôh z tela, rozmiestnenie nôh v tele a na prítomnosť vyvažovacieho zariadenia (balanceru) v tele KM.

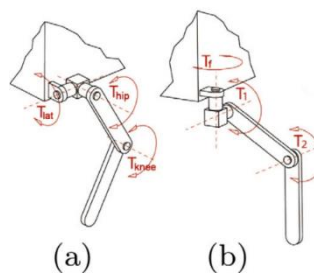
Počet nôh je základným charakteristickým znakom KM, ktorý určuje jeho topológiu. V prírode sa vyskytujú tvory s jednou, dvoma, štyrmi, šiestimi a ôsmimi nohami, ale taktiež ďalšie tvory s vyšším počtom nôh. Keďže KM nemusia byť odvodené len od prírodných modelov, môžeme teoreticky uvažovať aj o vyššom nepárnom počte. Túto skupinu tvoria systavy napr. s tromi, piatimi a siedmimi nohami. Avšak, zmienenú jednu nohu nie je možné zahrnúť medzi obecné znaky, kvôli tomu, že jednonohé KM patria do skupiny tzv. skákajúcich mechanizmov. Taktiež nemá zmysel uvažovať o väčšom počte nôh ako 6, keďže tieto systavy sú dostatočne stabilné (vyšším počtom nôh sa zvyšuje počet kontaktov s podkladom a teda aj statická stabilita). Uvažovaný počet nôh bude 2 až 6, teda 5 jedinečných znakov.

Ďalším dôležitým aspektom KM je počet stupňov voľnosti na jednu nohu. Ten určuje pohyblivosť nohy a možný typ kontaktu s podkladom. Ako už bolo v rešerši spomenuté, kontakt nohy s podkladom na obr. 7 má tri prevedenia: bodový, čiarový (dvojbodový) a plošný (trojbodový), s tým, že na obr. 7 je ku každému typu kontaktu sú pripísané zostávajúce stupne voľnosti. Tieto prevedenia odoberajú 3, 5 a 6 stupňov voľnosti voči obecnému súradnicovému systému, v tomto poradí. Tieto stupne voľnosti odpovedajú potrebným počtom stupňov pre jednu nohu, aby sa dosiahlo nezávislé prepojenie voľne uloženého tela a podkladu pri zachovaní typu kontaktu. Noha môže mať aj viac stupňov voľnosti. V prípade, že sa jedná o špeciálnu konštrukciu a noha je redundantná, avšak výsledný počet stupňov voľnosti medzi začiatkom a koncom nohy je stále rovnaký. Budú sa teda uvažovať neredundantné konštrukcie s počtom stupňov voľnosti 3, 5 a 6 bez bližšie určenej stavby. Skupinu stupňov voľnosti tak tvoria tri jedinečné znaky.



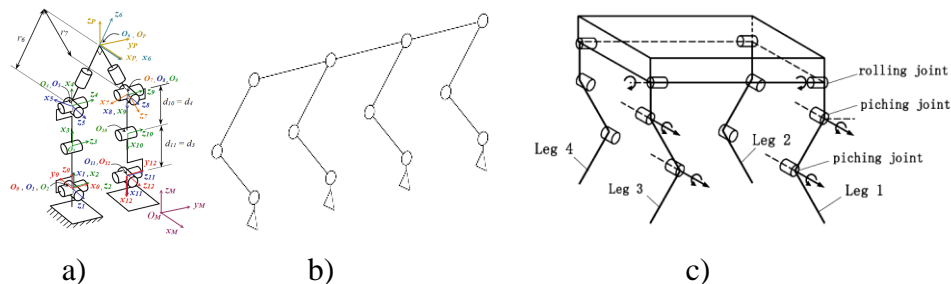
Obr. 7) Jednobodový, dvojbodový a trojbodový kontakt (body predstavujú kontakt, plné čiary telo KM a čiarkovaná čiara osi možných rotácií)

Podstatným parametrom stavby KM je smerovanie nôh z tela KM. Rozlišujú sa dva typy pripojenia a to vertikálne a horizontálne (laterálne). Vertikálne pripojenie môžeme pozorovať u cicavcov, kde sa pracovný priestor nachádza vertikálne pod ukotvením nohy v tele. V prípade horizontálneho pripojenia je pracovný priestor horizontálne (laterálne) vysunutý od ukotvenia nohy v tele. Toto pripojenie je vedieť u plazov alebo krabov. Z pohľadu kinematiky nie je možná zámena horizontálneho a vertikálneho pripojenia z dôvodu singulárnych bodov. Pre horizontálne pripojenie je singulárny bod na vertikálnej ose ukotvenia nohy v tele, a pre vertikálne pripojenie zase opačne. Tieto typy pripojenia sú v anglickom jazyku označované VC (vertical connected) a LC (lateral connected) [54] a ich príklady stavby sú zobrazené na obr. 8.



Obr. 8) Smerovanie nôh: a) vertikálne smerovanie; b) horizontálne smerovanie [54]

Z geometrického pohľadu je možné rozlišovať KM na základe pozícií ukotvenia nôh v tele KM. Všetky kotvové body nôh môžu byť obecné uložené v jednom bode, na jednej priamke alebo v jednej rovine. Príkladom uloženia v rovine môžu byť základné geometrické tvary ako n-uholníky. Príklady uloženia kotvových bodov nôh v tele sú na obr. 9.



Obr. 9) Ukotvenie nôh: a) v bode [55]; b) na priamke; c) v rovine [56]

Poslednou skupinou obecných znakov je vyvažovacie zariadenie, ktoré býva u KM často integrované do stavby. Vyvažovanie tak zabezpečujú ruky spoločne s trupom. Druhým riešením je použitie nezávislého vyvažovania, napr. gyroskopu alebo prenášanej hmoty.

Vymedzením jedinečných znakov vzniká 2D matica zobrazená v tab. 8. Pre vytvorenie riešenia je potrebné vybrať práve jeden jedinečný znak z každého riadku tabuľky. Vznikne tak jedinečná kombinácia. Celkový počet týchto kombinácií sa následne vypočíta ako súčin všetkých počtov jedinečných znakov v jednom riadku. V tomto prípade je počet všetkých kombinácií 180 (5·3·2·2·3).

Tab 8) Morfológická matica

obecný znak	jedinečný znak					počet znakov
počet nôh	2	3	4	5	6	5
počet stupňov voľnosti na nohu	3	5	6	-	-	3
smerovanie nôh	horizontálne	vertikálne	-	-	-	2
vyvažovanie	áno	nie	-	-	-	2
rozmiestnenie nôh	bod	priamka	rovina	-	-	3
počet kombinácií						180

7.2 Hodnotenie kombinácií morfológickej matice

Počet všetkých kombinácií je 180. Pre zníženie tohto počtu sa používa postupná selekcia. Tá na základne hodnotenia riešenia z pohľadu funkčnosti, konštrukčnej náročnosti, ekonomického hľadiska a komplexného pohľadu zredukuje počet riešení. Jeden zo základných funkčných požiadavkou je statická stabilita. V prípade KM sa statická stabilita dosiahne minimálne 3 bodovým kontaktom (v 3D priestore) tak, že tieto body neležia na jednej priamke a vertikálny priemet ťažiska KM sa nachádza v ploche kontaktu vytvorenou troma kontaktnými bodmi. Výpočet kontaktných bodov je násobok počtu nôh v kontakte s podkladom a počtom kontaktných bodov jednej nohy. Matematický zápis je nasledujúci:

$$nb \geq 3 \quad (1)$$

kde: n je počet nôh v kontakte s pokladom, b je počet kontaktných bodov jednej nohy.

V prípade, že má noha 3 stupne voľnosti je počet bodov kontaktu 1, keď má noha 5 stupňov voľnosti je počet kontaktných bodov 2 a pre 6 stupňov voľnosti je počet kontaktných bodov 3, tak ako to bolo rozobrané na obr. 7.

7.2.1 Šesťnohé KM

Prvá posudzovaná skupina riešení bude mať šesť nôh. Hodnotiť sa budú kombinácie šiestich nôh s ostatnými jedinečnými znakmi. Kombinácia šiestich nôh a šiestich stupňov voľnosti na jednu nohu je síce teoreticky funkčné a konštrukčne prevediteľné riešenie, ale z ekonomického hľadiska je toto riešenie finančne náročné, keďže riešenie má celkovo 36 (6·6) stupňov voľnosti. Tieto nadbytočné stupne voľnosti zvyšujú celkovú hmotnosť KM a nezvyšujú jeho stabilitu. Trojbodový (rovinný) kontakt jednej nohy s podkladom má porovnateľne nižšiu plochu ako plocha tvorená tromi nohami s podkladom (uvažuje sa s minimálne troma nohami v kontakte počas celej doby pohybu KM). Podobné hodnotenie má aj kombinácia s piatimi stupňami voľnosti na jednu nohu. Z ekonomického a komplexného pohľadu, riešenia s piatimi a so šiestimi stupňami na nohu uvažovať nebudeme. Vybrané sú preto tri stupne voľnosti na nohu, ktoré splňujú podmienku stability ($3 \cdot 1 \geq 3$), pri uvažovaní s minimálne troma nohami v kontakte počas celej doby pohybu KM. Ďalším obecným znakom je smerovanie nôh

s možnosťami: horizontálne a vertikálne smerovanie. Obe tieto možnosti v kombinácii so 6 nohami a tromi stupňami voľnosti na nohu sú funkčné, konštrukčne a ekonomicky rovnako náročné. Uvažovať tak môžeme obe. U tohto riešenia je zbytočné použiť vyvažovacie zariadenie, keďže KM splňuje podmienku stability. Posledným obecným znakom je rozmiestnenie kotvových bodov nôh. Ukotvenie všetkých šiestich nôh v jednom bode je nereálne, keďže by nohy nemali dost priestoru pre pohyb. Rozmiestnenie nôh na jednej priamke takisto nie je dobré z funkčného hľadiska. Nohy rozložené na jednej osi nevedia zaistiť stabilitu, bez vyvažovania. Aj v prípade vyvažovania je šesť nôh na jedenej čiare priveľa, vznikol by tak príliš dlhý/široký KM, dostačujúcim počtom by boli štyri nohy, ktoré by sa striedali napríklad po dvojiciach. Jediným rozumným riešením je teda uloženie v rovine.

Výsledkom selekcie sú dve kombinácie u šesťnohého riešenia. Tie majú spoločné tri stupne voľnosti na jednu nohu, nemajú vyvažovanie, majú nohy ukotvené v rovine a líšia sa v smerovaní nôh. Prvá kombinácia má smerovanie nôh vertikálne a druhá kombinácia horizontálne.

7.2.2 Päťnohé KM

Druhá posudzovaná skupina riešení bude mať päť nôh. Tie sa môžu nakombinovať, rovnako ako u šesťnohého riešenia, s 3, 5 a 6 stupňami voľnosti na nohu. Keďže počet nôh je stále dostačujúci a kontakt s podkladom udržiavajú stále tri nohy, nie je potrebné mať dvojbodový alebo trojbodový kontakt na jednu nohu. Teda riešenia s piatimi a šiestimi stupňami sú u päťnohého riešenia zbytočné, podobne ako tomu bolo u šesťnohého riešenia. Ďalším obecným znakom je smerovanie nôh, ktoré má dve prevedenia: horizontálne a vertikálne. Obe tieto riešenia sú funkčné, ekonomicky a konštrukčne rovnako náročné. Budú teda uvažované obe. Vyvažovacie zariadenie u päťnohého riešenia nie je potrebné, keďže sa uvažuje s minimálne tromi nohami so stálym kontaktom s podkladom a podmienka stability je splnená ($3 \cdot 1 \geq 3$). Posledným obecným znakom je rozmiestnenie kotvových bodov nôh v tele, kde sú tri možnosti. Umiestnenie v jednom bode nedáva zmysel z dôvodu väčšieho počtu nôh, ktoré by sa navzájom obmedzovali. Druhou možnosťou je rozmiestnenie nôh na jednej priamke, čo by vytvorilo problém so stabilitou, preto ani toto riešenie nebude uvažované. Zostáva teda rozmiestnenie nôh v rovine. Vymedzením posledného obecného znaku sa riešenia s piatimi nohami zredukovali na dve riešenia s tromi stupňami voľnosti na jednu nohu, ktoré nemajú vyvažovacie zariadenie a majú rozložené nohy v rovine, s tým že smerovanie nôh je vertikálne alebo horizontálne.

7.2.3 Štvornohé KM

Tretia posudzovaná skupina riešení budú štvornohé KM. Posúdenie všetkých 30 štvornohých riešení naraz je komplikovanejšie, keďže nie je možné niektoré obecné znaky vymedziť bez výberu iných znakov, vzájomne sa obmedzujú. Preto budú jednotlivé riešenia posudzované samostatne. Jediné nezávislé jedinečné znaky sú nohy s šiestimi stupňami voľnosti, ktoré by dokázali vymedziť všetky stupne voľnosti len jednou nohou (uvažuje sa o kontakte minimálne dvoch), a taktiež umiestnenie nôh v jednom bode, ktoré nie je použiteľné kvôli nedostatočnému priestoru. Zostáva tak šesťnásť riešení ($2 \cdot 2 \cdot 2$). Prvá polovica riešení je vypísaná v tab. 9, kde sa uvažuje s tromi stupňami voľnosti na jednu nohu.

Prvé riešenie je kombináciou troch stupňov voľnosti na jednu nohu, s horizontálnym smerovaním, s vyvažovaním a rozmiestnením nôh na priamke, ako je uvedené v tab. 9. Toto prvé riešenie je síce funkčné no nadbytočnou časťou je vyvažovanie. KM je schopný dosiahnuť statickú stabilitu ($3 \cdot 1 \geq 3$) len pomocou troch nôh a štvrtú presúvať. Odstránením vyvažovania

sa získa druhé riešenie. Medzi výsledné riešenie tak bude zaradené druhé. Tretie riešenie kombinuje tri stupne voľnosti na jednu nohu, horizontálne smerovanie, vyvažovanie a uloženie kotvových bodov nôh na priamke. Vyvažovanie je v tomto prípade zbytočné, keďže KM dosiahne statickú stabilitu kontaktom troch nôh s podkladom. Tretie riešenie je po úprave rovnaké ako štvrté až na to, že nemá vyvažovanie a preto bude uvažované ako výsledné riešenie. Piate riešenie pozostáva s vertikálneho uloženia, s tromi stupňami voľnosti na nohu, s vyvažovaním a uložením koncov nôh na jednej priamke. Toto riešenie je zaujímavé hlavne tým, že má nohy ukotvené v tele na jednej priamke a smerovanie nôh je vertikálne, čo spôsobuje nestabilitu (otáčanie okolo priamky). Je preto nutné mať u tejto kombinácie vyvažovanie. Táto istá kombinácia bez vyvažovania, v poradí šiesta nebude uvažovaná. Siedme riešenie kombinuje vertikálne smerovanie nôh s tromi stupňami voľnosti na jednu nohu, s vyvažovaním a rovinným rozložením. Toto riešenie má nadbytočné vyvažovanie, keďže je KM staticky stabilný. Siedme riešenie nebude preto uvažované. Uvažované bude ôsme riešenie, ktoré oproti siedmemu riešeniu vyvažovanie nemá.

Deviate až šestnásť riešenie má oproti predchádzajúcim ôsmim kombináciám namiesto troch, až päť stupňov voľnosti na jednu nohu. Jediná kombinácia, kde by bolo rozumné použiť päť stupňov, je v prípade spojenia vertikálneho smerovania, bez vyvažovania a s kotvovými bodmi nôh na priamke. U ostatných riešení je možné nahradiť päť stupňov voľnosti tromi bez straty stability.

Počet výsledných kombinácií u štvornohého prevedenia je teda päť. Je preto potrebná ďalšia redukcia. Spojiť je možné riešenia, ktoré sa líšia len rozmiestnením nôh na priamke alebo v rovine, riešenia 2 a 4. Spoja sa tak dve kombinácie, kde ostatné jedinečné znaky sú tri stupne voľnosti, horizontálne smerovanie a nemajú vyvažovanie. Obe riešenia tak budú uvažované len s rovinným riešením. Výsledný počet sa tak redukuje už len na štyri riešenia.

Tab 9) Riešenia štvornohé s tromi stupňami voľnosti na jednu nohu

Číslo riešenia	Smerovanie	Vyvažovanie	Rozmiestnenie
1.	horizontálne	s	na priamke
2.	horizontálne	bez	na priamke
3.	horizontálne	s	v rovine
4.	horizontálne	bez	v rovine
5.	vertikálne	s	na priamke
6.	vertikálne	bez	na priamke
7.	vertikálne	s	v rovine
8.	vertikálne	bez	v rovine

7.2.4 Trojnohé KM

Štvrtá posudzovaná skupina budú trojnohé KM. Podobne ako u štvornohých KM nie je možné vyradiť jedinečné znaky bez zváženia ostatných. Jediný znak, ktoré je možné vyradiť je šesť stupňov voľnosti na jednu nohu, keďže v kontakte s podkladom budú minimálne dve nohy, postačuje tak pre dosiahnutie stability päť stupňov voľnosti na nohu. Zostáva tak 24 (2·2·2·3) riešení. Prvých dvanásť riešení, ktoré budú posudzované majú tri stupne voľnosti na nohu a sú vypísané v tab. 10. Niektoré riešenia je možné hneď vyradiť, keďže sa nedajú zostaviť. Riešenie 7 a 8 je nerealizovateľné, kombinácia umiestnenia konca nôh v jednom bode s vertikálnym

smerovaním spôsobuje vzájomné kríženie sa týchto troch nôh. Ďalšie riešenia, ktoré môžeme okamžite vyradiť sú tie, ktoré neobsahujú vyvažovanie a 3 stupne voľnosti na nohu s uvažovaním minimálnym kontaktom dvoch nôh vedie k nestabilite ($2 \cdot 1 \geq 3$). Zostávajú tak riešenia 1, 3, 5, 9 a 11. Riešenia 1, 3 a 5 sa líšia len rozmiestnením nôh a sú kombinované s horizontálnym smerovaním nôh. Vo výsledku by sa tieto tri riešenia svojimi vlastnosťami nelíšili, potrebovali by aktívne vyvažovanie a mali by veľký klopiaci moment pri zdvihnutej jednej nohe. Nebude sa preto ďalej uvažovať o žiadnom z týchto riešení. Kombinácie 9 a 11 sú diametrálne odlišné, číslo 9 má nohy ukotvené v jednom rade a číslo 11 rozmiestnené v rovine napr. trojuholníku. Budú sa teda ďalej uvažovať obe s kombináciou s tromi stupňami voľnosti na jednu nohu.

Druhých dvanásť riešení bude kombinovať päť stupňov voľnosti na jednu nohu a ostatné jedinečné znaky, tiež vypísané v tab. 10. Z rovnakého dôvodu ako predtým môžeme vyradiť riešenia 7 a 8, pretože nie sú realizovateľné. Kombinácia piatich stupňov voľnosti s horizontálnym smerovaním je zbytočná, z toho dôvodu, že čiarový/dvojbodový alebo bodový kontakt nedokáže zaistiť dostatočnú stabilitu na dlhom horizontálnom ramene (nohe). Teda riešenia 1 až 6 nebudú uvažované. Pri vertikálnom smerovaní nôh dokážu dve nohy s čiarovým kontaktom zaistiť stabilitu ($2 \cdot 2 \geq 3$), keďže sa nachádzajú bližšie pri sebe a pri ťažisku KM. Uvažovať teda riešenia s vyvažovaním nie je potrebné. Zostávajú tak riešenia číslo 10 a 12 s kombináciou piatich stupňov voľnosti na jednu nohu.

Výsledkom sú tak štyri trojnohé riešenia. Kombinácie sa líšia len vo vyvažovaní a počte stupňov voľnosti, inak majú vertikálne smerovanie nôh a uloženie nôh v jednej rade alebo rovine.

Tab 10) Trojnohé riešenia s tromi a piatimi stupňami voľnosti na jednu nohu

Číslo riešenia	Smerovanie	Vyvažovanie	Rozmiestnenie
1.	horizontálne	s	v bode
2.	horizontálne	bez	v bode
3.	horizontálne	s	na priamke
4.	horizontálne	bez	na priamke
5.	horizontálne	s	v rovine
6.	horizontálne	bez	v rovine
7.	vertikálne	s	v bode
8.	vertikálne	bez	v bode
9.	vertikálne	s	na priamke
10.	vertikálne	bez	na priamke
11.	vertikálne	s	v rovine
12.	vertikálne	bez	v rovine

7.2.5 Dvojnohé KM

Poslednou posudzovanou skupinou je skupina dvojnohých KM. Jedinečné znaky, ktoré je možné hneď vyradiť sú horizontálne smerujúce nohy, z dôvodu veľkého klopiaceho momentu pri kontakte len jednej nohy s podkladom. Vyradiť môžeme umiestnenie nôh v rovine, keďže dva kotviace body nohy nedokážu vytvoriť rovinu. Z konštrukčného hľadiska nie je podstatné,

pri dvojnóhom riešení, umiestnenie nôh v bode alebo na priamke, keďže v oboch kombináciách by sa nohy nakoniec spojili do jedného bodu. Ďalej sa tak bude uvažovať len o riešeniach s ukotvením v jednom bode. Zostáva tak 6 kombinácii (3·2), ktoré sú vypísané v tab. 11. Riešenia sa líšia v počte stupňov voľnosti a tým, či majú alebo nemajú vyvažovanie. Kombinácie s tromi a piatimi stupňami voľnosti na nohu vyvažovanie potrebujú, keďže jedna noha nevymedzí všetkých 6 stupňov voľnosti a nie je splnená podmienka stability ($1 \cdot 2 \geq 3$). Z toho istého dôvodu noha so šiestimi stupňami vyvažovanie nepotrebuje, keďže vymedzí všetkých 6 stupňov voľnosti. Výsledné sú teda tri riešenia 1, 3 a 6 z tab. 11, kde všetky riešenia majú vertikálne smerovanie nôh, konce nôh sú ukotvené v jednom bode a líšia sa v počte stupňov voľnosti na nohu a vyvažovaní.

Tab 11) Riešenia dvojnóhé s bodovým umiestnením nôh

Číslo riešenia	Počet stupňov voľnosti na nohu	Vyvažovanie
1.	3	s
2.	3	bez
3.	5	s
4.	5	bez
5.	6	s
6.	6	bez

7.2.6 Výsledné riešenia

Postupná selekcia zredukovala všetkých 180 kombinácii na 15 riešení. Najviac riešení majú trojnohé a štvornóhé KM so 4 kombináciami, nasledujú dvojnóhé KM, ktoré majú 3 riešenia a nakoniec šesťnohé a päťnohé KM, ktoré majú každé 2 riešenia. Všetky riešenia sú vypísane v tab. 12. Riešenia môžeme rozdeliť na už existujúce a nové. Nové riešenia sú 5, 7, 9 a 11. Ostatné riešenia už existujú.

Pre úplnosť by mala byť morfológická analýza stavby ešte doplnená aj o konkrétne konštrukčné prevedenie. Mal by byť zvolený typ pohonov, zdroj energie, zakončenia nôh, materiály konštrukcie atď., popísané v podkapitole 2.1. Každý tento ďalší jedinečný znak by bolo potrebné samostatne vyhodnotiť a vybrať vhodnú kombináciu pre všetky kinematické štruktúry. Avšak toto doplnenie je závislé od aktuálneho technologického pokroku a mení sa, čo v prípade kinematickej štruktúry neplatí. Správne je tak previesť toto doplnenie podľa súčasného stavu.

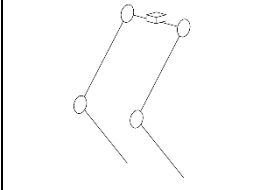

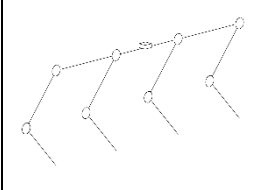
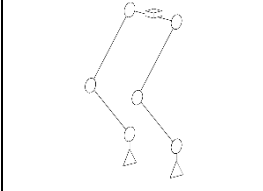

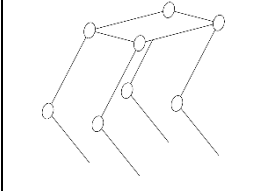

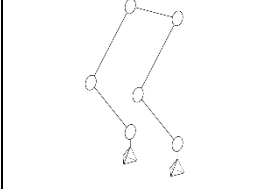

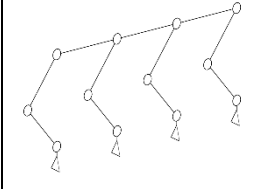
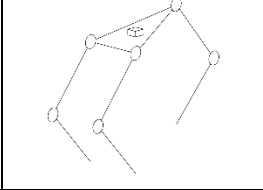

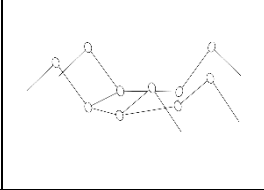

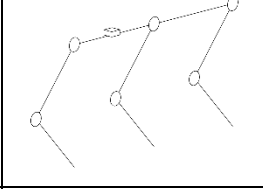
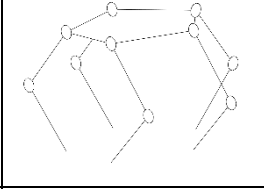

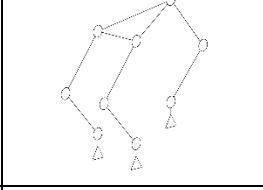

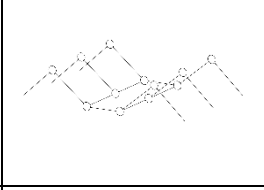

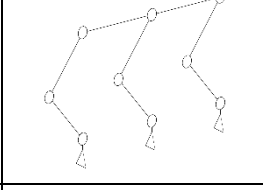
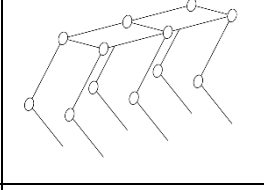

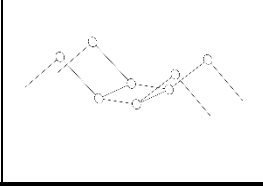

Tab 12) Zoznam riešení

Číslo riešenia	Počet nôh	Počet stupňov voľnosti na nohu	Smerovanie	Vyvažovanie	Rozmiestnenie
1.	2	3	vertikálne	s	v bode
2.	2	5	vertikálne	s	v bode
3.	2	6	vertikálne	bez	v bode
4.	3	3	vertikálne	s	v rovine
5.	3	3	vertikálne	s	na priamke
6.	3	5	vertikálne	bez	v rovine
7.	3	5	vertikálne	bez	na priamke
8.	4	3	horizontálne	bez	v rovine
9.	4	3	vertikálne	s	na priamke
10.	4	3	vertikálne	bez	v rovine
11.	4	5	vertikálne	bez	na priamke
12.	5	3	horizontálne	bez	v rovine
13.	5	3	vertikálne	bez	v rovine
14.	6	3	horizontálne	bez	v rovine
15.	6	3	vertikálne	bez	v rovine

7.3 Grafické znázornenie riešení a ich predstaviteľia

Výsledné riešenia sú graficky zobrazené v tab. 13. Grafické znázornené riešenia predstavujú príklady možného riešenia na základe konceptu vychádzajúceho z kombinácií. Na grafickom znázornení je krúžkom označovaný kĺb s jedným až tromi rotáciami a kockou znázornené vyvažovanie. Zvyšné čiary predstavujú pevné časti rámu alebo ramená nôh. Vedľa grafických znázornení sú navyše zobrazené reálne KM, ak má daná kombinácia známe konštrukčné prevedenie, inak je v okne tabuľky pomlčka.

Tab 13) Graficky znázornené riešenia [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67]

Č.	Grafické znázornenie	Existujúce prevedenie	Č.	Grafické znázornenie	Existujúce prevedenie
1.			9.		-
2.			10.		
3.			11.		-
4.			12.		
5.		-	13.		
6.			14.		
7.		-	15.		
8.					

8 ANALÝZA REZISTENTNÉHO TERÉNU

Dôležitým aspektom pre pohyb KM je okolitý terén. Prevedenie terénu môže byť rôzne, od rovného tvrdého podkladu až po tvarovo zložitý a poddajný podklad. Veľa z týchto terénov je KM dobre prekonateľný. KM sú schopné chodiť po mäkkých, poddajných, šmykľavých podkladoch, prekonávať schody, obchádzať prekážky alebo aj prekročiť trhliny v zemi. Jedna z málo riešených oblastí terénov sú tzv. rezistentné terény. Sú to terény, ktoré vytvárajú trvalú rezistenciu ako je voda, sneh, močariská, husté alebo odolné porasty, piesok, blato atď. Rozdeliť ich môžeme na terény kvapalné ako je voda, močiare, blato, na pevné stlačiteľné granulované ako je sneh, na pevné nestlačiteľné granulované ako je piesok a na pevné deformovateľné nespojité ako je porast.

8.1 Kvapalný terén

Kvapalina je obecné popísaná svoju hustotou, viskozitou a povrchovým napätím. V interakcii s okolím vytvára silové pôsobenie ako je: vztlaková sila F_V , viskózná sila F_T a odporová sila F_O [68]. Ich rovnice sú nasledujúce:

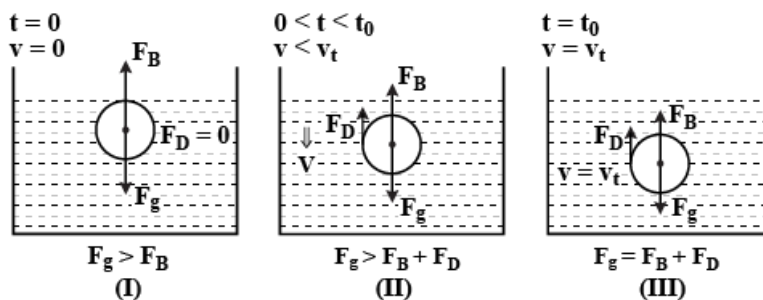
$$F_O = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (2)$$

$$F_V = \rho g V \quad (3)$$

$$F_T = \mu A \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

kde: ρ predstavuje hustotu kvapaliny, v rýchlosť objektu, C_D koeficient odporu, A plochu elementu, g gravitačné zrýchlenie, V objem ponoreného telesa, μ dynamickú viskozitu kvapaliny a du/dy gradient rýchlosti vo smere kvapaliny.

Na obr. 10 je zobrazený príklad silového pôsobenia v kvapaline na voľne uložené teleso. Označenie odporovej sily je v tomto prípade F_D a vztlakovej F_B .



Obr. 10) Silové pôsobenie v kvapaline [69]

8.2 Stlačiteľný granulovaný terén

Predstaviteľom granulovaného stlačiteľného terénu môže byť napríklad sneh. Je schopný formovať rôzne veľkosti granuly, ale pri tom sú stále stlačiteľné. Fyzikálnu podstatu snehu pre simulácie komplexne vystihol tento článok [70]. Tento model snehu pracuje s tzv. elementárnou bodovou metódou, kde každý bod má danú pozíciu, rýchlosť, hustotu, hmotnosť, silové pôsobenie a stlačenie v jednotlivých časových periódach. Simulácia pracuje s opakujúcimi sa desiatimi krokmi:

1. rasterizácia elementov do mriežky;
2. výpočet objemu a hustoty elementov;
3. výpočet mriežkových síl;
4. výpočet rýchlosti na mriežke;
5. kolízie elementov na základnej mriežke;
6. riešenie systému lineárnych rovníc;
7. aktualizácia stlačiteľných gradientov;
8. aktualizácia rýchlosti elementov;
9. kolízie elementov na základe elementu;
10. aktualizácia polohy elementov.

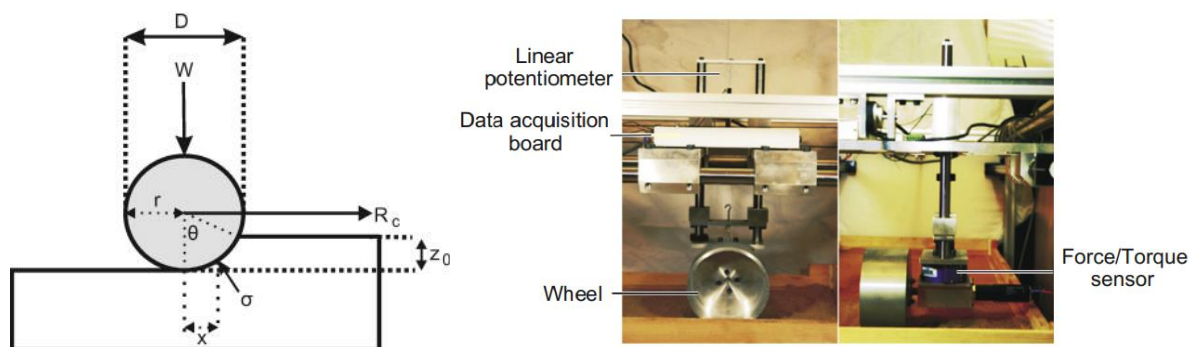
Každý tento krok je popísaný matematickou rovnicou. Spoločne predstavujú model snehu, ktorý bol dokonca použitý firmou Disney pre animovanie snehu. Ukážka použitia tohto simulačného modelu je na obr. 11.



Obr. 11) Simulácia snehu [70]

8.3 Nestlačiteľný granulovaný terén

Za nestlačiteľný granulovaný terén môžeme považovať piesok. Jeho správanie v interakcii s inými telesami dobre popisuje Bekkerová teória a práce z nej odvodené [71, 72]. Pomocou tejto teórie je možné popísať zaborenie sa do piesku pre nerotujúci a rotujúci objekt a vyvodit' z matematických rovníc pôsobiace odporové sily. Teória je prispôbená pre rôzne veľkosti častice piesku, priemery vnikajúcich objektov a rýchlosť rotácie. Schéma pre výpočet a testovacia stolica sú na obr. 12.



Obr. 12) Schéma Bekkerovej teórie a testbed [73]

8.4 Deformovateľný nespojitý terén

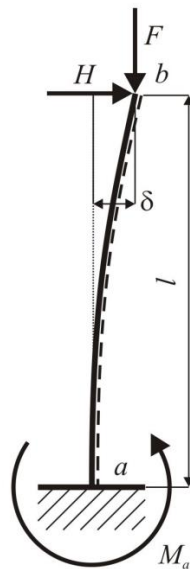
Príkladom deformovateľného nespojitého terénu môže byť hustý porast (tráva) alebo aj riedky málo poddajný terén (mladé stromy, kríky). Tomuto terénu najlepšie odpovedá fyzikálny model skupiny jednoduchých prútov. Ich popisom je geometria, zahrňujúca dĺžku a priemer (valcový tvar), fyzikálne parametre zahŕňajúce Youngov modul pružnosti, Poissonovu konštantu a faktor tlmivosti [74]. Silové pôsobenie vychádza nielen z interakcií medzi terénom a KM, ale aj medzi prútmi terénu. Vzorce pre priehyb δ_P a natočenia φ_P na konci prútu a moment M_P v päte od sily H na obr. 13 je:

$$M_P = Hl \quad (5)$$

$$\delta_P = \frac{Hl^3}{3EI_y} \quad (6)$$

$$\varphi_P = -\frac{Hl^2}{2EI_y} \quad (7)$$

kde: l je dĺžka prútu, E modul pružnosti v ťahu materiálu, I_y je kvadratický moment v ose y .



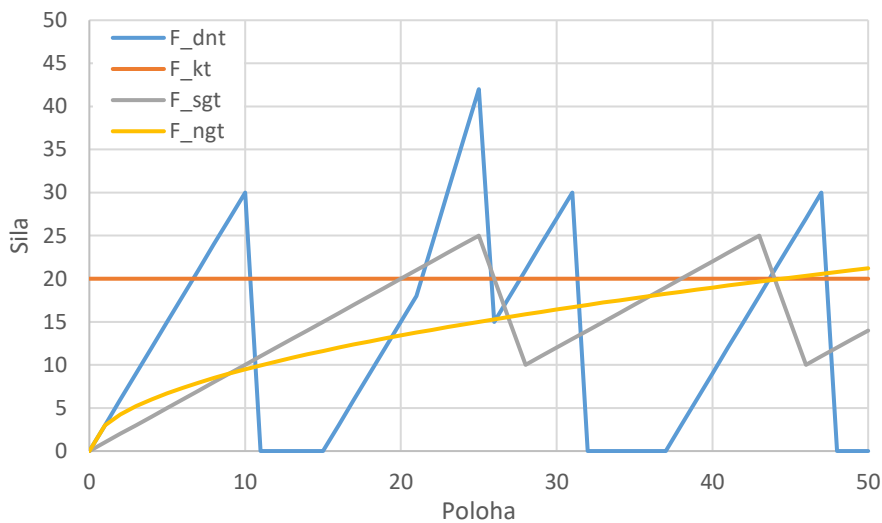
Obr. 13) Deformácia prútu [75]

8.5 Predpokladaná silové pôsobenie a výber terénu

Z predchádzajúcich podkapitol je možné vyjadriť predpokladanú závislosť sily na polohe elementu a sily na rýchlosti elementu pre všetky štyri analyzované rezistentné terény. Tieto závislosti poskytujú informácie o priebehu, podľa ktorého sa zvolí rezistentné prostredie simulované v tejto práci.

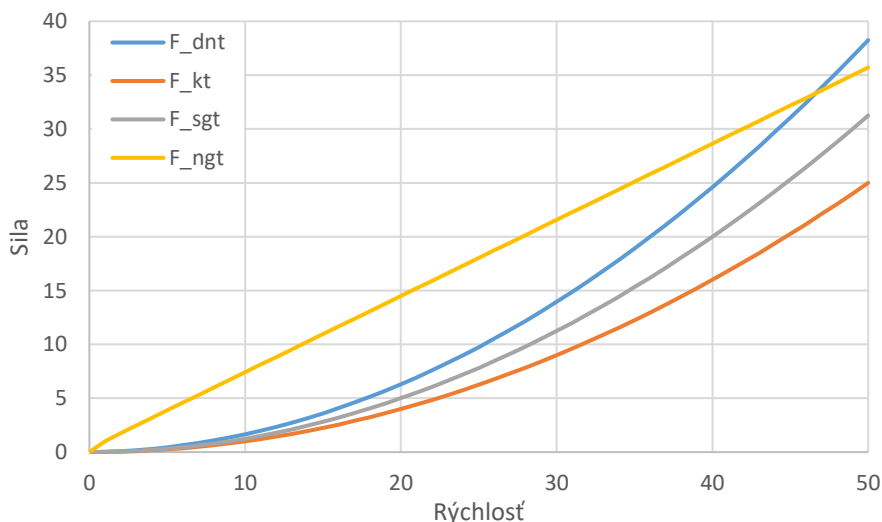
Predpokladané závislosti sú graficky znázornené na obr. 14 a 15. Obr. 14 vyjadruje závislosť sily na polohe, kde hodnota sily a poloha sú len informatívne, neodrážajú presné hodnoty. Sila označená F_{dnt} prezentuje silu na jeden element v deformovateľnom nespojitom teréne, F_{kt} silu v kvapalnom teréne, F_{sgt} silu v stlačiteľnom granulovanom teréne a F_{ngt} silu v nestlačiteľnom granulovanom teréne. Sila F_{kt} je v tomto prípade konštantná, kdeže sa predpokladá, že poloha elementu nemá vplyv na vzniknutú rezistentnú silu od kvapaliny. Sila F_{ngt} má tvar exponenciálnej funkcie, keďže vo vyjadrení sily má poloha exponent menší ako jedna. Sila F_{sgt} má tvar lineárnych spojnic, ktoré opakovane klesajú a rastú. Jedná sa

o stláčanie deformovateľného materiálu, jeho odsunutia od smeru pohybu a opätovného stlačenia nového materiálu. Sila F_{dnt} je prerušovaná a má tvar lineárnych spojnic, ktoré rastú pri kontakte s jedným (poloha 0 až 11) alebo viacerými prútmi (poloha 21 až 26) a okamžite poklesne pri jeho prekonaní.



Obr. 14) Závislosť sily na polohe

Obr. 15 graficky znázorňuje predpokladanú závislosť sily na rýchlosti. Pri silách F_{ngt} a F_{dnt} nie je priama závislosť medzi rýchlosťou a silou, ale len medzi polohou a silou. Preto do výpočtu bude vložená odpovedajúca poloha, ako by tomu bolo pri rovnomernom zrýchlenom pohybe. Výsledný priebeh pri sile F_{ngt} má rastúcu lineárnu závislosť. Pre silu F_{dnt} je krivka parabolická, teda závislosť medzi silou a rýchlosťou je kvadratická. V prípade síl F_{kt} a F_{sgt} je ich vyjadrené druhou mocninou rýchlosti.



Obr. 15) Závislosť sily na rýchlosti

Z analýzy vyplýva, že priebeh síl v jednotlivých typoch terénoch sa líši. Jediný terén, ktorý vykazuje konštantnú závislosť medzi polohou a silou je kvapalný terén. Ostatné terény majú premenlivú ťažko lineárne opísateľnú závislosť. Z pohľadu rýchlosti väčšina terénov má mocninnú závislosť, až na nestlačiteľný granulovaný terén, ktorý má lineárnu rastúcu závislosť. Vhodný terén pre simuláciu, z pohľadu priebehu síl a prihliadnutím na predpisy pre výpočet síl

a ich závislosti na počte vstupov, je teda kvapalný terén. Takisto kvapalný terén je svojimi vlastnosťami najstálejší oproti ostatným terénom. Vlastnosti snehu sú veľmi závislé na okolitej teplote a nie je možné tento sneh spätne uviesť do pôvodného stavu, pre opakované merania.

9 SIMULAČNÝ MODEL

Program Matlab Simulink bol vybratý pre vytvorenie modelu KM a jeho okolia, rezistentného terénu. Jeho špeciálna časť Simscape Multibody poskytuje simulačné prostredie mechanických systémov v 3D priestore ako sú roboty, podvozky áut, stavebné vybavenie a podvozky lietadiel. V tomto prostredí je možné simulovať zostavy pomocou náhradných blokov prezentujúce telesá, kĺby, väzby, silové zložky a senzory. Simulačné prostredie vytvára a rieši rovnice pohybu celkového mechanického systému. Do simulácie je možné vložiť CAD modely spoločne s hmotnosťou, momentami zotrvačnosti, kĺbmi a väzbami. Simuláciu je možné automaticky vizualizovať priamo v tomto prostredí [76].

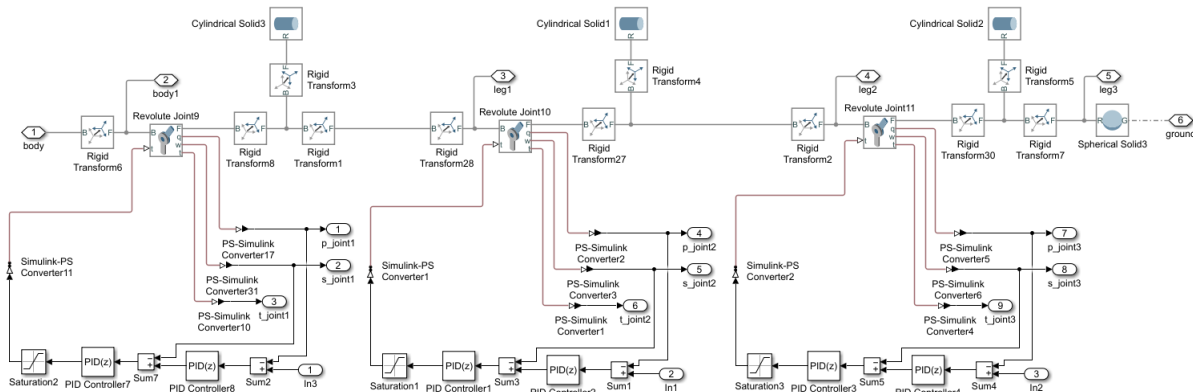
Simulačný model bude pozostávať z dvoch častí: modelu KM a modelu prostredia. Modely KM budú vychádzať z morfolologickej analýzy a celkovo bude vytvorených 15 modelov. Model prostredia bude nahrádzať kvapalnú terén. Súčasťou modelu prostredia budú aj väzby medzi KM a týmto prostredím.

9.1 Model KM

Získané riešenia KM z morfolologickej analýzy sa vymodelujú do simulácie pre ich testovanie, meranie hodnôt a pre návrh spôsobu pohybu (stratégie pohybu) KM v teréne. Modelovanie bude modulárne a parametrické pre zníženie časovej náročnosti tvorby a úprav. Každému typu nohy s tromi, piatimi a šiestimi stupňami bude vytvorený jeden modul. Rovnako to bude s telom KM a vyvažovacími zariadeniami. Výsledné KM budú kombináciou týchto modulov a subsystémov.

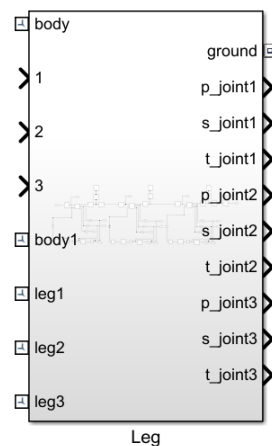
9.1.1 Subsystém nohy

Celkovo budú modelované tri univerzálne subsystémy nohy. Všetky tri nohy budú výhradne používať rotačné väzby, valcovité telesá a budú zakončené guľovou plochou v jednom, dvoch alebo troch bodoch. Rotačné väzby sú použité z dôvodov nižšej hmotnosti, väčšieho pomerového dosahu oproti posuvným väzbám a taktiež z dôvodu napodobenia prírodného riešenia a možnosti re-orientovania mechanického systému, čo je nutnosť pre viac ako trojstupňové mechanizmy. Vybrané valcové náhrady umožňujú jednoduchší a rýchlejší výpočet reakcii s okolím. Zakončenie guľovou plochou umožňuje použiť špeciálny blok kontaktu v Simulinku pre simulovanie čo najreálnejšieho kontaktu so spätnou väzbou v podobe silového pôsobenia.



Obr. 16) Model nohy s tromi stupňami voľnosti

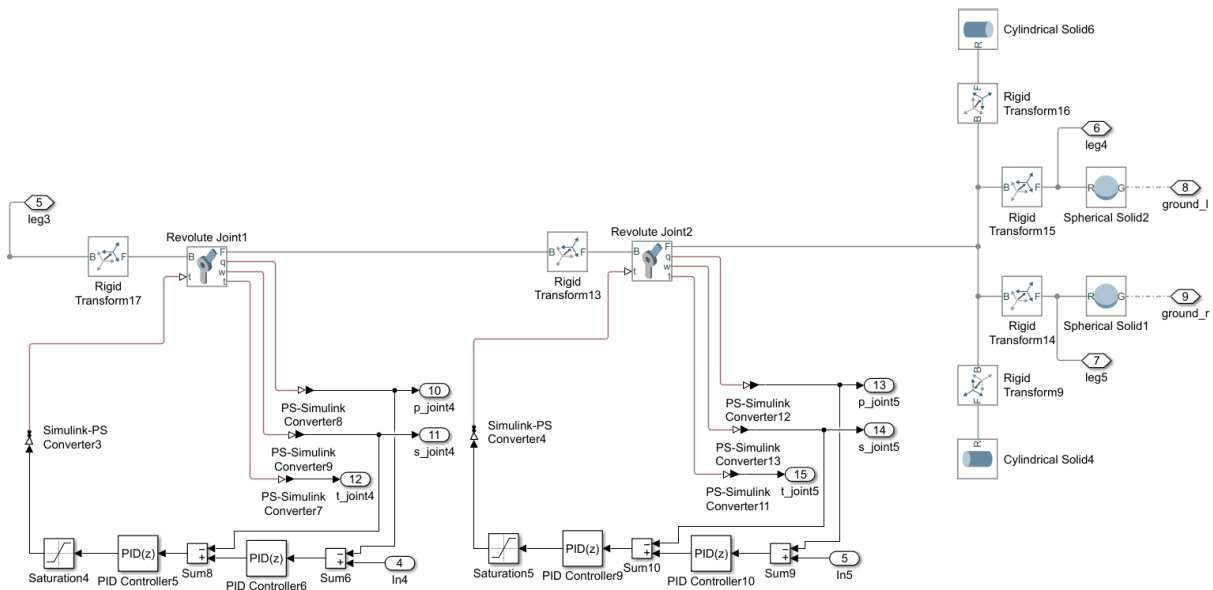
Prvý subsystém nohy bude mať tri stupne voľnosti a jeho kinematické zoskupenie rotácii má poradie BAA(pitch, roll, roll), tzv. antropomorfné (tradičné) usporiadanie, ktoré sa najčastejšie používa v robotike ako polohovacia časť. Na obr. 16 je zobrazený model tejto nohy. Kotvový bod v tele KM sa nachádza na ľavom kraji obr. 16 s blokom *body*, na ktorý sa napája *transformačný blok súradníc* (6). Po re-orientovaní kotviaceho bodu týmto blokom, tak aby z-ová osa odpovedala rotácii, je napojený *rotačný blok* (9), ktorý odpovedá kĺbu nohy. Ďalšie dva *transformačné bloky* (8,1) vytvárajú prvé rameno nohy a posúvajú súradnicový systém. Medzi tieto *transformačné bloky* (8,1) je vložený ďalší *transformačný blok* (3), ktorý posúva a orientuje náhradné *valcové teleso* (3). Toto spojenie je použité trikrát pre ďalšie ramená nohy. Zakončenie posledného ramena je, ako bolo spomínané, *gul'ovo plochou/telesom* (3) bez hmotnosti a rozmerov, ktoré je výhradne použité pre urýchlenie kalkulácie. V spodnej časti je modelované riadenie troch rotácií pomocou dvojice PID regulátorov. Jedná sa o polohový a rýchlostný regulátor, kde prvotným vstupom je poloha a posledný výstupom je moment. Použité sú diskrétné regulátory pre simulovanie reálnych podmienok a urýchlenie kalkulácie. Výstupný moment z PID regulácie je navyše obmedzený limitným momentom. Vstupné parametre subsystému sú: kotvový bod v tele KM (*body*), poloha kĺbov nohy (1, 2, 3); a výstupné parametre sú: koncový bod nohy (*ground*), poloha, rýchlosť a moment kĺbov (*p_joint*, *s_joint*, *t_joint*) a poloha styčných bodov nohy (*body1*, *leg1*, *leg2* a *leg3*). Výsledný subsystémový blok je zobrazený na obr. 17.



Obr. 17) Blok subsystému nohy s 3 DoF

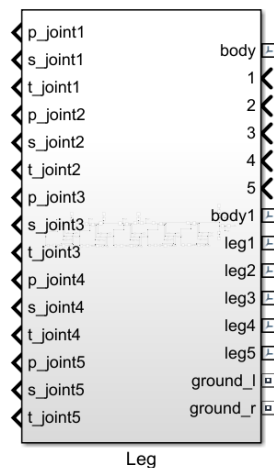
Keďže vstupnou hodnotou pre tento blok nohy je natočenia jednotlivých kĺbov, je potrebné kalkulovať inverznú kinematiku. Riešením je použitie sady geometrických rovníc pre prepočet karteziánskych súradníc (x , y , z) na natočenie jednotlivých kĺbov (ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3) [77].

Tento subsystém nohy s tromi stupňami voľnosti bude použitý u morfológických riešení 1, 5, 9, 10, 13 a 15 ako vertikálna noha a u riešení 8, 12 a 14 ako horizontálna noha.



Obr. 18) Model orientačnej časti nohy s 5 DoF

Druhým subsystémom je noha s piatimi stupňami voľnosti. Vybrané kinematické zoskupenie je BAACA (pitch, roll, roll, yaw, roll). Jedná sa o rozšírené riešenie subsystému s tromi stupňami voľnosti. Je doplnená orientačná časť v dvoch osiach, kde tretia osa rotácie je vyriešená kontaktom len dvoch bodov s podkladom. Zakončenie je tak v tvare obráteného V, dvoma telesami valcov, kde každý koniec je ukončený guľovou plochou. Doplnené sú tiež PID regulácie rotačných kĺbov. Táto doplnková časť je zobrazená na obr. 18. Výsledný blok má tak navyše 2 vstupy natočenia a navyše výstupy: polohy, rýchlosti a momentu týchto dvoch rotácií, dve polohy styčných bodov a jeden kontaktný bod. Výsledný subsystémový blok je zobrazený na obr. 19.

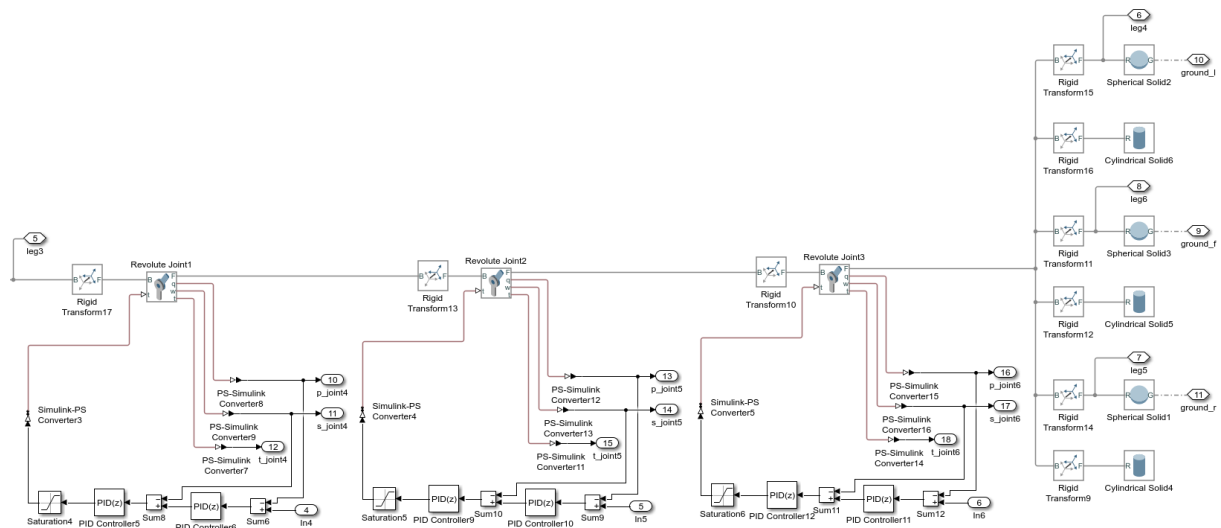


Obr. 19) Blok subsystému nohy s 5 DoF

Podobne ako u nohy s tromi stupňami voľnosti je potrebné pre jednoduchšie riadenie kalkulovať inverznú kinematiku. Na rozdiel od nohy s tromi stupňami voľnosti, je použitý obecný prístup k výpočtu. Sú použité tzv. DH (Denavit–Hartenberg) parametre, ktoré riešenia obecné natočenie v priestore pre jednu alebo aj dve osi súčasne [78]. Vstup pre túto kalkuláciu je nielen poloha bodu x , y a z , ale aj požadovaná orientácia α , β a γ . Výsledkom sú natočenia jednotlivých kĺbov θ_1 až θ_5 .

Tento subsystem je použitý pre morfológické riešenia 2, 6, 7 a 11.

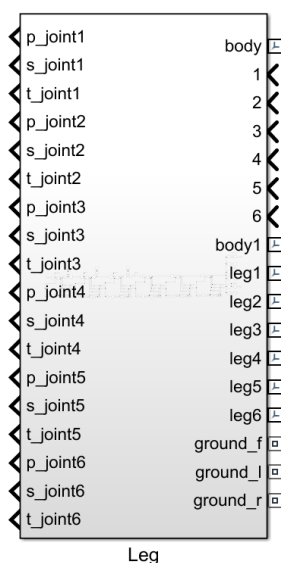
Posledným subsystemom je noha so šiestimi stupňami voľnosti. Jej kinematické zoskupenie je BAACAB (pitch, roll, roll, yaw, roll, pitch). Jedná sa o univerzálne riešenie so 6 stupňami voľnosti, vychádzajúce s prechádzajúceho 5 stupňového riešenia. Posledná šiesta osa rotuje aktívne v stavbe nohy. Noha je zakončená trojramennou vidlicou a dosahuje trojbodový kontakt, pre vymedzenie všetkých 6 stupňov voľnosti. Oproti nohe s 5 stupňami, je subsystem nohy doplnený o rotačnú väzbu, PID reguláciu a valcové teleso s guľovým zakončením. Rozšírenie trojnohého subsystemu je na obr. 20.



Obr. 20) Model orientačnej časti nohy so 6 DoF

Pre výpočet inverznej kinematiky sú rovnako použité DH parametre a maticový zápis. Blok subsystemu je zobrazený na obr. 21. Je rozšírený o jeden vstup: natočenie šiesteho kĺbu a o výstupy: jeden styčný bod, jeden kontaktný bod a polohu, rýchlosť a moment šiestej osi.

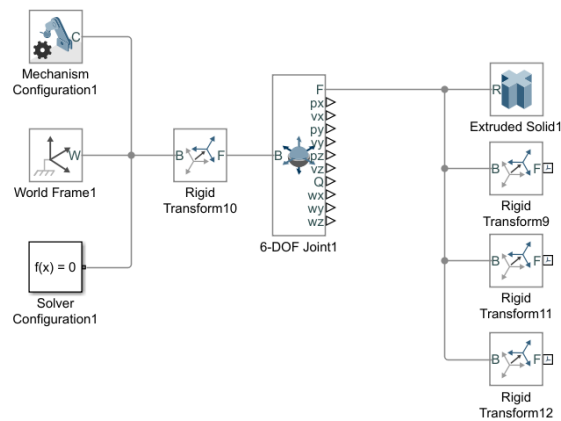
Tento subsystem nohy so šiestimi stupňami voľnosti bude použitý u morfológického riešenia 3.



Obr. 21) Blok subsystemu nohy so 6 DoF

9.1.2 Subsytém tela

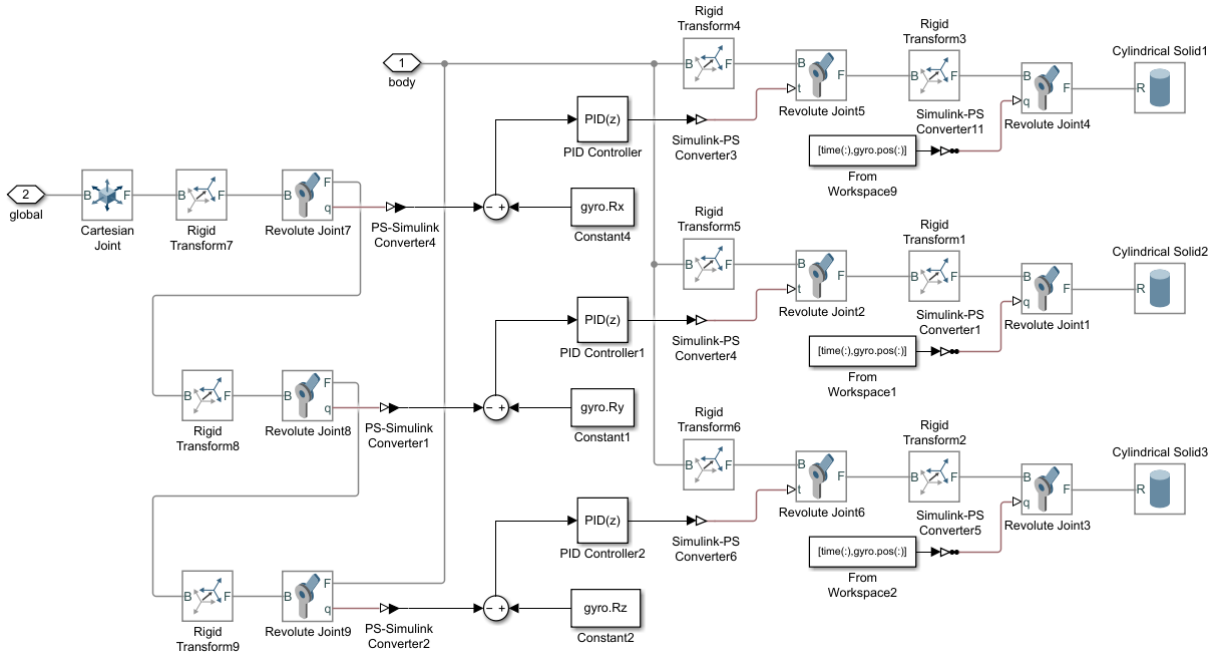
V závislosti od vybraného morfológického riešenia bude telo KM modelované ako vysunutý n-uholník, kde každý roh n-uholníka bude kotviacim bodom nohy. Telo nohy bude priamo naviazané na globálny súradnicový systém pre vymedzenie počiatočných podmienok simulácie. Spojenie zaisťuje 6 DoF kĺb, bez aktuátorov s odmeriavaním pozície, natočenia a rýchlosti. Nutnou súčasťou simulácie sú bloky *globálneho systému, mechanická konfigurácia a konfigurácia riešiteľa*. Súčasťou tela sú aj kotviace body nohy vysunuté *transformačnými blokmi* (9, 11, 12,..). Príklad modelu tela je na obr. 22.



Obr. 22) Model tela KM

9.1.3 Subsytém vyvažovania

Zvoleným vyvažovacím zariadením pre simuláciu je jeden až tri-osí gyroskop, v závislosti od modelu kráčajúceho KM. Vyvažovanie je potrebné pre morfológické riešenia 1, 2, 4, 5 a 9, kde sú KM staticky neurčité.

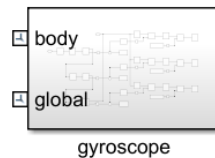


Obr. 23) Model trojosieho gyroskopu

Na obr. 23 je zobrazený tri-osí model gyroskopu, kde na pravej strane obr. 23 sú telesá gyroskopov, *valcové teleso (1,2,3)*. Tieto telesá sú napojené na *rotačné väzby* (1, 3, 4), ktoré

ich rotujú konštantnou vysokou rýchlosťou. Pre dosiahnutie gyroskopického momentu sú gyroskopy klopené kolmo na osu rotácie pomocou *rotačných väzieb* (2, 5, 6). Uloženie gyroskopov a osi klopenia sú také, aby gyroskopický moment (precesia) pôsobil vo všetkých troch osiach. Klopenie gyroskopov je riadené diskretným PID regulátorom, kde vstupom je rozdiel uhlovej odchýlky tela KM voči globálnemu systému a požadovaného naklopenia KM. Uhlová odchýlka je získaná tromi rotačnými väzbami v osiach x, y a z. Blok má dva prípojné body, pozícia a orientácia tela a pozícia a orientácia globálneho systému, ktoré sú voči sebe odmeriavané. Gyroskop je pevne uchytený k telu KM v jeho geometrickom strede.

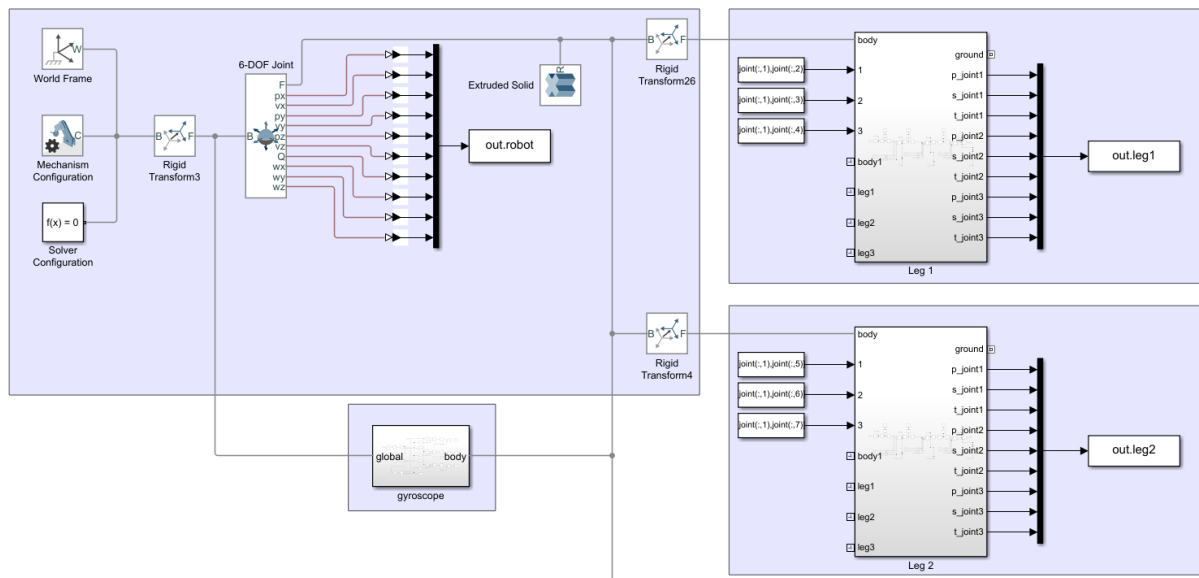
Na obr. 24 je zobrazený výsledný blok vyvažovania.



Obr. 24) Blok gyroskopu

9.1.4 Zostavy subsystémov

Kombináciou vytvorených subsystémov je možné vytvoriť všetkých 15 riešení morfolologickej analýzy, podľa tab. 13 v podkapitole 7.3 Graficky znázornené riešenia. Príklad celkového modelu je na obr. 25. V ľahom hornom rohu je uložený subsystém tela KM, na ľavej strane sú uložené dve subsystémy nôh a v ľavom dolnom rohu je subsystém gyroskopu. V oblasti subsystému nohy sú ešte navyše pridané bloky vstupov a výstupov. Na ľavej strane od bloku nohy sú vstupy, tomto prípade tri natočenia kĺbov a na pravej strane výstupy spojené do štruktúrovanej premennej. Podobne je to prevedené v oblasti tela, kde sa meria a zaznamenáva poloha a natočenie tela KM k globálnemu systému. Nepripojené porty blokov sú pripravené na napojenie rezistentného terénu.

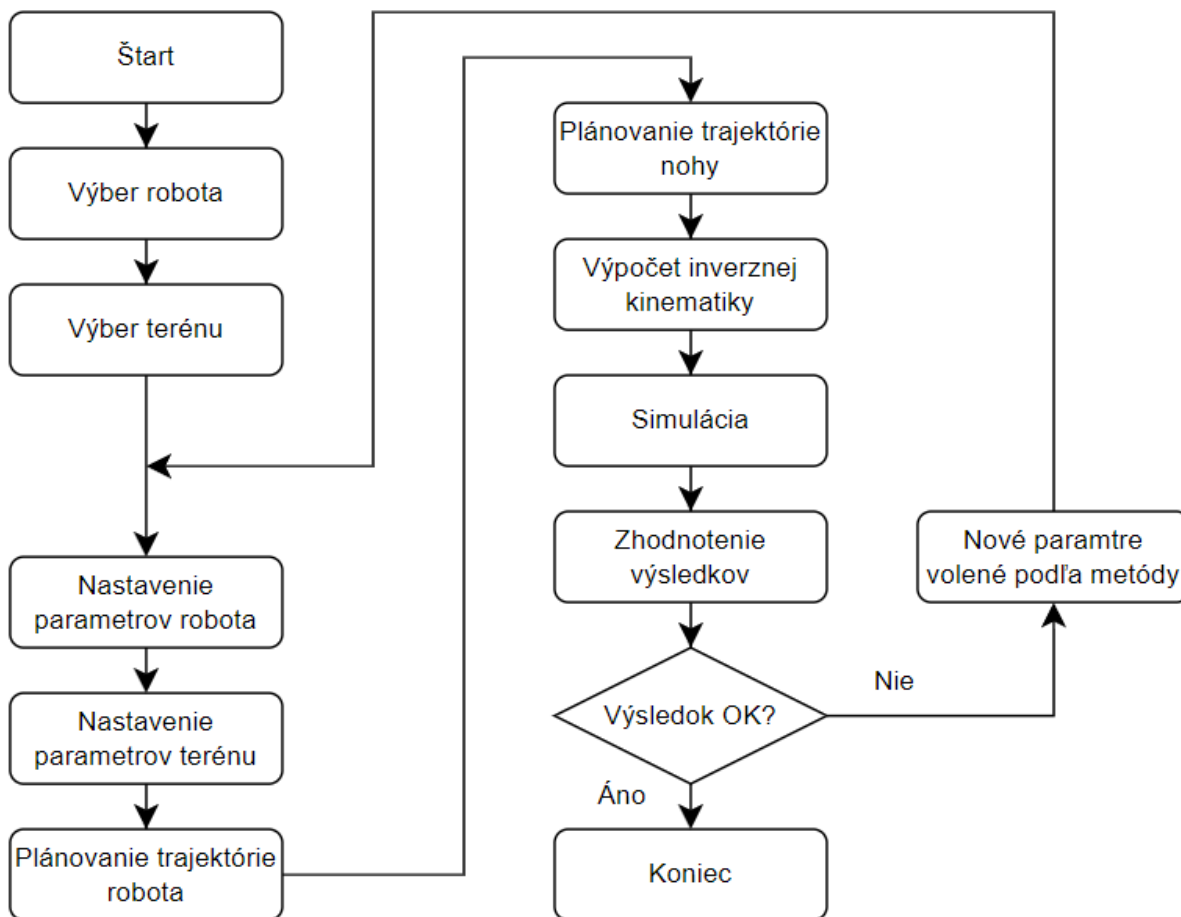


Obr. 25) Model KM

9.1.5 Logika riadiaceho algoritmu

Riadenie KM zaisťuje samostatný program, tzv. m-script, ktorý má formu štruktúrovaného textu. Jeho obsah sa dá popísať blokovým diagramom na obr. 26. Prvým krokom programu je

voľba KM (jedného z 15 morfológických riešení) a voľba rezistentného terénu (v tejto práci len kvapalný). Následne na to, sú vybranému KM a terénu priradené variabilné parametre. Program pokračuje výpočtom trajektórie tela KM a nohy, ktorá sa počas simulácie mení. Program pokračuje výpočtom inverznej kinematiky a spustením simulácie. Po simulácii sú namerané dáta zhodnotenú, ak sú vyhovujúce program sa ukončí, ak nie program pomocou zvolenej metódy parametre KM a terénu upraví a vráti sa späť v programe pred blok nastavenie parametrov KM. Toto obecné riešenie riadenia umožňuje zamieňať celé bloky, hlavne blok metód, ktorý je pre túto prácu cieľom.

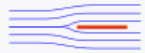





Obr. 26) Logika riadenie

9.2 Model odporového terénu

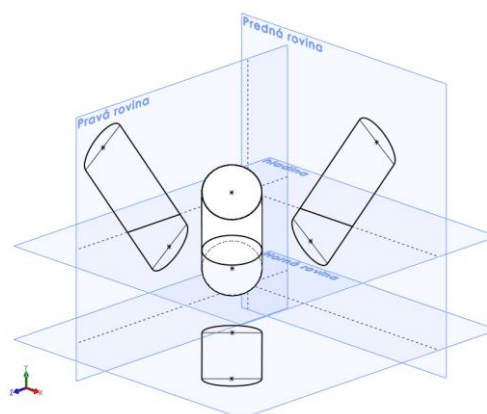
9.2.1 Kvapalný terén

Fyzikálny model kvapalného terénu pre účel simulácie je vytvorený na základe dvoch rovníc 2 a 3, vysvetlených v podkapitole 8.1 Kvapalný terén. Tieto dve rovnice vyjadrujú silové pôsobenie medzi telesom a kvapalným terénom. Rovnica 2 vyjadruje odporové sily F_0 a rovnica 3 reprezentuje vztlakové sily F_V . Na povrch telesa pôsobia aj trecie sily F_T s kvapalinou, ktoré sú v tomto prípade zanedbateľné, keďže vzťah 4 pre jej výpočet obsahuje prvú mocninu rýchlosti, voči druhej mocnine vo výpočte odporovej sily. Podstatným je aj tvar telesa. V modeli je výhradne používaný valec, ktorý svojim prierezom (kruhom) nemá vysoký podiel trecích síl, ale skôr vysoký podiel odporových síl ako je zobrazené na obr. 27.

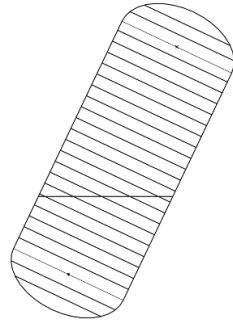
Shape and flow	Form Drag	Skin friction
	0%	100%
	~10%	~90%
	~90%	~10%
	100%	0%

Obr. 27) Podiel trecích a odporových síl [79]

Implementácia týchto rovníc do simulácie je numerická a výpočet je odvodení pre valcové teleso. Vstupné hodnoty pre výpočet sú poloha a rýchlosť vybraných bodov valca (stredy kruhových podstáv), okolitá rýchlosť kvapaliny a hustota kvapaliny. Výpočet je rozdelení do niekoľkých krokov, prvým je vytvorenie priemetov valca do troch rovín karteziánskeho systému a rozdelenie tohto priemetu na ponorenú a neponorenú časť ako je zobrazené na obr. 28. Druhý krok je rozdelenie priemetov valca na sekcie s konštantnou rýchlosťou a prepočet vstupnej rýchlosti vybraných bodov na jednotlivé sekcie ako na obr. 29. Posledným tretím bodom je výpočet síl. Odporové sily sú kalkulované len pre celkovo alebo čiastočne ponorené sekcie, kde plocha pre výpočet je celá poloha sekcia alebo len jej ponorená časť. A rýchlosť pre výpočet, je rozdiel rýchlosti sekcie a okolitej rýchlosti, hustota je prevzatá z vstupných parametrov. Získané odporové sily sekcie sú následne pomocou pákového pravidla rozpočítané do celkového silového pôsobenia vo vybraných bodoch valca. Vztlakové sily sú kalkulované ako súčin pôdorysných ponorených sekcii a hydrostatického tlaku. Sily pôsobiace v ostatných dvoch rovinách sa navzájom vykrátia, sú vo výsledku nulové. Výsledné sily sú tak súčtom odporových a vztlakových síl pôsobiacich na stredy podstáv valcov.

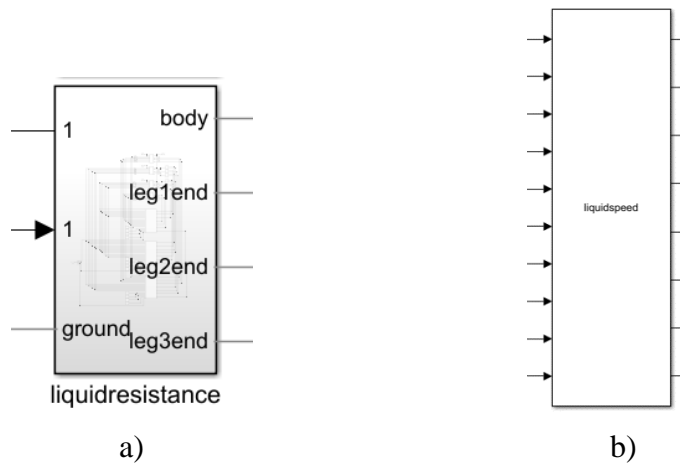


Obr. 28) Priemet valca do troch rovín s deliacou rovinou hladiny



Obr. 29) Rozdelenie priemetu valca na sekcie s konštantnou rýchlosťou

Výpočty v simulácii sú spracované do samostatného bloku na obr. 30a. Vstupné hodnoty sú vybrané body valcov, nulový bod kvapalného terénu (pozícia) a naviac rýchlosť okolitej kvapaliny. Výstupné hodnoty sú pôsobiace sily vo vybraných bodoch a rýchlosť týchto bodov. Dôvodom pre vytvorenie vstupu rýchlosti okolitej kvapaliny a výstupu rýchlosti vybraných bodov, je ten, že pohyb telies KM vytvára prúdenie kvapaliny, ktoré ovplyvňuje aktuálnu rýchlosť kvapaliny ostatných telies KM. Je preto potrebné globálne spracovať rýchlosti telies a vytvorené prúdenie, a predávať ho spätne ostatným telesám rýchlosť kvapaliny. Blok globálneho spracovania rýchlosti je na obr. 30b.



Obr. 30) a) Blok odporových síl; b) Blok globálnej rýchlosti kvapaliny

10 SIMULÁCIA

10.1 Prvotná simulácia

Pre pochopenie fungovania KM bude všetkých 15 modelov testovaných v rezistentnom kvapalnom teréne a nerezentnom teréne, vzduchu. Účelom tohoto testu je otestovať funkčnosť interakcie KM a kvapalného terénu, funkčnosť KM, vymedziť podstatné závislé veličiny a vybrať KM pre reálne testovanie.

Kvapalný terén sa nastavil pre všetky simulácie rovnako. Parametre kvapalného terénu a s ním súvisiace parametre sú nasledujúce:

Tab 14) Parametre terénu

Názov parametru	Označenie parametru	Hodnota	Krok
Hustota kvapaliny	ρ	$0 \div 5000 \text{ kg/m}^3$	1000 kg/m^3
Výška hladiny kvapaliny	p_z	0,120 m	-
Koeficient odporu	C_D	1	-
Tuhosť podkladu	k_s	$600 \div 1\,400 \text{ kN/m}$	200 kN/m
Tlmivosť podkladu	b_s	$600 \div 1400 \text{ N/(m/s)}$	20 N/(m/s)
Statický koeficient trenia	f_s	0,1 \div 0,9	0,2
Dynamický koeficient trenia	f_D	$0,8f_s$	-

Nastavenie parametrov KM je pre každý model individuálne. Avšak, niektoré parametre sú pre všetky KM rovnaké, resp. v rovnakom rozmedzí. Rovnaké sú dĺžky a priemery ramien nôh a ich hmotnosti, hmotnosť tela, nastavenie PID regulátorov a maximálnych momentov pohonov, rýchlosť tela KM, dĺžka, výška a tvar kroku. Individuálne parametre sú rozmery a tvar tela, orientácia kolien nôh a krokové cykly. Všetky zmienené parametre modelov sa pohybovali vo zvolenom rozmedzí, aby bolo možné zamedziť a predísť možným problémom, nefunkčnosti KM, ktoré by mohli nastať pri inej konfigurácii KM. Parametre a ich rozmedzia sú vypísané v tab. 15.

Tab 15) Parametre KM

Názov parametru	Označenie parametru	Hodnota	Krok
Rýchlosť	v_r	20 ÷ 100 mm/s	20 mm/s
Dĺžka kroku	l_s	20 ÷ 60 mm	15 mm
Výška kroku	h_s	10 ÷ 30 mm	5 mm
Dĺžka prvého ramena nohy	l_{g1}	15 ÷ 27 mm	3 mm
Dĺžka druhého ramena nohy	l_{g2}	32 ÷ 48 mm	4 mm
Dĺžka tretieho ramena nohy	l_{g3}	56 ÷ 72 mm	4 mm
Dĺžka štvrtého ramena nohy	l_{g4}	32 ÷ 48 mm	4 mm
Dĺžka piateho ramena nohy	l_{g5}	32 ÷ 48 mm	4 mm
Hmotnosť tela KM	m_{rb}	270 ÷ 470 g	50 g
Výška tela KM	h_{rb}	10 ÷ 30 mm	5 mm
Tvar trajektórie kroku	t_s	1 ÷ 4 (1: trojuholník; 2: obdĺžnik; 3: lichobežník; 4: pól kruh)	1
Krokový cyklus	c_s	1 ÷ 5 (individuálne pre každého KM)	1
Orientácia kolena	k_o	1 ÷ 5 (individuálne pre každého KM)	1
Maximálny moment motorov	m_{mt}	0,8 ÷ 1,2 Nm	0,1 Nm

Otestovaných bolo všetkých 15 KM v rezistentnom (kvapalnom) a nerezistentnom (vzdušnom) prostredí. Sledovaná bola funkčnosť KM, teda či KM prešiel požadovanú vzdialenosť (nestratil stabilitu a nespadol) a spotrebovaná energia. V prípade ak KM úspešne prešiel požadovanú vzdialenosť, bola porovnaná spotrebovaná energia pri pohybe v rezistentnom a nerezistentnom teréne. Týmto porovnaním bol zistený rozdiel medzi spotrebovanou energiou, ktorý zapríčinil kvapalný terén. Nie je teda riešený samotný KM, ale jeho interakcia s rezistentným terénom. Podľa tohto pomeru energií je možné určiť do akej miery parametre KM a terénu ovplyvňujú spotrebovanú energiu, a teda jeho dôležitosť pre budúcu optimalizáciu. Výsledkom týchto simulácií je tab. 16, kde u každého KM sú v vzostupnom poradí podľa pomeru, vypísané preddefinované parametre a kde skratka P. predstavuje parameter, a R. číslo KM. Na oranžovo sú podfarbené tie parametre, kde nebola v celom rozsahu tohto parametru pozorovaná funkčnosť, teda KM pre jednu konkrétnu hodnotu rozsahu parametra nefungoval a spadol (nesplnil podmienku prejdenej vzdialenosti). Tento jav bol pozorovaný len u staticky nestabilných KM a KM č. 3.

Tab 16) Parametre KM a prostredia

P.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R.																		
1	v_r	ρ	k_o	l_s	l_{g2}	l_{g1}	l_{g3}	m_{rb}	f_s	h_{rb}	k_s	b_s	c_s	h_s	t_s	m_{mt}	-	-
2	v_r	ρ	k_o	f_s	l_{g2}	l_{g4}	t_s	l_s	l_{g1}	k_s	h_s	l_{g3}	h_{rb}	b_s	c_s	m_{rb}	m_{mt}	-
3	ρ	v_r	l_{g2}	k_o	f_s	t_s	l_{g1}	l_{g3}	b_s	h_{rb}	k_s	l_s	h_s	c_s	m_{rb}	l_{g4}	l_{g5}	m_{mt}
4	ρ	h_s	l_s	v_r	l_{g2}	t_s	l_{g1}	l_{g3}	k_o	f_s	m_{rb}	h_{rb}	b_s	k_s	c_s	m_{mt}	-	-
5	ρ	k_o	k_s	b_s	t_s	v_r	l_s	l_{g2}	l_{g3}	l_{g1}	m_{rb}	h_{rb}	h_s	f_s	c_s	m_{mt}	-	-
6	v_r	ρ	l_{g2}	l_s	k_o	l_{g3}	l_{g1}	h_{rb}	m_{rb}	c_s	h_s	f_s	k_s	b_s	t_s	m_{mt}	l_{g4}	-
7	t_s	v_r	ρ	l_s	l_{g2}	l_{g3}	l_{g1}	m_{rb}	k_s	b_s	h_{rb}	c_s	h_s	f_s	k_o	m_{mt}	l_{g4}	-
8	ρ	h_s	v_r	l_{g2}	l_s	l_{g1}	f_s	m_{mt}	m_{rb}	b_s	h_{rb}	c_s	k_s	l_{g3}	t_s	k_o	-	-
9	k_o	ρ	v_r	l_s	l_{g2}	l_{g1}	l_{g3}	m_{rb}	b_s	f_s	k_s	h_{rb}	c_s	h_s	t_s	m_{mt}	-	-
10	ρ	m_{mt}	v_r	l_s	k_o	l_{g2}	l_{g3}	m_{rb}	l_{g1}	b_s	f_s	k_s	h_{rb}	c_s	h_s	t_s	-	-
11	ρ	v_r	t_s	c_s	l_{g4}	l_s	l_{g2}	l_{g3}	l_{g1}	k_s	f_s	m_{rb}	b_s	h_{rb}	h_s	m_{mt}	k_o	-
12	ρ	h_s	v_r	m_{mt}	l_s	l_{g2}	t_s	l_{g3}	m_{rb}	l_{g1}	b_s	h_{rb}	c_s	f_s	k_s	k_o	-	-
13	ρ	v_r	k_o	h_s	l_{g2}	l_s	l_{g3}	m_{mt}	l_{g1}	b_s	k_s	h_{rb}	c_s	f_s	m_{rb}	t_s	-	-
14	v_r	ρ	m_{mt}	l_s	l_{g3}	l_{g1}	l_{g2}	c_s	m_{rb}	h_s	b_s	h_{rb}	k_s	f_s	t_s	k_o	-	-
15	ρ	v_r	m_{mt}	l_{g2}	k_o	l_s	l_{g1}	m_{rb}	l_{g3}	t_s	c_s	k_s	b_s	h_{rb}	h_s	f_s	-	-

10.1.1 Výber vhodného KM

Na základe prvej simulácie, kde sa otestovalo všetkých 15 kráčajúcich KM v nerezištantnom a rezistentnom teréne a zistil sa nárast spotrebovanej energie medzi nimi, je možné rozhodnúť o vhodnom KM pre ďalšie simulácie a reálne experimenty. Najlepšou voľbou je ten KM, ktorý mal najmenší rozdiel spotrebovanej energie v nerezištantnom a rezistentnom teréne. Týmto KM bol KM č. 3. Avšak tento KM pri niektorých simuláciách spadol. Z tohto dôvodu je lepšie voliť len z KM, ktoré boli počas všetkých simulácií schopné udržať stabilitu a v reálnych experimentoch by boli plne funkčné. Do tejto skupiny prevažne patria len KM stabilné (bez vyvažovania) a najlepším KM z tejto skupiny je KM č. 14. Všetkých 15 KM je prehľadne

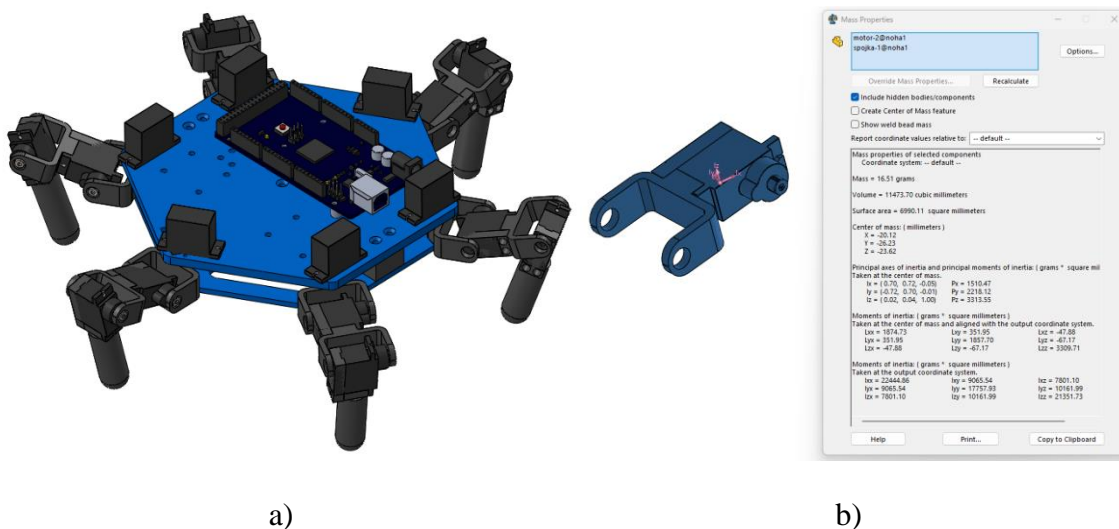
spracovaných v tab. 17, kde sú v prvom riadku vypísané KM. Vyfarbenie bunky na oranžovo označuje spadnutie KM a na modro zase udržanie si stability. V druhom riadku je vypísaný priemerný pomer rozdielov spotrebovanej energie, kde je vyfarbený zelenou farbou celkovo najlepší KM a žltou najlepší KM zo skupiny stabilných KM.

Tab 17) Rozdiely spotrebovanej energie kráčajúcich KM.

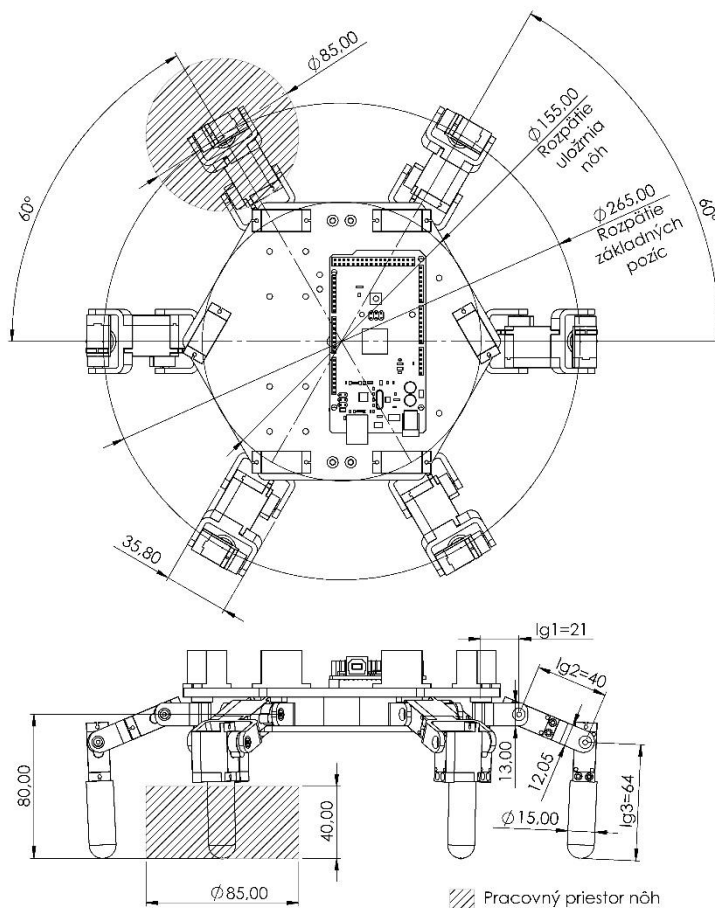
KM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pomer	5,6	1,7	1,4	6,8	11,0	21,8	6,7	9,2	7,5	17,2	8,2	12,5	14,9	5,5	12,2

10.1.2 Simulačný a CAD model vybraného KM

Keďže simulačný model bol vytvorený len odhadom a základnými telesami, je nutné pre získanie odpovedajúceho simulačného modelu vytvoriť CAD model reálneho KM a získať z neho dôležité údaje, ako hmotnosti a presné rozmery. Navrhnutý model je na obr. 31a. Oproti pôvodnému simulačnému modelu má upravené dĺžky ramien nôh, rozmiestnenie ukotvenia nôh v tele KM z dôvodu nedostatočného priestoru pre pohyb nôh a obsahuje nutné komponenty pre jeho fungovanie ako je riadiaca jednotka a batéria na spodnej časti KM. Vyrábané diely budú pravdepodobne vyrobené technológiou 3D tlače z plastu. Hustota komponentnou bude nastavená odpovedajúceho materiálu. Príklad zistených informácií o pevnom celku je na obr. 31b. Neznáme sú však straty vznikajúce trecími odpormi, ktoré zostávajú stále len odhadnuté. Všetky rozmery, hmotnosti a parametre získané z modelu sú na obr. 32 a v tab. 18.



Obr. 31) a) CAD model; b) Príklad získaných informácií

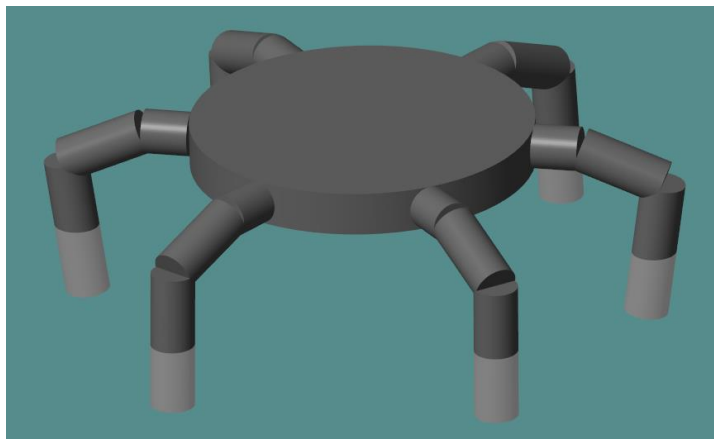


Obr. 32) Výkres CAD modelu

Tab 18) Parametre z CAD modelu

Názov parametru	Označenie parametru	Hodnota
Dĺžka prvého ramena nohy	l_{g1}	21 mm
Dĺžka druhého ramena nohy	l_{g2}	40 mm
Dĺžka tretieho ramena nohy	l_{g3}	64 mm
Hmotnosť prvého ramena	m_{g1}	4 g
Hmotnosť druhého ramena	m_{g2}	17 g
Hmotnosť tretieho ramena	m_{g3}	16 g
Hmotnosť tela KM	m_{rb}	370 g
Pracovná výška tela KM	h_w	80 mm

Výsledný CAD model bol následne prevedený na simulačný model, ktorý je zjednodušený a používa len valcové telesa. Dôvod použitia tohto zjednodušenia je taký, že výpočtová časť programu je nastavená len na valcové telesa, aby bolo možné analyticky vypočítať odpor od kvapaliny. Grafické znázornenie simulačného modelu je na obr. 33 s tým, že model odpovedá rozmerom a hmotnostiam na obr. 32 a tab. 18. Ďalšími parametrami modelu sú aj rýchlosť KM, PID regulácia, tvar trajektórie nohy, krokové cykly, parametre terénu, čas simulácie. Všetky tieto hodnoty sú vypísané v prílohe 1.



Obr. 33) Simulačný model

10.1.3 Vymedzenie riešených závislých veličín

Vybraný KM (č. 14) bol prvotne testovaný s 15 rôznymi parametrami. Keďže táto práca je cielená na KM, parametre ktoré sa týkajú terénu, výrazne nemenili spotrebovanú energiu a konštantné parametre budú odfiltrované. Neriešená teda bude: orientácia kolena, tvar trajektórie nohy, súčiniteľ trenia, tuhosť podkladu, výška tela KM, tlmivosť podkladu, hmotnosť tela KM a moment pohonov.

10.2 Návrh pohybu a optimalizácia závislých veličín vybraného KM

10.2.1 Adaptácia

KM používajú k zlepšeniu funkčnosti v premenlivých okolitých podmienkach tzv. adaptáciu. Princípom adaptácie je prispôbiť sa okolitým podmienkam tak, aby sa dosiahla menšia strata rýchlosti, nižšia spotrebovaná energia, ale tiež zaistila väčšia stabilita KM. Tieto výsledky je možné dosiahnuť úpravou pohybu a to zmenou postoja KM, úpravou trajektórie nohy, výberom iného krokového cyklu, zmenou rýchlosti a zmenou regulačných parametrov.

V tejto práci je okolitým terénom kvapalný rezistentný terén, ktorý môže byť premenlivý v hustote, výške a viskozite kvapaliny. Tieto zmeny menia silové pôsobenie na KM, čím negatívne ovplyvňujú jeho fungovanie. Správnou adaptáciou KM na tieto podmienky by sa mohlo vylepšiť celkové fungovanie. Keďže predpis pre výpočet odporu je založený na ploche ponorenej nohy a jej rýchlosti pohybu v kvapaline boli navolené také závislé veličiny, ktoré s nimi priamo súvisia. Je to teda výška kroku, ktorá ovplyvňuje ponorenie nohy. A tiež krokový cyklus, kde každý cyklus má rozdielnu rýchlosť spätného pohybu nohy. Ostatné závislé veličiny sa týkajú okolia alebo konštrukcie, a tá bude v tomto prípade nemenná.

Vybrané veličiny určené pre adaptáciu sa prvotne otestujú v plnom rozsahu hustôt kvapalín od 0 kg/m^3 do 13500 kg/m^3 , s krokom 500 kg/m^3 . Každá hustota bude spárovaná so štyrmi rozdielnymi výškami trajektórie nohy a štyrmi rôznymi krokovými cyklami. Vybrané výšky trajektórie sú 8, 16, 24 a 32 mm a vybrané krokové cykly Wave, Ripple, Tetrapod a Tripod, kde základná verzia používa Tripod s 8 mm výškou trajektórie nohy. Nastavenie simulácie zostáva rovnaké ako je uvedené v podkapitole 10.1.2, s jednou zmenou, a to zmenou rýchlosti na 20 mm/s. Trvanie simulácie je 5 sekúnd. Toto prvotné testovanie závislosti jednotlivých veličín na hustote zistí priebehy rýchlosti a spotrebnej energie a bude z neho možné určiť adaptačný proces pre každú veličinu samostatne. Následne budú výsledky adaptačného procesu porovnané voči sebe a voči základnej verzii. Počas simulácie bude

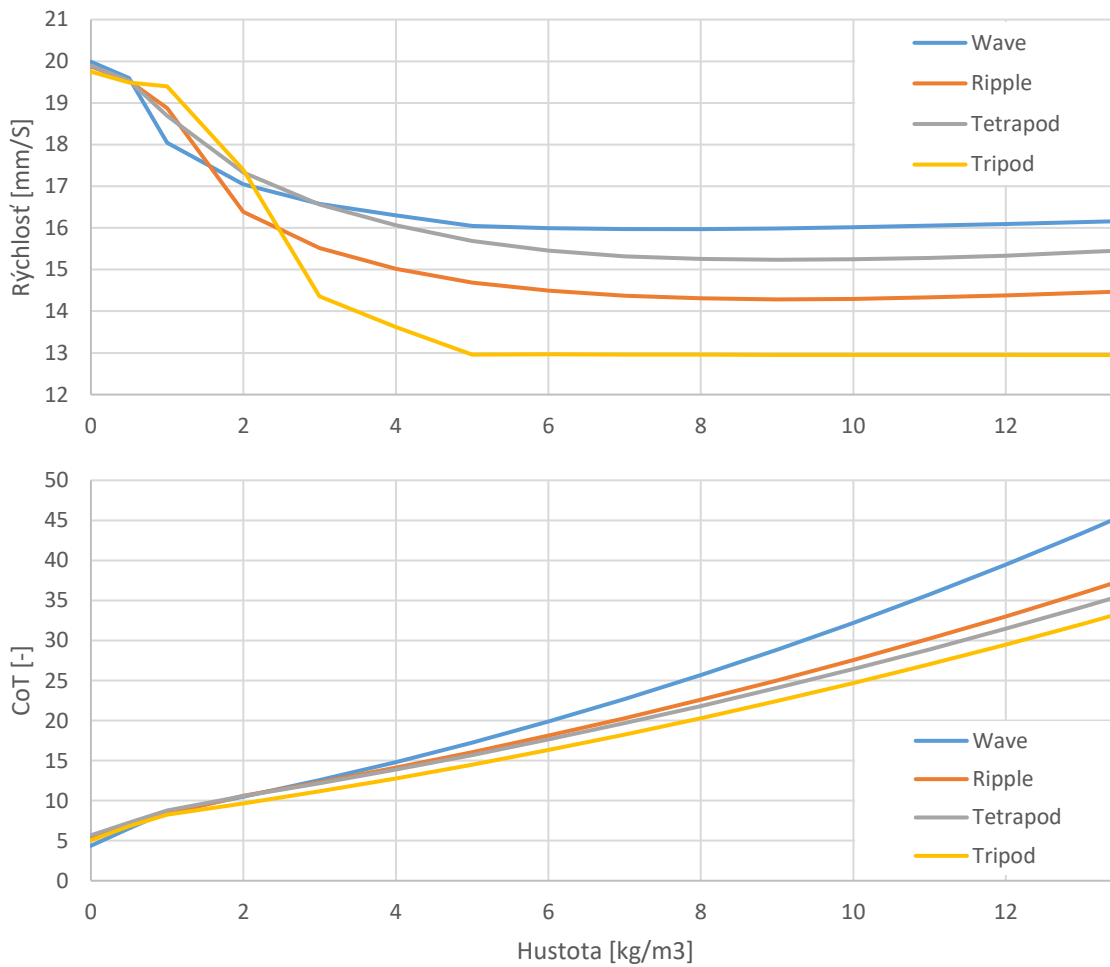
pozorovaná rýchlosť KM a spotrebovaná energia vzťahnutá k prejdenej vzdialenosti a hmotnosti KM, označovaná tiež CoT (Cost of Transportation). Výpočet CoT je nasledujúci:

$$CoT_m = \frac{E_m}{m_r g d} \quad (8)$$

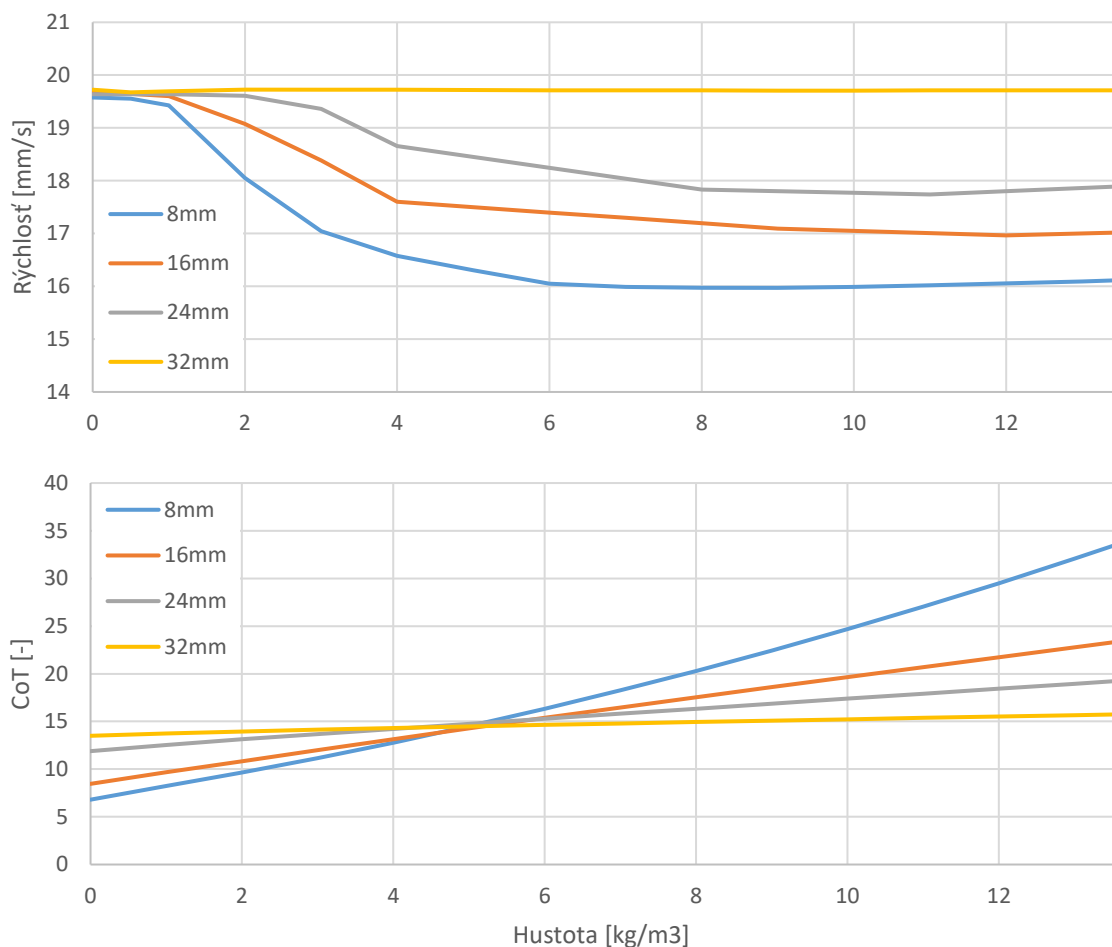
$$E_m = \sum_{i=1}^{18} \int_0^t P_i dt \quad (9)$$

$$P = M\omega \quad (10)$$

kde: CoT_m je spotrebovaná energia vzťahnutá k prejdenej vzdialenosti a hmotnosti, E_m mechanická energia, m_r hmotnosť KM, g gravitačné zrýchlenie, d prejdenej vzdialenosti, P_i výkon i -teho motora, i číslo pohonu, M aktuálny moment pohonu a ω aktuálna uhlová rýchlosť pohonu.



Obr. 34) Simulácia závislosti hustoty a krokového cyklu



Obr. 35) Simulácia závislosti hustoty a výšky trajektórie nohy

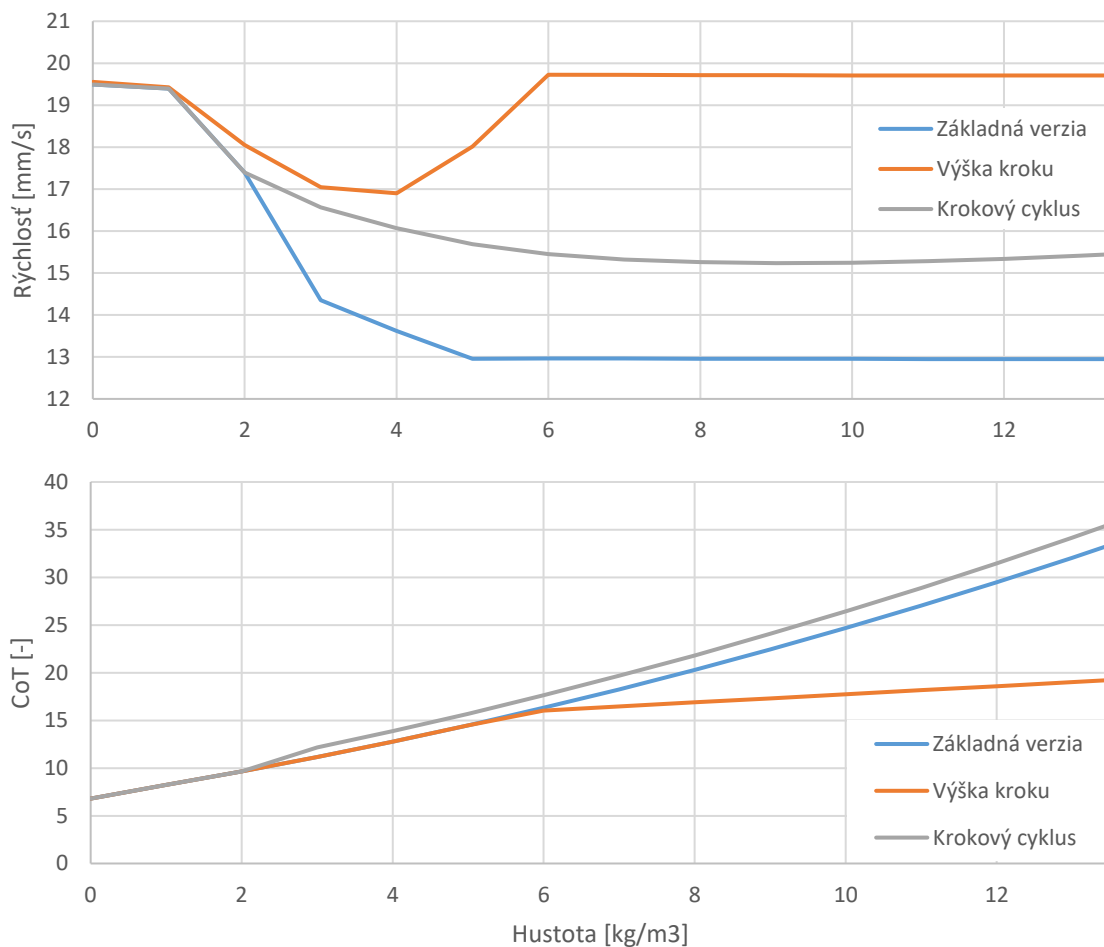
Výsledky prvotnej simulácie na obr. 34 a 35 ukázali, že zmenou krokového cyklu a výšky trajektórie nohy sa mení rýchlosť KM a množstvo spotrebovanej energie. Pre minimalizáciu straty rýchlosti a spotrebovanej energie je potrebné vybrať správny krokový cyklus a výšku trajektórie nohy pre danú hustotu kvapaliny.

Z pohľadu krokových cyklov je pre dosiahnutie najmenej straty rýchlosti vhodné použiť Tripod do hustoty približne 2000 kg/m^3 . Od tejto hustoty majú najmenšiu stratu rýchlosti krokové cykly Wave aj Tetrapod. Avšak spotreba energie pri cykle Wave je vyššia, a preto je vhodnejšie použiť cyklus Tetrapod. KM tak vo výsledku dokáže prejsť na jedno nabitie väčšiu vzdialenosť za cenu času vychádzajúceho z dosiahnutej rýchlosti. Z pohľadu výšky trajektórie nohy, je pre výšku 32 mm rýchlosť nemenná a s nižšou hodnotou výšky trajektórie strata rýchlosti postupne narastá. Použitím len 32 mm výšky by sa nedosiahla optimálna spotreba energie do hustoty 5000 kg/m^3 . Vhodné je preto do tejto hustoty použiť výšku s najnižšou spotrebou energie, teda 8 mm výšku.

Keďže sa predpokladá, že KM nebude schopný rozoznávať hustotou prostredia, bude sa riadiť rozdielom požadovanej a aktuálnej rýchlosti. Preto, pre dosiahnutie najnižšej straty rýchlosti u krokového cyklu dôjde k zmene z cyklu Tripod na Tetrapod, pri strate rýchlosti väčšej než 3 mm/s, čo odpovedá prechodu z redšieho do hustejšieho prostredia. Opačná zmena nastane pri strate rýchlosti menšej než 2 mm/s. Použitím posunutej hranice z 2,5 na 3 mm/s alebo 2,5 na 2 mm/s sa zamedzí možnému opakovanému prepínaniu cyklov v riadení KM.

V prípade výšky trajektórie nohy, je zmena výšky z 8 mm na 32 mm pri strate rýchlosti nad 4mm/s a opačná zmena pri strate pod 3 mm/s. Podobne ako u krokového cyklu je cieľom dosiahnuť stabilné riadenie zmeny. Zmeny vo výške kroku prebiehali vždy po položení jednotlivých nôh. Zmena krokového cyklu nastane v prípade kontaktu všetkých nôh s podkladom.

Aplikovaním oboch adaptácií sa v prípade rýchlosti, dosiahla menšia priemerná strata rýchlosti na celom rozsahu hustôt oproti základnej verzii. Základná verzia dosiahla priemernú rýchlosť 14,3 mm/s. Použitím adaptačnej zmeny krokového cyklu narástla priemerná rýchlosť na 16,2 mm/s a pri zmene výšky trajektórie narástla až na 19,1 mm/s. Z pohľadu spotrebovanej energie, sa pri zmene krokového cyklu dosiahlo priemerne CoT 20,5, nasleduje základná verzia s CoT 19,2 a najnižšie priemerné CoT má adaptácia výšky trajektórie nohy 14,9. Ak si obe adaptácie porovnáme, výhodnejšie je použiť zmenu výšky trajektórie nohy. Dosahuje sa tým vyššia priemerná rýchlosť a nižšia priemerná spotrebovaná energia na celom rozsahu hustôt. Grafické znázornenie adaptácii a základnej verzii je na obr. 36. Najlepším prístupom by bolo otestovať všetky rozsahy krokových cyklov a výšky nôh súčasne a vytvoriť tak maticu kombinácií, podľa ktorej by sa využili obe adaptácie naraz.



Obr. 36) Výsledky simulácii s použitými metódami

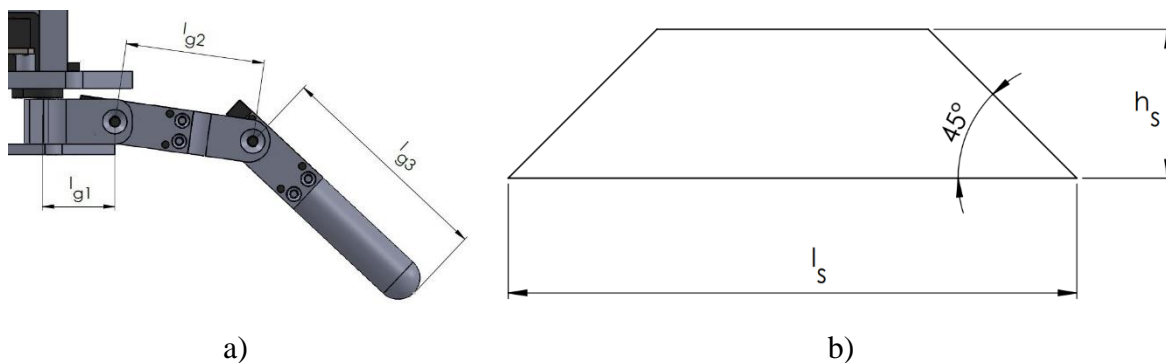
10.2.2 Genetický optimalizačný algoritmus

Jedna z možností ako dosiahnuť optimalizáciu je použiť genetický algoritmus. Tento optimalizačný proces funguje na princípe evolúcie. Vytvárajú sa tzv. generácie, ktoré sa každou iteráciou hodnotia a vylepšujú. Výstupom tohto algoritmu je najlepšia generácia.

V tejto práci sa genetický algoritmus aplikoval na vybraný KM a optimalizovala sa spotrebovaná mechanická energia. Vybrané vstupné parametre boli: dvojica hardwarových a dvojica softwarových parametrov, podľa poradia významnosti a možností ich jednoducho upravovať na vygenerovanom modeli. Vybrané hardwarové parametre boli dĺžky ramien nôh s označením l_{g1} a l_{g2} a softwarové parametre výška kroku h_s a dĺžkou kroku l_s , graficky zobrazené na obr. 37. Optimalizované boli samostatne hardwarové a softwarové parametre a následne všetky parametre spoločne. Pribeh optimalizácie bol nasledujúci:

- vytvorený model z prvotnej simulácie bol upravený tak, aby ho bolo možné opakovane spustiť pre novo-vygenerované generácie s tým, že sa vymedzili hraničné hodnoty premenných vstupov a ostatné nastavenia zostali konštantné, tak ako tomu bolo v prvotnej simulácii,
- po každej simulácii bola získaná spotrebovaná mechanická energia vrátená genetickému algoritmu a boli vygenerované nové vstupy,
- simulovala sa chôdza KM po dobu 5 sekúnd v jednom smere v rezistentnom teréne.

Výsledkom tejto optimalizácie sú najlepšie generácie (vstupné parametre) a spotrebovaná energia. Spotrebovaná energia sa vypočítala podľa rovníc 9 a 10 v podkapitole 10.2.1 Adaptácia. Počet generácií vo všetkých troch prípadoch bol rovnaký a to 1000 generácií. Vstupné hodnoty boli ohraničené, aby sa dosahovalo len reálnych riešení. Výsledky optimalizácie sú vypísane v tab. 19, kde sú navyše aj výsledky základnej neoptimalizovanej verzie.



Obr. 37) a) Hardwarové parametre; b) Softwarové parametre

Tab 19) Výsledky simulácie genetického algoritmu

	Vstup: l_{g1}	Vstup: l_{g2}	Vstup: h_s	Vstup: l_s	Výstup: spotrebovaná energia
Dolná hranica	21 mm	40 mm	1 mm	20 mm	
Horná hranica	33 mm	56 mm	32 mm	60 mm	
Základná verzia	21 mm	40 mm	10 mm	60 mm	14,10 J
Optimalizované hardwarové parametre	21 mm	56 mm	10 mm	60 mm	12,81 J
Optimalizované softwarové parametre	21 mm	40 mm	1 mm	50 mm	10,40 J
Optimalizované všetky parametre	25,8 mm	47,8 mm	1 mm	43,7 mm	9,80 J

Spoločne s finálnymi výsledkami boli zaznamenané aj priebehy všetkých optimalizácií tvorené vstupnými a výstupnými hodnotami z 1000 generácií. Priebehy sú spracované v podobe grafov v prílohe 2. V prílohe je možné vidieť, že po približne 800 generáciách u hardwarových parametrov a všetkých štyroch parametrov sa dosiahlo optimalizovaného výsledku. V prípade softwarových parametrov bol generačný algoritmus rýchlejší a dosiahol výsledku už pri 600 generáciách. Ďalším dôležitým faktom je, že boli dosiahnuté hraničné hodnoty u dĺžok ramien nôh a výšky kroku. Táto skutočnosť mohla obmedziť fungovanie genetického algoritmu pri dosiahnutí najlepšieho výsledku. Ideálnym riešením by bolo pracovať bez ohraničenia, čo by však v prípade reálneho KM nebolo možné z dôvodu výkonu pohonov alebo nežiadúcim kontaktom nohy s podkladom pri jej pohybe.

Získané finálne výsledky vo všetkých troch prípadoch optimalizácie dosiahli zlepšenie. Najlepšie zlepšenie vykazujú optimalizované všetky parametre. Za nimi nasledujú softwarové parametre, hardwarové parametre a posledná je základná verzia. Z pohľadu vývoja KM, za podmienky, že bude optimalizovaná len hardwarová alebo softwarová časť KM, je lepšie optimalizovať softwarovú časť (v prípade tohto modelu KM a jeho konfigurácie). Je to z dôvodu nižšej spotrebovanej energie a taktiež z dôvodu náročnosti úprav prevedených na KM. Softwarové úpravy nezasahujú do konštrukcie a sú ľahko prevediteľné. Hardwarové úpravy by si vyžiadali prevedenie celého konštrukčného procesu od začiatku. Taktiež z pohľadu na generácie, hardwarové parametre pri všetkých zmenách vstupov mali len malý efekt na spotrebovanú energiu.

10.2.3 Metóda jednej vlny

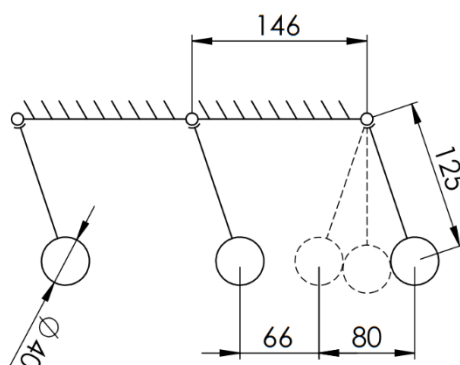
Pozorovaním pohybu KM v kvapalnom teréne bolo zistené, že pri každom spätnom pohybe nohy je vytvorená vlna, ktorá ďalej pokračuje a obteká ostatné nohy. Toto prúdenie teoreticky mení rýchlosť okolitej kvapaliny nohy a mohlo by pozitívne prispieť k zníženiu spotrebovanej energie. Podobné javy môžeme pozorovať v prúdení vzduchu. Ku zníženiu odporu sa radia objekty (dva a viac pohybujúcich objektov), blízko za seba a dochádza tak k draftigovému efektu. Prvý objekt v rade prekonáva odpor a vytvára tak závetrie pre ďalšie objekty idúce za ním.

Využiť túto metódu by mohli tie KM, kde minimálne dve nohy alebo ich ponorená časť je v jednej rade za sebou. Princiipiálne by zadná noha vytvorila vlnu pri svojom spätnom pohybe

na ktorú by naviazala predná noha. Tým by sa predná noha pohybovala vo vytvorenej vlně a jej odpor by bol nižší, keďže rozdiel rýchlostí vlny a nohy by bol nižší než pri nesynchronnom pohybe. Výrazný vplyv na vytvorenie vlny má viskozita kvapaliny, ktorá definuje vnútorné trenie kvapaliny. Čím je trenie vyššie, tým rýchlejšie je vlna spomaľovaná. Ideálne je preto použiť kvapalinu s nízkou viskozitou ako je voda, kde sa prejaví zníženie energie pri pohybe nôh najviac.

Vytvorený simulačný model pre simulovanie tejto metódy nie je vhodný, keďže nohy KM nie sú radené za sebou, ale v tvare šesťuholníka. Je tak možné tento model upraviť alebo vygenerovať nový, ktorý by túto podmienku splňoval. Pre test tejto metódy sa vytvoril nový zjednodušený model, kde KM bude nepohyblivý, pevne uložený a jeho tri nohy budú radené za sebou len na jednej strane a budú vykonávať len jeden rotačný pohyb. Takýto model je dostatočnou náhradou pre pozorovanie tohto efektu. Vhodnejší je preto, že do pohybu nôh sa nezahrňuje nepresnosť ostatných pohybov. Pohľad zhora na navrhnutý model je na obr. 38. Model je zložený z nepohybujúceho tela, ku ktorému sú rotačne uchytené 3 nohy. Každá noha je zjednodušená a tvorí ju rameno s dĺžkou 125 mm a valec s priemerom 40 mm a výškou 90 mm. Valec je ponorený do hĺbky vody 80 mm a nie je v kontakte s povrchom, je voľne otočný.

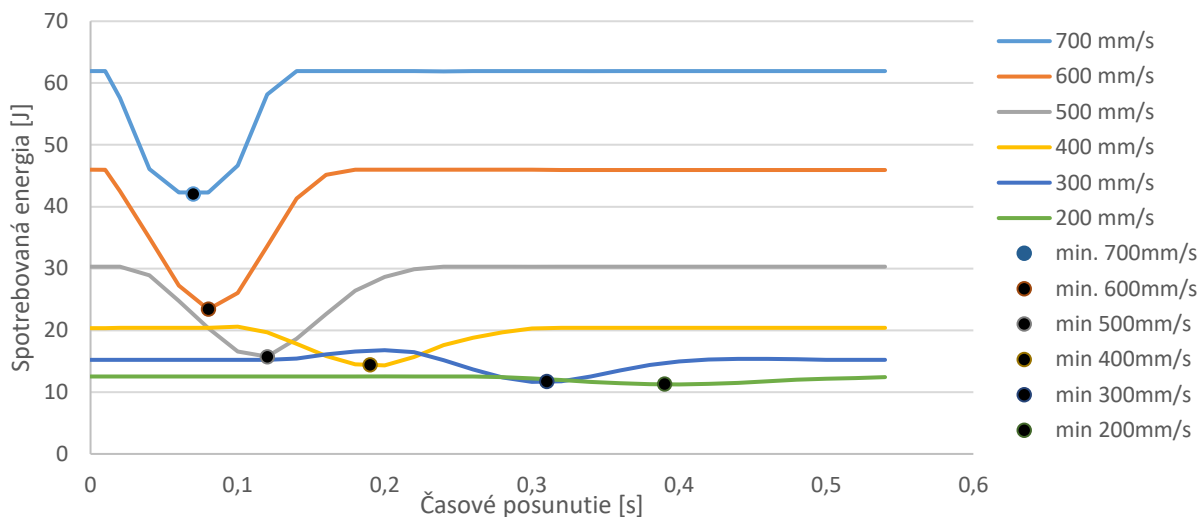
Na začiatku simulácie boli všetky nohy na svojej počiatočnej pozícii, tak ako sú zobrazené na obr. 38 plnou čiarou. Pohyb nôh bol sekvenčný, ako prvá sa pohla noha napravo, nasledovala stredná noha a posledná sa pohla noha na ľavej strane. Čas medzi štartom prvej a druhej nohy bol nastavený od nulového času, do času zaznamenania pôvodnej hodnoty spotrebovanej energie. Tento čas bude v tejto práci pomenovaný ako tzv. časové posunutie. Všetky nohy sa otočili tak, že sa posunuli v pozdĺžnej ose tela o 80 mm, ako zobrazuje čiarková čiara na pravej nohe. Simulácia bola opakovaná pre rôzne rýchlosti, aby sa zistilo v akých rýchlostiach je metóda použiteľná a najefektívnejšia. Rozsah rýchlosti bol stanovený na 200 až 700 mm/s s krokom 100 mm/s. Predpokladá sa, že rýchlosť vlny bude odpovedať rýchlosti nohy, a že najvyššia úspora energie bude v prípade, že nohy budú na seba nadväzovať takým spôsobom, aby čas od zastavenia predchádzajúcej nohy po štart nasledujúcej odpovedal času, za ktorý prejde rovnakú vzdialenosť vlna vody. Počas simulácie sa bude sledovať hodnota spotrebovanej energie jednotlivých nôh. Prvá noha v sekvencii bude určovať základnú spotrebovanú energiu bez jej zníženia touto metódou.



Obr. 38) Schéma zjednodušeného modelu

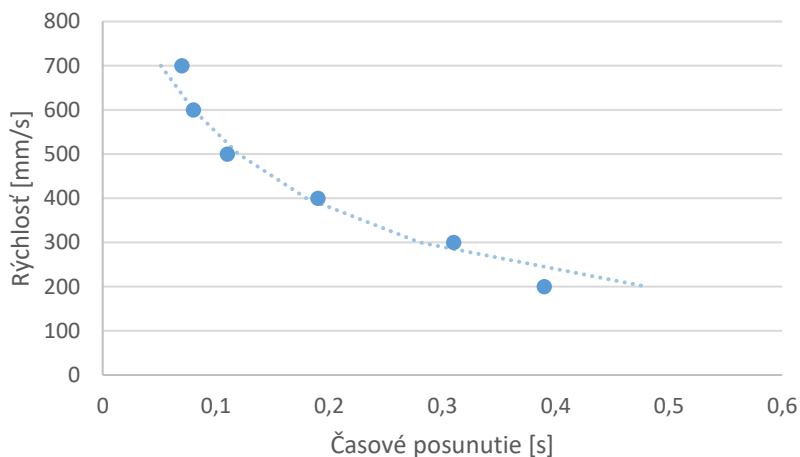
Výsledky zo simulácie sú na obr. 39. Priebeh spotrebovanej energie ukázal pokles v určitých úsekoch časového posunutia pre jednotlivé rýchlosti. Najvýraznejší pokles bol pozorovaný pri vyšších rýchlostiach (32% u rýchlosti 700 mm/s) a pri nižších rýchlostiach bol

zase rozdiel takmer nepozorovateľný (10% u rýchlosti 200 mm/s). Dosažené minimá spotrebovaných energií sú vyznačené čiernymi bodmi. U najvyššej rýchlosti sa minimum dosiahlo za najkratšie časové posunutie a naopak, pri najnižšej rýchlosti sa minimum dosiahlo pri najväčšom časovom posunutí.



Obr. 39) Závislosť spotrebovanej energie na časovom posunutí zo simulácie

Závislosť medzi rýchlosťou a časovým posunutím minim spotrebovanej energie je na obr. 40. Táto závislosť najviac odpovedá nepriamej úmere, čo potvrdzuje predpoklad, že rýchlosť vlny je nepriamo úmerná na časovom posunutí.



Obr. 40) Optimálne časové posunutie pre konkrétnu rýchlosť

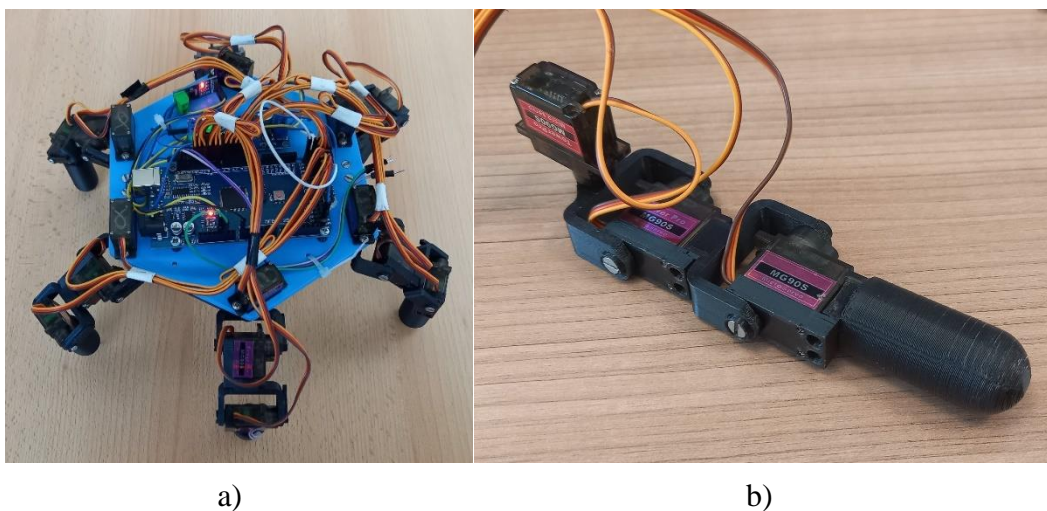
11 EXPERIMENT

Nezahrnutím všetkých podstatných vplyvov do simulácie alebo ich nepresné kvantifikovanie, môže spôsobiť odchylenie simulačných výsledkov od reality. V tejto práci boli v simulácii straty vzniknuté v pohonoch len odhadnuté. Z toho dôvodu bude simulačný model dodatočne upravený podľa reálnych experimentov prevedených v tejto kapitole. Neznáme parametre pohonov sa nastavujú tak, aby si model a KM čo najviac odpovedali. Experiment tak posluží na doladenie simulácie a na následne overenie výsledkov zo simulácie a ich správnosť.

11.1 Experimentálny KM

11.1.1 Hardware

Na základe simulačného modelu bol zostrojený experimentálny KM. Rovnako ako v simulácii je KM zložený z tela a šiestich nôh. Telo má šesťuholníkový tvar a na každom jeho vrchole je rotačne uložená noha. Telo je centrálnym prvkom a je nosičom 8,4 V Li-ion batérie, riadiacej jednotky Arduino Mega, meniča napätia a troch senzorov prúdu ACS712. Batéria je uložená pod telom a zaistená podporným rámom, ktorý tiež vytvára podporné body pre prvé rotácie nôh. Každá zo šiestich nôh má tri pohyblivé ramená spojené rotačným kĺbom s jedným stupňom voľnosti. Každý kĺb je poháňaný servopohonom MG90S, ktorý má vymenený zadný kryt. Na tomto kryte je pridaný závit pre naskrutkovanie čapu slúžiaceho ako podporný bod rotačného kĺbu. Prvé dva ramená nôh majú U-tvar a posledné rameno má tvar valca. Detail konštrukčného prevedenia je na obr. 41a a 41b. Všetky nenakúpené mechanické časti sú vytlačené na 3D tlačiarňi z PLA plastu.



Obr. 41) a) KM; b) Detail nohy

Zdrojom energie je batéria, ktorá napája prúdom riadiacu jednotku a regulátor napätia. Regulátor napätia následne napája všetky pohony KM, s tým že predný pár, stredný pár a zadný pár nôh je pripojený cez prúdový senzor, pre zaznamenávanie prúdu. Sensory prúdov sú napájané riadiacou jednotkou s jej vlastnej regulácie napätia. Výstupné hodnoty prúdu majú formu analógových signálov pripojených na analógové vstupy riadiacej jednotky. Pre riadenie pohonov sú použité digitálne výstupy napojené na signály pohonov, kde dĺžka impulzu určuje polohu pohonu.

11.1.2 Software

Program pre riadiacu jednotku Arduino Mega je napísaný v softvare Arduino IDE. Štruktúra programu je rovnaká ako v simulácii s rozdielom použitej syntaxe a doplnkových príkazov pre nastavenie vstupov a výstupov, merania prúdu, nulových polôh pohonov, definície premenných a štartovacej sekvencie. Limitujúcim faktorom pre tento program je pracovná frekvencia pohonov (50 Hz), čím sa redukuje počet pozícií nohy voči simulácii. Na rozdiel od pohonov senzory prúdu pracujú na frekvencii 200 Hz, ktoré svoj výstup následne posielajú do počítača na spracovanie.

11.2 Experimentálne prostredie

Na prevedenie experimentov bolo postavené experimentálne prostredie, ktoré je možné vidieť na obr. 42. Jednalo sa o kontajner postavený z priehľadného plexiskla zlepeného do celku kyanoakrylovým lepidlom a tesnenie lepených spojov zaistil silikón. Rozmery kontajnera sú: dĺžka 1200 mm, šírka 450 mm a výška 100 mm. Kontajner je tiež vybavený skrutkou pre vypúšťanie vody. Pri všetkých experimentoch bola použitá ako médium voda s premenlivou výškou hladiny.



Obr. 42) Kontajner

11.3 Overenie výsledkov simulácie

11.3.1 Adaptácia

Navrhnutá metóda adaptácie v simulácii pracovala s rezistentným terénom, ktorý menil svoju hustotu. Problémom je, že vytvoriť rezistentný terén s hustotou od 0 do 13500 kg/m³ nie je možné z dôvodu toxicity vysoko hustých kvapalín. Preto bude experimentom overená len časť simulácie, kde je hustota 1000 kg/m³. Overia sa všetky štyri krokové cykly a štyri výšky trajektórii nôh.

Na overenie sa použije experimentálny KM popísaný v predchádzajúcej podkapitole. Nastavený bude rovnako ako v simulácii a postupne otestuje 8, 16, 24 a 32 mm výšku trajektórie nohy a krokové cykly: Wave, Ripple, Tetrapod a Tripod. KM sa bude pohybovať pozdĺž dlhšej hrany po trase dlhej 800 mm rýchlosťou 20 mm/s. Merat' sa bude prejdená vzdialenosť, z ktorej sa vypočíta rýchlosť, spotrebovaná elektrická energia vzťahnutá na prejdenú dráhu a hmotnosť KM, označovaná tiež CoT, ktorá sa vypočíta nasledujúco:

$$CoT_e = \frac{E_e}{m_r g d} \quad (11)$$

$$E_e = \sum_{i=1}^{18} \int_0^t P_i dt \quad (12)$$

$$P = UI \quad (13)$$

kde: U je aktuálne napätie, I aktuálny prúd, P_i elektrický výkon, E_e elektrická energia všetkých 18 pohonov, t čas experimentu, i číslo pohonu, m_r hmotnosť KM, g gravitačné zrýchlenie a d prejdená vzdialenosť.

Výsledky merania spoločne s hodnotami zo simulácie sú v tab. 20. Hodnoty boli namerané 10 krát a výslednou hodnotou je aritmetický priemer týchto hodnôt. Namerané dáta z experimentu pomerne presne odpovedajú simulácii. Maximálny rozdiel v prípade CoT sú 3% a v prípade rýchlosti 5%.

Tab 20) Výsledky experimentu adaptácie

Krokový cyklus	Výška trajektórie nohy [mm]	Rýchlosť v simulácii [mm/s]	CoT v simulácii [-]	Rýchlosť v experimente [mm/s]	CoT v experimente [-]
Wave	8	18,04	8,65	18,00	8,62
Ripple	8	18,87	8,34	18,90	8,46
Tetrapod	8	18,69	8,77	18,47	8,58
Tripod	8	19,39	8,25	19,34	8,27
Tripod	16	19,60	9,67	19,35	9,68
Tripod	24	19,64	12,54	19,89	12,70
Tripod	32	19,69	13,74	20,81	13,36

11.3.2 Genetický algoritmus

Ideálny postup overenia genetického algoritmu by bolo zopakovať celý priebeh optimalizácie na reálnom KM. V prípade softwarových parametrov by tento postup bol možný a jednoducho prevediteľný zmenou v programe. V prípade hardwarových parametrov, by musel byť KM prestaviteľný v dĺžke ramena každej nohy. Toto konštrukčné riešenie by bolo prevediteľné, problémom však zostáva časová náročnosť. Prestaviť 1000 krát 12 dĺžok ramien nôh a previesť meranie by bolo časovo nerealizovateľné. Z týchto dôvodov budú skontrolované len finálne výsledky. Bude sa overovať základná verzia, optimalizované softwarové, hardwarové parametre a následne ich kombinácia. Pre test je potrebné vyrobiť ramená nôh s dĺžkami odpovedajúcimi výsledkom z celkovej optimalizácie a hardwarovej optimalizácie. Vytlačené nové rameno nôh na 3D tlačiarňi zmontované do jednej nohy pre každú veľkosť sú na obr. 43. Z pohľadu softwaru je potrebné upraviť výšku a dĺžku kroku. Táto zmena je jednoduchá, prepíšu sa len dve premenné v programe.



Obr. 43) Novo vytlačené ramená nôh

Priebeh experimentu bol prevedený v postavenom kontajneri s výškou hladiny vody 50mm. KM sa v nej pohyboval v priamom smere, rovnobežne s dlhšou hranou. Nastavená rýchlosť KM bola rovnaká ako v simulácii pri použití finálnych výsledkov z genetického algoritmu z kapitoly 10.2.2. Celý experiment bol prevedený 40 krát (10 sekúnd, 800mm) pre všetky tri optimalizované verzie a základná verziu. Prúd bol zaznamenaný pomocou senzoru, pri nastavenom konštantnom napätí. Výsledky merania sú v tab. 21.

Tab 21) Výsledky experimentu genetického algoritmu

	Vstup: l_{g1}	Vstup: l_{g2}	Vstup: h_s	Vstup: l_s	Výstup: spotrebovaná energia v simulácii	Výstup: spotrebovaná energia v experimente
Základná verzia	21 mm	40 mm	10 mm	60 mm	14,10 J	14,32 ± 0,96 J
Optimalizované hardwarové parametre	21 mm	56 mm	10 mm	60 mm	12,81 J	12,65 ± 0,89 J
Optimalizované softwarové parametre	21 mm	40 mm	1 mm	50 mm	10,40 J	10,76 ± 0,39 J
Optimalizované všetky parametre	25.8 mm	47.8 mm	1 mm	43,7 mm	9,80 J	10,24 ± 0,33 J

Zistené hodnoty z experimentu ukazujú nižšiu spotrebovanú energiu vo všetkých prípadoch optimalizácie. Tieto výsledky boli očakávané. Predikoval sa tiež rovnaký pomer zlepšenia. Ten bol v simulácii približne o 10% lepší v hardwarových parametroch, 36% v softwarových parametroch a 44% vo všetkých parametroch. Reálny experiment však ukázal

rozdiel pomerov zlepšenia medzi simuláciou a praktickým prevedením. Zlepšenie pri optimalizovaných hardwarových parametroch bolo 13 %, softwarových 33% a pri ich kombinácii 40%.

11.3.3 Metóda jednotnej vlny

Navrhnutý model pre meranie metódy jednej vlny zo simulácie bol vymodelovaný a postavený. Neštandardizované diely boli vytlačené na 3D tlačiarňi. Vytlačená noha bola dvojdielna, zostavená z ramena a z valca spojená skrutkou. Noha bola spojená s pohonom pomocou náboja dodávaná spoločne so servomotorom. Použitým servomotorom bol MG995. Noha bola podporená navyše otočným čapom z druhej strany ramena oproti náboju, pre väčšiu tuhosť mechanizmu. Uloženie motorov bolo tiež vytlačené na 3D tlačiarňi, jednalo sa o jednoduchý rám pripevnený na hliníkový profil s rozmermi 80x60x400 mm. Použitá riadiaca jednotka bola Arduino Uno. Na meranie prúdu boli použité senzory s označením ASC712 a zdrojom energie bol laboratórny zdroj Diametral R230R61D. Výsledná zostava je vidieť na obr. 44.

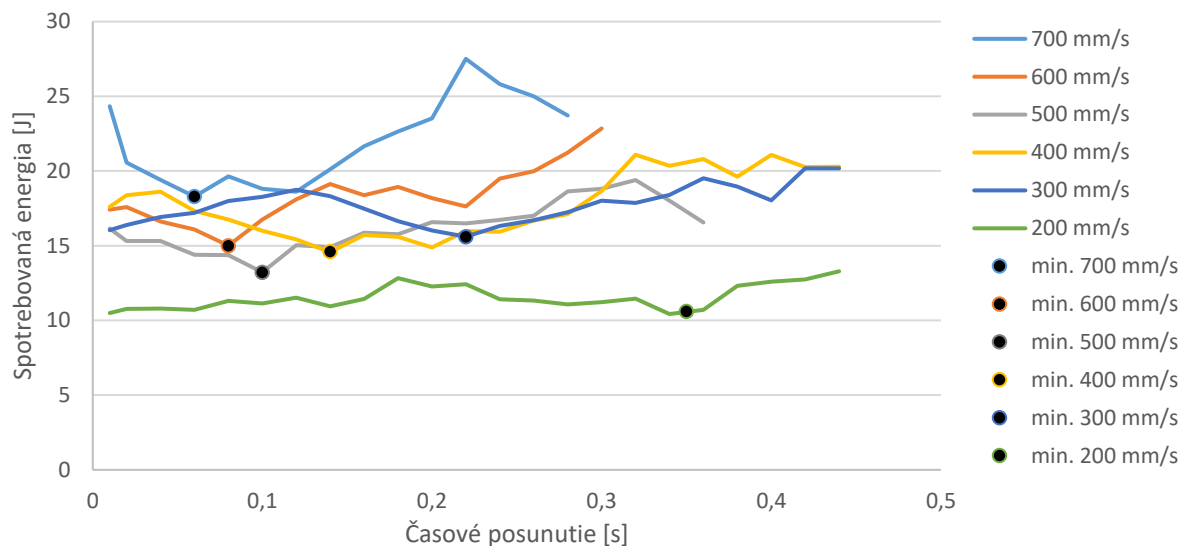


Obr. 44) Experimentálna zostava

Experiment prebiehal rovnako ako je uvedené v simulácii. Na začiatku boli nohy v počiatkovej polohe, z ktorej sa otáčavým pohybom postupne pohlili o vzdialenosti 80mm. Oneskorenie pohybu bolo jasne definované časovým posunom. Jednalo sa o časový posun medzi štartom prvej a druhej nohy, a rovnakým časovým posunom medzi štartom druhej a tretej nohy. Počas pohybu nôh sa zaznamenávala spotrebovaná energia. Na rozdiel od simulácie sa spotrebovaná energia vypočítala z elektrického prúdu a napätia, a uplynulého času. Časové posunutie bolo pre jednotlivé rýchlosti také, aby sa našlo minimum spotrebovanej energie.

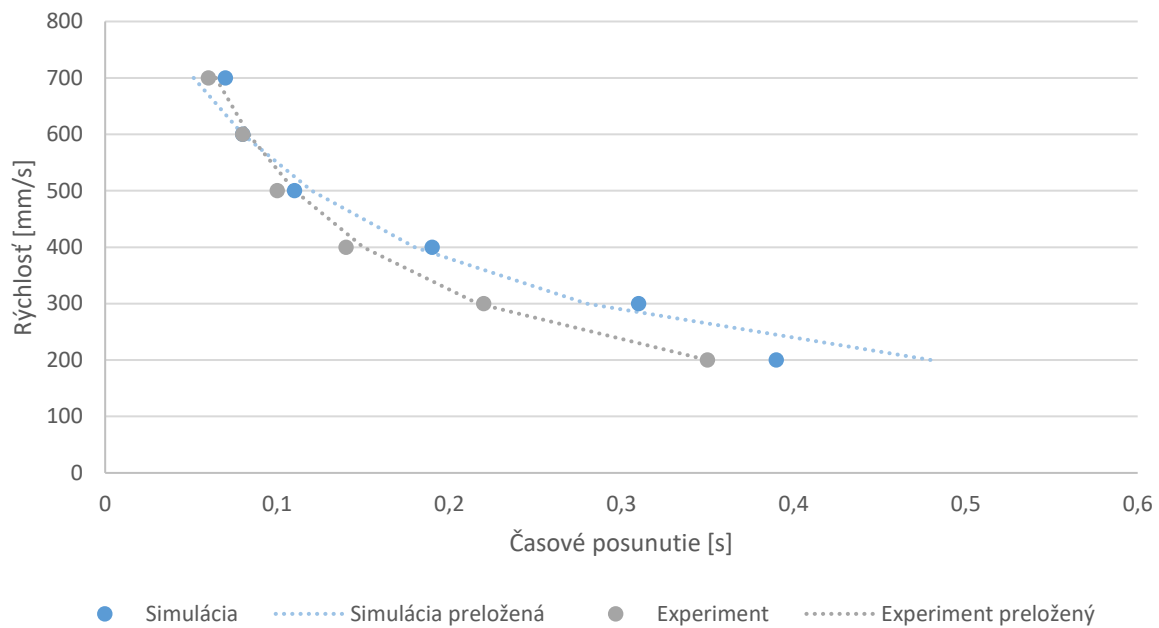
Získané výsledky z experimentu sú na obr. 45, kde je zobrazená len spotrebovaná energia tretej nohy z dôvodu prehľadnosti. Meraná bola spotrebovaná energia zvoleného rozsahu časových posunutí pre rýchlosti 200 až 700 mm/s. Na zvolenom rozsahu časového posunutia bola hľadaná minimálna spotreba energie, ktorá určuje optimálne časové posunutie pre danú rýchlosť. Minimá sú zvýraznené čiernym bodom. Najväčšie zlepšenie dosiahla rýchlosť 700 mm/s 24,7% a najmenšie zlepšia rýchlosť 200 mm/s 0,9%, čo je skoro

zanedbateľná úspora energie. Prejav použitia tejto metódy pohybu je výrazný od rýchlosti 400 mm/s, kde je úspora energie 17,6%. V porovnaní so simuláciou, rýchlosť 700 mm/s dosiahla úsporu 32% a rýchlosť 200 mm/s 10%. Experiment tak dosiahol o niečo nižšie zlepšenie ako simulácia vo vyšších rýchlostiach a v nižších rýchlostiach sa pomerne odlišoval. Taktiež spotrebovaná energia v simulácii bola od rýchlosti 400 mm/s takmer dvojnásobná, čo poukazuje na rozdielnosť simulačného a experimentálneho modelu. Zlepším nastavenia simulačného modelu by mohlo dôjsť k spraveniu odhadu spotrebovanej energie. Najpravdepodobnejší dôvodom rozdielu je nelineárne správanie sa pohonov.



Obr. 45) Experimentálna závislosť spotrebovanej energie na časovom posunutí

Porovnanie celých priebehov spotrebovanej energie je v prílohe 3. Rozdiel časového posunu mínim zo simulácie a experimentu bol v priemere 0,03s. Minimá zo simulácie a experimentu sú na obr. 46. Časové posunutie simulácie a experimentu sa najviac približuje pri vysokých rýchlostiach. Minimá sú navyše preložené krivkou nepriamej úmery, ktorá vytvára predpokladané časové posunutia pre ostatné rýchlosti. Metódu je tak možné použiť vo všetkých rozsahoch rýchlosti s jednoduchým prepočtom na časové posunutie. Implementácia by tak zahŕňala voľbu správneho krokového cyklu (pravdepodobne asymetrického) ku danej rýchlosti tak, aby sa dosiahlo optimálne časové posunutie a rýchlosť. KM by si tak vyžadoval špeciálne riadenie.



Obr. 46) Optimálne časové posunutie pre konkrétnu rýchlosť

DISKUSIA K ZÍSKANÝM VÝSLEDKOM

Vzniknutý model KM vytvorený v prostredí Matlab Simulink, ktorý bol vypracovaný do detailov a zahrňal kinematiku a dynamiku KM, straty v pohonoch a PID reguláciu pohonov, interakciu s povrchom a silové pôsobenie od vonkajších vplyvov, bol overený reálnym experimentom, kde rozdiel výstupov bol minimálny po nastavení neznámych parametrov PID regulátorov a strát v motoroch. Vznikol tak presnejší a reálnejší model.

Testovaním modelu sa zistilo, v prípade adaptácie k hustote kvapaliny, že KM dokáže aj napriek vysokej hustote pokračovať (nedochádza k jeho úplnému zastaveniu, na ostatných nepohybujúcich sa nohách, pri šmýkaní KM, vzniká odporová sila opačného smeru dostačujúca pre pohyb pohybujúcich sa nôh a celého KM). Taktiež porovnávaním adaptácií sa zistilo, že je výhodnejšie použiť zmenu výšky kroku než zmenu krokových cyklov pri meniacej sa hustote kvapaliny. Tieto zistenia rozširujú aktuálne vedomosti zistené pri použití len jednonohého robota nefungujúci ako samostatne voľne položený celok. Pohyb robota je teda možný aj v extra hustých prostrediach ako zobrazuje graf rýchlosti na obr. 34.

Okrem reakcie na okolité prostredie sa táto práca zamerala aj na optimalizáciu stavby KM a nastavenie trajektórie nohy. Na danú optimalizáciu sa použil genetický algoritmus, ktorý sa prvotne aplikoval samostatne na stavbu (hardware), na nastavenie trajektórie nohy (software) a následne na obe oblasti. Z daných výsledkov je teda možné odporučiť aplikovať optimalizáciu len trajektórie nohy alebo oboch oblastí. Zlepšenie pri úprave stavby je pomerne nižšie voči ostatným. Taktiež úprava stavby znamená výrobu a montáž nových dielov, poprípade prestavbu nohy. Z časového a finančného hľadiska je táto úprava náročnejšia. Toto zistenie urýchli proces optimalizácie, keďže optimalizácia stavby (hardwaru) je možné vynechať.

Počas realizácie experimentov bolo zistené, že pohyb KM v kvapalnom teréne vytvára vlny na hladine. Prevedeným experimentom sa táto teória potvrdila a vymedzila jej použitie pre pohyb nohy rýchlejši ako 400mm/s, kde boli pozorované úspory energie. Takisto navrhuje spôsob ako implementovať túto metódu na pohyb KM a to použitím asymetrického krokového cyklu. Táto metóda tak prináša ďalšie zvýšenie efektivity pohybu KM v kvapalnom teréne a špecifikuje, kde má zmysel ju používať.

PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE

Prínos pre vedeckú oblasť

Aplikovaním morfolologickej analýzy na KM sa za daných predpokladov a delenia vytvorilo 15 základných funkčných, ekonomicky výhodných a konštrukčne nenáročných KM, a uzavrela sa tak oblasť stavby KM. Je tak možné priamo vybrať dané riešenie a podľa výhod a nevýhod ho aplikovať. Analýzou rezistentných terénov sa vyšpecifikovalo predpokladané silové pôsobenie závislé na polohe a rýchlosti na KM, ktoré je možné použiť v pokračovaní tejto práci. Vytvorený model KM je nielen použiteľná funkčná vzorka, ale vo svojej podstate návod ako vytvoriť dostatočne odpovedajúci model KM v programe Matlab Simulink. Presnosť modelu potvrdzujú výsledky zo simulácií a experimentov, ktoré si vzájomne odpovedajú. Simulácie a experiment s KM nepriniesli len optimalizáciu v oblasti stavby a riadenia, ale hlavne ich porovnali a vyhodnotili, ktorý z daných postupov prináša najlepší výsledok. Je tak možné vybrať konkrétnu optimalizáciu, nie je potrebné ich opakovať a porovnávať. Práca tiež priniesla novú stratégiu pohybu, tzv. Metódu jednej vlny, kde sa používa k zníženiu spotrebovanej energie uvažuje o spoločnom pohybe nohy a prúdenia kvapaliny. Jedná sa o nové doteraz nepoznané riešenie pohybu v kvapaline, ktoré sa dá aplikovať nielen na KM, ale aj iné sekvenčne pohybujúce sa objekty.

Prínos pre pedagogickú oblasť

Rozšírené znalosti z modelovania, programovania a simulovania KM, obecné robotov, prispeli ku lepšiemu poznaniu tejto oblasti a pomohli tak pri vysvetľovaní fungovania priemyselných robotov v predmetoch 6SR, FRM, GPZ a GNP. Obecné sa jednalo o oblasti matematického modelovania, kinematiku, dynamiku a problematiku singularít. Takisto tieto vedomosti poslúžili pri vedení záverečných prác.

Prínos pre prax

Nasadenie KM v praxi závisí na ich schopnostiach a výdrži. Táto práca vyprodukovala 15 detailne vypracovaných modelov KM, čím sa docielila možnosť testovať limity jednotlivých KM v simulácii a okamžite vybrať najlepšie riešenie pre daný scenár. Taktiež sa jeden z vybraných modelov optimalizoval a dosiahol tak výrazne lepšej efektivity pri pohybe rezistentným terénom, čím sa navýši výdrž KM. KM bol konštrukčne a pohybovo optimalizovaný a získané výsledky je možné aplikovať na akýkoľvek KM a zvýšiť tak jeho efektívnosť. Posunula sa tak hranica nasadenia KM v teréne, kde sú teraz KM schopné prekonať a efektívne sa pohybovať v hlbokom snehu, kvapaline, hustým porastom a prípadne pieskom, kde môžu slúžiť ako záchranná, prieskumná, transportná alebo aj technologická jednotka.

Plány do budúcnosti

Dizertačná práca pracuje so šesťnohým KM, pričom vhodnejším riešením KM je zložitejšie dvojnohé prevedenie. Jeho postavenie a sfunkčnenie si vyžaduje dlhší čas výskumu, vývoja a tiež financie. Experimentovanie a optimalizácia tohto riešenia by pravdepodobne viedla k ďalším poznatkom o pohybe a stabilite dvojnohých KM (nie stabilných šesťnohých) v rezistentnom teréne. Taktiež táto práca simuluje a experimentuje len s kvapalným terénom. Rozšírenie výskumu na oblasť snehu, piesku, blata, hustého porastu atď., by viedla k návrhu

optimálneho pohybu v každom z týchto terénov, prípadne prechody medzi nimi, a našla nové metódy ako znížiť spotrebovanú energiu, zvýšiť stabilitu a celkovo funkčnosť KM. Riešenie danej problematiky si vyžaduje medziodborové vedomosti, teda vedecký tím zložený ľuďmi z rôznych oblastí.

ZÁVER

Dizertačná práca si kládla za cieľ navrhnuť model KM a simulovať jeho pohyb v ťažkom teréne. Tento cieľ bol rozdelený na niekoľko čiastočných cieľov, kde prvým bol systémový prístup. Použil sa Jednotný scenár riešenia problémov, kde sa KM popísal ako funkčný systém vložený do okolia O (kvapalný terén) a jeho interakcie s ním. Taktiež sa týmto postupom definovala problémová simulácia, formuloval problém a vytvoril systém podstatných veličín.

Druhým čiastočným cieľom bola morfológická analýza stavby KM. Na základe súčasného stavu stavby KM sa vytvorili obecné znaky a z nich 180 možných kombinácií. Pomocou kritérií sa týchto 180 kombinácií zredukovalo na 15 riešení. Zvolené kritéria boli funkčnosť, ekonomickosť a použiteľnosť. Význam tejto morfológickej analýzy bol taký, že prehľadne spracovala možné riešenia stavby a umožnila priami výber z 15 riešení a s prípadnými ďalšími kritériami určiť optimálne riešenia a potvrdiť ho ďalej popísanou simuláciou.

Súčasťou práce je aj krátka analýza rezistentného terénu, ktorá prispela k výberu konkrétneho rezistentného terénu pre simuláciu a experiment. Na základe silového pôsobenia v závislosti na polohe a rýchlosti v jednotlivých terénoch bol zvolený kvapalný terén. Spomedzi terénov sa jednalo najjednoduchšie zadefinovaný, fyzikálne nemení v normálnych teplotných podmienkach (20°C), dostupný a opakovateľne použiteľný terén bez trvalých deformácií.

Všetkých 15 riešení z morfológickej analýzy bolo vymodelovaných v softvare Matlab Simulink Multibody. Voľba tohto prostredia bolo z dôvodu jeho univerzálnosti a rozšírení do ostatných mechanických oblastí týkajúcich sa KM. Keďže táto práca riešila prevažne mechanickú stránku, je stále možnosť model KM rozšíriť o odpovedajúcu elektrickú a tiež softwarovú stránku. Toto prostredie tiež umožňuje použiť najnovšie technológie a prístupy k riešeniu problémov, pretože je stále vyvíjané. Pokrok nastal aj pri tvorbe tejto práci, kde rozšírenie Multibody prešlo aktualizáciou, a umožňoval tak vytvoriť presnejší model, ale bolo potrebné sa s danou aktualizáciou naučiť pracovať. Použitím aktuálnej verzie sa vytvoril model, ktorý zahrňoval kinematiku a dynamiku KM, straty v pohonoch a PID reguláciu pohonov, interakciu s povrchu a silové pôsobenie od vonkajších vplyvov. Testovaním a analyzovaním simulácií sa overila funkčnosť modelov a ich odpovedajúce reakcie.

Modely boli tvorené blokovo tak, aby sa zaistila univerzálnosť a sprehlľadnila sa štruktúra modelu. Boli vytvorené bloky nôh, gyroskopu a rezistentného terénu, kde sa parametre vyjadrili premennými pre jednoduchú úpravu v programe. Tento program slúžil tiež ako riadiaci algoritmus, v podobe skriptu, a spoločne s modelom vytváral ucelené riešenie umožňujúce simulovaný experiment, vývoj a optimalizáciu, nie len pre túto prácu, ale aj akademickú sféru a prax. Podarilo sa tak vytvoriť funkčný model s možnosťou rozšírenia o iné ako mechanické oblasti a s možnosťou zlepšenia novšími verziami softwaru Matlab.

Prvotnou simuláciou týchto 15 modelov KM v rezistentnom teréne pri zmene jednotlivých parametrov KM a okolitého terénu sa získala závislosť týchto parametrov a spotrebovanej energie pre funkčné KM. Veľkosť závislosti parametrov na spotrebe vymedzila tie parametre (významné), ktoré na ňu majú najväčší vplyv. Tieto významné parametre sú tak dôležité pri návrhu KM a mala by im byť venovaná určitá pozornosť. Na základe významných parametrov a veľkosti ich vplyv na spotrebovanú energiu u jednotlivých riešení sa vymedzilo

vhodné riešenie KM (č. 3) s 15 možných pre kvapalný terén. Toto riešenie nakoniec nebolo použité, pretože sa jednalo o zložité riešenie, a tiež kvôli tomu, že v simulácii niekoľkokrát stratilo stabilitu. Zvolené bolo druhé najlepšie riešenie KM (č. 14), s ktorým sa ďalej simulovalo a experimentovalo.

Z vybraným riešením KM bolo simulované a experimentované. Bol vytvorený CAD model KM a z neho získane parametre prenesené do simulácie. S touto upravenou simuláciou boli prevedené optimalizácie, kde sa pracovalo s adaptáciou výšky nohy a krokového cyklu ku hustote kvapaliny, genetickým algoritmom optimalizovali dĺžky ramien nôh a trajektória nohy, a otestoval nový návrh pohybu nôh s využitím prúdenia kvapaliny vzniknutého od pohybu KM. V simulácii boli všetky optimalizácie prevedené a meraním v experimente potvrdené. Zistené bolo, že je vhodnejšie meniť výšku trajektórie nohy podľa hustoty než meniť krokový cyklus, že je vhodnejšie optimalizovať trajektóriu nohy (výška a dĺžka kroku) než dĺžky ramien nôh (dĺžka prvého a druhého ramena od tela) a, že je vhodné synchronizovať pohyb nôh a rýchlosti vlny. Tieto optimalizácie mali za cieľ znížiť spotrebovanú energiu pri pohybe KM a zvýšiť tak efektívnosť KM, ktorá oproti ostatným mobilným robotom pomerne nízka. Taktiež bola snaha rozšíriť použiteľnosť KM, zabrániť zaseknutiu, kĺzaniu a prevráteniu KM v rezistentnom teréne.

Celkovo považujem prácu za prínosnú v oblasti stavby, modelovania, riadenia a optimalizácie KM, v oblasti rezistentnom terénov ich popisom, delením a silovým pôsobením. Práca je základom pre ďalší rozvoj KM (simulačný model a aj reálny robot) v oblastiach elektroniky a vývoja softwaru a taktiež priblíženie fungovania KM, jeho úskalia použitia v praxi, možnosti optimalizácie pre akademickú sféru, ale aj verejnosť. Stálym vylepšovaním a s použitím nových technológií KM môžu dosiahnuť široké využitie pri akejkoľvek mobilnej operácii vo vnútornom, ale aj vonkajšom prostredí.

ZDROJE

- [1] ACEKRMAN, Evan. Boston Dynamics' Spot Is Helping Chernobyl Move Towards Safe Decommissioning [online]. New York: IEEE Spectrum 2020 [cit. 2021-3-21]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/autamaton/robotics/robotics-hardware/boston-dynamics-spot-chernobyl>
- [2] VINCENT, James. This walking package-delivery robot is now for sale [online]. New York: The Verge [2020] [cit. 2021-3-21]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2020/1/6/21050322/bipedal-robot-digit-agility-robotics-on-sale-delivery-inspection-ces-2020>
- [3] Aist. Development of a Humanoid Robot Prototype, HRP-5P, Capable of Heavy Labor [online]. Tokyo [2018] [cit. 2021-3-21]. Dostupné z https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2018/20181116/en20181116.html
- [4] GART, Sean, Ryan ALICEA, Wei GAO, Jason PUSEY, John NICHOLSON, Jonathan E CLARK a Sean GART. Legged locomotion in resistive terrains. *Bioinspiration & biomimetics* [online]. 2020 [cit. 2021-03-23]. ISSN 17483182. Dostupné z: doi:10.1088/1748-3190/abd011
- [5] GRAF, Nicole, Alexander BEHR, Kathryn A DALTORIO a Nicole GRAF. Dactyls and inward gripping stance for amphibious crab-like robots on sand. *Bioinspiration & biomimetics* [online]. 2021 [cit. 2021-03-23]. ISSN 17483182. Dostupné z: doi:10.1088/1748-3190/abdd94
- [6] ZHANG, Rui, Hao PANG, Haijin WAN, Dianlei HAN, Guoyu LI a Lige WEN. Design and Analysis of the Bionic Mechanical Foot with High Trafficability on Sand. *Applied Bionics and Biomechanics* [online]. Hindawi Limited, 2020, 2020 [cit. 2021-03-23]. ISSN 1176-2322. Dostupné z: doi:10.1155/2020/3489142
- [7] Homchanthanakul, J., et al. Neural Control with an Artificial Hormone System for Energy-Efficient Compliant Terrain Locomotion and Adaptation of Walking Robots. *SCOPUS* [online]. 2019 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: doi:10.1109/IROS40897.2019.8968580.
- [8] A Retrofit Passive Foldable Snow Shoe for A Legged Robot to Walk on Snowfield. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* [online]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2019, 8(6), 867-872 [cit. 2021-03-23]. ISSN 2278-0149. Dostupné z: doi:10.18178/ijmerr.8.6.867-872
- [9] LEE, Joonho, Jemin HWANGBO, Lorenz WELLHAUSEN, Vladlen KOLTUN a Marco HUTTER. Learning Quadrupedal Locomotion over Challenging Terrain. ArXiv.org [online]. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: doi:10.1126/scirobotics.abc5986
- [10] XIONG, X., A.D. AMES a D.I. GOLDMAN. A stability region criterion for flat-footed bipedal walking on deformable granular terrain. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, s. 4552-4559 [cit. 2021-03-23]. ISBN 9781538626825. ISSN 21530858. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2017.8206323
- [11] Wang, M., Wonsick, M., Long, X., & Padr, T. (2020). In-situ terrain classification and estimation for NASA's humanoid robot valkyrie [online]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z doi:10.1109/AIM43001.2020.9158804

- [12] BAL, Cafer. Neural coupled central pattern generator based smooth gait transition of a biomimetic hexapod robot. *Neurocomputing* (Amsterdam) [online]. Elsevier B.V, 2021, 420, 210-226 [cit. 2021-03-28]. ISSN 0925-2312. Dostupné z: doi:10.1016/j.neucom.2020.07.114
- [13] HOBART, Clinton G, Anirban MAZUMDAR, Steven J SPENCER, et al. Achieving Versatile Energy Efficiency With the WANDERER Biped Robot. *IEEE transactions on robotics* [online]. IEEE, 2020, 36(3), 959-966 [cit. 2021-03-28]. ISSN 1552-3098. Dostupné z: doi:10.1109/TRO.2020.2969017
- [14] TRUONG, Joanne, Denis YARATS, Tianyu LI, Franziska MEIER, Sonia CHERNOVA, Dhruv BATRA a Akshara RAI. Learning Navigation Skills for Legged Robots with Learned Robot Embeddings. *ArXiv.org* [online]. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org, 2020 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2464267979/>
- [15] SOFTBANK. Robots for Higher Education and Research [online]. Japan Tokyo 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/robots-higher-education-and-research>
- [16] BOSTON DYNAMICS. Research [online]. Boston Massachusetts 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.bostondynamics.com/research>
- [17] DYNAMICS ROBOTICS LABORATORY. Oregon State University, Oregon Oregon [online], 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z <https://mime.oregonstate.edu/research/>
- [18] KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016, 787 stran : ilustrace (převážně barevné), portréty. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [19] HONDA. Asimo: *Humanoid Robot* [online]. 2020 [cit. 2021-04-09] Dostupné z: <https://world.honda.com/ASIMO/>
- [20] BOSTON DYNAMICS. Atlas: *Humanoid Robot* [online]. 2020 [cit. 2021-04-09] Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/boston-dynamics-atlas-robot-shows-off-parkour-skills>
- [21] KASHYAP, Abhishek Kumar, Dayal R PARHI, Manoj Kumar MUNI a Krishna Kant PANDEY. A hybrid technique for path planning of humanoid robot NAO in static and dynamic terrains. *Applied soft computing* [online]. Elsevier B.V, 2020, 96 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1568-4946. Dostupné z: doi:10.1016/j.asoc.2020.106581
- [22] RADFORD, Nicolaus A., Philip STRAWSER, Kimberly HAMBUCHEN, et al. Valkyrie: NASA's First Bipedal Humanoid Robot. *Journal of Field Robotics* [online]. 2015, 32(3), 397-419 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1556-4959. Dostupné z: doi:10.1002/rob.21560
- [23] ZHENG, Y. F, H WANG, S LI, Y LIU, D ORIN, Kiwon SOHN, Youngbum JUN a Paul OH. Humanoid robots walking on grass, sands and rocks. In: *2013 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)* [online]. IEEE, 2013, s. 1-6 [cit. 2021-04-09]. ISBN 9781467362238. ISSN 23250526. Dostupné z: doi:10.1109/TePRA.2013.6556367
- [24] HOBART, Clinton G, Anirban MAZUMDAR, Steven J SPENCER, et al. Achieving Versatile Energy Efficiency With the WANDERER Biped Robot. *IEEE transactions on robotics* [online]. IEEE, 2020, 36(3), 959-966 [cit. 2021-04-09]. ISSN 1552-3098. Dostupné z: doi:10.1109/TRO.2020.2969017

- [25] Fierro, Jesus & Pamanes, Alfonso & Moreno Avalos, Hector & Núñez Nalda, Jose Victor. (2017). On the Constrained Walking of the NAO Humanoid Robot. 10.1007/978-3-319-54377-2_2. 2020 [cit. 2020-04-09]
- [26] GONG, Yukai, Ross HARTLEY, Xingye DA, Ayonga HEREID, Omar HARIB, Jiunn-kai HUANG a Jessy GRIZZLE. Feedback Control of a Cassie Bipedal Robot: Walking, Standing, and Riding a Segway [online]. 2018 [cit. 2020-04-09].
- [27] SMITH, Mat. This ostrich robot doesn't need to think to run. *Engadget* [online]. New York: AOL, 2017 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1894681232/>
- [28] LEVINE Gabrael. Blackbird Bipedal Robot: A low-cost, high-performance bipedal walking robot[online]. HACKADAY 2019. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/160882-blackbird-bipedal-robot>
- [29] ARM, P., R. ZENKL, P. BARTON, et al. SpaceBok: A dynamic legged robot for space exploration. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, s. 6288-6294 [cit. 2021-04-12]. ISBN 9781538660263. ISSN 10504729. Dostupné z: doi:10.1109/ICRA.2019.8794136
- [30] ARENA, Paolo, Luca PATANÈ a Salvatore TAFFARA. Energy Efficiency of a Quadruped Robot with Neuro-Inspired Control in Complex Environments. *Energies (Basel)* [online]. MDPI, 2021, 14(433), 433 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: doi:10.3390/en14020433
- [31] LOC, Vo-gia, Ig Mo KOO, Duc Trong TRAN, Sangdoek PARK, Hyungpil MOON a Hyouk Ryeol CHOI. Improving traversability of quadruped walking robots using body movement in 3D rough terrains. *Robotics and autonomous systems* [online]. Elsevier B.V, 2011, 59(12), 1036-1048 [cit. 2021-04-12]. ISSN 0921-8890. Dostupné z: doi:10.1016/j.robot.2011.08.007
- [32] GARCIA, E a P GONZALEZ DE SANTOS. On the Improvement of Walking Performance in Natural Environments by a Compliant Adaptive Gait. *IEEE Transactions on Robotics* [online]. IEEE, 2006, 22(6), 1240-1253 [cit. 2021-04-12]. ISSN 1552-3098. Dostupné z: doi:10.1109/TRO.2006.884343
- [33] KITANO, Satoshi, Shigeo HIROSE, Atsushi HIRIGOME a Gen ENDO. TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. *ROBOMECH Journal* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 3(1), 1-16 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: doi:10.1186/s40648-016-0047-1
- [34] GRAF, Nicole, Alexander BEHR, Kathryn A DALTORIO a Nicole GRAF. Dactyls and inward gripping stance for amphibious crab-like robots on sand. *Bioinspiration & biomimetics* [online]. 2021 [cit. 2021-04-13]. ISSN 17483182. Dostupné z: doi:10.1088/1748-3190/abdd94
- [35] BELTER, Dominik, Jan WIETRZYKOWSKI a Piotr SKRZYPCZYŃSKI. Employing Natural Terrain Semantics in Motion Planning for a Multi-Legged Robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2019, 93(3), 723-743 [cit. 2021-04-13]. ISSN 0921-0296. Dostupné z: doi:10.1007/s10846-018-0865-x

- [36] CHEN, Weihai, Tao LIU, Wenlu LI, Jianhua WANG, Xingming WU a Dong LIU. Locomotion control with sensor-driven reflex for a hexapod robot walking on uneven terrain. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* [online]. London, England: SAGE Publications, 2016, 38(8), 956-970 [cit. 2021-04-13]. ISSN 0142-3312. Dostupné z: doi:10.1177/0142331215571121
- [37] J. Homchanthanakul, P. Ngamkajornwiwat, P. Teerakittikul a P. Manoonpong, "Neural Control with an Artificial Hormone System for Energy-Efficient Compliant Terrain Locomotion and Adaptation of Walking Robots," 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, 2019, 5475-5482 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z doi: 10.1109/IROS40897.2019.8968580.
- [38] BAL, Cafer. Neural coupled central pattern generator based smooth gait transition of a biomimetic hexapod robot. *Neurocomputing (Amsterdam)* [online]. Elsevier B.V, 2021, 420, 210-226 [cit. 2021-04-13]. ISSN 0925-2312. Dostupné z: doi:10.1016/j.neucom.2020.07.114
- [39] Chang, Mei & Fanghua. (2018). A Bioinspired Gait Transition Model for a Hexapod Robot. 10.1155/2018/2913636. ISSN 1687-9600. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2018/2913636>.
- [40] HAN, Dianlei, Rui ZHANG, Hua ZHANG, Zhenyu HU a Jianqiao LI. Mechanical Performances of Typical Robot Feet Intruding into Sands. *Energies* [online]. Basel: MDPI, 2020, 13(8), 1867 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: doi:10.3390/en13081867
- [41] ZHANG, Rui, Hao PANG, Haijin WAN, Dianlei HAN, Guoyu LI a Lige WEN. Design and Analysis of the Bionic Mechanical Foot with High Trafficability on Sand. *Applied Bionics and Biomechanics* [online]. Hindawi Limited, 2020, 2020 [cit. 2021-04-13]. ISSN 1176-2322. Dostupné z: doi:10.1155/2020/3489142
- [42] SINKAR, Avadhoot, Aditya PANDEY, Chaitanya MEHTA, Karthick S, S JAYACHANDRAN, Akash K a I.A PALANI. Design and Development of wall climbing Hexapod Robot with SMA actuated suction gripper. *Procedia computer science* [online]. Elsevier B.V, 2018, 133, 222-229 [cit. 2021-04-13]. ISSN 1877-0509. Dostupné z: doi:10.1016/j.procs.2018.07.027
- [43] ACKERMAN Evan. Quadruped Robots Can Climb Ladders Now. *IEEE Spectrum* [online]. IEEE, 2019 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/quadruped-robots-can-climb-ladders-now>
- [44] PLAYTER, R., M. BUEHLER a M. RAIBERT. BigDog. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. 2006 [cit. 2021-04-13]. ISBN 0819462861. ISSN 0277786X. Dostupné z: doi:10.1117/12.684087
- [45] BLOSS, Richard. Robot walks on all four legs and carries a heavy load. *Industrial Robot: An International Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2012, 39(5) [cit. 2021-04-13]. ISSN 0143-991X. Dostupné z: doi:10.1108/ir.2012.04939eaa.005
- [46] ZHONG, Yuhai, Runxiao WANG, Huashan FENG a Yasheng CHEN. Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. London, England: SAGE Publications, 2019, 16(3) [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: doi:10.1177/1729881419844148

- [47] LIU, Chengju, Qijun CHEN a Danwei WANG. CPG-Inspired Workspace Trajectory Generation and Adaptive Locomotion Control for Quadruped Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* [online]. IEEE, 2011, 41(3), 867-880 [cit. 2021-04-13]. ISSN 1083-4419. Dostupné z: doi:10.1109/TSMCB.2010.2097589
- [48] WEN, Jintao, Jianhua WANG, Weihai CHEN a Jingbing ZHANG. A gait planning approach for locomotion stability of four-legged robots. In: 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) [online]. IEEE, 2012, s. 324-329 [cit. 2020-12-13]. ISBN 9781457721182. Dostupné z: doi:10.1109/ICIEA.2012.6360745
- [49] CARVALHO, C.S., L.S.C. RAPTOPOULOS, W.S. ANDRADE, D.S.F. ALVES, M.S. DUTRA a F.M.G. FRANCA. Extending SMER-based CPGs to accommodate total support phases and kinematics-safe transitions between gait rhythms of hexapod robots. *Neurocomputing* [online]. Elsevier B.V, 2015, 170, 113 [cit. 2020-12-13]. ISSN 0925-2312.
- [50] BLOESCH, Michael, Christian GEHRING, Peter FANKHAUSER, Marco HUTTER, Mark A HOEPFLINGER a Roland SIEGWART. State estimation for legged robots on unstable and slippery terrain. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2013, s. 6058-6064 [cit. 2021-04-15]. ISSN 2153-0858. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2013.6697236
- [51] NUNEZ, Alberto Perez, Matko ORSAG a Daniel M LOFARO. Design, Implementation, and Control of the Underwater Legged Robot AquaShoko for Low-Signature Underwater Exploration. In: *2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)* [online]. IEEE, 2018, s. 228-234 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: doi:10.1109/URAI.2018.8442209
- [52] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [53] KOLÍBAL, Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. Košice: Viena, 2000, 178 s. : il. ISBN 80-88922-27-5.
- [54] GONZALEZ-RODRIGUEZ, Angel Gaspar, Antonio GONZALEZ-RODRIGUEZ a Fernando CASTILLO-GARCIA. Improving the energy efficiency and speed of walking robots. *Mechatronics (Oxford)* [online]. OXFORD: Elsevier, 2014, 24(5), 476-488 [cit. 2021-9-13]. ISSN 0957-4158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2014.05.004
- [55] FIERRO, Jesus E, J ALFONSO PAMANES, Hector A MORENO a Victor NUNEZ. On the Constrained Walking of the NAO Humanoid Robot. *Advances in Automation and Robotics Research in Latin America*. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 13-29. ISBN 9783319543765. ISSN 2367-3370. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-54377-2_2
- [56] Shuaishuai, Zhang & Rong, Xuwen & Li, Yibin & Li, Bin. (2015). A Composite COG Trajectory Planning Method for the Quadruped Robot Walking on Rough Terrain. *International Journal of Control and Automation*. 8. 101-118. 10.14257/ijca.2015.8.9.11.
- [57] OREGON STATE UNIVERSITY. Atrias: Humanoid robot [online]. 2015 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://daniel.human-motion-engineering.org/wp-content/uploads/2013/10/ATRIAS_small.png

- [58] XIONG, Xiaobin a Aaron D AMES. Sequential Motion Planning for Bipedal Somersault via Flywheel SLIP and Momentum Transmission with Task Space Control. In: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [online]. IEEE, 2020, s. 3510-3517 [cit. 2021-11-12]. ISBN 9781728162126. ISSN 2153-0858. Dostupné z: doi:10.1109/IROS45743.2020.9341467
- [59] INTERBOTIX. HR-OS5: Humanoid Research Platform [online]. 2010 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/Shared/images/PImages/hros5legs/HR-OS5-LEGS-b.jpg>
- [60] UNIVESITY OF CALIFORNIA. STriDER: Tripedal robot [online]. 2007 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://www.romela.org/wp-content/uploads/2015/02/strider_1-1024x763.jpg
- [61] SATO ROBOT LABORATOTRY. Three-legged walking robot [online]. 2020 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://makerfaire.com/wp-content/uploads/gravity_forms/245-9309d71dafd32496d6e4c7eda6293ae7/2020/05/GEDV0040.JPG
- [62] KITANO, Satoshi, Shigeo HIROSE, Atsushi HORIGOME a Gen ENDO. TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. ROBOMECH journal [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 3(1), 1-16 [cit. 2021-11-10]. ISSN 2197-4225. Dostupné z: doi:10.1186/s40648-016-0047-1
- [63] ANYBOTICS. ANYmal: Autonomous legged robot [online]. 2019 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020_49/anymal-c-legged.jpg
- [64] JEŽERSKÝ, Jíří. Penta: Pentapod [online]. 2008 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://serva.webnode.cz/_files/200000460-d1cf1d2c87/penta01_1024B.JPG
- [65] IKEDA, Tsutoma. Black Tiger L45: Legs remodeled robot [online]. 2011 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://iketomu.sakura.ne.jp/SANY5004.jpg>
- [66] INTERBOTIX. PhantomX: Hexapod [online]. 2018 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/b201/_media/courses/b4m36uir/labs/phantomx.jpg?cache
- [67] HWANG, Min-chan, Feifei LIU, Jie YANG a Yuanzhang LIN. The design and building of a hexapod robot with biomimetic legs. Applied sciences [online]. BASEL: MDPI, 2019, 9(14), 2792 [cit. 2021-11-12]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9142792
- [68] KREJČÍŘÍK, Stanislav. *Možnosti snižování odporu pohybujících se těles v kapalinách inspirované přírodou* [online]. Brno, 2014 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32887>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Jaroslav Štigler.
- [69] TOPPR. Force analysys of object inf fluid [online]. 2020 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://d3jlfssyc6yvi.cloudfront.net/image/mw:1024/q:85/https%3A%2F%2Fhaygot.s3.amazonaws.com%3A443%2Fcheatsheet%2F30670_c77db554a8c6417099cc416eb050e078.png
- [70] STOMAKHIN, Alexey, Craig SCHROEDER, Lawrence CHAI, Joseph TERAN a Andrew SELLE. A material point method for snow simulation. *ACM transactions on graphics* [online]. NEW YORK: ACM, 2013, 32(4), 1-10 [cit. 2022-11-30]. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/2461912.2461948

- [71] MEIRION-GRIFFITH, Gareth a Matthew SPENKO. A modified pressure–sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains. *Journal of terramechanics* [online]. OXFORD: Elsevier, 2011, 48(2), 149-155 [cit. 2022-11-30]. ISSN 0022-4898. Dostupné z: doi:10.1016/j.jterra.2011.01.001
- [72] DING, Liang. Improved explicit-form equations for estimating dynamic wheel sinkage and compaction resistance on deformable terrain. *Mechanism and machine theory* [online]. OXFORD: Elsevier, 2015, 86, 235-264 [cit. 2022-12-01]. ISSN 0094-114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.011
- [73] MEIRION-GRIFFITH, Gareth a Matthew SPENKO. A modified pressure–sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains. *Journal of terramechanics* [online]. OXFORD: Elsevier, 2011, 48(2), 149-155 [cit. 2023-01-03]. ISSN 0022-4898. Dostupné z: doi:10.1016/j.jterra.2011.01.001
- [74] DE LARA SANTOS, Airton Mauro, Claudio Henrique SOARES DEL MENEZZI a Gerald BORTOLETTO JUNIOR. Theoretical and experimental behavior of wood I-beams: effects of web type on strength, stiffness and deflection. *Scientia forestalis* [online]. PIRACICABA: Ipef-Inst Pesquisas Estudos Florestais, 2009, 37(82), 131-141 [cit. 2022-12-12]. ISSN 1413-9324.
- [75] KREJSA, Martin, Lausová, Michalcová: Pružnost a plasticita. VŠB-TU Ostrava 2011 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/lausova/pruznost_tisk.pdf
- [76] MATHWOKRS. Matlab Simulink Sinspace [online]. 1994 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/products/simscape-multibody.html>
- [77] GONZALEZ-RODRIGUEZ, Angel Gaspar, Antonio GONZALEZ-RODRIGUEZ a Fernando CASTILLO-GARCIA. Improving the energy efficiency and speed of walking robots. *Mechatronics (Oxford)* [online]. OXFORD: Elsevier, 2014, 24(5), 476-488 [cit. 2021-9-13]. ISSN 0957-4158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2014.05.004
- [78] STRYDOM, Mario Llewellyn, Artur BANACH, Jonathan ROBERTS, Ross CRAWFORD a Anjali Tumkur JAIPRAKASH. Kinematic Model of the Human Leg Using DH Parameters. *IEEE access* [online]. Piscataway: IEEE, 2020, 8, 191737-191750 [cit. 2022-03-28]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2020.3031295
- [79] NUCLEAR POWER. Skin friction - Friction drag [online]. 2022 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/wp-content/uploads/2017/12/Drag-skin-friction-and-form-drag.png?ezimgfmt=ngcb50/notWebP>

ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

Zoznam skratiek a symbolov

Symbol/Skratka	Jednotka	Význam
α	rad	natočenie okolo osy z
β	rad	natočenie okolo osy y
δ_P	m	priehyb prútu
μ	Nm ² s	dynamickú viskozitu kvapaliny
ρ	kg/m ³	hustota
Σ	-	suma
Υ	rad	natočenie okolo osy x
φ_P	rad	natočenie prútu
2D	-	dvojdimenzionálny
3D	-	trojdimenzionálny
A	m ²	plocha elementu
b	-	počet kontaktných bodov
b_s	N/(m/s)	tlmivosť podkladu
CAD	-	projektovanie pomocou počítača (computer aided design)
CD	-	gradient rýchlosti
CoT	-	náklady na transport (cost of transportation)
CoT _e	-	elektrický náklad na transport
CoT _m	-	mechanický náklad na transport
c_s	-	krokový cyklus
č.	-	číslo
d	m	prejdená vzdialenosť
DoF	-	stupeň voľnosti (degree of freedom)
du/dy	m/s	gradient rýchlosti
E	Pa	modul pružnosti
E _e	J	elektrická energia
F _{dnt}	N	odporová sila v deformovateľnom nespojitom teréne
F _{kt}	N	odporová sila v kvapalnom teréne
F _{ngt}	N	odporová sila v nestlačiteľnom granulovanom teréne

F_{sgt}	N	odporová sila v stlačiteľnom granulovanom teréne
F_B	N	vztlaková sila
f_D	-	dynamický koeficient trenia
F_D	N	odporová sila
F_O	N	odporová sila
f_S	-	statický koeficient trenia
F_T	N	viskózna sila
F_V	N	vztlaková sila
g	m/s^2	gravitačné zrýchlenie
H	N	posuvná sila
h_{rb}	m	výška tela KM
h_S	m	výška kroku
h_w	m	pracovná výška tela KM
I_y	m^2kg	kvadratický moment v ose y
I_y	A	prúd
KM	-	kráčajúci mechanizmus
k_o	-	orientácia kolena
k_S	N/m	tuhosť podkladu
l	m	dĺžka prútu
l_{g1}	m	dĺžka prvého ramena nohy
l_{g2}	m	dĺžka druhého ramena nohy
l_{g3}	m	dĺžka tretieho ramena nohy
l_{g4}	m	dĺžka štvrtého ramena nohy
l_{g5}	m	dĺžka piateho ramena nohy
Li-on	-	lithium-iontová
l_S	m	dĺžka kroku
m_{g1}	kg	hmotnosť prvého ramena
m_{g2}	kg	hmotnosť druhého ramena
m_{g3}	kg	hmotnosť tretieho ramena
m_{mt}	Nm	maximálny moment motorov
M_p	Nm	moment v päte prútu
m_r	kg	hmotnosť KM
m_{rb}	kg	hmotnosť tela KM
MSR	-	mobilný servisný robot
n	-	počet nôh

obr.	-	obrázok
OSB	-	Oriented Strand Board – preglejka
P	W	výkon
P.	-	poradie
PID	-	proporčne-integračno-derivačný
PLA	-	polylaktidové vlákno
p _z	m	výška hladiny kvapaliny
R.	-	robot
t	s	čas
t.j.	-	to jest
tab.	-	tabuľka
ts	-	tvar trajektórie kroku
U	V	napätie
V	m ³	objem
v	m/s	rýchlosť
v _r	m/s	rýchlosť

Zoznam obrázkov

OBR. 1) DVOJNOHÝ MECHANIZMUS (ĽUDSKÝ VZOR) [25]	19
OBR. 2) DVOJNOHÝ MECHANIZMUS (PŠTROSÍ VZOR) [28]	20
OBR. 3) ŠTVORNOHÝ MECHANIZMUS [33]	20
OBR. 4) ŠEŠŤNOHÝ MECHANIZMUS [39]	21
OBR. 5) ŠPECIÁLNE ZAKONČENIA NÔH [5] [8] [41].....	22
OBR. 6) SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČÍN	29
OBR. 7) JEDNOBODOVÝ, DVOJBODOVÝ A TROJBODOVÝ KONTAKT (BODY PREDSTAVUJÚ KONTAKT, PLNÉ ČIARY TELO KM A ČIARKOVANÁ ČIARA OSI MOŽNÝCH ROTÁCIÍ).....	38
OBR. 8) SMEROVANIE NÔH: A) VERTIKÁLNE SMEROVANIE; B) HORIZONTÁLNE SMEROVANIE [54].....	38
OBR. 9) UKOTVENIE NÔH: A) V BODE [55]; B) NA PRIAMKE; C) V ROVINE [56] 38	
OBR. 10)SILOVÉ PÔSOBENIE V KVAPALINE [69].....	47
OBR. 11)SIMULÁCIA SNEHU [70]	48
OBR. 12)SCHÉMA BEKKEROVEJ TEÓRIE A TESTBED [73].....	48
OBR. 13)DEFORMÁCIA PRÚTU [75]	49
OBR. 14)ZÁVISLOSŤ SILY NA POLOHE.....	50
OBR. 15)ZÁVISLOSŤ SILY NA RÝCHLOSTI.....	50
OBR. 16)MODEL NOHY S TROMA STUPŇAMI VOĽNOSTI.....	53
OBR. 17)BLOK SUBSYSTÉMU NOHY S 3 DOF	54
OBR. 18)MODEL ORIENTAČNEJ ČASTI NOHY S 5 DOF.....	55
OBR. 19)BLOK SUBSYSTÉMU NOHY S 5 DOF	55
OBR. 20)MODEL ORIENTAČNEJ ČASTI NOHY S 6 DOF.....	56
OBR. 21)BLOK SUBSYSTÉMU NOHY S 6 DOF	56
OBR. 22)MODEL TELA KM.....	57
OBR. 23)MODEL TROJOSIEHO GYROSKOPU	57
OBR. 24)BLOK GYROSKOPU	58
OBR. 25)MODEL KM.....	58
OBR. 26)LOGIKA RIADENIE	59
OBR. 27)PODIEL TRECÍCH A ODPOROVÝCH SÍL [79]	60
OBR. 28)PRIEMET VALCA DO TROCH ROVÍN S DELIACOU ROVINOU HLADINY	60
OBR. 29)ROZDELENIE PRIEMETU VALCA NA SEKcie S KONŠTANTNOU RÝCHLOSŤOU.....	61

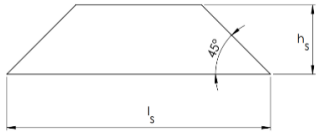
OBR. 30) A) BLOK ODPOROVÝCH SÍL; B) BLOK GLOBÁLNEJ RÝCHLOSTI KVAPALINY	61
OBR. 31) A) CAD MODEL; B) PRÍKLAD ZÍSKANÝCH INFORMÁCIÍ.....	66
OBR. 32) VÝKRES CAD MODELU	67
OBR. 33) SIMULAČNÝ MODEL.....	68
OBR. 34) SIMULÁCIA ZÁVISLOSTI HUSTOTY A KROKOVÉHO CYKLU....	69
OBR. 35) SIMULÁCIA ZÁVISLOSTI HUSTOTY A VÝŠKY TRAJEKTÓRIE NOHY	70
OBR. 36) VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ S POUŽITÝMI METÓDAMI	71
OBR. 37) A) HARDWAROVÉ PARAMETRE; B) SOFTWAREOVÉ PARAMETRE	72
OBR. 38) SCHÉMA ZJEDNODUŠENÉHO MODELU	74
OBR. 39) ZÁVISLOSŤ SPOTREBOVANEJ ENERGIE NA ČASOVOM POSUNUTÍ ZO SIMULÁCIE	75
OBR. 40) OPTIMÁLNE ČASOVÉ POSUNUTIE PRE KONKRÉTNU RÝCHLOSŤ	75
OBR. 41) A) KM; B) DETAIL NOHY	77
OBR. 42) KONTAJNER	78
OBR. 43) NOVO VYTLAČENÉ RAMENÁ NÔH	80
OBR. 44) EXPERIMENTÁLNA ZOSTAVA.....	81
OBR. 45) EXPERIMENTÁLNA ZÁVISLOSŤ SPOTREBOVANEJ ENERGIE NA ČASOVOM POSUNUTÍ	82
OBR. 46) OPTIMÁLNE ČASOVÉ POSUNUTIE PRE KONKRÉTNU RÝCHLOSŤ	83

Zoznam tabuliek

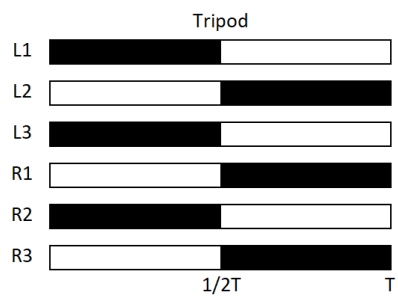
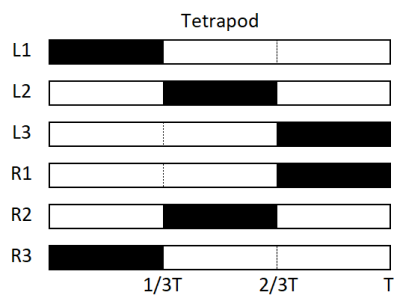
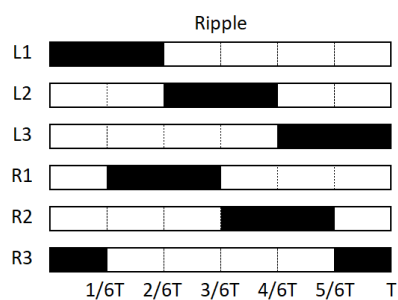
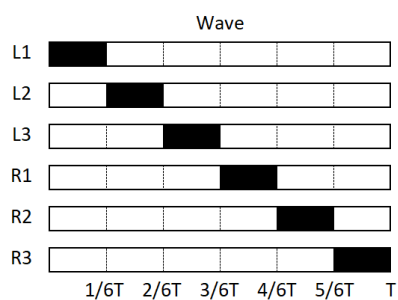
TAB 1) CHÔDZA.....	23
TAB 2) BEH.....	23
TAB 3) KLUS (TROT)	24
TAB 4) BOUND.....	24
TAB 5) ROTARY GALLOP	25
TAB 6) WAVE.....	25
TAB 7) TRIPOD.....	26
TAB 8) MORFOLOGICKÁ MATICA.....	39
TAB 9) RIEŠENIA ŠTVORNOHÉ S TROMI STUPŇAMI VOĽNOSTI NA JEDNU NOHU.....	41
TAB 10) TROJNOHÉ RIEŠENIA S TROMI A PIATIMI STUPŇAMI VOĽNOSTI NA JEDNU NOHU	42
TAB 11) RIEŠENIA DVOJNOHÉ S BODOVÝM UMIESTNENÍM NÔH.....	43
TAB 12) ZOZNAM RIEŠENÍ.....	44
TAB 13) GRAFICKY ZNÁZORNENÉ RIEŠENIA [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67]	45
TAB 14) PARAMETRE TERÉNU.....	63
TAB 15) PARAMETRE KM.....	64
TAB 16) PARAMETRE KM A PROSTREDIA	65
TAB 17) ROZDIELY SPOTREBOVANEJ ENERGIE KRÁČAJÚCICH KM.	66
TAB 18) PARAMETRE Z CAD MODELU	67
TAB 19) VÝSLEDKY SIMULÁCIE GENETICKÉHO ALGORITMU	73
TAB 20) VÝSLEDKY EXPERIMENTU ADAPTÁCIE	79
TAB 21) VÝSLEDKY EXPERIMENTU GENETICKÉHO ALGORITMU	80

PRÍLOHY

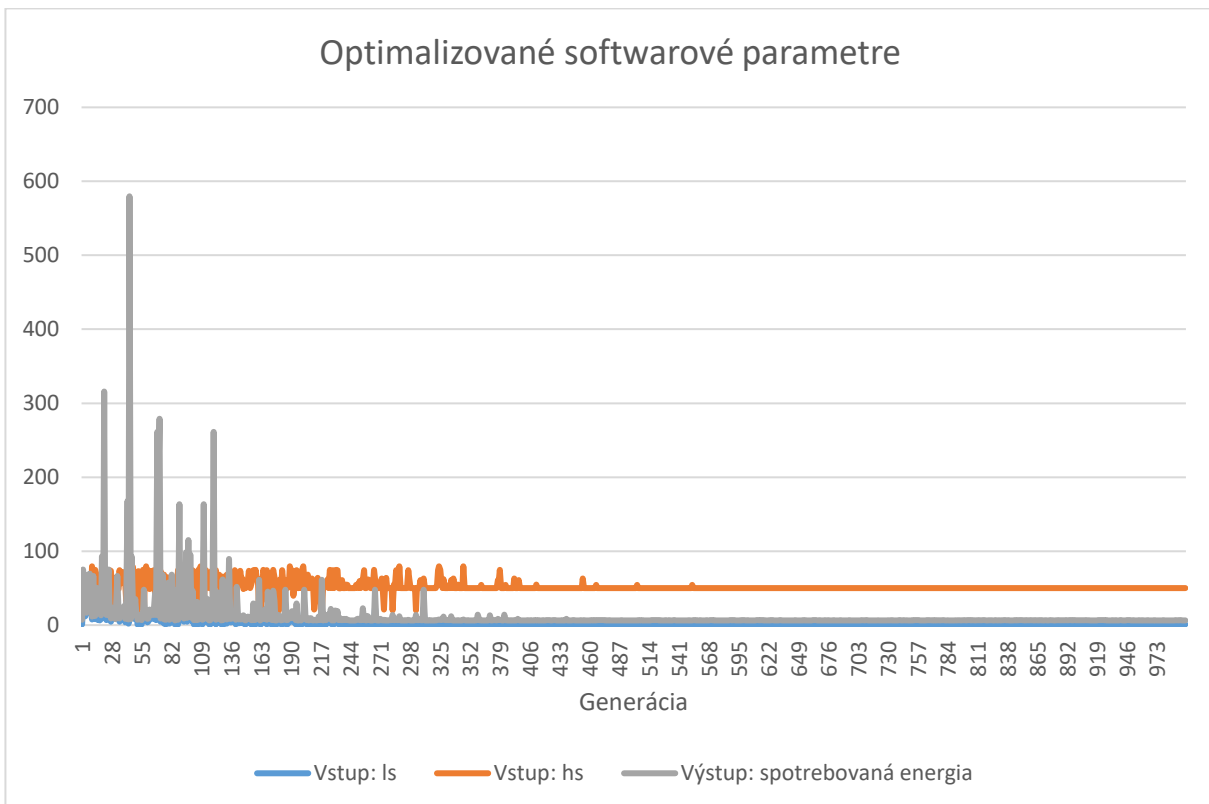
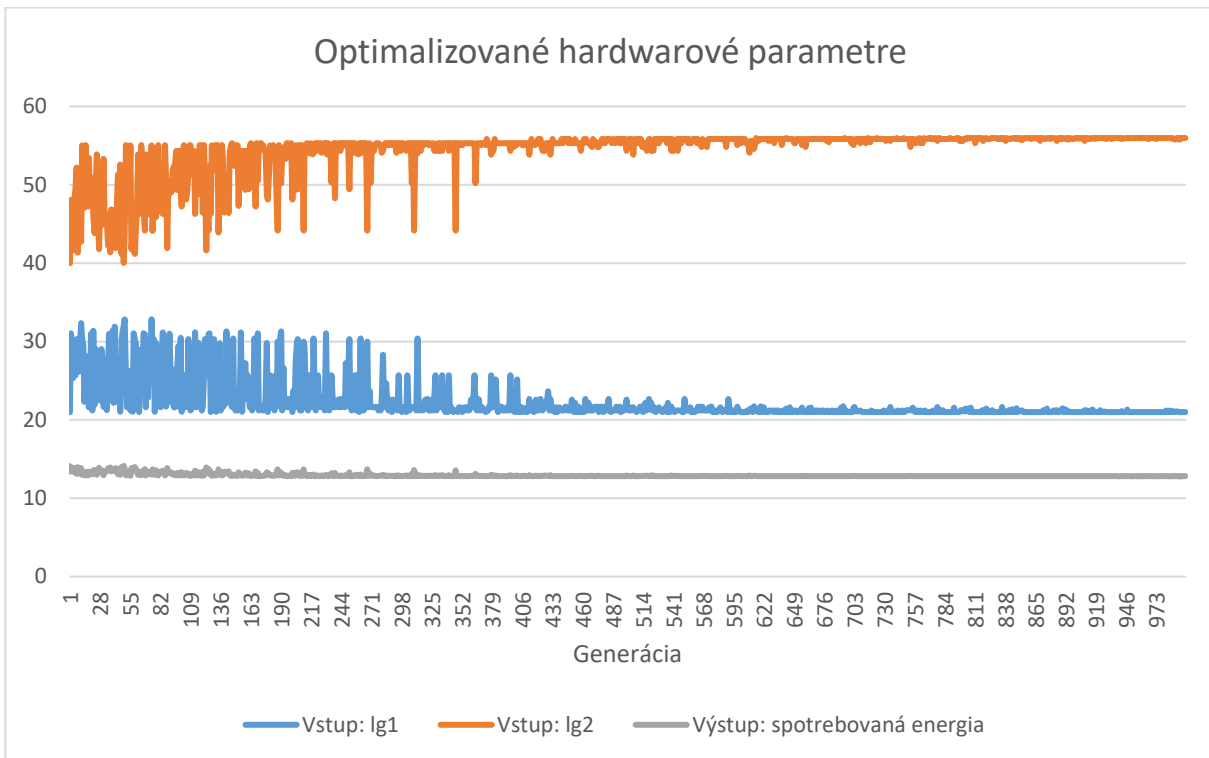
1. Ostatné parametre simulácie:

Názov parametru	Označenie parametru	Hodnota
P zložka rýchlostného regulátoru	P_r	0,29
I zložka rýchlostného regulátoru	I_r	6,63
D zložka rýchlostného regulátoru	D_r	0
Filter rýchlostného regulátora	F_r	100
P zložka polohovacieho regulátoru	P_p	36
I zložka polohovacieho regulátoru	I_p	513
D zložka polohovacieho regulátoru	D_p	0
Filter polohovacieho regulátora	F_p	0
Vnútny odpor motora závislý na natočení	K_m	0,0022
Rýchlosť KM	v_r	0,080 m/s
Dĺžka kroku	l_s	0,060 m
Výška kroku	h_s	0,010 m
Tvar kroku	t_s	
Krokový cyklus (graficky znázornený pod tabuľkou)	c_s	1: Wave 2: Ripple 3: Tetrapod 4: Tripod (základný)
Hustota kvapaliny	ρ	1 000 kg/m ³
Výška hladiny kvapaliny	p_z	0,032 m
Koeficient odporu	C_D	1
Tuhosť podkladu	k_s	1 000 000 N/m
Tlmivosť podkladu	b_s	1 000 N/(m/s)
Statický koeficient trenia	f_s	0,9
Dynamický koeficient trenia	f_D	0,72
Čas simulácie	τ_s	5 s

Krokové cykly:

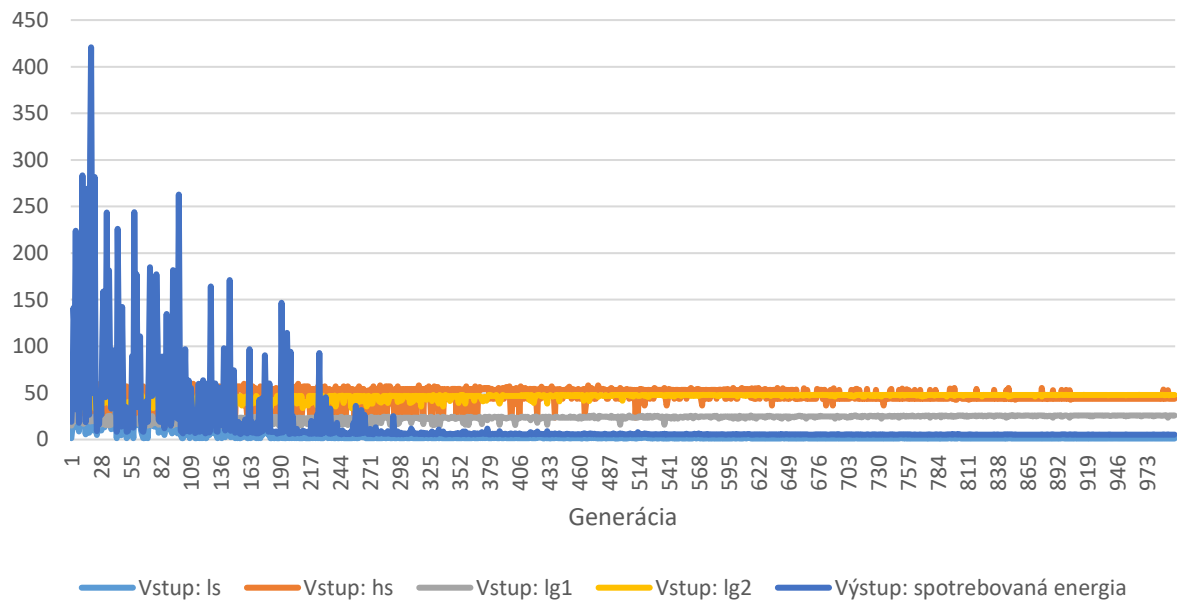


2. Priebehy genetického algoritmu





Optimalizované všety parametre



3. Metóda jednej vlny

