



# 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



## KLÍČOVÉ SLOVÁ

kráčajúci robot, mobilný robot, autonómny robot, krokové cykly kráčania, konštrukcia kráčajúceho robota, dvojnohý robot, štvornohý robot, šesťnohý robot, simulácia 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, sand, stream, snow, waterproof robot

## ABSTRAKT

Dizertačná práca rieši návrh modelu autonómneho kráčajúceho mechanizmu a jeho simuláciou v ťažkom teréne. Prvá časť práce sa venuje krátkemu prehľadu súčasného stavu kráčajúcich robotov pohybujúcich sa v teréne a vymedzuje riešenú problematiku, ktorá bola určená ako pohyb kráčajúceho robota v rezistentnom teréne. Druhá časť sa zameriava na kráčajúce roboty, ich stavbu a krokové cykly. V tejto časti je tiež popísaný rezistentný terén. Tretia časť sa venuje kritickému hodnoteniu súčasného stavu a nachádza neriešené oblasti pohybu kráčajúcich robotov v rezistentnom teréne, a vytvára z nich konkrétny problém. Štvrtá časť sa zameriava na ciele práce, etapy práce a harmonogram riešenia práce. Piata časť je venovaná experimentálnemu robotu pre lepšie pochopenie fungovania kráčajúcich robotov. Posledná šiesta časť hodnotí celú prácu a vytvára záver pre budúcu dizertačnú prácu.

## ABSTRACT

This doctoral thesis topic deals with the design of a walking autonomous mechanism and its simulation of movement in difficult terrain. The first part of the work is devoted to a brief overview of the current state of walking robots moving in the terrain and the definition of the problem, which was determined as the movement of a walking robot in resistive terrain. The second part focuses on walking robots, their construction and gait. A resistive terrain is also described in this section. The third part deals with a critical evaluation of the current state and finds unresolved areas of movement of walking robots in resistive terrain, and creates a specific problem from them in the problem definition section. The fourth part focuses on the objectives of the work, stages of work and the schedule of work. The fifth part is dedicated to the experimental robot for a better understanding of the functioning of walking robots. The last sixth part evaluates the whole work and draws a conclusion for future dissertation work.



# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>1 VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A OBECNÉ CIELE .....</b>	<b>9</b>
<b>2 SÚČASNÝ STAV POZNANIA .....</b>	<b>11</b>
2.1 Obecná stavba kráčajúcich robotov .....	11
2.2 Klasifikácia kráčajúceho robota.....	12
2.3 Stavba kráčajúcich robotov pre ťažký terén .....	12
2.3.1 Dvojnohý kráčajúci robot .....	12
2.3.2 Štvornohý kráčajúci robot .....	14
2.3.3 Šesťnohý kráčajúci robot .....	15
2.3.4 Špeciálne zakončenia nôh.....	15
2.3.5 Pohony a zdroje energie kráčajúcich robotov .....	16
2.4 Krokové cykly robotov .....	16
2.4.1 Cyklus dvojnohého kráčajúceho robota .....	17
2.4.2 Cyklus štvornohého kráčajúceho robota .....	17
2.4.3 Cyklus šesťnohého kráčajúceho robota .....	19
2.5 Terén .....	20
2.5.1 Rezistentný terén .....	20
<b>3 KRITICKÉ ZHODNOTENIE SÚČASNÉHO STAVU VO VEDNOM ODBORE.....</b>	<b>21</b>
<b>4 DEFINÍCIA PROBLÉMU .....</b>	<b>23</b>
4.1 Problémová situácia .....	23
4.2 Formulácia problému .....	24
4.3 Systém podstatných veličín .....	24
<b>5 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....</b>	<b>27</b>
<b>6 POSTUP A ETAPY RIEŠENIA .....</b>	<b>29</b>
<b>7 EXPERIMENTÁLNY ROBOT .....</b>	<b>33</b>
<b>8 ZÁVER PRE BUDÚCU DIZERTAČNÚ PRÁCU .....</b>	<b>35</b>
<b>9 ZDROJE.....</b>	<b>37</b>



## 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 radiácie 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], efektívnosťou [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 prejdienie 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 poprípadne 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

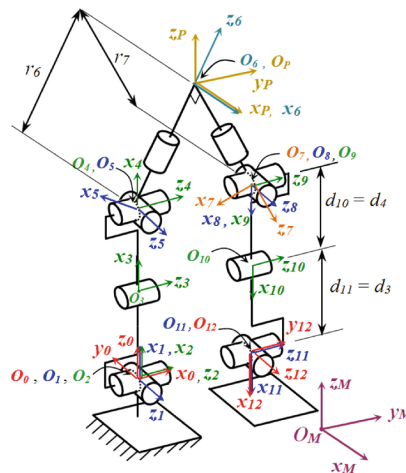
Základným a najdôležitejším údajom kráčajúcich robotov je počet nôh. Roboty určené pre ťažký terén sú rozdelené do skupín na: dvojnohé, štvornohé a šesťnohé. Tieto skupiny sú pritom najpočetnejšie oproti všetkým robotom zmieneným v podkapitole 2.2.

### 2.3.1 Dvojnohý kráčajúci robot

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

## Dvojnóhý robot vychádzajúci z ľudského vzoru (humanoid)

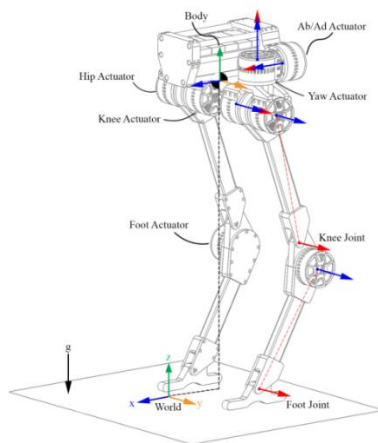
Táto stavba je veľmi rozšírená a často používaná. Najznámejšie roboty používajúce toto riešenie vo výskumnej a vedeckej sfére sú: ASIMO, Atlas, HRP-5, Nao (obr. 1), Valkyrie, Hubo 2+, WANDERER atď. Riešenia sa vyznačujú dynamickou nestabilitou, vertikálnym smerovaním nôh a plošným stykom nôh s podkladom. 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 Atlasu, 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) Dvojnóhý mechanizmus (ľudský vzor) [25]

## Dvojnóhý 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].

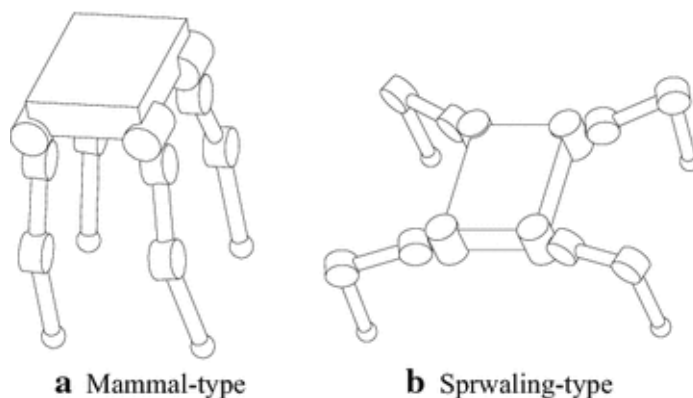


Obr. 2) Dvojnohý mechanizmus (přstrosí vzor) [28]

### 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].

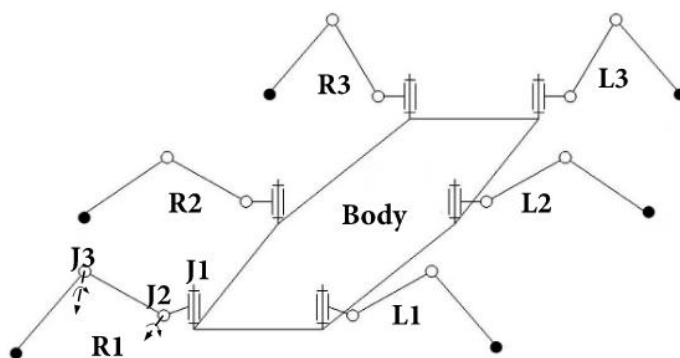
Do druhej skupiny štvornohých kráčajúcich robotov môžeme zaradiť roboty odvodené od biologických vzorov. Tieto roboty vychádzajú zo šesťnohého hmyzu bez dvoch nôh (sprawling-type, obr. 3b). Príkladom takýchto robotov sú: MR4, SILO4 a TITAN XIII. Podobne ako v prvom prípade, sú nohy rozložené rovnomerne 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 Šest'nohý kráčající robot

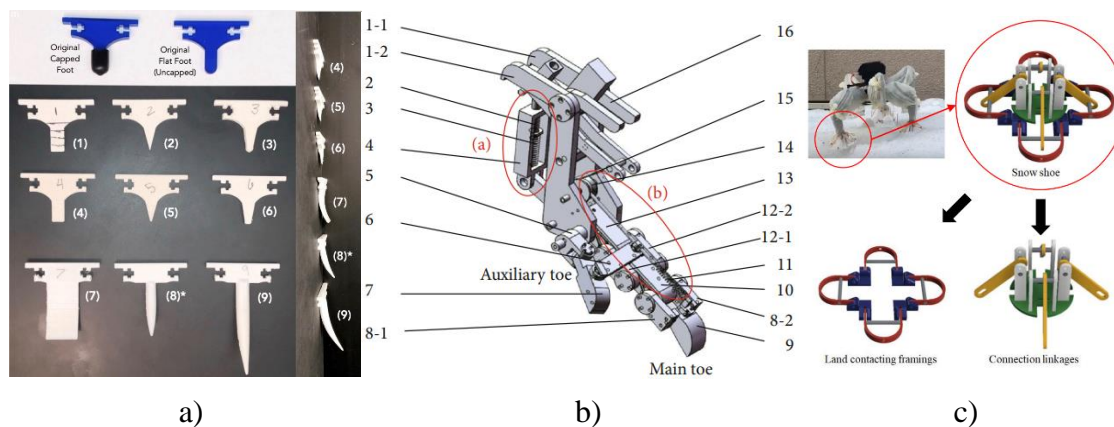
Biologickým vzorom šesťnohých kráčajúcich robotov je hmyz ako napríklad mravec, včela atď., podľa ktorých boli navrhnuté roboty ako HEXY (obr. 4), Messor II, WEBOTS, šesťnohý robot z Firat University a šesťnohý robot z King Mongkut's University of Technology Thonburi. Tento robot je charakterizovaný 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 zľadovatenom 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 chápadlami 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 vyvodenie 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 pohonov, 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]

Dvojnóhý robot používa, 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 štvornoheho 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 cyklu 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 šest'nohého kráčajúceho robota [49]

Šest'nohé 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) šest'nohej 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 robot 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.

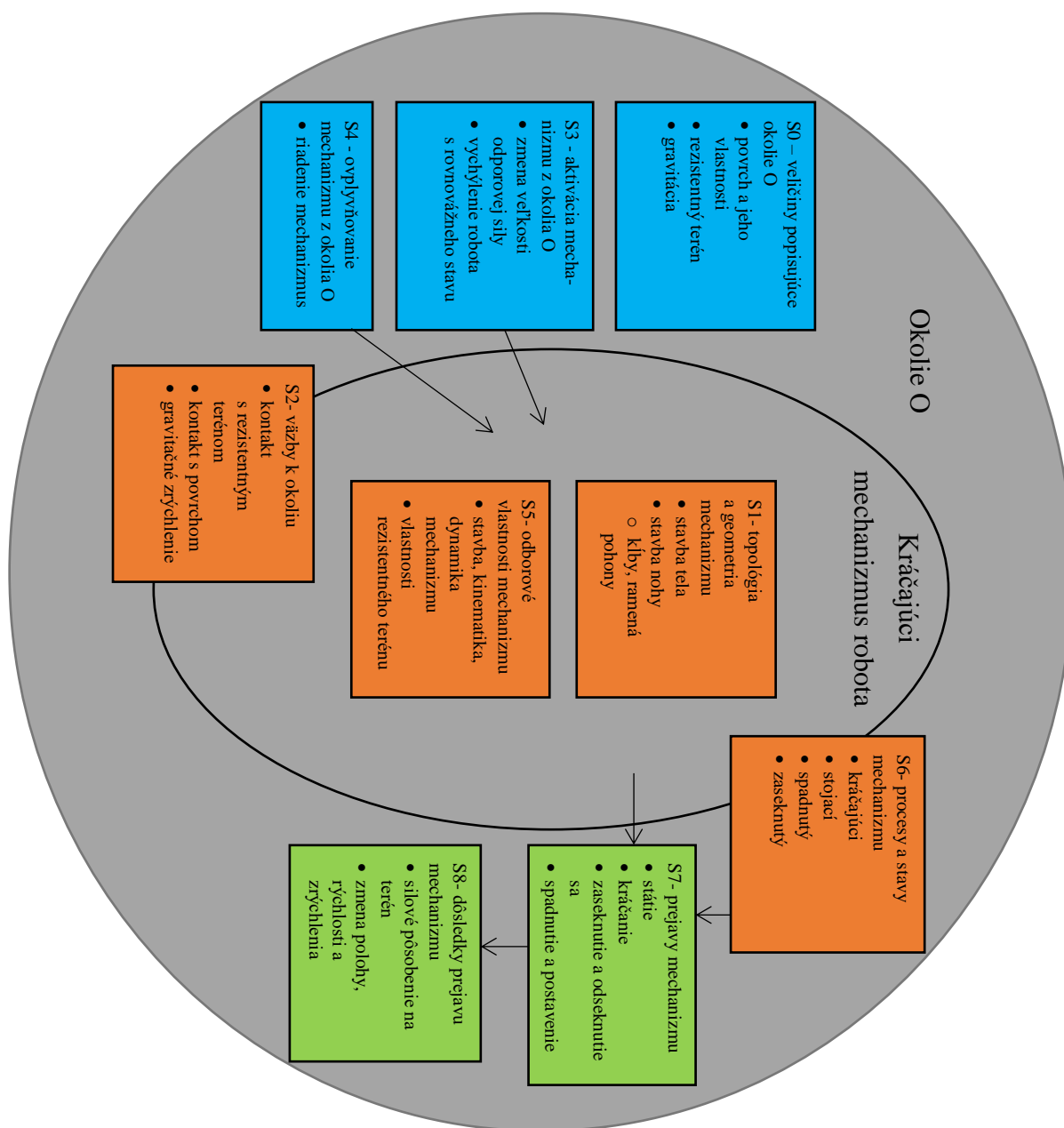


## 4 DEFINÍCIA PROBLÉMU

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 tlmiivosť) 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 odporu 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 nabaluje 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, spadnutí, alebo zaseknutý, čomu odpovedajú aj prebiehajúce procesy. Pri stáťi 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 stáťim, 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.

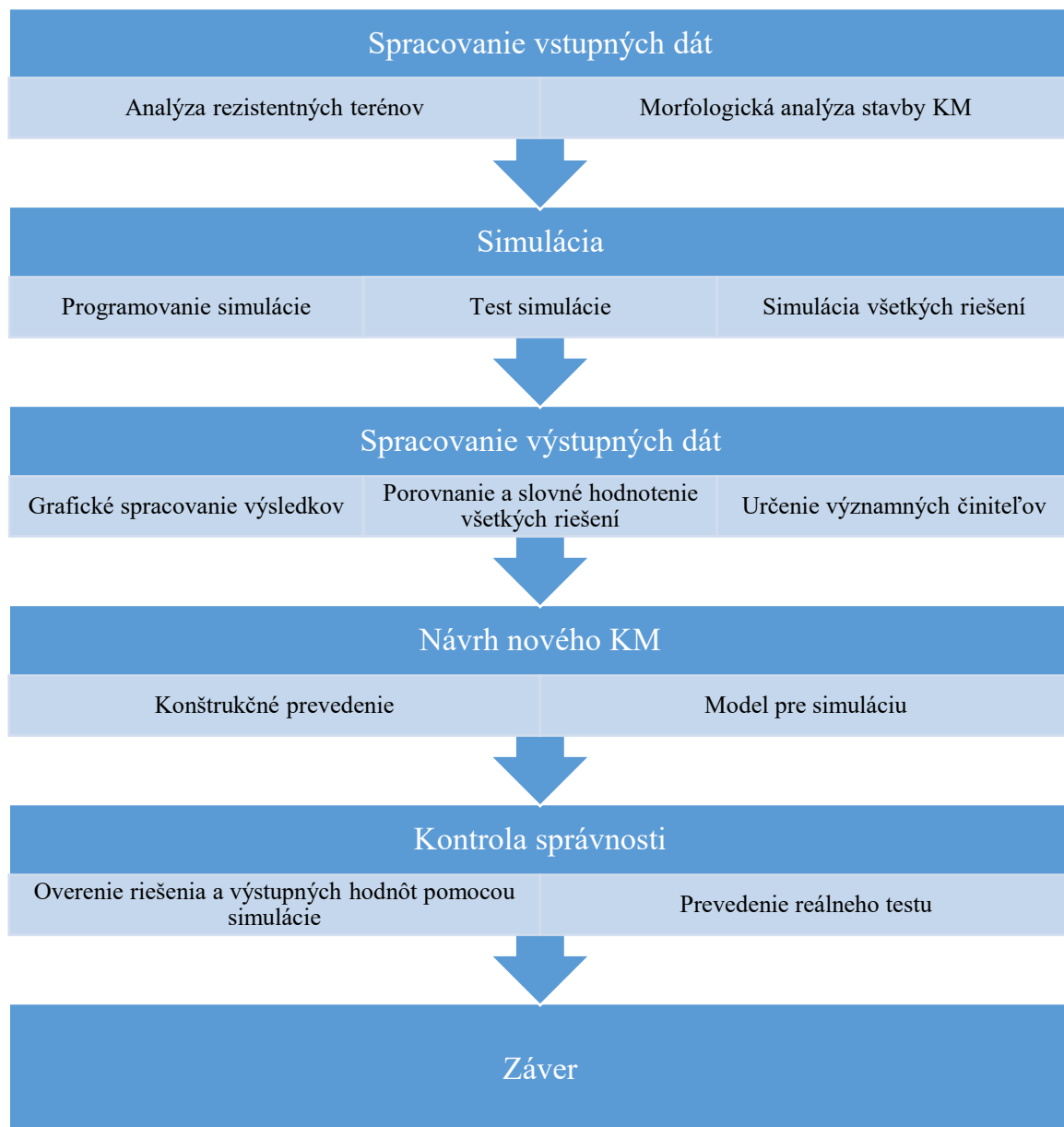
Nasledujúci text špecifikuje postup riešenia práce s čiastočnými fázami a výstupmi k naplneniu hlavných cieľov práce:

- 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  $\Sigma$ , 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 A ETAPY RIEŠENIA

Postup riešenia práce je nasledujúci:



Etapy riešenia sú nasledujúce:

		2021						2022				
		júl	august	september	október	november	december	január	február	Marec	apríl	máj
<b>I. ETAPA</b> Spracovanie vstupných dát	<b>Popis činností</b>											
Analýza rezistívneho terénu	V tejto časti riešenia budú analyzované existujúce typy prírodných terénov, teda sneh, blato, tečúca voda, vysoká tráva a piesok, ktoré budú spracované do matematického modelu vhodného pre simuláciu.											
Morfologická analýza stavby	V tejto časti riešenia budú analyzované rôzne používané kinematické štruktúry a vybrané funkčné riešenia budú spracované ako matematický model pre simuláciu.											
<b>II. ETAPA</b> Simulácia	<b>Popis činností</b>											
Programovanie simulácie	V tejto časti budú vytvorený program pre testovanie všetkých riešení vychádzajúcich s morfolologickej analýzy a rezistívnych terénov.											
Test simulácie	V tejto časti bude simulačný program testovaný a bude kontrolovaná správnosť výstupných hodnôt.											
Simulácia všetkých riešení	V tejto časti sa vykoná simulácia všetkých riešení vychádzajúce s morfolologickej analýzy a rezistívnych terénov.											
<b>III. ETAPA</b> Spracovanie výstupných dát	<b>Popis činností</b>											
Grafické spracovanie výsledkov	V tejto časti budú výsledky spracované do grafické prostredia pre lepšie hodnotenie jednotlivých riešení.											



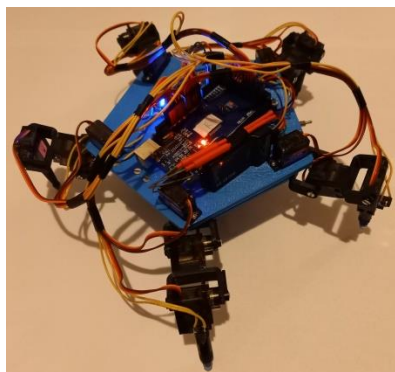


## 7 EXPERIMENTÁLNY ROBOT

Pre lepšie pochopenie fungovania kráčajúcich robotov, bol zostrojený experimentálny robot. Tento experimentálny robot má nezvyčajnú topológiu s piatimi nohami. Voľba práve piatich nôh bola spojená s nedostatkom informácii o päťnohých robotoch a tiež z dôvodu teoretických výhod tejto konštrukcie. Konštrukcia päťnohého robota je podobná s konštrukciou šesťnohého robota, ktorá je tiež schopná mať stály kontakt s terénom v troch bodoch (nohách) a má rovnomerne rozložené nohy. Rozdielom však je menší počet stupňov voľnosti (15) a teda aj pohonov, menšia hmotnosť o jednu nohu, vyššia pohyblivosť [53], rýchlejšie sa pohybujúce nohy vo vzduchu pri rovnakej rýchlosti tela oproti šesťnohému robotu a vyššia nosnosť.

Konštrukcia robota pozostáva s päťuholníkového tela a piatich nôh uložených na cípoch päťuholníka. Každá noha je rovnaká a má tri stupne voľnosti. Stupne voľnosti sú, ako to už býva u kráčajúcich robotov, rotačné väzby, poháňané hobby servo motormi SG90. Rotačné väzby sú rozložené rovnako ako u šesťnohých robotov, a to tak, že prvá rotácia rotuje prvé rameno okolo zvislej osi, druhá rotácia umožňuje druhému ramenu pohybovať smerom nahor/nadol a posedná tretia rotácia pohybuje tretím ramenom do strán a os rotácie je paralelná s osou druhou rotácie. Nohy sú na tretom ramene vybavené spínačom, pre kontrolu kontaktu nohy s povrchom. O riadenie sa stará vývojová platforma Arduino Mega, ktorá ma na svojich 15 PWM svorkách pripojené servo motory, na dvoch komunikačných kanáloch prijímač FlySky IA10B a na piatich digitálnych svorkách kontaktné spínače. O napájanie riadiacej dosky a hobby servo motorov sa stará step-down menič s výstupom 5V a 2A, ktorého zdrojom je trojčlánková Li-on batéria s napätím 11.1V. Pre riadenie robota je použitý kompatibilný vysielač a to FlySky I6X.

Program je napísaný v prostredí Arduino IDE za použitia knižníc Servo.h a I2CBus.h. Riadiaci program je schopný spracovať informácie od vysielača FlySky I6X a na základe týchto informácii, riadiť pohyb robota. Robot sa dokáže simultánne pohybovať v dvoch smeroch vo vodorovnej rovine a zároveň rotovať okolo zvislej osi. Má tiež možnosť naklápať svoje telo okolo vodorovných osí a meniť svoju svetlú výšku. Je teda schopný translácie a rotácie vo všetkých 6 smeroch. Dokáže tiež zvládnuť mierne nerovný terén a to za pomoci snímačov kontaktu nohy s povrchom teréne. Tie pri pokladaní nohy na zem snímajú kontakt a podľa neho sa noha zastaví. Plánovanými vylepšeniami sú ďalšie senzory ako gyroskop a ultrazvukový senzor. Pre riadenie chôdze nie je použitý „general pattern generator“, ale vlastný algoritmus, ktorý v prípade potreby výmeny švihovej a podpornej fázy, vyberie také stabilné rozloženie nôh vo švihovej alebo podpornej fázy, ktoré je pre robota najvýhodnejšie, podľa zostávajúcej vzdialenosti každej nohy do hraničnej pozície.



Obr. 7) Päťnohý robot



## 8 ZÁVER PRE BUDÚCU DIZERTAČNÚ PRÁCU

Tieto tézy k dizertačnej práci spracovávajú súčasný stav kráčajúcich robotov, kriticky ho hodnotia, určujú problém, ciele, etapy a postup dizertačnej práce. Na základe informácii zo súčasného poznania, kde je uvedená stavba, delenia, pohony a krokové cykly kráčajúcich robotova a tiež popísaný rezistívny terén, je vyhotovené kritické hodnotenie.

Kritické hodnotenie dochádza k záverom, že súčasné kráčajúce roboty sú schopné pohybovať sa v rôzne naklonenom a členitom teréne, či po schodoch, bez uvažovania odporu spôsobeného terénom v oblasti nôh či tela. Doterajšie výskumy pracovali s nerezigistívnym terénom a robot sa pohyboval vo vzduchu. Jedinou výnimkou sú roboty pohybujúce sa pod vodou. Nové štúdie, ktoré sa venovali pohybu kráčajúcich robot v rezistívnom teréne definovali matematické rovnice terénu a previedli simuláciu a test jednonohého kráčajúceho robota v tomto prostredí. Problém z pohľadu robota zjednodušili, a nevenovali sa tak robotu ako funkčnému celku. Táto oblasť teda zostáva nevyriešená.

Na základe zistení v kritickom zhodnotení bol formulovaný problém, problémová situácia a systém podstatných veličín. Problém je formulovaný takto: Zaseknutie sa, šmýkanie sa alebo spadnutie kráčajúceho robota v rezistívnom teréne. Táto formulácia poukazuje na nejasnú funkčnosť aktuálnych riešení, pričom jednotlivé existujúce riešenia majú rozdielny počet nôh, počet stupňov voľnosti, rozloženie nôh, krokové cykly a pohony, ktoré môžu pozitívne alebo negatívne vplývať na pohyb v rezistívnom teréne. Analýzou týchto čiastočných problémov je možné prispieť k väčšiemu poznaniu kráčajúcich robot a zjednodušiť proces navrhovania robot určených pre rezistentný terén.

Zvoleným postupom pre riešenie neurčitosti návrhu kráčajúcich mechanizmov je analýza čiastočných problémov a vytvorenie simulácie pre testovanie všetkých riešení a ich objektívne porovnanie. Pomocou týchto informácii je následne možné nájsť optimálne riešenia. Keďže simulácia je presná len do určitej úrovne a pracuje len s matematickými modelmi jednotlivých komponentov je potrebné skonštruovať model s reálnych dielov a opätovne overiť správnosť riešenia.

Táto dizertačná práca má za cieľ okrem nájdenia optimálneho riešenia kráčajúceho robota vytvoriť podklady a závery pre ďalšie pokračovania práce v analyzovaných oblastiach a umožniť tieto informácie rozširovať a vkladať ich do vytvorenej simulácie.



## 9 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/automaton/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](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 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. 2021-04-12]. 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] MORADIAN, S a K MOHAMMADI. The Algorithm of Fault Tolerant Locomotion of Pentapod Robot. In: *2011 21st International Conference on Systems Engineering* [online]. IEEE, 2011, s. 175-179 [cit. 2021-04-18]. ISBN 9781457710780. Dostupné z: doi:10.1109/ICSEng.2011.39