

DESIGN OF SMALL LABORATORY QUADRUPED ROBOT

M. Švehlák, R. Grepl, S. Věchet, M. Bezdíček, J. Chmelíček*

Summary: *In the article is a sum dectripcion of the design of a small quadrupedal walking robot. The aim of the work is to make a physical model for authenticating computational simulation and other problems related with walking robots. The physical model should be noted for simple design, unpretentious production and relatively small financial coast. The physical model is qualified enough to make various experiments. The actuators are concepted in reference to the character of the loading moment.*

Keywords: Walking robot, Quadruped robot, Design of robot.

1. Úvod

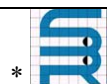
Kráčející mechanismy představují významnou oblast ve sféře mobilních robotů. Avšak i v dnešní době pokročilé robotiky je většina kráčejících robotů pouze laboratorními exempláři. Důvodem jsou vyšší nároky kladené na řízení. Také jejich energetická a konstrukční náročnost je daleko větší než u kolových mechanismů. Svou podobou a způsobem chůze se stále častěji podobají živým tvorům. Kráčivý robot má lepší předpoklady při pohybu v rozmanitém terénu než tradiční kolové nebo pásové podvozky. Podle konstrukce noh lze čtyřnohé kráčivé roboty rozdělit na tři základní typy: „savec“, „hmyz“ a ostatní.

Nejpoužívanější konstrukce nohy:

- noha s dvěma stupni volnosti: - dvě rotační kinematické vazby
- translační kinematické dvojice
- rovinná pantografická
- noha se třemi stupni volnosti: - tři rotační kinematické vazby
- prostorová pantografická

2. Formulace problému a cílů řešení

Pro výzkum v oblasti kráčivých robotů je nezbytné realizovat konkrétní podobu konstrukce. Z tohoto důvodu jsme si kladli za cíl vytvořit fyzikální model robotu, na kterém budou ověřovány výpočtové simulace nebo řešeny jiné problémy související zejména s řízením a detekcí kolizních stavů. Fyzikální model by se měl vyznačovat svou jednoduchostí konstrukce, nenáročnou výrobou, relativně malými finančními náklady, ale přesto dostatečnou způsobilostí k vykonávání rozmanitých experimentů.



Shrnutí požadavků na konstrukci robotu:

- Z důvodu nenákladnosti a jednoduchosti konstrukce jsme se při realizaci omezili na malý čtyřnohý kráčejíci robot. Každé noze bude umožněno pohybu pomocí tří kinematických rotačních vazeb.

-Volba pohonů musela být limitována zejména finančním hlediskem. Možnost aplikace modelářských servomechanizmů jako akčních členů kráčejíciho robotu, se ukázala pro tento účel jako v hodné řešení. Jsou to stejnosměrné elektrické motory. Mají příznivý poměr mezi výkonem a hmotností a jednoduše lze provádět i jejich řízení.

- Dále jsme si kladli za požadavek provést srovnání dvou koncepcí: pohonové jednotky umístěné na nohách versus na těle. Analyzovali jsme vhodné rozmístění baterií po konstrukci robotu s ohledem na příznivý průběh zatěžujících momentů působících na pohony. Tento požadavek předurčuje konstrukci, která musí umožnit umístění baterií nejen na tělo, ale i do noh.

3. Návrh konstrukce a pohonů robotu

3.1. Volba metody řešení problému

Problém výše formulovaný byl řešen na základě jednoduchých dílčích analytických výpočtů. Nemalá část problémů inženýrské praxe se obtížně modeluje. Proto při sestavování dílčích řešení v jedno, bylo někdy použito intuice nebo metody „pokus omyl“.

3.2. Model topologie a geometrie objektu

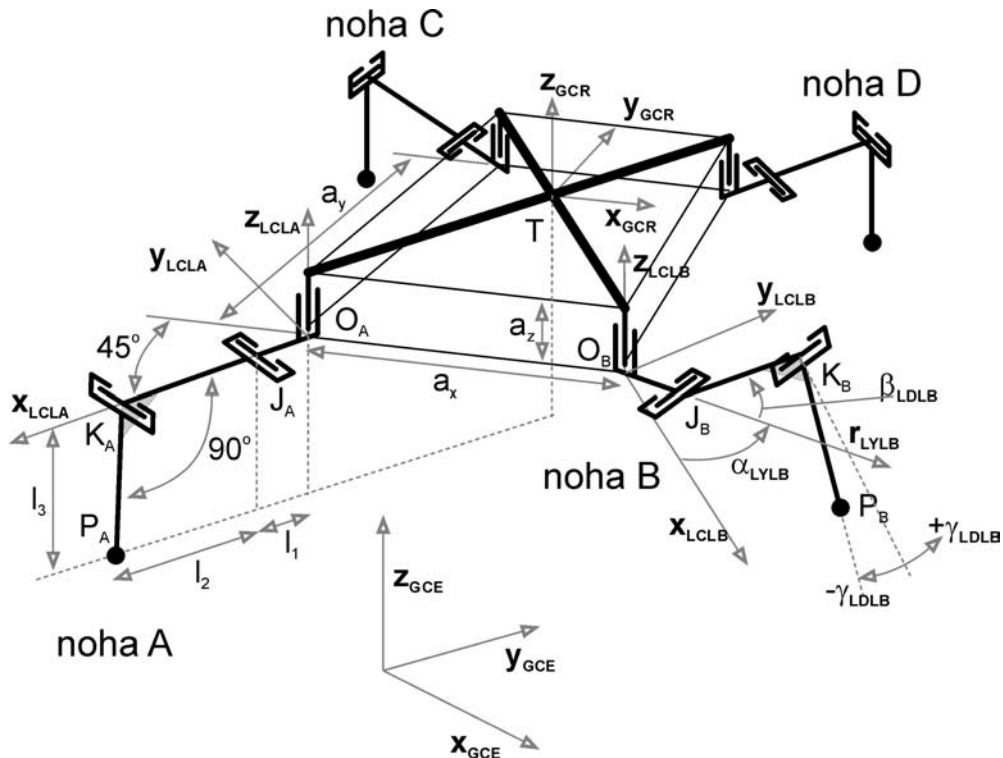
Kráčejíci robot je složen z těchto podsystémů:

- lokomočního
- manipulační nástavby
 - podvozkem
 - pohony

Vlastní konstrukce (podvozek) je tvořena z těla a čtyřech noh. Každá noha má tři stupně volnosti, které byly voleny na základě kompromisu mezi složitostí konstrukce, cenou (zejména pohonů) a dostačujícím potřebám pro experimentální účely. Vzhledem k tomu, že pohony budou tvořeny modelářskými servomechanizmy, není důvod použití jiného než rotačního pohybu bez jeho transformace na translační. Jedná se o tři rotační kinematické vazby. Noha se tedy skládá z lýtka a stehna, kolena a kyčle. Přičemž kyčel zajišťuje dva stupně volnosti. Geometrie těchto hlavních částí nohy, byla po úvaze volena s ohledem na velikosti baterií, tak aby bylo možno jejich umístění do stehna a lýtka. Stehno musí být schopno pojmu jednu a lýtko dvě tužkové baterie velikosti AA.

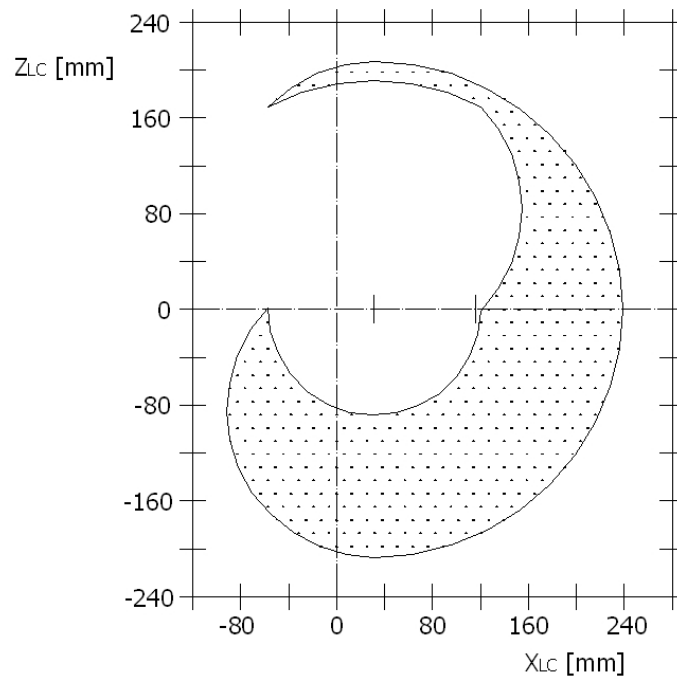
3.3. Návrh kinematiky

Jelikož problémem se zabývá více řešitelů, je nutné aby popis vazeb a souřadné systémy byly jednotné pro všechny. Kinematický popis formulovaného problému lze shrnout do obr. 1.



Obr. 1. Souřadné systémy a popis vazeb. [1]

Pracovní prostor nohy



Obr. 2. Pracovní prostor nohy v rovině X_{LC}, Z_{LC} .

Konstrukce nohy a omezení v servomechanizmech má za důsledek, že koncový bod může dosáhnout pouze některé souřadnice x,y,z . Obálka těchto souřadnic se nazývá pracovní prostor nohy. Při uvažování rotace nohy kolem svislé osy Z_{LC} lze pracovní prostor nohy popsat pouze v rovině X_{LC}, Z_{LC} . Celý prostor pak vznikne rotací této plochy kolem osy Z_{LC} na každou stranu o 90° .

Model přímé kinematiky pro jednu nohu

Model přímé kinematiky mechanismu určuje polohu koncového bodu nohy robotu při známých natočeních jednotlivých vazeb O, J, K o úhly α, β, γ a charakteristických rozměrech nohy L_1, L_2, L_3 . Výpočet není obtížný, ale pro potřeby jednoduché změny vstupních hodnot byl proveden v počítačovém prostředí *Matlab Release 12.1*.

3.4. Volba pohonů

Aktivace mechanismu bude realizována pohony, které by měly splňovat následující předpoklady:

- dostatečný výkon
- malá hmotnost
- nenáročnost při řízení
- požadovaná rychlost
- schopnost brzdit setrvačné účinky
- udržení si polohy při zatížení a nulové rychlosti
- spolehlivost

Každý stupeň volnosti bude realizován jedním servomechanizmem. Při volbě pohonů padlo už v kapitole „*Formulace problému a cílů řešení*“ omezení pouze na modelářské servomechanizmy. Ze statických výpočtů a s uvažováním 100% předdimenzování byly voleny výkony servomechanizmů. Dostatečnou rezervu musel mít jejich maximální dosažitelný kroučící moment. Výrobce udávané hodnoty nemohly být vzaty v úvahu pro jejich návrh. Důvodem bylo zjištění provedené experimentem, že při maximálním momentu se pohon nechoval dynamicky. Tudíž po zvážení okolností musela být v tomto ohledu ponechána 50% rezerva.

3.5. Srovnání koncepce: pohonové jednotky umístěné na nohách versus na těle

Pohonové jednotky umístěné na těle robotu:

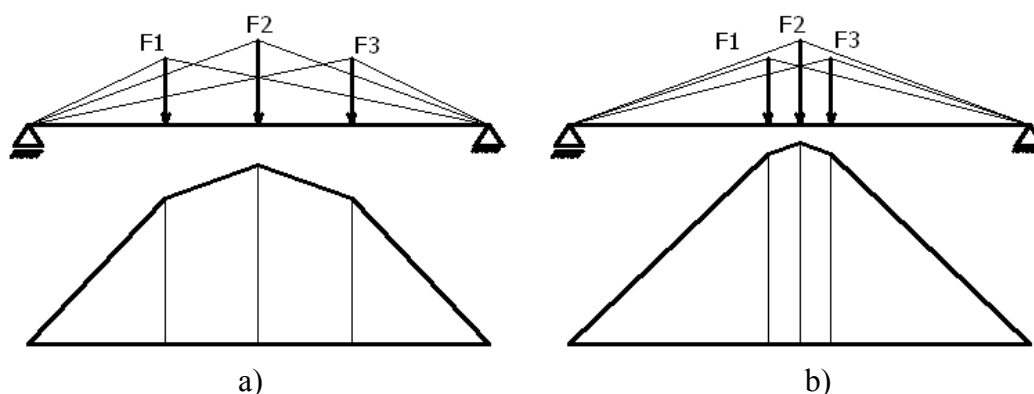
Nutnost dopravy energie od akčního členu, k členu mající konat pohyb. Z toho vyplývá potřeba zavedení nejrůznějších převodů, pák, trubek a jiných přenosných médií. Tímto se konstrukce stává složitější a hmotnější, výroba takové konstrukce je nákladnější, nehledě na ztráty způsobené těmito převody. Důsledkem může být větší nespolehlivost bezporuchové činnosti konstrukce jako celku.

Pohonové jednotky umístěné na nohách robotu:

Konstrukce pohonu musí umožňovat přímé napojení na členy mající vykonávat pohyb. Více hmotnosti rozložené po nohách konstrukce umožňuje, aby tělo mohlo nést větší zátěž. Nemusí se vždy jednat o náklad, ale např. může jít o sensorické vybavení nebo řídicí členy.

Pohony se velkou částí podílejí na hmotnosti celé konstrukce, proto je důležitá otázka jejich umístění na konstrukci. Na obr. 3. jsou znázorněny dvě různé varianty rozmístění sil na nosníku. Umístíme-li na nosníku ty samé velikosti sil blíže k jeho středu, moment v místech působitě těchto sil vzroste. Pokud budeme uvažovat, že nosník je tělo robotu a síly F_1 a F_3 jsou gravitačními účinky vyvolané servomechanizmy, můžeme stejnou myšlenku aplikovat na vliv umístění pohonů po konstrukci. Protichůdným jevem je stav robotu, kdy uvažujeme zvednutí jedné nohy. V tomto případě zatěžující moment působící na servomechanizmy je tím větší, čím jsou vzdálenější od těla. Srovnáním jsme dospěli k závěru, že pro náš konkrétní případ je vhodnější umístění pohonů přímo na nohy.

Jednoduchými výpočty jsme dospěli k závěru, že umístěním pohonů na tělo robotu zvyšujeme požadavek na jejich momentové charakteristiky, potažmo jejich potřebný výkon. Proto bylo rozhodnuto ve prospěch koncepce umísťující pohony přímo na nohy robotu.



Obr. 3.

3.6. Vhodné umístění baterií po konstrukci robotu

Provedeme stejným způsobem jakým jsme porovnali vhodnost umístění pohonů. Pomocí srovnání dvou stavů momentové charakteristiky se určí vhodné rozmístění bateriek po konstrukci. Při prvním stavu jedna noha robotu není v kontaktu se zemí, ostatní jsou. Druhý stav představuje úsek chůze, kdy všechny nohy jsou v kontaktu se zemí. Pokud se momentové charakteristiky takto popsaných stavů shodují, minimalizovali jsme požadavky na energetickou náročnost servomechanizmů. Při úvahách nebylo uvažováno s dynamikou pohybu. Realizace tohoto záměru předpokládá konstrukci, která umožňuje umístění baterií do noh i na tělo, což tato konstrukce umožňuje.

3.7. Pevnostní výpočty a volba materiálu

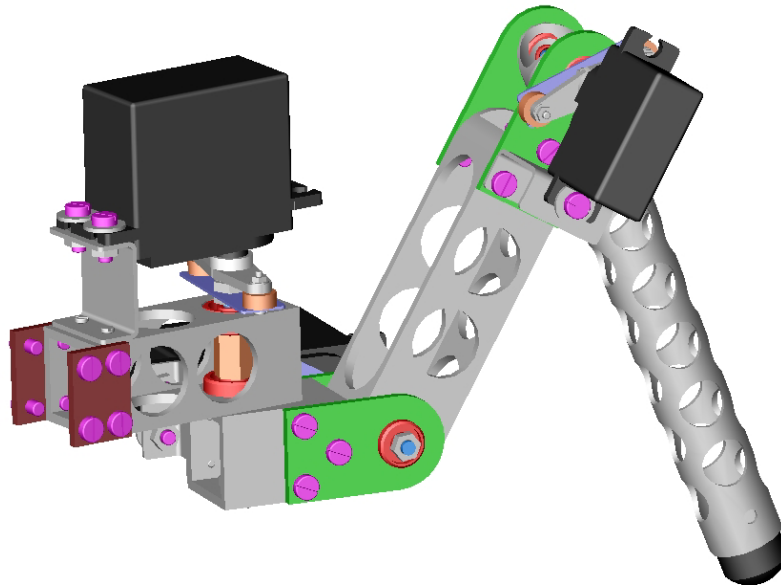
Cílem bylo dimenzovat hřídelky v jednotlivých vazbách O, J, K, které přenášejí kroutící moment ze servomechanizmů. Výpočet hřídelek namáhaných na krut se provedl analyticky. Dále byla zkontrolována vhodnost použitých hliníkových profilů z hlediska charakteru zatížení konstrukce.

Materiál

Po zvážení těchto vlastností a požadavků: pevnosti, hustoty, dostupnosti, tuhosti, ceny, obrobitelnosti, nenáročnosti při výrobě konstrukce; byl zvolen profilový hliníkový materiál. Tato volba umožňuje umístění baterií nejen na tělo, ale i do noh. Profily byly vybírány s ohledem na velikosti baterií, což umožní jejich zavedení dovnitř profilů.

3.8. Vizualizace modelu geometrie

Nyní můžeme přistoupit k návrhu geometrie robotu včetně konstrukčních a technologických úprav. Model geometrie byl realizován v CADovském systému *SolidWorks 2001*. Tímto způsobem byla získána dokonalá vizuální představa o konstrukci včetně smontovatelnosti jednotlivých komponent a kolizních stavů. Tento software dále umožňuje počítání fyzikálních vlastností objektů. Nejdůležitější byly: hmotnosti dílů, poloha jejich těžiště, osy a momenty setrvačnosti. *SolidWorks* umožňuje takto vytvořený model exportovat do programu *SimMechanic*, který slouží k simulaci statických, kinematických a dynamických vlastností mechanismů.



Obr. 4. Vizualizace konečné podoby nohy robotu

4. Realizace fyzikálního modelu robotu a prezentace výsledků řešení

Dříve než byla započata realizace fyzikálního modelu, byl vyroben prototyp jedné nohy, na které by bylo možno experimentálně zhodnotit charakter návrhu konstrukce. Základní díly byly vyrobeny na frézce, kde bylo dosaženo větší přesnosti za kratší výrobní čas. Při sestavení všech komponent a odzkoušení, byly zjištěny nedostatky, zejména byl špatně vyřešen přenos krouticích momentů ze servomechanismů na pohyblivé části, proto serva prokluzovala. To se vyřešilo pájením prokluzávajících částí, za současného dodržení požadavku nedestruktivní rozebíratelnosti konstrukce.

Po drobných konstrukčních úpravách byl proveden vlastní experiment. Úkolem bylo ověřit správnost navržených pohonů, zda mají dostatečně velký krouticí moment na danou konstrukci a způsob zatížení. Zkouška dopadla úspěšně, proto bylo rozhodnuto, že budou vyrobeny ostatní nohy a tělo robotu bez většího zásahu do konstrukce.

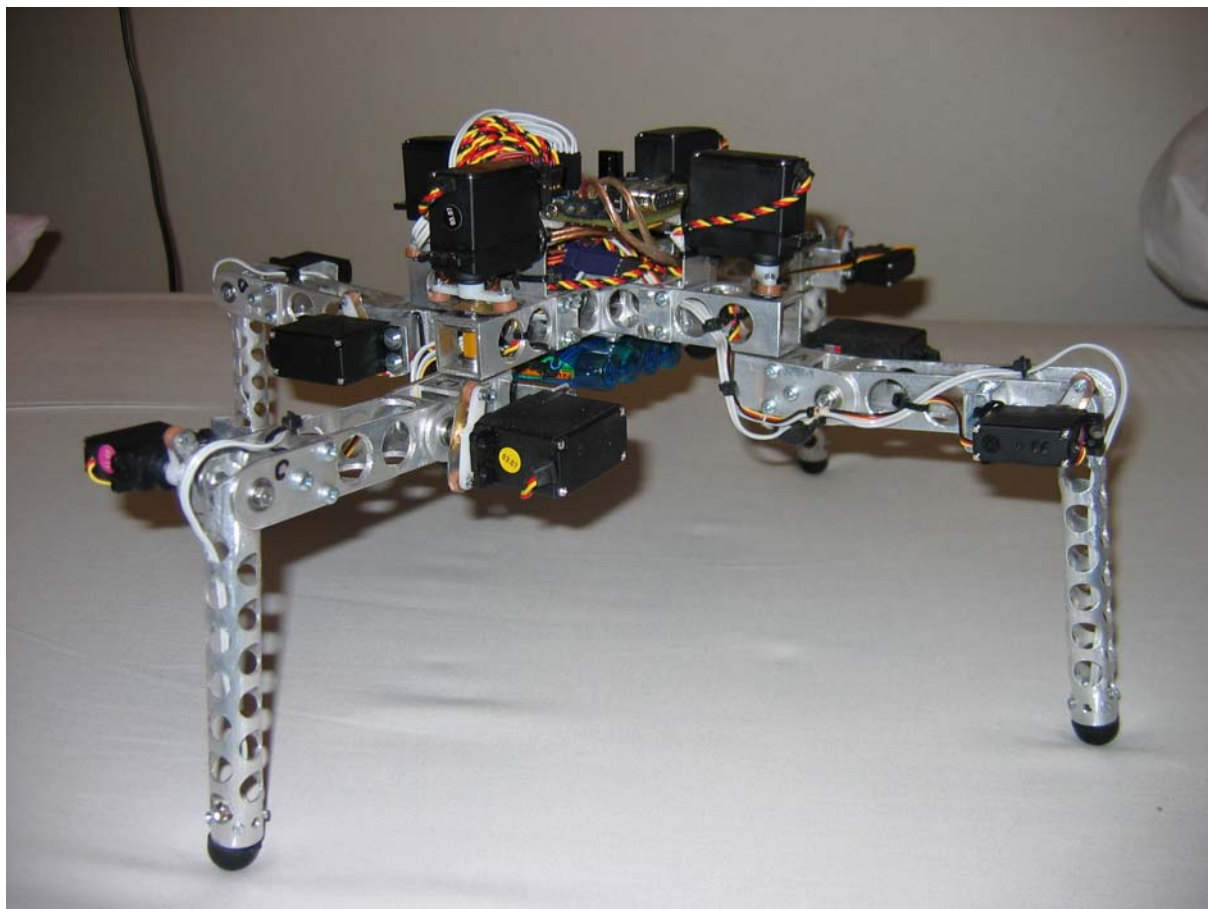
Vytvořený fyzikální model svým kinematickým rozsahem noh a variabilitou těla, umožňuje sestavit konstrukci, která dovoluje model robotu „savec i hmyzu“. Avšak pro praktické aplikace, model konstrukce nohy typu „savec“, by bylo potřeba řešit s více stupni volnosti než se třemi.

Samotná konstrukce je odlehčena, čímž se ušetřilo asi 40 % hmotnosti na hliníkových profilech. Experimentem zjištěná nosnost robotu, tzn. kdy se bez obtíží zvedne a může bezproblémově chodit je 300g, což činí 27 % z jeho hmotnosti. Fyzikální model je dostatečně tuhý a odolný.

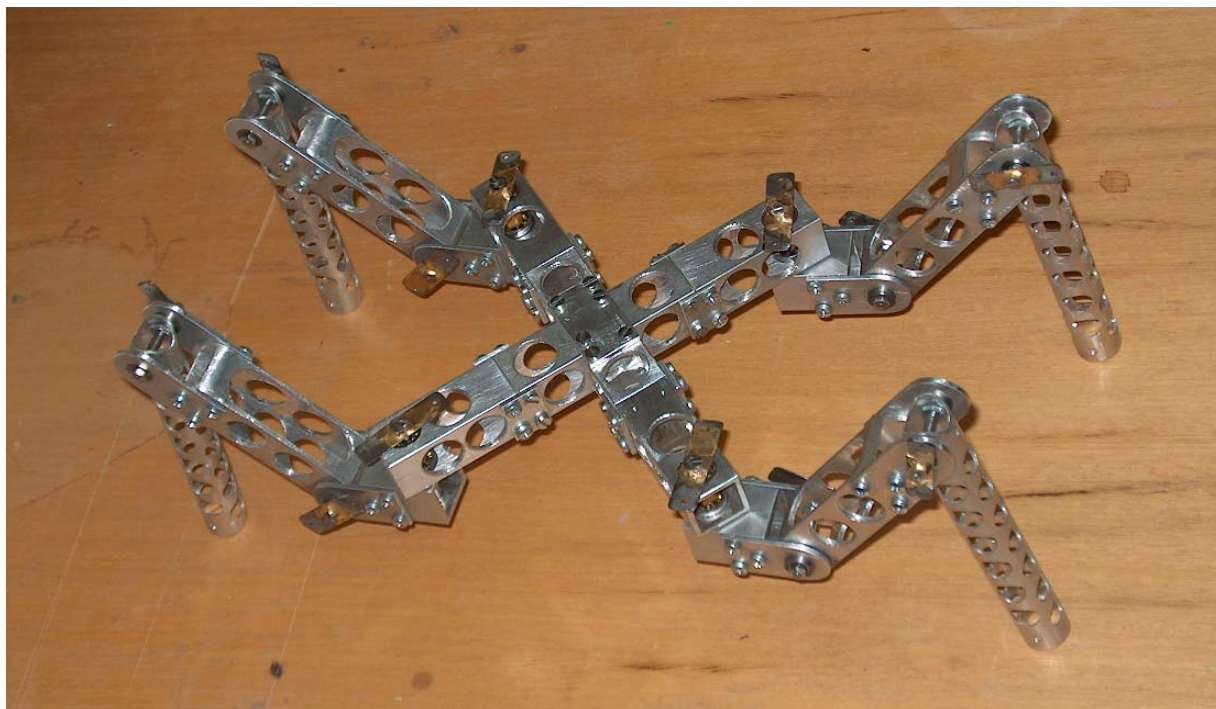
| Parametr | hodnota | jednotka |
|----------------------------------|----------|----------|
| Délka** | 0,4 | [m] |
| Šířka** | 0,4 | [m] |
| Výška** | 0,2 | [m] |
| Celková hm. robotu včet. baterií | 1,1 | [kg] |
| Nosnost | 0,3 | [kg] |
| Druh pohonu | DC-serva | |
| Hmotnostní podíl pohonů | 0,4 | [kg] |
| Napájení (interní) | 4,5-6 | [V] |
| Počet stupňů volnosti | 12 | [°v] |

**Hodnoty délka, šířka a výška jsou pro křížové tělo malého provedení v poloze dle Obr.5.

Tab. 1. Základní vlastnosti vytvořené konstrukce



Obr. 5. Konečná podoba fyzikálního modelu robotu



Obr. 6. Zhotovená konstrukce ještě před umístěním servomechanizmů

5. Závěr

V článku byla stručně popsána konstrukce malého čtyřnohého robotu. Návrh konstrukce a zejména jeho realizace byla s úspěchem provedena. Robot v současnosti slouží experimentálním účelům [1], [2], [3]. Nenáročnost konstrukce i po její finanční stránce byla dodržena.

6. Poděkování

Práce vznikla za podpory pilotního projektu ÚT AV ČR č. 52020 „Realizace základních řídicích členů kráčivého robotu“ a projektu MŠMT MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“.

7. Literatura

- [1] Grepl R., Věchet S., Bezdíček M., Švehlák M., Chmelíček J., : *Control of experimental walking robot using simulating model*, Inženýrská mechanika 2004, Svratka, ČR, 2004
- [2] Bezdíček M., Grepl R., Švehlák M., Chmelíček J., : *Artificial neural network application to walk of a four legged robot*, Inženýrská mechanika 2004, Svratka, ČR, 2004
- [3] Chmelíček J., Grepl R., Bezdíček M., Švehlák M., : *Collision states detection for quadruped robot motion*, Inženýrská mechanika 2004, Svratka, ČR, 2004
- [4] Karsten B., *Walking machine Catalogue*, <http://www.walking-machines.org/>
- [5] Skalický J.,: *Elektrické servopohony*, 1. vydání, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999, Technická 2, ISBN 80-214-1484-7, 86 stran.
- [6] Valášek M. a kolektiv, *Mechatronika*, Vydavatelství ČVUT, Praha 6, 1. vydání 1995, ISBN 80-01-01276-X, 153 stran.