

Řízení robota typu hexapod

Zdeněk Pelz



Abstrakt

Tato práce popisuje problémy, se kterými je možné se setkat při programování různých typů pohybu robota typu hexapod, a také obsahuje popis jejich řešení. Dále obsahuje popis stavby těla a analýzu končetin a servomotorů, pomocí kterých se hexapod pohybuje. Součástí článku je i popis inverzní kinematiky používané při pohybu robota pro výpočet pozic jednotlivých servomotorů. Také jsem popsal, jak lze postupovat při detekci překážky a jakým způsobem je možné ji obejít. Při práci na tomto článku jsem pracoval s robotem typu PhantomX AX Hexapod Mark II. Jedná se o šestinožého robota s třemi stupni volnosti na každé končetině.

Klíčová slova: Hexapod — Inverzní kinematika — PhantomX AX Hexapod Mark II

Přiložené materiály: [Demonstrační video](#)

spelzz00@stud.fit.vutbr.cz, *Fakulta informačních technologií, Vysoké učení technické v Brně*

1. Úvod

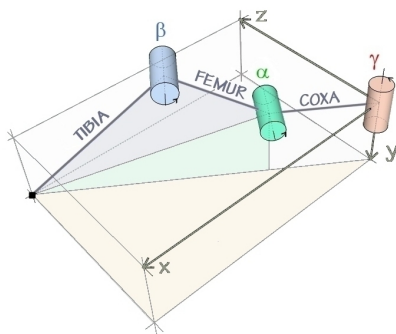
Výzkum nových technologií a robotika jdou ruku v ruce, není se tedy čemu divit, že s příchodem nových technologií přichází i nové způsoby řízení a konstrukce nových druhů robotů. To se týká hlavně robotů s kráčivým podvozkem. Oproti robotům s kolovým nebo pásovým podvozkem mají roboti s kráčivým podvozkem tu výhodu, že mohou přelézat překážky, které by roboti s jiným typem podvozku museli objet nebo překonat jiným způsobem a tím si prodloužit cestu k cíli. Tato vlastnost jim dává větší přizpůsobivost danému terénu a dělá je vhodnějším pro pohyb ve členitém terénu [1]. Jedním z případů jsou i roboti typu hexapod. Hexapodi, ze všech robotů s kráčivým podvozkem, poskytují největší rychlost a stabilitu v poměru k počtu končetin. Proto je tedy značná většina výzkumů, které se zabývá kráčivými podvozky, orientovaná právě na hexapody.

Pro pohyb hexapoda slouží servomotory umístěné na jeho končetinách. Každá končetina má tři servomotory, což dává dohromady celkem 18 pohonných jed-

notek. Při řízení je tedy třeba spočítat všech 18 nových hodnot pro jednotlivé servomotory. Tyto hodnoty se musí před samotným provedením kroku spočítat, což může být bez správného postupu problematické. Je také potřeba, aby mohl hexapod s jednotlivými servomotory pohybovat nezávisle na sobě, jinak by mohlo při chůzi dojít k zakopnutí nebo ke klopýtání, popřípadě k ujíždění podkluzování končetin.

Pro počítání těchto hodnot se používá inverzní kinematika. Počítá se různými způsoby, ale všechny způsoby mapují vstupní souřadnice styčného bodu s povrchem terénu v prostoru na výstupní množinu poloh, do kterých se mají otočit jednotlivé servomotory.

Díky malému počtu stupňů volnosti (viz Obr. 1) používám algebraické metody pro zjištění vhodných poloh servomotorů. Algebraickou metodou dostanu soustavu rovnic s takovým počtem rovnic jako je počet servomotorů ovládajících jednu končetinu. Toto řešení je ideální pro menší počet servomotorů, protože obtížnost algebraického řešení stoupá s každým dalším ser-



Obrázek 1. Končetina hexapoda se třemi stupni volnosti.

vomotorem. Řešení je pak možné aplikovat na všechny ostatní končetiny, ovšem s jinými vstupními parametry. V mém případě jsou to tři rovnice, protože mám tři servomotory na končetině. Algebraické metody je možné aplikovat až do šesti stupňů volnosti, ale záleží to na každém konkrétním případě. Pro vyšší stupně již není možné takto triviálním způsobem najít řešení nebo zjistit, zda vůbec existuje.

Pokud není možné použít algebraické řešení, pak je nutné použít některou z numerických metod. Jedna z možností řešení tohoto problému je například použít Jacobiho inverzní metodu. Pro použití Jacobiho inverzní metody musí být ovšem splněno několik předpokladů. Jedním z problémů může být, že metoda používá inverzi matic. V některých případech nemusí být možné tuto matici invertovat. Tato matice taky roste s každým dalším stupněm volnosti, takže se může stát, že metoda bude časově velmi náročná [2].

Další možnost řešení inverzní kinematiky je CCD (Cyclic coordinate descend). Metoda je vhodná pro jednoduché objekty. Ovšem pozice se počítají od počátku tělesa, v našem případě končetiny, takže může zbytečně přepočítat polohu celého tělesa místo pohybu pouze jedním servomotorem. Pokud není možné použít Jacobiho inverzní metodu, je možné použít Jacobiho transpozici. Tato metoda má podobné nedostatky jako původní Jacobiho metoda, ale nemusí se u této metody invertovat matice, což je velkou výhodou [3].

2. Konstrukce těla hexapoda

Stavba hexapoda je inspirována hmyzem. Proto není žádným překvapením, že jak stavba jeho těla tak i stavba končetiny jsou hmyzu velmi podobné. Zejména jsou hexapodi podobní mravencům kvůli stejnému počtu končetin. Podle toho kolik je pro pohybování s končetinou využíváno servomotorů říkáme, že hexapod má tolik stupňů volnosti, kolik má jedna končetina servomotorů.

Aby ovšem nedocházelo k nechtěnému ujíždění

stýčných bodů po povrchu terénu, měla by mít končetina alespoň tři stupně volnosti, čili tři servomotory. První servomotor, které bude s končetinou pohybovat v horizontální rovině tj. dopředu a dozadu, druhý servomotor, který bude pracovat ve vertikální rovině a tím pádem pohybovat s končetinou nahoru, a dolů a třetí servomotor, který bude kompenzovat pohyb dvou předchozích a zabraňovat bodu, na kterém končetina stojí, v nechtěném pohybu a klouzání po povrchu terénu.

Jeden servomotor je vždy umístěn v blízkosti těla hexapoda. Ten, který je určen pro pohyb končetiny dopředu a dozadu. Na samotných končetinách jsou tedy umístěné pouze dva servomotory. Tyto dva servomotory rozdělují končetinu na tři části: coxa, femur a tibia.

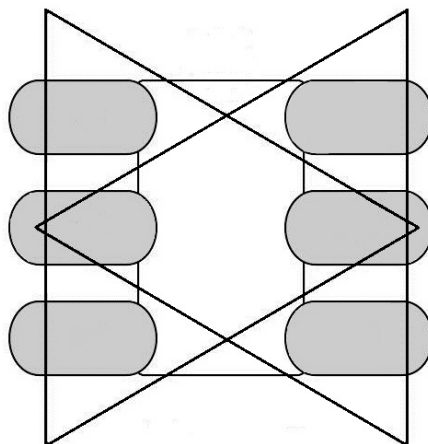
Při přirovnání k lidské noze můžeme říci, že serva ovládající coxu a femur u člověka představují kyčelní kloub a tibia je kolenní kloub. Protože má hexapod více končetin než člověk, stačí mu k udržení rovnováhy stát pouze na jednom bodě, nikoliv na celém chodidle, proto je kotník a celé chodidlo zbytečné. Může ovšem při pohybu členitým terénem zlepšovat stabilitu celého robota tím, že celá váha nebude soustředěna v jednom bodě, ale bude rozprostřena po celé ploše chodidla. Tímto se například zabrání uskakování malých částic rozmístěných po povrchu terénu.

3. Pohyb hexapoda

Roboti typu hexapod mají tři základní typy pohybu, tripod, vlna a vlnění [4]. Tyto typy se používají zejména při pohybu po rovině. Pro pohyb na členitém terénu se většinou volí pozice končetiny dynamicky podle okolního terénu a podle toho, kam je zrovna možné nakročit.

3.1 Tripod

Pro udržení rovnováhy stačí, aby hexapod stál na třech končetinách. Tripod spočívá v rozdělení končetin na



Obrázek 2. Seskupení končetin do dvou trojúhelníků.

tři a tři, se kterými se pohybuje zároveň. Končetiny jsou rozdělené do 2 trojúhelníků (viz Obr. 2). Přední a zadní končetina na jedné straně a prostřední končetina na straně druhé. Hexapod na jedné skupině končetin v trojúhelníku stojí a provede na nich samotný krok a končetiny v druhém trojúhelníku přesouvá na pozice, na kterých bude stát v příštím kroku. Potom po ukončení jednoho kroku přeneše váhu na nakročené končetiny a zbylé tři končetiny zvedá a přesouvá pro další krok. Pro přenesení váhy je nutné, aby hexapod stál na všech šesti končetinách, aby nedocházelo k zakolísání. Při opakování tohoto pohybu potom dochází k chůzi.

Tripod je nejrychlejším pohybovým algoritmem, ale nejméně stabilním. Tři končetiny jsou minimální počet pro udržení rovnováhy a další typy chůze stojí na více končetinách. Krok provádí na třech končetinách.

3.2 Vlna

Tento typ chůze se zaměřuje na co největší stabilitu. Pohybuje pouze jednou končetinou v daný okamžik. Teprve až dokončí nakročení na pozici začne hýbat další končetinou. Je také nejpomalejší pro situace, kde stabilita není prioritou např. při pohybu po rovině. Využívá se více při pohybu v členitém terénu, kde je riziko “upadnutí” větší.

3.3 Vlnění

Vlnění je typ chůze, který je podobný vlně. Při chůzi stojí současně na čtyřech končetinách. V okamžiku, kdy dokračuje končetinou na pozici tak již začíná nakračovat další končetina. Provádí tedy nakračování dvěma končetinami současně. Vždy jsou ve vzduchu zároveň končetiny protějších stran, což zvyšuje stabilitu. Když rozdělíme končetiny na levou a pravou stranu, tak při chůzi je jedna strana oproti druhé fázově posunuta o 180 stupňů, cyklus levé strany končetin začíná přesně v půlce průběhu cyklu pravé strany.

3.4 Rychlost

Nejrychlejší ze zmíněných algoritmů je tripod, který dokončí jeden krok za dva cykly. Nejpomalejším algoritmem je vlna, která potřebuje na vykonání jednoho kroku šest cyklů. Vlnění díky překrývání jednotlivých nakročení dokončí krok za tři cykly.

Rychlost může být ovlivněna dvěma způsoby. Prodloužením délky kroku nebo zvýšením frekvence chůze.

3.5 Stabilita

Nejstabilnější z algoritmů je vlna, která zvedá vždy pouze jednu končetinu. Při pohybu tedy stojí na pěti zbývajících končetinách. Vlnění je druhým nejstabilnějším druhem chůze, kdy jsou ve vzduchu dvě

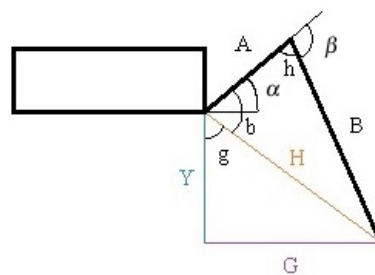
končetiny, ale vždy když je jedna končetina ve vzduchu, tak předchozí končetina už dokračuje a následující končetina se připravuje ke kroku. Stojí tedy vždy nejméně na čtyřech končetinách. Tripod je nejméně stabilní stojící pouze na třech končetinách.

4. Inverzní kinematika

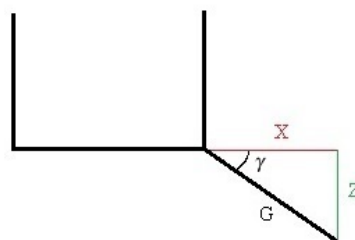
Aby se mohl hexapod volně pohybovat, musí být schopen pohybovat všemi servomotory nezávisle na sobě. Inverzní kinematika umožňuje najít takové polohy servomotorů, které vyhovují dané poloze robota a tímto také volně kontrolovat celý jeho pohyb [5]. Když jediné nad čím má programátor kontrolu jsou servomotory, tak nelze jinak určit na jaké místo má robot nastavit končetinu. Jako vstup jsou používány polohy styčných bodů končetiny, na kterých robot stojí a výstupem jsou polohy, na které je potřeba dostat jednotlivé servomotory. Samotnou pozici končetiny můžeme chápat jako výsledek natočení všech servomotorů ovládajících jednu končetinu.

Protože bylo možné vypočítat jednotlivé hodnoty pomocí algebraických metod, bylo zbytečné použít jakoukoliv z numerických metod. Pro výpočet požadovaných úhlů jsem použil trigonometrické funkce, pomocí kterých jsem pak vyjádřil a spočítal jednotlivé úhly tak, že výsledné hodnoty jsou přímo použitelné pro nastavení servomotorů hexapoda.

Za předpokladu, že platí označení stran na obrázcích (3) a (4) jsem při řešení výpočtů inverzní kinematiky použil následující rovnice pro získání hodnot požado-



Obrázek 3. Pohled na levou přední končetinu zepředu.



Obrázek 4. Pohled na levou přední končetinu shora.

vaných úhlů α , β , γ :

$$G = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1)$$

$$H = \sqrt{Y^2 + G^2} \quad (2)$$

$$b = \arccos\left(\frac{A^2 + H^2 - B^2}{2AH}\right) \quad (3)$$

$$h = \arcsin\left(\frac{H \sin(b)}{B}\right) \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{G}{Y}\right) + b - 90 \quad (5)$$

$$\beta = h - 180 \quad (6)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{X}{Z}\right) \quad (7)$$

5. PhantomX AX Hexapod Mark II

Jedná se o výrobek firmy Trossen Robotics¹, která jej prodává jako jeden ze své kolekce robotických kitů dostupných pro širokou veřejnost. Kit je vybaven mimo jiné servy Dynamixel AX-12A² a ovladačem Arbotix Commander³, kompatibilním s Arduino deskami⁴, určeným pro dálkové ovládání hexapoda. Robot je nutné prvně sestavit. Kvůli úspoře místa je totiž dodáván rozložený. Složený robot je zobrazen na Obrázku 5 připraven v postoji typickém pro hexapody, kdy jsou končetiny stočeny do charakteristického esíčka.



Obrázek 5. PhantomX AX Hexapod Mark II.

¹<http://www.trossenrobotics.com/hex-mk2>

²<http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-ax-12-robot-actuator.aspx>

³<http://www.trossenrobotics.com/p/arbotix-commander-gamepad-v2.aspx>

⁴<https://www.arduino.cc/>



Obrázek 6. ArbotiX Commander ovladač s připojeným komunikačním modulem XBee.

5.1 Servomotory Dynamixel AX-12A

Servomotor AX-12A má možnost měřit svoji vlastní rychlost, teplotu, úhel natočení, napětí a zatížení. Servomotor má vlastní mikrokontroler, který se stará o výše zmíněné hodnoty, které za běhu aktualizuje, a také může měnit rychlost pohybu. Hlavní mikrokontroler se tedy může zabývat jinými výpočty a může nechat vykonávání jednotlivých rozkazů na samotných servomotorech. Mají rozsah otáček až 300°. Doporučené napětí je 11.1 V [6].

5.2 ArbotiX Commander

ArbotiX Commander⁵ je kontroler, který byl speciálně navržen pro ovládání robotů. Používá sériové rozhraní XBee⁶ pro komunikaci s ostatními zařízeními. Může být ovládán dvěma joysticky a má k dispozici 8 programovatelných tlačítek. XBee komunikační modul není součástí balení.

6. Senzor SRF08

Senzor SRF08 je sonar určený pro dálkové snímání. Standartně je jeho maximální dosah jedenáct metrů, ale je možné tuto hodnotu zvýšit nebo snížit podle hodnoty zadané do jeho řídicího registru. Pokud je tato vzdálenost menší, sonar je schopen měřit s větší frekvencí a naopak [7]. Jedná se o ultrazvukový senzor, snímající zvuk odražený od případné překážky. Vzdálenost se potom počítá podle času, za který zvuk ze sonaru dorazil k překážce, odrazil se a vrátil zpět k sonaru. Sonar komunikuje s mikrokontrolerem pomocí I2C sběrnice.

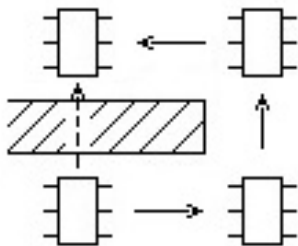
⁵<http://www.trossenrobotics.com/p/arbotix-commander-gamepad-v2.aspx>

⁶<http://www.trossenrobotics.com/store/p/5200-XBee-1mW-Communication-Module.aspx>

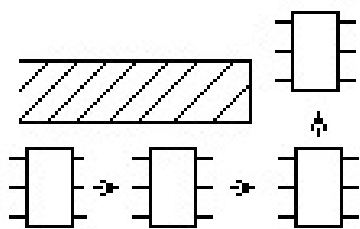
7. Pohyb mezi překážkami

Senzory umožňují hexapodovi detekovat a tím obcházet některé překážky, které jsou dost velké na to, aby je senzor zachytil. Protože nemá hexapod žádné tlakové senzory na konci končetin, je pro něj nemožné přecházet překážky a udržovat při tom stabilitu těla. Hexapod tedy musí všechny překážky, které jeho senzory zachytí, obcházet.

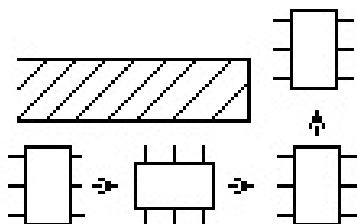
Samotný pohyb hexapoda je nastaven tak, že hexapod bude pokračovat v pohybu dopředu, dokud senzory nezachytí překážku. Pokud se taková překážka objeví, hexapod zvolí cestu okolo dané překážky podle toho, zda je vůbec možné tuto překážku obejít zleva nebo zprava tj. zda mu v pohybu okolo překážky jedním nebo druhým směrem nebrání další překážky. Pokud nalezne takovou cestu, bude pokračovat v chůzi podél překážky, dokud tato překážka neskončí. Pokud narazí na konec obcházené překážky, za překážkou se pohne o takový počet kroků, který byl nutný vykonat při obcházení překážky doleva nebo doprava, opačným směrem. Po ukončení pohybu okolo překážky se bude tedy nacházet v takové pozici, jako kdyby prošel přímo přes překážku (viz Obr.7).



Obrázek 7. Pohyb okolo překážky



Obrázek 8. Obcházení překážky bez rotace.



Obrázek 9. Obcházení překážky s rotací.

Pokud hexapod narazí na překážku, může ji obejít tak, že se nebude nijak otáčet a půjde bokem na jednu nebo druhou stranu, podle toho která je výhodnější, dokud překážka neskončí (viz Obr. 8), nebo nebude nutné změnit směr. Také se může hexapod, při detekci překážky, otočit o určitý počet stupňů a pokračovat v cestě podél hrany překážky, dokud překážka neskončí (viz Obr. 9), nebo dokud nebude nutné znovu změnit směr.

Někdy se může stát, že senzory překážku nezachytí, např. proto, že je překážka moc nízká. V takovém případě může dojít k nežádoucí změně směru pohybu hexapoda.

8. Závěr

V tomto článku byly popsány nejpoužívanější typy chůze, některé problémy s jejich implementací pro robota typu hexapod a navrhnul jejich řešení. Dále jsem popsal řešení problémů spojených s inverzní kinematikou a představil robota, se kterým pracuji, jeho stavbu a možnosti ovládání.

Dále jsem popsal senzory používané pro orientaci v prostoru a způsob, jakým se hexapod může vyhýbat překážkám a jak je může obcházet.

Robot PhantomX AX Hexapod Mark II může chodit a různým způsobem měnit směr pohybu po rovném povrchu. Robot však nemůže přecházet překážky kvůli absenci dotykových senzorů.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Marku Žákovi za jeho odborné vedení, ochotu a konstruktivní kritiku při práci.

Literatura

- [1] Melany L. Hunt. *Robotic walking in the real world*, volume 339. Science, 2013.
- [2] Samuel R. Buss. Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods, October 2009.
- [3] L. Bařinka and R. Berka. Inverse kinematics - basic methods.
- [4] Xilun Ding, Zhiying Wang, Alberto Rovetta, and J. M. Zhu. *Locomotion Analysis of Hexapod Robot, Climbing and Walking Robots*. 2010.
- [5] Abdullah Aamir Hayat, Ratan O. M. Sadanand, and Subir. K. Saha. Robot manipulation through inverse kinematics. In *Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, 2015.
- [6] *ROBOTIS e-Manual*, 1.27.00 edition, 2010.

[7] Srf08 ultra sonic range finder technical specification. <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf08tech.html>.