



Vybrané problémy kinematiky štandardných kolesových podvozkov mobilných robotov

Analýza súčasných riešení mobilných servisných robotov (MSR) dokumentuje, že kolesové podvozky sú v súčasnosti najčastejším riešením lokomócie. Táto skutočnosť si vyžaduje širšie sa zaoberať problémami riešenia kolesových podvozkov zo všetkých stránok ich potrieb a požiadaviek. Príspevok zhrňa poznatky z oblasti kinematiky kolesových podvozkov.

Dynamický rozvoj mobilných servisných robotov (MSR), najmä v posledných rokoch, prináša okrem iného aj problematiku konštrukčných riešení mobilných podvozkov. Analýza súčasných riešení lokomočných úloh ukázala, že napriek často používaným riešeniam mobilných podvozkov postavených na báze kolies neexistuje ucelená metodika prístupu k ich konštruovaniu.

Vo svojom príspevku uvádzam stručný pohľad na teoretickú a praktickú časť vybraných problémov súvisiacich s konštrukčným riešením kolesových podvozkov.

1. Klasifikácia kolies

Kolesá realizujú prenos hnacej sily (krútiaceho momentu) z pohonu (najčastejšie prostredníctvom prevodových členov medzi pohonom a kolesom) na podložku, po ktorej sa pohybujú pomocou trenia (efekt valenia), a tak udeľujú celému mechanizmu (podvozku) kinetickú energiu. Kolesá možno klasifikovať z rôznych hľadísk, predovšetkým je vhodné ich členiť z hľadiska:

Funkcie v zostave podvozku a mechanike pohybu:

- hnacie – aktívne, poháňané kolesá, priame spojenie s pohonom,
- hnané – pasívne, kolesá bez pohonu,
- smerové/riadiace – aktívne alebo pasívne (riadenie natáčaním pomocou pohonu; riadenie bez natáčania – všesmerové) – zabezpečujú orientáciu (zmenu smeru jazdy) podvozku v operačnom priestore,
- podporné/vlečné – nemajú žiadnu aktívnu funkciu, sú vlečené a podpierajú podvozok, poprípade ulahčujú zmenu smeru jazdy,
- meracie – slúžia na odmeriavanie vybraných kinematických charakteristík pohybu podvozku.

Princípu ich funkčných vlastností:

- štandardné (väčšinou jeden až dva stupne voľnosti),
- všesmerové (minimálne dva stupne voľnosti, umožňujú podvozku meniť smer jazdy bez zmeny jeho orientácie),
- špeciálne (pre špecifické požiadavky pohybu podvozku, prípadne špecifické vlastnosti pri prekonávaní prekážok).

2. Klasifikácia kolesových podvozkov z hľadiska kinematiky pohybu

Podvozok MSR je vo svojej podstate väzbami vzájomne prepojená sústava telies, ktoré sa voči sebe môžu pohybovať s určitým stupňom voľnosti. Na opis týchto relatívnych pohybov je vhodné stanoviť zostavu viazaných súradnicových systémov (s. s.) pre jednotlivé telesá podvozku (obr. 1), z ktorých jeden je hlavný (rám) a naň sa vzťahujú všetky ostatné súradnicové systémy telies obsiahnutých v sústave. Vnútri týchto súradnicových systémov si počas pohybu zachovávajú všetky nepohyblivé časti svoju polohu a orientáciu. Čo sa počas pohybu zmení, je poloha pohyblivých telies voči s. s. rámu, resp. všeobecnému súradnicovému systému.

Súradnicový systém MSR je pevne spojený najčastejšie s ťažiskom podvozku MSR a vzťahuje sa ním voči všeobecnému súradnicovému systému (pevne spojený s priestorom pohybu) polohu a orientáciu MSR v jeho operačnom priestore.



Obr.1 Súradnicové systémy kolesového mobilného podvozku

Koleso – subsystém vytvorený spojením niekoľkých prvkov, sa pre zjednodušenie z hľadiska podvozku MSR ako celku vníma ako jeden objekt s určitým počtom stupňov voľnosti. Pri opise kinematických charakteristík kolesa sa mu pridružuje vlastný súradnicový systém a transformáciou tohto systému do súradnicového systému podvozku sa určuje priebeh jednotlivých kinematických veličín (napr. uhlová rýchlosť kolesa, uhol natočenia). Začiatok tohto súradnicového systému sa umiestni do ťažiska kolesa nachádzajúceho sa na osi jeho rotácie. Umiestnením začiatku súradnicového systému do ťažiska možno značne zjednodušiť väčšinu súvisiacich výpočtov.

3. Odporý pôsobiace na koleso pri jeho pohybe

Pri kolesových podvozoch MSR zohráva koleso významnú úlohu vzhľadom na to, že ako jediný článok celého kinematického reťazca zabezpečuje kontakt podvozku s podložkou. Z tohto hľadiska koleso výrazne ovplyvňuje jazdné vlastnosti podvozku, a teda aj MSR.

Pohyb kolesa po podložke je zložený z postupného translačného pohybu kolesa a rotačného pohybu okolo okamžitého stredy otáčania. Pri valení sa teda koleso otáča okolo tzv. okamžitého stredy otáčania A a dráha prejdená po podložke je rovná dĺžke oblúka uhla φ , o ktorý sa koleso pootočí. Rýchlosť premiestnenia ťažiska kolesa, resp. osi jeho rotácie sa rovná obvodovej rýchlosti kolesa za predpokladu dodržania podmienky valenia. Valiace sa koleso má jeden stupeň voľnosti pohybu ($^{\circ}v$).

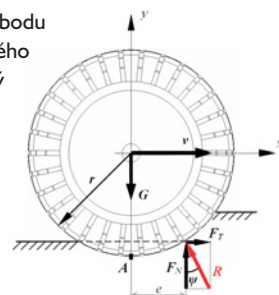
Väzby pri valení:

- ideálna (zanedbávame deformácie a odpor pri valení),
- reálna (pružné koleso na tuhej podložke, tuhé koleso na poddajnej podložke).

Ako príklad reálnej väzby možno uviesť nasledujúce skutočnosti, pričom pri určení Coulombových vzťahov budeme vychádzať zo styku dokonale tuhých telies.

3.1 Tuhé koleso na poddajnej podložke

Vzhľadom na deformácie podložky vzniká z dotykového bodu (pri ideálnej väzbe) dotyková plocha (obr. 2). Zároveň sa normálová reakcia podložky F_N vyvolaná tiažou G posunie z bodu A vždy v smere pohybu o rameno valivého odporu e , čím vyvolá odpor – valivý moment M_v pôsobiaci proti otočeniu kolesa. Valivý odpor je nežiaduci jav, ktorý spôsobuje straty výkonu, preto je vhodné znížiť tento odpor na minimum, resp. zabezpečiť jeho prekonávanie pri zachovaní vonkajších výkonových charakteristík podvozku.



Obr.2 Reálna väzba – poddajná podložka



Kde: G – tiaž pripadajúca na koleso,
 r – polomer kolesa, $r = d/2$,
 v – smer rýchlosti kolesa,
 F_N – normálová reakcia podložky,
 e – rameno valivého odporu (zistuje sa experimentálne a závisí od dotýkajúcich sa materiálov),
 F_T – dotyčnicová reakcia podložky (vzniká jedine počas pohybu, pôsobí proti možnému ušmyknutiu kolesa),
 R – výsledná reakcia podložky,
 ψ – uhol výslednej reakcie podložky,
 A – okamžitý stred otáčania kolesa (referenčný bod),
 x, y – osi s. s. kolesa.

$$\text{Nadvázne možno vyjadriť: } M_v = F_N \cdot e \quad (1)$$

$$\text{a vzhľadom na reakciu podložky platí: } F_N = G \quad (2)$$

Dotyčnicová reakcia F_T spolu s normálovou reakciou F_N vytvára výslednú reakciu podložky R , čo sa dá vyjadriť:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{F_T}{F_N} = f_o \quad (3)$$

Následne možno určiť dotyčnicovú reakciu:

$$F_T = f_o \cdot F_N \quad (4)$$

kde f_o je koeficient statického trenia, ak ide o prípad nulovej relatívnej rýchlosti v bode A .

Dotyčnicová reakcia F_T prislúcha situácii, keď v dotykových plochách nenastáva pohyb, ale otáčanie okolo okamžitého streda otáčania A , teda jej pôsobisko má nulovú rýchlosť. Práca dotyčnicovej reakcie je nulová, a preto nie je pasívnym odporom a nemá podiel na výkonových stratách. Vektor tejto reakcie je orientovaný proti možnému ušmyknutiu kolesa, teda môže ísť proti smeru valenia, v smere valenia alebo pri zatažení silovou dvojicou môže byť nulový.

Podmienka valenia:

$$F_T \leq F_N \cdot f_o = F_{T_0} \quad (5)$$

f_o – koeficient statického trenia (vzniká v statickom stave, kde nevzniká trenie z preklzavania),

F_{T_0} – maximálna hodnota dotyčnicovej reakcie (po jej prekročení sa koleso dostane do šmyku).

Pri nesplnení tejto podmienky sa z valivej väzby stane všeobecná väzba a na mieste dotyku A nastáva relatívny pohyb (preklzavanie kolesa – strata prílnavosti = strata výkonu, rýchlosti), ktorému potom zodpovedá trecia sila:

$$F_t = f \cdot F_N \quad (6)$$

f – koeficient šmykového trenia.

Pri rozbehu/brzdení kolesa (resp. všetkých s ním spojených bremien) treba zohľadniť aj zotrvačnosť pohybujúcich sa hmôt.

3.2 Pružné koleso na tuhej podložke

Pri pohybe pružného kolesa po tuhej podložke treba vzhľadom na jeho deformáciu zohľadniť zmenšenie jeho polomeru, resp. polomeru, po ktorom sa koleso reálne odvaluje, čo má priamy vplyv na výslednú rýchlosť translácie kolesa. Tento vplyv sa môže prejaviť najmä pri pohybe na veľké vzdialenosti.

$$r_K = \lambda \cdot r \quad (7)$$

λ – koeficient deformácie obvodu kolesa,

r_K – účinný polomer kolesa,

pričom koeficient deformácie obvodu kolesa je vlastnosťou použitého materiálu.

Ďalším dôležitým faktorom pri pružných kolesách je vnútorné trenie materiálu kolesa, ktoré rovnako prispieva k zvyšovaniu odporu.

4. Kinematika štandardného kolesa

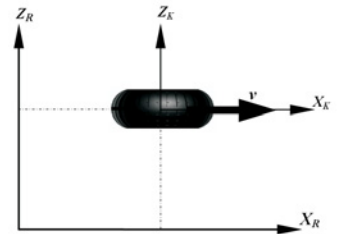
Základným pohybom kolesa je jeho rotácia okolo vlastnej osi (ťažisko kolesa), čím pri kontakte s podložkou (pri dodržaní podmienky valenia) dochádza k translačnému pohybu kolesa po podložke a zároveň všetkých telies s ním pevne spojených (podvozok). Pre zjednodušenie výpočtov možno považovať koleso za teleso pohybujúce sa v rovine.

V súčasnosti najpoužívanejším funkčným princípom kolesa je pre svoju relatívnu jednoduchosť a široký priestor použitia tzv.:

štandardné (konvenčné) koleso (pevné, riadené, vlečné)

4.1 Pevné štandardné koleso

Pevné štandardné koleso (obr. 3) má jeden stupeň voľnosti ($1^\circ v$ – rotácia okolo osi rovnobežnej s podložkou a kolmej na smer translácie, nemení sa orientácia súradnicového systému kolesa voči súradnicovému systému robota). Keďže ide o pohyb po kružnici, charakterizuje sa uhlom pootočenia φ (8), uhlovou rýchlosťou ω (9), uhlovým zrýchlením α (10) a otáčkami n (11). Okamžitá rýchlosť translácie v rovnobežnej osi v smere pohybu podvozku je vyjadrená vzťahom (12) a je rovná obvodovej rýchlosti kolesa.



Obr.3 Pevné štandardné koleso

$$\varphi = \int \omega \cdot dt \quad (8)$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_o}{r} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

$$n = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (11)$$

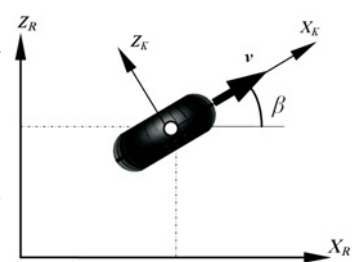
$$v = \omega \cdot r = v_o \quad (12)$$

Prednosťou tohto kolesa je jeho konštrukčná nenáročnosť a plynulý chod s vysokou účinnosťou premeny hnacej energie na translačný pohyb podvozku. Pevné štandardné koleso je v zásade schopné prekonať prekážky do výšky $\sim 1/3$ vlastného priemeru.

Nevýhodou je problematické riadenie orientácie podvozku v operačnom priestore pri použití viac ako dvoch pevných štandardných kolies, kde pri zmene smeru jazdy podvozku nutne dochádza k preklzavaniu jednotlivých kolies a tým aj k značnému zvyšovaniu odporu voči zmene smeru.

4.2 Riadené štandardné koleso

Riadené štandardné koleso (obr. 4) má dva stupne voľnosti ($2^\circ v$ – rotácia okolo osi rovnobežnej s podložkou a rotácia okolo osi kolmej na podložku). Pre rýchlosť translácie rovnobežnej osi platí vzťah (12). Rotácia okolo kolmej osi je väčšinou obmedzená určitým rozsahom tzv. riadiaceho uhla β (obr. 4).

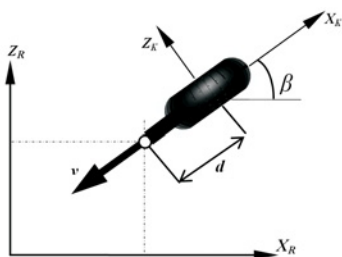


Obr.4 Riadené štandardné koleso

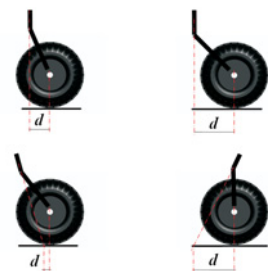
Výhodou je jednoduchá zmena riadiaceho uhla, čo umožňuje zjednodušenie manévrovania podvozku v operačnom priestore. Pri zatačaní sa podvozok otáča okolo tzv. okamžitého streda otáčania (OSO) a nevzniká odpor z preklzavania kolies. Koleso rovnako dobre prekonáva prekážky do výšky $\sim 1/3$ vlastného priemeru.



Nevýhodou je komplikovanejšia konštrukcia a zvýšené nároky na riadenie, kde pri zatáčaní okolo OSO opisujú kolesá krivky s rôznymi polomerami. To vyžaduje plynule diferencovať otáčky kolies a rovnako ich riadiace uhly β , v závislosti od zmeny smeru jazdy podvozku.



Obr.5 Vlečné štandardné koleso



Obr.6 Konštrukčné príklady

4.3 Vlečné štandardné koleso

Vlečné štandardné koleso (obr. 5) má rovnako ako riadené koleso dva stupne voľnosti, pričom rotácia okolo osi kolmej na podložku je vyosená o určitú vzdialenosť d . Ide o pasívne, neriadené a nepoháňané koleso. Toto vyosenie pri vlečení kolesa spôsobuje vznik prídavného momentu, uľahčujúceho jeho orientáciu voči podvozku pri pohybe MSR. Je citlivé na zmenu smeru jazdy a rovnako uľahčuje orientáciu podvozku v operačnom priestore, nemá však žiaden vplyv na polomer zatáčania. Koleso opisuje pri zatáčaní rovnakú krivku ako riadené štandardné koleso, oneskorenú o vyosenie d .

Výhodou je jednoduchá konštrukcia umožňujúca podvozku zatáčanie bez preklzovania kolies a zjednodušenie riadenia podvozku pri zatáčaní.

Nevýhodou sa môže stať veľkosť vyosenia d , ktoré pri nedostatočnej dĺžke spôsobuje kmitanie vlečného kolesa a vplyv na stabilitu podvozku závisiacu od polohy kolesa. Veľkosť vyosenia je kolmým priemetom vzdialenosti medzi osou rotácie kolesa a priesečníkom osi, okolo ktorej sa otáča rameno vyosenia d , na podložku, po ktorej sa koleso pohybuje.

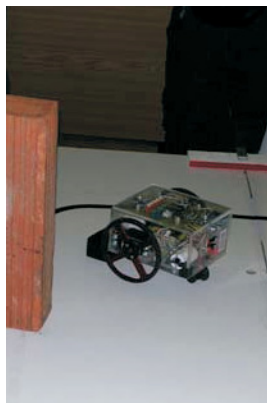
Vplyv na minimálnu potrebnú dĺžku závlak d má najmä hmotnosť vlečného kolesa, rýchlosť jeho translácie a nerovnosti povrchu podložky, po ktorej sa vlečné koleso odvaluje.

Aby sa zabránilo kmitaniu, možno zvýšiť hmotnosť kolesa, zmierniť nerovnosti podložky, zväčšiť závlak vhodným konštrukčným riešením (obr. 6), príp. obmedziť rýchlosť.

5. Príklady využitia štandardného kolesa

Príkladom využitia štandardných kolies sú rôzne aplikácie MSR a iných kolesových podvozkov určených na nosenie technológie, premiestňovanie nákladov či napr. na inšpekčnú činnosť.

SNAIL (obr. 7) je experimentálny robot skonštruovaný na KVTaR TU v Košiciach s cieľom experimentu navigačných systémov. Je postavený na dvojnápravovom podvozku (tricycle). Obe predné kolesá majú vlastný motor a riadením diferenciacie ich vzájomných otáčok sa vykonáva riadenie smeru pohybu robota. Robot sleduje čiaru, ktorá je navigačnou informáciou, pričom reaguje na prekážky na dráhe. Je určený predovšetkým na automatizované premiestňovanie materiálu a dielcov medzi dvoma stanovišťami vo výrobných halách (www.snailbot.wz.cz).



Obr. 7: Robot SNAIL

ORPHEUS (obr. 8) je diaľkovo ovládaný mobilný prieskumný robotický systém určený predovšetkým na prieskum oblastí nebezpečných alebo neprístupných pre človeka; pozostáva z dvoch častí – mobilný kolesový

podvozok (robot) a vzdialené riadiace stanovište. Riadenie vykonáva operátor v reálnom čase pomocou teleoperácie a bezdrôtového obojsmerného prenosu.

Robot MMP8 Inspection (obr. 9) je robotický systém určený na vykonávanie inšpekcie v exteriéri. Svojím deleným podvozkom a po stranách umiestnenými šiestimi nezávisle poháňanými kolesami je schopný prekonávať rôzne druhy prekážok. Je vybavený kamerovým systémom s možnosťou odosielania obrazovej informácie riadiacemu stanovištu.



Obr.8 Robot ORPHEUS



Obr.9 Robot MMP8

6. Záver

Cieľom príspevku bolo poukázať na časť základných problémov súvisiacich s riešením kinematiky podvozkov MSR. Uvedené fakty naznačujú teoretickú aj praktickú časť problému.

Poznámka

Článok prezentuje výsledky, ktoré sú súčasťou riešenia projektu 3/3157/05 podporovaného agentúrou KEGA MŠ SR.

7. Literatúra

- [1] Bartoš, L.: Návrh kolesového mobilného robota pre experiment navigačných systémov. Technická správa DP 004/04, SjF TU Košice, Košice 2004.
- [2] Bartoš, L.: Pohľad na súčasný stav navrhovania mobilných podvozkov. Zborník konferencie doktorandov SjF NOVUS SCIENTIA 2005, s. 23.
- [3] Bartoš, L. – Friga, P.: Poznatky ku kinematike štandardného kolesového podvozku servisných robotov. Zborník konferencie ARTEP 2007
- [4] Burkhard, H. D.: Kognitive Robotik. Berlin: HU 2003.
- [5] Gsöllpointner, S.: Ein 3-dimensionales Modell zur Simulation von Kraftfahrzeugen in Echtzeitanwendungen. DA Johannes Kepler Universität, 2002.
- [6] Hafner, R.: Mobile Roboter. Universität Osnabrück, 2003.
- [7] Kárník, L.: Servisní roboty. Skriptá. ES VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004.
- [8] Novák, P.: Mobilní roboty. Pohony, senzory, řízení. BEN – technická literatura, Praha 2005.
- [9] Siegart, R. – Nourbakhsh, I.: Autonomous Mobile Robots. 2004.
- [10] Skařupa, J. – Mostýn, V.: Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů. Viena Košice, 2002.
- [11] Smrček, J. – Palko, A. – Nemeč, M.: Niektoré problémy navrhovania kolesového podvozku mobilného robota. In: Acta Mechanica Slovaca, roč. 7, č. 3/2003, TU Sjf Košice, Košice 2003, s. 129 – 136.
- [12] <http://autonomousmobilerobots.epfl.ch>
- [13] <http://robotcombat.com>
- [14] <http://www.snailbot.wz.cz>
- [15] <http://www.uamt.feec.vutbr.cz/robotics/index.html>

Ing. Ludomil Bartoš
BWG k.s.

e-mail: ludkoman@yahoo.com