

Koncepce řešení pohonů robotů

Jiří Skařupa

Úvod

Současné roboty, ať již průmyslové nebo servisní, se mohou lišit mimo jiné způsobem umístění pohonů (uvažujeme nyní převážující užití elektropohonů) jejich pohybových jednotek. Umístění pohonů na konstrukcích průmyslových robotů je významným koncepčním znakem, který ovlivňuje jejich vlastnosti. V zásadě je pro sériové koncepce možné umístit motory :

- v kloubech
- mimo klouby
- hybridně – částečně v kloubech, částečně mimo klouby.

Důsledky rozdílných koncepčních řešení pohonů

Důsledné umístění všech pohonů do os příslušných kloubů je prakticky nemožné, a to především v pohybových jednotkách orientačního ústrojí, protože by došlo k podstatnému omezení pracovního prostoru těchto jednotek a snížilo užitečnou nosnost robotu v důsledku trvalé zátěže pohonů na konci polohovacího řetězce.

V praxi převládají řešení hybridní. Nejčastěji je motor pro pohon horního ramene umístěn o kloub níž (případně i mimo kloub) a motory orientačního ústrojí na konci horního ramene, kde přispívají k jeho statickému vyvážení (obr. 1 vpravo). Důvod k hybridnímu řešení je zřejmý – motor sám je významnou zátěží s účinky statickými i dynamickými, které by nepříznivě ovlivnily vlastnosti robotu.

Hybridní koncepce je tedy z hlediska energetického výhodnější, je však složitější řízení i konstrukce převodů i příslušné pohybové jednotky. Je zde také problém v delším kinematickém řetězci, když se obtížněji zajišťuje jeho požadovaná tuhost a přesnost.

Naopak konstrukce s motory v kloubech usnadňuje řízení, dosažení vyšší tuhosti a přesnosti, ale energeticky je méně výhodná.

V praxi dnes však existují také roboty, jejichž všechny motory jsou umístěny důsledně v základovém rámu (obr. 1 vlevo). Taková konstrukce je velmi čistým a „elegantním“ řešením, jehož štíhlou vnější část konstrukce nic neomezuje v pohybu. Daleko lépe využítá pracovní prostor, oproti rozměrově a kinematicky srovnatelnému robotu hybridní koncepce, s vně v kloubech umístěnými motory



Obr.1 Robot s motory v základním rámu (vlevo) a s hybridní koncepcí motorů (vpravo)

a energetickou a signální kabeláží (porovnání viz obr. 1). Možnosti využití pracovního prostoru jsou ilustrovány v jedné z krajních poloh ramen robotu (obr. 2). Jsou-li dokonce i kabelové rozvody umístěny uvnitř ramen, může se takový robot dostat i do velmi úzkých prostor.

Roboty s motory v základu

Tyto roboty vznikly z původních manipulátorů, označovaných jako kopírující, pro manipulaci s radioaktivními, nebo s jinak nebezpečnými materiály, kdy člověk musel s takovými látkami manipulovat sám, v dostatečně chráněném prostoru a pohyby jeho ruky kopíroval manipulátor v bunkru, v kontaktu s příslušnými materiály.

Přenos pohybu se pak realizoval systémem poměrně složitých ozubených převodů s kuželovými koly, u kterých musela být postupně vyřešena řada problémů, zejména pokud jde o jejich tuhost, přesnost a adekvátní reakci efektoru na řídicí impulsy operátora. Rovněž energetické poměry při větší zátěži musely být řešeny přidáním pomocných pohonů, při udržení citu operátora pro zátěž.

V dalším vývoji se tato koncepce ukázala jako výhodná pro některé aplikace, jednak již uvedenou štíhlostí, s možností vstupu do omezených prostor, jednak možností použití elektromotorů velkých výkonů a hmotností, jejichž aplikace na motory hybridní koncepce by možná nebyla.

Později se jako výhoda ukázala možnost snadného přizpůsobení k různým aplikacím stavebnicovým řešením, kdy lze objednat ramena různých délek a průměrů, různé typy a výkony motorů i způsoby jejich řízení. V souvislosti s rozvojem servisní robotiky je možné jejich další uplatnění pro celé soubory úloh.

Problémy řízení robotů s motory v základu

Problém s řízením robotů, s motory v základu, je vyvolán ovlivněním pohybů kloubů, nejen motorem příslušným kloubu, ale i pohyby motorů, jejichž převody kloubem jen prochází. Z hlediska řízení nejde dnes již o významný problém. Lze jej řešit programem, který bere v úvahu konkrétní konstrukci převodů, přenášejících pohyb do příslušných kloubů.

Pro mechatrické systémy (o které jde i v tomto případě) jsou ovšem možné různé přístupy k vyřešení různých problémů, které se při návrhu konstrukce vyskytnou. Adekvátní k možnosti programového řešení problému vzájemného ovlivnění pohybů v kloubech jednotlivých pohybových jednotek je řešení mechanického převodového systému. Je pak nezbytné provést tak zvané rozpojení pohybů v kloubech (tedy odstranit vzájemné ovlivnění, jak bylo již uvedeno).

Problém se řeší pomocí kompenzačních převodů. Pro návrh robotu s pohony v kloubech provádíme, ke správné volbě výkonů motorů a pro stanovení charakteristik rychlosti, přesnosti a zatížení, pro navrhovaný robot, pouze silovou a dynamickou analýzu.

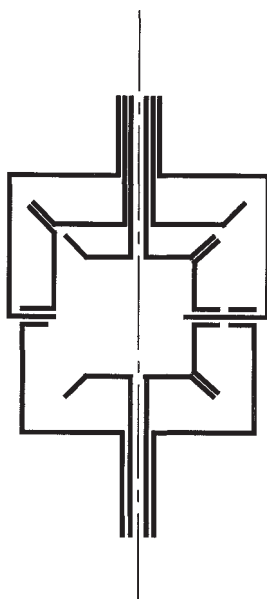


Obr.2 Extrémní pohybové možnosti robotu s motory v základu





Obr.3 Motorová a převodová sekce robotu z obr. 2



Obr.4 Možné kinematické schéma kloubů robotu s motory v základu

Při návrhu robotů s pohony na rámu je třeba navíc řešit specifické úlohy kinematické analýzy a syntézy složitých planetových převodů a diferenciálních ústrojí.

Takové schéma sice vyžaduje navíc mechanismy rozpojení pohybu a předepnutí kinematického řetězce, ale umožňuje zmenšit rozměry a hmotnost manipulátoru, zlepšit pohyblivost a charakteristiky oprav a údržby.

Jedná se tedy o problematiku spojenou s řešením přenosu pohybu z motorů, umístěných v základu manipulátoru, na nepohyblivém rámu, ke kinematickým dvojicím. Kompenzační převody robotu z obr. 1 a 2 jsou umístěny v horní polovině rámu (obr. 3). V tomto případě jde o ozubené převody s čelními koly, ale lze využít i převody s koly kuželovými.

V kloubech robotu jsou používány různé varianty kuželových diferenciálních ústrojí, jedna z možností je zobrazena v obr. 4. Kuželová kola v sousedních kloubech jsou spojena dutými hřídeli.

Identifikace relací mezi pohyby motorů, kompenzačních převodů a klouby robotu

K řešení tohoto problému je třeba identifikovat vztahy v kinematickém řetězci, mezi pootočeními na vstupech a výstupech mechanismu ruky. Lze si představit aplikaci známého postupu pro přechod od mechanismu s více stupni volnosti, ke stejnému počtu mechanismů s jedním stupněm volnosti, jestliže postupně zastavíme všechny klouby mimo jednoho a zjišťujeme velikost pootočení všech motorů. Opakováním postupu pro všechny klouby získáme matici dílčích převodových poměrů, která popisuje kinematiku mechanismu ruky. Jedná se o systém algebraických lineárních rovnic s konstantními koeficienty. Jakékoliv změny v kinematice mechanismů ruky se projeví v matici dílčích převodových poměrů, tzn., že je třeba provést syntézu mechanismů, které by vyhověly požadavkům.

Musí být zajištěna jednoznačnost pohybu mezi každým vstupem do mechanismu (pohyb motoru) a jemu odpovídajícím výstupem (pohyb příslušného kloubu), tak jak je tomu u motorů umístěných v kloubech.

Matematicky je jednoznačnost pohybů zajištěna diagonálností matice dílčích převodových poměrů, z hlediska mechaniky vede snaha o jednoznačnost k zavedení speciálních, tzv. kompenzačních (nebo rozpojovacích) mechanismů. Jimi je dosaženo odstranění vzájemného ovlivnění v jednotlivých stupních volnosti.

Uvedenou procedurou zastavení všech kloubů mimo jednoho, kterým pootočíme, lze zjistit odpovídající pootočení motorů

$$\Delta\psi_i = \sum_{m=1}^n \frac{\partial\psi_i}{\partial q_m} \Delta q_m \quad (i, m = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

Koeficienty této lineární transformace tvoří matici T rozměru $n \times n$

$$T = \begin{vmatrix} \frac{\partial\psi_1}{\partial q_1} & \frac{\partial\psi_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial\psi_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial\psi_2}{\partial q_1} & \frac{\partial\psi_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial\psi_2}{\partial q_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial\psi_n}{\partial q_1} & \frac{\partial\psi_n}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial\psi_n}{\partial q_n} \end{vmatrix} \tag{2}$$

Transformační matice T má konkrétní podobu podle způsobu umístění motorů a závislost mezi $\Delta\psi$ a Δq má pak dvě mezní varianty:

1. pro případ, že všechny motory jsou umístěny v kloubech (matice T je diagonální)

$$\begin{vmatrix} \Delta\psi_1 \\ \Delta\psi_2 \\ \Delta\psi_3 \\ \dots \\ \Delta\psi_{n-1} \\ \Delta\psi_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \dots \\ \Delta q_{n-1} \\ \Delta q_n \end{vmatrix} \tag{3}$$

2. pro motory v základu

$$\begin{vmatrix} \Delta\psi_1 \\ \Delta\psi_2 \\ \Delta\psi_3 \\ \dots \\ \Delta\psi_{n-1} \\ \Delta\psi_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \dots \\ \Delta q_{n-1} \\ \Delta q_n \end{vmatrix} \tag{4}$$

Z rovnice (3) je zřejmá jednoznačná závislost mezi velikostí pootočení m -tého kloubu a m -tého motoru, podle rovnice (4) tomu tak není. Problém tedy odpovídá, jak již bylo výše popsáno, požadavku na odstranění vzájemného ovlivnění pohybů v kloubech kinematického řetězce.

Problém má řešení matematické a adekvátní technické. Matematicky jde o přechod od matice trojúhelníkové k matici diagonální. Technické řešení se zakládá na zařazení kompenzačních diferenciálních převodů mezi motory a manipulátor, ustavených rovněž v základu.

Vzhledem k použití diferenciálních převodů je kinematika kompenzačních převodů analogická kinematice manipulátoru, takže příslušné rovnice mají tvar typu, přičemž převody manipulátoru jsou spojeny n spojovacími hřídeli s přírůstkou pootočení $\Delta\theta$ od přírůstkou pootočení motorů $\Delta\psi$.

$$\Delta\theta = \mathbf{R}\Delta\psi$$

kde matice \mathbf{R} je tvořena opět dílčími převodovými poměry a má obdobný fyzikální význam jako \mathbf{T} .

Dále nutno vyšetřit vztah mezi $\Delta\theta$ a Δq a to stejnou procedurou jako pro $\Delta\psi$ a Δq

$$\Delta\theta = \mathbf{T}^* \Delta q$$

kde matice \mathbf{T}^* je vytvořena opět stejným postupem.

Z obou rovnic lze vyjádřit přírůstkou pootočení motorů v závislosti na pootočení kloubů

$$\Delta\psi = \mathbf{R}_{-1} \mathbf{T}^* \Delta q$$

Je znám postup jak nalézt takové matice \mathbf{R}_{-1} a \mathbf{T}^* , jejichž součinem vznikne matice diagonální, čímž dosáhneme „rozpojení převodů robotu“ pomocí kompenzačního převodu; tedy vzájemně jedno-

značnosti pootočení kloubů manipulátoru robotu a pootočení příslušných motorů.

V maticích

$$T^* = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & & a_{nn} \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & & b_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

jsou a_{im} a b_{im} dílčí převody od i -tého vloženého hřídele k m -tému kloubu manipulátoru a m -tému motoru získané z podmínky, že všechny ostatní klouby manipulátoru a hřídele motorů jsou zastaveny.

Zvolíme-li hodnoty a_{im} (tj. dílčí převody) kompenzačního mechanismu tak, aby v každém sloupci matice byly hodnoty stejné velké, tj.

$$\begin{aligned} b_{11} = b_{21} = b_{31} = \dots = b_{n1} &= p_k \\ b_{22} = b_{32} = \dots = b_{n2} &= s_k \\ b_{33} = \dots = b_{n3} &= t_k \\ &\dots \\ b_{nn} &= f_k \end{aligned} \quad (6)$$

kde $p_k, s_k, t_k, \dots, f_k$, jsou dílčí převodové poměry kompenzačních převodů. Pak příslušné inverzní matice dostanou tvar

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{p_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{s_k} & \frac{1}{s_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{t_k} & \frac{1}{t_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{u_k} & \frac{1}{u_k} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{f_k} & \frac{1}{f_k} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Tímto postupem jsme také matici značně minimalizovali pokud se týká počtu prvků. Posledním krokem postupu je určení součinu obou matic R^{-1} a T^* . Diagonálnost součinu bude zajištěna jestliže zvolíme prvky matice T^* , podobně jako u matice R^{-1} , tj. v každém sloupci konstantní.

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{21} = a_{31} = \dots = a_{n1} &= p_p \\ a_{22} = a_{32} = \dots = a_{n2} &= s_p \\ a_{33} = \dots = a_{n3} &= t_p \\ &\dots \\ a_{nn} &= f_p \end{aligned} \quad (8)$$

pak výsledná matice ze součinu bude

$$R^{-1}T^* = \begin{pmatrix} p_p / p_k & & & & & \\ & s_p / s_k & & & & 0 \\ & & t_p / t_k & & & \\ & & & u_p / u_k & & \\ & 0 & & & & \dots \\ & & & & & f_p / f_k \end{pmatrix} \quad (9)$$

a splňuje požadavek jednoznačnosti; přitom $p_p, s_p, t_p, \dots, f_p$ jsou dílčí převodové poměry mechanismu manipulátoru a $p_k, s_k, t_k, \dots, f_k$ jsou dílčí převodové poměry kompenzačních mechanismů.

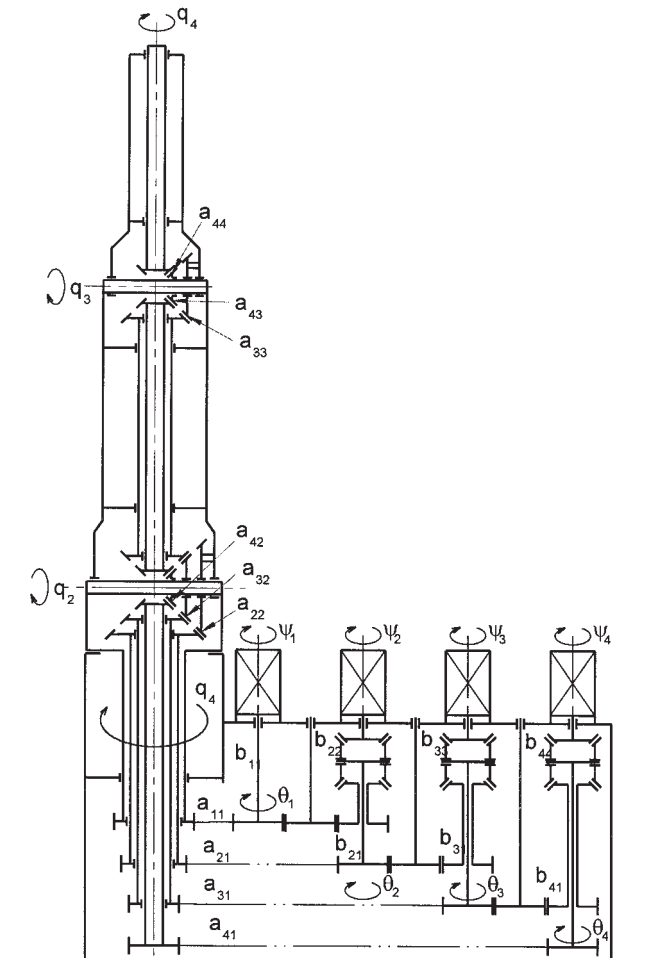
Jedno z možných provedení manipulátoru s motory v základu, využívající kuželových diferenciálních převodů je na obr. 5. Jednotlivé dílčí převody z výše uvedených matic jsou zde uvedeny.

Dodatek

Článek byl zpracován v rámci projektu výzkumného záměru MŠMT ČR J17/98:272300008.

Literatura

[1] KÁRNÍK, L., KNOFLÍČEK, R., MARCINČIN, J. N.: Mobilní roboty. Opava: MÁRFY Slezsko, 2000
 [2] SKAŘUPA, J., MOSTÝN, V.: Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů. Košice: Viena, 2002



Obr.5 Robot s motory v základu, využívající kompenzačních převodů s diferenciálními kuželovými převody

doc. Ing. Jiří Skařupa, CSc.
 Katedra robototechniky
 FS, VŠB – TU Ostrava