



Paralelní robotické struktury a moderní metody jejich řízení

Autor: Belda Květoslav (Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., Praha)

Rubrika: Aplikační šíře oboru automatizace **Téma:** Robotika a mechatronika, Teorie automatického řízení

Paralelní robotické struktury představují perspektivní způsob jak zvýšit dynamiku a tuhost nově vyvíjených průmyslových robotických zařízení se srovnatelnou nebo i vyšší dosahovanou přesností oproti současným jednoúčelově navrženým strojům. V článku budou představeny a srovnány paralelní robotické struktury s běžně používanými strukturami sériovými, které jsou blízko svých mechanických limitů. Bude zde představen moderní způsob jejich řízení, který je založen na modelově orientovaném vícekrokovém prediktivním řízení. Pro potřeby řízení bude nastíněn postup sestavení matematicko-fyzikálního modelu používaného k popisu kinematiky a dynamiky zmíněných robotických struktur.

Klíčová slova: Paralelní robotické struktury, průmyslová robotika, prediktivní řízení, řízení v reálném času

Parallel robotic structures represent perspective way to improve dynamics and stiffness of recently designed industrial robotic systems with comparable or even higher reached accuracy against current single-purposively designed machines. In the paper, there will be an introduction and comparison of parallel robotic structures with usually used serial structures, which are near their mechanical limits. The modern way of their control will be introduced, which is based on model-based predictive control. For control design, the procedure of composition of mathematical-physical model will be outlined. This model describes kinematics and dynamics of considered robotic structures.

Keywords: Parallel robotic structures, industrial robotics, predictive control, real-time control

Úvod

Robotické struktury tvoří základ průmyslových robotů, manipulátorů a moderních obráběcích strojů. Jejich hlavním úkolem je zajistit požadovaný pohyb výkonných částí – pracovních vřeten a upínačů nástrojů u obráběcích strojů a uchopovacích hlav u manipulačních zařízení. V článku budou paralelní robotické struktury nejdříve představeny ve srovnání se strukturami sériovými a bude nastíněno sestavení jejich matematicko-fyzikálního modelu. Sestavení modelu bude uzpůsobeno jak pro simulaci struktur, tak i pro vlastní návrh jejich řízení. Dále bude ukázán příklad vyšetření mechanických vlastností u paralelních struktur. V závěrečné části článku bude naznačen postup návrhu modelově orientovaného řízení a jeho laboratorní realizace vhodná pro reálné řízení robotických struktur v reálném času.

Představení robotických struktur

Robotické struktury jsou obecně chápány jako mechanické soustavy skládající se z velmi robustních ramen spojených buď rotačními nebo posuvnými vazbami [1]. Ramena jsou zřetězena z velké části v otevřených kinematických řetězcích. Takto definované struktury se označují jako sériové robotické struktury (Obr. 1). I když jsou velmi rozšířené, tak jejich použití pro přesné obráběcí a přesné manipulační operace ve výrobních systémech dnes běžně vybavených pružnou automatizací je omezené – jsou na hranici svých mechanických limitů. To je dáno přítomností pohonů ve všech vazbách kinematické struktury – tj. nutnost přesunu hmot těchto pohonů a ne pouze užitečného zatížení, které je tímto značně omezeno.

Z vlastní podstaty otevřeného kinematického řetězce vyplývá nižší tuhost sériových struktur, jež snižuje přesnost v pohybu i při stabilizaci v určité konkrétní poloze. Proto jsou tyto struktury používány jen pro méně přesné operace manipulačního charakteru. Avšak oproti jednoúčelovým strojům navrženým pro jeden převládající charakter práce mají výhodu ve své flexibilitě, jež umožňuje nasazení ve výrobním procesu s pružnou automatizací a v počítačem integrované výrobě.

Paralelní struktury [2], které jsou námětem článku, reprezentují naopak uzavřené kinematické řetězce (Obr. 2). Ty se vyznačují odlišnými vlastnostmi. I když se myšlenka paralelního uspořádání robotických struktur poprvé objevila už v šedesátých letech, tak díky nedostupnosti vhodných algoritmů řízení se neuplatnila. Teprve na konci devadesátých let minulého století se opět myšlenka paralelního uspořádání znovu objevila a začala být intenzivně zkoumána.

Konkrétně se paralelní struktury prezentují jako pohyblivé příhradové konstrukce nebo pohyblivé základny podepírané paralelně několika rameny. Zmíněné pohyblivé základny jsou místem pro sklíčidla, upínače, pracovní vřetena a pro pomocná technologická zakončení, jako jsou výstupy vedení energie, měřících senzorů, tlakového vzduchu a chladicích kapalin.

Hlavní výhody popsaného paralelního uspořádání jsou následující:

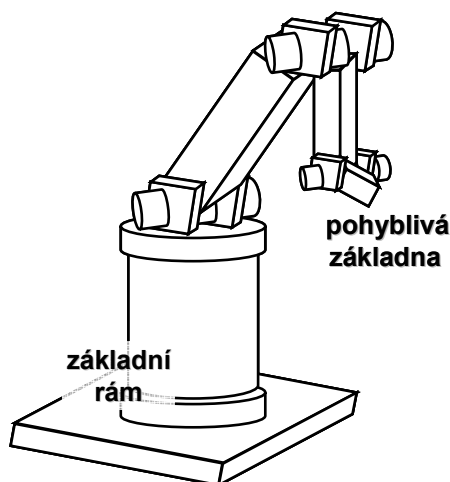
- je možné upevnit většinu pohonů přímo na základní rám bez nutnosti jejich přesouvání,
- díky vlastnostem příhradových konstrukcí jsou struktury tužší a to bez ztráty pohyblivosti.

To dohromady přispívá k nárůstu dynamiky pohybu a polohovací přesnosti.

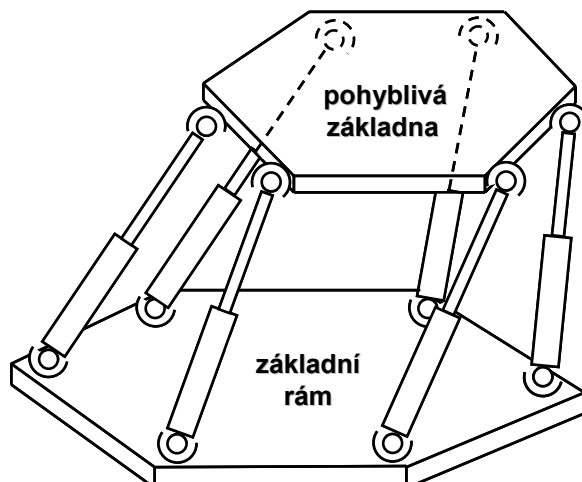
Na druhou stranu struktury tohoto typu mají i několik nevýhod:

- v pracovním prostoru se mohou vyskytovat kinematické singularity, ve kterých se ztrácí kinematická určitost znemožňující řízení struktur,
- samotné paralelní uspořádání je limitujícím faktorem pro pracovní prostor, který bývá menší.

Obě tyto nevýhody mají své řešení resp. své kladné vyvážení. Prvně jmenovaná nevýhoda je řešitelná symetrickým přidáním dalšího poháněného paralelně připojeného kinematického řetězce popř. dalších. Toto přidání vytváří tzv. redundantně poháněnou paralelní strukturu, jež se vyznačuje dále zlepšením tuhosti díky většímu počtu podpěrných řetězců a také zlepšením dynamiky díky redundantnímu pohánění. Druhá nevýhoda je vyvážena stejnorodostí kinematických a dynamických vlastností v pracovním prostoru, která u sériových struktur nebývá vysoká.



Obr. 1 Sériová robotická struktura



Obr. 2 Paralelní robotická struktura

Popsané vlastnosti společně s vhodným řízením předurčují paralelní struktury pro velmi přesné obráběcí a manipulační operace ve výrobních systémech s pružnou automatizací a též jako součásti hybridních systémů autonomních robotů.

Sestavení matematicko-fyzikálního modelu

Modelování robotických struktur zahrnuje tři spolu související části mechaniky: statiku, kinematiku a dynamiku. *Statika* se zabývá určením a poměry silových účinků při rovnováze celé struktury a jejích jednotlivých součástí. Silové účinky jsou definovány jako účinky působící na pohyblivou základnu (např. vnější zatížení) nebo účinky působící ve vazbách struktury (síly v posuvných vazbách, silové dvojice – momenty a reakční síly v rotačních vazbách). Statika je důležitá při návrhu nominálních průřezů jednotlivých součástí. Zde předpokládáme už nějakou danou paralelní strukturu. Proto hlavní otázkou bude analýza pracovního prostoru a syntéza plánovaného pohybu pomocí vazebních podmínek, čímž se zabývá *kinematika*. Dále pak simulace pohybu a následně návrh řízení, jež obojí využívá dynamický model získaný na základě *dynamiky*.

Kinematický model

Kinematický model popisuje pohyb resp. jeho charakteristiky – polohu, rychlost a zrychlení bez uvažování silových účinků, které daný pohyb způsobují. Pohyb kinematických vazeb (kloubů) je navázán na pohyb a úhlový směr pohyblivé základny omezený těmito vazbami. Vyskytují se zde dvě základní úlohy a to úloha přímé a úloha zpětné (inverzní) kinematické transformace. Obě úlohy se uplatňují i při plánování pohybu robotických struktur. Přímá transformace se snaží určit pohyb a úhlový směr pohyblivé základny z pohybu poháněných kinematických vazeb. Inverzní transformace naopak napočítává všechny parametry pohybu celé struktury z kinematických parametrů pohyblivé základny.

Kinematický model vychází z množiny geometrických podmínek a vazeb ve formě algebraických rovnic a jejich derivací. Nejobecnější vyjádření je soustava rovnic (1)

$$\mathbf{f}(\mathbf{s}(t)) = \mathbf{f}(\mathbf{q}(t), \mathbf{z}(t)) = \mathbf{0} \quad (1)$$

kde $\mathbf{s}(t)$ je vektor všech používaných fyzikálních souřadnic, $\mathbf{q}(t)$ je vektor nezávislých souřadnic, většinou souřadnic pohyblivé základny, jejichž počet je roven počtu stupňů volnosti celé robotické struktury a $\mathbf{z}(t)$ jsou zbývající závislé souřadnice resp. souřadnice poháněných vazeb. Soustava rovnic (1) a její derivace představují kinematický model, který umožňuje určení všech kinematických charakteristik.

Dynamický model

Dynamický model popisuje vztahy silových účinků (sil a momentů) potřebných pro vyvození pohybu robotické struktury včetně i jejích setrvačných silových účinků. V případě paralelních struktur je k vyvození pohybu potřeba skupina momentových nebo silových funkcí aplikovaných na poháněné vazby. Zmíněné funkce pohonů nezávisí jen na prostorových nebo časových atributech daného naplánovaného pohybu, ale také na hmotnostních charakteristikách jednotlivých součástí struktury, jejího pracovního zatížení a nebo dalších jiných vnějších sil nebo silových dvojic.

Při sestavování je možné opět jako u kinematického modelu řešit dvě úlohy a to úlohu přímé nebo úlohu zpětné (inverzní) dynamiky. První úloha pro momentové nebo silové funkce těchto vazeb určuje výsledný pohyb pohyblivé základny. Druhá úloha pro naplánovaný požadovaný pohyb pohyblivé základny hledá momentové nebo silové funkce aplikované na poháněné vazby, které vyvodí požadovaný pohyb. Úloha inverzní dynamiky je základem strategií modelově orientovaného řízení.

Pro sestavení dynamického modelu je možné použít řadu různých metod např. Newton-EulEROVY rovnice, princip virtuálních prací nebo Lagrangeovy rovnice. Obecný dynamický model je možné zapsat soustavou rovnic druhého řádu (2)

$$\ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{f}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{g}(\mathbf{s}) \mathbf{u} \quad (2)$$

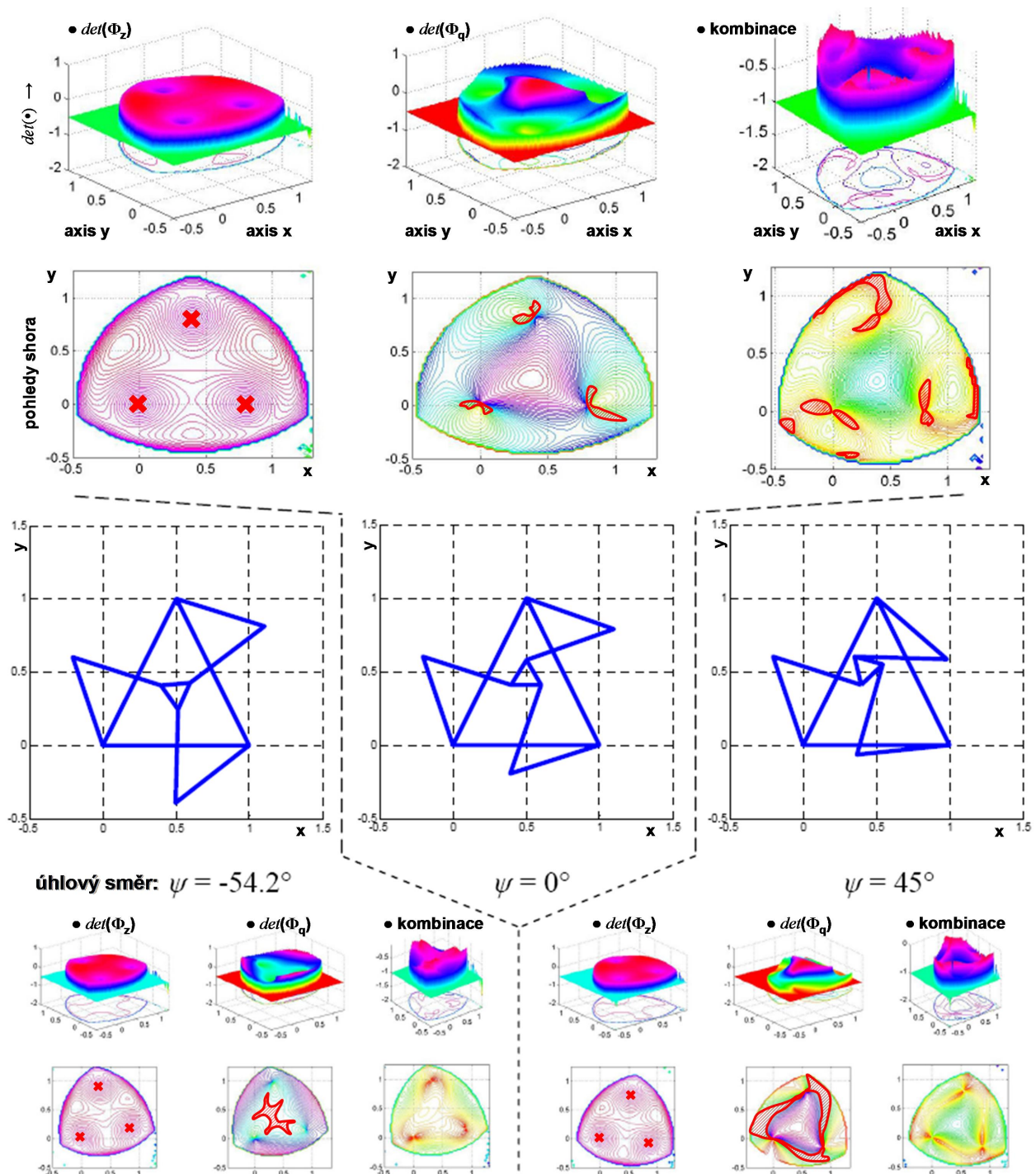
kde $\mathbf{f}$ je funkce vnitřní dynamiky struktury, $\mathbf{g}$ je vstupní matice a $\mathbf{u}$ je vektor vstupů – akčních zásahů tj. vstupních silových účinků působících v poháněných vazbách. Soustava (2) společně se soustavou (1) tvoří dynamický model zahrnující pohybové rovnice s definovanou vstupní částí a kinematický model, který slouží pro určení všech souřadnic vyskytujících se v dynamickém modelu. Popsaný model je použitelný pro simulaci paralelních struktur, pro potřeby návrhu modelově orientovaného řízení je vhodné ho však ještě zjednodušit a upravit do tvaru dané metody řízení.

Příklad vyšetření mechanických vlastností

Během návrhu nového robota, manipulátoru nebo obráběcího stroje se provádí řada analýz zaměřených na mechanické vlastnosti vlastní mechanické struktury zařízení. V návrhové etapě je možné měnit a ladit parametry zařízení ještě před jeho reálným uskutečněním. Po sestavení jde cokoliv měnit už jen obtížně, parametry jsou už danou konstrukcí struktury pevně určeny. Změnu vlastností není možné očekávat ani od kvalitně navrženého řízení. Řízení může hlavně zajistit efektivní distribuci a využití energie a daných mechanických parametrů, nikoliv jejich posun resp. zlepšení jejich limitů. Rozhodujícími parametry struktur jsou tuhost, dynamika, vlastní frekvence a manipulovatelnost. Pro příklad uvažujme manipulovatelnost, která souvisí s velikostí pracovního prostoru. Manipulovatelnost tj. schopnost se zařízením bezpečně a jednoznačně manipulovat se váže na vyšetřování singularit v pracovním prostoru. Vyšetřování vychází z časové derivace kinematického modelu (1) a zabývá se možností přepočtu derivací souřadnic pohonů na derivace souřadnic pohyblivé základny a naopak.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{f}(\mathbf{s}(t)) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{q}} \frac{d\mathbf{q}}{dt} + \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \frac{d\mathbf{z}}{dt} = \Phi_q(\mathbf{q}, \mathbf{z}) \dot{\mathbf{q}} + \Phi_z(\mathbf{q}, \mathbf{z}) \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{0} \quad (3)$$

Příklad vyšetření singularit pro rovinnou paralelní strukturu skládající se ze šesti ramen spojených devíti rotačními vazbami s trojúhelníkovým základním rámem a trojúhelníkovou základnou je znázorněn na Obr. 3. Obrázek zachycuje mapování singularit pro tři různé úhlové směry pohyblivé základny. Ke každému směru je znázorněna jedna vybraná poloha struktury a tři dvojice prostorového pohledu a pohledu shora znázorňující výskyt singularit pro celý pracovní prostor. První dvojice se váže k přepočtu souřadnic pohyblivé základny na souřadnice poháněných vazeb, druhá k opačnému přepočtu a třetí ke kombinaci obou předchozích. Červeně vyznačené body a oblasti v pohledech shora reprezentují nežádoucí oblasti singularit.



Obr. 3 Příklad analýzy kinematických singularit pracovního prostoru rovinné paralelní struktury

Moderní metody řízení paralelních struktur

Jak už bylo zmíněno, důležité pro řízení je použití vhodných energeticky efektivních a hlavně bezpečných řídicích strategií. Řídicí algoritmy by měly zvládat i redundantní uspořádání tj. soustavy s různým počtem vstupů a výstupů, kde přebytek vstupů značí právě redundantní strukturu. Přímé použití klasických přístupů k řízení založených na PID/PSD regulátorech není možné nebo bezpečné přinejmenším energeticky efektivní. Popsané požadavky lze řešit modelově orientovaným řízením, jež právě pomocí modelu může např. různý počet vstupů nebo výstupů a i známe nelinearity postihnout. Pro jeho potřeby je vhodné model dynamiky (2) většinou převést do stavové formy [4]. Stavová forma modelu se linearizuje v každém časovém okamžiku a převádí do diskretní formy zapsané například takto:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned}, \quad \mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \dot{\mathbf{y}}(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

kde vektor stavu $\mathbf{x}(k)$ zachovává svůj fyzikální význam a obsahuje souřadnice pohyblivé základny a jejich časové derivace.

Souřadnice základny $\mathbf{q}$ jsou z důvodu konzistence s teorií řízení označeny $\mathbf{y}$ a význam vektoru vstupů $\mathbf{u}(k)$ zůstává beze změny.

Modelově orientované prediktivní řízení

Jedním z představitelů modelově orientovaného řízení je prediktivní řízení [3], které je založeno na lokální optimalizaci kvadratického kritéria a predikčních rovinicích. Predikční rovnice slouží pro vyjádření přímé vazby v rámci předpokládaného predikčního horizontu. Na jejich základě se vypočítává dominantní část akčních zásahů. Při použití stavového modelu (4) mají následující tvar:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{f} + \mathbf{G}\mathbf{u}, \quad \hat{\mathbf{y}} = [\hat{\mathbf{y}}(k+1) \dots \hat{\mathbf{y}}(k+N)]^T \\ \mathbf{f} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^N \end{bmatrix} \mathbf{x}(k), \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{B} \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{N-1} & \mathbf{B} \dots & \mathbf{C}\mathbf{B} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

kde vektor $\mathbf{f}$ reprezentuje volnou odezvu od okamžiku k , tj. predikované výstupy pro $\mathbf{u} = \mathbf{0}$. Součin $\mathbf{G}\mathbf{u}$ kompenzuje rozdíly těchto výstupů od jejich požadovaných hodnot na uvažovaném predikčním horizontu. Vlastní řízení $\mathbf{u}$ se počítá pomocí kvadratického kritéria

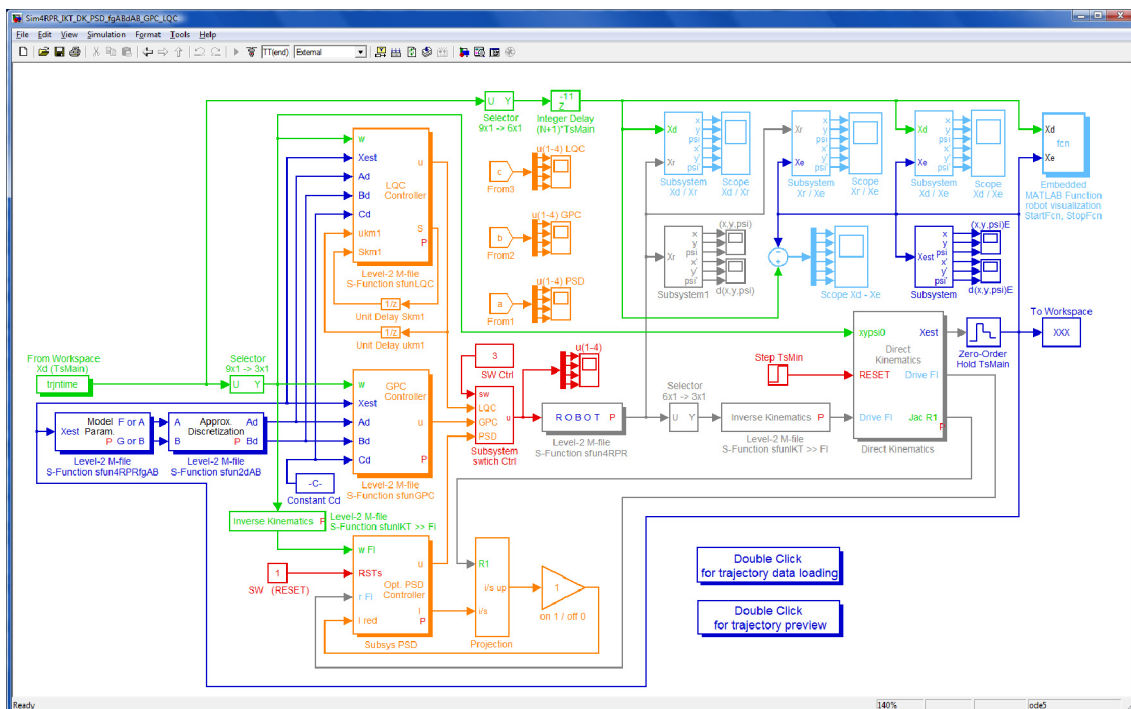
$$J_k = \sum_{j=1}^N \{ \| (\hat{\mathbf{y}}(k+j) - \mathbf{w}(k+j)) \mathbf{Q}_y \|^2 + \| \mathbf{u}(k+j-1) \mathbf{Q}_u \|^2 \} \quad (6)$$

kde $\mathbf{Q}_y$ a $\mathbf{Q}_u$ jsou penalizační matice reprezentující ladící parametry; a $\mathbf{w}(k+j)$ je vektor žádaných hodnot.

Získaný vektor $\mathbf{u}$ reprezentuje akční zásahy pro celý horizont N . Z něho se však použijí jen první příslušné zásahy odpovídající okamžiku k . Proces výpočtu se opakuje pro příslušně aktualizovaný model (4).

Realizace prediktivního řízení

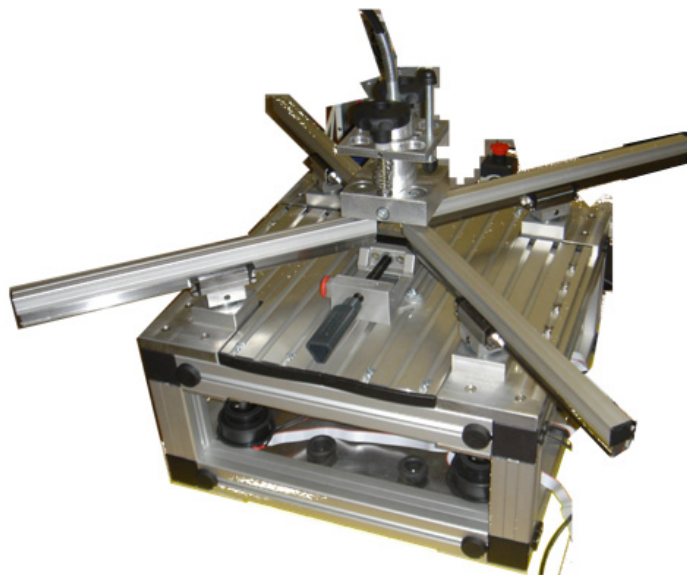
Výše naznačený postup návrhu je možné algoritmicky realizovat pro reálné řízení například pomocí Simulinku a jeho nadstaveb přes digitální signálový procesor (DSP) [5], [6]. Schéma simulinkového modelu je na Obr. 4, který znázorňuje model s prediktivním regulátorem a jeho alternativami LQ regulátorem a optimalizovaným PSD regulátorem.



Obr. 4 Schéma simulinkového modelu s regulátory: prediktivním (uprostřed), LQ (nahore) a PSD (dole)

Schéma obsahuje dva bloky pro napočítávání a úpravu dynamického modelu (modře ohraničené bloky napravo). Vstupem pro napočítávání modelu je aktuální stav robotu. Nad těmito bloky je blok žádané trajektorie (zeleně ohraničený blok), jehož výstupem jsou požadované souřadnice trajektorie pohyblivé základny. Výstupy výše zmíněných bloků vedou do obou modelově orientovaných regulátorů: prediktivního regulátoru a LQ regulátoru (horní a prostřední oranžový blok). Do optimalizovaného PSD regulátoru (oranžový blok dole) vede jen žádaná trajektorie, která se navíc přepočítává na motorové souřadnice. Ze všech třech bloků regulátorů vede signál akčních zásahů (hodnoty momentů) přes přepínač (červený blok) vybírající zásahy konkrétního regulátoru. Nastavení přepínače je možné měnit jen při stání robotu ne však za jeho pohybu. Vybrané akční zásahy vedou přímo do vstupně výstupního bloku robotu. Z tohoto bloku vycházejí souřadnice motorů, které jsou přepočítávány v pomocných blocích (šedivé ohraničení) na stav robotu a tím je celá smyčka řízení uzavřena.

Schéma z Obr. 4 je určeno pro řízení funkčního modelu obráběcího robotu "Pohyblivý kluzák", který vychází z rovinné redundantní paralelní struktury. Robot je znázorněn na Obr. 5.



Obr. 5 Funkční model obráběcího robotu založený na rovinné paralelní struktuře

Závěr

Paralelní robotické struktury představují perspektivní způsob zvýšení dynamiky a tuhosti nově vyvíjených průmyslových robotických zařízení. Oproti sériovým strukturám mívají lepší mechanické vlastnosti včetně jejich rovnoměrného rozložení. Tyto struktury však vyžadují propracovanější návrh řízení založený na sofistikovanějších řídicích strategiích, které se dokáží vypořádat jak s rychle se měnící dynamikou struktury tak i s různým počtem vstupů a výstupů struktury. Jedním z možných řešení je použití prediktivního řízení, jež představuje výkonnou modelově orientovanou strategii, která nabízí řadu možností, jak dosáhnout požadovaného řídicího pochodu při minimálních požadavcích na uživatele. Toto řízení však klade důraz na použití poměrně přesného modelu řízeného systému.

LITERATURA

- [1] TSAI, L.-W.: *Robot Analysis, The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & sons, Inc., New York 1999.
- [2] Merlet, J.-P.: *Parallel Robots*. Springer, Dordrecht 2006.
- [3] ORDYS, A.- CLARKE, D.: A state – Space Description for GPC Controllers. *INT. J. Systems SCI.*, 1993, Vol. 24, No. 9, pp. 1727-1744.
- [4] BELDA, K. - BÖHM, J.: *Predictive control of redundant parallel robots and trajectory planning*. In: Proc. of the Parallel Kinematic Machines in Research and Practice. PKS 2006. (Neugebauer R. ed.). IWU, Chemnitz 2006, pp. 497-513.
- [5] BELDA, K. et al.: *GPC pages (GPC Toolbox)*. <<http://as.utia.cas.cz/asc/>>.
- [6] Online Manuals: Using MATLAB, Using Simulink, The MathWorks, Inc. 2005-2008.