

NÁVRH SFÉRICKÉHO MECHANISMU HEXASPHERE

Design of Spherical Mechanism HexaSphere

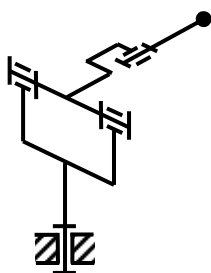
Matěj Karásek, Michael Valášek, Josef Zicha, Petr Svatoš

Abstract: The paper deals with a new type of spherical mechanism - Hexasphere, which is a redundantly actuated parallel kinematical structure that enables spherical motion in large extent of ± 100 degrees. The kinematic analysis is done, the main attention is paid to the dexterity that reaches very good values. High movability is proven on a kinematical prototype of the mechanism, where new design approaches and innovative components were used.

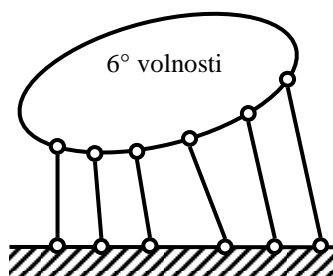
Key words: Parallel kinematical structures, redundant actuation, spherical mechanisms, kinematic analysis, dexterity.

1. Úvod

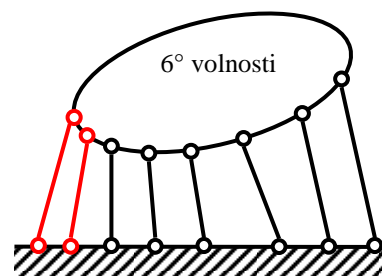
Sférické mechanismy, které umožňují natáčení a orientování objektu v prostoru, jsou používány pro řadu důležitých operací. Jsou to mechanismy naklápěcích hlav s vřetenem pro obráběcí stroje, které tvoří základ naprosté většiny obráběcích center pro pětiosé obrábění. Montáže teleskopů, tj. mechanismy pro jejich pohyb, jsou také sférické mechanismy. Další skupinu tvoří mechanismy pro natáčení různých antén. Mnoho aplikací sférických mechanismů je při směřování optických paprsků.



Obr. 1 Kardanův závěs



Obr. 2 Paralelní kinematická struktura



Obr. 3 Redundantní pohony

Naprostá většina sférických mechanismů je založena na Kardanově závěsu (Obr. 1). Jeho výhodou je velká pohyblivost, často $\pm 90^\circ$. Jedna základní nevýhoda Kardanova závěsu jako sériové kinematické struktury je, že je tvořen po sobě jdoucí posloupností rotačních pohybů a pohony se pohybují spolu s mechanismem. Mimo to je rám konstrukce nevýhodně namáhán ohybem. Důsledek je nevýhodný poměr mezi hmotností a tuhostí i menší dynamické schopnosti mechanismu. Dochází ke sčítání chyb v řetězci dílčích pohybů. Druhá základní nevýhoda Kardanova závěsu je, že obsahuje singulární polohu v zenitu způsobující, že nelze mezi všemi polohami v pracovním prostoru realizovat spojitou trajektorii.

Proto byl hledán nový koncept sférického mechanismu. Všechny zmíněné problémy odstraňují paralelní kinematické struktury (Obr. 2) – namáhání ramen je pouze na tah/tlak, pohony lze umístit na rám stroje, délka řetězců se sčítanými chybami se zkracuje. Nevýhodou prostých paralelních kinematických struktur je omezení pracovního prostoru singulárními polohami a kolizemi, složitější je také řízení. Příklady použití paralelních sférických mechanismů jsou uvedeny na Obr. 4-5.



Obr. 4 Hexapodový teleskop v Chile ($\pm 47^\circ$)



Obr. 5 Naklápěcí hlava Z3 sprint (pohyblivost $\pm 30^\circ$)

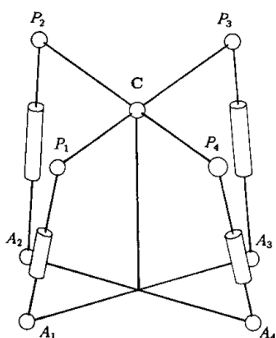


Obr. 6 Mechanismus Sliding Star

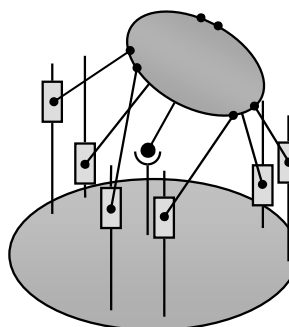
Mnohé výše popsané problémy paralelních kinematik řeší použití redundantních (nadbytečných) pohonů (Obr. 3) - ramen s pohony je více, než má platforma stupňů volnosti. Nenastávají singulární polohy, podstatně roste tuhost i dynamika, zvyšuje se kinematická přesnost, nastává možnost on-line samokalibrace [1]. To se podařilo ukázat na strojích Trijoint 900H a Sliding Star (Obr. 6) pro kartézské posuvné pohyby. Plný funkční ekvivalent Kardanova závěsu s pohyblivostí $\pm 90^\circ$ pomocí paralelních kinematických struktur však byl stále otevřenou výzvou.

2. Koncept mechanismu HexaSphere

Inspirací pro vznik mechanismu HexaSphere byla publikace [2], ve které byl popsán sférický mechanismus na Obr. 7. Pomocí výpočtu dexterity je zde dokázáno, že byl vyřešen problém se singularitami.



Obr. 7 Návrh Kurtze a Haywarda



Obr. 8 Mechanismus HexaSphere

Dexterita, neboli manipulovatelnost je definována jako

$$D = \frac{1}{\text{cond}(\underline{J}_z^{-1} \cdot \underline{J}_q)} \quad (2.1)$$

a může nabývat hodnot od 0 (nejhorší případ značící singularitu) do 1 (nejlepší hodnota). Dexteritu lze chápat jako míru přenosu sil z pohonů na koncový efektor. Jakobiány se vyjádří za pomoci kinematických vazbových rovnic

$$\underline{f}(\underline{q}, \underline{z}) = \underline{0} \quad (2.2)$$

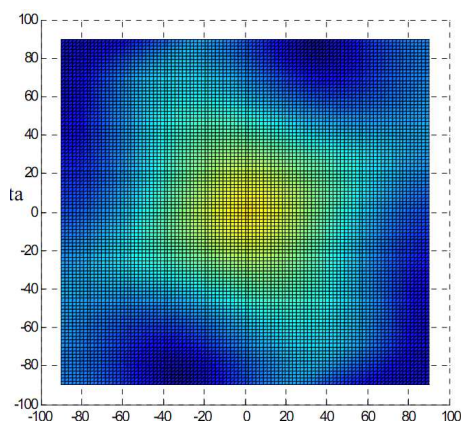
mezi nezávislými souřadnicemi \underline{q} popisujícími polohu platformy a závislými souřadnicemi \underline{z} popisujícími polohu pohonů jako

$$\underline{J}_q = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{q}^T}; \quad \underline{J}_z = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{z}^T} \quad (2.3)$$

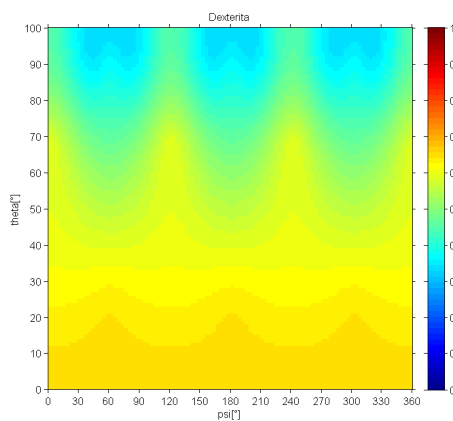
Vazbové rovnice představovaly druhou mocninu vzdálenosti mezi koncovými body prutů na platformě a na rámu, resp. poháněných vozících. Sférický pohyb mechanismu lze popsat pomocí Eulerových úhlů ψ , ϑ a φ . Aby nedocházelo ke kolizím jednotlivých nohou, byla stanovena podmínka zaručující odvalování platformy – úhel vlastní rotace φ musí být záporně vzatý úhel precese ψ . Derivaci vazbových rovnic (2.2) můžeme za použití metody transformačních matic [3] upravit do tvaru

$$\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{q}^T} \cdot \underline{\omega}_{12} + \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{z}^T} \cdot \underline{\dot{s}} = \underline{0} \quad (2.4)$$

kde $\underline{\omega}_{12}$ představuje úhlové rychlosti platformy a \underline{s} posunutí jednotlivých pohonů. Z této rovnice je již možné pomocí (2.3) určit jakobiány \underline{J}_q a \underline{J}_z . Tímto postupem bylo napočítáno rozložení dexterity mechanismu v pracovním prostoru. Z Obr. 9 je patrné, že se hodnoty pohybují od 0,0065 do 0,6307. Všechny jsou nenulové a tedy neexistují singularity, nicméně se dexterita v pracovním prostoru mění přibližně 100 krát a minimum je velmi blízko nuly. Dexterita popisuje poměr mezi silami v pohonech a na platformě, její rozložení u tohoto mechanismu je tak velmi nevýhodné.



Obr. 9 Dexterita mechanismu Kurtze a Haywarda



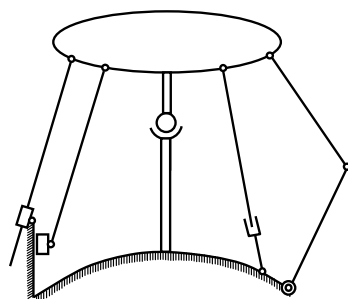
Obr. 10 Dexterita mechanismu HexaSphere

Byl proto vytvořen koncept mechanismu HexaSphere. Platforma mechanismu je k rámu připojena centrálním sférickým kloubem. Díky tomu má jen 3 stupně volnosti a pro její pohyb by stačily 3 pohony. Ty však umožňují jen pohyb v malém rozsahu úhlů, neboť pro

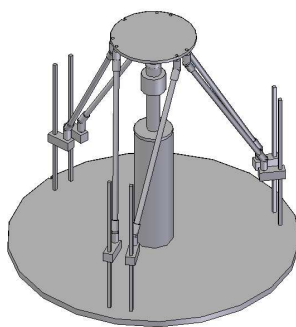
větší pohyby nastávají singulární polohy (platforma získá přidavné neřízené stupně volnosti a zhroutí se). Platforma je proto zavěšena na 6 ramenech s pohony, z čehož 3 jsou redundantní. HexaSphere je tak vlastně složen z hexapodu, jehož platforma je navíc spojena s rámem pomocí pasivního centrálního sférického kloubu. Dexterita byla vypočtena stejným způsobem jako u předchozího mechanismu. Vysoký stupeň redundance pohonů má velmi příznivý účinek na rozložení dexterity. Její hodnoty se pohybují v rozmezí od 0,33 do 0,65 (Obr. 10), její velikost se tak v celém pracovním prostoru mění pouze dvakrát a její hodnoty jsou poměrně vysoké. Znamená to, že síly v pohonech musí být maximálně 2÷3 krát větší, nežli jsou požadované síly na platformě, resp. koncovém efektoru.

3. Návrh a konstrukce mechanismu HexaSphere

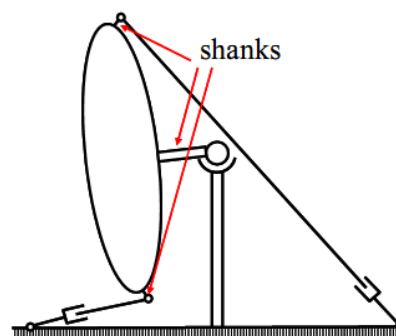
Výsledky výpočtů ukazují, že HexaSphere umožňuje sférický pohyb s pohyblivostí $\pm 100^\circ$. Velkou výhodou mechanismu HexaSphere je odstranění singularity v zenitu, tedy možnost spojitého pohybu mezi všemi polohami v pracovním prostoru. Obrovská pohyblivost si však klade velké nároky na konstrukci, jelikož musí být zabráněno kolizím jednotlivých členů během pohybu. Nejprve bylo vytvořeno několik variant lišících se druhem pohonů ramen (Obr. 11). Ta jsou vždy na jedné straně připojena k platformě pomocí sférických kloubů, ale jejich pohyb je možno zrealizovat několika způsoby. Zvolena byla koncepce s vozíky pojíždějícími po rovnoběžných svislých vedeních.



Obr. 11 Varianty možných pohonů



Obr. 12 Kontrola kolizí



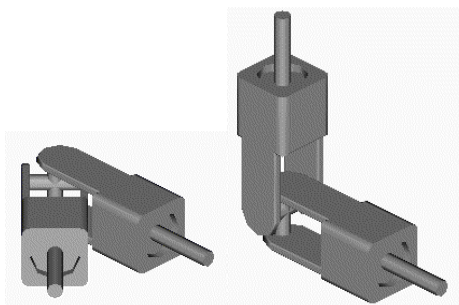
Obr. 13 Klouby umístěné na stopkách

Klíčovým bodem při konstrukci bylo navrhnout rozměry mechanismu tak, aby nedocházelo ke kolizím jednotlivých částí. Byl proto vytvořen a rozpohybován 3D model v programu SolidEdge, kde je možné tyto kolize kontrolovat. První model byl tvořen z primitiv (válců, kvádrů, koulí – Obr. 12) a jeho prvotní rozměry vycházely z 2D návrhu. Iterativním způsobem byly měněny jednotlivé rozměry tak, aby byly nalezeny co nejmenší rozměry mechanismu umožňující návrhem zvolený rozsah pohybů – naklopení platformy až o 100° . Klíčovým rozměrem se ukázala být velikost sférických kloubů, které bylo třeba minimalizovat. Důležitým principem je umístění sférických kloubů na stopkách (Obr. 13), díky nimž nenastávají kolize mezi rameny a platformou při velkých natočeních.

Rozsah pohybů mechanismu vyžaduje sférické klouby s velkou pohyblivostí. Na trhu nabízené sférické klouby mají omezenou pohyblivost do 90° aspoň v jedné ose. Byly proto vyvinuty nové typy sférických kloubů. Pro spojení nohou a platformy resp. nohou a vozíků byly vyvinuty a použity klouby s možným rozsahem pohybu až 300° [4]. Takový rozsah lze získat modifikací tradičního Kardanova kloubu tak, že má celkem 4 rotační vazby (Obr. 14).

Pro zvýšení přesnosti je však nutné odměřování polohy vnitřního kříže, ještě lépe doplněné o možnost řízeného zablokování jedné z os, například pomocí piezoaktuátoru. Centrální kloub je tvořen koulí připevněnou k platformě, která je držena v kulové jamce pomocí magnetické síly generované cívkou [5]. Pro eliminaci tření je sedlo jamky vyrobeno z teflonu (Obr 15).

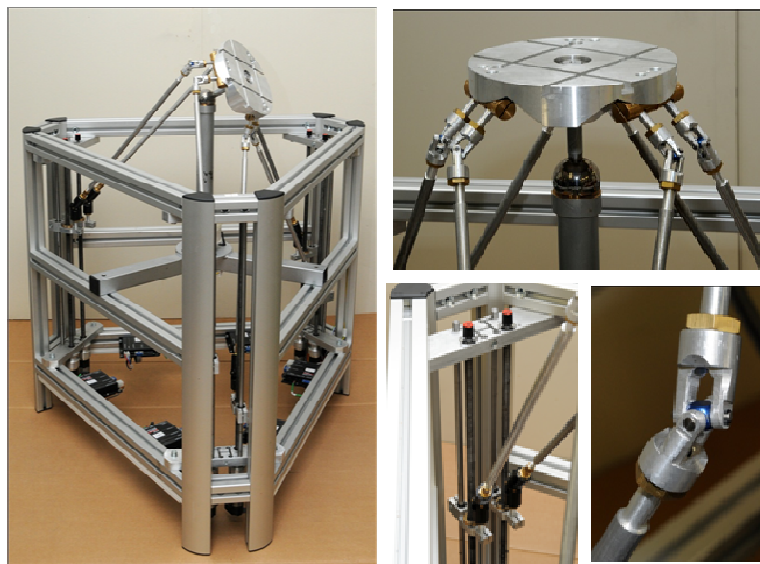
Finální konstrukce mechanismu a její detaily jsou zachyceny na Obr. 16.



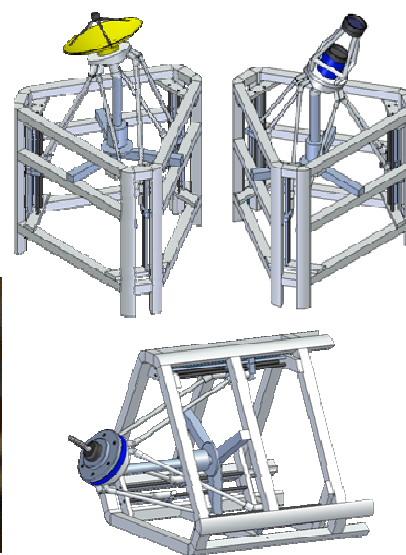
Obr. 14 Sférický kloub použitý na platformě



Obr. 15 Elektromagnetický centrální sférický kloub



Obr. 16 Funkční kinematický prototyp mechanismu HexaSphere



Obr. 17 Příkladů možného použití

4. Použití

Mechanismus HexaSphere může mít široké použití pro všechny aplikace sférických mechanismů. Zvláště důležité je odstranění singularity v zenitu tradičního Kardanova mechanismu. To především přispěje ke zvýšení dynamiky pohybu. Hexasphere může být základem montáže teleskopů (Obr. 17), které budou několikanásobně lehčí než současné, ale současně velmi dynamické, např. pro sledování gama záblesků. Další aplikace se nabízí pro naklápěcí hlavu obráběcího stroje s velkým rozsahem pohybů $\pm 100^\circ$ při velké tuhosti a dynamice. Nadbytečný počet čidel umožňuje i on-line určení a kompenzaci teplotních deformací. HexaSphere může také velmi dynamicky pohybovat anténami, kamerami nebo zrcátky.

5. Závěr

Mechanismus HexaSphere má velmi slibné vlastnosti. V první řadě je to obrovská pohyblivost (úhel naklonění platformy až $\pm 100^\circ$). Důležitá je také relativně malá změna dexterity v pracovním prostoru. Díky tomu lze využít i dalších výhod paralelních kinematických struktur – velké přesnosti, tuhosti i dynamiky. V neposlední řadě je to neexistence zenitové singularity, což umožní plynulý pohyb mezi libovolnými dvěma polohami v pracovním prostoru. Na postaveném funkčním kinematickém modelu se následně podařilo ukázat, že tento koncept je možné zkonstruovat tak, aby nedocházelo ke kolizím. Bylo ověřeno, že je možné platformu naklopit od svislého směru až o 95° .

Do budoucna je nutné vylepšit konstrukci sférických kloubů na platformě, jelikož se ukázaly jako nejvíce problémový člen, případně zvolit koncepci s ovládním pomocí lan, kde sférické klouby úplně odpadnou a navíc bude možné zmenšit nyní dosti velký zástavbový prostor. Je však třeba zajistit trvalé tahové namáhání všech lan, což vyžaduje další bádání.

Poděkování

Autoři oceňují podporu GAČR projektu 101/08/H068 a nadace ČVUT Media Lab.

Reference

- [1] Valášek M., Redundant Actuation and Redundant Measurement: The Mechatronic Principles for Future Machine Tools. Proc. of International Congress on Mechatronics MECH2K4, CTU, Praha, 2004, s. 131-144.
- [2] Kurtz R., Hayward V., Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, vol. 8, no. 5, s. 644-651.
- [3] Stejskal V., Valášek M., Kinematics and Dynamics of Machinery. Marcel Dekker, New York, 1996.
- [4] Sulamanidze D., Spherical Joints with Increased Mobility. Disertační práce, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Praha, 2007.
- [5] Valášek M., Petruš F., Zicha J., Magnetický sférický kloub. Patentová Příhláška PV 2058, Praha, 2008.

Kontaktní adresa

Odbor mechaniky a mechatroniky, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2, tel.: +420 224 357 361, e-mail: Michael.Valasek@fs.cvut.cz