

McKibbenův pneumatický sval v robotice

Lukáš Kopečný, František Šolc

Článek popisuje konstrukci, vlastnosti, modelování, řízení a možnosti aplikace jednoho typu netradičních pohonů v robotice – McKibbenových pneumatických svalů. Článek uvádí některé údaje o výzkumu v této oblasti, jak je prováděn na Ústavu automatizace a měřicí techniky, FEKT, VUT v Brně.

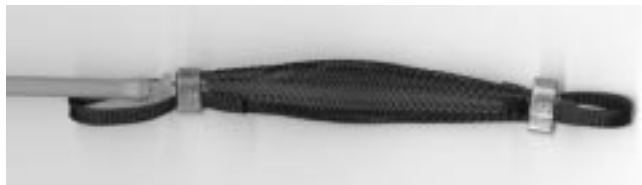
Úvod

Roboty jsou často přirovnávány k člověku a porovnávány s člověkem. Platí to i o současných průmyslových robotech, které jsou pro své manipulační schopnosti srovnávány s lidskou rukou. Současné průmyslové roboty jsou poměrně přesné a výkonné stroje. Za tuto přesnost a výkonnost platí vysokou hmotností a velice tuhou, neohebnou konstrukcí, která ve značné míře komplikuje sdílení pracovního prostoru robotu s lidmi a jeho spolupráci s nimi. Naproti tomu lidská ruka je při manipulačních operacích bez speciálních pomůcek poměrně nepřesná, její manipulační schopnosti, flexibilita a poměr výkonu k hmotnosti jsou však zatím strojem nedosažitelné. Lidská ruka je, samozřejmě, dokonale přizpůsobena ke spolupráci s člověkem. Pro konstruktéry je proto lidská ruka stálým zdrojem inspirace. Jedním z prvků, které se konstruktéři snaží napodobit a který má podstatný vliv na výkony lidské ruky, jsou svaly. Mezi zatím v praxi použitelné napodobeniny biologických svalů patří především pneumatické svaly. Tento článek popisuje pohon, jenž je v této oblasti zatím nejvíce zkoumán – McKibbenův umělý sval (McKibben Artificial Muscle Actuator).

Princip pneumatického svalu

První aplikace tohoto pneumatického pohonu, který byl inspirován živočišným svalem – McKibbenova umělého svalu – byla v umělé končetině (protéze) sestavené v 60-tých letech. Pro složitost řízení a kvůli potřebě zdroje stlačeného vzduchu bylo od jejich používání upuštěno. Až vývoj řídicích technik a snadná dostupnost dostatečného výpočetního výkonu znovu oživil vývoj pneumatických svalů a využití jejich výhodných vlastností tam, kde elektrické pohony selhávaly zejména pro jejich nadměrnou hmotnost, tuhost a objem při nízkém výkonu. Bylo vyvinuto několik modifikací McKibbenova umělého svalu, např. Rubbertuator (fy Bridgestone, 1988), Braided Pneumatic Muscle Actuator [4] (University of Salford, 1993), Pneumatic Muscle (fy Festo, 1997). Všechny tyto umělé pneumatické svaly se vyznačují vysokým poměrem výkonu ku hmotnosti a dostatečnou stabilitou pružnosti. Stále však přetrvávají potíže s polohovým řízením svalů vzhledem k jejich nelinearitě a problémům spojeným se stlačitelností média.

Pneumatické svaly založené na McKibbenových umělých svalech se zpravidla vyznačují dvouplášťovou válcovou strukturou. Vnitřní vrstva je pružná a nepropustná (nejčastěji tenká gumová hadice), zatímco vnější vrstva je bifilární spirálovitě spletaná z pevných vláken (např. nylonových). Válec je na obou koncích pomocí spon za-



Obr.1 Pneumatický sval s nylonovým opletením

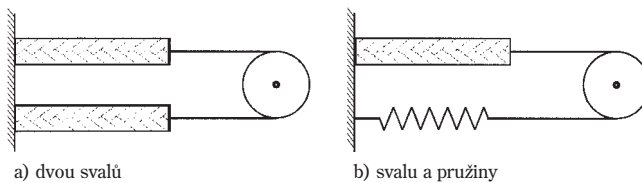


Obr.2 Pneumatický sval Festo

těsněn duralovými koncovkami s jedním či více plnicími/upevňovacími otvory (obr. 1). Průmyslová verze pneumatického svalu FESTO má spletanou vrstvu integrovanou (zalitu) přímo v první gumové vrstvě a koncovky jsou na svalech upevněny převlečnou maticí. Tato průmyslová verze se vyznačuje delší životností za cenu zhoršení ostatních parametrů svalu, především maximální kontrakce svalu (obr. 2).

Statický model McKibbenova umělého svalu bude uveden níže, nejprve k jeho charakteristickým rysům:

1. Pneumatické svaly se vyznačují mimořádně vysokým poměrem síly a výkonu ku hmotnosti a objemu.
2. Mohou být vyrobeny prakticky v libovolné délce a průměru.
3. Vlastnosti, tvar a chování jsou srovnatelné s lidskými svaly, což umožňuje jejich snadné vzájemné propojení (protézy, rehabilitace apod.).
4. Dosažitelné maximální zkrácení se pohybuje na hranici 30 % jmenovité délky svalu, což je opět srovnatelné s živočišnými svaly.
5. Dosud vyvinuté regulátory jsou schopny regulace polohy s přesností lepší než 1 % z rozsahu pohybu a umožňují dosáhnout mezní frekvence více než 10 Hz.
6. Tažná síla na jednotku plochy průřezu tvoří až 300 N/cm² v porovnání s 40 N/cm² pro živočišný sval.
7. Přesný a plynulý chod svalu mezi krajními polohami.
8. Nízká hystereze a tření.



a) dvou svalů

b) svalu a pružiny

Obr.3 Antagonistické uspořádání s kladkou



9. Nízká cena, vysoká spolehlivost, minimální údržba.
10. Vysoká bezpečnost – možnost použití ve výbušném a vlhkém prostředí.

Protože pneumatické svaly mohou vyvíjet aktivní sílu pouze při jednom směru pohybu – kontrakci – musí být vždy uspořádány tzv. antagonisticky, a to buď jako dvojice proti sobě působících svalů (obr. 3a), nebo jako jeden sval sprážený s pružinou (obr. 3b).

Přímočarý pohyb svalu lze jednoduše převést na rotační pohyb pomocí soustavy táhel a kladek (obr. 3), podobně jako tomu je u živočišných svalů.

Zjednodušený statický fyzikální model

Pneumatický sval převádí pneumatickou (případně hydraulickou) energii na mechanickou. Působením tlaku média na vnitřní vrstvu válce dochází ke kontrakci svalu a k vyvození tažné síly. V následujícím odstavci bude odvozena závislost tažné síly na tlaku a okamžité délce svalu.

Vstupní práce plynu W_{in} působícího silou na stěnu svalu lze vypočítat z rovnice:

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P - P_0) dl_i \cdot ds_i = P' dV \quad (1)$$

Kde P je absolutní tlak plynu uvnitř svalu, P_0 absolutní tlak okolního plynu, P' relativní tlak ($P - P_0$), S_i celkový vnitřní povrch svalu, ds_i diferenciál plochy, dl_i posunutí vnitřního povrchu, dV změna objemu.

Výstupní práce svalu W_{out} konaná při zkrácení svalu je:

$$dW_{out} = -FdL \quad (2)$$

Kde F je axiální tažná síla svalu, dL je axiální posunutí.

Z pohledu zákona zachování energie, zanedbáme-li ztráty systému, je výstupní práce rovna vstupní, tudíž:

$$dW_{out} = dW_{in} \quad (3)$$

Dosažením z [1] a [2]:

$$-FdL = P' dV \quad (4a)$$

$$F = -P' \frac{dV}{dL} \quad (4b)$$

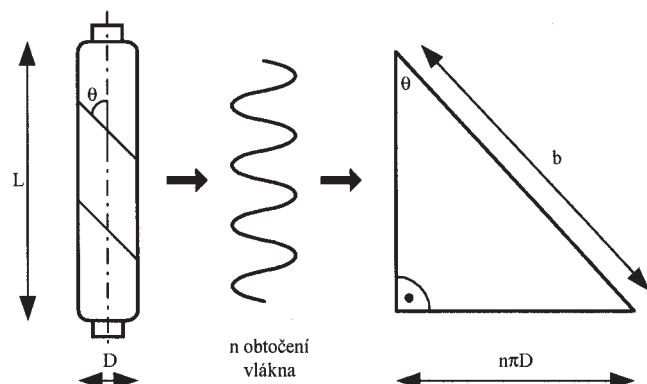
Pro odhad dV/dL uvažujme aktivní část svalu ve tvaru ideálního válce, kde L je jeho výška, θ je úhel mezi vlákny opletení (druhé vrstvy svalu) a osou válce, D je průměr válce, n počet obtočení vláknů kolem válce a b délka vlákna (obr. 4). L a D lze vyjádřit jako funkci θ s konstantními parametry n a b :

$$L = b \cos \theta \quad (6)$$

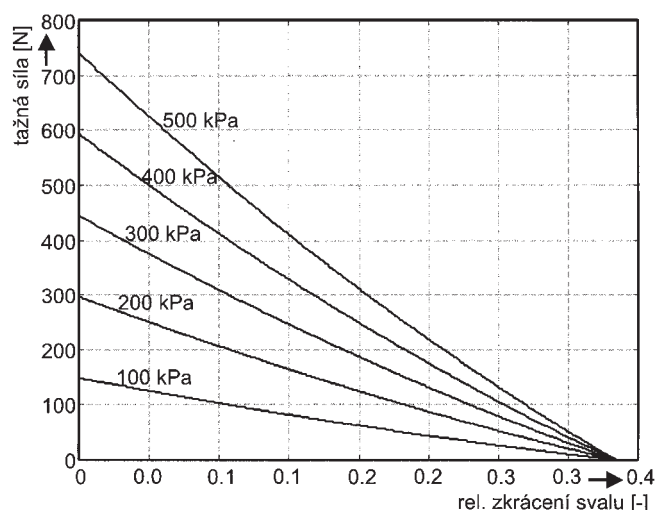
$$D = \frac{b \sin \theta}{n\pi} \quad (7)$$

Objem válce pak je:

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L = \frac{b^3}{4\pi n^2} \sin^2 \theta \cos \theta \quad (8)$$



Obr.4 Určení koeficientů n a b



Obr.5 Závislost síly na zkrácení svalu podle zjednodušeného statického modelu

Nyní můžeme ze (4b) odvodit konečný vztah pro tažnou sílu svalu jako funkci P' a θ :

$$F = -P' \frac{dV}{dL} = -P' \frac{dV/d\theta}{dL/d\theta} = \frac{P' b^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{4\pi n^2} \quad (9)$$

Nebo po dosažení z (6) sílu jako funkci P' a L :

$$F = \frac{P' (3L^2 - b^2)}{4\pi n^2} \quad (10)$$

Tažná síla je tedy přímo úměrná tlaku média uvnitř svalu a je monotónní funkcí úhlu vláken. Teoretická maximální kontrakce svalu při $F = 0$ je pro $\theta = 54,7^\circ$, což odpovídá relativnímu zkrácení cca 38 %.

Na obr. 5 je graficky znázorněna závislost tažné síly na relativním zkrácení svalu ($\epsilon = (L_{max} - L)/L_{max}$) pro hodnoty $L_{max} = 30$ cm, $n = 3$, $b = 32$ cm. Maximální možná délka svalu L_{max} je dána druhem opletení a závisí na nejmenším možném úhlu vláken, v daném případě je $\theta_{min} = 20^\circ$. Průměr D uvedeného svalu při maximální kontrakci je 28 mm.

Skutečné hodnoty se od uvedeného vztahu liší v krajních případech až o desítky procent, přesnější modely počítají s nenulovou tloušťkou membrány, její pružností, pružností vláken, třením a deformacemi na okrajích svalů.

Polohové řízení

Z fyzikálního modelu odvozeného v minulé kapitole je zřejmé, že vzhledem k závislosti síly na délce svalu, nebudou standardní regulátory (založené na PID reg.) dávat dobré výsledky.

Nejčastěji používané principy pro polohovou regulaci McKibbenova svalu jsou v současnosti následující:

- Feedforward + PID regulátory.
- Fuzzy PID regulátory.
- Regulátory s adaptivním rozmístováním pólů.
- Regulátory pracující v klouzavém režimu (příp. s proměnnou strukturou).
- Regulátory založené na neuronových sítích.

Vzhledem k podobným vlastnostem pneumatických a živočišných svalů, dobrých výsledků dosahuje i přímé propojení pneumatických svalů s lidským operátorem (obr. 6).

Aplikace

Jak už bylo řečeno v předchozím textu, pneumatické svaly jsou vhodné pro spolupráci s lidskými, zejména pro jejich bezpečnost vyplývající z pracovního principu (omezená kontrakce, přirozená pružnost a vnitřní tlumení). Do této skupiny patří lidské protězy,



Obr.6 Exoskeleton University of Salford, G. B.

rehabilitační pomůcky, exoskeletony [3] (obr. 6), haptická rozhraní (obr. 7) atd.

Další skupina, spíše průmyslového nasazení pneumatických svalů, využívá jiných výhodných vlastností – vysokého poměru výkon/hmotnost, jednoduché konstrukce, nízké ceny, nízkého vnitřního tření a absence pohyblivých částí u aplikací, kde není nutné příliš přesné polohování – robotická paže SoftArm (fy Bridgestone) pro stříkání barev, dále napínání válcovacích stolic, lisování, použití v prašném prostředí (fy Festo).

Skupina robotiky na ÚAMT VUT v Brně se pneumatickými svaly McKibbenova typu zabývá již delší dobu. Ve spolupráci s University of Salford byla navržena a realizována haptická rukavice se zpětnovazebním silovým působením (obr. 7). Skládá se ze dvou částí – snímací rukavice opatřené senzory ohybu prstů a z tvarovaného termoplastu, upevněného popruhem k zápěstí, na němž jsou uchyceny pneumatické svaly a jejich podpůrné kladky. Opačné konce pneumatických svalů jsou opatřeny tenzometry pro měření působící síly a spojeny s jednotlivými prsty. Celá struktura váží méně než 500 g a je hadičkami a stíněnými vodiči propojena s boxem obsahujícím ventily, zdroje a řídicí elektroniku.

Pro řízení tlaku vzduchu v jednotlivých svalech byly použity porciální šoupátkové ventily JOUCOMATIC 602, jež se později ukázaly naprosto nevhodné pro pomalou odezvu (> 500 ms), velkou hysterezi a vysokou nelinearitu. V současné době jsou nahrazeny rychlými solenoidními ventily MATRIX, které jsou řízené



Obr.7 Haptická rukavice s pneumatickými svaly

pulsně-šířkovou modulací na frekvenci 200 Hz. Box dále obsahuje snímače tlaku, přístrojové zesilovače, řídicí procesor a výkonové elektronické spínače ventilů.

Pomocí rozhraní RS 232 je řídicí procesor propojen s osobním počítačem, na němž pod operačním systémem Windows 2000 běží program napsaný v prostředí Visual C++. Program se skládá z následující posloupnosti procedur:

- Čtení hodnot senzorů.
- Digitální filtrace.
- Zjištění případné kolize či proniknutí do objektu.
- Výpočet sil na jednotlivé prsty.
- Výpočet výstupu Feedforward + PID regulátoru.
- Vyslání akčních hodnot.

Program také zobrazuje některá důležitá data, jako aktuální polohu prstů, tlak ve svalech atd. Uživatel může nastavovat pružnost, tlumení a velikost objektu.

Po spuštění programu je změřeny a zaznamenány statické charakteristiky ventilů pro daný vstupní tlak a nastaveny regulátory.

Výsledný hmatový vjem je pro operátora reálný zvláště při simulaci měkkých objektů. Následující vývoj vede k simulaci tvrdých objektů, kdy je třeba významně zrychlit časovou odezvu systému.

Závěr

Výzkum v oblasti konstrukce, modelování, řízení a nakonec i aplikace pneumatických svalů je atraktivní především pro některé nesporné přednosti pneumatických svalů, které je určují pro použití především v oblasti servisní robotiky. Podobnost těchto svalů s živočišnými otvírá nové možnosti v návrhu manipulátorů a dalších robotických systémů. Zajímavým výsledkem výzkumu mohou být i algoritmy řízení těchto značně nelineárních systémů. Výzkum v této oblasti je na ÚAMT umožněn díky grantu GAČR 102/02/0782 „Výzkum chování a řízení netradičních akčních členů pro robotiku“.

Literatura

- [1] TONDU, B., LOPEZ, P.: Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. IEEE Control Systems Magazine, s. 15 – 38, April 2000.
- [2] CHOU, C. P., HANNAFORD, B.: Static and Dynamic Characteristic of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. IEEE International Conference on Robotics and Automation, s. 281 – 286, vol. 1, 1994.
- [3] TSAGARAKIS, N., CALDWELL, D. G., MEDRANO-CERDA, G. A.: A 7 DOF Pneumatic Muscle Actuator (pMA) Powered Exoskeleton. 8th IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction RO-MAN '99. s. 327 – 333, Pisa, 1999.
- [4] CALDWELL, D. G., RAZAK, A., GOODWIN, M. J.: Braided Pneumatic Muscle Actuators. IFAC Conf. on Intelligent Autonomous Vehicles. Soutampton, April 1993.

doc. Ing. František Šolc, CSc.
Ing. Lukáš Kopečný

Ústav automatizace a měřicí techniky
FEKT VUT v Brně
e-mail: kopcny@feec.vutbr.cz

