

Pneumatski mišić kao aktuator

doc. dr. sc. Željko Šitum, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

Pneumatski mišić, koji je nastao kao rezultat interdisciplinarnog istraživanja u području robotskih manipulatora i bioloških sustava, predstavlja zanimljiv izbor tipa aktuatora koji se može koristiti u primjenama za regulaciju položaja i/ili sile manipulatora.

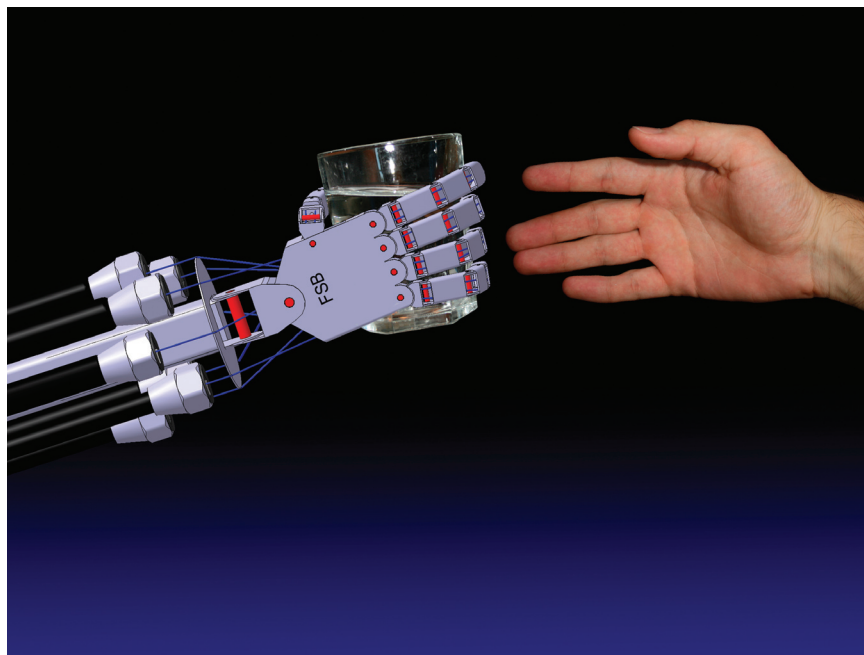
Umjetni pneumatski mišići imaju prirodnu elastičnost što ih čini pogodnim za primjenu u bioničkim sustavima, tj. biološki inspiriranim izvedbama tehničkih sustava. Ovaj osebujni transfer tehnologije između živih stvorenja i umjetnih tehničkih sustava čini se izrazito poželjan jer je evolucijski razvoj prirodne sustave načinio visoko optimiranim i učinkovitim. Iako se bionika kao znanstvena disciplina može smatrati kao relativno novo područje, treba se prisjetiti da je još Leonardo da Vinci bio inspiriran prirodom pri konstruiranju svojih letećih strojeva i plovećih objekata.

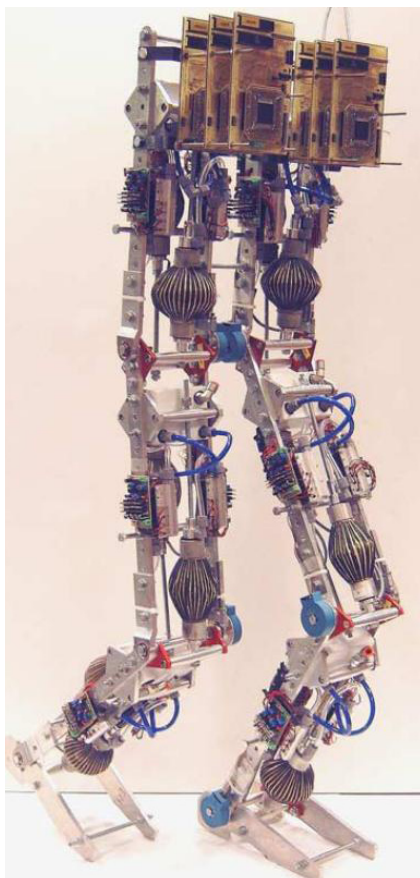
Područja primjene pneumatskih mišića

Umjetni pneumatski mišići (engl. *Pneumatic Artificial Muscles*) nalaze primjenu u raznim područjima industrijske automatizacije, robotike i fizioterapije. Njihova najranija primjena bila je kod izrade ortopedskih pomagala u medicini, gdje su zbog svojih značajki kao što su mala masa i dimenzije, povoljan odnos mase i sile koju proizvode, mekana karakteristika sile, lako održavanje, dugi vijek trajanja i dr. bili vrlo prihvatljivi izbor aktuatora. U području robotike, primjena pneumatskih mišića rezultira elastičnošću prilikom gibanja robota jer manja krutost sustava uslijed stišljivosti zraka omogućuje im djelovanje poput opruge.

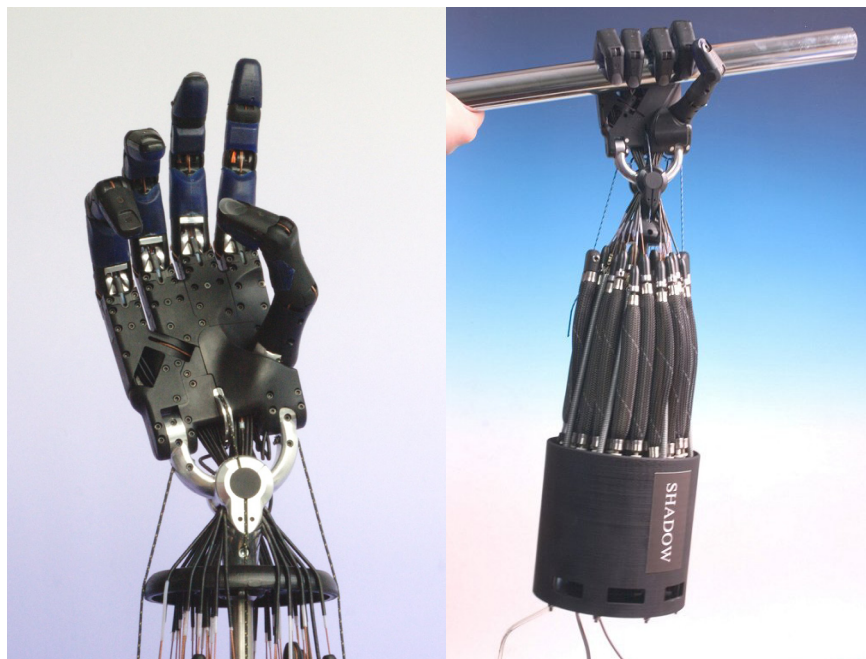
I u području industrijske automatizacije pneumatski mišići se sve više koriste te s uspjehom mogu nadomjestiti primjenu pneumatskih cilindara i omogućiti bolja svojstva u nepovoljnim uvjetima okoline u pogledu otpornosti na vlagu, prašinu i nečistoće u pogonu. Najčešće se koriste za podizanje i spuštanje tereta, u procesima sortiranja, manipuliranja radnim predmetima ili kao pneumatske opru-

Slika 1 Robotska šaka pokretana umjetnim pneumatskim mišićima
Foto: S. Herceg

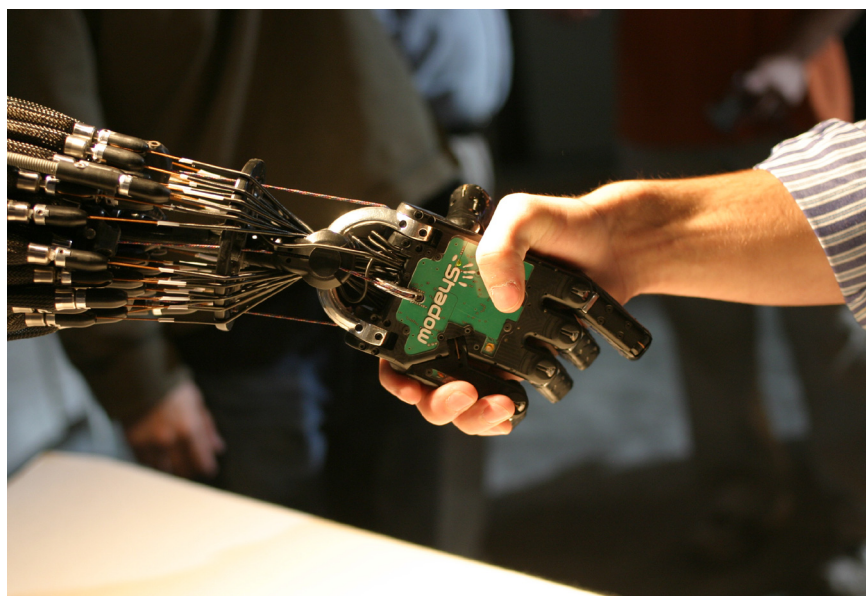




▲ Slika 2 Humanoidni hodajući robot Lucy (prema: B. Verrelst i dr: Control architecture for the pneumatically actuated dynamic walking biped "Lucy", Mechatronics 15; 2005.)



▲ Slika 3 Robotska šaka tvrtke Shadow Robot Company (preuzeto sa: <http://www.shadowrobot.com>)



▲ Slika 4 Mehanički sustav za pokretanje ljudske ruke (prema: N.G. Tsagarakis, D.G. Caldwell: Development of a 'Soft-Actuated' Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training, Autonomous Robots 15; 2003.)



Humanoidni roboti koji koriste pneumatske mišiće kao aktuator, predstavljaju primjer bioničkih sustava kod kojih se nastoji ostvariti konverzija konstrukcijskih principa i procesa prirodnih bioloških sustava s ciljem poboljšanja suvremenih tehnoloških rješenja.

◀ Slika 5 Ortoza za stopalo pokretana pneumatskim mišićima (prema: K.E. Gordon, G.S. Sawicki, D.P. Ferris: *Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle-foot orthosis*, Journal of Biomechanics)

ge. Primjenom poboljšanih upravljačkih komponenta i naprednih upravljačkih algoritama prilagođenih danom zadatku prevladavaju se poteškoće u pogledu regulacije položaja i/ili sile aktuatora.

Pneumatski aktuatori

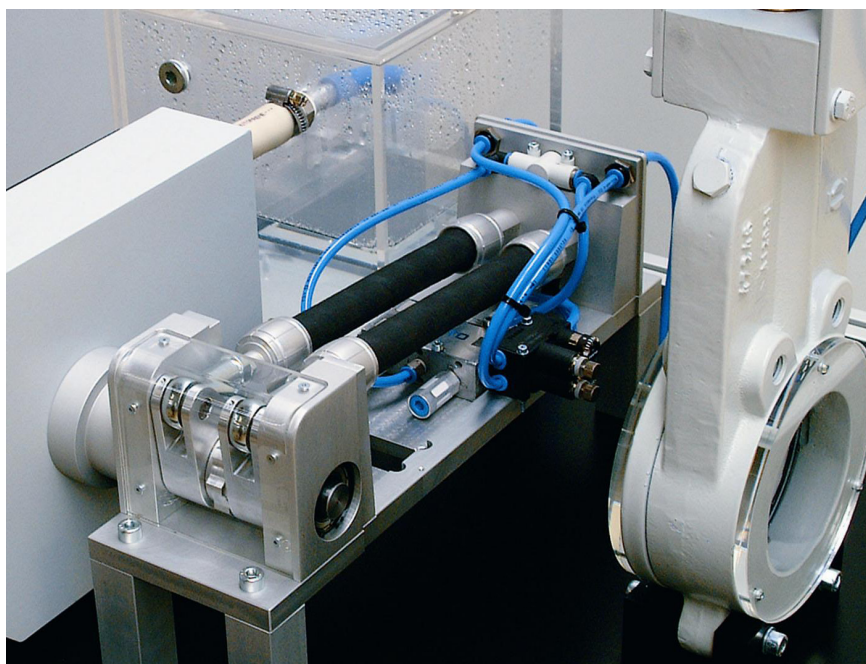
Aktuatori kao osnovne pogonske jedinice sustava (bioloških ili mehaničkih), omogućuju pretvorbu energije u različite oblike gibanja čime se ostvaruje interakcija sustava s njegovom okolinom. Pomoću aktuatora se npr. kod robota ostvaruju sile i momenti koji omogućuju pokretanje zglobova, a time i gibanje elemenata robota. Najčešća je primjena električnih aktuatora (elektromotora) i pogona koji koriste energiju stlačenog fluida – hidrauličkih aktuatora za veće snage, te pneumatskih aktuatora. Električni aktuatori imaju relativno mali odnos snage i težine, tj. malu *specifičnu snagu*, što može biti nepovoljno u nekim primjenama kao što je primjerice kod humanoidnih (antropoidnih) robota. Prednosti pneumatskih pogona su visoka brzina rada, lakoća u prijenosu snage, jednostavnost održavanja, raspoloživost medija, sigurnost operacija, a u usporedbi s elektromotornim i hidrauličkim pogonima, pneumatski sustavi su općenito sigurni od zapaljenja te omogućuju čist radni okoliš. Međutim,

u usporedbi s električnim i hidrauličkim pogonima, pneumatski pogoni su složeniji za upravljanje jer nelinearnosti uzrokovane kompresibilnošću zraka, trenjem, internim i eksternim poremećajima, promjenama tlaka napajanja i opterećenja čine pneumatski sustav zahtjevnim za ostvarenje reguliranog gibanja. Za razliku od pneumatskih cilindara ili pneumatskih motora kao često korištenih aktuatora u industrijskim pogonima, umjetni pneumatski mišić se puno rjeđe koristio kao pogonska jedinica u pneumatskom sustavu. Međutim, tehnološka poboljšanja i inovacije, kao i novi načini regulacije daju pneumatskim mišićima veliki potencijal u industrijskim primjenama za pogon novih vrsta manipulatora.

Pneumatski mišić, koji je nastao kao rezultat interdisciplinarnog istraživanja u području robotskih manipulatora i bioloških sustava, predstavlja zanimljiv izbor tipa aktuatora koji se može koristiti u primjenama za regulaciju položaja i/ili sile manipulatora. Na taj način, npr. humanoidni roboti koji koriste pneumatske mišiće kao aktuator, predstavljaju primjer bioničkih sustava kod kojih se nastoji ostvariti konverzija konstrukcijskih principa i procesa prirodnih bioloških sustava s ciljem poboljšanja suvremenih tehnoloških rješenja.

Nastanak i izvedbe pneumatskih mišića

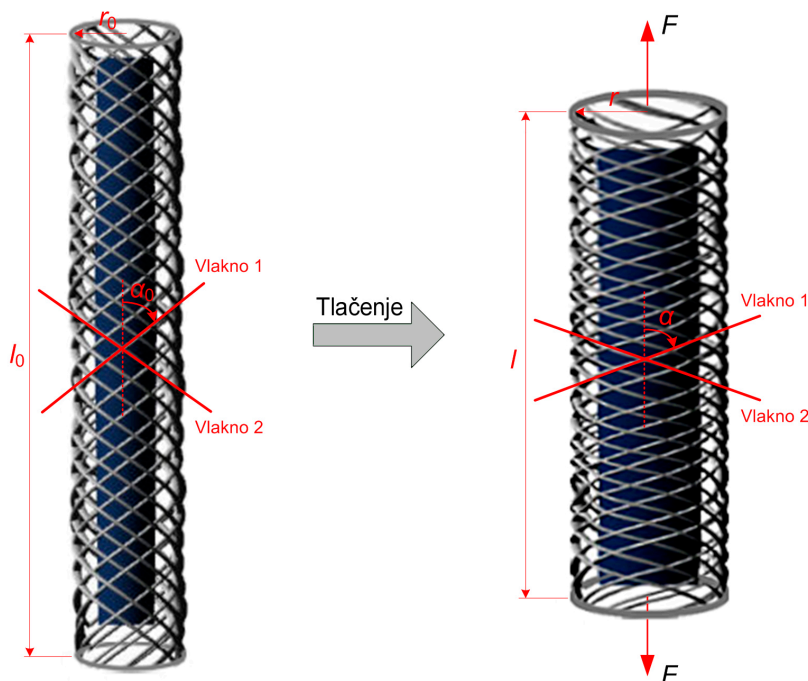
Ruski izumitelj S. Garasiev još je 30-tih godina prošlog stoljeća razvijao različite tipove aktuatora u obliku mišića koji su bili pogonjeni različitim vrstama fluida. Međutim, najčešće korišteni i u literaturi najviše obrađivani pneumatski umjetni mišić je McKibbenov mišić. Njegov izumitelj, liječnik Joseph L. McKibben je s umjetnim mišićem imao ideju pokretanja ortoza ruke njegove kćeri oboljele od dječje paralize pa se pneumatski mišići od tada često koriste i u izradi umjetnih proteza. Loša strana ovoga *mekanoga* aktuatora u izradi umjetnih proteza je potreba za stlačenim plinom koji se mora osigurati u spremniku određenog volumena, što je i bio razlog sve češće upotrebe električnih motora pogonjenih malim električnim baterijama. Međutim, i pneumatski sustavi imaju mogućnost učinkovite pohrane i brze nadopune stlačenog plina (zraka) potrebnog za pogon aktuatora. Tri desetljeća kasnije inženjeri u japanskoj tvornici gume Bridgestone redizajnirali su i poboljšali verziju McKibbenovog mišića (*rubbertuator*), koriste za pogon robotskih članaka. Tvrtka *Shadow Robot Company* koristi čak 40 integriranih pneumatskih mišića za ostvarenje 24 pokreta robotske šake, što je čini usporedivom s ljudskom šakom.



▲ Slika 6 Pneumatski mišići u industrijskoj primjeni. Mehanizam koji služi za pogon crpke za punjenje spremnika fluidom realiziran je s parom pneumatskih mišića. (Preuzeto sa: <http://www.festo.com>)

Zbog jednostavne konstrukcije i održavanja, kao i relativno niske cijene McKibbenov mišić predstavlja najčešće korišteni tip umjetnog pneumatskog mišića.

▼ Slika 7 Shema radnog principa pneumatskog mišića
Foto: S. Herceg



kom. Također i njemačka tvrtka Festo komercijalizira primjenu pneumatskih mišića za potrebe u robotici i industrijskoj automatizaciji. Pokrenuti projekti na velikom broju istraživačkih instituta i sveučilišta u svijetu ukazuju na povećano zanimanje istraživača za primjenu pneumatskih mišića u području robotike, a taj trend će se sasvim sigurno nastaviti i u budućnosti. Pneumatski mišići postižu prihvatljive radne učinke slične biološkim mišićima, te se koriste i u studijama iz područja biomehanike (projektiranje bioloških sustava s inženjerskim pristupom).

Premda ima različitih tipova pneumatskih mišića obično su građeni na način da je elastična zatvorena kontrakcijska membrana, izvana ojačana pletenim vlaknima, pričvršćena s obje strane različitim tipovima prirubnica s priključkom za dovod stlačenog zraka s jedne ili s obje strane mišića. Mišić je karakteriziran početnim vrijednostima duljine, polumjera i kuta nagiba između uzdužne osi mišića i jednog od dvaju isprepletanih vlakana. Kada se u pneumatski mišić dovodi stlačen zrak, membrana se istovremeno radijalno širi (ekspandira) i aksijalno sužava (kontrahira), pri čemu se ostvaruje vlačna sila i gibanje koje je linearno i jednosmjerno.

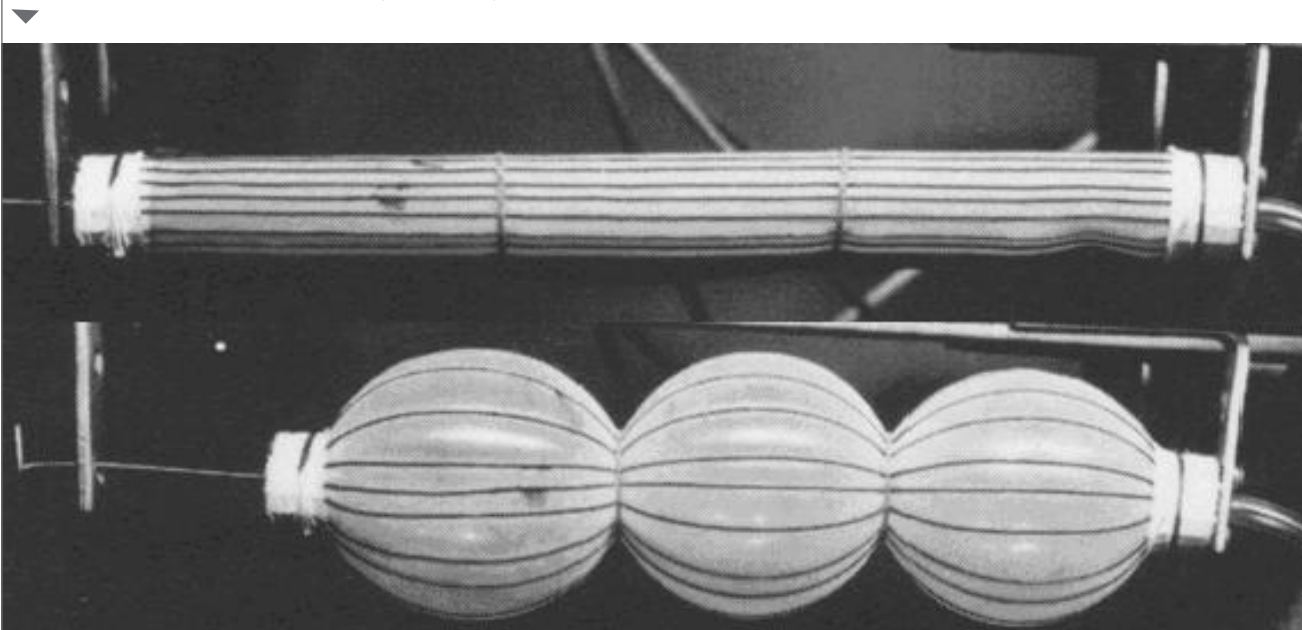
Uz već ranije spomenute izvedbe umjetnih pneumatskih mišića, na Slici 8 prikazane su i druge izvedbe mišića koje se susreću u stručnoj literaturi. Materijali koji se uobičajeno koriste za izradu umjetnih mišića su silikonska guma, lateks, najlonska vlakna i sl. Područje radnih tlakova umjetnih mišića uobičajeno je 100–500 kPa, a maksimalno dozvoljeni tlak ograničen je čvrstoćom kontrakcijske membrane jer pri visokim iznosima tlaka mogu nastati ispuččenja membrane kroz vlakna koja ju okružuju i pucanja membrane.

Zbog jednostavne konstrukcije i održavanja, kao i relativno niske cijene McKibbenov mišić predstavlja najčešće korišteni tip umjetnog pneumatskog mišića. Pneumatski mišić s uzdužnom armaturom (*rubbretuator*), sastoji se od cijevi načinjene od elastomera koja je očvrstnuta vrlo snažnim nitima postav-

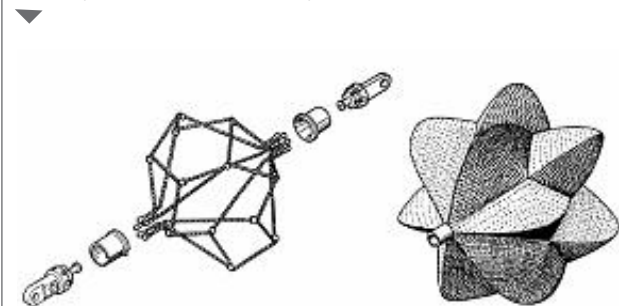
McKibbenov pneumatski mišić ▶



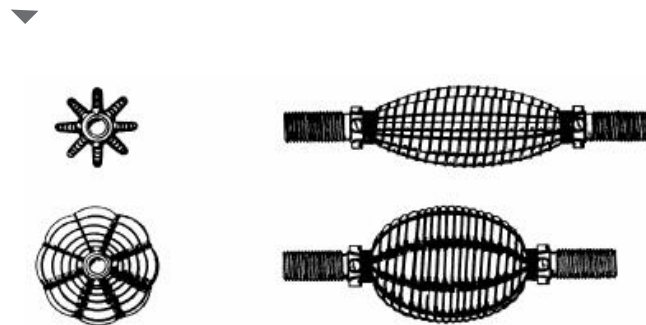
Pneumatski mišić s uzdužnom armaturom (*Rubbertuator*)



ROMAC (RObotic Muscle ACtuator) pneumatski mišić



Yarlottov pneumatski mišić



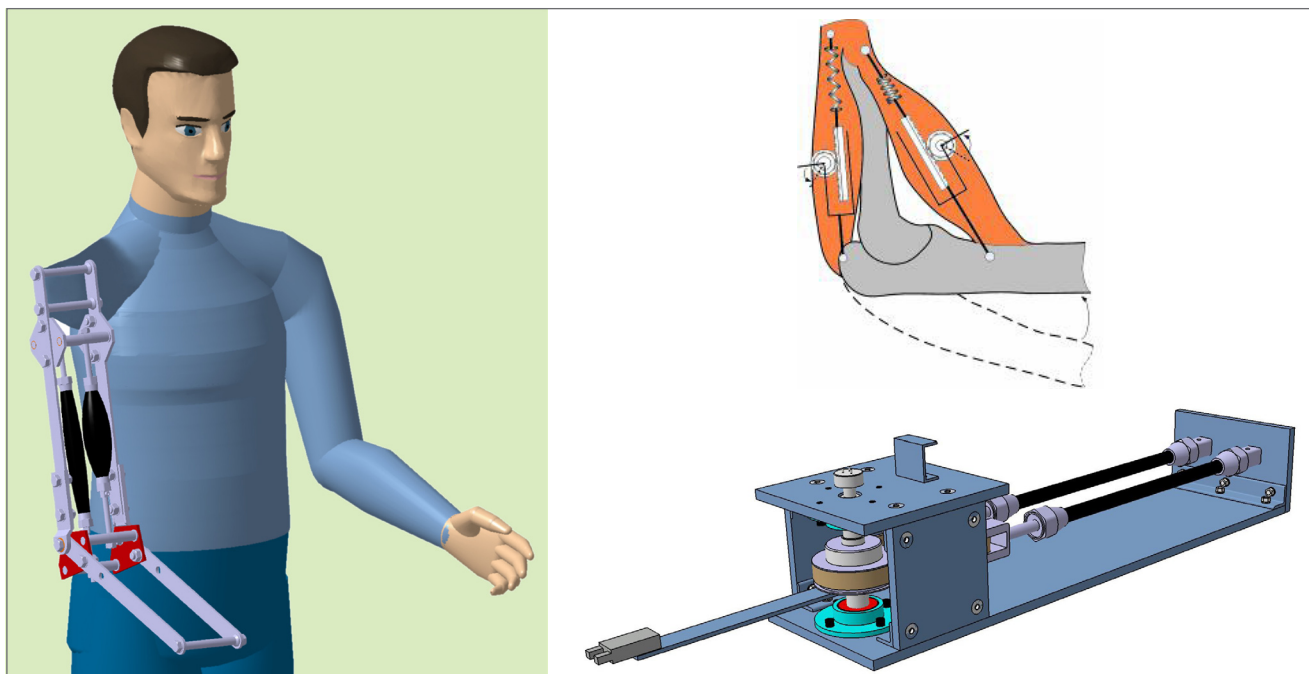
Pneumatski mišić tvrtke FESTO



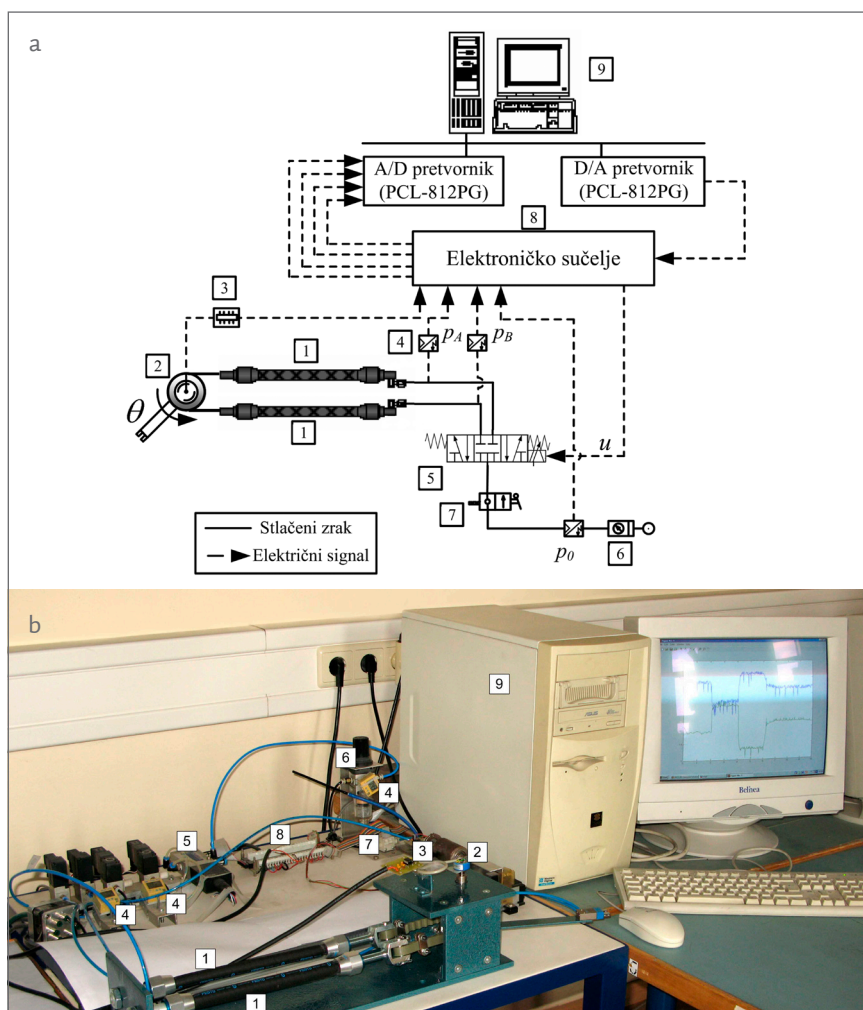
Kukoljev pneumatski mišić



▲ Slika 8 Neke izvedbe umjetnih pneumatskih mišića. (prema: F. Daerden, D. Lefeber: Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation, European Journal of Mechanical and Environmental Engineering 47; 2002.)



▲ Slika 9 Sličnost djelovanja ljudskih mišića s djelovanjem umjetnih pneumatskih mišića
Foto: S. Herceg



► Slika 10 Manipulator s pneumatskim mišićima kao aktuatorima:

a) Shematski dijagram reguliranog sustava:

1. Pneumatski mišić,
2. Rotacijski potenciometar,
3. Referenca napona,
4. Osjetilo tlaka,
5. Proporcionalni ventil,
6. Pripremna grupa,
7. Ventil za otvaranje/zatvaranje dovoda zraka,
8. Elektroničko sučelje,
9. Upravljačko računalo

b) Fotografija eksperimentalnog sustava. Manipulator je načinjen u Zavodu za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

ljenim uzduž mišića. Pneumatski mišić tipa ROMAC sastoji se od višedjelnog mjehura izrađenog od nepropusnog, fleksibilnog materijala visoke krutosti obavijenog mrežom načinjenom od žice koja je s obje strane zatvorena spojnim elementima. Žičana mreža povezana je u čvorove, tako da oblikuje niz četverostranih ispupčenja, koja se pri upuhivanju fluida pod tlakom širi u radijalnom smjeru i istovremeno skraćuje u aksijalnom smjeru. Pri tome je ukupna površina aktuatora konstantna zbog slabo rastezljive obloge. Zbog smanjenja trenja i iznimno čvrste konstrukcije ostvaruju se veće vlačne sile aktuatora. Yarlottov pneumatski mišić sastoji se od membrane loptastog oblika, preko koje su u aksijalnom smjeru prevučene žice. U napuhanom stanju mišić poprima sferni oblik, dok pri niskim iznosima tlaka nastaje niz ispupčenja i udubljenja po obodu mišića. Kukoljev pneumatski mišić predstavlja varijaciju McKibbenovog mišića. Osnovna razlika je u vanjskom pletivu od vlakana koje je kod Kukoljevog mišića izvedeno kao otvorena mreža. Nešto robustniji tip pneumatskog mišića predstavlja fluidički mišić tvrtke Festo. Izvedba ovog mišića uključuje fleksibilnu polimernu cijev visoke čvrstoće dodatno ojačanu žičanim pletivom, čime je dobivena kompaktna

struktura sa smanjenim iznosom trenja, koja omogućuje vrlo veliki broj radnih ciklusa (prema podacima proizvođača i do 10 milijuna ciklusa).

Konstrukcija ruke manipulatora s pneumatskim mišićima kao aktuatorima

Par spregnutih, suprotno djelujućih pneumatskih mišića zakreću rotacijski zglob manipulatora na sličan način kao što se odvija zakretanje ljudske podlaktice oko lakta skupljanjem i izduživanjem mišića bicepsa i tricepsa. Dva suprotno djelujuća pneumatska mišića direktno su povezani remenom te vlačne sile mišića zakreću remenicu na kojoj je pričvršćena ruka manipulatora. Početni tlak unutar mišića je približno jednak. Rotacijsko gibanje ruke manipulatora ostvaruje se povećanjem tlaka u jednom mišiću uz istovremeno smanjenje tlaka u drugom, suprotno djelujućem mišiću. Stupanj kontrakcije pneumatskih mišića uobičajeno je do 25 % njegove početne duljine.

Na Slici 10 prikazan je shematski dijagram i fotografija eksperimentalnog modela manipulatora koji koristi pneumatske mišiće kao aktuatore. Eksperimentalni postav moguće je podijeliti na mehanički dio i upravljački dio sustava. Mehanički dio sastavljen je od manipulatora koji uključuje pneumatske miši-

će, sklopa pomoću kojeg se ostvaruje rotacijsko gibanje ruke s prihvatnicom, proporcionalnog ventila za upravljanje protokom zraka prema aktuatorima, senzora za mjerenje kuta zakreta ruke manipulatora i tlakova u aktuatorima, te sustava za pripremu i dovod stlačnog zraka. Upravljački dio sustava čine računalo i sustav za akviziciju (prihvat i obradu) signala. Upravljački program (algoritam upravljanja), implementiran je na računalo i izveden je u programskom jeziku C. Mjereni signali sa senzora se putem A/D (analogno/digitalnog) pretvornika kartice za prihvat i obradu signala učitavaju u računalo. U računalo se izvršava algoritam upravljanja te se izračunati upravljački signal putem D/A (digitalno/analognog) pretvornika šalje na ventil, koji upravlja protokom zraka prema aktuatorima. Promjenom količine zraka u aktuatorima se mijenjaju tlakovi, što uzrokuje različite vlačne sile u aktuatorima koje zakreću ruku manipulatora. Pri tome, regulator realiziran u upravljačkom algoritmu nastoji održati pogrešku regulacije (razliku između referentnog, tj. željenog kuta zakreta i ostvarenog, tj. mjenog kuta zakreta) što manjom.

Za one koji žele znati više

- F. Daerden, D. Lefeber; Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation, *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47, pp. 10-21, 2002,
- N. Tsagarakis; D. G. Caldwell: Development and Control of a 'Soft-Actuated' Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training, *Autonomous Robots*, 15, pp. 21-33, 2003,
- F. Daerden; Conception and Realization of Pleated Pneumatic Artificial Muscles and their Use as Compliant Actuation Elements, disertacija, Vrije Universiteit Brussel, 1999,
- R. Van Ham; Compliant Actuation for Biologically Inspired Bipedal Walking Robots, disertacija, Vrije Universiteit Brussel, 2006,
- K. E. Gordon, G. S. Sawicki; D. P. Ferris: Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle-foot orthosis, *Journal of Biomechanics*, 39, pp. 1832-1841, 2006,
- S. Herceg; Konstrukcija robotske ruke s pneumatskim mišićima kao aktuatorima, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, završni rad (mentor é. äitum), 2007,
- Shadow Robot Company, The Hand Overview, <http://www.shadowrobot.com/hand/>,
- Fluidic Muscle DMSP/MAS, FESTO katalog, 2005.