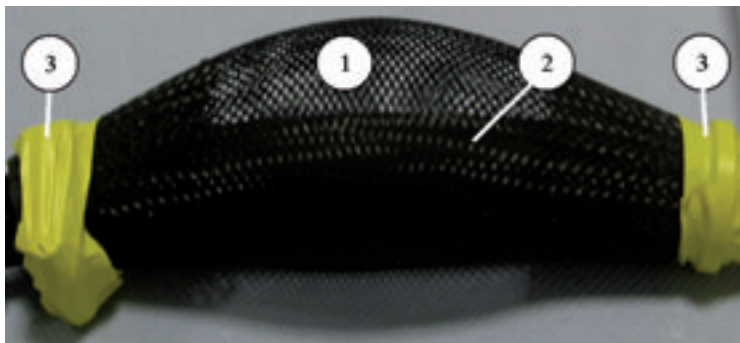


# Muscoli a fluido



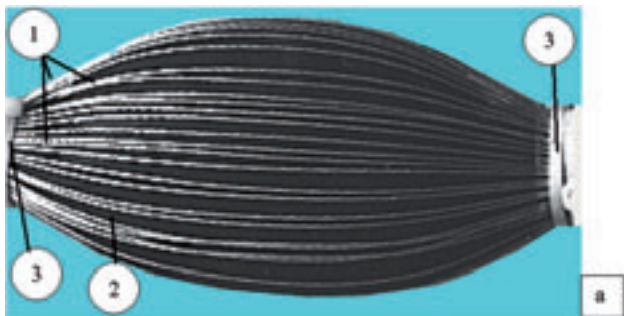
**1. Muscolo di McKibben**  
in condizioni di riposo.

Un particolare tipo di attuatori pneumatici, meno diffusi dei tradizionali cilindri pneumatici, ma non per questo meno interessanti è rappresentato dagli attuatori pneumatici flessibili. Essi sono attuatori che sfruttano la grande deformabilità di setti e pareti, realizzati solitamente in elastomero. Tra questi un posto importante occupano i cosiddetti muscoli pneumatici artificiali (Pam Pneumatic artificial muscle). Questi attuatori agiscono contraendosi a fronte di una pressurizzazione di camere di opportuna geometria. La loro caratteristica di funzionamento riporta la forza di attuazione a data pressione in funzione della frazione di corsa effettuata. La forza di attuazione, infatti, non dipende soltanto dal livello di pressione del fluido di lavoro, ma anche dalla frazione di corsa realizzata. A causa di questo essi hanno un comportamento del tipo di quello di un elemento elastico attivo, per il quale la forza generata è funzione dell'entità della deformazione raggiunta e del livello di pressurizzazione dell'attuatore. Questi attuatori muscolari a fluido sono economici, leggeri, capaci

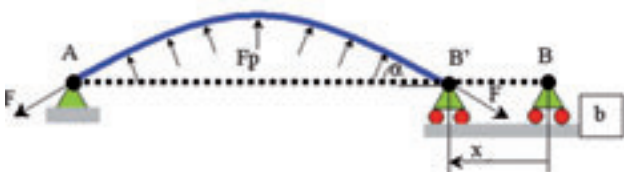
di grandi forze di attuazione in rapporto al loro peso. Inoltre, questi attuatori sono dotati di tenute statiche e, quindi, esenti da perdite per attriti in tenute striscianti e da fughe di fluido di lavoro. Caratteristica importante di questo tipo di attuatori è la capacità di operare con fluidi diversi, generici, senza particolari caratteristiche. Si possono, dunque, utilizzare fluidi sicuri, economici, antideflagranti e leggeri. Questi attuatori possono, ad esempio, lavorare con acqua, aria, olio. Inoltre, essi possono operare in ambienti ostili, con forti gradienti di temperatura, vibrazioni, polveri, disturbi elettromagnetici. Altra importante caratteristica di questi attuatori è la possibilità di operare agevolmente in presenza di montaggi con disallineamenti significativi, senza introdurre onerose sollecitazioni dovute a configurazioni iperstatiche.

Gli attuatori flessibili sono caratterizzati dalla presenza di una membrana in parete sottile, ad elevata deformabilità, che delimita una camera in cui agisce il fluido in pressione; essa è leggera e in grado di raccogliere la forza che deriva

Gli attuatori pneumatici flessibili spiccano tra le proposte più interessanti di progettisti e ricercatori nel campo della pneumatica. I principali tipi di muscoli pneumatici, proposti da centri di ricerca e aziende di punta del settore della potenza fluida, analizzandone alcune prestazioni e indicandone le caratteristiche

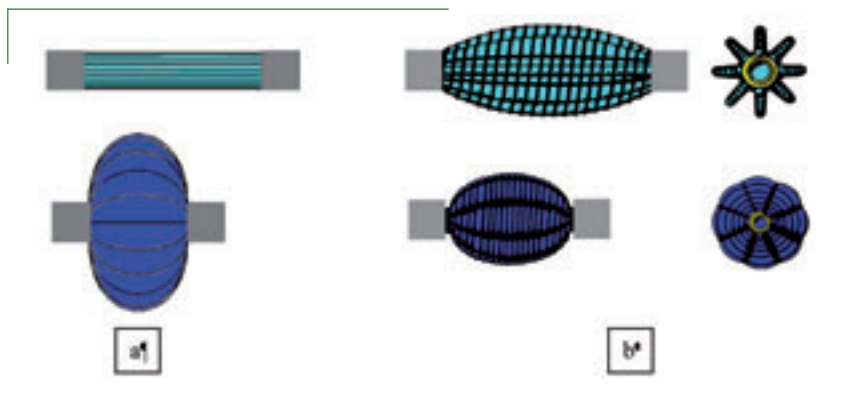


**2. Muscolo a fibre dritte (a)** e diagramma di corpo libero (b) di una fibra sottoposta a carico di pressione  $F_p$  e carico esterno  $F$ .



**3. Muscolo pieghettato (a)** e muscolo di Yarlott (b).

dall'azione del fluido in pressione. A questa camera deformabile si impongono vincoli cinematici selettivi e direzionali che le consentono di dilatarsi lungo particolari direzioni predefinite, per esempio solo radialmente o solo assialmente, impedendo deformazioni in altre direzioni. Tra i muscoli pneumatici più diffusi e utilizzati ci sono i muscoli a fibre intrecciate detti anche muscoli di McKibben, brevettati da Gaylord nel 1958 e applicati in campo biomeccanico da McKibben [1],[2]. Il muscolo di McKibben è costituito da una camera deformabile di forma cilindrica, una maglia esterna che costituisce il vincolo alla camera quando questa è pressurizzata, e due testate che permettono il collegamento a vincoli e carico esterni e l'alimentazione con il fluido in pressione. In figura 1 si vede l'immagine di un muscolo di McKibben in condizioni di riposo. Il principio di funzionamento del muscolo di McKibben si basa sull'inestensibilità di fibre (1) avvolte ad elica intorno alla camera gonfiabile interna (2) ed ancorate alle testate di estremità (3) che permette l'ancoraggio e l'alimentazione dell'attuatore. In presenza di una pressurizzazione della camera interna si ha una dilatazione della camera stessa che viene a contatto con le fibre inestensibili avvolte intorno ad essa. Queste ultime, ancorate alle testate di estremità, avvicinano le testate quando la camera, sotto l'azione del fluido in pressione, assume un ingombro radiale maggiore. In questo modo si realizza una contrazione del muscolo. Un altro tipo di muscolo pneumatico è rappresentato dal muscolo a fibre dritte che è un muscolo di McKibben con passo dell'elica delle fibre tendente



a infinito. Un esempio di questo tipo di muscolo è rappresentato in figura 2: la fotografia mostra un prototipo di questo tipo di muscolo realizzato presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino [4]. In figura 2a si vede il muscolo, con le fibre poste sulla superficie della camera non più lungo un'elica, come per il muscolo di McKibben, ma lungo i meridiani della camera pressurizzata. In figura si vedono le fibre (1), la camera in elastomero (2) e le testate (3) per l'ancoraggio e l'alimentazione dell'attuatore. In figura 2b si ha il diagramma di corpo libero di una delle fibre che corrono da una testata all'altra del muscolo lungo i meridiani, sulla superficie della camera; si vede lo schema di una fibra indeformata AB e deformata AB', sottoposta al carico di pressione rappresentato dalla componente di forza radiale  $F_p$ , dovuta alla pressione del fluido nella camera, e soggetta alla quota di carico esterno  $F$ , applicata al muscolo. Quest'ultima, che è rappresentativa della forza di attuazione, può divenire anche grandissima; questo è tanto più vero quan-

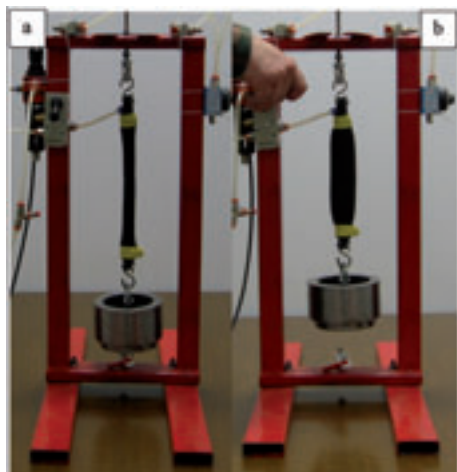
to più il muscolo è stirato e le fibre sono prossime ad essere parallele all'asse dell'attuatore, in una condizione di rettilineità. La fibra si fa carico di una quota  $F$  dell'intero carico esterno. La singola fibra, sottoposta a carico di pressione, realizza una trazione  $F = F_p / (2 \sin(\alpha))$  tanto più grande, quanto più l'angolo  $\alpha$  è piccolo. Questo attuatore è estesamente descritto e confrontato con il muscolo di McKibben [3],[4].

Un'interessante evoluzione del muscolo a fibre dritte è rappresentata dal muscolo pieghettato [5] e dal muscolo di Yarlott [6]. In questi attuatori la parete della camera, invece che essere realizzata da una membrana elastomerica che si deforma, assorbendo così lavoro di deformazione, è costituita da una membrana pieghettata lungo direzioni

assiali, evitando così di assorbire lavoro di deformazione del materiale durante il suo spiegamento radiale. Altro significativo esempio di muscolo, che evita perdite di energia in deformazione della membrana, è il muscolo RoMaC (Robotic Muscle Actuator) [7]. Anche in quest'ultimo la membrana è pieghevole e, per il cambiamento di geometria della camera, non è necessaria la deformazione del materiale ma il dispiegamento della membrana. In figura 3 si vede uno schema dell'attuatore pieghettato e dell'attuatore di Yarlott, sia in condizioni di riposo sia sotto carico.

## Le prestazioni di muscoli pneumatici

La caratterizzazione statica di questi attuatori mira a conoscere l'andamento della forza sviluppata dall'attuatore per diversi valori di pressione del fluido di lavoro, alle diverse frazioni di corsa realizzata, da corsa nulla a corsa massima. Le prove di caratterizzazione possono essere svolte a carico costante, usando ad esempio pesi calibrati, la-



**4. Muscolo in prova per la caratterizzazione:** muscolo non pressurizzato (a), pressurizzato (b), caratteristica qualitativa (c).

sciando libera una delle testate di estremità e sospendendo l'attuatore all'altra, oppure si può eseguire la prova a punto fisso vincolando entrambe le testate e rilevando la forza di attuazione con un trasduttore di forza per diversi valori di contrazione del muscolo.

In queste prove il muscolo pneumatico in prova è vincolato a una struttura con rigidità di molto più grande di quella dell'attuatore in prova. Per la prova a carico costante si utilizza un peso calibrato sospeso ad una delle testate, mentre l'altra è vincolata al telaio. In questo modo è possibile, imponendo diversi valori di pressione di alimentazione, rilevare la corsa della testata libera misurandone lo spostamento. Si potranno tracciare diverse curve dell'andamento della contrazione dell'attuatore, in funzione della pressione di alimentazione; queste curve avranno come parametro il carico imposto. In figura 4 si vede l'attrezzatura utilizzata per la caratterizzazione, con l'attuatore sottoposto a un carico noto e nelle due diverse condizioni: senza (4a) e con (4b) pressurizzazione. Se, invece, si impone la corsa vincolando entrambe le testate si può tracciare l'andamento della forza sviluppata dall'attuatore in funzione della contrazione per diversi valori di pressione di alimentazione. In questa prova è necessario utilizzare un trasduttore di forza collegato a una delle due testate. I risultati delle prove, sia che queste siano realizzate a corsa imposta sia a carico costante, sono riportati in grafici del tipo di quello rappresentato in figura 4c. In questi grafici si riporta la forza generata dall'attuatore, in funzione della contrazione rappresentata dalla corsa; ciascuna curva è parametrizzata con la pressione di alimentazione.

## Applicazioni e considerazioni

Le interessanti potenzialità dei muscoli pneumatici hanno visto applicazione, nella realizzazione detta di McKibben, già dal 1958 in ortesi per l'ausilio a disabili, ma, più recentemente, si trovano realizzazioni interessanti che sono state commercializzate. Tra queste il Rubbertuator, proposto sul mercato della giapponese Bridgestone e applicato a realizzazioni di robotica non convenzionale di alto interesse [8],[9]. Altro importante esempio di realizzazione industriale di muscoli pneumatici è offerto dalla tedesca Festo, azienda specializzata nella pneumatica industriale [10], che definisce il proprio Pam come un attuatore pneumatico senza stelo, con membrana contrattile, dinamico, potente, senza effetto stick-slip, a semplice effetto in trazione. Interessanti prodotti ed esempi pregevolissimi di applicazioni sono offerti dalla inglese Shadow Robot Company [11].

Questi esempi di tipo industriale sono solitamente rivolti a realizzazione che utilizzano lo schema del muscolo di McKibben. Nel campo della ricerca ci si rivolge con particolare interesse anche a muscoli di tipo diverso: in particolare hanno trovato applicazioni interessanti i muscoli a fibre dritte. In conclusione, i muscoli pneumatici rappresentano una delle più recenti e interessanti tematiche di ricerca della robotica non convenzionale, come testimoniano le numerose ricerche in corso in campi diversi e ad alto valore aggiunto: applicazioni aerospaziali, in campo biomeccanico, per l'ausilio ad operazioni delicate in ambiente controllato e in camere bianche. Infine, questi attuatori, privi intrinsecamente del fenomeno dello stick and slip non avendo organi striscianti, of-

frono interessanti prospettive per realizzazioni di posizionatori controllati anche a bassissima velocità. L'autore ringrazia il Ministero Italiano dell'Istruzione, Università e Ricerca (Miur) che ha contribuito alle ricerche presentate (ndr).

A. Manuello Bertetto, professore ordinario di Meccanica applicata alle macchine, Dipartimento di Ingegneria meccanica, Università degli Studi di Cagliari.

readerservice.it n. 258

## Bibliografia

- [1] Gaylord, R.H.; 1958, USA Patent 2844126
- [2] H. F. Schulte, The characteristics of the McKibben Artificial Muscle, *The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics*, pp. 94-115, National Academy of Sciences-National Research Council, Publication 874, Lake Arrowhead, 1961.
- [3] C. Ferraresi, W. Franco, A. Manuello Bertetto, Flexible Pneumatic Actuators: a comparison between the McKibben and the straight fibres muscle, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Tokyo, Vol.13 N.1, february 2001, pp. 56-63, Issn 0915-3942.
- [4] A. Manuello Bertetto, M. Ruggiu, "Characterization and modeling of air muscles", *Mechanics Research Communications Pergamon Press*, ed. B. Boley, 31 pp.185-194, 2004.
- [5] F. Daerden, D. Lefeber, B. Verrelst, R. Van Ham, "Pleated pneumatic artificial muscles: actuators for automation and robotics", 2001 IEEE Asme international Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, 8-12 July 2001, Como, Italy.
- [6] J. M. Yarlott, "Fluid actuator", US Patent No. 3 645 173, 1972.
- [7] G. B. Immega, Romac muscle powered robots", Technical report MS86-777, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 1986.
- [8] K. Inoue, "Rubbertuators and applications for robotics", *Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics Research*, pp. 57-63, 1987.
- [9] Robert T. Pack, Joe L. Christopher Jr. and Kazuhiko Kawamura, "A Rubbertuator-Based Structure-Climbing Inspection Robot", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico - April 1997.
- [10] <http://www.festo.com>
- [11] <http://www.shadowrobot.com>