

I POLIMERI ELETTROATTIVI

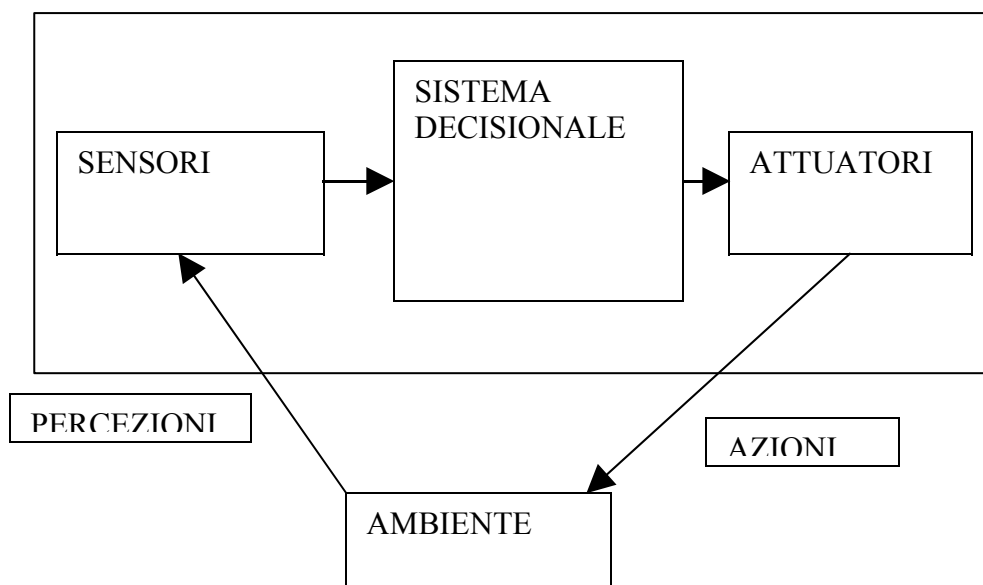
E

**LORO UTILIZZO NEI MUSCOLI
ARTIFICIALI.**

A CURA DI MARCO BUTTOLO.

INTRODUZIONE:

Un robot viene visto come un agente che interagisce con il mondo circostante. Per poter fare ciò il robot si serve di due tipi di dispositivi: *i sensori* e gli *attuatori*. I sensori sono quei dispositivi che permettono al robot di percepire l'ambiente in cui è immerso, mentre gli attuatori gli permettono di agire sull'ambiente stesso. La seguente figura illustra quanto è stato appena detto:



In questa sede intendiamo analizzare gli attuatori e più precisamente un particolare tipo di attuatore basato sui polimeri elettroattivi. Da tempo i fisici stanno studiando materiali in grado di adattarsi, cioè materiali in grado di deformarsi creando forze in piccoli dispositivi detti attuatori. Questo tipo di studio è nato dall'esigenza di trovare materiali poco ingombranti in grado di sostituire leve o martinetti idraulici. Quindi questi materiali rivoluzionari sono destinati alla messa a punto di manipolatori microscopici e di bracci artificiali. I materiali più studiati per queste applicazioni sono le **ceramiche piezoelettriche**, le **leghe che conservano memoria di forma**, e i **polimeri**. Tutti questi materiali purtroppo soffrono dello stesso difetto: sono fragili. Per esempio le ceramiche piezoelettriche vengono usate per pilotare la testina di lettura di un disco rigido, ma si deformano facilmente se soggette ad un campo elettrico. I materiali polimerici sopportano grandi deformazioni e sono robustissimi oltre a deformarsi rapidamente e ad essere molto malleabili. Una caratteristica che contraddistingue fortemente questi tipi di materiali è la loro similarità operativa con il funzionamento dei muscoli naturali, ed in particolare la loro elasticità e la loro abilità ad indurre grandi sollecitazioni di attuazione. Per decenni i ricercatori hanno cercato un dispositivo artificiale equivalente, in termini funzionali, al muscolo. Un muscolo, analizzandone le sue caratteristiche, ha la particolarità che cambiando semplicemente la propria lunghezza in risposta ad uno stimolo nervoso, è in grado di esercitare un determinato tipo di forza controllata. Tale forza può essere di

qualsiasi intensità, chiaramente rientrando nei limiti del muscolo stesso. Un muscolo esibisce anche un'altra proprietà molto importante che prende il nome di *invarianza di scala*. Per essere più precisi con questo termine si indica il fatto che un muscolo lavora con la stessa efficienza in qualunque posizione e in tutte le dimensioni. Allo stesso modo dei muscoli naturali, i quali utilizzano per il proprio funzionamento l'energia chimica, anche i muscoli artificiali hanno bisogno di energia per contrarsi oppure allungarsi. Una classe particolare di polimeri sono i polimeri elettroattivi. Prima dell'avvento dei materiali basati sui polimeri elettroattivi, esistevano dei materiali denominati *elettroattivi ceramici (EAC)* i quali erano compatti ed erano incorporati in motori, manipolatori, e così via. Poi sono comparsi i materiali basati sui polimeri elettroattivi i quali godono della proprietà di esercitare uno spostamento nettamente maggiore rispetto ai materiali elettroattivi ceramici che risultavano essere piuttosto rigidi. La seguente tabella mostra le differenze in termini di prestazioni tra queste due tecnologie:

CARATTERISTICHE	EAC	EAP
Forza di attuazione	0,1-0,3%	>10%
Velocità di reazione	Dal microsecondo al secondo	Dal microsecondo al secondo
Densità	6-8 g/cc	1-2,5 g/cc
Voltaggio di guida	50-800 volt	10-100 volt
Potenza consumata	Watt	milliwatt
caratteristiche	Fragilità	elasticità

Quindi come si può notare dalla tabella i materiali EAP presentano dei vantaggi che i materiali EAC non hanno. I nuovi muscoli artificiali sfruttano quindi la tecnologia dei *polimeri elettroattivi (EAP)*. I polimeri elettroattivi altro non sono che dei materiali che si muovono in risposta a stimoli elettrici. I muscoli basati su tale tecnologia promettono di diventare i nuovi muscoli del futuro. Tutto ebbe inizio un po' di anni fa quando alcuni individui tra cui Yoseph Bar-Cohen, un ricercatore scientifico, lanciò una sfida alla comunità di ricercatori dei polimeri elettroattivi a sostegno dell'interesse sul campo. Tale sfida consisteva nel costruire il primo braccio robotico guidato che avrebbe potuto competere a braccio di ferro con un braccio umano. Comunque la prima offerta seria di prodotti legati alla tecnologia dei polimeri elettroattivi è legata alla **SRI international**, un laboratorio di ricerca no-profit in California che in pochi mesi ha tentato di lanciare una compagnia chiamata **Artificial Muscle Incorporated** per il commercio di prodotti con tecnologia legata agli EAP. Oggi i polimeri vengono sempre più utilizzati in campi evoluti come nel campo aerospaziale, proprio grazie alla loro bassa densità. Vengono utilizzati anche in altri campi come le strutture gonfiabili (come per esempio i palloni che fungono da cuscini di ammortizzamento del colpo quando un aerorobot atterra) grazie alla flessibilità che questi materiali hanno. Essi sono stati utilizzati anche negli attuatori ed in particolare nell'attuatore di **McKibben**. L'uso dei polimeri con reazione elettroattiva è emersa solo negli ultimi decenni con l'introduzione di materiali EAP aventi significativi livelli di spostamento (in termini di contrazione ed espansione). Questi materiali sono altamente attrattivi per la loro bassa densità, come è già stato detto, con un'alta capacità di sollecitazione che è molto più alta delle rigide e fragili ceramiche elettroattive. Come è già stato detto la caratteristica forse più interessante dei polimeri elettroattivi è la loro abilità nell'emulare muscoli naturali. Si può dire che questo sia il lato più positivo di questa tecnologia. Anche nel campo biomedico i polimeri elettroattivi vengono molto utilizzati. Infatti i sistemi bionici fanno un largo uso di queste tecnologie. Quindi riassumendo il campo dei polimeri elettroattivi è relativamente nuovo, e sono utilissimi grazie alla capacità di questi materiali di produrre forti spostamenti ed emulare un muscolo naturale. Come tutti i sistemi complessi, anche un sistema guidato dai polimeri elettroattivi può essere scomposto nei suoi componenti costituenti.

Questi componenti in realtà sono solo possibili applicazioni di un ipotetico attuatore EAP. Quindi un tale attuatore può venire utilizzato nei seguenti campi:

1. in **controlli intelligenti** come per esempio la navigazione, l'operazione di evitare gli ostacoli, eccetera.
2. nell'ambito **sensoriale**
3. nell'ambito della **mobilità** come per esempio per svolgere le funzioni di camminare, guidare, volare, nuotare, eccetera.

Sfortunatamente prima i materiali che erano emersi nel settore presentavano una capacità di esibizione della forza relativamente bassa e/o erano piuttosto lenti nella risposta. Perciò non era possibile utilizzare tali materiali in prodotti da immettere effettivamente sul mercato. Fortunatamente in anni recenti si sono scoperti materiali EAP che presentano le capacità di esercitare forze maggiori. Questo comporta la loro applicazione in contesti differenti come per esempio un muscolo artificiale su un braccio robotico che permette al braccio stesso di compiere spostamenti più significativi. Un esempio di questi recenti materiali sono le membrane di scambio di ioni, i **polimeri a gel** e così via. Nello sviluppo effettivo di materiali EAP, le caratteristiche di un muscolo naturale possono servire come punto di partenza. Inoltre le caratteristiche a livello di performance di un muscolo sono di solito difficili da misurare. Come abbiamo già detto i polimeri elettroattivi possono venire utilizzati largamente per molti dispositivi, come per esempio per creare robot altamente flessibili in grado di camminare, nuotare, volare e così via. Si pensi ad esempio ai robot colonizzatori della NASA che hanno messo piede su Marte. Si ricordi comunque che conta molto anche il tipo di dispositivo su cui si vogliono usare i materiali EAP, e soprattutto l'ambito di utilizzo di questi dispositivi. In particolare conta tanto la dimensione del dispositivo. Per esempio se vogliamo emulare il movimento di un insetto avremo bisogno di dispositivi che funzionano con i materiali EAP, ma questi dovranno essere piuttosto piccoli. Un'applicazione molto importante degli attuatori elettroattivi riguarda le applicazioni spaziali che presentano anche le condizioni più ardue in cui un robot è costretto ad operare. Infatti in questo contesto al robot sono richieste delle caratteristiche molto importanti come per esempio la durabilità che lo stesso deve possedere oppure la robustezza. Un'altra applicazione degli attuatori elettroattivi consiste nei bracci robotici miniaturizzati con un controllo in anello chiuso (che è anche il tipo di controllo usato in tutti gli ambiti industriali). Per esempio esiste un attuatore elettroattivo **longitudinale** brevettato dalla SRI international che si abbassa e si alza e che permette di sollevare oppure abbassare vari oggetti. Per fare ciò questo braccio longitudinale si serve anche di una mano con quattro pinze. Quindi concludendo questa breve introduzione sulle tecnologie dei polimeri elettroattivi e sul loro utilizzo, possiamo affermare che i polimeri elettroattivi sono emersi pochi anni fa con quella grande potenzialità di emulare un muscolo reale. Comunque lo sviluppo di una struttura effettiva per questo campo è piuttosto critica per la poca disponibilità, fino a poco tempo fa, di materiali adatti al loro inserimento in un dispositivo da introdurre sul mercato.

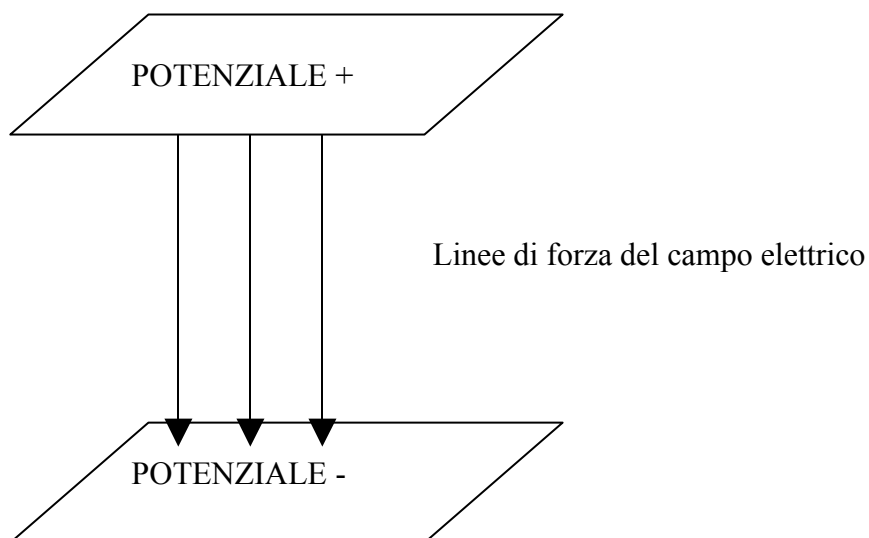
LA TECNOLOGIA DEI POLIMERI ELETTROATTIVI:

Vediamo ora di entrare maggiormente nel dettaglio della tecnologia dei polimeri elettroattivi. Innanzitutto ci chiediamo cosa è un polimero. Per definizione un **polimero** è una molecola complessa, a lunga catena, costituita a sua volta da molte (si parla di centinaia e forse migliaia)

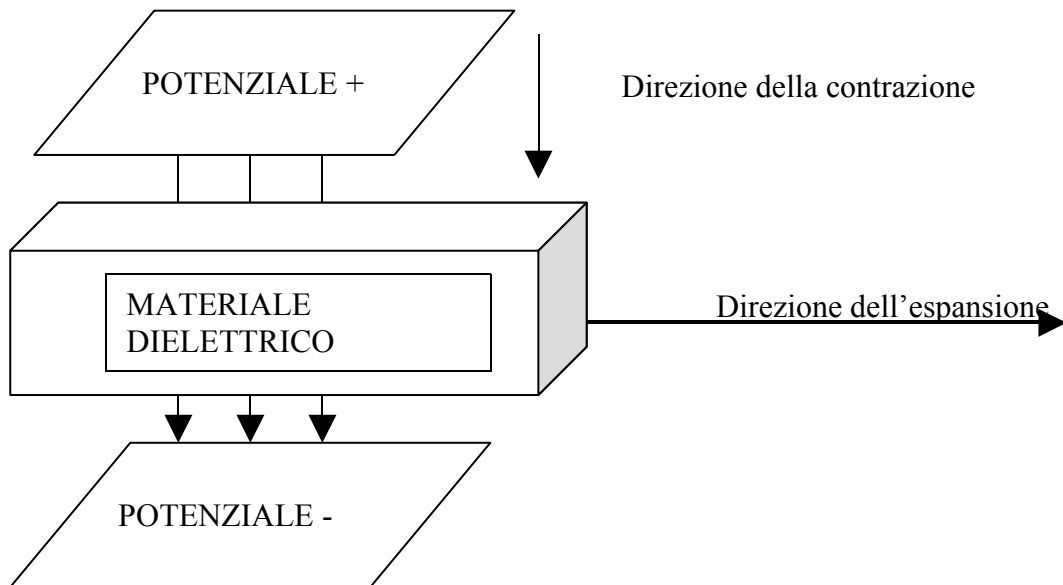
unità più piccole dette **monomeri**. Per essere più precisi esistono molecole che possiedono masse molecolari stimate attorno a milioni di unità di massa atomica. Queste molecole sono dette macromolecole oppure per l'appunto polimeri. I polimeri sono costituiti da semplici molecole a basse masse molecolari unite tra di loro per formare molecole estremamente grandi. Un esempio di polimero molto comune è il **polietilene**. Un altro polimero molto usato in pratica è il lattice o **gomma naturale**. Purtroppo i prodotti sintetici della gomma ebbero un uso limitato in quanto erano appiccicosi in estate e rigidi in inverno. Ma nel 1839 Charles Goodyear scoprì accidentalmente che riscaldando una miscela di zolfo e gomma si otteneva un prodotto molto più resistente al caldo e al freddo, e moto più elastico. Questo processo va sotto il nome di **vulcanizzazione**. Lo scopo di questo processo è quello di formare legami incrociati tra lunghe catene polimeriche. Altri esempi di polimeri sono il **nylon** e il **teflon**. Esistono due tipi sostanziali di reazione di polimerizzazione. C'è la **polimerizzazione a catena** dove i monomeri con doppi legami carbonio-carbonio reagiscono e come risultato finale si ha una apertura dei doppi legami con la conseguenza che le unità monomeriche si addizionano alle catene in crescita, e c'è la **polimerizzazione a stadi** detta anche polimerizzazione per condensazione dove qualsiasi coppia di monomeri è libera di legarsi in un **dimero**, e poi un dimero può unirsi ad un altro monomero per formare un **trimero**, e così via.

Detto ciò vediamo ora più nel dettaglio il funzionamento dei polimeri e in particolare dei polimeri elettroattivi. Per essere più precisi i **polimeri elettroattivi** altro non sono che dei materiali che si contraggono e si espandono significativamente in lunghezza o in volume quando sono soggetti a stimolazioni elettriche. I polimeri elettroattivi reagiscono anche a pochi volt e sono buoni conduttori perché contengono ioni come il sodio. La loro robustezza invece è piuttosto scarsa. Vediamo in linea di principio il funzionamento di base di questi polimeri. Nei materiali **piezoelettrici** lo stress meccanico era causato da cristalli elettricamente polarizzati. Colpiti dalla corrente elettrica questi cristalli si deformavano, e deformandosi generavano a loro volta elettricità. Nei polimeri elettroattivi invece le cose sono differenti. Consideriamo due piatti posti in parallelo l'uno rispetto all'altro. In mezzo a questi piatti è presente un **dielettrico elastomero** cioè un dielettrico composto da materiale gommoso, come per esempio il silicone. Il tutto deve sembrare un grosso sandwich.

Applichiamo ora tra i due piatti una differenza di potenziale (tensione), tale che sul piatto superiore si ottiene un potenziale positivo mentre sul piatto inferiore si ha un potenziale negativo. Quindi il materiale dielettrico, se è soggetto ad un campo elettrico, che chiaramente si muove dal potenziale positivo verso il potenziale negativo, inizia a contrarsi e si contrae nella direzione delle linee di forza del campo elettrico, mentre si espande perpendicolarmente ad esso. Questo fenomeno prende il nome di **stress di maxwell**. Si guardi in merito le seguenti figure:



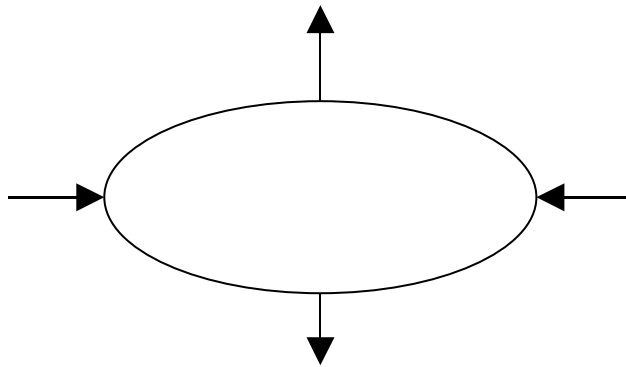
Quindi come si può notare sul piatto superiore è presente un potenziale positivo (+), mentre sul piatto inferiore è presente un potenziale negativo (-). Si genera quindi una differenza di potenziale (d.d.p) tra i due piatti e questo comporta il fenomeno di attrazione tra i due comprimendo il materiale dielettrico. Di conseguenza l'area occupata da quest'ultimo aumenta.



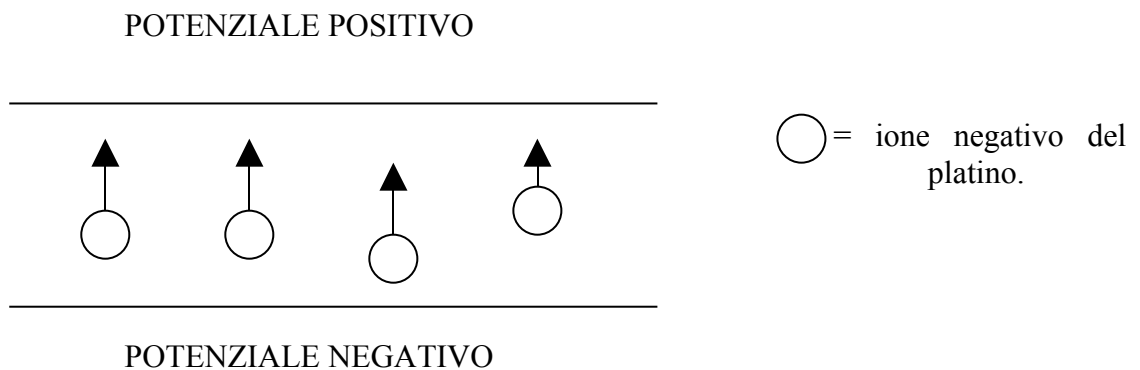
Quindi gli attuatori basati sui polimeri elettroattivi usano, per il proprio funzionamento, i polimeri elastomeri i quali permettono, attraverso l'uso di elettrodi, la propria espansione o compressione in risposta all'applicazione di un campo elettrico o di uno stress meccanico. Chiaramente i muscoli artificiali basati sui polimeri elettroattivi hanno bisogno di energia per poter funzionare e questa energia viene fornita sotto forma elettrica. Questi polimeri producono una grande potenza elettrica in risposta ad una larga compressione con un'alta efficienza di accoppiamento ed un'alta densità di energia. La buona risposta elettromeccanica unita con una buona durabilità suggeriscono l'utilizzo di questi materiali in svariate applicazioni. I polimeri che cambiano forma in risposta a stimoli di natura elettrica possono essere grossolanamente suddivisi in due tipi:

1. *tipi ionici*
2. *tipi elettronici*

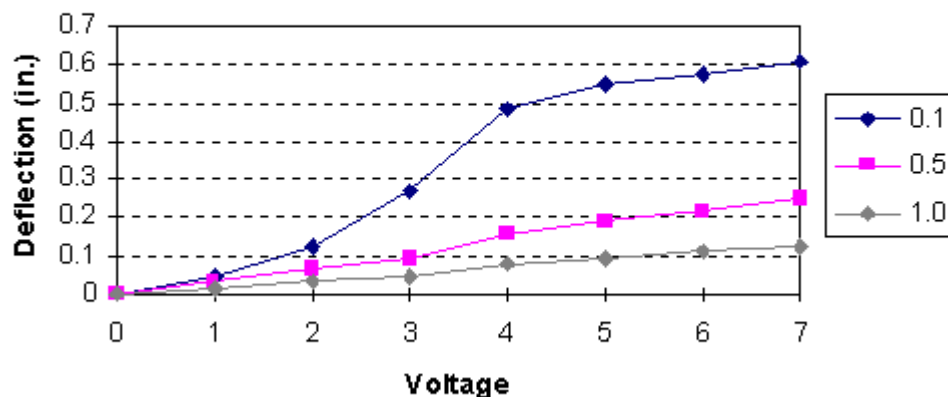
Entrambi i due tipi presentano ovviamente dei vantaggi e dei svantaggi. Analizziamo brevemente il primo tipo di polimeri. I polimeri di tipo ionico, in cui ricadono come vedremo anche i polimeri ionici di tipo gel, i polimeri metallici ionomerici, i polimeri conduttivi, e così via, lavorano basandosi sull'elettrochimica e sulla mobilità e diffusione di ioni. Analizziamo in merito i polimeri basati su membrane **IPMC (Ion-Exchange Platinum Membrane Composite)**. Gli IPMC sono pellicole che si piegano sotto un'elettroattivazione. Usando delle coppie di IPMC in un muscolo, esso si contrae longitudinalmente e si espande verticalmente. Si guardi in merito la seguente figura:



Le caratteristiche delle membrane IPMC è che esse sviluppano un'attuazione lineare di spostamento maggiori del 10% quando guidate da tensioni di 5 volt, una consumazione di potenza pari a 20-30 milliwatt, ed il peso delle pellicole varia da 0,1 grammi a circa 6 grammi. Una batteria operativa guida il circuito. Una proprietà interessante di questi materiali è la loro capacità di assorbimento di solventi come per esempio l'acqua. Sostanzialmente consideriamo una soluzione acquosa dove chiaramente l'acqua è il solvente e supponiamo che nel solvente sia immersa una membrana di materiale polimerico di tipo ionomerico. Si piazzano poi due elettrodi di platino su entrambi i lati della pellicola sottile (membrana). Immettendo gli elettrodi chiaramente nell'acqua questi liberano immediatamente ioni metallici. Tutti questi ioni si appoggiano sulla superficie della pellicola, ma alcuni di essi addirittura riescono ad entrarci. Quindi quando una tensione esterna viene applicata su una pellicola IPMC, essa causa una naturale migrazione di ioni negativi verso l'elettrodo positivo (anodo), e questa migrazione aumenta all'aumentare del voltaggio applicato esteriormente. Si guardi in merito la seguente figura:



Sotto una tensione alternata, il movimento animato della pellicola e chiaramente anche il livello della flessione non dipendono soltanto dall'ampiezza della tensione stessa ma anche dalla sua frequenza. Si guardi in merito la seguente figura, la quale mostra la risposta di un materiale ionomerico alla variazione dei livelli di ampiezza della tensione esterna applicata in tre differenti frequenze:



Generalmente le tensioni a basse frequenze, come per esempio 0,1 oppure 0,01 Hz, inducono grandi flessioni. Il movimento dell'attuatore è controllato dall'applicazione di una sorgente elettrica, ma esso è fortemente limitato dall'acqua contenuta nel materiale che serve come strumento di trasporto degli ioni. La contrazione oppure l'espansione del materiale cioè lo spostamento verso sinistra o verso destra dipende dalla polarità del voltaggio. Invertendo la polarità scambia chiaramente anche il tipo di movimento. Un altro aspetto curioso di questa tecnologia è che recenti test sulla performance dei polimeri ionici hanno mostrato che la risposta di tale materiale diminuisce con la temperatura. Quindi abbassando la temperatura di riduce anche la flessione esercitata dal materiale. Per compensare una tale riduzione, si può aumentare la tensione applicata all'esterno attraverso gli elettrodi. Per essere più precisi una sostanza idrofila è una sostanza che assorbe acqua. Quindi questo tipo di polimeri ricade nella categoria delle sostanze idrofile. Gli ioni metallici del platino si disperdono attraverso la regione idrofila del polimero. Raggiunto l'equilibrio questa membrana risulta gonfia di acqua. Il contenuto dell'acqua dipende dalle proprietà idrofiliche delle specie ioniche presenti dentro la membrana e anche dalla concentrazione elettrolita della soluzione esterna. Per mantenere la loro capacità di attuazione, questi materiali deve essere continuamente inumiditi per fornire i necessari ioni responsabili dell'attuazione. Non hanno bisogno di alti voltaggi, anche perchè bastano singole basse tensioni per ottenere spostamenti significativi. In aggiunta a ciò hanno costruito recentemente dei materiali che sono rivestiti di un certo materiale che permette di trattenere l'umidità all'interno della pellicola. Purtroppo quando il voltaggio supera un certo livello, si rischia di danneggiare seriamente il materiale. Potenzialmente i polimeri ionici possono essere sintetizzati sotto forma di gel, per produrre forti attuazioni le quali a loro volta dovrebbero uguagliare la forza esercitata da un muscolo naturale. Come abbiamo appena visto, questi materiali vengono attivati da una reazione chimica, dove il cambiamento da un acido ad una base provoca il fatto che il gel diventa rispettivamente o denso o gonfio. Per esempio negli anni quaranta si dimostrò che un nastro di poliammide acrilico immerso in una soluzione lievemente salina si allunga facendo affondare un corpo ad esso attaccato quando si introduce nella soluzione idrossido di sodio, mentre si solleva quando vi si aggiunge acido cloridrico. In questa situazione particolare il polimero si trova in forma di gel perché tutto l'insieme è gonfio d'acqua. I gruppi acidi lungo le catene restano neutri quando la soluzione è acida, cioè quando il $\text{PH} > \text{POH}$, cioè quando siamo in presenza di una maggior concentrazione di ioni H^+ (in realtà ioni idronio). Generalmente i polimeri ionici possono essere costruiti in modo da gonfiarsi sotto l'attivazione elettrica quando il materiale contiene ioni solvente. Di solito il solvente utilizzato è l'acqua. Nel gel la concentrazione di ioni sodio di carica positiva, attratte dalle cariche negative dei gruppi acidi ionizzati è superiore a quella della soluzione. Quando si aggiunge un acido alla soluzione le catene si accorciano e il gel si ritira. Espellendo le molecole di acqua. Purtroppo dopo circa dieci cicli di allungamento e accorciamento il gel smette di funzionare. Quindi si è messo a punto una nuova tecnica basata sul fatto di poter

scambiare ioni tra l'esterno e l'interno del gel per ridurre così la degenerazione. Quindi in sostanza le catene si deformano e lasciano penetrare l'acqua nel gel, il cui volume può aumentare fino a 100 volte. Però questi gel hanno tre difetti:

1. il loro cambiamento di volume richiede una risorsa di acqua;
2. sono fragili e resistono male ai cicli di contrazione ed espansione;
3. il fatto che gli scambi di acqua si producono per diffusione, rallentano le deformazioni;

Questi gel comunque sono interessanti in quanto si prestano bene alla miniaturizzazione. Si noti che la velocità di questi materiali può variare da qualche millisecondo a qualche minuto. Abbiamo visto precedentemente le membrane IPMC. Esistono due tipi di polimeri di base che vengono utilizzati per realizzare queste membrane, e sono:

1. *nafion*
2. *flemion*

Inizialmente questi polimeri vennero impiegati nelle celle di combustibile per la produzione di idrogeno (*idrolisi*). Il secondo tipo di polimeri (i polimeri elettronici) invece sono polimeri guidati da campi elettrici. Essi richiedono un voltaggio relativamente alto, il quale però può provocare uno shock elettrico. Però tali polimeri possono reagire più rapidamente e sviluppare forze meccaniche di maggiore intensità rispetto a quella esercitate dal primo tipo di materiali polimerici visti precedentemente. Essi inoltre non hanno bisogno di essere ricoperti da un certo materiale protettivo, e la corrente richiesta per mantenere la posizione è quasi nulla. Mentre i polimeri ionomerici presentano un significativo livello di flessibilità e spostamento nell'attuazione, hanno però una bassa capacità di sollevamento e quindi sono poco adatti in muscoli che necessitano di sollevare determinati pesi. In questo contesto è preferibile utilizzare un **attuatore longitudinale EAP**, che viene costruito utilizzando polimeri che sono rigidi cioè possiedono una bassa elasticità, e che presentano un'alta costante dielettrica. In oltre questi polimeri sono soggetti ad un campo elettrico. Quindi questo tipo di attuatore ricade nella categoria degli attuatori realizzati con polimeri di tipo elettronico. Le caratteristiche appena citate fanno sì che questo tipo di attuatore possa operare effettivamente come un muscolo naturale, e che quindi usando la forza di coulomb tra i due elettrodi possa effettivamente comprimere o espandere il materiale. Questi attuatori elettrostatici vengono principalmente costruiti in forma capacitiva, come viene mostrato nelle figure di pagina 5 e pagina 6. Purtroppo uno dei più grandi svantaggi di questo tipo di attuatori è che presenta una tensione di breakdown piuttosto bassa. I due tipi di materiali elastomeri utilizzati in questo tipo di attuatori sono il *silicone* e il *polyurethane*. Come è stato già detto in precedenza quando il materiale viene esposto ad un campo elettrico, esso si contrae nella direzione delle linee di forza del campo e si espande nella direzione perpendicolare alle stesse. Si dimostra che la forza esercitata da un attuatore di questo tipo è:

$$P = \epsilon\epsilon_0 * E^2 = \epsilon\epsilon_0 * (V/t)^2$$

Dove ϵ è la costante dielettrica o di permittività del materiale utilizzato, ϵ_0 è la costante di permittività del vuoto ed E il campo elettrico (si ricordi che è una grandezza vettoriale). Infatti si ricordi dalla fisica elementare che:

$E = V/t$ dove V è la tensione applicata agli elettrodi e t è lo spessore del materiale elastomero.

L'utilizzo di polimeri con un'alta costante dielettrica su cui poi si applica un campo elettrico di elevata intensità permette all'attuatore stesso di produrre elevate forze e sollecitazioni. Si noti che il volume del materiale polimero rimane costante sotto l'azione del campo elettrico che deforma però la pellicola. Supponiamo che gli elettrodi applicati ai lati del materiale polimerico siano di forma circolare. Sia D il diametro di tale elettrodi. Sia poi D_0 il diametro del materiale elastomero successivamente alla fase di compressione ed espansione. Sia inoltre T lo spessore del materiale e T_0 il nuovo spessore del materiale in seguito alle modifiche dimensionali dovute ai fenomeni di contrazione ed espansione. La seguente espressione mostra come calcolare il diametro e lo spessore della pellicola di materiale elastomero presente tra gli elettrodi dopo una fase di compressione o espansione:

$$D - D_0/D_0 = (1/2)T - T_0/T_0$$

La chiave d'uso di questi attuatori longitudinali sta nel fatto che lo spessore del materiale elastomero è uniforme. L'uso di una pellicola sottile di questo materiale permette l'attivazione effettiva dell'attuatore anche con una tensione all'esterno piuttosto bassa. Di solito la creazione di attuatori longitudinali che esercitano una grande forza di attuazione necessita di due strati di silicone e su ognuno di essi è collegato un elettrodo di carbonio. La seguente figura mostra un attuatore longitudinale al lavoro:



Come si può notare di solito come end-effector (mano) di un braccio manipolatore si usa una pinza a tre o quattro "dita", perché risulta essere una configurazione semplice da gestire. L'uso degli attuatori EAP permette la realizzazione di dispositivi robotici che emulano le mani umane.

Da quando gli IPMC sono stati realizzati con materiale più resistente, larghe tensioni sono state sviluppate per produrre prese che simulano quelle di una mano umana. In particolare le dita della mano si aprono e si chiudono proprio come quelle della mano di un essere umano. Gli uncini che sono installati alle estremità delle varie dita svolgono la funzione di mantenere più salda la presa sull'oggetto. Questi uncini sono del tutto simili alle unghie nella mano umana. Come viene mostrato nella figura di pagina precedente, sono state realizzate mano con due e quattro dita. La mano con quattro dita è in grado di sollevare pesi fino a 10,3 grammi. Le tensioni che guidano queste mani sono dell'ordine dei 2-5 volt con una frequenza di 0,1 Hz. La mano opera in questo modo. Inizialmente si aprono le dita della mano, dopo di che quest'ultima viene portata in prossimità dell'oggetto che si desidera raccogliere. A questo punto le dita si chiudono sull'oggetto, e l'oggetto inevitabilmente viene "catturato". La seguente figura mostra un'altra mano robotica di tipo umanoide.



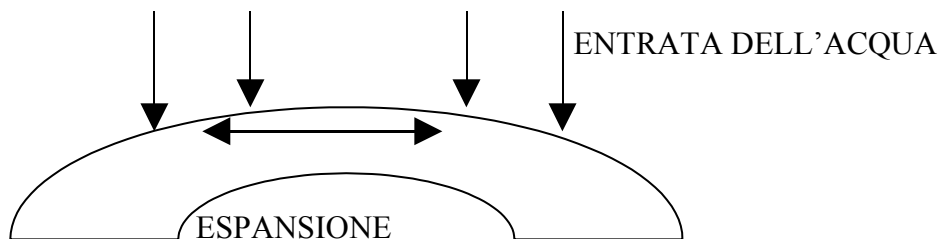
Robotic hand (Photographed at JPL)
Courtesy of Dr. Graham Whiteley, Sheffield Hallam U., UK.

Come si può notare in questa figura la mano è composta esattamente da quattro dita. Lo sviluppo di robot intelligenti richiede la combinazione di forti muscoli (attuatori) e acuti sensori. Usando gli attuatori EAP come muscoli artificiali noi possiamo sviluppare sistemi robotici in grado di simulare sistemi biologici, e che quindi sono in grado di svolgere svariate funzioni come per esempio camminare, nuotare, volare, eccetera. I muscoli naturali sono guidati da un complesso meccanismo e hanno la capacità di spostare e sollevare grandi carichi in pochi millisecondi. Noi considereremo un muscolo come un sistema altamente ottimizzabile. Sebbene i muscoli producono forze lineari, i movimenti sono di tipo rotazionale. Quindi la forza esercitata in generale da un essere vivente non è semplicemente la forza esercitata da un muscolo, bensì è la forza esercitata dal muscolo modificata dai giunti rotoidali che permettono per l'appunto il movimento rotatorio del muscolo stesso. Abbiamo detto che i polimeri elettroattivi sono poco robusti. Per ovviare a questo problema, è stato necessario ricercare e sviluppare un materiale più rigido, meno malleabile, ma più resistente agli sforzi. Materiali di questo tipo sono il nafion, e i polimeri conduttori. Mentre il primo tipo di materiale (nafion) è più semplice da sintetizzare ed è più stabile, il secondo tipo di materiale è più adatto per dispositivi miniaturizzati, in quanto è possibile generare piccole pellicole di tali materiali. Rivediamo ora in linea di principio e più sinteticamente il funzionamento dei **polimeri conduttori**. Innanzitutto applicando una corrente elettrica ad una pellicola di polimeri conduttori nel senso dello spessore si generano tante particelle positive che si respingono tra loro. Per compensare questa

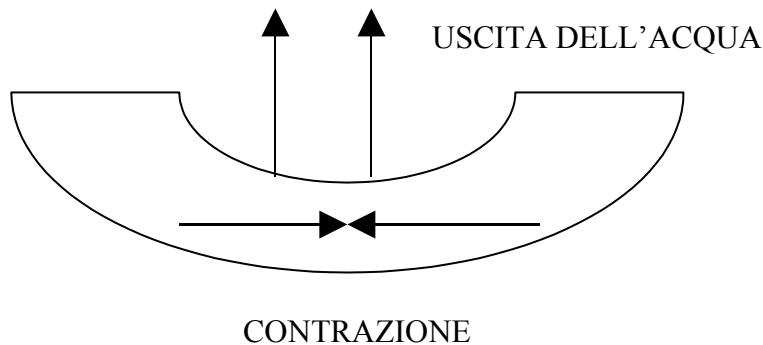
repulsione elettrostatica, l'acqua e gli ioni negativi in essa contenuti penetrano nel materiale gonfiandolo di conseguenza. Graficamente si ha:



Quando entra l'acqua si ottiene:



Mentre quando esce l'acqua si ha:



Se per esempio consideriamo un film di polimero conduttore spesso all'incirca 10 micrometri (quindi sottilissimo) fissato su un supporto di plastica, questa pellicola si contorce quando è sottoposta ad una corrente di circa 30 milliampere. La faccia della pellicola a contatto con la soluzione salina inizia a gonfiarsi mentre l'altra resta fissa essendo immobilizzata dal supporto di plastica. Quando si cambia il verso della corrente la lamina torna nella sua posizione originale. Successivamente essa si deformerà nell'altro senso, ottenendo quindi un'oscillazione nella deformazione. Questo tipo di polimeri possono avere largo impiego nella microchirurgia, in quanto possiedono la capacità di permettere al braccio manipolatore in questione di effettuare piccoli e precisi spostamenti (si parla di micrometri). Esistono altri materiali molto interessanti come per esempio gli **elastomeri nematici**. Questi vengono spesso usati nei muscoli artificiali in quanto sono sostanzialmente filamenti elastici in cui vengono inserite piccole molecole a forma di bastoncini. Prese singolarmente queste molecole formano un liquido nematico che può presentarsi in due stati:

1. **stato disordinato** in cui le molecole sono ordinate in tutte le possibili direzioni;
2. **stato particolarmente ordinato** in cui tali molecole sono parallele ma restano mobili l'una rispetto alle altre;

Si noti innanzitutto che per valori di temperatura piuttosto elevati, dominano gli stati disordinati, in quanto per definizione l'entropia aumenta all'aumentare del disordine delle varie molecole. Lo stato ordinato invece appare quando siamo al di sotto di certi valori di temperatura che possiamo chiamare **valori critici**. Una volta che le molecole vengono incorporate nelle catene polimerizzate di un elastomero si genera un materiale elastico che, nello stato ordinato si allunga nella direzione dell'allineamento. Si noti che le prestazioni di questi materiali dipendono tanto da come le molecole nematiche vengono legate nelle catene polimeriche. Quando queste catene sono troppo lunghe si hanno deformazioni ridotte, mentre in caso contrario cioè quando le molecole nematiche sono integrate nella catena, si hanno deformazioni più significative. Quindi gli elastomeri sono fatti in modo che solo la temperatura ne condiziona la forma. Quindi i polimeri sono i materiali adattativi che hanno le migliori prestazioni. In particolare i polimeri nematici sono materiali elastici in cui molecole nematiche cioè molecole costituite da una parte centrale rigida e da estremità flessibili, sono integrate alla catena polimerica. Queste molecole tendono ad allinearsi per reazione ad uno stimolo proveniente dall'esterno di natura per esempio luminosa. Questo orientamento comune comunque viene trasmesso alle molecole del polimero che si allunga di conseguenza nel verso delle molecole nematiche. Analizziamo ora le principali applicazioni delle tecnologie appena descritte. Innanzitutto, i polimeri che si espandono in risposta all'elettricità rendono possibile la creazione di attuatori di rotazione che permettono di effettuare l'estensione o la flessione attraverso un semplice comando. I primi ingegneri avevano arrotolato due strati di dielettrico elastomero, laminati su entrambi i lati con elettrodi flessibili, in un cilindro compatto. Molto spesso tali pellicole sono avvolte attorno ad un'elica compressa. Questi tipi di attuatori vengono spesso usati per la robotica, per la costruzione di pompe, o nei dispositivi che richiedono lo stesso movimento lineare. Di solito questi meccanismi sono in grado di esercitare forze che raggiungono l'intensità di 30 newton. Per moltiplicare le prestazioni di un dispositivo che utilizza questi attuatori, è possibile inserire in serie o in parallelo più attuatori di questo tipo. La SRI International negli ultimi anni ha sviluppato parecchi attuatori che sfruttano le tecnologie appena menzionate. In particolare esistono **attuatori di tipo lineare** che altro non sono che gli attuatori ad elica appena accennati. Poi ci sono gli **attuatori di rotazione e di flessione** che altro non sono che attuatori di tipo lineare dove gli elettrodi sono collegati a due o più pellicole avvolte attorno all'elica. I robot che usano questi attuatori vengono anche chiamati **snake robots**. Inoltre ci sono gli attuatori di tipo **push-pull**, i **loudspeakers**, i **generatori di potenza** e così via. In particolare i dielettrici elastomeri possono produrre potenza elettrica. In un generatore, un voltaggio viene applicato attraverso il dielettrico elastomero, il quale viene chiaramente deformato dalla forza esterna. Come la forma dell'elastomero cambia, la capacità effettiva del dispositivo viene anch'essa alterata, e di conseguenza viene creata energia elettrica, chiaramente sfruttando anche un po' di elettronica. Poi la densità di energia di questi materiali viene utilizzata come generatore, e questa risulta essere piuttosto alta. Per esempio si può generare energia semplicemente come risposta ad una compressione oppure ad una espansione. In entrambi i casi tale energia viene generata semplicemente mutando la forma e le dimensioni del materiale elastomero. Nella sezione successiva verranno prese in considerazione alcune tra le più famose aziende che operano nel settore dei polimeri elettroattivi, e che producono prodotti che si basano su tali tecnologie.

AZIENDE CHE PRODUCONO ATTUATORI CON TECNOLOGIA EAP.

Esistono parecchie aziende che lavorano con la tecnologia dei polimeri e che producono apparecchiature che vanno dagli attuatori ai sensori che sfruttano tale tecnologia. Iniziamo a dare una breve carellata delle principali società che operano in questo settore. Iniziamo questa carellata partendo dalla **Artificial muscle Inc.** una società situata in California e aperta dalla **SRI International**, che sostanzialmente realizza attuatori elettroattivi di tipo solido, sensori, e generatori per l'automovimento.. Inoltre questa società realizza anche servomotori. Una'altra azienda che lavora con i polimeri elettroattivi è la **eamex corporation**. La eamex corporation lavora con i polimeri elettroattivi di tipo conduttivo e produce attuatori IPMC. Questi ultimi attuatori vengono sostanzialmente utilizzati per applicazioni mediche e di robotica industriale in generale. Un istituto di ricerca e sviluppo nel campo delle pellicole di polimeri flessibili è la **MCNC Research and development institute**. Tale istituto lavora con microattuatori e microsensori, come per esempio il seguente microattuatore flessibile:

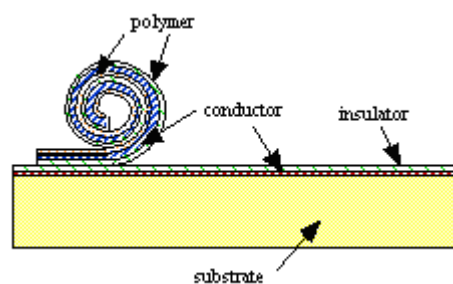


Le aree di ricerca dell'istituto MCNC sono:

1. l'area che progetta e realizza pellicole di attuatori elettrostatici flessibili che vengono fabbricati su un semiconduttore o sottostrato trasparente e opera a 150 volt e ad una frequenza maggiore di 5 KHz. Questi tipi di attuatori vengono utilizzati per controllare il il flusso di un fluido, oppure come interruttore per la corrente elettrica.

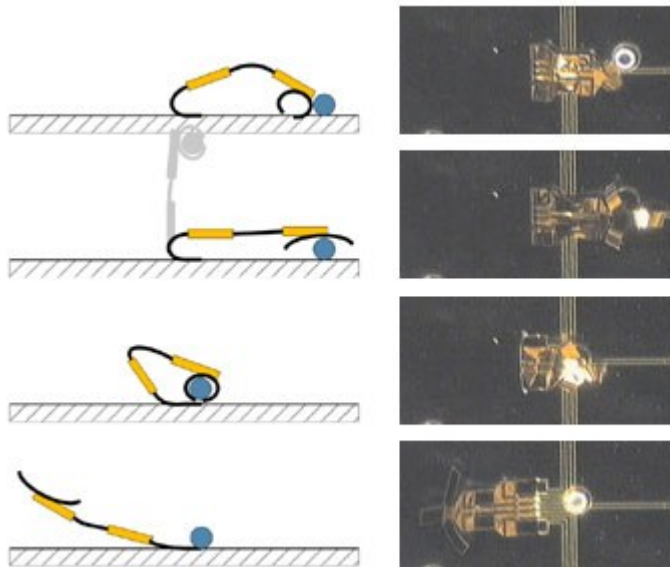
2. l'area che si occupa di fabbricare microsensori di tipo piezoresistivo, piezoelettrico, oppure dispositivi di tipo elettronico/elettrostatico. Essi vengono costruiti con materiale basato sul silicene. Inoltre quest'area si occupa di svolgere la ricerca nel campo dei cristalli fotonici per agenti biologici. I tipi di sensori che utilizzano la tecnologia sviluppata in questa area sono sensori termici, tattili, magnetici, sensori di forza eccetera.
3. l'area che si occupa di sviluppare attuatori di forza utilizzati nei muscoli artificiali robotica, nelle valvole e nelle micropompe.
4. l'area che sviluppa attuatori piezoelettrici per la produzione per l'appunto di attuatori di forza altamente veloci. Sono stati sviluppati in questa area sia pellicole ceramiche sia pellicole polimeriche. Gli attuatori ceramici sono stati integrati sia nei cristalli fotonici che nei superconduttori per produrre filtri ottici. Questa area ha creato trasduttori ultrasonici, e sistemi per il controllo del flusso aeronautico.

I progetti che sono stati realizzati o che sono in corso d'opera riguardano attuatori artificiali per la protezione di sensori ottici. Questi tipi di attuatori sostanzialmente consistono in una pellicola di polimeri e strati metallici arricciato su uno strato di materiale conduttore a sua volta posto sulla superficie di un substrato. L'attuazione elettrostatica avviene grazie all'applicazione di un campo elettrico tra l'elettrodo metallico presente nella pellicola flessibile e il conduttore fissato. Il processo di arricciamento tra il metallo e lo strato polimerico è data da una differenza di espansione termica tra le due parti, e può essere variata tale differenza semplicemente cambiando lo spessore della pellicola. Si guardi in merito la seguente figura:

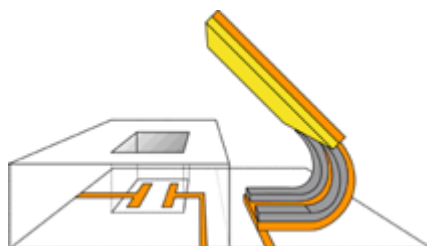


Un'altra azienda rinomata che lavora nel campo dei polimeri elettroattivi è la **Micromuscle AB**. Questa società sta costruendo componenti di dimensioni microscopiche. I micromuscoli vengono fabbricati usando tecnologie di microfabbricazione. Un esempio dell'utilizzo dei micromuscoli in un sistema più o meno complesso è dato dal seguente microrobot disegnato come un braccio con dei gomiti e con un polso che unisce una semplice mano composta sostanzialmente da una pinza con il resto del braccio. La pinza possiede tre dita. Il robot è lungo $670\mu\text{m}$ e largo $250\mu\text{m}$.

La seguente figura mostra il microrobot in questione:

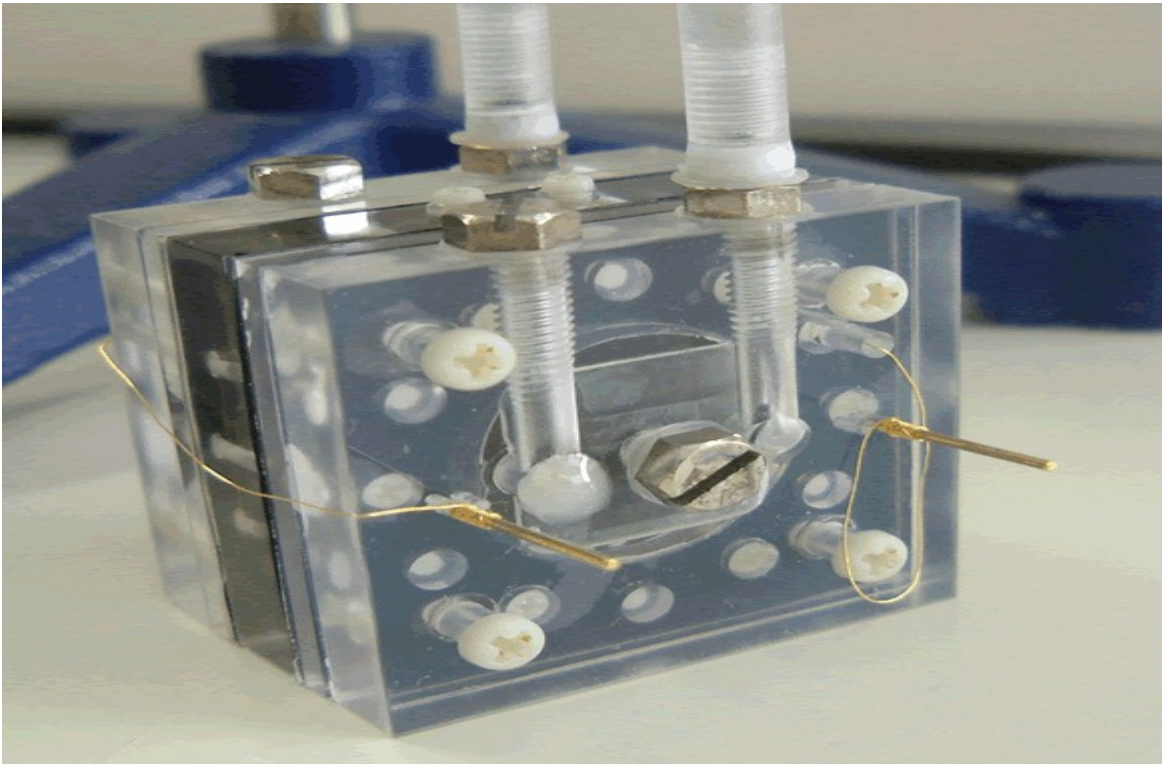


Un'altra applicazione dei micromuscoli consiste nelle **celle cliniche**. Praticamente le celle cliniche sono piccoli microfiale con un coperchio che può essere aperto oppure chiuso utilizzando un cardine attivo costruito con micromuscoli. La figura seguente mostra l'apertura e la chiusura di un vettore di tali fiale.



Un ultimo tipo di azienda che vediamo che tratta materiali legati ai polimeri è la **nanosonic**. Questa Società è nata nel 1998 nel Blacksburg, nello stato della Virginia. Essa lavora nel settore molecolare ed in particolare nei processi di assemblaggio che permettono la sintesi controllata di strutture di materiali a livello di manometri come ordini di grandezza. Anche in questo contesto si lavora su nanoattuatori e quindi sulle nanotecnologie. Questa crescente esigenza di dover realizzare attuatori sempre più piccoli e leggeri deriva dal fatto anche che esistono svariati campi dove è necessario avere a disposizione dei dispositivi leggeri e poco ingombranti in grado effettuare spostamenti

piccoli e precisi, come per esempio nel caso dei bracci robotici che assistono i chirurghi durante un'operazione. L'esempio appena estrapolato è un tipico esempio dell'uso della microrobotica nel campo della microchirurgia, ma i potenziali campi di applicazione sono veramente tantissimi. Nel seguito ci sono alcune immagini di sistemi robotica che sfruttano attuatori costruiti con i polimeri elettroattivi.



Questa immagine mostra una pompa funzionante mediante la tecnologia dei polimeri elettroattivi. La seguente immagine mostra invece una mano robotica intenta ad afferrare un oggetto. Questa mano è stata realizzata dalla eamex corporation.

