

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000024356
Data Deposito	22/09/2021
Data Pubblicazione	22/03/2023

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	25	J	9	10

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	25	J	9	14

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	15	B	15	10

Titolo

Dispositivo muscolo artificiale fluidico
--

DESCRIZIONE dell'Invenzione Industriale dal titolo:

"Dispositivo muscolo artificiale fluidico"

appartenente a Fondazione Istituto Italiano di
Tecnologia, di nazionalità Italiana, con sede in Via
5 Morego 30, 16163 Genova e a Scuola Superiore Sant'Anna,
di nazionalità Italiana, con sede in Piazza Martiri
della Libertà 33, 56127 Pisa.

TESTO DELLA DESCRIZIONE

10 La presente invenzione ha per oggetto un
dispositivo muscolo artificiale fluidico comprendente
almeno un attuatore pieghettato atto ad esercitare
forze lungo un asse, detto attuatore comprendendo una
camera delimitata da porzioni di chiusura alle due
15 opposte estremità lungo il detto asse e da una membrana
flessibile nella porzione centrale interposta alle
dette porzioni di chiusura, la quale membrana presenta
una pluralità di creste e valli che si alternano tra
loro in direzione circonferenziale attorno al detto
20 asse a formare una struttura a pieghe.

Il campo dell'invenzione è relativo ai muscoli
artificiali fluidici, e più specificamente ai muscoli
artificiali pneumatici, o PAM.

Il termine Pneumatic Artificial Muscle (PAM) è
25 nato insieme al primo del suo genere, ovvero il muscolo
artificiale di McKibben, creato negli anni '50 e
iniziato a commercializzare solo negli anni '80. Il
nome di questi attuatori pneumatici deriva sia dalle
somiglianze con i muscoli biologici sia dalle loro
30 applicazioni nel campo della biomeccanica.

I PAM sono ampiamente utilizzati in robotica,
specialmente in applicazioni che imitano il
comportamento muscolare umano come robot umanoidi,

dispositivi di riabilitazione, sistemi per l'interazione sicura uomo-robot, ecc.

Diverse proprietà principali distinguono i muscoli artificiali fluidici dagli altri attuatori:

5 • si contraggono (piuttosto che allungarsi) quando pressurizzati;

• sono leggeri e hanno un elevato rapporto potenza/peso;

10 • poiché normalmente funzionano con aria compressa (anche se, in linea di principio, possono funzionare con qualsiasi fluido) e il loro componente principale è una membrana deformabile, mostrano una buona cedevolezza e questa può essere sfruttata anche per interazioni sicure con un operatore umano;

15 • la loro cedevolezza consente loro di agire con un comportamento del tipo a molla e di ottenere movimenti fluidi che mimano il comportamento del muscolo biologico;

20 • contrariamente ai motori, non necessitano di alcun tipo di trasmissione di potenza o ingranaggi in quanto possono essere collegati direttamente al corpo che deve essere azionato.

I PAM e i muscoli artificiali fluidici differiscono principalmente da altri attuatori pneumatici (ad esempio gli attuatori a soffiETTO) perché, contro-intuitivamente, si contraggono quando pressurizzati e si allungano quando depressurizzati. Poiché la pressione dell'ambiente è tipicamente quella atmosferica, la depressurizzazione produce forze limitate, e ciò significa che le forze di contrazione ottenute depressurizzando gli attuatori a soffiETTO sono molto inferiori a quelle ottenibili pressurizzando i PAM. I PAM sono quindi la scelta preferita per imitare

la contrazione dei muscoli biologici. Da quando sono stati presentati i primi muscoli artificiali McKibben, sono stati sviluppati diversi PAM e, anche se hanno design diversi, il loro principio di funzionamento
5 principale è lo stesso degli attuatori McKibben originali.

Infatti, i PAM si basano su tre componenti principali: una membrana elastica, fibre ad alta resistenza alla trazione e due elementi di chiusura
10 terminali rigidi. A volte la membrana è realizzata con un materiale composito e comprende già il componente ad alta resistenza alla trazione, solitamente un tessuto di fibre incollate su uno strato di tenuta in elastomero.

15 Il principio di funzionamento principale dei PAM si basa sulla caratteristica ortotropica della membrana composita (o della membrana insieme alle fibre). Quando pressurizzata, la membrana tende a gonfiarsi ma le fibre ad alta resistenza alla trazione che vincolano
20 la membrana legano l'espansione radiale ad una contrazione assiale.

La gamma di pressioni di esercizio dei PAM dipende fortemente dal loro design e dai materiali coinvolti.

PAM di diversi design sono stati sviluppati
25 principalmente per ridurre gli effetti negativi non lineari che interessano gli attuatori McKibben originali, come l'attrito tra le fibre e la membrana o l'allungamento della membrana durante il gonfiaggio, che portano a comportamenti non lineari, isteresi,
30 perdita di energia e durata di vita più breve dell'attuatore.

I PAM sono generalmente classificati in quattro categorie specifiche, principalmente in base alla

diversa configurazione della guaina delle fibre esterne rispetto alla membrana e sono: muscoli intrecciati, muscoli reticolati, muscoli incorporati e PAM pieghettati.

5 Il documento EP 0219327 A1 descrive un PAM provvisto di una camera d'aria e il relativo attuatore, che richiede almeno tre componenti diversi (fibre, connettori terminali e camera d'aria di forma complessa). Il documento indica che la camera d'aria
10 deve avere una forma ben definita con sporgenze appositamente studiate e in questo modo restringe fortemente il campo di applicabilità dell'idea. L'attuatore descritto deve essere assemblato da parti diverse, comprese ulteriori strutture di supporto di
15 collegamento, il che ne limita l'adozione in configurazioni complesse. Infine, l'attuatore descritto non può funzionare utilizzando la depressurizzazione ed è possibile ottenere solo la contrazione.

20 Il documento "Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements," F. Daerden, Vrije Univ. Brussel, p. 176, 1999, introduce i PAM pieghettati. Come per tutti i PAM, anche i PAM pieghettati (PPAM -
25 Pleated Pneumatic Artificial Muscles) descritti in questo documento non funzionano utilizzando una generica membrana elastica ma necessitano di una membrana composita costituita da tessuto di fibre ad alta resistenza alla trazione incollata ad uno strato
30 elastomerico gonfiabile, con due chiusure terminali rigide. Ogni componente di questo tipo di PAM necessita di processi produttivi specifici e questo ne ostacola la produzione in serie. I diversi componenti devono

essere assemblati e l'attuatore non può essere progettato e realizzato direttamente incorporato in altre strutture o in configurazioni complesse. Oltre al materiale utilizzato, non esistono parametri
5 progettuali specifici da modificare per ottenere le diverse prestazioni desiderate. Viene presentato solo un modello meccanico teorico per la sollecitazione e la deformazione della membrana, che definisce il design delle pieghe per ottenere una condizione di zero
10 sollecitazione parallela. Questo modello descrive solo la deformazione teorica di una generica membrana quando è pressurizzata e non vengono prese in considerazione né le fibre né le chiusure terminali. Ancora più importante, il modello non è adatto come strumento di
15 progettazione pratico. Inoltre, l'unico componente deformabile è la membrana mentre le due chiusure terminali e le fibre sono relativamente rigide. Infine, anche questo PAM può unicamente contrarsi e lavorare solo con una pressione positiva.

20 Il documento "Third-generation pleated pneumatic artificial muscles for robotic applications: Development and comparison with McKibben muscle", D. Villegas et al., Adv. Robot., vol. 26, no. 11-12, pp. 1205-1227, 2012, descrive un'evoluzione dei primi PPAM.
25 Secondo questa versione, il PPAM è più leggero e utilizza una membrana isotropa, ma l'ortotropia della struttura è ancora ottenuta attraverso diversi materiali utilizzando fibre ad alta resistenza alla trazione e una membrana elastomerica. I due elementi
30 di chiusura terminali sono parzialmente stampati in 3D mentre gli altri componenti necessitano di altre tecniche di produzione. L'attuatore è realizzato attraverso un processo a più fasi e richiede successive

fasi di assemblaggio. La realizzazione di questo attuatore all'interno di altre strutture o in allestimenti complessi, data la sua lavorazione, necessita di complesse fasi di montaggio. Non ci sono
5 parametri di progetto specifici da modificare per ottenere diverse prestazioni desiderate oltre al materiale dei componenti. L'unico componente deformabile è la membrana elastomerica. Anche questo attuatore può unicamente contrarsi e lavorare solo con
10 una pressione positiva.

Il documento CN 108161929 A descrive un muscolo pneumatico artificiale che comprende corpi elastici di forma esaedrica azionati da pressione negativa ed è strutturato come se fosse un tubo percorso da aria in
15 pressione. Attraverso il design differenziato degli spessori delle pareti trasversali e longitudinali di ciascuna unità della camera d'aria, lo spostamento lineare (unidirezionale) e la forza dell'effetto elastico si manifestano per effetto della pressione
20 negativa esterna. Quando l'effetto della pressione negativa esterna scompare, si verificano la forza elastica di ripristino e lo spostamento lineare che ripristinano lo stato naturale. Il controllo dello spostamento lineare e della forza elastica del muscolo
25 artificiale pneumatico può essere ottenuto mediante controllo della pressione negativa in ingresso. Il muscolo artificiale pneumatico ha una pompa a pressione negativa, utilizzata come fonte di ingresso di aria. Essendo azionato a contrazione mediante una pressione
30 negativa, il PAM descritto ha un comportamento del tutto simile agli attuatori a soffiETTO.

Il documento US 2007/129653 A1 descrive un PAM in grado di erogare forze bidirezionali, comprendente un

attuatore con una camera d'aria circondata da un materiale intrecciato montato in parallelo con una molla elastica. Sono previsti due tubi coassiali con diverso diametro al fine di avere lo scorrimento delle
5 superfici. Quando il muscolo viene pressurizzato con pressione positiva con una sorgente pneumatica, si espande e la sua lunghezza aumenta e la larghezza diminuisce o viceversa. Durante il ciclo di contrazione si attiva una pressione positiva interna tramite
10 l'inserimento di aria, la molla elastica viene compressa e immagazzina energia fino al successivo rilascio, che corrisponde al rilascio della pressione nella camera d'aria. Quando la molla si espande, produce una forza di espansione. Le forze di
15 contrazione ed espansione sono controllabili utilizzando una serie di configurazioni, inclusa la modifica della posizione di equilibrio della molla elastica, utilizzando una camera d'aria nominale diversa e utilizzando una pressione iniziale diversa.
20 Il peso del muscolo artificiale è maggiore a causa della presenza delle molle. Oltre al peso, si ha lo svantaggio di un tempo di risposta all'impulso pneumatico più alto, a causa della meccanica dei due cilindri coassiali e delle molle.

25 Il documento WO 2016/207855 A1, dei medesimi richiedenti, descrive un PAM che riprende la struttura di base e il funzionamento dei muscoli artificiali di tipo McKibben e simili, che consente di essere azionato sia in contrazione che in estensione. È prevista una
30 camera cilindrica cava, di materiale resiliente, che viene gonfiata nella fase attiva. La camera interagisce con un manicotto intrecciato, costituito da fili inestensibili, disposti secondo traiettorie elicoidali

incrociate aventi un caratteristico angolo di inclinazione rispetto all'asse longitudinale del dispositivo. Il manicotto è collegato alle estremità con due organi di testa rigidi previsti per essere
5 collegati meccanicamente a corpi esterni. Sono previsti mezzi di regolazione, associati agli organi rigidi di testa, atti a variarne la distanza a riposo, in modo da richiedere una variazione proporzionale e consistente dell'angolo di inclinazione così da
10 ottenere alternativamente un'estensione o una contrazione nella fase attiva. Questo PAM necessita di una progettazione complessa e non facilmente scalabile e gravose fasi di assemblaggio.

Per riassumere, i principali svantaggi dei PAM
15 noti allo stato dell'arte sono:

- non possono essere totalmente deformabili in quanto sono sempre necessari almeno tre diversi componenti e la loro cedevolezza è limitata alla sola membrana;
- 20 • hanno sempre bisogno di una fase di assemblaggio dei diversi componenti, e questo limita le tecniche di fabbricazione che possono essere adottate e limita anche sia la loro customizzazione che la loro produzione in serie;
- 25 • non possono essere realizzati incorporati all'interno di strutture più complesse o realizzati direttamente in più disposizioni ma devono sempre essere assemblati e collegati al corpo da azionare, utilizzando strutture di supporto aggiuntive;
- 30 • le due zone dove la membrana e le fibre (o la membrana composita) sono incollate ai due elementi di chiusura terminali rigidi sono sempre zone ad alto stress che tendono a ridurre la durata del dispositivo;

• per progettazione, tutti i PAM possono deformarsi attivamente principalmente contraendosi o allungandosi, ma raramente entrambi i comportamenti sono ottenuti con lo stesso progetto, ed anche in
5 questi casi i PAM necessitano di un modello complesso e non facilmente scalabile che richiede anche pesanti fasi di assemblaggio;

• le prestazioni dei PAM non sono facilmente impostabili in fase di progettazione mediante i
10 parametri di progetto poiché, generalmente, gli unici parametri che possono essere modificati sono la lunghezza, il diametro e la configurazione delle fibre del manicotto esterno.

La presente invenzione mira al superamento degli
15 svantaggi suddetti in relazione ai PAM noti allo stato dell'arte e all'ottenimento di un muscolo artificiale fluidico leggero e semplice da fabbricare, che può funzionare sia in contrazione che in estensione, e che può essere progettato mediante l'utilizzo di un modello
20 geometrico che consente al dispositivo di ottenere le prestazioni attese.

La presente invenzione consegue questi obiettivi mediante un muscolo artificiale fluidico come descritto all'inizio, in cui inoltre il detto attuatore è
25 costituito da un unico elemento di materiale flessibile o elastico.

In questo modo le dette porzioni di chiusura alle due estremità e la membrana flessibile nella porzione centrale sono costituite da un corpo unico. Ciò
30 consente di semplificare al massimo la fabbricazione del dispositivo, evitando l'utilizzo di macchinari dedicati alle singole componenti ed evitando laboriose fasi di assemblaggio.

Ciò consente inoltre di evitare attriti tra i diversi componenti assemblati e quindi di allungare la vita operativa del dispositivo.

Secondo un esempio esecutivo il detto attuatore è
5 provvisto di almeno tre pieghe.

In un ulteriore esempio esecutivo il dispositivo comprende una pluralità di detti attuatori, i quali attuatori sono vincolati tra loro e/o sono collegati fluidicamente in serie e/o in parallelo tra loro. Anche
10 in questo caso più attuatori ed i mezzi di vincolo reciproco possono essere formati da un unico elemento.

Ciò consente di creare strutture anche complesse che incorporano una pluralità di attuatori mantenendo al contempo un'elevata semplicità di fabbricazione.

15 Oggetto della presente invenzione è inoltre un metodo di fabbricazione di un dispositivo muscolo artificiale fluidico come qui sopra descritto, il quale metodo consiste in un processo a passo singolo.

Ciò consente di sfruttare a pieno la struttura a
20 corpo unico del dispositivo per ottenere un'elevata semplicità di fabbricazione.

In una prima variante esecutiva, detto processo di fabbricazione a passo singolo è un processo di manifattura additiva.

25 In una seconda variante esecutiva, detto processo di fabbricazione a passo singolo è un processo di stampaggio.

Secondo un perfezionamento, uno o più detti attuatori sono fabbricati assieme ad una struttura da
30 attuare ed incorporati nella struttura da attuare stessa.

Ciò consente, in un unico passaggio di fabbricazione, di realizzare non solo assiemi complessi

comprendenti più attuatori come descritto sopra, ma anche di incorporare tali assiemi, così come anche un solo attuatore, all'interno della struttura da azionare.

5 Oggetto della presente invenzione è inoltre un metodo di progettazione di un dispositivo muscolo artificiale fluidico come qui sopra descritto, il quale metodo prevede i seguenti passi:

 a) definizione di un modello geometrico della
10 detta membrana, il quale modello geometrico comprende una pluralità di variabili indipendenti relative a parametri geometrici;

 b) definizione di un valore atteso del rapporto di contrazione e/o del rapporto di allungamento e/o di
15 una combinazione dei rapporti di contrazione e allungamento;

 c) individuazione dei detti parametri ottimali per soddisfare il detto valore atteso.

 Una combinazione dei rapporti di contrazione e
20 allungamento può essere data ad esempio dalla somma dei valori assoluti dei rapporti di contrazione e allungamento, o da altre combinazioni lineari o non lineari dei rapporti di contrazione e allungamento.

 In una forma esecutiva, le dette creste sono
25 uguali tra loro e le dette valli sono uguali tra loro per tutte le dette pieghe ed il modello geometrico prevede i seguenti passi:

 a1) definizione per ciascuna semi-piega di due curve di profilo di sezione trasversale rispetto al
30 detto asse, di cui una prima curva di sezione avente concavità verso la camera e una seconda curva di sezione avente concavità in verso opposto alla camera;

a2) identificazione di una pluralità di dette variabili indipendenti relative a parametri geometrici delle dette curve di sezione;

a3) definizione di tre curve di profilo
5 longitudinali rispetto all'asse, di cui una curva di cresta, una curva di valle e una curva di confine tra le dette curve di sezione;

e la detta individuazione dei detti parametri ottimali prevede i seguenti passi:

10 c1) definizione di una funzione obiettivo specifica per contrazione o per estensione, la quale funzione obiettivo è funzione del volume della camera dopo la deformazione;

c2) identificazione delle variabili del problema
15 di minimizzazione della detta funzione obiettivo come coordinate di prestabiliti punti delle dette curve longitudinali deformate e lunghezza della camera lungo il detto asse;

c3) calcolo del minimo della detta funzione
20 obiettivo per diverse combinazioni di valori dei parametri appartenenti a intervalli prefissati e conseguente determinazione del set ottimale di parametri per la massimizzazione del rapporto di contrazione e/o del rapporto di allungamento e/o di
25 una combinazione dei rapporti di contrazione e allungamento.

Secondo una forma esecutiva le dette curve di sezione sono archi ellittici.

Ciò consente di descrivere le curve di sezione
30 unicamente mediante i loro semiassi.

Secondo una forma esecutiva le dette curve longitudinali sono parabole.

Da quanto sopra esposto, l'invenzione ha ad oggetto un attuatore fluidico costituito solo da una membrana pieghettata dispiegabile che può contrarsi assialmente, ossia longitudinalmente, mediante
5 dispiegamento radiale quando è gonfiato e allungarsi assialmente mediante ripiegatura radiale quando è sgonfiato. Il rapporto tra contrazione ed allungamento può essere regolato modificando i parametri di progetto risultanti dal modello geometrico che descrive le
10 trasformazioni geometriche (dispiegamento o piegatura delle pieghe) durante il gonfiaggio o lo sgonfiaggio.

Gli attuatori possono essere costituiti ciascuno da un unico componente costituito da un unico materiale, che può essere isotropo e continuo, senza
15 alcuna fase di assemblaggio, ma possono anche essere realizzati utilizzando due o più materiali o componenti al fine di ottenere prestazioni diverse o altre esigenze specifiche.

Gli attuatori possono essere interamente
20 deformabili, in quanto non necessitano di elementi di chiusura terminali rigidi o fibre ad alta resistenza alla trazione come altri PAM noti allo stato dell'arte. Ciò significa anche che non è presente attrito durante il funzionamento, il che riduce l'isteresi e migliora
25 l'efficienza degli attuatori.

Grazie al loro design monocomponente, gli attuatori possono essere interamente fabbricati con un processo in un unico passaggio, sia esso un processo di produzione additiva (SLA, FDM, SLS, DLP, ...) o
30 qualsiasi altra tecnica adatta alla fabbricazione di camere pneumatiche morbide come lo stampaggio.

Il design degli attuatori funziona bene con un'ampia gamma di materiali e può essere implementato

anche utilizzando materiali commerciali e dispositivi di produzione a basso costo. Al contrario, la maggior parte dei PAM tradizionali può essere prodotta solo utilizzando tecniche specifiche (ad esempio gli
5 attuatori Mckibben necessitano di una macchina trecciatrice appositamente progettata per intrecciare le fibre attorno alla camera pneumatica con l'angolo specifico richiesto).

Mediante il modello geometrico sopra citato, è
10 possibile conoscere i valori dei parametri di progetto richiesti necessari per ottenere prestazioni specifiche in termini di rapporto di contrazione e allungamento. Il design è completamente scalabile e il modello geometrico può essere utilizzato anche per
15 conoscere, a priori, la variazione delle prestazioni in funzione dei cambiamenti desiderati nelle dimensioni.

Poiché il principio di funzionamento si basa principalmente sulla geometria, il design può
20 funzionare con un'ampia gamma di materiali. Questi hanno un effetto sulla pressione in ingresso richiesta e sulle forze in uscita ottenibili, oltre che su proprietà specifiche come ad esempio la cedevolezza.

Sebbene il design possa funzionare con un'ampia
25 gamma di materiali, le migliori prestazioni si ottengono utilizzando materiali come TPU/TPE, silicone, gomma o simili con un intervallo di durezza shore compreso tra 50A e 100A/45D. Infatti, se il materiale è troppo tenero (durezza shore < 50A),
30 durante la contrazione, la deformazione delle zone della membrana prossime alle estremità delle pieghe aumenta e l'attuatore tenderà a gonfiarsi invece di contrarsi. D'altra parte, se il materiale è troppo duro

(durezza shore > 100A/45D), le pieghe non si apriranno facilmente.

Più duro è il materiale, maggiore è la differenza di pressione necessaria per piegare/dispiegare l'attuatore, maggiori sono le forze generate dalla contrazione o dall'estensione dell'attuatore.

Non essendo necessari ulteriori componenti rigidi o pesanti, contrariamente alla tecnica nota, gli attuatori proposti possono essere davvero leggeri (prototipi di circa 4 cm di lunghezza e 4 cm di diametro medio realizzati con materiali della gamma di durezza Shore definita in precedenza hanno un peso di circa 5-6 g mentre le loro versioni ridimensionate al 50%, hanno un peso di 1-2 g) ed è possibile raggiungere rapporti peso/potenza estremamente elevati, anche se parzialmente dipendenti dal materiale in gioco. Prove sperimentali su alcuni prototipi hanno permesso di apprezzare un attuatore di 6 g che solleva 1 kg per il 20% della sua lunghezza.

Infatti, sebbene il peso dell'attuatore dipenda dal materiale adottato e dalle dimensioni di progetto scelte, esso è relativamente contenuto in quanto la maggior parte del volume dell'attuatore è riempito d'aria a causa della camera vuota interna.

Poiché l'attuatore è autoportante anche quando sotto carico e non azionato, può essere implementato sia come attuatore che come elemento strutturale all'interno di un corpo più complesso.

Questo attuatore può deformarsi in entrambi i sensi e non solo contrarsi come la maggior parte dei PAM. Come visto all'inizio, i PAM noti allo stato dell'arte generalmente possono solo contrarsi, e questo perché solitamente coinvolgono fibre esterne che

possono generare solo forze di contrazione. Nel nostro caso, poiché non è coinvolta alcuna fibra esterna, l'attuatore può essere sgonfiato per ottenere l'allungamento. Come già accennato, il modello
5 geometrico può essere sfruttato per valutare i parametri di progetto dell'attuatore per ottenere uno specifico rapporto tra allungamento e contrazione.

Queste ed altre caratteristiche e vantaggi della presente invenzione risulteranno più chiaramente dalla
10 seguente descrizione di alcuni esempi esecutivi non limitativi illustrati nei disegni allegati in cui:

la fig. 1 illustra un esempio esecutivo di attuatore secondo la presente invenzione;

le figg. 2a e 2b illustrano rispettivamente una
15 vista laterale e in sezione dell'attuatore;

la fig. 3 illustra il modello geometrico;

la fig. 4 illustra la deformazione dell'attuatore;

la fig. 5 illustra l'approssimazione del volume interno;

20 le figg. 6, 7 e 8 illustrano lo spostamento in funzione dei parametri geometrici;

le figg. 9a, 9b e 9c illustrano tre differenti esempi esecutivi di attuatori ottimizzati per differenti prestazioni;

25 le figg. 10a e 10b illustrano un dito artificiale attuato da tre attuatori;

le figg. 11a, 11b e 11c illustrano un esempio esecutivo di attuatore per movimenti torsionali;

le figg. 12a, 12b e 12c illustrano un esempio
30 esecutivo di attuatore per movimenti di flessione;

le figg. 13a, 13b e 13c illustrano un esempio esecutivo di assieme di una pluralità di attuatori.

L'invenzione riguarda un dispositivo muscolo artificiale fluidico comprendente almeno un attuatore 1 atto ad esercitare forze lungo un asse K in contrazione o in estensione. L'attuatore fluidico 1 è
5 costituito da un'unica struttura, che può essere fabbricata in un unico materiale mediante un processo in un unico passaggio, senza fasi di assemblaggio, e che può contrarsi quando pressurizzato per dispiegamento ed allungarsi quando depressurizzato per
10 ripiegatura.

La figura 1 illustra un esempio esecutivo dell'attuatore 1, il quale attuatore 1 comprende una camera 10 delimitata da porzioni di chiusura 11 alle due opposte estremità lungo l'asse K e da una membrana
15 flessibile 13 nella porzione centrale 12 interposta alle dette porzioni di chiusura 11. La membrana 13 presenta una pluralità di creste 130 e valli 131 che si alternano tra loro in direzione circonferenziale attorno al detto asse K a formare un dato numero di
20 pieghe o lobi, da un minimo di tre pieghe ad un numero massimo che dipende dalla risoluzione massima ottenibile dalla tecnica costruttiva adottata e dal diametro di progetto desiderato dell'attuatore 1 lungo la direzione circonferenziale, poiché è completamente
25 scalabile. In senso longitudinale, ossia in direzione assiale lungo l'asse K, le pieghe hanno profili curvilinei, con il massimo corrispondente alla sezione centrale dell'attuatore 1, ed i minimi alle estremità, ossia in corrispondenza delle porzioni di chiusura 11.

30 Le porzioni di chiusura 11 sono di pezzo con la membrana 13 e sono costituite da ispessimenti terminali del medesimo materiale. Almeno una porzione di chiusura 11 è provvista di un ingresso per il fluido di

alimentazione della camera 10. Preferibilmente il fluido di alimentazione è aria, ed il muscolo artificiale fluidico è un PAM. È possibile, tuttavia utilizzare qualsiasi fluido di alimentazione.

5 La figura 2a illustra una vista laterale dell'attuatore 1 e la figura 2b illustra una vista in sezione trasversale lungo il piano indicato in figura 3, ossia nel piano centrale perpendicolare all'asse K ed equidistante rispetto alle porzioni di chiusura 11,
10 definita come sezione trasversale centrale.

 In questa sezione trasversale centrale sono visibili sei pieghe, definite come l'alternanza di profili curvilinei con concavità verso l'interno e verso l'esterno. Preferibilmente le creste 130 e le
15 valli 131 sono uguali tra loro per tutte le pieghe della membrana 13.

 Il design dell'attuatore 1 è generato da un modello geometrico, illustrato nelle figure da 3 a 8. Il modello geometrico descrive la forma dell'attuatore
20 1 mediante molteplici parametri di progettazione e la sua trasformazione geometrica durante la contrazione o l'allungamento.

 Il modello può essere sfruttato per mettere a punto le prestazioni dell'attuatore in base alla
25 progettazione (cioè per migliorare la sua contrazione o il suo allungamento) o per prevedere le prestazioni a seguito di variazioni delle dimensioni. Il design dell'attuatore 1 è adimensionale e le sue dimensioni sono vincolate solo dal processo di produzione scelto
30 per ogni specifica implementazione.

 Il suo principio di funzionamento è geometrico, il che significa che può essere realizzato in un'ampia gamma di materiali, rendendo il design presentato

adatto a lavorare con diversi intervalli di pressione e, di conseguenza, consentendo di ottenere diversi intervalli di forze esercitate.

La figura 3 illustra a sinistra uno schema dei
5 profili longitudinali e a destra un quarto della sezione centrale per un attuatore a sei pieghe (x_m corrisponde alla metà della lunghezza dell'attuatore 1, y corrisponde alla distanza radiale dall'asse K dell'attuatore 1)

10 La figura 3 mostra le tre curve principali di una piega (a sinistra) e un quarto della sezione trasversale centrale (a destra). Per ciascuna semipiega vengono definite due curve di profilo di sezione trasversale rispetto all'asse K, di cui una prima curva
15 di sezione 30 avente concavità verso la camera 10 e una seconda curva di sezione 31 avente concavità in verso opposto alla camera 10. La prima curva di sezione 30 è costituita dall'arco ellittico QP e la seconda curva di sezione 31 è costituita dall'arco ellittico
20 PS.

Le tre curve principali sono curve di profilo longitudinali rispetto all'asse, di cui una curva di cresta $\mathcal{L}_c$, passante per il punto Q, una curva di valle $\mathcal{L}_v$, passante per il punto S, e una curva di confine $\mathcal{L}_e$,
25 passante per il punto P, ossia posta al punto di congiunzione delle curve di sezione 30 e 31.

La piega può avere qualsiasi profilo curvilineo di sezione, non necessariamente ellittico. Preferibilmente il modello geometrico implementa archi
30 ellittici perché questi possono essere modellizzati tramite due soli parametri (i semiassi), ma possono essere prese in considerazione anche curve diverse. Qui viene considerato solo un attuatore 1 con sei pieghe,

tuttavia il metodo di progettazione e il modello geometrico secondo la presente invenzione sono validi per qualsiasi numero di pieghe maggiore o uguale a tre. Il numero di pieghe influenza leggermente le prestazioni in termini di contrazione/allungamento e forze esercitate ma anche la deformazione/sollecitazione del materiale. Elevate deformazioni e sollecitazioni possono ridurre la durata di vita dell'attuatore 1.

La geometria dell'attuatore 1 è ottenuta da un loft della sezione trasversale lungo una lunghezza che è la metà della lunghezza totale dell'attuatore 1 ($L = L_{tot}/2$). Il loft viene eseguito lungo le tre curve longitudinali L_c , L_v e L_e . Preferibilmente tali curve sono paraboliche perché, essendo curve semplici come cerchio ed ellisse, massimizzano le prestazioni del modello geometrico. Può tuttavia essere implementato qualsiasi profilo curvilineo monotono positivo, purché la sua concavità sia rivolta verso la camera interna dell'attuatore 1.

Le lunghezze delle curve longitudinali L_c , L_v e L_e vengono qui indicate con L_c , L_v e L_e .

La sezione è caratterizzata da sei parametri: le coppie di semiassi (a_1, b_1) e (a_2, b_2) e le distanze R_1 e R_2 . Tuttavia, solo quattro di questi parametri sono indipendenti. Infatti, ad esempio, assumendo $\{a_1, a_2, b_2, R_2\}$ come parametri indipendenti, b_1 e R_1 si ottengono come:

$$b_1 = R_2 \cos \frac{\pi - \alpha}{2} - b_2 \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$R_1 = R_2 \sin \frac{\pi - \alpha}{2} + b_2 \sin \frac{\alpha}{2}$$

Una volta assegnato il numero di pieghe e la lunghezza L_{tot} dell'attuatore 1, l'obiettivo del modello

geometrico è trovare i valori ottimali di parametri di progettazione indipendenti in modo tale che l'attuatore 1 soddisfi un determinato requisito. Il requisito può essere un qualsiasi rapporto specifico di contrazione e allungamento tra i possibili range (circa massimo 40%-45% di contrazione o allungamento o la somma del loro valore assoluto, ovvero 30% di contrazione e 10% di allungamento). In base a questo, vengono fissati la lunghezza e il diametro medio in modo che i prototipi possano essere facilmente realizzati utilizzando stampanti 3D e viene utilizzato il modello geometrico per trovare le tre geometrie che massimizzano la contrazione, l'allungamento e la loro somma, mantenendoli quasi uguali (cioè 20% di contrazione e 20% di allungamento). Per trovare tali geometrie, i parametri di progetto sono trattati come variabili; per ogni dato insieme $\{a_1, a_2, b_2, R_2\}$, il rapporto di contrazione e il rapporto di allungamento sono calcolati come soluzioni di un problema di ottimizzazione, come spiegato di seguito. In seguito, tutte le lunghezze sono normalizzate rispetto a L .

La figura 4 mostra come si spostano le curve longitudinali paraboliche $\mathcal{L}_c$, $\mathcal{L}_e$ e $\mathcal{L}_v$ se l'attuatore 1 è soggetto all'azione di una pressione positiva. L'ascissa della sezione centrale si sposta da x_m a x_m^* ; quindi, il rapporto di contrazione è dato da:

$$\rho_c = 1 - \frac{x_m^*}{x_m}$$

Viceversa, in caso di depressurizzazione, il rapporto di estensione può essere ottenuto come:

$$\rho_E = \frac{x_m^*}{x_m} - 1$$

A causa della normalizzazione, qui e nel seguito è $x_m = 1$. Il calcolo della configurazione deformata dell'attuatore 1 viene effettuato ponendo un problema di ottimizzazione. La funzione obiettivo dipende dal
 5 volume racchiuso dall'attuatore 1. Nel caso in cui l'attuatore 1 sia sottoposto a pressione positiva, il suo volume aumenta; viceversa, in caso di depressurizzazione il volume interno tende a raggiungere un valore minimo. Quindi, indicando il
 10 volume con V , la funzione obiettivo è:

$$f_c(X) = \frac{1}{V}$$

per un attuatore 1 che esegue la contrazione, mentre è

$$f_e(X) = V$$

15 per un attuatore 1 che esegue l'estensione. In entrambi i casi si deve trovare il minimo della funzione obiettivo. Il vettore X contiene le variabili del problema:

$$X = \{y_{c1}^*, y_{c2}^*, y_{c3}^*, y_{e1}^*, y_{e2}^*, y_{e3}^*, y_{v1}^*, y_{v2}^*, y_{v3}^*, x_m^*\}$$

20 Le prime nove variabili rappresentano le ordinate dei punti in figura 4. In tale figura le curve longitudinali paraboliche $\mathcal{L}_c$, $\mathcal{L}_e$ e $\mathcal{L}_v$ vengono spostate dalla posizione iniziale (linee continue) alla posizione finale (linee tratteggiate). La lunghezza
 25 dell'attuatore 1 diminuisce man mano che viene pressurizzato.

La ricerca del minimo della funzione obiettivo viene eseguita sotto vincoli geometrici. Nell'ipotesi di inestensibilità della membrana 13, si richiede che
 30 le linee $\mathcal{L}_c$, $\mathcal{L}_e$ e $\mathcal{L}_v$ mantengano la loro lunghezza costante in qualsiasi configurazione dell'attuatore 1:

$$L_c^* = L_c$$

$$L_e^* = L_e$$

$$L_v^* = L_v$$

Tutte le lunghezze sono calcolate approssimando le curve longitudinali paraboliche $\mathcal{L}_c$, $\mathcal{L}_e$ e $\mathcal{L}_v$ con le
 5 linee tratteggiate rappresentate in figura 4. Il volume V racchiuso dall'attuatore 1 è calcolato mediante approssimazione considerando il solido rappresentato in figura 5.

Oltre all'insieme dei vincoli di uguaglianza sopra
 10 elencati, nel modello geometrico devono essere introdotti vincoli di disuguaglianza. In qualsiasi configurazione deformata, deve essere:

$$y_{c2}^* - y_{c3}^* < 0$$

$$y_{c1}^* - y_{c2}^* < 0$$

$$15 \quad y_{c2}^* - 2y_{c1}^* < 0$$

$$y_{c3}^* - 2y_{c2}^* + y_{c1}^* < 0$$

La prima coppia di disuguaglianze è imposta per garantire che $\mathcal{L}_c^*$ aumenti in modo monotono, mentre le altre due assicurano che la sua pendenza diminuisca
 20 dall'estremità dell'attuatore 1 alla sezione trasversale centrale. Espressioni analoghe valgono per $\mathcal{L}_v^*$ e $\mathcal{L}_e^*$.

È necessario un altro insieme di vincoli per definire la relazione tra le curve. Infatti, in
 25 qualsiasi configurazione, $\mathcal{L}_v^*$ rimane la più vicina all'asse longitudinale K dell'attuatore 1, $\mathcal{L}_c^*$ la più lontana, mentre $\mathcal{L}_e^*$ si trova sempre tra le due.

Quindi si impone:

$$y_{vi}^* - y_{ei}^* < 0$$

$$30 \quad y_{ei}^* - y_{ci}^* < 0$$

per $i = 1, 2, 3$.

Un'ultima serie di vincoli è assegnata per tenere conto dell'inestensibilità degli archi ellittici 30 e 31 nella sezione trasversale. È stato osservato che definire tale vincolo sotto forma di uguaglianza porta
 5 a scarsi risultati nel calcolo della configurazione deformata. Per allentare il vincolo, questo viene introdotto sotto forma di disuguaglianza come segue:

$$\sqrt{a_1^2 + b_1^2} < L_{ell_c}^* < L_{ell_c}$$

$$\sqrt{a_1^2 + b_1^2} < L_{ell_v}^* < L_{ell_v}$$

10 dove il pedice *ell* si riferisce agli archi ellittici 30 e 31 nella sezione trasversale.

Il modello geometrico implementato permette di indagare come i parametri di progetto influenzino i rapporti di contrazione ed estensione. Poiché lo spazio
 15 dei parametri è quadridimensionale, i risultati presentati nelle figure 6, 7 e 8 vengono visualizzati trattando due parametri come variabili, mantenendo costanti gli altri due. I risultati si ottengono per l'attuatore 1 con $R = 0,2$, essendo R definito come il
 20 raggio dell'estremità dell'attuatore 1 stesso, indicato in figura 3, a destra.

Nelle figure 6 e 7 è illustrato lo spostamento della sezione trasversale centrale dell'attuatore 1 in contrazione (figura 6) ed estensione (figura 7) in
 25 funzione di a_2 e R_2 , per attuatori aventi $a_1 = 0,38$ e $R_2 = 0,15$.

Le superfici nelle figure 6 e 7 sono ottenute per attuatori aventi $a_1 = 0,38$ e $b_2 = 0,15$. Si vede che il parametro R_2 gioca un ruolo importante nella
 30 deformazione dell'attuatore 1, sia in contrazione che in estensione. Grandi valori di R_2 consentono all'attuatore 1 di eseguire una grande estensione,

specialmente per piccoli valori di a_2 : più lunga L_v ,
più l'attuatore 1 può estendersi sotto una differenza
di pressione negativa applicata. Come previsto, tale
combinazione di valori non è adatta per costruire un
5 attuatore 1 con un elevato rapporto di contrazione: la
figura 6 mostra che x_m^* raggiunge il minimo (quindi ρ_c
massimo) per un valore relativamente basso di R_2 ($\sim 0,5$)
e per il valore più alto di a_2 . In sintesi, quelle
caratteristiche che favoriscono la contrazione
10 dell'attuatore 1 penalizzano l'estensione, e
viceversa. Mentre R_2 e a_2 risultano essere gli unici
parametri che influenzano significativamente il
rapporto di estensione, il rapporto di contrazione
risulta essere influenzato anche da b_2 .

15 La figura 8 illustra lo spostamento della sezione
centrale di due attuatori con $a_1 = 0,43$ e $R_2 = 0,83$
(superficie opaca) o $R_2 = 0,57$ (superficie
trasparente). La figura 8 mostra che, per massimizzare
il rapporto di contrazione, si preferiscono valori
20 bassi di b_2 se si adotta un basso a_2 ; inoltre, valori
bassi di R_2 consentono all'attuatore 1 di eseguire una
contrazione maggiore solo per le coppie (a_2, b_2) per le
quali le superfici presentano un plateau, mentre svolge
l'effetto opposto al di fuori di tale plateau.

25 Le figure 9a, 9b e 9c illustrano forme esecutive
di attuatori ottimizzate per differenti prestazioni.
Sono stati determinati i set di parametri ottimali per
i tre design che massimizzano rispettivamente la
contrazione (figura 9a), lo spostamento assoluto, ossia
30 la somma di allungamento e contrazione in valore
assoluto (figura 9b) e l'allungamento (figura 9c). I
relativi parametri per le tre forme esecutive,
risultanti dal modello, sono contenuti nella tabella

qui sotto riportata, in cui tutti i valori sono normalizzati rispetto a L che rappresenta la metà della lunghezza dell'attuatore 1, ossia $L_{tot}/2$.

Parametro	Max ρ_c	Max ρ_e	Max $\rho_c + \rho_e$
a_1	0,48	0,10	0,24
b_1	0,17	0,26	0,29
R_1	0,515	0,89	0,76
a_2	0,16	0,06	0,09
b_2	0,11	0,22	0,13
R_2	0,53	0,90	0,8

5 Da queste tre forme esecutive principali, è possibile dare una spiegazione semplificata su come i parametri di progetto influenzino il rapporto di contrazione e il rapporto di allungamento, e questo vale per qualsiasi numero di pieghe (considerando tre
10 pieghe come minimo) e per qualsiasi profilo curvilineo delle pieghe, come detto sopra. Più le pieghe sono ripiegate, più l'attuatore avrà un rapporto di contrazione superiore al rapporto di allungamento. D'altro canto, meno le pieghe sono pronunciate, minore
15 è la contrazione mentre maggiore è l'allungamento.

Eventuali limitazioni derivanti dallo specifico processo di fabbricazione coinvolto possono essere prese in considerazione sotto forma di vincoli nel modello matematico presentato finora.

20 Come già accennato, poiché l'attuatore 1 può essere realizzato in un unico passaggio senza alcuna fase di assemblaggio, è anche possibile realizzare configurazioni complesse anche aventi attuatori incorporati in strutture da attuare.

25 Le figure 10a e 10b mostrano un esempio esecutivo in cui tre attuatori 1 sono realizzati direttamente

incorporati all'interno della struttura da attuare. In questo esempio esecutivo la struttura da attuare è un dito artificiale 2, composto da una struttura continua realizzata direttamente mediante stampa 3D, in particolare con la tecnica SLA, in un processo a
5 singolo passaggio senza alcuna fase di assemblaggio. Sono previsti tre attuatori 1 posti in serie tra loro. Il dito 2 è composto da un elemento metacarpale 20 e tre elementi a falange 21, tutti collegati da
10 ponticelli di materiale. La catena di elementi a falange 21 è attuata a piegamento rispetto all'elemento metacarpale 20 da un tirante 22 azionato dagli attuatori 1 in serie, essendo gli attuatori 1 posizionati in corrispondenza dell'elemento
15 metacarpale 20. Il dito 2 può essere costruito in dimensioni antropometriche, ad esempio con attuatori 1 lunghi ciascuno 2 cm. La figura 10a mostra il dito 2 in posizione di riposo mentre la figura 10b mostra il dito 2 piegato, con i tre attuatori 1 pressurizzati e
20 contratti.

È possibile prevedere forme attuative che, oltre alla contrazione e all'allungamento, esercitano anche flessione e torsione.

Le figure 11a, 11b e 11c illustrano diverse viste
25 di una forma esecutiva di attuttore 1, in cui si ottiene una torsione ruotando leggermente in fase di progettazione le pieghe della membrana 13 rispetto all'asse K dell'attuttore 1 con un andamento elicoidale. Ciò consente di aggiungere alla contrazione
30 e all'allungamento la torsione dell'attuttore 1 quando questo è gonfiato o sgonfiato.

Le figure 12a, 12b e 12c illustrano diverse viste di una forma esecutiva di attuttore 1, in cui si ottiene

una flessione dell'asse K durante la contrazione. In questo modo, a contrazione avvenuta, le opposte estremità dell'attuatore non giaceranno più su una linea retta ma su una curva. Questo effetto si ottiene
5 rimuovendo in fase di progettazione alcune pieghe per avere un pattern di pieghe parziale e asimmetrico rispetto all'asse K. In questo modo il lato dell'attuatore 1 che presenta le pieghe tende a contrarsi o ad allungarsi mentre l'altra parte no.
10 Questa deformazione asimmetrica porta alla flessione dell'attuatore 1.

Il dispositivo oggetto della presente invenzione comprende inoltre uno o più attuatori 1 che possono essere fabbricati direttamente in serie, parallelo o
15 altra disposizione complessa o anche incorporati nella struttura da azionare 2, come visto sopra.

Ciò consente di ottenere ad esempio un muscolo artificiale gerarchico, illustrato nelle figure 13a, 13b e 13c e fabbricato come un'unica struttura in un
20 processo di produzione in un unico passaggio e composto da disposizioni complesse dell'attuatore 1.

Tale esempio esecutivo comprende una serie di attuatori legati insieme in configurazione parallela utilizzando mezzi di vincolo reciproco costituiti da
25 connettori radiali 41 a formare un assieme per tener collegate le deformazioni dei singoli attuatori 1 e far deformare l'intera struttura come un singolo muscolo. I connettori radiali 41 possono essere internamente cavi per condividere l'alimentazione
30 dell'aria tra tutti gli attuatori 1. In questo modo basta anche un solo condotto di alimentazione per azionare tutto il muscolo. L'esempio esecutivo illustrato nelle figure 13a, 13b e 13c è relativo ad

un muscolo artificiale che simula il comportamento dei muscoli biologici longitudinali, ma è possibile modificare la configurazione per simulare il comportamento di diversi muscoli biologici, come ad esempio muscoli obliqui o muscoli radiali. Questi muscoli artificiali ampliano i vantaggi del design a singolo attuatore 1 descritto in precedenza poiché combinando vari attuatori è possibile ottenere più deformazioni, moltiplicare la forza ottenuta e imitare diversi tipi di muscoli biologici, con la possibilità anche di produrre l'intero muscolo artificiale in un unico processo e un unico materiale. La figura 13a mostra il concetto principale del muscolo gerarchico come disposizione complessa di singoli attuatori 1, costituito da più fibre muscolari artificiali 40, qui in configurazione parallela tra loro, ciascuna a sua volta costituita da più attuatori 1 in serie.

Il processo di fabbricazione a passo singolo di manifattura additiva può essere di tipo qualsivoglia, ad esempio il metodo di modellazione a deposizione fusa (FDM - Fused Deposition Modeling) e la fotopolimerizzazione o stereolitografia (SLA), con l'utilizzo di diversi materiali.

È importante sottolineare che non solo questi due processi di produzione additiva possono essere adottati, ma può essere utilizzato ogni processo di fabbricazione in grado di produrre una camera pneumatica.

30

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo muscolo artificiale fluidico comprendente almeno un attuatore (1) pieghettato atto ad esercitare forze lungo un asse (K), detto attuatore
5 (1) comprendendo una camera (10) delimitata da porzioni di chiusura (11) alle due opposte estremità lungo il detto asse (K) e da una membrana flessibile (13) nella porzione centrale (12) interposta alle dette porzioni di chiusura (11), la quale membrana (13) presenta una
10 pluralità di creste (130) e valli (131) che si alternano tra loro in direzione circonferenziale attorno al detto asse (K) a formare una struttura a pieghe,

caratterizzato dal fatto che
15 il detto attuatore (1) è costituito da un unico elemento di materiale flessibile o elastico.

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui il detto attuatore (1) è provvisto di almeno tre pieghe.

20 3. Dispositivo secondo la rivendicazione 1 o 2, comprendente una pluralità di detti attuatori (1), i quali attuatori (1) sono vincolati tra loro e/o sono collegati fluidicamente in serie e/o in parallelo tra loro.

25 4. Metodo di fabbricazione di un dispositivo muscolo artificiale fluidico secondo una o più delle precedenti rivendicazioni,

caratterizzato dal fatto che

consiste in un processo a passo singolo.

30 5. Metodo secondo la rivendicazione 4, in cui il detto processo di fabbricazione a passo singolo è un processo di manifattura additiva.

6. Metodo secondo la rivendicazione 4, in cui il detto processo di fabbricazione a passo singolo è un processo di stampaggio.

7. Metodo secondo la rivendicazione 4, in cui uno
5 o più detti attuatori (1) sono fabbricati assieme ad una struttura da attuare (2) ed incorporati nella struttura da attuare (2) stessa.

8. Metodo di progettazione di un dispositivo muscolo artificiale fluidico secondo una o più delle
10 rivendicazioni da 1 a 3,

caratterizzato dal fatto che

prevede i seguenti passi:

a) definizione di un modello geometrico della detta membrana (13), il quale modello geometrico
15 comprende una pluralità di variabili indipendenti relative a parametri geometrici;

b) definizione di un valore atteso del rapporto di contrazione e/o del rapporto di allungamento e/o di una combinazione dei rapporti di contrazione e
20 allungamento;

c) individuazione dei detti parametri ottimali per soddisfare il detto valore atteso.

9. Metodo secondo la rivendicazione 8, in cui le dette creste (130) sono uguali tra loro e le dette
25 valli (131) sono uguali tra loro per tutte le dette pieghe ed il modello geometrico prevede i seguenti passi:

a1) definizione per ciascuna semi-piega di due curve di profilo di sezione trasversale rispetto al detto asse (K), di cui una prima curva di sezione (30)
30 avente concavità verso la camera (10) e una seconda curva di sezione (31) avente concavità in verso opposto alla camera (10);

a2) identificazione di una pluralità di dette variabili indipendenti relative a parametri geometrici delle dette curve di sezione (30, 31);

5 a3) definizione di tre curve di profilo longitudinali rispetto all'asse (K), di cui una curva di cresta ($\mathcal{L}_c$), una curva di valle ($\mathcal{L}_v$) e una curva di confine ($\mathcal{L}_e$) tra le dette curve di sezione (30, 31);

e la detta individuazione dei detti parametri ottimali prevede i seguenti passi:

10 c1) definizione di una funzione obiettivo specifica per contrazione o per estensione, la quale funzione obiettivo è funzione del volume della camera (10) dopo la deformazione;

15 c2) identificazione delle variabili del problema di minimizzazione della detta funzione obiettivo come coordinate di prestabiliti punti delle dette curve longitudinali deformate e lunghezza della camera (10) lungo il detto asse (K);

20 c3) calcolo del minimo della detta funzione obiettivo e conseguente determinazione del set ottimale di parametri per la massimizzazione del rapporto di contrazione e/o del rapporto di allungamento e/o di una combinazione dei rapporti di contrazione e allungamento.

25 10. Metodo secondo la rivendicazione 9, in cui le dette curve di sezione (30, 31) sono archi ellittici.

11. Metodo secondo la rivendicazione 9 o 10, in cui le dette curve longitudinali ($\mathcal{L}_c$, $\mathcal{L}_v$, $\mathcal{L}_e$) sono parabole.

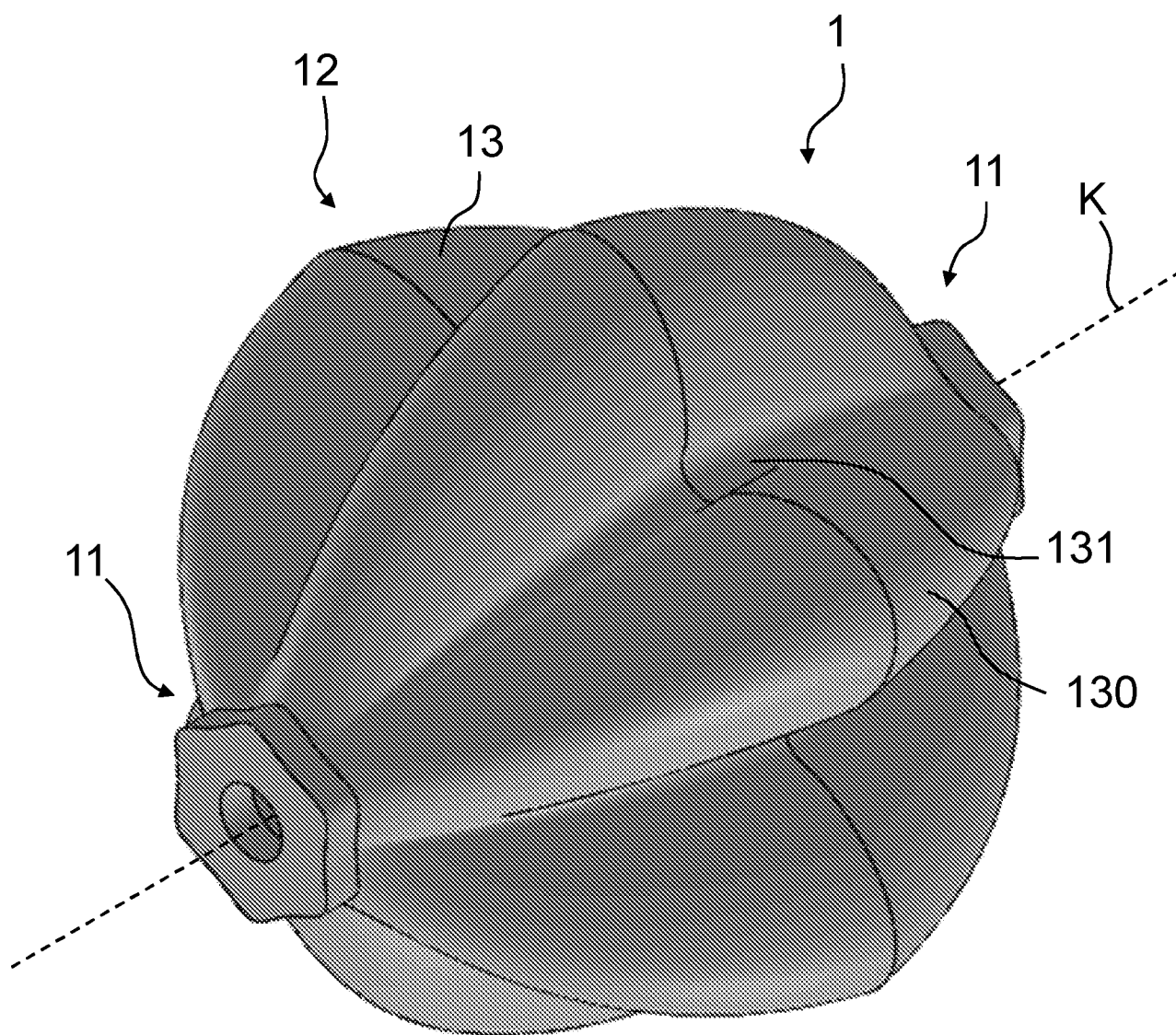


Fig. 1

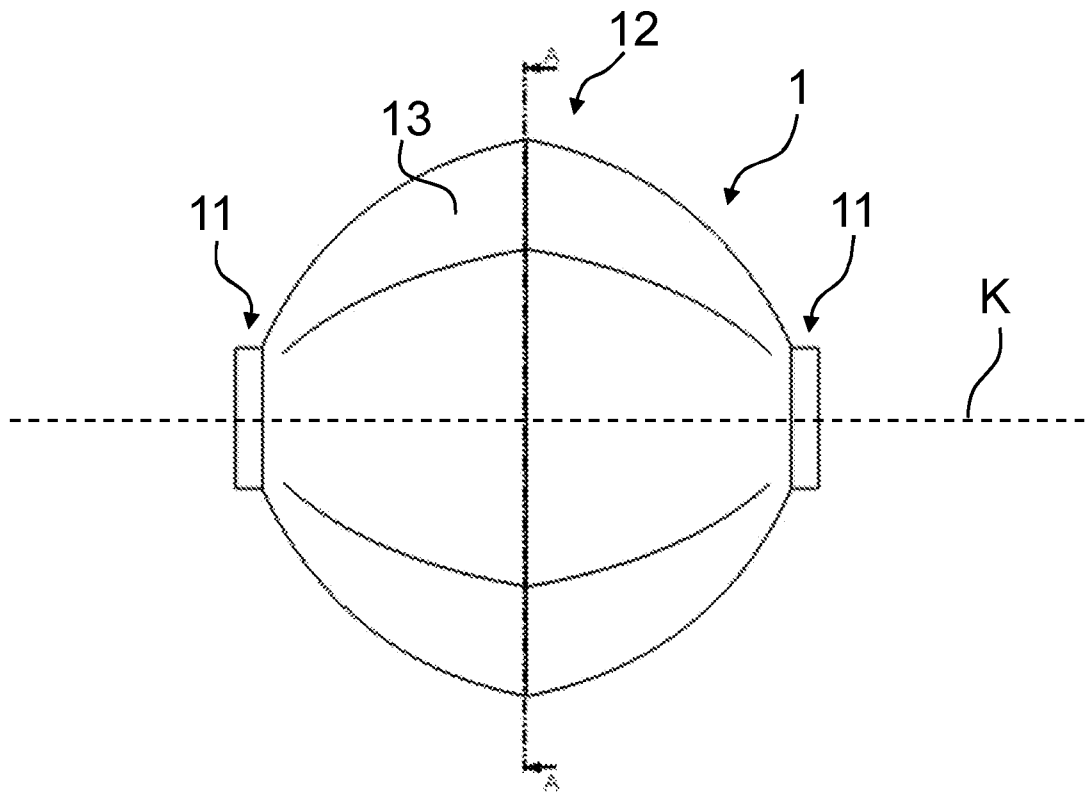


Fig. 2a

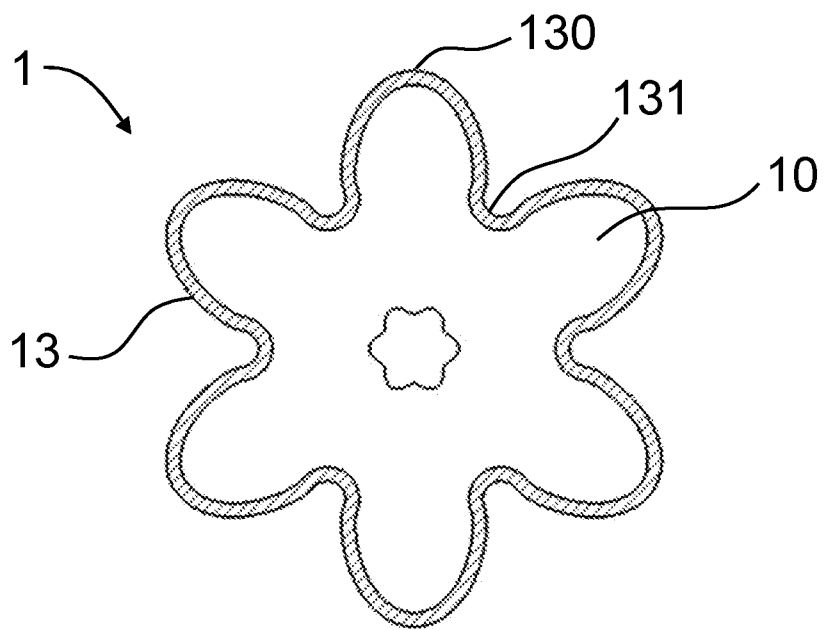


Fig. 2b

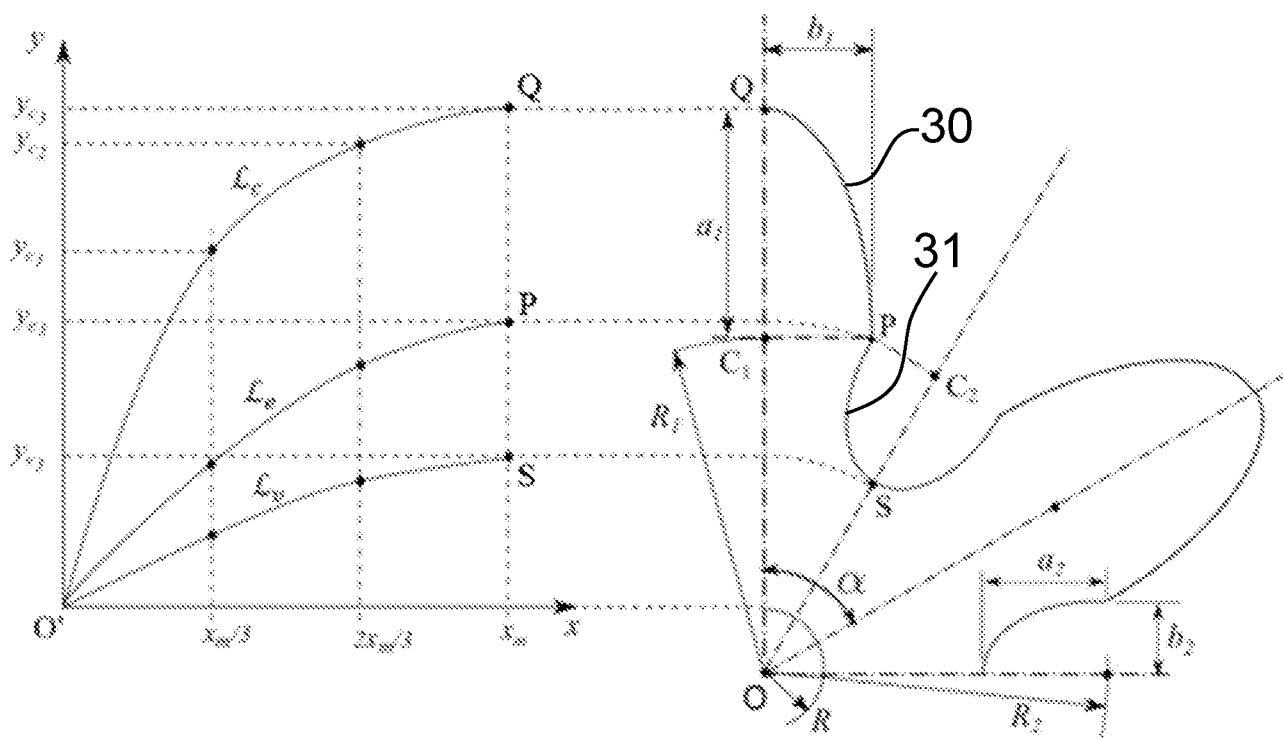


Fig. 3

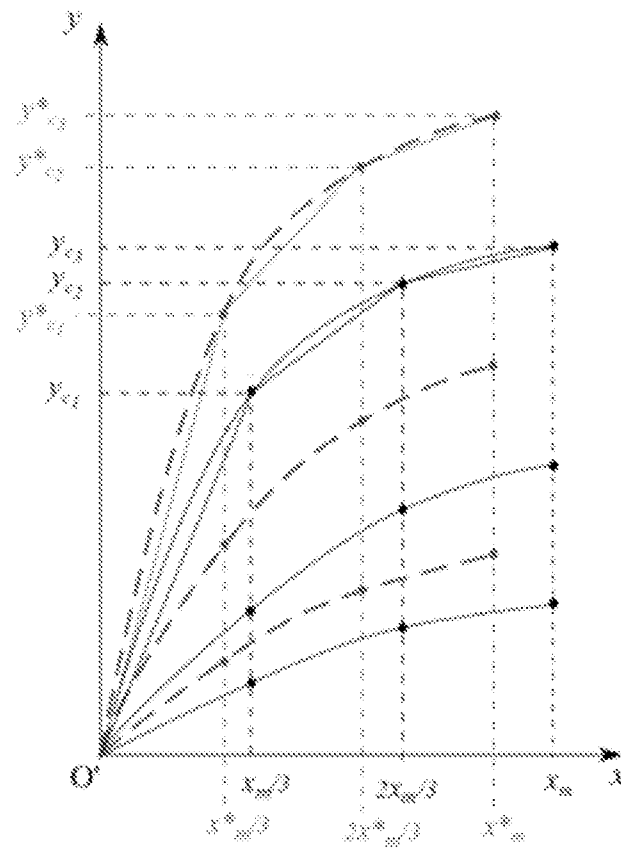


Fig. 4

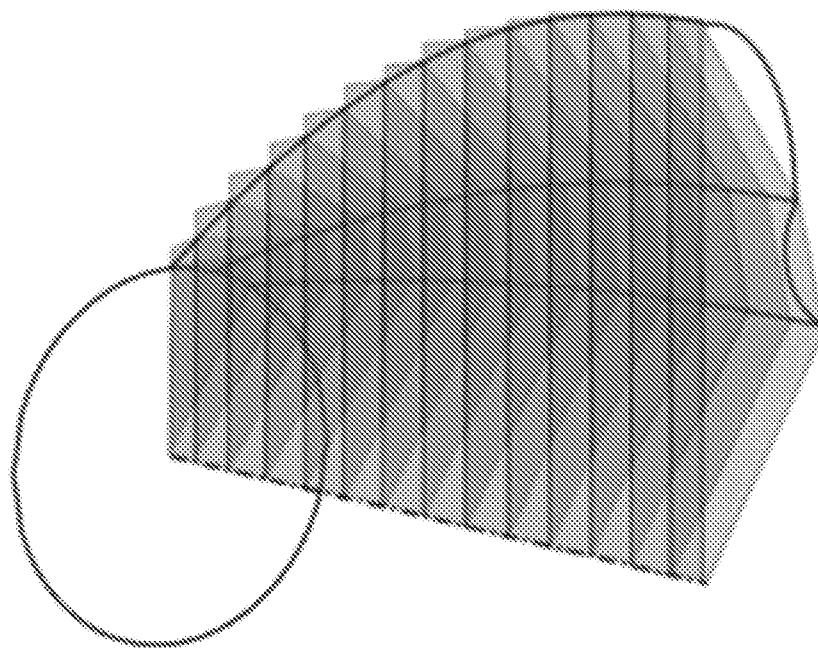


Fig. 5

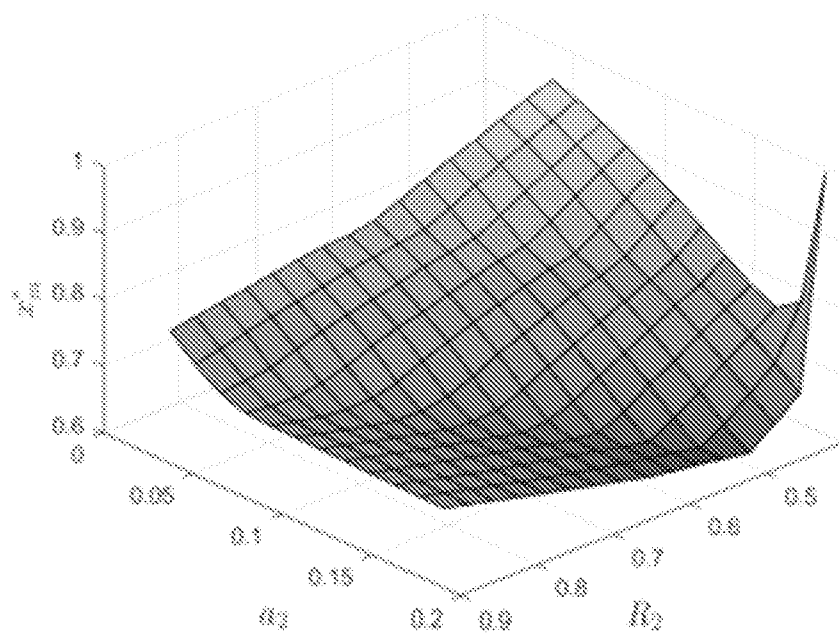


Fig. 6

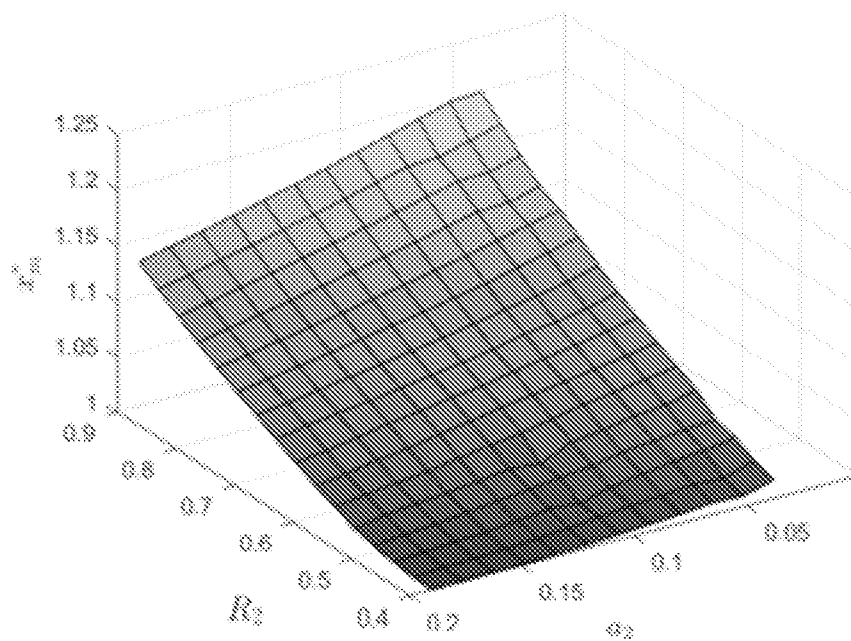


Fig. 7

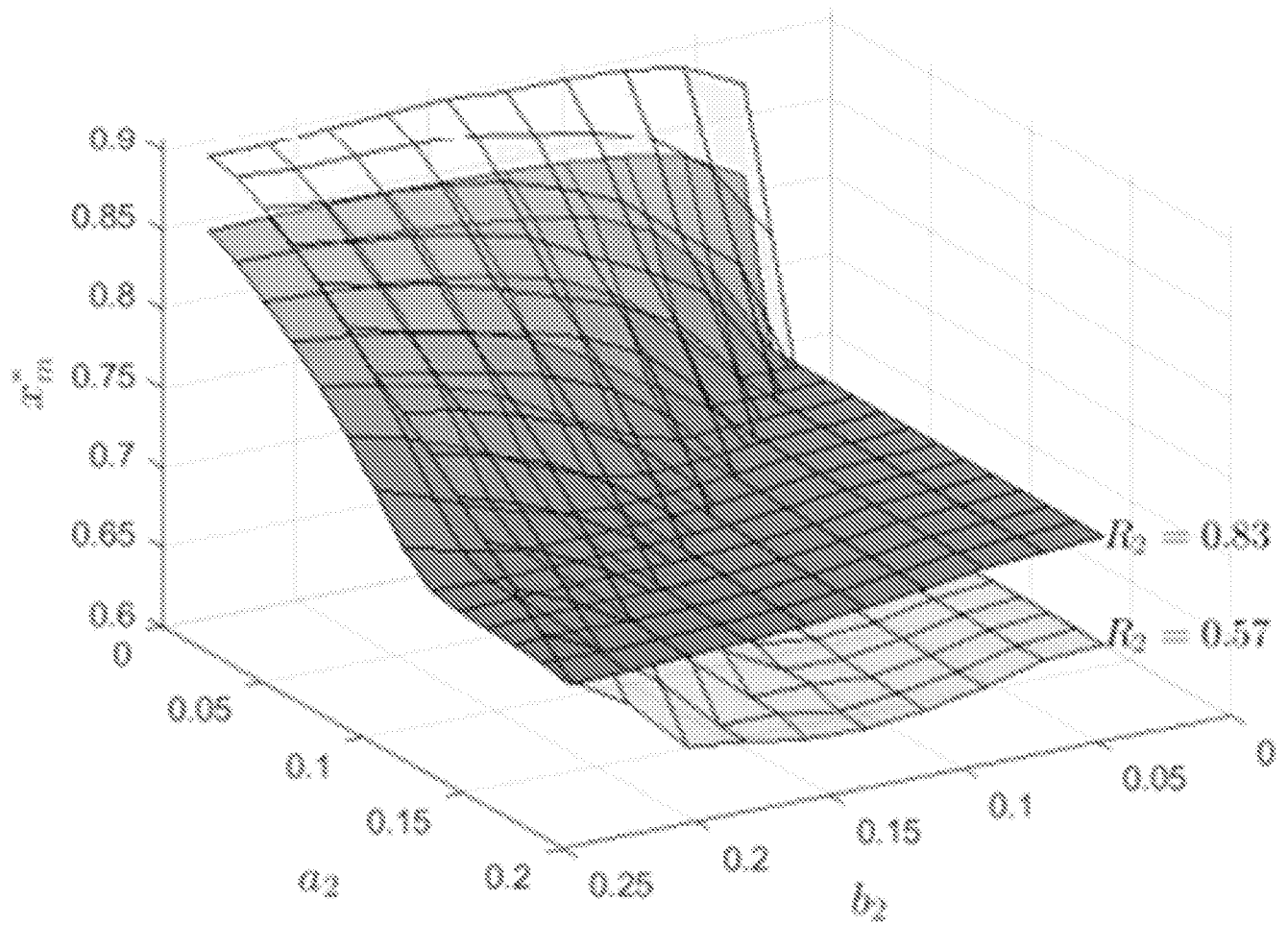


Fig. 8

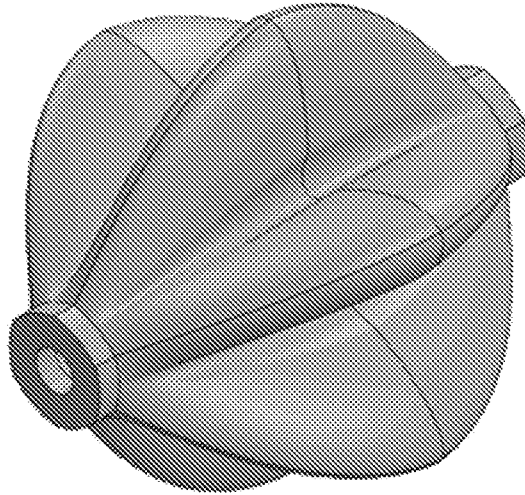


Fig. 9a

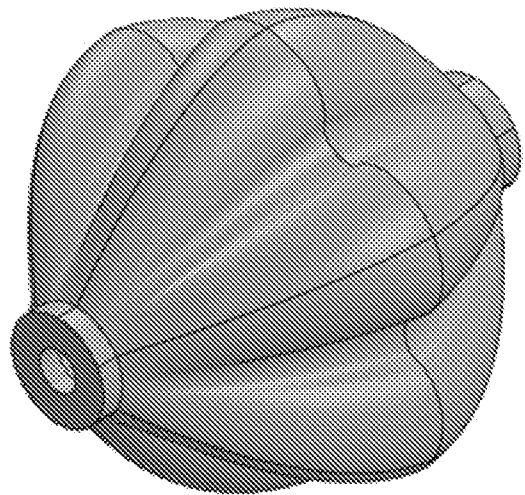


Fig. 9b

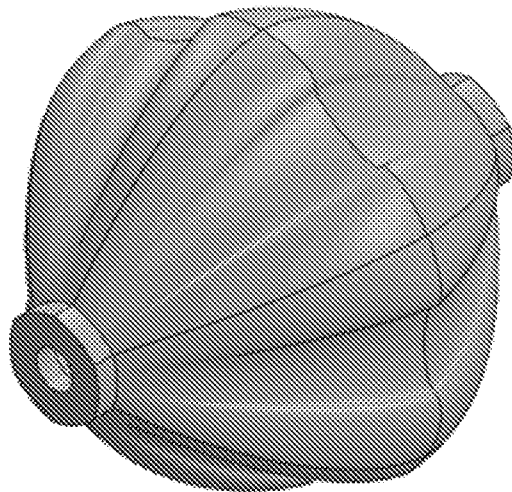


Fig. 9c

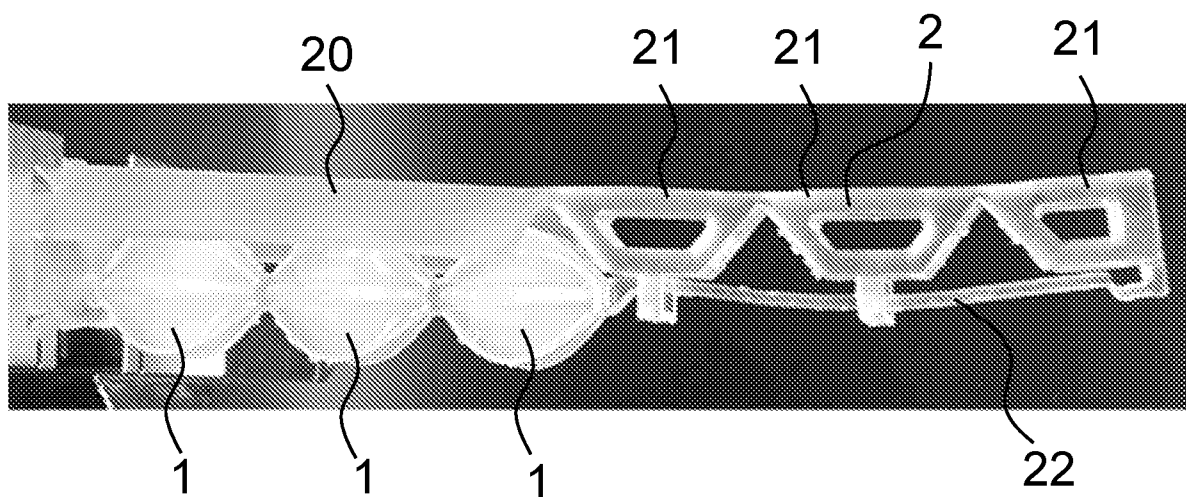


Fig. 10a

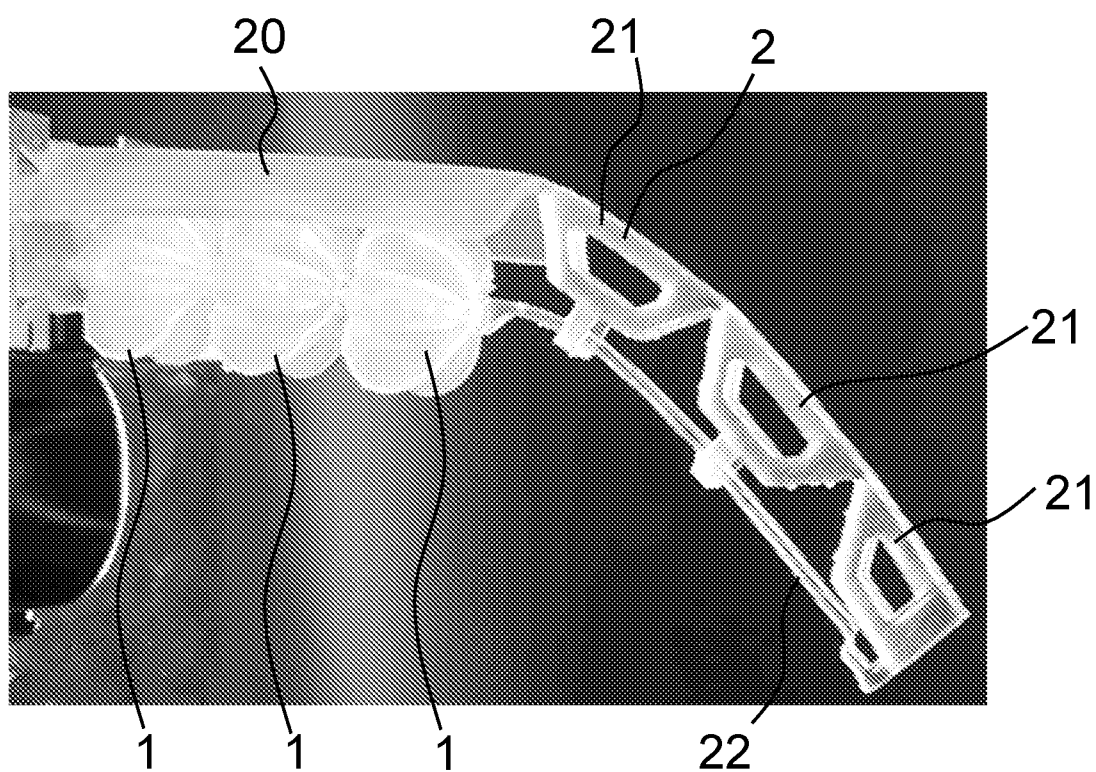


Fig. 10b

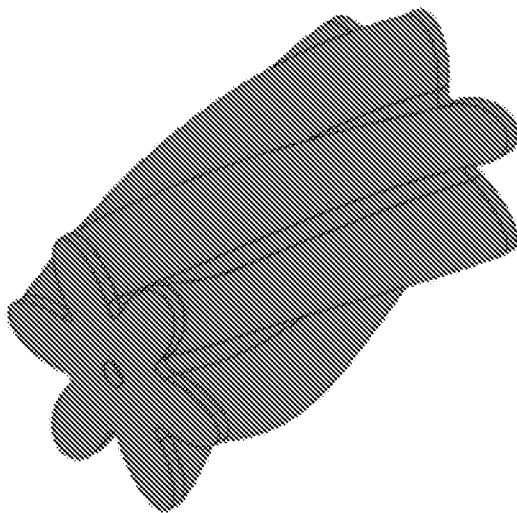


Fig. 11a

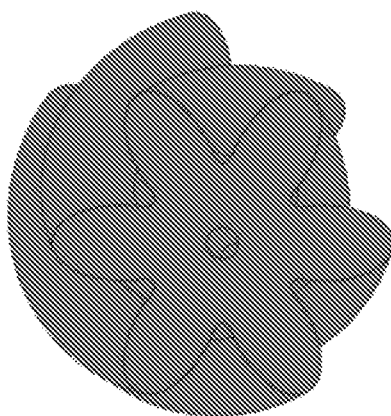


Fig. 11b

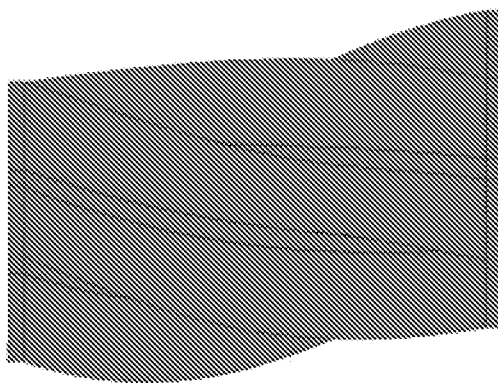


Fig. 11c

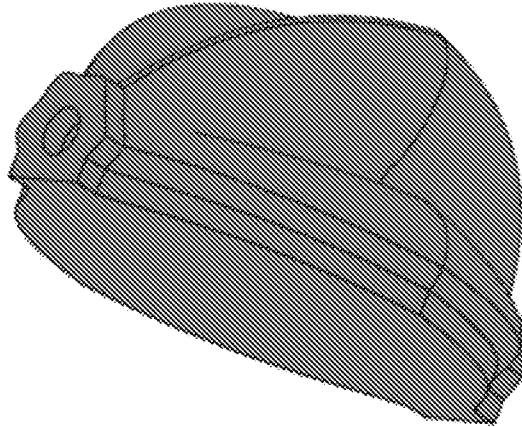


Fig. 12a

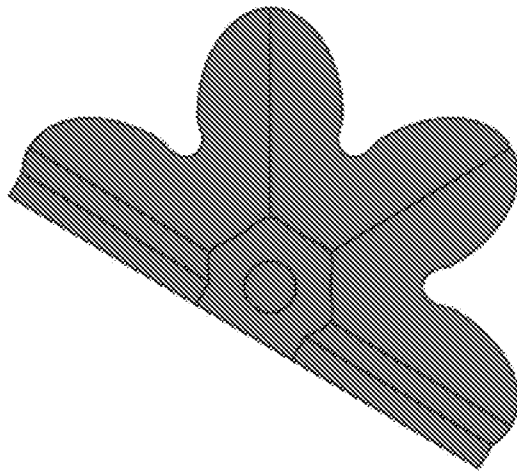


Fig. 12b

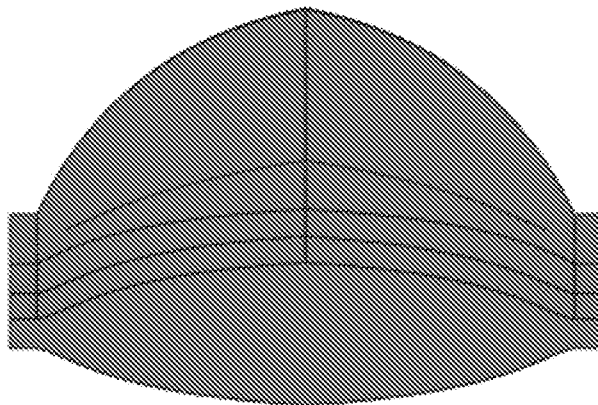


Fig. 12c

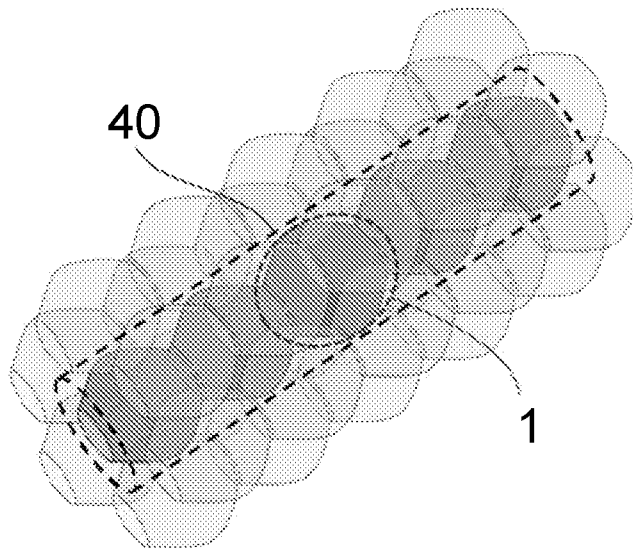


Fig. 13a

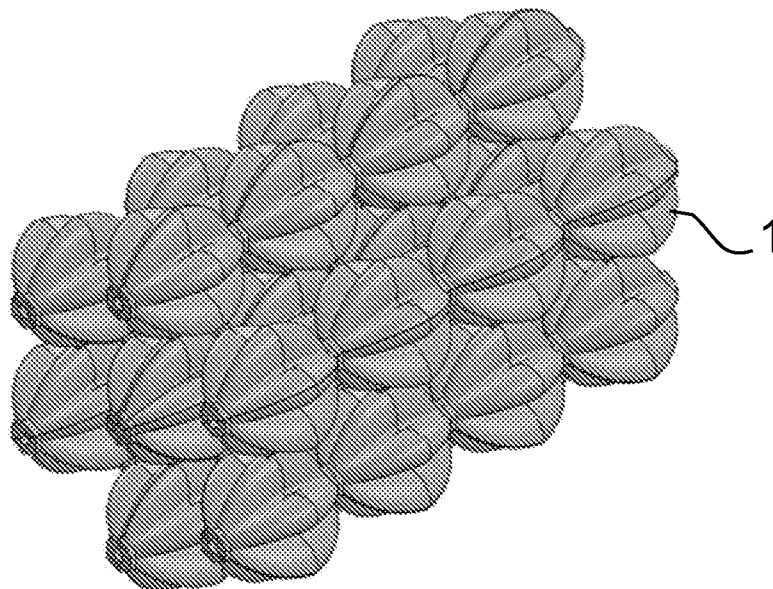


Fig. 13b

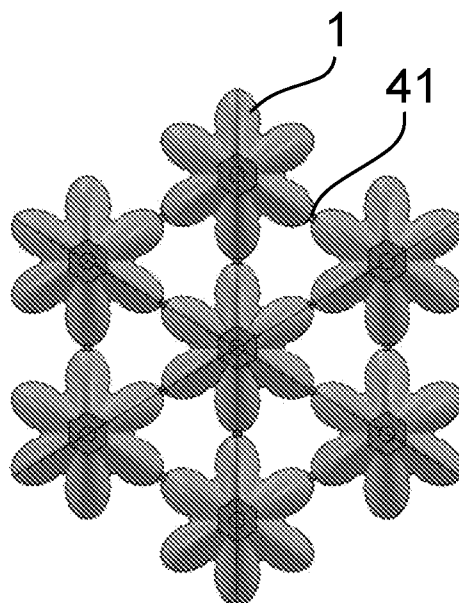


Fig. 13c