

関節リウマチ手指変形に対する動的リハビリテーションアシスト装具の開発

Development of the dynamic rehabilitation assist orthosis for thumb MP joint dorsal subluxation

辻内伸好 (同志社大)      小泉孝之 (同志社大)      ○ 野尻豊 (同志社大院)  
 徳永大作 (京都府立医大)      久保俊一 (京都府立医大)      中村悟 (京都府立医大)

Nobutaka TSUJIUCHI, Doshisha University  
 Yutaka NOJIRI, Doshisha University Graduate School  
 Takayuki KOIZUMI, Doshisha University  
 Daisaku TOKUNAGA, Kyoto Prefectural University of Medicine  
 Toshikazu KUBO, Kyoto Prefectural University of Medicine  
 Satoru NAKAMURA, Kyoto Prefectural University of Medicine

**Abstract:** There is no orthosis available to perform an active assistance to the rehabilitation of rheumatoid arthritis. In this study, we developed new pneumatic actuators which were called membrane pneumatic actuators to produce an assist orthosis. We presented that the force generated of the single actuator had the linearity to the air pressure supplied to the actuator and that the dynamic characteristics depended on the efficiency of an electropneumatic regulator from our characteristics experiment. And we verified an effect of reduction by the assist orthosis with the actuator.

**Key Words:** Membrane Pneumatic Actuator, Rheumatoid Arthritis, Assist Orthosis, Linearity, Characteristics

1. 諸言

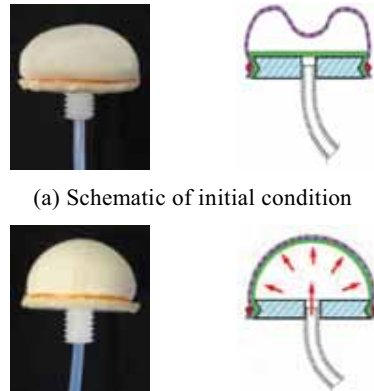
関節リウマチは、全身の関節の変形と機能障害をきたす原因不明の疾患である。特に手指の変形が強く、手指の進行性機能障害に罹患している患者は 50 万人以上が存在すると見込まれる。関節リウマチ (RA) 患者では手指 MP 関節掌側亜脱臼 (以下 MP 関節亜脱臼) を生じることが多く、亜脱臼の発生早期からその程度を診断し、保存療法 (薬物療法、装具、ハンドセラピーなど) と手術療法を病期の進行に応じて選択する必要がある。ここで、保存療法に着目すると、疼痛軽減に有効な局所の固定・安静を目的とした装具が存在するが、手指機能改善効果が認められなかった<sup>(1)</sup>。現状、機能改善のため、ハンドセラピーが行われている。しかし、外来通院レベルで十分なリハビリテーションを行うことは困難である。そこで、先行研究において、良肢位で右手指を固定できるウレタン製の土台と、2cm 径の低圧駆動型空気圧アクチュエータ (メンブレン型空気圧アクチュエータ) を応用し、母指 MP 関節亜脱臼を掌側から加圧して整復した際の圧力を計測できる機器を製作した。また、超音波診断装置および単純 X 線側画像を用いて、製作した機器による脱臼の整復を確認した<sup>(2)</sup>。

本研究では、メンブレン型空気圧アクチュエータと、アシスト装具の構造について述べるとともに、アクチュエータに供給される空気の圧力と発生力を実験的に計測し、アクチュエータの特性を明らかにした。また、ハンドセラピーによって整復した手指の状態と、アシスト装具により整復した手指の状態を比較し、アシスト装具により、脱臼した指の整復が可能であるかどうかを比較検証した。

2. メンブレン型空気圧アクチュエータの構造

本研究において新規で開発したメンブレン型空気圧アクチュエータの概略図を図 1 に示す。圧縮空気を空気圧アクチュエータ内に送ることにより図 1 (a) から図 1 (b) の状態へ膨張する。そして、膨張することにより空気圧アクチュエータは押し圧を発生させる。ここで、メンブレン型空気圧アクチュエータの主な構成部材はチューブ、ベース部材、内膜部材、外膜部材である。構造としては、圧縮空気を

を内膜部材内に送り込むチューブが、板状のベース部材の厚み方向へ貫通する孔に通されている。ベース部材の一方の貫通孔を覆うように、内膜部材がベース部材に取り付けられ、内膜部材を被覆するように外膜部材が取り付けられている。内膜部材は流体の供給により膨らみ、外膜部材は膨らんだ内膜部材に伴って変形することが可能な柔軟性を有している。さらに、外膜部材の特徴は最大操作状態まで膨らんだ内膜部材が、その状態を超過して膨らむことを抑える締付力を有していることである。



(a) Schematic of initial condition  
 (b) Schematic of pressurized condition  
 Fig. 1 Schematic of membrane pneumatic actuator

3. 実験環境

実験機器を図 2 に示す。PC/AT 互換機 (Core2Quad 3.00 GHz) をホストコンピュータとし、ISA バスに取り付けた DSP ボード (DS1005 : dSPACE) により 1ms のサンプリング周期で実験を行う。さらに、PC 上で MATLAB/Simulink を用いて、制御系設計を行う。PC からの信号は DSP で D/A 変換され、アナログ信号として電空レギュレータ (MEVT500-0C4-T11-8-U-3 : CKD 製) に送信される。電空レギュレータとは入力される電気信号に応じて出力圧力を制御する機器である。そして、電空レギュレータから圧縮空気をメンブレン型空気圧アクチュエータに送る。その時

の空気圧アクチュエータの内圧は電空レギュレータに内蔵されている圧力センサにより計測し、発生力は力センサ (LUR-A-SA1 引張圧縮両用型小型ロードセル：共和電業製) により測定する。センサからの信号を DSP で D/A 変換し、PC 上でモニタリング可能としている。

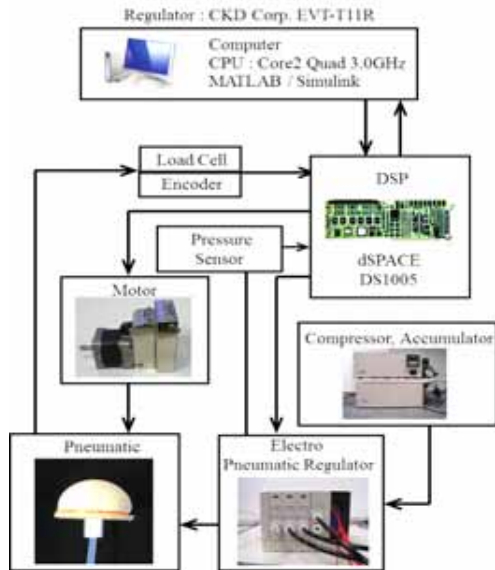


Fig. 2 Experimental apparatus

#### 4. メンブレン型空気圧アクチュエータの特性実験

##### 4-1 空気圧アクチュエータの発生力

本研究で開発したメンブレン型空気圧アクチュエータの軸力は、球殻が内圧を受ける場合の半球部分に働く力の平衡を考えることにより表現できると考えられる。球殻の半球部分に働く外力は、近似的に式 (1) のように表現することができる (図 3 参照)。

$$F = p\pi r^2 \quad (1)$$

ここで、 $F$ ；半球面に垂直な発生力、 $p$ ；内壁に作用する圧力、 $r$ ；球殻の半径である。この関係がメンブレン型空気圧アクチュエータにおいて成立するか実験により調べる。

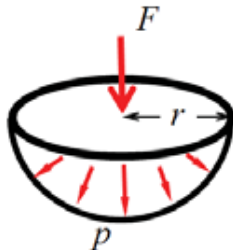


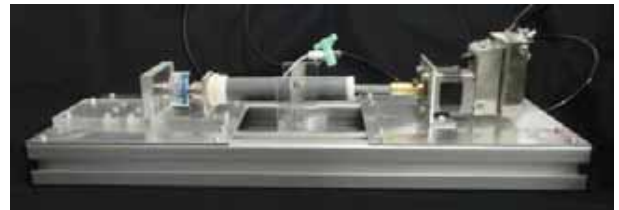
Fig.3 Schematic of thin sphere shell

##### 4-2 特性実験

###### 4-2-1 実験方法

実験装置を図 4 (a) に示す。初期状態として、空気圧アクチュエータを図 4 (b) のように力センサに垂直に接触するように設置した。そして、空気圧アクチュエータをモータ (CM1-V-11S30：Muscle Corp.製) を用いて固定した。初期状態から電空レギュレータを用いて空気圧アクチュエータに圧力を供給した。圧力は 10 秒間で 0kPa から 200kPa に達するように供給し、その後 10 秒間で 200kPa から 0kPa に達するように圧力を排出した。実験で使用するメンブ

ン型空気圧アクチュエータは直径 19.7mm、内膜厚さ 0.34mm である。



(a) Overall view experimental apparatus



(b) Contact of force sensor with actuator

Fig.4 Experimental apparatus

##### 4-2-2 実験結果および考察

実験結果を図 5 に示す。図 5 の赤線は理論から求めた軸力、青線は実験により計測した軸力である。図 5 より、実験結果と理論値が良く一致していることからメンブレン型空気圧アクチュエータの発生力において、式 (1) の関係が成立する。よって、空気圧アクチュエータに供給される空気圧と発生力との関係は、線形であることがわかった。また、空気圧アクチュエータを、空気圧アクチュエータに対して垂直な方向の力のみ測ることのできる力センサに対して、垂直に接触するように設置し、実験結果と理論値が良く一致していることから、軸力は接触面に対して垂直方向に発生することが考えられる。

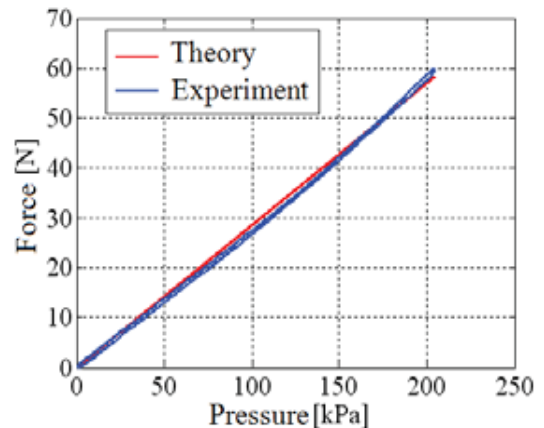


Fig.5 Experimental result of axial force measurement

##### 4-3 空気圧アクチュエータの動特性

###### 4-3-1 実験方法

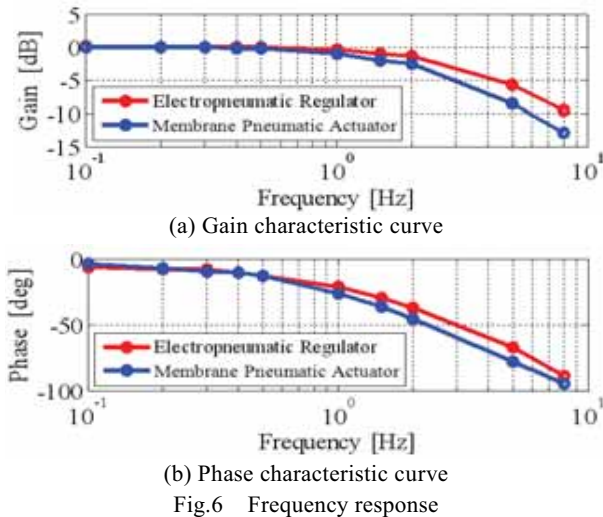
空気圧アクチュエータの周波数応答を調べるために、電空レギュレータの印加電圧から算出した指令圧力値と空気圧アクチュエータの内圧を比較した。また、電空レギュレータの周波数応答を調べるために、電空レギュレータの印加電圧から算出した指令圧力値と電空レギュレータの供給圧力を比較した。

電空レギュレータへの印加電圧の周波数は 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0, 8.0 Hz の 10 通りとした。

### 4-3-2 実験結果および考察

周波数応答を図6に示す. ゲイン曲線を図6(a)に示し, 位相曲線を図6(b)に示す.

図6(a)より, 空気圧アクチュエータの周波数応答は1.0Hz以下ではゲインがほぼ0dBとなった. 図6(b)より, 0.4Hz以下では位相遅れもほぼ0degとなった. また, 電空レギュレータと空気圧アクチュエータの特性が同様の傾向を示すことにより, 空気圧アクチュエータの動特性は電空レギュレータの性能に依存することがわかった.



## 5. アシスト装具による手指の整復

### 5-1 アシスト装具の構造

母指 MP 関節掌側亜脱臼矯正装具の一式を図7に示す. コンプレッサーから送られてきた圧縮空気を圧力コントローラに送る. 圧力コントローラを用いて空気圧アクチュエータに供給する空気圧を制御することで, MP 関節の整復に必要な力を発生させる.

装具の使用方法としては, 図8(a)に示すように, 右手を固定具の上に載せ, 右母指末節部および右手部を図8(b)に示すように, 伸縮性ベルトで固定する. そして, 空気圧アクチュエータに空気圧を供給することで, 亜脱臼を整復するための力を発生させる.

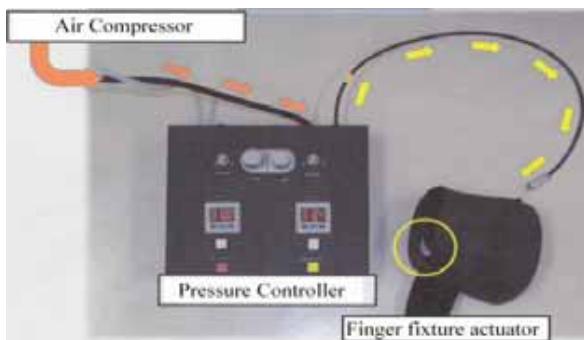


Fig. 7 Assist orthosis of thumb MP joint subluxation toward palm side

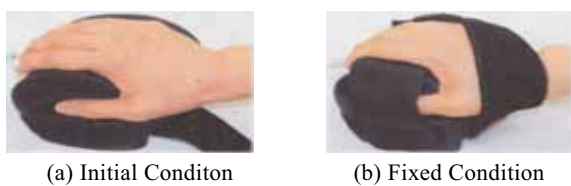


Fig. 8 How to use Assist orthosis

### 5-2 脱臼の整復結果および考察

整復対象者は, 右母指にNalebuff分類 TypeI 変形があり, 右母指 MP 関節に明らかな関節炎がない患者5人5手を対象とした. アクチュエータへの供給圧力50kPaで整復できたのは1人, 100kPaで整復できたのは3人, 整復不能であったのは1人であった. 図9(a)の左図にハンドセラピーによって徒手整復する前の母指の超音波画像, 右図に開発した装具による整復前の母指のX線画像を示す. 図9(b)の左図にハンドセラピーによって徒手整復した後の母指の超音波画像, 右図に開発した装具による整復後の母指のX線画像を示す. 図9より, 先行研究において開発した装具による整復は, ハンドセラピーによる整復と同等の効果を示すことがわかる. 以上から, 開発した装具により, 脱臼の整復は可能であることが考えられる.

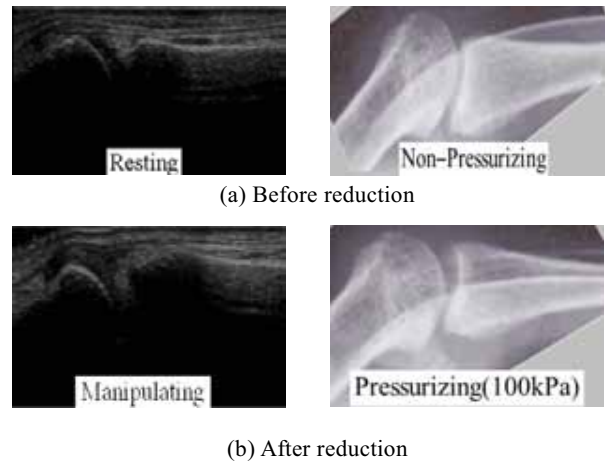


Fig. 9 X-ray of the thumb

## 6. 結言

本研究では, 関節リウマチ手指変形に対する動的リハビリテーションアシスト装具に用いられるメンブレン型空気圧アクチュエータに供給される空気圧と発生力との関係は, 線形であることと, 電空レギュレータと空気圧アクチュエータの特性が同様の傾向を示すことにより, 空気圧アクチュエータの動特性は電空レギュレータの性能に依存することがわかった. また, 先行研究において開発した装具による整復は, ハンドセラピーによる整復と同等の効果を示すことがわかった.

## 謝辞

なお, 本研究の一部は日本學術振興会科学研究費助成事業挑戦的萌芽研究(課題番号:24656159)の援助を受けた. 記して謝意を表す.

## 参考文献

- (1) Paula Gabriel Silva, Império Lombardi, Jr, Cristina Breitschwerdt, Pola Maria Poli Araújo and Jamil Natour, Functional thumb orthosis for type I and II boutonniere deformity on the dominant hand in patients with rheumatoid arthritis: a randomized controlled study, Clinical Rehabilitation, vol. 22, pp.684-689, 2008.
- (2) 中村 悟, 徳永 大作, 小田 良, 今井 寛, 久保 俊一, 低圧駆動型空気圧アクチュエータを用いたRAにおけるMP関節掌側亜脱臼矯正装具の開発, 特別号: 日本リハビリテーション医学会誌, vol. 49, S282, 2012.