

Original Article

脳卒中後の手指痙縮に対する空気圧人工筋肉を用いた手指ウェアラブルロボットの有用性

三田基樹,^{1,2} 鈴森康一,³ 工藤大輔,¹ 齊藤公男,^{1,4}
千田聡明,^{1,4} 畠山和利,^{1,4} 島田洋一,^{1,5} 宮腰尚久¹

¹秋田大学大学院医学系研究科医学専攻機能展開医学系整形外科学講座

²由利組合総合病院整形外科

³東京工業大学工学院

⁴秋田大学医学部附属病院リハビリテーション科

⁵秋田県立医療療育センター

要旨

Mita M, Suzumori K, Kudo D, Saito K, Chida S, Hatakeyama K, Shimada Y, Miyakoshi N. Utility of a wearable robot for the fingers that uses pneumatic artificial muscles for patients with post-stroke spasticity. Jpn J Compr Rehabil Sci 2022; 13: 12-16.

【目的】われわれが開発した空気圧人工筋肉を用いた手指用ウェアラブルロボットを用いた、脳卒中後の手指痙縮に対するリハビリテーションの有用性を検討した。

【対象と方法】脳卒中後の指の痙縮を有する3名の患者に、ウェアラブルロボットを用いて20分/日、5日/週、3週間のリハビリテーションを行った。訓練前後の他動的関節可動域、Modified Ashworth Scale (MAS)、各指の周径を測定し比較した。

【結果】ウェアラブルロボットを使用することで可動域と手指周径の改善を認めた。MASは部分的に改善し、増悪はなかった。

【結論】われわれが開発したウェアラブルロボットは、脳卒中後の痙攣に対して有用であり、静脈還流を改善する可能性もある。

キーワード：痙縮、空気圧人工筋肉、関節可動域訓練、静脈還流

はじめに

痙縮は脳卒中の後遺症として知られており、約30%に認めるといわれている [1]。この痙縮は日常生活に支障をきたし Quality of Life を低下させること

が報告されている [2, 3]。痙縮のリハビリテーション治療について、関節可動域訓練に加えて、バクロフェンやA型ボツリヌス毒素などを用いた薬物療法や電気刺激療法が推奨されている。Yehら [4] は腓腹筋痙縮症例にモーター駆動の持続的関節他動訓練器

(CPM: continuous passive motion) を使用し関節可動域訓練を行い、痙縮と関節可動域の有意な改善を認めたと報告し、Diserensら [5] は上肢痙縮症例にモーター駆動の CPM を使用し関節可動域訓練を行い、上肢筋力や関節可動域の有意な改善を認めたと報告した。これらの研究により、CPM を用いた痙縮に対する関節可動域訓練の有用性が示唆されている。しかしながら、手指の痙縮に対し CPM を用いて関節可動域訓練を行った報告はいまだ認めない。そこで、われわれは空気圧で駆動する人工筋肉を用いて CPM として機能する手指ウェアラブルロボットを開発した (図1)。本ロボットは各指に屈曲用と伸展用人工筋肉が独立して装着されており、屈曲用の人工筋肉と伸展用の人工筋肉が交互に収縮することで手指の屈曲伸展を可能にしている。屈曲用のものは1本の人工筋肉を各指に巻きつけており、靴紐を締める要領で装着可能となっている。屈曲用の人工筋肉をこのように非解剖学的な走行で設置している理由の1つとして、人工筋肉の収縮率の特徴があげられる。われわれの使用した人工筋肉の収縮率は20~25%であり、屈曲用の人工筋肉を解剖学的な走行で装着した場合、各指を十分に屈曲するためには肘付近までの長さが必要となる。そのためウェアラブルロボットのサイズが大きくなり装着が困難となる可能性が懸念された。そこで人工筋肉を手指に巻きつけることで筋長を稼ぎ、手関節付近までのサイズのロボットでも十分な屈曲を得られるように工夫した。伸展用のものは7本の人工筋肉から成り、手指背側に装着されている。本ロボットはサイズが小さく軽量という特徴があり、ベッドサイドや自宅でも使用可能となっている。

われわれは、本ロボットを用いて脳卒中後の手指痙縮に対し関節可動域訓練を行うことで痙縮が改善する可能性があるかと仮説を立てた。

本研究の目的は、本ロボットを用いた手指痙縮に対

著者連絡先：三田基樹
由利組合総合病院整形外科
〒015-8511 秋田県由利本荘市川口家後38
E-mail: signalrocket4@gmail.com
2021年12月21日受理

利益相反：本研究において一切の利益相反はありません。



図 1. 開発したウェアラブルロボット背側 (a)、掌側 (b)

われわれの開発した CPM として機能する手指ウェアラブルロボット。空気圧で駆動する人工筋肉を使用している。

する可動域訓練が、痙縮、手指関節可動域、浮腫に対して与える影響を検討することである。

対象と方法

2020 年 11 月から 2021 年 11 月までの 1 年間に関連施設に入院していた脳卒中後の手指痙縮症例 3 例を対象に、われわれの開発した手指ウェアラブルロボットを用いて関節可動域訓練を行った。研究デザインとして前後比較試験を使用した。

適格基準を、脳卒中による手指痙縮、Modified Ashworth Scale (MAS) 1 以上、本研究に対する同意の意思表示が可能な症例、循環呼吸動態が安定している症例とした。除外基準はバクロフェンや A 型ボツリヌス毒素などの痙縮に対する薬物療法を行っている症例、痙縮が強くウェアラブルロボット装着により疼痛を生じる症例、ウェアラブルロボットを使用した可動域訓練に対し同意いただけなかった症例とした。基準を満たした症例は 3 例であり、内訳は以下のとおりであった。症例 1 は 70 歳男性で左視床出血発症後 9 か月経過しており、右母指から環指の屈筋に痙縮を認めた。麻痺の程度は手指 Brunnstrom stage IV であり、右手指に知覚低下を認めた。症例 2 は 65 歳男性で左脳梗塞発症後 10 か月経過しており、右全手指の屈筋に痙縮を認めた。麻痺の程度は手指 Brunnstrom stage II であり、右手指および前腕に知覚低下を認めた。症例 3 は 74 歳女性で右脳梗塞後 9 か月経過しており、左全手指の屈筋に痙縮を認めた。麻痺の程度は手指 Brunnstrom stage II であり、左母指～環指に知覚低下を認めた。

本装置を用いた可動域訓練は、1 日 20 分、週 5 日行い 3 週間継続した。評価項目は他動的関節可動域、MAS、各指周径とした。当該関節の他動的関節可動域は最大屈曲～最大伸展の範囲とし、手指用角度計を用いて測定した。指周径は各指の最大径を計測した。計測時期は訓練開始前と終了時とし、各評価項目を前

後と比較した。また、疼痛や皮膚障害などの有害事象の有無を調査した。データの測定はすべて同一検者が行った。

本ロボットに用いた人工筋肉は東京工業大学で開発された空気圧で駆動する人工筋肉である。この人工筋肉は、コンプレッサーから送り込まれた空気により収縮する仕組みになっており、径が 2～5 mm と従来のものより細く、実際の筋繊維のように束ねたり編み込んだりすることができる特徴がある。本ロボットは伸展用人工筋肉の長さを調節可能であり、装着時に DIP 関節と PIP 関節は屈曲 0 度、MP 関節は屈曲 30 度となるよう症例ごとに調整した。空気圧は全症例 0.4 MPa に設定した。

本研究は秋田大学医学部附属病院の倫理委員会および厚生労働省に承認された特定臨床研究であり、承認番号は jRCTs022200012 である。また、本研究は患者に十分なインフォームド・コンセントを行った上で、同意書に署名いただき実施した。

結果

他動的関節可動域について、リハビリテーション前後における各関節可動域の変化を表 1 に示した。全症例部分的に改善していたが、症例 2 の示指 MP 関節のみ 85 度から 80 度と軽度悪化した。しかしながら、リハビリテーション前後で屈曲 75 度伸展 10 度から屈曲 80 度伸展 0 度に変化しており、屈曲に関しては改善していた。

MAS に関して、症例 1 と症例 3 は示指のみ改善し、症例 2 は全指改善した。痙縮が増悪した手指は認めなかった (表 2)。

手指周径について、症例 1 の母指以外すべての手指で改善しており、増悪した手指は認めなかった (表 3)。有害事象は全症例で認めなかった。

考察

われわれの渉猟しうる限りでは、手指痙縮に対し空気圧人工筋肉を用いたウェアラブルロボットを CPM として使用しリハビリテーション治療を行った報告は認めない。本研究では脳卒中後の手指痙縮に対し、空気圧人工筋肉を用いたウェアラブルロボットを CPM として使用しリハビリテーション治療を行うことで、関節可動域と手指周径の改善を得られ、痙縮も改善することが示された。

手指用のウェアラブルロボットの報告にはさまざまなものがあるが [6-14]、その構造から分類すると、モーターで駆動するものと空気圧で駆動するものの 2 種類に分類できる。モーターで駆動するロボットの報告には外骨格型のものとしてケーブルを使用した報告がある。Li ら [8] や Diez ら [9] は外骨格型のウェアラブルロボットに知覚のフィードバックを組み合わせたシステムの有用性を報告している。ケーブルを使用したものについて、Araujo ら [10] は脳波により制御可能なウェアラブルロボットの報告をした。Yurkewich ら [11] は前腕の筋電図をもとに作動するケーブルを使用したウェアラブルロボットを作成し、脳卒中症例 9 例に使用したところ、ウェアラブルロボットを装着

表 1. 可動域が改善した関節と訓練前後の他動的関節可動域

	症例 1		症例 2		症例 3			
	訓練前 (度)	3 週間後 (度)	訓練前 (度)	3 週間後 (度)	訓練前 (度)	3 週間後 (度)		
母指 IP	70	70	母指 IP	50	55	母指 IP	50	60
MP	80	80	MP	50	50	MP	40	50
示指 DIP	40	50	示指 DIP	45	50	示指 DIP	35	50
PIP	70	70	PIP	80	90	PIP	70	90
MP	90	90	MP	85	80	MP	90	90
中指 DIP	30	30	中指 DIP	40	40	中指 DIP	35	45
PIP	90	90	PIP	75	80	PIP	60	70
MP	80	80	MP	90	95	MP	90	90
環指 DIP	40	40	環指 DIP	35	35	環指 DIP	50	60
PIP	80	80	PIP	70	75	PIP	80	90
MP	90	90	MP	90	100	MP	90	90
小指 DIP	50	50	小指 DIP	50	50	小指 DIP	50	60
PIP	90	90	PIP	70	75	PIP	80	80
MP	90	100	MP	80	90	MP	90	90

IP, interphalangeal; MP, metacarpophalangeal; DIP, distal interphalangeal; PIP, proximal interphalangeal.

表 2. 訓練前後の手指屈筋の Modified Ashworth Scale (MAS)

	症例 1		症例 2		症例 3			
	訓練前	3 週間後	訓練前	3 週間後	訓練前	3 週間後		
母指	1	1	母指	1	0	母指	1	1
示指	1 +	1	示指	1 +	1	示指	1 +	1
中指	1 +	1 +	中指	1 +	1	中指	1	1
環指	1 +	1 +	環指	1 +	1	環指	1	1
小指	0	0	小指	1 +	1	小指	1	1

表 3. 訓練前後の手指周径

	症例 1		症例 2		症例 3			
	訓練前 (mm)	3 週間後 (mm)	訓練前 (mm)	3 週間後 (mm)	訓練前 (mm)	3 週間後 (mm)		
母指	73	73	母指	71	70	母指	70	65
示指	72	69	示指	74	70	示指	72	65
中指	74	69	中指	70	68	中指	73	62
環指	68	66	環指	63	60	環指	65	60
小指	58	56	小指	53	52	小指	55	50

している間は Fugl-Meyer Assessment-Hand および Chedoke Arm and Hand Activity Inventory が有意に改善したことを報告した。空気圧で駆動するウェアラブルロボットについて、Yap ら [12] は空気圧人工筋肉を使用したロボットを作成し把持動作が可能であったことを報告している。Chen ら [13] は、空気圧で作動するシリカゲルチューブを用いたウェアラブルロボットを作成し、パーキンソン病により手指機能が低下した症例に使用したところ、同様に把持動作が可能となったことを報告した。このようにさまざまな構造を用いた報告を認めるが、Sun ら [14] は空気圧で駆動

するウェアラブルロボットはモーターと比較しコンプライアンスや柔軟性、安全性に優れるため手のリハビリテーションに有用であることを報告しており、本研究で安全に良好な結果が得られた理由の 1 つとして空気圧で駆動する人工筋肉を使用したことが考えられた。

本研究で他動関節可動域と痙縮が改善した理由として、ウェアラブルロボットの構造上の特徴が 3 点あげられる。1 点目は Three point bending structure であり (図 2)、手指に巻きつけた屈曲用人工筋肉の交点がそれぞれ DIP, PIP, MP 関節に位置するため手指屈曲に効率よく屈曲力が働く点である。2 点目は Flat braid

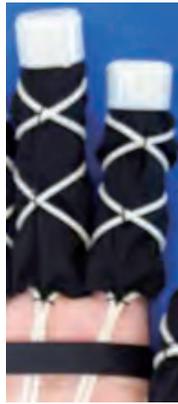


図 2. Three point bending structure
手指に巻きつけた屈曲用人工筋肉の交点がそれぞれ DIP, PIP, MP 関節に位置する構造である。



図 3. Flat braid
伸展用人工筋肉を 7 本編み込み手背に装着している。

であり (図 3), 伸展用人工筋肉を 7 本編み込み手背に装着することで, 脳卒中の後遺症として特異的な屈曲拘縮に対して十分拮抗可能な強いトルクが作用する点である。3 点目は手指背側の DIP, PIP 関節に装着されている Elastic plate (図 4) であり, Plate の端が DIP 関節と PIP 関節に位置するため, 梃子の原理により効率よく伸展力が働く点である。

また, 本ロボットが空気圧により一定のトルクで作用する点も効果的であった可能性がある。Yeh ら [4] は下肢の痙縮に対し, 一定のトルクで運動する CPM (定トルク型) と一定の角度で運動する CPM (定角度型) を用いてリハビリテーションを行い比較した。その結果, 定トルク型も定角度型も共に痙縮や関節可動域に改善を認めたが, 定トルク型 CPM のほうがより効果的であった, と報告している。本研究で使ったウェアブルロボットは先述のとおり定トルク型であり, この構造も良好な成績を導く一助となったことが示唆された。

本研究ではほぼ全手指で周径が改善しており, 静脈還流が改善したことが示唆された。Bonnaire ら [15]



図 4. Elastic plate
手指背側の DIP, PIP 関節に弾性板を装着している。

は足関節 CPM を健常人に使用し大腿静脈の還流を調査したところ静脈還流が上昇したことを報告しており, 関節の他動的な屈曲伸展により静脈還流が改善することを示している。ウェアブルロボットは各手指の屈曲伸展運動に加え, 手指に巻きつけられた屈曲用人工筋肉が収縮することで手指に対してポンプのように作用するため, より効果的に静脈還流が改善した可能性があると考えられた。

最後に, Koizumi ら [16] は本ウェアブルロボットを用いた先行研究より, 脱力した健常人に装着することで 500 g の水筒を把持することが可能だったと報告している。以上より, 本ロボットは脳卒中慢性期に生じる痙縮に対するリハビリテーションのみならず, 脳卒中の急性期に生じる麻痺に対するリハビリテーションや生活をサポートするロボットとしても使用できる可能性がある。

本研究の限界として, 研究対象者数が少なく統計学的な比較が行えていないことがあげられる。研究を継続し, 今後症例数を増やし検討する予定である。

結語

われわれの開発した空気圧人工筋肉を使用した手指ウェアブルロボットは, 手指関節可動域を改善し MAS も改善したため痙縮のリハビリテーションに有用である。また, 手指周径を改善したことから静脈還流を改善する効果も得られる可能性が示唆された。

文献

1. Thibaut A, Chatelle C, Ziegler E, Bruno MA, Laureys S, Gosseries O. Spasticity after stroke: physiology, assessment and treatment. *Brain Inj* 2013; 27: 1093-105.
2. Gillard PJ, Sucharew H, Kleindorfer D, Belagaje S, Varon S, Alwell K, et al. The negative impact of spasticity on the health-related quality of life of stroke survivors: a longitudinal cohort study. *Health Qual Life Outcomes* 2015; 13: 159.
3. Germanotta M, Gower V, Papadopoulou D, Cruciani A, Pecchioli C, Mosca R, et al. Reliability, validity and

- discriminant ability of a robotic device for finger training in patients with subacute stroke. *J Neuroeng Rehabil* 2020; 17: 1.
4. Yeh CY, Tsai KH, Chen JJ. Effects of prolonged muscle stretching with constant torque or constant angle on hypertonic calf muscles. *Arch Phys Med Rehabil* 2005; 86: 235-41.
 5. Diserens K, Perret N, Chatelain S, Bashir S, Ruegg D, Vuadens P, et al. The effect of repetitive arm cycling on post stroke spasticity and motor control: repetitive arm cycling and spasticity. *J Neurol Sci* 2007; 253: 18-24.
 6. Ho NS, Tong KY, Hu XL, Fung KL, Wei XJ, Rong W, et al. An EMG-driven exoskeleton hand robotic training device on chronic stroke subjects: task training system for stroke rehabilitation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2011; 2011: 5975340.
 7. Kang BB, Choi H, Lee H, Cho KJ. Exo-Glove Poly II: a polymer-based soft wearable robot for the hand with a tendon-driven actuation system. *Soft Robot* 2019; 6: 214-27.
 8. Li M, Chen J, He G, Cui L, Chen C, Secco EL, et al. Attention enhancement for exoskeleton-assisted hand rehabilitation using fingertip haptic stimulation. *Front Robot AI* 2021; 8: 602091.
 9. Diez JA, Santamaria V, Khan MI, Catalán JM, Garcia-Aracil N, Agrawal SK. Exploring new potential applications for hand exoskeletons: power grip to assist human standing. *Sensors (Basel)* 2020; 21: 30.
 10. Araujo RS, Silva CR, Netto SPN, Morya E, Brasil FL. Development of a low-cost EEG-controlled hand exoskeleton 3D printed on textiles. *Front Neurosci* 2021; 15: 661569.
 11. Yurkewich A, Kozak IJ, Ivanovic A, Rossos D, Wang RH, Herbert D, et al. Myoelectric untethered robotic glove enhances hand function and performance on daily living tasks after stroke. *J Rehabil Assist Technol Eng* 2020; 7: 1-14.
 12. Yap HK, Lim JH, Nasrallah F, Goh JCH, Yeow RCH. A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness. *IEEE Int Conf Robot Autom* 2015; 2015: 4967.
 13. Chen Y, Tan X, Yan D, Zhang Z, Gong Y. A composite fabric-based soft rehabilitation glove with soft joint for dementia in Parkinson's disease. *IEEE J Transl Eng Health Med* 2020; 8: 1400110.
 14. Sun Z, Guo Z, Tang W. Design of wearable hand rehabilitation glove with soft hoop-reinforced pneumatic actuator. *J Cent South Univ* 2019; 26: 106-19.
 15. Bonnaire F, Brandt T, Raedecke J, Bonk A. Mechanical dynamic ankle passive motion for physical prevention of thrombosis? Changes in hemodynamics in the lower pressure system with new dynamic splints. *Unfallchirurg* 1994; 97: 366-71.
 16. Koizumi S, Shimada Y, Chang TH, Nabae H, Endo G, Suzumori K, et al. Soft robotic gloves with thin McKibben muscles for hand assist and rehabilitation. *2020 IEEE/ SICE Int Symp Syst Integr* 2020.