理学療法士の介入技能をもとにした起立動作の支援機器の開発
-臀部押上げ機構の開発-

Assistive Chair of Human Sit-to-stand based on Intervention Skill of Physical Therapist
-Development of Buttock Push-up Mechanism-

○学　辛治杭（九大）　正　Qi AN（九大）
山川博司（東大）　正　下田真吾（理研）
正　倉爪亮（九大）

Zhihang XIN, Kyushu University
Qi An, Kyushu University, anqi@ait.kyushu-u.ac.jp
Hiroshi YAMAKAWA, The University of Tokyo
Shingo SHIMODA, RIKEN
Ryo KURAZUME, Kyushu University

Patients with stroke may have hemiplegia, which reduces their ability to perform activities of daily living and reduces their quality of life compared to before the onset. To improve motor function of them, it is important to develop an assistive device that support rehabilitation as physical therapists do in clinical environment. Here, we developed a chair-type rehabilitation device that emulates intervention of physical therapist. The devices estimate movement of the user through pressure sensor and stimulate buttocks of the user. We firstly clarified the relationship between center of pressure of the seat and pinching force by physical therapists. This is implemented on the assistive device and the measurement experiment was performed. The results showed that the assistive device could successfully stimulated the user's buttocks. Future work will be implementation of other intervention method of physical therapists.

Key Words: Sit-to-stand motion, Physical Therapist, Rehabilitation

1　序論

脳卒中患者は発症後に片麻痺が残ることがあり，日常生活動作を行う能力が低下してしまい，発症前に比べて生活の質が低下する．そのため，脳卒中発症後に運動機能を改善するためのリハビリテーション（以下リハビリ）は重要である．しかしながら，現在の医療制度では患者がリハビリを受けられる時間が限られており，これを補うための手段としてリハビリを支援する機器を開発することは重要である．我々の研究グループでは日常生活動作において起点となる起立動作に着目した研究を行ってきた．

従来のリハビリを支援するロボットは患者の臀部を押し上げることで不足した力を補い運動を補助するものがある [1]．また我々の従来研究では，臨床現場において理学療法士が起立動作のリハビリを行う際の介入動作を調べた [2]．その結果理学療法士は図 1 に示すように，麻痺側の臀部を把持し，動作タイミングに合わせて運動の教示を行っていることを明らかにした．

さらに我々は理学療法士のリハビリ中の介入技能をもとに立ち上がり動作を支援する機器を開発した [3]．この機器では座面に設置した圧センサから座面の圧中心を計測し，圧中心が一定以上変化したときを離殿とみなし，座面の一部を押し上げることで動作タイミングの教示をしていた．しかしながら，臀部の押上げ機構はガススプリングを利用したもので，使用者の動きに追従することができず，理学療法士の技能を十分に再現することができなかった．これに対して本研究では，臀部の押上げ機構に新たに力センサを導入することで理学療法士が臀部を押す際の力を再現することができる支援機器を開発する．

Fig.1 Supported by a physiotherapist

2　起立動作の支援機器

2.1　支援機器の要求仕様

理学療法士は片麻痺患者の起立動作に対して，動作開始に合わせて大殿筋を刺激し，離殿タイミングの教示を行う．本研究ではこのような理学療法士の技能を再現するために，使用者の動きを推定し，運動に合わせて臀部を刺激することができる装置を開発する．そのためには臀部を押し上げる刺激部と使用者の臀部の間に発生した反力を計測し，その反力が理学療法士が介入時に臀部を刺激する力と同程度になるように制御を行う．このような支援機器に求められる機能は以下の通りである．

- 使用者の運動の推定
- 刺激部が使用者にかける力の計測
- 刺激部が使用者の運動に合わせて移動する機構

以下ではこれらの各要素について述べる．

2.2　使用者の運動の推定

支援機器は使用者が座る座面と臀部を押すための刺激部から構成される．立ち上がり動作では運動の開始時に上体を前屈し，徐々に臀部を持ち上げることで離殿する．このような動作を推定するために，座面には圧センサを入れて臀部の圧中心（COP）を算出し，運動の推定に用いる．運動の開始から離殿に伴って圧中心は前方に移動するため，圧中心の前方向の変位を調べる．さらに圧センサを用いることで，身体にマーカを貼り付ける必要がなくなり，簡便に動作の支援が行える．

座面における圧センサの配置を図 2 に示す．使用者の前方を x 軸の正方向とした座標系において，圧センサ i の座標を x_i，センサ値を p_i，センサの総数を N とすると，座面における圧中心 x_{COP} は次式のように加重平均によって求められる．

$$x_{\mathrm{COP}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} p_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} p_i}. \tag{1}$$

この圧中心の変位に応じて，使用者の臀部にかける力を変化させる．

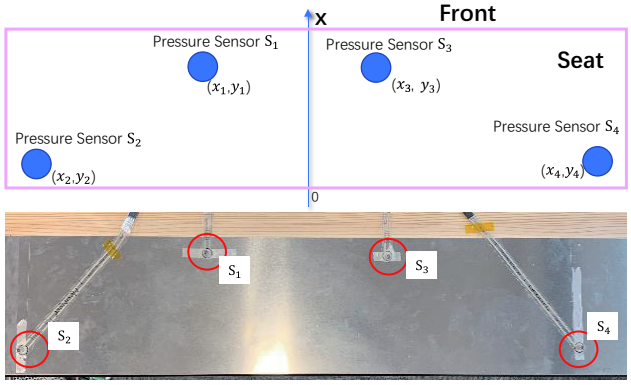

Fig.2 Sensor Layout

2.3 臀部の刺激の開発

本研究で開発する支援機器は使用者の離殿の動きに合わせ，理学療法士の介入時と同程度の力で臀部を押す必要がある．実際に開発したシステムを図 3 に示す．先行研究ではガススプリングを使って臀部の刺激部を上昇させていたのに対して，本研究では 2 つのモータを利用して刺激部を前後と上下方向に移動させる．また，使用者の臀部にかかる反力を計測することで，臀部を刺激する力を制御することとし，理学療法士の技能を再現する．刺激部にロードセルをつけることで，刺激部で発生した反力を計測し，また PD 制御によって介入時に臀部にかかる力という目標値に近づける．

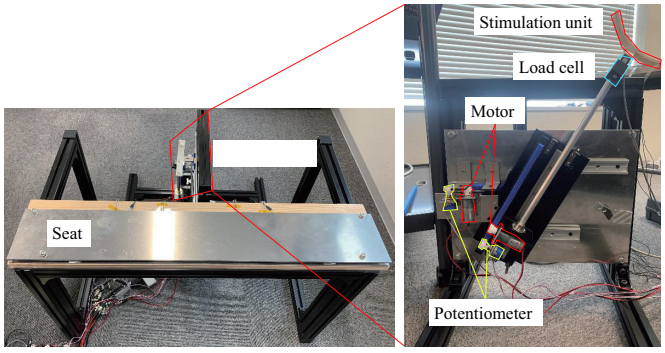

Fig.3 The appearance of the machine

2.4 刺激部の制御方法

本支援機器は使用者が起立動作を開始する上体の前屈から離殿に合わせて支援を行う．使用者が座った際の初期の COP を記録し，COP が一定以上前方に移動した際に，使用者の立ち上がり動作が開始していると判定した．起立動作が開始されたあとは，COP の位 x_{COP} 置に合わせて，使用者の臀部に力を与える．制御の流れを図 4 に示す．まず High Level Controller では使用者の COP に応じて，臀部を刺激するための目標となる力 $\hat{F}$ を算出する．目標値となる力は下位の PD Contoroller に入力され，制御入力 u が算出されモータに入力される．使用者に対する刺激部の力 F はロードセルによって常に計測され，フィードバックされることでモータの位置を制御する．次章では，理学療法士の介入中の動作において，圧中心 COP と刺激する力の関係性を調べる．

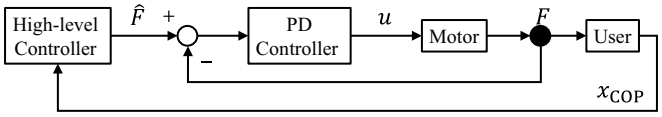

Fig.4 Control scheme

3 理学療法士の介入技能の解析

理学療法士は片麻痺患者の動作中に身体に介入することで運動を補助し機能改善を図る [2]．ここでは，機器の使用者の動作に合わせて大殿筋を刺激するため，理学療法士の介入中の使用者の圧中心 COP と臀部を刺激する力の関係を調べる．

3.1 介入技能の計測実験

本実験では，理学療法士が筋肉を刺激する際の力を調べるために，理学療法士の指先に圧力センサ（Tekscan 社 A201-25）を貼り付けて力を計測した．また起立動作における圧中心 COP の変化と筋へ刺激する力の関係を調べるために，臀部に設置した床反力計（テック技販社 TF3040）と同期して 2,000 Hz でデータを計測した．本実験には 20 年以上の経験を持つ理学療法士が 1 名参加し，健常者 1 名の起立動作に対して介入を行ってもらい，合計 7 回の起立動作を計測した．理学療法士には片麻痺患者に対する介入と同じ筋を普段通りに刺激してもらうように依頼した．

3.2 座面の圧中心と刺激部にかかる力の関係

理学療法士が起立動作に介入する際の座面の圧中心と指先の力の関係を図 5 に示す．ここでは離殿時が 1.0 秒となるようにデータをカットし，離殿の前後 1 秒のデータとして，平均を示す．起立動作を開始し，上体の前屈に伴って座面の COP が前方へ移動しており，それにつれて理学療法士が臀部に与える力が増えていることが分かる．特に人の臀部が座面から離臀をする際に，COP は 100 mm ほど前方に移動し，理学療法士は離殿時には 5-6 N の力で臀部を刺激していることが分かった．

次に理学療法士の技能を再現する支援機器を開発するためには，立ち上がる人の運動とそれに対応する理学療法士の力の関係をモデル化する．前章で説明したように，本研究では座面の COP によって機器の使用者の運動を推定し，その状態に合わせて刺激部を制御して臀部を押し上げる．ここでは線形回帰モデルを用いて，座面の COP と理学療法士の指先の力データの間にある関係をモデル化する．

理学療法士が臀部に介入する際の COP と指先の力の対応関係を示したものを図 6 に示す．横軸には人が座位で安静にある時の COP からの変位を示し，縦軸にはその時に理学療法士の指先の力を示す．これらのデータから線形回帰モデルを用いて，座面の COP の位置 x_{COP} と指先の圧力 F の以下の関係式を導出した (式 (2))．

$$\hat{F} = \alpha x_{\mathrm{COP}} + \beta \tag{2}$$

なおここでは α は 0.049，β は 2.01 となった（図 6 中の赤線）．理学療法士の介入技能の計測実験において，COP の変化幅は約 120 mm であるのに対して，我々の開発し機器の座面における COP の移動幅は 40 mm となっている．そこで，実際の機器を制御する際に，圧中心 x_{COP} から目標となる力 $\hat{F}$ を算出する際

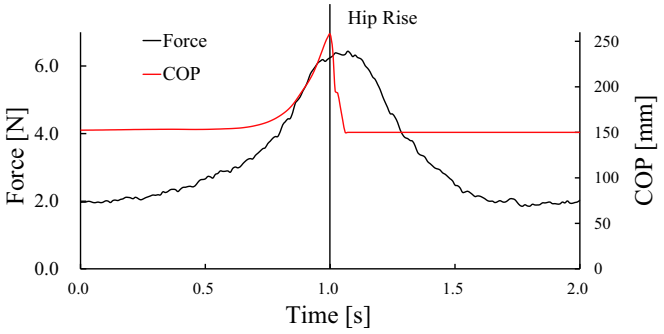

Fig.5 Relationship of COP and Force

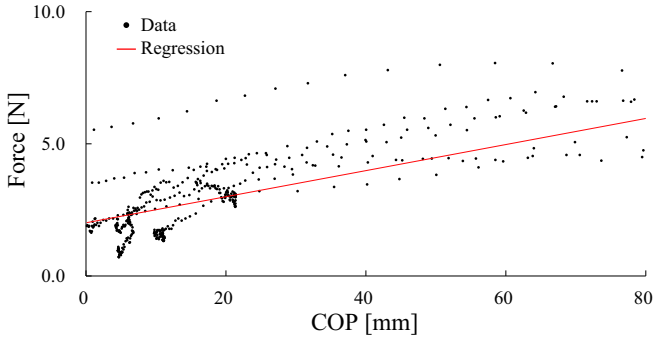

Fig.6 Pressure changes with cop

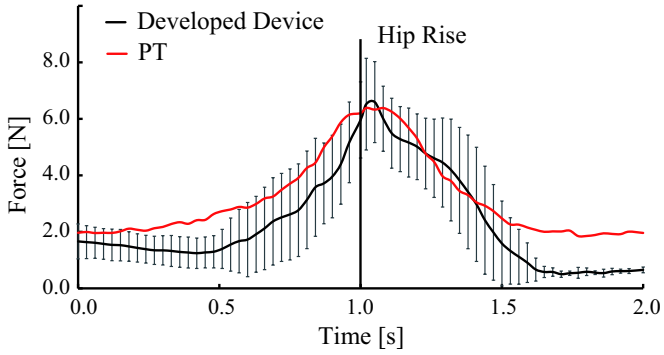

Fig.7 Experimental result

の係数 α は 0.147 とした．これを用いて 2.4 節に説明した刺激部に与える目標の力を算出する．

4　支援機器の評価実験

第 2 章において開発した起立動作の支援機器において，使用者の運動に合わせて理学療法士が介入するのと同様の力で臀部を刺激できるか検証した．本実験には 20〜30 歳代の 2 名の被験者が参加し，それぞれ両手を使わずに起立動作を 10 回行ってもらった．実際の理学療法士は片麻痺患者を対象に介入するのに対して，本評価実験には健常者が参加している．なお本実験は九州大学システム情報科学研究院実験倫理委員会の承認のもと実施された．

実験の際に実験の結果は図 7 に示す．これは 2 名の被験者の平均と標準偏差を示している．1 秒のところが使用者が離殿したタイミングとなっており，離殿に合わせて押す力が徐々に上昇している．これは理学療法士が介入した際に臀部にかかる力と近くなっており，理学療法士の技能を再現することができた．

一方で理学療法士は臀部だけではなく，膝部にも介入を行うことで，起立動作を支援する．今後の研究においては，これらの理学療法士のその他の技能の支援機器への実装も行い，その効果の検証をする．

5　結論

本研究では人の起立動作を対象に，自分自身でリハビリを行うための支援機器の製作を行った．理学療法士は立ち上がり動作の離殿のタイミングに合わせて臀部を刺激しており，この介入技能を支援機器に導入した．本支援機器では，座面に圧センサを配置し圧中心を算出することで使用者の運動を推定する．また臀部の刺激部にはロードセルをつけ，機器の使用者に与える力を計測することで，理学療法士と同じように臀部を刺激できるようにした．健常者を対象とした実験において，理学療法士の技能を再現できていることが確認された．今後は実際の立ち上がり動作中の身体軌道や筋活動も調べることで，起立動作に与える影響を検証する．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H01405 および永守財団の研究助成を受けて実施されたものである．

参考文献

[1] Atsushi Tsukahara, Ryota Kawanishi, Yasuhisa Hasegawa and Yoshiyuki Sankai, “Sit-to-Stand and Stand-to-Sit Transfer Support for Complete Paraplegic Patients with Robot Suit HAL,” Advanced Robotics, vol.24:11, pp.1615–1638, 2010

[2] Hiroki Kogami, Qi An, et al., “Effect of Physical Therapy on Muscle Synergy Structure during Standing-up Motion of Hemiplegic Patients,” IEEE Robotics Automation Letter, vol.3, no.3, pp.2229–2236, 2018.

[3] Hiroki Kogami, Qi An, et al., “Assistive Chair to Support Hip Rising of Elderly People Improves Body Movement of Sit-to-Stand Motion”, Proceedings of the 1st Workshop on Robot Control (WROCO2019), pp. 1-4, Daejeon (Korea), 2019/Sep.