

# 立ち上がり時支援とエネルギー消費なしの中腰支援が可能な 空気圧回生型ウェアラブル椅子

Pneumatic Regenerative Wearable Chair for  
Supporting Up and a Half-sitting Posture without Energy Consumption

長田京右 (東京農工大) 正 水内郁夫 (東京農工大)

Kyosuke Osada, TUAT, osada@mizuuchi.lab.tuat.ac.jp

Ikuro Mizuuchi, TUAT, ikuro@mizuuchi.lab.tuat.ac.jp

Prolonged sitting and standing up at work is physically demanding. The physical burden of long hours of sitting and standing up is great. Assistive devices have been studied to reduce the physical burden. The work that requires assistive devices is often performed outdoors, and it is difficult to obtain a power source. Therefore, long-term battery power operation is required. This study aims to develop a wearable pneumatic device that can support standing up and a half-sitting posture. Incorporating a pneumatic regeneration mechanism can reduce the physical burden and realize long-term operation. We fabricated wearable chair to provide mid-back and stand-up support. In addition, the effectiveness of the pneumatic regeneration mechanism was verified through experiments.

**Key Words:** Long time operation, Air regeneration, Wearable chair

## 1 緒言

農場や工場などの作業では、収穫や製造の各工程において長時間にわたる中腰姿勢を維持したり、立ち上がり動作が求められることが多く身体的負担が大きい。そのため、身体的負担を軽減するために様々なアシスト装置の研究が行われている [1][2][3][4][5][6][7]。アシスト装置は、動作の補助・増強をすることで身体的負担を軽減する。アシスト装置の中で特に中腰姿勢を維持する装置としてウェアラブルチェアがある。Noonee の Chairless Chair は、バッテリー駆動で、設定した高さでの中腰姿勢維持を行うことができる [8]。Yao Tu らの E-leg は、電磁スイッチをロックすることで、0.4 m から 0.8 m の間で中腰姿勢維持が可能である [9]。Archelis や永島らの装置は、固定高さでの中腰姿勢をサポートを行うことが可能である [10][11]。これらの装置が適用される、農場や工場での作業は野外や移動範囲が広い場合が多く、電源を得ることが困難であるため、長時間動作が求められる。しかし、これらは、バッテリー駆動であるため動作時間が制限されることや、固定高さでの作業にしか対応できず、立ち上がり動作を支援することができないなどの問題がある。一方、Magdum らの研究では、ウェアラブルチェアの高さ調整に空気圧シリンダを利用することで、中腰支援と立ち上がりが可能である。空気圧シリンダに圧縮空気を印加し、弁を閉じることでエネルギー消費なしに中腰姿勢を維持することが可能である [12]。しかし、この空気圧システムでは、使用した圧縮空気を大気圧解放するためエネルギーが無駄になっている。このエネルギーの無駄を削減するための方法として、一度使用した圧縮空気を再利用する空気圧回生機構が存在する [13][14][15]。

本研究では、空気を動力源とすることで立ち上がり時支援とエネルギー消費なしの中腰支援の両方が可能なコンプレッサ搭載型のウェアラブル椅子を製作し、身体的負担を軽減する。さらに空気圧回生機構を組み込むことにより使用した圧縮空気を排気する装置と比較して長時間動作を実現する。

## 2 ウェアラブル椅子のコンセプトと空気回生機構

### 2.1 ウェアラブル椅子のコンセプト

Fig. 1 は、本研究で目的とする動作を示す。ウェアラブル椅子は、人間の臀部付近に空気圧シリンダが設置された構造をしている。立ち上がり時支援と中腰支援の2つの動作を行うことができる。Fig. 1a と Fig. 1b は中腰支援の様子である。シリンダが一番縮んだの状態から空気を印加し、弁を閉じることで Fig. 1b で示す任意の位置での中腰支援が可能である。また、空気を動力源としているため空気を印加し弁を閉じればエネルギー消費なしに中腰支援を行うことが可能である。Fig. 1c は立ち上がり時支援の様子である。空気を印加し、シリンダを伸ばすことで、立ち

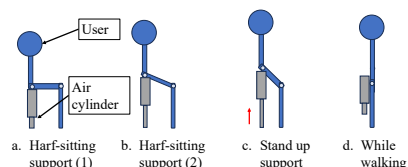


Fig.1: Concept of wearable chair

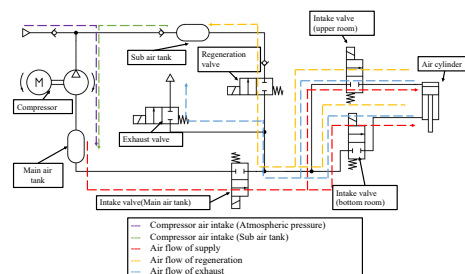


Fig.2: The pneumatic circuit with the regenerative air pressure system and air flows of each states

上がり時支援を行うことができる。Fig. 1d は移動中の様子である。使用者が移動する間、シリンダと座面とのなす角を変えることで移動中に農作物などにシリンダが接触を防ぐことができる。

### 2.2 空気回生機構の有効性

通常、使用した圧縮空気を排気する場合は大気へと解放されている。しかし、圧縮空気を大気へと解放することは、空気圧シリンダに用いた圧縮空気のエネルギーをすべて捨てることを意味する。バッテリーのみで長時間動作を実現するためには、余分な消費電力を減らす、すなわちコンプレッサの動作時間を短くすることが求められる。そこであらかじめ大気圧以上に加圧された空気をコンプレッサに吸気することでコンプレッサの動作時間を短くする。この空気圧回生を用いた空気回路図を Fig. 2 に示す。通常は排気弁によって大気解放されるアクチュエータ内の圧縮空気の一部を回生弁から回生用再生タンクに送り込み、一時的に圧縮空気を貯蔵する。回生用再生タンクに貯蔵された圧縮空気は、コンプレッサが動作する際には吸気として供給され、圧縮空気の回生動作を実現する。



Fig.3: Wearable chair

### 3 長時間動作が可能なウェアラブル椅子の開発

#### 3.1 ウェアラブル椅子の開発

コンセプトを基に開発したウェアラブル椅子を Fig. 3 に示す。ウェアラブル椅子の重量は、5.7 kg であり、シリンダ非伸長時の幅・奥行・高さは、425 × 360 × 420 mm、シリンダ伸長時の幅・奥行・高さは、425 × 360 × 620 mm である。シリンダはコガネ社製の CCDA50X200 を使用している。シリンダの内径は 50 mm、ロッド径は、20 mm、ストロークが 200 mm であり、質量は、1.68 kg である。ロッドの先端はおねじが設けられており、先端に部品を付け替えることで、様々な場所での作業に対応可能である。圧縮空気をためるタンクは、炭酸飲料用のペットボトルを使用している。タンクは、炭酸飲料用の 1 L のペットボトルを圧力を供給するメインタンクに 3 本、空気回生機構に使用する回生タンクに 3 本使用した。一般的なペットボトルの耐圧が 1.9~2.3 MPa である [16]。圧縮空気を生成するのに必要なコンプレッサは、ウェアラブルで移動可能な仕様にするために小型かつ軽量であることが求められる。コンプレッサは SQUSE 社 MP-2-2-C を用いている。重さは 0.194 kg であり、最大圧縮圧は、400 kPa である。ウェアラブル椅子の構造はアルミフレームで構成されており、コ字は、関節構造となっている。アルミフレームと座面と接触する内側とシャフトを止める外に各 1 個ずつ左右で、計 4 個ベアリングを設けており、回転することが可能としている。このような関節構造を設けることにより、移動の時は、エアシリンダと座面の角度を変更することが可能となり、使用者がウェアラブル椅子を着用したまま移動の妨げにならないような構造となっている。また、Fig. ?? に示すような、ロックピンを差し込むことでシリンダと座面とのなす角を 90 度に固定することが可能である。

#### 3.2 ウェアラブル椅子の装着

Fig. ??(a) にウェアラブル椅子を着装した状態で立っている様子を示す。ウェアラブル椅子と使用者は、Techouter 社製のハーネスと、東洋物産工業社製のバックル付きベルトで固定されている。Fig. ??(b) にロックピンを差し込み、シリンダと座面の角度を 90 度に固定して座った状態を示す。Fig. ??(a)(b) に示すように使用者にウェアラブル椅子を身に装着可能である。ロックピンでシリンダと座面とのなす角を固定していない状態で歩行を行うと、使用者の脚にシリンダやタンクが当たり、歩行の妨げになっていた。しかし、シリンダと座面の角度を 90 度に固定した状態で歩行すると、シリンダが農作物などに引っかかる可能性がある。よって、シリンダと座面の角度を使用者の歩行の妨げにならない角度で固定する必要があると考えられる。

## 4 中腰支援と空気回生実験

#### 4.1 ウェアラブル椅子の沈み量

ウェアラブル椅子で中腰支援を行う場合、立ち上がった状態でシリンダの伸ばす部屋とシリンダを縮める部屋に空気を印加し、その後人間が座ることで中腰支援を行う。中腰支援時のシリンダの概略図を Fig. ?? に示す。シリンダを伸ばす部屋の初期圧力、体積、断面、長さはそれぞれ  $P_{h\_cu1}$ ,  $V_{h\_cu1}$ ,  $S_{cu}$ ,  $L_{cu1}$ 、シリンダを縮める部屋の初期圧力、体積、断面、長さはそれぞれ  $P_{h\_cb1}$ ,  $V_{h\_cb1}$ ,  $S_{cb}$ ,  $L_{cb1}$  とする。質量  $M$  の物体を乗せた時、シリンダが  $z_{h1}$  だけ縮んだとする。このとき、シリンダを伸ばす部屋の圧力、体積はそれぞれ  $P_{h\_cu2}$ ,  $V_{h\_cu2}$ 、シリンダを縮める部屋の圧力、体積はそれぞれ  $P_{h\_cb2}$ ,  $V_{h\_cb2}$  に変化したとする。等温変化とするとボイルの法則からと縮めた後のピストンの圧

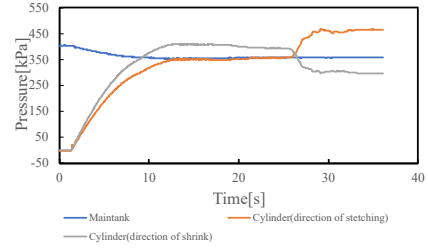


Fig.4: Half-sitting posture support experiment(pressure)

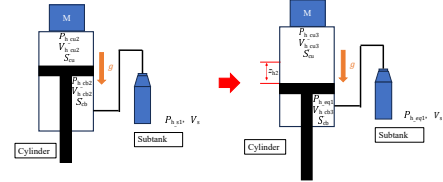


Fig.5: Sub-tank recovery model during exhausting air from bottom room

力は

$$P_{h\_cu1} S_{su} L_{cu1} = P_{h\_cu2} S_{cu} (L_{cu1} - z_{h1}) \quad (1)$$

$$P_{h\_cb1} S_{cb} L_{cb1} = P_{h\_cb2} S_{cb} (L_{cb1} + z_{h1}) \quad (2)$$

となる。このとき、シリンダに作用する力は釣り合い

$$P_{h\_cu2} S_{cu} - P_{h\_cb2} S_{cb} = Mg \quad (3)$$

となる。したがって、式 (1)、式 (2)、式 (3) を基に沈み量  $z_{h1}$  は求められる。

#### 4.2 ウェアラブル椅子の中腰支援

ウェアラブル椅子に人間が乗せた状態で中腰支援が可能か確認を行った。人が立ち上がった状態で、シリンダが最も短い状態の時に、伸ばす部屋と縮める部屋に圧縮空気を印加し、弁を閉じた。メインタンクの容量は 3 L、400 kPa 印加されている。圧力変化を Fig. 4 示す。始めに、人を乗せずにメインタンクからシリンダに 350 kPa 印加し、弁を閉じた。この時、シリンダを伸ばす部屋の圧力が 350 kPa、シリンダを縮める部屋の圧力は 409 kPa、シリンダは 115 mm 伸びた状態となる。シリンダを伸ばす部屋とシリンダを縮める部屋の圧力が違うのは、ロッドで断面積が違うためである。次に、ウェアラブル椅子に座った。この時、約 46.8 kg の荷重がかかり、シリンダの長さは 115 mm から 90 mm に変化した、25 mm 沈んだ。また、Fig. 4 より、26 s 付近で人がウェアラブル椅子に座ると、シリンダの伸ばす部屋の圧力が高くなり、シリンダの縮める部屋の圧力は低下した。また、4.1 節より求められるシリンダの沈み量  $z_{h1}$  は 22 mm であり、沈み量の実験値と近い値であることが確認できた。加えて、中腰支援中はシリンダに空気を印加し弁を閉じるため、エネルギー消費なしのサポートができていると考えられる。そのため、中腰支援は、同じ高さで作業を行う場合、1 度のメインタンクの圧縮空気の使用のみでよいから、長時間動作に貢献することが可能である。

#### 4.3 中腰支援後のシリンダから回生タンクの圧力平衡

中腰支援を行った後、シリンダを縮める部屋の圧力を回生タンクに排気することで、シリンダの縮める力が弱まり、立ち上がり支援することが可能である。シリンダの縮める部屋の圧力を排気する際のシリンダとメインタンクの概略図を Fig. 5 に示す。シリンダには、質量  $M$  の物体が乗っていると想定する。シリンダを伸ばす部屋の初期圧力、体積、断面はそれぞれ、 $P_{h\_cu2}$ ,  $V_{h\_cu2}$ ,  $S_{cu}$  で、シリンダの縮める部屋の初期圧力、体積、断面は、 $P_{h\_cb2}$ ,  $V_{h\_cb2}$ ,  $S_{cb}$  とする。回生タンクの圧力、体積はそれぞれ、 $P_{h\_s1}$ ,  $V_s$  とする。シリンダを縮める部屋から回生タン

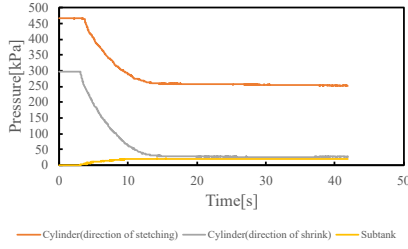


Fig.6: Transition in recovery pressure after half sitting posture support

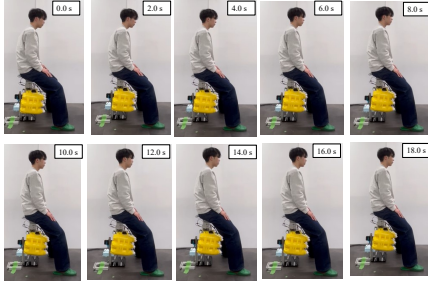


Fig.7: Assistance in standing up after half-sit posture support

クに空気を排気し、シリンダの縮める部屋と回生タンクの圧力は平衡状態となる。シリンダが  $z_{h2}$  だけ伸びたとすると、ピストンは、シリンダを伸ばす部屋の圧力、体積はそれぞれ、 $P_{h\_cu3}$ 、 $V_{h\_cu3}$ 、シリンダの縮める部屋の圧力、体積はそれぞれ、 $P_{h\_eq1}$ 、 $V_{h\_cb3}$ 、回生タンクの圧力がメインタンクの圧力は、 $P_{h\_eq1}$  に変化したとする。ここで、平衡状態の圧力  $P_{h\_eq1}$  は

$$P_{h\_cb2}V_{h\_cb2} + P_{h\_s1}V_s = P_{h\_eq1}V_{h\_cb3} + P_{h\_eq1}V_s \quad (4)$$

$$V_{h\_cb3} = V_{h\_cb2} - S_{cb}z_{h2} \quad (5)$$

また、平衡状態でのシリンダに作用する力は釣り合い、

$$P_{h\_eq1}S_{cb} = P_{h\_cu3}S_{cu} - Mg \quad (6)$$

$$P_{h\_cu2}V_{h\_cu2} = P_{h\_cu3}V_{h\_cu3} \quad (7)$$

$$V_{h\_cu3} = V_{h\_cu2} + (S_{cu}z_{h2}) \quad (8)$$

ここで、式 (7) よりシリンダを縮める部屋の空気は、ボイルの法則を満たす。式 (4) と式 (6) を基にシリンダの伸び  $z_{h2}$  と  $P_{h\_eq1}$  を求めることができる。

#### 4.4 中腰支援後の回生タンクへの回収実験

中腰支援を行った後、シリンダの縮める部屋から回生タンクへ一度排気したときに回収できる圧力を確認した。実験の結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、シリンダを縮める部屋の圧力が 296 kPa の時に回生タンクへ排気すると、回生タンクに圧力を 21 kPa 回収できた。4.3 節の式を用いて計算すると、シリンダを縮める部屋の圧力が 296 kPa の時に回生タンクへ回収できる圧力  $P_{h\_eq1}$  は 21 kPa であり、実験値と近い値であることが確認できた。また、立ち上がりの様子を Fig. 7 に、立ち上がり時のシリンダの長さおよび重量の変化を Fig. 8 に示す。シリンダには平均 45.7 kg の荷重がかかっている。シリンダを縮める部屋の圧力が低下することにより、立ち上がり支援を行うことができ、90 mm から 147 mm まで、57mm の立ち上がり支援を行うことが確認できた。4.3 節をの式を用いてシリンダの伸び  $z_{h2}$  を計算すると、シリンダの長さは 65 mm であり、少し実験値と差があることが確認された。理論値より、実験値のほうが小さいと考えられるのは、粘性の影響が考えられる。

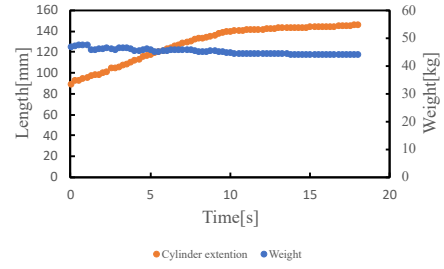


Fig.8: Stand-up assistance experiment after half-sitting posture (cylinder length and weight)

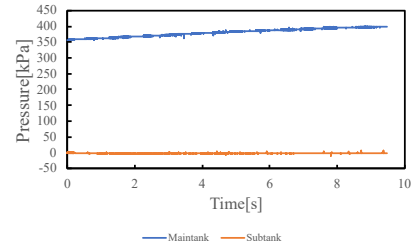


Fig.9: Transition in pressure for compression speed comparison (without regeneration, after half-sitting posture support)

#### 4.5 中腰支援後のコンプレッサ圧縮速度短縮実験

中腰支援を一回行った後、空気回生の有無により、メインタンクの圧力を回復させる時間を短縮できるか確認を行った。空気回生をせずに大気から空気を取り込んでメインタンクの圧力を 400kPa まで回復させた結果を Fig. 9 に、回生タンクから空気を取り込んでメインタンクの圧力を回復させた結果を Fig. 10 に示す。Fig. 9 より回生なしの場合はメインタンクの圧力を回復させるのに約 9.5 min 要した。一方、Fig. 10 より回生ありの場合は約 8.2 min 要した。これにより、回生タンクを用いるとコンプレッサの動作時間を約 1.3 min 削減することが確認できた。

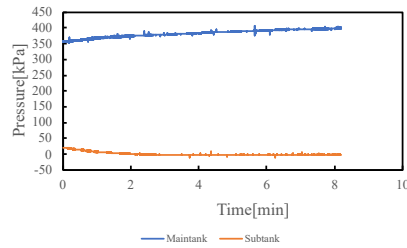
#### 4.6 ウェアラブル椅子の立ち上がり支援実験

開発したウェアラブル椅子に人を乗せた状態で立ち上がり支援可能か確認を行った。シリンダが一番短い状態で、シリンダの伸ばす部屋に空気を印加した。シリンダの縮める部屋は弁を閉じている。荷重は、体重計にウェアラブル椅子を置き、計測を行っている。伸びた長さはカメラ画像から求めた。メインタンクの容量は 3 L であり、400 kPa 印加されている。実験の様子を Fig. 11 に示す。メインタンクから圧力を供給したときの圧力変化を Fig. 12 に、Fig. 13 にシリンダ長さおよび荷重の変化を示す。メインタンクからシリンダに空気を印加したところ、シリンダを伸ばす部屋の圧力は 362 kPa、平均 43.0 kg の荷重がかかっている状態で 129 mm 持ち上げを確認した。また、??節より求められるメインタンクが 400 kPa から平衡状態へ移行した時のシリンダを伸ばす部屋の圧力  $P_{s\_eq1}$  は 360 kPa であり、測定値と近い値を取ることが確認できた。加えて、??節より求められるシリンダの伸び  $z_{s1}$  は 131 mm であり、測定値と近い値を取ることが確認できた。

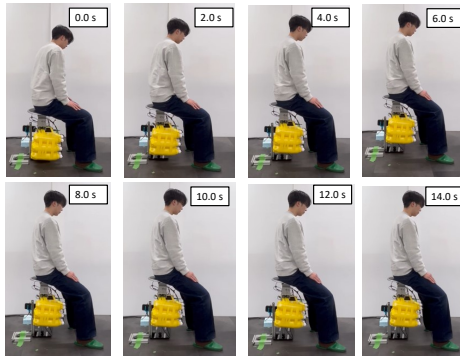
## 5 結 言

本研究では、中腰支援と立ち上がり支援を行うことができるとともに空気回生機構による長時間動作を行うことができるウェアラブル椅子の開発を目標とした。まず、ウェアラブル椅子のコンセプトを提案した。提案したコンセプトは、人間の臀部にシリンダがついており、空気圧を動力源として中腰支援と立ち上がり支援を行う。また、空気回生機構の有効性について述べた。ウェアラブル椅子を製作した。製作したウェアラブル椅子をハーネス





**Fig.10:** Transition in pressure for compression speed comparison (with regeneration, after half- sitting posture support)



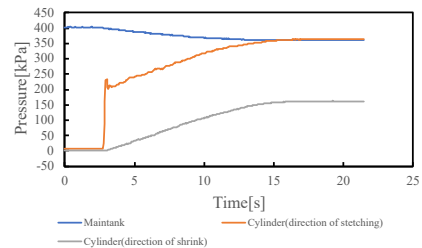
**Fig.11:** Stand-up assistance experiment flow

とバックル付きベルトで使用者に装着することで移動することができる。製作したウェアブル椅子を用いて、立ち上がり支援と中腰支援を行うことができることを確認した。また、空気再生機構を用いることで、コンプレッサの動作時間が短縮され、エネルギー消費量が少なくなることを確認した。

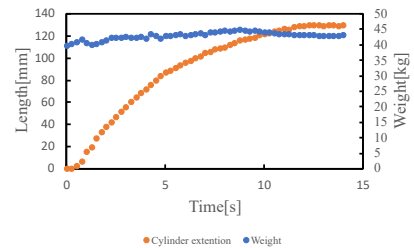
今後の展望として、ウェアブル椅子を実際の農業現場で使用することで、ウェアブル椅子の有効性を確認する。

#### 参考文献

- [1] 足立啓, 佐々木大輔, 高岩昌弘. 3a1-q06 重装備に起因する体幹および下肢の負担軽減を目的とした空気式パワーアシストウェア (ウェアブルロボティクス). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2014, pp. 3A1-Q06.1-3A1-Q06.4, 2014.
- [2] 則次俊郎. 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストウェアの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 222-227, 2015.
- [3] 小林宏. マッスルスーツ®. 日本ロボット学会誌, Vol. 38, No. 2, pp. 143-146, 2020.
- [4] 佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之. ロボットスーツhal による移乗介助動作の支援. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 762, pp. 227-235, 2010.
- [5] Adam Zoss, Hami Kazerooni, and Andrew Chu. On the mechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex). In *2005 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, pp. 3465-3472. IEEE, 2005.
- [6] 伊藤拓末, 内山輝一, 戸森央貴. 中腰姿勢の維持を目的とする空気圧ゴム人工筋肉を用いた膝関節アシスト装具の開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2022, pp. 2A1-E11. 一般社団法人 日本機械学会, 2022.
- [7] 則次俊郎, 高雷. 湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いた腰部パワーアシスト装置の開発. 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 36, No. 6, pp. 143-151, 2005.



**Fig.12:** Stand-up assistance experiment (pressure)



**Fig.13:** Stand-up assistance experiment (cylinder length and weight)

- [8] Noonee. Chairless chair 2.0, 2019. <https://www.noonee.com/?lang=en>.
- [9] Yao Tu, Aibin Zhu, Jiyuan Song, Xiaodong Zhang, and Guangzhong Cao. Design and experimental evaluation of a lower-limb exoskeleton for assisting workers with motorized tuning of squat heights. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 30, pp. 184-193, 2022.
- [10] 井上賢之, 川平洋, 下村義弘, 高久美子, 堀江久永, 佐田尚宏. 腹腔鏡下手術・開腹手術時における直接介助看護師のウェアラブルチェア使用の受容性. 人間工学, Vol. 56, No. 5, pp. 165-169, 2020.
- [11] 永島幹久, 池田篤俊. 形態切り替え型ウェアラブルチェアによる中腰作業時の関節モーメント軽減. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2018, pp. 1P1-C15, 2018.
- [12] Rushikesh M Magdum and Sachin M Jadhav. Design and implementation of chair less seating arrangement for industrial workers and farmers. *Glob Res Dev J Eng*, Vol. 3, No. 8, pp. 5-11, 2018.
- [13] 熊倉翔平, 水内郁夫. 2a2-p03 高圧コンプレッサと空気圧回生システムを搭載した自立型空気圧駆動ロボット birdleg の開発と跳躍動作実現 (アクチュエータの機構と制御 (2)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2014, pp. 2A2-P03.1-2A2-P03.4, 2014.
- [14] 熊倉翔平, 水内郁夫. 2p1-d13 高効率自立型空気圧駆動ロボットのための超小型高圧コンプレッサ及び空気圧回生システムの実現 (アクチュエータの機構と制御 (3)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2013, pp. 2P1-D13.1. 一般社団法人 日本機械学会, 2013.
- [15] 佐々木大輔, 則次俊郎, 高岩昌弘, 岩脇辰佑. 空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための小型空気圧供給システムの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 7, pp. 659-668, 2013.
- [16] 福田忠生, 尾崎公一, 山部匡央, 飯坂元哉, 早川悌二. 耐圧ペットボトルの構造挙動と耐圧強度に関する一検討. 圧力技術, Vol. 49, No. 3, pp. 118-123, 2011.