

報告日 2018 年（平成 30 年）3 月 20 日

報告者 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 助教

宮寄 哲郎

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名（日本語）

工場作業者の身体荷重を支持するパワーアシストアームの研究

(2) 研究者氏名

宮寄 哲郎 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 助教

(3) 研究概要（日本文）

本研究課題では、工場作業者の身体負荷を低減するためのパワーアシストアーム（荷重支持アームと命名）を提案する。荷重支持アームは空気圧シリンダで駆動される 2 本の脚部をもつ機構であり、これを人体の腰部に装着することで、装着者の脚部荷重を低減することが可能である。これにより、工場作業者による長時間の立ち仕事や重量物の取り扱いなど、脚部に大きな負荷がかかる作業に対し、荷重支持アームを使用することで効果的な作業補助が可能になると考えられる。提案する機構を設計・製作し、実機を用いた脚部荷重低減実験を行った。実験の結果、荷重支持アームを使用することで脚部の負荷が軽減可能であることを確認した。

(4) キーワード

パワーアシストロボット、工場作業者の補助、空気圧シリンダ、支持力制御、剛性制御

(英文)

(1) Research title

A Study of Power Assist Arm for Supporting Factory Worker

(2) Name of researcher with title of position

Tetsuro Miyazaki, Assistant Professor, Tokyo Medical and Dental University

(3) Summary

In this research, a supporting arm is proposed, which is worn by a factory worker for reducing the worker's body load. The supporting arm consists of

two leg mechanisms, and it is attached to the worker's hip and supports a part of the worker's leg load. The supporting arm will be effective for the factory worker to assist some tasks of heavy load and standing for a long time. The proposed mechanism was designed and manufactured, and its performance was evaluated by experiments measuring electromyogram waveforms of leg muscles. As a result, the supporting effect of the supporting arm was demonstrated.

(4) Key Words

Power assist robot, Factory worker support, Pneumatic cylinder,
Support force control, Stiffness control

2. 本研究の意義・特色

本研究の意義・特色として、提案する荷重支持アームが空気圧シリンダで駆動される冗長身体型パワーアシストロボットであることが挙げられる。人間の活動を支援するパワーアシストロボットの研究・開発はこれまで盛んに行われており、その形態には外骨格型、環境固定型、冗長身体型などが提案されている。このうち、冗長身体型パワーアシストロボットは、人体をロボットによって機構的に拡張するものである。人体の四肢とは別に動作するロボットの手足などを使用者の身体に装着し、ロボットが人体と協調して動作することによって作業を支援する。ただし、安全性と効率性の観点から、ロボットは人体の四肢と衝突しないように動作させる必要がある。本研究が提案する荷重支持アームは脚一つあたりを空気圧シリンダ一つで駆動するシンプルな機構を持つため制御が簡易であり、また駆動機構に空気圧シリンダを使用することで、装着者の安全確保のために重要な柔軟なバックドライバビリティを備えている。荷重支持アームがこれらの特徴を持ちつつ、目的のタスクである装着者の身体荷重支持が達成可能な出力を有することを実験により検証した。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

（文献「宮寄 哲郎，飯島 拓也，平原 雄一，眞田 一志，作業者の身体負荷を軽減する荷重支持アームの開発と装着時支持性能の評価，日本機械学会論文集．2017.05； 83（849）： 16-00544.」より一部抜粋）

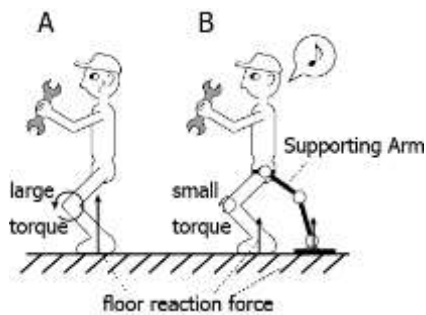


図 1 荷重支持アームを装着した
作業者の様子



図 2 製作した荷重支持アームの実験機

3. 1 荷重支持アームの機構設計

身長 170 cm, 体重 70 kg の作業者モデルを想定し, その身体荷重 50%分を支持可能となるように荷重支持アームのリンク系を設計した. 荷重支持アームを作業者に装着した様子を図 1 に示す. 図中, 左図 A は中腰姿勢を維持する作業者の様子であり, この姿勢では足腰に大きな負担がかかる. 一方, 右図 B は荷重支持アームを装着した作業者の中腰姿勢の様子であり, この場合人体の荷重の一部は荷重支持アームによって支持されるため, 作業者の足腰の負担は軽減される. 荷重支持アームの設計要求として, 作業者の腰高さ方向が可動であることと, アーム接地位置が変更可能であることを与える. アーム接地位置を変更可能とする理由は, 作業現場の環境によっては作業者の周囲に障害物がある場合や, 足場がせまい場合なども考えられ, 環境ごとにアーム接地位置を適切に変更する必要があると想定されるためである. 荷重支持アームの駆動に用いる空気圧シリンダの選定は静力学解析に基づいて行った. 製作した荷重支持アームの実験機を図 2 に示す. 実験機は空気圧シリンダで駆動される二つの脚機構と, 作業者の身体との接続部品として登山用のバックパックで構成される. 固定用のベルトの長さを調整し, バックパックと作業者胴体の相対位置を適切に保ちつつ, 肩ベルトから上向きの力を作業者胴体に伝え, 荷重を支持する.

3. 2 荷重支持アームの制御系設計

荷重支持アームの支持力を二つの要求: (i) 目標荷重に対し十分な支持力を出力可能, (ii) 作業者の腰高さ方向で支持力の所望の剛性特性を実現, を満たすように二自由度制御系を用いて制御した. 要求 (i) に関して, 目標荷重はフィードフォワードコントローラが出力する支持力で支持され, 要求 (ii) に関して, 所望の剛性特性はフィードバックコントローラの比例ゲインを調整して与える.

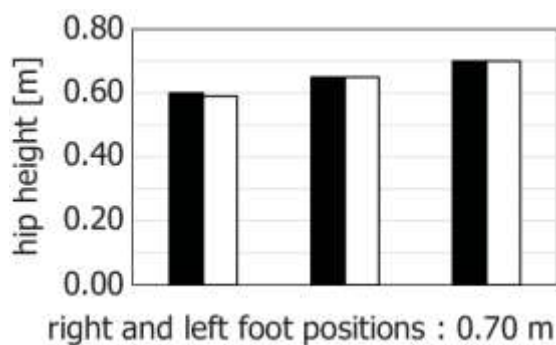


図3 支持力制御実験の結果（左右脚位置固定，目標腰高さ 0.60, 0.65, 0.70 m）。黒線は目標腰高さ，白線は試行 3 回から計算した平均腰高さ

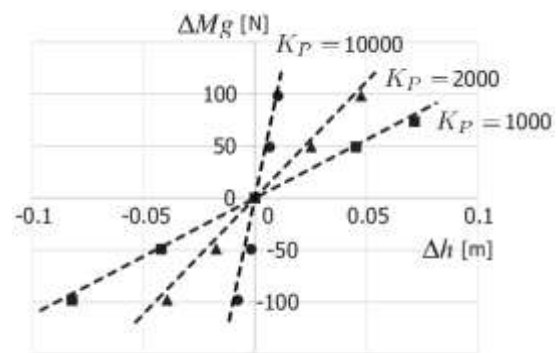


図4 剛性制御実験の結果。横軸は腰高さの位置ずれの平均値，縦軸は荷重の変化。四角マーカ，三角マーカ，丸マーカはそれぞれ比例ゲインが 1000, 2000, 10000 N/m のときの実験値，破線は実験値の線形近似関数

3. 3 荷重支持アームの支持力制御実験および剛性制御実験

製作した平面荷重支持アームを用いて，所望の支持力が得られること，および支持力に所望の剛性を与えて制御できることを実験で検証した．支持力制御の実験では，目標質量 35 kg の重りを平面荷重支持アームに取り付け，目標腰高さや足リンクの位置を可動範囲内で複数パターン与え，重りを支持しつつ目標の姿勢近くに到達し，姿勢を維持可能であるかを検証した．支持力制御実験の結果の一例を図 3 に示す．左右の足リンク接地位置を固定し，三通りの目標腰高さ 0.60, 0.65, 0.70 m を与え，それぞれの条件で三回ずつ腰高さを計測した．図中，黒線は目標腰高さ，白線は腰高さの平均値を示す．いずれの実験でも腰高さは目標腰高さに対して 1 cm 以下の位置誤差で静止した．作業者の荷重支持という用途では，人体の中腰姿勢での腰高さが 70 cm 程度であるのに対し，腰高さ 1 cm 程度の誤差は十分小さく，実用上問題はないと判断した．一方，剛性制御の実験では，フィードバックコントローラの比例ゲインとして 1000, 2000, 10000 N/m を与え，これら剛性理論値に近い剛性実験値が実現可能であるかを検証した．実験結果を図 4 に示す．横軸は腰高さの位置ずれの平均値，縦軸は荷重の変化を表す．四角マーカ，三角マーカ，丸マーカはそれぞれ比例ゲインが 1000, 2000, 10000 N/m のときの実験値であり，破線は実験値の線形近似関数である．いずれも剛性の理論値である比例ゲインに近い剛性の実験値が得られ，所望の値に近い支持力剛性が実現可能であることが示された．

3. 4 表面筋電計を用いた荷重支持アーム装着時の作業者身体の負荷計測実験

作業者が中腰姿勢を維持するときに大きな負荷がかかると考えられる両脚の大腿部と脛

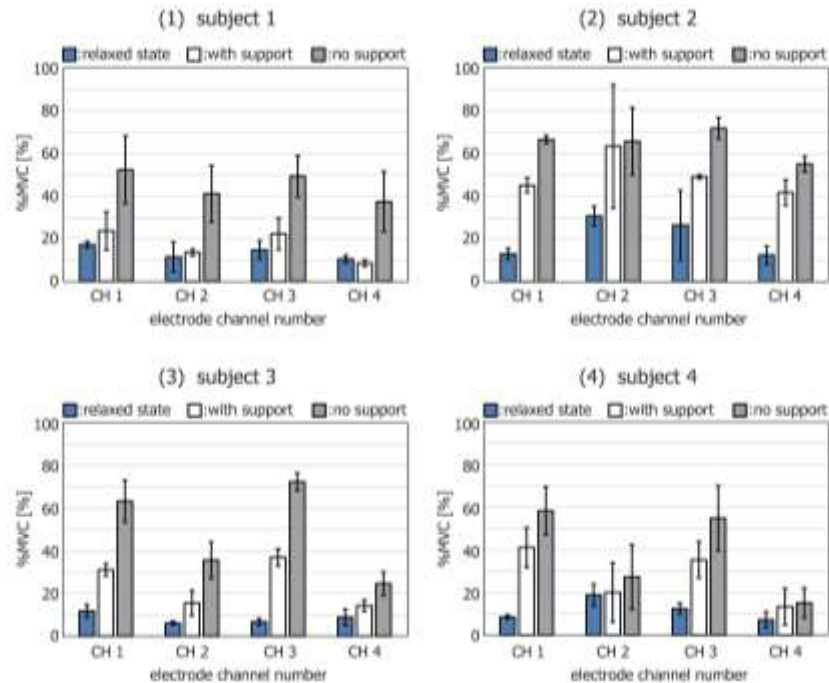


図5 被験者4人の負荷計測実験の結果. 縦軸は3回ずつ計測した実験結果からチャンネルごとに計算した%MVC 値の平均値と標準偏差, 横軸は筋電計の各チャンネル. 色太線は%MVC 平均値であり, 青色はリラックス時, 白色は支持あり時, 灰色は支持なし時の値. 黒細線は%MVC 値の標準偏差

部の筋電位信号を, 荷重支持アームで支持する場合と支持しない場合についてそれぞれ計測し, 荷重支持の効果を定量的に評価した. 体格の異なる作業者に対する荷重支持アームの支持効果を確認するために, 被験者4人に対して3回ずつ負荷計測実験を行った結果を図5に示す. 縦軸は3回ずつ計測した実験結果からチャンネルごとに計算した%MVC 値(チャンネルごとの最大随意収縮時の筋電位に対する現在の筋電位の割合)の平均値と標準偏差であり, 横軸は筋電計の各チャンネルを表す. 色太線は%MVC 平均値であり, 青色線はリラックス時, 白色線は支持あり時, 灰色線は支持なし時の値を表す. 黒細線は%MVC 値の標準偏差である. 実験結果の全体の傾向として, %MVC 値の平均値はリラックス時, 支持あり時, 支持なし時の順番に大きくなる傾向が見られた. さらに, 支持あり時と支持なし時の%MVC 平均値に有意差があるかどうかをt 検定を用いて検証した. 片側検定の有意水準5% で検定を行い, 実験データから算出した検定統計量はt 分布の参照値よりも大きくなった. これにより, 支持あり時と支持なし時の筋電位平均値には有意な差があり, 荷重支持アームによる身体負荷の軽減効果に再現性があることと, 異なる被験者に対して効果があることが示された.

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

宮寄 哲郎 東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 助教

眞田 一志 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授

5. 研究実施時期

2016 年（平成 28 年）3 月 1 日から 2018 年（平成 30 年）2 月 28 日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

2017 年

Tetsuro MIYAZAKI, Takuya IJIMA, Yuuichi HIRAHARA and Kazushi SANADA, Performance Evaluation of Supporting Arm for Reducing Body Load Using Surface Electromyography, The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power FUKUOKA 2017. 2017.10; (2B12): 1-8.

平原 雄一, 飯島 拓也, 宮寄 哲郎, 眞田 一志, 空気圧支持アームによる負担軽減効果の統計学的検証, 「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC 2017). 2017.08.29.

宮寄 哲郎, 飯島 拓也, 平原 雄一, 眞田 一志, 作業者の身体負担を軽減する荷重支持アームの開発と装着時支持性能の評価, 日本機械学会論文集. 2017.05; 83 (849): 16-00544.

2016 年

宮寄 哲郎, 飯島 拓也, 平原 雄一, 眞田 一志, 作業者の身体負担を軽減する荷重支持アームの装着時支持性能の実験評価, 計測自動制御学会 2016 年度産業応用部門大会 2016.10.25.

平原 雄一, 飯島 拓也, 宮寄 哲郎, 眞田 一志, 作業者に装着する荷重支持アームの協調制御による目標支持力剛性の実現, 山梨講演会 2016.10.22.

飯島 拓也, 平原 雄一, 宮寄 哲郎, 眞田 一志, 作業用荷重支持アームの製作と協調制御を用いた支持性能の実験評価, 平成 28 年秋季フルードパワーシステム講演会 2016.10.19.

宮寄 哲郎, 飯島 拓也, 鈴木 裕二, 眞田 一志, 作業者の身体負荷を軽減する荷重支持アームの設計と支持力制御, 日本機械学会論文集. 2016.10; 82 (842): 16-00216.

Tetsuro Miyazaki, Takuya Iijima and Kazushi Sanada, Design and Control of Supporting Arm for Reducing Factory Worker Load with Desired Support Force and Stiffness Characteristics, Proc. of the Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control (FPMC2016). 2016.09; FPMC2016-1708.

宮寄 哲郎, 飯島 拓也, 鈴木 裕二, 眞田 一志, 作業者の負荷を軽減する荷重支持アームの剛性制御, 春季フルードパワーシステム講演会 2016.05.26.

飯島 拓也, 鈴木 裕二, 宮寄 哲郎, 眞田 一志, 作業者の負荷を軽減する荷重支持アームの設計と支持性能の実験評価, 春季フルードパワーシステム講演会 2016.05.26.

7. 内外における関連研究の状況

冗長身体型パワーアシストロボットのコンセプトは MIT d'Arbeloff Laboratory の Harry Asada 教授らのグループにより提唱され, 様々な電気モータ駆動式の冗長身体型パワーアシストロボットが研究されている. 発表されているものでは, 冗長身体型ロボット腕, 脚, 指などがある[1, 2, 3]. また, 東京工業大学武田研究室により, 健常な上肢をもつ下肢障害者の歩行支援を目的として, 松葉杖形歩行支援機械が開発された[4]. 機構に内蔵される松葉杖は人体の腕部を脚化する医療器具であり, 機構によって人間の脚機能は冗長化され, 少ないアクチュエータによって歩行に必要な蹴り出し力が補助される. 立命館大李周浩教授らのグループにより, 腰装着型ハイブリッド駆動式サードアームが開発されている[5]. この機構では, 大きな負荷がかかるアーム根元の受動関節をロック機構で固定し, 手首関節を電気モータで駆動する. また, ジョージア工科大の Khodambashi らにより, 装着者の腕と同期して楽器のドラムを叩くロボットアームが開発されている[6]. これらはいずれも電気モータをアクチュエータとして用いている.

参考文献

[1] Llorens-Bonilla, B., Parietti, F. and Asada, H., Demonstration-based control of supernumerary robotic limbs, Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2012), pp.3936–3942.

- [2] Parietti, F., Chan, K. and Asada, H., Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2014), pp.141–148.
- [3] Wu, F. Y. and Asada, H., Bio-artificial synergies for grasp posture control of supernumerary robotic fingers, Robotics: Science and Systems X (2014).
- [4] 佐藤秀太, 武田行生, 樋口勝, 松葉杖形歩行支援機械の開発, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, Vol.7 (2008), pp.207–208.
- [5] Kojima, A., Yamazoe, H., Chung, M. G. and Lee, J. H., Control of wearable robot arm with hybrid actuation system, Proceedings of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (2017), pp. 1022–1027.
- [6] Khodambashi, R., Weinberg, G., Singhose, W., Rishmawi, S., Murali, V. and Kim, E., User oriented assessment of vibration suppression by command shaping in a supernumerary wearable robotic arm, Proceedings of the 2016 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (2016), pp. 1067–1072.

8. 今後の発展に対する希望

このたび、公益財団法人油空圧機器技術振興財団様にご支援いただいたことで、本研究課題において多くの研究成果を得ることができ、それを国内外で発表させていただいた。その後、本課題の担当者は、冗長身体型パワーアシストロボットの研究に加えて、新たに空気圧ゴム人工筋を用いた外骨格型パワーアシストロボットの研究も開始した。

パワーアシストロボットの研究は現在も盛んに行われているが、ロボットの駆動方式は多くの場合に電気モータを使用しており、空気圧駆動方式のものはまだ比較的事例が少ない。この原因の一つとして、空気圧駆動方式ではコンプレッサやエアタンクなどを含む駆動系全体のサイズが大きくなる場合が多く、装着型パワーアシストロボットに採用しにくいことが挙げられる。この課題を解決するために、装着型パワーアシストロボットのための携帯式小型空気圧源も研究されている。本課題の担当者が所属する研究グループでも、空気圧駆動系のサイズダウンのために、バルブ内蔵型アクチュエータの研究を行っている。

上記のような解決すべき課題もあるが、空気圧駆動アクチュエータは多くのメリット、例えばシンプルな機構で壊れにくい、軽量高出力、柔軟いバックドライバビリティをもつなど、電気モータとは異なる特性を多数有しており、魅力的な駆動方式の一つである。本研究課題をさらに発展させるために、今後も空気圧駆動式パワーアシストロボットの研究開発を多角的に実施していく予定である。