

ヒューマノイドロボットによる筋力補助装具スマートスーツ・ライトの複合動作時の効果検証

Validation of Passive Power-Assist Device Smart Suit Lite Using Humanoid Robot:
Effect on Complex Motion○ 今村由芽子（産総研） 鮎澤光（産総研） 吉田英一（産総研）
田中孝之（北大）Yumeko IMAMURA, AIST
Ko AYUSAWA, AIST
Eiichi YOSHIDA, AIST
Takayuki TANAKA, Hokkaido University

Abstract: This paper presents basic experiments using humanoid robot HRP-4 for evaluating the effect of the passive assistive suit. A passive power-assist supporter, called *Smart Suit Lite*, aims at reducing the lumbar load utilizing the tension of elastic belts. Its design method is based on the simulation with a digital human model. In the experiment, the joint torques of the robot were measured during complex movements that imitate human motion. We found that the change in joint torques show the good correlation with the simulation. In addition, the effect on the joint torque are shown as the assistance effect and the resistance effect. It was confirmed that the distribution of the load for each axis of the joint is able to be quantitatively observed through the experiment.

Key Words: assistive device evaluation, humanoid robot, human motion imitation

1. 背景、目的

近年、人の動作支援や作業負荷軽減を目的とした装置型のアシスト機器が盛んに研究開発されており、すでにその中のいくつかは商品化されている。特に超高齢社会である日本では高齢労働者の作業負荷軽減や介護作業の身体負荷軽減を目的とした様々な装着型機器の開発が進められているが、その一方でそれらの機器の定量的評価に関する報告は少ない。アシスト機器の最も一般的な評価手法は非侵襲で計測が可能な表面筋電図による筋活動の比較であると考えられる⁽¹⁾。その他にも NIRS を利用した筋疲労推定や力知覚機能の向上などの評価が行われている。しかし、これらの手法はアシスト機器の力学的な影響を直接的に評価するものではなく機器設計にフィードバックして利用されることも少ない。

我々は人と機器間の物理的なインタラクションを定量的に評価する標準的な枠組みを確立することを目指し、ヒューマノイドロボットを用いた効果検証を提案している⁽²⁾。ヒューマノイドロボットは人に近い動きを再現することができ、繰り返し動作の精度が人と比べて非常に高い。また機構内にセンサを配置することで関節トルクや圧力など人では計測困難な力の直接計測が可能である。

本報では、パッシブ筋力補助装具スマートスーツ・ライトのヒューマノイドロボットを用いた定量的な検証実験を行い、シミュレーション結果との比較と腰関節の各軸方向への効果を示す。

2. 方法

2.1 ヒューマノイドロボット HRP-4

最も広く行われている機器の評価手法は被験者実験であるが、被験者実験は体型や感覚の個人差や動作の再現性が低いこと、倫理的な問題などの課題を抱えている。これに対しヒューマノイドロボットによる機器評価には次のような特長がある。

- ・ 人に近い形態を持ち、人のために開発された機器を実環境で使用することが可能である。
- ・ 動作を正確に繰り返すことができ、関節の軌道やトルク、外力等の定量的な計測が可能である。

・ 被験者実験に伴う傷害のリスク等の倫理的な問題がない。

本研究ではヒューマノイドロボット HRP-4(Fig. 1) を用いる。HRP-4 は身長 151cm、重量 39kg と日本人成人女性の平均に近い体格であるため、アシストスーツを装着しその補助効果を受けることが可能である。また、本実験では硬質なプラスチックの外装の代わりにクッション性のあるスーツを体幹と脚部分に装着させ、人のような柔らかい体表面を再現している。

2.2 スマートスーツ・ライト

スマートスーツ・ライト (SSL) は弾性素材の張力をアシスト力として利用するパッシブ型の筋力補助装具であり、主に腰の筋負担の軽減を目的としている⁽⁴⁾。SSL のプロトタイプを Fig. 2 に示す。背面に肩から大腿にかけて弾性特性を持つベルトが配置され、装着者が姿勢を変化させた際に直立姿勢に戻すようなアシスト力を発揮する。SSL の開発のためにデジタルヒューマンモデルと動作解析に基づいた弾性材の配置・強度の設計手法が提案されている。提案手法では最初に補助対象の動作を選定し、動作計測により対象動作シーケンスを取得する。次に SSL を組み込んだデジタルヒューマンモデルにより逆動力学解析を行い、筋負担とアシスト効果を推定し、補助効率の良い弾性材配置を選定する。最後に補助率を設計者が設定することにより、弾性材の弾性



Fig.1: HRP-4 with a soft body surface.



Fig.2: Passive power-assist device Smart Suite Lite.

特性が決定される。本実験で用いた SSL は介護作業用に開発された SSL を HRP-4 の体格に合わせて製作したものであり、肩部のベルトの弾性特性が 232[N/m]、大腿部のベルトが 547[N/m] である。

2.3 幾何学シミュレーションモデル

SSL の補助力を推定するため、ロボットの形状を持ったリンクモデルに SSL の弾性ベルトをワイヤとして表現し付加する。それぞれのワイヤはロボットのリンクに対し固定された複数の経由点を持つ。これにより弾性材の発揮する補助力は動作中のワイヤの経路長の変化から推定することが出来る。経由点の位置は光学式モーションキャプチャシステムにより弾性材上に取り付けたマーカとロボットの特徴点上に配置したマーカの 3 次元位置を計測し、相対的な位置関係を求め決定した。Fig. 3 に補助力推定のためのシミュレーションモデルを示す。

2.4 計測実験

ここでは SSL の補助対象が腰であるため、HRP-4 の腰にあたる Chest 関節の 3 自由度 (pitch, roll, yaw) に着目する (Fig. 4)。本実験の対象動作は次の二つの動作である。

- ・ Bending : 腰を屈曲させて上体を水平付近まで傾け、直立姿勢に戻るまでの腰の屈伸動作 (Fig. 7)
- ・ Twisting : 仮想的な荷物を床から持ち上げて腰を捻りながら左上方へ置き、また元の位置へと戻す動作 (Fig. 8)

Bending 動作は矢状面上の 2 次元的な動き、Twisting 動作は捻りを含む 3 次元的な動きである。それぞれの動作の関節角度変化を Figs. 5, 6 に示す。これらの動作は動作リターゲティング技術⁽⁵⁾により、人の動作計測結果を基にして生成されているため人間らしい細やかな姿勢制御を再現している。動作中の HRP-4 の関節角度とトルクは 200Hz で計測した。

3. 結果、考察

3.1 関節トルクの変化

計測された動作中の関節トルクの例を Fig. 9, 10 に示す。ここで、 τ_c を SSL 装着時に計測されたトルク、 τ_{c0} を通常時のト

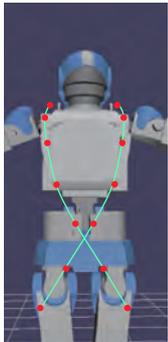


Fig.3: Wire path model of Smart Suit Lite.

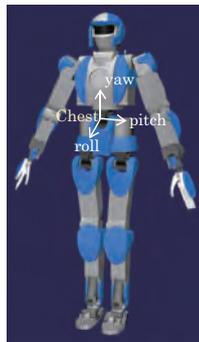


Fig.4: Definition of rotation axes at chest joint.

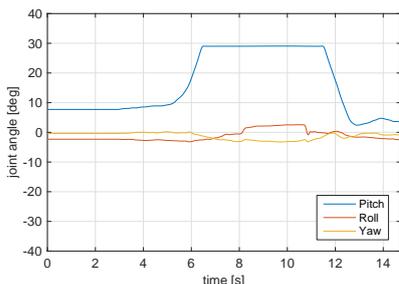


Fig.5: Chest joint angle in bending motion

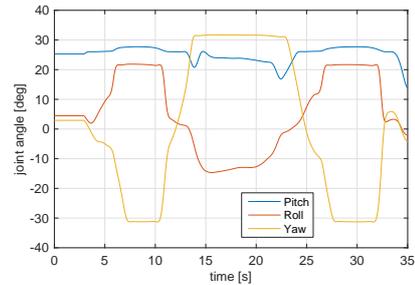


Fig.6: Chest joint angle in twisting motion.

ルクとし、その差分 $\hat{\tau}_s = \tau_c - \tau_{c0}$ を SSL の補助力が関節トルクへ与える作用として定義する。図中の黒破線は計測値から求められた関節トルクの変化、青実線が 2.3 節のシミュレーションモデルを用いて求めた結果である。実測値はトルク同士の差分により求めているためばらつきが大きいものの、シミュレーション結果と傾向は一致していることがわかる。シミュレーション結果と実測値の RMSE は Bending 動作で pitch が 2.72Nm, roll が 3.15Nm, yaw が 1.82Nm、Twisting 動作で pitch が 3.57Nm, roll が 1.27Nm, yaw が 2.15Nm であった。

3.2 関節トルクの変化

次に SSL による関節トルクの変化の意味について考える。SSL の影響を関節トルクの絶対値の減少量として次の式により再定義する。

$$\hat{\tau}_e = |\tau_{c0}| - |\tau_c| \tag{1}$$

動作中のトルク減少量を Fig. 11,12 に示す。この値が正であるときロボットの発揮する関節トルクは減少し SSL は assistance (補助) として働くが、負である時には関節への負担が増加する resistance (抵抗) となる。今回の動作では、Bending 動作では roll, yaw 方向への動きが小さいため $\hat{\tau}_e$ はばらつきを持っているものの平均的には影響が少ない。pitch に対しては動作開始時から初期姿勢へ戻るまで assistance として作用しており、直立姿勢で静止するための姿勢制御を行うフェーズで僅かに resistance 効果が見られる。一方で twisting 動作では pitch と roll に対しては全体的に assistance 効果、yaw に対しては resistance 効果となっている。これは、SSL の補助力により発生する関節トルクは姿勢から定まる値であり、その方向は直立姿勢へ戻そうとする向きであるためである。この SSL による関節トルクがアシスト効果となるのは、直立姿勢に戻ろうとしている動作フェーズと、重力下で傾いた姿勢を取り自重が直立姿勢と逆向きのトルクを発生させているフェーズである。今回対象としたような中腰姿勢では pitch 関節に対しては SSL は補助力として作用したが、重力の影響を受けない yaw 方向の動きに対しては負荷となっていた。しかし仮に対象動作がシットアップ (腹筋動作) のような姿勢であった場合にはロボットの発揮すべき pitch 関節トルクと SSL は逆向きのトルクを発生し、人間であれば動作の主導筋である腹筋の負荷が増加すると考えられる。

4. 結論

本報ではパッシブ型筋力補助装具スマートスーツ・ライトのヒューマノイドロボットを用いた直接計測による効果の定量的評価を示した。その結果、関節トルクの変化はシミュレーション結果と傾向が一致していることが確認できた。また、関節の 3 軸 (pitch, roll, yaw) 方向への SSL の影響を負担を軽減する assistance 効果とその反対に関節の駆動力を増加させる resistance 効果として示した。このように軸方向に効果を分離することは人間の被験者実験で計測することは不可能である。しかし、それらの総合的な影響が補助対象である筋活動に作用してい

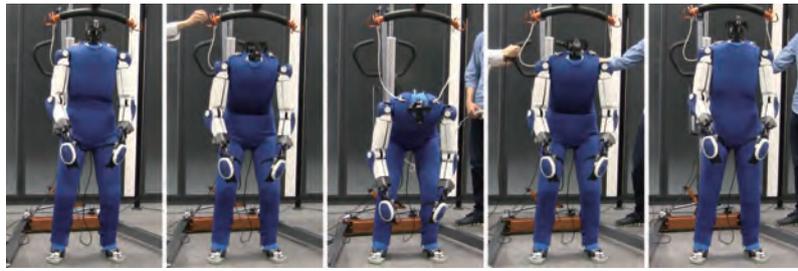


Fig.7: Snapshots of bending motion of HRP-4.



Fig.8: Snapshots of twisting motion of HRP-4.

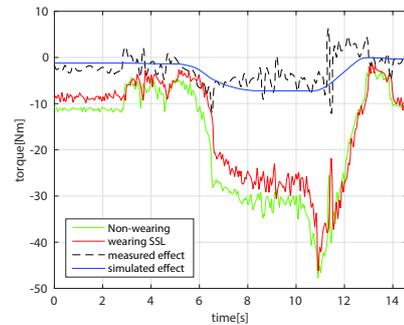
ると考えられるため、SSLによる効果解析を行う上は有用な情報である。今回の結果のように、SSLのような補助装具は必ずしも全ての関節・姿勢に対して負担軽減のみを行っているのではなく、補助対象の関節から他の関節へと負荷の分散を行っていると思える事が出来る。そのため補助の対象となる関節と抵抗力を受ける関節に関して慎重な解析を行い、その結果に基づきアシスト機器の設計を行うことが重要である。

謝辞

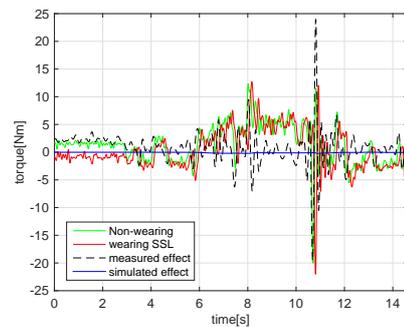
本研究は、経済産業省「ロボット介護機器開発・導入促進事業(基準策定・評価事業)」の支援を受けたもので、ここに謝意を表します。

参考文献

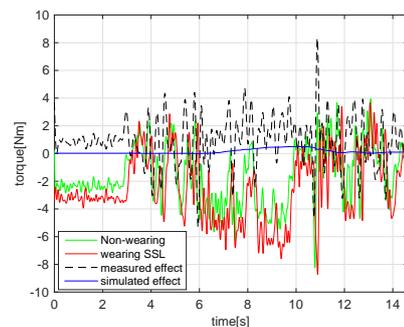
- (1) Y. Muramatsu, et al., Improvement and quantitative performance estimation of the back support muscle suit, in: Proc. of 35th Int. Conf. of IEEE EMBC, pp.2844-2849, 2013.
- (2) K. Ayusawa, et al., New evaluation framework for human-assistive devices based on humanoid robotics, Advanced Robotics, vol.30, no.8, pp.519-534, 2016.
- (3) K. Kaneko, et al., Humanoid robot hrp-4-humanoid robotics platform with lightweight and slim body, in: 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.4400-4407, 2011.
- (4) Y. Imamura, et al., Motion-Based-Design of Elastic Material for Passive Assistive Device Using Musculoskeletal Model, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.23, no.6, pp.978-990, 2011.
- (5) K. Ayusawa, et al., Motion retargeting for humanoid robots based on identification to preserve and reproduce human motion, in Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2774-2779, 2015.



(a) chest pitch

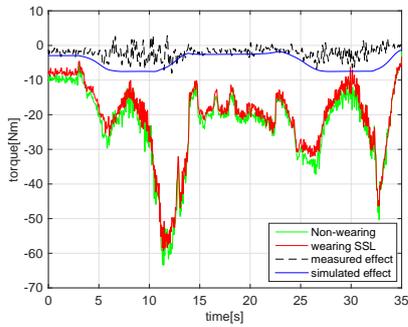


(b) chest roll

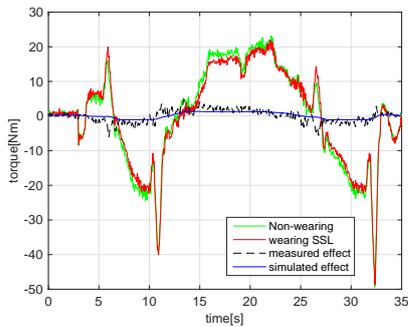


(c) chest yaw

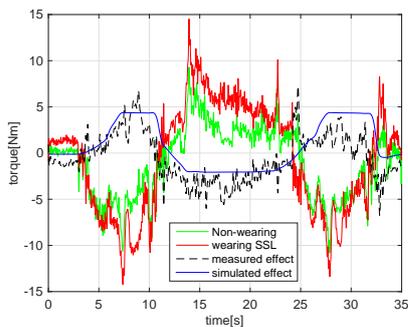
Fig.9: Change in joint torque during the bending motion.



(a) chest pitch



(b) chest roll



(c) chest yaw

Fig.10: Change in joint torque during the twisting motion.

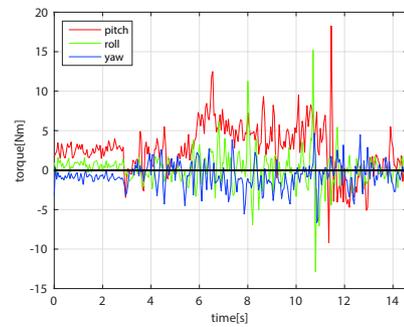


Fig.11: Chest joint angle in bending motion.

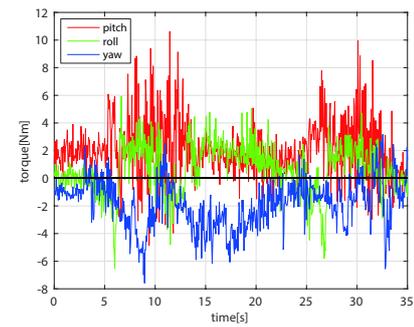


Fig.12: Chest joint angle in twisting motion.