

体幹部アシスト用多関節装着型ロボットの試作と接触力の分布情報に基づく制御法の実機実装

Prototype of Multiple Joints Wearable Robot for Body Trunk and Implementation of Control Methods based on Contact State

○ 佐藤飛鳥（名大） 内山直哉（名大） 舟洞佑記（名大）  
道木慎二（名大） 道木加絵（愛工大）

Asuka SATO, Nagoya University  
Naoya UCHIYAMA, Nagoya University  
Yuki FUNABORA, Nagoya University  
Shinji DOKI, Nagoya University  
Kae DOKI, Aichi Institute of Technology

**Abstract:** In order to realize assist of complex body parts such as body trunk, this paper presents a prototype of wearable robot with multiple joints. Providing safe assist is the most important aspect for wearable robots; and controlling the robot based on physical contact state between the user and robot is desired. In the previous research, a novel control method based on pressure distribution (information of physical contact force with the user) has been proposed and evaluated through simulation. To validate the method in real robot, 4 joints serial link type robot with tactile sensors mounted on surface of the prototype robot is developed in this paper. Effectiveness of the method is evaluated based on time-series contact force compared to that of conventional torque base control method.

**Key Words:**Wearable robot, Power Assist, Pressure distribution, Body trunk

1. 背景

高齢社会問題<sup>(1)</sup>の対策として装着型アシストロボットが研究開発されてきた<sup>(2,3)</sup>。装着型ロボットは人体に装着し、人間の動作を直接支援するロボットである。医療分野ではリハビリ用途として障害部位の機能回復効果介護・福祉分野では介護者の身体的負担の軽減効果が期待される。実際に介護者が大きな負担を感じている部位は腰部・背中部・首部の体幹部が多い<sup>(4)</sup>。インフェス社の腰補助用マッスルスーツ<sup>(5)</sup>やアクティブリンク社のアシストスーツAWN-03<sup>(6)</sup>などでは、関節を補助することで人体の腰部に対応した屈曲動作支援を実現した。しかし体幹部全体の支援には至っていない。

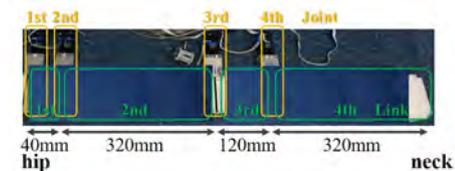
そこで本研究では体幹部全体の前後屈曲運動を支援する多関節装着型ロボットの実現を目指す。実現に向けて大きく二つの課題を解決する必要がある。動作支援に適したロボットの構造決定と装着者の安全性を確保するロボットの制御法の確立である。

前者の課題については、先行研究<sup>(7)</sup>より4関節のロボットに構造を決定した。

後者の課題については、体幹部は多数の関節から構成され、動きも複雑であるので安全に支援するためにロボットと人体との接触状態をフィードバックする制御法が望ましいと考える。先行研究にてシミュレーション上で提案する圧力分布ベース制御法の有効性を検証してきた<sup>(9,10,11)</sup>。筆者らはロボット表面に面状圧力センサを搭載し、人体との接触状態を直接計測可能な4関節のリンク型ロボットを試作し、非アシスト状態における定常状態での提案法の有効性を確認した<sup>(12)</sup>。本稿では、試作したロボットが体幹部のある姿勢に収束するまでの時系列の接触力の分布変化を既存のトルクベース制御法と提案する圧力分布ベース制御法を比較し、提案法の有効性を実機において確認する。

2. 試作した体幹部アシスト用多関節ロボット

先行研究<sup>(7)</sup>に基づき、図1(a)に示す4関節4リンクのシリアルマニピュレータ型試作機を製作したロボット全体の質量は約4500[g]である。剛体部であるリンク部にはアルミニウムを用い、各リンク長は腰の第1リンクから順に40, 320, 120, 320[mm]で



(a) Structure of multi-joint robot



(b) Position and number of sheet pressure sensor

Fig.1: Multi-joint robot mounted sheet pressure sensor

ある。関節部にはmaxon社のモータ(RE 30 Ø30mm グラファイトブラシ 60Watt)を使用し、制御用ドライバは位置制御モードで駆動する。制御用計算機とドライバ間の制御周期は50[ms]である。面状圧力センサとしてSRソフトビジョン(数値版)を緩衝材を介してロボット表面に取り付けた(図1(b))。①～②セルはリンク1、③～⑭セルはリンク2、⑮～⑳セルはリンク3、㉑～㉒セルはリンク4に位置し、2枚の面状圧力センサの29セル分の圧力値を制御に用いる。センサの計測周期は200[ms]である。試作機の制御周期は圧力センサの計測周期に合わせて200[ms]とした。今回の試作機は自重を無視できるように水平に動かす。

人体との装着及び計測する圧力分布情報のイメージを図2に示す。第1リンクが腰部に、第2,3リンクが背中部、第4リンクが肩から首部に接触する。制御法の評価に用いる接触力は面状圧力センサの計測値とセル面積から計算する。

3. 実装した制御法

比較基準となるトルクベース制御法と評価する圧力分布ベース制御法<sup>(9)</sup>の実装法を説明する。共通する制御系を図3に示す。

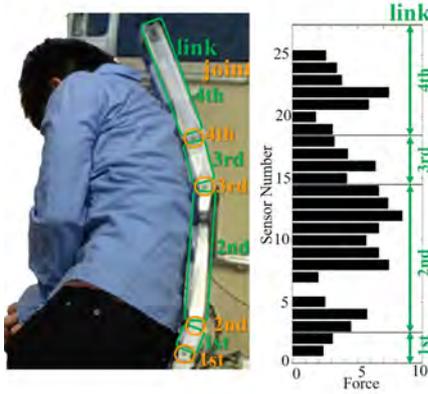


Fig.2: Wearing image and image of measured pressure distribution

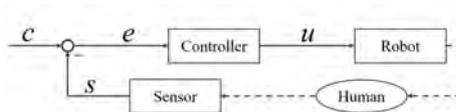


Fig.3: Control System

制御系では制御指令  $c$  とセンサで観測した実現値  $s$  との偏差  $e$  に基づきロボットへの制御入力  $u$  を計算する.

### 3.1 トルクベース制御法

トルクベース制御においては、 $c = \tau^*$ 、 $s = \tau_s$ 、 $e = \tau$  である。以降、ある関節に着目しスカラー量で説明する。トルク実現値  $\tau_s$  はトルクセンサから計測することが望ましいが、試作機はトルクセンサを搭載していない。本稿では圧力センサから接触力の平均値と重みづけをした平均接触位置から簡易的に  $\tau_s$  を求める (式 (1)).

$$\tau_s = (\bar{p}K_p)\bar{l} \quad (1)$$

ここで  $\bar{p}$  はリンク上の圧力値の平均値、 $K_p$  は圧力から力への変換係数である。 $\bar{l}$  は圧力によって重みづけをした平均接触位置である。 $\tau^*$  と  $\tau_s$  により  $\tau$  を求める。

$$\tau = \tau^* - \tau_s \quad (2)$$

インピーダンスモデルを用いてトルク偏差  $\tau$  からロボットの関節角修正値  $\Delta\theta$  を式 (3) で算出する。

$$\Delta\theta = (Ms^2 + Ds + K)^{-1}\tau \quad (3)$$

$M$ 、 $D$ 、 $K$  はそれぞれインピーダンスモデルの慣性、粘性、弾性項である。算出した  $\Delta\theta$  に基づき、ロボットへの制御入力を位置制御器で算出。 $\tau$  をゼロにするように制御する。一方体幹部とロボットの構造は異なるため、 $\tau$  を完全にゼロにすることは困難である。許容範囲に  $\tau_s$  が収まった場合に誤差が収束したとみなす。

### 3.2 圧力分布ベース制御

圧力分布ベース制御においては、 $c = p^*$ 、 $s = p_s$ 、 $e = p$  である。あるリンク上の  $i$  番目のセル毎に圧力値が計測できるとすると、圧力分布指令  $p_i^*$  と圧力分布の実現値  $p_{si}$  との偏差  $p_i$  を求める。

$$p_i = p_i^* - p_{si} \quad (4)$$

リンク上の最大圧力値がリンク中心にかかるとし、疑似的なトルク偏差  $\tau^+$  に変換する (式 (5)).

$$\tau^+ = (\max(p_i)K_p)\frac{L}{2} \quad (5)$$



(a) Initializing the shape model (b) Fitting to the subject's trunk (c) Shape of the body subject model

Fig.4: Modeling process of body trunk shape of a subject

Table 1: Table title

	$p^*$	$\tau^*$	$\tau_{max}$	$\tau_{min}$
Joint1(Link1)	5.16	0.10	0.13	0.077
Joint2(Link2)	5.16	0.81	1.0	0.62
Joint3(Link3)	5.16	0.31	0.39	0.23
Joint4(Link4)	5.16	0.10	1.0	0.62

ここで  $L$  はリンク長である。 $\tau^+$  から式 (3) により関節角修正  $\Delta\theta$  を求め、制御入力を決する。 $\tau$  同様、 $\tau^+$  を完全にゼロにすることは困難である。許容範囲内に  $\tau^+$  が収まれば収束したとみなす。

## 4. 実機実験

本章では体幹部のモデルを用いて、トルクベースと圧力分布ベースの2つの制御法に基づき制御し、ロボットの挙動が収束するまでの接触力の変化を比較する。

### 4.1 実験条件

人体の体幹部の形状取得のための体幹部モデルを作製した (図 4(a)). 人に押し当てた方と反対の棒の先端に体幹部の形状が反映される (図 4(b), 図 4(c)). 人体の柔らかさを反映するため、体幹部モデルとロボットの接触部に緩衝材を取り付けた。体幹部モデルの形状は前屈姿勢とし、体幹部モデルに対してロボットの姿勢を収束させる。

本稿では、表 1 に示す微小指令値  $p^*$  と  $\tau^*$  を設定した。なお収束範囲の閾値は、試行錯誤的に全関節とも  $p_{min} = 3.87$ 、 $p_{max} = 6.45$  とした。圧力分布ベース制御とトルクベース制御を同一条件にするため、式 (6),(7) で  $\tau_{max}$ 、 $\tau_{min}$  を算出した。

$$\tau_{max} = \frac{L}{2}p_{max}K_p \quad (6)$$

$$\tau_{min} = \frac{L}{2}p_{min}K_p \quad (7)$$

収束条件は式 (8) とした。

$$\tau_{min} < \tau, \tau^+ < \tau_{max} \quad (8)$$

初期状態では体幹部モデルとロボットが離れており、接触力が発生しない ( $\tau, \tau^+ < \tau_{min}$ )。この場合、ロボットは一定角で体幹部モデルに近づくように制御する。関節 1 から関節 4 まで順に 0.5, 0.2, 0.1, 0.05[deg] ずつ体幹部モデルに近づく。 $\tau_{max} < \tau, \tau^+$  の時、既存法と提案法の制御法により算出した  $\Delta\theta$  だけ体幹部モデルから離れるようにロボットを制御する。式 (8) を満たす時、その関節は収束したとみなして関節角修正値  $\Delta\theta = 0$  とする。全関節が停止し、ロボットが収束状態になるまで制御する。なお収束までの時間は、式 (3) における  $M, D, S$  のパラメータ調整により変動するため調整を要するが、本稿では考慮しない。

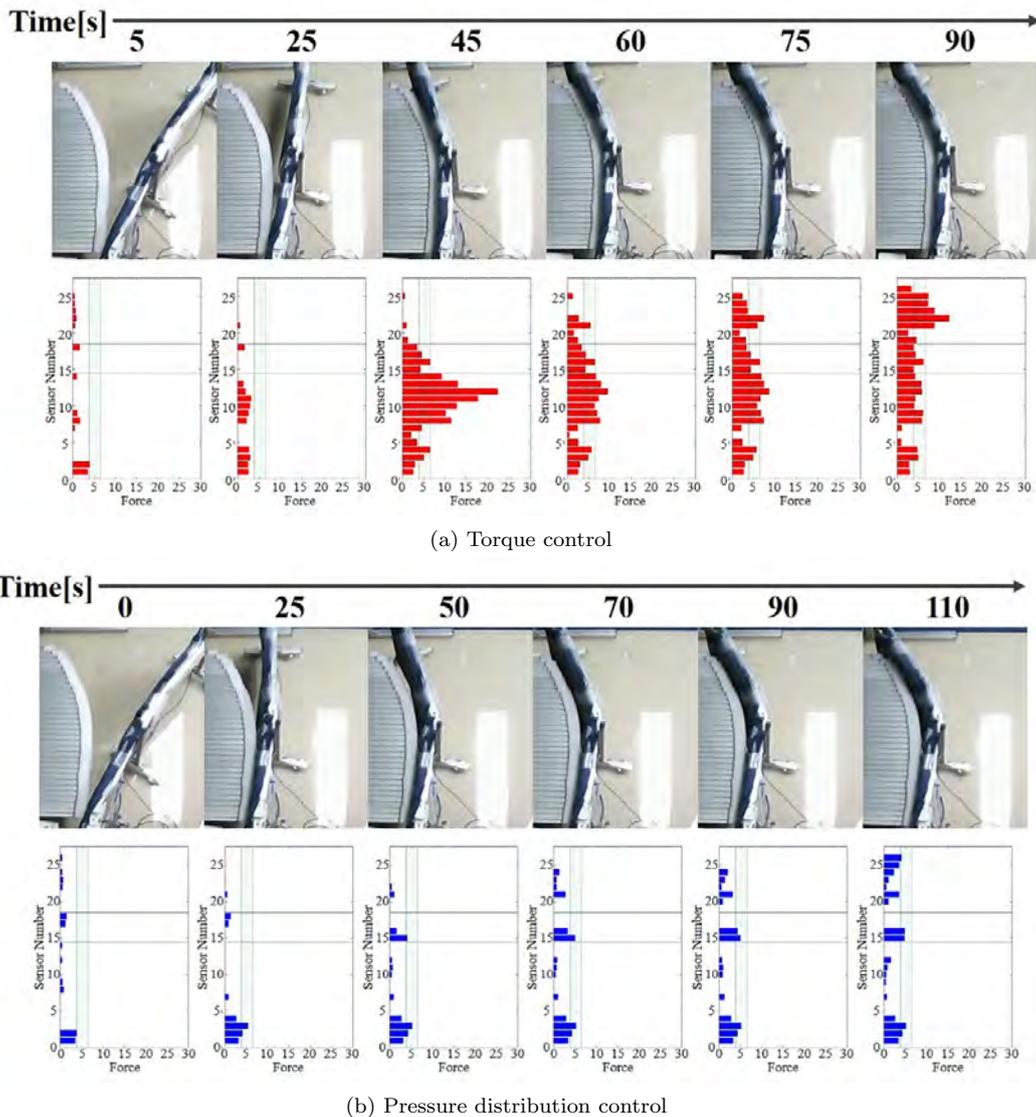


Fig.5: Time series of movements of robot in the experiment

#### 4.2 実験結果

図 5 にトルクベース制御におけるトルク偏差  $\tau$  (赤線) と圧力分布ベース制御における疑似トルク偏差  $\tau^+$  (青線) を示す。縦軸が制御量  $\tau$  と  $\tau^+$  であり、横軸が計測時間である。  $\tau_{min}$  と  $\tau_{max}$  の値がリンクにより大きく異なるので 4 つのグラフの縦軸の範囲は異なる。今回の実験では大きく離れた状態からロボットを近づけているため時間がかかってしまっているが、  $\tau$  と  $\tau^+$  が所望の範囲に収まり、ロボットが収束している。

図 5(a) の上段にトルクベース制御における実験開始から収束するまでのロボットの動きを、下段にロボットの姿勢に対応した接触力分布を示す。下段のグラフの縦軸は図 1(b) で示したセンサセルの番号で腰から順に首まで対応しており、横軸が接触力の大きさである。収束域を網掛けで示している。圧力分布ベース制御における同様の結果を図 5(b) に示す。図 5(a) のトルクベース制御においては 0~45[s] の間はロボットは全体的に近づく方に制御しており、45[s]~90[s] の間はトルク偏差  $\tau$  に基づき、ロボットは全体的に離れる方向に制御している。90[s] ではロボットは収束している。45[s] ではリンク 2 に局所的な大きな接触力が発生しており、人体に危険を及ぼす可能性がある。90[s] で収束した時も、リンク 4 での接触力が所望の範囲に収まらず、人体に危険な力がかかる可能性がある。図 5(b) の圧力分布ベース制

御においても同様に 0~50[s] の間はロボットは全体的に近づく方に制御しており、50[s]~110[s] の間は疑似トルク偏差  $\tau^+$  に基づき、ロボットは全体的に離れる方向に制御している。110[s] ではロボットは収束している。全時刻において局所的な力は発生しておらず、収束時においても各リンクの最大接触力が所望の範囲に収まっており、安全であると言える。

図 7 にトルクベース制御 (赤線) と圧力分布ベース制御 (青線) の実験開始から収束までの各リンクの最大接触力の変化を示す。縦軸が最大接触力を横軸が計測時間である。つまり図 5 の接触力分布の最大接触力のみを時間変化を示している。図 5(a) の 45[s] で大きな力が発生していたが、図 7(b) でも 50[s] 付近で最大接触力が大きくなっている。また図 6(d) のトルク偏差  $\tau$  としては収束しているが、図 7(d) を見ると、最大接触力は大きくなってしまっている。一方、圧力分布ベース制御の最大接触力の時間変化を見てみると全時刻において大きな力が発生することはなく、安全な制御ができたと言える。

以上より、実機において提案法の圧力分布ベース制御の方が収束時においても過渡時においても安全性が向上したと言え、接触力という評価項目において有効性が確認できた。

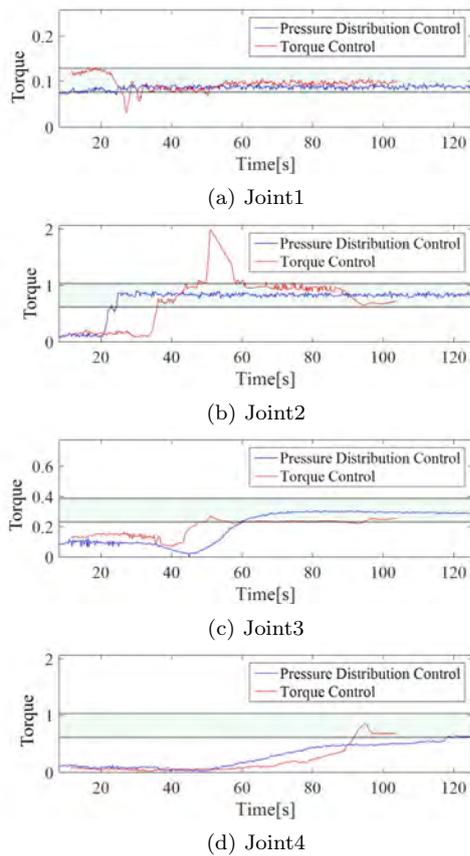


Fig.6: Time series of measured torque

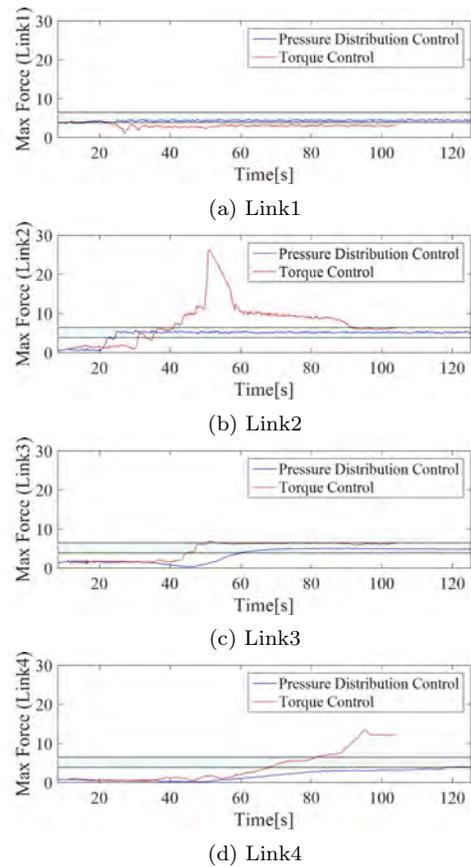


Fig.7: Time series of maximum force

5. 結論

本稿では、収束するまでの接触力の分布の変化から既存法と提案法を比較した。限定された条件ではあるものの、リンク表面に取り付けた圧力センサから取得した圧力分布情報に基づき制御することで、収束時のみだけでなく過度時でも人体にかかる力を低減できた。

今後は屈曲運動中の様々な姿勢に関して実機にて検証するとともに、リンク間の影響を考慮した手法に拡張し、収束時と過度時両方の最大接触力の低減を試みる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費若手研究 (B)2687024, 若手研究 (A)16H05915 の助成を受けて実施したものである。ここに謝意を示す。

参考文献

- (1) 総務省統計局, “日本の統計 2016”, 2016
- (2) 中村尚彦, 小管一弘, 平田泰久, “人体モデルに基づいた下肢用装着型抗重力筋支援システム”, 日本機械学会論文 (C 編), 71 巻 702 号 (2005-2)
- (3) 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 (C 編), 76 巻 762 号 (2010-2), No.09-7030, 2010.
- (4) 大阪府立公衆衛生研究所, “高齢者介護サービス事業者の腰痛・顎肩腕障害の軽減策に関する調査”, 2010
- (5) 株式会社イノフェス, “マッスルスーツに新たに 3 タイプ追加 2016 年春に順次試験販売”, プレスリリース, 2016
- (6) アクティブリンク株式会社, “重量物の上げ下ろし動作時の身体負担を軽減する「アシストスーツ AWN-03」を発売”, プレスリリース, 2015

- (7) Yuki Funabara, Hyungeun Song, Shinji Doki, and Kae Doki, “Position Based Impedance Control based on Pressure Distribution for Wearable Power Assist Robots”, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics(SMC), 2014
- (8) Kong, Kyoungchul, Joonbum Bae, and Masayoshi Tomizuka, “Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human robot interaction applications,” Mechatronics, IEEE/ASME Transactions, pp.105-118, 2009.
- (9) 内山直哉, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵, “人体との接触状態に基づく多関節装着型ロボットのインピーダンス制御”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, Y-81
- (10) Naoya Uchiyama, Yuki Funabara, Shinji Doki, Kae Doki, “Impedance Control based on Pressure Distribution for Wearable Assist Robot on Multi-joint body part”, 5th IEEE International Conference on Control Systems, Computing and Engineering, 2015.
- (11) 内山直哉, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵, “逆運動学を用いた接触面の圧力分布情報に基づく多関節装着型アシストロボットの制御”, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2015.
- (12) 佐藤飛鳥, 内山直哉, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵, “多関節装着型ロボットにおける人体との接触状態を考慮した制御法の実機実装”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A1-13b3