体幹部全体を安全にアシストする多関節装着型ロボットの実現に向けた 逆運動学に基づく人体との接触力分布フィードバック制御の提案

舟 洞 佑 記*・内 山 直 哉*
道 木 慎 二*・道 木 加 絵**

Contact Force Distribution Feedback Control Based on Inverse Kinematics
with a Multi-joint Wearable Robot for Safe Assist on Entire Torso

Yuki FUNABORA*, Naoya UCHIYAMA*,
Shinji DOKI* and Kae DOKI**

This paper presents a contact force distribution feedback control system for developing safe wearable assistive robots. In order to ensure the safety of the user wearing an assist robot being different structure from the assisting part (e.g. entire torso assist with several actuators), a control system based on contact force distribution measured via tactile pressure sensors (pressure distribution sensors) is proposed. By utilizing the tactile sensors on the robot's surface, the robot can measure physical contact force distribution as pressure distribution and control it to suppress excessive. In our previous research, a control methodology with pseudo torque generated from maximum contact force measured by tactile sensors was proposed, however, amplitude of contact force needed to reduce according to pain tolerance of human body parts. A control methodology based on inverse kinematics, a known methodology on the field of serial link-type manipulators, is presented, and confirmed to be effective to improve safety from conventional torque-base control methodology on computer simulations.

Key Words: wearable assist robot, feedback control system, tactile pressure sensor, multi-joint robot

1. はじめに

日本を筆頭に高齢社会に直面する国が世界的に増加¹⁾しており、高齢社会に伴う介護者の負担軽減や健康寿命の延長が急務となっている。介護者の身体的負担軽減や要介護者のリハビリ用途を中心に、装着型アシストロボットが研究・開発されている^{2)~9)}。CYBERDYNE (株) の HAL[®]^{2)~5)}は、欧州だけでなく、米国でも医療認可を取得⁵⁾し、リハビリ用途を中心に活躍している。(株) ATOUN は、腰用のパワーアシストスーツである ATOUN MODEL Y⁶⁾を開発・販売しており、もち上げ動作における腰関節の負荷を低減した。このように、脚部や腕部、腰部などの部分的な身体動作をアシストする装着型ロボットの実用化が進められている。

介護従事者へのアンケート¹⁰⁾によると、介護従事者の71%が

腰部に、50%が背中部に、64%が首部に身体的負担(こり・だるさ)を感じている。腰部・背中部・首部を含む体幹部全体の身体動作に伴う負担がある一方、実用化の進むロボットは、関節部ごとの動作に対するアシストに留まっている。体幹部の身体動作を補助する受動的なアシストスーツ¹¹⁾が開発され、体幹部全体をアシストすることの有効性が示されつつあるものの、体幹部全体の身体動作を能動的にアシストするロボットは十分に研究されていない。著者らは、負担の大きな腰・背中・首部を含む体幹部全体を能動的にアシストできれば、介護者の身体的負担を大きく低減できると考える。

体幹部の身体動作の内、介護作業において特に負担の大きな屈曲動作に限定した場合でも、体幹部用装着型ロボットの実現にはいくつかの課題がある。装着型ロボットは、一般的に、リンクやベルトなどの力の伝達部位を介して、着用者に直接力を加えて身体動作をアシストする。身体動作の安全なアシストには、着用者に過度な力を加えることを回避する必要がある。実用化されたロボット²⁾では、人体に危害を加えない範囲にアクチュエータ出力を制限することで安全性を担保することが多い。腕部や脚部などでは、着用部と類似機構のロボットが製作できるため、人体の関節と明確に対応したロボット関節部のアクチュエータにおいて関節角度やトルク出

* 名古屋大学大学院工学研究科 名古屋市千種区不老町

** 愛知工業大学大学院工学研究科 豊田市八草町

* Graduate School of Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

** Graduate School of Engineering, Aichi Institute of Technology,
Yakusa-cho, Toyota
(Received November 2, 2018)
(Revised January 25, 2019)

力などを制限することで安全性が担保できる。一方、体幹部は26の骨からなる脊椎¹²⁾を含む複雑な部位であり、同一機構のロボット製作は困難である。体幹部の屈曲動作を解析して類似した動作を実現可能なロボットの機構は議論された¹³⁾が、対応する関節部が明確ではないため、関節レベルでの角度制限・出力制限のみでは着用者の安全が担保できるとは限らない。

体幹部全体の屈曲動作を安全にアシストするために、著者らは、人体とロボット間の接触により生じる力（接触力）をロボット表面に配置した面状圧力センサで直接計測、過度な力の発生を抑制する制御系を研究してきた^{13)~16)}。装着型ロボット以外の分野では、面状圧力センサで計測した人体とロボットの接触力の分布を活用した研究事例^{17), 18)}がある。Moriら¹⁷⁾は、介護支援ロボット RIBA II による被介護者乗移タスクの安全性向上のために、腕部に搭載した面状圧力センサで計測した被介護者との接触力分布を活用した。抱上げる直前の接触力分布と被介護者-ロボット間の相対位置を学習、抱上げに適したロボット位置範囲からのずれを推定し、ロボット操縦者に提示する。パターン化した抱上げ動作を機能させるための離散的な位置提示（9つの範囲）を目的としている。御崎ら¹⁸⁾は、寝たきりによる褥瘡防止のために、人とマットレス間の接触力分布を活用した。マットレスは多数のエアセルで構成されており、接触力の大きいセンサセルに対応するエアセルを駆動し、逐次的にマットレスを変形することで臥床者の接触力を分散させる。

これに対して著者らは、文献13), 14)において、既存のトルクに基づくインピーダンス制御⁹⁾の枠組みを活用し、面状圧力センサで計測した大きな接触力を優先的に解消する疑似的なトルク指令に基づく制御系を提案、安全性向上に一定の効果があることを示した。しかしながら、人体表面形状計測結果に基づいてロボットが着用者に加える力を模擬したシミュレーションにおいて、人間が許容可能な痛覚耐性限界値¹⁹⁾以上の力を加えた場合が確認され、過度な力を十分に抑制できていなかった。単関節部を対象とした既存の枠組みの制約（関節独立な制御）を受けた結果、上記の問題が残存したと考える。無論、面状圧力センサで計測した接触力が痛覚耐性限界値を超えないように出力を抑制すれば最低限の安全は保障できるが、接触力分布自体を制御できることが望ましい。

そこで著者らは、文献13)で議論したロボット機構で、面状圧力センサで計測した接触力を利用して効果的に接触力分布を制御するために、既存のシリアルリンク型マニピュレータにおける運動学の知見²⁰⁾を基に、複数関節を協調して制御する手法を検討してきた^{15), 16)}。この手法は、面状圧力センサによる接触力分布の計測値を全体的に指令値に近づける関節位置（リンク姿勢）を推定、逆運動学により複数関節の指令値を算出して制御を行なうものである。残存する誤差を運動学モデルを駆使して抑制するオーソドックスな制御のアプローチであり、これまでに要素となる制御法の提案、および、原理検証を報告してきたが、アシスト可能性を含む定量的な

Fig. 1 The assumed multi-joint robot with tactile sensors for assisting a forward bend of body trunk

議論は不十分であった。本論文では、既存のトルクに基づく制御系⁹⁾を比較対象に、実際の人間の屈曲動作を反映したシミュレーションにより、逆運動学に基づく接触力分布フィードバック制御系の安全性とアシスト可能性を痛覚耐性限界値から定量的に評価する。

2. 問題設定

体幹部の基本的な動作である前屈動作を、面状圧力センサをリンク表面に搭載したシリアルリンク型ロボットでアシストすることを想定する（Fig. 1 参照）。ロボットの構造は先行研究¹³⁾にて決定した4関節4リンクとし、リンク長は腰側から順に40, 320, 120, 320 mmとした（腰関節下部の固定部を除く）。リンク幅は全リンク100 mmで一定とした。関節番号は、腰側関節から首側へ向かって順に0~3とし、関節角を $\theta = \{\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ とする。ロボットはベルトによって着用者に装着すると仮定し、着用者とロボットが互いに押す場合と、ベルトを介して相互に引く場合の2方向の物理的な力（接触力）の発生を仮定する。これらの接触力をロボットが能動的に着用者に加えることで、着用者の前屈動作をアシストする。なお実応用においては、ロボット自体の重さが着用者への負荷になることを避けるため、脚部のアシスト機構と連結して使用することを想定している。

着用者とロボット間に生じる接触力は、人体表面形状とロボットモデルの位置関係から求める。装着により人体とロボットが接触すると、人体接触部の自然な表面形状がロボットのリンク部（ベルト部）に沿って変形するが、このとき、変形量が大きいかほど大きな接触力が発生すると考えられる。そこで、ロボット未装着状態での人体表面形状を計測、人体表面形状とロボットのリンク部との位置が離れているほど装着時に大きな力が、近いほど小さな力が生じると考え、両者の間の接触力をモデル化する。リンク部を平面（リンク長×リンク幅）で近似したロボットモデルと、装着部（接触部）である人体背面の形状を点群として計測したデータ（以下、形状データ）の距離に応じて、人体とロボット間に生じる接触力の分布を模擬する。Fig. 2のように距離画像センサ（Microsoft社 Kinect V2）で人の屈曲動作を計測し、上半身背面形状の

Fig. 2 Measurement conditions and an example of shape data of body trunk surface in bending motion

Fig. 3 Captured time series shape data and corresponding postures in a bending motion

時間変化を時系列点群データとして取得した。前屈動作は1サイクル（直立-前屈-直立）を約15秒で行なった。計測周期50msで2サイクル（600フレーム）分の時系列点群データを取得した。取得した形状データの一例を**Fig. 3**に示す。形状データ内の点群数は、背面全体で最小14172点、最大15285点であった。ロボットは腰関節下部で着用者に固定するとし、形状データの腰位置とロボットの腰関節位置を一致させた（**Fig. 4(a)**参照）。その上で、“リンク上に位置する形状データ中の i 番目の点在最も近いリンクに接触力 f_i を発生する”との仮定の下、 i 番目の点が発生する接触力を(1)式で模擬した。

$$f_i = \begin{cases} +K_B D_i & \text{case of pressing} \\ -K_F D_i & \text{case of pulling} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 D_i は i 番目の点と最も近いリンク部面とのユークリッド距離、 K_B 、 K_F はおのの人体背部と腹部の弾性係数（本論文では $K_B = 9.8$ 、 $K_F = 2.5 \text{ N/mm}$ と設定¹⁹⁾）である。Fig. 1に示したとおり、正の力がロボットのリンクが直接人体背面を押す力を、負の力がロボットがベルトを介して人体を引く力を模擬している。Fig. 4(a)の位置関係において発生する接触力分布をFig. 4(b)に示す。実世界では、ロボットを装着する際のベルトによっては接触力が偏る可能性

(a) A relative position of the robot model and a measured shape data (b) A modeled force distribution applying to the user (f_i distribution)

Fig. 4 Modeling of contact force (f_i) from the robot link model and a measured shape data

(a) Definition of cell arrangement (b) An example of measured contact force distribution (F from P) via a tactile sensor

Fig. 5 Modeling of a tactile sensor mounted link surface

があるが、本論文では距離に応じた垂直方向の力が人体に加わるとした。

接触力を計測する面状圧力センサは**Fig. 5**のようにモデル化した。面状圧力センサは20mm角のセルで構成（SRソフトビジョン数値版²¹⁾を想定、Fig. 5(a)参照）し、セルごとにセル内の平均接触力に対応する圧力値を計測できると仮定した。たとえばFig. 4(b)の接触力 f_i の分布に対し、面状圧力センサで計測、力に再変換した力分布の計測値はFig. 5(b)になる。全リンク上の全セル（200セル）で計算した圧力ベクトル P を、面状圧力センサの計測値とした。

本章の設定に基づいて、提案する接触力分布情報に基づく制御法をシミュレーションにて検証する。なお提案法の有効性は、関節部で計測した接触に伴うトルク値に基づくインピーダンス制御法⁹⁾（以下、既存法）を比較対象として議論する。既存法で必要となる接触により生じるトルクは、リンクごとにリンク上に分布する f_i から求めた。

Fig. 6 The block diagram of the proposed control system

3. 接触力分布情報に基づく制御系

面状圧力センサで計測した接触力分布情報に基づく制御方法を説明する。本論文では、マニピュレータの知見を活かし、4つの関節を連動させて制御することで、リンク部に生じる接触力分布を全体的に指令分布に近づける。指令分布に近づけるアプローチはいくつか考えられるが、ここでは、指令分布と計測した現在の接触力分布との接触力誤差分布を算出、ロボットの運動学の知見に基づき誤差を逐次的に抑制するオーソドックスな制御アプローチを採用する。

提案する制御系を Fig. 6 に示す。 F^* はアシストのための理想的な接触力指令分布であり、上位の制御ループから与えられる。 P は面状圧力センサによる計測値であり、圧力と力の関係式から接触力分布の計測値 F に変換する。 F^* と F の差が接触力誤差分布 ΔF である。 ΔF を減少させるようにロボットの関節角 θ を制御する。

リンクごとに、リンク上の ΔF を最小化する理想的なリンク姿勢を算出 (Fig. 7 (a)(b))、理想的なリンク姿勢に近づけるための関節位置の修正方向 (関節位置修正ベクトル $\Delta r = \{\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, \Delta r_4\}$) を算出 (Fig. 7 (c))、 Δr を可能な限り実現する関節角修正量 $\Delta \theta = \{\Delta \theta_0, \Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3\}$ を求める (Fig. 7 (d))。一般的な位置制御系を用いて、次ステップで $\Delta \theta$ を実現するようにロボットの関節角 θ を逐次的に制御する。以下、提案システム特有な関節位置推定ブロックと疑似逆行列ブロックを説明する。

3.1 関節位置推定ブロック

関節位置推定ブロックでは、入力 ΔF から各関節位置の修正方向を示す関節位置修正ベクトル Δr を算出する。

ΔF の要素は、各セル位置に残存する接触力誤差である。そこで、 ΔF と人体の弾性係数¹⁹⁾から、 ΔF の各要素をゼロとする理想的なセル位置をセルごとに求める (Fig. 7 (a))。一般的に、ロボットの関節数に対して面状圧力センサのセル数は十分に多いため、すべてのセルの誤差をゼロにすることは事実上不可能である。そこで、リンクごとに、理想的なセル位置群に対する近似直線を最小二乗法で求める (Fig. 7 (b)) ことで、リンク上のセル群の誤差を可能な限り抑制する。ここで、ロボットの動作は x-y 平面上に制約されているが、面状圧力センサのセルはリンク幅方向にも複数セル存在する (2章の設定では5セル, Fig. 5 参照)。幅方向のセルの扱いはさまざま考えられるが、本論文では、“大きな力を優先的に減らすことが着用者の安全性を高める”との考えの下、リ

Fig. 7 Calculation concept from ΔF to $\Delta \theta$ in proposed control system Fig. 8 Determination of Δr from ΔF

ンク幅方向において力が最大になるセルのみに着目し、理想的なセル位置群を算出、近似直線を求める。リンク姿勢を近似直線に近づけることで ΔF は減少すると考え、近似直線方向にリンク両端の関節位置を動かす。即ち、 n 番目のリンク ($n = 1 \sim 4$) において、 $(n-1)$ 番目と n 番目の関節位置の修正方向 Δr_{n-1}^n と Δr_n^n が、おのおの (2) 式と (3) 式で求める (Fig. 8 (a) 参照)。

$$\Delta r_{n-1}^n = \frac{a_n x_{n-1} + y_{n-1} + b_n}{a_n^2 + 1} (-a_n, 1) \quad (2)$$

$$\Delta r_n^n = \frac{a_n x_n + y_n + b_n}{a_n^2 + 1} (-a_n, 1) \quad (3)$$

ここで、 x_n と y_n は n 番目の関節位置 ($n = 4$ のときはリンク先端に相当) の x と y 座標であり、 a_n と b_n は最小二乗法で求めた近似直線の係数である。

n 番目の関節位置修正ベクトル Δr_n は、接続する2リンクの修正方向 Δr_n^n と Δr_{n+1}^{n+1} を (4) 式で合成して求める (Fig. 8 (b) 参照)。

$$\Delta \mathbf{r}_n = \begin{cases} K_n \Delta \mathbf{r}_n^n & n = 4 \\ K_n (\Delta \mathbf{r}_n^n + \Delta \mathbf{r}_n^{n+1}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで K_n は、 $\Delta \mathbf{r}_n$ の大きさを調整するゲインである。

3.2 疑似逆行列ブロック

疑似逆行列ブロックは、入力 $\Delta \mathbf{r}$ をロボット関節部のアクチュエータへ指令可能な出力 $\Delta \boldsymbol{\theta}$ に変換する。一般的なシリアルリンク型マニピュレータでは、リンク先端のエンドエフェクタ位置における位置修正ベクトル (Fig. 7 (c) の $\Delta \mathbf{r}_4$ に相当) を逆ヤコビ行列を用いて $\Delta \boldsymbol{\theta}$ に変換する^{22), 23)}。提案システムでは、4つの関節位置を含む $\Delta \mathbf{r}$ から $\Delta \boldsymbol{\theta}$ に変換するため、既存の逆ヤコビ行列はそのまま適用できない。ここでは、全関節位置に対するヤコビ行列を連立させた拡張ヤコビ行列を求め、拡張ヤコビ行列に対する疑似逆行列から $\Delta \boldsymbol{\theta}$ を求める。

個々の関節位置修正ベクトル $\Delta \mathbf{r}_1, \dots, \Delta \mathbf{r}_4$ と関節角修正量 $\Delta \theta_0, \dots, \Delta \theta_3$ は、おのおの次式で定式化できる。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{r}_1 = \mathbf{J}_1 \Delta \theta_0 \\ \Delta \mathbf{r}_2 = \mathbf{J}_2 (\Delta \theta_0, \Delta \theta_1)^T \\ \Delta \mathbf{r}_3 = \mathbf{J}_3 (\Delta \theta_0, \Delta \theta_1, \Delta \theta_2)^T \\ \Delta \mathbf{r}_4 = \mathbf{J}_4 (\Delta \theta_0, \Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3)^T \end{cases} \quad (5)$$

$\mathbf{J}_n$ は n リンクロボットのヤコビ行列である。ここで、拡張ヤコビ行列 $\mathbf{J}$ を (6) 式で定義し、(5) 式を (7) 式で表わす。

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ & \mathbf{J}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ & & \mathbf{J}_3 & \mathbf{0} \\ & & & \mathbf{J}_4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{J} \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (7)$$

($\Delta \mathbf{r}$ の次元数) > ($\Delta \boldsymbol{\theta}$ の次元数) であるから $\mathbf{J}$ は正方行列でなく、(7) 式の逆行列は存在しない。そこで、(8) 式で定義される Moore-Penrose 疑似逆行列 $\mathbf{J}^+$ を用いて、(9) 式により $\Delta \boldsymbol{\theta}$ を求める。

$$\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \quad (8)$$

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^+ \Delta \mathbf{r} \quad (9)$$

なお Moore-Penrose 疑似逆行列は、正方性を満たさないロボティクス分野の逆行列計算に広く用いられている^{24), 25)}。

4. シミュレーション

シミュレーションにより提案法の有効性を検証する。本論文では、制御系の原理的な有効性を検証することを目的とし、最も基本的な非アシスト状態 ($\mathbf{F}^* = \mathbf{0}$, 装着者の前屈動作に追従させるモード) において人体に加えた接触力 (残存した f_i の分布) から提案法を評価する。比較対象は、関節トルクに基づく既存法⁹⁾とした。

Table 1 Setting parameters for conventional torque base impedance control

joint	M $\frac{Nm}{deg/s^2}$	D $\frac{Nm}{deg/s}$	K $\frac{Nm}{deg}$
1	4.0×10^{-3}	3.0	150
2	3.0×10^{-3}	2.0	350
3	2.0×10^{-3}	1.0	400
4	1.0×10^{-3}	1.0	450

まず 4.1 節において、2 章で説明した特定被験者の前屈動作を対象に、各制御法によるロボットの挙動や人体とロボット間に生じた接触力を詳細に議論する。4.2 節では、提案法の有効性を広く検証するために、複数被験者の前屈動作に対する結果を議論する。4.3 節では、本シミュレーションで用いた仮定と実機実装時に想定される問題について議論する。

4.1 特定被験者動作に対する検証

2 章で説明した特定被験者 (20 代健康男性) の前屈動作を対象に、人体とロボット間に生じた接触力から各制御法の特性を議論する。時刻 $t = 0$ において、人体背面の形状データに沿うようにロボット姿勢を調整 ($\boldsymbol{\theta} = \{56.5, 30.0, -21.0, -26.5\}$ degree) した後、各制御法で前屈動作に追従するように制御する。既存法では、各関節部の接触に伴うトルクの時間変動を確認しつつ試行錯誤的に調整したインピーダンスパラメータ (Table 1) を用いた。実際の装着を想定して初期姿勢を調整したことで、制御が破綻しない限り、形状データとロボットモデルが大きく離れることはない。即ち、提案法の理想的なロボット姿勢が現在のロボット姿勢から大きく離れることはないため、微小変位の調整ゲイン K_n はすべて 1 とした。

シミュレーション結果を Fig. 9 に示す ((a) が既存法, (b) が提案法)。Fig. 9(a)(b) 共に、上段が形状データとロボット姿勢の時間変化、下段がロボット姿勢と人体に加えた接触力 f_i の分布の時間変化を表わす。 f_i 分布は人体右側から見た図であり、リンク上の線の起点が力を加えた部位、線の方向が力の向き (リンク左側が背側、右側が腹側) に相当する。リンク中心からの線の長さが絶対的な力の大きさを、線の色が背側・腹側の痛覚耐性限界値 (人体が許容可能な接触力の限界値)¹⁹⁾ でおのおのスケーリングした相対的な力の大きさを示す。背側・腹側の痛覚耐性限界値をおのおの赤色とした。図中のロボット姿勢の時間変化を見ると、両手法とも形状データに追従しており、大きな差異がないように見える。一方、人体の弾性係数 ($K_B = 9.8$, $K_F = 2.5 \text{ N/mm}$)¹⁹⁾ を踏まえると、ロボット姿勢の微小な違いが f_i に大きく影響する。そこで、各時刻で残存した f_i の大きさから両手法を比較する。既存法で制御した Fig. 9(a) では、 $t = 2.76, 5.74, 10.00, 20.00, 25.90$ で痛覚耐性限界値の半分以上の接触力 (緑～黄色) が残存した。一方、提案法で制御した Fig. 9(b) では、最大でも $t = 5.45, 27.41$ で痛覚耐性限界値の半分程度までの接触力 (最大で緑色程度) になり、 f_i 分布の大きさを全体的に低減できた。(1) 式で求めた f_i をトルクセンサで計測して既存法で制御すると、局所的に発生した f_i が計測されるトルク値に十分反映されず、結

Fig. 9 Observed robot motion and force distribution in forward bending motions

Fig. 10 Time series of maximum and average of distributed $\|f_i\|$ during bending motions

Fig. 11 Histogram of amplitude of applied contact force, distribution of f_i , during bending motions

果として大きな f_i が残存した。一方、同様の f_i であったとしても、面状圧力センサで計測して提案法で制御することで、 f_i の大きさを直接制御に反映することができ、大きな f_i の発生が抑制された。

人体に加えた接触力を定量的に評価するために、 f_i 分布の平均値と最大値の時間変化を Fig. 10 に示す。横軸が時刻、縦軸が接触力の大きさ、実線が分布最大値、破線が分布平均値を示す。赤が既存法、青が提案法である。Fig. 10(a) と (b) はおのおの背側と腹側の接触力である。既存法では、時刻 2.76 s で背側に最大 187.7 N の力を、時刻 25.9 s で腹側に最大 95.3 N の力を人体に加えていた。文献 19) によると、人体背側と腹側の痛覚耐性限界値はおおの 294 N と 125 N である。着用者への安全性の観点から、許容可能な限界値である痛覚耐性限界値を超える接触力を人体へ加えてはならない。また痛覚耐性限界値には個人差もあり、背側で約 15%、腹側で約 28% の変動があるとされる¹⁹⁾。既存法では、特に腹側において痛覚耐性限界値の 76% の大きさの力に加えられており、個人による痛覚耐性限界値の変動と人体への安全性の観点から、アシストを行なう余地がほぼないといえる。提案法においては、時刻 25.9 s で背側に最大 163.0 N、時刻 5.45 s で腹側に最大 63.8 N を加えていた。背側、腹側でおの痛覚耐性限界値の 55.4%、51.0% に留めることができ、個人による痛覚耐性限界値の変動がある場合でも、アシスト状態で十分に運用できる可能性が見えた。

動作中に残存した接触力 f_i の大きさの頻度分布を Fig. 11 に示す。横軸は f_i の大きさ、縦軸は発生頻度である。提案法の頻度分布は、背側、腹側ともに既存法よりも左側にシフトしており、屈曲動作中に着用者に意図せず加えた力の大きさを全体的に低減できた。非アシスト状態の検証において、接触力分布情報を利用した提案法により、体幹部用多関節装着型ロボットの安全性が向上したといえる。屈曲動作時に人体を支えるアシストを想定すると、おおむね 50 N までの接触力分布を全体的に人体腹側に加えることが可能になったと見込める。接触力誤差分布を制御周期ごとに逐次的にフィードバックするオーソドックスなアプローチであっても、接触力分布を制御に利用した効果が見られた。結果として、人体と対応する関節部が明確でない体幹部用多関節装着型ロボットにおいても安全にアシストを行なう余地ができた。

4.2 複数被験者動作に対する検証

着用者が異なる場合における提案法の有効性を確認する。2 章の被験者に加え、8 名の被験者の前屈動作を計測し、4.1 節と同様のシミュレーションを行なった。

20 代健常男性 8 名（身長 161~177 cm）を対象に、2 章と同様の条件で前屈動作を計測して形状データを取得した。2 章の被験者も含めた合計 9 人分の形状データに対して、おのの既存法と提案法でロボットを制御した際に発生した最大接触力を比較する。なお、計測した形状データの最小点群数と最大点群数の 9 人分の平均値は、おのの 17082.7 点と 20301.4 点であった。被験者ごとに初期姿勢が異なるため、時

Table 2 Maximum contact force between human body and robot on individual subject

subject number	conventional		proposed	
	back	front	back	front
1	187.7 N (63.8%)	95.3 N (76.2%)	163.0 N (55.4%)	63.8 N (51.0%)
2	232.2 N (79.0%)	105.0 N (84.0%)	158.9 N (54.0%)	75.5 N (60.4%)
3	318.7 N (108.4%)	90.5 N (72.4%)	183.5 N (62.4%)	81.6 N (65.3%)
4	231.8 N (78.8%)	142.7 N (114.2%)	163.2 N (55.5%)	67.2 N (53.8%)
5	176.0 N (59.9%)	83.1 N (66.5%)	173.7 N (59.1%)	81.0 N (64.8%)
6	217.3 N (73.9%)	106.2 N (85.0%)	167.2 N (56.9%)	69.7 N (55.8%)
7	187.0 N (63.6%)	103.8 N (83.0%)	150.7 N (51.3%)	74.3 N (59.4%)
8	198.1 N (68.4%)	90.1 N (72.1%)	163.7 N (55.7%)	86.8 N (69.4%)
9	149.3 N (50.8%)	128.7 N (103.0%)	196.0 N (66.7%)	102.1 N (81.7%)
Average	210.9 N (71.7%)	105.0 N (84.0%)	168.9 N (57.4%)	78.0 N (62.4%)

刻 $t = 0$ における各被験者の形状データに沿うようにロボットの初期姿勢を調整した。既存法のインピーダンスパラメータと提案法のゲイン K_n は、4.1 節と同様の値を用いた。

既存法・提案法でロボットを制御したときに、背側・腹側に発生した最大接触力を Table 2 にまとめる。ここで、括弧内は痛覚耐性限界値に対する最大接触力の割合を表わす。なお被験者 1 は、4.1 節で詳細に検証した 2 章の被験者である。既存法と提案法の最大接触力を比較すると、被験者 9 の背側以外で、提案法が既存法を下回った。ここで被験者 9 の最大接触力に着目すると、既存法では腹側が痛覚耐性限界値を超えていた。一方、提案法では、背側の最大接触力は既存法より増加したものの、背側・腹側ともに最大接触力が痛覚耐性限界値を下回った。接触力分布を利用した提案法により、腹側の大きな接触力を背側に逃がすように制御できたと考えられる。

既存法では、被験者 9 の腹側以外にも、被験者 3 の背側、被験者 4 の腹側で痛覚耐性限界値を超えた。一方、提案法では、全被験者の背側・腹側ともに痛覚耐性限界値を下回った。ここで、最大接触力の被験者平均を見ると、既存法は背側、腹側がそれぞれ 71.7%、84.0% であった。文献 19) の痛覚耐性限界値の個人差による変動（背側で約 15%、腹側で約 28%）を考慮すると、非アシスト状態でも既存法では痛覚耐性限界値を超える可能性があり、4.1 節と同様にアシストの余地がないと判断できる。提案法で制御した際の 9 名の最大接触力の平均値は、背側、腹側がおのの 57.4%、62.4% であり、変動を考慮しても痛覚耐性限界値を下回る。同一機構のロボットであっても、接触力分布を利用した提案法で制御することで、体幹部用多関節装着型ロボットの安全性が向上し、アシストできる可能性が見えた。

4.3 考察

シミュレーション結果から、面状圧力センサを装着型ロボット表面に配置、接触力分布を計測、制御に利用することで、既存の関節部のトルクに基づく制御では抑制できない大きな接触力を低減でき、着用者の安全性に寄与することがわかった。一方で、本シミュレーションには実機実装時に成立するとは限らないいくつかの仮定がある。ここでは、本論文の仮定を踏まえ、実機実装時に想定される問題について議論する。

2章で説明したとおり、本論文では“リンク上に位置する形状データ中の*i*番目の点が最も近いリンクに接触力 f_i を発生する”との仮定の下、接触力を(1)式で模擬した。また、パラメータ K_B と K_F は一定値と仮定して f_i を計算した。ここで、接触力は、ロボットリンク部やベルト部が人体の皮膚を押込んで変形させた結果、変形量に応じて発生した力と考えられる。押込み量が比較的小さい場合には線形的に力が発生すると近似できるが、押込み量の増加に伴って、皮膚自体の変形に加えて皮下組織（脂肪や筋肉、骨の有無など）の影響を受け、線形近似が成立しなくなる。また、皮膚は位置によって厚みや皮下組織が異なるため、 K_B と K_F は接触位置に依存して変動する。加えて、体型にも関係するため個人差も存在する。このような接触力のモデル化誤差がシミュレーションに内在している。

人体とロボット間の摩擦により、ロボットが必ずしも皮膚を垂直に押込むとは限らず、接線方向の力（せん断力）が発生する場合がある。本論文では、形状データの各点と最短リンクとの距離から接触力を求めており、せん断力は無視している。実機においては摩擦によるせん断力は十分に発生する可能性がある。

Fig.1のようにベルトで装着する場合、固定位置の制約などから腹側全体に均一な張力で固定することは難しい。そのため、ベルト部上に生じる接触力が偏る可能性がある。本論文ではこの影響を無視して接触力を算出した。

モデル化誤差、せん断力の無視、接触力の偏りの無視などの仮定があり、実機で人体とロボット間に生じる接触力を厳密に模擬できているとはいえない。一方、仮定の下で計算した接触力ではあるものの、接触力から各種センサの計測値への影響、各種センサの計測値に基づいた制御による接触力の比較を通して、提案法が既存法より優位であることを示した。実機でもおのおのセンサの計測値から制御するため、接触力分布を利用した提案法がより真の接触力を抑制できる可能性は高い。体幹部の接触力分布を計測する実機を製作、実際に計測した接触力分布を用いた検証実験を進める必要がある。

5. 結 論

本論文では、面状圧力センサを表面に配置した多関節装着型ロボットにおいて、直接接触力を計測・フィードバックして接触力分布を全体的に低減する制御法を提案した。前屈動作時の人体表面形状計測に基づき人体との接触力をモデル化したシミュレーションにおいて、既存の関節トルクに基づく

制御法と比べ、提案法では人体に加えた接触力の大きさを低減でき、着用者の安全性が向上することを示した。具体的には、既存法では非アシスト状態でも痛覚耐性限界に近い過度な力を人体に加えた場合があったが、提案法では過度な力が抑制され、屈曲動作中に加えた力の大きさが痛覚耐性限界を十分下回った。結果として、体幹部全体の屈曲動作を4関節シリアルリンク型ロボットでアシストできる余地が見えた。

今後は、アシスト時の検証を進める。また、今回のシミュレーションでは特に接触力のモデル化にいくつかの仮定があり、実際の接触が十分に模擬できているとはいえない。そこで、体幹部の接触力分布を計測可能な実機を製作し、実際に計測した接触力分布を用いた検証実験を進める必要がある。これらの基礎実験を進め、体幹部全体の安全なアシストの実現に繋げる。

謝辞 本研究はJSPS科研費若手研究(B)26870274, 若手研究(A)16H05915の助成を受けて実施したものである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) United Nations: World Population Ageing 2017 Report, http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WPA2017_Report.pdf (参照日 2018年4月2日)
- 2) T. Hayashi, H. Kawamoto and Y. Sankai: Control method of robot suit HAL working as operator's muscle using biological and dynamical information, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 3455/3460 (2005)
- 3) K. Kiguchi and Y. Hayashi: An EMG-Based Control for an Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Robot, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, **42**-4, 1064/1071 (2012)
- 4) CYBERDYNE (株):「HAL[®] 腰タイプ 作業支援用」新モデル (LB03) 販売のお知らせ, プレスリリース (2017)
- 5) CYBERDYNE (株):医療用 HAL[®], 米国FDAから医療機器承認を取得～患者自身の歩行機能改善効果をもたらす世界初のロボット医療機器として、世界最大市場の米国へ展開～, プレスリリース (2017)
- 6) (株) ATOUN: 40 パーセントの軽量化に成功 介護用途にも対応した腰用パワーアシストスーツの新モデル「ATOUN MODEL Y」を販売, プレスリリース (2017)
- 7) H. Kazerooni, R. Steger and L. Huang: Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX), The International Journal of Robotics Research, **25**-56, 561/573 (2006)
- 8) 村田, 岡田, 山平, 原田, 藤井: 外乱オブザーバを用いた空気圧駆動関節アシストシステムの制御系の構成, 日本機械学会論文集, **81**-824, 14-00579 (2015)
- 9) K. Kong, J. Bae and M. Tomizuka: Control of Rotary Series Elastic Actuator for Ideal Force-Mode Actuation in Human-Robot Interaction Applications, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **14**-1, 105/118 (2009)
- 10) 大阪府立公衆衛生研究所: 高齢者介護サービス従事者の腰痛・頸肩腕障害の軽減策に関する調査, 大阪府立公衆衛生研究所 (2001)
- 11) Y. Imamura, T. Tanaka, Y. Suzuki, K. Takizawa and M. Yamanaka: Motion-Based-Design of Elastic Material for Passive Assistive Device using Musculoskeletal Model, Journal of Robotics and Mechatronics, **23**-6, 978/990

- (2011)
- 12) 斎藤, 高木: 翻訳 人体物理学, 65/76, エヌ・ティー・エス (2009)
 - 13) Y. Funabara, H. Song, S. Doki and K. Doki: Position Based Impedance Control based on Pressure Distribution for Wearable Power Assist Robots, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 1889/1894 (2014)
 - 14) 内山, 舟洞, 道木: アシストロボットの安全性向上をめざした接触面の圧力分布に基づくインピーダンス制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1A1-P05 (2015)
 - 15) N. Uchiyama, Y. Funabara, S. Doki and K. Doki: Control System based on Pressure Distribution for Wearable Assist Robot on Multi-Joint Body Part, 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision (ICARCV2016), Mo21.2 (2016)
 - 16) 内山, 舟洞, 道木, 道木: 体幹部の安全なパワーアシストのための面状圧力センサを搭載した多関節装着型ロボットの制御, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), 0250/0255 (2016)
 - 17) Y. Mori, R. Ikeura and M. Ding: Estimation of Care Receiver's Position Based on Tactile Information for Transfer Assist Using Dual Arm Robot, Journal of Robotics and Mechatronics, **26**-6, 743/749 (2014)
 - 18) 御崎, 今西, 高杉, 和田, 深川, 吉江: 体圧フィードバック型床ずれ防止マットレス, SEI テクニカルレビュー, **1**-184, 93/97 (2014)
 - 19) 斎藤, 池田: 人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性限界の測定, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.33 (2005)
 - 20) 日本ロボット学会: 新版 ロボット工学ハンドブック, 240/295, コロナ社 (2005)
 - 21) 東海ゴム工業 (株): 「SR ソフトビジョン 数値版」を発売, プレスリリース (2013)
 - 22) C.C. Cheah and H.C. Liaw: Inverse Jacobian Regulator with Gravity Compensation: Stability and Experiment, IEEE Transactions on Robotics, **21**-4, 741/747 (2005)
 - 23) D. Berenson, S.S. Srinivasa, D. Ferguson, A. Collet and J.J. Kuffner: Manipulation Planning with Workspace Goal Regions, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009), 618/624 (2009)
 - 24) M. Tucker and N.D. Perreira: Generalized inverses for robotic manipulators, Mechanism and Machine Theory, **22**-6, 507/514 (1987)
 - 25) Y. Zhang, Y. Yang, N. Tan and B.C. Zhang: Neural network solving for time-varying full-rank matrix Moore-Penrose inverse, Computing, **92**-2, 97/121 (2011)

[著者紹介]

舟 洞 佑 記 (正会員)

2012 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程電子情報システム専攻満期退学。同年理化学研究所基幹研究所特別研究員, 2013 年名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻助教, 現在に至る。博士 (工学)。主として, ロボティクス, 知能制御, ソフトコンピューティングに関する研究に従事。日本機械学会, 電子情報通信学会, 電気学会, IEEE 会員。

内 山 直 哉

2017 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程電子情報システム専攻修了。修士 (工学)。主として, 装着型アシストロボットの制御法に関する研究に従事。

道 木 慎 二 (正会員)

1995 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程電子機械工学専攻修了。同年同大学助手, 2000 年三重大学助教授, 2004 年名古屋大学助教授, 2007 年同大学准教授, 2012 年同大学教授, 現在に至る。博士 (工学)。主として, 制御理論にもとづく電動機制御, および制御のためのパターン情報処理・信号処理・モデリングとその応用に関する研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会, 自動車技術会, IEEE 会員。IEEE IECON'92 best paper award, 平成 14 年度ファナック FA ロボット財団論文賞, 平成 16, 27 年電気学会電気学術振興賞 (論文賞) を受賞。

道 木 加 絵 (正会員)

2002 年名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了, 同年愛知工業大学工学部電気工学科助手, 2007 年愛知工業大学工学部機械学科准教授, 2012 年愛知工業大学工学部電気学科准教授, 現在に至る。博士 (工学)。主として, 知的制御システム, ロボティクス, 知的情報処理に関する研究に従事。日本ロボット学会, 電気学会, IEEE 会員。