

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870274

研究課題名(和文) 柔軟な面状圧力センサを用いた多関節ロボットのインピーダンス制御

研究課題名(英文) Impedance Control for Multi-joint Wearable Assist Robots using Flexible Tactile Sensors

研究代表者

舟洞 佑記 (FUNABORA, Yuki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20633548

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：形状計測と最適化手法から成るシリアルリンク型ロボットの関節配置決定法を構築した。体幹部のように対応する関節が定まらない部位でも、装着に適したロボットの構造が求まるようになった。面接触情報に基づくインピーダンス制御法を検討し、既存の枠組みを拡張したパラメータ設計が容易な制御法と、関節間を協調させた発展的な制御法を提案した。直接人体に加わる力に基づく制御法の枠組みができ、装着型ロボットの安全性向上に繋がる可能性が見えた。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve safe assist for complex body part (body trunk), a structure determination method and novel impedance control systems have been researched. Basic structure of an assist robot (especially number of joint and link pattern) is determined through matching link pattern candidates with shape data of complex body part collected in human movements. Two novel impedance control systems based on physical contact forces measured by tactile sensors are proposed; one is tractable system using pseudo torque based on conventional torque base impedance control system, the other is advanced system based on inverse kinematics model of the robot to control all joints synchronously. By using these control systems, local contact forces with high magnitude occurred between user and robot can be reduced significantly. This research can realize safer assist system even for a complex body part.

研究分野：知能情報処理

キーワード：アシストロボット インピーダンス制御 面状圧力センサ 多関節装着型ロボット

### 1. 研究開始当初の背景

超高齢社会に伴い、介護者の作業負担の低減を目指した装着型ロボットによるパワーアシスト技術が研究され、実用化が進みつつある。脚や腕などの部分的な運動補助は実現されつつあるが、首・背中・腰からなる体幹部の運動補助は実現されていない。介護作業の中でも移乗作業（被介護者を持上げて車椅子等へ移動させる作業）は、特に介護者の腰部に大きな負担を与える。装着型ロボットの実用性向上には体幹部運動補助が望まれる。

82 個の脊椎から成る体幹部は、屈曲・傾げ・ねじり等、複雑に運動する。装着型ロボットの要素技術の一つに、装着者の運動を阻害しないようにロボットの機構を追従させるゼロインピーダンス制御がある。既存法[1]では、人体の装着部と同一構造となるロボットを製作し、装着者が発生する関節トルクに応じて対応する関節のトルクを制御することでゼロインピーダンス制御を実現していた。人体と同一構造が製作できる腕部や脚部では有用であるが、体幹部では、構造の違いから上記手法を直接適用できない可能性が高い。また、手先の接触点にかかる力を計測、ロボットの機構モデルに基づいて各関節トルクを計算し、手先でのインピーダンス制御を実現した研究もある。しかし、体幹部においては人間の柔らかさと脊椎の複雑さから単純な点接触を仮定できず、既存法は適用できない。人間と同様の構造製作が困難、かつ、面での接触となる体幹部におけるインピーダンス制御の実現が望まれる。

### 2. 研究の目的

装着者の自然な動きを柔軟にアシストするための要素技術として、実世界での接触と同様な面での接触、及び、多関節構造の駆動機構を対象としたインピーダンス制御法の検討と提案を行う。多自由度かつ動きに応じて軸ずれが生じる体幹部（首・背中・腰）の運動補助実現に向けた初期研究として、ここでは、介護支援分野で第一に必要とされる体幹部の屈曲方向の運動（以下、屈曲運動）に着目して、次の点を明らかにする。

(1) 体幹部の屈曲運動補助に適した多関節駆動機構：駆動系の体積当たりの出力を考慮すると、人間の体幹部と同一構造を持つロボットを製作することは困難である。そこで、屈曲運動支援に最低限必要な構造（関節数とリンク長）を明らかにし、制御手法を検証するためのロボットを試作する。

(2) 屈曲運動に伴う背面の皮膚伸縮が面の接触情報に与える影響：装着者の背面の皮膚と広く面で接触し、装着者の屈曲運動を補助するロボットを考える。この時、装着者自身の運動に伴う皮膚の伸縮によって、接触状態も変化することが想定される。伸縮可能な面状圧力センサを用いて皮膚の伸縮に伴う圧

力変化を事前に計測してモデル化する。

(3) 多関節構造におけるゼロインピーダンス制御：面状圧力センサをロボット表面に取付けることで、ロボット全体が装着者に加える力を直接計測できる。これまで十分議論されてこなかった、人体と関節配置が異なるロボットに既存のゼロインピーダンス制御は適用できるか否かを、人体に加える力に基づき評価する。既存法で十分に制御できない場合、面状圧力センサの出力をフィードバックしたゼロインピーダンス制御法へと拡張する。人体と構造が異なるロボットにおけるゼロインピーダンス制御の実現を目指す。

(4) 面状圧力センサを用いた部分的なインピーダンス制御：腰部では、大きな負荷を支えるために高インピーダンスが望ましい。一方、背中部では、人間の自由な運動に追従するために低インピーダンスが望ましい。面状圧力センサの圧力情報を部位に応じてフィードバックすることで、異なるインピーダンスで制御可能かを明確にする。

上記を明らかにすることで、面接触を前提とした基本的な制御法の確立、及び、運動補助が困難とされていた体幹部における運動補助の実現に繋げる。

### 3. 研究の方法

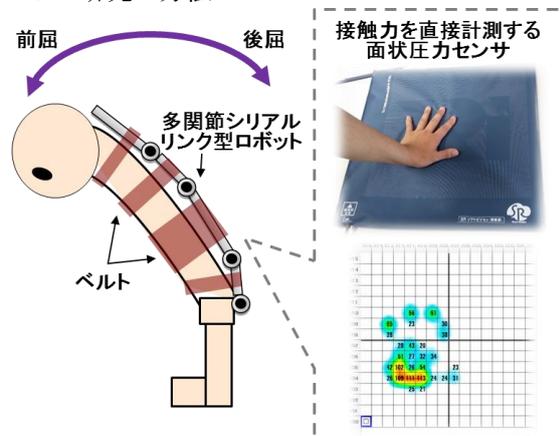


図1：想定する面状圧力センサを表面に配置した多関節装着型ロボット

図1のように、多関節シリアルリンク型ロボットを、ベルトを介して人体に装着すると想定する。面状圧力センサを、人体-ロボット間、及び、ロボット-ベルト間に配置し、直接的な接触力を計測する。2章の各項目に対応した研究の方法を説明する。

(1) 人間の屈強運動を解析して、人間の自然な屈曲運動を極力阻害しない多関節シリアルリンク型ロボットの構造を明確にする。

① 屈曲運動に限定すると、運動中のロボットを装着する体幹部表面の形状は、2次元平面上での曲線の時間変化と捉えることが

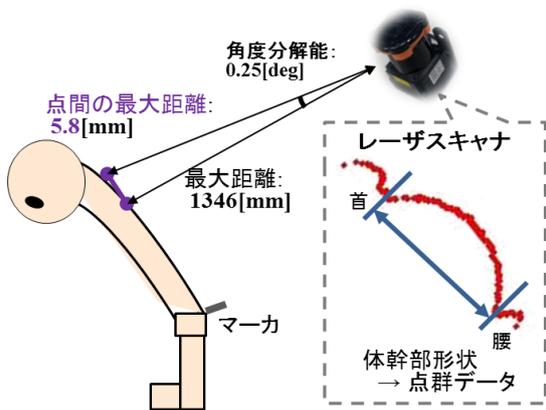


図 2：屈曲運動中の体幹部背面の形状データの計測

できる。そこで、図 2 のように、屈曲運動時の背面の姿勢形状をレーザスキャナでキャプチャし、姿勢形状（点群データ）とロボットモデルのマッチングにより、ロボットの構造（関節数とリンク長）を決める。シリアルリンク型ロボットは、関節部を結点、リンク部を線分と見なした単純なリンクモデルで近似できる。屈曲運動時に計測した様々な体幹部形状の点群データに対して、リンクモデルを当てはめ、幾何学的関係から最大誤差を計算する。ある関節数において、運動中の全データの最大誤差を最小化するリンク長の組合せを求める。関節数を増やしつつ、最小化した最大誤差を求め、関節数と誤差の減少量から、関節数を決める。その時に最も点群データとマッチするリンク長の組合せからロボットの構造を決める。

② 関節数とリンク長が決まってロボットの構造が明確になると、リンク形状や関節負

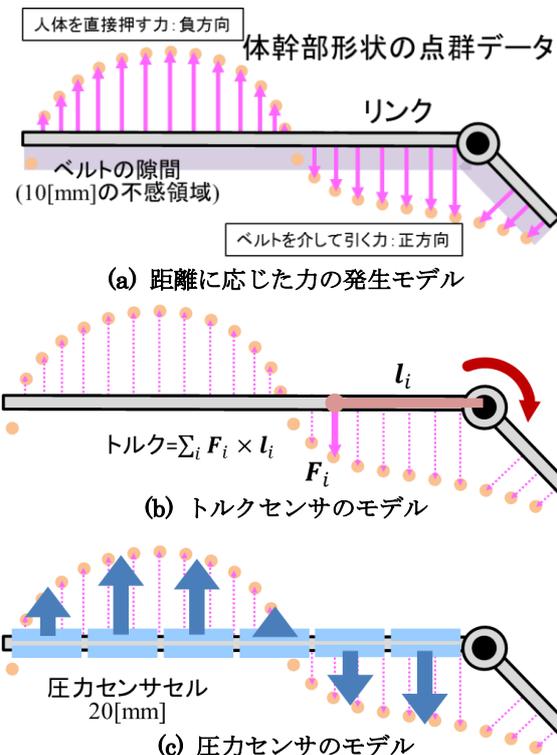
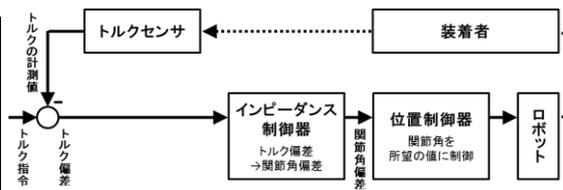
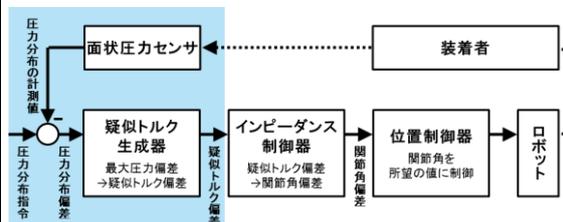


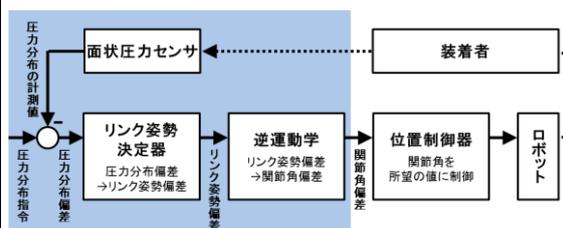
図 3：点群データとリンクモデルによる力発生とトルク・圧力分布センサのモデル



(a) トルクに基づく既存法



(b) 疑似トルクに基づく提案法



(c) 逆運動学を利用した提案法

図 4：一般的な位置ベースインピーダンス制御系を拡張したインピーダンス制御系

荷等が見積もれる。リンクの重さや面状圧力センサの配置法等を考慮し、設計の専門家と相談しつつ、検証用ロボットを試作する。

(2) 屈曲運動に伴う背面の皮膚伸縮が、面状圧力センサの計測値に与える影響を実測する。伸縮性のある面状圧力センサを人体背面に装着し、屈曲運動を行った時に発生する圧力情報を計測、モデル化する。

(3) シミュレーションで手法を検討する。(1)で計測した体幹部形状と、決定したリンクモデルを用いて、人体-ロボット間に生じる力をモデル化する。人体（点）とリンク（線分）の位置関係から力の正負を判定する。点群データ内の各点に対応したロボット表面に、点と直線の距離に比例した力が発生する（フックの法則）とした（図 3(a)）。点群データから計算した力の分布から、関節に発生するトルク、及び、セルごとの圧力を計算し、各々トルクセンサと圧力分布センサをモデル化した（図 3(b)、図 3(c)）。

① 既存のトルクに基づくインピーダンス制御システムを図 4(a)に示す。まずはこのシステムでゼロインピーダンス制御を行い、人体に加わる力の大きさを検証する。ここでは、「人間は十分にゆっくり動く」、及び、「ロボットの制御周期が十分短い」という前提の下、定常的な状態での力の大きさに着目する。

② トルクは関節部に発生する接触力の合力である。既存のトルクに基づく制御法では、局所的に発生する大きな力を検出できず、人体に害を及ぼす力を加わる可能性がある。そこで、図 3(c)の圧力分布情報に基づく制御系

を検討する。ここでは、既存のインピーダンス制御の枠組みを活かし、圧力分布から疑似的なトルク情報に変換してインピーダンス制御を実現する（図 4(b)）。人体への安全性を考慮し、リンク中の最大圧力に着目し、正負各方向成分の最大圧力の差がリンク中心に発生すると仮定し、疑似トルクを求める。

③ トルクも疑似トルクも、関節ごとに独立に計測して、関節角偏差を計算する。リンクごとに独立した制御構成になっている。シリアルリンク型ロボットは、運動学・逆運動学モデルを利用すると、関節間で協調した制御ができる。図 4(c)のように、圧力分布をロボット全体で低減するようなリンク姿勢を求めることで、より効果的に残存する力を低減できると考える。分布情報を積極的に利用した制御系に拡張し、有効性を確認する。

④ シミュレーションで検討した圧力分布情報に基づく制御法、及び既存のトルクに基づく制御法を実機に実装する。実機の制御性能に応じて手法を比較、検討する。

(4) インピーダンス制御は、人間がロボットに加えた力に応じてロボットを制御し、所望の機械的抵抗力を人間に加える制御法である。既存法のトルクに基づく手法では、トルクから関節角への伝達関数を所望のインピーダンスとなるように設計することで、先の機能を実現できる。ここで、部位ごとに独立に制御する場合、関節ごとに独立にインピーダンスパラメータを設計すればよい。

① 図 4(b)では、疑似トルク情報を利用するため、既存法と同様に部位ごとに独立したインピーダンスパラメータを設定する。

② 図 4(c)では、姿勢偏差から関節角偏差を直接計算するため、既存と同様なインピーダンスパラメータは設定できない。一方、各リンクにおいてリンク姿勢偏差をインピーダンスパラメータに従って操作すれば、部位ごとに所望のインピーダンスになると考える。

③ シミュレーションで検討した制御法を実機に実装し、実機の制御性能の枠内で手法を比較、評価、検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 図 2 の環境を構築し、特定個人 (22 歳男性、身長 1720[mm]、体重 68[kg]) を対象に、屈曲運動中の 179 個の体幹部形状を取得した。姿勢辺り約 150 の点群で近似された。

① 関節数と、関節数ごとに屈曲運動中の最大誤差を最小化するリンク長の組合せを探索的に求めた。結果を図 5 に示す。横軸が関節数、縦軸が最大誤差である。関節数の増加に伴って誤差が減少し、関節数が 4 で誤差が収束したように見える。この結果から、4 関節に決定し、リンク長は腰側から順に {40, 320, 120, 320} [mm] と決めた。ここでは、特定個人のロボットモデルを紹介した。体幹部形状に対するロボットのリンクモデルの最適化手法を提案したため、体幹部形状計測

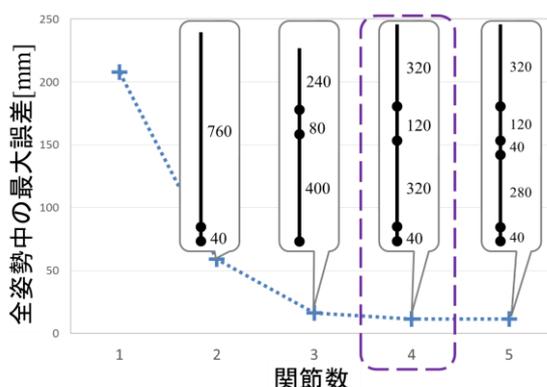


図 5：関節数と屈曲運動中の最大誤差 (誤差の遞減率に基づく構造決定)

から構造決定までの枠組みが整った。個人ごとのモデルの決定や、個人差の影響を見積もる際に、本成果が大きく寄与する。一方、レーザースキャナで計測する都合上、2 次元の形状データしか取得できない。計測時の位置ずれや 3 次元的な形状変化に対応するためには、Kinect 等の 3 次元計測器を用いた計測環境の構築が必要になることが分かった。

② 決定したロボットの構造から 4 関節シリアルリンク型ロボットを試作した (図 6)。関節部にモータ、リンク部にアルミフレームを用い、リンク表面に面状圧力センサを取付けた。駆動系は数十ミリ秒の制御周期で制御できる。一方、面状圧力センサは計測周期が 200 ミリ秒である。ロボット自体は人体よりも十分早く制御することができるが、センサの計測周期の制約により、過渡的な検証は難しい。今回は、センサ自体の柔軟性と予算からセンサを選択したが、制御周期の短いセンサへの換装が望ましい (なお制御周期の短い市販のセンサは予算区分を超えた)。人間は十分にゆっくり動くという仮定の下、定常的な接触力の分布から手法を評価する。

(2) 面状圧力センサを人体背面に装着して屈曲運動を行い、計測したセンサ値を解析した。結果、屈曲運動によっても圧力値は変動しないことが明らかになった。皮膚伸縮の影響は無視する。ロボットのリンク表面に面状圧力センサを配置し、接触による力のみが計測できると考える。

(3) 図 4(a) のトルクに基づく制御法と図 4(b)(c) の圧力分布に基づく制御法の比較結



図 6：試作した 4 関節シリアルリンク型ロボット

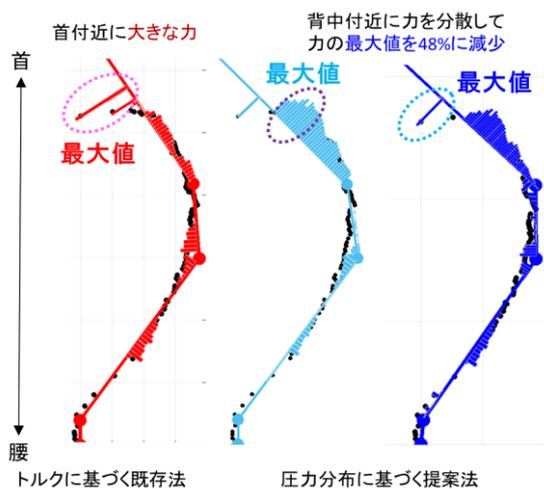


図7：前屈姿勢における収束時のリンク姿勢と残存した力の分布

果の一例を図7に示す。前屈時の体幹部形状が黒点であり、ロボットの収束姿勢が丸付線である。結果を見やすくするために、残存した力の分布をリンク上に移動させた。赤がトルクに基づく既存法、薄青が疑似トルクに基づく提案法(図4(b))、濃青が逆運動学を用いた提案法(図4(c))の結果である。体幹部形状と、リンクモデルは完全には一致していない。体幹部と(1)で決めたリンクモデルとの構造の違いにより、残存する力が発生した。

① 図7のトルクに基づく制御法で残存した力は約950[N]であり、非常に大きい。想定通り、トルク情報のみでは人体に害を及ぼす可能性が高いと考えられる。人体とロボット

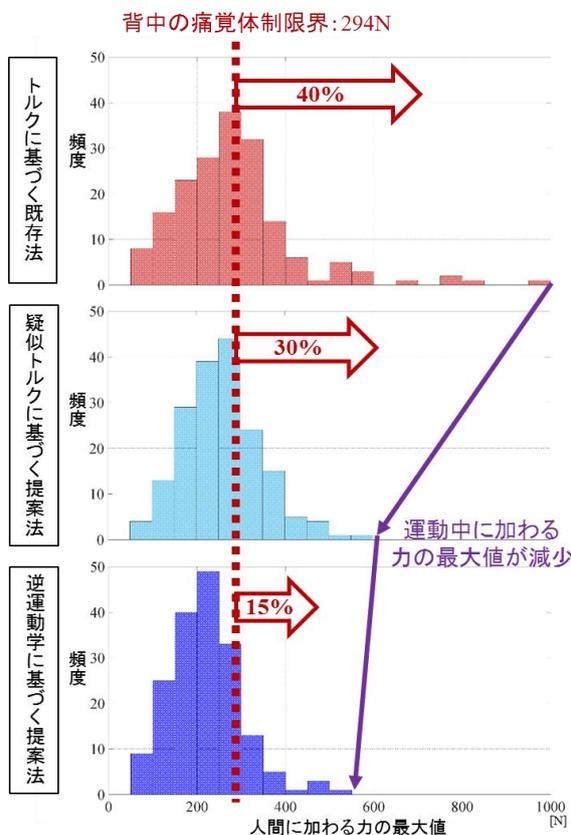
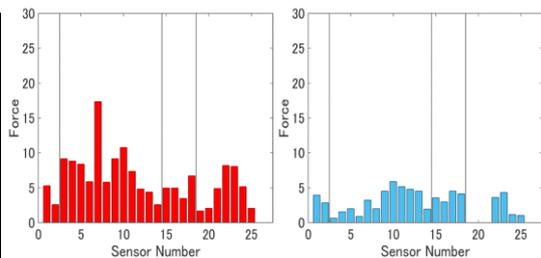


図8：屈曲運動中に残存した力の最大値のヒストグラム



(a) トルクに基づく提案法 (b) 疑似トルクに基づく提案法  
図9：前屈時における収束時に残存した力の分布

の構造が異なる場合は、安全性の観点から、直接的な接触力を考慮すべきである。

② 図7の薄青の姿勢に収束し、残存する力を既存法の48%に抑えた。179個の全姿勢において、人体に加わる力の最大値のヒストグラムを図8に示す。赤がトルクに基づく既存法、薄青が疑似トルクに基づく提案法の結果である。屈曲運動におけるゼロインピーダンス制御中に、人体に加わる力の最大値が大幅に減少できたことが確認できる。文献[2]によると、人体の背中部における痛覚体制限界は294[N]である。既存法では、屈曲運動中の40%の姿勢において痛覚体制限界を超えていたが、疑似トルクに基づく提案法により、30%まで低減できた。

③ 逆運動学モデルを利用して関節間で協調して制御した結果が、図7・図8の濃青である。図7においては、最大となった接触位置は異なるものの、疑似トルクに基づく提案法とほぼ同一の姿勢に収束した。一方、図8から、屈曲運動に追従するゼロインピーダンス制御中に、背中の痛覚体制限界を超える割合が15%になり、大幅に低減できた。人体とロボットの間には多少の緩衝材を挿入する程度で、対応できる見込みが立った。

④ 実機における検証結果の一例を図9に示す。人間の前屈姿勢の体幹部形状を、体幹部形状モデルで再現し、試作機を体幹部形状モデルに押し当てるように制御する実験を行った。図9(a)と(b)が、トルクに基づく既存法と疑似トルクに基づく提案法で制御して収束した時の力分布である。横軸が接触位置(面状圧力センサのセル番号)、縦軸が力を表す。同一の押し当て指令を与えた場合でも、収束時の力分布は異なった。トルクに基づく既存法では、7番目のセルに局所的に大きな力が発生していた。一方、提案法ではほぼ全てのセルで一定の力を維持している。直立姿勢や、後屈姿勢でも同様の結果が得られた。3姿勢という限定された条件ではあるものの、実機においても直接的な接触力を考慮した提案法の一有効性が示せた。

(4) シミュレーションにおいて、関節ごとにインピーダンスパラメータを変更することで異なる収束性を示した。部分的に異なるインピーダンスを実現できる可能性が見えたものの、運動に応じた適切なインピーダンスの設計は十分に検討できておらず、今後の課題として残った。

① 既存法を同様に関節ごとに独立したインピーダンスパラメータを設計すればよい。

② 関節ごとにインピーダンス特性を反映したフィルタを設計することで、部位ごとにインピーダンス特性が変更できると考える。

③ 予算の都合上、インピーダンス特性を確認できるほどの制御応答が得られない可能性が高い。

運動に応じた適切なインピーダンスの設計は十分検討できていないものの、当初目標としていた、単一のコントローラでも部位ごとに異なるインピーダンスが制御できる可能性は明確にでき、かつ、制御法の枠組みが構築できた意義は大きい。

人体の体幹部形状モデルを用いた基礎的検討により、限定的な条件ではあるものの、実機においても圧力分布情報に基づく制御法の有効性を示した。本研究の申請時に設定した目標は概ね達成できた。

#### <参考文献>

- [1] K.Kong, et.al., “Control of Rotary Series Elastic Actuator for Ideal Force-Mode Actuation in Human-Robot Interaction Applications”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol. 14, No. 1, 2009
- [2] 齋藤剛、池田博康、“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

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① 宋炫根、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、接触部位の圧力分布に基づく多関節部位アシスト機構の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 2014、査読無、2014年5月27日発表、富山市総合体育館(富山県・富山市)
- ② Y.Funabora、H. Song、S. Doki、K. Doki、Position Based Impedance Control based on Pressure Distribution for Wearable Power Assist Robots、IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics、査読有、2014年10月7日発表、San Diego (USA)
- ③ 内山直哉、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、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、査読無、2015年5月18日発表、みやこめっせ(京都府・京都市)

④ 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、査読無、2015年9月2日発表、大分大学(大分県・大分市)

⑤ 韓天実、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、屈曲運動アシストのためのシリアルリンク型ロボットの構造決定法、平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、査読無、2015年9月28日発表、名古屋工業大学(愛知県・名古屋市)

⑥ N. Uchiyama、Y. Funabora、S. Doki、K. Doki、Impedance Control based on Pressure Distribution for Wearable Assist Robot on Multi-joint body part、IEEE International Conference on Control Systems, Computing and Engineering、査読有、2015年11月28日発表、Penang (Malaysia)

⑦ 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、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、査読無、2015年12月14日発表、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

[その他]

道木研究室ホームページ

<http://doki-n.nuee.nagoya-u.ac.jp>

一般向け発表実績(計6件)

[2014年度]

- ① 名古屋大学大学祭 研究室見学  
② 名古屋大学オープンキャンパス  
③ フロンティア21エレクトロニクスショー

[2015年度]

- ① 名古屋大学オープンキャンパス  
② 名古屋大学ホームカミングディ  
③ フロンティア21エレクトロニクスショー

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

舟洞 佑記 (FUNABORA, Yuki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 20633548

(4) 研究協力者

道木 慎二 (DOKI, Shinji)  
道木 加絵 (DOKI, Kae)  
宋 炫根 (SONG, Hyungeun)  
内山 直哉 (UCHIYAMA, Naoya)  
韓 天実 (HAN, Tianshi)  
佐藤 飛鳥 (SATO, Asuka)