

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04564

研究課題名（和文）着用者動作への追従性と高アシスト力を両立する表面骨格型アシスト機構の開発と制御

研究課題名（英文）Development of Surface-Skeleton Assistive Robot; a novel wearable assistive structure with low constraint and high assist performance

研究代表者

舟洞 佑記（Funabora, Yuki）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20633548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：体表面に面状のリンク部を設けた新たな装着型ロボット「表面骨格型アシスト機構」の実現可能性を検証した。上半身を対象に、表面骨格に相当する面状リンクを体表形状に基づいて設計・試作した。面状リンクを配置した体幹部用の受動的な機構により、当該機構が着用者の自由な動作を阻害しないことを確認した。腕部屈曲・体幹部回旋・肩部外転等を含む上半身用表面骨格型アシスト機構を試作、ヒトの関節と同等の硬さと可動域を有する介護練習用人形でアシスト力を検証した。同一出力で駆動しても、面状リンクを有することで人形関節部の駆動範囲が拡大された。着用者動作への追従性とアシスト力の拡大が確認でき、提案機構の実現可能性が見えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

装着型ロボットにおいて、既存の外骨格型アシストロボットの特徴である高アシスト性と、内骨格型アシストスーツの特徴である人の自然な動作への高い追従性を両立させる全く新しい概念「表面骨格型アシスト機構」を提案、実験を通して実現可能性を示した点は、装着型ロボットの応用範囲拡大に繋がる社会的意義を持つ。また、体表面に配置すべき面状リンク形状の決定、面状リンク間をつなぐ人工筋配向の決定等、既存の剛体モデリングに基づくロボット設計とソフトロボティクス分野のロボット設計の中間的位置づけとなる設計法を提案しており、外骨格型ロボット・内骨格型スーツの学術的な発展に寄与する可能性を持つ成果が得られたと考える。

研究成果の概要（英文）：In this project, we validated the feasibility of a surface-skeleton assistive robot, which is a novel wearable assistive structure with low constraint and high assist performance. It consists of two components; multiple surface-type links designed to conform to the body's shape, and flexible actuators between these links. Through the experiments with the passive prototype for a torso, we observed the prototype did not impede the wearer's movement. We developed a prototype of the surface-skeleton assistive robot for the upper body (arm, torso and shoulder), and its assistive performance was verified with a care practice doll with joints' stiffness and range of motion equivalent to that of human joints. By attaching surface-type links, the driving range of the doll's joints was expanded when the actuators drove at the same output. Although the verification was limited, we confirmed that the proposed robot could effectively follow the wearer's movements and enhance assistive performance.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：福祉・介護用ロボット 装着型アシストロボット 制御工学 機械力学・制御 知能ロボティクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

既存の装着型アシストロボット・アシストスーツは、製品化も進んでいる外骨格型と、研究・開発が中心の内骨格型に大別される。外骨格型は、剛性の高い棒状フレーム(リンク)で構成され、高いアシスト力が得られるが、着脱の手間やロボットが着用者の自然な動作を阻害する点が課題となっている。機構的工夫での解決が図られているが、人体とロボット間の構造の違いに起因した問題であるため、既存のアプローチでは人の自然な動作への対応は難しい。内骨格型は、空気圧人工筋肉に代表されるソフトアクチュエータを衣服上に配向した構成をとり、衣服のような着脱性と人の動作への追従性を高めている。一方研究代表者は、過去の研究経験から「柔軟な素材のみで構成すると着用者に効果的なアシスト力を伝えることが難しい」との見解を持つ。機構自体の柔軟性に起因した「着用者に力を加える位置(接触位置)がずれる点」や「加える力の方向を一定にできない点」等が問題の原因と考える。故に、内骨格型における既存のアプローチを発展させても、高いアシスト力の実現は難しい。

上記を背景に、外骨格型・内骨格型の特徴を組み合わせた新たな装着型ロボットの概念として「表面骨格型アシスト機構」を提案する。人が様々な動作をした時の上半身の体表面形状の変形を計測・解析した経験から、体表面には「動作に依存せずに位置・姿勢が変化しない(剛体性が保たれる)領域」と「動作に依存して三次元的に大きく変形する領域」に分けられることが解った。前者の領域を、接触する体表面と同一形状、かつ、剛性の高い「面状リンク」部として構成することで、面状リンクを介して着用者に効果的なアシスト力が伝達できると目論む。また、後者の領域に対して、各領域と同一の変形を実現可能な「面状アクチュエータ」を開発、面状リンク間を面状アクチュエータで接続することで、着用者の自由な動作を阻害しない機構の実現を目論む。「表面骨格型アシスト機構」は、研究代表者の研究推進経験から着想を得た今までにない装着型ロボットの概念である。新たな発想に基づく装着型アシストロボットの可能性を探る研究課題である。

### 2. 研究の目的

装着型ロボットにおいて、既存の外骨格型アシストロボットの特徴である高アシスト性と、内骨格型アシストスーツの特徴である人の自然な動作への高い追従性を両立させる新しい概念：表面骨格型アシスト機構を提案し、実現可能性と有効性・有用性を明らかにすることが第一の目的である。着用者の装着部(接触部)の形状と同一形状を持つ剛性の高い「面状リンク」群と、自身が柔軟に伸縮・変形して力を発揮する「面状アクチュエータ」群から構成される新奇の表面骨格型アシスト機構を、安全に運用できる枠組みを構築する。「接触レベル」での安全の枠組みを構築するために、ロボットが着用者に“加える力”を直接計測できる面状リンクを開発し、複雑に変形する面状アクチュエータ群を対象とした接触力分布フィードバック制御系を確立することが第二の目的である。目標達成に向け、次の5つの研究項目に取り組む。

(1) 表面骨格型アシスト機構の明確化：表面骨格型アシスト機構において鍵となる面状リンクと面状アクチュエータの幾何的配置、個々の面状リンク形状、個々の面状アクチュエータの要件(変形の種類・方向・大きさ等)を明確にする。

(2) 微小な接触力分布が計測可能な面状リンクの開発：着用者の安全性を「接触レベル」で保障するために、人体とロボット間の微小な接触力分布が計測できる面状リンクを開発する。

(3) 体表面と同様に変形する面状アクチュエータの開発：研究項目「表面骨格型アシスト機構の明確化」で決定した面状リンク形状をモデル化し、時系列点群データとフィッティングすることで、動作中に生じる面状リンク間の相対位置・姿勢変化を明らかにする。

(4) 接触力分布情報に基づく面状アクチュエータ群の制御：面状リンクに生じる接触力分布に基づいた面状アクチュエータの変形制御法を検討する。まずは、2リンク1アクチュエータの基本的な構成において、基盤となる制御系を構築し、面状アクチュエータの変形を制御する。加えて、リンク間の相対位置・姿勢の制御性能を確認、必要に応じて改良する。

(5) 表面骨格型アシストロボットの試作と評価：各研究項目を経て製作した「接触力分布センサ内蔵型の面状リンク」と「面状アクチュエータ」を接続し、上半身・下半身で分割した表面骨格型アシストロボットを順次製作していく。なお、上半身は羽織って前部ファスナで固定するジャケット型、下半身はズボン型を想定している。先に試作が完了したユニットを研究項目「接触力分布情報に基づく面状アクチュエータ群の制御」に用いる。

### 3. 研究の方法

2章の項目ごとに当初研究の方法と実際の取り組みについて説明する。

(1) 複数の距離画像センサ(10台を想定)を用いて人体表面全域の三次元形状変形を遮蔽なく計測できる環境を構築、人の多様な動作に伴う人体表面形状を時系列点群データとして計測する。多様な動作においても点間の幾何的關係が変動しない点群を抽出、抽出した点群形状から面状リンク形状を決定する。決定した面状リンク形状をモデル化し、面状リンク(接触力分布センサ非搭載型)を3Dプリンタで試作する。面状リンク間を、伸縮性の高い織布で接続した受動的

な機構を製作し、着用者の動作への追従性を評価することで、機構の妥当性を検証する。なお、提案機構は着用者の体型に依存することが想定される。本研究では、標準体型の機構に限定し、標準体型の複数被験者の動作を計測・解析する。

(2) 微小な接触力分布が計測可能な面状リンクの開発：着用者の安全性を「接触レベル」で保障するために、人体とロボット間の微小な接触力分布が計測できるセンサ内蔵型面状リンクを開発する。過去に接触力分布に基づく制御系を構築した経緯から、装着型ロボット用の接触力分布センサには、微小な力を検知する感度と、人の動作に比して短い間隔でデータを取得する計測周期に加え、体表面形状に即した形状にセンサが配置できることが望ましい。装着型ロボットに適した接触力分布センサの調査とセンサの構成を検討し、機能性材料(高剛性・導電性・磁性・柔軟性等)が印刷可能な3Dプリンタを活用し、センサ内蔵型のリンクを試作、計測性能を評価する。

(3) 体表面と同様に变形する面状アクチュエータの開発：研究項目「表面骨格型アシスト機構の明確化」で決定した面状リンク形状をモデル化し、時系列点群データとフィッティングすることで、動作中に生じる面状リンク間の相対位置・姿勢変化を明らかにする。明らかにした面状リンク間の相対位置・姿勢変化を、面状アクチュエータの設計と制御の要件とし、要件を満たす面状アクチュエータを製作する。

(4) 接触力分布情報に基づく面状アクチュエータ群の制御：面状リンクに生じる接触力分布に基づいた面状アクチュエータの変形制御法を検討する。まずは、2リンク1アクチュエータの基本的な構成において、基盤となる制御系を構築し、面状アクチュエータの変形を制御する。加えて、リンク間の相対位置・姿勢の制御性能を確認、必要に応じて改良する。構築した制御系と制御則を拡張し、上半身用・下半身用各々を想定して試作したユニットに制御法を実装、実際の試作ユニットを駆動させながら制御法を検討する。上記計画であったが、研究進捗と優先順位を鑑み、本研究項目の実施は断念した。

(5) 表面骨格型アシストロボットの試作と評価：各研究項目を経て製作した「接触力分布センサ内蔵型の面状リンク」と「面状アクチュエータ」を接続し、上半身・下半身で分割した表面骨格型アシストロボットを順次製作していく。なお、上半身は羽織って前部ファスナで固定するジャケット型、下半身はズボン型を想定している。先に試作が完了したユニットを研究項目「接触力分布情報に基づく面状アクチュエータ群の制御」に用いる。倫理の承認を得た後に、装着実験(着脱性の検証)、追従実験(動作への追従性検証)、アシスト実験(アシスト効果の検証)の被験者実験を実施、表面骨格型アシストロボットの実現可能性を客観的に判断するとともに、実応用時の有用性・有効性を定量的に考察する。上記計画であったが、研究進捗と優先順位を鑑み、対象部位を上半身に限定、人形を用いた性能評価実験に留めた。

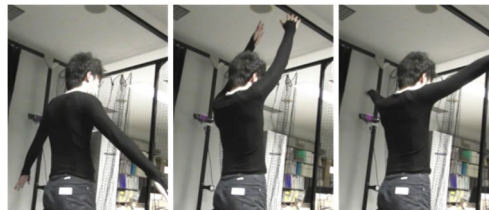


図1：実際の運動と複数距離画像センサの点群から算出した体表面形状データ

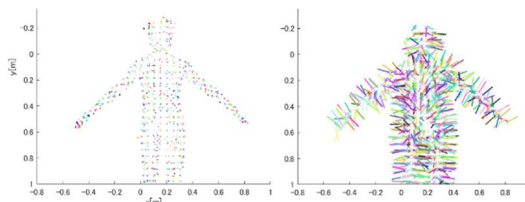


図2：体表面形状データ(左)と点群データから抽出した各体表位置での法線(右)



図3：面状リンク形状評価用の体幹部運動

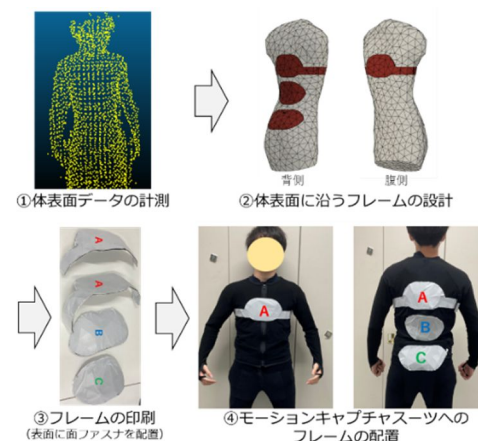


図4：体幹部用面状リンクの設計・印刷と動作追従性評価用に製作した受動的な機構

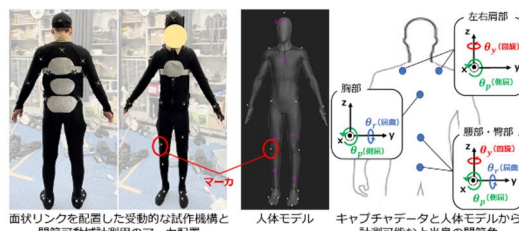


図5：体幹部運動に寄与する関節角の計測

表1：面状リンクによる関節可動域の変化

可動域	面状リンク有り	面状リンク無し	絶対差(変化率)
右肩 $\theta_{R1}^s$	15.9 deg	15.3 deg	0.6 deg (+3.9%)
" $\theta_{R2}^s$	50.9 deg	54.2 deg	3.3 deg (-6.1%)
左肩 $\theta_{L1}^s$	17.7 deg	18.1 deg	0.4 deg (-2.2%)
" $\theta_{L2}^s$	52.1 deg	61.2 deg	9.1 deg (-14.9%)
胸部 $\theta_C^s$	24.2 deg	25.3 deg	1.1 deg (-4.3%)
腰 $\theta_W^s$	36.0 deg	33.1 deg	2.9 deg (+8.8%)
" $\theta_W^s$	50.9 deg	49.4 deg	0.5 deg (+3.3%)

#### 4. 研究成果

(1) 12 台の距離画像センサ (Intel RealSense d435i/d455i) を導入した三次元形状計測環境、4 台の距離画像センサ (Kinect V2) で構築した三次元形状計測環境等、複数台の距離画像センサを導入してヒトの動作に伴う体表形状を計測した。多様な運動要素を含むラジオ体操中の 7 つの運動 (伸びの運動・胸をそらす運動・体を横に曲げる運動・体をねじる運動・腕を上下に伸ばす運動・体を前後に曲げる運動・体を回す運動) に対して環境を変更しつつ動作を計測した (図 1)。しかし、計測ノイズの影響を抑制しきれず、点群から体表位置は抽出できたが、法線の抽出精度に課題が残った (図 2)。結果、大まかな面状リンク部は抽出できたものの、運動の特性を反映した面状リンク部の抽出には至らなかった。試行錯誤に時間を要した点、COVID-19 で実験を中断せざるをなかった点を受け、上半身を対象を限定 (体幹部・腕部・肩部の段階的検討) した上で、マーカベースのモーションキャプチャシステム (OptiTrack Prime13X) を導入して問題の解決を図った。計測データにこれまでの知見も踏まえて、体幹部の前後屈・側屈・回旋に相当する運動 (図 3) を阻害しない面状リンク形状を決定、決定した形状の面状リンクを 3D プリンタで印刷、面ファスナでモーションキャプチャスーツに貼付した受動的な機構を製作した (図 4)。受動的な機構の着用者動作への追従性を、剛性の高い面状リンクによる着用者の関節可動域の減少度から評価した (図 5、表 1)。面状リンクによって左肩関節ピッチ角が最も制約された (9.1deg 減少)。動作に寄与した関節の可動域増減の平均は 1.3deg の減少に留まっており、当該面状リンクが着用者の運動を阻害しないことが確認できた。腕部・肩部も同様に面状リンク形状を決定した。なお、面状リンク形状は第一試作段階であり、更なる改良を要する。

(2) 機能性材料が印刷可能な 3D プリンタを導入し、接触力を計測するためのセンサ部を試作した。空圧・キャパシタンス・磁気変化等の幾つかのタイプを試したが、現行の 3D プリンタ材料では十分な計測性能が得られなかった。そこで、文献 [1] を参考に、磁気エラストマ (純シリコンに鉄粉を混ぜて磁性を持たせた柔軟物) を用いたセンシング法をリンク表面に実装する方策を採った (図 6)。腕部を想定した面状リンク部の 3D モデルを作成 (図 7)、3D プリンタで印刷した。磁石・センサを配置して配線を行い、人体と接触するリンク部内側に純シリコン層と磁気エラストマ層を配置した腕部用センサ内蔵型面状リンクを試作した (図 8)。センサセルに印加した外力に応じた電圧値が計測され (図 9)、センサ機能が確認できた。標準偏差で 0.25N 程のばらつきが見られたが、1~8N 程度の力が計測できた。感度・計測範囲の更なる調整は必要ではあるが、接触力が計測できるセンサ内蔵型面状リンクを実現した。

(3) 当初は面状リンク間の相対位置・姿勢変化の計測から面状アクチュエータの構成を検討する予定であったが、(1) で生じた体表面時系列データの計測精度に限界があった点を受け、アプローチを変更した。腕部屈曲のように比較的動作を容易にモデル化できる部位と、体幹部のように

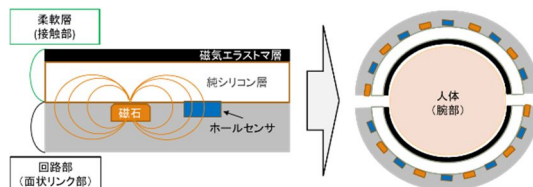


図 6: 磁気によるセンサ内蔵型リンクの構成

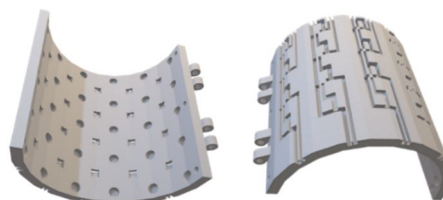


図 7: 設計した腕部用面状リンク部のモデル (左:磁石・センサ埋込側、右:配線用外側)

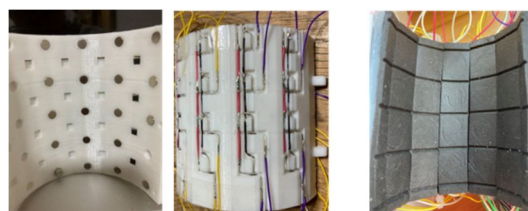


図 8: 試作した腕部用面状リンク (左:磁石・センサ埋込側、中:配線した外側、右:柔軟層まで配置したリンク内側)

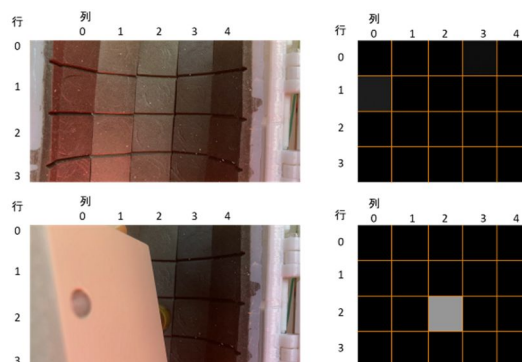


図 9: 面状リンクで接触力を計測した様子 (左上:無負荷時のセンサ、右上:無負荷時のセンサセル計測値(黒)、左下:2-2セルに力を印加、右下:印加時のセンサセルの計測値(白))

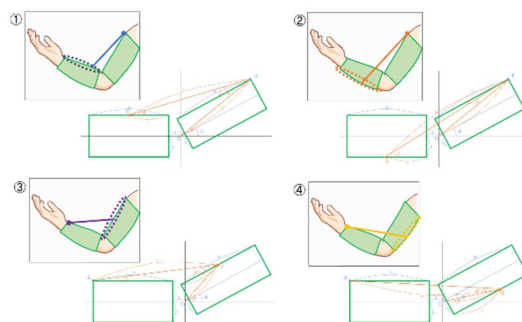


図 10: 上腕・前腕の面状リンクのモデル化とリンク間をつなぐ人工筋端点位置候補の群

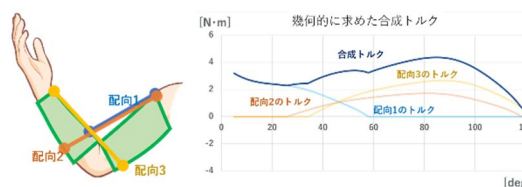


図 11: モデルから幾何的に算出した配向ごとの発揮トルクと合成トルク

複合的に動作してモデル化が容易ではない部位に分け、各々面状リンク間の人工筋配置法を開発した。前者では、一般的に用いられるリンク形状を線分で近似する手法を拡張し、厚みを持ったリンク面上に人工筋の固定端を配置する問題として捉えた(図10)。固定位置と関節部に生じるトルクをモデル化し、所望のトルク(ここでは2.0Nmとした)を発揮可能な固定位置と人工筋数を求めた(図11)。腕部屈曲の実構成を図12に示す。後者では、(1)で最終的に構築したモーションキャプチャシステムを用いて、体幹部運動に伴う体表面の変化に基づき人工筋配向を決定する手法を開発した。運動の前後で体表面の変化が大きい箇所に沿うように伸縮型の人工筋を配置することで、人工筋の伸縮により当該運動が効果的に誘発できると仮定し、運動前後でのマーカ間の相対移動量が大きい経路を見つける経路探索問題として捉えた。図13のように、体表面全体にマーカを配置して動作に伴う体表面の変化を計測、マーカをノード、マーカ間の相対位置の変化量をエッジとしたグラフを構成した。ノード中に始点・終点の候補を設定して、グラフ上での経路探索問題を解くことで人工筋配向を決定した。モーションキャプチャスーツ上に配向した例を図14に示す。

(4)進捗を鑑みて本項目の実施は断念した一方で、接触力分布を用いた制御法は検討を進めた。

(5)前述の通り、上半身を対象を限定して表面骨格型アシスト機構を試作した。当初は被験者実験による検証を計画していたが、まずは試作機構の定量評価を実施することに主眼を置き、ヒトと類する関節自由度・硬さを有する介護練習用人形を用いて評価実験を行った。ここでは、腕部・体幹部・肩部の部位ごとに、面状アクチュエータの駆動(実際は衣服上に配向した人工筋の収縮)によって駆動した人形関節部の角度から有効性を評価した。図12が介護練習用人形に装着した腕部屈曲用試作機構であり、人工筋の収縮によって、肘関節が初期角度20degから80degまで駆動した(60degの駆動)。概ね意図通りの駆動であった。図15に体幹部回旋(左回旋から立位)用の試作機構と駆動時の様子を示す。モーションキャプチャで計測した回旋角度の駆動量は可動範囲の69.5%であった。面状リンク部を貼付せずに人工筋のみで駆動した場合、回旋角度の駆動量は可動範囲の56.2%となった。面状リンクを有することで約13%駆動範囲が拡大した。図16に試作した上半身用表面骨格型機構を示す。駆動する角度範囲の更なる改善が必要ではあるが、腕部屈曲・体幹部回旋に加え、肩部外転・水平内転、及び、それらを含む複合的な動作が確認できた。

ヒトの計測に基づいた本研究課題は、COVID-19の影響を大きく受け、当初計画通りには遂行できなかった。しかし、表面骨格に相当する面状リンクにより、人体へ効果的に力が伝達できることが確認でき、表面骨格型アシスト機構の価値が示せた意義は大きい。併せて、介護練習用人形を用いた実験を通じ、表面骨格型アシスト機構の実現可能性が見えた点も成果である。研究を通して顕在化した課題に継続して取り組み、表面骨格型アシスト機構の実現に繋げたい。

<引用文献>

[1] T.Kawasetsu, T.Horii, H.Ishihara, M.Asada, "Flexible Tri-Axis Tactile Sensor Using Spiral Inductor and Magnetorheological Elastomer", IEEE Sensors Journal, 18/14, 5834(5841) (2018).



図12: 試作した腕部屈曲用表面骨格型機構

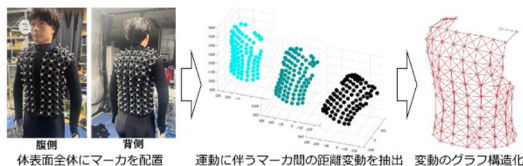


図13: マーカ計測に基づいた運動に伴う体表面上の距離変動のグラフ化

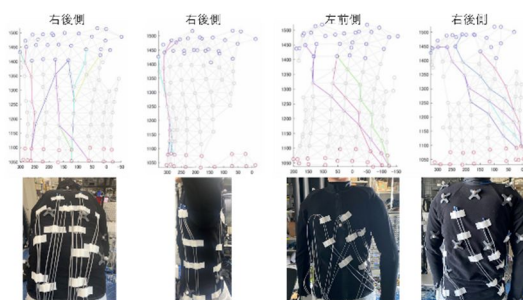


図14: グラフ上での経路探索による体幹部運動に対応した人工筋配置の決定(左から前屈 立位、右側屈 立位、右回旋 立位の前側・後側)



図15: 試作した体幹部(左回旋 立位)用表面骨格型機構



図16: 試作した上半身用表面骨格型機構(左:介護練習用人形に装着した様子、右上:吊り下げ状態での肩水平内転、右下:初期(左)・肩外転(中)・複合動作(右))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 酒井 悠輔, 舟洞 佑記, 道木 慎二
2. 発表標題 体表面形状に沿ったフレームと布状アクチュエータを用いたアシストスーツの試作
3. 学会等名 令和4年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深津 暖, 酒井 悠輔, 舟洞 佑記, 道木 慎二
2. 発表標題 体表面に沿ったフレームを有するアシストスーツに向けたフレーム配置と可動域の調査
3. 学会等名 令和4年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 舟洞 佑記
2. 発表標題 ヒトと共存して未来を拓くロボットシステム
3. 学会等名 メッセナゴヤ2022併催セミナー「ロボット・AIイントロダクションセミナー」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 舟洞 佑記
2. 発表標題 動く布 ～能動布の製作・モデリング・制御～
3. 学会等名 電気学会東海支部若手セミナー「超スマート社会実現のための情報通信と信号処理」（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学道木研究室  
<http://doki-n.nuee.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	道木 慎二  (Doki Shinji)		
研究協力者	正岡 真一  (Masaoka Shinichi)		
研究協力者	安田 凜  (Yasuda Rin)		
研究協力者	酒井 悠輔  (Sakai Yusuke)		
研究協力者	深津 暖  (Fukatsu Haru)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 将  (Tanaka Tamotsu)		
研究協力者	柴田 泰雅  (Shibata Taiga)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関