ロボットによる被覆操作のための教示方法

林 直 宏* 富 沢 哲 雄* 末 廣 尚 士* 工 藤 俊 亮*

Teaching Method for Wrapping Operation by Robot

Naohiro Hayashi*, Tetsuo Tomizawa*, Takashi Suehiro* and Shunsuke Kudoh*

A purpose of this study is to achieve wrapping operation by robots. As a teaching method of wrapping operation, this study uses an intuitive instruction based on a movement of a hand, and generates robot commands from the instruction. This study represents wrapping operation based on a three-layered model as intermediate representation, which is originally proposed in our previous study. In this paper, as a key elements of this study, we describe the teaching method which is a part of inputting to the model. This method can understand an intention of the rough instruction and generate appropriate intermediate representation which represents the intention. In the intermediate representation, a part of hand path generation method is extended to loosen limitations about shapes of objects and fabric that can be handled. Finally, we integrate them into a total wrapping robot system, and confirm that the proposed method is effective to achieve wrapping operation by a robot.

Key Words: Manipulation, Deformable Object, Wrapping Operation, Robot Teaching

1. は じ め に

近年、紐や布といった柔軟物の認識や、ロボットによる操作の研究が活発化している。布状柔軟物の認識の研究としては、画像情報や力覚情報から布の形状や把持点を探索する研究が挙げられる[1]~[6]。布状柔軟物操作の研究としては、和田ら[7]の平面上での布の同時位置合わせ作業、柴田ら[8]の布展開動作、Abbeelら[9]の衣服の折りたたみや、寺田ら[10]の箱への風呂敷包み、稲葉ら[11]、柴田ら[12]の人間への着衣支援などが挙げられる。これらの布状柔軟物に関する研究の中で、本研究では、ロボットによる物体への被覆操作を目指している。例えば風呂敷で物を包むといった物体への被覆操作は、布状柔軟物の重要な用途の一つであると言える。これまでの研究では、布被覆操作の記述に、ペアの点群[7][8]、折り紙に用いられるような折り線[9][10]や、布を持つ手先の経路[11][12]が使用されている。しかし、様々な形状を持つ物体への被覆操作を考えた場合、点や折り線による記述では曲面物体の表面への指示を行うことが難しい。また、手先経路による記述では、逐一手作業により経路の座標を指定しなければならず、経路を作成する人間への負担が大きい。

人が人に包み方を指示するときは、Fig. 1のように、大まか

Fig. 1 Instruction of wrapping

な手の動きで示す。本論文では、この手の動きを「大まかな指示」と呼ぶこととする。この大まかな指示は単に、布を包むときの手の動きを直接表しているというよりも、布で物体のどこを包むかという、布と物体の重なり合いを表しているものと考えられる。本研究は、この大まかな指示で被覆操作を指示し、ロボットに被覆作業を行わせることを目標としている。このような、「動作の意図を表す大まかな指示」を理解し表現できれば、ユーザは指示内容を、細やかに考えて教えるのではなく、直感的に伝えることができると期待できる。そのためには、被覆の意図をどのような形で中間表現として記述するかが課題となる。しかし、初めに述べたように、既存の記述方法を用いて被覆操作を表現することは難しく、代わりとなる記述方法が求められる。

そこで、大まかな動作指示と実際のロボット動作をつなぐ中間表現として、本研究では「目標線」の概念を用いた手法を用いる。目標線という考え方自体はすでにCGの世界で用いられてきており、五十嵐ら[13]や幸村[14]の研究がその例である。この目標線は物体上と布上にそれぞれ対応するように引かれている。被覆時の布と物体の関係は、この目標線のペアが重なっ

原稿受付 2015 年 12 月 8 日

*電気通信大学

*The University of Electro-Communications

■ 本論文は新規性(要素分野)で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

Fig. 2 (a) Target lines on a fabric section and an object (b) Wrapping an object with the target line of a fabric section placed onto the corresponding target line on the object

Fig. 3 Intermediate representation of wrapping

た状態として表される (**Fig. 2**). この目標線を用いた記述方法は、様々な物体形状への被覆操作の記述に有用である。なぜなら、他の記述と比べ、平面だけでなく曲面形状への指示も行いやすく、また、どのような流れで、物体のどこを包むかという被覆の本質的な目的を、自然に表すことができるためである。これらの利点から、本研究ではロボットのための被覆操作の中間表現として、目標線を用いた方法を採用する。

しかし、実世界のロボットに被覆操作を行わせるためには、CG 分野で用いられるような目標線の記述だけでは十分とはいえない。なぜなら、記述どおりに包むためには、布を操作する手先経路を目標線から計画しなければならないうえに、ロボットごとの外形の違いや物体との干渉を考慮し、適宜、布の把持点を変えたり、左右の腕で布を持ち替えなければならないからである。すなわち、目標線の記述からロボット自身の特性を考慮して動作計画を行ったうえで、操作を実行する必要がある。このように、目標線だけの記述だけではロボットを動作させることはできず、中間表現の中に、さらにロボットごとの動作に表すステップも必要であると言える。

そこで筆者らは、まず文献[15]で中間表現として、被覆操作の目標線による記述方法、および三層構造を用いたモデル化を提案した。そこでは **Fig. 3** に示すように、以下の三つの階層に分けてロボットによる被覆操作のモデル化を提案した。

- インストラクションレベル：物体上と布上それぞれに対応するよう引かれた目標線を用いて、物体を包むための布の重ね方を表す階層。
- ハンドリングレベル：把持点と、把持点の経路（手先経路）を用いて、布を物体に重ねるための布の動かし方を表す階層。
- ロボットレベル：個々のロボットに応じた記述（ロボット動作）を用いて、ロボットの動作計画を表す階層。ロボッ

Fig. 4 Target lines on a fabric section and an object

トの外形などの特性を考慮し、手先経路上での双腕ハンドでの布の持ち替えや折畳みの動作を計画する。

そして、目標線による被覆操作の記述から、ロボットのための動作を生成する手法について述べた。

本論文では、これまで行ってこなかった部分として、人間の大きな指示に含まれている意図を理解し、適切な中間表現を生成する手法について提案する。また、中間表現からロボット動作を生成する部分についても、扱える物体や布の範囲を広げるための拡張を行う。大きな指示を理解する上で問題となるのは、まず、物体の凹凸について、作業に用いる布のサイズによって凹面を埋めるべきかの判断である。そこで本論文では、凹面を含むような複雑な形状の物体に対しても適切な被覆が実現されるように、形状の局所的な凸性に着目して、布が覆いかぶさる物体表面の領域（以降、被覆領域と呼ぶ）を適切に生成する方法を提案する。次に問題となるのは、大きな指示を行っているときに発生する手振れの影響である。そこで、この手振れの影響を補正し、適切に目標線を生成する方法を提案する。また、中間表現からロボット動作を生成する部分について、文献[15]の中で報告した方法は、長方形の布であり、かつ、布の辺と平行な布上目標線にしか使用できない問題があった。そこで本論文では、拡張した手先経路生成方法を提案する。そして、これらを一連の被覆作業システムとして統合し、提案手法がロボットへの被覆作業の教示に有効であることを示す。

本論文の構成としては 2 章ではおおまかな指示を目標線によって記述する方法、3 章では目標線から手先経路を生成する方法について述べる。4 章では実際のロボットによる、本手法を用いた被覆操作の実験について述べる。最後に 5 章で結論を述べる。

2. 目標線による大まかな指示の記述

本章では、目標線の定義と、大まかな指示による教示を目標線によって記述する方法について述べる。

2.1 目標線の定義

本論文では、 $\mathcal{A}_1$, $\mathcal{A}_2$ の二つの座標系が与えられたとき、 $\mathcal{A}_1$ から $\mathcal{A}_2$ への同時変換行列を式 (1) のように表記する。

$${}^{\mathcal{A}_2}T_{\mathcal{A}_1} = \begin{pmatrix} {}^{\mathcal{A}_2}R_{\mathcal{A}_1} & {}^{\mathcal{A}_2}t_{\mathcal{A}_1} \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{pmatrix}, \text{ where } \mathbf{0}_3 = (0, 0, 0) \quad (1)$$

ベクトル v の座標系 $\mathcal{A}$ 上での表現を ${}^{\mathcal{A}}v$ と表記する。

Fig. 4 に示すように、ワールド座標系を $\mathcal{W}$ とし、対応する

Fig. 5 Winding a fabric section diagonally

物体上・布上の目標線は L_j^o, L_j^d と表す (j は目標線のインデックス). 各目標線には目標線座標系 $\mathcal{T}_i$ が張られており, 物体上目標線座標系の位置成分を t^o , 布上目標線座標系の位置成分を t^d とするとき, 物体上目標線 w_{t^o} 間の間隔と布上の目標線 w_{t^d} 間の間隔は対応するようになっている (式 (2)).

$$\|w_{t_{\mathcal{T}_i^o}} - w_{t_{\mathcal{T}_{i-1}^o}}\| = \|w_{t_{\mathcal{T}_i^d}} - w_{t_{\mathcal{T}_{i-1}^d}}\| \quad (2)$$

被覆操作を行うときには, この物体上の目標線座標系 $\mathcal{T}_i^o$ と布上の目標線座標系 $\mathcal{T}_i^d$ が重なるように操作する. 各目標線座標系の x 軸方向は目標線の進行方向を示す. 物体上の目標線座標系の z 軸方向は表面の法線を表し, 布上の目標線座標系の z 軸方向は物体と触れない側の面の法線を表す. この目標線座標系 $\mathcal{T}$ の張られた目標線 L のペアを用いて, 被覆する方向と, 目標の被覆状態を表す. 目標線を用いれば, Fig. 5 に示すような, 円柱へ布を斜めに巻く操作も記述することができる.

2.2 教示方法

本節では, 被覆操作を教示する方法について述べる. 実際にユーザが指示する環境としては, 本手法では実空間で教示デバイスを用いて教示を行う. この教示デバイスを用いることにより, 大まかな指示による被覆操作の教示が可能となり, 教示内容を目標線として記述することができる.

Fig. 6 に提案する教示方法を示す. ユーザは教示デバイスを持ち, 望みの被覆領域に向けて動かしていくことにより, システムが指示を理解し目標線を生成していく. この教示デバイスにはデプスセンサと磁気式のモーションセンサが取り付けられており, 深度情報と教示デバイスの動きを取得することができる. このデータから物体上の被覆領域を計測し, 目標線を生成していく. モーションセンサより求まるデプスセンサの座標系を $\mathcal{K}$ とし, デプスセンサは被覆に用いる布の幅 d 分の線分をスキャンする (以降, 得られた点群データをスキャンラインと呼ぶ). 物体表面の向きを表すラインの始点 t^s , 終点 t^e として, 得られたスキャンラインを構成する点の集合 S の端点を求め, この t^s, t^e の中点を t^o とする. 本論文では, この t^s, t^e で表される線分をフィットラインと呼ぶこととする.

次に, このフィットラインとデプスセンサの座標系 $\mathcal{K}$ から物体上目標線座標系 $\mathcal{T}^o$ を求める方法について述べる. Fig. 7 中央部に示す教示デバイスのデプスセンサ座標系 $\mathcal{K}_i$ から見た物体上目標線座標系 $\mathcal{T}_i^o$ の姿勢 ${}^{\mathcal{K}_i}R_{\mathcal{T}_i^o}$ について, 初めに式 (3) を用いて, フィットラインの単位ベクトル f を Fig. 7 左上部に示すように計算する.

$$f = \frac{t_i^e - t_i^s}{\|t_i^e - t_i^s\|} \quad (3)$$

次に, 式 (4) を用いて, Fig. 7 右上部に示すように $\mathcal{T}^o$ の x

Fig. 6 Instruction of a target line on an object

Fig. 7 Calculation of $\mathcal{T}^o$

Fig. 8 Treated area (a) false instruction (b) true instruction

軸成分 m_x を求める. この m_x と f から m_z を求め, 最後に m_x と m_z から m_y を求める. このようにして $\mathcal{T}^o$ の軸成分から, $\mathcal{T}^o$ の姿勢 ${}^{\mathcal{K}_i}R_{\mathcal{T}_i^o}$ を求める.

$${}^{\mathcal{K}_i}R_{\mathcal{T}_i^o} = \begin{pmatrix} m_x & m_y & m_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$m_x = \frac{t_i^o - t_{i-1}^o}{\|t_i^o - t_{i-1}^o\|}, \quad m_z = m_x \times f, \quad m_y = m_z \times m_x$$

また, Fig. 8 (a) に示すように, 教示デバイスを動かしているときに, 誤ってデバイスを傾けてしまい, $t_3^o \rightarrow t_4^o$ のように目標線が逆走してしまう場合がある. そこで, 本手法では Fig. 8 (b) に示すように, 記述済みの領域に再び目標線を引いてしまうのを防ぐ判定処理を用いる. 判定処理では Fig. 9 に示すように, 新たに入力された目標線 t_i^o が一つ前の t_{i-1}^o の表す領域と重複していないか判定する. 具体的には式 (5) に示すように, 記述済みの領域に存在していないかを v_i が閾値 α 以上の長さであるかで判定し, かつ, 急に目標線が曲がるような入力でないか

Fig. 9 Instruction of a target line on an object

Fig. 10 Instruction of target line on fabric

を $|\theta_i|$ が β 以内の角度にあるかで判定する。例えば、教示デバイスで t_{i-1}^o まで入力されているとき、逆走して式 (5) 判定外のデータが入力されている間は目標線の更新が止まり、再び判定内のデータが入力されると t_i^o から目標線が更新されていく。

$$\|v_i\| > \alpha \quad \text{かつ} \quad |\theta_i| < \beta \quad (5)$$

ただし、

$$v_i = t_i^o - t_{i-1}^o, \quad \cos \theta_i = \frac{n_i \cdot v_i}{\|n_i\| \|v_i\|}, \quad n_i = {}^w R_{T_{i-1}^o} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

最後に布上目標線の入力方法について述べる。Fig. 10 に示すように、1本の線分で表せる目標線を布上に入力する場合、初期布上目標線として、目標線の始点 t^{ds} と終点 t^{de} を教示デバイスで決める。このとき、布上目標線の始点は物体上目標線の始点を用いるので、 $t^{ds} = t_0^o$ となり、終点 t^{de} の方はデバイスでスキャンラインを1ラインだけ入力し、そこから求まるフィットライン中点の位置を終点とする。システムは布上目標線座標系を、式 (2) のように物体上の目標線座標系間の間隔に合わせて、始点 t^{ds} から、始点と終点より表される線分方向に布上の目標線座標系を配置する。座標系の姿勢は式 (6) のように、始点終点入力時のフィットラインから計算する。これらのフィットラインから求まる布の面（デバイスから反対側の方の面）の垂線 m_z と、初期布上目標線方向 $t^{de} - t^{ds}$ を用いて座標系の姿勢は定められる。このようにして布上目標線 L_j^d を生成する。

$${}^w R_{T_i^d} = \begin{pmatrix} m_x & m_y & m_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$m_x = \frac{t^{de} - t^{ds}}{\|t^{de} - t^{ds}\|}, \quad m_z = f \times m_x, \quad m_y = m_z \times m_x$$

このように、教示デバイスを用いた教示方法により、大まかな指示による被覆操作の教示が可能となり、その内容を目標線として記述することができる。

2.3 凹面への目標線指示

2.3.1 凹面への被覆指示

前節では、大まかな指示から目標線を生成する方法について述べた。しかし、実際の物体形状には凹凸があり、被覆を行うときは、その凹凸を考慮する必要がある。重力やハンドの引っ

Fig. 11 Wrapping a concave surface

Fig. 12 Convex hull of a scan line

張る力を用いて凹面部分に布を入れ込むような被覆も挙げられるが、本論文では布の幅より小さい凹面は避けて布で物体を覆うという代表的な被覆を対象とする。また、本論文では、ユーザからは重力方向を考慮した破綻のない指示が送られていることを前提とする。そのため、ハンドが操作を終了して布を放した瞬間、布が剥がれ落ちるようなことはないものとする。これらに基づき、本節ではその被覆に適切な凹凸の処理方法を提案する。例えば、Fig. 11 に示すように、目標線を凹面に引いても、実際は布の柔軟性のために、目標線 L_1^o 側の凹面に布を被覆することはできない。そのため、物体上目標線 L_2^o のように、凹面上をショートカットするように目標線を引く必要がある。さらに、実際の物体にはスキャンライン方向の物体形状の凹凸と、目標線進行方向の凹凸を三次元的に考慮しなければならない。それらを踏まえ、次項より凹面を考慮して目標線を生成する方法について述べる。

2.3.2 スキャンライン上での凸包処理

本項ではスキャンライン上の凹凸の処理について述べる。初めに、センサ座標系 $\mathcal{K}$ から得た布の幅 d 分のスキャンラインを構成する点の集合 S (Fig. 12 (a)) の凸包多角形 $CH(S)$ を求める (Fig. 12 (b))。この $CH(S)$ について、センサ座標系 $\mathcal{K}$ から見て $CH(S)$ の上包と、センサ座標系の z 軸の延長線の交点を t^o とする (Fig. 12 (c))。そして、 t^o を含む上包の線分を t^o を中心に布の幅 d の長さまで延長し、フィットラインとする (Fig. 12 (d))。これにより、スキャンライン上での凹部分の凸化ができる。

Fig. 13 Global Convex hull (a) on 2D (b) on 3D

Fig. 14 Global convex hull (a) desired wrapping area (b) convex hull of the object

2.3.3 スキャンライン間での凸包処理

本項ではスキャンライン間での凸包化処理を行い被覆領域を凸化する処理について説明する。前項より、入力された各スキャンラインは凸化され、被覆領域はフィットライン群（フィットラインの始点、終点の点群 $F = t_i^s, t_i^e$ ）として表される、本手法は、このフィットライン群に対し凸化処理を行う。

その前にここで、三次元物体上の被覆領域への凸包化の問題について述べる。一般的な凸包化処理とは、ある形状の物体や物体群について形状の凹部を埋め凸包を生成するものであり [16] [17]、通常行われる物体形状全体の凸包化は global convex hull と呼ばれる。また、関連して、物体形状の凹凸を数値化する convexity measurement, 凹凸から物体を大まかなセグメントに分割する Convex decomposition [18]~[20] の研究も挙げられる。

次に、被覆領域生成に global convex hull を用いた場合の例を Fig. 13 に示す。Fig. 13 (a) に示すように、凹面を持つ形状に布を被覆する場合は、物体に凸包化処理を行い、凹部分を避けた面に被覆領域を生成する必要がある。また、Fig. 13 (b) に示すような、凹面を持つ三次元物体に布を被覆する場合でも、物体に凸包化処理を行えば凹部分を避けた被覆領域を生成することができる。しかし、Fig. 14 (a) に示すような巻き付けを含む被覆を望む場合に、Fig. 13 (b) に行った global convex hull 処理を用いた場合、Fig. 14 (b) に示すような被覆領域を生成してしまう。この被覆領域を用いた場合、ロボットは布を何もない領域に巻き付けようとするため布が弛んでしまい、目標どおりの巻き付けを行うことができない。このように、一般的な global convex hull 処理では、布の幅を考慮した被覆に最適な凸面領域を適切に生成することはできない。また、関連する物体形状全体の凹凸の数値化や、大まかな形状分割手法に関しても、global convex hull のように物体全体を基に凹凸を扱っていくので、被覆に適した凸化処理を行うことはでき

Fig. 15 Global concave and local convex

Fig. 16 Local convex hull (a) initial wrapping area (b) optimized wrapping area (c) calculation of an angle

ない。

そこで、まず、三次元物体上の被覆領域に求められる凹凸形状の条件について論じる。被覆に理想的な領域は、Fig. 14 のように入力された領域全体で凸包の性質を持つということではなく、Fig. 15 に示すように、領域中の至る所で局所的な凸包の性質を持てばいいと言える。本研究における局所的な凸包とは、あるフィットラインとその前後のフィットラインから構成される局所領域が凸面であるということの意味し、領域中の至る所で局所的な凸包の性質を持つ場合、被覆領域が凸であると呼ぶこととし、凸な領域に目標線が引かれているとき、目標線は凸であると呼ぶこととする。

次に、この条件を満たす被覆領域を生成する提案方法について述べる。初めに、ある局所領域の凹凸判定する方法について述べる。Fig. 16 (a) に示すように、あるフィットラインと、その前後のフィットラインからなる領域について、 $\Delta(t_{i-1}^s, t_i^e, t_{i+1}^e)$ と $\Delta(t_{i-1}^s, t_i^e, t_{i+1}^s)$ の二つの三角形の垂線どうしが成す角度 θ_i^s を式 (7) から求める (Fig. 16 (c))。

$$\sin \theta^s = \frac{\|(a \times b) \times (b \times c)\|}{\|a \times b\| \|b \times c\|} \quad (7)$$

ただし、

$$a = t_{i-1}^s - t_i^e, \quad b = t_i^e - t_{i+1}^e, \quad c = t_{i+1}^e - t_{i+1}^s$$

このように θ_j^s を求める処理を、これ以降 $\theta_i^s = \text{CalAngle}(\Delta(t_{i-1}^s, t_i^e, t_{i+1}^e), \Delta(t_i^e, t_{i+1}^e, t_{i+1}^s))$ と書くことにする。この角度が負の場合、二つの三角形で表されている面は凹面であるので、凸包化処理を行う。このとき、一般的な凸包化方法では凹面を塞ぐため、 $t_{i-1}^s \sim t_{i+1}^s$ 間を繋ぎ、 t_i^e を消去してしまうが、提案方法では Fig. 16 (b) に示すようにフィットラインの端点として残すために、 t_{i-1}^s と t_{i+1}^s の中点を補完点 $t_i^{s'}$ として作成する。このようにして被覆領域を表す点群を更新する。この処理内容を $\Delta(t_{i-1}^s, t_i^e, t_{i+1}^e)$ と $\Delta(t_i^e, t_{i+1}^e, t_{i+1}^s)$ の側についても、同様に行う。そして、すべての θ_j^s, θ_j^e ($j = 2, \dots, N-1$) が非負となるように、これらの Convex hull 処理を含む Algorithm に示す

Algorithm Local Convex Hull, (t^s, t^e)

```

loop
  count = 0
  for all  $i$  such that  $0 < i < N$  do
     $\theta^s = \text{CalAngle}(\Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i-1}^s), \Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i+1}^s))$ 
     $\theta^e = \text{CalAngle}(\Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i-1}^e), \Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i+1}^e))$ 
    if  $\theta^s < 0$  then
       $t_i^s \leftarrow \frac{1}{2}(t_{i+1}^s - t_{i-1}^s)$ 
      count ++
    end if
    if  $\theta^e < 0$  then
       $t_i^e \leftarrow \frac{1}{2}(t_{i+1}^e - t_{i-1}^e)$ 
      count ++
    end if
  end for
  if count = 0 then
    return
  end if
end loop
    
```

処理を行う。

この Algorithm は局所的な凸包化処理をフィットラインのシーケンス内で繰り返し行うことにより凹部分を埋めていくことができる。これにより局所凸包の性質を持つ被覆に適した領域を生成することができる。以上のようにして、フィットラインシーケンス上で提案方法の局所凸包化処理を行うことにより、既存の凸包処理では生成できなかった、被覆に適した到る所凸の領域生成、および目標線の指示が可能となる。

2.4 目標線の補正処理

ここでは、目標線への手振れの影響を補正する方法について述べる。教示デバイスによる目標線入力時、直線を入力したつもりでも手の振れによって、目標線も振れてしまう場合がある。目標線の入力については 2.2 節の式 (5) で定義したように、線が急に逆走したり、大きく離れた所に入力されないものとしている。よって、この教示デバイスに伴う手の振れとは、入力したい目標線の進行方向に対する垂線方向でのずれである。物体へは直線や緩やかな曲線形状の目標線を入力することが多いため、提案方法は、この直線や緩やかな曲線の目標線の入力を可能にするための補正を行う。そこで、必要となる線を滑らかにする方法としては、線を構成する点の位置を補正するスプライン補間等が一般的に挙げられるが、これらの補正をそのまま物体上目標線に行った場合、Fig. 17 のように角上では物体内にめり込むような形で補正してしまう場合がある。そのため、提案方法では式 (8) のように目標線が物体表面上にあるのを保つような補正を行う。具体的には、スプライン補間で滑らかにした目標線 (Fig. 18 (a)) を物体表面上へ補正目標線として射影する。このとき、まず、滑らかにした目標線を元のフィットライン上あるいはその延長線上に射影する方法が考えられるが、Fig. 18 (b) のように、手振れにより物体の角付近のフィットラインが傾いている時は、射影した目標線が物体表面より離れてしまう場合がある。そこで、提案方法では Fig. 18 (c) のように、元の物体上目標線座標系で表される物体表面に射影する。これにより、目標線補正時の物体へのめり込みを防ぎつつ、線を滑らかにすることができる。

Fig. 17 Buried point in an object

Fig. 18 Projection of spline points (a) spline interpolation (b) projection on the plane

Fig. 19 Swinging hand path in a straight line part of the target line

$$t_i^{c'} = t_i^c - m_i n_i^z \quad (8)$$

ただし、

$$n_i^z = {}^w R_{T_i^o} (0, 0, 1)^T, \quad m_i = n_i^z \cdot (t_i^c - t_i^o),$$

$$t_i^c = (1-s)^2 t_{i+1}^o + 2s(1-s) t_i^o + s^2 t_{i-1}^o, \quad (s = 0.5)$$

次に、目標線座標系列の姿勢成分を考慮して、補正目標線の直線部分の間引き処理を行う。これを行う理由としては、3章で述べる手先経路（目標線より生成される布を動かすための手先経路）に影響があるためである。Fig. 19 に示すように、本来、直線状に並ぶ物体上目標線座標系 $T_i^o \sim T_{i+2}^o$ から生成される手先位置 $H_i \sim H_{i+2}$ は同じ位置を指すべきである。しかし、実際は入力の手振れの影響により $T_i^o \sim T_{i+2}^o$ 間も振れ、 H_i 付近で余分に振れる手先経路となってしまう。そこで、式 (9) に示すように、二つの目標線座標系 T_i^o, T_j^o ($j = i+1, i+2, \dots, N$)

Fig. 20 Generation of hand paths

の目標線の方角を表す x 軸どうし、布が重なる方向を表す z 軸どうしがなす角度 $\theta_{i,j}^x, \theta_{i,j}^z$ を求める。

$$\theta_{i,j}^x < \beta_x \text{ かつ } \theta_{i,j}^z < \beta_z \quad (9)$$

ただし、

$$\cos \theta_{i,j}^x = \frac{n_i^x \cdot n_j^x}{\|n_i^x\| \|n_j^x\|}, \quad \cos \theta_{i,j}^z = \frac{n_i^z \cdot n_j^z}{\|n_i^z\| \|n_j^z\|},$$

$$(n_k^x = {}^w R_{T_k^o}(1, 0, 0)^T, n_k^z = {}^w R_{T_k^o}(0, 0, 1)^T, k = i, j)$$

そして、 T_i^o から T_{i+2}^o までのそれぞれの角度が閾値 β_x, β_z 以下だった場合、同じ平面上にある目標線の直線部分であるとみなし、直線上の近い姿勢の目標線座標系 $T_i^o \sim T_{i+1}^o$ を間引く。そして、間引いた分 T_{i+2}^o 以降の座標系のインデックスを i 番めから振りなおす。このようにして、細かな振れを減らす処理を施す。本システムは、これらの物体上目標線の補正処理によって、手振れの影響を軽減することができる。

3. 目標線からの手先経路生成

本章では、目標線から布を動かすための手先経路を生成する方法について述べる。手先経路生成方法については文献[15]で報告を行っているが、以前の提案方法は長方形の布で、辺に平行な布上目標線にしか対応していなかったため、本論文では、それ以外にも対応するように改良した手先経路生成方法を述べる。

3.1 手先経路生成

手先経路生成方法は目標線と布の把持点の関係から、実際に布を動かすための右手と左手の手先経路 h^r, h^l を生成する。実際には、手先経路上に座標系 H_i^r, H_i^l ($i = 0, 1, \dots$) を考え、ワールド座標系 $\mathcal{W}$ からの同次座標変換行列を求める (式 (10))。

$${}^w T_{H_i} = \begin{pmatrix} {}^w R_{H_i} & {}^w t_{H_i} \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{pmatrix}, \text{ where } \mathbf{0}_3 = (0, 0, 0) \quad (10)$$

ロボットが布を把持する位置として、両手で把持する場合は、被覆開始時点の右手と左手の手先経路座標系 H_0^r, H_0^l を設定する。Fig. 20 左部に示すように、この被覆開始時点の手先経路座標系を手先経路の始点とし、手先経路を生成していく。 i 番めの物体上と布上目標線座標系どうしを重ねるための右手と左手の手先経路座標系 H_i^r, H_i^l は、布上目標線座標系 T_i^d と手先経路座標系 H_0 との初期位置関係、物体上目標線座標系 T_i^o より求める (Fig. 20 右部)。手先経路座標系 H_0 から布上目標線座標系 T_i^d への同時変換行列を ${}^d T_{H_0}$ とするとき、手先経路

Fig. 21 Interpolation of a hand path section

座標系からワールド座標系への同時変換行列は、式 (11) に示すように計算する。

$${}^w T_{H_i^r} = {}^w T_{T_i^o} {}^d T_{H_0^r}, \quad {}^w T_{H_i^l} = {}^w T_{T_i^o} {}^d T_{H_0^l} \quad (11)$$

本論文では今回、布の力学モデルや状態フィードバックを用いた、高精度の位置合わせ作業は対象としていない。本研究は初期目標として、人間の日常的な包む動作のような、大まかに布を合わせる操作の実現を目指しているためである。そのため、今回の操作では布の弛みの考慮は行わないものとする。それにより、手先位置が H_i で i 番めの目標線座標系どうしまでが重なっているとき、布上目標線座標系 T_i^d から手先位置 H_i までの布は、弛まずに平面形状を保っていると見なす。この手先経路生成方法により、目標線から手先経路を生成することができる。

3.2 手先経路の補正処理

物体の角上での目標線から生成される手先経路は Fig. 21 (a) のような H_i, H_{i+1} を結ぶ直線経路となる。布の把持点 H_i と T_i^o の位置関係を布に維持したまま、 H_{i+1} まで手先を移動させることを考慮すると、 H_a を経由するような円弧上の経路で布を移動させるのが理想的である。このように、 H_i, H_{i+1} 間の中点を H_b とすると、物体上目標線座標系 T_i^o, T_{i+1}^o 間の姿勢が大きく変わるほど、 H_a と H_b の差が大きくなっていく。この問題を避けるために、本手法では二つの目標線座標系 T_i, T_{i+1} の姿勢変化 $\theta_{i,i+1}^x$ が閾値 β_h 以上の場合、経路間を円弧状に補間する (Fig. 21 (b))。ワールド座標系から見た目標線座標系 T_i の姿勢のクォータニオンを q^{T_i} とし、二つの目標線座標系間を n 分割して円弧補間する。そのために式 (12) に示すように、クォータニオンの球面線形補間を用いて二つの目標線座標系姿勢間の補間姿勢 q_k^{int} を生成し、これを元に、円弧状に補間する手先姿勢 H_k^{int} を配置する。この補間手先姿勢 H_k^{int} を経由して手先を移動させる。この補正処理によって、移動中の布と把持点の位置関係を変えずに、布を動かすことができる。

$$q_k^{\text{int}} = \frac{\sin\left(\left(1 - \frac{k}{n}\right)\omega\right)}{\sin \omega} q^{T_i} + \frac{\sin\left(\frac{k}{n}\omega\right)}{\sin \omega} q^{T_{i+1}} \quad (12)$$

ただし、

$$\omega = \cos^{-1}\left(q^{T_i} \cdot q^{T_{i+1}}\right), \quad (k = 0, 1, \dots, n)$$

4. 実 験

4.1 実験環境

まず、本システムは 1 章で述べた被覆操作の 3 階層モデル化に基づき、各機能が ROS [21] のモジュール群として実装されている (Fig. 22). インストラクションレベルでは、教示デバイスによるオペレータの教示データから、2 章で述べた目標線生成方法を用いて、目標線を生成している。ハンドリングレベルでは、この目標線から、3 章で述べた手先経路生成方法を用いて、手先経路を生成している。ロボットレベルでは、この手先経路から、逆運動学計算モジュール等を用いて、最終的なロボットの関節動作計画を生成している。このように、教示デバイスによるオペレータの教示データが階層モデルを経て、最終的なロボットの関節動作計画に変換され、これをロボットに送ることにより、ロボットが被覆操作を行うことができる。

次に、教示に用いたデバイス (Fig. 23 (a)) は、デプスセンサ (asus 製 xtion), 磁気式モーションキャプチャ装置 (polhemus 製 fastrak) を作成したグリッパに取り付けたものであり、デブ

Fig. 22 System overview

(a)

(b)

Fig. 23 An instruction device (a) the appearance (b) the graphical feedback display

スセンサ座標系とモーションキャプチャ装置の座標系は事前にキャリブレーション済みである。また、デバイスをコントロールするために、指輪型プレゼンツール (コクヨ製 ELA-FP1) を用いた。各ボタンには入力機能として、ボタンを押している間、フィットラインの入力が行われる、強制的に現在のフィットラインを入力する、現在のフィットラインを消すなどを割り当てた。Fig. 23 (b) は、教示中に入力を確認するためのフィードバックディスプレイであり、デバイスの RGB カメラ画像が映る画面中には、現在のスキャンラインや入力された目標線、フィットライン群などの情報が表示される。

以降の実験について、2.2 節の式 (5) で述べた目標線入力判定の閾値は、 α は 1 [cm], β は 45° とした。なお、これらのパラメータは物体の形状や、スキャンラインで表される被覆領域が要求する再現精度を考慮して設定する。

4.2 目標線入力の手振れ補正

本節の実験では、2 章で提案した教示デバイスを用いた目標線の入力、目標線および手先経路の手振れ補正方法について評価を行う。4.2.1 項では、教示デバイスで目標線を入力したときの目標線自体の誤差および、提案補正方法の効果について述べる。4.2.2 項では、スムージング処理による物体への目標線めり込み問題 (Fig. 17) に対して、提案補正方法の効果について述べる。4.2.3 項では、目標線補正処理の最終的な手先経路への効果について述べる。これらより、手振れの影響を減少し、入力したい目標線が作成され、手先経路が生成できることを示す。

4.2.1 目標線入力および補正実験

この実験では、教示デバイスを用いた教示から目標線の入力を行う。教示デバイスを用いて入力したい主な目標線は、直線と、緩やかな曲線である。そこで、本実験では直線と緩やかな曲線を入力目標線とする。この入力目標線と実際に入力された目標線との誤差を求める。また、線に乗る手振れのノイズを 2.4 節で述べた補正処理で軽減した場合の、入力目標と補正後の目標線との誤差についても評価を行う。入力する直線、曲線は以下のガイドラインの線とする。

Case1: Fig. 24 (a) のように、36 [cm] の高さの机の上に 50 [cm] の直線ガイドラインを配置。

Case2: Fig. 24 (b) のように、36 [cm] の高さの机の上に半径 10 [cm] の円柱上に円周 90° 分の曲線ガイドラインを配置。

実際の入力時には、ガイドラインを紙で隠した状態で、元のガイドラインと同じようになるように目標線の入力を行う。今回の教示デバイスの最短センシング距離は 80 [cm] であり、実験中はそれ以上離れた高さで入力作業を行っている。入力はい

(a)

(b)

Fig. 24 Condition of the instruction (a) a line (b) a curve line

Table 1 Result of the instruction (Standard deviation)

	Case1(line)		Case2(curve line)	
	μ_x [mm]	μ_θ [°]	μ_x [mm]	μ_θ [°]
Input	4.8 (2.2)	3.85 (0.84)	5.1 (2.5)	1.5 (0.6)
Smoothing	4.1 (1.9)	0.63 (0.42)	5.0 (2.5)	0.6 (0.2)

Fig. 25 Result of smoothing

下の条件で、10回ずつ入力を行う。

- ・線の始点としてスタートポイントはあらかじめ入力してある。
- ・フィードバックディスプレイを見ながらデバイスで入力する。
- ・スタートからゴールまで手を止めず、動かし続けて入力する。

実際に入力した目標線 (Input) に提案補正処理を行い、補正目標線 (Smoothing) を生成する。これらの線 (Input, Smoothing) の滑らかさを測る。本実験では、Fig. 25 (a) に示すように、直線は y 軸方向 1 [cm] ごと、緩やかな曲線は円周方向 1° ごとに線分として分割し、手振れによる線の振れとして、隣り合う線分どうしの x 軸成分の角度を計算する。この線分どうしの成す角度の線全体での絶対値平均角度を滑らかさの指標として、入力した線ごとに求める。

Table 1 に結果として、入力 10 回分のガイドラインと目標線の x 軸方向の誤差の絶対値平均 μ_x と絶対値平均角度の 10 回分の平均角 μ_θ を示す (カッコ内は標準偏差)。まず、平均誤差は 5 [mm] 前後に収まり、そして、Case1, 2 とも、補正処理により、平均角度が角度が小さくなり、入力された目標線の手振れの影響を減少させていることが分かる。特に、平面上に入力した Case1 (直線状の目標線) は間引き処理の効果で、入力した目標線と比較して、補正後の目標線は角度の絶対値平均角度が大幅に小さくなっている。この間引き処理の効果の典型例として、Fig. 25 (b), (c) に Case1 の入力した目標線と補正目標線を示す。このように、手振れの影響により振れている目標線が補正処理により滑らかにされ、直線に近づけられているのが分かる。また、さらに実験 4.2.3 項では、本実験の目標線を滑らかにした結果が、具体的に実際の被覆操作に必要な手先経路にどのような効果をもたらすかを示す。

Fig. 26 Result of buried lines on an object

4.2.2 補正処理のめり込み減少効果の評価実験

次に、一般的なスプライン補正では、物体の角付近での目標線が物体内にめり込んでしまう問題がある。これに対処した提案補正方法のめり込み防止の効果を評価する。そこでまず、角状 (0, 15, 30, 45°) の目標線 (例 Fig. 26 (a), (b)), 円周状 (90° を 2~10 分割で作成) の目標線 (例 Fig. 26 (c), (d)) の 2 種類を作成する。これらの結果例の図は、角や曲面上の目標線 (Input data) を横から見たものにならうようにプロットされている。この線について、スプライン補正 (Conventional) と提案方法 (Proposed) により補正を行い、元の目標線の表す角へのめり込み度合いを評価する。そのために、元の目標線の長さとして、生成された補正目標線の長さを比較した。Fig. 26 (e), (f) のように元の目標線と提案方法を用いた補正目標線の長さ

Fig. 27 Result of hand pathes

の変化は角状、円周状それぞれ一般的な補正方法より小さくなり、一般的な補正法よりめり込みを少なくしていることが分かる。布の巻き終わりが物体の角付近にあるケースでは、物体と手先が接近する場合がある。このようなときに干渉回避システムが働いている場合、動作が停止してしまう可能性がある。本手法を用いてめり込みを防ぐことにより、このような状況を減らすことができる。

4.2.3 補正目標線を用いた手先経路の生成実験

本実験では、補正目標線から生成される手先経路の評価を行う。本実験では、まず、実験 4.2.1 項で扱った直線上の入力目標線と補正目標線を、Fig. 27 (a) のような箱上面を表す目標線であると想定する。そして、箱を布で覆うために、60 [cm] の布上目標線を作成し、この布上目標線と実験 4.2.1 項の入力 10 回分の入力目標線と補正目標線より手先経路を生成した。

ここでまず、この箱上面の目標線から生成される手先経路がどのような位置にくるか説明する。Fig. 27 (a) の布を把持している手先が次に目指す手先位置について、振れのない直線状の目標線が箱上面に記されている場合、その目標線から生成される経由点（手先経路を構成する点）は、すべて箱上平面の先にある一点（点 P）に生成される。しかし、手振れの影響を受けた直線状の目標線の場合、その目標線から生成される経由点は点 P の左右にふらついて生成されてしまう。

次に、実際の入力 10 回分の目標線から生成された手先経路について、Table 2 に評価結果を示す。手先経路の経由点の数に

Table 2 Result of the hand path (Standard deviation)

	μ_s [point]	μ_e [m]
Input	42.3 (0.8)	0.04 (0.03)
Smoothing	5.2 (2.4)	0.03 (0.01)
Decreasing rate	85%	

ついて、10 回分の平均値を μ_s として示す。そして、各経由点の理想的な点 P からの誤差距離の平均を計算する。その平均距離誤差の 10 回分の平均値を μ_e として示す。加えて、補正前と補正後での経由点数の減少率を示す（カッコ内は標準偏差）。また、経由点の左右の振れの典型例として、Fig. 27 (b), (c) に箱上面から見た目標線と経由点を示す。これらのように、大幅に入力時の手振れの影響によるふらつきを抑え、経由点を減らすことができていのが分かる。補正前の目標線からでは左右に大きく繰り返して振れる手先経路を生成してしまい、この振れは布を角にひっかけたり、大きな皺を生む原因となる。この問題に対し、4.2.1 項の補正処理実験および、その線を用いた手先経路生成の本実験により、提案補正方法を用いることで、大きな左右への繰り返しの振れを、大幅に少なくすることができることを示した。

4.3 大まかな指示を用いた教示による被覆操作

この節では、提案した教示法によって作成された目標線を用いて被覆が行えることを示す実験を行った。実験には、双腕ロボット（Rethink 製 Baxter）を使用し、被覆に用いる布は綿製のさらし布を用いた。

4.3.1 凹凸を含む曲面形状への目標線を用いた被覆

この実験では、凹凸を含む曲面物体を布で包む実験を行う。初めに、幅の狭い布で Fig. 28 (a) に示す目標線ペアのように物体を布で包むとする。このとき、布の幅より物体の埋めるべき凹部分は（Fig. 28 (b)）の部分となる。デバイスから入力されたフィットライン群（Fig. 28 (c)）が、凸化処理により埋められ（Fig. 28 (d)）、これから目標線、そして、その目標線ペアと把持点から手先経路を生成し（Fig. 28 (e)）、被覆した結果を Fig. 28 (f) に示す。このように物体の考慮すべき凹部分のみを埋めた目標線を生成し、包むことができていのが分かる。

次に、幅の広い布で Fig. 29 (a) に示す目標線ペアのように物体を布で包むとする。このとき、布の幅より物体の埋めるべき凹部分は、幅の狭い布のときと違い（Fig. 29 (b)）の部分となる。実際にデバイスで教示するとき、布の幅を考慮することにより、物体上部の半円柱からなる凹部分は埋めることができ、布幅に適したフィットライン群（Fig. 29 (c)）を生成することができた。さらにフィットライン群の凹部分が凸化処理により埋められ（Fig. 29 (d)）、これから目標線、そして、その目標線ペアと把持点から手先経路を生成した（Fig. 29 (e)）。被覆した結果として、Fig. 29 (f) に示すように、物体の凹部分を考慮して包むことができた。これらのように、布の幅に合わせて凹部分を考慮し、被覆操作を行うことができた。

4.3.2 複数の目標線を用いた被覆

この実験では、Fig. 30 (a) に示すような目標線を引き、平包みという包み方を行った。Fig. 30 (b) に示すように、4 本の目標線をデバイスで入力し、手先経路を生成した。以前の手先経路

Fig. 28 Wrapping by a narrow cloth (a) plan of wrapping (b) concave places to bury (c) fit lines (d) convexed fit lines (e) target lines and a hand path (f) result

Fig. 29 Wrapping by a wide cloth (a) plan of wrapping (b) a concave place to bury (c) fit lines (d) convexed fit lines (e) target lines and a hand path (f) result

Fig. 30 Wrapping a box as Hira-Dutumi (a) plan of wrapping (b) target lines and hand pathes (c) 1st (d) 2nd (e) 3rd (f) result

生成方法では、例えば長方形の布の中心を通るような、布の辺に平行な布上目標線しか用いることができなかった。これに対し本システムでは、改良した手先経路生成方法を用いているため、布の対角線上に布上目標線が引かれているような場合でも、手先経路を生成することができる。これを用いて、ロボットは Fig. 30 (c)~(e) に示すように箱を包んでいく。そして、結果として Fig. 30 (f) に示すように、箱を平包みすることができた。

4.4 考察

本手法を用いた被覆実験4.3節の結果のように、今回の目標である、覆うべきでない領域は避け、覆うべき領域に布を覆うという、被覆の本質的な作業を果たすことができた。ただし、実用的な被覆操作という観点から、綺麗に皺なく包装するという作業を次に考える場合、実験結果には、布の伸び、弛みの影響による布の沈みや皺という課題が現れてくる。この布の皺や弛みを手先経路の調整で取り除けば、実用的な包装作業にまで達することができると思う。

これら布の皺や弛みといった問題は、布の正確な力学モデルをもつことにより予測や追跡がある程度は可能であろうが、最終的には動作時に視覚・力覚を用いて布の状態を監視しながら適宜解消していくことが必要になると考えられる。こういった問題に関する先行研究としては、力覚を用いたテンション調整による柔軟物操作時のローカルな位置調整を行っている研究 [22] [23] が挙げられる。これらの研究は視覚による布のセンシングとともに、力覚に基づく調整を合わせて操作を行っている。ここで人間が被覆を行う場合を考えてみると、多くの場合、使用する布と対象物体を見て事前に経路を計画して被覆動作を行っているが、そのうえで、事前に予測しづらい皺やたるみに対しては視覚や力覚からのフィードバックによりその都度、経路を微調整している。これらを考えると、皺や弛みへの対応は、ローカルな動作修正として全体の作業計画とは独立に実装されるのが自然である。したがって、今後の研究で皺や弛みの問題に対処するために本手法を拡張する場合にも、本論文で示した動作生成の流れを根本的に変更するのではなく、ローカルな動作補正を本手法に追加する形で拡張してゆくことになろう。逆に、視覚・力覚を用いた補正動作生成の観点から見ても、全体的な作業計画がある上でのローカルな調整としてアルゴリズムを構築する方が、よりの確な視覚・力覚フィードバックを実現できると期待できる。

5. おわりに

本論文では、ロボットによる布被覆操作を目指し、大まかな指示に含まれている意図を理解し、適切な中間表現を生成する手法を提案した。この提案手法を用いることにより、人間の大まかな指示から、三階層モデルによる中間表現を通して、凹凸を持つ曲面形状の物体への被覆作業の記述および、実行することができた。これにより、ユーザは複雑な被覆操作の指示を、大まかな指示により、ロボットへ直観的に伝えることができるようになった。提案手法の中では、大まかな指示を解釈するための手振れと物体の凹凸考慮の問題を挙げ、目標線への手振れの影響を補正する方法と、被覆に適した凸包領域の生成方法について述べた。また、以前報告した手先経路生成方法については、以前は長方形の布であり、かつ、布の辺と平行な布上目標線にしか使用できない問題があった。そのため、本論文ではそれ以外の布や布上目標線でも手先経路を生成できる改良方法を提案した。

実験では、提案手法が、手振れを考慮しながら人間の大まかな指示を解釈し、被覆操作を目標線として記述、実行できることを示した。その中で、凹凸のある物体を包む実験では、布の

形状から埋めるべき凹凸を考慮し物体を包み, 提案した凹凸処理方法の効果を示した. 次に, 箱への平包み実験では, 布の対角線上に引いた複数の目標線を用いて物体を包み, 提案した手先経路生成方法の効果を示した.

今後は, 凹凸や曲面を含む物体への何周もの巻き付けといったより複雑な作業を行っていく. このとき, ロボットアームの可動範囲や手先の回転角の制約, 物体とロボットアームの干渉問題が発生すると考えられる. この問題を避け, 手先軌道通りに布を動かすためには, 動作中に布の持ち替えが必要となる. このような作業を行うための教示作業では, 今回, 提案した局所凸化処理の効果がより発揮されていく.

参 考 文 献

- [1] A. Ramisa, G. Aleny, F. Moreno-noguer and C. Torras: "Using depth and appearance features for informed robot grasping of highly wrinkled clothes," International Conference on Robotics and Automation, pp.1703–1708, 2012.
- [2] Y. Kita, F. Saito and N. Kita: "A deformable model driven visual method for handling clothes," International Conference on Robotics and Automation, pp.3889–3895, 2004.
- [3] C. Bersch, B. Pitzer and S. Kammel: "Bimanual robotic cloth manipulation for laundry folding," International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1413–1419, 2011.
- [4] C. Elbrechter, R. Haschke and H. Ritter: "Bi-Manual Robotic Paper Manipulation Based on Real-Time Marker Tracking and Physical Modelling," International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1427–1432, 2011.
- [5] K. Nagata and N. Yamanobe: "Picking up a Towel by Cooperation of Functional Finger Actions," International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1785–1790, 2009.
- [6] 小野栄一, 喜多伸之, 坂根茂幸: "視触覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布生地を展開", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.2, pp.275–283, 1997.
- [7] 和田隆広, 平井慎一, 川村貞夫: "面状柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の解析とプランニング", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.675–682, 2000.
- [8] 柴田瑞穂, 太田剛士, 平井慎一: "摘み滑り動作を利用した布地の展開動作", 日本ロボット学会誌, vol.27, no.9, pp.1029–1036, 2009.
- [9] S. Miller, J. van den Berg, M. Fritz, T. Darrell, K. Goldberg and P. Abbeel: "A Geometric Approach to Robotic Laundry Folding," International Journal of Robotics Research, vol.31, no.2, pp.249–267, 2012.
- [10] H. Terada and K. Yagata: "Motion Planning Approach of a Multi-Robot System for "Furoshiki" Wrapping Operation," Journal of the Japan Society of Precision Engineering, vol.76, no.5, pp.546–551, 2010.
- [11] R. Oya, K. Nagahama, K. Miyake, K. Yamazaki, K. Okada and M. Inaba: "Dressing assistance with failure recovery actions based on cloth states' recognition," The Robotics and Mechatronics Conference, 2A2-Q13, 2013.
- [12] T. Tamei, T. Matsubara, A. Rai and T. Shibata: "Reinforcement Learning of Clothing Assistance with a Dual-arm Robot," International Conference on Humanoid Robots, pp.733–738, 2011.
- [13] T. Igarashi and J.F. Hughes: "Clothing Manipulation," ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.91–100, 2002.
- [14] H. Wang and T. Komura: "Manipulation of Flexible Objects by Geodesic Control," Computer Graphics Forum, vol.31, no.2, pp.499–508, 2012.
- [15] N. Hayashi, T. Tomizawa, T. Suehiro and S. Kudoh: "Dual Arm Robot Fabric Wrapping Operation Using Target Lines," International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.2185–2190, 2014.
- [16] D. McCallum and D. Avis: "A linear algorithm for finding the convex hull of a simple polygon," Information Processing Letters, vol.9, issue.5, pp.201–206, 1979.
- [17] F.P. Preparata and S.J. Hong: "Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions," Communications of the ACM, vol.20, no.2, pp.87–93, 1977.
- [18] E. Rahtu, M. Salo and J. Heikkil: "A new convexity measure based on a probabilistic interpretation of images," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.28, no.9, pp.1501–1512, 2006.
- [19] C. Bajaj and T.K. Dey: "Convex decomposition of polyhedra and robustness," SIAM Journal on Computing, vol.21, no.2, pp.339–364, 1992.
- [20] J.-M. Lien and N.M. Amato: "Approximate convex decomposition of polyhedra," Proc. of the 2007 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling, pp.121–131, 2007.
- [21] Robot Operating System, <http://www.ros.org> (2016 年 3 月現在)
- [22] A. Lee, H. Lu, A. Gupta, S. Levine and P. Abbeel: "Learning Force-Based Manipulation of Deformable Objects from Multiple Demonstrations," International Conference on Robotics and Automation, pp.177–184, 2015.
- [23] A. Colom, A. Planells and C. Torras: "A Friction-Model-Based Framework for Reinforcement Learning of Robotic Tasks in Non-Rigid Environments," International Conference on Robotics and Automation, pp.5649–5654, 2015.

林 直宏 (Naohiro Hayashi)

2013 年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程修了, 修士 (工学). 現在, 電気通信大学大学院情報システム学研究科博士後期課程在学中. ヒューマノイドの動作生成やマニピュレータによる柔軟物操作といった, 人間の巧みな動作のモデル化の研究に従事. (日本ロボット学会学生会員)

末廣尚士 (Takashi Suehiro)

1980 年東京大学大学院修士課程修了, 同年産業技術総合研究所 (旧電子技術総合研究所) に入所. 1990 年東京大学博士 (工学). 2009 年より電気通信大学大学院情報システム学研究科教授. 現在同大学大学院情報理工学研究科教授. マニピュレータを中心としたロボットシステムの研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)

富沢哲雄 (Tetsuo Tomizawa)

2006 年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士課程修了, 博士 (工学). JSPS 特別研究員, 産業技術総合研究所特別研究員を経て, 2016 年より防衛大学校情報工学科講師. 人間共存環境で働くロボットに関する研究に従事. (日本ロボット学会正会員)

工藤俊亮 (Shunsuke Kudoh)

2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了, 博士 (情報理工学). 同年同大学生産技術研究所特任助教. 2010 年電気通信大学 大学院情報システム学研究科准教授. 現在同大学大学院情報理工学研究科准教授. 人間動作の解析やロボットの見える学習の研究に従事. (日本ロボット学会正会員)