摘み滑り動作を利用した布地の展開動作

柴田 瑞穂* 太田 剛士* 平井 慎一*

Fabric Unfolding Using Pinching Slip Motion

Mizuho Shibata*, Tsuyoshi Ohta* and Shinichi Hirai*

We discuss an unfolding of fabrics by robotic hands. During unfolding, humans usually allow their fingertips to slip on the fabric surfaces, referred to as a *pinching slip motion*. We define this motion using differential geometry coordinate. In this motion, the weight of the fabric generates relative movement between the moving fingertips and the fabric, and then, the edges of the fingertips are in contact with the hem of the fabric. We confirm experimentally that the success rate depends on fingertip shapes and grasping force of a robotic hand during the motion. The range between fingertips can be selected widely when fingertips with circular edges are applied. Finally, we demonstrate a fabric unfolding experimentally.

Key Words: Handling, Deformable Object, Differential Geometry Coordinate, Fabric Unfolding, Pinching Slip Motion

1. 緒 言

布製品を扱う機械には、シャツを畳む機械、タオルを折り畳む機械、おしぼりを巻く機械などがある。しかしながら、それら機器への移送、着脱は人が行っているものがほとんどである [1]。このように、布製品を操作する技術は人手に大きく依存しており、アパレル、クリーニング、リネンサプライ、福祉、医療などの産業ではロボットの導入が強く求められている。これらの分野では効率の面だけでなく衛生面からもロボットでの自動化が望まれている。このような背景から、布地をハンドリングするロボットシステムに関する研究が報告されている。小野らは、折れ重なった布生地 of 輪郭情報を、画像処理を用いて検出し、ロボットハンドで布生地のコーナーエッジを摘みあげ、展開するシステムを構築した [2] [3]。Parker らは、重ねられた布地の山から 1 枚を分離するために、ピンを有するロボットハンドを作成し、布地のハンドリングを実現した [4]。蒲谷らは、指先に回転機構を付加したロボットハンドを試作し、布地の巻き取りによる把持を実現している [5]。ここでは、布地にしわがある場合に把持を行う方策を提案している。大澤らは、蒲谷らの回転機構を有するロボットハンドに人間の爪に相当する機構を付加することにより、床に広げてある布地の把持を実現している [6]。Paraschidis らは、布地を汎用に扱うために階層的制御手法を提案している [7]。ここでは、布地を扱う作業を定置作業 (lying),

ならし作業 (flattening) などに分類し、それぞれを組み合わせることで所望の作業を実現することを論じている。しかしながら、具体的な個々の作業についての定式化は成されていない。Torgerson らは、平面状に広げられた布地を空気圧を利用した吸着ハンドで安定に把持するために、画像情報から把持点を推定するシステムを構築した [8]。濱島らは、ロボットシステムにより布地の展開を行うためのプランニングに関する研究を行った [9] [10]。文献 [9] では、山積み洗濯物の静止画像から把持候補点を抽出し、ロボットによる布地の 1 枚分離に成功している。文献 [10] では、布地の持ち替え作業を題材に、吊り下げ状態の静止画を凸包と凸欠陥による近似表現により分類し、タオル類、上着類、パンツ類を実験により取得した画像から判別した。Kita らは、衣服を多質点モデルで表現し、計算機内部で形状変化を予測する手法を構築した [11]。任意の一点で衣類を把持し、観測した画像上の衣類領域の形状と複数の予測形状の一致度を算出することにより、対象がどのように把持されているかを推定する。小林らは、乱雑に積層された布製品の中から 1 枚の製品を取り出し、対象となる製品の特徴点を検出することで、任意のコーナーを把持するシステムを提案している [12]。ここでは、物体側の任意の平面を基準面とし、基準面からの相対的な距離を求める手法を用いて、物体の三次元情報を獲得している。これらの研究では、主に把持候補点の算出に力点が置かれている。和田らは、靴下の縫製を題材に、二次元平面状の伸縮柔軟体の間接同時位置決めを行った [13]。ここでは、柔軟物の粗いモデルを用いて、布地の複数の編み目の位置を合わせるという作業を実現している。Ono らは、積層された布地の束から 1 枚の布地を摘みあげる手法を提案している [14]。ここでは、布地間の摩擦

原稿受付 2009 年 1 月 27 日

*立命館大学

*Ritsumeikan University

■ 本論文は学術性で評価されました。

Fig. 1 Unfolding motion by human

力およびロボット指と布地の摩擦力の差を利用することによって作業を実現している。Salleh らは、2本のロボットアームを用いて空中で矩形上の布地を展開するシステムを構築した[15]。この研究では、主に布地の縁および角をカメラとロボットハンドに取り付けた赤外線センサを用いて検出することに力点が置かれている。

このように、布地を操作するロボットシステムに関する研究は数例報告されている。しかしながら、柔軟物と剛体との接触を伴う作業に関する知見は少ない。布地の把持動作、定置動作、展開動作に代表される布地の移動に関する作業の多くは柔軟物である布地と剛体である環境、ロボットとの接触を伴う作業である。したがって、これらの作業に関する知見を得ることは、汎用な柔軟物ハンドリングシステムを実現する上で意義深い。本論文では、布地を扱う基本動作の一つである布地の空中における展開動作に着目する。Fig. 1 に人間による布地の展開動作を示す。人間は空中で布地を展開する際には、指先と布地の接触を巧みに利用する。図では、指先を布端および布角に配置することで展開動作を行っている。これに倣い、ロボット指と布地の接触を利用することによって展開作業を実現する。

本論文の構成を以下に示す。第2章では、空中における展開動作を微分幾何法[16]を使って定義する。第3章では、指先と布地の接触を伴う展開動作として摘み滑り動作による展開を提案する。また、摘み滑り動作の特徴について論じる。指先を動かす方向により、縦滑りおよび横滑り動作に細分する。第4章では、摘み滑り動作による展開動作の実験を評価する。ここでは、横滑り動作を対象とする。ロボット指の指先形状が実験の成否に与える影響を検討する。第5章では、第4章の結果および考察に基づき布地展開システムを構築する。第6章に本論文の結論を示す。

2. 空中における布地の展開動作の定義

本章では、空中における布地の展開動作を定義する。展開作業とは、しわや折れ重なり、ねじれのない状態まで布地を広げる作業である[3]。本論文では、扱う物体を曲げ、ねじれ、伸縮が可能な薄板状柔軟物体であると仮定する。Fig. 2 に示すような、物体を摘むことが可能な剛体のロボット指を考える。ロボット指は2本で薄板状柔軟物体の両面を摘む。この2本のロボット指を1組と数える。このロボット指を n 組使って、布地を操作する。第 i 番目の指 F_i と第 j 番目の指 F_j による展開を考える。展開の成否を判断するために、一本の線状物体 P_{ij} を

Fig. 2 Pinched fingertips

考える。この線状物体は、展開している布地の一部である。指先の組 F_i, F_j で線状物体 P_{ij} の両端を摘み、線状物体を所望の形状にすることで、展開を行う。線状物体の形状は微分幾何法[16]を使って表現する。線状物体の形状は、回転を表す三つのパラメータと伸びを表す一つのパラメータにより表される。これらのパラメータは、基準位置からの距離 s に依存する。曲げ $\kappa(s)$ 、ねじれ $\omega(s)$ 、伸び $\varepsilon(s)$ 、空間座標 $\mathbf{x}(s)$ はこれらのパラメータを用いて表現できる。指先と線状物体との相対位置および線状物体の形状を決定する。線状物体 P_{ij} の自然長を L_{ij} とする。このとき、線状物体 P_{ij} の端点の位置ベクトルは、 $\mathbf{x}(0)$ 、 $\mathbf{x}(L_{ij})$ と表すことができる。指先の組 F_i, F_j の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_j$ とする。線状物体 P_{ij} の両端を指先 F_i, F_j で把持し、布地にしわや折れ重なり、ねじれのない状態を展開の成功とする。すなわち、動作後、下記の条件を満たす場合、展開動作が成功していると判定する。

[条件 1] すべてのロボット指の組が布地と接触している。

[条件 2] すべてのロボット指の組が静止している。

[条件 3] すべてのロボット指の組と布地の間に滑りはない。

[条件 4] 線状物体 P_{ij} と指先の相対位置を決定する。

すなわち、

$$\forall i, j \quad |\mathbf{x}_{ij}(0) - \mathbf{F}_i| < \Delta x_{ij}, \quad (1)$$

$$\forall i, j \quad |\mathbf{x}_{ij}(L_{ij}) - \mathbf{F}_j| < \Delta x_{ij}. \quad (2)$$

[条件 5] 線状物体 P_{ij} の形状を決定する。すなわち、

$$\forall i, j, \forall s \in [0, L_{ij}] \quad |\kappa_{ij}(s)| < \Delta \kappa_{ij}, \quad (3)$$

$$\forall i, j, \forall s \in [0, L_{ij}] \quad |\omega_{ij}(s)| < \Delta \omega_{ij}, \quad (4)$$

$$\forall i, j, \forall s \in [0, L_{ij}] \quad |\varepsilon_{ij}(s)| < \Delta \varepsilon_{ij}. \quad (5)$$

ここで、 Δx_{ij} , $\Delta \kappa_{ij}$, $\Delta \omega_{ij}$, $\Delta \varepsilon_{ij}$ は、それぞれ、指先と線状物体との相対位置、曲げ、ねじれ、歪みに対する許容誤差であり、正の定数である。Fig. 3 に展開例を示す。図では、 $n = 2$ の場合を示す。成功例を Fig. 3(a), 失敗例を Fig. 3(b), (c) に示す。Fig. 3(a) に示すように、動作後、指先が線状物体の両端を把持し、線状物体に曲げ、ねじれがない状態を、展開動作の成功であると判定する。Fig. 3(b) に示すように、動作後、指先が線状物体の両端を把持していない場合には、展開動作が失敗であると判定する。Fig. 3(c) に示すように、動作後、線状物体が曲がっている場合には、展開動作が失敗であると判定する。線状物体 P_{ij} および許容誤差 Δx_{ij} , $\Delta \kappa_{ij}$, $\Delta \omega_{ij}$, $\Delta \varepsilon_{ij}$ を適宜設定することによって、展開後の布地の状態を調整することができる。

Fig. 3 Definition of unfolding motion in air

本論文では、 $n = 2$ の場合の展開動作を対象とする。線状物体を布縁に沿うように定義し、布縁を展開することによって、布全体の展開とする。微分幾何法による布地操作の定義は展開動作だけによるものではない。例えば、間接同時位置決め [13] を定義する場合には、布縁以外に複数の線状物体を定義することで、作業全体を表現することになる。

3. 摘み滑り動作による布地の展開

指先と布地が接触を伴いながら展開する動作を、本論文では摘み滑り動作による布地の展開と定義する。摘み滑り動作による布地の展開は、指先の動かす方向によって、縦滑りと横滑りに大別される。本章では、それぞれの手法の特徴を示す。本章では例として、2組のロボット指を使って布地を展開する。1組のロボット指で把持し、もう1組のロボット指を動かして展開する。把持するロボット指は動作中動かず、布地との滑りがないものとする。ここで、Fig. 1 に示したように、展開時に指先を布端や布角に配置する展開方法を考える。

3.1 縦滑り動作

Fig. 4 に示すように、指先の移動を重力方向に沿って行う展開方法を縦滑り動作と定義する。デカルト座標で考え、重力の方向と z 軸を一致させる。Fig. 4 (a) は斜め上方から、Fig. 4 (b) は、真横から見た動作の様子を示している。布地と接触した面は z 軸方向に平行になるように設定する。図に示すように、一方の指先を重力方向に滑らせることで布地を展開する。縦滑り動作では、Fig. 4 (b) に示すように、布地は重力の影響を受け固定部を中心に回転する。このとき、指先は布端からは遠ざかる方向に動作する。すなわち、布地を上げ落とすことのない展開動作である。しかしながら、縦滑り動作単体では指先を布端や布角に配置することは難しい。

3.2 横滑り動作

Fig. 5 に示すように、指先の移動を水平面内で行う展開方法を横滑り動作と定義する。デカルト座標で考え、重力の方向と z 軸を一致させる。Fig. 5 (a) は斜め上方から、Fig. 5 (b) は、真横から見た動作の様子を示している。布地と接触面は、床面と平行に設定する。図に示すように、一方の指先を水平面内で滑らせることで布地を展開する。Fig. 5 (a) に示すように、指を動かす方向を y 軸とする。このとき、布地は重力の影響を受け、固定部を中心に回転し、 x 軸方向に滑る。すると、指先は縁方

Fig. 4 Vertical pinching slip motion for fabric unfolding

Fig. 5 Horizontal pinching slip motion for fabric unfolding

向に移動し、布地から抜けるように動作する。すなわち、重力に伴う布地の変形と、布縁と指先の接触を利用することで、縁との距離を短くすることができる。Fig. 5 (b) に示すように、もし指先が縁を越えることなく布縁に沿うことができれば、横滑り動作単体で指先を布端や布角に配置することが可能である。

本章では、摘み滑り動作による布地の展開動作を、動かす指の方向により、縦滑りおよび横滑りに分類した。縦滑り動作では、布縁と指先の距離を小さくすることができないが、横滑り動作では、布地の自重を利用して布縁と指先の距離を小さくできる。しかしながら、布および布縁と指先の接触を伴うため、指先形状および把持力が展開動作の成否に大きく影響を与えることが予想される。次章では、横滑り動作に着目し、展開動作における接触する指先形状の影響を実験的に検討する。

4. 実験

4.1 使用する布地の特性

本実験では、木綿地の布地を対象とする。布地形状は矩形型である。大きさは、 450×430 [mm²]、重量は 19.5 [g] である。Fig. 6 (a) に示すように、布縁に対してヘム加工が施されている布地を使用する。ヘム加工とは、糸のほつれを防止するために、布端を折り込んだあと、縫いつける加工である。ハンカチ、タオル、衣類など布地製品の端加工として一般的なものである。本論文では、ヘム加工されている布縁をヘムと呼ぶ。このヘムを使って展開動作を行う。Fig. 6 (b) に指先とヘムが接触の様子を示す。布地の基本特性を調べるために、Kawabata's Evaluation System for fabric (KES) [17] を用いた。KES では、布地の摩擦係数、曲げ剛性、厚さなどを計測する。この計測法は物理シミュレーションの分野にも応用されている [18] [19]。Table 1 に布地の物理特性の計測結果を示す。KES にて同じ木綿地の布

(a) Fabric hem (b) Contact state

Fig. 6 Unfolding motion using fabric hem

Table 1 Physical properties of specimen

	Average	Standard deviation
Friction coefficient	0.17	8.91×10^{-3}
Flexural rigidity [gf·cm]	0.030	1.02×10^{-2}
Thickness [mm]	0.30	0.15

(a) Circular (b) Half-rounded rectangular

(c) Square with roundings

Fig. 7 Robotic fingertips for unfolding motion

地を 10 枚計測した．表では，計測値の平均および標準偏差を示している．

4.2 指先形状

指先形状として，**Fig. 7** に示す 3 種類の指を使用する．それぞれ接触面は，(a) 円形状（半径 30 [mm]），(b) 半円と直方体を組み合わせた形状（半径 30 [mm] の半円と 15×30 [mm²] の長方形の組み合わせ），(c) 正形状（1 辺 30 [mm] で二つの角に半径 3 [mm] の丸み付け加工）である．指の材質はアクリルである．これら 3 種類の指先をハンドの進行方向に対して複数の姿勢で取り付ける．

4.3 判定条件

Fig. 8 に実験装置の概要を示す．実験では，**Fig. 8** (a) に示すように，布地の一端をチャックで固定する．ロボットアームに取り付けられたロボットハンドで布地を把持する．ロボットアームを水平移動させることにより，展開動作を実現する (**Fig. 8** (b))．すなわち，2 組のロボット指で展開動作を行う．指先を y 軸方向に 200 [mm] 滑らせた時点で展開の成否を判定した．展開の成否は第 2 章に示す条件に基づき判定する．具体的には，最終状態にて，動かした指がへみに接触している場合に展開成功と

(a) (b)

Fig. 8 Experimental setup

判定する．片方の指は固定されている．したがって，動かした指先とへみが接触している場合に，[条件 4] を満足すると判定する．動かした指先とへみが接触している場合は線状物体の曲げはないと判定する．したがって，曲げの許容誤差 $\Delta\kappa_{12}$ を 0 とした．また本実験では，指を水平に動作させるため，線状物体のねじれはない．したがって，ねじれの許容誤差 $\Delta\omega_{12}$ を 0 とした．伸びの総和 E には，以下の関係式が成り立つ．

$$E = \left| \int_0^L \varepsilon \, ds \right| \leq \int_0^L |\varepsilon| \, ds \leq \int_0^L \Delta\varepsilon \, ds = L \Delta\varepsilon. \quad (6)$$

この関係から，伸びの許容誤差 $\Delta\varepsilon_{12}$ を算出する．具体的には，使用する布地に関して破断試験を行い，実際に破断した長さを E に代入する．本実験では，許容誤差 $\Delta\varepsilon_{12}$ は 0.09 となった．したがって，布地が破断せずに，動かした指先とへみが接触している場合に，[条件 5] を満足すると判定する．

4.4 実験条件

指先形状以外の実験の初期条件として，

- ロボットアームの手先速度
- ロボットハンドの把持力
- 縁の上下方向

を設定する．ロボットアームの手先速度 V を 9.95 [mm/s] とした．**Fig. 8** (c) に示すように，二つの指先の幅 d を 0.45 [mm] ~ 0.70 [mm] まで 0.05 [mm] 刻みで変化させることで把持力を変化させる．へみは布地の厚さと比較して，0.3 [mm] ほど厚い．**Fig. 8** (d) に示すように，二つの指の対向する面の角度 α は，1.0 [deg] 以下に設定する．ロボットアームとして三菱電機製 4 自由度スカラアーム RH5AH-55 を用いた．ロボットハンドとして NKE 製 2 自由度グリップ SK-CH-2 を用いた．このハンドは，直流モータを使用しており，指はボールジョイントを介して直動する．本実験では，ハンドのモータは使用しない．初

期状態で指先幅 d を設定し、展開実験を行う。縁を乗り越えるなど、大きな負荷がかからない場合は、ギアの摩擦力によって、実験中は初期状態で設定した指先幅を維持する。ヘムは折り込んだあとに縫いつけてあるため、表面と裏面で形状が異なる。布地の表裏を **Fig. 9** のように定義する。すなわち、ヘムの折り込みが見えない面を表面、見える面を裏面とする。本実験では、初期状態として、鉛直方向に対してどちらの面が上を向いているかを区別する。初期状態において、指先とヘムとの距離を 5.0 [mm] とする。実際の展開例として、展開実験を行う様子を **Fig. 10** に示す。この例では、指先形状として **Fig. 7(a)** に示す円形状を使用した。布地は裏面が上を向くように設定した。指先幅 d は 0.60 [mm] に設定した。初期状態 (**Fig. 10(a)**) から、指先とヘムとの距離が徐々に小さくなり (**Fig. 10(b)**)、ヘムと指先が接触する (**Fig. 10(c)**)。指先がヘムに沿う形で推移し (**Fig. 10(d)**, **(e)**)、展開に成功している (**Fig. 10(f)**)。失敗は、ヘムと指先が接触せずに試行が終了する場合と、指先がヘムを乗り越えて、ハンドが布地を落してしまう場合の二つに大別される。

Fig. 9 Warpage direction of fabric

4.5 実験結果

前節までの実験条件に基づき、布地の展開実験を行った。成否を **Table 2** に示す。Fig. 7 に示す 3 種類の指先をハンドの進行方向に対して複数の姿勢で取り付け、様々な接触状態を実現する。第一行目は、指先形状と、指先の進む方向に対して接触するヘムを表している。指先形状の図にある縦線はヘムを表現しており、指先の右側付近で接触することを示している。例えば、第二列目の指先は円形状であり、ヘムと円弧部分で接触する。第三列目の指先は半円と長方形を組み合わせた形状であり、ヘムと円弧部分で接触する。第二行目は、ヘムの上下方向を表している。Fig. 9 に示した、布地の表裏に従い、表面が鉛直方向で上にくる場合を O (Obverse)、裏面が鉛直方向で上にくる場合を R (Reverse) と表現する。実験はそれぞれの組み合わせにおいて 3 回ずつ行い、すべて成功した場合を S (Success)、すべて失敗した場合を F (Failure)、成功と失敗が両方起こった場合は S/F (Success or Failure) と表現する。実験の結果、円弧がヘムと接触する場合、指先幅 d を幅広く設定しても展開動作が成功することが分かった。同形状の指先に関しても、ヘムと接触する指先形状が異なる場合、成否が異なることが分かった。すなわち、展開動作の成否が接触する指先形状に依存することが明らかになった。また、展開の成否はヘムの向きに依存する。Fig. 7(c) に示す指先では、裏面つまりヘムが上方向を向いている場合、成功率が悪くなっている。しかしながら、 $d = 0.45$ [mm] のように把持力を適切に設定すれば、どの指先でも成功するという結果が得られた。

4.6 考察

本実験では、力覚センサなど接触状態を計測するセンサを使用していない。これは、使用する布地に対して適切な指先形状、指先幅を設定することで展開動作が可能であることを示唆して

Fig. 10 Experimental unfolding motion

Table 2 Experimental results of pinching slip motion

d [mm]	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O
0.45	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S/F
0.50	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S/F	S	S/F	F
0.55	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S/F	S	F	F
0.60	S	S	S	S	S/F	S	F	S	F	S	S/F	S	F	F
0.65	S	S	S	S	S/F	S/F	F	S	F	S	S/F	S	F	F
0.70	S/F	S/F	S	S	F	F	F	S	F	S	S/F	S/F	F	F

Fig. 11 Unfolding motion for fabric setting

いる。Table 2 の結果から、適切な条件下では、初期状態における布地の裏表にかかわらず、展開することが可能である。したがって、布地の大きさが既知であり、ロボット指の位置情報がエンコーダ等により獲得できるのであれば、接触状態をリアルタイムに計測する必要はない。また、布地製品を扱う場合、布地を傷めないために、把持力は小さく設定できるほうが望ましい。この観点から、本論文で試みた形状の中では、円形状の指先による展開が最もよい。本実験では、ロボットの手先速度に関する結果は示していない。前節で示した実験結果以外に、円形状の指先を用いて、手先速度を $V = 318.30$ [mm/s]、指先幅 $d = 0.60$ [mm]、表面を上向きに設定した場合に、展開動作が成功することを確認している。この手先速度は、前節における実験速度の約 32 倍である。このように、横滑り動作を用いて適切な指先形状、把持力を設定することで、速度に対してロバストに展開できることを実験的に確認している。展開動作における布地の動特性の影響に関しては、今後の課題としたい。また、本実験では、二つのグリップで把持していることから、試行終了時に指先と布縁が接触している場合には、布地に曲げやねじりが起きていないとし、曲げおよびねじりを陽には計測していない。布地の形状制御を行う際には、曲げやねじりの計測が必要になる場合がある。これらの曲げおよびねじりの計測・判定を含む動作の実現についても、今後の課題としたい。

5. 布地展開システム

本章では、前章までの結果に基づき、実際の展開動作を実現する。展開動作を実現するために、4 自由度ハンドを作成した。このハンドは、布地を掴むための 1 自由度グリップを 2 個有する。各グリップは鉛直方向に開閉する。また、それぞれのグリップが独立に同軸上を水平移動する。それぞれの可動部はエンコーダを内蔵した直流モータで動く。鉛直方向はボールねじを、水平方向は台形ねじを介して駆動する。ハンドを前章のス

カラームの手先に取り付けた。ハンドとスカラームにより展開作業を行う。展開する試料として、前章で用いた木綿地の布地を使用する。この布地は、4 辺すべてに端処理が施された布地である。以下の手順で展開を行う。布地の大きさは既知であるとする。

- (1) 布地を把持し、持ち上げた状態を初期状態とする。
- (2) 両方の指を外側に水平移動させる。
- (3) 両方の指を外側に水平移動させ続ける。
- (4) 指先の水平距離をエンコーダで獲得し、設定する距離になった時点で動作を終了する。

Fig. 11 に、実現した展開動作を示す。初期状態 (Fig. 11 (a)) から両方の指を外側に水平移動させる。布地表面の状況により、片方の指が布地との相対運動を起こし、移動する (Fig. 11 (b))。先に動いた指先が布地の角までくると、それ以上相対運動することができないため、ここまでの動いていなかった指先が相対運動を起こし始める (Fig. 11 (c))。指先の水平運動の終了条件は、布地の大きさとした (Fig. 11 (d))。どちらの指から相対運動を起こすかは不明であるにもかかわらず、図に示すように、試作したシステムは布地を展開可能であることが確認された。

展開の成否を判定する。指先は、Fig. 7 (b) に示すような、半円と直方体の組み合わせた形状を用いた。半円の直径は 3.5 [mm]、直方体の大きさは 3.5×15 [mm²] である。指の材質は SUS304 である。ヘムが円弧と接触するように取り付けた。指幅 d は 0.4 [mm] と設定した。ヘムは裏面が上にくるように設定した。初期状態では、それぞれの指とヘムとの距離を 5 [mm] と設定した。最終状態にて、動かした指が両端の角に接触している場合に展開成功と判定する。動かした指先と両端の角が接触している場合に、[条件 4] を満足すると判定する。第 4 章と同様に、曲げの許容誤差 $\Delta\kappa_{12}$ 、ねじれの許容誤差 $\Delta\omega_{12}$ をそれぞれ 0 とした。許容誤差 $\Delta\varepsilon_{12}$ は 0.09 とした。したがって、布地が破断せずに、動かした指先とヘムが接触している場合に、[条件 5]

Table 3 Experimental results against other clothes

No.	Material	Size [mm ²]	Friction coefficient	Flexural rigidity [gf-cm]	Thickness [mm]	Hem [mm]	Success rate [%]
1	Cotton (100%)	420 × 430	0.22	0.021	0.42	0.31	98
2	Cotton (100%)	430 × 430	0.17	0.035	0.32	0.37	100
3	Cotton (100%)	410 × 430	0.16	0.24	0.34	0.38	99
4	Cotton (100%)	200 × 200	0.32	0.17	2.02	0.04	40

を満足すると判定する。同製品の布地 10 枚を使用した。それぞれの布地に対して 10 回、計 100 回実験を行った。このとき、成功率は、96% であった。実験では、2 例が指先が片方の角に接触せずに試行が終了する場合であり、2 例が指先がヘムを乗り越えて、ハンドが布地を落としてしまう場合であった。本実験で使用した指先の大きさは、第 4 章と比べて小さい。したがって、変形させる領域が小さくなることから、把持力が小さくなることが予想される。しかしながら、成功率は比較的高い結果が得られた。このことから、本手法は指先形状とともに、ヘムの厚みを強く利用していることが示唆される。

同様の実験を、他の 4 種類の布地に対して行った。結果を **Table 3** に示す。表では、布地の厚さだけではなく、ヘムの厚さも示している。それぞれの布地は矩形形状である。布地 4 は厚く、指先幅 d を 0.4 [mm] に設定することができなかった。布地 4 に関しては、 $d = 1.00$ [mm] の結果を示す。布地 1~3 に関しては、布地の厚さが指先幅 d と同程度であり、縁にある程度厚みがあることから、摩擦係数および曲げ剛性によらず、良好な結果が得られている。布地 4 に関しては、摩擦係数が大きく、ヘムの厚みが小さいため、成功率が他の布地と比べて低くなった。布地 4 に関する実験では、8 例が指先が布地の角に接触せずに試行が終了する場合であり、52 例が指先がヘムを乗り越えて、ハンドが布地を落としてしまう場合であった。

6. 結 言

本論文では、布地を扱う動作の一つである空中における展開動作を実現した。ここでは、曲げ、ねじれ、伸縮が可能な薄板状柔軟物体を、微分幾何法を用いて表現した。これにより、作業の成否の判定を可能にした。また、人間の動作に倣い、指先と布地が接触を伴いながら展開する動作を、摘み滑り動作による布地の展開と定義した。摘み滑り動作による布地の展開を、指先の動かす方向によって、縦滑りと横滑りに大別し、それぞれの特徴を示した。横滑り動作では、布地の自重を利用して布縁と指先の距離を小さくできる。本論文では、横滑り動作に着目し、縁のある布地を対象に、その有効性を実験的に検討した。その結果、摘み滑り動作を用いる展開動作では、その成否が指先形状に大きく依存することを示した。今後の課題としては、つまみ滑り動作の解析、指先形状の変化による布地のシミュレーション、布地および指先の材質の検討、他の布地への応用などが挙げられる。また、既報 [20] にて、布地の把持、展開、定置を一連の動作として実現するシステムを構築している。

謝 辞 本研究の一部は、2007 年度科学技術振興機構 (JST) シーズ発掘試験 (研究課題名「視覚を用いた布の展開と定置に関する技術開発」) の支援を受けて行われた。

参 考 文 献

- [1] 小野: “布のマニピュレーション”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.2, pp.149–153, 1998.
- [2] E. Ono, N. Kita and S. Sakane: “Strategy for unfolding a fabric piece by cooperative sensing of touch and vision,” Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.441–445, 1995.
- [3] 小野, 喜多, 坂根: “視触覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布生地の展開”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.2, pp.275–283, 1997.
- [4] J.K. Parker, R. Dubey, F.W. Paul and R.J. Becker: “Robotic Fabric Handling for Automation Garment Manufacturing,” Transactions of ASME Journal of Engineering for Industry, vol.105, pp.21–26, 1983.
- [5] 蒲谷, 柿倉: “布地物体のハンドリングに関する研究”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.64, no.620, pp.1356–1361, 1998.
- [6] 大澤, 柿倉: “各種布地混在洗濯物の把握用指の試作と把握実験評価”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.735–743, 2001.
- [7] K. Paraschidis, N. Fahantidis, V. Vassiliadis, V. Petridis, Z. Doulgeri, L. Petrou and G. Hasapis: “A Robotic System for Handling Textile Materials,” Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1769–1774, 1995.
- [8] E. Torgerson and F.W. Paul: “Vision Guided Robotic Fabric Manipulation for Apparel Manufacturing,” Proc. of 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1196–1202, 1987.
- [9] 濱島, 柿倉: “布地物体展開手順のプランニング (塊状洗濯物の分離)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.63, no.607, pp.967–974, 1997.
- [10] 濱島, 柿倉: “布地物体展開手順のプランニング (布地物体の種類判別)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.65, no.636, pp.3260–3267, 1999.
- [11] Y. Kita, F. Saito and N. Kita: “A deformable model driven visual method for handling clothes,” Proc. of 2004 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3889–3895, 2004.
- [12] 小林, 林, 濱田, 河井, 北條, 秦: “3 次元視覚センサーを用いた布のハンドリングシステム”, 第 13 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, pp.219–224, 2008.
- [13] 和田, 平井, 川村: “伸縮柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.2, pp.282–290, 1999.
- [14] E. Ono and K. Takase: “On Better Pushing for Picking a Piece of Fabric from Layers,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.589–594, 2007.
- [15] K. Salleh, H. Seki, Y. Kamiya and M. Hikizu: “Tracing Manipulation in Clothes Spreading by Robot Arms,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.18, no.5, pp.564–571, 2006.
- [16] H. Wakamatsu and S. Hirai: “Static Modeling of Linear Object Deformation Based on Differential Geometry,” International Journal of Robotics Research, vol.23, no.3, pp.293–311, 2004.
- [17] 川端: 風合い評価の標準化と解析 第 2 版. 日本繊維機械学会, 1980.
- [18] B. Eberhardt, A. Weber and W. Strasser: “A Fast, Flexible, Particle-System Model for Cloth Draping,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol.16, issue 5, pp.52–59, 1996.
- [19] J.W. Eischen, S. Deng and T.G. Clapp: “Finite-Element Modeling and Control of Flexible Fabric Parts,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol.16, issue 5, pp.71–80, 1996.
- [20] M. Shibata, T. Ota, Y. Endo and S. Hirai: “Handling of Hemmed Fabrics by a Single-Armed Robot,” Proc. IEEE Conf. on Automation Science and Engineering, pp.882–887, 2008.

柴田瑞穂 (Mizuho Shibata)

2001 年立命館大学理工学部ロボティクス学科単位取得退学。2006 年同大学理工学研究科総合理工学専攻博士後期課程単位取得退学。2007 年同大学理工学部助手。2008 年同大学理工学部ロボティクス学科助教となり、現在に至る。柔軟物ハンドリングの研究に従事。柔軟ロボティクスに興味を持つ。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

太田剛士 (Tsuyoshi Ohta)

2008 年立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業。同年、同大学理工学研究科創造理工学専攻博士前期課程入学。現在に至る。柔軟物ハンドリングの研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

平井慎一 (Shinichi Hirai)

1990 年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻単位取得退学。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手。1995 年同助教授。1996 年立命館大学理工学部ロボティクス学科助教授。2002 年同教授となり、現在に至る。1989 年米国マサチューセッツ工科大学客員研究員。1990 年度計測自動制

御学会論文賞、2008 年度日本ロボット学会論文賞、1996 年度日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門業績賞受賞。柔軟物ハンドリング、リアルタイムビジョン、分散マニピュレーションなどの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)