単腕ロボットによる 巻き込み防止器具を用いた矩形布生地を展開*

弓場 寛之[†]・山崎 公俊[†]

Unfolding an Item of Clothing by Using a Single Arm Robot with Assistant Instrument*

Hiroyuki YUBA[†] and Kimitoshi YAMAZAKI[†]

This paper describes a method of unfolding an item of clothes by a single arm robot. The unfolding motion is assumed to use a corner of a table so that a crumpled cloth is unfolded by pulled up while making contacts with the corner. Using this approach, two problems arose; entrainment problem and outward warp problem. To solve the former, we proposed an instrument to prevent entrainment. To solve the latter, we built an algorithm that recognizes a warping form of clothes by SVM. Using four kinds of clothes, we confirmed the effectiveness of the proposed method by using a real single arm robot. Our experiment resulted at a success rate from 65 percent to 85 percent.

1. はじめに

日常生活を営むうえで布製品は欠かせない存在である。それゆえに人々は布製品を扱う作業を日常的におこなっている。このうち、洗浄や乾燥については全自動洗濯機などの普及によりすでに自動化がなされているが、一方で、畳む・広げるなどの操作は現状では人手によることがほとんどである。しかし、それらの作業は非生産的な事に分類されるものであり、自動化の要望は多い。

このような背景から、ロボティクス分野においてもこれまで布製品操作に関する研究が行われてきている。具体的な研究課題としては、操作を通して布製品の種類を知る機能 [9]、操作中の布製品の形状状態を知る機能 [6,13]、布製品を畳むタスク [3,11] などが扱われてきた。これらの研究は基本的に双腕のロボットを使用することを想定していた。すなわち、二つのエンドエフェクタにより布製品を保持しつつ、布製品の形状を制御できることを前提としていた。通常、人間がどのように作業を行っているかを考えれば、この方針は正統的であるといえる。

筆者らは、一般家庭で日常的に生じる布製品の操作を

自動化することに興味がある。ただし、そこで利用する自動機械については、製造費用の抑制やメンテナンスの容易さの観点から、なるべく簡便な機構によって実現したいと考えている。家庭用ロボット一般にもそのような考え方が存在し、単腕ロボット型の製品化が計画されている [5,16]。そこで本研究では、単腕のロボットによって布生地を操作することとし、研究課題として、無造作に置かれた矩形の布生地をテーブル上に展開する作業を扱う。この展開によって布を認識しやすい形状へ変形できるため、その後の折り畳み作業などへの見通しを立てることが容易になる。単腕ロボットを用いた布製品操作の従来研究には、積層された布製品から一枚を分離する手法などがある [4]。本研究の成果はこれとの連携が可能であり、布製品の自動操作に貢献するものである。

単腕ロボットを用いて布生地の展開を行うにはいくつかの方法が考えられる。この一つとして小野ら [8] の研究がある。そこでは、単純な折れ重なりがある布生地が平板上に置かれている状況から、視覚によるコーナー検出を用いて折れ重なりのパターンを認識した。以後は、その角を一つずつ摘み上げて外側にひらくことで展開を行うことができる。一方で本研究では、より一般的な状況にも対応するために、折れ重なりをパターン化することが難しいような複雑な形状状態を扱うことを目指した。そこで、布生地の角の一つを摘み上げ、あとはテーブルの角などの一般的な環境構造を利用して展開を行うこととした。

* 原稿受付 2014年10月3日

[†] 信州大学 工学部 Faculty of Mechanical Systems Engineering, Shinshu University; Wakasato, Nagano city, Nagano 380-8553, JAPAN

Key Words: clothing manipulation, unfolding, a single arm robot, home robot, assistant robot.

この方針を採るにあたり、筆者らは大きく二つの問題に直面した。一つ目は、展開操作中に布生地 of 折れ重なりを新たに生じさせてしまう問題である。二つ目は、操作に伴う布生地 of 形状変化が、目標とする展開状態へ遷移できないものとなる問題である。本研究では前者を巻き込み問題、後者を外反り問題とよび、前者については簡易な補助器具を用いる方針により問題を緩和した。後者については、展開作業中の布生地 of 形状を確認し、その結果が望ましくない場合に追加操作を加えることで解決した。

本論文の構成は以下のようなものである。2 章では、単腕のロボットにも可能な矩形の布生地 of 展開手法の提案を行い、本研究における布生地展開の可否を定義する。また、展開手法の実行時に発生しう二つの問題について述べる。3 章、4 章では、それら二つの問題に対する解決手法をそれぞれ述べる。5 章では、3 章、4 章に示した解決手法に基づき、実際にロボットを用いた展開実験とその結果に対する考察を行う。6 章では本研究のまとめと今後の課題を示す。

2. テーブルの角を利用した布生地 of 展開

2.1 テーブルの角を利用した展開手法

矩形の布生地がテーブル上に無造作に置かれており、そこから少なくとも一つの角部分が摘み上げ可能な状態であるとす。この状況下で、単腕のロボットによって布生地 of 展開を行う手順として、以下を提案する。

- (1) テーブル上に置かれた布生地 of 角を認識・把持する。
- (2) 布生地 of 最下端がテーブル天板に接しない高さまで持ち上げる。その後、ロボットハンドをテーブルの角の位置まで移動する。
- (3) テーブルの角に布生地を当てながらテーブル上に引き上げる。

ロボットが一つのエンドエフェクタしかもたない場合、布の形状を十分に制御することは難しい。そこで本研究ではテーブルの角を利用する。このような部位は生活環境によく見られるため、手法 of 一般性は失われないと考えた。この手順をロボットによって行ったときの様子を Fig. 1 に示す。

ここで、本研究における布生地 of 展開の成功を定義する。上述の手順を用いると、Fig. 2 左に示す理想的な状態に加え、中央、右に示すように布生地が完全に展開されない場合がある。しかし、二つの隣り合う角が展開状態にあれば、次にそれらを摘み上げることで布生地を平面状に展開することが容易になるため、本研究では Fig. 2 のいずれの場合も成功と定義する。すなわち、布生地展開の成功と失敗はそれぞれ以下のようなものである。

[I] 成功: 矩形布生地 of 三つ以上の角が視認でき、かつそれぞれに折り返しがない状態。

[II] 失敗: [I] 以外 of 状態。

Fig. 1 Unfolding a clothing item

Fig. 2 Successful types of unfolded result

Fig. 3 Unfolding a clothing item using a corner of a table

2.2 布生地展開時に発生する問題

前節では、単腕のロボットによる矩形の布生地 of 展開手法の提案を行った。本節では、この展開手法を用いる際に発生する二つの問題点を述べる。

巻き込み問題

一つ目は、Fig. 3 に示すように、テーブルの角に布生地を当てながらテーブル上に引き上げて展開する際、内側部分の布生地 to 接触した縁部分の布生地が、その状態を解消できないままとなる問題である。このときの布生地は Fig. 3 右に示すように折り返しのない角が二つしか視認できない状態となるので、展開は失敗である。縁部分の布生地が内側に巻き込まれた状態であることから、本研究ではこれを「巻き込み問題」とよぶことにす。

外反り問題

二つ目は、テーブルの角に当てた際の布の反り方によって、展開の成功率が大きく左右される問題である。この反り方にはおもに Fig. 4 上段に示すような三種類がある。

- (1) 布生地 of 縁が二つともテーブルの角に対して内向きに反る。
- (2) 布生地 of 縁が二つともテーブルの角に対して外向きに反る。
- (3) 布生地 of 縁の一方が内向きに反り、もう一方が外向きに反る。

それぞれについて、テーブル上に引き上げた後の布生地の様子を Fig. 4 下段に示した。多くの場合、(1) の状態からテーブル上へ引き上げると (4) の状態に、(2) の状態は (5) の状態に、(3) の状態は (6) の状態になる。

Fig. 4 Three patterns of unfolded clothing

ここで、2.1 節で示した展開成功の定義に基づくと、(4) と (6) については折り返しのある角が一つないし二つであるため、展開成功とみなせる。一方で、(5) は展開失敗である。すなわち、展開成功の可否は、引き上げ前の布の折り返しの方向が、テーブルに対して内向きか外向きかによって大きく左右される。そこで本研究では、(1) の状態を「内反り」、(2) の状態を「外反り」と称し、外反りを要因とした失敗が起きることを「外反り問題」とよぶことにする。

3. 巻き込み問題への対処

前述したように、引き上げる前の状態が Fig. 4(1) や (3) であれば展開成功が見込める。ただし、引き上げ動作を通して、布生地同士が内反りで接している状態を解消することが必要である。テーブルの角に布生地を当てて引き上げる方針は、この解消にある程度の効果があり、テーブルの縁を使う場合などと比べると有効性が高いことは筆者らの経験から明らかであった。そこで、テーブルの角に改良を加えることで巻き込み問題を緩和する方針を採ることとした。

なるべく簡便な改変で済ませたいとの考えに基づき、Fig. 5 上段に示すような器具を考案した。この器具は先端が尖った形をしており、その角度は 90 度である。テーブルとの接地面には滑り止め用のラバーシートが貼られている。この構成であれば、テーブルの角にただ置くだけでよく、接着や挟み込み操作をする必要がない。また、テーブルの角に合わせた形とすれば、布を引き上げる方向には動くことがないので、器具自体を重くする必要がない。すなわち、単腕ロボットにも自動で設置させることが容易である。なお、器具の頂上部には滑り止めが付与されており、これについては 5.4 節で触れる。

Fig. 5 中段は、この器具が巻き込みを解消する様子である。上段中央の写真に示すように、器具を置くことでテーブルの縁と布の縁との間に所定の隙間ができる。こ

Fig. 5 Assistant instrument and its effectiveness

Fig. 6 Four types of assistant instruments

れにより、巻き込みが生じていたとしても、縁部分の布生地が重力によって下に落ちる効果が得られ、巻き込みを解消することができる。Fig. 5 下段は、このときの様子を、上から見たときの断面図として示したものである。以後、この器具を「巻き込み防止器具」と称する。

以下では、巻き込み防止器具がこの形態に至るまでの検討内容について説明する。Fig. 6 に示すように、このほかにもいくつかの形状の器具を製作し、人の手による展開実験を行うことで性能を比較した。それぞれの形状については以下のような検討があった。

扇形の板 (Fan)

布生地と器具の接触面積は増やさずに、左右の凹みによる巻き込み問題の解消を主として狙った。扇形の板の半径については、50 mm、100 mm を試した。

円盤型の板 (Disc)

布生地と器具の接触部分を滑らかな曲線とすることで、布生地を引き上げるのに合わせてそれを広げる効果を狙った。円盤の半径については、50 mm、100 mm の 2 種類を試した。

Fig. 7 Results of manually unfolding experiments

半球型形状 (Hemisphere)

形状を立体的にすることで円盤型よりも布生地と器具の接触面積を増やすことによって、引き上げる最中に布生地を広げる効果を狙った。

Hemisphere 型, Arrow 型は, 3D プリンタを用いて熱可塑性プラスチックによって造型した。Fan 型, Disc 型の素材は厚紙としたが, 布生地と触れる部分については, 上述の 2 器具と同様の素材となるよう, 熱可塑性プラスチックによるカバーを取り付けた。なお, 5 章で述べるように, ロボットを用いた実験においては, テーブル上に引き上げる最中の布生地が器具の左右どちらかにずれていくといった巻き込みとは別の問題が起きやすくなった。そこで, 立体形状である Hemisphere 型, Arrow 型には滑り止めのため中央部に耐水ペーパーを貼り付けることとし, 本実験においても評価の対象とした。

Table 1 は, 実験に用いた 4 種類の布製品とその緒元を示している。生地については (1)(2) が細かさの異なるパイル地であり, (3) はワッフル生地, (4) はマイクロファイバー入りの平織生地である。布の厚みは, 尾崎製作所の低圧厚み測定器 FFG-11 を用いて, JIS L 1096 箇条 8.4 A 法により算出した。展開動作においては, 布製品の角を親指・人差し指・中指を用いて挟み込み, 親指が上になる形で把持した。器具の手前まで布製品をもっていったあとの引上げの手先軌道は, 把持点をテーブル天板から 40[mm] 程度浮かせつつ, テーブルの角の二等分線, すなわちテーブルの縁から 45 度の直線軌道とした。直線軌道の距離は 700 [mm] とし, 引上げ動作を約 7 秒かけておこなった。この距離は, 5 章で述べる実験で使用したロボットの可動範囲を考慮したものである。

Fig. 7 は, 人手で各布製品につき 10 回ずつの展開実験を行ったときの成功率を示したものである。Arrow 型の巻き込み防止器具を用いた場合に 10 回中平均 8 回以上の展開に成功し, 最も高い成功率を示した。以上より, Arrow 型の器具を用いれば巻き込み問題を緩和する効果が高いことがわかった。

4. 外反り問題への対処

外反り問題へ対処する方法として, まず外反りが起きているか否かを視覚により認識し, 起きていた場合は外

Table 1 Clothing specifications

Clothing type	Size [mm]	Weight [g]	Thickness [mm]
Hand towel	340 × 335	38.2	2.86
Face towel	330 × 450	61.6	3.53
Dishcloth	350 × 460	31.0	1.02
Napkin	420 × 395	36.8	0.61

Fig. 8 Inward and outward turnback. White rectangular boxes depicted in lower panel shows Region Of Interests (ROI) where turnback type will be distinguished.

反りを振りほどく動作を行う。

4.1 外反り状態の認識

布生地展開の基本的な流れは 2.1 節の (1) から (3) に示したとおりである。ここで, 外反り問題へ対処するために, (1) で布生地の角を把持してから (2) の行動へ移行する前に, 把持した状態のまま布生地をテーブルの上に横置きにする行動を挿入する。Fig. 8 上段はその行動後の布製品の様子を俯瞰視点から撮影した結果である。

この後, 布生地を図中右側にある補助具の手前まで移動させることになる。筆者らの経験によれば, 上段左に示した置かれ方であったときには布生地は外反りに, 上段右に示した置かれ方では内反りになる可能性が高いことが明らかであった。すなわち, 横置きした状態での布生地の形状が判別できれば, 展開が成功しやすい形状か否かを知ることができる。

そこで, Fig. 8 に示すような俯瞰撮影した画像を用

いて、以下の方法により布生地の折れ重なり状態の判別を行う。まず、横置きされた布生地を撮影した画像に対し、Canny フィルタ [2] によるエッジ検出を行い、Fig. 8 下段に示すような画像を得る。この画像のうち、図中白線四角に示すようなハンド付近の矩形領域 (Region Of Interest, ROI) に着目すると、内反りと外反りでは、この領域内に次のような違いが表れる。

- 外反りのとき：領域内の一番上と一番下のエッジの間に多くのエッジが存在する。
- 内反りのとき：領域内の一番上と一番下のエッジの間にほとんどエッジが存在しない。

そこで、これらの違いを二値判別問題として扱うことで、内反り・外反りを認識する。単純にエッジの本数を数えるだけでは誤判定が生じる可能性があるため、次のような手順によって特徴ベクトルを計算し、二値判別を行う。

算出する特徴ベクトルの次元を n とする。まず、矩形領域内の画素を走査して、画素値が 0 でないピクセル (エッジが検出されているピクセル) を抽出し、その個数 N を得る。また、それらの画素のうち、最小の行番号を持つ画素の行数を R_1 、最大の行番号を持つ画素の行数を R_2 とする。そして、 R_1 と R_2 の差を n で割った値として、以下の d を得る。

$$d = \frac{R_2 - R_1}{n} \quad (1)$$

ただし、 d が整数にならなかった場合は、四捨五入することで整数にする。続いて、矩形領域中の第 R_1 行目から第 $R_1 + nd$ 行目までの区間を n 等分に分割し、各区間に画素値が 0 でないピクセルが何個存在するかを数え、区間ごとの個数 $N_1, N_2, \dots, N_n$ を得る。最後に、それらをそれぞれ N で正規化した値を要素に持つ n 行 1 列のベクトルとして、以下に示す $\mathbf{D}$ を得る。 T は転置を意味する。

$$\mathbf{D} = \left[\frac{N_1}{N}, \frac{N_2}{N}, \dots, \frac{N_n}{N} \right]^T \quad (2)$$

すなわち、 $\mathbf{D}$ は画素値をもつピクセルの個数の、区間ごとの密度を要素にもつベクトルとなる。このようにして $\mathbf{D}$ を得ると、外反りでは $\mathbf{D}$ の各要素が 0 以外の値をとる場合が多いことが予想される。

この予想に基づき、Support Vector Machine (SVM) [12] を用いた機械学習を行う。まず、Fig. 8 下段の ROI に示すような外反りと内反りの学習画像をそれぞれ用意し、それらから特徴ベクトル $\mathbf{D}$ を得る。それらに対して SVM を適用して識別器を生成する。そして、以後はこの識別器を用いて外反り・内反りを判別し、その出力が外反りであった場合は、次節に述べる振りほどき動作を行うことにより、内反りにしてから次の動作に移るようにする。なお、布の形状状態として、Fig. 4(3) のように一方が内反り、もう一方が外反りとなること

がある。この状態から作業を先へ進めると、展開に失敗しやすい。そこで、学習器を生成するとき、そのような状況も外反りとして扱うこととして学習を行った。

上述の処理を行うに当たり、ROI の設定方法については以下のように考えられる。カメラがロボット上に搭載されていると想定すれば、カメラと手先の位置・姿勢を一定の関係に保つことは容易である。また、布生地を横置きにする動作は、布生地の高さが Table 1 に示す程度であれば、少なくとも手先付近については、毎回ほとんど同じ位置に布生地を配置させることが可能である。画像内部で布生地が上下にずれることはあるが、上述の R_1, R_2 を用いた正規化により補正することができる。よって、ROI はロボットの手先の近くに配置し、上下幅については布生地を十分に捉えられる範囲とすればよく、状況に応じて位置や大きさを変更する必要はない。

4.2 外反り解消動作の導入

外反りと判断された場合、布を把持した状態のまま腕を振り回すことによって、それを内反りに変える作業を行う。ロボットの体幹中央に右手座標系の原点があるものとし、正面を x 軸正方向、左を y 軸正方向にとり、以下の動作を生成する。

- (1) 布生地を把持したハンドを所定の高さ z まで上げ、布生地を完全にテーブルから離す。その後、 $z - \Delta z$ まで下げる。
- (2) ハンドを $(0, -\Delta y, 0)$ だけ相対移動する。
- (3) $(0, 0, \Delta z)$ だけ相対移動する。
- (4) $(0, \Delta y, 0)$ だけ相対移動する。

ここで、(2) の動きは布生地をテーブルに接触させた状態で行うようにする。これにより、反り方を反転させることが可能になる。(1) から (4) の動作を行った後は外反り・内反りの識別を再度行い、外反りでないことが確認できれば、巻き込み防止器具を用いた展開作業へ移行する。

5. 実験

5.1 使用するロボットと実験環境の設定

川田工業株式会社製のロボット HIRO [15] を使用した。このロボットは片腕 6 関節、腰に 1 関節、首に 2 関節を持つ双腕ロボットであるが、本研究では単腕による布製品の操作を目的としているため、本実験では左腕のみを利用した。ハンドは、フタバ電子工業株式会社のコマンド方式サーボ RS301CR を二つずつ直列した 2 指ハンドであり、指先にはプラスチック製の平板を取り付けることでテーブル上の布のフチをつかみやすくした。

布生地の計測を行うセンサとして、Microsoft 社製の Kinect を使用した。VGA サイズ (640×480 pixel) のカラー画像と深度画像を 30 [fps] で取得することが可能である。本実験ではこれを HIRO の頭部に固定し、カラー画像を用いて布生地の角の検出や 4 章で述べたような布の反り方の判定を行った。また、深度画像は、検出

した角の三次元位置を特定するために利用した。

テーブルの高さを 750 [mm] とし、この値を既知とした。布生地は基本的に無造作に置かれているとするが、少なくとも一つの角がテーブル天板と接した状態で存在しており、おおむね左側を向いた状態で、ロボット頭部から視認できるものとした。

5.2 実験手順

実験は、以下に示す四つの手順を 1 回として行った。動作の様子を Fig. 9 に示す。

- (1) テーブル上に置かれた布生地を角を検出する。
- (2) 検出した角を把持し、布生地を持ち上げる (Fig. 9(A) から (C))。
- (3) 布生地を横置きし、その形状が外反りであると判断された場合、4.2 節に述べた動作によって外反りを解消する。内反りであった場合、布生地をテーブルの角の位置へ持っていく (Fig. 9(D) から (F))。
- (4) 布生地を引き上げてテーブル上に展開する。 (Fig. 9(G), (H))。
- (5) テーブル上に置かれた布生地が 2.1 節の [I] [II] のどちらであるかを人間が判別し、展開の可否を記録する。

この流れを Table 1 に示した 4 種類の布に対して 50 回ずつ、計 200 回行った。そして、それぞれの布製品について 50 回中何回展開が成功したかを記録した。

Fig. 10 は、1 回の展開行動における処理フローを示す。入力 Kinect から送られてくるカラー画像と深度情報、出力はロボットへの動作命令である。以下に、上記 (1)~(4) の手順の実現に至るまでの流れを述べる。手順 (1) では、まず Kinect から送られてくるカラー画像からエッジ検出を行い、画像内での布生地を角の座標を求める。つぎに、深度画像からその角の座標に対応する深度値を得る。そして、カメラ姿勢情報を用いて角の三次元位置を算出する。その三次元位置に左腕を伸ばすように逆運動学を解き、把持を実行する。手順 (3) では、布製品はいったんテーブル上に置かれる。その様子を撮影したカラー画像から、4.1 節で述べた手法により内反り・外反りの判定を行う。もし外反りと判定されれば解消動作が実行され、その後再度判定処理がなされる。内反りであれば手順 (4) へ移行し、布生地をテーブル上へ展開する。

手順 (4) におけるテーブル上への引上げ動作は、3 章で述べた人手による実験と同様に、テーブルの縁から 45 度を成す直線軌道を基準とした。ただし、動作ソフトウェアの制約により手先を完全な直線軌道に沿わせることが難しかったため、直線上に 70 [mm] ごとに経路点を設定し、各経路点間を手先が 2 [sec] で動くように軌道を設定した。そこでは、目標となる次の手先姿勢を与え、逆キネマティクス計算により目標関節角度列を計算し、現在関節角度列からその関節角度列へ移行するための関

Fig. 9 An unfolding experiment

節角度列ベースの minimum-jerk 補間を行った結果を用いて実機を動作させた。Fig. 11 に、100 [msec] ごとにプロットした手先位置座標を示す。テーブルの縁から 45 度を成す直線を y 軸の方向としている。

(a) X-Y plane (b) Y-Z plane

Fig. 11 End-effector trajectory for unfolding

4.1 節で述べた画像特徴量については、抽出領域の分割数 n を経験的に 10 とした。学習データとして、外反り内反りの画像を各 20 枚ずつ、計 40 枚の画像を用意した。それらに対し、ソフトマージンパラメータを 5.0 とした線形 SVM を適用して識別器を得た。

外反り解消動作のパラメータは $z=700$ [mm], $\Delta y = \Delta z = 400$ [mm] とした。これらの値は、4.2 節 (2) の布生地を吊り下げた状態において、その下端が 200 から 300 [mm] テーブル天板に接することを考慮して決めたものである。

Fig. 10 The procedure flow of unfolding. The numbers written in the blocks correspond to the number depicted in Fig. 9.

Table 2 Experimental results

Clothing type	No. of success	Success rate
Hand towel	43	86 %
Face towel	41	82 %
Dishcloth	38	76 %
Napkin	40	80 %

Table 3 Number of failure for every causes

Clothing type	(1)	(2)	(3)	(4)
Hand towel	1	5	0	3
Face towel	3	2	1	1
Dishcloth	0	9	1	2
Napkin	1	3	5	1

5.3 実験結果

展開実験の結果を Table 2 に示す。布生地ごとの成功回数は、最大は Hand towel を用いた際の 43 回、最小は Dishcloth を用いた際の 38 回であった。Table 3 には、失敗要因を下記 4 種類にわけて、それぞれの布製品ごとにまとめたものである。

- (1) 引き上げ時に巻き込み問題が発生する。
 - (2) テーブル上に布生地を引き上げる際に布生地がテーブルの縁に沿って横に滑り、展開が失敗する。
 - (3) 外反り解消動作に失敗したにもかかわらず、誤判定により外反りのまま展開動作に移ってしまう。
 - (4) 動作の途中で把持していた布を落とす。
- (2) については失敗回数が多く、厚みがなく粗い布目の生地のとくに顕著であった。その他のケースでは、内反り・外反り判定が困難な布生地が存在したが、全体的に大きな差は見られなかった。

5.4 考察

200 回の実験のうち、(1) の巻き込み問題の発生回数は 5 回であった。これは、テーブルの角に設置した巻き込み防止器具が巻き込み問題の防止に役立ったことを示唆している。一方、(2) に示したように、布生地をテーブル上に引き上げる最中に布生地が横にずれていき、巻き込み問題の解消効果を得ることなくテーブル上に移動される事例が見られた。これについては、補助具の頂上

部に耐水ペーパーを貼付し、布生地と器具との接触面における摩擦を強くすることで問題が緩和されたが、完全な解決には至らなかった。この現象の原因は、器具と布が接触している領域の重心位置と、器具より下にぶら下がっている布の領域の重心位置が、水平方向にずれているためであると考えられる。有力な改善案は、布製品をテーブル上へ引き上げる際に、布の形状状態に合わせて手先の軌道を変えていくことである。すなわち、引き上げる最中に布生地の状態認識を行い、その結果から手先軌道を適応的に決めていく仕組みが必要であると思われる。また、巻き込み防止器具に接触センサを取り付けるなどして、布と器具の間に生じるすべりなどを計測し、手先軌道の改善に生かしていきたい。

(3) 外反り・内反りの誤判定については、布のフチを抽出するエッジ検出処理が不完全であり、必要なエッジ情報が得られないことが大きな要因であった。エッジの強度を閾値処理する方針では、布製品による違いや照明条件の変化に十分に対応できないため、異なる方式によってフチのエッジを信頼性高く抽出する仕組みが必要である。(4) の展開動作中に把持していた布を落とす問題については、ロボットハンドの先端に布を確実に把持するために爪の形状を工夫する、触覚を利用することで把持の確実性を判定する仕組みを導入する、などの解決法が考えられる。これらは展開作業における処理手順を増やすものではないため、効果的な工夫である。また、現状の外反り判定手法は無地の布にしか適用できないため、この改善も今後の課題としたい。

6. おわりに

本論文では、単腕のロボットによる矩形の布生地を展開について述べた。テーブルなどの角を利用することを前提とした展開手順を提案した。その際に発生する問題点として、巻き込み問題、外反り問題の二つを取り上げ、それぞれに対する解決法を提案した。そして、腕付きロボットを用いた実験により、日常生活でよく用いる矩形の布製品について、8 割強の成功率で展開が可能であることを示した。実験結果に基づいて、展開の成功率と失敗時の要因を調べ、それに対する考察を行った。

今後の課題としては、5.4節で述べた内容への対応がある。また、より一般的な状況下でも本研究の成果を適用していくために、乱雑に置かれた布製品の中から対象の布生地を取り出す作業や、展開した布を単腕で折り畳む作業との連携が期待される。前者に既存研究[4]が存在することは1章に述べた通りであるし、複雑な形状状態の布製品から把持位置を決める方式などは、筆者らも研究を進めている[14]。布生地の折り畳みに関しては、たとえば柴田ら[10]が行っていた摘みすべり動作はアームを二本用いなくとも展開状態での把持が可能であり、参考にしていきたい。また、本研究の成果を矩形以外の布製品に対応可能にしていくことも重要である。

単腕ロボットによる日常生活の支援アプリケーションについては、第1章で述べた通りこれまでも実用を見据えた研究開発が進められてきており[5,16]、今後の発展が期待される。これらのロボットに布製品操作の機能を付加し、実用性を示していくことが、本研究の意義を示す一つの方法である。

謝 辞

This work was partly supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers 26700024.

参 考 文 献

- [1] D. Comaniciu, V. Ramesh and P. Meer: Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift; *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 142–149 (2000)
- [2] J. Canny: Computational approach to edge detection; *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, pp. 679–698 (1986)
- [3] S. Cuen-Rochin, A. Andrade-Cetto and C. Torras: Action selection for robotic manipulation of deformable planar objects; *Proceedings of Frontier Science Conference Series for Young Researchers: Experimental Cognitive Robotics*, pp. 1–6 (2008)
- [4] K. Hamajima and M. Kakikura: Planning strategy for unfolding task of clothes - Isolation of clothes from washed mass -; *Proceedings of International Conference on Robots and Systems*, pp. 1237–1242 (2000)
- [5] K. Hashimoto, F. Saito, T. Yamamoto and K. Ikeda: A field study of the human support robot in the home environment; *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, pp. 143–150 (2013)
- [6] Y. Kita, F. Saito and N. Kita: A deformable model driven method for handling clothes; *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, pp. 1425–1431 (2004)
- [7] J. Maitin-Shepard, M. Cusumano-Towner, J. Lei and P. Abbeel: Cloth grasp point detection based on multiple-view geometric cues with application to robotic towel folding; *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2308–2315 (2010)
- [8] E. Ono, K. Kita and T. Sakane: Unfolding a folded fabric using information of outline with vision and touch sensor; *Journal of Japan Robotics Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 275–283 (1997)
- [9] F. Osawa, H. Seki and Y. Kamiya: Unfolding of massive laundry and classification types by dual manipulator; *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 11, No. 5, pp. 457–463 (2007)
- [10] M. Shibata, T. Ota and S. Hirai: Fabric unfolding using pinching slip motion; *Journal of Japan Robotics Society*, Vol. 27, No. 9, pp. 67–74 (2009) (in Japanese)
- [11] J. Stria, D. Prusa, V. Hlavac and L. Wagner: Garment perception and its folding using a dual-arm robot; *Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2014)
- [12] V. N. Vapnik: *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag (1995)
- [13] B. Willimon, S. Birchfield and I. Walker: Classification of clothing using interactive perception; *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1862–1868 (2011)
- [14] K. Yamazaki: Grasping point detection for a piece of clothing casually placed on daily environment; *Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2014) (to appear)
- [15] 川田工業株式会社:HIRO;
<http://nextage.kawada.jp/hiro/>
- [16] UBR-1, <http://unboundedrobotics.com/ubr-1/> (accessed on 14 Apr., 2014)

著 者 略 歴

ゆり 弓 場 寛 之

2014年信州大学工学部機械システム工学科卒業、同年信州大学理工学系研究科機械システム専攻入学。現在に至る。ロボットハンドによる柔軟物体操作の研究に従事。日本ロボット学会の会員。

やま 崎 公 俊 (正会員)

2007年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。東京大学大学院情報理工学系研究科特任助教、特任講師を経て、同年9月より信州大学工学部機械システム工学科助教。2006～2007年 日本学術振興会特別研究員、2010～2014年 科学技術振興機構さきがけ研究員を兼任。ロボットの知能情報処理の研究に従事。博士(工学)。IEEE、日本ロボット学会などの会員。