

つまみ滑り動作による動的な布地の展開における接触の観察

太田 剛士, 柴田 瑞穂, 平井 慎一 (立命館大学)

Observation of Contact between Fabric's Hem and Fingertips during Dynamic Unfolding by Pinching Slip Motion

Tsuyoshi OTA, Mizuho SHIBATA, and Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

Abstract: The paper presents dynamic unfolding of fabrics by pinching slip motion. By keeping the textile in contact with robot fingertips, the dynamic unfolding is done successfully in horizontal direction. The success rate depends on fingertips shape. We simulate the distribution of pressure between fingertips and the fabric. Here, we assume that the contact force is described by contact between fluid and an obstacle in duct. In addition, we measured some contact areas between fingertips and the fabric during pinching slip motion. In this paper, we confirmed that the robot can do a steady dynamic unfolding using half-rounded rectangular fingertips.

1 緒言

布地ハンドリングの多くはヒトに頼らざるを得ず、自動化されていない現状にある。これは従来のロボットが主に剛体を対象にしており、布地のような大変形を伴う柔軟物ハンドリングを想定していないからである。薄い柔軟物として、布地は変形に対する力の応答が非線形であり、ヒステリシスを示し、異方性を有する。これらの特性が、布地ハンドリングの困難さを引き起こしており、布地製品そのものをハンドリングする技術は確立されていない。

本研究では、ロボットアームとグリップ型のロボットハンドにより、布地の基本的な動作技術である把持、展開、定置動作を実現した。把持動作について、把持するために布地の特性である残留変位を利用することで把持部を作成した [1]。ここでは座屈荷重の理論より、力のつりあいのために必要な接触部の長さを算出し実験により検討した。この方策により、単腕ロボットによる布地の把持動作を実現した。また展開動作について、ヒトの展開動作を模倣したつまみ滑り動作を実装した [2]。把持力を適切に設定することにより展開動作が安定に行えること、指先形状において成功率に差異が生じることを実験的に示した。定置動作について、布地の定置時における振る舞いを状態遷移グラフを用いることで表現し、定置において適切な手先速度と軌道を実験的に求めた [3]。状態遷移については高速度カメラによる評価を行った。この手法により、布地の初期形状によらず安定に定置することができる。これらの布地の基本動作技術を統合することで、一連の流れとして布地を把持、展開、定置する機械システムを実現した [4]。単腕 2 指 2 自由度ハンドを有する機械システムにより、布地の整列動作を実現した。

本報告では布地と指先の接触面について実験を行い、柔軟物ハンドリングにおいて、なぜ指先形状が展開動作に影響を与えるのかを解明することを試みる。

2 布地の展開実験

2.1 つまみ滑りによる布地の展開動作

Fig.1 に、つまみ滑りによる布地の展開方法を示す。Fig.1-(a) は斜め方向から、Fig.1-(b) は Y 軸方向から、Fig.1-(c) は Z 軸上向きから見た図である。つまみ滑り動作とは、布地の縁を利用した展開動作であり、布地を落とさず、指先を滑らせる動作である [2]。この動作の、指先と布地が接触しながら相対的に運動する動作を、動的な動作と定義する。動作終了時に、縁との距離 L_e を短くすることが成功条件である。

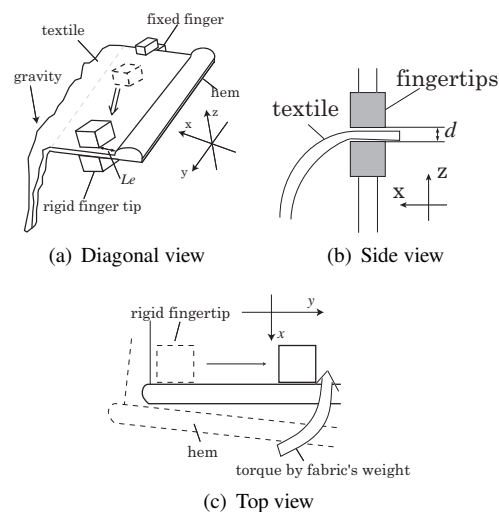


Fig.1 Pinching slip motion

Table 1 Physical properties of cotton

Size [mm]	450x430
Weight [g]	19.49
Friction coefficient *	0.22
Flexural rigidity [gf·cm] *	0.043
Thickness [mm] *	0.61
Thickness of hem [mm]	0.91

* measured by KES

2.2 実験条件

つまみ滑りによる展開作業において、(1) ロボットハンドの指先形状、(2) ロボットアームの手先速度、(3) ロボットハンドの把持力、(4) 縁の上下方向が実験条件として挙げられるが、指先形状については、Fig.2 に示すアクリルの指先を使用する。布地と接触する形状は、(a) 半径 15 mm の半円と 15 mm × 30 mm の四角を組み合わせたものと、(b) 2 つの角に 3 mm の丸み付け加工を施した 30 mm × 30 mm の直方体形状である。2 種類の指先をハンドの進行方向に対して固定することで、縁との接触状態を決定している。ロボットアームの手先速度は $V = 9.947$ mm/s とした。



(a) Half-rounded rectangular (b) Square with roundings

Fig.2 Robot fingertips

Table 2 Experimental results of pinching slip motion

d [mm]				
0.45	○	○	○	△
0.50	○	○	△	×
0.55	○	○	×	×
0.60	○	○	×	×
0.65	○	○	×	×
0.70	○	○	×	×

また把持力については、Fig.1-(b) に示すように、指先の幅を $d = 0.45$ mm から 0.70 mm に 0.05 mm 刻みに変化させることで検討する。Table 1 において、本実験で使用した、木綿のハンカチである布地の物理特性を示す。測定方法は Kawabata's Evaluation System for fabric (KES) [5] を用いた。展開動作時にセンサを用いて、指先の幅 d や、布地形状を測定することはしない。展開動作の成否は、ハンドを移動させたときに、布地を把持しているか、また縁と把持点との距離 L_e がゼロになる、つまり指先が布地の縁に沿う位置に移動できているかで判定する。

2.3 実験結果

前節の実験条件より、布地の展開実験を行った。成否を Table 2 に示す。実験結果は文献 [2] と同様であるが、実験結果を検証するために再録する。第一列目の図は、指先形状と、指先の進む方向に対して接触する縁を表している。指先形状の横の線は、布地の縁であり、指先の右側付近で接触することを表している。第二列目の図は、布地の縁の上下方向を表している。実験はそれぞれ 3 回ずつ行い、すべて成功した場合に ○、すべて失敗した場合は ×、両方起こった場合は △ としている。実験の結果、円弧状の指先の場合、指先幅 d を幅広く設定しても展開動作は成功することがわかる。また $d = 0.45$ mm のように把持力を大きくすることができれば、どのような指先でも概ね成功するという結果が得られた。Table 2 の結果より、布地の表裏によって成功率に差が生じているが、展開作業を行う場合、適切な指先形状、把持力を選択できれば、センサレスで、布地のばらつきによらず、展開することが可能であることが示唆される。

3 指先にかかる圧力の解析

Table 2 の結果より、展開動作の成否は指先形状に依存していることが示唆される。したがって、布地との接触によって指先に発生している力を解析する。仮に布地と指先の接触を剛体の接触と見なすと、境界条件が煩雑になり、さ

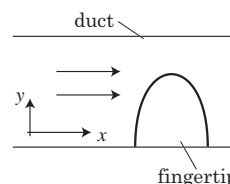
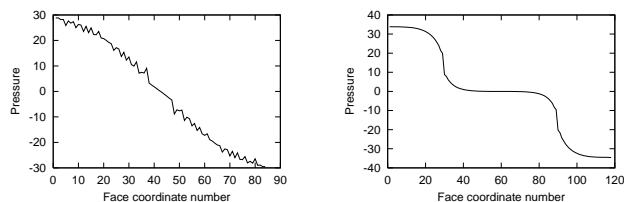


Fig.3 Fingertip in a duct



(a) Half-rounded rectangular

(b) Square with roundings

Fig.4 Simulator condition

らに布地の柔軟な接触を表現できない。むしろ布地と指先が接した状態で相対位置が変化する接触をとまなう動的な動作は、流体と側壁の接触に酷似しているため布地と指先の接触を、流体と障害物の接触とみなし指先の圧力分布を解析する。Fig.3 に示すように、布地と指先の間を 2 次元の流体と流体ダクトに置かれた障害物の関係とみなすことでシミュレーションを行う。障害物はダクト下部と接地している。この障害物の表面上の圧力分布をシミュレーションにより検討する。

3.1 流体解析と実験とのマッチング

数値流体解析によりシミュレーションを行う。基本方程式は連続の式と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式を用いた [2]。このときに、流体パラメータを実際の布地特性にマッチングさせる必要がある。布地は形は容易に変化するが、体積は変化しないため、扱う流体を密度、粘性変化のない非圧縮流体とする。また Navier-Stokes 方程式を無次元化する時にレイノルズ数 Re を表す場合、一定の粘性を ν 、代表速度を U 、代表長さを L とすると、

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (1)$$

となる。KES で測定した布地の動摩擦係数を動粘性係数 ν と見なすことで、レイノルズ数を決定する。Table 1 より、 $Re = 23.25$ であり低レイノルズ数となる。これは実験での布地と指先との相対速度が、音速に比べると非常に小さいという条件を満たし、動摩擦係数を動粘性係数と見なす仮定が妥当であると言える。

3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig.4 に示す。Fig.4 は指先の表面にかかる圧力値であり (a) は円弧形状、(b) は四角形状の指先である。四角形状の場合、2 つの角のところで圧力差が大きく生じている。円形状の場合には圧力差の上下が細かく表れている。これらは格子形状を、直交格子のレギュラー格子を採用しているため、滑らかな形状を表現できていないためである。圧力の最大値については、四角形状の方が大きい結果となった。しかしながら、2 つのグラフからでは接触位置が不明なため、つまみ滑り動作による指先形状の優劣を判断できない。

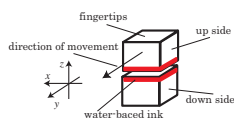


Fig.5 Fingertip with water-based ink

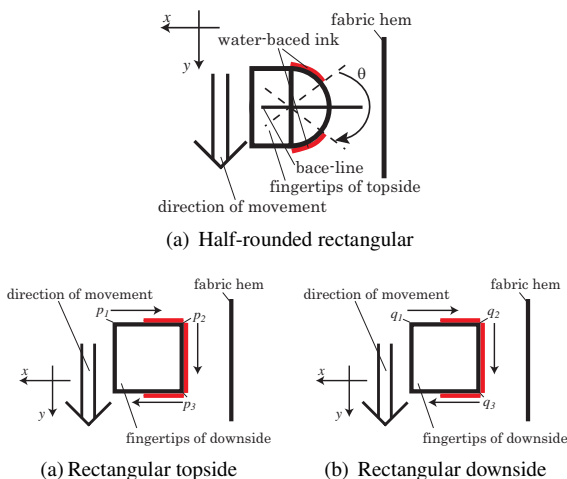


Fig.6 Robot fingertips from top view

4 展開時における布地と指先の接触実験

前章の結果より、圧力分布を考察するためには、指先と布地の接触位置が重要であることが示された。しかしながら、指先と布地が接触する面の位置とその面の幅は、布地が柔軟物であるため、また動的に展開しているために特定できない。Fig.5に示すように、ロボットハンドの指先に水性のインクを塗布した状態でつまみ滑り動作による展開を行う。このとき、布地と指先の接触力によってインクが擦れ落ちた部分から接触面の位置と幅を推定する。

4.1 実験条件

実際に水性のインクを指先に塗布した状態で、つまみ滑りによる展開動作を行い、インクが擦れ落ちた部分を布地と指先が接触した面と見なす。この方策の場合、ある程度接触力がなければインクが擦れ落ちないということが考えられるが、つまみ滑り動作による展開時に、指先と布地の接触に支配的な力を知ることができる。

指先形状と布地の縁と接触する方向については、前章の実験の2種類の指先と同様に、円弧形状の円の部分と直方体形状の四角形部分が縁と接触する場合を考える。試行回数は30回とし、展開動作そのものを失敗した場合は計測を行わない。円弧形状について、指先の上側に対してZ軸下向きに見た図をFig.6(a)に示す。円弧形状における接触位置の計測角度は、指先の円弧中心から図に示すX軸と平行にとった基準線に対して、進行方向側に向かって時計回りに接触した角度を θ とする。角度 θ より、接触した長さ a を計算により求める。また、下側の指先についても同様の基準線ととり、角度 ϕ を計測し、接触長さ b を求める。四角形状の場合をFig.6(b), (c)に示す。指先の上側、下側を上方から、Z軸下向きに見た図である。それぞれの3つの角を $p_1, p_2, p_3, q_1, q_2, q_3$ と原点と定義し、矢印方向に正をとる。

4.2 実験結果

実験結果をFig.7, Fig.8, Fig.9に示す。円弧形状の指先で布地が裏面を向いた場合の接触長さをFig.7-(a), (b), 表側の面の場合をFig.7-(c), (d)に示す。進行方向側の長さとして進行方向逆側の長さの差分もプロットしている。四角形状の指先で裏面の場合をFig.8に示し、Fig.8-(a), (b), (c)は上側の指先、Fig.8-(d), (e), (f)が下側の指先において、それぞれの接触位置をそれぞれの座標軸上で表している。円弧形状の傾向として裏面の場合、布地の縁が上を向いているため、上側の指先の a のみに接触が見られる。それは表面の場合にも同様であり、縁が下を向いているため下側の接触長さ b に接触がある。接触面の長さのばらつきはそれぞれ接触面は ± 20.0 degの範囲にあり少なく、また常に基準線をまたぐ形で接触している。裏面と表面を進行方向と進行方向逆の接触長さの差分で比較すると、裏面の方が角度に対して差分が小さく平均すると約 1.3 degであり、長さに対すると約 0.3 mmであるのに対して、表面は平均して約 4.0 deg、長さにして約 1.0 mmほど差分が見られ、常に進行方向逆側に大きく接触する。しかしながら、円弧形状の接触の場合には、接触位置が一箇所であり、ばらつきが小さい。四角形状の傾向として、円弧形状の場合と同様に布地の表裏によって接触位置が変化する。しかしながら、表裏に関係なく、座標 q_2 の 30.0 mm付近や、座標 q_3 の 0.0 mm付近には接触が見られる。また円弧形状の場合、接触面の長さの平均が裏面であったときは約 4.4 mm、表面のときには約 4.1 mmであったが、四角形状の場合には、裏面の場合で約 12.7 mm、表面のときには約 12.5 mmと接触面の長さが長くなる傾向にある。さらに接触面の大部分を占める裏向きときの座標 p_2 と、表向きときの座標 q_2 については円弧形状に比べ接触位置にばらつきが大きい。これらの結果により、安定なハンドリングには円弧形状の方が有利であることが示唆され、つまみ滑りにおける指先形状の差異を示した実験結果を支持するものである。しかしながら、前章で示した圧力分布のシミュレーションとは整合性が取れていない。これは、メッシュを直交座標系でとっていること、メッシュそのものが荒いこと、重力による布地の自重による回転力を考慮していないことによると考えられる。

5 結言

本報告では布地を扱う動作の一つである、展開動作において、つまみ滑りという方策を実装し、ロボットハンドの指先形状、把持力、布地の表裏を考慮した実験を行った。その結果、指先形状によって成功率に差異があること、把持力の大きさによって、布地のばらつきを抑えつつ、展開作業ができるという結果が得られた。また展開動作における布地によって指先にかかる圧力を、流体におけるダクト内の障害物にかかる圧力と見なしシミュレーションを行った。布地の動摩擦係数を非圧縮流体の動粘性係数と見なすことでレイノルズ数を決定した結果、四角形状の方が圧力の変化量が大きいことがわかった。さらに布地と指先の接触面の位置を知るために、指先に水性のインクを塗布した状態で、つまみ滑り動作を行った。擦れ落ちた部分から、布地と指先の接触面を計測した。その結果、円弧形状の場合、四角形状に比べ接触位置においてばらつきが少ないことが示された。これは、つまみ滑りという動的なハンドリングを実行する場合に、指先が円弧形状ならば、より安定して展開可能であることを示唆している。

今後の課題として、布地と指先の接触力をより高精度のシミュレーションによって示すこと、また実験の応用として、縁のない布地を展開すること、物理特性や形状の異なる布地を展開することなどが挙げられる。

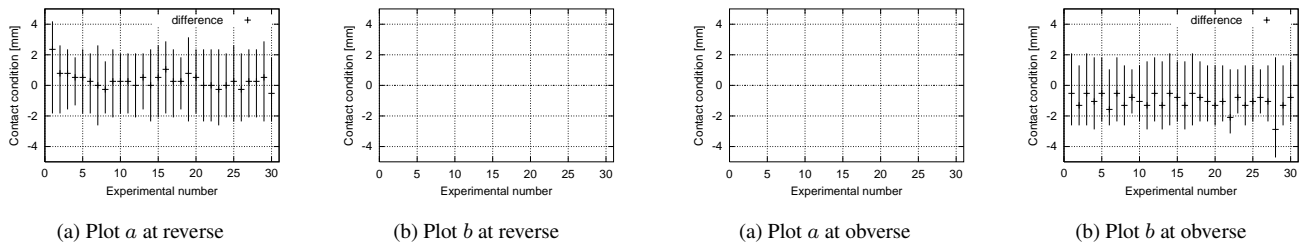


Fig.7 Contact location by half-rounded rectangular

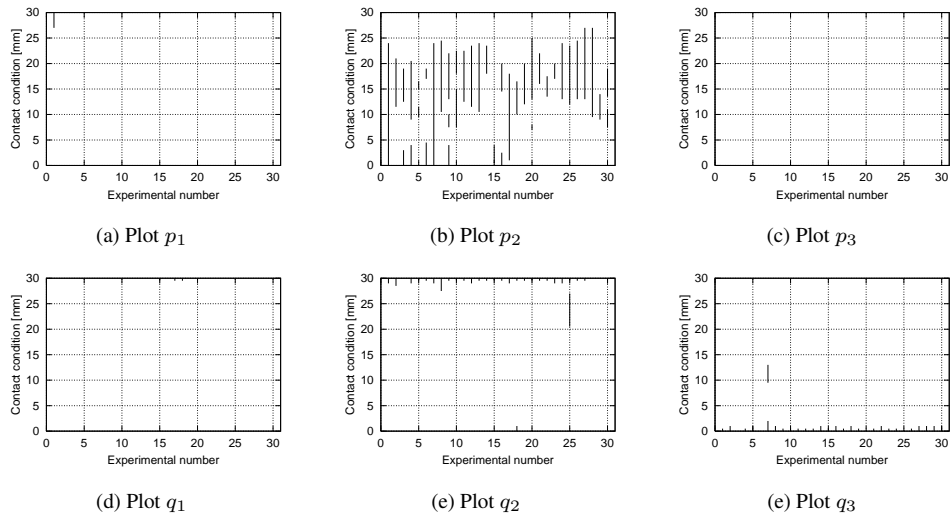


Fig.8 Contact location by square with roundings at reverse

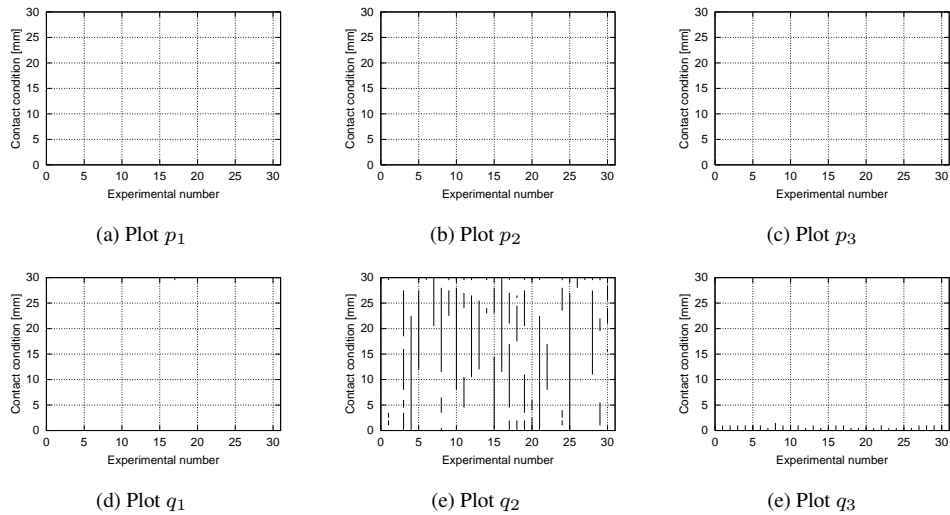


Fig.9 Contact location by square with roundings at obverse

参考文献

[1] 柴田, 太田, 遠藤, 平井: ”単腕ロボットによる残留変形を利用した布地の把持動作”, 第8回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論文集, 2007.
 [2] 太田, 柴田, 遠藤, 平井: ”つまみ滑り動作による縁あり布地の動的な展開”, 第20回ロボティクス・メカト

ロニクス講演会論文集, 2008.
 [3] 柴田, 太田, 遠藤, 平井: ”布地の動的な定置動作における状態遷移グラフ”, 第25回日本ロボット学会講演集, 2007.
 [4] 柴田, 太田, 遠藤, 平井: ”布地の把持・展開・定置を実現する機械システム”, 第20回ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2008.
 [5] 川端季雄: ”風合い評価の標準化と解析 第2版”, 日本繊維機械学会, 1980.