

# 布地の動的な定置動作における状態遷移グラフ

## State Transition Graph in Dynamic Placing Motion of Textile

柴田 瑞穂 (立命館大) 太田 剛士 (立命館大) 遠藤善雅 (I.S.T) 平井 慎一 (立命館大)

\*Mizuho SHIBATA, Tsuyoshi OTA, Shinichi HIRAI : Ritsumeikan Univ.

Yoshimasa ENDO : I.S.T.

**Abstract:** We realize dynamic placing motion of a textile using a scalar robot. Successful placing motion depends on warpage direction of a textile at an initial state. Second, we propose state transition graph of placing textile to explain the experimental results. In the state transition graph, we take warpage direction of a textile into account. Eight nodes in the graph present the placing textile. Based on the graph, we analyze the observed placing processes. Finally, we point out that the successful placing also depends on velocity of a robot arm that grasps the textile and contact angle between the textile and floor.

**Keywords:** State transition graph, Softness, Textile, Dynamics, Placing motion

### 1 緒言

布地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。これらの分野では衛生面や効率の面からもロボットでの自動化が望まれているが、扱う対象が柔軟物である点および商品の大きさ・形状・品質が多様多様であるという点から現状のロボット技術では布地のハンドリングは困難である。

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の詳細情報を、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つまみあげ、展開するシステムを構築した [1]。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 [2, 3]。文献 [2] 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 [3] 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。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、布地の巻取りによる把持を実現している [4]。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、床に広げている布地の把持を実現している [5]。これらの研究では、主に把持候補点の算出や、把持のためのロボットハンドの開発に力点がかけられており、布地の動的な操作は対象としていない。

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 [6]。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。またこのとき、モデルのバネ定数の推定値が大雑把でよいことを実験的に確認している。このように、布地

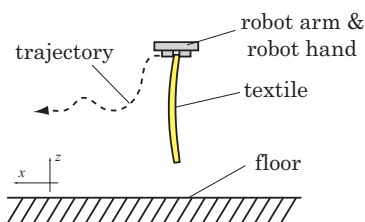


Fig.1: Placing motion of textile by robot arm

を動的に操作するロボットシステムに関する研究は数少ない。ロボットを用いて布地を汎用に扱うためには、動的な操作の実現が必要となる。しかしながら、柔軟物と剛体との接触には未知の部分が多く、布地の定置動作、展開動作に代表される布地と環境・ロボットとの動的な接触をとまなう作業の実現は大変意義深い。

本報告では、布地を動的に扱う基本動作のひとつである布地の定置動作をロボットアームの軌道生成によって実現する。特に、矩形の布地の定置動作について取り扱う。また、布地の特性を考慮した状態遷移グラフを作成する。この状態遷移グラフに基づいて、実際の定置動作の状態遷移を確認することによって、布地の定置動作の成功率変化について考察する。

### 2 布地の定置実験

本章では、布地の定置動作を、スカラロボットの軌道生成によって実現する。特に、矩形の布地の定置動作について取り扱う。

#### 2.1 布地の定置動作

布地の一辺をロボットハンドで把持し空中に持ち上げている。この状態からロボットアームを動かすことで布地と床を接触させる。その後、ロボットアームの動作を停止することで、布地を床との接触を維持したまま静止させる。この一連の作業を布地の定置動作と定義する。このとき、布地の定置動作は、Fig.1 に示すように、ロボットアームの軌道計画問題に帰着される。ここで、定置動作中の布地のねじれが小さいと仮定すると、図に示すように、 $x-z$  平面内での軌道生成問題に帰着される。このとき、 $x$  軸の正方向をロボットアームの水平の移動方向に一致するように設定する。また、 $z$  軸は床から鉛直上向きを正とする。ここで、Fig.2 に示すように、定置前の初期状態において  $x$  座標の大きい方を布地の表面、 $x$  座標の小さい方を布地の裏面を定義する。

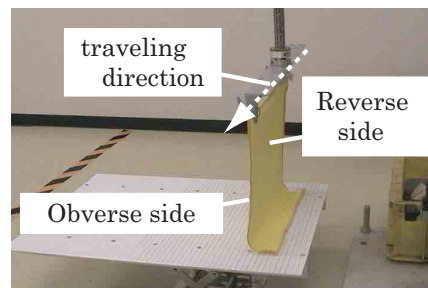
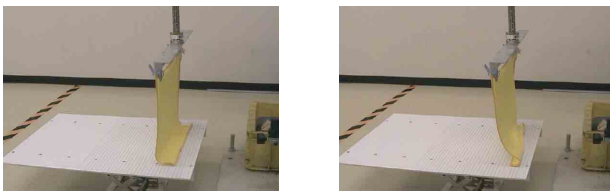


Fig.2: Obverse and reverse side of textile



(a) Success case (b) Failure case

Fig.3: Evaluation of textile placing

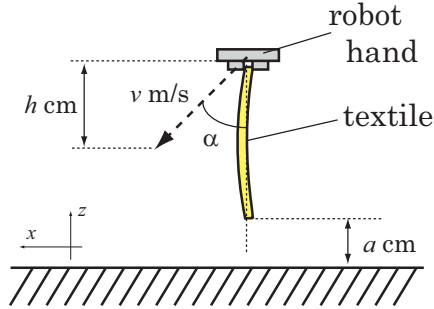


Fig.4: Experimental setup

## 2.2 定置動作の成否

定置動作の成否は、床と接触後、布地が静止した時点の接触状態で判定する。Fig.3-(a)のように、静止している状態で、布地の表面と床が面接触している状態を本実験では定置動作の成功と定義する。Fig.3-(b)のように、布端が曲がっている場合は、布地と床が面で接触していないので、定置動作は失敗であると判定する。ただし今回は、裏面と床が接触して静止する場合には、失敗と判定する。また、本実験では、静止状態における布地位置のばらつきについては検討しない。

## 2.3 実験条件

定置動作において、考慮すべき実験条件として、

- ロボットアームの軌跡
- ロボットアームの手先速度
- 布地の材質・大きさ
- 布地の初期状態

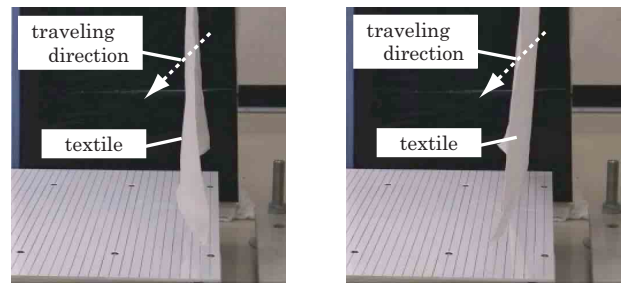
が挙げられる。

Fig.4に、本実験で検討したロボットアームの初期位置および軌跡を示す。本実験では簡単のために、直線軌道を検討する。図に示すように、初期状態では、布地の下端と床との距離が  $a$  になるように配置する。本実験では、 $a = 4$  cm とした。手先は、移動角度  $\alpha$  で、初期位置から鉛直下向きに  $h$  下りるまで動かす。したがって、 $x$  軸方向には、 $h \tan \theta$  だけ進む。本実験では、 $\alpha = 30, 45, 60$  deg を検討した。また、 $h = 8$  cm とした。ロボットアームの手先速度  $v$  は、Table 1 に示す 7 種類に関して検討した。この速度は、布地と床が接する瞬間の速度である。ロボットアームは、三菱重工製 4 軸スカルロボット RH5AH-55 を使用した。

Table 2 に本実験で用いた布地の物理特性を示す。本実験では、木綿地のハンカチを使用した。表に示す、布地の摩擦係数、曲げ剛性、通気性の測定については、Kawabata's Evaluation System for fabric (KES) [7] を用いた。布地は後の研究においてロボットハンドで持つことを想定し、ロボットアームの先端に治具を取り付け、一边を 2 点で固定した。

布地の初期状態のばらつきとして、布地の反りを考える。Fig.5 に示すように、布地が反っている状態を、伸展している面によって、表反り (Obverse warpage) と裏反り (Reverse warpage) の 2 つに大別する。表面側が伸展している場合を表反りと定義する。布地の種類や持ち方に依存するが、布地を 2 点で固定する場合、初期状態ではどちらかに反ることが多い。

他の実験条件として、温度、湿度、空気の対流など実験環境に関するものが挙げられるが、本実験では可能な限り一定であるとした。



(a) Obverse warpage (b) Reverse warpage

Fig.5: Warpage direction of textile

Table 1: Velocity of robot arm

Number	Velocity [mm/s]
1	636.62
2	318.31
3	159.15
4	79.58
5	39.79
6	19.89
7	9.95

## 2.4 実験結果

前節の実験条件を用いて、定置実験を行った。Table 3 に実験結果を示す。表中の速度に割り当てられた番号は、Table 1 に示したものと同一である。試行は反り方向、ロボットアームの手先速度、移動角度のパラメータの組み合わせを 1 セットとし、それぞれのセットについて 10 回ずつ行った。このとき、すべて成功した場合を  $\circ$ 、すべて失敗した場合を  $\times$ 、成功と失敗の両方が起こった場合を  $\triangle$  と表記した。表から分かるように、布地の初期状態が表反りの場合は、手先速度、移動角度によらず定置動作が成功した。また、布地の初期状態が裏反りの場合は、角度が  $45, 60$  deg で、速さがある程度大きい場合に成功した。すなわち、速さを大きくし、床と布地が接地する際の入射角が浅くなる方が成功率が高いという結果が得られた。実際の定置動作においては、初期状態の表反り、裏反りの判別することなく、同一の軌道で成功できる方が望ましい。Table 3 の結果から、初期状態の裏反りで成功したパラメータで定置を行えば、初期状態の反り方向によらず定置が可能となる。

## 3 布地の定置動作における状態遷移グラフ

本章では、実際の定置過程がどのように遷移するかを検討するために、布地の定置動作を状態グラフとして表現する。一般に、マニピュレーション過程は、ノードとアークから成るグラフにより表現することができる。このときマニピュレーション作業は、ノードとアークに相当する一連の基本操作の列で与えられる。特に、柔軟物の操作では、ノードは移動操作と変形操作に対応する [8, 9]。

### 3.1 布地のモデル化

本節では、平面内を運動する布地を線状物体と考え、Fig.6 に示すように、頂点と稜線の集合として表現する。布地の反りを考慮した状態遷移を扱うために、図に示す 3 点の頂点が 2 本の稜線により結合しているモデルを考える。3 点は布地の反りを表現できる最小の頂点数である。また定置動作を行う際に、ロボットハンドにより頂点  $C$  を把持すると仮定する。したがって、最終的に定置動作終了後、頂点  $C$  は接地していないものとする。

ここで、前章で述べた布地の反りを表現するために、稜線の角度を考える。Fig.7 に示すように、稜線  $AB$  と稜線  $BC$  の成

Table 2: Physical properties of specimen

Size [mm]	450x430
Weight [g]	19.49
Friction coefficient	0.22
Flexural rigidity [gf-cm]	0.043
Air-flow resistance [kPa-sec/m]	0.054

Table 3: Experimental results

Velocity	Obverse warpage			Reverse warpage		
	Angle					
Number	30	45	60	30	45	60
1	○	○	○	×	○	○
2	○	○	○	×	△	○
3	○	○	○	×	△	○
4	○	○	○	×	×	×
5	○	○	○	×	×	×
6	○	○	○	×	×	×
7	○	○	○	×	×	×

す角を半時計回りに  $\theta$  と定義すると、ロボットアームの手先の移動方向が  $x$  軸に対して正方向であるとき、布地の反りは、

$$\begin{cases} \text{No warpage:} & \text{when } \theta = \pi \\ \text{Obverse warpage:} & \text{when } 0 < \theta < \pi \\ \text{Reverse warpage:} & \text{when } \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

と表現される。角度を導入することにより、移動方向に対する布地の反りを表現できる。

### 3.2 状態遷移グラフ

Fig.8 に布地の定置動作における状態遷移グラフを示す。布地と床との接触状態、布地の反り、ロボットハンドによる把持を考慮すると、布地の定置過程は、図に示す 8 つのノードで表現できる。アークはそのノードから直接遷移可能であることを表している。図に示すパターンは、各要素の状態の違いをシンボリックに表現したものであり、物体の実際の変形形状とは異なる。布地の初期状態は、(a)~(c) のいずれかとなる。ロボットの手先の  $x$  軸方向の移動が図に示す正方向の移動であるとすると、状態 (a) が表反り、状態 (c) が裏反りに相当する。またこのとき、初期状態から状態 (d) に遷移することが定置動作の成功となる。

## 4 高速度カメラによる評価

本章では、それぞれの実験条件における代表的な結果が、どのような状態遷移になるかということ、高時間分解能のカメラを用いて観察する。また、実際の状態遷移から、より成功率の高い軌道について考察する。

### 4.1 実際の状態遷移

本実験では、実際の定置過程を、CMOS+FPGA ビジョン [10] を用いて駆動周波数 1000Hz にて撮像した。Fig.9 に観察した状態遷移の例を示す。図は、初期状態が裏反りで、ロボットの手先速度 159.15 mm/s、移動方向 60 deg のときの状態遷移であり、前節で示した状態グラフで表現すると、(c) (g) (h) (g) (f) (e) (d) の過程を経て、定置が成功している。以下に代表的な状態遷移を列挙する。速度番号は Table 1 に準ずる。

- 初期状態表反り  
(a) (e) (d) (成功)

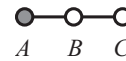


Fig.6: Model of textile for state transition graph

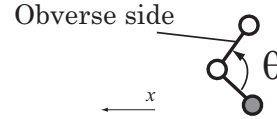


Fig.7: Warpage direction of textile in state description

- 初期状態裏反り、速度 3、角度 60 deg  
(c) (g) (h) (g) (f) (e) (d) (成功)
- 初期状態裏反り、速度 2、角度 60 deg  
(c) (g) (f) (e) (d) (成功)
- 初期状態裏反り、速度 1、角度 60 deg  
(c) (b) (a) (e) (d) (成功)
- 初期状態裏反り、速度 7、角度 60 deg  
(c) (g) (h) (失敗)
- 初期状態裏反り、速度 3、角度 45 deg  
(c) (g) (h) (g) (失敗)

これらの結果より、様々な状態遷移が、初期状態の反り方向、ロボットの手先速度、手先の移動方向によって決定されることが分かった。

### 4.2 考察

観察した中では、(e) (f) (g) (h) のように、接地した状態で、状態 (e) から状態 (h) に遷移することはなかった。これは布地の持つエネルギーが関係していると考えられる。床に接地している状態 (d)~(h) の中で、状態 (d), (h) が床に対する位置エネルギーが小さく、状態 (f) が一番高いと考えられる。すなわち、状態 (e), (g) からは状態 (d), (h) になりやすい。したがって、初期状態が (a) の表反りの場合には、手先速度や移動方向によらず、安定に定置が可能であると考えられる。状態グラフから考えると、初期状態が (c) の裏反りの場合には、空中で表反りの形に遷移するか、裏反りの状態で接地した後に表反りの状態による接地に遷移する必要がある。前節の結果から、速度を大きくすることによって、空中での表反りの遷移が実現されている。位置エネルギーの観点からは、状態 (g) で接地した場合、状態 (h) へ遷移する。したがって、接地後 (g) (f) (e) の状態遷移を行うためにも、速度を大きくすることは有効な方策の一つであると考えられる。また、床と布地が接地する際の入射角も重要な要素である。同じ速度であれば、床と布地の入射角が浅い方が  $x$  軸の正方向への力が大きいので、移動角度が 45 deg よりも 60deg の方が、成功率が向上したのではないかと考えられる。

人間が本実験のように布地の定置を行う場合、布地を前後に振ってから定置動作に入ることが多い。この動作は遷移グラフで考えると、反りの状態を表反りにする操作に相当する。これは人間が経験的に成功率の高くなる状態遷移を実現しているからだと考えられる。

本実験では、定置動作の精度に関する検討は行っていない。実際、速度を大きくするにしたがって、接地した後に床の上を滑る時間が長くなり、停止位置のばらつきが大きくなる傾向を実験的に確認している。定置動作の精度向上方策については今後の課題としたい。

## 5 結言

本報告では、布地を動的に扱う基本動作のひとつである布地の定置動作をロボットアームの軌道生成によって実現した。実験条件として、ロボットアームの手先速度、移動方向、初期状態における布地の反り方向を考慮した。その結果、定置の精度を無視すれば、速さを大きくし、床と布地が接地する際の入射角が浅くなる方が成功率が高いという結果が得られた。次に、

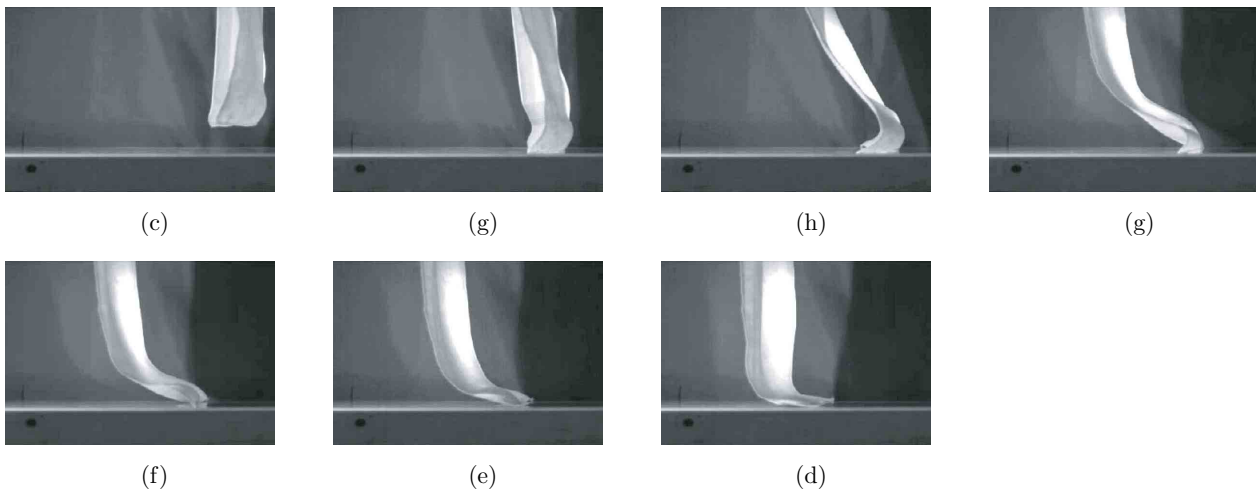


Fig.9: Experimental state transition of placing textile

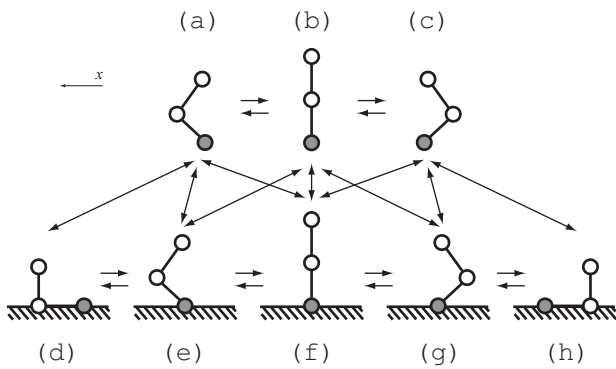


Fig.8: State transition graph of placing textile

その成功率を考察するために、布地の特性を考慮した状態遷移グラフを作成した。この状態遷移グラフに基づき、実際の定置動作をグラフ化することで、成功率を改善する軌道生成の指針を示した。

今後の課題としては、(1) 定置を実現する直線軌道以外の軌道の探索、(2) 定置動作における静止位置の高精度化、(3) 他の布地製品への応用が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 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を展開", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp. 275-283, 1997.
- [2] 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), 63巻, 607号, pp. 967-974, 1997.
- [3] 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), 65巻, 636号, pp. 3260-3267, 1999.
- [4] 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), 64巻, 620号, pp. 1356-1361, 1998.
- [5] 大澤, 柿倉: "各種布地混合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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 若松, 平井, 岩田: "薄板状物体のマニピュレーションにおける曲げ変形操作の静力学的解析", 日本機械学会論文集(C編), 63巻, 607号, pp. 1102-1109, 1997.
- [9] 平井, 若松: "ハンドリング工学", コロナ社, 2005.
- [10] K. Shimizu and S. Hirai: "CMOS+FPGA Vision System for Visual Feedback of Mechanical Systems", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2060-2065, 2006.