# 学術・技術論文

# 高速多指ハンドシステムを用いた布の動的折りたたみ操作

山川雄司\*1 並木明夫\*2 石川正俊\*1

# Dynamic Folding of a Cloth using a High-speed Multifingered Hand System

Yuji Yamakawa<sup>\*1</sup>, Akio Namiki<sup>\*2</sup> and Masatoshi Ishikawa<sup>\*1</sup>

The purpose of this paper is to achieve a dynamic folding of a cloth using a robot system with two high-speed multifingered hands. First, we will analyze the dynamic folding by a human subject in order to extract elements for this task. Second, a simple model of sheet-like flexible object using high-speed motion will be suggested. Third, motion planning of the robot system will be performed based on the proposed model and a simulation result will be illustrated. Fourth, the folding analysis using a triple pendulum model will be carried out. Fifth, a high-speed visual feedback control method will be proposed to grasp the cloth. Finally, an experiment result with the motion planning and the high-speed visual feedback will be demonstrated.

Key Words: Sheet-like Flexible Object, Dynamic Manipulation, High-speed Robot

## 1. はじめに

マニピュレーションはロボティクスにおいて重要な技術要素 の一つであり、特に柔軟物体マニピュレーションの実現が望ま れている [1]. しかし、タスク実現のための戦略提案・柔軟物体 のモデリングと制御など多くの問題点が存在し、その実現が困 難とされてきた. 従来は、ロボットを低速で動作させた静的操 り状態で結び操作 [2] [3]・布の展開操作 [4]・折り紙操作 [5] [6] や タオルの折りたたみ操作 [7] などが行われてきたが、静的操り のため高速にタスクを実現することは困難である. 筆者らは柔 軟物体マニピュレーションの高速化を目指し、線状柔軟物体の 動的マニピュレーションの一例として、ダイナミックな紐結び 操作を実現している [8]. そこでは、ロボットの高速かつ等速な 運動を利用して、微分方程式から代数方程式への柔軟物体モデ ルの近似を可能にしている.

本研究では対象物体を拡張し,面状柔軟物体の動的マニピュ レーション実現を目指す[9].面状柔軟物体のマニピュレーショ ンの実現により,操り対象物体の拡大が望める.筆者の知る限 り面状柔軟物体の動的マニピュレーションに関する既存研究は 行われておらず,新しい操り手法の獲得も期待される.面状柔 軟物体のある線上に折り目をつける場合,その折り線に対して 垂直な平面による断面を考えれば面状柔軟物体は線状柔軟物体 として考えることができるため,既論文の知見[8]を適用する ことができる.本論文では,具体的なタスクとして Fig.1 に示 すような空中での布の動的折りたたみ操作を設定し,実現する ための戦略を提案する.

布の折りたたみ操作は、面状柔軟物体の代表的なタスクであ り、自動折りたたみシステムの開発・包装作業の自動化や縫製作 業の自動化などが応用として考えられる。今回、折り目が一線 だけであるが、複数の折り目を同時に生成するのは複雑である ため、面状柔軟物体の動的マニピュレーションの最初の研究例と



Fig.1 Research scenario

原 2010年12月20日

<sup>\*1</sup>東京大学大学院情報理工学系研究科

<sup>\*2</sup>千葉大学大学院工学研究科

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup>Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

<sup>&</sup>lt;sup>\*2</sup>Graduate School of Engineering, Chiba University

<sup>■</sup>本論文は学術性で評価されました.



Fig. 2 Overview of high-speed multifingered hand system

して、本タスクは妥当であると考える。簡単化のために、折り目 を横から見ることで、線状柔軟物体の操り手法を適用している が、モデルを二次元の多リンク系に拡張しており、各関節の状 態がミリ秒オーダで認識できる画像処理が可能であれば、本モ デルを用いた二次元的な操りも可能であると考える。また、本 手法を既存の様々な面状柔軟物体の操り手法 [5] [7] と組み合わ せることで、複雑な作業の高速化にも有用であると考えられる。

#### 2. 実験システム

高速多指ハンドシステムは, Fig.2 に示すように高速多指ハ ンド2台[10],高速多指ハンドの前後方向位置制御用高速スラ イダ2台,高速ビジョン1台,画像処理用 PC,信号の入出力 処理とシステムをリアルタイムで制御するコンピュータから構 成されている.

高速多指ハンドは3本指・10自由度で,0.1 [s] 間に180 [deg.] の高速動作が可能である。高速多指ハンドは高速スライダに搭載 されており、高速スライダは1自由度機構で,1[s] 間に2[m] の 動作が可能である。高速ビジョンには Mikrotron 社製の EoSens MC1362 を用いており、画素数は800 [px]×1,024 [px] で,画 像処理(ROI 設定,画素面積・重心計算)とデータ転送が2[ms] ごとに行われる。ハンドの関節角度やスライダの位置はサンプ リング時間1[ms] で PD 動作により制御されている。

ハンドの3本指を布の把持に用いるため、本タスクに用いる 自由度はハンドの手首屈曲進展運動 $\theta_w$ とスライダの並進運動  $\theta_s$ の2自由度である。ハンド1・2による布の把持位置をそれ ぞれ $r_1 \in \mathbb{R}^3$ ,  $r_2 \in \mathbb{R}^3$ と記述する。ここで、ロボットシステ ムに y 座標に関する自由度がないため、把持位置の y 座標は固 定され、把持位置は二次元ベクトルとして考えることができる。

#### 3. 布の動的折りたたみ操作戦略

布の動的折りたたみ操作に必要な要素を抽出するために、人間による動的折りたたみ操作を撮影した結果を**Fig.3**に示す. Fig.3(a)は初期姿勢を示している.Fig.3(b)(c)は肩と肘の運動を利用して布を引き上げ、布を体に引き寄せている.Fig.3(d) は肩と肘の運動を止めることで、布の自由端側が慣性により折りたたまれる様子を示している.Fig.3(e)は引き寄せた布を把 持する様子を示している.最後に、Fig.3(f)は布の動的折りた



Fig. 3 Dynamic folding by a human

- たみ操作が完了した様子を示している.
- 以上の結果から,
- (1) 布を適切に変形させること
- (2) 変形させた布を把持すること
- が本タスク実現のキーポイントである.

(1)は「布の変形」と「慣性による布の折りたたみ」の二つ の要素から実現される.はじめに、4章においてロボットの高 速動作を利用して、ロボットの把持位置の軌道をなぞるように 布を変形させるモデルと軌道生成手法について説明する.次に、 5章において慣性による布の折りたたみの可能性について検討 する.(2)については、6章において高速視覚フィードバック 制御手法を提案する.そして、7章において布の動的折りたた み操作の実験結果を示す.

#### 4. ロボットの把持位置追従による布の変形

本章では、ロボットの高速運動を用いた把持位置追従による 布の変形モデルを構築し、軌道生成手法を提案する. 既論文[8] において、線状柔軟物体(紐)の目標形状に対して、ロボットの 手先を接線方向に高速かつ等速度で動作させることにより、重 力の影響を小さくし、法線方向に対する紐の運動の拘束を可能 にすることで、紐の変形モデルが代数方程式で近似できること を示した.本章では、その性質を利用して、線状柔軟物体の一 次元モデルから面状柔軟物体の二次元モデルに拡張することに より、ロボットの高速かつ等速動作を利用した面状柔軟物体の 変形モデルを構築する.

#### 4.1 高速操りにおける布の変形モデルと順問題

**Fig.4**に示すような布の把持位置(*r*<sub>1</sub>, *r*<sub>2</sub>)を考え,関節をリンクで接続した二次元の多リンク系で布をモデル化する.Fig.4 において,*m*,*n*はそれぞれ布の縦,横方向の関節数を表している.そして,ロボットの手先を接線方向に高速かつ等速運動時における布の変形モデルの導出にあたり,次の仮定が成り立



Fig. 4 Model of cloth



Fig. 5 Image of algebraic model of cloth

つものとする.

- (1) 各関節は、把持位置に近い一つとなりの関節の動きを、一 定の時間遅れでなぞるものとする.
- (2) 関節間の距離(リンク長)は変化しない.

以上の仮定と高速動作を利用した線状柔軟物体モデル[8]の 拡張を考えると、布の各関節座標は次のような代数方程式で記 述できる. また, 本モデルの概念図を Fig.5 に示す.

$$c_{i,j}(t) = r_1 \left( t - (d_i + d_j) \right) \quad (j \le n/2)$$
 (1)

$$c_{i,j}(t) = r_2 \left( t - (d_i + d_j) \right) \quad (j > n/2)$$
 (2)

 $c_{i,j} \in \mathbf{R}^3$ は (i,j)要素の関節座標を表し、 $c_{1,1}$ 、 $c_{1,n}$ はそれ ぞれハンド1,ハンド2における把持位置と同じである. $d_i, d_j$ はロボットの運動から布が変形するまでの遅れ時間を表してお り、それぞれ縦方向、横方向の遅れ時間を表している、そして、 (i, j)要素の関節において、 $d_i = \lambda l_1(i-1), d_j = \lambda l_2(j-1)$ (ここで, λ は基準となる遅れ時間, l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub> はリンク長である) で与えられるとする. Fig.5 に示すように、ハンドによる布の 把持位置を追従するように各関節が移動し、布が変形する.

シミュレーションは布の把持位置から縦方向、横方向一つず つ関節の番号を変更し、布の関節座標が計算されていく、今回 の場合、2台のハンドがあるため、ハンド1とハンド2の把持 位置から順番に計算され、最後に計算されるのは布の中央の自 | 由端となる. すなわち, 式 (1), (2) に示すように横方向 (j 成 分)の中点でハンド1,2を切り替え, $j \le n/2$ の場合にはハ ンド1の把持位置 ( $r_1$ ), j > n/2 の場合にはハンド2の把持 位置(r<sub>2</sub>)を用いて関節座標を計算する.布の各関節が把持位 置を追従するように移動するというモデルの仮定から、この計 算手順を採用している.

本モデルは代数方程式で記述しているため、解析が容易であ り、シミュレーション時間も短縮することができる、また、モ デルパラメータが一つのため、その推定も容易であると考えら れる.本モデルの最大の利点は、布の形状からモデルを逆に解 くことで、ロボットの軌道を生成できる点である.

布の変形を計算するシミュレーションの流れを説明する. は じめに、ハンドの手首関節角度 $\theta_w$ とスライダの位置 $\theta_s$ の時系 列を与える.次に、ロボットシステムの順運動学を基に布の把 持位置 r1, r2 が算出される. そして, ハンド・スライダの運動 に従って布の変形(関節座標) *c<sub>i,i</sub>* が求められる.式(1),(2) を用いて布の変形を計算すると、布の各関節がハンド1・2に 寄って二つに分裂してしまう場合や関節間距離が一定に保持さ れない場合といった問題点が生じる. そのような場合には、次 の座標修正を行い、これらの問題点を解決する. ロボットの把 持位置に近い布の関節  $(c_{i,j})$  と、その関節に隣り合う布の関節  $(c_{i+1,j}, c_{i,j+1})$ の3関節を考える. $c_{i,j}$ を球座標系の原点と して,  $c_{i,j}$  と  $c_{i+1,j}$ ,  $c_{i,j+1}$  との間の偏角をそれぞれ求め, そ れらの偏角を用いて  $c_{i,j}$  と  $c_{i+1,j}$ ,  $c_{i,j+1}$  との間の関節間距離 がリンク長  $l_1$ ,  $l_2$  となるように  $c_{i+1,j}$  と  $c_{i,j+1}$  の座標修正を 行う [9]. この座標修正もハンド1とハンド2の把持位置から順 番に計算される.

#### 4.2 布操りの逆問題と軌道生成

布の変形が代数方程式で近似できることを用いて、布の変形 からシステムの軌道生成を行う方法を提案する. 三次元空間に おいて、二次元の多リンク系とした布の各関節座標の制御点を 与えるのは困難であるため、真横から見た x-z 平面上での二次 元の布の関節座標  $c_{ri} \in \mathbf{R}^2$   $(i = 1, 2, \cdots, N)$  を与えること にする.ここで、ハンド1・2の両側における布の変形は同じで あると仮定すると、ハンド1・2による把持位置の軌道は同じ  $(\mathbf{r}_1(t) = \mathbf{r}_2(t))$  になり、その軌道を  $\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_1(t) = \mathbf{r}_2(t)$  と する.

はじめに,布の制御点の数 N を指定し,二次元平面上に目標 とする布の形状の関節座標  $c'_{ri}$  (定数ベクトル)を与える. そ して、これらの布の関節座標の N 番めの制御点から1番めの 制御点までを順に並べた点列をロボットの手先の目標軌道とす る場合を考える.

c'<sub>ri</sub> はある時点での布の目標形状であるが、ロボットの動作 中に重力によって布の形状が変化してしまうため、布の目標形 状の関節座標に対する重力補償が必要となる. そこで、自由落 下がある状況で、ある時点での布の目標形状  $c'_{ri}$  に対して、動 作時間 T 秒だけさかのぼったときの布の形状 cri を与えるよ うに重力補償を行う.動作時間が短いことから近似的に布の各 関節座標は -1/2gt<sup>2</sup> で落下すると重力の影響を考える. した がって, z 方向に対して,

$$c_{ri} = c'_{ri} + \left[0, \ \frac{1}{2} \frac{i-1}{N-1} g T^2\right]^{\mathrm{T}}$$
 (3)

で重力補償が行われる. 添字 T は転置を意味している. i=1のときはロボットの動作時間 T 秒後の布の位置を指定している

227



Fig. 6 Configuration of cloth

ため、重力補償は不要である.逆に、*i* = *N* のときはロボットの動作開始時間の布の位置を指定しているため、重力補償が必要となる.その間の布の位置については、両端の重力補償分を線形で補間している.

次に、布の形状  $c_{ri}$  からロボットによる布の把持位置 r の軌 道を与える、モデルの仮定より布は把持位置を追従するように 変形することから、布の把持位置 r は布の各関節座標をなぞる ように、次式で与えることができる(**Fig.6**).

$$r(t=0) = c_{rN}, \quad r(t=T) = c_{r1},$$
 (4)

ここで, N は 20 とし, T (= 0.2 [s]) はロボットの動作時間を 表している.離散点間は滑らかにつなぐものとし, ロボットシ ステムの軌道は N 番めの制御点から 1 番めの制御点に時間 T で線形に動作するように与える.離散点間を線形で補間しても, 関節の数を多くした場合や高速動作の場合にはほとんど問題に ならない.

最後に,逆運動学を解くことにより,ハンドの手首関節角度  $\theta_w$ とスライダの位置  $\theta_s$ の軌道を得ることができる.

4.3 シミュレーション

Fig. 6 に x-z 平面上に指定した布の形状を示す.指定した形 状を基に逆問題を解いて得られたハンドの手首関節角度  $\theta_w$  と スライダの位置  $\theta_s$  の軌道を Fig. 7 に示す. この結果から本手 法を用いて得られる軌道は滑らかな軌道であり,ロボットシス テムへの実装可能性を示している.そして,構築した布の変形 モデルと得られた軌道を用いてシミュレーションを行った結果 を Fig. 8 に示す.シミュレーションにおいて,試行錯誤的に関 節数 ( $m \times n$ ) は 20 × 20,遅れ時間  $\lambda$  は 6.6 [s/m] とした. 布 の大きさを 0.4 [m] (幅) × 0.3 [m] (高さ)とすると,リンク長 はそれぞれ  $l_1 = 0.3/20$  [m],  $l_2 = 0.4/20$  [m] となる. Fig. 8 を 見て分かるように,ハンド・スライダの高速動作に従って,布が 変形していることが分かる.Fig. 6 に示した目標形状と Fig. 8 のシミュレーション結果との誤差を計算した結果を Fig. 9 に示 す. 横軸は関節番号,縦軸は各関節における誤差を示している. 誤差の計算は,

$$error(i) = \sqrt{(r_{xc}(i) - x_c(i))^2 + (r_{zc}(i) - z_c(i))^2}$$
(5)

で行っている.ここで, i は関節番号,  $r_{xc}(i)$ ,  $r_{zc}(i)$  は目標形状の i 番めの関節における x, z 座標,  $x_c(i)$ ,  $z_c(i)$  はシミュ



Fig. 7 Result of motion planning



Fig. 8 Simulation result with motion planning

レーション結果の *i* 番めの関節における *x*, *z* 座標, *error(i)* は *i* 番めの関節における誤差を表している. 布の自由端に近づ くにつれて誤差が大きくなる傾向にあるが, 全体的に誤差が小 さいことから, 提案する軌道生成手法より得られたロボットシ ステムの軌道の妥当性を確認することができた.

さらに、4.2節で提案したモデルの妥当性について検討するために、軌道生成手法から得られた軌道を用いたときの布の変形を実験とシミュレーションで比較する.ここで、布の三次元形状で比較することは困難なため、実験システムを真横から見た



Fig.9 Simulation error



(a) t=0.00 [s]



(c) t=0.10 [s]



(e) t=0.20 [s]



(d) t=0.15 [s]

ときの布の二次元形状で比較検討する.実験に使用した布はポ リエステル製で比較的柔らかく変形しやすい材料であり、幅は 0.4 [m], 高さは 0.3 [m], 厚さは 0.0013 [m], 質量は 0.032 [kg] である.シミュレーション条件は同じである.実験とシミュレー ションの結果を Fig. 10 に示す. Fig. 10 において, o はロボッ トの各関節位置, 〇 はシミュレーションから得られた布の関節 位置を表しており、シミュレーション結果を実験結果に合成し ている.これらの結果から、横から見た布の形状が実験とシミュ レーションでほぼ一致し、提案する布の変形モデルが布の変形 を再現できることから、提案モデルの妥当性が確認された.

次章では、布を変形させるためのロボットの動作を停止した 後に、布が折りたたまれる可能性を検討するために、シミュレー ション結果から動作時間後の布の位置、速度を抽出し、これら を初期条件とした振り子モデル解析を行う.

# 5. 慣性による布の折りたたみ

得られた軌道を基にロボットシステムを動作させ、ある時刻 においてロボットシステムを急停止させることにより Fig. 11 に示すように、布は慣性により変形すると考えられる. このよ うな慣性を利用することも動的マニピュレーションを実現する 重要な要素である. そこで、ロボットシステムを停止させたと きの慣性による布の変形について考察する.特に、本タスクに おいて、布が折りたたまれることが重要であるため、布の折り たたみの可能性について検討する.4章のモデルは、ロボット が高速かつ等速に運動するという条件の基で成立する.本章で はロボットは動作させず、布の慣性を利用するため、モデルを 代数モデルから動力学モデルに移行する必要がある. ロボット を停止させた瞬間における代数モデルから得られる布の位置・ 速度が動力学モデルの初期条件となり、二つのモデルを接続し ている.

今回、慣性による布の折りたたみを採用しているが、ロボッ トの自由度が十分・より高速な動作が可能・布の質量が小さい などの条件が満たされれば、動作制限や重力の影響が無視でき るため、目標とする布の変形を円形状に指定すれば、軌道生成 のみで布の折りたたみが実現されると考えられる.一方,限ら れたロボットの自由度で高速にタスクを実現する場合には、慣 性を利用することが有効な新しい手法であると考えられる.

#### 5.1 三重振り子による解析

布の折りたたみの問題を簡単化するために、布を横から見た 二次元平面で考え、その物理モデルとして布の折りたたまれる 様子を示すのに必要最小限な自由度であると考えられる三重振 り子(Fig. 12(a))を考える.詳細は省略するが、このモデル の運動方程式はラグランジュの運動方程式より求められる.

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\ddot{\theta}}, \boldsymbol{\dot{\theta}}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\dot{\theta}}_0, \theta_0, g, t) = 0 \tag{6}$$

ここで、 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^{\mathrm{T}}$ である。前章のシミュレーション結 果から初期角度  $\theta_0$ , 初期角速度  $\dot{\theta}_0$  が得られ, これらの初期条 件を Fig. 12 (b) に示すように与えた初期値問題を考える.本シ ミュレーション (Fig. 12 (a)) において、リンク長 l は 0.3/3 [m] とし, 質点の質量 m は 0.032/(4×4) [kg] とした.

#### 5.2 解析結果

この振り子モデルを用いて、各質点における初期角度 $\theta_0$ と 初期角速度 $\dot{\theta}_0$ を与え、布が折りたたまれるのかを考察する、そ して、布が折りたたまれるとき、各質点における角度 $\theta_i(>0)$ の総和は $\sum \theta_i = 3\pi/2$  [rad] (= 270 [deg.]) 付近になると考え られ、これが布が折りたたまれるかどうかの条件となる.

4.5 節のシミュレーション結果 (Fig. 8) において、ロボットシ ステムを停止させた瞬間における布の各質点における位置と速度 から三重振り子の初期角度  $\theta_0$  と初期角速度  $\dot{\theta}_0$  を求めて解析を 行った. その結果を **Fig. 13** (実線, 黒) に示す. シミュレーショ ンから得られた初期角度と初期角速度はそれぞれ約  $\theta_0 = \pi/4$ ,  $\dot{\theta}_0 = 2\pi/3$  である. ここで、 $\theta_0$  と  $\dot{\theta}_0$  は  $\theta_1$  に対する初期条件 であり、その他の関節については簡単化のため、Fig. 12 (b) に 示すように  $\theta_1$  以外の関節に対する初期角度と初期角速度をそ れぞれ  $\theta_2 = \theta_3 = 0$ ,  $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_0 (N - i + 1)/N$  (ここで、N は関



Fig. 11 Image of folding (side view)



Fig. 12 Triple pendulum



Fig. 13 Analysis of triple pendulum

節数, i は関節番号である)と近似するが、シミュレーションか ら得られる結果はこの近似をほぼ満たしている.また、布の把 持位置を等速に動作させているため、三重振り子の初期角加速 度はほぼ0と考え無視している.Fig.13において、初期角度・ 初期角速度ともに  $\pm 20\%$  の誤差を含む場合の結果も示してい る.初期角度の誤差が -20% の結果を点線、20% の結果を破線 で示し、初期角速度の誤差に関する結果は線色で区別している. この結果から、どの条件においても角度の総和が  $3\pi/2$  [rad] に 到達することから、ある程度ロバストに布の折りたたみが可能 であることが確認された.また、布が折りたたまれる条件に初 期角度が影響することは少なく、初期角速度が重要であり、ロ ボットの高速動作が必要となる.

# 6. 高速視覚フィードバック制御

本タスクにおいて,折りたたまれた布を把持するタイミングは 極めて重要である.しかし,Fig.13に示すように,条件によっ て把持のタイミングが異なるため,得られたロボットの軌道の みでは,様々な布の変形に対してロバストな布の把持実現は困 難である.そこで高速視覚を用いて,把持タイミングの抽出と, ロボットシステムの制御法を提案する.ここで,Fig.14に示す ようにカメラ座標系を設定し,高速ビジョンから見た指と布に設 置したマーカの位置関係を考える.ハンド指先と布の自由端側 に再帰性反射材のマーカをそれぞれ二つずつ取り付け,これら四 つのマーカを高速ビジョンを用いてトラッキングする.そして, これらの重心座標位置 ( $x_{(c{1,2},f{1,2})},y_{(c{1,2},f{1,2})}$ )[px]と 画像面積  $a_{(c{1,2},f{1,2})}$ [px]が2[ms] ごとに計算される.

はじめに zv 方向の位置補正を行うために,得られたスライ



Fig. 14 Setup of high-speed visual feedback

ダの軌道 (Fig. 7 (a)) の代わりに,指と布のマーカの画像面積 *a<sub>c,f</sub>* を一致させるように

$$\theta_{s\{1,2\}} = k_p(a_{c\{1,2\}} - a_{f\{1,2\}}) + k_d(\dot{a}_{c\{1,2\}} - \dot{a}_{f\{1,2\}})$$
(7)

の PD 制御則に従ってスライダ位置を制御する. これにより,  $z_v$  方向における布の自由端に一致するように布の把持位置を制 御できる. ここで,  $k_p$  [m/px],  $k_d$  [m s/px] はそれぞれ比例ゲ イン, 微分ゲインを示している.

次に、布の把持位置と自由端との間の  $y_v$  座標相対位置がある閾値よりも小さくなったとき、すなわち、

$$|y_{c\{1,2\}} - y_{f\{1,2\}}| < y_{thre} \tag{8}$$

のときを把持タイミングと認識し、ハンドを動作させ布を把持 する.ここで、*y*thre [px] が把持タイミングを決定する閾値で ある.

#### 7. 実 験

実験に使用した布は4.3節と同じものである. Fig. 15 に実験



結果の連続写真を示す. Fig. 15 は高速ビデオカメラ (300 [fps]) で撮影したものであり、高速多指ハンドシステムによる布の動 的折りたたみ操作が実現されていることが分かる.また、布を変 形させるためにロボットシステムが動作している時間は 0.2 [s] で、0.22 [s] 後から視覚フィードバックを行い、約 0.3 [s] 後に布 の把持を行い、高速な布の折りたたみ操作が実現されているこ とが分かる.約20回の試行を行い、布を折りたたむ変形につ いては、ほぼ100%の成功率であるが、布を把持する成功率は 約70%であった、したがって、布の動的折りたたみ操作の成功 率は約70%である。失敗の原因として、マーカを見失い、把持 タイミングを認識できないことなどが挙げられる. 高速ロボッ トシステムを用いることにより、所望の布の変形が得られ、そ の変形した布の把持を実現していることから、提案した面状柔 軟物体の変形モデルの有効性、シミュレーション結果の妥当性 と高速視覚フィードバック制御の有効性を確認することができ た. 高速視覚フィードバックを行うためにマーカを取り付けて いるが、その質量の影響は無視できることを確認している.

高速視覚フィードバック制御で用いたマーカの画像面積  $a_{(c1,f1)} \ge y_v$ 座標重心 $y_{(c1,f1)}$ を示したのが, Fig. 16 である. Fig. 16 (a)を見て分かるように、布と指に取り付けたマーカの 画像面積が一致するようにスライダが制御され、二つの差が小 さくなっていることが分かる。そして、Fig. 16 (b)より、二つ のマーカの $y_v$ 座標重心位置の差が閾値 $y_{thre}$ (今回の実験で



Fig. 16 Experimental result with visual feedback

232

は、*y*thre=50 [px]) よりも小さくなったとき,把持するタイミングを認識し,布を把持し,二つのマーカの値が一致していることが分かる.したがって,高速視覚フィードバック制御の有効性が確認できる.

実験結果のムービーは、筆者らのウェブページ[11] から見る ことができる.

## 8.まとめ

本研究では、面状柔軟物体の動的マニピュレーションを目標 とし、ロボットの高速動作を利用した高速かつ動的操り手法を 提案した.そして、目標タスクとして布の動的折りたたみ操作 を設定し、その操り戦略を提案した.本論文の主張は以下のと おりである.

- (1) ロボットを高速に動作させることにより、面状柔軟物体の 変形モデルはロボットの軌道から算出できる代数方程式で 近似できる。
- (2)柔軟物体の代数変形モデルを用いると、二次元の布の目標 形状から直接ロボットの軌道を生成することができる。
- (3) 三重振り子モデルを用いて, 布が折りたたまれる様子を解 析した.
- (4) 布の把持タイミングを抽出するための高速視覚フィードバック制御手法を提案した.
- (5) 提案手法を用いることにより,布の折りたたみ操作を動的 かつ高速に実現した.

今後の課題は、様々な布に対する実験やその他の布操りの実現 である。

# 参考文献

- 平井慎一: "柔軟物操作",日本ロボット学会誌,vol.16, no.2, pp.136-139, 1998.
- [2] H. Inoue and M. Inaba: "Hand-eye Coordination in Rope Handling," Robotics Research: The First International Symposium, pp.163–174, 1984.
- [3] T. Matsuno, T. Fukuda and F. Arai: "Flexible Rope Manipulation by Dual Manipulator System Using Vision Sensor," IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, pp.677–682, 2001.
- [4] 柴田,太田,平井: "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.
- [5] K. Tanaka, Y. Kamotani and Y. Yokokohji: "Origami Folding by a Robotic Hand," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot Systems, pp.2540–2547, 2007.
- [6] D.J. Balkcom and M.T. Mason: "Robotic origami folding," Int. Journal of Robotics Research, vol.27, no.5, pp.613–627, 2008.
- [7] J.M. Shepard, M.C. Towner, J. Lei and P. Abbeel: "Cloth Grasp Point Detection based on Multiple-View Geometric Cues with Application to Robotic Towel Folding," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2308–2315, 2010.
- [8] Y. Yamakawa, A. Namiki and M. Ishikawa: "Motion Planning for Dynamic Knotting of a Flexible Rope by a High-speed Robot Arm," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot Systems, pp.49–54, 2010.
- [9] Y. Yamakawa, A. Namiki and M. Ishikawa: "Motion Planning for Dynamic Folding of a Cloth with Two High-speed Robot Hands and Two High-speed Sliders," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.5486–5491, 2011.
- [10] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa and M. Kaneko: "Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.2666–2671, 2003.
- [11] http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/DynamicFolding/



#### 山川雄司 (Yuji Yamakawa)

2006年東京大学工学部機械工学科卒業.2008年東 京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専 攻修士課程修了.2008~2011年日本学術振興会特 別研究員(DC1).2011年同専攻博士課程修了.現 在同研究科創造情報学専攻特任助教.柔軟物体の高 速マニピュレーション,空調制御システムの解析・

制御,電動車いす入力装置の開発と制御,高速高精度質量計測システム開発などの研究に従事,博士(情報理工学).

(日本ロボット学会正会員)



# 石川正俊(Masatoshi Ishikawa)

1977年東京大学工学部計数工学科卒業.1979年東 京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程 修了.同年通産省工業技術院製品科学研究所入所. 1989年東京大学工学部計数工学科助教授.1999年 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻教授.現 在東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専

攻教授. 2002, 2003 年度東京大学総長特任補佐. 2004 年度東京大学 副学長. 2005 年度東京大学理事・副学長. 超並列・超高速ビジョン, センサフュージョン,メタ・パーセプションなどの研究に従事. 1984, 2010 年計測自動制御学会論文賞, 1990 年応用物理学会光学論文賞, 1999 年櫻井健二郎氏記念賞, 2004 年計測自動制御学会技術賞友田賞, 2005 年応用物理学会光・電子集積技術業績賞(林厳雄賞), 2010 年 日本バーチャルリアリティ学会論文賞, 2012 年島津賞, 1998, 2001, 2008, 2010 年本学会論文賞等受賞. 2011 年紫綬褒章受章. 計測自動 制御学会および本学会フェロー. 工学博士.

(日本ロボット学会正会員・フェロー)



#### 並木明夫(Akio Namiki)

1994 年東京大学工学部計数工学科卒業.1996 年東 京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修 了.1999 年同専攻博士課程修了.同年日本学術振 興会リサーチアソシエート.2000 年科学技術振興 機構研究員.2004 年東京大学大学院情報理工学系 研究科システム情報学専攻講師.2008 年千葉大学

大学院工学研究科准教授. 多指ロボットハンド, 視覚フィードバック 制御, センサフュージョンの研究に従事. 博士 (工学).

(日本ロボット学会正会員)