

解析的モデルを用いない柔軟物体の組立

大阪大学 ○三浦 純

カーネギー・メロン大学 池内克史

Assembly of Flexible Objects without Analytical Models

○Jun Miura (Osaka University)

Katsuhi Ikeuchi (Carnegie Mellon University)

Abstract This paper describes a novel approach to assembly of flexible objects. The operation dealt with in this paper is to assemble a rubber belt with fixed pulleys. By analyzing possible states of the belt based on the *empirical* knowledge of the belt, we can derive a method to have not only the action planning but also the visual verification planning. We have implemented a belt assembly system using the two manipulators and a laser range finder as the sensor, and succeeded in performing the belt-pulley assembly.

Key Words Flexible object manipulation, Sensor-based manipulation, Assembly planning

1 はじめに

ゴムベルトやゴムチューブなどの柔軟物体の組立は、多くの生産プロセスに含まれており、その自動化に対する要求は強い。柔軟物体の扱いに関するこれまでの研究は、タスクに依存したシステムを構築するもの [1] と対象柔軟物体の解析的モデルを構築して利用するもの [2] に大別できる。前者は開発に多大な労力を必要とする。後者もまた適切なモデルを構築することは容易ではなく、さらにその適用に際してはかなりの計算量を必要とする。

一方、人間は、柔軟物体の精密な解析的モデルは持たないが、比較的簡単に柔軟物体の組立を行うことができる。これは、人間の (1) 知識を用いて問題を適切に抽象化する [3] 能力と (2) 効率的なセンサフィードバック [4] の能力によるものであると考える。

本研究では、この人間の能力についての仮説に基づいて、柔軟物体の組立に対する新たなアプローチを提案する。対象とする作業は、ロボット指と視覚センサを用いて、ゴム製ベルトを固定されたプーリに組み付ける作業である。ベルトのとり得る状態を適切に制限することにより、元の複雑な問題が、動作プランニングと視覚プランニングの両面で非常に容易な問題に変換できることを示す。

2 問題を簡単化するための拘束

われわれは経験的に次のことを知っている：

”指／プーリでベルトがゆるみなく引っ張られているときには、ベルトの形状は指／プーリの形状と位置から一意に決定できる状態にある。”

このような状態をベルトの安定状態と呼ぶ。この知識を用いて、次のような拘束を導入する：

“ベルトが常に安定状態にあるように操作する。”

これにより、元の問題は以下の2点で簡単化される：

(1) “状態”という概念を導入することにより、組立動作のプランニング問題は状態遷移系列のプランニングと、各遷移に対応する指の軌道プランニングに分けられ、それらを階層的に解くことにより探索空間が大幅に縮小できる。

(2) ベルトの形・位置が予測できるので、探索的な視覚認識は不要となる。視覚システムは、ベルトの形状と位置が予測通りであるかどうかだけを確認すればよい。

3 上位レベルプランニング：状態遷移系列候補の生成

このレベルでは各状態を定性的に表現する。すなわち、ベルトに接触している指 (F) / プーリ (P) の順序と、ベル

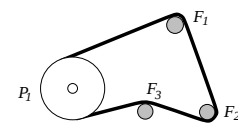


Fig. 1: State $P_1 F_1 F_2 F_3^*$.

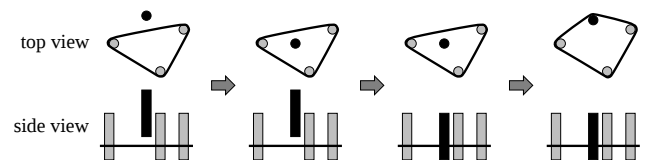


Fig. 2: operator *ADD-FINGER-INSIDE*

トの内側か外側のどちらにあるかだけを記述する。例えば、Fig. 1に示す状態は、 $P_1 F_1 F_2 F_3^*$ と表す。ここで、*はベルトの外側にあることを示す。

次に、状態遷移のためのオペレータを定義する。例えば、指 x をベルトの内側の他の指／プーリ y と z の間に入れるオペレータ *ADD-FINGER-INSIDE*(x, y, z) は Fig. 2に示すように動作する。

初期状態からの前向き探索と最終状態からの後向き探索を組み合わせ、最短の状態遷移系列を探索する。得られた状態遷移が実際に有効であるかどうかは、下位レベルのプランニングを行わないと決定できない。そこで、得られた最短遷移系列の候補をすべて下位レベルに渡して詳細な計画を生成する。もし、どの候補も有効でないことが下位レベルで明らかになったら、次に短い遷移系列候補を生成し、下位レベルに渡す。

4 下位レベルプランニング：指の軌道生成

まず、上位レベルから与えられた状態遷移から、遷移前と遷移後の状態を満たす指の位置候補を決定する。次に、(1) 指が他の指／プーリに衝突しない、(2) 指がベルトに接触しているときには、ベルトの安定状態を壊さないように動く、という2つの条件を満たすような指の動きを生成する。上位レベルから与えられた候補のいずれについても、上の2条件を満たすような指の動きが生成できない場合には、上位レベルに次の候補を生成するように要求する。

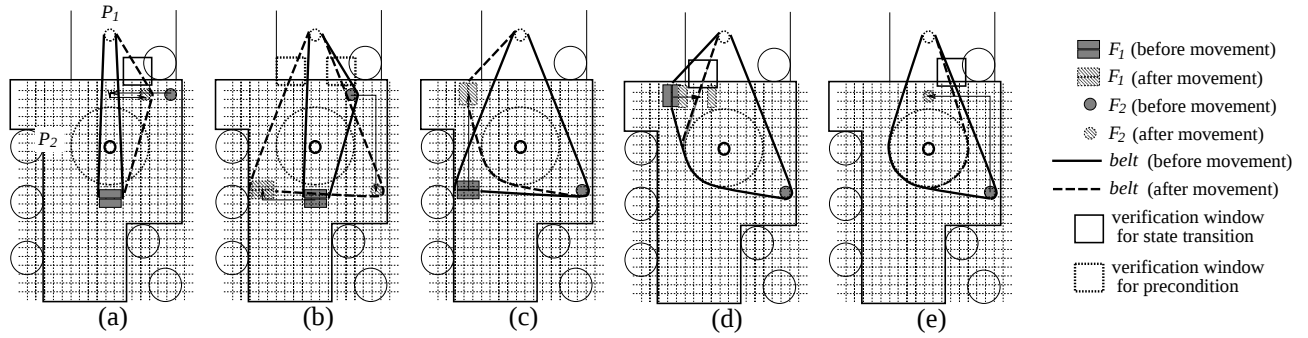


Fig. 6: Final plan:

- (a) move F_2 , lower F_2 , and move back F_2 ; (b) move F_1 and F_2 so that P_2 enter the inside of the belt;
(c) rotate and move F_1 ; (d) move F_1 and open the parallel gripper; (e) move F_2 .

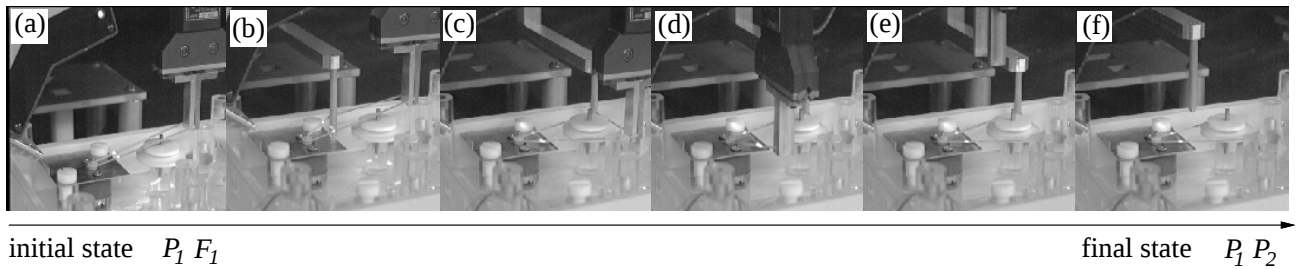


Fig. 7: A successful belt-pulley operation.

5 視覚プランニング

視覚により、(1) 状態遷移が確実に行われたこと、および(2) 状態遷移のための前提条件が満たされていることを確認する。いずれも計画から予想される位置にベルトがあるかどうかを調べればよいので、その予想されるベルト位置を観測できる位置に視覚センサを配置する。例えば、オペレータ *ADD-FINGER-INSIDE* の場合には、Fig. 3に示すような位置に観測領域 (verification window) を設定し、そこを観測できる位置に視覚センサを配置する。

6 実験

Fig. 4に示す平行指ハンド、1本指ハンド、レーザー距離センサを用いて実験を行った。Fig. 5に使用した指と

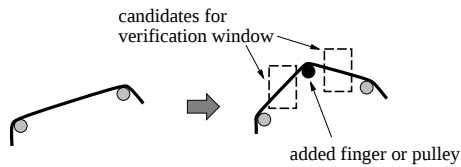


Fig. 3: Verification window for add operation.

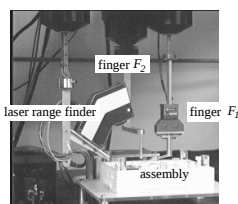


Fig. 4: Experiment.

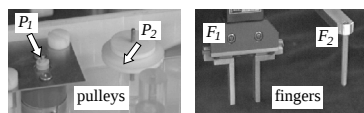


Fig. 5: Pulleys and fingers.

プーリを示す。Fig. 7(a)(f)に示される、初期および最終状態から、Fig. 6に示す計画が得られた。Fig. 7は成功したベルト組付け動作を示す。

7 おわりに

柔軟物体の組み立てに対する新たなアプローチを提案した。実験システムを構築し、ゴムベルトをプーリに組み付ける動作を実現した。

本アプローチを他の柔軟物体の組み立て問題に適用する際には、問題を簡単化するための適切な拘束を得ることが必要となる。そのような拘束は容易に得られるとは限らないが、人間が柔軟物体を扱うさまを観察することにより、適切な拘束を抽出できる場合が多いのではないかと考えている。そこでは、ゴムベルトの例で用いた安定状態という概念を適用すること、すなわち柔軟物体の状態がある程度限定できる状態を見つけることが重要であると考えられる。

謝辞: 本研究はCarnegie Mellon University, The Task-Oriented Vision Laboratoryにおいて行った実験設備について御協力頂いた川出雅人氏(現オムロン)に感謝致します。なお第一著者のCarnegie Mellon Universityでの滞在については(財)電気通信普及財団の援助を受けた。

参考文献

- [1] 高橋宮川青木, “VTRテプレコダ用ゴム部品のハンドリング”, 精密工学会誌, 55-7, 1989.
- [2] 若松平井岩田: “軟らかい線状部品のマニピュレーションのためのモデリングに関する研究”, 日本機械学会第71期通常総会講演論文集 1994.
- [3] E.D. Sacerdoti, “Planning in Hierarchy of Abstraction Spaces”, Artificial Intelligence, 5, 1974.
- [4] 稲葉井上: “ロボットによる紐のハンドリング”, ロボット学会誌, 3-6, 1985.