

単純なフィードバック制御による柔軟物体のロバストな操り

○和田 隆広[†], 平井 慎一[‡], 川村 貞夫[‡], 上地 徳昌^{*}, 塚本一義[†]
[†] 香川大学工学部 [‡] 立命館大学ロボティクス学科 ^{*} (有) カミヂ

Robust Manipulation of Deformable Objects by Simple Feedback Control

○Takahiro Wada[†], Shinichi Hirai[‡], Sadao Kawamura[‡], Norimasa Kamiji^{*}
 and Kazuyoshi Tsukamoto[†]

[†] Faculty of Engineering, Kagawa Univ. [‡] Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.
^{*} Kamiji Ltd.

Abstract—We will discuss on the manipulation of deformable objects. The manipulation is a primitive task in garment industry, food industry and so on. It is difficult to realize these tasks by mechanical systems due to their complex deformation characteristics. In this paper, we will realize manipulation of deformable objects utilizing a simple PID feedback controller.

Key Words: deformable objects, robust manipulation, control

1. はじめに

柔軟物の操りは、衣料産業や食品産業など幅広い分野における基本的な作業である。しかし、対象物体の変形特性の多様さにより、機械システムによる実現は難しいのが現状である。

これまでに、視覚センサを用いることによって、粗いモデルに基づく繰り返し制御則を柔軟物の操りに適用し、制御が可能であることを示した¹⁾。従来提案されている制御則では繰り返し試行によって、モデル化誤差があっても望みの変形を実現することができた。しかしながら、繰り返し制御則では、変形情報を離散的にしか利用できないため、制御の収束時間が早くできず、さらには安定に柔軟物を把持するような作業には適用することが難しかった²⁾。

そこで本稿では、単純なPIDフィードバック制御則によって、柔軟物体の操りを実現する。

2. 柔軟物の操り

柔軟物の操りとは、物体の位置・姿勢と変形の両方を同時に制御することである。Fig.1に示すように、物体上の位置決め点がある目標の場所へ位置決めする。ただし、作業空間の問題等によって、位置決め点を直接操作できず、物体上の他の点を適切に操作することによって、目的の位置決めを実現する。

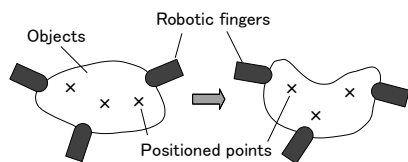


Fig.1 Manipulation of deformable objects

3. 定式化

布地などの伸縮柔軟物体を、Fig.2の格子状のバネでモデル化する¹⁾。格子の単位要素は、縦横および斜め方向の線形バネより構成される。物体は平面内で変形、移

動すると仮定し、その平面内に空間座標系 $o-xy$ を固定する。また、格子点の位置ベクトル $p_{i,j} = [x_{i,j}, y_{i,j}]^T$ ($i = 0, \dots, M; j = 0, \dots, N$) で、物体の変形と移動を表す。なお、ここでは柔軟物体を弾性体であると仮定し、質量や粘性要素はないと考える。

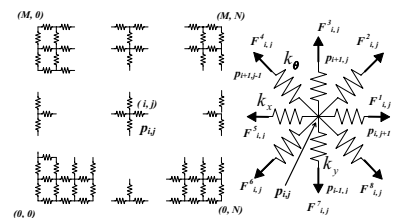


Fig.2 Spring model of deformable objects

格子点を以下の3種類に分類する (Fig.3).

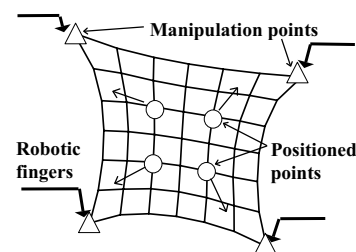


Fig.3 Classification of mesh points

操作点 ロボット指で拘束を与える点。(Fig.3の Δ)

位置決め点 位置決め機構などで操作できないが、操作点を適切に制御することにより位置決めする点。(Fig.3の $\bigcirc$)

非対象点 操作点でも、位置決め点でもない点。

操作点、位置決め点および非対象点の数をそれぞれ m, p, n とする。すべての操作点の x, y 座標を並べた $2m$ 次元ベクトルを r_m とおく。同様に、位置決め点および

非対象点に対して、ベクトル $\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_n$ を定義する。ここで、各格子点における釣り合い式を時間微分し、各格子点の速度関係を導くと次式を得る¹⁾。

$$A(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n, \mathbf{r}_p) \dot{\mathbf{r}}_m + G(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n, \mathbf{r}_p) [\dot{\mathbf{r}}_n^T, \dot{\mathbf{r}}_p^T]^T \quad (1)$$

ここで、式 (1) を変形し、次式の $\dot{\mathbf{r}}_p$ と $\dot{\mathbf{r}}_m$ の速度関係を得る。

$$\dot{\mathbf{r}}_p = J(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n, \mathbf{r}_p) \dot{\mathbf{r}}_m \quad (2)$$

ここに、 $J = -S_L G^{-1} A$, $S_L = [0, I]$ とおいた。

4. フィードバック制御則

柔軟物の操りを行う際、位置決め点と操作点の位置関係は釣り合い方程式で表現される拘束条件を受ける。そのとき、微分関係が式 (2) で表されるため、仮想仕事の原理より、次のフィードバック制御則が導かれる。

$$\mathbf{u} = -\hat{J}^T K_P (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_p^d) - K_V \dot{\mathbf{r}}_m - \hat{J}^T K_I \int (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_p^d) d\tau \quad (3)$$

ただし、行列 $\hat{J}$ は、誤差を含んだ J である。また、簡単のため、この制御則においては、ロボットは直動型であるように書いており、その直動関節の変位を表す変数を、 $\mathbf{r}_m$ と一致させてある。ただし、ロボットが回転関節を持つ場合でも、全く同様に制御則が構成できることを注意されたい。式 (3) は、Cheah³⁾ らの近似ヤコビ行列によるマニピュレータ制御と同様になる。

ヤコビ行列 J は一般に対角行列ではなく、格子点の間には干渉が存在し、かつ変形に伴って値が変化する。ここでは簡素化するために、干渉および変形を無視した、定数行列を用いた制御則、式 (4) を提案する。

$$\mathbf{u} = -K_P S \{\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_p^d\} - K_V \dot{\mathbf{r}}_m - K_I S \int (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_p^d) d\tau \quad (4)$$

つまり、 $\hat{J}$ を S に置き換えた。ここに S は、位置決め点の配置と操作点の配置を結びつける行列であり、どの位置決め点の誤差をどの操作点にフィードバックするかを表す。 S を求める手順のイメージ図を Fig.4 に示す。図に示す通り、ある位置決め点の誤差を、それに最も近い操作点の誤差としてそのままフィードバックするのである。例えば、位置決め点 $p_{1,1}^d - p_{1,1}$ の誤差を、操作点 $p_{1,0}$ の誤差として扱う。つまり、行列 S は、単位行列の列ベクトルを、状況に合わせて入れ換えた形となる。

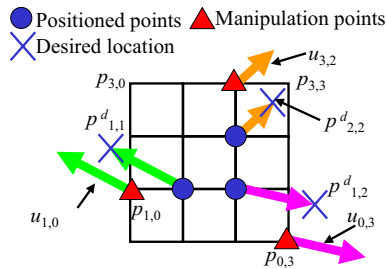


Fig.4 Simplified kinematic relation

マニピュレータの場合、一般にヤコビ行列は姿勢により変化する。しかしながら、柔軟物における行列 J は、位置決め点や操作点の柔軟物体上における配置にもよるが、変形が大きい場合、その変化が少ないと予想される。この性質を利用すれば、式 (4) のように変形モデルを用いない柔軟物制御が可能となる。次節に、この制御則の有効性を示すシミュレーション結果を示す。

5. シミュレーション結果

本節では、式 (4) の有効性およびロバスト性を示すため行ったシミュレーション結果を示す。Fig.5の左側を初期値として、同図右側のように変形させる作業を考える。物体のサイズは180[mm]×180[mm]である。物体を合計100この格子点に離散化する。位置決め点および操作点の配置はFig.5に示す通り、 $\mathbf{r}_p = [p_{2,2}^T, p_{2,6}^T, p_{6,3}^T, p_{6,7}^T]^T$, $\mathbf{r}_m = [p_{0,0}^T, p_{0,9}^T, p_{9,0}^T, p_{9,9}^T]^T$ とした。また、位置決め点 $p_{2,2}, p_{2,6}, p_{6,3}$ をそれぞれ、操作点 $p_{0,0}, p_{0,9}, p_{9,9}$ にフィードバックする。したがって、この場合は行列 S は単位行列となる。また、位置決め点の目標値は $\mathbf{r}_p^d = [90, 90, 180, 90, 90, 180, 180, 180]^T$ とした。

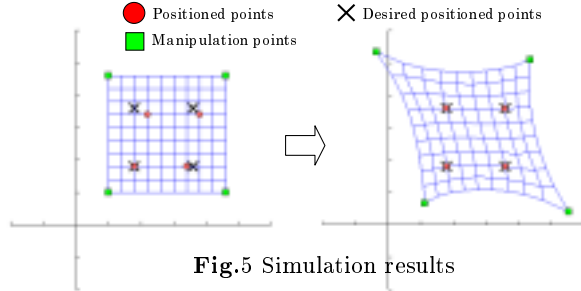


Fig.5 Simulation results

式 (4) の導出時には、柔軟物の質量や粘性要素は無視した。ここでは質量、粘性を持つ物体を考え、この制御則が適用できるかどうか調べる。なお、柔軟物の格子点の質量0.01[kg]、各格子の粘性係数5[Ns/m]、バネ定数10[N/m]、ロボットの質量10[kg]とした。

Fig.6に、誤差ノルムの収束の様子を示す。この結果より、変形モデルを用いなくとも、柔軟物の操りが実現できることがわかる。

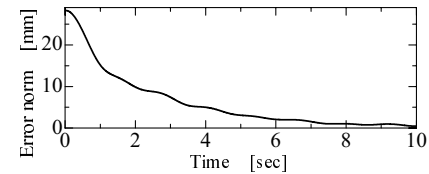


Fig.6 Error norm

6. まとめ

本稿では、伸縮柔軟物体の操りを対象としその定式化を行った。また操りのために、変形モデルを用いない単純なフィードバック制御則を提案した。その制御則の有効性がシミュレーションにより確認された。

変形が大きくなると、定数行列 S と J の間の誤差が大きくなり、収束しなくなることが予想される。これに対しては、不完全でもいいがある程度のモデルが必要であると考えられる。どの程度の変形まで対処できるのか、理論的な解明を行いたい。さらに、位置決め点や操作点の数が増えると、定数行列 S をどのように作るかが問題である。これは、物体上における操作点の配置問題と関連がある。併せて検討したい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 和田, 森, 古池, 平井, 川村 “モデルに基づく柔軟物体のロバストな操り”, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2000
- 3) C.C.Cheah, S.Kawamura, S.Arimoto, K.Lee, “PID Control of Robotic Manipulator with Uncertain Jacobian Matrix”, Proc. ICRA'99, pp.494-499, 1999