

帯状物体のマニピュレーションのための軌道導出手法

大阪大学 ○若松栄史, 森永英二, 荒井栄司

要 旨

電子機器の小型化に伴い、フレキシブル基板等の帯状物体の需要が高まっているが、それらの組み付けは自動化が困難である。特に、フレキシブル基板は柔軟性に異方性があるため、不適切に扱くと断線を生じる可能性がある。そこで本研究では、微分幾何法を用いた帯状物体のモデル化手法とそのマニピュレーションのための軌道導出手法について提案する。

1. 緒論

電子機器の小型化・薄型化に伴い、従来のリジッド基板に代わって、フレキシブル基板が使われるようになってきている。しかし、フレキシブル基板は容易に変形するため、組み付け作業の自動化が困難である。更に、フレキシブル基板は、電線等と異なり、柔軟性に異方性を持っている。例えば、フレキシブル基板は法線方向にはダメージを与えることなく大きく変形できるが、長手方向の中心軸周りに振じられると断線を生じる可能性がある。したがって、このようなフレキシブル基板のマニピュレーションの自動化のためには、基板にダメージを与えない適切なマニピュレーション軌道の導出が重要となる。そこで本研究では、微分幾何法を用いてフレキシブル基板のような帯状物体をモデル化し、そのモデルに基づいた軌道導出手法について提案する。

2. 帯状物体のモデル化

前提として、帯状物体は矩形型形状を有し、マニピュレーション中は常に長手方向両端を把持されているものとする。また、マニピュレーション中の動的効果は無視できるものとし、物体の変形は準静的であると仮定する。

図1に示すように、帯状物体の長さを L 、幅を b 、厚さを h とする。物体内の点を $P(u, v, w)$ （ただし、 $0 \leq u \leq L$ 、

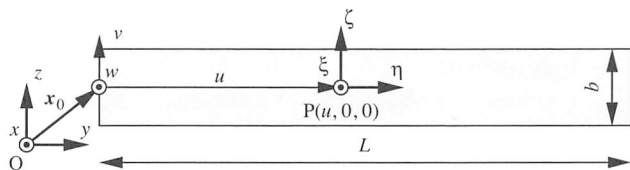


図1 物体座標系の設定

$-0.5b \leq v \leq 0.5b$, $-0.5h \leq w \leq 0.5h$) とし、長手方向中心軸上に物体座標系 $P(u, 0, 0) - \xi\eta\zeta$ を設定する。物体が変形した場合、物体座標系の各軸方向単位ベクトルの変化量は以下のように表わされる。

$$\frac{d}{du} [\xi \quad \eta \quad \zeta] = [\xi \quad \eta \quad \zeta] \begin{bmatrix} 0 & -\omega_\zeta & \omega_\eta \\ \omega_\zeta & 0 & -\omega_\xi \\ -\omega_\eta & \omega_\xi & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 ω_ξ , ω_η , ω_ζ は各軸周りの回転率を表わす。上記微分方程式を数値的に解くことにより、物体各点における各軸方向単位ベクトルを求めることができ、そこから下式のように点 $P(u, 0, 0)$ の空間座標を求めることができる。

$$x(u) = x_0 + \int_0^L \eta du \quad (2)$$

ここで、 x_0 を物体左端の空間座標とする。また、物体の持つポテンシャルエネルギーは、 ω_ξ , ω_η , ω_ζ , 更に幅方向の曲率 χ を用いて以下のように表わされる。

$$U = U_{nb} + U_{tb} + U_t + U_g \quad (3)$$

$$U_{nb} = \frac{E}{2(1-\nu)^2} \frac{bh^3}{12} \int_0^L (\omega_\zeta^2 + \chi^2 - 2\nu\omega_\zeta\chi) du \quad (4)$$

$$U_{tb} = \frac{E}{2(1-\nu)^2} \frac{b^3h}{12} \int_0^L \omega_\xi^2 du \quad (5)$$

$$U_t = \frac{G}{2} \frac{bh^3}{3} \int_0^L \omega_\eta^2 du \quad (6)$$

$$U_g = bhdg \int_0^L x_g du \quad (7)$$

ここで、 E はヤング率、 G は剛性率、 ν はポアソン比、 d は密度、 g は重力加速度、 x_g は重心の x 座標を表わす。導入した4変数を下式のように基底関数の線形和で表わし、それらの係数をまとめたものを係数ベクトル \mathbf{a} とする。

$$\begin{bmatrix} \omega_\xi \\ \omega_\eta \\ \omega_\zeta \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^\xi \cdot \mathbf{e}(u) \\ \mathbf{a}^\eta \cdot \mathbf{e}(u) \\ \mathbf{a}^\zeta \cdot \mathbf{e}(u) \\ \mathbf{a}^\chi \cdot \mathbf{e}(u) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^\xi \\ \mathbf{a}^\eta \\ \mathbf{a}^\zeta \\ \mathbf{a}^\chi \end{bmatrix} \quad (8)$$

すると、物体のポテンシャルエネルギー U 、また、物体に課せられる幾何学的制約は係数ベクトル \mathbf{a} の関数として表わすことができる。よって、制約条件の下でポテンシャルエネルギー U が最小となる係数ベクトル \mathbf{a} を求めることで、物体の変形形状を導出できる。

3. 帯状物体のマニピュレーション過程のモデル化

前章で示したように、物体の変形形状は係数ベクトルで表わされる。物体がマニピュレーションにより \mathbf{a}_0 で表わされる形状から \mathbf{a}_1 で表わされる形状に変化した場合、その途中の形状は、状態パラメータ k ($0 \leq k \leq 1$)を導入し、以下のような $\mathbf{a}(k)$ によって表わすことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(k) = & (1-k)\mathbf{a}_0 + k\mathbf{a}_1 \\ & + (1-k)\sum_i \mathbf{c}_{0,i}k^i + k\sum_j \mathbf{c}_{1,j}(1-k)^j \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{0,i}$ と $\mathbf{c}_{1,j}$ をまとめて \mathbf{c} とし、経路ベクトルと呼ぶ。物体がどのように変形するかは経路ベクトル \mathbf{c} に依存する。

マニピュレーション中に、物体に局所的に過度な負荷がかからないようにするためには、マニピュレーション中の微小領域におけるポテンシャルエネルギー U_{local} の最大値を最小化すればよいと考えることができる。よって、以下に示すような目的関数 Ω が最小となるような経路ベクトル \mathbf{c} を求めればよい。

$$\Omega(\mathbf{c}) = \max_k \max_u U_{\text{local}}(\mathbf{c}, k, u), \quad U_{\text{local}} = \frac{dU}{du} \quad (10)$$

一方、マニピュレーション中の変形が準静的であることを保証するために、静力学の変分原理に基づいて以下の制約を設ける。

$$\int_0^1 \left(\frac{\partial U}{\partial k} - \frac{\partial W}{\partial k} \right)^2 dk = 0 \quad (11)$$

ここで、 W は物体右端に加えられる力およびモーメントがなす仕事を表わし、以下のように表わされる。

$$W = \mathbf{f} \cdot \mathbf{x}(L) + \mathbf{m} \cdot \int_0^L (\xi \omega_\xi + \eta \omega_\eta + \zeta \omega_\zeta) du \quad (12)$$

\mathbf{f} および \mathbf{m} は未知の関数であるので、以下のように基底関数の線形和で表わし、係数 \mathbf{c}^f および \mathbf{c}^m も経路ベクトル \mathbf{c} の要素とする。

$$\mathbf{f} = \mathbf{c}^f \cdot \mathbf{e}(k), \quad \mathbf{m} = \mathbf{c}^m \cdot \mathbf{e}(k) \quad (12)$$

以上より、式(11)で表わされる制約の下で式(10)で表わされる目的関数を最小化することにより、マニピュレーション中に物体に生じる負荷が最も小さい変形経路、すなわちマニピュレーション軌道を導出できる。

4. ケーススタディ

提案した手法の妥当性を検証するために実験を行った。長さ200mm、幅20mm、厚さ0.14mmのポリスチレン製の帯状物体を垂直平面内でマニピュレーションすることを想定する。物体右端の初期位置を $[0, 200, 0]^T$ 、目標位置を $[150, 50, 0]^T$ とし、提案手法を用いて物体右端の軌道を導出する。その後、得られた軌道をロボットに与えてマニピュレーションを行い、その際の物体の形状を計測する。図2に上記計算結果と計測結果を示す。図からわかるように両者はよく一致しており、少なくとも、提案手法により準静的な変形形状を精度良く予測できていると言える。

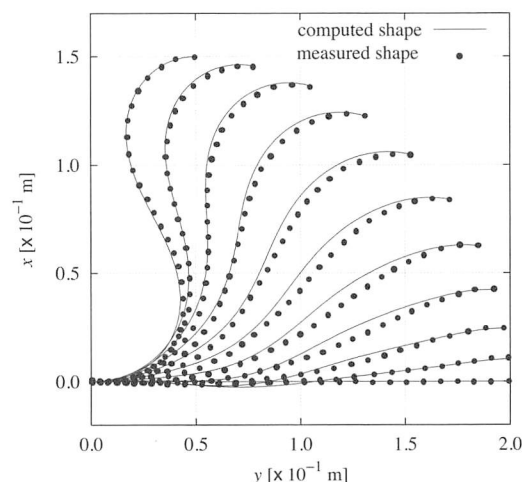


図2 変形経路の計算結果と計測結果

5. 結論

帯状物体のマニピュレーションの自動化を目標に、微分幾何法を用いた物体のモデル化手法とそれに基づいた軌道導出手法を提案した。得られた変形経路が本当に負荷の小さな変形経路であるかの検証が今後の課題である。