

屈曲部を含む帯状物体のマニピュレーションのための 変形シミュレーション

大阪大学 若松 栄史, 森永 英二, 荒井 栄司 立命館大学 平井 慎一

Simulation of Deformable Belt Objects with Angles toward Their Manipulation

Hidefumi WAKAMATSU, Eiji MORINAGA, and Eiji ARAI Osaka Univ.
Shinichi HIRAI Ritsumeikan Univ.

Abstract— A modeling to represent deformation of a belt object with angles is proposed. Deformation of a belt object such as film/flexible circuit boards must be estimated for automatic manipulation and assembly. First, a differential geometry based modeling to describe deformation of a rectangular belt object is explained. We can estimate deformation of the object by minimizing its potential energy under geometric constraints. Next, this model is applied to a belt object with angles. The deformed shape of an angled object can be derived by separating it into rectangular parts and angled parts and by assuming that each angled part forms a part of a cylindrical surface. Finally, the validity of our proposed model is verified by comparing the computed shape of an L-shaped belt object with its measured shape.

$$2H = \delta - \omega_\zeta = \kappa_1. \quad (2)$$

1. 緒言

携帯電話等の電子機器の小型化・薄型化に伴い、フレキシブル基板の需要がますます高まっている。しかし、フレキシブル基板は操作中に変形しやすく、また目標状態が特定の変形状態である場合も多いため、組付作業の自動化が困難である。このような作業の自動化のためには、フレキシブル基板の変形形状の予測が重要となる。そこで本研究では、微分幾何に基づいた帯状物体の変形形状表現のためのモデル化手法を提案する。

2. 矩形型帯状物体のモデル化

本研究では、帯状物体は伸縮しないと仮定し、変形としては曲げとねじれのみを考える。また、物体は、長さに対して十分に小さい幅を持つものとする。矩形型帯状物体の長さを U 、幅を V とし、物体の一端から長手方向中心軸に沿った距離を u 、中心軸からの幅方向の距離を v とする。物体上の点を $P(u, v)$ と表す。Fig.1に示すように、物体の中心軸上の点 $P(u, 0)$ に物体座標系 $P-\xi\eta\zeta$ を設定し、空間座標系 $O-xyz$ に対する物体座標系 $P-\xi\eta\zeta$ の向きをオイラー角 $\phi(u), \theta(u), \psi(u)$ で表す。この時、変形後の点 $P(u, 0)$ の空間座標 $x(u, 0)$ はオイラー角を用いて表すことができる。また、 $P(u, 0)$ における物体座標系各軸回りの微小回転量を $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ とする。ここで、 ω_ξ は中心軸の $\eta\zeta$ 平面内での曲率、 ω_ζ は中心軸の $\xi\eta$ 平面内での曲率、 ω_η は中心軸回りのねじれ率であり、それぞれオイラー角で表される。さらに、 $P(u, 0)$ における幅方向の曲率を $\delta(u)$ とする。この時、物体表面の形状は、ガウス曲率 K および平均曲率 H によって特徴づけられるが、帯状物体が伸縮しないという仮定から、物体表面は可展面とみなすことができるので、ガウス曲率 K および平均曲率 H はそれぞれ

$$K = -\omega_\zeta\delta - \omega_\eta^2 = 0, \quad (1)$$

となる。ここで、 κ_1 は最大曲率である。よって、帯状物体の変形形状は、4つの変数 $\phi(u), \theta(u), \psi(u), \delta(u)$ によって表すことができる。物体表面が可展面だとすると、物体は最大曲率方向に曲げ変形のみを生じていると考えることができるので、ポテンシャルエネルギー I は、

$$I = \int_0^U \frac{R_f}{2} \kappa_1^2 du = \int_0^U \frac{R_f}{2} (\delta - \omega_\zeta)^2 du \quad (3)$$

と表せる。ここで、 R_f は中心軸方向の曲げ剛性である。次に、物体表面が可展面を維持するためには、ガウス曲率 K が常に0でなくてはならない。したがって、

$$-\omega_\zeta\delta - \omega_\eta^2 = 0, \quad \forall u \in [0, U] \quad (4)$$

となる。また、帯状物体が伸縮しないためには、中心軸の $\eta\zeta$ 平面内での曲率 ω_ξ が常に0である必要がある。すなわち

$$\omega_\xi = 0, \quad \forall u \in [0, U] \quad (5)$$

となる。さらに、物体が円錐の頂点のような特異点を内部に持たないためには、以下の不等式を満たす必要がある。

$$-\frac{2}{V}\omega_\zeta^2 \leq \frac{d\omega_\eta}{du}\omega_\zeta - \omega_\eta \frac{d\omega_\zeta}{du} \leq \frac{2}{V}\omega_\zeta^2, \quad \forall u \in [0, U]. \quad (6)$$

したがって、式(4)、(5)、(6)の制約を含む幾何学的制約条件の下で、式(3)で表されるポテンシャルエネルギー I が最小となるような $\phi(u), \theta(u), \psi(u), \delta(u)$ を求めることにより、帯状物体の変形形状を求めることができる [1]。

3. 屈曲部を持つ帯状物体のモデル化

実際のフレキシブル基板は、Fig.2のように屈曲部を有する場合が多い。そこで、このような帯状物体をモデル化

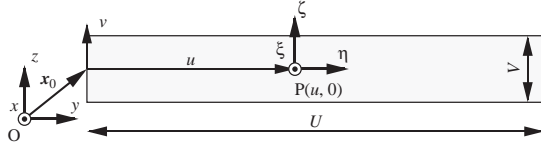


Fig.1 Coordinates of belt object

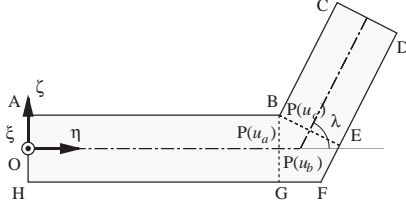


Fig.2 Object with one angle

する． Fig.2において，帯状物体を長方形 ABGH，四角形 BEFG，長方形 BCDE に分割する．長方形 ABGH と長方形 BCDE は，矩形型帯状物体としてモデル化できる．四角形 BEFG については円筒面の一部になると仮定する．すなわち，曲面の特性を表す各変数 $\omega_{\zeta b}$ ， $\omega_{\eta b}$ ， δ_b は距離 u ($u_a \leq u \leq u_c$) に関わらず一定であるとし，円筒面の半径を $1/\kappa_{1b}$ とする．すると，物体の変形形状は，三つの部分のポテンシャルエネルギーの総和

$$I = \int_0^{u_a} \frac{R_f}{2} \kappa_{1a}^2 du + \frac{R_f}{2V} \kappa_{1b}^2 S + \int_{u_c}^U \frac{R_f}{2} \kappa_{1c}^2 du \quad (7)$$

を最小化することにより求めることができる．ここで， κ_{1a} は長方形 ABGH の各点における最大曲率， κ_{1c} は長方形 BCDE の各点における最大曲率， S は四角形 BEFG の面積とする．ただし，点 $P(u_a)$ における長方形 ABGH 側の各変数を $\omega_{\zeta a}$ ， $\omega_{\eta a}$ ， δ_a ，点 $P(u_c)$ における長方形 BCDE 側の各変数を $\omega_{\zeta c}$ ， $\omega_{\eta c}$ ， δ_c ，屈曲角を λ とおくと，曲面の連続性から，以下の制約を満たす必要がある．

$$\omega_{\zeta a} = \omega_{\zeta b}, \quad \omega_{\eta a} = \omega_{\eta b}, \quad \delta_a = \delta_b, \quad (8)$$

$$\omega_{\zeta c} = \omega_{\zeta b} \cos^2 \lambda - 2\omega_{\eta b} \sin \lambda \cos \lambda - \delta_b \sin^2 \lambda, \quad (9)$$

$$\omega_{\eta c} = -\omega_{\zeta b} \sin \lambda \cos \lambda + \omega_{\eta b} (\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) + \delta_b \sin \lambda \cos \lambda, \quad (10)$$

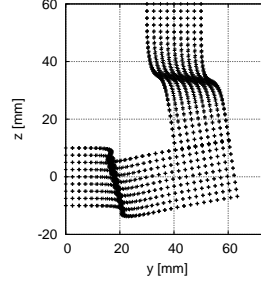
$$\delta_c = -\omega_{\zeta b} \sin^2 \lambda - 2\omega_{\eta b} \sin \lambda \cos \lambda + \delta_b \cos^2 \lambda. \quad (11)$$

4. 検証実験

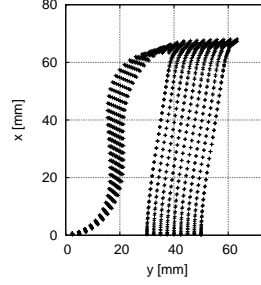
モデルの妥当性を検証するため，両翼の長さ 100mm，幅 20mm，厚さ $140\mu\text{m}$ のポリスチレン製 L 型帯状物体の変形形状の計測を行った．計算結果を Fig.3 に，計測結果を Fig.4 に示す． yz 平面内での屈曲部の向きなどに関して両者はよく一致しており，提案したモデルにより，屈曲部を含む帯状物体の変形形状を予測できると考えられる．

5. 結言

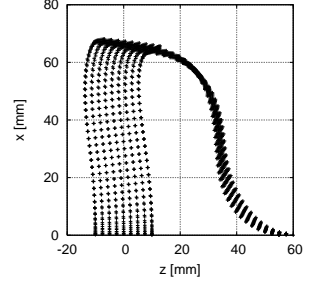
本研究では，フレキシブル基板のような帯状物体，特に屈曲部を有する帯状物体の変形形状を導出するためのモデ



(a) Top view

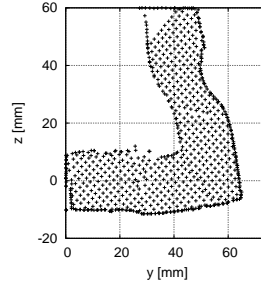


(b) Front view

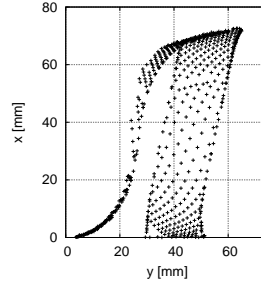


(c) Side view

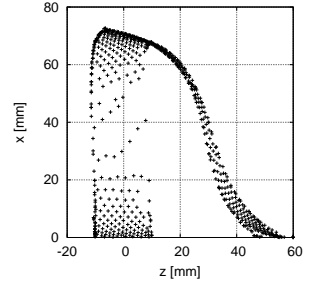
Fig.3 Computational result of L-shaped object deformation



(a) Top view



(b) Front view



(c) Side view

Fig.4 Experimental result of L-shaped object deformation

ル化手法を提案した．本手法は，屈曲部だけでなく，分岐を有する帯状物体にも適用可能であると考えられる．

参考文献

- [1] H. Wakamatsu, E. Arai, and S. Hirai : Fishbone Model for Belt Object Deformation, Robotics: Science and Systems III, pp.89-96, The MIT Press, (2008).