

線状柔軟物体の変形と転がり運動

中西 永 (立命館大学) 平井慎一 (立命館大学)

Deformation and tumbling motion of linear object

*Hisashi Nakanishi (Ritsumeikan University), Shinichi Hirai (Ritsumeikan University)

Abstract— Robots are required to be safe for human, which should be lightweight and have to provide a proper softness. Thus, robots should be constructed with soft and light materials. Additionally, soft robots are good at according with environment, because of deforming their body. We made linear soft objects with thin steel(SUS304). In this paper, we show how the linear soft objects deform statically. Also, we show how the linear soft object moves passively.

Key Words: Soft robot, Linear soft object, Tumbling, Deformation

1. はじめに

近年, 安全性や複雑なタスクなどに関してを実現させることがロボティクスの分野などで要求されている。これらを実現するためには機械的ならびに, 制御的なソフトネスが重要なポイントとなる [1]。ロボットや機械に柔軟性を持たせるためには, 軽量, 柔軟な材料でロボットを設計し, 精度劣化などの問題を制御で克服する方法と, 剛性の高い材料で物体を設計し, 制御により柔軟性を持たせるという方法がある。後者の場合は環境の外乱などに対して柔軟性を持たせることには限界がある。一方, 軽量, 柔軟な材料で設計したロボットであれば環境の外乱に対して受動的な変形が可能である。つまり, 常に柔軟な性質を保つことができ, 安全性に対する信頼度は高くなる。

杉山らはロボットのボディの形状を伸縮性のある形状記憶合金を用いて変形させるソフトロボット KOHARO を開発した [2]。このロボットはシンプルな形状で製作され, 傾斜のある地面での移動, 跳躍などが可能である。松田らは可変剛性関節を用いて, 機械的に剛性を変えて移動するロボットを開発した [3]。機構はループ形状で, コンプライアンス分布制御を行う。しかし, これらのロボットに関しては形状の変化や環境に対する受動的な変形に対して十分な解析などがなされていない。

本報告では薄金属を用いて線状物体を作成し, 静的な形状の変化を観測した。これらの物体に関して物体の力学的なエネルギーを解析するために, 線状物体モデリング法を用いた [4][5]。線状物体モデリング法は変分原理に基づいた微分幾何法を用いた方法である。物体固有のパラメータのヤング率やポアソン比から物体の形状や運動を表す方法である。また, 柔軟物体を坂道に置き重力のみの作用で物体が受動的に形状変化をしながら転がる様子を撮影し, 回転周期, 外乱に対する挙動, 傾斜角度とすべりの影響などの観測をした。

2. 線状柔軟物体の静的形状

2.1 線状物体モデリング法

本研究では微分幾何法を用いた線状物体モデルによってシミュレーションを作成する。図 1 に線状物体のモデル図を示す。物体の長さを L , 原点 O からの距離を

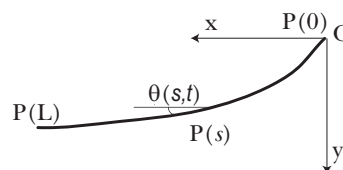


Fig.1 Deformation of linear object

s として任意の点 $P(s)$ を定める。また, 点 $P(s)$ における水平方向からの角度を $\theta(s,t)$ とし, 時間の関数で表す。時間 t における点 $P(s)$ の位置は以下のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} x(s,t) \\ y(s,t) \end{bmatrix} = \int_0^s \begin{bmatrix} \cos \theta(u,t) \\ \sin \theta(u,t) \end{bmatrix} du. \quad (1)$$

このとき, ここでは, 伸びやねじりによる変形は無視できる程小さいとし, 線状柔軟物体のポテンシャルエネルギーは重力ポテンシャルエネルギーと曲げポテンシャルエネルギーで表すことができると仮定する。全体のポテンシャルエネルギーを U は, 以下のように表すことができる。

$$U = U_{flex} + U_{grav}. \quad (2)$$

ただし U_{flex} は曲げポテンシャルエネルギー, U_{grav} は重力ポテンシャルエネルギーを表す。これらのエネルギーはそれぞれ,

$$U_{flex} = \int_0^L \frac{1}{2} R_f \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds, \quad (3)$$

$$U_{grav} = \int_0^L D \sin \theta(s) ds \quad (4)$$

と表すことができる。ここで, R_f は曲げ剛性を表し, 材料の弾性係数と断面 2 次モーメントから算出可能である。 D は物体の単位質量を表す。ここで, 質点数を N 点として, 質点を線状物体の原点からの距離 $0 \leq s \leq L$ に等間隔に $\theta_0 \sim \theta_N$ を定めて FEM を用いて質点間を補間する。線状物体全体のエネルギーを $I(\theta)$ とすると,

$$I(\theta) = U(\theta) + \lambda_x R_x(\theta) + \lambda_y R_y(\theta) \quad (5)$$

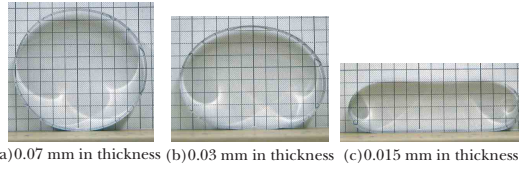


Fig.2 Shape of thin steel on ground

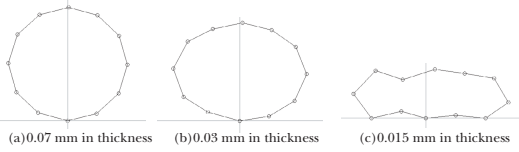


Fig.3 Simulation shape of thin steel on ground

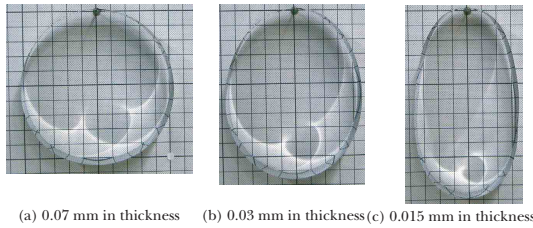


Fig.4 Shape of objects suspended at one point

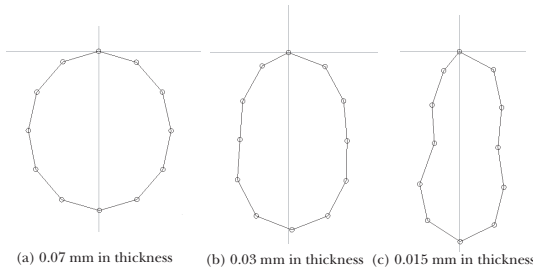


Fig.5 Simulation shape of objects suspended at one point

と $\theta_0 \sim \theta_N$ の関数で表すことができる。端点 2 点を固定するために、点 $P(0)$ と点 $P(L)$ に拘束力 λ_x と λ_y を与える。それぞれの拘束条件 R_x と R_y は、以下のように示される。

$$R_x = x(L) - x(0) = \int_0^L \cos(\theta) ds = 0, \quad (6)$$

$$R_y = y(L) - y(0) = \int_0^L \sin(\theta) ds = 0. \quad (7)$$

ここで独立変数が 2 個以上の関数の極小値を求める方法である、滑降シンプレックス法 (downhill simplex method) を用いて式 (5) を変数 $\theta_0 \sim \theta_N$ について極小値を求めると物体の形状を表すことができる [6]。

2.2 シミュレーション結果との比較

金属材料 SUS304 を素材とする周囲長 314 mm, 幅 20 mm で厚みが 0.015 mm, 0.03 mm, 0.07 mm の三種類の薄板の金属の端点を接続して、円形の形状物体を

作成した。それぞれの質量は 0.73 g, 1.60 g, 3.55 g である。これらの物体を地面に置いた図を Fig.2 に、線状物体モデルを用いたシミュレーション結果を Fig.3 に示す。すべての物体は自然状態において静力学の変分原理より、自身のエネルギーを最小に保つような形状をとる。Fig.2(a) は物体の形状は曲げポテンシャルエネルギーの方が支配的でそれを小さくするために曲率が十分小さくなる円形をとっている。厚みが 0.03 mm, 0.015 mm の線状物体は曲げポテンシャルエネルギーより重力ポテンシャルエネルギーの方が支配的になり、重力ポテンシャルエネルギーを優先して小さくしつつ、なおかつ曲げポテンシャルエネルギーを小さくする形状をとっていることが分かる。また、物体の曲げ剛性は断面 2 次モーメントに比例することから、厚みの 3 乗に比例し、厚みが変わると形状の変化が顕著に表れる。これらの結果とシミュレーション結果との比較から形状はほぼ一致しているといえる。

次に、同じ物体を重力方向に垂直に固定した形状を Fig.4 に、シミュレーション結果を Fig.5 に示す。Fig.4(b) の中央部の最大の伸び率は 15% であるのでそれと同じ伸び率となるようにシミュレーションの曲げ剛性と曲げ粘性を調節した。その結果他の厚さの最大伸び率と形状はほぼ結果と一致した。以上から、同じ素材を利用した物体の力学パラメータが分かれば、厚みが異なる物体の変形形状が予測できるといえる。

3. 線状柔軟物体の受動的な転がり

3.1 坂道上の転がり

2 章で用いた線状物体を、角度が 5.24 deg で摩擦が比較的少ないステンレス表面の坂道に置いて物体の挙動を測定した。坂道が転がる様子を CMOS カメラを用いて、撮像サイズは 1280×1024 pixel, サンプリングレートを 300 Hz で撮影した。使用した CMOS カメラには FPGA が搭載されており、高速処理が可能である [7]。厚みが 0.07 mm の転がりを Fig.6 に、0.03 mm の転がりを Fig.7 に、厚みが 0.015 mm の転がりを Fig.8 に示す。厚みが 0.07 mm の物体はほぼ円形のまま転がるが、厚みが 0.03 mm, 0.015 mm の物体は転がっているときの形状はほぼ一定で重力による垂直方向への引力よりも物体の自重による形状変化の方が支配的であるといえる。Fig.8 の (b) と (d) を比較すると、(b) は右方向に膨れ、(d) は左方向に膨れ、物体に揺れが起きていることが分かる。この揺れは周期的に起こり、物体の初期形状の違いや、空気抵抗によって起きている可能性がある。

3.2 回転周期の安定性

線状柔軟物体の回転周期を計測するために物体が回転するラップタイムの計測をした。ここでは計測が容易なように坂道の角度を 3.86 deg とした。厚さが 0.03 mm での結果を Fig.9, 0.015 mm での結果を Fig.10 に示す。横軸を回転回数、縦軸を周期を示し、いずれも 10 回測定した結果の平均値を示している。破線で示すパターンは初期位置を 300 mm 高い位置での初期高さを与えている。摩擦が働かなければ等加速度的に物体の周期は速くなるはずであるが、Fig.9 では 5 回転目ではほぼ約 0.7 s に、Fig.10 では約 0.9 s に収束した。

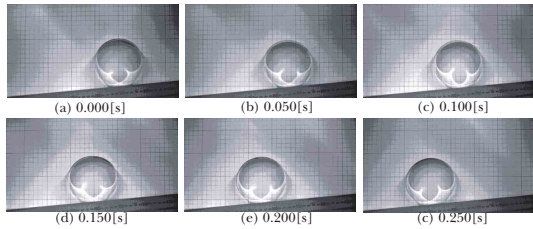


Fig.6 Rotation of object (0.07 mm)

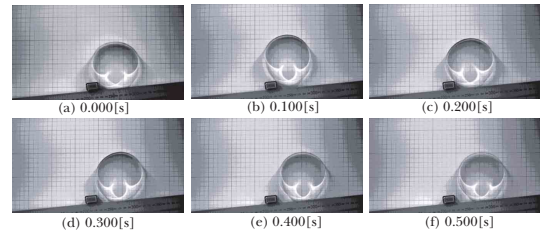


Fig.11 Climbing of object (0.07 mm)

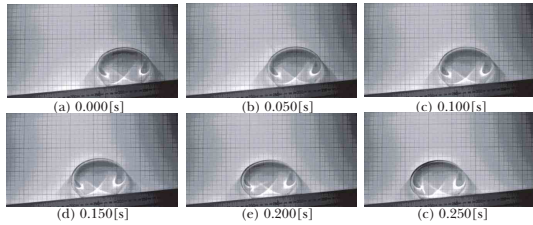


Fig.7 Rotation of object (0.03 mm)

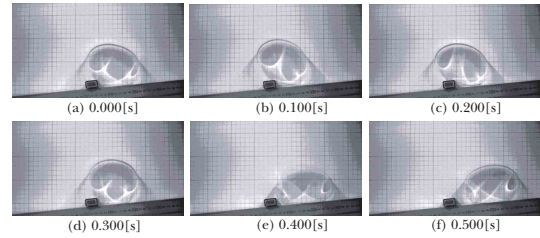


Fig.12 Climbing of object (0.03 mm)

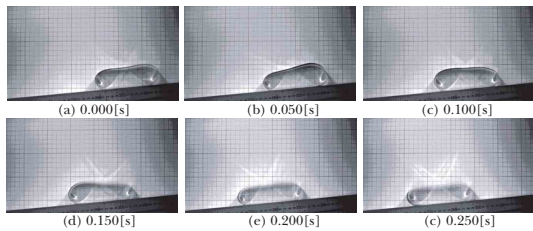


Fig.8 Rotation of object (0.015 mm)

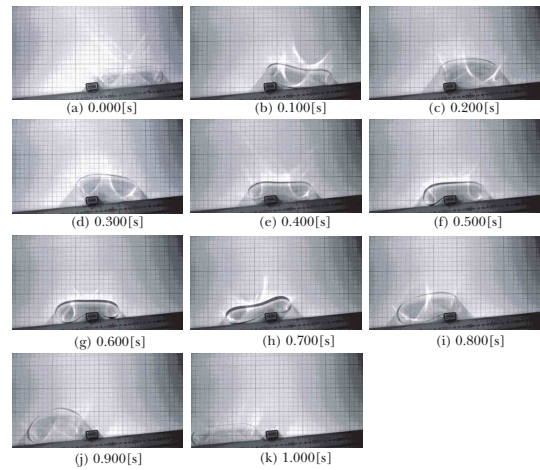


Fig.13 Climbing of object (0.015 mm)

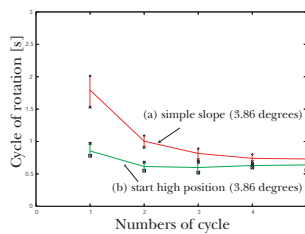


Fig.9 Cycle of rolling thin steel (0.03 mm)

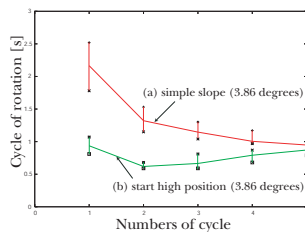


Fig.10 Cycle of rolling thin steel (0.015 mm)

この結果から、物体は地面との摩擦によるエネルギーの損失が一定となるように変形を受動的に繰り返しているといえる。この現象は受動歩行などに見られる「引き込み現象」との関係性が深いと推測される。

3.3 障害物に対する挙動

3.1 節と同様の坂道に、幅 25 mm、高さ 13 mm の乾電池を障害物として置いた。それに対してどのような挙動を示すかを接触した時間を 0.0 s として、Fig.11, Fig.12, Fig.13 に示す。いずれの場合も障害物と接触すると、衝撃による力が発生し、それまでに転がって移動していた運動エネルギーが物体の内部エネルギーに変化され、形状が変化する。厚さ 0.015 mm の物体に比べて、0.07 mm と 0.03 mm は曲げ剛性が 102 倍、8 倍も高くなるので変形が少なく障害物を乗り越えることができない。線状柔軟物体の受動的な変形においては、曲げ剛性の値によって挙動が大きく異なる。また、曲げ剛性が低い物体の方が形状の変形が容易であるので移動、接触においては、形状の移動を利用した動作が可能となる。

3.4 坂道の傾斜と滑り

厚みが 0.015 mm の線状柔軟物体を様々な角度で置いたときの回転周期と線状柔軟物体の坂道面垂直方向への高さの最大値を Table1 に示す。17 deg を越えたあた

Table 1 Behavior of each slope

Angle [deg]	Cycle [s]	Height [mm]	Slide
8.63	0.65	55	×
16.86	0.46	59	×
27.19	0.43	62	△
40.49	-	63	○

りから滑りが生じ、回転の周期も増加しないので、回転よりも滑りが移動に寄与していると考えられる。また、物体が転がりだす角度は 4.3 deg~7.1 deg であり、滑りが生じる角度は 9.2 deg であった。このことから、線状柔軟物体は剛体の物体と比較して転がりやすく、すべりが生じにくいということがいえる。

4. おわりに

本論文では、薄金属を用いて線状柔軟物体を作成してその物体の受動的な変形の挙動の解析を行った。また、線状物体モデリング法を用いたシミュレーション結果と実験結果を比較し、シミュレーションの妥当性を示した。静的に物体が安定となる点に関しては同じ材料であればシミュレーションを用いて形状を推測できることを示した。物体の転がりに関しては、安定した転がり周期が存在することが分かった。また柔らかい物体の方が障害物に対して安定な変形移動が可能なが示された。また、線状柔軟物体は剛体と比較して転がりやすく滑りにくいということがいえる。

今後は動的な転がりの挙動を摩擦などを考慮してシミュレーションによるエネルギーの解析を行う。受動的な転がりの原理を解析することによって効率的なソフトロボットの移動が可能になると考えられる。また、今後はエネルギー効率が良く、薄膜での製作が可能な EPAM を用いたロボットの製作なども検討したい [8]。

参考文献

- [1] 内山 勝: “ソフトロボティクス”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6, pp.756-757, 1999.
- [2] 杉山勇太, 平井慎一: “柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4, pp.378-387, 2006.
- [3] Takeshi Matsuda, Satoshi Murata : “Stiffness Distribution Control”, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, 2006.
- [4] Hidefumi Wakamatsu, Shinichi Hirai: “Static modeling of linear object deformation based on differential geometry”, The International journal of robotic research, Vol23, No.3, pp293-311, 2004.
- [5] Hidefumi Wakamatsu, Kousaku Takahashi and Shinichi Hirai: “Dynamic modeling of linear object deformation based on differential geometry coordinates”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005.
- [6] William H, Saul A, William T, Brian P : Numerical recipes in C, 1993.
- [7] Kazuhiro Shimizu and Shinichi Hirai: “CMOS+FPGA Vision System for Visual Feedback of Mechanical Systems”, Proc. IEEE Int.

Conf. on Robotics and Automation, pp.2060-2065, Orlando, May, 2006.

- [8] Seiki Chiba, Scotto Stanford, Ron Pelrine, Roy Kornbluh and Harsha Prahald: “Electroactive Polymer Artificial Muscle”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4, pp.466-470, 2006.