

# 受動的変形による転がり運動の安定性解析

立命館大学 中西 永, 平井 慎一

## Stability analysis of passive crawling

Hisashi NAKANISHI and Shinichi HIRAI Ritsumeikan Univ.

Abstract: Crawling is a novel locomotion that employs the deformation of a soft body of a robot. In this paper, we explore the passive crawling of circular objects through experiments. Passive crawling requires no external energy, implying that it is the most efficient crawling motion along a slope. Therefore, we investigate characters of passive crawling. First, we show experimental results of passive crawling of circular objects. Next, we analyze the stability of the passive crawling.

### 1 はじめに

近年ロボットに柔軟性を持たせる研究が盛んに行われている。外殻の変形を利用して移動するロボットとして、モジュラー型のロボットなどが開発されている [1][2]。これらのロボットは機械的に外殻の剛性の変化を実現し、形状を変化させ移動を実現している。ロボットが移動するときには環境との力学的な相互作用を考慮する必要がある。それらを積極的に利用したエネルギー効率の良いロボットの移動を目指して、受動歩行の研究が盛んに行われている [3]。

本研究では薄金属を用いて円形形状物体を作成し、静的な形状の変化を観測する。またこれらの物体を傾斜のなだらかな坂道に置き、物体の挙動を測定する。これらの結果から円形柔軟物体の受動的な転がり運動の特徴と安定性を力学的エネルギーの変化に注目して考察する。

### 2 円形柔軟物体の転がり

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、円形の柔軟物体を作成した。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上に置いた図を Fig.1 に示す。静力学の変分原理より、物体はポテンシャルエネルギーが最小の状態に静止する。厚さが 0.07 mm の物体の形状は曲げポテンシャルエネルギーの方が重力ポテンシャルエネルギーよりも支配的であり、曲げポテンシャルエネルギー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。厚さが 0.03 mm, 0.015 mm の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、楕円に近くなっている。

これらの物体を滑らかな坂道に置き、挙動を高速度カメラ (200Hz) で撮影した。撮像図を Fig.2~4 に示す。坂道の傾斜は 9.1 deg で、高さ 25 mm、幅 97 mm の障害物を置いた。厚さ 0.07 mm の物体は障害物に衝突すると逆方向にはね返り障害物を乗り越えることができない。厚さ 0.03 mm の物体は障害物を乗り越えることができる。厚さ 0.015 mm の物体は衝突によって速度が弱められ障害物を乗り越えられない。

### 3 転がり運動の安定性解析

2章で作成した柔軟物体を力学的エネルギーに注目して解析を行う。柔軟物体を両端点を固定された原点を  $P_0$  とする

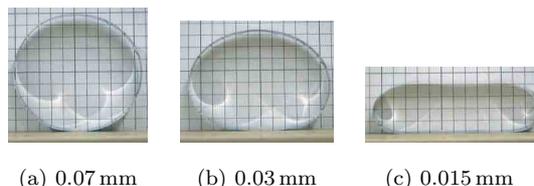


Fig.1 Stable shape of circular objects made of thin steel on ground

線状物体と仮定し、周囲長を  $L$ 、原点からの距離を  $s$  とする。二次元平面上に  $x$  軸を水平方向、 $y$  軸を垂直方向にとる。物体上の点  $P(s)$  は水平面とのなす角度を  $\theta(s)$  とすると、

$$x(s, t) = x_0(t) + \int_0^s \cos \theta(u, t) du, \quad (1)$$

$$y(s, t) = y_0(t) + \int_0^s \sin \theta(u, t) du, \quad (2)$$

と表すことができる。ここで物体の運動エネルギーを  $T$ 、曲げポテンシャルエネルギーを  $U_{flex}$ 、重力ポテンシャルエネルギーを  $U_{grav}$  とし、力学的エネルギーの総和は  $E_{total} = T + U_{flex} + U_{grav}$  と仮定する。物体の線密度を  $\rho$  とすると運動エネルギーは、

$$T = \int_0^L \frac{1}{2} \rho (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) ds \quad (3)$$

と表すことができる。単位質量を  $D$ 、曲げ剛性を  $R_f$  を用いて表すと曲げポテンシャルエネルギー  $U_{flex}$ 、重力ポテンシャルエネルギー  $U_{grav}$  はそれぞれ

$$U_{flex} = \int_0^L \frac{1}{2} R_f \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds, \quad (4)$$

$$U_{grav} = \int_0^L D y(s, t) ds \quad (5)$$

となる。撮像画像 Fig.2~4 から物体の形状を抽出し、抽出した物体上に代表点を 8 個とる。有限要素法を用いて円形柔軟物体の力学的エネルギーを 0.05 s 間隔で算出した結果を Fig.5 に示す。厚さ 0.07 mm の柔軟物体は 0.40 s のときに衝突し、衝突前後 0.05 s で運動エネルギーが 84%、曲げポテンシャルエネルギーが 4% 減少している。運動エネル

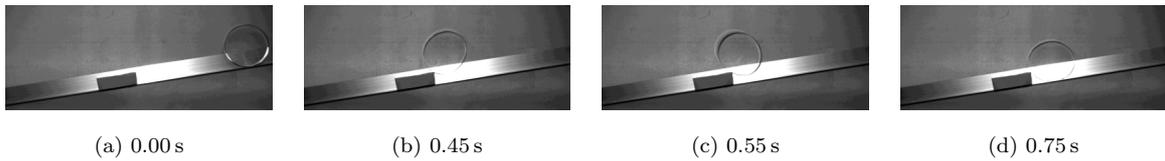


Fig.2 Object 0.07 mm thick crawling down 9.13 degree slope with hurdle

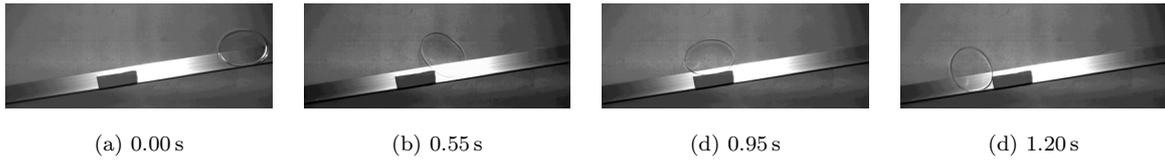


Fig.3 Object 0.03 mm thick crawling down 9.13 degree slope with hurdle

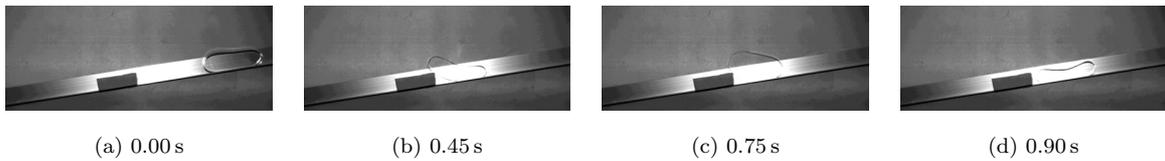


Fig.4 Object 0.015 mm thick crawling down 9.13 degree slope with hurdle

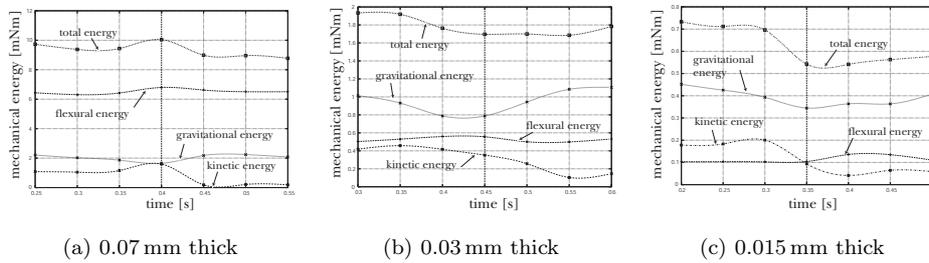


Fig.5 Mechanical energies of crawling down objects 9.13 degree slope with hurdle

ギーが急激に損失し坂道方向への運動量が減少して乗り越えることができない。厚さ 0.03 mm の柔軟物体は 0.45 s のときに障害物に衝突し、衝突前後 0.05 s で運動エネルギーが 39% 損失、曲げポテンシャルエネルギーが 10% 減少している。運動エネルギーは減少しているが、厚さ 0.07 mm の物体と比較して運動エネルギーは残存している。厚さ 0.015 mm の物体は 0.35 s のときに障害物と衝突し、衝突前後 0.05 s で運動エネルギーは 79% 損失するが、曲げポテンシャルエネルギーが 33% 増加している。運動エネルギーは減少しているが、損失したエネルギーの一部が曲げポテンシャルエネルギーに蓄えられていると考えることができる。物体が適度に柔軟であると運動エネルギーの損失が緩和されるが、柔軟性が高すぎると物体自身の弾性効果により運動エネルギーを曲げポテンシャルエネルギーに変換される。受動的な転がりにより障害物を乗り越えるときには物体の適度な柔軟性が必要である。

#### 4 おわりに

本研究では薄金属を用いて厚さの違う柔軟な円形物体を 3 種類作成し、その物体が障害物のある坂道を受動的に転がる

様子を撮影した。これらの物体は厚さの違いによって障害物に対する挙動が違うことを観測し、力学的エネルギーの変化を示した。

今後は柔軟物体が他の物体との衝突後どのような形状変化をするのかの解析を行う。また、動的なシミュレーションを作成して柔軟さを利用した効率的な移動の解析を行う。

#### 参考文献

- [1] Takeshi Matsuda and Satoshi Murata, *Stiffness Distribution Control*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Orlando, Florida, pp.1491-1498, 2006.
- [2] Jimmy Sastra, Sachin Chitta and Mark Yim, *Dynamic Rolling for a Modular Loop Robot*, Proc. Int. Symp. on Experimental Robotics, Rio de Janeiro, July, pp.160-167, 2006.
- [3] Ted McGeer, *Passive Dynamic Walking*, Int J. of Robotics Research, 9-2, pp.62-82, 1990.