

柔らかい物体の把持に関する静力学的解析

Static Analysis of Grasping of Deformable Objects

正 若松栄史 (大阪大学) 正 平井慎一 (大阪大学)

正 岩田一明 (大阪大学)

Hidefumi WAKAMATSU, Shinichi HIRAI, Kazuaki IWATA

Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565

Abstract— An approach to the static analysis of grasping of deformable objects is presented. Firstly, the concept of force closure grasping is extended for deformable objects. Secondly, deformation of linear objects is formulated and an algorithm to compute their deformation is developed. Finally, we show that this approach can derive the maximum external force/moment allowable for stable grasping.

Key words : statics, grasping, deformable objects, force closure

1. 緒言

現在, 生産現場において, 自動化がなかなか進展しない工程のひとつとして, やわらかく変形しやすい材料でできた部品のマニピュレーション, 特にその把持があげられる. そこで本報告では, 弾性変形を生じる線状物体を例に取り, 新たに bounded force closure という概念を導入して, その把持における静力学的性質について考察する.

2. 変形しやすい物体の把持の定式化

剛体を対象物とする把持に関しては, 従来, form closure や force closure という概念が提案されている. そこで, これらの概念が, 変形しやすい物体の把持に対して適用できるか否かを検討する. まず, form closure について考えてみる. 物体が柔らかく変形しやすい場合には, 物体の自由度は無限にあると考えられるので, 剛体と同様の form closure の条件を満たすことは不可能である. 次に, force closure について考える. 物体上の任意の点に対して, 任意の方向・大きさの力およびモーメント p を加える. 任意の力・モーメント p が, 物体周囲の指から作用する抗力とつり合う時, force closure であると呼ぶ. 剛体が k 個の指と点接触していると仮定すると, force closure であるための条件は次式のように表される.

$$\begin{aligned} \forall p, \quad \exists r_1, r_2, \dots, r_k \geq 0, \\ \text{s.t.} \quad p + b + \sum_{i=1}^k r_i w_i = o. \end{aligned} \quad (1)$$

ただし, b は物体力, w_i は i 番目の接触点での wrench ベクトルである. 今, 把持対象物が変形しやすい物体である場合を考える. 物体は, 指からの初期把持力によって支えられており, 物体の変形によって, 接触点および指同士の相対的な位置関係は変化しないと仮定する. この時, ある指の接触点に, それを与えている初期把持力より大きい力を, 初期把持力の方向に加えると, その指と物体との接触が失われてしまう. したがって, 物体の変形を考慮する場合, force closure のための条件 (1) 式は満たされない. 一方, 物体を安定に把持するためには, 物体に加えることのできる力およびモーメントの値に上限があることがわかる. そこで, 次のような概念を導入する.

物体のある点 x に, 大きさ f , 方向 n の力が加わっているものとし, この力に対応する wrench ベクトルを w_f

$= [n^T, (x \times n)^T]^T$ とする. この時, force closure の条件を満たすことのできる最大の f を $F(x, n)$ とおく. $F(x, n)$ は, x と n とに依存するので, その最小値を F_{bfc} と定義する. すなわち,

$$F_{\text{bfc}} = \min_x \min_n F(x, n) \quad (2)$$

とする. これにより, 任意の x, n に対して外力の大きさ f が F_{bfc} を超えない限りにおいては, force closure の条件が満たされることになる. このような状態を, bounded force closure の状態にあると定義する. これを式で表すと次のようになる.

$$\begin{aligned} \forall x, \quad \forall n, \quad \exists F_{\text{bfc}} > 0, r_1, r_2, \dots, r_k \geq 0, \\ \text{s.t.} \quad f w_f + b + \sum_{i=1}^k r_i w_i = o, \quad \forall f \in [0, F_{\text{bfc}}] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, F_{bfc} を最大許容外力と呼ぶ. モーメントについても同様に考えることができる. 物体に, 大きさ m , 方向 d のモーメントが加わっているものとし, このモーメントに対応する wrench ベクトルを $w_m = [o^T, d^T]^T$ とする. この時, force closure の条件を満たすことのできる最大の m を $M(d)$ とおく. $M(d)$ の最小値を M_{bfc} と定義する. すなわち,

$$M_{\text{bfc}} = \min_d M(d)$$

とする. これにより, 任意の d に対してモーメントの大きさ m が M_{bfc} を超えない限りにおいては, force closure の条件が満たされることになる. このような状態を, bounded force closure の状態にあると定義する. これを式で表すと次のようになる.

$$\begin{aligned} \forall d, \quad \exists M_{\text{bfc}} > 0, r_1, r_2, \dots, r_k \geq 0, \\ \text{s.t.} \quad m w_m + b + \sum_{i=1}^k r_i w_i = o, \quad \forall m \in [0, M_{\text{bfc}}] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, M_{bfc} を最大許容モーメントと呼ぶ. (3)(4) 式より, 物体に $[f^T, m^T]^T$ で表される wrench が加えられた時, $|f| \leq F_{\text{bfc}}$ かつ $|m| \leq M_{\text{bfc}}$ であれば, bounded force closure の状態にあるということが出来る. 以上のように, 変形しやすい物体の場合には, 外力およびモー

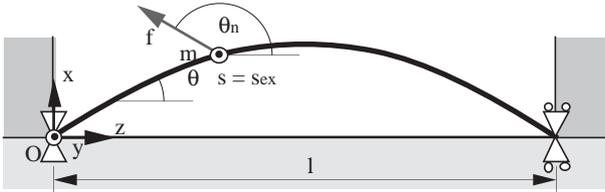


Fig. 1 2D-deformation of a linear object

メントがある範囲内にあるときのみ、安定な把持が可能であり、その限界は、最大許容外力 F_{bfc} および最大許容モーメント M_{bfc} で表される。

3. 線状物体の変形の解析

例として、Fig.1に示すような、テーブル上に置かれた長さ L の線状物体の変形を解析する。初期状態として、物体は、位置制御される二つの指によって両端間の距離が l に縮められており、物体の両端にはモーメントを発生させることはできないものとする。この物体に複数の外力およびモーメントを加える。ここで、物体の静的に安定な変形形状は、ポテンシャルエネルギーと外力およびモーメントのなした仕事との差が最小となる形状であるとする。ポテンシャルエネルギーとしては、曲げとねじれによる弾性エネルギーを考える。物体の中心軸に沿った距離を s で表し、オイラー角 $\phi(s)$ 、 $\theta(s)$ 、 $\psi(s)$ を導入することにより、ポテンシャルエネルギー U は、次のように表すことができる。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L R_f \kappa(s)^2 ds + \frac{1}{2} \int_0^L R_t \omega(s)^2 ds \quad (5)$$

ここで、 R_f は曲げ剛性、 R_t はねじり剛性、 $\kappa(s)$ は曲率、 $\omega(s)$ はねじれ率を表し、曲率とねじれ率は、オイラー角を用いて表現することができる [1]。次に、外力およびモーメント p_i ($i = 1, \dots, h$) がなした仕事 W は、 p_i による変位を δq_i とおくと、

$$W = \sum_{i=1}^h p_i \cdot \delta q_i \quad (6)$$

と表される。また、幾何学的制約は以下のようなになる。

$$\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}(L) = 0 \quad (7)$$

$$z(L) = 0 \quad (8)$$

$$y(L) = 0 \quad (9)$$

$$x(L) \leq l \quad (10)$$

$$z(s) \geq 0, \forall s \in [0, L] \quad (11)$$

ここで、(7) 式は両端における中心軸方向の曲率に対する制約を、(8)(9)(10) 式は、それぞれ右端の z 、 y 、 x 軸方向の制約を、(11) 式は、物体がテーブルと干渉しないための制約を表している。これらの幾何学的制約のもとでエネルギー $U - W$ を最小化することにより、物体の静的な安定形状を導出することができる。以上のような変形形状の計算は、オイラー角を基底関数の線形和で表現することにより、変分問題から最適化問題に変換することができ、乗数法、準ニュートン法等の手法を用いて数値的に解くことができる [1][2]。その結果、物体の変形形状と周囲の物体からの wrench $r_i w_i$ が求められる。

4. 最大許容外力およびモーメントの導出

前節での解析に基づいて、物体の安定な把持のための指標となる最大許容外力 F_{bfc} および最大許容モーメント M_{bfc} を求める。

Fig.1において、線状物体は $x - z$ 平面内で変形すると仮定する。物体右端と指との接触点において、 x 方向には滑べりが生じるものとし、その最大静止摩擦係数を μ とおく。前章の方法で求められた物体右端に生じる抗力 r_R の z 方向成分を r_{Rz} 、 x 方向成分を r_{Rx} とすると、外力およびモーメントによる抗力が、 $r_{Rx} \leq \mu r_{Rz}$ を満たす限り、滑ることなく安定に物体を把持することができる。したがって、 $r_{Rx} = \mu r_{Rz}$ となる外力およびモーメントのうち、大きさの最小のものが最大許容外力 F_{bfc} および最大許容モーメント M_{bfc} ということになる。

例として、物体の $s_{ex} = 0.1\alpha L$ ($\alpha = 1, \dots, 9$) の点において、 $\theta_n = (\beta + 4)\pi/8$ ($\beta = 0, 1, \dots, 8$) の方向に外力を、 y 軸方向にモーメントを加える。この時求められる最大許容外力 F_{bfc} を Fig.2に、最大許容モーメント M_{bfc} を Fig.3に示す。Fig.2、Fig.3より、指との摩擦係数が大きいほど、また、両端間の距離 l が小さい、すなわち、初期状態における変形が大きいほど、大きな外力およびモーメントに対して安定な把持を維持できることがわかる。

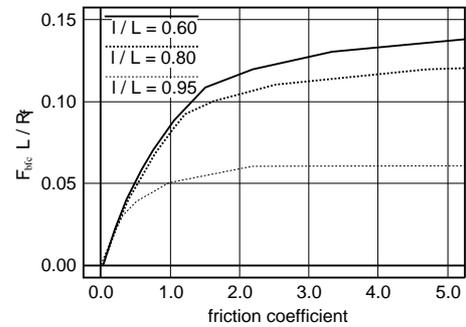


Fig. 2 Allowable maximum external force

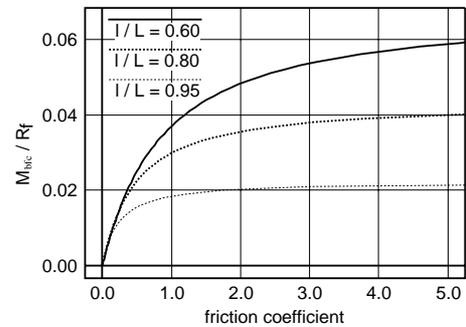


Fig. 3 Allowable maximum external moment

5. 結論

本報告では、線状物体を例にとり、bounded force closure という新しい概念を導入することによって、変形しやすい物体を安定に把持するための条件を求めた。その結果、安定性の指標となる最大許容外力およびモーメントが、周囲の物体との摩擦係数と、初期状態における物体の変形形状とに依存することが示された。

【参考文献】

[1] H. Wakamatsu, S. Hirai, and K. Iwata : Modeling of Linear Objects Considering Bend, Twist, and Extensional Deformation, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.433-438 (1995).

[2] 今野, 山下 : 非線形計画法, 日科技連 (1978).