

柔らかい指先の2次元接触モデルと分布圧センサによる計測値との比較

朴貴浩 金丙鎬 平井慎一 (立命館大学)

Two-dimensional Contact Model of a Soft Fingertip and Comparison with Tactile Sensor Measurements

Kwi-Ho Park, Byoung-Ho Kim, and Shinichi Hirai (Ritsumeikan Univ. Japan)

Abstract— In this paper, we will propose a simple modeling method of a soft fingertip based on geometrical analysis. First, we introduce a virtual spring system of the soft fingertip with two-dimensional contact between a planar object and fingertip. Second, we describe the equation of pressure distribution from hydrostatic equation, and validate this theory by simulating the equation and comparing the equation and the measurements of tactile sensor. Finally, we denote how to obtain amplitude θ_0 and maximum displacement d_0 from the tactile sensor.

1. はじめに

従来よりロボットハンドによる対象物体の把持、操りの研究は数多く行われてきた。そのほとんどがハンドの指先において点接触を仮定している [1][2]。しかし、点接触のような摩擦のない環境では対象物を安定して把持することは難しい。

人間の指は粘弾性の特徴を持ち、対象物が接触することによってその対象物の方が硬ければ指先が変形し、その逆は対象物に変形する。また、対象物の接触を指先の皮下組織において応力を検知し、対象物の形状、硬さなどを認識していると言われている。このように、人間の指先を模倣したロボットハンドによる操りを実現するためには、指先へ対象物の接触により現れる圧力（応力）を計測することが必要である。

本研究では、1次元接触モデル [3] を拡張し大変形を伴う柔軟指の2次元接触モデルを導出しシミュレーションを行い、指先下部のタクトイルセンサに現れる分布圧と比較することにより、導出した関係式の正当性を検証する。また、2次元接触における対象物との接触角 θ_0 と、指先の最大変位量 d_0 をタクトイルセンサから求める方法を提案する。

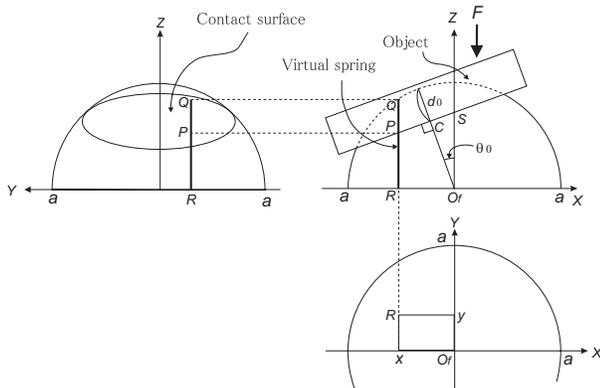


Fig.1 Two-dimensional deformation

2. 静力学関係式の導出

定式化を簡単に行うために、2つの仮定を以下に示す。

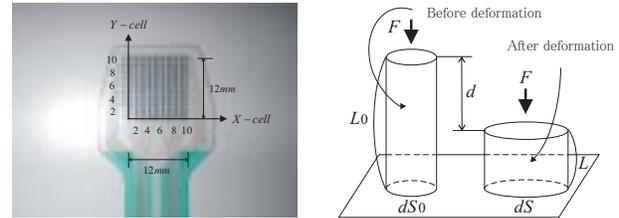


Fig.2 Tactile sensor and deformation of virtual spring

1. 接触物体は剛体であり、接触面は平面である。
2. 指先は線形弾性変形を受ける。
3. 外力 F は xy 平面（センサ面）に対して垂直である。

Fig.1 のように、線分 QR に仮想ばねを導入する。Z 軸に対して偏角 θ 傾いた対象物と指先とが外力 F の 2 次元方向接触を行うとき、線分 QR を自然長に持つ仮想ばねは線分 PQ だけ縮むことになる。また、ゴム、シリコン系、ポリウレタン系材料は非圧縮性の特性を有するため、少しの荷重増加により体積をほとんど変えずに容易に変形を起こす。以下に仮想ばねの大変形を伴った静力学関係式の定式化を記述する。

柔軟な指先と対象物との接触に関する従来の研究 [3] では、 $dP_0(x, y) = E\varepsilon = E(1 - h(x, y))$ という式を導いた。しかし、柔らかい指先の大変形を考慮すると Fig.2 の右図より $dS_0 = \left(1 - \frac{d}{L_0}\right) dS$ が成り立ち、対象物との接触により仮想ばね QR に現れる微小面積あたりの圧力は、

$$dP(x, y) = E(1 - h(x, y))h(x, y) \quad (1)$$

になる。ここで dS は仮想ばねの変形後の断面積、 E は縦弾性係数、 $h(x, y)$ は

$$h(x, y) = \frac{a - d_0 - \sin \theta_0 x}{\cos \theta_0 \sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}} \quad (2)$$

である。(1) 式において右辺のヤング率を除いた部分は、材料力学のフックの法則 $\sigma = E\varepsilon$ におけるひずみ ε に相当する。

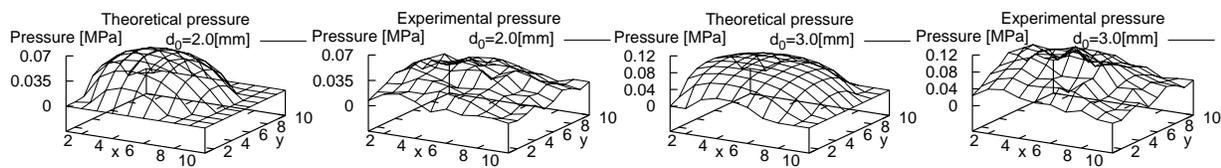


Fig.3 Simulation of pressure distribution at $\theta_0=10$ [deg]

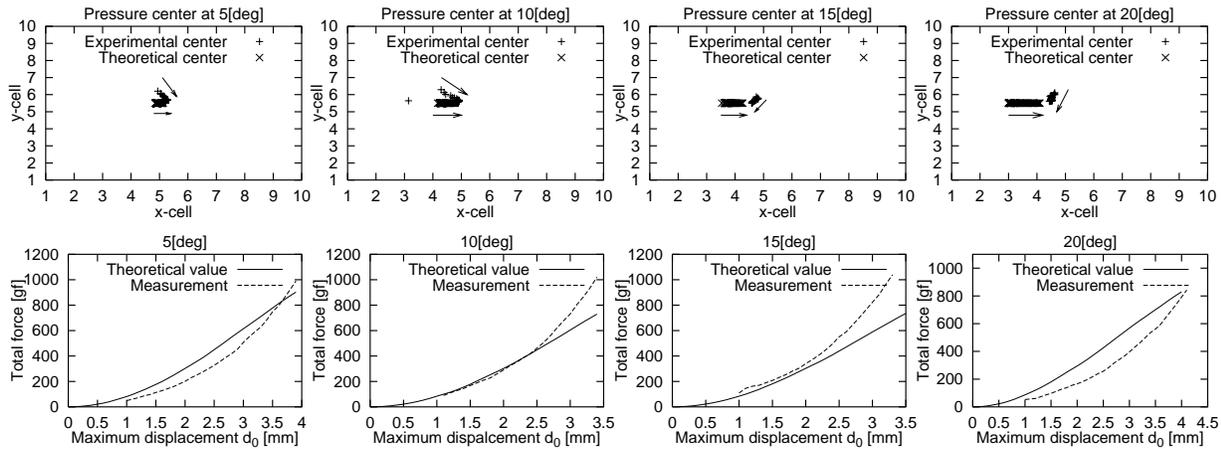


Fig.4 Shifting of pressure center and relationship between total force and maximum displacement

3. シミュレーションと計測値との比較

式 (2) より分布圧シミュレーションを行う。Fig.3 は、偏角 $\theta_0=10$ [deg]、最大縮み量 $d_0=2.0$ [mm], 3.0 [mm] それぞれの、センサに現れる分布圧の理論値と計測値を比較したものである。

Fig.4 は、分布圧の圧力中心 (上図) とセンサに加わる指先最大変位ごとの荷重総和 (Total force) の関係 (下図) を示している。上図の矢印は、最大変位量 d_0 を 0 から 0.1 [mm] ずつ、 3.0 [mm] もしくは 4.0 [mm] 付近まで増加したときの圧力中心の軌跡である。下図は、指先と対象物との接触によりタクタイルセンサに現れるセルごとの圧力を力に変換し、荷重総和を求めたものである。

4. 考察

Fig.3 では、理論値と実測値それぞれの圧力軸のスケールがほぼ等しい。これは仮想ばねのモデリングにおいて、圧縮によるばねの断面積の増加を考慮した結果である。また、分布圧の形状においては、理論値と計測値とは大きな違いがある。これは、センサ自体の特性に起因する。 12 [mm²] のセンサ部に 100 セルの高集積を実現しているため、ノイズの影響を無視できない。さらに、センサは感圧フィルムで覆われているため、フィルムが少しでも湾曲した状態で指先を押し付けても、接触初期段階 (最大変位量小) では指先下部とセンサとの密着性が十分得られず測定誤差が生じる。

Fig.4 上図では、偏角 θ_0 の増加 (5 [deg]- 20 [deg]) に伴って圧力中心が全体的に左に移動している。最大変位量が増加するにしたがって、理論値と計測値の圧力中心が近づいていくことが分かる。これも同様に、接触初期段階では指先とセンサ間の接触が不安定になり密着性が保てないために起きる測定誤差が原因である。

しかし、変位量が 3 [mm] を超えると互いに徐々に近づいていることから、 3 [mm] 以上では変位量からの対象物の偏角の推定が可能である。なお、偏角 $\theta_0=0$ のときの圧力中心の座標は $(x,y)=(5.5,5.5)$ である。

Fig.4 下図では、荷重総和の理論値と計測値のグラフが類似していることが分かる。これは、本研究で導出した 2 次元接触の方程式 (1) 式の妥当性を示すものであり、計測値 (荷重総和) を読むことにより最大変位量 d_0 を推定することができる。

5. おわりに

本研究では、対象物と柔らかい指先との 2 次元接触モデルを提案し、その静力学的関係式を導出した。また、それらの式の正当性を検証し、2 次元接触においては θ_0 と d_0 がタクタイルセンサの分布圧情報から推定可能であることを証明した。

しかし、Fig.3 においては d_0 が 2 [mm] 以下での分布圧形状に大きな違いがあり、また、Fig.4 上図でも同様に d_0 が 2 [mm] 以下では圧力中心の一致性が低い。

今後もモデリングの研究を続け、これらの点を修正できる簡単な関係式を導く予定である。また、3 次元接触モデルを導出し、任意方向からの外力を考慮した定式化を検討する。

参考文献

- 1) 前川, 谷江, 小森谷: "指先での転がり接触を考慮した多指ハンドによる三次元把握の運動学・静力学および剛性効果", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.2, pp.205-213, 1998
- 2) 横小路, 坂本, 吉川: "ソフトフィンガー型の多指ハンドによる物体の操りのための接触点における摩擦モーメント補償", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.6, pp.876-886, 1999
- 3) 朴, 金, 平井: "物体操作のためのタクタイルセンサを用いた柔らかい指先のモデリング", 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3E25, 2002