

把持力制御のための2軸弾性フィンガ型センサの開発

Development of Elastic Finger-like Sensor for Control of Grasping Force in Dual Axis

○非 木村 竜司 (慶大) 正 内山 孝憲 (慶大)
正 前野 隆司 (慶大)

Ryuji KIMURA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama
Takanori UCHIYAMA, Keio University
Takashi MAENO, Keio University

Human can lift an object using adequate grasping force without slippage, even though they do not know the weight and friction coefficient of the object. We had designed an elastic finger-like sensor imitating human tactile receptors. However, the sensor had restrictions of grasping posture and velocity. A two axial finger-like sensor was developed in the present study. First, the relationship between stick area and internal strain distribution of the sensor was calculated using FE analysis. Then, the grasping force control method was proposed based on the obtained relationship. Finally, it was confirmed that objects can be lifted with adequate grasping force causing no slippage.

Key Words: Tactile Sensor, Grasping Force, Contact Problem, Finite Element Analysis

1. 緒論

ヒトは重量や摩擦係数が未知の物体を適切な力で把持することができる。これは、指先に配置された多数の触覚受容器により、皮膚の複雑な応答変化を検出し、末端および中枢神経系で処理することにより適切な把持力を算出しているためであると考えられている。ヒトの指腹部は巨視的に曲率をもっている。そのため、指から物体が滑り落ちる場合には、指の端部から滑り領域となる局所滑りが発生した後、徐々に滑り領域が中央に向かって拡大する。ヒトはこの局所滑りを検出することによって把持力を制御していると考えられる。

このようなヒトの物体把持をロボットハンドにより実現するために、筆者らはヒト指の特徴を模倣したフィンガ型センサを開発してきた⁽¹⁾。しかし、一方向の滑りしか検出できないため、持ち上げる方向が限定されるという問題があった。また、アルゴリズムの問題から、一定の把持速度でなければ最適な把持力を算出することができなかった。

そこで、本研究では、任意の持ち上げ方向での物体把持を実現するために、2軸にセンサを配置したフィンガ型センサの設計を行う。さらに、把持速度に依存せず、安定に物体を把持するためのアルゴリズムを検討するとともに、実際に未知物体の把持を行うことによって本弾性フィンガ型センサの有効性を確認する。

2. フィンガ型センサの構造

本研究で設計したシリコンゴム製弾性フィンガ型センサの有限要素モデルの全体図を Fig. 1 (a)に示す。フィンガの端部から局所滑りを発生させるため、フィンガ表面を球状とした(曲率半径 950 mm, 直径 60 mm, 高さ 15 mm)。なお、図の底面の節点を固定した。フィンガの物性値は、ヤング率 0.3 MPa, ポアソン比 0.45, 密度 1230 kg/m³である。Fig. 1 (b)は、Fig. 1 (a)の (I) 軸におけるセンサ配置部の断面である。(I) 軸断面に、10枚のひずみゲージを左右対称にしてフィンガ底面に対して45度方向に傾けて配置した。(II) 軸断面にも (I) 軸同様に10枚のひずみゲージを配置している。それぞれのひずみゲージで、フィンガ内部に発生するひずみの分布を検出することができる。ここで、センサ配列軸 (I)の、 x が負の領域に配置されたひずみゲージ 1 から 5 を array1, 正の領域に配置されたひずみゲージ 6 から

10 を array2 と呼ぶこととする。また、センサ配列軸 (II) のひずみゲージを z が正の領域より 11 から 20 とする。

3. 接触状態とひずみの関係

局所滑り領域と固着領域に対応したひずみ分布を確認するために、有限要素法による接触解析を行った。まず、 $-y$ 方向に 7N の荷重を剛体平板によって与えた。この時点を経験ステップ 0 とする。次に、この状態から $+x$ 方向に 1mm の強制変位を与え、ひずみゲージ 1 から 10 によって検出されるひずみを求めた。 x 方向強制変位量が 0 mm から 1 mm (時間ステップ 100) のときのひずみの履歴を Fig. 2 に示す。

直上の節点が固着状態にある場合、その節点直下の弾性体はせん断力を受ける。このため、array1 では引張ひずみ、array2 では圧縮ひずみが発生している。図より、直上の節点が滑り状態に移行すると、せん断力の変化は小さくなり、各ひずみゲージで検出されるひずみの時間変化はほぼ 0 となることがわかった。また、固着状態にある節点直下のひずみゲージで検出されるひずみの時間変化はほぼ等しいことがわかった。

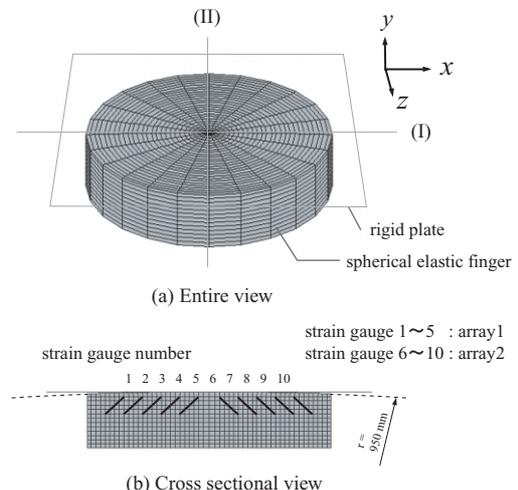


Fig. 1 Finite elements model of elastic finger-like sensor

以上より、ひずみの時間変化の最も大きいひずみゲージを基準にして、各ひずみゲージにおけるひずみの時間変化と比較することで、フィンガ表面の接触状態判定を行うことができると考えられる。すなわち固着条件は以下のような式で近似することができる。

- (i) array1 $|\Delta \varepsilon_i|/a > c$
- (ii) array2 $|\Delta \varepsilon_i|/b > c$

ただし、 a は array1 における $|\Delta \varepsilon_i|$ の最大値、 b は array2 における $|\Delta \varepsilon_i|$ の最大値である。

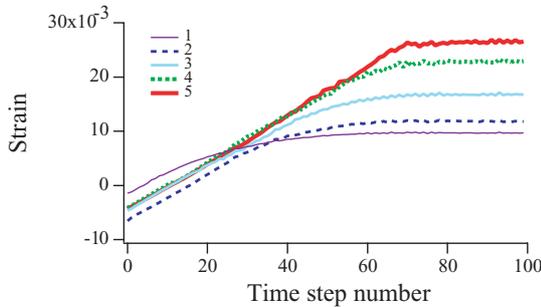
Fig. 2 の結果から考えると、 $|\Delta \varepsilon_i|$ に閾値を設定してフィンガ表面の接触状態を推定することも可能である。しかしながら、 $|\Delta \varepsilon_i|$ は剛体平板の移動速度によって変化する値であるため、このような推定法を適用すると一定の把持速度の場合にしか物体把持を行うことができない。

4. 把持力制御実験

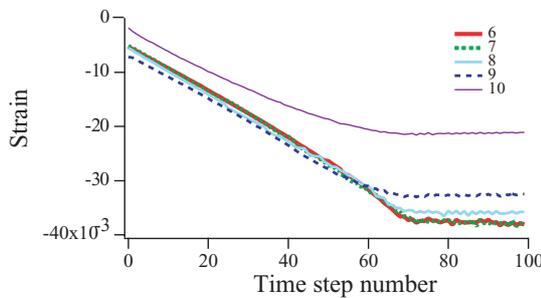
設計したフィンガ型センサを用いて、把持力制御実験を行なった。把持力制御アルゴリズムを Fig. 3 に示す。

まず、初期状態において把持力の目標値を与える。次に、把持力が目標値に達した段階で、 $|\Delta \varepsilon_5 - \Delta \varepsilon_6|$ と $|\Delta \varepsilon_{15} - \Delta \varepsilon_{16}|$ の比較を行う。これにより、2 軸あるひずみゲージ配列軸のうち、持ち上げ方向 (滑り発生方向) に近い配列軸を選択する。 $|\Delta \varepsilon_5 - \Delta \varepsilon_6| > |\Delta \varepsilon_{15} - \Delta \varepsilon_{16}|$ となった場合には、配列軸 (I) を選択し、 $|\Delta \varepsilon_5 - \Delta \varepsilon_6| < |\Delta \varepsilon_{15} - \Delta \varepsilon_{16}|$ となった場合には配列軸 (II) を選択する。

これ以降は、選択された配列軸により推定した固着点数に依存して、把持力増加曲線の傾き $\Delta Ft / \Delta Fn$ を変化させる。ただし、 Ft は持ち上げ力、 Fn は把握力である。



(a) array1



(b) array2

Fig. 2 Change in strain detected by strain gauges

質量 0.9 kg、静止摩擦係数 0.46 および 0.59 の物体を把持したときの把持力増加曲線を Fig. 4 に示す。静止摩擦係数が大きな物体の場合の方が、より小さな把握力により物体を把持できていることがわかる。また、物体把持が完了したときの把握力 F_n は、必要最小把握力の 1.5 倍程度であった。ヒトが 1.2~1.5 倍程度の力で把持動作を行っていること⁽²⁾を考えると、過度な把握力を加えることなく、適切な力で物体を把持できているといえる。

5. 結論

重量および摩擦係数が未知の物体を適切な力で把持するための球面状 2 軸弾性フィンガ型センサを設計した。また、有限要素解析の結果から、フィンガ表面と把持物体の接触状態判定法を検討し、実際に未知物体の把持力制御実験を行なった。その結果、本弾性フィンガ型センサにより適切な力で未知物体の把持を行えることを確認した。

参考文献

- (1) T. Maeno et al, "Control of Grasping Force by Detecting Stick/Slip Distribution inside an Elastic Finger," Proc. IEEE/RSJ Int. conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 1658-1663, 1998
- (2) R. S. Johansson et al, "Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control of Precision Grip When Lifting Rougher or More Slippery Objects, Exp. Brain Res., Vol. 56, pp. 550-564, 1984

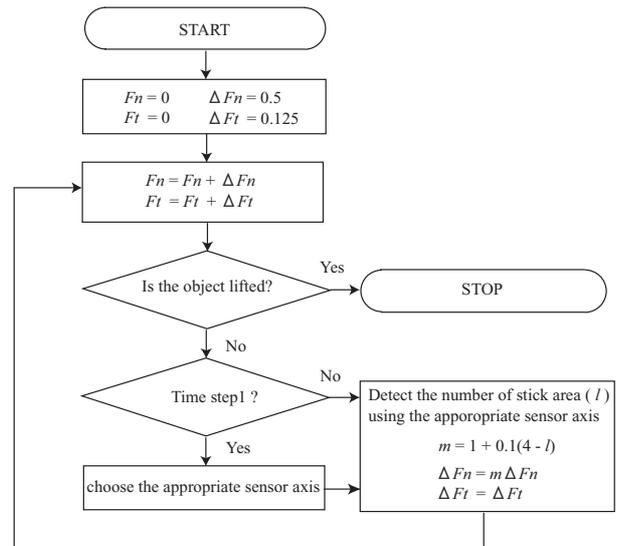


Fig. 3 Flow chart of the grasp force control scheme

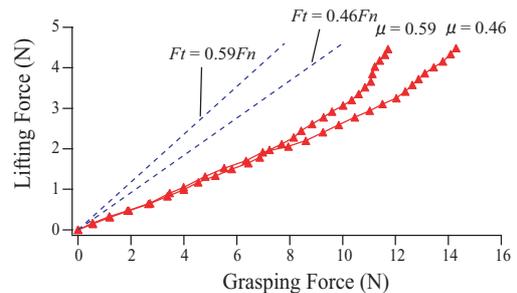


Fig. 4 Change in measured grasp force