

指紋状凹凸内部の分布触覚情報検出に基づく把持力制御用弾性フィンガの設計

Design of Elastic Finger Having Distributed Tactile Sensors underneath Ridges of Finger Surface for Controlling Grasping Force

学 山田 大介 (慶大) 正 前野 隆司 (慶大)
 正 山田 陽滋 (豊田工大)

Daisuke YAMADA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama
 Takashi MAENO, Keio University
 Yoji YAMADA, Toyota Technological Institute, 2-12-1, Hisakata, Tempaku-ku, Nagoya

An elastic finger for controlling grasping force is designed. Characteristics of the elastic finger are as follows: First, it has ridges at the surface and tactile sensors distributed underneath the ridges same as finger of human. Second, it has a curved surface in broad perspective. Third, it is made of an elastic silicone rubber so as to transform elastic deformation to the sensors. A Finite Element (FE) model of the elastic finger for conducting a dynamic contact analysis using a FE method is made in order to design the finger in detail. Then the elastic finger is made to conduct an experiment in same condition as for the analysis. As a result, it is confirmed that the elastic finger can detect partial incipient slippage that occurs at the edge of the contact area, even when the weight, friction condition between the elastic finger and grasping object and lifting speed are changed.

Key Words: Tactile Sensor, Precise Grasping, Biomimetics, Tribology, Dynamic contact problem

1. 緒論

ヒトは重量および摩擦係数が未知の物体を適切な力で把持し持ち上げることができる。このような把持をロボットによって実現するために、筆者ら⁽¹⁾⁻⁽³⁾はヒト指の特徴を模倣したロボットフィンガを開発してきた。しかし、一定の速度でしか物体を把持することができない、または物体をわずかながら滑り落とさなければ最適な把持力を算出できないといった問題があった。本研究では、これらの問題を解決するために、ヒト指の指紋等の特徴を模倣した新しい形状のロボットフィンガの構造を提案する。また、フィンガを有限要素法を用いて設計するとともに、実際に製作し、本フィンガによって初期局所滑りを検出できることを確認する。

2. ヒトの触覚受容機構に関する物理的考察

ヒトの把持力制御にはマイスナー小体の働きが重要であると言われている⁽⁴⁾。これは、ヒトが物体を滑り落とす直前に急激に興奮するマイスナー小体の信号によって滑りを予測し、物体を滑り落とすことなく把持できると考えられるからである。また、マイスナー小体は特定の周波数刺激に対して感度が高く、刺激の速度成分に対応して興奮するという性質を持っている。一方、ヒト指は、表面に指紋を有し、巨視的に曲率を持った構造となっており、皮膚は柔軟な弾性体で構成されている。また、マイスナー小体は指紋直下の真皮乳頭先端部に2列に配置されている。これらの点を考慮すると、ヒト指の触覚検出機構および把持力制御法は、次のようにな

っていると考えることができる。まず、ヒト指が物体を把持した際に物体の重量によって指紋がせん断変形するが、その大きさは指紋内部に配置された2つのマイスナー小体の応答の差を計算することにより検出できる(Fig. 1)。また、指が曲率を持っているために、接触面端部のみにおいて初期局所滑りが発生し、滑り状態に達した指紋はその固有振動数に依存した速度でせん断変形が開放される。その際、マイスナー小体は指紋のせん断変形の急激な速度変化を検出し、指紋が滑りに達したことを検出する。つまり、マイスナー小体の興奮によって初期局所滑りの発生を検出し、滑りを予測することによって、適当な把持力を求め、筋を制御していると考えられる。

3. フィンガの設計と特性評価

2章の考察を踏まえて、表面に指紋を有し巨視的に曲率を持った、Fig. 2に示すような弾性フィンガを考案し、その有限要素モデルを作成した。次に、作成したモデルを用いて、フィンガと剛体壁との動的接触問題を解析し、2体の接触状態とフィンガ内部のひずみとの関係を解析した。その結果、フィンガに対してFig. 3に示すような荷重を負荷したときに、指紋3内部の2点のひずみの差(以下「ひずみ」と呼ぶ)の速度および加速度が、Fig. 4に示すような応答を示した。これは指紋3の接触状態によく対応している。すなわち、指紋3が滑りに達したときにはひずみ速度が急激に減少し、それに伴ってひずみ加速度が絶対値 $4.0 \times 10^3 \text{ s}^{-2}$ 以上の大きさの応答を示した。また、指紋3が滑りに達したときに、より中央に位置する指紋では滑りが発生しなかったことから、指紋3において初期局所滑りが検出できたと言える。さらに、荷重

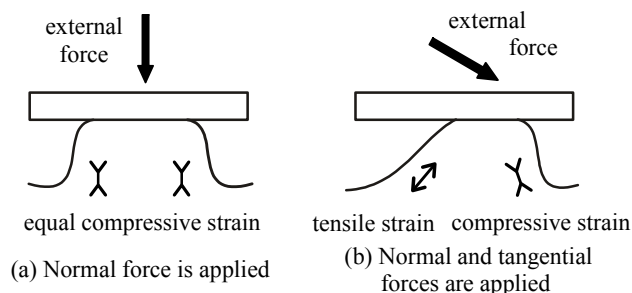


Fig. 1 Distribution of strain inside the ridge

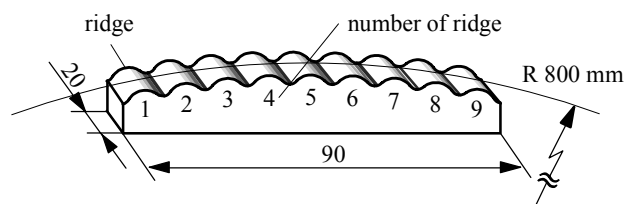


Fig. 2 Top view of designed artificial finger skin

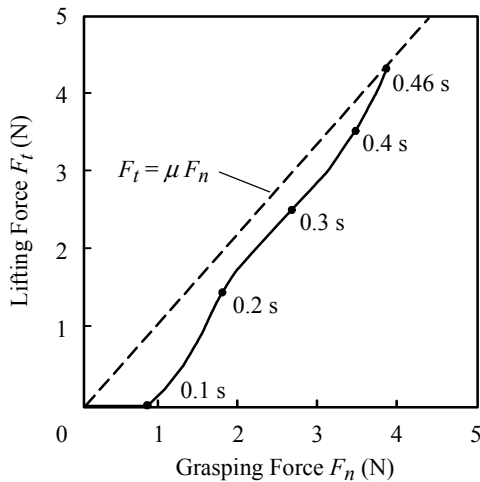
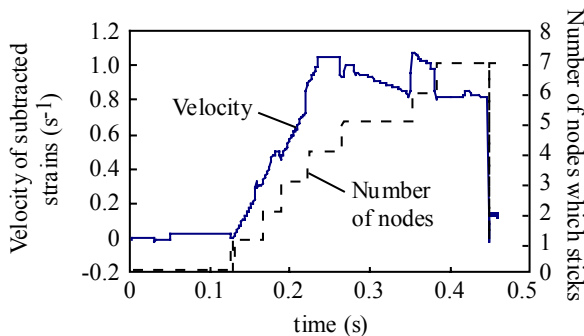


Fig. 3 History of external force

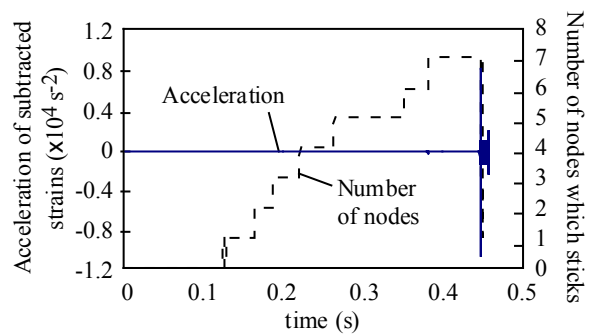
条件、摩擦条件および荷重を負荷する速度を変更して同様の解析を行った結果、指紋3において同様の結果が得られた。したがって、考案したフィンガによって、荷重条件、摩擦条件および荷重を負荷する速度によらず初期局所滑りを検出し、これを利用して把持力を制御することができる。

4. フィンガの製作と解析の検証実験

弾性体としてシリコンゴムを、センサとしてひずみゲージを用いて設計したフィンガを製作し、解析と同様の条件で荷重を負荷する実験を行った。その結果、指紋3において解析と同様の結果が得られた(Fig. 5)。特に、接触し始めてから約0.1 sの間に、ひずみ速度がほぼ一定の勾配で増加するという現象や、指紋3における滑りによって、ひずみ速度が急に減少し、ひずみ加速度が大きな振幅の応答を示すという現象が、実際に製作したフィンガにおいても発生することが確認された。したがって、解析結果は妥当であり、本フィンガ

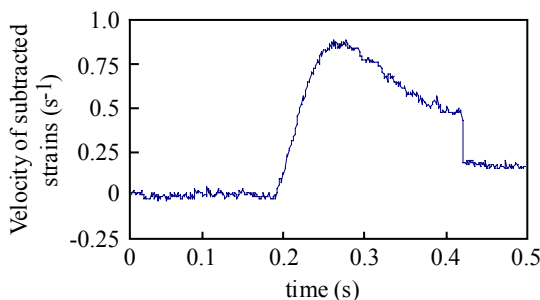


(a) Relationship between number of sticking nodes and velocity of subtracted strains

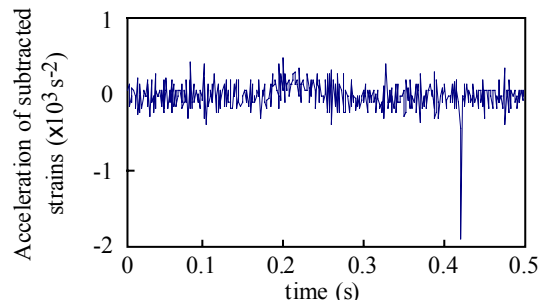


(b) Relationship between number of sticking nodes and acceleration of subtracted strains

Fig. 4 Results of analysis for third ridge



(a) History of velocity of subtracted strains



(b) History of acceleration of subtracted strains

Fig. 5 Results of experiment of third ridge

を用いて把持力を制御できると言える。なお、本研究では解析の妥当性を確認するためにセンサとしてひずみゲージを用いたが、今後はひずみ加速度を精度よく検出できるPVDFフィルムを用いることを考えている。

5. 結論

ヒトの触覚検出機構に関する物理的考察に基づき、ヒト指の特徴を模倣した指紋状凹凸を有する弾性フィンガを設計した。また、設計したフィンガを製作して荷重を負荷する実験を行い、解析結果が妥当であることを示した。今後は、開発したフィンガをロボットハンドに装着し、把持力制御実験を行う。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会基盤研究(B)課題番号 12450168 により行われた。

文献

- (1) T. Maeno, T. Kawai and K. Kobayashi, "Analysis and Design of a Tactile Sensor Detecting Strain Distribution inside an Elastic Finger", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp.1658-1663, 1998.
- (2) T. Maeno, S. Hiromitsu and T. Kawai, "Control of Grasping Force by Detecting Stick/Slip Distribution at the Curved Surface of an Elastic Finger", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3896-3901, 2000.
- (3) Y. Yamada, Y. Morita and Y. Umetani, "Slip phase isolating : impulsive signal generating vibrotactile sensor and its application to real-time object re-grip control", *Robotica*, Vol.18, No. 1, pp. 43-49, 2000.
- (4) R. S. Johansson and G. Westling, "Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses During the Precision Grip", *Exp. Brain Res.*, Vol. 66, pp. 141-154, 1988.