半球形弾性体を用いた荷重測定用柔軟接触センサの開発

Development of Flexible Contact Sensor for
Load Measurement Using Hemispherical Elastic Model

○ 久保田 和樹 (信州大) 正 中山 昇 (信州大)
 正 宋 星武 (信州大) 田中 航平 (信州大)
 福井 博章 (東亜電気工業) 鈴木 拓也 (スズキプレシオン)
 正 武石 洋征 (千葉工大)

Kazuki KUBOTA, Shinshu University
 Noboru NAKAYAMA, Shinshu University
 Sung-Moo SONG, Shinshu University
 Kohei TANAKA, Shinshu University
 Hiroaki FUKUI, Toa Electric Industrial
 Takuya, SUZUKI, Suzuki Precion
 Hiroyuku TAKEISHI, Chiba Institute of Technology

To prevent the gap falling of object, robot hand need to cover with a flexible sensor to obtain the load, load position, and load direction apply to the robot hand. A newly sensor consists of hemispherical elastic model and a load measurement layer, which is composed of an upper substrate, a lower substrate, and an electric conductive material was developed. Increasing or decreasing the load on the electric conductive material causes its internal resistance to change, allowing the measured voltage change between the upper and lower electrodes to be used to calculate the load applied to the sensor. In this study focused on the normal load applied to the sensor, and the position of normal load applied to sensor was changed, the relationship between normal load, position of normal load and voltage change was investigated.

Key Words : Sensor, Flexible Structure, Robot hand, Elasticity, Measurement.

1. 緒言

現在、医療・介護・福祉の分野でロボットの開発と導入が進み、義手やヒューマノイドロボットへの応用を目的としたロボットハンドが開発されている[1]。ロボットハンドには、硬さや形状の異なる対象物を適応的に把持する能力が備わっている必要がある。しかし、ロボットハンドは高荷重を負荷すると把持する対象物に損傷を与えてしまうことが考えられる。また、把持したい対象物のずれ落ち防止のために荷重の大きさと荷重が負荷される位置、荷重の方向を測定し、制御することが望まれる。そのため、ロボットハンドの指先に柔軟変形し、荷重の大きさ、荷重の方向および荷重の負荷される位置が測定できるセンサが必要である。また、指先に用いるセンサは、センシング面が半球などの曲面であることが望まれる[2]。

そこで、感圧導電性材料と弾性体を用いた三軸荷重測定用柔軟接触センサ[3]が挙げられる。このセンサは複数のゾーンから構成される荷重検出層をもち、各ゾーンで検出される電圧変化の関係から負荷される荷重を垂直成分とせん断成分に分離し測定することができる。

しかし、三軸荷重測定用柔軟接触センサは、センサ中心軸上以外の位置に負荷される荷重と電圧変化の関係が求められていないため、センサ中心軸上以外に負荷される荷重を測定することができない。

本研究では半球形弾性体を用い、センサ中心軸上以外に負荷される荷重の大きさ、荷重の方向および荷重の負荷される位置が測定でき、ロボットハンドの指先へ装着できるセンサの開発を目的とする。そこで、センサに負荷する垂直荷重の位置を変化させ、垂直荷重と電圧変化の関係および荷重の負荷される位置と電圧変化の関係を調べた。

2. センサの構成

図1にセンサの模式図を示す。本センサは柔軟な半球形弾性体と荷重検出層からなる。半球形弾性体のヤング率は0.404MPa、ポアソン比は0.492、直径は60mmである。荷重検出層は下部基板、固定フィルム、感圧導電性材料、上部基板の順に積層して構成されている。感圧導電性材料はポリカーボネート(PC)に気相成長炭素繊維(VGCF)を質量比で20%添加したPC/20wt%VGCFを使用し、サイズは65×65mm、厚さ0.1mmである。上部基板にはポリイミド製のフレキシブル基板、下部基板にはガラスエポキシ製の感光基板を使用した。上部基板の電極は図1に示すような4つのゾーンを、x軸の正方向を基準にゾーン1とし、反時計回りにゾーン2、ゾーン3、ゾーン4と定義する。

Fig. 1 Composition of the sensor.

図2に作製したセンサの回路図を示す。PC/20wt%VGCFは荷重が負荷されることで電気抵抗値が変化するため可変抵抗として考えられるため、図2のように表わすことができる。また、上部電極の各ゾーンに抵抗値 $R=100\Omega$ の固定抵抗を接続することで、各ゾーンの可変抵抗を固定抵抗で分圧したものを並列に構成した並列回路となっている。

また、荷重を導出する際に電源電圧 V_0 の値が含まれないように各ゾーンの可変抵抗に置き換えられた部分に生じる電圧を $V_m(m=1,2,3,4)$ と定義し、電源電圧 V_0 から各ゾーンの電圧変化の差をとったものを各ゾーンの電圧変化量 $dV_m(m=1,2,3,4)$ と定義する。各ゾーンの電圧変化量から荷重の導出を行うため、上下電極間の電圧測定を行った。

Fig. 2 The circuit diagram of a sensor.

3. 実験方法

本研究では精密万能試験機(EZ-L-500N, (株)島津製作所)を用いて実験をおこない、センサの任意の位置に垂直荷重を負荷し、荷重の大きさおよび負荷位置と各ゾーンの電圧変化の関係を調べた。そこで、センサ中心軸からの距離を Δr と定義し、ゾーン1からの角度をゾーン1から反時計回りの角度を ϕ と定義する。そこで、センサ中心軸からの距離 Δr を $\Delta r=0, 5, 10, 15\text{mm}$ と変化させ、ゾーン1から反時計回りの角度を $\phi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と変化させ垂直荷重 P_n の負荷をおこなった。センサの圧縮には直径 5.0mm の半球ジグを用い、荷重負荷速度 3.0mm/min とし、垂直荷重 P_n を押し込み変位量 $\Delta h=15\text{mm}$ まで負荷した。電圧の供給には安定化電源を用い、9V一定で実験を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 垂直荷重の実験結果

図3に $\phi=0^\circ, \Delta r=0$ における垂直荷重 P_n と各ゾーンの電圧変化 $V_m(m=1, 2, 3, 4)$ の関係を示す。垂直荷重 P_n の増加に伴い、各ゾーンの電圧 V_m が減少していることが確認できる。また、センサの中心に垂直荷重が負荷されることで各ゾーンに均一に荷重が負荷されるため、各ゾーンの電圧 V_m は同様に変化していることがわかる。

図4(a), (b)に $\phi=0^\circ, \Delta r=0, 15\text{mm}$ のときの垂直荷重 P_n と各ゾーンの電圧変化量 $dV_m(m=1, 2, 3, 4)$ の関係を示す。図4(a)より、 $\Delta r=0\text{mm}$ のとき垂直荷重が増加するに従い全てのゾーンの電圧変化量が同様に増加することがわかる。図4(b)より、 $\Delta r=15\text{mm}$ のとき x 軸の正方向へ位置を変化させ荷重を負荷しているため、 $\Delta r=0\text{mm}$ のときと比べてゾーン1に負荷される荷重が増加し、ゾーン1の電圧変化量が増加していることがわかる。また、ゾーン3に負荷される荷重が減少しているためゾーン3の電圧変化量が減少していることがわかる。また、x軸上に荷重を負荷しているため、ゾーン2、ゾーン4には均一に荷重が負荷され、電圧変化量が同様に変化していることがわかる。

Fig. 3 Relationship between P_n and voltage change V_m in each zones ($m=1, 2, 3$, and 4) for $\Delta r=0\text{mm}$.

Fig. 4 Relationship between P_n and voltage change dV_m in each zone ($m=1, 2, 3$, and 4) for $\Delta r=0\text{mm}$ and $\Delta r=15\text{mm}$.

4.2 センサ中心からの距離の測定

式(1)に示すように、各ゾーンの電圧変化量の総和 V を定義し、式(2)に示すように、電圧変化の x 成分を V_x 、電圧変化の y 成分を V_y と定義する。 V_x, V_y から、距離 Δr と関係を持つ ΔV を式(3)に示すように定義する。

$$V = dV_1 + dV_2 + dV_3 + dV_4 \quad (1)$$

$$V_x = dV_1 - dV_3, \quad V_y = dV_2 - dV_4 \quad (2)$$

$$\Delta V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3)$$

図5に $\phi=0^\circ$ における各ゾーンの電圧変化量の総和 V と電圧変化 ΔV の関係を示す。各ゾーンの電圧変化量の総和 V と電圧変化 ΔV の関係は垂直荷重 P_n が 5N となる前後でモードが異なる。そこで、図6(a)に垂直荷重 P_n が 5N 以下の場合における電圧変化量の総和 V と電圧変化 ΔV の関係を示す。

このとき電圧変化量の総和 V と電圧変化 ΔV の関係から導かれる傾きを係数 k_1 と定義し式(4)に示す。

$$k_1 = \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

係数 k_1 とセンサ中心からの距離 Δr の関係は図7(a)に示され、式(5)のように最小二乗法を用いて1次関数で近似できる。

$$\Delta r = 39.62k_1 \quad (5)$$

また、図 6(b)に垂直荷重 P_n が 5N 以上の場合における電圧変化量の総和 V と電圧変化 ΔV の関係を示す。このとき電圧変化量の総和 V と電圧変化 ΔV の関係から導かれる傾きを係数 k_2 と定義し式(6)に示す。ここで、 a は切片であり、今回は実験結果から得た値を用いた。

$$k_2 = \frac{\Delta V - a}{V} \quad (6)$$

係数 k_2 とセンサ中心からの距離 Δr の関係は図 7(b)に示され、式(7)のように最小二乗法を用いて 2 次関数で近似することができる。

$$\Delta r = -219.6k_2^2 + 106.8k_2 + 1.976 \quad (7)$$

よって、式(5)、式(7)を用いることで、各ゾーンの電圧変化量を測定することで、垂直荷重の負荷されるセンサ中心からの距離 Δr を求めることができる。そこで、センサ中心から任意の位置に負荷した垂直荷重 P_n とセンサ中心からの距離 Δr の関係を図 8 に示す。図 8 から、本センサは各ゾーンの電圧変化量を測定し、垂直荷重の負荷されるセンサ中心からの距離 Δr を求められることがわかった。

Fig. 5 Relationship between total voltage change V and amount of voltage change ΔV for $\Delta r=0, 5, 10, 15\text{mm}$.

Fig. 6 Relationship between total voltage change V and amount of voltage change ΔV for $\Delta r=0, 5, 10, 15\text{mm}$.

Fig. 7 Relationship between coefficient k and distance from the center of sensor Δr .

Fig. 8 Relationship between normal load P_n and distance from the center of sensor Δr .

4.3 ゾーン 1 からの角度の測定

図 9 に $\Delta r=15\text{mm}$ のときの電圧変化 V_x と V_y の関係を示す。角度 ϕ と電圧変化の関係式を式(8)に示す。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_x}{V_y} = \tan^{-1} \frac{dV_2 - dV_4}{dV_1 - dV_3} \quad (8)$$

よって、式(8)に測定した電圧変化を代入することで、ゾーン 1 からの角度 ϕ を求めることができる。

したがって、各ゾーンの電圧変化量の関係からセンサ中心からの距離 Δr とゾーン 1 からの角度を求めることで、センサに負荷される荷重の位置を測定可能であることがわかった。

Fig. 9 Relationship between voltage difference V_x and V_y for $\phi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ($\Delta r=15\text{mm}$).

4.4 垂直荷重の大きさの測定

図 10 に Δr を変化したときの垂直荷重 P_n と各ゾーンの電圧変化量の総和 V の関係を示す。センサ中心からの距離 Δr

の増加に伴い、同一の垂直荷重において各ゾーンの電圧変化量の総和 V が減少していることがわかる。

そこで、 $\Delta r=0\text{mm}$ の場合における垂直荷重 P_n と各ゾーンの電圧変化量の総和 V の関係をマスターカーブとし、マスターカーブに係数 c をかけることで、センサ中心からの距離 Δr のときの垂直荷重 P_n と各ゾーンの電圧変化量の総和 V の関係が求められる。各距離 Δr における垂直荷重 $P_n=40\text{N}$ のときの、各ゾーンの電圧変化量の総和を $V_{\Delta r}$ とすると、係数 c は、式(9)で求めることができる。

$$c = \frac{V_{\Delta r}}{V_{\Delta r=0}} \quad (\Delta r = 0, 5, 10, 15\text{mm}) \quad (9)$$

求めた係数 c とセンサ中心からの距離 Δr の関係を図 11 に示す。この関係を最小二乗法を用いて 2 次関数で近似した結果を式(10)に示す。

$$c = 0.001198 \Delta r^2 - 0.004189 \Delta r + 1 \quad (10)$$

ここで、マスターカーブを最小二乗法を用いて 5 次関数で近似し、式(9)の係数 c を適用することで式(11)となる。

$$P_n = 0.00005505 \left(\frac{V_{\Delta r}}{c} \right)^5 - 0.001157 \left(\frac{V_{\Delta r}}{c} \right)^4 + 0.017 \left(\frac{V_{\Delta r}}{c} \right)^3 + 0.05164 \left(\frac{V_{\Delta r}}{c} \right)^2 + 0.7717 \left(\frac{V_{\Delta r}}{c} \right) \quad (11)$$

よって、式(11)を用いることで、 Δr の位置に負荷される垂直荷重 P_n を測定することができる。

Fig. 10 Relationship between normal load P_n and total voltage change V for $\Delta r = 0, 5, 10, 15\text{mm}$.

Fig. 11 Relationship between distance from the center of sensor Δr and coefficient c .

4.5 z 方向の押し込み量の測定

図 12 に Δr における垂直荷重 P_n と z 方向の押し込み量 Δh の関係を示す。 Δr が変化しても垂直荷重と z 方向の押し込み量の関係は同様に变化する。この関係を最小二乗法を用いて 3 次関数で近似した結果を式(12)に示す。

$$\Delta h = 0.00005323 P_n^3 - 0.008308 P_n^2 + 0.5965 P_n \quad (12)$$

よって、式(12)に垂直荷重を代入することで、 z 方向の押し込み量 Δh を求めることができる。

Fig. 12 Relationship between P_n and Δh for $\Delta r = 0, 5, 10, \text{ and } 15\text{mm}$ ($\phi = 0^\circ$).

5. 結言

ロボットハンドへ装着し、荷重の大きさ、負荷位置および方向を測定できるセンサの開発を目的とし、本研究では、センサに負荷する垂直荷重の位置を変化させ、垂直荷重の大きさと電圧変化の関係および垂直荷重の負荷位置と電圧変化の関係を測定した結果、以下のことがわかった。

- (1) 各ゾーンの電圧変化量を測定することで、垂直荷重の大きさ、垂直荷重の負荷されるセンサ中心からの距離およびゾーン 1 からの角度が求められる。
- (2) 垂直荷重の大きさから z 方向の押し込み量を求められる。

以上、荷重測定用柔軟接触センサの電圧変化を測定することで、センサに負荷される垂直荷重の大きさおよび負荷位置の測定が可能である。

現段階では、センサは大きなモデルで実験を行ったが、今後センサの小型化をすることで、ロボットハンドの指先に装着し、把持の制御を行えると考える。

文 献

- [1] 中本祐之, 小林太, 今村信明, 白沢秀則, 小島忠男, 連続 DP を用いたユニバーサルロボットハンドによる回転操作中物体の外周形状識別, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 74, No.746, pp.2521-2527, 2008.
- [2] 大岡昌博, 小林弘明, 高田純平, 三矢保永, 半球形光学式三軸触覚センサの開発, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 74, No. 742, pp.1477-1484, 2008.
- [3] 小林貴人, 中山昇, 宋星武, 武石洋征, 導電性材料を用いた三軸荷重測定用柔軟接触センサの開発, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 76, No. 766, pp.130-139, 2010.