

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：57403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700223

研究課題名(和文) ホール素子有感圧感温受容器として弾性材料に埋め込んだ柔軟人工指の作製

研究課題名(英文) Soft artificial fingertip with Hall elements as a pressure-temperature sensitive device embedded in elastic material

研究代表者

湯治 準一郎 (YUJI, Junichiro)

熊本高等専門学校・機械知能システム工学科・准教授

研究者番号：80332104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ホール素子と永久磁石の位置変化による接触力検出とホール素子自体の温度特性を利用した温度検出の両機能を有する人工指や人工皮膚の構成手法の提案を目的とする。接触力と温度の同時検出を行うために、2つのInSbホール素子と永久磁石を弾性材料に埋め込んだ2種類の人工指を作製した。本研究の特徴は、これら2つのホール素子は、それぞれ定電流駆動と定電圧駆動によってホール電圧を出力し、その2種類のホール電圧から応答曲面関数によって、入力情報である接触力と温度を同時に求めることである。実験結果より、InSbホール素子のみで接触力と温度を同時に検出しうることを示された。

研究成果の概要(英文)：A magnetic multifunctional tactile sensing method with Indium antimonide (InSb) Hall elements for artificial fingertip to detect simultaneously normal contact force and temperature was investigated. A trial artificial fingertip consists of Hall elements and a magnet that are embedded in a silicone rubber. The temperature characteristic of InSb Hall elements depends on the bias circuit to generate the Hall voltage. Two output Hall voltages driven by two kinds of bias circuits are used to formulate the inverse response surface. This inverse response surface detected the normal contact force and the temperature by using only two Hall voltages.

研究分野：センシング工学

科研費の分科・細目：情報学 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：触覚センサ 皮膚感覚 人工指 ホール素子

1. 研究開始当初の背景

人間の指先の感覚機能や形状を模倣した多機能型触覚センサの研究が、様々な方法やセンサ材料を用いて試みられている。その中で、電磁誘導や磁気抵抗素子を用いた柔軟な磁気式触覚センサが提案され、接触圧や滑りの検出が可能となっているが、これらの磁気式センサはカベクトルの計測が容易に構成できる特徴があるものの、温度検出機能がないため、皮膚の複合感覚による対象物の特性評価や皮膚感覚模倣型の触覚センサとして利用されるまでには至っていない。

そこで研究においては、主にモータ駆動用の磁気センサとして用いられているホール素子と永久磁石の位置変化による接触力検出とホール素子自体の温度特性を利用した温度検出の両機能を有する柔軟人工柔軟指の作製を目標とする。

2. 研究の目的

ホール素子には、主に GaAs (ガリウム砒素)、InSb (インジウムアンチモン) などの化合物半導体が用いられているが、特に InSb ホール素子は、定電流駆動では高感度になるものの、温度依存性が大きくなる特徴を有している。そこで本研究では、この InSb ホール素子の温度依存性に着目し、3年間で(1)ホール素子を用いた感圧感温機能の検証と(2)ホール素子を弾性材料に埋め込んだ人工指の製作を目的とした。

(1)では、市販のホール素子を用いて磁界変化による感圧機能とホール電圧の温度依存性を利用した感温機能の検証実験を行い、多機能触覚センサ素子としての利用可能性の提示が主な内容である。

(2)では、(1)の結果を踏まえて、多機能ホール素子の数個を弾性材料に配置した人工皮膚および骨から成る人工指の作製と評価が主な内容である。最終的には単一ホール素子を皮膚に点在する感圧感温受容器としての利用を目指した研究である。

3. 研究の方法

(1)ホール素子を用いた感圧感温機能の検証

ホール素子は、半導体のホール効果を利用して磁界を電圧に変換する二つの入力端子と二つの出力端子を有する磁気センサである。図1にホール素子の原理と駆動方法を示す。発生するホール電圧は、定電流駆動の場合では、駆動電流(制御電流) I_c に比例し、定電圧駆動では、駆動電圧 V_c に比例する。

そこで、駆動方法の違いによる磁界特性と温度特性を調べ、感圧感温機能が実現しうるかどうかが評価する。ホール素子は、高感度 InSb ホール素子 (HW-302B, 旭化成エレクトロニクス社製) を用い、定電流回路と定電圧回路は演算増幅器 (OP アンプ) を用いて構成した。

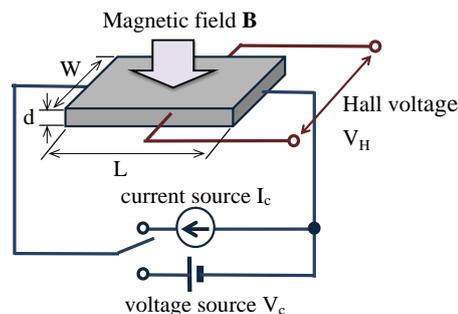


図1 ホール素子の原理と駆動方法

図2に2種類の駆動方法による InSb ホール素子のホール電圧-磁束密度特性を示す。どちらも磁束密度に比例したホール電圧を出力しているが、定電圧駆動の場合には、磁気抵抗効果の影響により、入力抵抗が増加するため、定電流駆動より感度が悪くなっている。

図3(a)に定電流駆動、同図(b)に定電圧駆動におけるホール電圧の温度特性を示す。定電流駆動の場合には、キャリア密度 n の温度特性により、ホール電圧は大きく減少しているが、定電圧駆動の場合には、入力抵抗の温度依存性(負の温度係数)によって変化が相殺されるため、温度係数が小さくなっている。

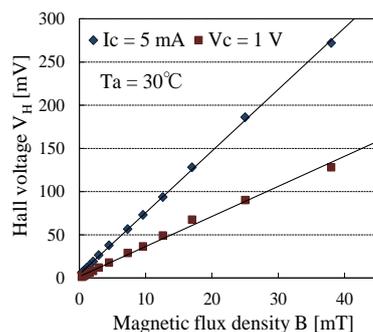
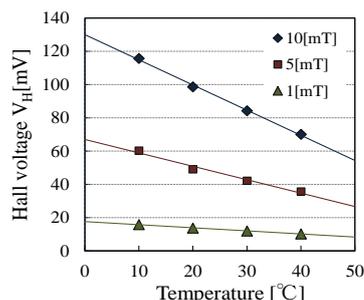
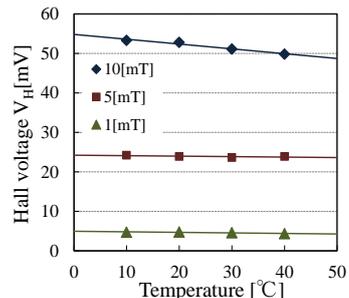


図2 ホール電圧-磁束密度特性



(a) 定電流駆動 ($I_c = 5 \text{ mA}$)

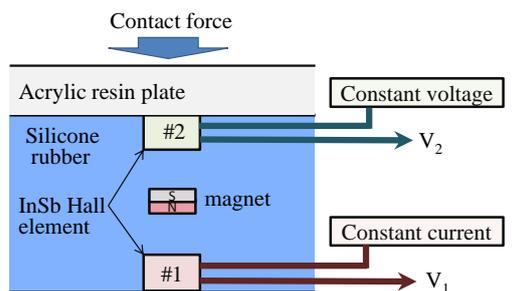


(b) 定電圧駆動 ($V_c = 1 \text{ V}$)

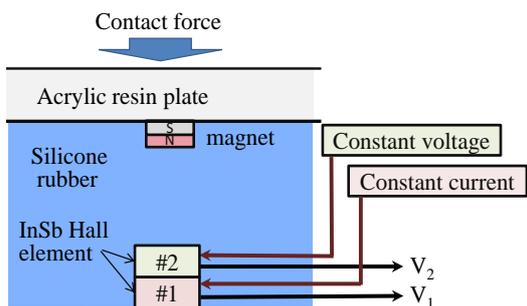
図3 ホール電圧-温度特性

以上の実験結果より、定電流駆動の場合には、磁束密度に対する感度は高いが、温度依存性も大きく現れ、定電圧駆動の場合には、磁束密度に対する感度は小さくなるが、温度依存性が小さくなる事が確認できる。したがって、磁界の変化を利用した接触力センシング、ホール素子の温度依存性を利用した温度センシングを同時に行うために、図4に示す2種類の人工指を作成し、評価する。

図4(a)は、2個のInSbホール素子の片方をアクリル板側（人工骨に対応）、もう片方を表面側に設置し、その間に永久磁石を埋め込む構造（これをタイプ1とする）である。表面側は外界や対象物の温度の影響を強く受けるように定電流駆動、アクリル板側は、温度の影響を受けないように定電圧駆動とする。一方、図4(b)は、表面側のみに2個のホール素子を重ね合わせて配置し、磁石は埋め込まずにアクリル板側に配置する構造（これをタイプ2とする）である。ここでは、この2個の重ね合わさったホール素子を単一の感圧感温受容器とみなす。ホール素子は、それぞれはタイプ1と同じように駆動する。このタイプ2は、磁石をシリコンゴム内に埋め込む必要が無いため、製作が簡便化される。どちらも、ホール素子は、磁界が増加するとホール電圧が正となる向きに配置する。



(a) 2個のInSbホール素子を用いた構造（タイプ1）



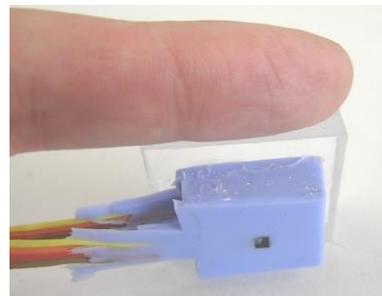
(b) 2個のホール素子を重ね合わせて表面側のみに配置した構造（タイプ2）

図4 人工指の構造

接触力が加わり、磁石とホール素子の間隔が狭くなることによって磁界は増加するため、ホール電圧は増加する。また、ホール素子周辺のシリコンゴムの温度によってもそれぞれ変化する。したがって、異なる駆動方法により得られた2種類のホール電圧を

データ処理することによって、縦方向の接触力と温度の検出を行う。ホール素子#1の出力電圧を V_1 、#2の出力電圧を V_2 とする。

図5(a)にタイプ1、同図(b)にタイプ2の概観を示す。タイプ1は板状に形成したが、タイプ2は指形状を模して半円柱型としている。タイプ2からはInSbホール素子HW-322B（HW-302Bの後継製品）を用いている。



(a) タイプ1の概観



(b) タイプ2の概観

図5 作製した人工指

図6にセンシングの流れを示す。それぞれのホール素子には、依存性は異なるものの、接触力と温度の混在情報が入力され、その複合された結果としてのホール電圧が出力される。それら2つのホール電圧をデータ処理（関数）によって、入力情報である接触力と温度に分離して求める手法を提案する。

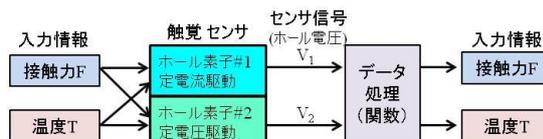


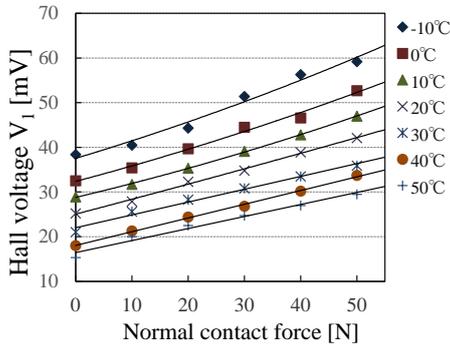
図6 センシングの流れ

実験は、図7に示す電動接触力実験装置、デジタルマルチメータ、小型環境試験器（恒温恒湿槽）を用いて行う。

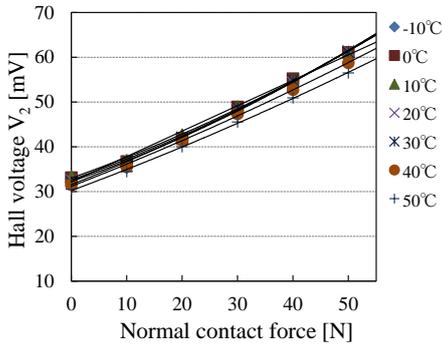


図7 実験装置

図8にタイプ1, 図9にタイプ2の温度可変時の接触力特性を示す. タイプ2においては, V_1 (定電流駆動) は75倍, V_2 (定電圧駆動) は150倍に増幅された結果である.

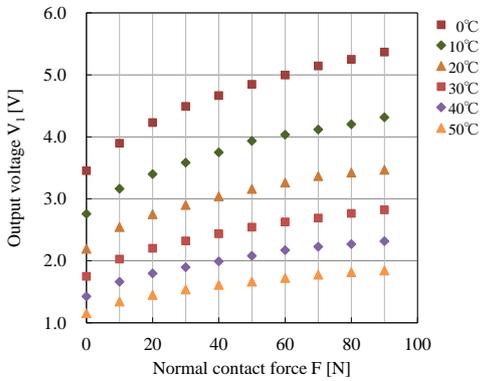


(a) 定電流駆動

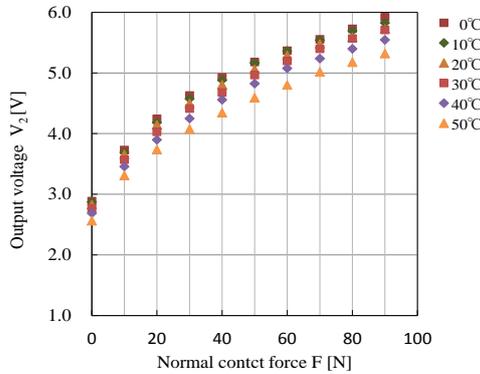


(b) 定電圧駆動

図8 タイプ1の特性



(a) 定電流駆動 (75倍に増幅)



(b) 定電圧駆動 (150倍に増幅)

図9 タイプ2の特性

どちらの構造においても, 定電流駆動の V_1

は温度の影響を大きく受けているが, 定電圧駆動の V_2 はその影響は小さくなっている. 図8 (タイプ1) より, 接触力に対する変化率は, V_2 (定電圧駆動) が V_1 (定電流駆動) よりも大きくなっているが, これは, 磁石の配置位置が#2側にずれており, ホール素子と磁石の距離が異なっているためと考えられる. 図9においても同様のことが言えるが, こちらは, ホール素子#2 (定電圧駆動) と磁石の距離が, ホール素子#1 (定電流駆動) よりもホール素子の厚さだけ短いためである.

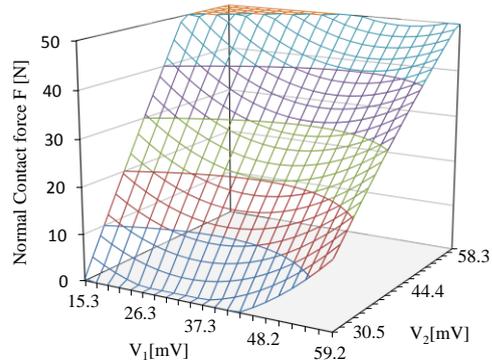
そこで, これらの特性をもとに, 入力情報である接触力 F と温度 T を求める2変数の応答曲面関数を導出する. 接触力 F と温度 T の応答に対する近似関数 f として, 次の2次多項式を用いた.

$$f(V_1, V_2) = \beta_0 + \beta_1 V_1 + \beta_2 V_2 + \beta_3 V_1^2 + \beta_4 V_2^2 + \beta_5 V_1 V_2 \dots (1)$$

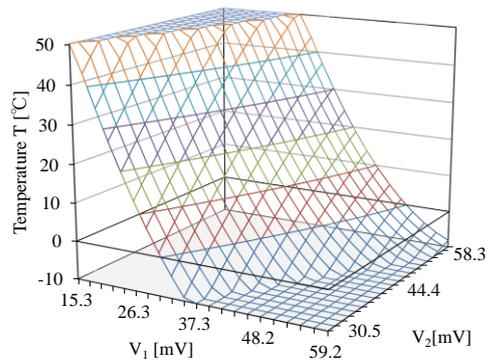
(1)式と接触力 F および温度 T の設定値との差の二乗和を求め, これが最小となるように, 係数 β を算出した. 式(2), (3)にタイプ1, 式(4), (5)にタイプ2の応答関数を示す. また, これらの関数を3次元グラフで示したものが, 図10, 図11である.

$$F = -79.5 - 4.51 \times 10^{-1} V_1 + 3.26 V_2 + 2.12 \times 10^{-2} V_1^2 - 5.54 \times 10^{-3} V_2^2 - 2.65 \times 10^{-2} V_1 V_2 \dots (2)$$

$$T = 25.2 - 4.63 \times 10^{-1} V_1 + 3.63 V_2 + 5.06 \times 10^{-2} V_1^2 - 1.08 \times 10^{-2} V_2^2 - 3.27 \times 10^{-2} V_1 V_2 \dots (3)$$



(a) 接触力 F



(b) 温度 T

図10 タイプ1の応答曲面関数の3次元表示

$$F = -64.2 - 1.88V_1 - 46.8V_2 + 3.94V_1^2 + 11.3V_2^2 - 6.23V_1V_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$T = 60.4 - 35.9V_1 + 10.2V_2 + 3.28V_1^2 - 1.74 \times 10^{-1}V_2^2 - 4.47 \times 10^{-1}V_1V_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

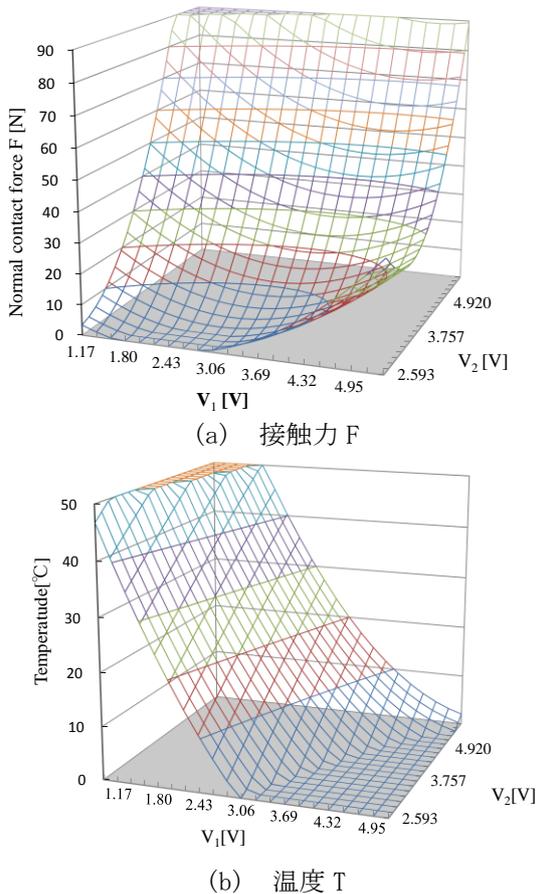


図 11 タイプ 2 の応答曲面関数の 3 次元表示

これらの結果より、2 種類のホール電圧 V_1 , V_2 が得られると、この曲面関数を用いて接触力 F と温度 T が一意に求まることが示された。

図 12 は、2 つのホール電圧を PC に取り込み、応答曲面関数によって接触力 F と温度 T を表示するプログラムの実行例を示す。複数の接触力 F と温度 T の組み合わせで関数の評価実験を行った結果、接触力においては $\pm 0.5\text{N}$ 、温度においては $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で検出できることが確認された。

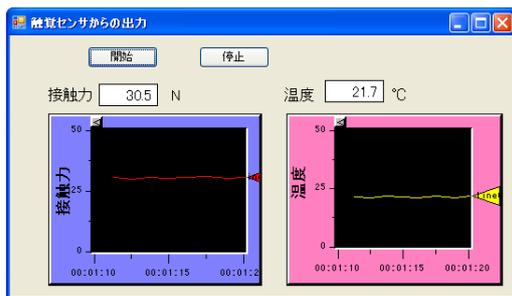


図 12 PC 上で接触力 F と温度 T を同時に表示するプログラムの実行例

4. 研究成果

本研究では、ホール素子と永久磁石の位置変化による接触力検出とホール素子の温度特性を利用した温度検出の両機能を有する人工指の構成に関する一手法を提案した。ここでは、InSb ホール素子自体の温度依存性に着目し、接触力と温度の同時検出を行うために、2 つの InSb ホール素子と永久磁石を弾性材料に埋め込んだ 2 種類の人工指を作製した。本研究の特徴は、これら 2 つのホール素子はそれぞれ定電流駆動と定電圧駆動によってホール電圧を出力し、その 2 種類のホール電圧から応答曲面関数によって、入力情報である接触力と温度を同時に求めることである。実験結果より、InSb ホール素子のみで接触力と温度を同時に検出することが示された。本手法は、データ処理のプロセスが必要となるが、弾性材料内に組み込むセンサ素子を同種類の素子とすることが可能なため、皮膚感覚のように複数の感覚情報を検出する場合には、構成が簡単化される利点がある。

タイプ 2 において、2 個のホール素子を単一の感圧感温受容器とみなしたが、最終的には単一ホール素子のみで同じ機能を持たせるために、アナログスイッチを用いて駆動回路を切り替えながら時分割で二種類のホール電圧を取得する実験を行った。この結果、駆動方法を切り替えながら、二種類のホール電圧を取得・分離し、それぞれのホール電圧を計装アンプで増幅して出力できることを確認した。これによって、単一の InSb ホール素子、二つの駆動源、スイッチング回路等により構成できるため、シリコンゴムへ組み込むホール素子数および配線数の減少が期待できる結果が得られた。しかしながら、それらが一体形となった人工指システムの完成まで至っていないため、システム全体の作製と評価が今後の課題である。

また、磁気式センサは磁界変化を利用しているため、外部磁界の影響を受けやすいことから、使用場所や接触対象物の材質が限定されてしまう問題が生じるが、それらの影響が極めて小さい環境や対象物（非磁性金属、絶縁物、農産物等）に限定して利用することによって今後の展開が期待される。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

① Jun-ichiro Yuji, Kaito Tanimura, Application of Hall element as multimodal sensing device for artificial skin, SPIE Smart Structures and Materials+NDE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 8692-129, March 12(Tue.), 2013, San Diego, USA

②湯治準一郎, 白木翔太, InSb ホール素子の温度特性を利用した磁気式触覚センシング, 計測自動制御学会計測部門 第30回センシングフォーラム資料, pp.296-300, 2013年8月30日(金), 信州大学繊維学部(上田キャンパス)

③ Jun-ichiro YUJI, Shota Shiraki, Magnetic tactile sensing method with Hall element for artificial finger, Proceedings of the 7th International Conference on Sensing Technology (ICST2013), pp.311-315, December 4, 2013, Massey University, Wellington, New Zealand

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 触覚センサ

発明者: 湯治準一郎

権利者: 独立行政法人国立高等専門学校機構

種類: 特許

番号: 2012-078840

出願年月日: 平成24年3月30日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯治 準一郎 (YUJI JUNICHIRO)

熊本高等専門学校・機械知能システム工学
科・准教授

研究者番号: 80332104