

非接触ハイトセンサ

Non-contact Height Sensor

清水 信 吉⁽¹⁾ 清水 慎 二⁽²⁾ 一津屋 正 樹⁽³⁾
Nobuyoshi Shimizu Shinji Shimizu Masaki Hitotuya

要 旨

リニア出力型の磁気抵抗素子には、非接触検出、アナログ出力、広い使用温度範囲といった特長がある。非接触型ハイトセンサはこの素子を応用したもので、自動車用に適している。

しかし、センサの実用化にあたっては、信号発生部である磁気部品とそれを補完する信号処理回路を適切に設計して、直線性や精度など、制御システムからの要求を満足する必要がある。さらにその他の周辺部品についても、自動車での使用条件を考慮した設計が必要である。

本稿は、これらハイトセンサ実用化のための技術を紹介するものである。

The linear output-type magneto-resistive element is characterized by non-contact detection, analog output and the usage in wide- ranging temperatures. This element is applied to non-contact height sensor which is suitable for automotive use.

In tailoring the sensor for practical use, however, it is necessary to appropriately design the signal-emitting magnetic parts and its supplementary signal-processing circuit and further to meet the requirements imposed by control system in terms of linearity and accuracy. Regarding the peripheral components, it is also vital to design them, taking into consideration the conditions set by automotive usage.

This paper is aimed at introducing the technology to put these height sensors to practical use.

(1) 富士通(株)機構部品事業部開発部

(2)、(3) モートロニクス本部技術部

1. はじめに

ハイトセンサ（車高センサ）は、自動車の車体の上下方向変位を検出するセンサである。このセンサは、車高調整制御システムやサスペンション制御システムなどの、いわゆる足まわり制御に多く用いられている。これらのシステムは、走行安定性や乗りごちなどの向上が目的で、最近の高級車やスポーティー車には、必ずと言ってよいほどこのようなシステムの設定がある。

これらのシステムに用いられるセンサには信頼性や耐久性のほか、高速制御に適した応答性や分解能が特に求められる。以下に紹介するリニア型磁気抵抗素子を応用したハイトセンサは、これらの要求をよく満足するものである。

なお内容の一部が当技報1989年10月号（Vol. 7, No.2）に掲載した「磁気抵抗素子の車載用センサへの応用」と重複するが、本稿は、特にハイトセンサの実用化技術について、磁気設計を中心として詳細に紹介するものである。

2. ハイトセンサの概要

2. 1 センサの構造¹⁾

ハイトセンサの検出対象は、車体フレームとサスペンションアーム（タイヤ取付け部付近）の相対変位である。この相対変位はほぼ直線的な運動であるので、この動きをそのまま検出できれば自然である。しかし、直線型のセンサは、大きさや防水の面で構造設計が難しいため、現行市販車にはすべて図-1のような回転型が用いられている。本稿で紹介するセンサも回転型である。

回転型は、リンク機構を用いて直線運動を回転運動に変換して用いるものである。センサは、本体を車体フレーム側に固定し、リンク機構の先端

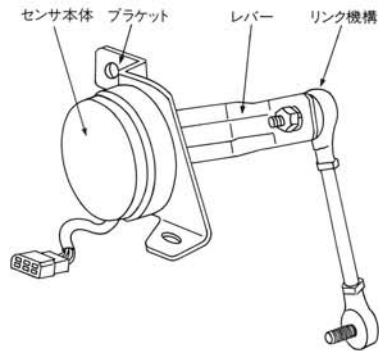


図-1 ハイトセンサの構造
Fig.1 Structure of height sensor

をサスペンションアームに接続して用いられる。サスペンションアームの相対変位は、リンク機構によって回転運動に変換され、センサの回転軸に伝わるようになっている。

2. 2 各種の検出原理

回転軸の回転を電気信号に変換する方法については、いくつかの方式がある。

2. 2. 1 光学式

その一つは光学式のもので、ホトインタラプタとスリット板を組み合わせた光学系を利用する構造である。¹⁾この方式は構造が簡単で、非接触検出であるため磨耗部品がなく、また精度を非常に高めることもできる。

しかし、出力信号がデジタル信号であるため、基本的には1または0の2種類の車高しか検出できない。検出分解能を高めるためには、インクリメンタル型かアブソリュート型にする必要があり、センサの構造がやや複雑になる。

2. 2. 2 摺動抵抗式

アナログ電圧出力のセンサとして、摺動抵抗式

がある。この方式は構造が単純で部品数も少なく、さらに信号処理のための電子回路を要しないという利点がある。抵抗体として導電性プラスチック(Conductive Plastic)を使用することにより、直線性の非常に優れたものが製作されている。

しかし、検出部が摺動ブラシと抵抗体との線(または数個の点)接触であるため、センサの動的な性能が摺動部の機械的な動きで決定されてしまうという難点がある。自動車用として振動の多い環境で用いる場合、摺動ブラシのパウンドによるデータ飛びに対する考慮や摺動部の磨耗に対する対策が必要である。

2. 2. 3 磁気素子式

磁気素子式は、磁気素子と磁気回路を組合わせたものである。磁気素子にはホール素子(Hall Element)か磁気抵抗素子(Magneto Resistive Element: MR素子)が用いられる。磁気回路はセンサの回転軸に直結され、回転角に応じた磁場を磁気素子に与えるものである。軸が回転すると素子出力が変化し、これを信号処理回路を通じて出力として用いる。

磁気素子式は、非接触でアナログ出力が得られる方式である。その出力は応答性や分解能などに優れ、自動車の高速制御に適している。また磁気を利用した非接触方式であるため、汚れや振動に対しての本質的な不安がない。

この方式の実用化のためには、直線性の良い磁

気部品と、適切な温度補正のできる信号処理回路が必要である。

2. 3. リニア型磁気素子の応用

以上述べたように、磁気素子式は、信頼性、耐久性のほか高速制御用の性能において優れたものが期待できる方式である。

我々は、この方式の実現のため磁気素子と磁気回路の改良を行った。以下に、磁気設計を中心に、このハイトセンサの各部について紹介する。

3. 磁 気 設 計

3. 1 磁気抵抗素子^{2) 3)}

センサにはリニア型磁気抵抗素子を用いている。この素子はバーバーポール型の電極構造を採用したもので、直線性が良好である。また強磁性薄膜を利用したものであるため、高感度で、使用温度範囲が広く、さらに温度による特性変化が小さいという特長もある。

3. 1. 1 磁気抵抗効果

磁気抵抗効果をもつ強磁性薄膜の電気抵抗率 ρ は、薄膜内の電流と磁気のなす角を ϕ として

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_m (1 - \sin^2 \phi) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される(図2)。ここで ρ_0 は $\phi=90^\circ$ のときの電気抵抗率であり、 $\Delta\rho_m$ は $\phi=0^\circ$ になったときの電気抵抗率の変化分である。

図-3 aは、磁気抵抗素子の模式図である。薄膜は、その長手方向に形成された磁化容易軸に沿って磁化されており、これを M_0 で表わす。ここで M_0 の垂直方向から外部磁場 H_{ex} を加えると、磁化は回転して M となる。この回転角 ϕ_1 は、大体

$$\sin \phi_1 = H_{ex}/H_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

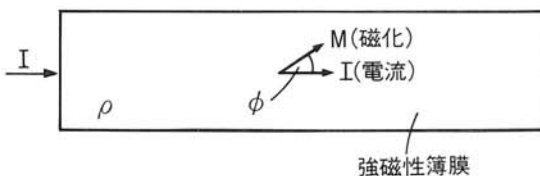


図-2 強磁性薄膜の電流と磁化

Fig. 2 Current flow and magnetization in ferromagnetic thin film

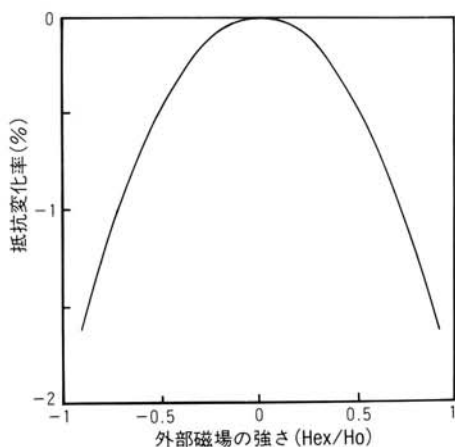
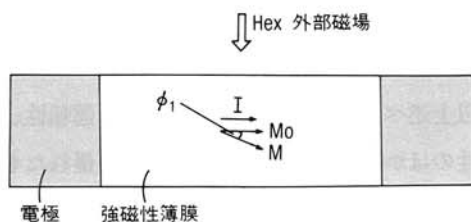


図-3 磁気抵抗素子の原理

Fig. 3 Principle of magneto-resistive element

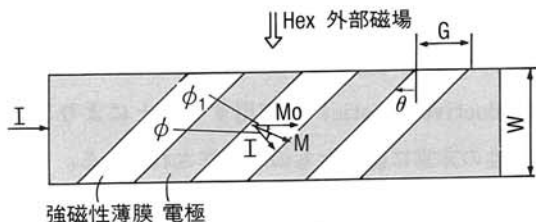
で表される。ここで H_0 は、内部磁荷 M_0 が、完全に素子の長手方向に直角になるのに要する磁場の強さである。 ϕ_1 は電流と磁化のなす角になるので、素子の特性は(1)式で $\phi = \phi_1$ とおくことにより求められる。

$$\rho = \rho_0 + \Delta \rho_m \{ 1 - (H_{ex}^2 / H_0^2) \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

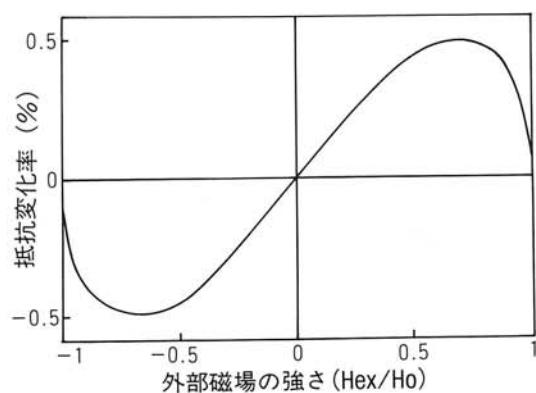
図-3 b はこれを図示したもので、曲線が原点で曲がっており、このままではリニアセンサ用の素子として使うことは難しい。

3. 1. 2 バーバーポール型の電極構造

そこで、バーバーポール型の電極構造をとるこ



a) 電極構造



d) 抵抗変化率

図-4 バーバーポール型電極

Fig. 4 Barber pole electrode

とにより、素子の直線性改善を図った。これは図-4 a に示すように、薄膜上に斜めの導電パターンを形成したもので、電流 I は斜めに流れるようになる。

電流 I の角度は、導電パターンによって決まるが、これが 45° の場合を考えてみる。

$$\begin{aligned} \sin^2 \phi &= \sin^2 (45^\circ - \phi_1) \\ &= \frac{1}{2} - \sin \phi_1 \sqrt{1 - \sin^2 \phi_1} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

であるから、この素子の特性は、(1)、(2)式から

$$\rho = \rho_0 + \Delta \rho_m \left(\frac{1}{2} + \frac{H_{ex}}{H_0} \sqrt{1 - \frac{H_{ex}^2}{H_0^2}} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

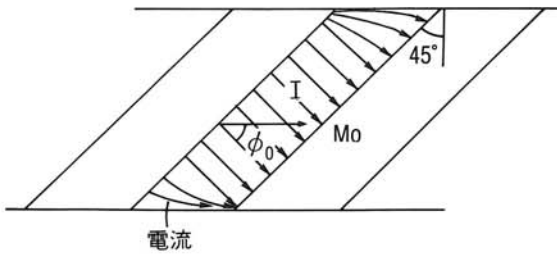


図-5 磁気抵抗素子内の電流

Fig. 5 Current flow in magneto-resistive element

図-4 bは、これを図示したもので、原点对称性が完全で、 $H_{ex} < 0.3H_0$ の範囲では直線性が1%以内と良好である。直線性の良いセンサを得るためには、実際の素子上でこの特性を実現する必要がある。

3. 1. 2 直線性の改善

実際の素子では、導電パターンの傾角を $\theta = 45^\circ$ にしただけでは、図-4 bの特性のものは得られない。パターン幅が有限であるため、図5のように、パターン端部で I が湾曲するからである。したがって実用化のためには、これらを考慮した形状設計が必要である。

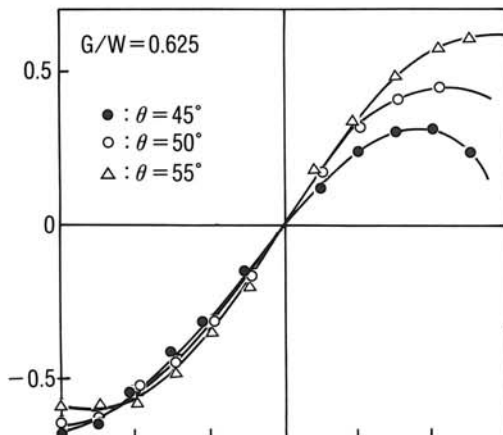


図-6 抵抗変化率の実験結果

Fig. 6 Experimental results of magneto-resistance

そのため、図-4 aの G/W と θ をパラメータとして境界要素法によるシミュレーションを行った。静電ポテンシャル Φ に関するラプラスの方程式

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

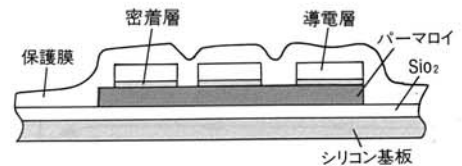
を境界積分の形式に変換し、それに境界条件を与えて Φ を求めた。さらに、

$$E = -\text{grad} \Phi \quad \dots\dots\dots (7)$$

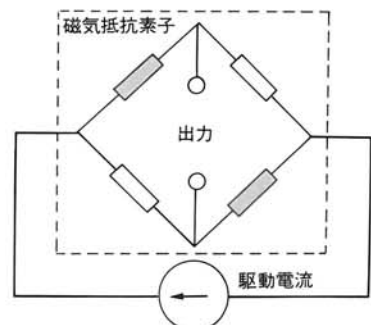
$$R = V/I = (\Phi_1 - \Phi_2) / (ds \cdot dn / \rho) \quad \dots\dots\dots (8)$$

によって抵抗値を求めた。

その結果 $G/W = 0.625$ のときには、 θ を 55° 付近に設定すればよいことがわかった。これは、実験結果ともよく一致している (図-6)。



a) 単素子の構造



b) ブリッジ構成

図-7 磁気抵抗素子の原理

Fig. 7 Structure of magneto-resistive element



図-8 磁気抵抗素子の外観
Fig. 8 Magneto-resistive element

3. 1. 2 磁気抵抗素子の構造

実際の磁気抵抗素子は強磁性体薄膜に鉄-ニッケル合金のパーマロイを用い、電極には金を用いている。

また感度向上と同相ノイズの除去のため、逆特性の単素子を2組、計4個組合わせて、ブリッジ構造にしてある。逆特性の単素子は、導電パター

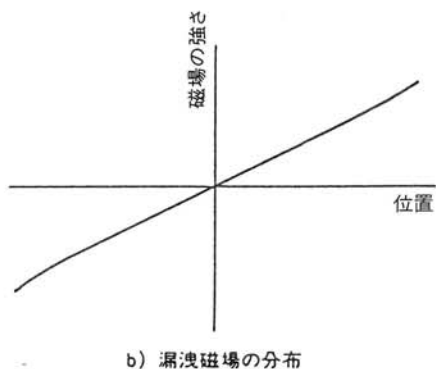
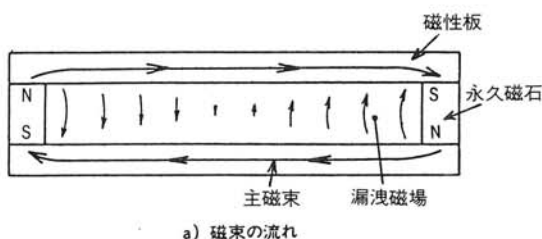


図-9 磁気回路の原理
Fig. 9 Principle of magnetic circuit

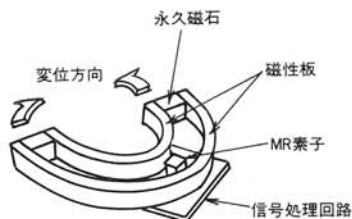


図-10 回転型の磁気回路
Fig. 10 Rotate type magnetic circuit

ンの傾角を逆にしたものである(図7)

3. 2 磁気回路^{4) 5)}

3. 2. 1 磁気回路の原理

このハイトセンサは、漏洩磁界型の磁気回路を用いている。これは2個の永久磁石を2枚の磁性板で連結したものである。

その原理を図-9を用いて説明する。図の磁気回路は閉ループをなしているので、永久磁石で発生した磁束の大部分は閉ループ内を流れる。これを主磁束と呼んでいる。しかし磁束は空気中にも流れるので、一部の磁束は磁性板間の空間を短絡して流れ、そこに漏洩磁場を生じる。漏洩磁場の強さは、磁気回路の midpoint で零で、左側の磁石から右側へ向かって連続的に増加する。したがってこの漏洩磁場中に磁気抵抗素子を置けば、位置に応じた出力が得られる。

3. 2. 2 回転型への応用

図-9の磁気回路は直線型である。ハイトセンサに用いるためには、これを図-10の回転型に変更する必要がある。

この場合の磁場分布のシュミレーションを、磁石を3次元、磁性体を2次元として積分法を用いて行った。積分法の基本方程式を次に示す。

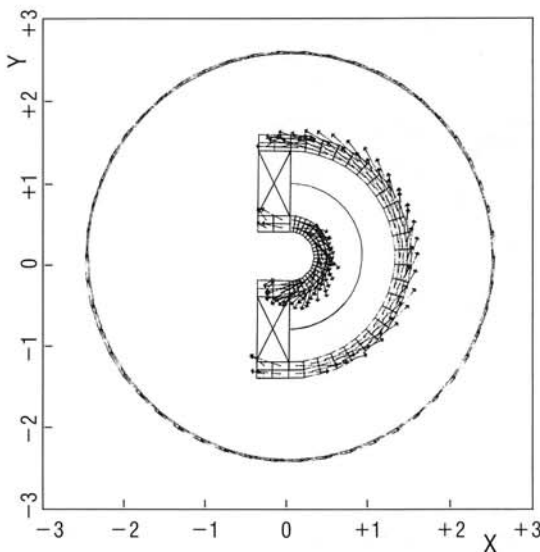
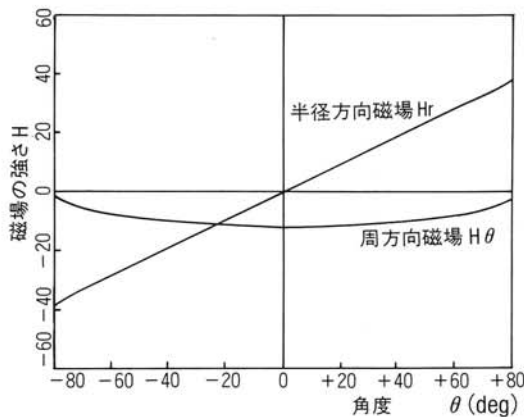


図-12 磁気回路外観
Fig. 12 Magnetic circuit

図-11は、その結果を示したもので、適切な直線性の磁場分布になっている。

3. 2. 3 磁気回路の構造

図-12は、磁気回路の外観である。磁性板には透磁率 μ を任意に制御できる鉄-アルミ材を用い、永久磁石には温度特性の良いアルニコ磁石を用いている。さらにこれらをプラスチック一体成形で保持することにより、磁気部品間の密着性を確保している。

3. 3 磁気シールド

3. 3. 1 外来磁気発生源

センサ外部から磁気加わると、センサ内部の磁気分布が乱され、出力特性が変化してしまう。これを防ぐため、センサには磁気シールドが必要である。磁気シールドの基本的方法は、高透磁率のシールド材でセンサを覆うことである。センサ外部からの磁気を、シールド材部分だけに集中して流すようにし、内部へは漏れなくするという考えである。

センサに対する外来磁気発生源として

- ① 自動車内からの磁気
- ② 走行中の道路周囲からの磁気
- ③ センサの輸送時や組付時の磁気

が考えられる。磁気シールド構造は、これらに対

図-11 磁場分布解析結果

Fig. 11 Analysis of Magnetic field distribution

磁荷 M のつくる磁束密度 B_m は、

$$A_m = \int_v \frac{M \times r}{|r|^3} dv \quad \dots\dots\dots (9.1)$$

$$B_m = \text{rot } A_m \quad \dots\dots\dots (9.2)$$

$$B_m = H_m + 4\pi M \quad \dots\dots\dots (9.3)$$

で表される。ここで

A_m : ベクトルポテンシャル

H_m : 磁場の強さ

r : 各要素の位置

である。この3式を用いて磁荷 M を求め、さらに各位置の磁場分布を求めた。

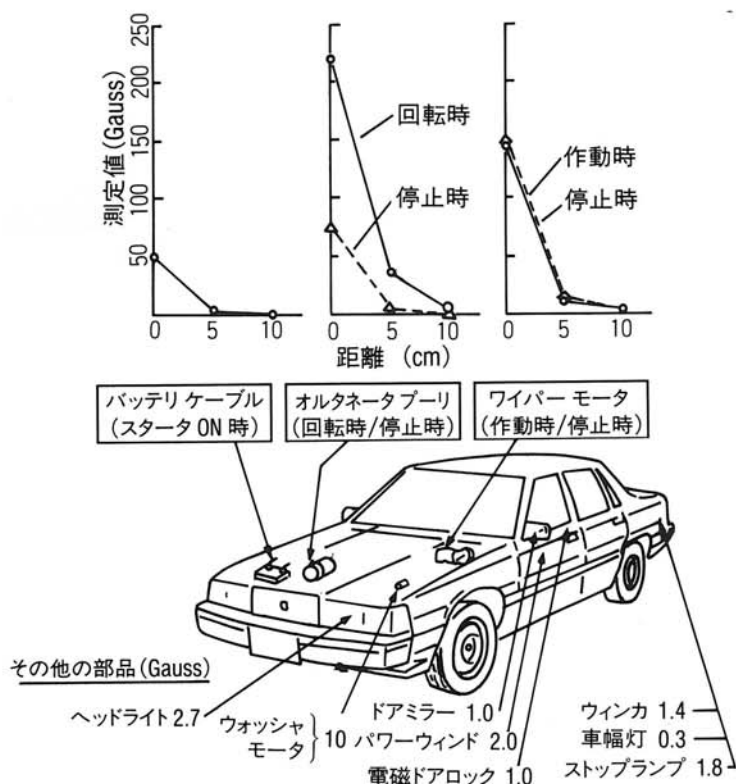


図-13 自動車内の磁場分布

Fig. 13 Magnetic field distribution in automobile

し適切に考慮されていなければならない。

3. 3. 2 自動車内の磁気発生源

自動車内には、モータ、ソレノイド、大電流ラインなど、多くの磁気発生源がある。これらの発生する磁気強度を測定してみた (図-13)。

その結果、磁場の強い場所として、エンジンルーム内のオルタネータとワイパモータ、それにスタータモータ通電時のバッテリーケーブルがあった。その値は表面で50~220 [Gauss] であるが、発生源から離れると急速に減衰していくことが確認された。これは、自動車のボディーが磁気シールド効果を示すからである。発生した磁束はボディー側に吸収され、空間にはほとんど放出されない。

その他アクセサリ類の強力な磁石による影響

も考えられるが、センサ取付け位置はタイヤハウジングの奥であり、センサと磁石が直接密着することは考えにくい。アクセサリ類による発生磁気は、エンジンルーム内のモータ類と同程度と考えて良い。

以上から、自動車内においては、ボディーのシールド効果が高いため、センサ側でそう強力な対策をとる必要はないと考えられる。

3. 2. 3 走行中の道路周囲からの磁気

磁気発生源には、磁石 (永久磁石と電磁石) と大電流 (電線内を流れる電流) があるが、道路周囲に強力な磁石があることは考えにくい。また大電流の電線から発生する磁気にしても、 I [A] の電流から r [cm] 離れた空間では、

$$B = 0.2I/r \text{ [Gauss]} \quad \dots\dots\dots (10)$$

であり、あまり大きくはない。送電線下や電車のトロリー線下でも、磁気は数 Gauss 以下である。したがって道路周囲からの磁気に対しても、前記のエンジンルームに対応できる程度の磁気シールドで十分と考えられる。

3. 2. 4 輸送中、組立中の磁気

輸送中、組立中には、磁気に関する考慮が払われないのが通例であり、これらに対する磁気シールドも必要である。輸送中、組立中の一時的な特性変化は問題にならないが、強い磁気による不可逆変化は避けなければならない。

3. 3. 2 磁気シールド構造

以上より、ハイトセンサの磁気シールドは、20 Gauss 程度の磁場中で出力特性を変化させず、100 Gauss 程度の磁場で不可逆な変化を生じさせない程度のもので良いと考えられる。

磁気シールド効果を示す材料として、パーマロイ、ケイ素鋼、電磁軟鉄などが知られている。このうちケ素鋼については、加工性が悪いため、ハイトセンサ用としては使用しにくい。

磁気シールド効果の指標として初透磁率 μ_0 、保磁力 H_c 、飽和磁束密度 B_m がある。初透磁率は弱磁場でのシールド効果の高さを、飽和磁束密度は強磁場でのシールド効果の高さを、保磁力は磁着されやすさを、それぞれ表す。保磁力は小さいほど良く、その他は大きいほど良い。

パーマロイは初透磁率の高さと保磁力の低さが極めて優れており、弱磁場では最高の磁気シールド性能を示す。しかし、飽和磁束がやや小さいため、強磁場ではやや性能不足である。またコストが非常に高い。

反対に電磁軟鉄は、飽和磁束が高いため、強磁

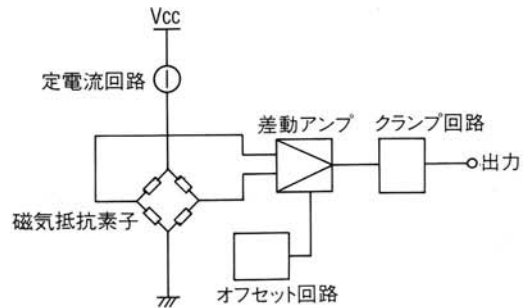


図-14 信号処理回路

Fig. 14 Signal-processing circuit

表-1 磁気シールドの効果

材 料 名	磁気シールド効果 ^{*1}	着 磁 のされやすさ ^{*2}	コスト
パーマロイ	-40dB	2.2%	高
電 磁 軟 鉄	-42dB	20.7%	低
パーマロイ+電磁軟鉄	-40dB	10.3%	中

^{*1}^{*}2 磁気シールドのない時との比較

^{*2} 強磁場印加の前と後の出力変化

場では優れた磁気シールド性能を示す。コストも妥当な程度である。

そこで、パーマロイと電磁軟鉄を組合わせ、実際のセンサを用いてシールド性能を比較してみた。その結果、センサ検出部付近のパーマロイを用い、その他は電磁軟鉄を用いることで良好なシールド性能が得られることがわかった。

4. 信号処理回路設計

4. 1 電源回路

磁気抵抗素子の電源方式には、定電圧方式と定電流方式がある。素子出力は、電気抵抗変化率と通電電流の積に基づいているため、定電流方式のほうが安定した出力が得られる。定電流回路に若干の温度補正を付加して用いれば、素子の温度特性はほぼ完全に補正できる。

4. 2 差動増幅回路

磁気抵抗素子の2出力は差動増幅器を通して出力される。センサに使用している差動増幅器は一般的な構成のものであるが、温度ドリフトの小さいアンプを使用することにより、温度変化の低減を図っている。

4. 3 クランプ回路

センサの出力の最終段にはクランプ回路を設けて、出力範囲を電源電圧の10～90%に制限している。これによって、センサ出力から接続に起因する不具合を判定できるようにしてある。

5. 機 構 設 計

自動車の足回り部はエンジンに直結しているため、外気にさらされているにもかかわらず、思いのほか高温となる。また極寒冷地での冷間始動時には、外気温そのままの温度にさらされる。ハイトセンサの機構部にはこれらの使用条件を考慮した設計が必要である。

センサ本体のケース材料にはガラス繊維入りのプラスチック材を用いて、耐熱性を確保するとともに、軽量化を図っている。また軸受には油分を含まないカーボン系の材料を用い、低温時と高温時に安定して使用できるようにしてある。

軸にはオーステナイト系のステンレス鋼棒を用いて、外部からの磁気の誘導を防止している。これには表面処理を行うことなく、さびの発生を防ぐ効果もある。

防水は、通常のOリングで行っている。本体が円筒形であるため、この方式で十分な気密性能が得られる。

6. 性 能

以上の設計に基づくセンサの総合性能を表-2

と図-16に示す。直線性において摺動抵抗方式にゆずる面もあるが、中点付近における直線性では、遜色がない。非接触方式として良好な性能であると考えている。



図-15 ハイトセンサ外観

Fig. 15 Height sensor

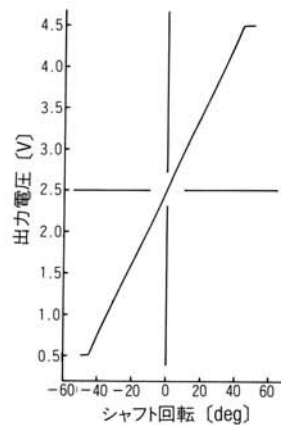


図-16 出力特性例

Fig. 16 Output example

表-2 センサ特性

項 目	特 性
検 出 範 囲	$\pm 45^\circ$
直 線 性	$< 1\% \text{ F.S.}$
精 度	$< 2\% \text{ F.S.}$
使 用 温 度 範 囲	$-30 \sim +85^\circ\text{C}$
外 形 寸 法	$\phi 58 \times \text{H}24\text{mm}$

7. お わ り に

ハイトセンサを実用化するための設計を行った。磁気部品の特性を向上するため、計算機シミュレーションなどにより、磁気設計の最適化を行った。また実使用を考慮した磁気シールド構造や、適切な温度補正を行う信号処理回路の採用を行った。これらにより、自動車用に適した性能のセンサを得ることができた。

今後の課題として、用途の拡大がある。このセンサはアナログ出力の回転角センサの一つであり、汎用性は高い。自動車内には回転角センサの用途は数多く存在する。それらの中からこの方式にふさわしい用途をよく検討し、センサの新たな展開を図っていきたい。

参 考 文 献

- 1) トヨタ技術会：エレクトロニクス用語辞典、トヨタ自動車(1986)
- 2) M. Endoh, et al. : Highly Sensitive Thin Film Magnetoresistive Sensor with Good Linearity. IEEE fifth IEMT Symposium, Lake Buena Vista, Florida, pp. 210-214 (1989)
- 3) K. E. Kuijk, W. J. van Gesrel and F. W. Gorter : The Barber Pole, a Linear Magnetoresistive Head. IEEE Trans. MAG, 11, 5, pp. 1215-1217 (1975)
- 4) 清水、遠藤、倉島：“磁気センサとその応用”，FUJITSU, 40, 4, pp. 235-241 (1989)
- 5) 清水、遠藤、若月：“漏洩磁界型ポジショナ”，信学技報, 88, 361, pp. 13-18 (1989)