

インダクタンス計測による環境非依存性近接センサ

Environment-Independent Proximity Sensing by Measuring Magnetic Permeability

○学 山崎 立翔 (立命館大)

正 平井 慎一 (立命館大)

Ryuto YAMAZAKI, Ritsumeikan University
Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

Originally, robots should be isolated from humans when working. However, in these days, the number of robots collaborating with human has been increasing. As the result, robots are expected to work under various conditions, and it is necessary to perform steady sensing in any environment.

In this research, we propose a sensor that can estimate the distance and moving direction of a nearby object in any environment by measuring magnetic permeability. Additionally, the sensor can detect a detectable object which is occluded by another detectable object from the sensor. We experimentally verified that the performance of our sensor is practical.

Key Words: Proximity-Sensor, Magnetic Permeability, Inductance, Environment-Independent

1. 緒言

ロボットはとても強く、人間では出せない速さや力を有する。一方人間にとって危険なものであり、従来は人間から隔離されながら稼働していた。しかし近年は「介護ロボット」や「掃除ロボット」に始まり、「ペットロボット」や「ハウスキーパーロボット」など様々なロボットが人間の生活空間で活動し始めているのも事実だ。それらは安全面の信頼度を確保できない代わりに最大出力が抑えられているが、それではロボットの持つ利点が完全に活かされているとはいえない。そこで、ロボットが人間と共生する未来に向けて、最大の関所である「安全性」を向上するための「ロボットの装備品」を開発したいと考えた。

ロボットが万が一物理的に人間と接触した際被害が少ないのはハードロボットよりもフレキシブルロボットである。さらに危機察知を行うためには環境情報をできるだけ多く取得することが有効である。つまり高出力のロボットを人間の生活空間で稼働させたい場合、フレキシブルロボットに様々なセンサを取り付けて安全性を確保するというのが妥当である。

そこで、本研究では数あるセンサの中でも応答性がよく取り回しも容易な「近接センサ」を製作する。

2. 研究目標

本研究では以下の要求項目を満たす近接センサを製作し、ロボットの接触事故回避に貢献することを目的とする。また既存のセンサに関する文献を参照しながら新規性および優位性を考慮する[1]。

(1) 小型または可変形

フレキシブルロボットにも搭載できるものであることが望ましい。本研究では小型化の方に重点を置く。

(2) 距離によって出力が変化する

代表的な近接センサに「フォトインタラプタ」「フォトリフレクタ」「焦電型赤外線センサ」などが挙げられる。これらの出力は「HIGH」と「LOW」の2値しかない。存在しているかどうかは検出できるが向かっている方向などまで瞬時に把握できるわけではないため初段階の衝突回避トリガとしては不十分である。したがって、本研究では多段階の出力を行えるセンサを製作する。

(3) 多くの素材に対して反応

安価で小型な近接センサとして「リードスイッチ(磁気センサ)」がある。これは磁気を帯びたものにしか反応しない。また、「誘導型近接センサ」も存在するが、従来使用されて

いる検出回路では金属にしか反応しない。理論上は非金属も検出できるが、ノイズが多く誤検知が頻出する。本研究では人間の居住環境での危機検知を前提としたセンサの製作を目的とするため、様々な素材および「人体」にも反応する必要がある。

(4) 衝突回避できる距離で検知

既存の近接センサの多くは検出可能距離が短い。本研究では50mmまでの範囲で正確に「距離と高い正の相関関係をもつ値」が出力されるセンサを作成する。

(5) 低ノイズ

危機察知の用途で使用する前提であるため、ノイズが大きいと信頼性に欠ける。さらにより遠い距離を測定するためにはノイズをより抑制する必要があるため、本研究ではノイズ抑制も重要視している。

(6) 環境に依存せず駆動できる

人間の生活空間は多種多様であるため、ロボット周辺の環境は著しく変化することが予想される。それらに左右されては危機察知を行うセンサとしては不十分であるため、本研究では環境非依存性を非常に重要視している。

(7) 高い応答性

危機察知を目的としているため、応答性が高いことは必須である。そのため本研究では応答性も重要視している。

3. 近接センサの試作

2節で述べた要求項目のうち最も制限的なものは「環境に依存せず駆動できる」ことである。これを可能とするには情報伝達媒体(電磁波や音など)をできるだけ介さないことが重要である。本研究では情報伝達媒体を一切介さない透磁率の計測を軸に距離計測を行う。

本研究で製作したセンサの回路を図1に示す。以下にこのセンサの測定原理を述べる。まず、物体が動くときセンサ周りの透磁率が変化する。次に透磁率が変化することによりコイルのインダクタンスが変化する。それにより、そのコイルを構成要素としているコルピッツ発振回路の発振周期が変化する。一方、独立して一定周期で発振するクリスタルオシレータを用意し、コルピッツ発振回路とクリスタルオシレータの発振周期の比率から特定のバイナリデータを出力する。後段のバイナリカウンタとDフリップフロップおよび各種演算器はそれを実現するための構成要素である。また、各種素子のパラメータは磁性材料に関する文献を参照し[2]、生活空間に存在する多くの物体に反応できるように調整した。その際、電磁

気学に関する文献[3]およびストレーキャパシティに関する文献[4]を参照し、コイル内部に発生するキャパシタンスおよびコイル外部に発生するインダクタンスを抑制できるようコイル形状を最適化した。

4. 近接センサの評価

4.1 検知可能物体数の評価

実際に距離と出力値の関係を実験的に調べる。出力値は空間内を占める原子磁気モーメントに依存して変化するため、原子磁気モーメントが異なる物質では出力値の変化の仕方も変化する。その点も評価するため、本研究では透磁率の異なる様々な物質をセンサに近づけてその値の変化を比較・評価した。透磁率の異なる4つの物質ベーク板、タングステンカーバイド板、銅張積層板、A2014板において、センサからの距離が20mmから100mmまで1mm刻みで81段階、各段階あたり1024個ずつ出力値を取得して合計331776個のデータを全てプロットした結果を図2に示す。対象物体によって出力値特性は大きく変わっており、どの物体の出力値も共通して距離と高い相関関係があることが分かる。

また、このセンサは危機察知を前提としているため、人体に対しても動作できなければならない。前述の物体は比較的透磁率が安定しているのに対し、人体は透磁率の変化が著しい。これは血液中に含まれる様々な透磁率を有するイオンが循環したり、皮膚表面から発汗したりするためである。それだけでなく、人体は常磁性体に分類されるため、比透磁率が1に近い物質である。そこで、人体に対してどれだけ距離測定可能なかを調べた。センサから手のひらまでの距離を20mmから100mmまで5mm刻みで17段階、各段階辺り1024回ずつ出力値を取得して合計17408個のデータを全てプロットした結果を図3に示す。前述のタングステンカーバイド板など比較すると出力値に対して誤差範囲が大きいように見えるが、距離-出力値特性自体はとても良いので実用的である。

4.2 距離出力値特性の再現性評価

本研究の最大の要求項目である環境非依存性についても評価する。まずは測定日によって距離-出力値特性がどのように変化するかを調べるため、銅張積層板についてセンサからの距離が20mmから100mmまで1mm刻みで81段階、各段階あたり1024個ずつ出力値を取得するという操作を5日間に分けて1日1回ずつ行い、計5回の試行を比較して評価した。合計414720個のデータ全てをプロットしたものが図4である。どの測定日においても同じような特性があることが分かり、特に近距離ではその差も少なく再現性があると評価できる。

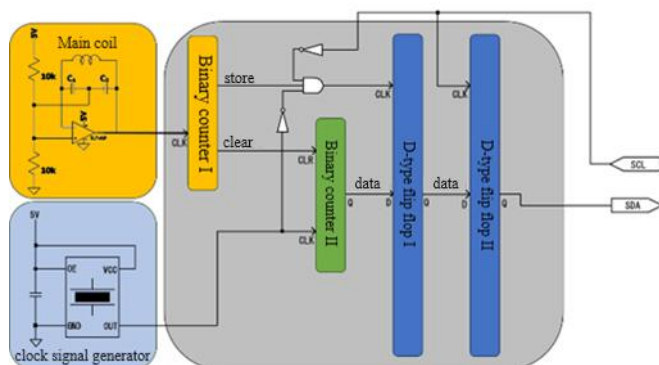


Fig. 1 Schematic diagram of sensing circuit

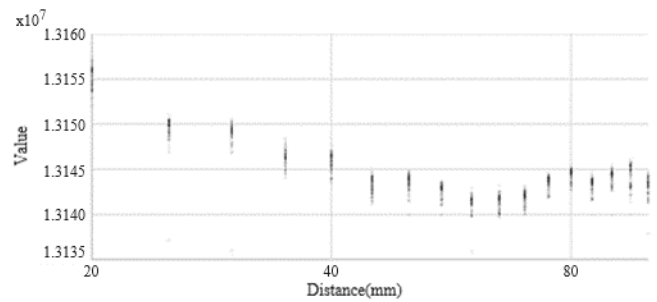


Fig. 2 Outputs caused by changes in a target

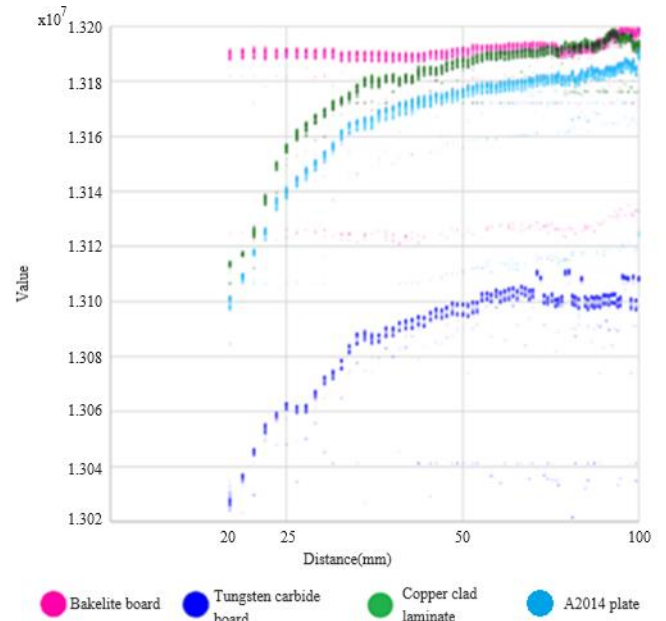


Fig. 3 Outputs caused by unsteady magnetic permeability of a target

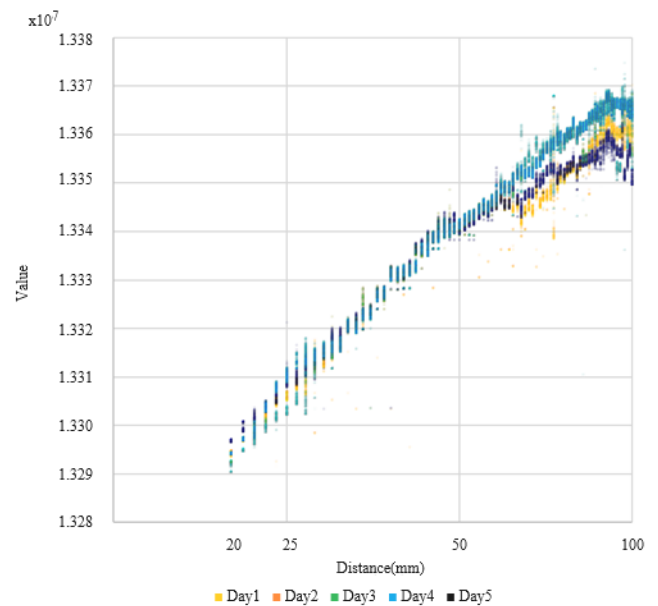


Fig. 4 Reproducibility of sensor characteristics

4.3 環境非依存性の評価

磁性材料に関する文献[5]によると、透磁率はその空間の磁界の強さにも依存する。人間の生活空間において大きな磁束が存在するとは思えないが、環境非依存性の評価という観点からも磁束による影響がどれだけあるかを調べた。まずは一定磁場内での測定が可能か調べるため、ネオジウム磁石についてセンサからの距離が20mmから100mmまで5mm刻みで17段階、各段階あたり1024個ずつ出力値を取得した。図5はこの試行において取得した合計17408個のデータを全てプロットしたものである。他の条件での測定と同じような距離-出力値特性が得られているため、一定磁場内での測定も可能であることがわかる。

次に、著しい磁束変化がある空間での測定が可能か調べることにした。電磁石に周波数50Hz、平均700mAの矩形波交流を流し、その影響を評価した。図6は交流が流れている電磁石および電流が流れていない電磁石の2つについてセンサからの距離が20mmから100mmまで1mm刻みで81段階、各段階あたり1024個ずつ出力値を取得し、合計165888個のデータ全てをプロットしたものである。交流が流れている電磁石を測定した場合の方が遠距離での距離-出力値特性が悪いという結果が出た。一方、近距離ではどちらも同じような値を取っていることが分かる。磁束変化による何らかの影響を受けている可能性はあるため、著しい磁束変化が生じる空間でこのセンサを使用する場合は何か工夫が必要かもしれない。ただし人間の生活空間でこのような磁束変化が生じることはないと考えられるため、危機察知のセンサとしては十分な環境非依存性があると言える。

4.4 遮蔽物非依存性の評価

また、このセンサの最大の特徴は「ある検出可能物体より遠くにある検出可能物体の動きも検知できる」ところにある。図7で代表的な距離センサである超音波距離計と赤外線距離計、そして本研究で製作したセンサを比較した。超音波距離計は最前面にある光学的に透明な板を検知できるが、その後方にあるものは検知できない。また、赤外線距離計は透明な板が検知できない代わりに、その後方にある不透明な板を検知することができる。このように、センサは自身の検出可能物体の後方に位置する検出可能物体に関しては検出できないのが一般的である。同じように、本研究で製作したセンサから見ると1枚目と2枚目の板は透明に見えるため、3枚目の金属板の情報を鮮明に取得することができる。

本研究で製作したセンサの場合は、3枚目の金属板の後方に位置している別の検出可能物体の変化も取得することが可能である。この理由は、このセンサの取得対象が「検出可能物体のうち最前面にあるものまでの距離」ではなく「一定空間内に占める物質の割合」なためである。このことについて、本当に検出可能物体の後方に位置する検出可能物体の検知が可能なのか実際に実験する。A2014板からセンサまでの距離を20mmから100mmまで1mm刻みで81段階可変させ、各段階あたり1024個ずつ出力値を取得した。遮蔽物がない場合、センサから10mmの距離にタングステンカーバイド板がある場合の2通り、合計165888個のデータをプロットした結果を図8に示す。タングステンカーバイド板で遮蔽した場合は遮蔽無しの場合に比べると距離-出力値特性が悪いが、それでも検出可能物体の後方に位置する検出可能物体の検知が可能である。これにより、このセンサの稼働時にロボット表面に露出している必要が無くなるため耐久性や信頼性の面からも優れたセンサだということができる。

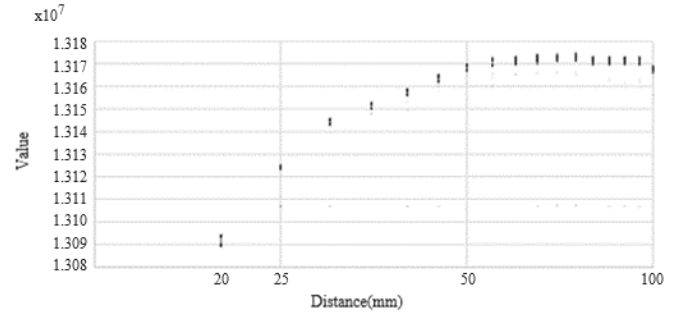


Fig. 5 Outputs caused by constant magnetic field

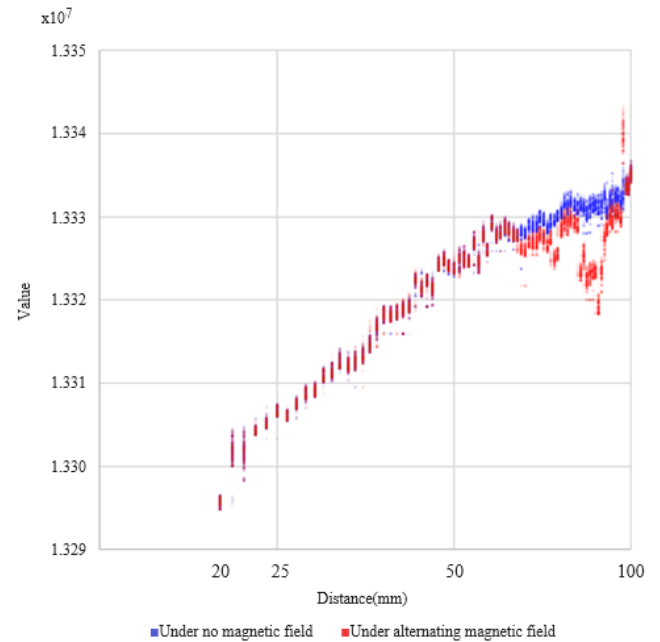


Fig. 6 Outputs caused by alternating magnetic field

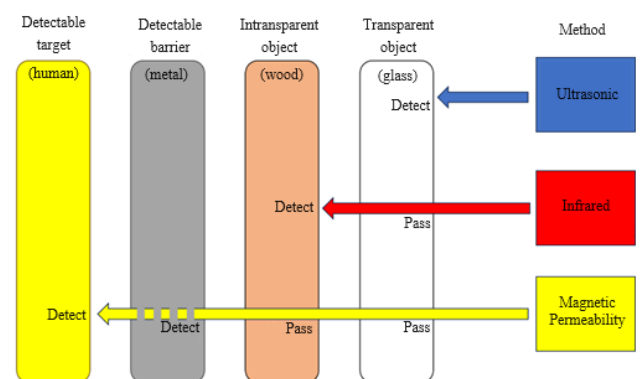


Fig. 7 Detectable targets for each sensor

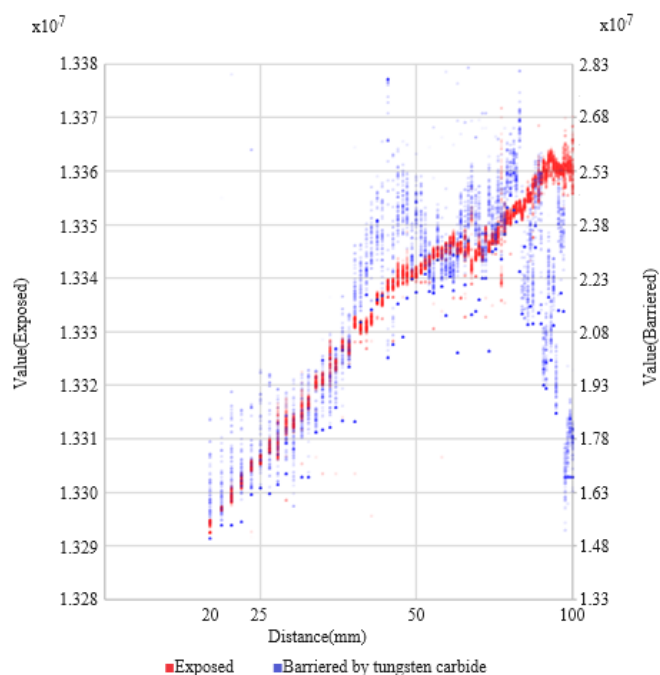


Fig. 8 Outputs caused by detectable obstruction

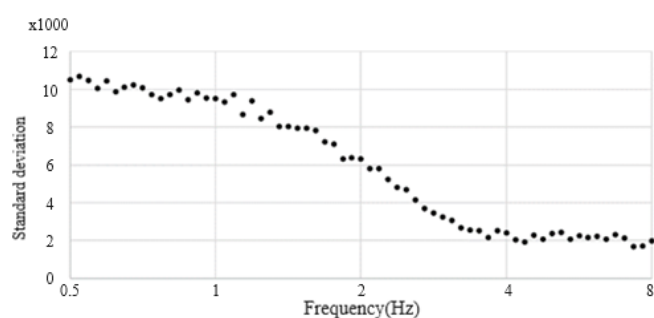


Fig. 9 Reciprocating motion followability

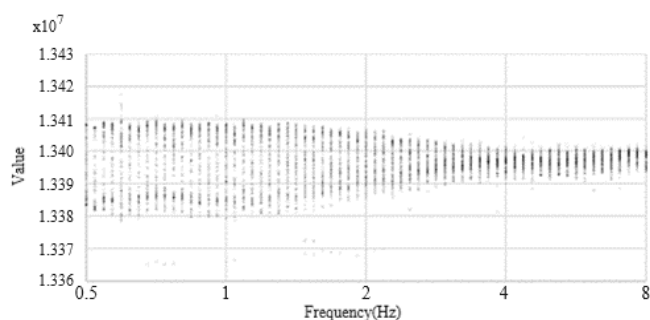


Fig. 10 Frequency-standard deviation diagram

4.5 応答性評価

また、危機察知に関わるセンサであるため、応答性が高いことは必須項目である。このセンサの応答性を評価するため、任意の周波数でセンサからの距離が15mmと25mmになるような点を往復する電磁ソレノイドをターゲットとして値を出力した。往復直線運動の周波数は0.5[Hz]から8Hzまで計65段階、各段階あたり1024個のデータを取得し、合計66560個のデータを全てプロットした結果を図9に示す。低周波域ではより濃く2値が出力されているのに対し、周波数が高くなるにつれてその中間の値を出力するようになってい

ることが分かる。これを数値的に分かりやすくするため、周波数ごとに標準偏差をとってプロットした結果を図10に示す。ここで、図10より低周波域の標準偏差を10000と仮定し、そこから3dB小さい値になる周波数を追従可能周波数と定義すると、追従可能周波数は1.8Hzであることが分かる。人間の生活空間における物体の素早さと比較すると十分大きく実用的だと評価できる。

5. 結言

本研究の目的は、環境変化に影響されづらい近接センサを製作することで、ロボットの接触事故回避に貢献することであった。センサ用に設計・製作した小型コイルを用いて発振回路およびその発振周期測定回路を組み、その値の変動を評価した結果、以下の2点が明らかになった。第一に、本研究で製作したセンサは幅広い物体を対象とでき、小型で多段階出力ができるという条件がすべて揃っているという点で新規性があるということが明らかになった。第二に、空間情報そのものを取得することで検知可能な物体の後方に位置する検知可能な物体の検知が可能になったという点において、このセンサの最も大きな優位性が発揮されているということが明らかになった。

本研究の社会的意義は、ロボットの安全性向上というよりもむしろ人間の生活空間へのロボットの進出促進というところにある。ロボットの信頼性が向上することにより人間とロボットが互いによりパートナーとして社会を支えるという未来に一步近づいたと考えている。

最後に、今後の展望に関して述べる。この近接センサは単体でも現実的に使用できることが分かった。さらに、複数枚使用することで正確な距離や方位の測定が可能となる。そのシステムを構築することでロボットの接触事故回避に対するさらなる貢献が期待できる。また、このセンサはまだプロトタイプにすぎず測定可能距離や測定誤差、応答性などに関してまだ多くの改善点が残されている。今後はコイル自体の最適化および発振回路の最適化、クロック周波数の向上などによって測定可能距離や測定誤差低減、応答性の向上を目指したい。

参考文献

- [1] 谷腰欣司. メカトロニクスのためのセンサ応用回路101選. 日刊工業新聞社, 1991, 200p.
- [2] 加藤哲男. 技術者のための磁気・磁性材料. 日刊工業新聞社, 1991, 256p.
- [3] 小暮裕明, 小暮芳江. すぐに役立つ電磁気学の基本. 株式会社誠文堂新光社, 2008, 232p.
- [4] 伊藤健一. イラストでよむストレーキャパシティのはなし. 日刊工業新聞社, 2008, 152p.
- [5] 小沼稔. 磁性材料. 工学図書株式会社, 1996, 288p.