

氏名・(本籍)	中 野 和 洋 (静岡県)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工博甲第 287 号
学位授与の日付	平成 18 年 9 月 22 日
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 ナノビジョン工学
学位論文題目	磁気パターン計測に基づく小型高精度CMOSロータリエンコーダに関する研究

論文審査委員	(委員長)		
	教授	浅井 秀 樹	助教授 村上 健 司
	教授	猪川 洋	教授 川人 祥 二

論 文 内 容 の 要 旨

ロータリエンコーダは、自動車、ロボット、プリンタなどの情報機器の位置決め制御に欠かすことができない重要な構成要素である。用途に応じて分解能やサイズ、方式の異なる様々なタイプが用いられているが、特に自動車用途など、温度変化やほこりの影響を受けやすい環境では、磁気式のエンコーダが好まれる。現状の多極磁石とMR素子やホール素子、波形整形回路で構成される磁気式エンコーダは、高分解能のまま小型化するには高度な製造工程と調整が必要であり、さらに、原点回帰を必要としない絶対角度検出式は、多極磁石にグレイコードなどをパターンニングするなど複雑化するため、小型化は困難である。CMOSチップ上に2方向のベクトルセンサを配置し、これら出力を演算することにより、絶対角度を検出する報告がある。小型で絶対角度検出可能な磁気ロータリエンコーダの構成法として有効であるが、CMOSプロセスで高性能なベクトルセンサの作製が難しいこと、また、この方法ではセンサ間のゲインミスマッチ、非線形が直接角度に影響を与えるため、高精度化は困難である。

本論文は、磁界パターンを磁気センサアレイを用いて計測し、集積化した統計的演算回路により回転角を計算する、新しい原理のロータリエンコーダに関する研究を取りまとめたものである。

第1章では緒言として、本研究の背景と目的を述べている。

第2章は、ロータリエンコーダの基礎的考察として、一般的なロータリエンコーダの原理、そして、CMOS技術を用いた先行研究について述べ、問題点と、本研究で目指すターゲットを定めている。

第3章では、提案する磁気パターンに基づくロータリエンコーダの構成と、統計的角度演算アルゴリズムについて示している。本システムでは、小型で高分解能を実現するために、多数の微小センサで構成される4本の磁気センサアレイをCMOSチップ上に4方

向に配置し、チップに対向して回転する永久磁石の磁界分布を検出する。CMOS磁気センサアレイを用いる本方式では、プロセスの不完全により生じるオフセット、センサが発生する熱雑音が、検出する磁界分布に重畳するランダムノイズとなり現れ精度を劣化させる。大きく分けて2種類の角度演算アルゴリズムを提案し、シミュレーションを行った結果、磁界がゼロ付近のデータを抽出し、最小二乗近似により推定した磁界ゼロの点2点から幾何学的に絶対角度を求める方法が、本システムに適していることが分かった。この手法を用いることによりセンサ信号に大きなノイズが重畳しているにも関わらず、高い精度が得られると共に、センサチップと磁石の配置ズレに対して高いロバスト性を示す。

第4章では、高感度、低オフセット化に優れた磁気センサアレイの構成法について述べている。標準CMOSプロセスで作製できる磁気センサ素子についての研究は、これまでも行われており、形状パラメータとセンサ感度の関係は十分に研究されている。半導体磁気センサ素子では、高感度化のために、センサアクティブ領域の不純物濃度が低く、高い電子移動が得られることが重要であるが、先端CMOSプロセスでは、ウェル濃度が高く、十分な感度が得られない問題があった。p基板に直接磁気センサを作るネイティブ磁気センサ素子を提案し、先端プロセスでの高感度化に成功した。また、低濃度なp基板を用いるため、センサ素子毎のオフセットばらつきも低減された。センサアレイの性能としてセンサ信号に対してオフセットばらつきが小さいことが重要であるが、オフセットばらつきという観点で、形状パラメータについての十分な研究は行われていない。そこで、ホール素子アレイ、磁気トランジスタアレイを試作し、性能評価を行った。2種類のアレイを比較したところ、ホール素子が低オフセット化に適しているという結果が得られた。また、センサアレイの高精度化に適したホール素子の形状パラメータについても測定の結果明らかにしている。また、半導体磁気センサ素子ではパッケージ実装する際に応力の影響が問題となる。応力により発生するオフセットのキャンセル方法として、1つの素子に4ないし8方向に電流を流し、出力を加算するスピニングカレント法がよく用いられているが、複雑なクロックサイクルが必要なこの方法は、多数の素子で構成されるセンサアレイには適さない。高速読み出しのために、並列接続により応力により生じるオフセットをキャンセルするセンサ配属・接続方法を提案し、測定の結果、十分な効果が得られることを示した。

第5章では、磁気センサアレイ、角度演算回路を1チップに集積したロータリエンコーダチップの試作と評価について示した。チップ4辺に配置するセンサアレイそれぞれに読み出し回路を設け、1つずつ順番に読み出されるセンサ信号は、S/Hアンプによりノイズの影響を軽減しながら増幅され、8bitA/D変換器により、デジタル信号に変換される。高速読み出しのため4つのセンサアレイは並列にスキャンされ、チップ中央部に配置する角度演算回路に磁界分布が入力される。演算回路では、磁界がゼロの点を検出し磁石角度を求める。アクティブ領域が、3.8mm角であるセンサチップは、10MHzのクロックで動作し、2kHzで磁石角度が出力される。±0.36°の精度を実現し、磁石とセンサチップの配置ズレに対する高いロバスト性も示された。回転中心の座標が(300μm, 300μm)ズレた時にも検出精度の劣化なく安定した角度検出が実現でき、本方式の有効性が示された。

第6章は、結言であり本研究により得られた成果をまとめた。

論文審査結果の要旨

磁気式ロータリエンコーダは、自動車、ロボット、プリンタなどの情報機器の位置決め制御に欠かすことができない重要な構成要素である。機器の小型化に伴い、小型で高精度なものが求められているが、従来の磁気式エンコーダは、小型化と高分解能化の両立が困難であった。本論文は、小型で高分解能のロータリエンコーダを実現するため、磁界パターンを磁気センサアレイを用いて計測し、集積化した統計的演算回路により回転角を計算する、新しい原理のロータリエンコーダに関する研究を取りまとめたものであり、全6章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。第2章は、ロータリエンコーダの基礎的考察として、一般的なロータリエンコーダの原理、CMOS技術を用いた先行研究について述べ、課題と本研究の到達目標について述べている。第3章では、提案する磁気パターン計測に基づくロータリエンコーダの構成と、幾つかの統計的角度演算アルゴリズムを提案し、それらの得失についてシミュレーションにより角度精度、磁石の回転中心のズレに対するロバスト性について議論している。その中で、磁界がゼロ付近のデータを抽出し、最小二乗近似により推定した磁界ゼロの2点から幾何学的に絶対角度を求める方法が、センサ信号に大きなノイズの重畳に対しても、高い精度が得られると共に、センサチップと磁石の配置ズレに対して高いロバスト性を示すことを明らかにしている。第4章では、高精度化のための磁気センサアレイの構成法について述べている。標準CMOSプロセスの低濃度p型基板上に直接磁気センサを作るネイティブ磁気センサ素子が、微細集積回路プロセスにおいて高感度化と、オフセットばらつきの低減に有効であることを試作により明らかにしている。シリコン磁気検出素子であるMOS型ホール素子と磁気トランジスタに関し、それらをアレイ状に配置したときのオフセットばらつき等アレイ構造への適性についてはこれまで議論されていない。試作により、ホール素子が低オフセット化において有利であること、またセンサアレイの高精度化に適したホール素子の形状パラメータを明らかにしている。さらに、パッケージ実装する際の応力により発生するオフセットの温度変動の大きく低減できる、応力キャンセル配置を提案し、試作により温度変動の影響を大きく低減できることを示している。第5章では、4つのリニア磁気センサアレイ、読み出し回路、A/D変換回路、角度演算回路を1チップに集積したロータリエンコーダチップの試作と評価について述べている。有効面積3.8mm角で、 $\pm 0.36^\circ$ の高精度が実現できることを示すとともに、磁石とセンサチップの配置ズレに対する高いロバスト性を明らかにしている。第6章は、結言であり本研究により得られた成果をまとめている。

以上のように本論文は、新しい原理の磁気式ロータリエンコーダに関し、シミュレーションと試作を通して研究し、従来困難であった小型化と高分解能化の両立への道を開いたものであり、計測・制御の分野に寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士（工学）の学位を授与するに十分な内容を有するものと認める。