

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	非接触多自由度ロータリーエンコーダの開発及び評価
Title(English)	
著者(和文)	加藤芳彦
Author(English)	Yoshihiko Kato
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9599号, 授与年月日:2014年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中村 健太郎,小池 康晴,熊澤 逸夫,黒澤 実,張 曉林,村瀬 亨
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9599号, Conferred date:2014/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学 大学院総合理工学研究科
博士課程 学位論文

非接触多自由度ロータリーエンコーダの 開発及び評価

平成 26 年（2014 年） 6 月

東京工業大学 総合理工学研究科 物理情報システム専攻
張曉林 研究室

指導教員 中村健太郎 教授
副指導教員 張曉林 客員教授

加藤 芳彦

概要

近年の目覚ましい工業技術の発展に伴い次々と新しい工業製品が登場する中で、それらに対する更なる小型化・高機能化の要求は尽きることはない。それはデバイスの駆動部も例外ではなく、従来のモータのような単に一軸周り（一自由度）のみの回転だけではなく、一例としては球面超音波モータ^[9]のような同時に多自由度の駆動を可能にするアクチュエータが登場し注目を集めるとともに応用が期待されている。

しかし、駆動システムが開発されているにもかかわらず、それを制御するには必要不可欠ともいえる回転角度の計測装置、すなわちロータリーエンコーダに目を向けると、多自由度回転角度、とりわけ三自由度回転の計測が可能なロータリーエンコーダというものとは極めて稀である。現状において多自由度回転機構の各軸周りの回転量計測は、一自由度のロータリーエンコーダやポテンシオメータ等を複数組み合わせ使用するのが一般的な手法であるが、その多くは複雑な機構を必要とするうえに、角度計測のために追加された部位がモータの駆動部に接触するため、駆動部の設計に大きな制約を与えるだけでなくモータ動作の妨げにもなっている。これでは計測機能は果たしていても、駆動部分の機能を十分に発揮できていないという点において満足なものとはいえない。また、これまでに提案された代表的な多自由度計測の手法としては、磁化球を用いる手法^{[22][25]}やカメラを設置し画像処理を用いる手法^[5]、レーザ距離計を用いる手法^[37]等があるが、これら手法においてもロータ内部を一様に磁化する必要があったり、外部に特殊な機構を要したりと課題が残る。そのため新たな非接触かつ多自由度回転角度の計測が可能なロータリーエンコーダの開発が求められている。

本研究では、計測対象に非接触でかつ同時に多自由度回転の角度計測が可能な新しいロータリーエンコーダの開発を目的とし、永久磁石を付加した回転子の姿勢変化に応じた周辺磁界の変化を磁界検出素子で検出することにより、回転子の姿勢を特定し回転角度に換算するといった角度計測手法を提案する。この手法は前述の既存手法と比べ、計測対象に対して永久磁石を付加するだけであるため計測対象内部への電気配線やその周辺への特殊な機構が必要なくアクチュエータの設計自由度が高い。付加する永久磁石の配置を工夫することにより周辺磁界の姿勢に対する冗長性を排除でき、球自体を磁化するよりも簡易に三自由度回転の計測が可能であるといった利点がある。

本論文では、この手法を実装した試作機を製作し、それを用いた実機実験並びにシミュレーション実験によって提案手法の有効性・特性を評価している。この論文では提案手法の紹介と、各種実験より得られた見解について述べており、その結果、三自由度回転角度を非接触で計測できる新しいロータリーエンコーダの開発に成功し、測定分解能 2 [deg]、測定誤差標準偏差 1.85 [deg]、応答周波数 64 [Hz]を達成した。また、これら測定性能に対し支配的な各種要素についても実験的に明らかにし、測定性能に与える影響や、これらを考慮したさらなる性能向上の可能性について示した。

目 次

第1章 序論	1
1・1 研究背景	2
1・2 研究目的	2
第2章 提案手法・理論	3
2・1 既存の多自由度回転角度計測手法	4
2・1・1.磁石及び磁気検出素子を用いる手法	4
2・1・2.磁化球及び磁気検出素子を用いる手法	6
2・1・3.カメラ及び画像処理を用いる手法	7
2・1・4.レーザ距離計を用いる手法	8
2・2 提案手法	9
2・2・1.提案手法概要	9
2・2・2.磁石配置	12
2・2・3.LUT探索	14
第3章 多自由度エンコーダ	17
3・1 多自由度エンコーダ	18
3・1・1.条件設定	18
3・1・2.構成	18
3・2 実験装置	25
3・2・1.実験装置構成	25
3・2・2.可動範囲	27
3・2・3.座標系	27
3・3 計測性能評価	28
3・3・1.実験条件	28
3・3・2.角度計測性能評価実験結果	29
3・3・3.考察及び結論	32

第4章 特性評価.....	33
4・1 評価項目	34
4・2 外乱量の見積.....	35
4・3 サンプルング間隔に関する特性評価	36
4・3・1.実験手法及び実験条件	36
4・3・2.実験結果及び考察.....	37
4・4 磁界再現性に関する特性評価	43
4・4・1.シミュレーション	43
4・4・2.妥当性評価.....	43
4・4・3.実験手法及び実験条件	44
4・4・4.実験結果及び考察.....	44
4・5 応答周波数に関する特性評価	50
4・5・1.探索アルゴリズムによる応答速度比較	50
4・5・2.部分探索型アルゴリズムの安定性評価	53
4・6 最適化時の挙動.....	55
4・7 結論	56
第5章 結論	57
5・1 本論文の結論.....	58
5・2 今後の展望及び課題.....	58
業績一覧.....	59
参考文献.....	60
謝辞	63

第1章

序論

1.1 研究背景

近年の目覚ましい工業技術の発展に伴い次々と新しい工業製品が登場する中で、それらに対する更なる小型化・高機能化の要求は尽きることはない。それはデバイスの駆動部も例外ではなく、従来のモータのような単に一軸周りのみの回転（一自由度回転）ではなく、一例としては球面超音波モータのような同時に複数の軸周りの回転（多自由度回転）駆動を可能にするアクチュエータが登場し注目を集めるとともに応用が期待されている。

しかし、多自由度回転の駆動システムが開発されているにもかかわらず、それを制御するには必要不可欠ともいえる回転角度の計測装置、すなわちロータリーエンコーダに目を向けると、多自由度回転角度、とりわけ三自由度回転の計測が可能なロータリーエンコーダというものは極めて稀である。

現状における多自由度回転機構の角度検出で最も一般的な手法は、一自由度のロータリーエンコーダやポテンショメータ等を複数組み合わせ使用する手法である。しかしその多くは回転角度を計測するためにモータ周辺に複雑な機構を追加する必要があるため、そのためアクチュエータの設計自由度を著しく下げる。また、追加された部位がモータの駆動部に接触するためモータ動作に対し余計な外力が加わることとなり、アクチュエータ制御の際にこれの補償が必要となる場合もある。これでは角度計測機能は果たしていても、駆動部分に多大な制約を与えるために、モータ本来の機能を十分に発揮できなくなるという点において問題があり満足なものとはいえない。

この問題に対し、これまでにいくつか多自由度回転角度計測の手法が提案されており、その代表的なものとして、磁化球を用いる手法やカメラを設置し画像処理を用いる手法、レーザ距離計を用いる手法等が挙げられる。しかし、これら手法においてもロータ内部を一様に磁化する必要があったり、外部に特殊な機構を必要としたりと課題が残る。そのため新たなロータリーエンコーダの開発が求められている。

1.2 研究目的

本研究は、計測対象に非接触でかつ同時に多自由度回転の角度計測が可能な新しいロータリーエンコーダを開発することを目的とする。そのためこれに対し、

- i. 非接触で同時に多自由度の回転角度が計測可能な手法を提案する
- ii. 上記の手法を実装した多自由度ロータリーエンコーダの試作機を設計・製作する
- iii. 製作した多自由度エンコーダを用いその性能並びに提案手法の有効性を評価する

と段階的に目標を設定し目的の達成を目指す。

なお、ここで言う非接触とは測定対象に触らずに測定することを指し、多自由度とは複数軸周りの回転角度を一度に測定することを指す。

第2章

提案手法・理論

本章ではまず既存の多自由度回転角度測定手法を紹介し，その特徴並びに問題点について論ずる．続いて提案する新しい角度測定手法について説明し，既存手法との違いについて述べる．

なお，ロータリーエンコーダに関しては，一（多）自由度という表現の他にも単（多）軸周りといった表記が特に区別されることなくどちらも一般的に用いられる．そのため本研究においてもこれらは同義として扱うが，論文内では一（多）自由度という表現に統一する．

2.1 既存手法

ここでは現在すでに提案されている多自由度回転角度の測定手法として，磁石及び磁気検出素子を用いる手法，磁化球及び磁気検出素子を用いる手法，カメラ及び画像処理を用いる手法，レーザ距離計を用いる手法の4つを紹介し，その原理の説明並びに問題点について論ずる．

なおこの章では測定対象として中心座標が固定で任意の方向に回転できる球（以下ロータとする）を考え説明する．これは回転自由度としては最大の三自由度を有する．

2.1.1 磁石及び磁気検出素子を用いる手法

この手法は，ロータに対し円筒磁石を1つ付加し，ロータの回転に伴う周辺磁界強度の変化を直交かつ対称で十字に配置した2対4個の磁気検出素子を用いて検出し，この出力を差動で用いることでロータの角度計測を行う手法である．ロータ及び磁気検出素子の配置は以下の図 2.1 に記した模式図のようになる．

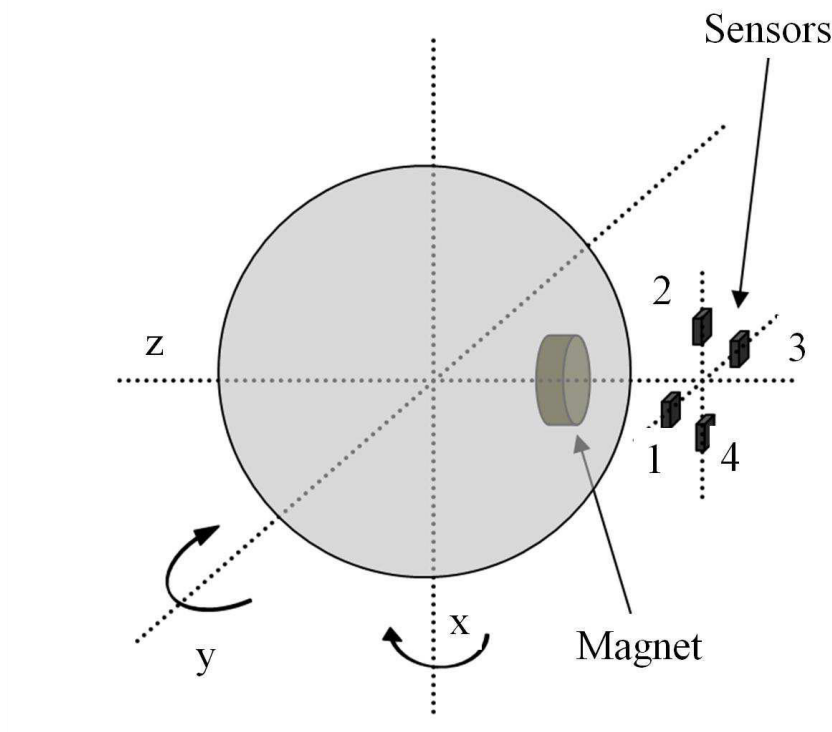


図 2.1 磁石及び磁気検出素子を用いる手法での配置模式図

図 2.1 のような位置関係において，例えば図中の x 軸周りにロータが回転した場合を考えると，この回転に伴い磁石と磁気検出素子の距離が増減するため，素子 1 及び素子 3 からの出力は以下の図 2.2 に記すグラフのような，配置した素子の位置関係に相当する量だけ位相のずれた同じ概形を描く．そのため，この二つの出力の差を考えれば x 軸周りの回転を測定することができ，それが十字に 2 組配置されているため x 及び y 軸周りの二自由度の回転計測が可能である．

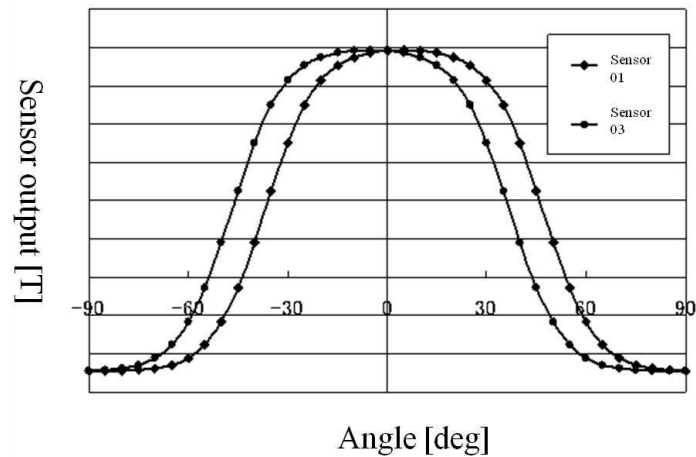


図 2.2 一対のセンサからの出力値概形

この手法は非常に簡単な構成で二自由度の回転角度計測を非接触で行えることが最大の利点であるが，その一方で欠点としては三自由度の回転に対応できないことが挙げられる．

三自由度の回転に対応できない原因は，円筒磁石の周囲に発生する磁界が以下の図 2.3 に示したように磁軸周りに回転対称であることに起因している．磁界が回転対称形である場合，この磁軸周りの回転において周囲の磁界形状は変化しないため，この回転は検出できない．

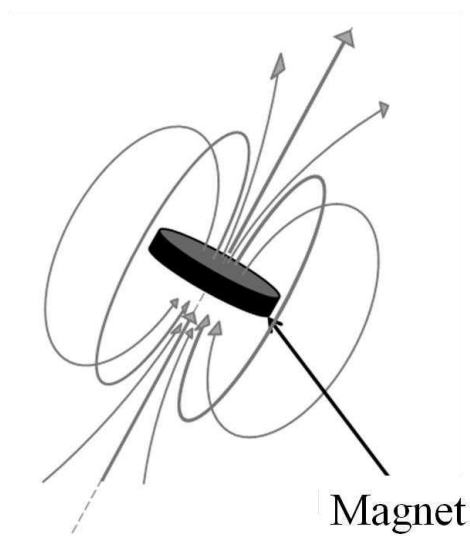


図 2.3 円筒磁石の作る周辺磁界の磁力線図

2.1.2 磁化球及び磁気検出素子を用いる手法

この手法は中野ら^{[22][25]}によって提案された三自由度の回転計測手法で、ロータそのものを磁化した磁化球と、その周囲に3ないし4つの磁気検出素子を配置することにより回転量の計測を行うものである。以下の図 2.4 にその構成の模式図を示す。

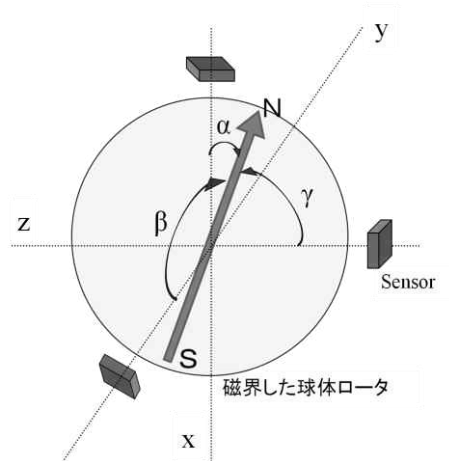


図 2.4 磁化球を用いる手法での配置模式図

均一に磁化した磁化球に対し図 2.4 のように磁気検出素子を近接した場合、素子からの出力は、磁軸とそれぞれの素子位置のなす角である α , β , γ に沿った出力となり、素子面が磁軸の N (S) 極と正対したときに最大 (小) となる。そのため、この 3 つの出力値から磁軸の位置ベクトルを求めることでロータの姿勢を特定することができる。

この手法の利点としては、3 ないし 4 つの磁気検出素子をロータに近接させるという構成が、複数のステータによりロータを挟み込む機構となるような与圧式の球面超音波モータに非常に適していることと、均一な磁化が可能であればロータ内部に多様な機構を持たせることができることが挙げられる。一方、問題点としては、均一にロータを磁化した場合、ロータ周辺に生成される磁界は以下の図 2.5 のように磁軸に対し回転対称形となるため、磁軸周りの回転を検出できないこと、ロータ内部に機構を持たせるために加工を行うと均一な着磁が難しいこと等が挙げられる。

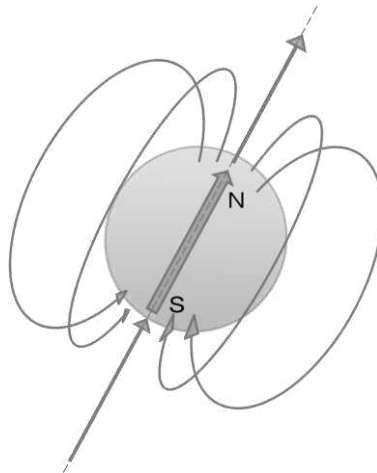


図 2.5 均一に磁化された磁化球周辺の磁力線図

2.1.3 カメラ及び画像処理を用いる手法

この手法は青柳ら^[5]によって提案された三自由度の回転計測手法で、図 2.6 に示したようなロータ表面に複数のマーカを付加し、ロータ側面に CCD カメラを設置するという構成で角度計測を行う手法である。

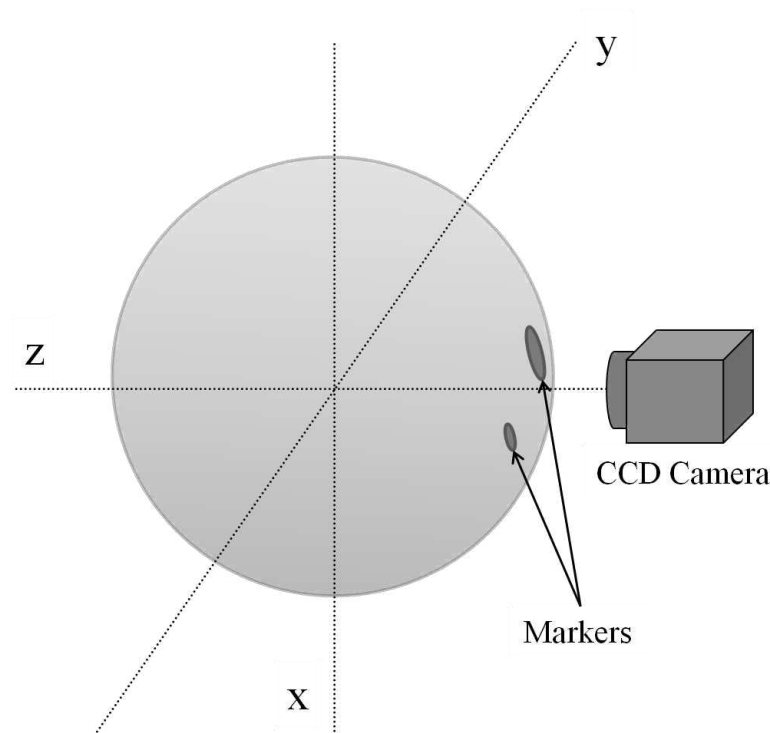


図 2.6 CCD カメラを用いる手法での配置模式図

この手法は CCD カメラによりロータのマーカを撮影し、撮影画像に二値化、ラベリング処理を施した後に画像内における各マーカの重心座標を求め、ロータの回転量を算出するものである。

この手法においてロータに金属球を使用した場合、表面に光沢を持つため反射や映りこみが発生し、その中でマーカ画像を安定に取得することが必要となるが、青柳らは周囲を斜光したうえでマーカに蓄光材を用い、CCD のシャッター光を蓄えマーカを発光させることでこれを解決している。

この手法の特徴としては比較的簡易に三自由度回転角度の計測が可能であることが挙げられるが、取得画像の安定化のため周囲を覆い斜光する設計が求められることや、マーカを付加する際にロータの表面を加工する必要があるため、球表面に凹凸が生じてしまうことが問題として挙げられる。

2.1.4 レーザ距離計を用いる手法

この手法は川野ら^[37]によって提案された手法で、二つのレーザ距離計と円盤状のレーザ反射板を組付けたロータを用いる以下の図 2.6 に示すような機構になっている。

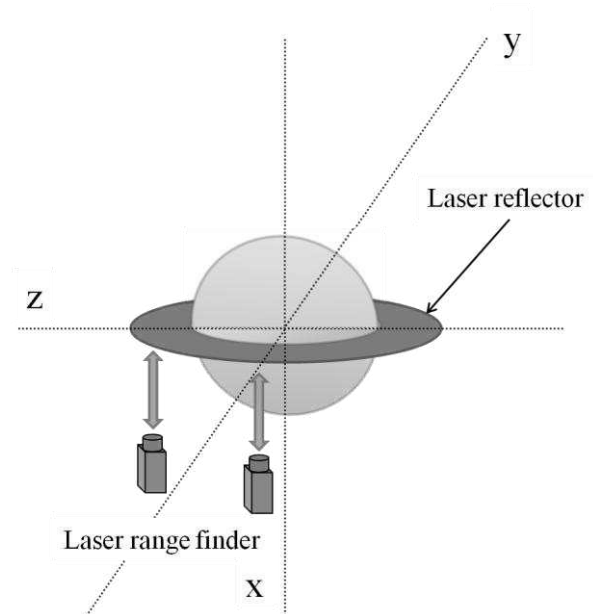


図 2.6 レーザ距離計を用いる手法での配置模式図

この手法は、鉛直方向上向に設置された二つのレーザ距離計により、ロータの回転に伴う反射板までの距離のそれぞれの変位を計測し、その値より反射板の傾斜量を算出するものである。しかしこの手法ではロータ外部に反射板を組付ける必要があるうえ、図中の y 及び z 軸周りの二自由度までしか測定できない。これは本来、テレヘッド^[37]と呼ばれる人の頸部分より上を模したロボットの制御のために考案された手法であるため、図中の x 軸周りの測定に関しては川野らも別途一自由度のロータリーエンコーダを使用している。

2.2 提案手法

ここでは提案する回転角度計測手法について述べる．本提案手法は，ロータに二つの磁石を付加し，ロータの回転に伴う周辺磁界の変化をロータの周囲に複数配置した磁界検出素子により磁界強度の変化を検出することでその姿勢を特定し，三自由度の回転量を同時に計測する手法である．その特徴としては，

- i. ロータに非接触で計測が可能である
- ii. 同時に三自由度の回転量を計測できる
- iii. ロータ及びその周囲に複雑な機構を必要とせずアクチュエータの設計自由度が高いことが挙げられる．

2.2.1 提案手法概要

まず，提案手法の基本的な考え方について述べる．本手法においては以下の図 2.7.の模式図に示すように，ロータには磁軸が直交するように二つの磁石を付加し，ロータ周囲には複数の磁気検出素子を配置した構成となる．この際に必要となる素子数は測定範囲や精度により増減するが，その最小個数は3である．

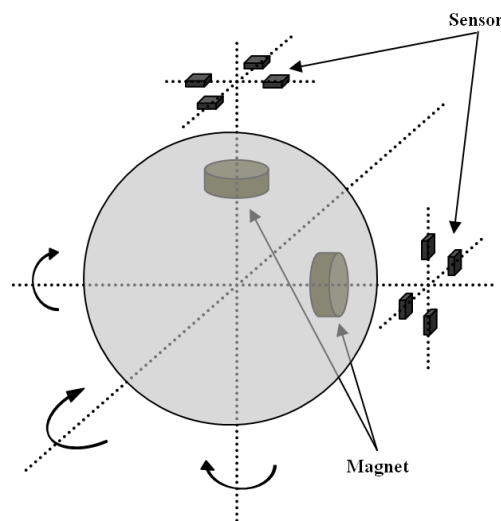


図 2.7 提案手法における配置模式図

上図のような構成で磁石，磁気検出素子を配置した後，ロータの回転に伴う周辺磁界の変化を磁気検出素子により測定し，これら素子からの出力群をもとにロータの回転姿勢を特定することにより3自由度の回転角度を同時に計測する．

しかし素子出力をもとにロータ姿勢を特定するにあたり、磁石周囲に生成される磁界の理論式を導出し使用することは極めて難しい。なぜなら実環境においては、磁石周囲に生成される磁界強度の実測値が理論値から大きくかけ離れてしまうためである。一般に磁束密度は距離の二乗に反比例して減衰することが理論として証明されているが、これはあくまで単極磁石における理想状態での理論である。通常の場合において磁石の周辺磁場は反対側の極の影響等で理論値から大きく外れた測定値を示すため、磁石周辺に生成される磁界の解析式を導出することは現実的ではない。この具体例として、磁石メーカーから提供されている磁界強度の実測値を以下の表 2.1 に記すが、この表からも磁石周囲の磁界の実測値は理論通りに距離の二乗に反比例とはならないことが伺える。

表 2.1 距離による磁力の減衰度合い

磁石との距離 [mm]	φ 38mm / フェライト磁石 [T]	φ 15mm / サマリウムコバルト磁石 [T]
0	0.110	0.267
5	0.076	0.107
10	0.052	0.044
15	0.034	0.019
20	0.023	0.010
25	0.016	0.006
30	0.011	0.004
35	0.008	0.002
40	0.006	0.002
45	0.005	0.001
50	0.004	0.001
55	0.003	0.001
60	0.002	0.001
65	0.002	0.000
70	0.002	0.000
75	0.002	0.000
80	0.001	0.000
85	0.001	0.000
90	0.001	0.000
95	0.001	0.000
100	0.001	0.000

そのため、本手法では磁界の解析式を求めることはせず、あらかじめ事前に測定しておいたロータの姿勢と、ロータ周辺に複数配置した磁界検出素子からの出力群の対応関係より磁界 - 角度間の参照テーブル（以下 LUT）を作成し、これを用いることによりこの問題を解決する。このときロータの姿勢を一意に決定するためには、

- i. 出力群の組合せがロータの姿勢に対し 1 対 1 で対応している（冗長性の無い）こと
- ii. 再現性が保証されていること

が必要条件となる。この条件について本研究では円筒磁石と検出素子の配置を工夫することで対応しているが、これに関しては次の<2.2.2>項で詳しく述べる。

上記必要事項を満たしたうえで、

手順①：事前準備

全ての三軸回転角度における周辺磁界のデータを事前に計測し、磁界 - 角度間の LUT を作成する。

手順②：角度計測

計測対象の回転に伴う周辺磁界の変化を読み取り、各素子からの出力群を基に LUT から対応する回転角度を探索し姿勢を特定する。

という二つの手順を踏むことで、計測対象であるロータの回転角度を非接触で三軸周りの回転角度を同時に測定することができる。また、本論文では以降、事前準備として LUT を作成する過程をサンプリングと呼ぶこととする。

2.2.2 磁石配置

計測対象に付加する永久磁石として円筒形の磁石を1つだけ用いた場合、周囲に生成される磁界は円筒磁石と回転対称軸を共有した回転対称形状となるため、この対称軸周りの回転においては周辺磁界が変化しないことは<2.1.1>項で述べた通りである。これは円筒形に限らず、一様に磁化された球形磁石の場合も同様で、このことが<2.1.1>項並びに<2.1.2>項で紹介した既存手法においてこの回転量を検出できない原因でもあった。そのため、本研究では二つの円筒磁石を回転対称軸がロータ中心において直交するようにロータに付加することでこの問題を解決する。この二つの磁石の位置関係並びに周囲に生成される磁界の磁力線を以下の図 2.8 に示す。

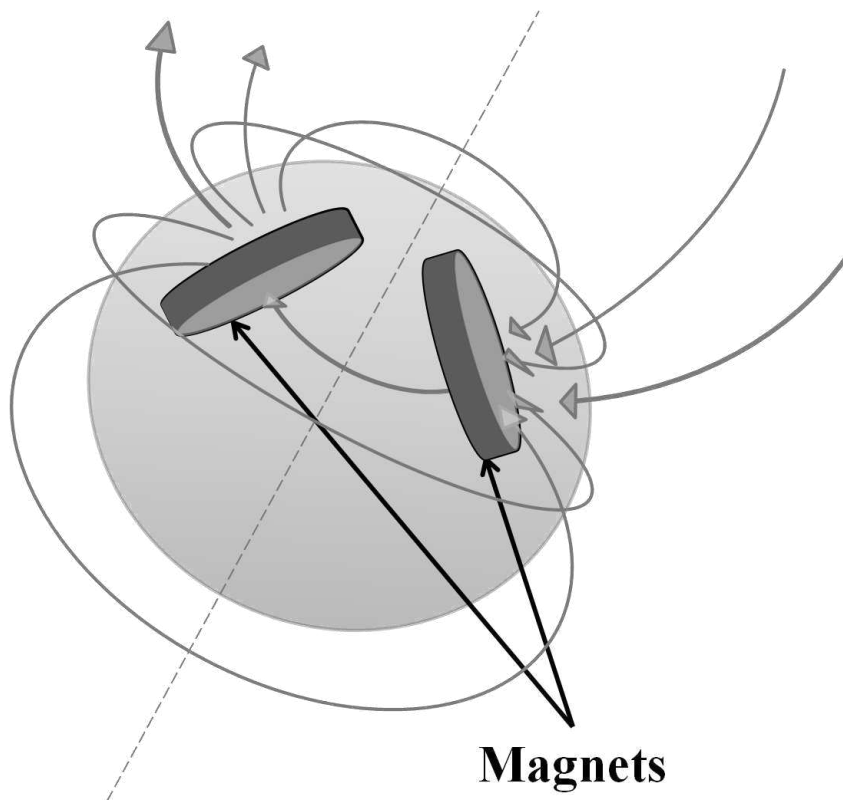


図 2.8 提案手法における磁石配置と周辺磁界の磁力線

図 2.8 に記したような直交位置に 2 つの円筒磁石を埋め込んだ場合，ロータ周囲に生成される磁界は図 2.9 に示すように，それぞれの磁石の回転対称軸を含む平面に対し面对称形状となる．これにより回転対称性を解消し任意方向回転後の姿勢と周辺磁界形状の 1 対 1 で対応させている．そのため，このロータ周辺に配置した 3 つ以上の素子により計測される磁界強度の出力群は，任意のロータ姿勢に対し非冗長性が保たれる．

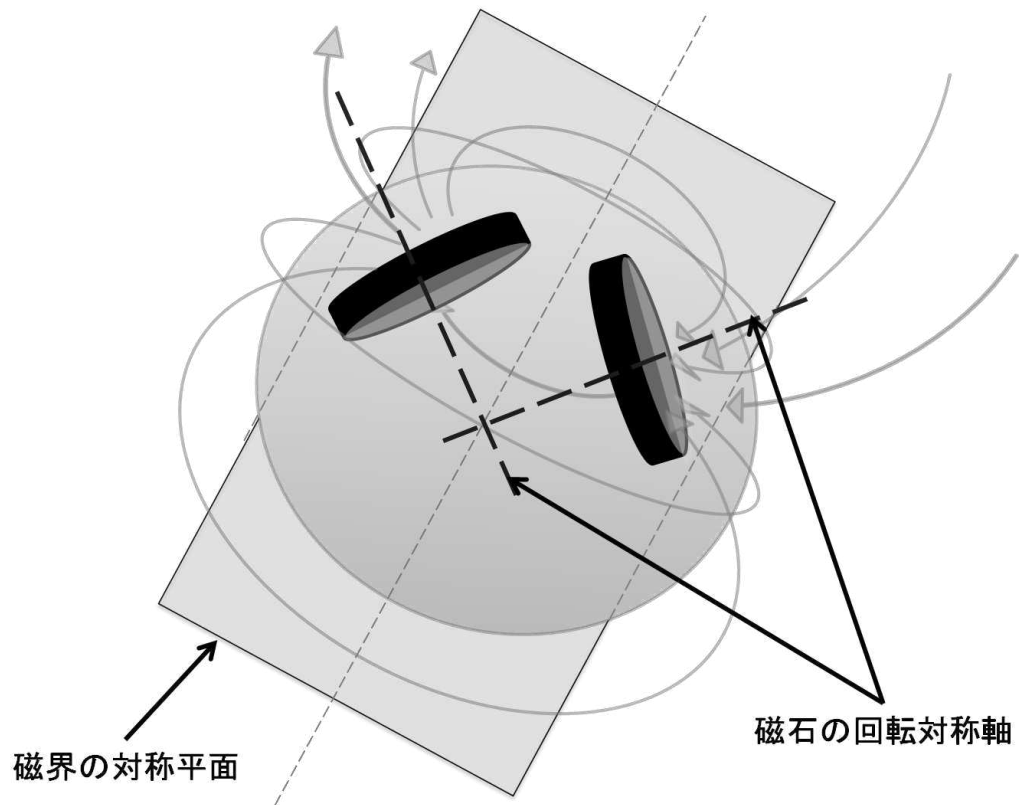


図 2.9 二つの円筒磁石の回転対称軸と磁界の対称平面

2.2.3 LUT 探索

<2.2.1>項で述べた計測手順の手順②にあたる過程では、計測時の姿勢におけるホール素子からの出力値群に最も近い値を LUT から探索する。そのため、この手法に基づくロータリーエンコーダの最大応答周波数はこの処理にかかる時間によって決まり、この処理はほぼ探索領域のサイズにより決まる。本研究では全探索型と部分探索型の2種類の探索アルゴリズムを用いており、ここではこれらについて述べる。

i. 全探索型アルゴリズム

これは最も基本的な探索アルゴリズムで、入力として与えられた検出磁界値群を LUT 内のすべての値と比較し最も近い値を求めるものである。ここで、使用する素子の数を n 、検出した i 番目の素子の出力値を v_i 、LUT 上の i 番目の素子の出力値を V_i としたときの以下の (1) 式

$$E = \sum_{i=1}^n (V_i - v_i)^2 \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる E が最小になる点が求める姿勢となる。

このアルゴリズムを用いる場合、探索領域は LUT 全てとなるため、これに必要とされる処理時間は LUT のサイズに準ずるものとなる。そのため提案手法における応答周波数は LUT のサイズにより決まる。LUT のテーブルサイズはサンプリングの際のデータ取得間隔（以下サンプリング間隔 / Sampling step）とデータ取得範囲（以下サンプリング領域 / Sampling area）によって決まるサンプリング時に取り得る姿勢の総数（以下サンプリング点数 / Sampling points）によって決定する。これについて、サンプリング点数を P 、Roll, Pitch, Yaw 回転におけるサンプリング間隔をそれぞれ S_{roll} , S_{pitch} , S_{yaw} 、サンプリング領域を A_{roll} , A_{pitch} , A_{yaw} とした場合、

$$P = \frac{S_{roll}}{A_{roll}} \cdot \frac{S_{pitch}}{A_{pitch}} \cdot \frac{S_{yaw}}{A_{yaw}} \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成り立つ。

全探索型アルゴリズムの場合、LUT 内のすべての値を参照するため、サンプリング点数がそのまま探索点数となり計算量・計算時間に影響する。例えばサンプリング領域を変えずに各軸周りのサンプリング間隔を2倍細かくした場合、サンプリング点数は8倍となるため、LUT 探索に要する時間もこれに伴い長くなる。また、LUT のテーブルサイズ（データサイズ）もサンプリング点数 P の関数で、この P に使用素子数 n と数値データ1つあたりに必要なデータ容量を掛け合わせたものとなる。

ここで全探索型のアルゴリズムを用いた場合の最高応答周波数に関して考える。多自由度エンコーダの応答周波数は後の<3.1>節で詳しく述べるその構成より、A/D 変換器の動作周期並びにプロセッサの動作周期が基本となりこれに準ずるものとなる。これに対し、実装したアルゴリズムにおける LUT の探索時間は、磁界強度を計測してから最終的に角度値を出力するまでの遅延時間として影響する。そのため、A/D 変換器の動作周期とプロセッサの動作周期のうち長いもの(以下基本周期とする)より LUT 探索時間が短い場合は、多自由度エンコーダの最高応答周波数は基本周期と一致し、長い場合は LUT 探索時間の逆数となる。そのため LUT 探索時間は基本周期よりも短いことが求められる。

ii. 部分探索型アルゴリズム

これは、モータ制御のような入力が続いて与えられる状況において適用することが可能な探索アルゴリズムであり、前回の測定値の近傍に限定し探索をするものである。LUT のテーブルサイズとは無関係に探索領域を指定するため、探索に必要とする時間を短縮することが期待できる。

部分探索型アルゴリズムにおける探索領域内に含まれるサンプリング点数（以下探索点数）を P_L とすれば、その値は Roll, Pitch, Yaw 方向それぞれの探索近傍数を N_{roll} , N_{pitch} , N_{yaw} として以下の式で表わされる。

$$P_L = (2N_{roll} + 1) \times (2N_{pitch} + 1) \times (2N_{yaw} + 1) \dots\dots\dots (3)$$

この (3) 式からも探索点数は任意に設定できる探索近傍数によってのみ決まることが分かる。そのため部分探索型アルゴリズムの計算量・計算時間はサンプリング点数とは無関係に探索点数によって決まることとなる。

ここで部分探索型アルゴリズムを用いた場合の最高応答周波数について考える。部分探索型アルゴリズムにおいても基本的には全探索型と同じで最高応答周波数は基本周期と一致し、LUT 探索時間が遅延として影響する。しかし、部分探索型の場合は全探索型と異なり探索近傍数、すなわち探索点数を任意に設定できるため、容易に探索時間を基本周期内に収めることが可能である。

Roll 方向の探索近傍数 N_{roll} についてその下限は、基本周期間における測定対象の角度変化量を探索領域内に収める必要があることから、測定対象の最大角速度と基本周期によって決まる。これは最大角速度を V_{max} [rpm]、基本周期を T [Hz]、Roll 方向のサンプリング間隔を S_{roll} とすれば、

$$N_{roll} > \frac{V_{max} \times 360}{60 \times T \times S_{roll}} \dots\dots\dots (4)$$

と表わされ、Pitch 及び Yaw 方向においても同様の式が成り立つ。

一方上限は、LUT 探索に要する時間を基本周期に収める必要があることから、探索点数 P_L の探索に要する時間を $f(P_L)$ とすれば、

$$f(P_L) < \frac{1}{T} \dots\dots\dots (5)$$

と表わされる。

以上の事から、部分探索型アルゴリズムを実装した多自由度エンコーダにおける最大応答周波数は、探索領域を式(4)及び式(5)で表わされる範囲に設定した場合、基本周期と一致する。

第3章

多自由度エンコーダ

本章では多自由度ロータリーエンコーダ（以下多自由度エンコーダとする）について述べる．本章では始めに多自由度エンコーダの構成に関して説明し，次にサンプリング及び性能評価用に作成した実験装置について述べる．その後，試作した多自由度エンコーダの検出性能を評価するために行った評価実験について論ずる．

3.1 多自由度エンコーダ

ここでは多自由度エンコーダに関して，条件設定，構成の順に説明する．

3.1.1 条件設定

多自由度エンコーダ開発にあたり，その条件を以下のように設定する．

■ 想定する計測対象

- ・形状 球形ロータ，直径 40[mm]
- ・動作条件 回転中心が球の中心と一致

■ 測定範囲

- ・Roll 軸周り $-30 \sim 30$ [deg]
- ・Pitch 軸周り $-30 \sim 30$ [deg]
- ・Yaw 軸周り $-180 \sim 180$ [deg]

3.1.2 構成

ここでは多自由度エンコーダの構成について説明する．まず製作した多自由度エンコーダの概観を以下の図 3.1 に示す．

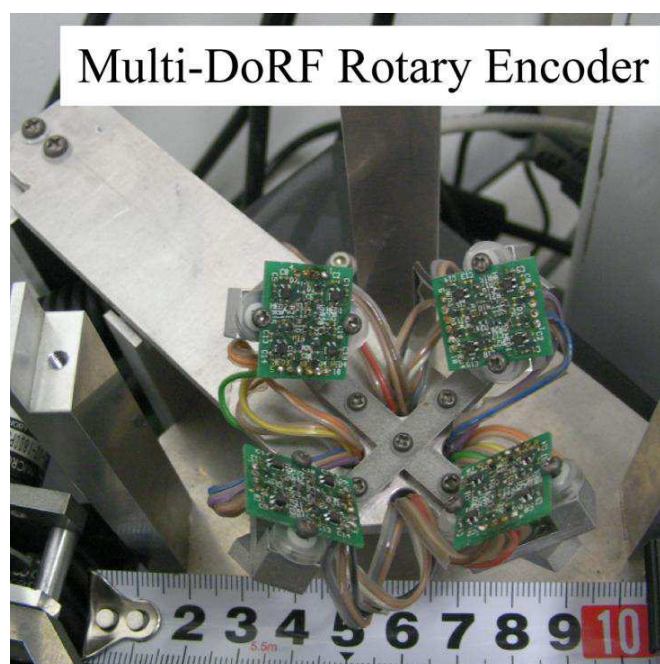


図 3.1 多自由度エンコーダ概観

これは磁気検出素子であるホール素子を4つ搭載したセンサ基板を4枚用いた構成になっており、図 3.2 に示す通り測定対象であるロータに対しかぶせるように設置し角度計測を行うことを想定したものである。

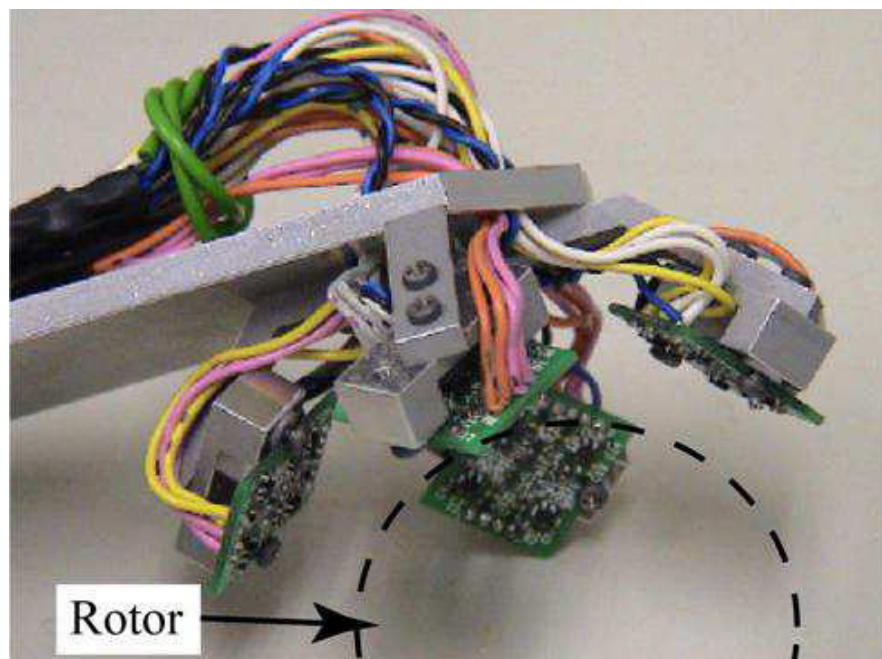


図 3.2 ロータとの位置関係

本項では以降，センサ基板，ロータとの位置関係，周辺機器の順に説明し，最後にまとめとして全体の構成を示す。

■ センサ基板

多自由度エンコーダのセンサ基板について説明する。まず図 3.3 にその外観を示す。

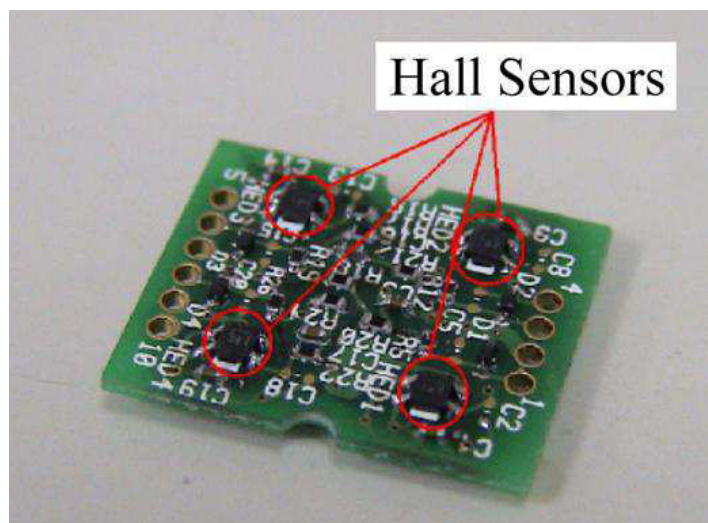


図 3.3 センサ基板

このセンサ基板は磁気検出素子であるホール素子を、対角線の距離が 12[mm]となるような正方形の頂点位置に搭載した構造となっている。そしてこの 4 つのホールセンサにより検出した磁気を、非磁性のオペアンプを使用した増幅回路により増幅することによって、-0.1~0.1[T]の範囲を 1.0~4.0[V]までに対応させてアナログ出力しホスト PC に伝送することができる。なお、このセンサ基板に関する詳細な仕様を表 3.1 および表 3.2 にまとめる。

表 3.1 ホールセンサ基板仕様 1

項目		仕様
形式		NZZA-6233-0001#01
検出機構	検出素子 / 数量	ホール素子 / 4 個
	検出位置	一辺 8.5 [mm]の四角形頂点位置 (対角線距離 12.0 [mm])
プリント基板	層数	4 層
	外形寸法	15 [mm] × 18 [mm] × 高さ約 3 [mm]
	取付部	R1.1 [mm] 半円 × 2
	配線部	Φ1.0 [mm] × 10 (電源 × 1, グランド × 1, 信号 / 信号グランド × 4 ペア)
回路	入力	5 [V]
	出力	アナログ 5 [V]

表 3.2 ホールセンサ基板仕様 2

項目	仕様	備考
電源電圧	4.75 ~ 5.25 [V]	5.00 [V]
消費電流	100 [mA]	最大定格
出力電圧 1 (基準値)	2.5 ± 0.2 [V]	0.0 [T] 相当
出力電圧 2 (最大値)	4.0 ± 0.4 [V]	0.1 [T] 相当
出力電圧 3 (最小値)	1.0 ± 0.4 [V]	-0.1 [T] 相当
出力電流	10 [mA]	最大定格

■ ロータとの位置関係

多自由度エンコーダにおけるロータと4枚のセンサ基板は以下の図3.4の模式図及び図3.5の断面図に示すように、測定対象として想定している磁石を埋め込んだ直径 40[mm]のロータ表面より 5[mm] 離れた接平面となるよう直交・対称に4枚配置される位置関係となる．これによりロータ周辺には合計 16 個のホールセンサが配置されることとなる．

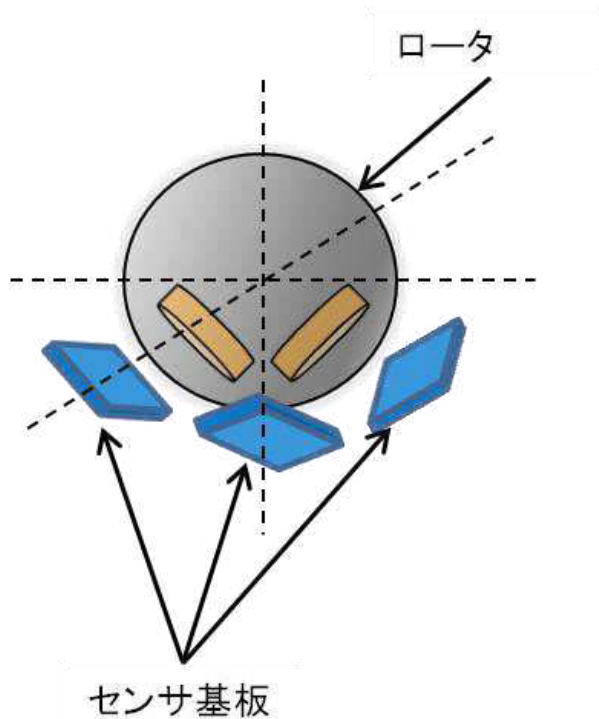


図 3.4 センサ基板配置

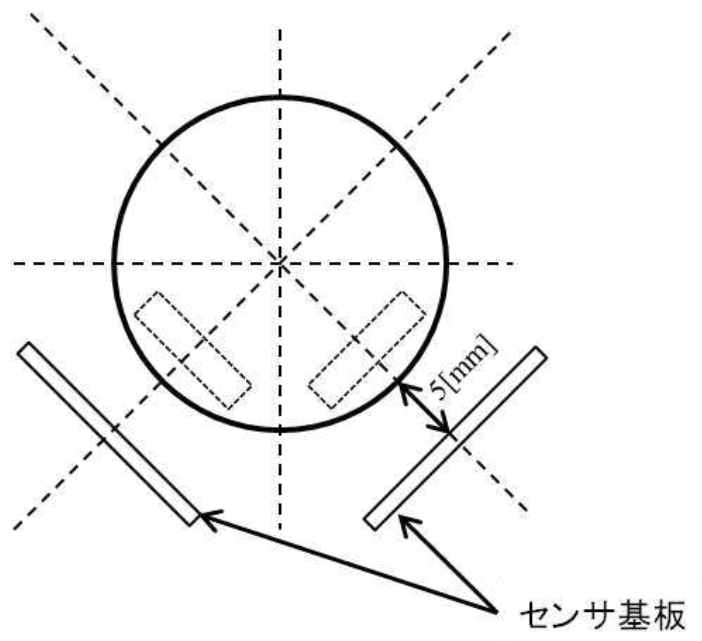


図 3.5 センサ基板配置（断面図）

なお、この 16 個のホールセンサには以下の図 3.6 の模式図に示したように順に 01～16 番の Node-ID が振られており、任意の素子出力を選択して出力することも可能である。

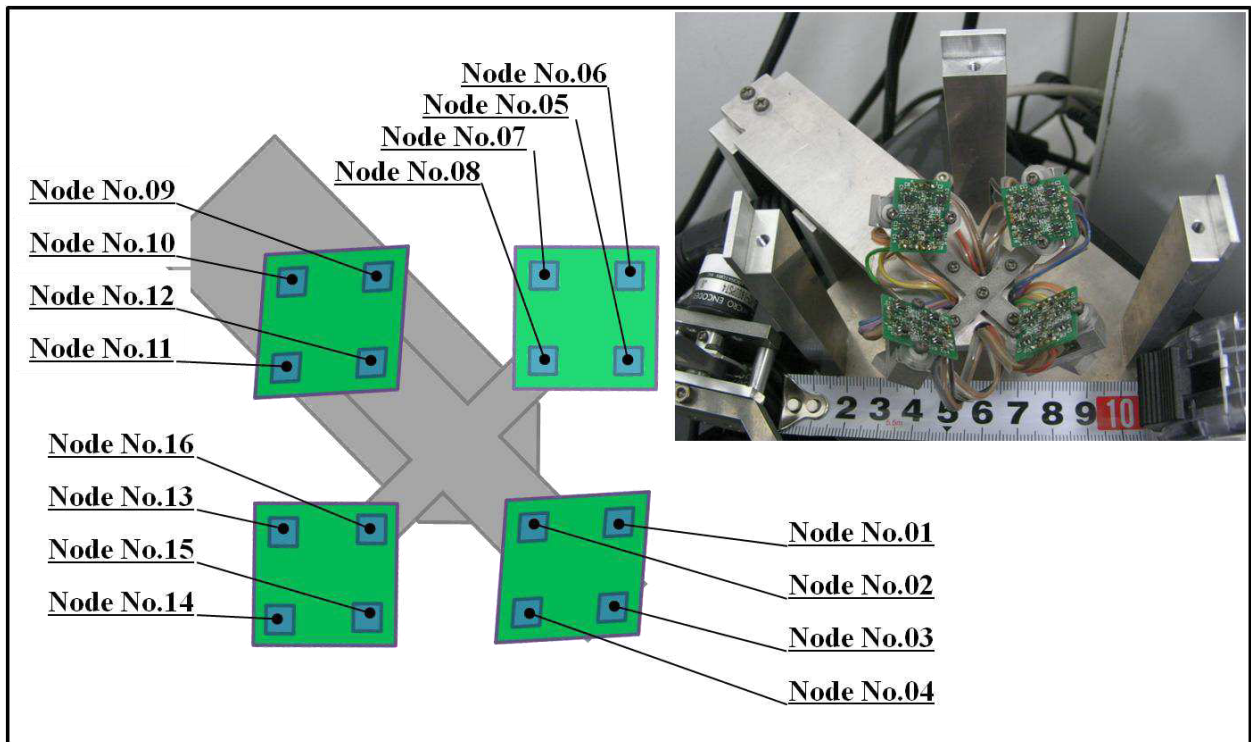


図 3.6 Node-ID

■ 周辺機器構成

多自由度エンコーダを用いての角度計測に必要な周辺機器の構成の模式図を以下の図 3.7 に示す。

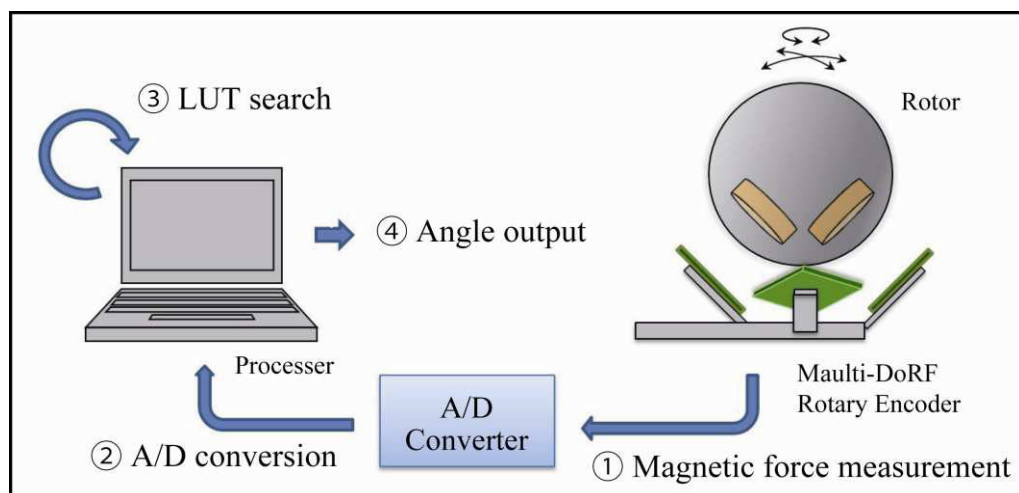


図 3.7 周辺機器構成

多自由度エンコーダ本体からは出力として1組あたり 16 の検出磁界出力群が得られる(図中①). この出力群を A/D 変換器を経て PC に取り込む(②). その後, PC 内で LUT の探索処理を行い(③), ロータの姿勢を特定し角度を出力する(④).

■ 周辺機器仕様

多自由度エンコーダの周辺機器として、アナログ出力を取込むための A/D ボードを搭載したホスト PC が必要となる。以下でこれらについて説明する。

i. A/D ボード

16 個の磁気センサから 0～+5[V] の範囲で出力された電圧をホスト PC に取り込む。以下の表 3.3 に使用した A/D ボードの主な仕様を示す。

表 3.3 A/D ボード仕様

アナログ入力部

項 目	仕様
形式	マイクロサイエンス社製 ADM-686zPCI
入力数・信号形式	16ch シングルエンド
入力範囲	0 [V] ～+5 [V]

AD 変換部

項 目	仕様
分解能	16 [Bit]
単チャンネルサンプリング速度	5 [μs] (200 [kHz])
複チャンネルサンプリング速度	5 × (実行チャンネル数) [μs]
非直線性	%FS ± 0.004
マルチサンプリング機能	各回サンプリング動作のとき各サンプリング・クロック到来ごとにマルチサンプリング・クロックによる指定回数の AD 変換を実行する機能。 平均化による雑音除去や、絶え間のない連続測定動作等に応用できる。
平均化処理機能	マルチサンプリング動作で取得した複数 AD データの平均値をハード的に得る。

ii. ホスト PC

A/D ボードにより取込んだ多自由度エンコーダからの出力値をもとに LUT 探索を行う。以下に使用した PC の仕様及びプログラミング環境を示す。

表 3.4 ホスト PC 環境

項目	仕様	
PC	Dimension9150 / DELL	Pentium4 3.2 [GHz] / Intel
OS	Windows XP / Microsoft	
プログラミング環境	Visual studio 2008 / Microsoft	Visual C++ / CLI

■ サンプルング

多自由度エンコーダでの角度計測では LUT を探索することによりロータの姿勢を特定し、その際の角度を出力する。そのため、事前に LUT を作成しておく必要があり、本研究ではこの LUT 作成の過程をサンプルングと呼ぶ。

サンプルングは以下の図3.8に示すようにロータに対し一時的に外部の多自由度動作機構や多自由度アーム等を組み付けることにより行う。この外部動作機構を用いてロータに全ての姿勢をとらせ、これら姿勢における角度値と磁界の出力値群から LUT を作成する。

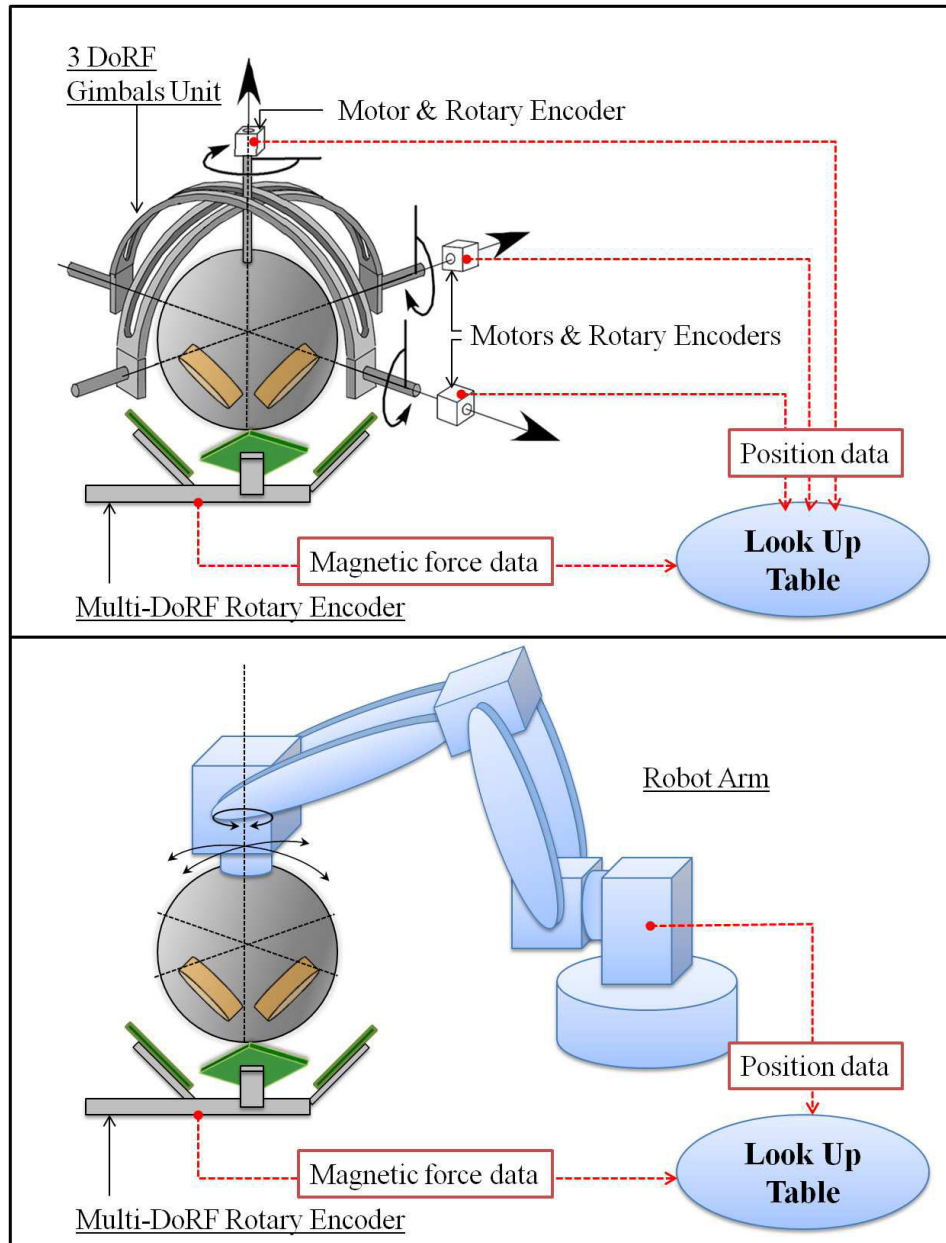


図 3.8 サンプルング環境

3.2 実験装置

ここでは、多自由度エンコーダのサンプリング及び性能評価実験のために製作した実験装置の構成並びに座標系の定義について説明する。

3.2.1 実験装置構成

ここでは実験装置の構成について述べる。まず、実験装置の概観を図 3.9 に示す。

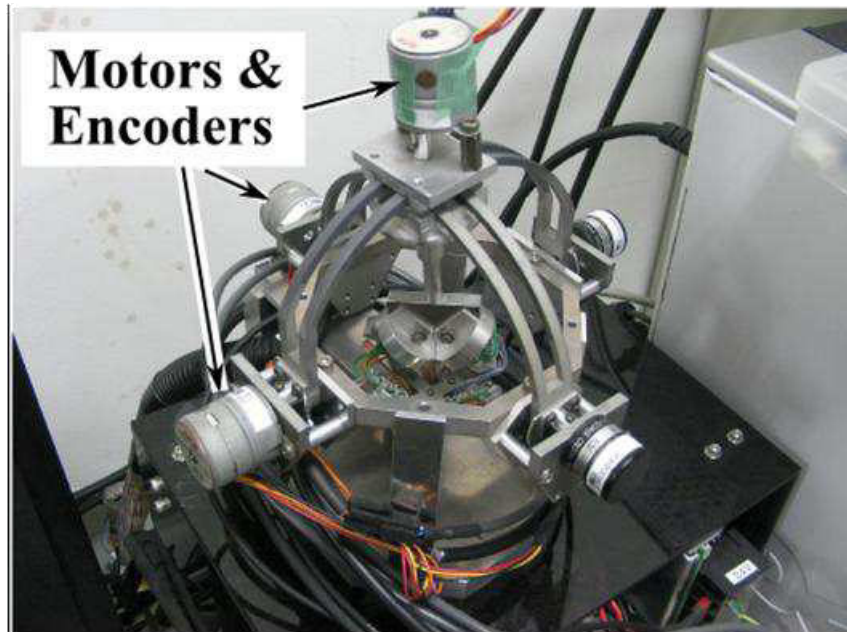


図 3.9 実験装置概観

この実験装置は以下の図 3.10 の模式図で示したような自由度 3 のジンバル構造による動作機構を持つもので、三つの回転軸のそれぞれに対しモータと単軸ロータリーエンコーダが取り付けられた構造になっている。

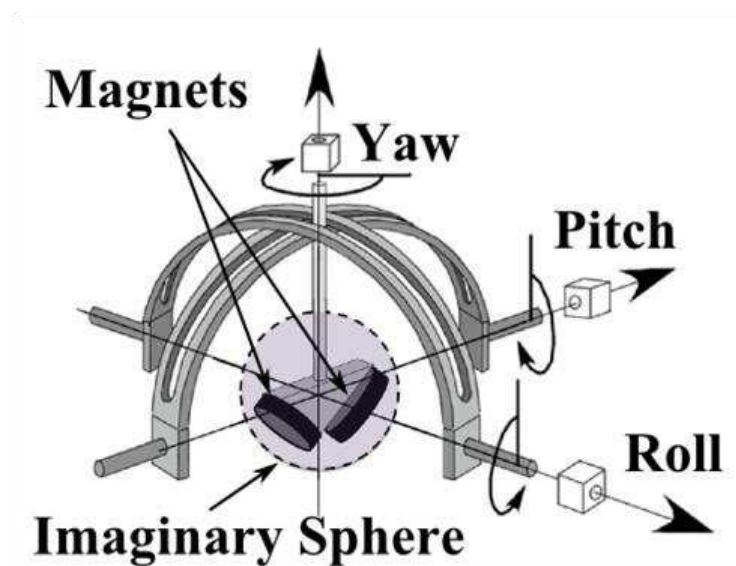


図 3.10 実験装置機構模式図

図 3.10 で示した構造により，この実験装置は機構中心部に可動範囲内で任意の三自由度回転姿勢をとらせることと，その時の各軸の回転角度を取得することが可能である．また，機構中心部は以下の図 3.11 の写真に記したように，2 つの円筒磁石が互いの回転対称軸を直交させるような位置関係で配置されており，これは直径 40 [mm] のロータ内部に収まる位置関係になっている．なおロータに非磁性材料を用いれば生成される磁界には影響がないため，本実験装置においては作業性を優先しロータに相当する金属球は取り付けしていない．

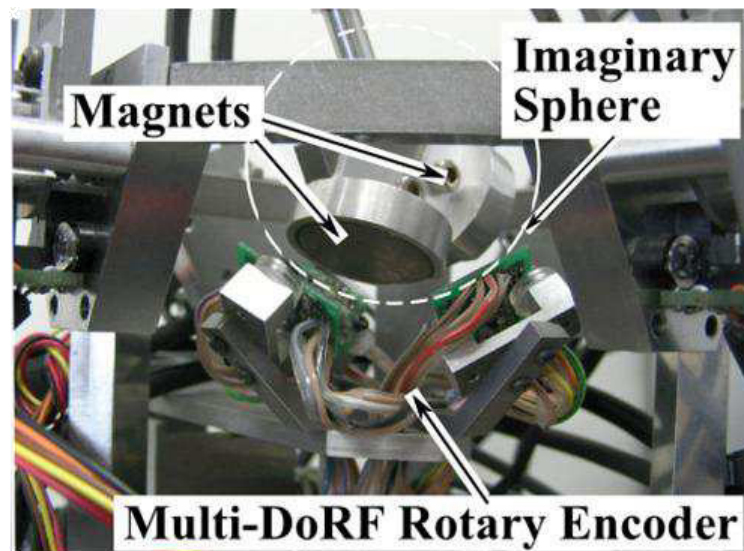


図 3.11 機構中心部

実験装置のモータには一回転あたり 2880 [pls] のパルスモータを，単軸ロータリーエンコーダには一回転あたり 1800 [pls] のものを電氣的に 16 通倍して使用している．したがって位置決めにおける最高分解能は 2880 分の 1，測定精度は ± 0.0125 [deg] である．なお，図 3.12 は分解時の写真で，多自由度エンコーダは仮想球体部を下側から覆うような位置に設置されている．

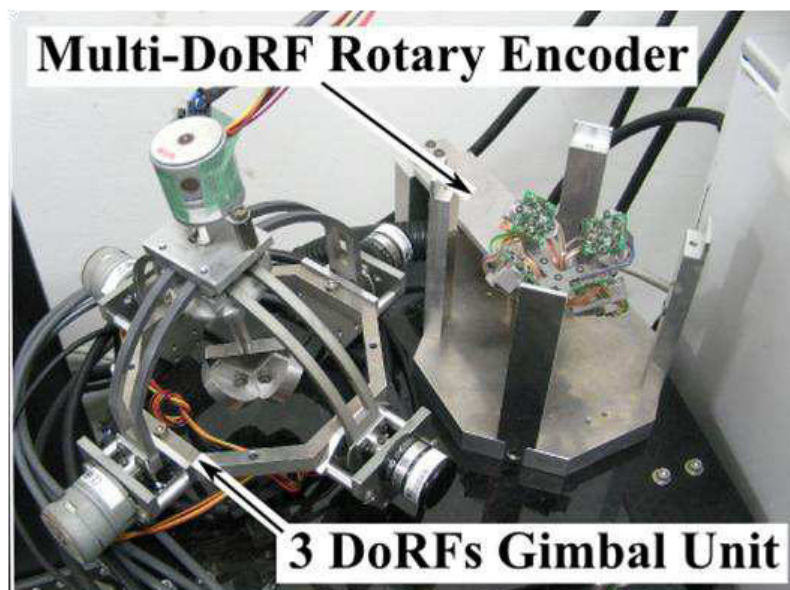


図 3.12 分解写真

3・2・2 可動範囲

本実験装置の各軸周り可動範囲は多自由度エンコーダの測定領域の設定を考慮し、

- ・ Roll 軸周り -60～60 [deg]
- ・ Pitch 軸周り -60～60 [deg]
- ・ Yaw 軸周り -180～180 [deg]

となるように設計している．そのため特異点は存在せずジンバルロックは発生しない．

3・2・3 座標系

多自由度エンコーダにより測定・出力される角度値はサンプリングの際の座標系，すなわち実験装置の座標系定義に依存し，各軸ともに原点位置からの回転量がそれぞれ出力される．

この実験装置には各軸に原点位置検出用のフォトセンサが搭載されており，これにより各軸とも初期姿勢を取得している．なお，初期姿勢は図 3.10 の模式図で示すような各アームが鉛直となる姿勢を原点としており，この初期姿勢においてはロータ中心を座標原点とした左手系を構成する．

3.3 計測性能評価

ここでは、開発した多自由度エンコーダの角度計測性能の評価を目的に行った評価実験について述べる。

3.3.1 実験条件

■ サンプルング条件

以下の表 3.5 に記した 3 種類の条件のもと、No.01～03 の 3 種の LUT を作成し実験に用いた。

表 3.5 サンプルング条件

		LUT No.01	LUT No.02	LUT No.03
サンプルング間隔		1 [deg]	2 [deg]	4 [deg]
サンプルング領域	Roll	± 4 [deg]	± 12 [deg]	± 32 [deg]
	Pitch	± 4 [deg]	± 12 [deg]	± 32 [deg]
	Yaw	± 180 [deg]	± 180 [deg]	± 180 [deg]
サンプルング点数		29,160	30,420	26,010

■ 判定条件

多自由度エンコーダによる角度計測を 3 種それぞれの LUT の場合で行い、得られた角度計測値を真値と比較する。なお、この際の計測範囲は各 LUT のサンプルング領域と同じとし、計測間隔は以下の表 3.6 に記した各 LUT につき 3 通り、試行回数は各 6 回で部分探索型のアルゴリズムにより前後 5 近傍を探索するものとする。

表 3.6 各 LUT の出力分解能

	LUT No.01	LUT No.02	LUT No.03
計測間隔	1, 2, 4 [deg]	2, 4, 8 [deg]	4, 8, 16 [deg]

3.3.2 角度計測性能評価実験結果

角度計測性能評価実験結果を以下の表 3.7～表 3.15 にそれぞれまとめた。

■ LUT No.01

・計測間隔 1 [deg]

表 3.7 LUT No.01 計測間隔 1 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	81.612	79.016	81.495	81.704	79.078	81.626	80.755
	Pitch	98.484	98.066	98.488	98.861	97.867	98.745	98.418
	Yaw	98.299	97.387	98.447	98.642	97.157	98.426	98.060
	三軸同時	79.043	75.350	79.225	79.709	75.055	79.331	77.952

・計測間隔 2 [deg]

表 3.8 LUT No.01 計測間隔 2 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	98.435	98.889	98.413	98.685	99.116	98.98	98.753
	Pitch	99.819	99.955	99.955	99.932	99.887	99.909	99.909
	Yaw	100	99.977	100	99.932	100	100	99.985
	三軸同時	98.322	98.821	98.39	98.549	99.002	98.889	98.662

・計測間隔 4 [deg]

表 3.9 LUT No.01 計測間隔 4 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	100	100	100	100	100	100	100
	Pitch	100	100	100	100	100	100	100
	Yaw	100	100	100	100	100	100	100
	三軸同時	100	100	100	100	100	100	100

■ LUT No.02

・計測間隔 2 [deg]

表 3.10 LUT No.02 計測間隔 2 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	99.974	99.987	99.984	99.869	99.967	99.888	99.945
	Pitch	99.944	99.776	99.934	99.839	99.665	99.645	99.801
	Yaw	99.987	99.872	99.99	99.875	99.915	99.845	99.914
	三軸同時	99.911	99.635	99.908	99.583	99.55	99.379	99.661

・計測間隔 4 [deg]

表 3.11 LUT No.02 計測間隔 4 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	100	100	100	100	100	100	100
	Pitch	100	100	100	100	100	100	100
	Yaw	100	100	100	100	100	100	100
	三軸同時	100	100	100	100	100	100	100

・計測間隔 8 [deg]

表 3.12 LUT No.02 計測間隔 8 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	100	100	100	100	100	100	100
	Pitch	100	100	100	100	100	100	100
	Yaw	100	100	100	100	100	100	100
	三軸同時	100	100	100	100	100	100	100

■ LUT No.03

・計測間隔 4 [deg]

表 3.13 LUT No.03 計測間隔 4 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	99.988	99.988	100	100	99.988	99.996	99.994
	Pitch	99.996	99.996	99.935	100	99.904	99.996	99.971
	Yaw	99.988	99.962	99.996	99.981	99.969	99.981	99.979
	三軸同時	99.985	99.954	99.931	99.981	99.873	99.977	99.95

・計測間隔 8 [deg]

表 3.14 LUT No.03 計測間隔 8 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	100	100	100	100	100	100	100
	Pitch	100	100	100	100	100	100	100
	Yaw	100	100	100	100	100	100	100
	三軸同時	100	100	100	100	100	100	100

・計測間隔 16 [deg]

表 3.15 LUT No.03 計測間隔 16 [deg]

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	平均
正答率 [%]	Roll	100	100	100	100	100	100	100
	Pitch	100	100	100	100	100	100	100
	Yaw	100	100	100	100	100	100	100
	三軸同時	100	100	100	100	100	100	100

3・3・3 考察及び結論

角度計測性能評価実験により，計測に使用した LUT のサンプリング間隔を基準として，1 倍，2 倍，4 倍となるような計測間隔で計測正答率を調べたが，その結果，LUT No.02（サンプリング間隔 2 [deg]）使用時の計測間隔 2 [deg]の場合において三自由度計測時の計測正答率 99.661 [%]を達成し，計測間隔 4 [deg]の場合は全ての LUT 使用時において計測正答率 100 [%]を達成した．ここにおいて計測間隔 2 [deg]は分解能に換算すると $2 / 360 (= 1 / 180)$ に相当し，計測間隔 4 [deg]は $1 / 90$ に相当することから，試作した多自由度エンコーダにより，実機実験で分解能 $1 / 90$ 相当の三自由度非接触計測を実現したと言え，99 [%]以上の計測正答率であれば分解能 $1 / 180$ 相当まで達成したと言える．

この計測に対し，探索する近傍数を 5 に設定した部分探索型のアルゴリズムを用いることで，リアルタイム計測も同時に達成しているが，応答速度（周波数）に関しては第四章で詳細を論ずる．

また，LUT のサンプリング間隔を細かくすると計測正答率が低下する傾向が全ての結果において伺えるが，これに関する詳しい考察も次の第四章で述べることとする．

よってここまでの結果より，少なくとも

- ・ 分解能 $1 / 90$ 相当の三自由度非接触計測をリアルタイムで実現した．
- ・ 99 [%]以上の計測正答率であれば分解能 $1 / 180$ 相当までを実現した．

と言え，これらより三自由度回転角度を非接触で計測できる新しいロータリーエンコーダの開発に成功したと結論づけた．

第4章

特性評価

本章では多自由度エンコーダの計測性能として、計測正答率と応答周波数を取り上げ、計測正答率に関してはこれに影響を与える要素であると考えられるサンプリング間隔並びに外乱量との関係から、応答周波数に関しては実装する LUT 探索アルゴリズムと周辺機器の構成から、これらの特性を明らかにすることを目的とし、実機実験並びにシミュレーションを用いた実験結果をもとに論じている。

4.1 評価項目

多自由度エンコーダの計測正答率は、<3.3.3>項でも述べた通り LUT のサンプリング間隔の影響を受けることが伺える。また、LUT を探索して角度計測を行うという提案手法の性質から外乱が全くなく、計測時の磁界の再現性が完全に保たれている場合、計測正答率は 100 [%]となるが、実環境においてはホール素子の出力特性やサンプリングにおける実機装置の位置決め精度、通信ノイズ、測定対象となるアクチュエータからのノイズ等の外乱が存在し、磁界再現性が低下するため計測正答率も低下することが考えられる。そのためここでは、

- ・サンプリング間隔
- ・磁界再現性

の二つの要素を評価項目に定め、これらが計測正答率に与える影響を調べる。一方応答周波数においては、<2.2.3>項で述べた通り、実装する LUT 探索アルゴリズムに大きく影響されることが考えられる。そのため、

- ・全探索型アルゴリズム
- ・部分探索型アルゴリズム

の二種類の探索アルゴリズムによる応答速度の測定実験の結果から、応答周波数に対して支配的な要因を特定するとともにその特性を評価する。

4.2 外乱量の見積

前節で定めた評価項目の評価に際し、外乱量及び分布を見積もる必要がある。理論的には全ての誤差要因を考慮した伝播式を用いればその理論値を算出することができるが、上述したような外乱を要因ごとに切り分けて理論値を求めることは非常に難しいうえに非効率である。よってここではこれらすべてを一括して扱うため、その量を実測して以降の評価実験に用いることとし、誤差量を見積もる予備実験を行った。

これは実験装置において Roll 及び Pitch 軸が -30, 0, 30 [deg] のいずれかになる 9 個所で Yaw 軸を -180 ~ 180 [deg] まで 1 [deg] 刻みで回転させたときにとる約 3,000 通りの姿勢での各素子からの検出値を 5 回取得し、この試行での出力値の分布を調べるといった手順で行った。その結果、以下の図 4.1 に示すような正規分布に近いヒストグラムが得られ、その標準偏差は 48.8 [digit] であった。なお、図中のグラフは標準偏差 48.8 の正規分布の理論曲線である。この結果より、以降の評価実験では外乱量は正規分布に従うものとして扱う。

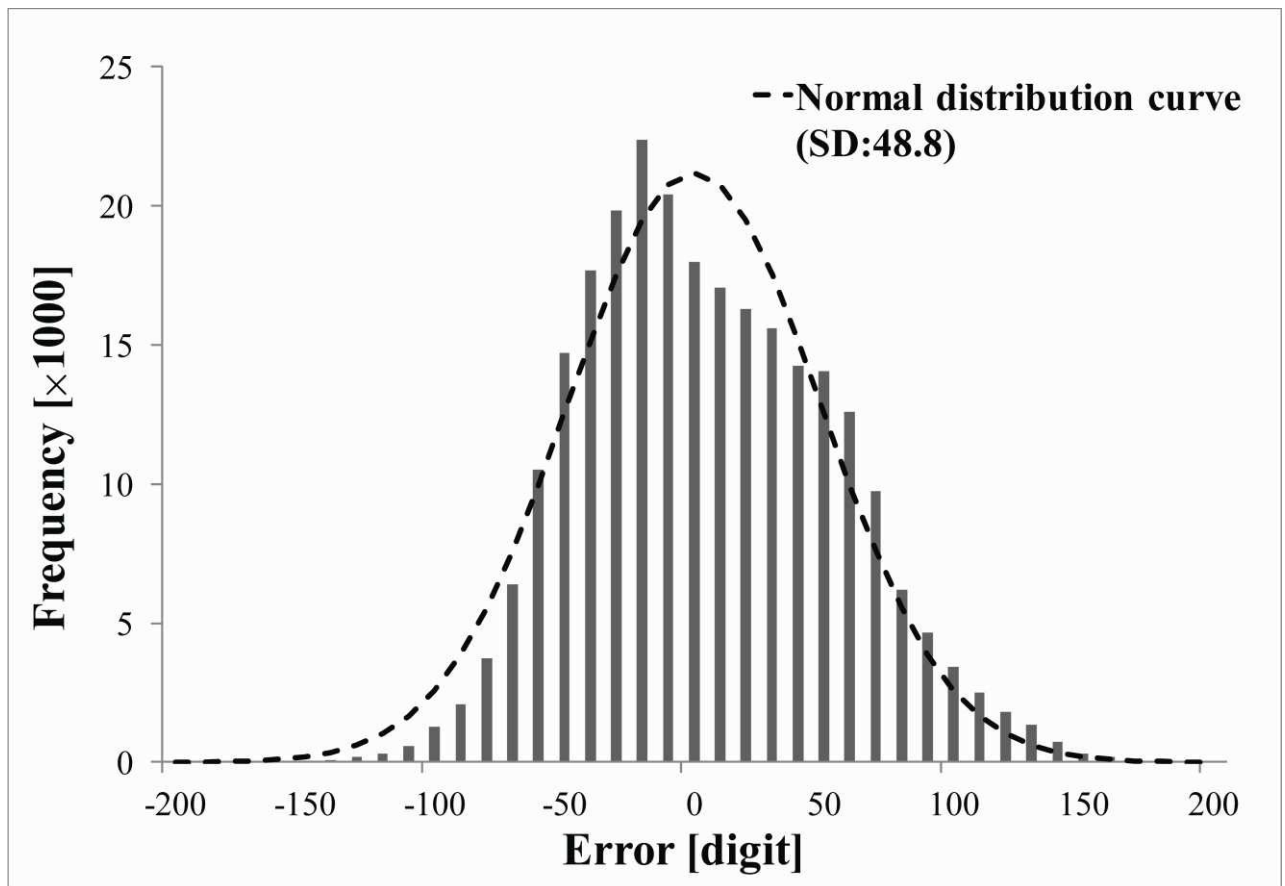


図 4.1 外乱量測定結果

4.3 サンプルング間隔に関する特性評価

ここではサンプルング間隔と計測正答率の関係を評価するために行った実験について述べる．なおこの実験環境下における基本時間（PC 上で動作するプログラムの 1 ループに要する時間）は平均で 15.6 [msec]，周波数に換算すると約 64 [Hz]としている．

4.3.1 実験手法及び実験条件

以下に記す手順に従いサンプルング間隔に関する評価実験を行った．

- (i) 1 [deg]から 6 [deg]まで 1 [deg]刻みでサンプルング間隔の異なる LUT を作成する
- (ii) これらに対し各々のサンプルング時に取り得る全姿勢で角度計測を行いそれぞれの計測正答率を求め，その結果を比較する．

なお，この評価実験の条件は以下の表 4.1 にまとめた．

表 4.1. 実験条件.

		LUT No01	LUT No02	LUT No03	LUT No04	LUT No05	LUT No06
サンプルング間隔 [deg]		1	2	3	4	5	6
サンプルング領域 [deg]	Roll	±180	±180	±180	±180	±180	±180
	Pitch	±6	±12	±24	±24	±25	±24
	Yaw	±6	±12	±24	±24	±25	±24
サンプルング点数		60,840	30,420	34,680	15,210	8,712	4,860

4.3.2 実験結果及び考察

サンプリング間隔に関する評価実験の結果を以下の表 4.2 にまとめた。なお、表中の計測失敗点数は誤差量ごとにまとめているが、LUT No.01～06 でそれぞれサンプリング間隔の異なる LUT を用いている都合上、出力誤差の単位間隔が異なる。そのためここでは LUT のサンプリング間隔を 1[step]とした誤差ステップ量としてまとめている。この誤差ステップ量は Roll, Pitch, Yaw 成分ごとの誤差の絶対値の和となっており、具体的には例えば Roll, Pitch, Yaw がそれぞれ (0,0,0) である姿勢を測定したとき、サンプリング間隔 1[deg]において測定値として (-1,0,1) が得られた場合の誤差ステップ量は 2 [step]として、サンプリング間隔 3[deg]において (-6,0,3) が得られた場合は 3 [step]として扱い集計している。

表 4.2 サンプリング間隔に関する特性評価実験結果

		LUT No01	LUT No02	LUT No03	LUT No04	LUT No05	LUT No06
計測失敗点数	誤差ステップ量 1 [step]	5,845	87	6	0	0	0
	誤差ステップ量 2 [step]	1,137	6	0	0	0	0
	誤差ステップ量 3 [step]	48	0	0	0	0	0
	誤差ステップ量 4 [step]	3	0	0	0	0	0
	合計	7,033	93	6	0	0	0
計測成功点数 (計測正答率[%])		53,807 (88.44)	30,327 (99.69)	34,674 (99.98)	15,210 (100)	8,712 (100)	4,860 (100)

サンプリング間隔に関する評価実験の結果について考察する．始めに，サンプリング間隔と計測正答率の関係のみに着目する．以下の図 4.2 は横軸にサンプリング間隔，縦軸に計測正答率（PCA）をとり表 4.2 の結果をプロットしたグラフである．

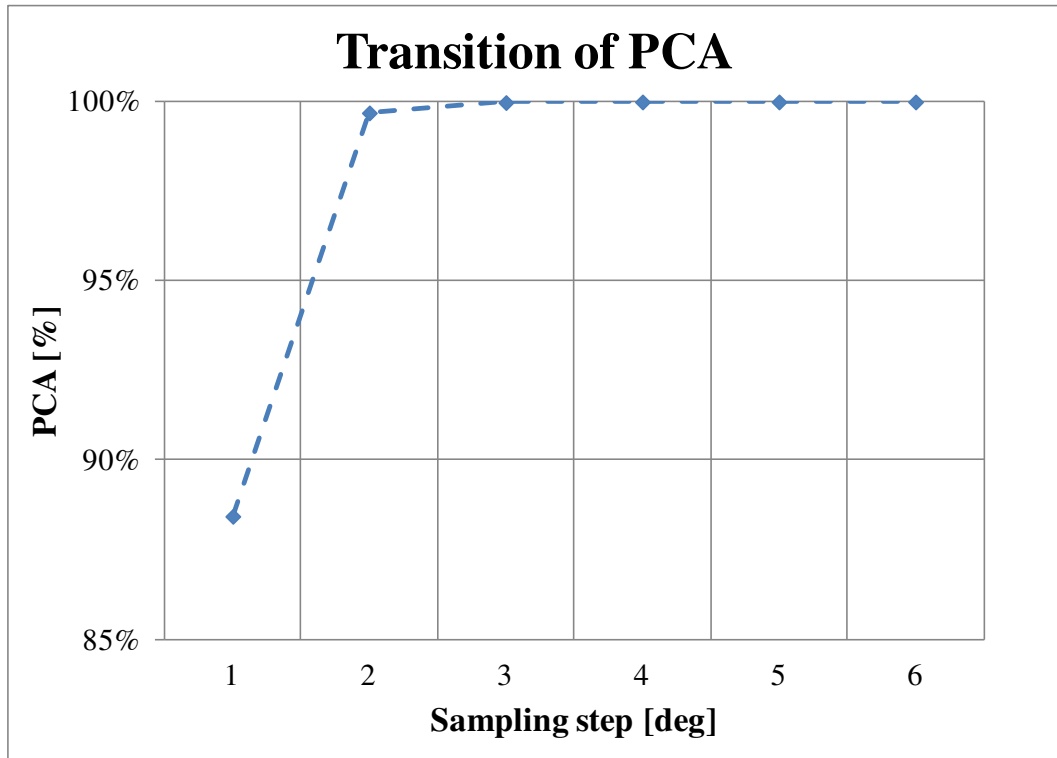


図 4.2 計測正答率の推移

この図から，サンプリング間隔が細くなるにつれて計測正答率が低下することが読みとれる．これは，サンプリング間隔が小さくなれば単位サンプリング間隔あたりの磁界の変化量，すなわち LUT における各姿勢間の値の差も小さなものとなるため，計測正答率が低下すると考えられる．

そのためここで**磁界変化量 / AMC** という値を定義する．これは LUT における各姿勢間の値の差を表す値である．ある姿勢における磁界の変化量は素子出力の微分値に相当するが，多自由度エンコーダでは 16 個の素子からの出力を用いるため，これら出力群の絶対平均値をとり，これをこの姿勢における磁界変化量とする．この実験に用いた 6 種類の LUT に対し磁界変化量を求め，以下の表 4.3 にまとめた．表中のサンプリング点平均は出力の正誤に関わらず，測定したサンプリング点全てにおける磁界変化量の平均値で， $\pm X$ [step] 平均とはそれぞれのステップ分の誤差を返した点のみの磁界変化量の平均値，計測失敗点平均は誤差量に関わらず測定に失敗した点全てにおける磁界変化量の平均値を示す．

表 4.3 磁界変化量

		LUT No01	LUT No02	LUT No03	LUT No04	LUT No05	LUT No06
AMC [digit]	サンプリング点平均	85.61	169.60	248.23	303.51	411.81	494.11
	± 1 [step] 平均	72.62	126.52	191.08	—	—	—
	± 2 [step] 平均	69.01	129.42	—	—	—	—
	± 3 [step] 平均	68.75	—	—	—	—	—
	± 4 [step] 平均	57.53	—	—	—	—	—
	計測失敗点平均	72.00	126.70	191.08	—	—	—

表 4.3 の値から，まず計測点全体の磁界変化量の平均よりも測定失敗点の磁界変化量の平均が常に下回っていることが読み取れる．また誤差ステップ量が大きいほど磁界変化量の平均値も小さいこともわかる．

ここで、測定失敗点の磁界変化量の分布を誤差ステップ量ごとに見るため、以下の図 4.3 にまとめた。この図 4.3 は LUT No.01 における測定失敗点の磁界変化量の分布を誤差ステップごとにそれぞれまとめたもので、横軸を磁界変化量、縦軸を出現頻度としてプロットしたグラフである。

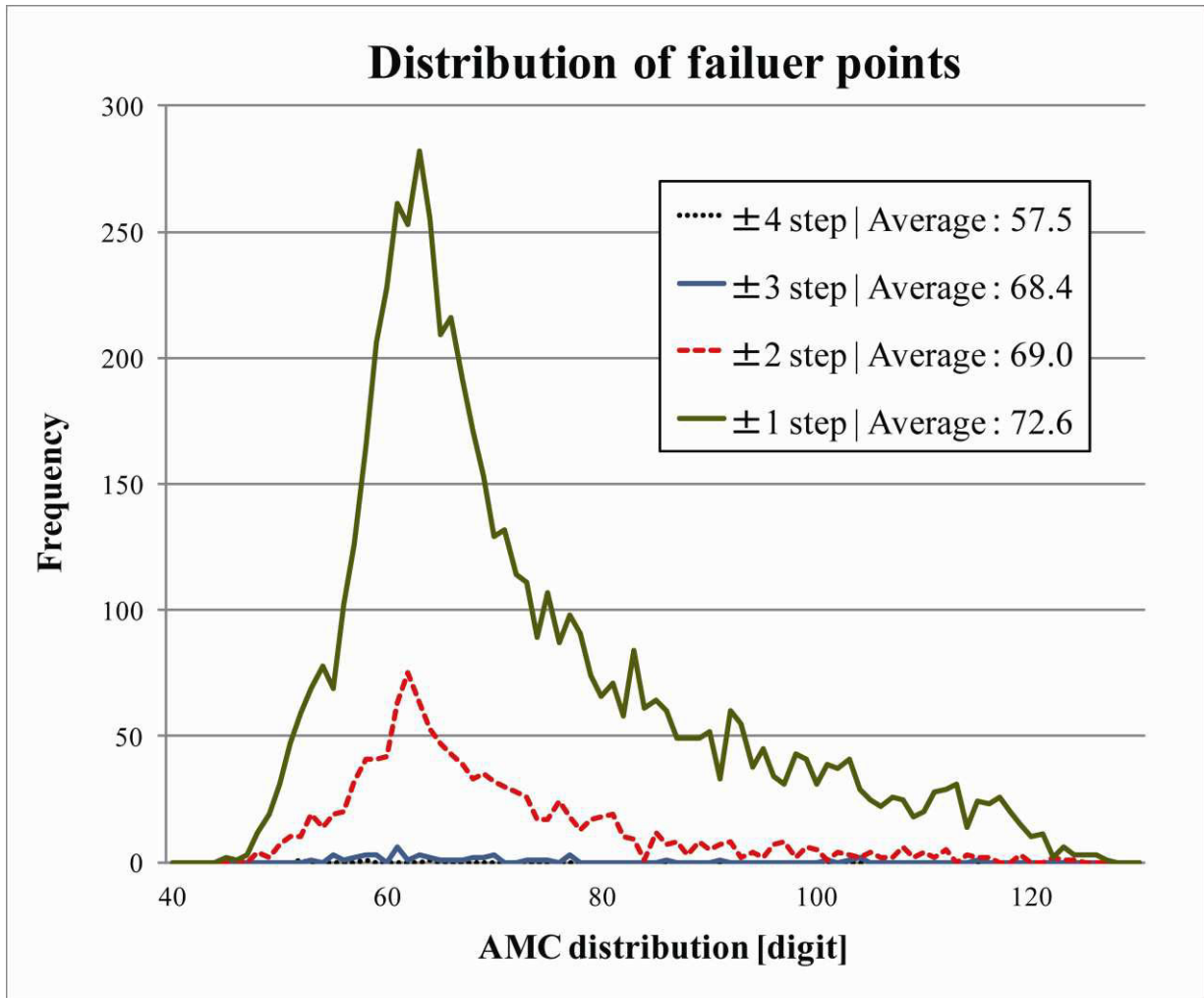


図 4.3 磁界変化量による誤差発生頻度の分布

この図 4.3 より、誤差ステップが小さい計測失敗点に比べ大きい計測失敗点の方がより磁界変化量の小さい範囲に集中して分布し、その平均値も小さくなっていることが読み取れる。この結果より磁界変化量の小さい姿勢において計測正答率は低下し、また誤差量も大きくなることが伺える。

次に各軸の回転量に対する計測失敗点の分布に着目する．以下の図 4.4 は横軸に計測失敗点における各軸の角度，縦軸に出現回数を Roll, Pitch, Yaw の成分ごとにまとめたヒストグラムである．なお，測定に際して Roll, Pitch, Yaw の内一つでも真値と異なる値を返せばその姿勢の計測は失敗であるため，このヒストグラムにおいて Roll, Pitch, Yaw それぞれの出現回数の和はすべて計測失敗点数に等しい．

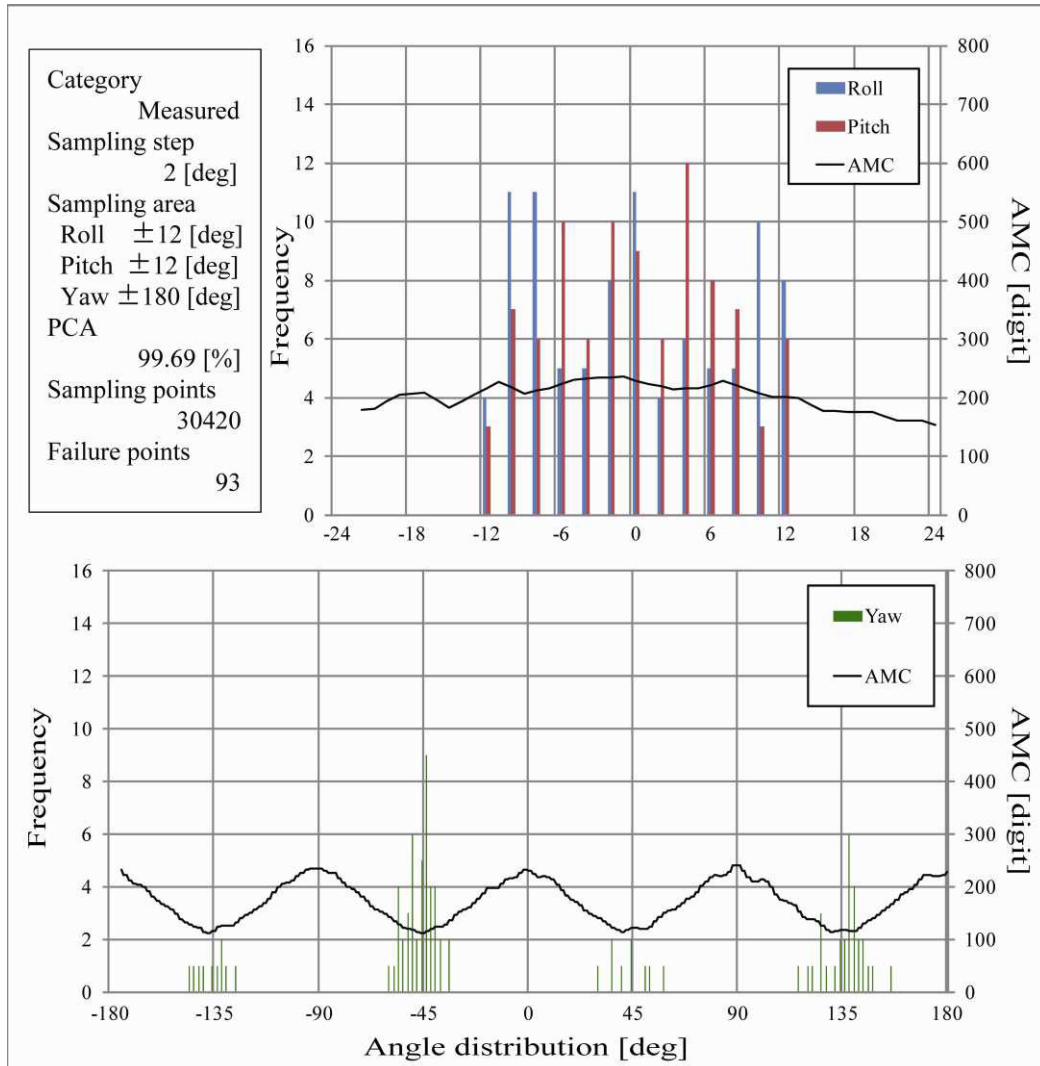


図 4.4 磁界変化量と計測失敗点の発生頻度

図 4.4 から，計測失敗点は Roll, Pitch 成分の分布に関しては明確な差はなく，Yaw 方向の分布において 90[deg]周期で集中しており，磁界変化量の減少に合わせて出現していることが読み取れる．この磁界変化量に伴い計測正答率が低下するという結果は先の知見とも一致する．またこの結果より，磁界変化量変動する理由としては磁石と多自由度エンコーダの位置関係が主な要因であると考えられる．ホール素子により検出される磁界は素子に対し垂直方向成分のみであるため，Yaw 方向においては図 4.5 の 45[deg]の例のように，二つの磁石の対称平面と直交するセンサ基板の出力はほぼ 0 となる．そのためこの姿勢となった場合は有効に機能する素子数（以下実効素子数）が減り，実質少ない素子数で計測を行っているのに等しい状態となるため磁界変化量が減少し，その結果計測正答率が低下すると考えられる．

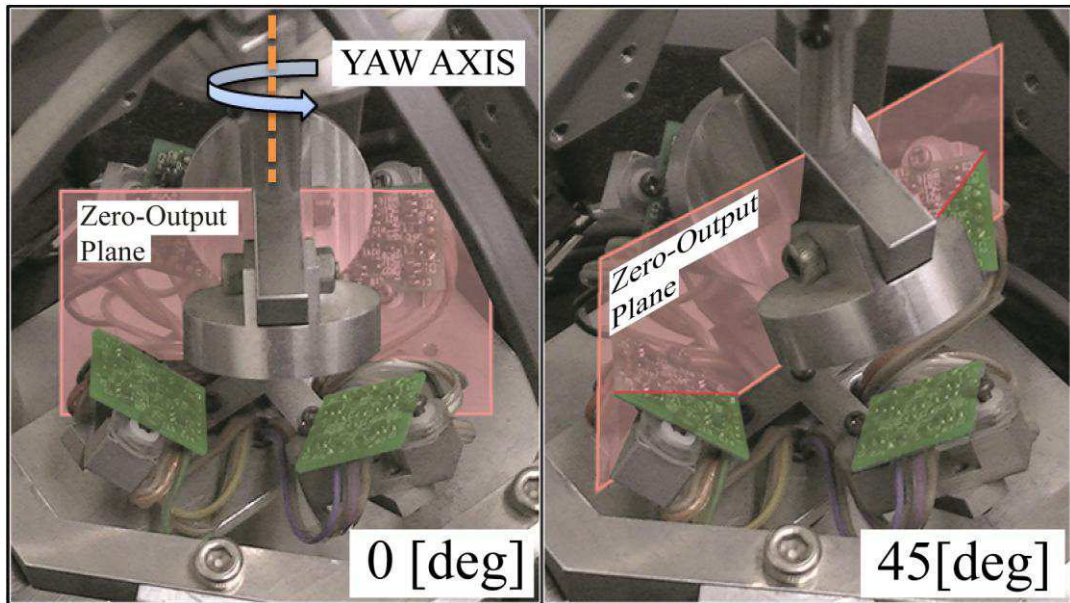


図 4.5 Yaw 方向回転時のゼロ出力平面

一方, Roll 及び Pitch 方向では, 今回の実験環境の制約上, サンプル領域を ± 12 [deg]としているため, 図 4.6 に示したように, この範囲内において磁石及び磁界の対称平面はセンサ基板から大きく離れることはなく, Yaw 方向の回転と比べて影響は少ない. そのため図 4.4 中で磁界変化量の描く概形は Yaw 方向の回転量に強く依存したものとなり計測失敗点もこれに合わせ周期的に出現することとなる.

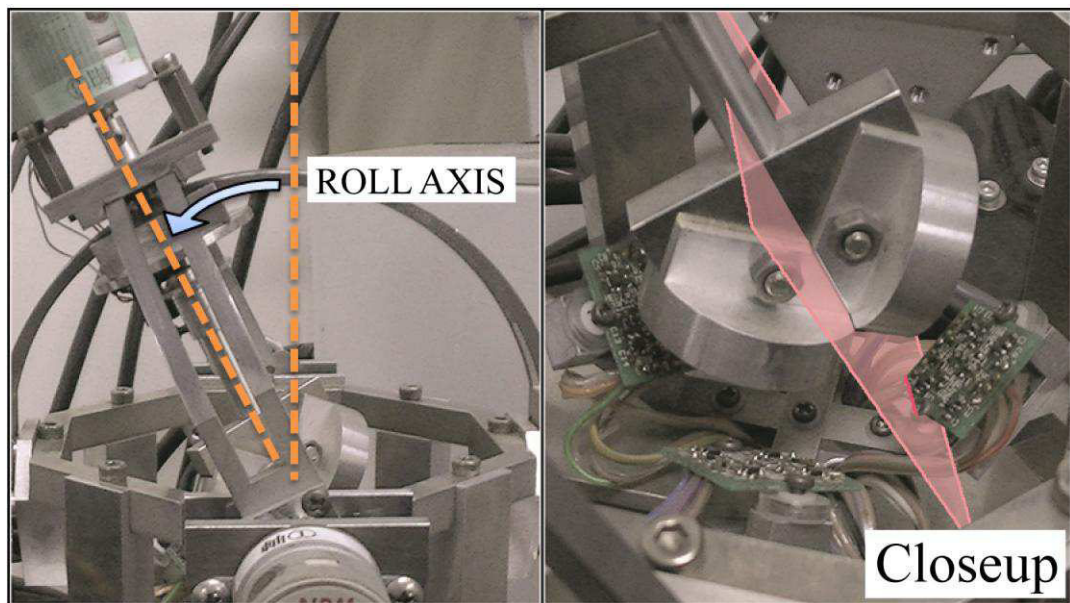


図 4.6 Roll (Pitch) 方向回転時のゼロ出力平面

以上の事から, サンプル間隔と計測正答率の関係において, サンプル間隔を小さくすると磁界変化量も小さくなるため計測正答率が低下するという見解を得た. さらに磁界変化量が小さいと測定失敗時の誤差量も大きくなることもわかった.

4.4 磁界再現性に関する特性評価

磁界再現性と計測正答率の関係を明らかにすべくシミュレーション実験を行った。ここではこれについて順に述べる。

4.4.1 シミュレーション

磁界再現性を変化させるには外乱量を調整する必要があるが、実環境では非常に困難であるため、この評価に関してはシミュレーションにより実験を行った。これは計算機を用い擬似的に任意の外乱を加え磁界再現性を変化させた入力パターンを作り、この入力パターンにおける計測正答率を求めるといったものである。具体的な手順は以下の通りである

- (i) 通常通りのサンプリングで LUT 作成を行う
- (ii) LUT 内の磁界値に正規分布に基づいた外乱を加えた入力パターンを作成する
- (iii) (ii) を入力として多自由度エンコーダに実装されているものと同じ検出アルゴリズムにより (i) の LUT を探索し計測正答率を求める

この時、加えた外乱量が少ないほど磁界再現性が高いことを意味しており、外乱の標準偏差が 0 [digit]であれば、測定時にサンプリング時の素子出力と全く同じ素子出力が得られることになるので、計測正答率は 100 [%]となる。

4.4.2 妥当性評価

磁界再現性に関する特性評価実験に先駆けこのシミュレーションの妥当性を簡単に評価する。<4.2>節の予備実験で外乱の実測値が平均 0 [digit]、標準偏差 48.8 [digit]の正規分布でことが分かっている。そこで上記の手順において加える外乱の標準偏差を 48.8 [digit]としたシミュレーションを 10 回行い、この結果を母集団とした場合の 99 [%]を信頼水準とする範囲内に実験装置を用いた実際の計測結果が収まるか否かで検定を行いシミュレーションと実測の整合性を見る。

シミュレーションの妥当性評価結果を表 4.4 にまとめた。この表より、全ての実測結果はシミュレーション結果群の 99 [%]信頼区間内に収まっていることが分かる。よってこの結果より、本実験で用いるシミュレーションの結果は実測結果との整合性がとれていると判断する。

表 4.4 シミュレーション妥当性の評価結果

サンプリング間隔 [deg]	1	2	3	4	5	6
平均	7060.50	111.10	3.60	0.60	0.00	0.00
標準偏差	262.23	7.77	2.19	0.55	0.00	0.00
99%信頼区間下限	6383.96	91.06	-2.05	-0.81	0.00	0.00
99%信頼区間上限	7737.04	131.14	9.25	2.01	0.00	0.00
実測値	7033	93	6	0	0	0
判定	可	可	可	可	可	可

4.4.3 実験手法及び実験条件

磁界再現性に関する特性評価実験の手法並びに実験条件について述べる． サンプルング間隔を 1 [deg]～6 [deg]とした 6 種の LUT に対し、外乱の標準偏差を 0～128 [digit]の間で 16 [digit]刻みで増加させた 9 通りの入力パターンを作成、これら 54 種類の入力パターンを基にシミュレーション実験を行った． これにより、測定の見測正答率が磁界再現性並びにサンプルング間隔の変化につれどのよう
に推移するかを調べる． この評価実験の条件を以下の表 4.5 にまとめた．

表 4.5 実験条件.

		LUT No01	LUT No02	LUT No03	LUT No04	LUT No05	LUT No06
サンプルング間隔 [deg]		1	2	3	4	5	6
サンプルング領域 [deg]	Roll	±180	±180	±180	±180	±180	±180
	Pitch	±6	±12	±24	±24	±25	±24
	Yaw	±6	±12	±24	±24	±25	±24
サンプルング点数		60,840	30,420	34,680	15,210	8,712	4,860

4.4.4 実験結果及び考察

実験の結果を表 4.6、表 4.7、図 4.7、図 4.8、図 4.9 にまとめた． 表 4.6 中の値は計測正答率でサンプルング間隔と加えた外乱の標準偏差ごとにまとめてあり単位は[%]、図 4.7 は横方向に外乱の標準偏差、奥行方向にサンプルング間隔をとり、計測正答率を高さとして表 4.6 をグラフにプロットした図である． また、表 4.7 は磁界変化量を算出し整理したもので、表中の平均値とはそれぞれのサンプルング間隔で取り得る全姿勢での磁界変化量の絶対平均値であり、外乱の標準偏差ごとに整理された値は計測失敗点のみにおける磁界変化量の絶対平均値、括弧の付けられた値は平均の算出に使用された母数が 10 点以下であるもの、数値の記入されていないものは母数が 0 点であったものである．そして図 4.8 及び図 4.9 は計測失敗点の分布を磁界変化量と合わせてプロットしたヒストグラムで、図 4.8 はサンプルング間隔が 2 [deg]で外乱の標準偏差を 48[digit]としたもの、図 4.9 は同じサンプルング間隔で標準偏差を 96 [digit]としたときの結果である。

表 4.6 計測正答率 (Simulated value)

Sampling step [deg]	Standard deviation of Noise [digit]								
	0	16	32	48	64	80	96	112	128
1	100	99.988	98.090	88.894	73.720	57.755	44.704	34.052	26.486
2	100	100	99.999	99.655	97.922	94.241	88.103	80.141	71.190
3	100	100	100	99.983	99.801	99.259	97.814	95.326	91.814
4	100	100	100	99.993	99.993	99.875	99.586	98.876	97.738
5	100	100	100	100	100	99.989	99.874	99.702	99.346
6	100	100	100	100	100	100	100	99.959	99.774

表 4.7 磁界変化量 (Simulated value)

Sampling step [deg]	Standard deviation of Noise [digit]								
	Average	16	32	48	64	80	96	112	128
1	85.609	(57.25)	65.898	71.950	76.662	79.788	81.532	82.738	83.545
2	169.604	—	(121.75)	126.311	131.963	137.977	145.070	150.495	154.306
3	248.231	—	—	(190.568)	202.799	204.527	209.458	214.483	218.551
4	330.512	—	—	(36.969)	(179.344)	(264.441)	265.307	273.014	276.964
5	411.806	—	—	—	—	(299.625)	(352.565)	349.025	347.666
6	494.106	—	—	—	—	—	—	436.219	426.048

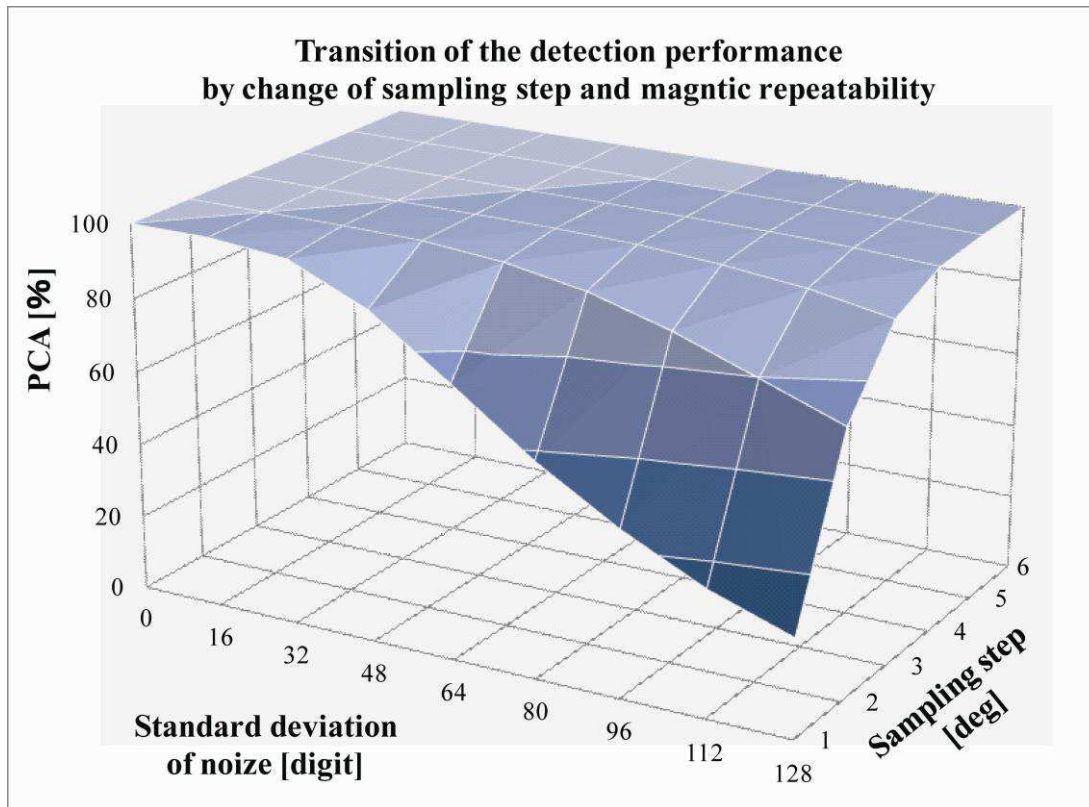


図 4.7 外乱並びにサンプリング間隔と計測正答率

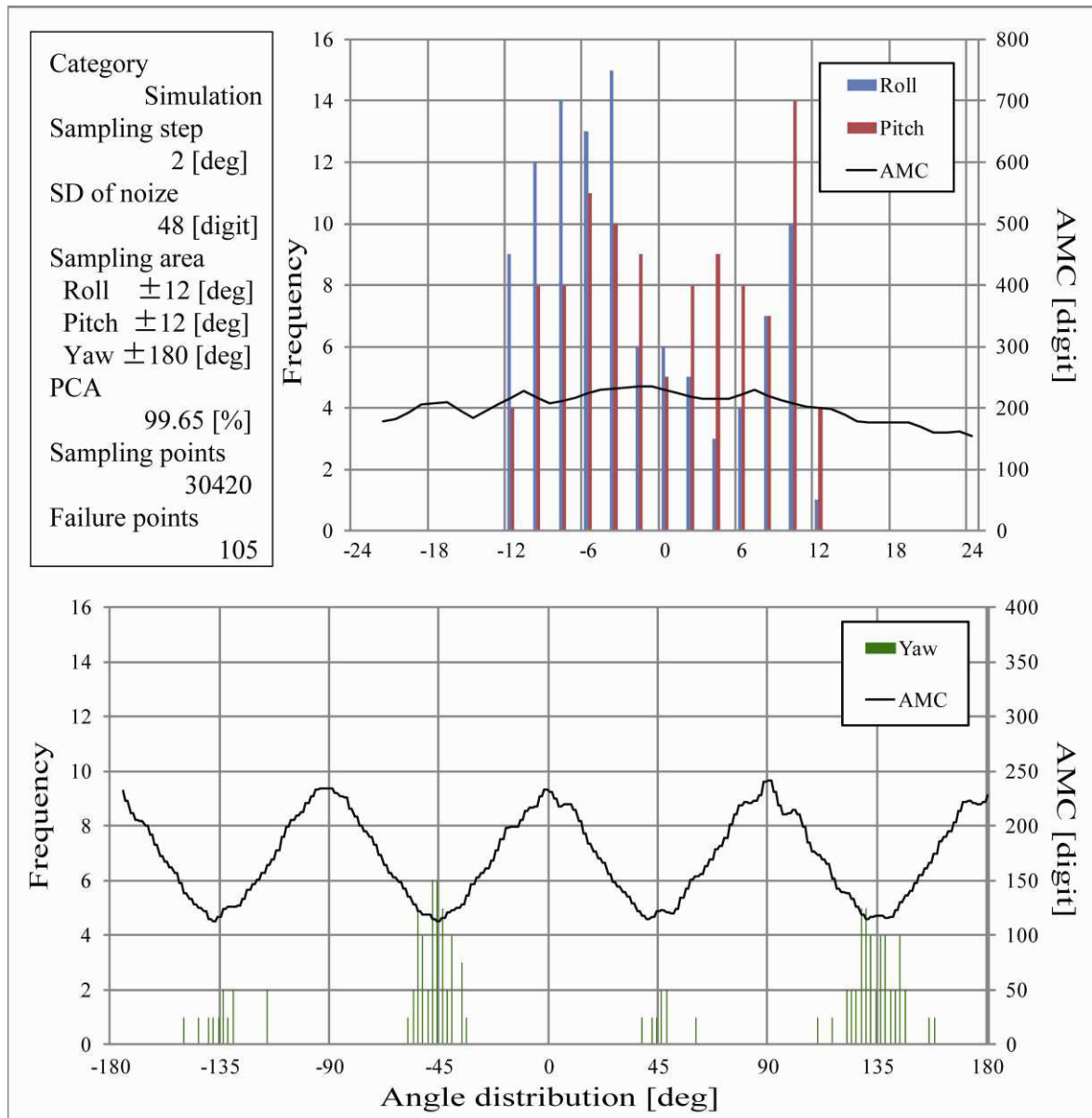


図 4.8 計測失敗点の分布 (外乱標準偏差 : 48)

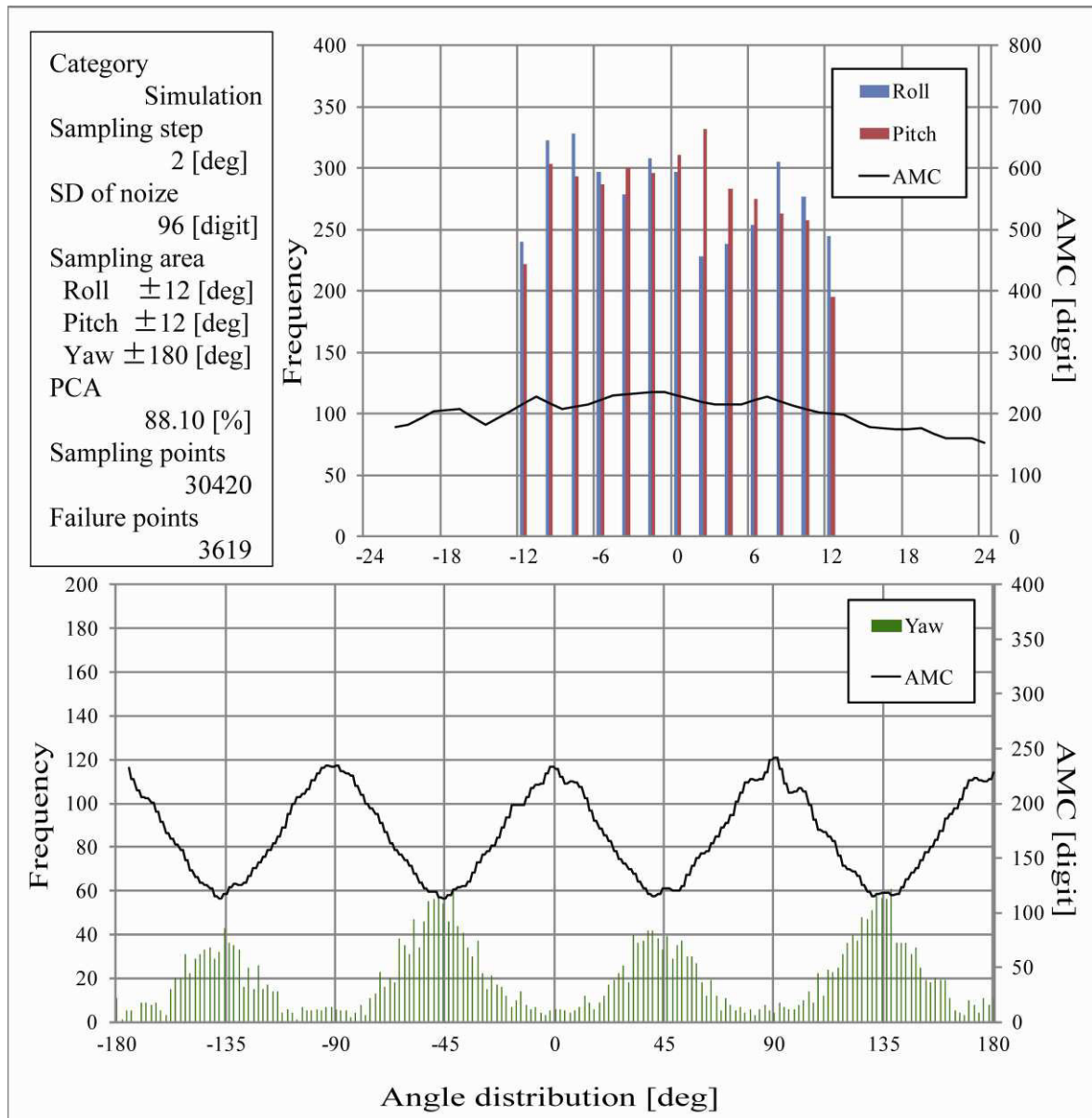


図 4.9 計測失敗点の分布 (外乱標準偏差 : 96)

磁界再現性評価実験の結果について考察する。まず、図 4.7 からサンプリング間隔が大きいほど計測正答率が高くなることが読み取れる。一方、表 4.7 に示された磁界変化量を見てみると、サンプリング間隔が大きくなるにつれて磁界変化量が増加していることがわかる。またこの表 4.7 から、測定失敗点の磁界変化量はすべての場合において全体平均値を下回っていることが言え、さらに、図 4.8 で示した計測失敗点の分布からは磁界変化量の小さい姿勢において測定に失敗していることが分かる。この傾向はすべてのサンプリング間隔の結果において同じであり、図 4.9 のように、計測失敗点の母数が多くなるとより顕著な結果として表れる。これらのデータは<4.3.2>項の実験で得られた、サンプリング間隔を細かくすると磁界変化量が減少するため計測正答率が低下するという見解をさらに裏付けるものであると言える。

次に、磁界再現性と計測正答率の関係について考察する。本提案手法においてはその磁石配置により、各姿勢における素子出力の冗長性は排除されており、この事はノイズの標準偏差を 0 [digit] とした時のシミュレーション結果が常に計測正答率 100 [%] となることから示されている。これに対し磁界再現性が低下した場合というのはある入力値群（以下探索値とする）からそれに最も近い LUT 内の値群（以下参照値とする）を探索する際に、探索値と参照値の間に差が生じることを意味するので、ノイズの乗り方によっては真の参照値以外の参照値に近い探索値が入力されることとなり、結果として計測に失敗する。この状況が起こりえる可能性は、磁界変化量に対しノイズの標準偏差が相対的に小さいほど低くなると予想される。このとき、磁界変化量はその定義よりサンプリング間隔に直接影響されるため、計測正答率は図 4.7 で示されるように、ノイズの標準偏差とサンプリング間隔の変化に伴い推移する。

そこでここで計測正答率を外乱の標準偏差と磁界変化量の相対関係に着目して評価するために **磁界再現係数 / Magnetic repeatability coefficient** という値を定義し、以下の式で表すこととする。

$$\text{磁界再現係数} = \frac{\text{外乱の標準偏差}}{\text{磁界変化量の平均値}} \dots\dots\dots (7)$$

上式より、磁界再現係数は磁界変化量と外乱の相対関係を示す値であることがわかる。また磁界再現係数は 0 以上の整数値をとり、その値が小さいほど磁界再現性が高いことを意味する。そしてこの磁界再現係数に着目して図 4.7 を整理し直し、図 4.10 にまとめた。これは横軸に磁界再現係数、縦軸に計測正答率をとり磁界再現性評価実験の結果を再集計しプロットしたグラフである。また、図中の曲線はこれらの点を多項式で補完したものである。

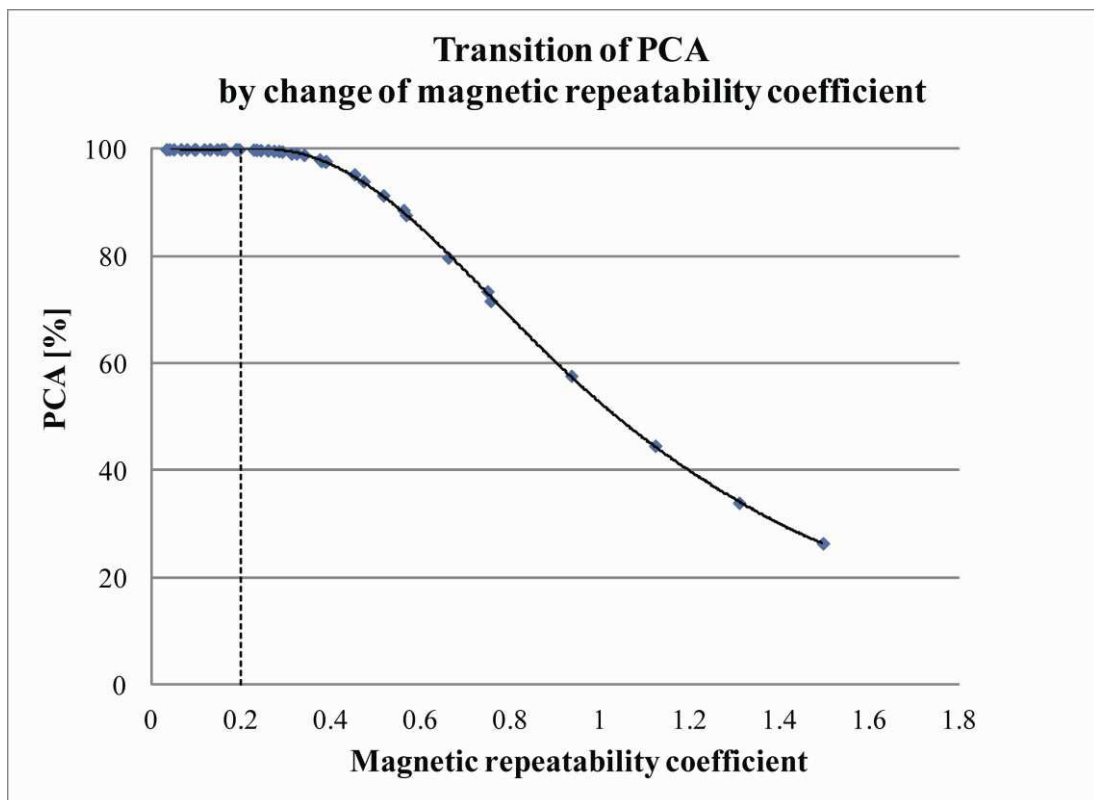


図 4.10 計測正答率と磁界再現係数

図 4.10 から、磁界再現係数と計測正答率は独立ではなく、互いに関係を持つことが読み取れ、磁界再現係数を用いることにより簡潔に計測正答率の推移を評価することができることがわかる。具体的にはこのグラフから本論文で行った実験環境下では計測正答率を 100 [%]にするためには磁界再現係数を約 0.2 以下にすればよいことが分かる。よってこの結果から多自由度エンコーダにおいて磁界再現係数は要求される計測正答率を見積もるうえで有効な指標であるといえる。

4.5 応答周波数に関する特性評価

多自由度エンコーダにおける応答周波数に関して、実装する LUT 探索アルゴリズムによる比較実験を行った。ここではこれについて順に述べる。

4.5.1 探索アルゴリズムによる応答速度比較

ここでは全探索型と部分探索型のアルゴリズムをそれぞれ実装した場合の応答周波数を比較することで、各アルゴリズムの特性を検証する。

実験の手順としてはまず、サンプリング間隔を 2 [deg]として以下の表 4.8 に記したようにサンプリング領域を変化させた LUT を 6 種類作成した。なお各条件下の LUT において含まれるサンプリング点数も表に合わせて記してある。

表 4.8 各 LUT のサンプリング条件

Look up table No.		No.01	No.02	No.03	No.04	No.05	No.06
Sampling step [deg]		2	2	2	2	2	2
Sampling area [deg]	Roll	±6	±12	±18	±24	±30	±36
	Pitch	±6	±12	±18	±24	±30	±36
	Yaw	±180	±180	±180	±180	±180	±180
Sampling points		8,820	30,420	64,980	112,500	172,980	246,420

始めにこれら LUT それぞれに対し全探索型アルゴリズムを用いた場合で角度計測を行い、データ出力までにかかる時間を測定した。以下の図 4.11 はこの結果を、横軸をサンプリング点数、縦軸を出力までの所要時間としてみたものである。

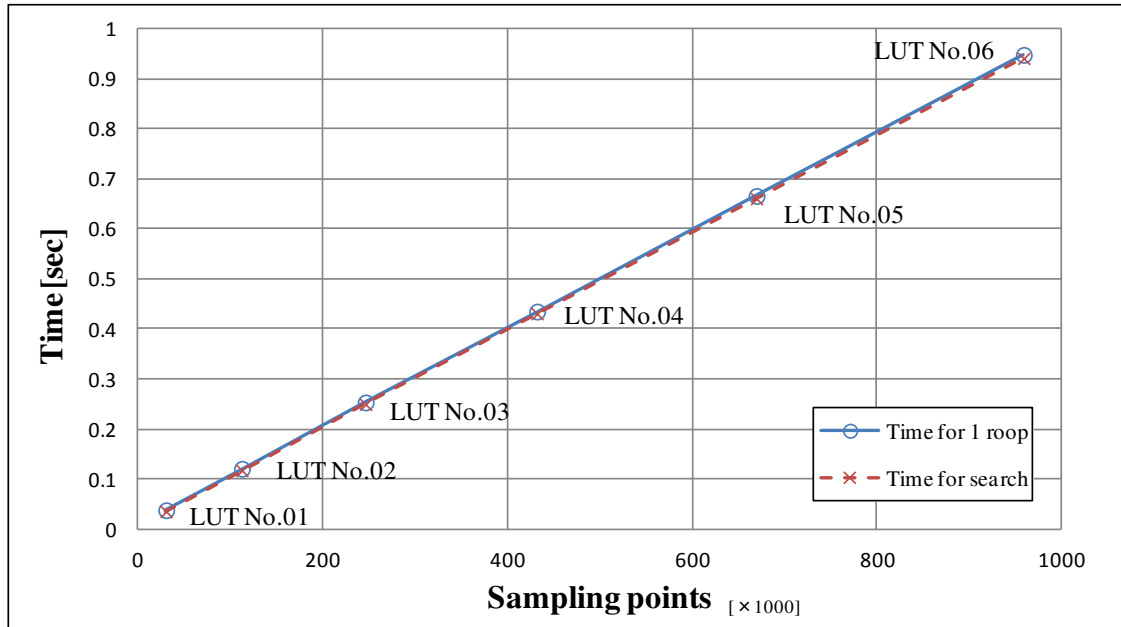


図 4.11 全探索型アルゴリズムの応答速度

このグラフよりサンプリング点数に比例して出力までの時間が増加していることと、この時間のうち殆どが LUT 探索に要する遅延時間であることがわかる。例えば LUT No.06 を用いた場合などは出力までの時間が約 1 [sec]であり、これを基本周期 15.6 [msec]内に収めるには、サンプリング領域を狭める、サンプリング間隔を荒くするといった方法が考えられるが、これらはそれぞれ自由度エンコーダの測定レンジ、分解能が犠牲となる。他には高速なプロセッサを用いることも考えられるが、この場合少なくともこの実験環境下から 1,000 倍以上の処理速度を達成する必要があるが、チップ・ボード化や並列化を想定しても現実的な手法とは言い難い。よって、全探索型アルゴリズムは多自由度エンコーダの実用において有効なものではないと言える。

次にこの実験と同じ LUT を用いて、部分探索型アルゴリズムを実装した場合の出力までに要する時間を測った。この時、探索近傍数を N ($= N_{\text{roll}} = N_{\text{pitch}} = N_{\text{yaw}}$) とし、4～10 の間であわせて変化させた。以下の図 4.12 はこの実験結果のうち LUT No.04 と No.06 の結果を合わせて記したグラフである。図中の横軸は探索点数、縦軸は所要時間を表し、実線は出力までに要した時間、波線は探索のみに要した時間を示している。

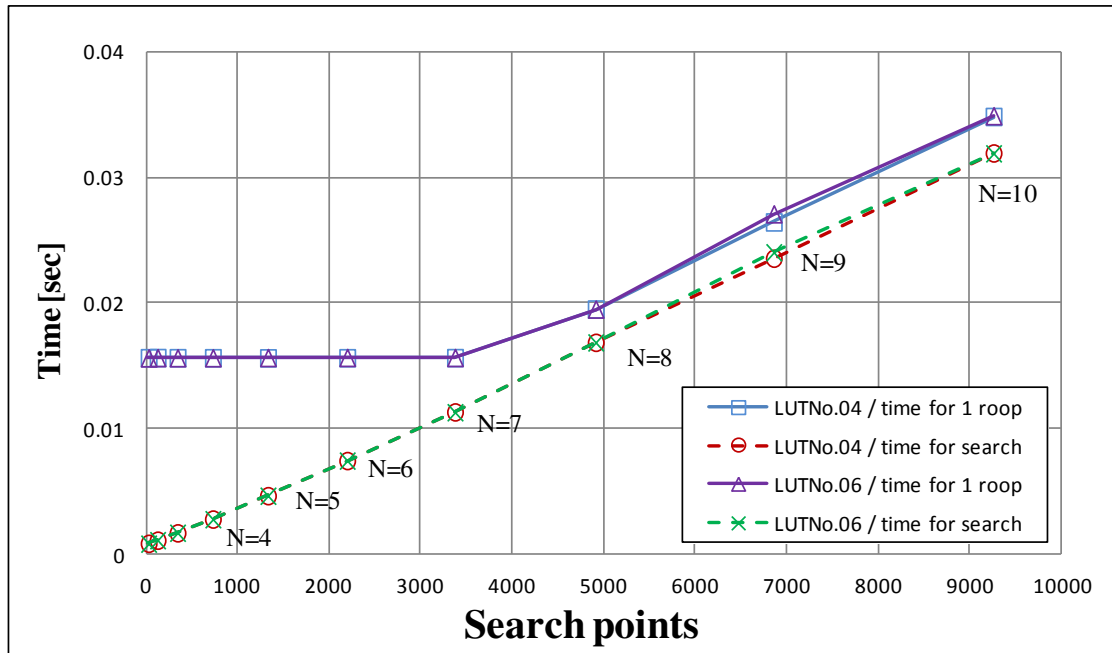


図 4.12 部分探索型アルゴリズムの応答速度

この結果より、LUT のテーブルサイズによって処理時間はほぼ変化しないこと及び N が小さい場合は基本周期の間に LUT 探索が終了していることが読み取れる。これらのことから部分探索型アルゴリズムは全探索型と比べ探索領域の指定により LUT のテーブルサイズに関係なく探索時間を大幅に短縮することができ、現実的な手法で動作周期に対する遅延をなくすることが可能であると言える。

またこの時の $N = 2$ における探索時間は 0.0011 [sec]であったが、このことから周辺機器のボード化等により基本時間を同程度まで短縮した場合、多自由度エンコーダの応答周波数を 1 [kHz]程度まで引き上げることが可能であると予想される。

4.5.2 部分探索型アルゴリズムの安定性評価

ここでは部分探索型アルゴリズムの安定性に関する検証について述べる。

部分探索型アルゴリズムにおいて探索近傍数 N を小さくとした場合、測定対象の回転速度によっては探索範囲を越えて測定対象の角度が変化する場合があります。以下に示す図 4.13 は、Yaw 方向角速度が 180 [deg/sec] である測定対象に対し、サンプリング間隔 2 [deg] の LUT を使用し、部分探索型アルゴリズムで探索近傍数を 2 とした場合の出力結果である。

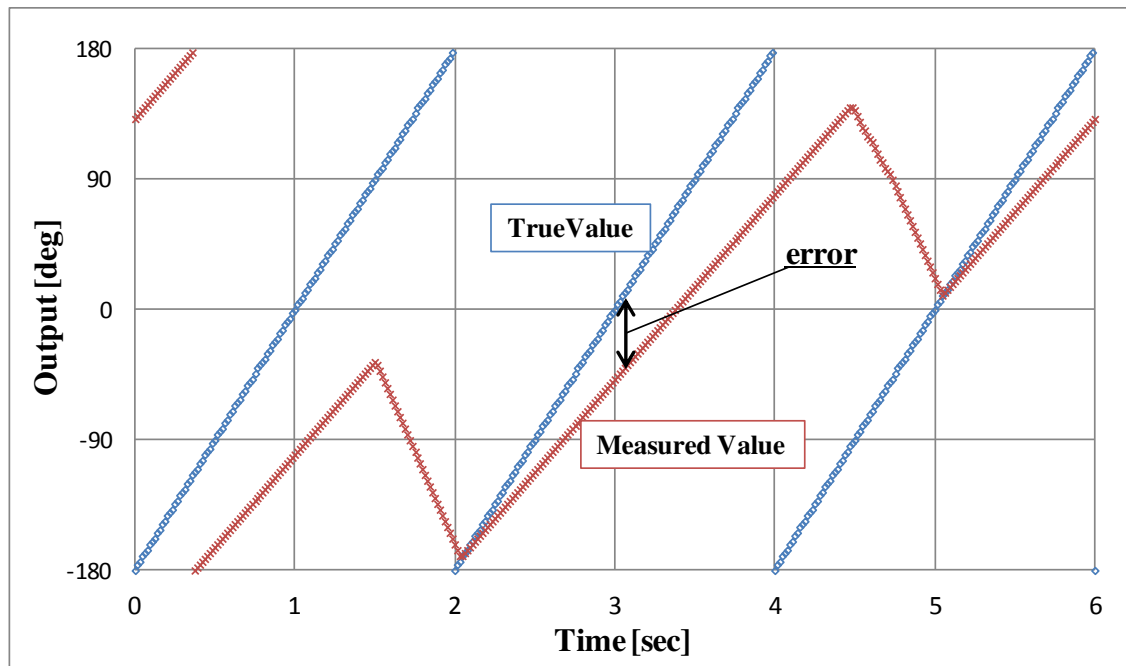


図 4.13 測定対象の高速動作時における出力挙動

このグラフからも、ある瞬間に測定値と真値が一致していても、測定対象の回転に測定範囲が追いついていないために出力誤差が拡大していく様子が見える。

その一方で、誤差が生じた状態で測定対象が減速または停止した場合を想定した出力の挙動を図 4.14 に記した。これはサンプリング間隔が 2 [deg]で、サンプリング領域が Roll 及び Pitch 方向が ± 36 [deg]、Yaw 方向が ± 180 [deg]の LUT を使い、測定対象の初期姿勢を Roll 方向 14 [deg]、Pitch 方向 30 [deg]、Yaw 方向 46 [deg]に固定した状態で測定を開始したときの出力の挙動である。

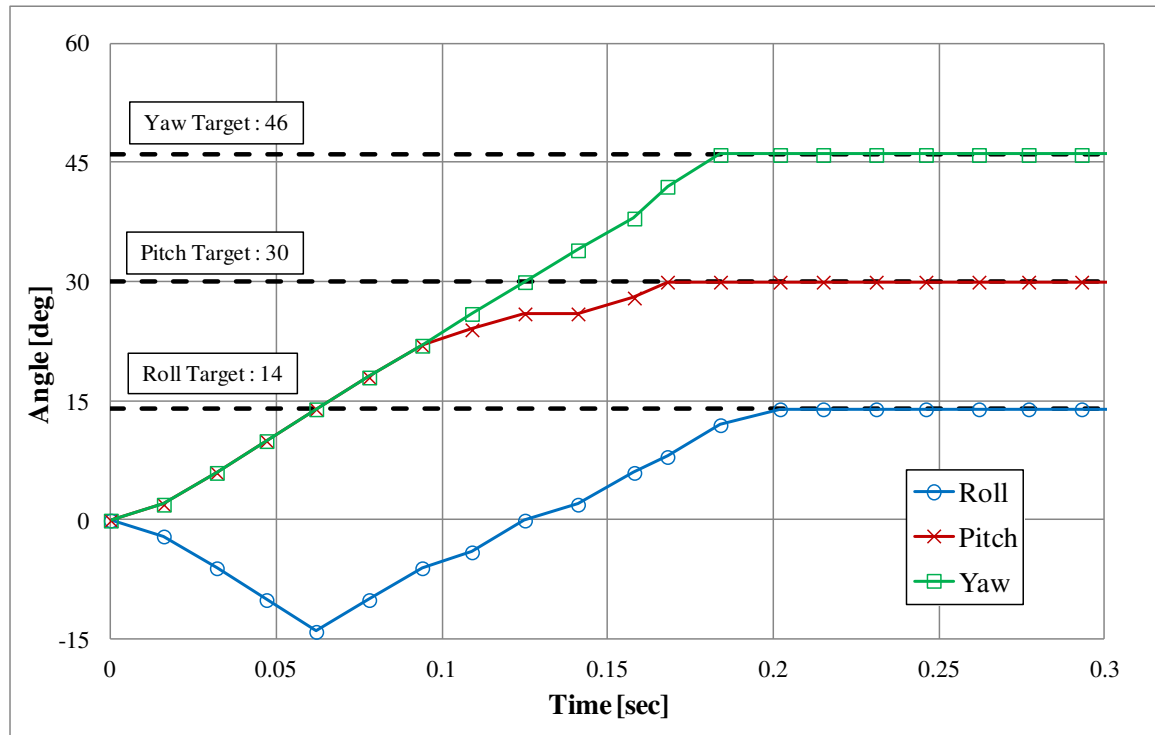


図 4.14 収束確認実験結果

図 4.14 から、部分探索型アルゴリズムにおいて計測対象の姿勢が探索近傍数を越えた場合でも、その後計測対象が停止すれば測定値が真値に追いつき角度計測が正常に行われる状態に復帰していることが分かる。

これら結果より、測定対象の最高角速度を基準に探索近傍数の下限を設定する必要があると、仮に最高速度を超えることがあっても、それが一時的なものであれば正常な状態に復帰可能であることが分かる。

4.6 最適化時の挙動

最後に、ここまでの結果を踏まえ最適化した場合の多自由度エンコーダの出力結果を取得した。以下の図 4.16 及び 4.17 は実験機を用いて Roll 及び Pitch 方向は ± 24 [deg] の範囲を周期 4 [1/sec] の正弦波、Yaw 方向は 90 [deg/sec] の等速回転で動作させたときの出力結果である。なお、Pitch 方向の出力結果は Roll 方向のそれとほぼ同じであったため割愛した。なお、各パラメータの設定値及び結果の具体的な数値は表 4.9 にまとめた。

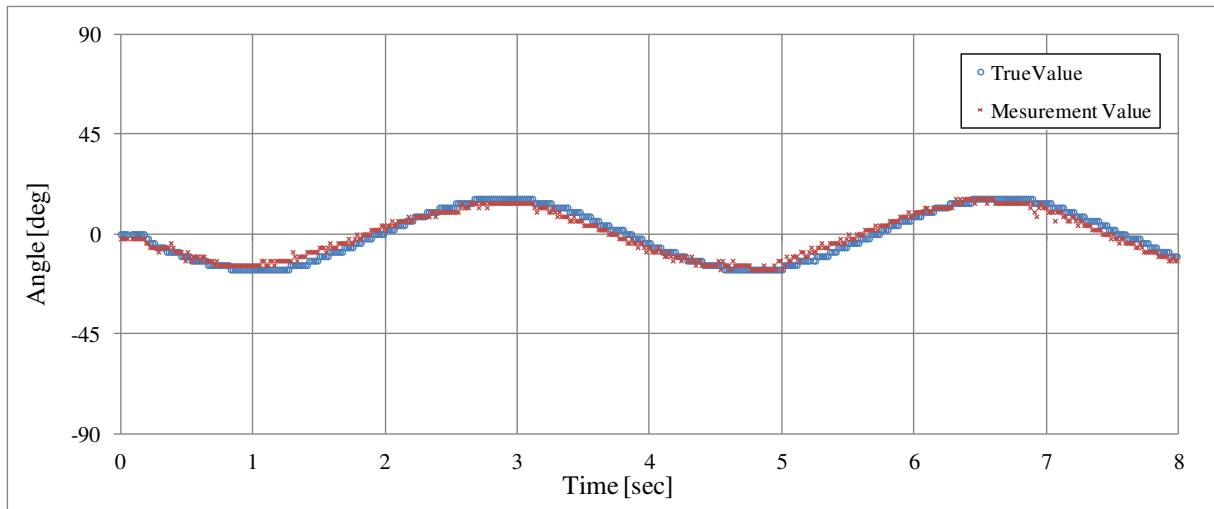


図 4.15 Roll 方向出力結果

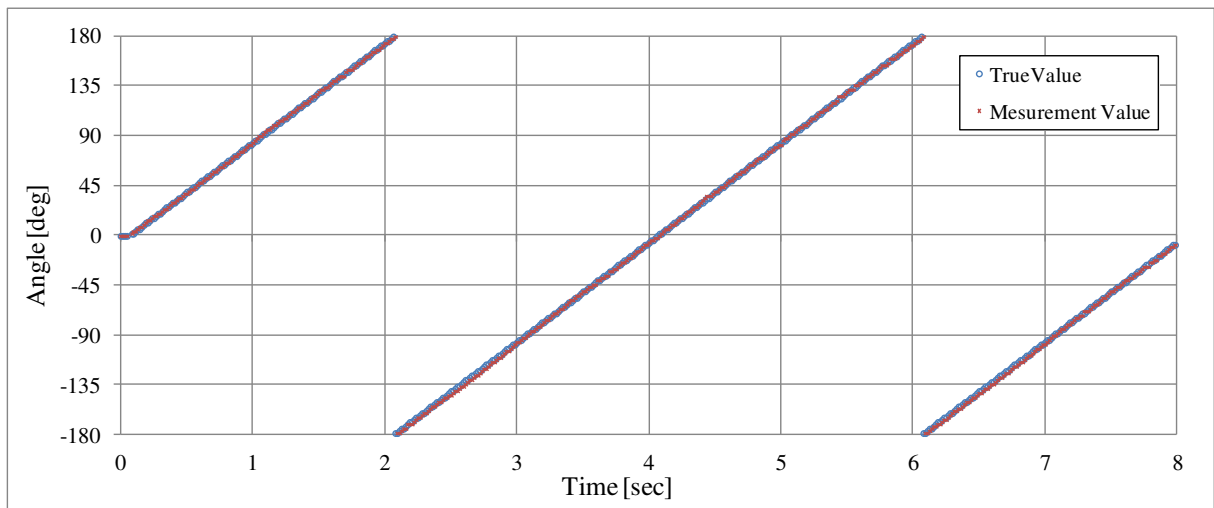


図 4.16 Yaw 方向出力結果

表 4.9 各種パラメータ設定値及び測定性能

	Roll	Pitch	Yaw
サンプリング間隔 [deg]	2	2	2
サンプリング領域 [deg]	±36	±36	±180
サンプリング点数	246,420		
測定対象角加速度 [deg/sec]	38 (Max)	38 (Max)	90
探索近傍数	4	4	4
平均基本速度 [msec]	0.0156		
平均探索時間 [msec]	0.0029		
測定誤差平均 [deg]	0.117		
測定誤差標準偏差 [deg]	1.846		
応答周波数 [Hz]	63.95		

これら結果から、非接触かつ多自由度の回転角度計測において、測定分解能 2 [deg]、測定誤差標準偏差 1.85 [deg]、応答周波数 64 [Hz]を達成した。また、このことから多自由度エンコーダのリアルタイム化において部分探索型アルゴリズムは有効な手法であるといえる。

さらに、部分探索型アルゴリズムの実装により基本周波数に対し探索速度は非常に余裕があるため、周辺機器のボード化等により基本速度を引き上げた場合、応答周波数をさらに向上させることが可能であると言える。

4.7 結論

本章で行った特性評価実験により以下の結論を得た。

- (i) 磁界再現性が計測性能に与える影響は磁界変化量との相対関係により決まる。
- (ii) 本手法において要求される計測正答率を見積もるうえで磁界再現係数は有効な指標である。
- (iii) 探索アルゴリズムは応答速度の観点から部分探索型アルゴリズムが有効である。
- (iv) 多自由度エンコーダにおいて測定分解能 2 [deg]、測定誤差標準偏差 1.85 [deg]、応答周波数 64 [Hz]を達成した。
- (v) 周辺機器のボード化等により探索速度と同程度まで基本速度を引き上げれば、現行のシステム構成のままだでも応答周波数を 1 [kHz]程度まで向上させられることを示唆した。

第5 章

結論

本章では本研究により得られた結論と、今後の展望及び残された課題に関して述べる。

5.1 結論

本研究により以下の結論を得た。

- ◆ 三自由度回転角度を非接触で計測できる新しいロータリーエンコーダの開発に成功した。
- ◆ 磁界再現性が計測性能に与える影響は磁界変化量との相対関係により決まる。
- ◆ 本手法において要求される計測正答率を見積もるうえで磁界再現係数は有効な指標である。
- ◆ 探索アルゴリズムは応答速度の観点から部分探索型アルゴリズムが有効である。
- ◆ 多自由度エンコーダにおいて測定分解能 2 [deg], 測定誤差標準偏差 1.85 [deg], 応答周波数 64 [Hz] を達成した。
- ◆ 周辺機器のボード化等により探索速度と同程度まで基本速度を引き上げれば、現行のシステム構成のままでも応答周波数を 1 [kHz]程度まで向上させられることを示唆した。

5.2 今後の展望及び課題

本研究では提案した多自由度エンコーダにおける、最も基本となるサンプリング点の測定性能評価において、上述の成果をあげた。この次の段階としては、より踏み込んだ評価をするために実験機材に改良を加えて、サンプリング点とサンプリング点の間の姿勢が入力として入った場合の出力の挙動を評価し、出力値における測定精度の幅を見積り評価することが考えられる。また、より高度な LUT の探索アルゴリズムや、初期姿勢のキャリブレーション技術、LUT 作成に用いた測定機器の分解能以上の分解能を実現する手法等を、LUT 探索を画像探索に見立てた上で画像処理技術を応用することで解決することも視野に入れるべきである。また、測定領域拡大のための最適な素子配置や、実効素子数を考慮した上での最小必要素子数等も実用を目指す上で課題となり、検討が必要となる項目であると考えている。よって今後はこれら項目の検討・評価によりさらなる性能向上を目指し、近い将来に実用化されることを期待する。

◆ 業績一覧

◆ 論文誌

- [1] 加藤 芳彦, 張 曉林: “非接触多自由度ロータリーエンコーダの開発及びその評価”, 電気学会論文誌, Vol. 133 -No. 7 pp.258-267 (2013)

◆ 国際会議

- [1] Yoshihiko Kato, Xiaolin Zhang: “Development of a Non-contact Multi-DoRF Rotary Encoder”, 2014 4th IEEE ICIST Proceedings, pp.404-408 (2014)

◆ 口頭発表

- [1] 加藤 芳彦, 藤原 祐介, 松崎 和敏, 張 曉林: “ホール素子を用いた非接触三自由度回転角度検出センサの開発”, H18 電気学会全国大会予稿集 pp2-113 (2006)
- [2] 加藤 芳彦, 松崎 和敏, 張 曉林: “ホール素子を用いた非接触多自由度回転角度検出センサの開発及びその評価”, H19 電気学会全国大会予稿集 pp2-163 (2007)
- [3] 加藤 芳彦, 張 曉林: “非接触多自由度ロータリーエンコーダにおけるサンプリング分解能と検出性能の関係”, H21 電気学会全国大会予稿集 pp2-126 (2009)
- [4] 加藤 芳彦, 張 曉林: “非接触多自由度ロータリーエンコーダにおける検出性能向上に関する研究”, H22 電気学会全国大会予稿集 pp3-136 (2010)

◆ ポスターセッション

- [1] 加藤 芳彦, 宮下 則俊, 張 曉林: “磁気検出と磁気制御の織り成す未来～The Future of Magnetic-Field Detection and Magnetic Control～”, The 3rd IEEE Tokyo Young Researchers Workshop (2006)
- [2] 加藤 芳彦・松崎 和敏・前田 幸徳・宮下 則俊: “両眼視差情報を用いない距離推定法の提案～ロボットビジョンの可能性の模索～”, The 2nd IEEE Student Workshop (2005)

◆ 受賞

- [1] 2014 4th IEEE ICIST Best Paper award on Computational Intelligence (2014)

◆ 特許

- [1] 特許 5132065, 加藤 芳彦, 松崎 和敏, 桜井 聡, 谷津 信夫, 清水 信吉, 藤原 祐介, 佐藤 誠, 張 曉林: “3 自由度回転検出装置及びその方法”, (2007)

◆ 参考文献

◆ 磁気応用・マグネティクス

- [1] 藪上信, 菊池弘昭, 山口正洋, 荒井賢一, 高橋桂, 板垣篤, 若生直樹: “磁気マーカによるモーションキャプチャシステムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, 1999.
- [2] 藪上信, 村山芳隆, 小澤哲也, 石山和志, 荒井賢一: “サブ pT 台の分解能を有する高感度磁界センサ”, 平成 18 年電気学会全国大会 講演論文集[2] pp154, 2006.

◆ センシング

- [3] 塩山忠義: 「センサの原理と応用」, 森北出版, pp.90-95 (2002)
- [4] 田島奏: 「航空計器」, 日本航空技術協会, pp.102-126 (1989)
- [5] 青柳学・藤田泰喜・高野剛浩・田村英樹・富川義朗: 「円環形球面超音波モータの画像処理による回転位置検出と制御」, 信学論, Vol.J93-A-8 pp.501-509 (2010)

◆ ロボティクス・自動制御

- [6] Xiaolin ZHANG, Yuzhang GU: “A Binocular Motor System Model for Humanoid Robotics”, WMSCI 2005, 2005/7.
- [7] X. Zhang: “A Conceptual Discussion on relationship between Vergence and Conjugate Eye Movements on the Viewpoint of System and Control Engineering”, Proc. ISCAS 2005 IEEE, 4783-4786, 2005/5.
- [8] X. Zhang, H. Wakamatsu, M. Sato: “A Human Like Robo-Eye System”, Proc. ICITA2004, 1-4, 2004/1
- [9] 竹村研治朗: 「小特集 - 最近の超音波モータの研究とその動向 - 多自由度超音波モータ」, 日本音響学会誌, Vol.66, No.3 pp.125-129 (2010)
- [10] 添田喬: “自動制御の講義と演習”, 2001, 日新書店.
- [11] 柴田浩: “新版 制御工学の基礎”, 2001, 朝倉書店.
- [12] 吉川恒夫: “ロボット制御基礎論”, 1988, コロナ社.
- [13] 藤堂勇雄: “制御工学基礎論(アナログ制御とデジタル制御)“, 1987, 森北出版.
- [14] John J. Craig 著, 三浦宏文・下山勲 訳: “ロボティクスー機構・力学・制御ー”, 共立出版, 1991.
- [15] 庭野慎一郎: “多自由度超音波アクチュエータの高性能化に関する研究”, 東京工業大学大学院総合理工学研究科電子機能システム専攻修士論文, 2004.
- [16] 羽田浩二: “高出力多自由度超音波アクチュエータの小型化に関する研究”, 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業論文, 2000.
- [17] 天野隆史: “縦・たわみ複合振動を用いた多自由度超音波アクチュエータの試作”, 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業論文, 1998.
- [18] 庭野慎一郎, 尹被薔, James R. Friend, 中村健太郎, 上羽貞行: “多自由度超音波モータの回転制御”, 2004 年音響学会講演論文集, 2004.

- [19] S.Niwano, C.-H. Yun, J. Friend, K. Nakamura, S.Ueha and T.Hirahara: “AN ACTIVE DUMMY HEAD DRIVEN BY A MULTI-DEGREE-OF-FREEDOM ULTRASONIC ACTUATOR”, WCU 2003 pp1597-1600, 2003.
- [20] TAKAFUMI AMANO, TAKAAKI ISHII, KENTARO NAKAMURA AND SADAYUKI UEHA: “An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and Longitudinal Vibrations of a Single Stator”, IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM pp667-670, 1998.
- [21] MINORU KUROSAWA, KENTARO NAKAMURA, TAKASHI OKAMOTO, AND SADAYUKI UEHA: “ An Ultrasonic Motor Using Bending Vibrations of a Short Cylinder”, IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL. VOL.36 NO.5 pp517-521, 1989.
- [22] 遠山茂樹: “磁化球を用いた球面超音波モータの制御”, 日本機械学会 第2回機素潤滑設計部門講演会講演論文集 pp121-124, 2002.
- [23] 遠山茂樹, 張国強, 杉谷滋, 長谷川慎一, 中村和人, 宮谷保太郎: “超音波モータを用いたロボット用アクチュエータの開発”, 日本ロボット学会誌 Vol.13 No.2 pp235-241, 1995.
- [24] 遠山茂樹, 波多江茂樹, 野中学: “超音波モータを用いたロボットマニピュレータ用アクチュエータの開発(第1報 ステータの開発)”, 日本ロボット学会誌 Vol.10 No.6 pp771-780, 1992.
- [25] 中野公一・遠山茂樹: 「磁界を用いた球面超音波モータ位置検出機構の開発」, 日本機械学会関東支部第7期総会講演会講演論文集, pp.153-154 (2001)
- [26] 竹村研二郎, 前野隆司: “多自由度超音波モータの駆動状態推定法”, 日本音響学会誌 57巻 7号 (2001) pp445-452, 2001.
- [27] 前野隆司, 竹村研治郎, 小島信行: “縦振動と横振動の縮退に基づく多自由度超音波モータの開発”, 日本ロボット学会誌 Vol.16 No.8 pp1115-1122, 1998.
- [28] Kenjiro Takemura and Takashi Maeno: “Method for Controlling Multi-DOF Ultrasonic Motor Using Neural Network”, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.15 No.2 pp534-537, 2003.
- [29] Kenjiro Takemura, Takashi Maeno: “Control of Multi-DOF Ultrasonic Motor using Neural Network based Inverse Model”, IEEE/RSJ IROS2002 pp2187-2192, 2002.
- [30] 青柳学, 富川義朗, 高野剛浩: “多重モード円環振動子を用いた多自由度超音波モータの構成”, 日本音響学会講演論文集 pp979-980, 1999.
- [31] 中島俊典, 青柳学, 富川義朗, 高野剛浩: “円環型多自由度超音波モータの高出力化の検討”, 電子情報通信学会 信学技報 pp49-54, 2003.
- [32] 中島俊典, 青柳学, 富川義朗, 高野剛浩: “円環型多自由度超音波モータのロータ保持・予圧方法の検討”, 第23回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム pp255-256.
- [33] Manabu AOYAGI, Hiroyuki WATANABE, Yoshiro TOMIKAWA and Takehiro TAKANO: “Spurious-Mode Control of Same-Phase Drive-Type Ultrasonic Motor”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.41 (2002) pp3252-3258, 2002.

- [34] Manaba Aoyagi, Steve P. Beeby, and Neil M. White: “A Novel Multi-Degree-of-Freedom Thick-Film Ultrasonic Motor”, IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL. VOL.49 NO.2 pp151-158, 2002.
- [35] 佐々江啓介, 五百井清, 大築康生, 黒崎泰充: “3 自由度小型アクチュエータの開発(第 1 報)”, 精密工学会誌 Vol.61 No.3 pp386-390, 1995.
- [36] 矢野智昭: “多自由度アクチュエータ”, 日本ロボット学会誌 Vol.15 No.3 pp330-333, 1997.
- [37] 川野洋・安藤英由樹・平原達也・尹喆鎬・上羽貞行: 「負荷接続状態の多自由度超音波モータの三自由度回転駆動制御手法—高臨場感伝達ロボット「テレヘッド」への応用—», 信学論, Vol.J87-A-11, pp.1386-1394 (2004)

◆ 謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なるご指導，ご教示をして下さると共に公私に渡り暖かく見守って下さった東京工業大学精密工学研究所 張曉林教授に心から感謝の意を表します．本当にありがとうございました．

本論文の作成に当たりの的確な助言を賜り，丁寧な指導をして下さった佐藤誠教授，羽鳥好律教授，熊沢逸夫教授，中村健太郎教授，黒澤実准教授並びに学外審査員の村瀬亨様に心より感謝いたします．

研究の遂行，特に試作機・実験機の製作にあたり，多大な尽力をいただいた富士通コンポーネントの有田隆様，清水信吉様，桜井聡様，谷津信夫様，並びに東京工業大学技術部精密工学技術センターの方々に厚くお礼を申し上げます．ありがとうございました．

本研究の足がかりとなる研究に従事し，基礎を築いた藤原佑介先輩，川井拓郎先輩，また，長く苦楽を共にした同輩の松崎和敏さん，宮下則俊さん，前田幸徳さんを始めとする東京工業大学総合理工学研究科 張研究室の皆様方，さらには陰から日向から私たち学生を支えてくださった補佐員の吉田貴子様，黒澤みゆき様，西條梨恵様に深く感謝致します．この論文は皆様方の協力があればこそその成果だと思っております．本当にありがとうございました．