

回転磁界と差動磁界を併用した 6 軸姿勢センサの開発

6 DOF Motion Sensor Using Rotating Magnetic Field and Differential Magnetic Field

江村 超*, 熊谷 正朗*, 野村 亮太*

Takashi Emura*, Masaaki Kumagai*, Ryota Nomura*

*東北大学

*Tohoku University.

キーワード : 仮想現実 (Virtual reality), 姿勢検出 (Motion capture),
回転磁場 (Rotating magnetic field), 差動磁場 (Differential magnetic field).

連絡先 : 〒80-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻
メカトロニクス講座メカトロニクス設計学分野

熊谷正朗, Tel.: (022)217-6969, Fax.: (022)217-6967, E-mail: kumagai@emura.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒言

バーチャルリアリティにおいて、強い没入感をもつシステムの構築を考えた場合、コンピュータ内に形成された仮想環境と現実世界に存在する体験者の動作を結びつけることが不可欠となる。これにより、体験者の視点の動きに同期して仮想環境内の視点を動かすことや、手の動作を入力し仮想環境内で物を掴む等の動作が可能となり、現実に近いことが可能となる。このような、人間の動作を取得するための装置をモーションキャプチャシステムといい、数種類の手法が研究されている。主なモーションキャプチャ方式である光学方式、機械方式、磁気方式について以下に比較する。

光学方式では、人体の関節などに目印を付け、その状態での人間の運動を複数のカメラで撮影し、画像処理により目印の抽出を行う。その後、カメラ上の位置より目印の 3 次元座標を算出する。この方

式では、目印がコンパクトでワイヤレスであるため、対象者が自由な動作をすることが可能である。また目印を増やすことで全身運動を計測できるため、アミューズメントの分野で広く用いられている。しかし、画像処理を用いているため処理量が多く、リアルタイム計測を行うためには高価なシステムが必要となる。

機械方式は、人体に直接リンクを取り付け、リンクの動きをエンコーダで取得する。この方式は、リアルタイム計測と安定の面において優れているが、対象者の動きを大幅に制限してしまう欠点がある。また複数の点を同時に計測することは困難である。

古典物理学により、空間に存在する 2 つのコイルの一方が励磁されたとき、もう一方のコイルに発生する電圧は、2 つのコイルの相対位置関係により、一意に定まる。磁気方式は、これを利用し、励磁コイルによって磁場を発生させ、磁場中においた可動のピックアップコイルに発生する電圧が

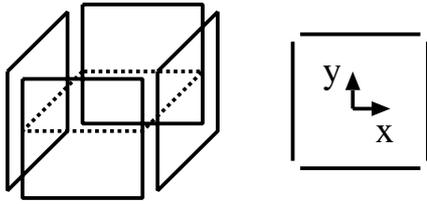


Fig. 1 2次元における座標系

ら励磁コイルとの相対位置関係を逆算することで、ピックアップコイルの座標を得る手法である¹⁾。この手法は、座標と姿勢の6軸についての情報が得ることができる。また、前2者に比較し、簡素な装置、処理で実現できるため、低コストにリアルタイム計測が可能である。さらに、センサが小型であるため、装着していても違和感を生じない。そのため、磁界に影響を及ぼす金属が存在しない場合には、バーチャルリアリティに適しているといえる。

現在入手可能な磁気式モーションキャプチャの大部分は、Polhemus社によって供給されている。同社の計測方式は、中心が一致した直交3軸のコイルを時分割で励磁することで発生させた磁場を用いる。また、空間内の異なる4点以上の励磁コイルを配置ことで計測を行う研究²⁾も行われている。これに対して、本発表では、計測空間を立方体フレーム状のコイルで囲み、回転磁界と差動磁界を発生させ計測する手法について提案を行う。提案する手法では、ピックアップコイルに発生する電圧の振幅を直接利用せず、同期検波を用いるためノイズに強いと考えられる。また、周波数多重をすることで、6軸について同時計測を行うため、応答性を向上させやすいという特徴がある。

2. 計測原理

2.1 2次元における角度計測

本手法に用いる励磁コイルは、正方形枠にホルマル銅線を巻き、これを6面組み合わせ立方体にしたものである。2次元の計測には、このうち1組の平行な2面を除いた4面を用いる。これを

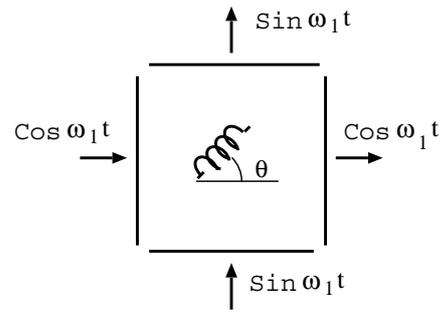


Fig. 2 角度計測の原理

Fig. 1 に示す。測定範囲は波線で表示された平面である。この平面の中心を原点とし、各軸がコイルに垂直な座標系を図のように定義する。初めに x 軸に垂直な2面に同一位相の正弦波電流を入力した場合、2面のコイルの間の空間には、 x 軸に平行に振動する磁界が発生する。次に y 軸に対象な2面のコイルにも同様に正弦波電流を入力し、合計4面のコイルを励磁することを考える。2組の入力波の角振動数を ω_1 とし、位相を 90 [deg] ずれてした場合、 xy 平面内には等速で回転する磁界が発生する。これを以下では、回転磁界と称する。本手法では、回転磁界を用い、角度の計測を行う。平面内の角度計測の原理を Fig. 2 を用いて示す。ここでは、未知な角度 θ の傾きを持つコイルを回転磁界内に設置した場合について考える。

この時、測定位置に発生している x 軸方向の磁場 B_x 、 y 軸方向の磁場 B_y は、次式で表される。

$$B_x = B_{x0} \cos \omega_1 t \sin \theta \quad (1)$$

$$B_y = B_{y0} \sin \omega_1 t \cos \theta \quad (2)$$

コイルに誘起される電圧 V_p は、磁場の時間変化によって生じるため、理想状態 $B_{x0} = B_{y0}$ の場合、次式で表される。

$$\begin{aligned} V_p &= K_1(\omega_1 \cos \omega_1 t \cos \theta - \omega_1 \sin \omega_1 t \sin \theta) \\ &= K_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで K_1 は、コイルの巻き数、コイルの面積、 $B_{x0}(= B_{y0})$ に依存する定数である。未知な角度 θ は、励磁コイルの入力信号に対する遅れとして

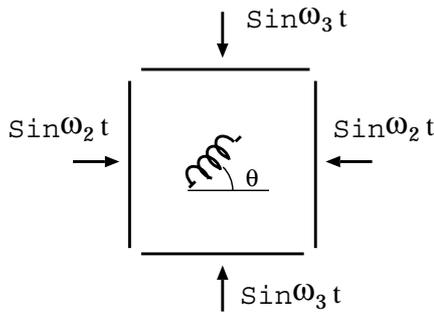


Fig. 3 位置計測の原理

表されている。この遅れを同期検波を用いて計測する。まず、 V_p に励磁コイルの入力波を乗算する。

$$\begin{aligned} V_{ps} &= V_p \times \sin \omega_1 t \\ &= \frac{K_1}{2} (\sin(2\omega_1 t + \theta) + \sin \theta) \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{pc} &= V_p \times \cos \omega_1 t \\ &= \frac{K_1}{2} (\cos(2\omega_1 t + \theta) + \cos \theta) \quad (5) \end{aligned}$$

ローパスフィルタに通すことで、直流成分である $\frac{K_1}{2} \sin \theta$ と $\frac{K_1}{2} \cos \theta$ を得ることができる。測定角度 θ は、

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_{ps}}{V_{pc}}\right) \quad (6)$$

によって得られる。2 相の磁場強度 B_{x0} , B_{y0} に差がある場合は、角度誤差となって表れる。

2.2 2次元における位置計測

回転磁界とは異なり、位置計測では対面したコイルに位相の反転した正弦波を入力する。この場合中心に近づくにつれ、磁界強度が減少し、中心で 0 になる。さらに中心を越えると位相の反転した磁界が発生する。これを差動磁界と称する。本手法では差動磁界の振幅を検出することで、位置の計測を行う。位置測定の方法について以下に示す。 x 軸、 y 軸に異なる角周波数 ω_2, ω_3 で差動磁界を発生させる。これを Fig. 3 に示す。この時、ピックアップコイルに発生する電圧 V_p は、次式で表される。

$$V_p = K_2 \omega_2 \cos \omega_2 t \sin \theta + K_3 \omega_3 \cos \omega_3 t \cos \theta \quad (7)$$

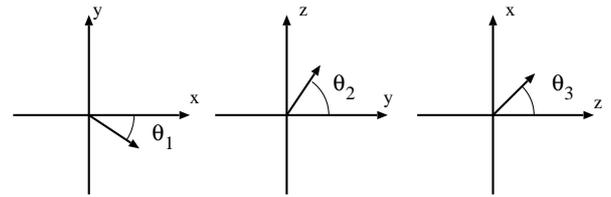


Fig. 4 3次元の角度計測

ここで K_2, K_3 は、計測地点に依存するそれぞれの軸成分の検出しうる最大振幅である。位置計測においても、角度計測と同様に入力波による同期検波を行う。しかしながら、ピックアップコイルに発生する電圧は、入力波に対して 90 [deg] の位相遅れを生じているため、乗算を行うことで、情報が失われてしまう。そのため、入力波にも同様の位相遅れを与え、 $\cos \omega_2 t$ と $\cos \omega_3 t$ による同期検波を行い。最終出力、 $\frac{K_2 \omega_2}{2} \sin \theta$, $\frac{K_3 \omega_3}{2} \cos \theta$ を得る。 θ はピックアップの角度であるが、回転磁界を用い計測された値を用いる。 x, y 成分の強度 K_2, K_3 は、あらかじめ計測して、校正曲線を得ておくことで位置に変換可能である。ここで注意すべき点は、 $\theta = 0$ [deg], 90 [deg], 180 [deg], 270 [deg] の時、 x 座標、 y 座標の片方が計測不能となる。そのため、角度の異なるピックアップコイルが必要となる。ここでは処理の容易さを考慮し、直交させることにした。

2.3 3次元への拡張

本手法を用いて 3 次元を計測するには、6 枚の面コイルと直交 3 軸のピックアップコイルが必要になる。3 次元における角度の計測は、3つの周波数により各平面に回転磁界を発生させて行う。各周波数による同期検波を行うことで、ピックアップコイルの各平面内での傾きを知ることができる。これを Fig. 4 に示す。計測された 3 つの角度とコイルの方向ベクトル成分は、次の関係で表される。

$$n_x : n_y = \cos \theta_1 : \sin \theta_1 \quad (8)$$

$$n_y : n_z = \cos \theta_2 : \sin \theta_2 \quad (9)$$

$$n_z : n_x = \cos \theta_3 : \sin \theta_3 \quad (10)$$

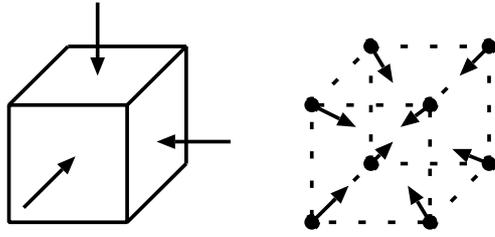


Fig. 5 磁界を発生させるコイル配置

ここで, $n_x = 1$ とおくと, ピックアップコイルのベクトルは以下の成分で表される.

$$n_x = 1 \quad (11)$$

$$n_y = \tan \theta_1 \quad (12)$$

$$n_z = \tan \theta_1 \tan \theta_2 \quad (13)$$

このベクトルを単位ベクトル化することで, コイルの方向ベクトルを得る. なお, 精度の向上のためには $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の大きさを検討し, 1 とする成分を選択すべきである. たとえば, θ_1, θ_2 が小さい場合は, $n_y = 1$ とした方がよい. 残りの 2 個のピックアップコイルについても同様に行うことで, ピックアップの座標系を定めることが可能である.

位置計測では, 直交 3 軸の差動磁界を用いる. 単一ピックアップの 3 成分の同期検波後の出力を O_1, O_2, O_3 , ピックアップコイルの単位ベクトルの成分を n_x, n_y, n_z , 測定点で得られる受信出力の最大値を K_x, K_y, K_z とすると以下の式が成り立つ.

$$O_1 = K_x \times n_x \quad (14)$$

$$O_2 = K_y \times n_y \quad (15)$$

$$O_3 = K_z \times n_z \quad (16)$$

そのため, 2 次元同様に, 位置を求めることが可能である. 以上により, 3 次元空間における位置, 角度の 6 軸が得られることが示された.

2.4 コイル配置法の選定

本手法に用いる回転磁界と差動磁界を発生させるコイル配置には, 本発表で用いた 6 面コイルによって計測範囲を囲む配置の他に, 計測範囲の頂点に点と見なせるコイルを固定する配置がある (Fig. 5).

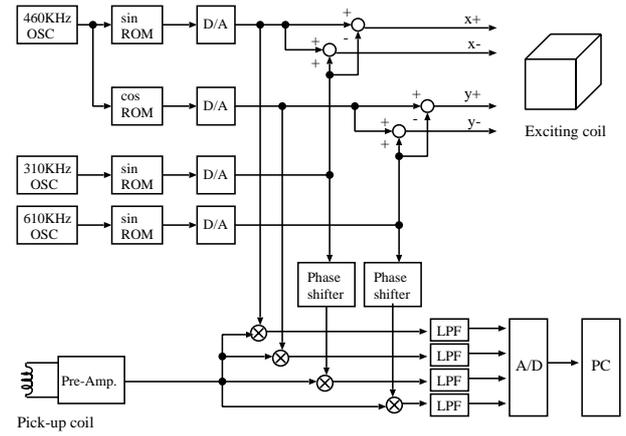


Fig. 6 実験装置のブロック図

しかし, シミュレーションによって面コイルを用いた場合には, 頂点コイルによる磁界に比べひずみが少ないことが確認された. また, 少ない電流で強い磁界を発生させることが可能である. さらにコイルに入力する励磁パターンが, 面コイルの 6 種類に対し, 頂点コイルでは 8 種類となる. そのため, 面コイルを用いることで若干低コストにシステムを製作可能である. 面コイルの欠点として, 立方体のフレームが必要となるため, 対象者の動作範囲を制限してしまうことが挙げられるが, 頂点コイルにおいてもコイルを支えるためにフレームが必要となる. また, バーチャルリアリティにおける使用では, 強い没入感を得るため HMD (Head Mount Display) との併用が考えられる. そのためケーブルの長さなどによる制限も存在する. その他, 面コイルを拡大することにより計測範囲を広げることにも可能であり, 大きな問題にならないと思われる. 以上の考慮に基づき, 本手法では面コイルを選定した.

3. 2 次元モデルによる検証

3.1 装置概要

原理の確認と精度を検証するために, 2 次元モデルにおいて実験を行なった. 実験装置のブロック図を Fig. 6 に示す. 実験では, 回転磁界の発生に



Fig. 7 コイルの外観

900 [Hz], 差動磁界に 600 [Hz] と 1200 [Hz] の正弦波を用いた。これらの正弦波を、発振回路、カウンタ、8 ビット 256 バイト分のROMを用いて生成し、加算回路を用いることで、回転磁界と差動磁界を同時に発生させるための各コイルの励磁パターンとした。

励磁コイルは、一辺 500 [mm] の正方形に直径 0.35 [mm] のホルマン銅線を 50 回巻いたものを鉛直な 4 面に使用した。励磁コイルの外観を Fig. 7 に示す。コイルの抵抗は、25 [Ω], インダクタンスは 4 [mH] である。このコイルに振幅を 0.2 [A] に調整した電流を流し、磁界を発生させた。

ピックアップには、直径 10 [mm], インダクタンス 6.8 [mH] のコイル 2 個を直交するように配置した。コイルの出力は、増幅した後、各入力波に対して乗算器とローパスフィルタを用い同期検波を行い、A/D 変換を介して、パーソナルコンピュータ (PC) に入力した。なお、コイルに発生する電圧は、前述のように位相が 90 [deg] 遅れるため、差動磁界の入力波に 45 [deg] 程度位相遅れを生じさせた後、同期検波に用いた(理想的には、90 [deg] であるが、0 [deg] でなければ、目的は達成可能である)。

次に計測に用いる座標系を定義する。計測に用いる座標は、測定原理に用いた座標系 (Fig.1) と

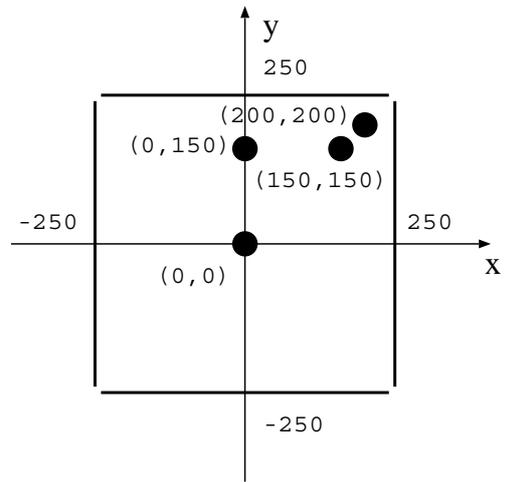


Fig. 8 角度計測における計測点

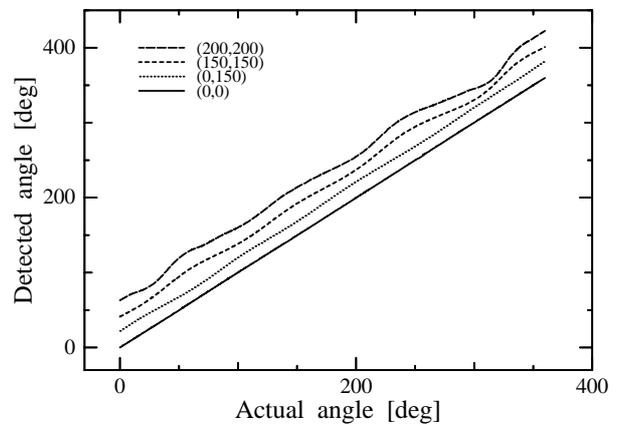


Fig. 9 回転角の実際値と計測値

同様に、4 面のコイルの中心に原点をとり、対面するコイルに垂直に座標軸を定義した。

3.2 角度計測

角度計測について検証を行うため、Fig. 8 に示す (0, 0), (0, 150), (150, 150), (200, 200) の 4 つの計測点において計測を行った。各計測地点での、実際の回転角と計測角度の関係を Fig. 9 に示す。Fig. 9 では、区別のため、各データに 20 [deg] のずつのオフセットを与え、表示した。回転角の実際値の計測は、ピックアップを一回転あたり 5000 パルスのエンコーダ(4 逓倍, 分解能 0.018 [deg])に装着することで行なった。Fig. 9 より原点に近いほど誤差が少なくなることが、明らかであり。この図から誤差は確認できない。これは、中心部は磁界のひずみが小さ

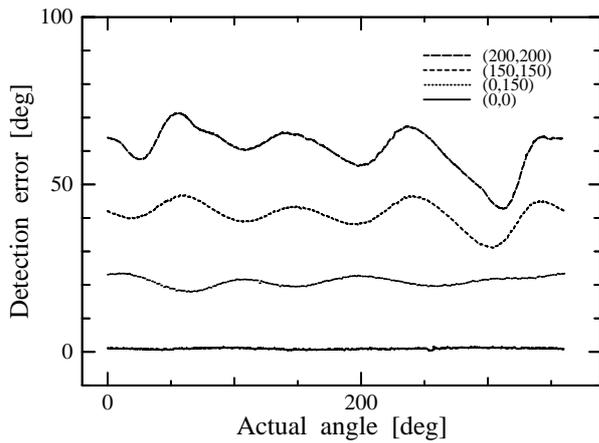


Fig. 10 角度の計測誤差

いため、理論どおりの結果が得られたといえる。一方、中心から離れ、励磁コイルに近づくと磁界のひずみの影響が顕著になる。単一コイルによる磁場にひずみが発生することに加え、2軸の磁場強度が異なり、コイル面に垂直ではない方向で誤差が大きくなる。しかしながら、この誤差は直交する2つのピックアップコイルで互いに逆方向に出ることが確認されたため、一方のコイルの検出角に90 [deg] 加えた角度と、他方の検出角を平均化することで補正を行うことにした(グラフは補正済の値による)。

次に、角度の計測誤差について Fig. 10 に示す。Fig. 10 では、区別のため、各データに 20 [deg] のオフセットを与え、表示している。中心部では絶対精度で誤差の最大値は 0.5 [deg] であり、補正を行う必要もなく実用に耐えるということが確認された。また励磁コイルまで 60 % の位置にあたる (150,150) の位置では、絶対精度で誤差 3 [deg]、同 80 % の位置にあたる (200,200) の位置では、絶対精度で誤差 15 [deg] と周辺部では大きな誤差が生じている。また理論上 360 [deg] 回転時の誤差分布は、180 [deg] 回転時の誤差分布を繰り返すはずである。しかしながら、(200,200) の位置での誤差は、非対称で一方に大きな誤差が生じている。これは、理論上は 2 個のピックアップコイルが中心が同一で直交であるとしているが、実際は同一中心を持つ

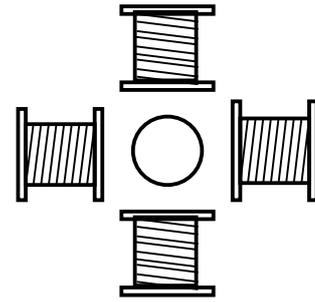


Fig. 11 ピックアップコイルの配置

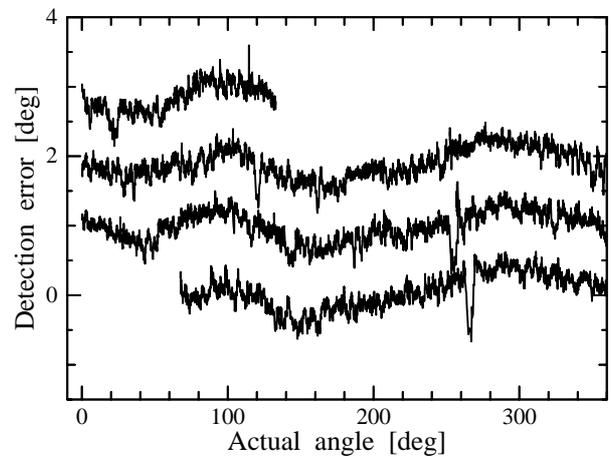


Fig. 12 角度計測における再現性

ていないために生じたと考えられる。この問題は、Fig. 11 に示すように点对称に 2 個ずつコイルを配置し平均化することで解決できると考えられる。

次に角度計測の再現性について検証を行った。原点で 3 周程度の回転を行なった場合の計測誤差を Fig. 12 に示す。Fig. 12 では、区別のために 1 回転ごとに 1 [deg] のオフセットを加えている。繰り返し精度は 0.1 [deg] 以内に収まっている。また 0.5 [deg] 程度のノイズが見て取れるが、ローパスフィルタによる平滑化を行うことで除去できると考えられる。今回は、ローパスフィルタによる遅延と、測定時のピックアップコイルの回転速度のばらつきによる誤差の発生をさけるために、平滑化を行わなかった。同様の測定を (150,150), (200,200) においても行い、いずれも繰り返し精度が 0.5 [deg]

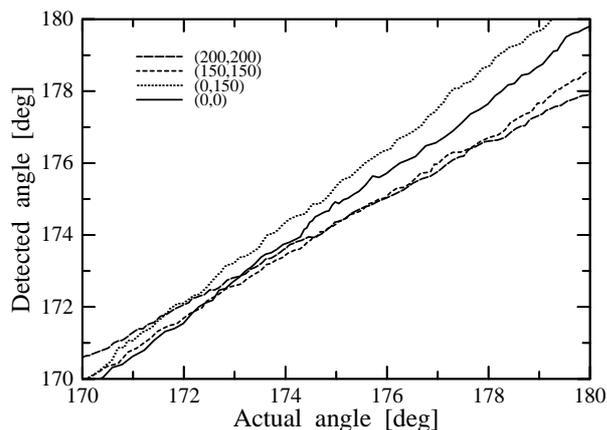


Fig. 13 角度計測の分解能

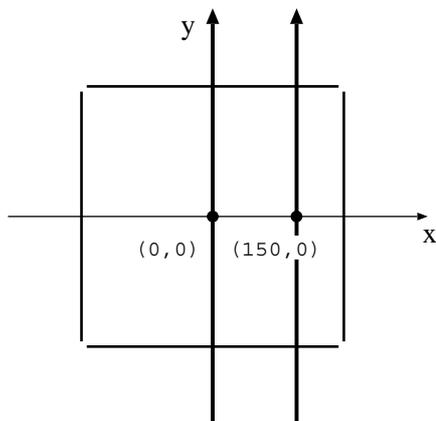


Fig. 14 位置計測を行う直線

ノイズ成分が 0.5 [deg] 以内に収まることを確認した。以上のように、角度計測では十分な再現性をもつため、容易に補正可能であると考えられる。

バーチャルリアリティに用いる場合、空間内における絶対精度と同等か、それ以上に対象者の微小動作を検出するための分解能が重要である。これを検証した結果を Fig. 13 に示す。これは、回転角の実際値と本手法による計測角の関係を示した Fig. 9 の一部を拡大したものである。いずれの計測位置においてもノイズの影響は見られるが、単調増加の傾向がある。そのため平滑化を行うことで 0.1 [deg] 程度の分解能を得ることできると思われる。

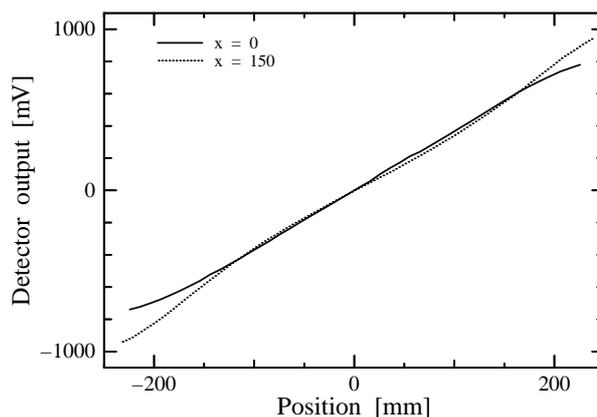


Fig. 15 差動磁界による位置の計測結果

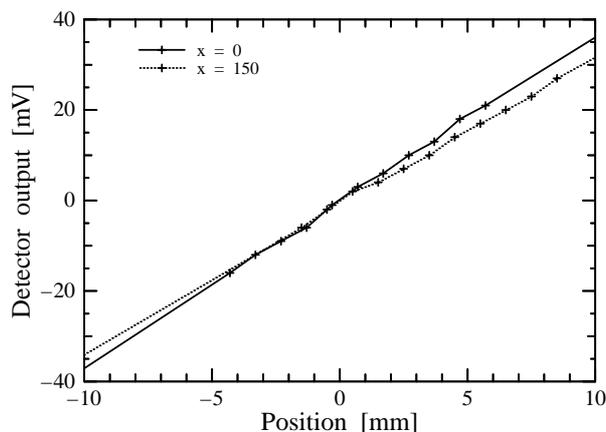


Fig. 16 原点付近の位置分解能

3.3 位置計測

次に、差動磁界による位置測定の実験結果について示す。実験は Fig. 14 に示された原点を通過する直線上と、原点より 150 [mm] 離れた直線上で行った。それぞれの直線上で、角度を固定したまま y 座標が負の地点から正の方向に 10 [mm] ごとの検波出力を計測した。この結果を Fig. 15 に示す。

次に中心部および、 y 方向に中心から 150 [mm] 離れた点において 1 [mm] 間隔で計測した。中心部の分解能を Fig. 16 に示す。計測点に+を印として表示した。ノイズによると思われる多少の変化が見られるものの、おおむね単調増加を示し、1[mm]程度の分解能を有するといえる。これらの結果において y 座標の変化に応じて中心部では直線的な値を示しているが、励磁コイルに近い位置では、磁

界のひずみのため直線から外れている。また、示した 2 直線上の計測値には線形性が見られ、中央 300 [mm] の区間で最大 30 [mV] のずれが生じている。これは 10 [mm] の誤差にあたり、補正の必要がある。しかしながら、位置計測においても、十分な再現性のあることが確認されている。たとえば、Fig. 15, Fig. 16 の計測で 10 [mm] 単位の計測値と 1 [mm] 単位の計測値は別途測定したものであるが、それにもかかわらず、同一直線上にのっている。よって、この補正も容易である。

3.4 考察

以上の結果より、本手法は、位置、角度ともにバーチャルリアリティに必要な精度を容易に得ることが可能であることが示された。また再現性を有するため、補正を行なうことで精度の向上が可能である。補正の手法としては、シミュレーションを行ない各地点の理論的な磁界強度を算出する手法が考えられる。また 2 次元モデルでは x 座標、 y 座標、角度の未知な 3 変数を決定する。それに対し、ピックアップから得られる情報は、2 個のコイルの信号それぞれに対して、回転磁界用の $\sin \omega_1 t$ 、 $\cos \omega_1 t$ 、位置測定用の $\sin \omega_2 t$ 、 $\sin \omega_3 t$ との同期検波を行っているため、計 8 個存在する。この冗長性を用いることでも、補正が可能であると考えられる。

4. 結 言

本発表では、従来の手法と異なる面コイルを用い、回転磁界と差動磁界を発生させることで 6 軸の姿勢を計測する手法を提案した。本手法はひずみの少ない磁場を発生させ、さらに同期検波の手法を用いるため容易に高精度と安定性を得られる。また 2 次元モデルの製作、実験を行ない、バーチャルリアリティに必要な精度を持つことを示した。3 次元空間での計測は今後の課題である。この場合の計測も、決定しなければならない 6 軸に対し、27

個の情報を持つため、十分補正可能だと考えられる。また今回コイルに流した電流が 200 [mA] と少量であるため、コイルを大きくし、電流を増加させるのみで測定範囲を広げることは容易である。この状態でピックアップを増やし、より大きな動きの検出も可能と考えられる。

参考文献

- 1) FREDERICK.H.RAAd, ERNEST.B.BLOOD, TERRY.O.STEINER, HERBERT.R.JONES: Magnetic Position and Orientation Tracking System, IEEE TRANSACTION ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, Vol.AES-15, No.5, 709/717 (1979)
- 2) 阿刀田 央一, 中村 雄一, 富澤 眞樹, 横山 一也, 今田 忠博: 磁気式モーションキャプチャ装置における双極子配置と座標逆算アルゴリズムの一設計法, 計測自動制御学会論文集, 34-5, 445/453 (1998)