

屋外における車両方位および位置の自動計測(1)

—— 方位計測センサの計測原理と特性 ——

I 実験目的

農用移動ロボットに限らず移動体の運動を記述したり、制御問題を考慮したりする場合、位置・方位情報は重要なファクターとなる。本実験では方位情報計測用のセンサとして、地磁気方位センサ(GDS: Geomagnetic Direction Sensor)に着目し、これらの計測原理を理解する。実際に屋外環境で計測を行い、キャリブレーションを行うことで、これらの特徴と問題点、改善方法について検討する。

II 方位センサ

1. 真北を求めるには

古来、人間は航海や旅、建設を行う際に、正しい方向を必要としてきた。北半球において、最もその役に立ったものは北極星である。北極星は時間によらず北を指すので非常に便利である。次に利用できるものは太陽である。この場合は、時間との関係をキャリブレーションして定める必要があるが(正午の時に陰ができる方向が北)、有用な方法であった。続いて、方位磁針である。地球の磁気を利用して、いつでも方位を求めることが可能である。ただし、方位磁針が指す北方向(磁北と呼ぶ)と、地図上の北(真北と呼ぶ)はずれている。これを偏角と言い、常に変化している。東京付近では 7° 、那覇では 4° 、札幌では 9.25° である。

現代においては、ジャイロステーションという装置によって、昼夜を問わず地上でも地下でも正しい方位が求められるようになった。この装置は、地球の自転を利用しており、水平に吊された回転体の軸が常に南北方向を向くことを利用している。また、屋外においては実験で用いる GPS によって真北を求めることができる。

2. 地磁気センサ

一般に用いられている磁気センサ(GDS: Geomagnetic Direction Sensor)には、フラックスゲート型、半導体ホール素子型、磁性体磁気抵抗素子型、光ファイバ型磁気センサなどがある*。方位を知るために磁気の方角ベクトルを求めるためには、磁気センサをお互い垂直に3つ組み合わせる必要がある。

1) フラックスゲート型 GDS

フラックスゲート(Flux gate)型の GDS の基本構造を図1に示す。高透磁率材料のトロイダルコアとその励磁コイル、およびコアの外側から囲む形で巻線される直交検出コイル X から構成される。コアは数 kHz の交流により過飽和励磁され磁心 X_1 、 X_2 部分の検出コイルには交流磁界によって発生する磁束密度 B_A による電圧が誘起する。この誘起電圧 V_{X1} と V_{X2} は大きさが等しく、互いに逆極性であることから検出コイル X 全体では出力電圧はゼロとなる。ここで、地磁気のような外部からの磁界 B_S が作用すると、 X_1 、 X_2 部分の磁界はそれぞれ B_A+B_S 、 B_A-B_S となり、その差に比

* 三浦宏文監修, ハンディブックメカトロニクス, 1996, オーム社

例した電圧が検出コイル X から出力される。出力電圧の大きさは外部からの作用磁界の大きさに比例し、作用磁界が地磁気のみであれば、作用する地磁気の磁心断面に対する角度に応じて出力磁界が変化する。

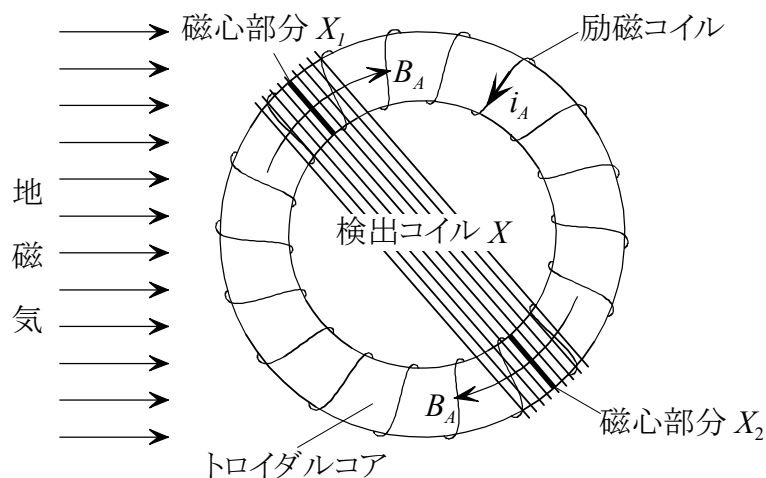


図1 フラックスゲート型地磁気センサの原理

2)半導体ホール素子型 GDS

ある種の半導体に電流 I を流し、これと垂直な方向に磁束密度 B の磁界があったとき、導体内の自由電子はローレンツ力 F_L によって運動方向が曲げられる。その結果、導体の下面が負に、上面が正に帯電するので、導体内に上面から下面への電界 E が発生する。電界 E による力 eE はローレンツ力 F_L と釣り合い、電子が直進するようになる。これにより、半導体上下面間に、流した電流 I や加えた磁界 B に比例した電位差(ホール電圧) V が生じる。

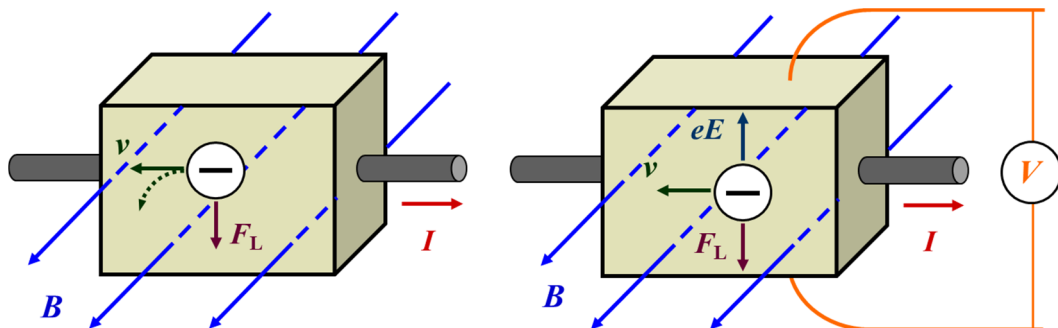


図2 ホール素子

本実験で使用する VN-100 Rugged は、ホール素子型3軸地磁気方位センサ、3軸加速度センサ、気圧センサを統合した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) で、携帯電話や PDA に組み込むことで、方位、加速度、傾斜角、気圧、高度を測定可能なセンサである。

センサの x, y, z 軸は図3のようにになっているので、 y 軸を車体の前進方向となるように取り付け、車両の方位を計測すると図3のように3軸それぞれの磁束密度が出力される。もし、車体が水平に置かれた場合、車両の磁北からの方位は3軸のうちの水平成分 B_x, B_y から、

$$\alpha = \text{atan} \frac{B_x}{B_y} \quad (1)$$

によって算出される。

伏角は、水平成分のベクトルの長さと、鉛直方向のベクトル B_z より、

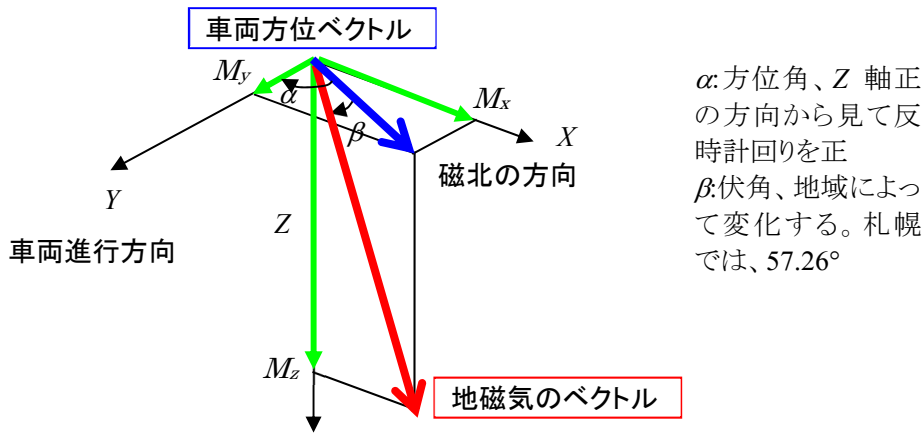


図3 座標系と計測されるベクトル

$$\beta = \text{atan} \frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \quad (2)$$

地磁気の大きさは、ベクトルの長さなので、

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3)$$

から求められる。

2. 地磁気検出の誤差

地磁気センサを用いて航法のために移動体の水平面上の向きを求める場合、移動体の向きは地磁気の水平分力を正確に求め、偏角を加算することで得られる。ところが微弱な地磁気の変化を計測するため、表1のような誤差要因を含むこととなる。特に、センサ周辺にある磁性体の影響は、搭載する車体が金属構造物である以上避けられない問題である。しかし、センサとともに移動し、その相対位置関係が変化しないなら、その関係を明らかにすることで、補正が可能である。

表1 GDS による検出誤差要因

センサ自身の誤差	コア等の加工・組立精度 電子部品の精度、温度特性など
地磁気の性質による誤差	日較差、磁気嵐、経年変化、地質の影響
使用方法による誤差	センサ周辺の磁性体・電流、センサの傾斜

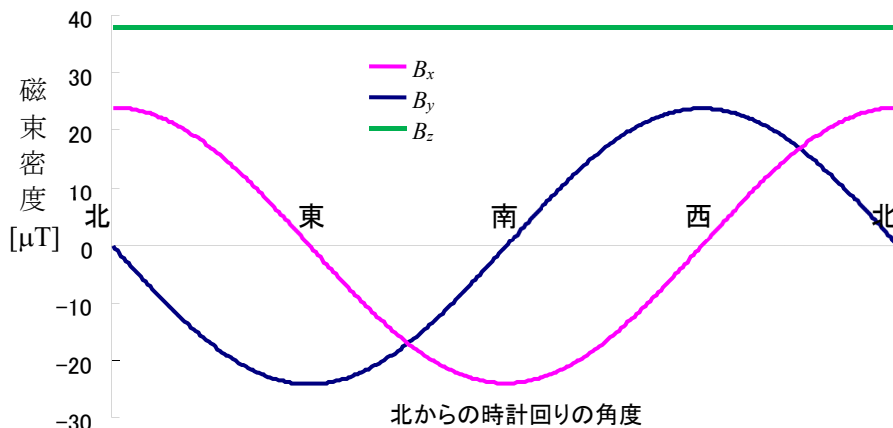


図4 理想的な磁気環境での計測結果

3. センサ出力の補正

地磁気センサを水平面上で理想的な状態で 360° 回転させたとき、 B_x 、 B_y 、 B_z は図4のようになり、 B_x 、 B_y の関係は図5(a)のように円(地磁気円)を描く。しかし、強磁性体などの影響がある場合には図5(b)のように地磁気とは別に磁界ベクトル成分が存在(円の原点が点 $O(0, 0)$ が $O'(o_x, o_y)$ にオフセット)するように観測され、算出した方位角 θ は本来の θ' に対して誤差を含んでいる。すなわち、何らかの方法でオフセット量 (o_x, o_y) を求められれば、

$$\theta' = \text{atan} \frac{B_x - o_x}{B_y - o_y} \quad (4)$$

によって、方位角 θ' を求めることができる。真北に対する方位角は、 θ' と、GPS によって求めた真北に対する角度の差(偏角)を求めてやればよい。

(o_x, o_y) は移動体を他の誤差要因が存在しにくい場所で 360° 回転させ、連続的に B_x 、 B_y を計測し、円近似することで得られる。

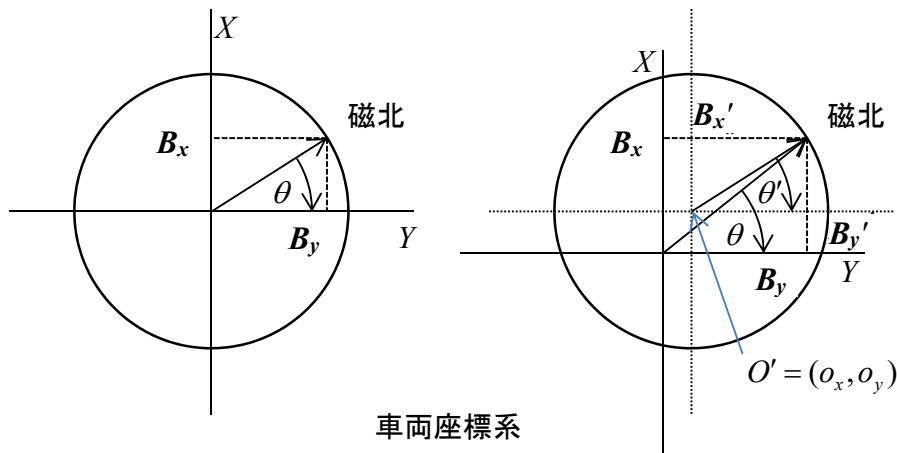


図5 GDS を 360° 回転させたときの計測値

4. 最小自乗法による円近似

計測データとして、 $(x_i, y_i) = (B_x, B_y)$ 、 $i=0, \dots, n$ が得られたとする。

円の一般式は、式(5)によって表される。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (5)$$

これを变形して、

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 - r^2 = 0 \quad (6)$$

とし、

$$\sum \left\{ (x-a)^2 + (y-b)^2 - r^2 \right\}^2 \quad (7)$$

を最小とする a 、 b 、 r を求めたい。しかし、 a 、 b 、 r は 4 次関数になるので、このまま a 、 b 、 r で偏微分しても、3 次関数となり、極小値を求めることができない。そこで、以下のように式を变形する。

$$\sum (x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)^2 \quad (8)$$

ただし、 $A = -2a$ 、 $B = -2b$ 、 $C = a^2 + b^2 - r^2$

(8) を A 、 B 、 C で偏微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial A} = 2 \sum (x_i^3 + x_i y_i^2 + Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cx_i) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial B} = 2 \sum (x_i^2 y_i + y_i^3 + Ax_i y_i + By_i^2 + Cy_i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial C} = 2 \sum (x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C) = 0 \quad (11)$$

この連立方程式を解けば良い。行列の形にすると、

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum (x_i^3 + x_i y_i^2) \\ -\sum (x_i^2 y_i + y_i^3) \\ -\sum (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

左辺の行列を \mathbf{M} 、右辺のベクトルを \mathbf{v} とおけば、

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{v}$$

となり、

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{v} \quad (13)$$

これより、 $a = -\frac{A}{2}$ 、 $b = -\frac{B}{2}$ 、 $r = \sqrt{a^2 + b^2 - C}$ と求められる。

エクセルを使って解く場合は、生データから(12)式の各要素を求め、逆行列を求めて計算すればよい。 Σ を求めるには SUM 関数を、逆行列を求めるには MINVERSE、行列の計算を行うには、MMULT を用いる。行列やベクトルの計算の時は、計算式を入力した後、Enter キーではなく ctrl-Shift-Enter キーを同時に押す(後述)。

IV 実験方法

1. 地磁気円中心オフセット量の計測

定常円回転時の地磁気センサ出力から地磁気円中心オフセット量の計測を行う。トラクタ上部に地磁気センサを取り付け、出力を記録する。定常円回転は、トラクタのステアリング角を約 30° 程度にして、走行速度 0.5m/s 程度で 1~2 周行う。

地磁気円中心オフセット量は式(5)~(13)を用いて計算する。

- 保存したデータファイルを Excel で開き、実測した B_x 、 B_y を散布図にプロットせよ。
- B_x 、 B_y より、前述の最小自乗法を用いてオフセット量 $(o_x, o_y) = (a, b)$ と半径 r を求めよ。 $B_x \rightarrow x_i$ 、 $B_y \rightarrow y_i$ と読みかえよ。
- 実際に計測した地磁気データと、最小自乗法によって求めた式 $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$ から得られるプロットを重ねて書け。 $x_i = a + r \cos \phi_i$ 、 $y_i = b + r \sin \phi_i$ 、 $\phi_i = \frac{\pi}{180} i$ 、 $0 \leq i \leq 359$ とせよ。
- r と B_z の平均値 \bar{B}_z より、図 2 中 β で示される伏角を求めよ。
- 実験で観測された地磁気のは大きさは何[T]か？ r と B_z の平均値 \bar{B}_z より計算せよ。

2. 基準方位の計測

基準方位と GDS 方位との関係を明らかにする。図5のように地面に約 45°おきに座標系を作成し、各方位に向けたトラクタで地磁気の値を約 10 秒間計測、同時に前後部に取りつけた下げ振りの位置 (x_f, y_f) 、 (x_r, y_r) を RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System) で約 10 秒間計測せよ。 (x_f, y_f) 、 (x_r, y_r) で表される座標を UTM (Universal Traverse Mercator) 座標と呼び、 x 軸が真東方向、 y 軸が真北方向と一致するように座標系をとる。 x の値は、東経 141° からの距離に 500Km を足した値、 y の値は、赤道からの距離である。北向きを $i=1$ とし右回りに計測せよ。

- 10 秒間の (x_f, y_f) 、 (x_r, y_r) の平均値から、各方位に対する車両の方向 θ_{vi} を、以下の式を用いて計算せよ。

$$\theta_{vi} = \text{atan2}(x_{fi} - x_{ri}, y_{fi} - y_{ri})$$

(ただし、atan2 はエクセルの関数で、0 から 2π の値を返す。)

- 10 秒間の地磁気の平均値 \bar{B}_x 、 \bar{B}_y と、先に求めた地磁気円中心のオフセット量を考慮に入れて、 $B_x' = \bar{B}_x - o_x$ 、 $B_y' = \bar{B}_y - o_y$ を求め、式(4)より方位 θ' を推定せよ。 θ' は(4)式で表されるが、 B_x' と B_y' の符号によって取り扱いを変えなければならない。そのため、 θ' と同様に atan2 を用いて計算せよ。
- 各基準方位に対する偏差 $\epsilon_i = \theta_{vi} - \theta'$ を求めよ。偏差の平均値、標準偏差を求め GDS の精度について考察せよ。

レポートの提出は、1班は 月 日()16:30、2班は 月 日()16:30 まで。S264 生物生産応用工学研究室に提出すること。メールでの提出も可だが、1つのワードファイルもしくは PDF にまとめること。計算がわかりにくい場合は質問に来ること。

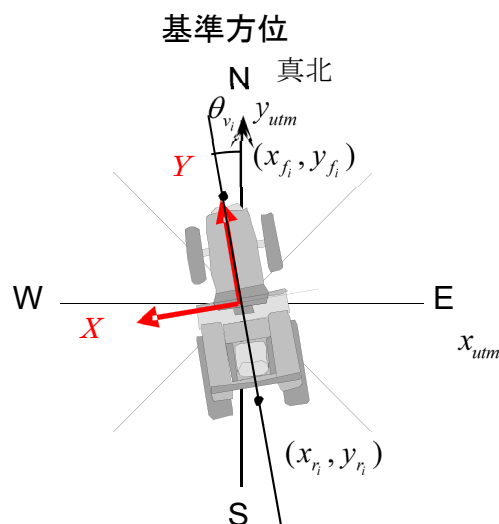
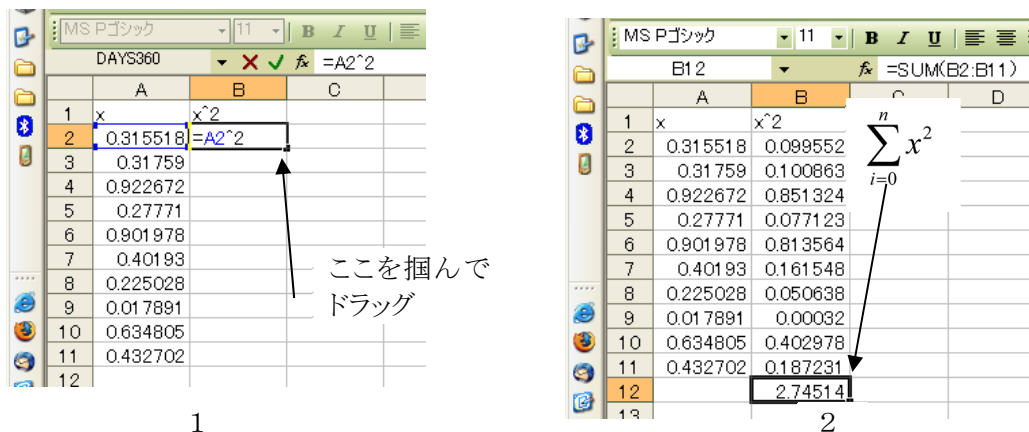


図6 トラクタの配置

$\sum_{i=0}^n x^2$ の求め方 ($n=10$ のとき)。隣の列に=A2^2 と入力し(A2 は参照するセルであり、場合によって変える必要がある)Enter を押す。その後、“下方向へコピー”、もしくは、セルの右下をドラッグして、B 列を全て A 列の二乗で埋め、最後に=sum(B2:B11)で $\sum_{i=0}^n x^2$ を求めることができる。この値を使うには、セルの値をコピーして、「編集」→「形式を選択して貼り付け」で、○値にチェックを入れ、「OK」を押す。これを応用して繰り返し、式(7)の行列を作る。



逆行列の作り方。まず、上記の方法で、元の正方行列を作る。この場合は 3×3 。逆行列を作りたいところに=MINVERSE(A1:C3)と入力する。ここで Enter を押すと、行列の M11 要素だけが計算される。次に、M11 を含むように 3×3 の領域を選択し、F2 を押す。最後に、ctrl+shift+Enter キーを同時に押すと、逆行列が計算される。行列とベクトルの計算もこれを応用せよ。

