

電子コンパスの超高速校正システム

電子デバイス研究所 小澤 直行¹・相沢 卓也¹

Ultra Fast Calibration System on Electronic Compass

N. Ozawa, and T. Aizawa

磁気センサを利用した電子コンパスは携帯機器に搭載された状態では、携帯機器内部の部品が発する漏洩磁場により正確な方位を算出できないため、この漏洩磁場の影響を取り除く必要がある。また、漏洩磁場は携帯機器外部からの強磁場印加や、経時変化、温度による変化があるため、携帯機器をユーザが使用している状態で漏洩磁場を演算により除去することが望まれてきた。当社ではより簡便でかつ高精度な方位表示を可能とすることを狙った逐次的に漏洩磁場の影響を除去する動的校正システムを開発し、その効果について実験で検証した。

In electronic compass system, the output of magnetic sensor should be calibrated by removing the influence of magnetic disturbance caused by some electronic parts in a mobile device, because the system indicates inaccurate azimuth without it. The magnetic disturbance vector changes with strong magnetic field from the outside of the mobile device, and varies with time and temperature. So it requires the electronic compass system to correct the magnetic sensor's output dynamically while the mobile phone user is not aware of calibration. For this purpose, we have developed the original calibrating system that removes the influence of magnetic disturbance sequentially. We verified the effectiveness of our system through a set of experiments.

1. ま え が き

近年、スマートフォンなどの携帯機器を中心に、機器の姿勢検出のために3軸地磁気センサと3軸加速度センサを組み合わせた搭載が増加している。姿勢検出の方法としては、加速度センサにて重力を検出して、重力の傾き具合から装置の傾斜角を計算し、地磁気センサにて地磁気を検出して、方位角を計算する。次章で具体的な傾斜角、方位角の算出方法について示し、電子コンパスが抱えている問題点について説明する。

2. 電子コンパスシステムの概要

まず、携帯機器とそれに搭載された地磁気センサ、加速度センサに対して、図1のようにXYZ軸を設定する。また、X軸まわりの角度をピッチ角 (p)、Y軸まわりの角度をロール角 (r)、Z軸まわりの角度を方位角 (θ) とここでは呼ぶ。このときに水平状態のセンサ出力 $S = (S_x, S_y, S_z)$ と傾斜状態のセンサ出力 $S' = (S'_x, S'_y, S'_z)$ の関係は、

$$\begin{bmatrix} S'_x \\ S'_y \\ S'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(r) & 0 & \sin(r) \\ \sin(p)\sin(r) & \cos(p) & -\sin(p)\cos(r) \\ -\cos(p)\sin(r) & \sin(p) & \cos(p)\cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (式 1)$$

となる。今、傾斜状態での重力加速度で規格化された(地球上で 9.8 m/sec^2 を検出したときに 1 とする) 加速度センサの出力を $A = (A_x, A_y, A_z)$ とすると、水平状態では $(0, 0, 1)$ であるので、

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(r) & 0 & \sin(r) \\ \sin(p)\sin(r) & \cos(p) & -\sin(p)\cos(r) \\ -\cos(p)\sin(r) & \sin(p) & \cos(p)\cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (式 2)$$

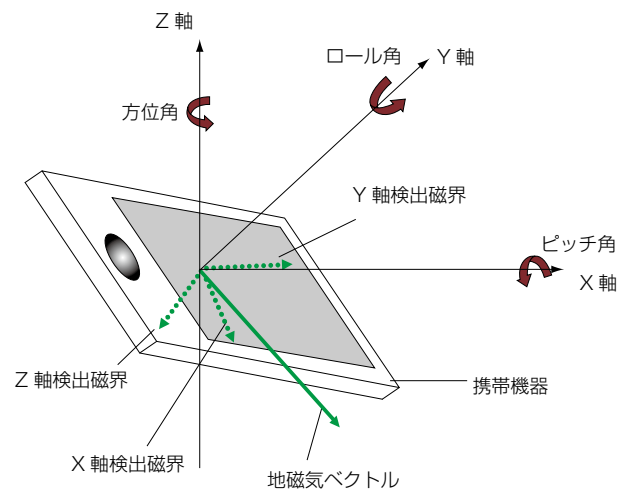


図1 携帯機器の姿勢と地磁気ベクトルの関係
Fig. 1. Relation of mobile device's posture and geomagnetic vector.

1 シリコン技術開発部

となる。この関係式から、加速度センサの出力値を使ってピッチ角、ロール角が計算される。すなわち

$$r = \sin^{-1}(A_x)$$

$$p = \sin^{-1}\left(\frac{A_y}{\sqrt{1-A_x^2}}\right) \dots\dots\dots (式 3)$$

一方で傾斜状態の磁気センサ出力を $M = (M_{tx}, M_{ty}, M_{tz})$ とすると、前述のピッチ角、ロール角から、

$$\begin{bmatrix} \cos(r) & \sin(p) \sin(r) & -\cos(p) \sin(r) \\ 0 & \cos(p) & \sin(p) \\ \sin(r) & -\sin(p) \cos(r) & \cos(p) \cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{tx} \\ M_{ty} \\ M_{tz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ V \end{bmatrix} \dots\dots\dots (式 4)$$

のように水平状態でのセンサ出力が求まるから、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_y}{H_x} \dots\dots\dots (式 5)$$

のように方位角が算出されることになる。

しかしながら地磁気センサは地磁気という微弱な磁界を検出するため、地磁気以外の磁界が印加された状態であると、(式 5) で算出される方位角は実際に携帯機器が向いている方位角と異なるという問題があった。特に携帯機器では、スピーカや振動モータ用磁石、ニッケルめっきされた電子部品などがもつ一定の大きさの磁界（以後、漏洩磁界）が存在している。漏洩磁界が地磁気センサに印加されると、あたかもセンサ出力にオフセットが重畳しているように観測される。この漏洩磁界の影響を除去するために、校正手法が研究されてきた。簡易的に校正する方法として、ユーザが携帯機器を水平に数回転、垂直に数回転させるという手法が長らく用いられてきた。まず水平に回転させたときに、地磁気センサのX軸出力とY軸出力の最大値、最小値を記録して、その平均をそれぞれX軸とY軸のオフセットとして記録する。次に垂直に回転させたときに、地磁気センサのZ軸出力の最大値、最小値を記録して、その平均をZ軸オフセットとして記録する。このように校正された後、地磁気センサの出力値からオフセットを減算して方位角を計算することにより、正しい方位角が計算されるようになる。しかしながら、漏洩磁界は経時的な変化、または周囲温度変化に伴う変化、あるいは携帯機器に磁石を近接させる等の携帯機器外部からの強い磁界印加による変化等があり、ユーザは漏洩磁界の変化を知るすべが無いため、漏洩磁界が変化した際に不正確な方位が表示されており、利便性を損ねていた。

電子コンパスの利便性向上が求められてきたなか、近年ユーザが意識せずに自動的に校正作業が行われる手法、つまり動的校正システムが開発されてきた。現在、主流になっている動的校正システム（以降、従来システムと称す）によれば、まずユーザが携帯機器を使用している中で、携帯機器の回転に応じてその時々地磁気センサ

の出力値をデータバッファに蓄積する。データバッファにある程度データが蓄積された状態で、最小二乗法にてオフセットを算出する。この計算方法について、図 2 を交えて説明する。図 2 は地磁気センサの各軸の出力値を 3 次元座標に変換してプロットしたものである。地磁気大きさは一定であると思わせるので、データバッファに蓄積されたデータは図 2 上では球面の軌跡を描くことになる。この球面にフィッティング=最小二乗法を行い、球の中心を推定することにより 3 軸同時にオフセットが算出できる。方位角計算の際には、地磁気センサの出力値からオフセットを減算してから方位角を算出する。この手法では、ユーザが校正作業として携帯機器を意識して回転させることなく、自動的に校正が行われる。

それに対して、当社では精度を維持しつつ、より簡便に校正が行われるような校正システムを開発した。本稿では、この校正システムの詳細について紹介し、従来システムとの比較実験について説明して、その効果について考察する。

3. 当社の校正システムの概要

従来システムでは、データバッファをある程度必要とするために、算出されるオフセットの追従性に問題があった。つまり、携帯機器の向いている方向に偏りがある場合、その時に蓄積したデータバッファからオフセットを算出すると不正確となってしまっていた。そこで、携帯機器をあらゆる方向に向け、データを多数測定しなければならなかった。そのため、正確なオフセットが算出可能なデータバッファの構築に時間がかかってしまうという問題点があった。また、携帯機器内部の環境が変化しオフセットが変化すると再度データを蓄積する必要が

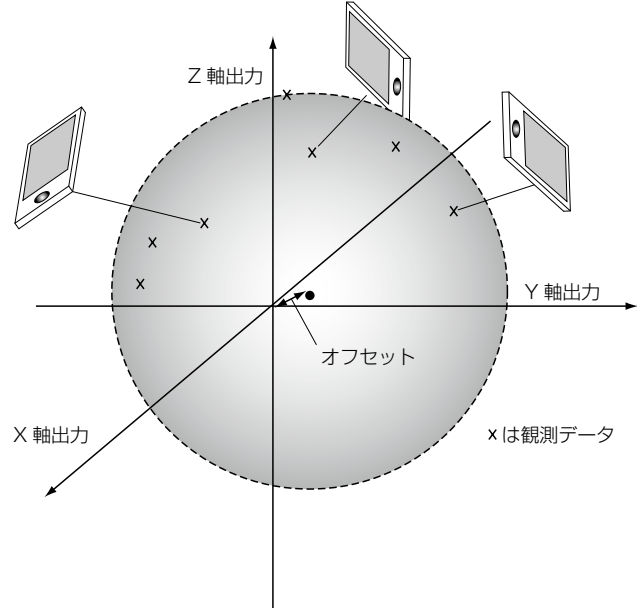


図 2 従来校正システムにおける原理
Fig. 2. Principle of conventional calibration system.

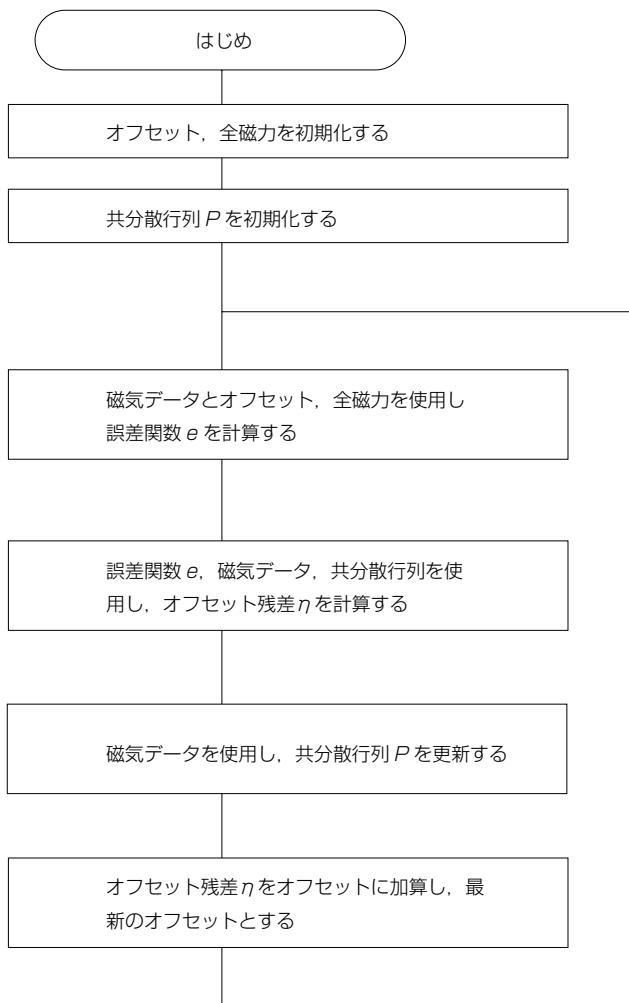


図3 当社システムにおける校正手順
Fig. 3. Calibration procedure of our system.

あり、その都度携帯機器をあらゆる方向に向ける必要性が生じるため、ユーザに負担をかけてしまうという問題があった。

そこで当社では、データバッファへの蓄積を必要としない、オフセットの追従性のよい、かつノイズ混入時にもその影響を緩和したうえで、より正確にオフセットを算出できる動的校正システムを開発した。この校正システムの概略について、図3のフローチャートを交えて説明する。

- ① オフセットと全磁力に初期値を設定する。初期値は一般的にはゼロが選択される。また、後のオフセット残差計算にて、重み付け係数を決定するための共分散行列 P は

$$P_0 = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha \end{pmatrix} \dots\dots\dots \text{(式 6)}$$

のように設定する。

- ② 誤差関数 e_n を算出する。磁気測定データと前回算出したオフセット、全磁力を使用し、A. 磁気測定データとオフセットとの距離の二乗を計算、B. 全磁力の二乗を計算し、 $A - B$ により誤差関数 e_n を求める。
- ③ オフセット残差 η を計算する。オフセット残差 η は、②で計算された誤差関数 e_n と前回測定時の共分散行列を使用し、(式7)のように計算する。なお、 z_n は n 番目に測定された磁気データを用いて計算する 1×4 行列である。

$$\eta = \frac{P_{n-1} z_n}{\rho + z_n^T P_{n-1} z_n} e_n \dots\dots\dots \text{(式 7)}$$

また、共分散行列は(式8)のように更新する。

$$P_n = \frac{1}{\rho} \left[P_{n-1} - \frac{P_{n-1} z_n z_n^T P_{n-1}}{\rho + z_n^T P_{n-1} z_n} \right] \dots\dots \text{(式 8)}$$

- ④ オフセットと全磁力を更新する。具体的には前回測定時のオフセットに、③で計算されたオフセット残差 η を加算することにより更新する。

$$x_n = x_{n-1} + \eta \dots\dots\dots \text{(式 9)}$$

- ⑤ 磁気センサでの測定が行われるたびに、②～④を繰り返す。

誤差関数は測定データの軌跡と校正システムが推定している球面とのずれ量を表しており、この誤差関数を最小にすることで測定データがたどっていると考えられる球面の軌跡に限りなく近い推定が行われる。これが意味するところは、測定データがたどる球の軌跡の中心と半径が推定できているということであり、本校正システムにおいては磁気センサのオフセットが高精度で推定できているということの意味している。また本校正システムでは、データバッファを使用せずに磁気センサで測定されるたびに逐次的にオフセットが更新されるので、携帯機器をあらゆる方向に向けずとも、携帯機器のわずかな回転で校正を完了させることができる。またデータバッファを使用した方法では、データバッファを少量にすると演算負荷を低減させることができる反面、推定精度が低下するという難点があったが、当社の校正システムでは、比較的負荷の軽い演算を地磁気センサ測定毎に実施するので、精度を低下させることなく、演算負荷の軽減も実現している。

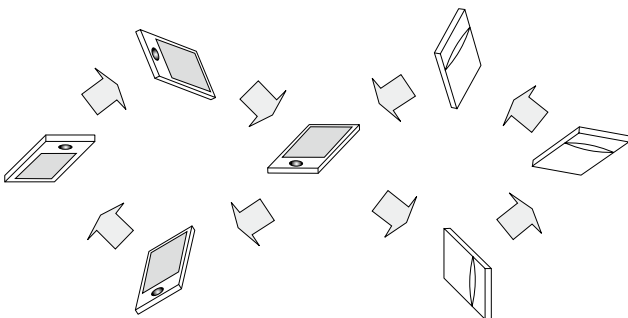
4. 比較実験

開発した校正システムが、従来システムと比較してオフセットの推定精度を落とすことなく、オフセットの追従性を向上させたことを確認するために、比較実験を行った。実験方法は、以下のステップのように行った。

- I. 地磁気センサが搭載された評価端末を用意した。評

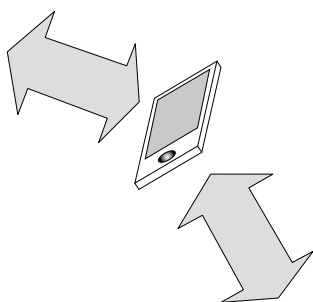
- 評価端末では、地磁気センサの出力値がモニタできるようにした。
- II. 評価端末にて、地磁気センサ出力値のモニタを開始した。
 - III. 次に、評価端末を所定の数だけ回転させた。所定の回転方法は、図4と図5に示した2種類の校正動作AとBである。回転させる回数は、1～5回でありそれぞれ別々に行った。
 - IV. その後、3軸ヘルムホルツコイルにて地磁気とは逆向きに磁界を印加し、その内部に評価端末を静止させた。
 - V. その後規定の時間が経過したら、地磁気センサ出力値のモニタを終了した。
 - VI. 当社の校正用プログラムと従来の校正用プログラムを用いて、①～⑤までのステップで観測された出力値を入力し、演算をさせてオフセット補正後の出力値を得た。

この評価方法を用いることで、再現性よくオフセットの推定精度を定量的に評価できる。まず再現性については、オフセット演算前にあらかじめ評価端末を回転させたときの地磁気センサの出力値をモニタしておき、そのモニタ結果を演算に用いているので再現性が良好となる。



8の字を描くように携帯機器を回転

図4 ユーザが行う校正動作A
Fig. 4. User's calibration movement A.



携帯機器を斜めに振る

図5 ユーザが行う校正動作B
Fig. 5. User's calibration movement B.

つまり、地磁気センサの出力値にはノイズが混入しており、また人間が手動で端末を回転させていることにより、同様の回転方法、回転数であっても地磁気センサの出力値は一致しないため再現性が良好でなかったが、本評価方法では同じモニタ結果を用いて演算しているため、同一条件で校正方法を比較していることになる。

次にオフセット推定精度の定量評価について説明する。演算後の出力値のうち、④のステップで観測された出力値に対応する値が推定誤差になると考えられる。この値は3軸分の値を含んでいるので、それぞれの出力値を v_x, v_y, v_z としたとき、以下の(式10)をオフセット残差として定義し、この値が小さいほど推定精度がよいと判断する。

$$d = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \dots\dots\dots (式 10)$$

続いて実験結果について説明する。校正動作Aにて実験を行ったときの、各回転数に対するオフセット残差のグラフを図6に示す。従来の校正方法によれば、校正動作が1回転と2回転の場合オフセット残差は100 uTを超えており、3回転～5回転のときの校正にて4～9 uTのオフセット残差になっている。地磁気の大きさは日本においては約46 uTであるので、1回転、2回転の場合はそれよりも大きいオフセット残差が存在するため、推定精度が悪いと考えられる。一方で当社の校正方法によれば、1回転～5回転のときの校正にて5～8 uTのオフセット残差になっている。つまり、従来の校正方法では1回転、2回転だけではオフセット推定が正確に行われていないが、当社の校正方法では校正動作の回転数によらず同じ精度でオフセット推定が行われている。よって、従来の校正方法では携帯端末を数多く回転させなければ校正が完了しなかったのに対して、当社の方法を使用した校正では、少ない回転数でも校正が可能となると考えられる。この理由は、当社の方法ではデータバッファへの磁気データの蓄積を必要とせず、測定毎にオフセ

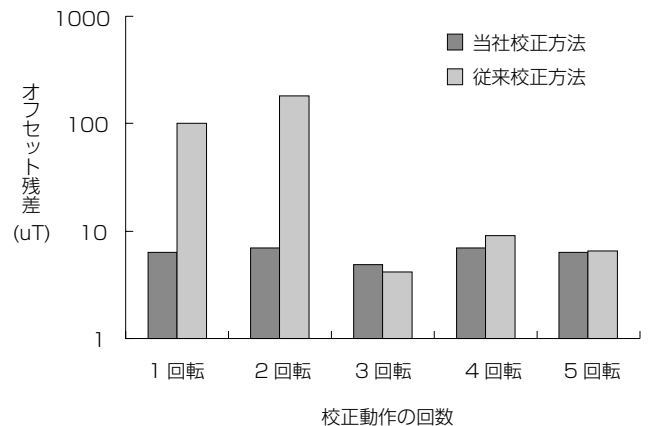


図6 校正動作Aにおける回数に対するオフセット残差
Fig. 6. Residual offset vs. the number of calibration movement A.

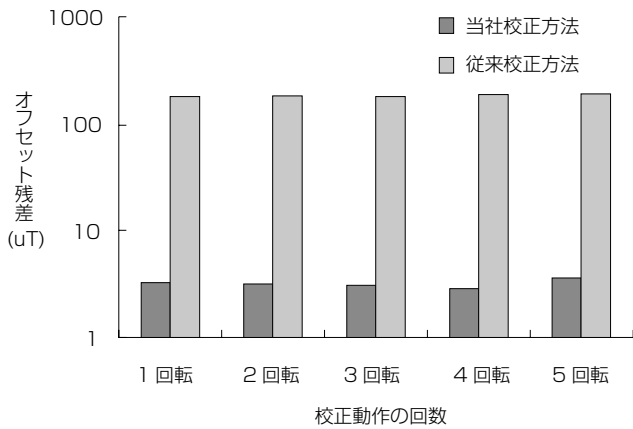


図7 校正動作Bにおける回数に対するオフセット残差
Fig. 7. Residual offset vs. the number of calibration movement B.

ット更新を行っているためであると考えられる。

次に校正動作Bにて同様の実験を行った。このときのグラフを図7に示す。従来の校正方法では、校正動作が5回転のときの校正でもオフセット残差が高い状態、つまりオフセット推定精度が悪い状態であったが、当社の校正方法では校正動作Aと同等の精度でオフセットが推定できている。この結果から、当社の校正方法によれば校正動作の差によらず同等の精度でオフセット推定が可能であることが示唆された。

最後に、演算負荷の比較実験について説明する。実験は、まず当社の校正プログラムを動作させた状態で携帯機器を校正動作Aさせた校正動作状態、静止状態でのそれぞれで演算負荷を計測し、続いて当社の校正プログラムを停止させてから従来の校正プログラムを動作させて、同様に校正動作状態、静止状態の演算負荷を計測した。演算負荷は、携帯機器の中央演算装置の占有率を指標とした。この実験結果を図8に示す。従来の校正プログラムでは、校正動作状態での中央演算装置の占有率は8~15%程度であり、静止状態では10%以下となっている。これは、校正動作状態では演算が行われているため、静止状態よりも演算負荷が大きくなっているためであると考えられる。それに対して当社の校正プログラムでは、校正動作状態においても静止状態の中央演算装置の占有率から大幅な増大は見られておらず、校正のための演算負荷は従来のそれより軽微であると考えられる。この理

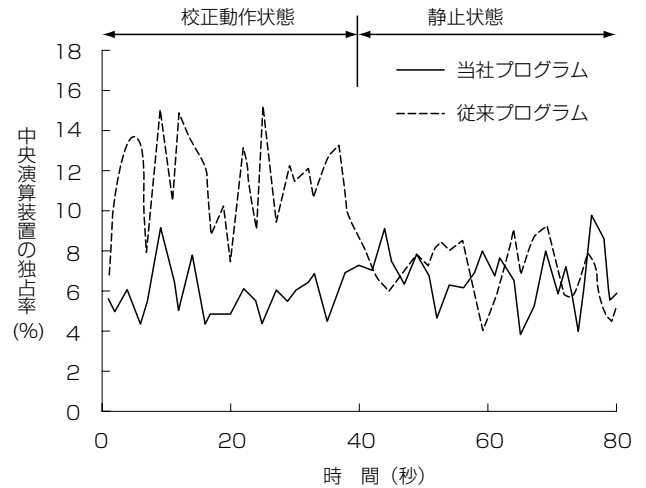


図8 各校正プログラムにおける中央演算装置の占有率の比較

Fig. 8. Comparison of central processing unit occupation between our program and conventional program.

由は以下のように考えられる。従来のプログラムでは、精度向上のためにデータバッファを多量に確保し、そのデータバッファ数に比例して演算負荷が増大していると推測される。一方で、当社のプログラムではデータバッファを必要とせず、測定毎に前節で示したような比較的負荷の軽い演算を行うため、演算負荷が増大しなかったと考えられる。

5. むすび

当社開発の動的校正システムについて説明した。また、従来の校正システムとの比較実験を実施し、その優位性について確認した。比較実験では、当社の校正システムを用いた場合、少ない携帯端末の回転でも回転数を増加させた場合と同等の精度でオフセット推定が可能であることを示した。また、回転方法に依存せず同等の精度でオフセット推定が可能であることを示した。演算負荷に関しても、オフセット推定時の演算負荷が従来システムよりも軽微であることが示された。

以上より、当社の校正システムを携帯機器端末に採用することにより、ユーザの負担の軽減が大いに期待される。