

重力測定のためのデジタルサーボセンサーの改良

横井 勇¹・小倉 祐美子²・須田治夫¹・木間定治¹・松田滋夫³・
徳江聡²・盛川仁⁴・野口竜也⁵・石田勇介⁶

¹ 非会員 株式会社 東京測振 (〒 123-0873 東京都足立区扇三丁目 14-34)

E-mail: yokoi@to-soku.co.jp

² 非会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 (〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: ogura.y.ab@m.titech.ac.jp

³ 非会員 クローバテック株式会社 (〒 180-0006 東京都武蔵野市中町 3-27-26)

⁴ 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

⁵ 正会員 鳥取大学工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 680-8550 鳥取市湖山町南 4-101)

⁶ 学生会員 鳥取大学工学研究科社会基盤工学専攻土木工学コース

従来より航空重力探査用センサーには小型で高い感度を持つフォースバランス型のセンサーが用いられたものがあり、成果を挙げている。しかし、航空機のようなキャリアの振動は非常に大きく、これを避けるために大掛かりな姿勢制御や振動制御のためのシステムを必要としていた。重力観測システムを小型化するためにはこれらの制御システムを用いることなくセンサーの出力から後処理で重力変化を抽出できるようなシステムであることが望まれる。その際、センサーは重力の微細な変化に追従可能な高い感度と分解能、キャリアの振動によって飽和しない広大なダイナミックレンジという互いに相反する性能を同時に満足しなくてはならない。しかし、従来のアナログ方式のサーボ回路を有するセンサーは、サーボ回路の自己ノイズのためにこの要求を満足することが難しい。そこで、デジタル処理によってサーボ回路を制御することでアナログ回路を簡略化し、広いダイナミックレンジと高い分解能を同時に満足するこれまでにない新しいセンサーを開発した。最初に制作した試作品は短周期成分の波によって出力波形が大きく歪んでしまうという問題を抱えていることが明らかとなった。そこで、これに大幅な改良を加え、周波数帯域を分割して制御を行うことで、出力値から短周期成分の影響を除去することに成功した。

Key Words: force-balanced-type accelerometer, digital servo system, gravity survey, gravimeter

1. はじめに

従来の空中または船上重力探査用のセンサーは航空機などのキャリアによる外乱を遮断し、センサーが重力の方向を向くことができるよう、ジャイロなどを含むアクティブ制御の架台に設置するなど非常におおがかりなシステムであることが多かった。また、航空機に搭載するためには安全上の多くの課題を解決する必要があり、どんな航空機にでもセンサーを搭載して直ちに計測をはじめると、ということは難しい¹⁾²⁾。

近年、ジャイロや加速度センサーなどの小型高性能化や GPS をはじめとする測位技術の飛躍的な向上、計算機の性能の向上により、複雑な架台を使うことなく重力計をキャリアに直接設置したうえで、キャリアの姿勢を精密に測定し、強力な計算機を用いた後処理で重力データを抽出する、という方法が現実味を帯びてきている。さらに、観測システム自体の簡素化に加え

てセンサーの小型化により大型ラジコンのようなキャリアへの搭載へなど多彩なキャリアの利用も期待できるようになってきた。

しかし、このような簡素化された観測システムではセンサーを搭載しているキャリアの振動がそのままセンサーに外乱として記録される。そのため、観測対象である非常に微少な変動成分である重力のデータを大振幅の外乱がマスクしてしまうだけでなく、外乱のレベルがセンサーの測定可能範囲を越える過大入力となって記録そのものがまったく使えなくなってしまうということも十分に考えられる。

地震動予測を目的とした地盤構造の推定のためには、1 mGal 程度のコンター間隔でブーゲー異常図を作成し密度構造を推定することが多い³⁾。また、船上重力計の精度も 1 mGal 程度かそれよりも少しよいという程度であると考えられる。そのため、センサーの精度としては 1 mGal 程度の間隔でブーゲー異常の等値線をひけ

ることを目標として、等値線より一桁程度精度の高い $100\ \mu\text{Gal}$ 程度のオーダーで観測値から重力値を抽出できることを目指している。しかも、キャリアによる外乱を含む記録を取り扱うことを考慮するとセンサー単体で外乱振動ノイズがない条件での精度はさらに一桁程度高い $10\ \mu\text{Gal}$ 程度が必要であると考えている。

したがって、センサーには重力の微小な変化に追従可能な高い感度と分解能、キャリアの振動によって飽和しない広大なダイナミックレンジという互いに相反する性能を同時に満足することが求められる。しかし、従来のアナログ方式のサーボ回路を有するセンサーは、サーボ回路の自己ノイズのためにこの要求を満足することが難しい。そこで、本研究ではデジタル処理によってサーボ回路を制御することでアナログ回路を簡略化し、ノイズフロアを出きるだけ下げて広いダイナミックレンジと高い分解能を両立するセンサーを開発した。

センサーの試作機では分解能とダイナミックレンジを両立するために、異なる感度を有する2つのフィードバック回路を搭載した。すなわち、高感度のフィードバック回路には高速動作が可能なアナログ回路を、広いダイナミックレンジを確保するための低感度のフィードバック回路には複雑な処理が必要となるためデジタルデータをリアルタイムに演算してフィードバックを行うデジタルサーボ回路を用いたハイブリッドシステムとした。また、デジタルサーボ回路には組み込み用のCPUを用いているため、ファームウェアを変更することで必要に応じてフィードバックのアルゴリズムを自由に入れ替えることができる、という高い汎用性もあわせて獲得することができた。

2. デジタルサーボセンサー

2.1 デジタルサーボセンサーの構成

フォースバランスによるフィードバックシステムは一般には、アナログ方式のフィードバックアンプによってフィードバック量をコントロールしている。しかし、アナログ方式の増幅器を用いる場合、信号が長周期になるほど $1/f$ ノイズによって信号ノイズ比 (S/N) が悪くなること、非常に注意して素子を選び回路を構成してもダイナミックレンジは $100\ \text{dB}$ あまりが限界であることが多い⁴⁾。

したがって、航空重力探査のためにセンサーを航空機に搭載することで受ける外乱によってセンサーの出力が飽和しないよう十分に広いダイナミックレンジを得るためには分解能を犠牲にせざるを得ない。その反対に、十分な分解能を得るためにセンサーの感度を高く取ると十分なダイナミックレンジを得ることができ

ず、外乱によって容易に出力が飽和してしまうことになる。このようにダイナミックレンジと分解能は互いに相反する性質を有しているため、同時に両者の性能向上を図ることは困難である。

そこで、本研究ではサーボ回路の制御にデジタル制御を導入することを考えた。高い分解能を得るために高感度のアナログ回路で微細な制御を高速に行い、大きな変動については組み込み演算装置で制御することで広いダイナミックレンジを確保しようとするものである。

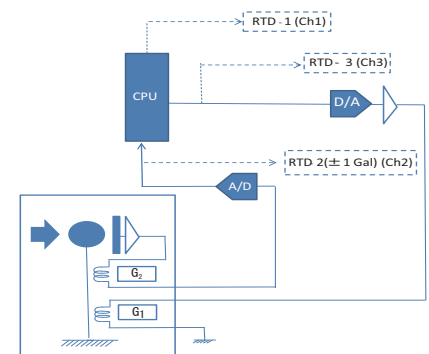


図-1 デジタルサーボセンサーのブロック図

図-1 に本研究で開発したデジタルサーボシステムのブロック図を示す。図中の左下の枠で囲った部分がフィードバック回路によって制御される振り子である。図中のコイル G_2 はギャップセンサーからの出力をフィードバックするアナログフィードバック回路として動作する。デジタルサーボセンサーでは、この G_2 の出力をアナログ/デジタル変換器 (A/D コンバータ) を介して組み込み用のCPUに入力し、演算処理の後、デジタル/アナログ変換器 (D/A コンバータ) によって制御電流をコイル G_1 に流して振り子を制御する、というものである。

システムは、以下のように動作する。

1. フィードバックコイル G_2 は最大 $\pm 1\ \text{Gal}$ の範囲でアナログ回路によってフィードバック制御を行うと同時にそのフィードバック信号を A/D コンバータを介して組み込みの演算装置 (CPU) に送る。
2. 演算装置は A/D コンバータの出力から制御力が $\pm 1\ \text{Gal}$ の範囲内かそれを越えるかを判断し、越えていれば G_1 を $1\ \text{Gal}$ 分だけ制御する。越えていなければ G_1 による制御を行わない。 G_1 の制御は G_2 のデータ 100 サンプルにつき 1 回行う。
3. G_1 による制御が行われると G_2 は強制的にリセットされ、 G_2 のフィードバック量はゼロに戻る。
4. 2. に戻る。

G_2 の A/D はサンプリング間隔 1 ms で動作し、 ± 1 Gal をおよそ 21 bit 分解能で出力する。したがって、理論上の最小分解能は 1 μ Gal である。また、 G_1 は $\pm 1 \sim 992$ Gal を 1 Gal 間隔で出力すればよいので 10 bit 程度の分解能でデジタル/アナログ変換をして制御する。振り子の応答は G_1 と G_2 の制御量の合計を 32bit 分解能でサンプリング間隔 0.01 s にデシメーションして出力する。出力はシリアル通信によってデジタルデータを直接コンピュータに送る。

以上のようなシステム構成により、理論上は 1 μ Gal の分解能で最大 992 Gal まで出力可能であり、そのダイナミックレンジは実に 180 dB に近い。実際には、 G_1 はアナログ方式のフィードバックアンプを用いているため最大分解能はこのアンプの S/N によって規定されることに注意が必要である。しかし、アナログ信号の伝達は最小限となるように構成されているため、アナログ回路に外部から混入するノイズの影響も最小限とすることができる。この点もデジタルサーボシステムを採用することの利点であるといえるであろう。

なお、図-1 に示す通り、 G_1 および G_2 の制御量をモニターできるようになっており、RTD-2 (ch.2) および RTD-3 (ch.3) がそれぞれ G_2 、 G_1 の制御量に対応する。

2.2 試作機の基本性能の検討

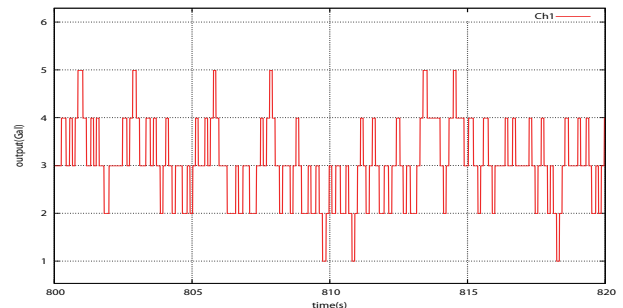
実際に動作するセンサーを製作し、その基本的な性能について検討するため、2012 年 5 月 28 日、センサーを観覧車に載せ、観測を行った。今回製作したデジタルサーボセンサーに加え、アナログフィードバック型加速度計である VSE (100Hz サンプリング、測定範囲 ± 50 Gal) でも同時にデータを取得した。図-2、3 にデジタルサーボセンサー各チャンネルの記録、VSE の記録を示す。 G_1 と G_2 による制御量を足し合わせたものが ch1、 G_1 による制御量が ch2、 G_2 による制御量は ch3 として出力されている。

図-2(a) と図 3 は、本来似たような波形を描くべきだが、明らかに異なっている。デジタルサーボセンサーの波形がステップ状になっていることから、システムのどこかで何らかの問題が生じていることが分かる。

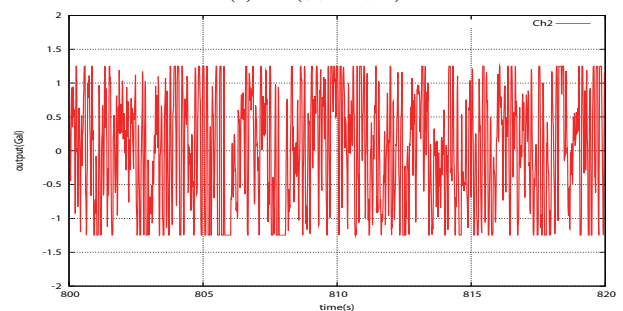
この原因を考えるために、デジタルサーボセンサーの ch2 と ch3 の出力である図-2(b),2(c) をみる。前節で述べたように、 G_2 (ch2) が ± 1 Gal に達するごとに、 G_1 (ch3) に 1 Gal ずつ足されている必要がある。しかし、図-2(b),2(c) をみると、 G_2 が 1 Gal に達した回数に対して、 G_1 の制御回数が圧倒的に少ないことが分かる。このことから、 G_1 による制御が正しく行えていないものと理解される。

先にも述べたように、CPU は A/D の出力から制御力

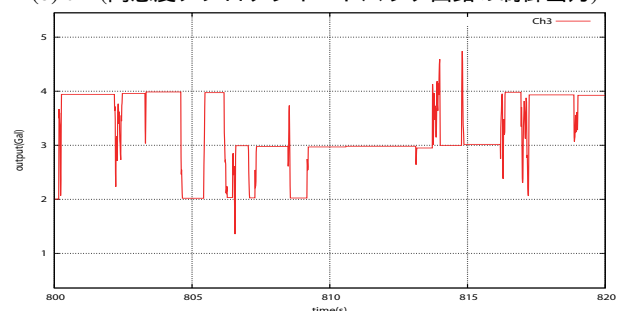
が ± 1 Gal の範囲内かそれを越えるかを判断し、越えていれば G_1 を 1 Gal 分だけ制御するかどうかを決定する。今回行った観測のように、1 Gal 以上の振幅を持つ短周期成分が多く入力されると CPU による計算が間に合わず、制御が正しく行われない場合がある、ということが明らかとなった。



(a) ch1(合成出力)



(b) ch2(高感度アナログフィードバック回路の制御出力)



(c) ch3(低感度デジタルフィードバック回路の制御出力)

図-2 観覧車におけるデジタルサーボセンサーの出力

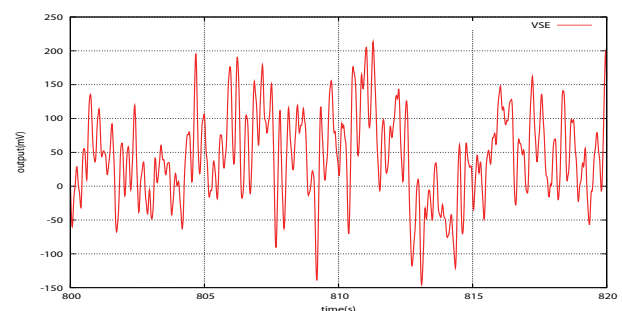


図-3 観覧車におけるアナログフィードバックセンサー (VSE) の出力

3．センサーの改良

前述の観測結果から、短周期成分の波によって記録波形が大きく歪んでしまうことが明らかとなった。開発したセンサーは、コイル G_1 と G_2 を用いることで、それらのコイルが制御する振幅範囲を分割して分担することで広いダイナミックレンジを確保しようとするものであった。しかし、移動体上での観測という環境では、大きな振幅を持つ短周期成分の振動が多く含まれるため、CPU による演算処理が間に合わなくなり、適切な制御が行えなくなってしまうという結果となった。

移動体上でセンサーを使用するためには、短周期成分の振動から逃れることはできない。そのうえ、短周期成分の振動によって微小な重力変化がマスクされ、重力変化を抽出することが困難となる。そのため、センサーの感度は短周期成分の信号に対する感度を低くすることが望ましい。

そこで、振り子の制御方法を工夫することで CPU に短周期成分が入力されないようにすることができれば、上に述べたような問題を回避する方法を考え、センサーの改良をおこなった。改良後のセンサーのブロック図を図-4 に示す。改良にあたっては制御用のコイルを 1 個増やし、これまでコイルごとに振幅を分割して分担することに加え、制御すべき周波数帯域を分割して分担させることで短周期成分の振動に対する CPU の処理遅れを回避することとした。

CPU の処理遅れが問題となっていた短周期成分については、図中のコイル G_2 による制御している。コイル G_2 は速度フィードバックとして機能しており、ハイパスフィルタを通してのことと同等であり、主として短周期成分の制御を分担している。そして、 G_2 の制御信号は CPU に送られることなく、そのままアースに捨てられる。このようにすることで、短周期成分による振り子の制御は行うが、出力信号には短周期成分が含まれず、センサーの周波数応答も短周期の感度が低いものとなる。一方、 G_2 によって制御されない長周期成分の信号は G_1 によってアナログ回路によるフィードバック制御がかけられ、その制御信号は A/D コンバータを介して CPU に送られる。そのうえで、演算処理ののち、D/A を通ってコイル G_3 によって制御される。このとき、 G_1 は主として高感度の信号を、 G_3 は低感度の信号を扱う。このように、 G_1 、 G_2 、 G_3 の 3 つのコイルによってそれぞれ周期帯域と振幅の分担を行うことで短周期成分の信号を CPU に送り込むことなく全周波数帯域での振り子の制御をおこないながら、短周期領域のセンサーの応答感度を低くして主として長周期成分に含まれる重力変化を抽出しやすくしている

のである。 G_1 での制御量と G_3 での制御量を足し合わせたものがデータとして出力される。

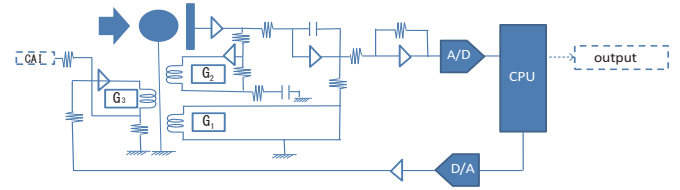


図-4 改良後のセンサーブロック図

4．改良後の観測

改良後のセンサーの性能を検討するため、2012 年 9 月 13 日に鳥取県東郷湖にて観測を行った。センサーを搭載した小型ボートを湖上を無線誘導によって航行させ、信号を記録した。改良後のセンサーと同時に 3 成分加速度計 (Nanometrics 社製 Titan) でも同時に振動を記録した。得られた波形を図 5,6 に示す。

図-6 より記録には短周期の振動成分が多く含まれていることがわかる。Titan の記録と改良後のデジタルサーボセンサーの記録は必ずしも一致していないが、これはセンサーの周波数特性が異なるためである。改良後のデジタルサーボセンサーは、振幅の大きな短周期成分の振動の影響を受けることなく、すなわち、波形が歪むことなく波形を記録できており、改良によって期待される性能を得ていることがわかる。

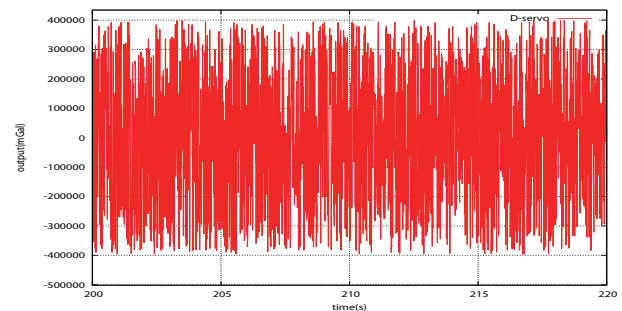


図-5 小型ボートにおけるデジタルサーボの出力

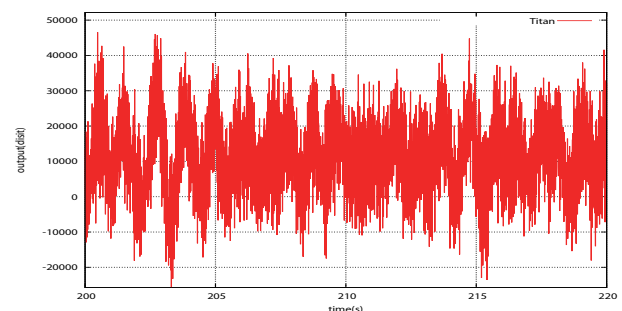


図-6 小型ボートにおける titan の出力

5 . まとめ

航空重力探査をはじめとした移動体にセンサーを搭載して、重力探査を実施することを前提としたセンサーの開発を行った。基本的な性能試験の結果、短周期成分の振動によって正確な応答が得られなくなることが分かった。そこで改良を行い、制御用コイルごとに制御すべき周波数帯域を分けることで、短周期成分を含む振動に対しても対しても応答するようようなセンサーを開発することができた。改良後の性能試験では、短周期成分の波に影響を受けることなく妥当と思われる波形を記録することができた。今後、センサー自体の更なる改良とともに、出力値から重力成分を抽出する後処理のアルゴリズムについても検討を続けていく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科学研究費 (21671003) の助成を受けた。

参考文献

- 1) Segawa, J., Kaminuma, K., and Kasuga, T.(1981) : A New Surface Ship Gravity Meter “NIPRORI-1” with a Servo Accelerometer , *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 27(2), 102–130.
- 2) 瀬川爾朗 (2011) : 空中重力測定の精度に関わる諸要因 , 地質ニュース , 677, 16–21.
- 3) Goto, H., Sawada, S., Morikawa, H., Kiku, H., Ozalaybey, S. (2005): Modeling of 3D subsurface structure and numerical simulation of strong ground motion in the Adapazari basin during 1999 Kocaeli earthquake, Turkey, *The Bulletin of Seismological Society of America*, 95(6), 2197–2215.
- 4) 荒木正之, 盛川仁, 伊藤貴盛, 谷川正真, 松本敬太郎 : A/D コンバーターのハイブリット利用による広ダイナミックレンジのデータログ-の開発 , 日本地震工学論文集 , 11(3), pp.59-72.

IMPROVEMENT OF DIGITAL SERVO SENSOR FOR GRAVITY SURVEY

Isamu YOKOI, Yumiko OGURA, Haruo SUDA, Sadaharu KIMA, Shigeo MATSUDA,
Satoshi TOKUE, Hitoshi MORIKAWA, Tatsuya NOGUCHI and Yusuke ISHIDA

Some systems for airborne gravity survey use a force-balanced-type accelerometer as a sensor to measure gravity. Such type of sensor can be very small, but has good sensitivity. However, a carrier such as airplane, induces undesirable vibration. To avoid any kinds of vibration from a carrier, usually an observation system introduces complicated and huge system to suspend the sensor. For simple and inexpensive system for gravity survey, no suspension system is desired. In a case where there is no complicated suspension system, a sensor for gravity survey has to work without any trouble under large vibration by a carrier and insure high resolution and large dynamic range. For this purpose, we develop a new sensor with digital feedback circuit, which can control the feedback force using computer inside of a sensor.

As for the original prototype, output is bad because of the influence of high frequency wave. We do some improvements by deviding the frequency band into many segments and doing control on each of them. Finally, influence of the high frequency wave is extinguished from the output.