

ジャイロ計と傾斜計を複合させたリアルタイム姿勢角検出器

平社信人^{*}, 石坂卓弥^{**}

Real Time Attitude Sensing System Multiplied Gyro Sensor and Inclino-Meter

Nobuto HIRAKOSO^{*}, Takuya ISHIZAKA^{**}

Attitude control is required to achieve stable movement for a variety of vehicles such as planes in the air, or robots and automobiles on the ground. Accurate detectors as part of a feedback system are necessary in the construction of an attitude control system for stabilization of moving vehicles. In this paper, a multi-sensor system consisting of two sensors, a gyro sensor and an inclino-meter, and a calculation algorithm is proposed for the construction of an accurate attitude sensor system. The gyro sensor is utilized for an environment of high response; however, it has a bias noise component of attitude angle with time increment. Conversely, the inclino-meter has no bias noise dependent of time, but has low response and heavy disturbance in output data upon shock. An attempt to combine the merits of each sensor is made, with the proposition of a resulting multi-sensor system with both high response and accuracy dependability. Tests of sine-wave oscillation and random oscillation upon a moving cart were employed, through which the effectiveness of the proposed multi-sensor system was confirmed.

Key Words : Attitude sensor, Gyroscope, Error correct, Inclino-meter, Measurement

1. はじめに

空を行きかう航空機¹⁾や地上を走行する車両²⁾, 機敏に動くロボット³⁾など, 機体を安定に運動させるためには姿勢制御技術⁴⁾⁵⁾が必要となる. 姿勢制御を高精度に実現するためには, 姿勢角を正確に検出することができるセンシングシステムを構築する必要がある. 高精度に姿勢角を検出し, その検出値を制御系に取り込み帰還させることにより高精度な姿勢制御系を構築することができる.

姿勢角検出では一般に, 角速度センサを使用し得られた角速度情報を時間積分することにより姿勢角情報を得ている²⁾. しかしこの手法は, 角速度検出に混在する誤差要素も同時に積算するため, 時間の経過に伴い誤差成分が増大するという問題点を持っている. 高精度に角速度を検出できるセンサとしてリングレーザジャイロなどの計測機器⁶⁾があるが, これらは非常に高価であり汎用性も極めて低い.

通常, 角速度センサを使用し姿勢角を算出する際, 時間経

過に伴うバイアス誤差を除去するため, 何らかの姿勢角検出器をもうひとつ用意しジャイロ計のバイアス誤差をリセットすることで誤差を取り除くが, リセットを行う際, 姿勢角情報は一時遮断されてしまう. リセットを伴わない姿勢角検出器として, 光ファイバジャイロと傾斜計を使用し光ファイバジャイロの低周波ノイズと傾斜計の高周波ノイズをソフトウェアフィルタにより除去するもの⁷⁾やジャイロ計, 傾斜計, 磁気センサ, 加速度計, GPS を複合させた検出器はあるもののいずれも高価なセンサシステムである.

本研究は, 安価なジャイロ計⁸⁾と傾斜計を組み合わせ常時, 途切れることなく高精度に姿勢角情報を提供することのできる計測機器の開発を行うものである. 筆者らは, ジャイロ計の短所と傾斜計の長所, 傾斜計の短所とジャイロ計の長所が一致することに着目し, これら2つのセンサの長所を演算処理により複合させそれぞれのセンサの短所を打ち消す複合センサシステムを提案する.

本論文では, 第2章において本研究で使用するジャイロ計と傾斜計の特徴⁹⁾を明らかにするためタッピング実験を行い, それぞれのセンサの特徴を明示した後, それらの特徴を活かした計算アルゴリズム⁹⁾を提案する. 第3章において, 提案した複合センサシステムの有効性を確認するため, 正弦波揺動実験を行い, 得られた結果について報告する. 第4章において, 任意揺動実験としてスローブを通過する際の台車上の姿勢角の計測実験を行い, 得られた結果について報告する. 第5章において, 本研究のまとめについて報告する.

* 群馬工業高等専門学校機械工学科 群馬県前橋市鳥羽町 580 (E-mail: hirakoso@mech.gunma-ct.ac.jp)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科

* Department of Mechanical Engineering, Gunma National College of Technology, 580 Toriba-machi Maebashi, Gunma

** Tokyo Institute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering

(Received December 15, 2010)

2. 複合センサシステム

2.1 ジャイロ計と傾斜計の特徴

本論文では、複合センサシステムとして、ジャイロ計と傾斜計の2つのセンサを使用する。ジャイロ計と傾斜計の特徴を Fig.1 に示す。ジャイロ計の特徴として、応答速度が速くノイズも少ない。また衝撃印加時にも正しく検出値を出力することができる。しかしジャイロ計は角速度を検出するセンサであり、姿勢角情報を得るためには、得られた角速度値を時間積分する必要がある。その積分時に角速度情報に含まれるわずかな誤差成分も積算されるため、時間の経過に伴うバイアス誤差が発生してしまう。傾斜計の特徴として、傾斜計は重力場環境における重力加速度方向との傾き角を出力するため、時間経過に伴うバイアス誤差の発生はないが、衝撃印加時に重力方向を大きく見失い正確な姿勢角を検出することができない。また反応速度が遅くノイズレベルも大きい。

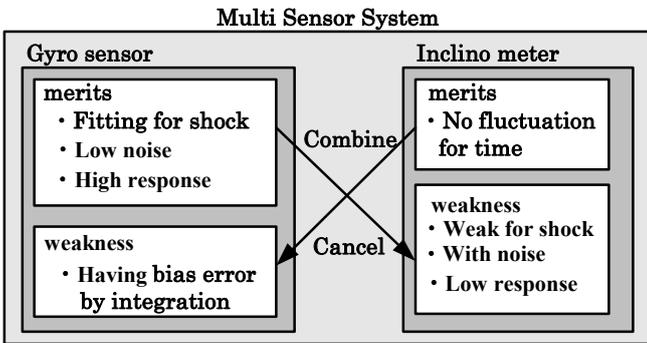


Fig.1 Gyro sensor / Inclinometer characteristics

2.2 傾斜計タッピング実験

傾斜計とジャイロ計の特徴を把握するため、タッピング実験を実施する。タッピング実験では、傾斜計とジャイロ計を剛に組みつけた状態で姿勢角が動かない状態に固定し衝撃を印加し、その応答出力を計測した。試験条件として、計測開始後、約 20 秒ごとにタッピングを行い意図的に衝撃を印加した。タッピング実験に用いたジャイロ計と傾斜計および計測機器の仕様を Table1 に示す。計測におけるサンプリング周期は、10[ms]としてデータ収録を行った。傾斜計とジャイロ計のタッピング実験結果を Fig.2 に示す。その結果、傾斜計は姿勢角を一定に固定しているにもかかわらず、衝撃印加時に姿勢角検出値が大きくずれスパイク状のノイズが発生しており、また衝撃を印加していない静的な状態におけるノイズレベルも大きいことがわかる。ジャイロ計は、衝撃印

加時に姿勢角が大きくずれることなく、また、衝撃を印加していない静的な状態におけるノイズレベルは小さいことがわかる。しかし、ジャイロ計は時間経過に伴い、姿勢角にバイアス誤差が蓄積していくことがわかる。

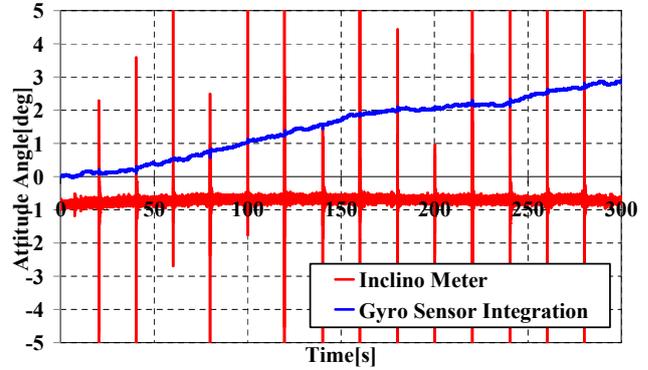


Fig.2 Tapping experiment result

2.3 複合センサシステム計算アルゴリズム

ジャイロ計と傾斜計の特徴を把握したうえで、常時途切れることなく正確な姿勢角情報を得られる複合センサシステムの構築を行う。ここで提案する複合センサシステムの計算フローを Fig.3 に示す。傾斜計、ジャイロ計による計測は常時実施するが、姿勢条件によりそれぞれのセンサの使い分けを実施する。前述のように傾斜計は、衝撃印加時に姿勢角が大きく乱れたり、激しく動く環境下において正しい姿勢角を算出できなくなる。姿勢角が静的な状態においては、傾斜計の計測値は安定しており正しいと判断することができる。まず、姿勢角が動的な状態であるか静的な状態であるかを判別し、つぎに姿勢角が静的であると判断された場合、傾斜計の検出値を使用し、動的と判断された場合はジャイロ計の検出値を使用する。姿勢角が静的か動的であるかの判断を行うための基準として傾斜計の計測データを使用する。傾斜計の計測データを時間微分することにより、角速度および角加速度に換算しその値の大きさにより静的か動的かの判断を実施する。Fig.3 の計算フローでは、角速度の判断基準を λ_A 、角加速度の判断基準を λ_B と設定し、姿勢角の揺動が動的であるか静的であるかを判定する。姿勢角が動的であると判断された時、ジャイロ計計測値を前の時刻の姿勢角に積算し、現在の時刻の複合センサシステムの姿勢角とする。ここで、ひとつ前の時刻の姿勢角はジャイロ計の角速度の積分時の積分定数に相当する。静的と判断した時、傾斜計の姿勢角をそのまま複合センサシステムの姿勢角として更新する。最終的に得られた姿勢角とひとつ前の時刻における姿勢角を比較し、あらかじめ設定した値 (λ_C) よりもその差異が大きくなるようであれば、一定値 λ_C を加算し姿勢角の円滑化を実施する。これらの計算過程を一サイクルとし、サンプリング周期：10[ms]で計測および計算を実施し複合センサシステムの姿勢角値を算出する。

Table 1 Tapping Experimental component

Component	Maker Name	Product Name
Inclino meter	Crossbow	CXTA02
Gyro sensor	SILICON SENSING	CRS03-02S
AD/DA PC Card	CONTEC	ADA16-8/2(CB)L
Note PC	LENOVO	2714-A21

従来ジャイロ計の角速度積分に伴うバイアス誤差の除去時に、ジャイロ計による計測を一時停止し計測が途絶える時間が存在したが、ここで提案する複合センサシステムは、途切れることなく常時、正確な姿勢角情報を得ることができる。

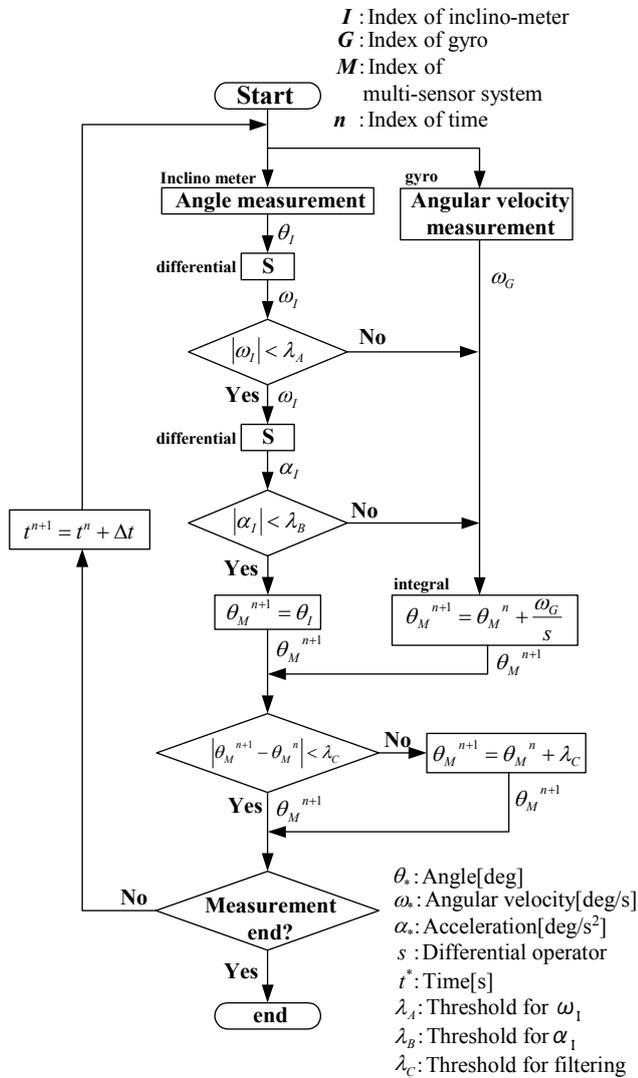


Fig.3 Measurement and calculation flow

2.4 各種パラメータ設定

複合センサシステムでは、あらかじめ設定すべき閾値が 3 種ある。姿勢角の揺動が静的か動的かを判定する際、傾斜計の計測値を 1 回微分した角速度値 (λ_A) ならびに 2 回微分した角加速度 (λ_B) の値により判定を行う。したがってこれらの数値を適切に設定することにより複合センサシステムの性能を向上させることができる。ジャイロ計のバイアス誤差は、Fig.2 より 300 秒あたりおよそ 3[deg]程度であるため、傾斜計による姿勢角の補正は頻繁に行う必要はなく、1 秒に一回程度、傾斜計の姿勢角にリセットすれば充分である。この 3 種のパラメータの設定値を Table2 にまとめる。これらの変数の設定目安として、傾斜計の静的な状態におけるノイズレベルより設定することができる。Fig.2 の傾斜計の静的な状態におけるノイズレベルを解析したところ、振幅が 0.4[deg]相当、周波数が約 10[Hz]の正弦波であった。このノイズ波形は、角速度に換算すると約 25[deg/s]、角加速度に換算すると約 1500[deg/s²]に相当する。最終的には、これらの数値を目安とし試行錯誤によるチューニングにより個別のセンサに対し変数設定を実施した。

Table 2 Threshold of parameter

Threshold of ω	λ_A	20[deg/s]
Threshold of α	λ_B	1600[deg/s ²]
Threshold of filter	λ_C	0.2[deg]

3. 正弦波応答実験

3.1 1 軸揺動模擬装置

複合センサシステムの有効性を確認するため、複合センサシステムに揺動を与え性能評価を行う。そこで、揺動環境を模擬できる 1 軸揺動模擬装置を製作した。この揺動模擬装置は、センサの性能を評価するため精度よく正弦波などの任意の揺動環境を作り出せなければならない。そこで、揺動模擬

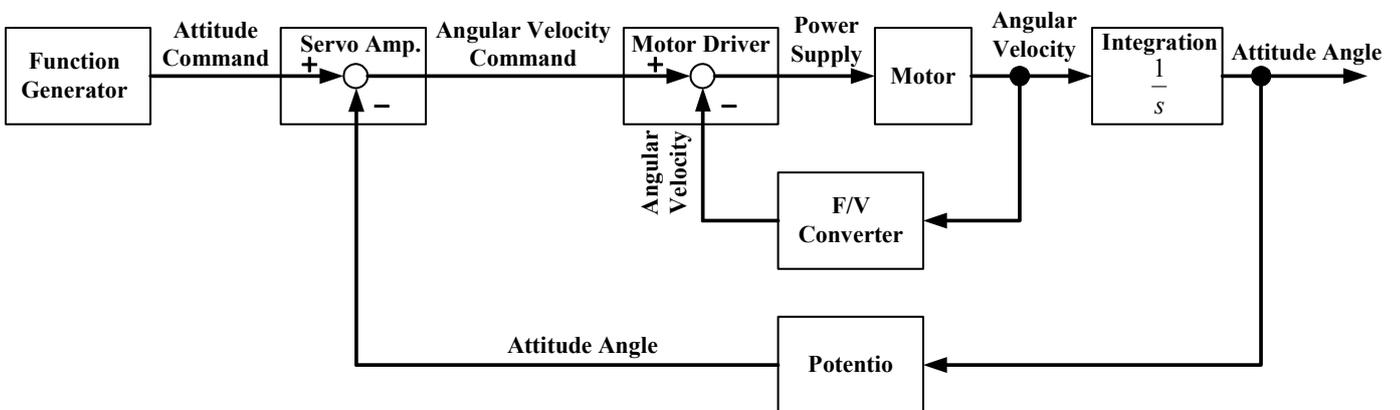


Fig.4 Base motion simulator system

装置のサーボシステムとして、速度制御系を内側ループに有する位置制御系を構成した。揺動模擬装置のサーボシステムに用いた各機器を **Table3** に示す。また、サーボシステムのブロック線図を **Fig.4** に示し、揺動模擬装置の全系写真を **Photo1** に示す。揺動指令信号は、関数発生器により波形信号を入力し、速度制御および位置制御により姿勢角を制御する。姿勢角を検出するセンサとして回転軸まわりにポテンショを配置させフィードバック制御を行っている。

Table 3 Base motion simulator component

Component Name	Maker Name	Product Name
Function Generator	GW Instech	SFG-2104
Servo Amp.	Sawamura Denki	SAP-1201A
Motor Driver	Sawamura Denki	MS-100T05
DC Motor	Sawamura Denki	SS40E2-E0
F/V Converter	Sawamura Denki	SFV-1000LD

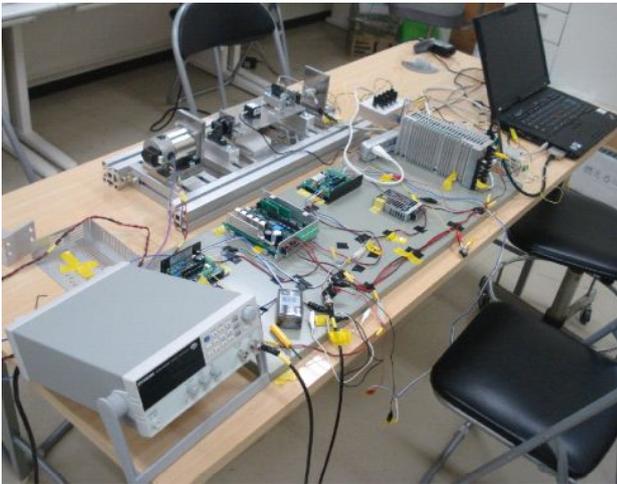


Photo1 Base motion simulator

3.2 複合センサシステムのハードウェア構成

複合センサシステムは、前述のように傾斜計、ジャイロ計を使用しそれらの計測データを演算処理することにより高精度に姿勢角を検出するものである。演算処理は、ノート PC の C コンパイラにより計算を行う。複合センサシステムに使用する構成部品は、タッピング実験に使用した計測機器と同一のものを使用する(**Table1** 参照)。ここで使用するジャイロ計や傾斜計は検出した物理量をアナログ信号電圧として出力するものであり、これらの出力信号は AD/DA-PC カードを介しノート PC に読み込まれ、ノート PC の C コンパイラにより **Fig.3** の計算フローに従って演算処理され複合センサシステムの姿勢角検出値として出力される。

3.3 正弦波揺動実験条件

複合センサシステムの有効性を確認するため、周期的でありかつ最も基本的な応答実験である正弦波揺動実験を行う。

正弦波揺動はノミナル波形が明確であり性能評価を実施する上でもとても都合がよい。正弦波揺動実験では、揺動模擬装置のベース上にジャイロ計と傾斜計を載せた状態で計測を行う。**Photo2** に正弦波揺動実験のセットアップの写真を示す。正弦波揺動実験で取り扱う試験条件を **Table4** にまとめる。試験条件の **Case①** として、振幅 ± 10 [deg]、周波数 0.2 [Hz] を想定した揺動環境と、**Case②** として、振幅 ± 10 [deg]、周波数 1.0 [Hz] の正弦波揺動を取り扱う。

試験条件 **Case①** で取り扱う正弦波は、小型船舶の揺動環境を模擬した揺動条件³⁾であり他の移動体と比較すると、振幅は大きく周波数は低目である。**Case②** として振幅を **Case①** と同一とし周波数のみを高く変化させた揺動条件を設定する。

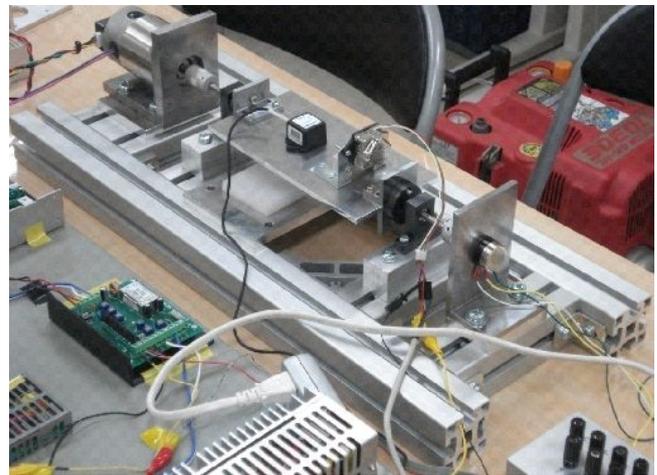


Photo2 Sine wave experiment with base motion simulator

Table 4. Condition of sine wave experiment

	Amplitude	Frequency	Results
Case ①	10.0[deg]	0.2[Hz]	Fig.5(a)~Fig.5(d)
Case ②	10.0[deg]	1.0[Hz]	Fig.6(a)~Fig.6(d)

3.4 正弦波揺動実験結果

Case① の試験条件：振幅 ± 10 [deg]、周波数 0.2 [Hz] における正弦波揺動実験の結果を **Fig5(a)~(d)** に示す。**Case②** の試験条件：振幅 ± 10 [deg]、周波数 1.0 [Hz] における正弦波揺動実験の結果を **Fig.6(a)~(d)** に示す。それぞれ **Fig.5(a)**、**Fig.6(a)** は、試験時間全域における 120 秒間のジャイロ計、傾斜計、複合センサシステムの姿勢角を示しており、**Fig.5(b)**、**Fig.6(b)** は、波形の分解能を高くするため、5 周期分の正弦波応答を示したものである。また、**Fig.5(c)**、**Fig.6(c)** は、傾斜計の計測値を 1 回微分し算出した角速度換算値 ω_1 と閾値 λ_A を示しており、**Fig.5(d)**、**Fig.6(d)** は、傾斜計の計測値を 2 回微分し算出した角加速度換算値 α_1 と閾値 λ_B を示している。 ω_1 あるいは α_1 のいずれかが閾値を下回った時、傾斜計の値を使用し複合センサシステムの姿勢角を更新する。

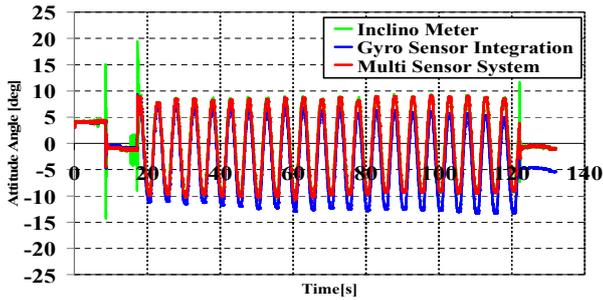


Fig.5(a) Result of sine wave experiment (Case①:overall)

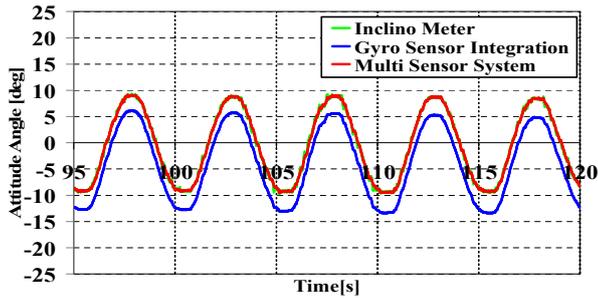


Fig.5(b) Result of sine wave experiment (Case①:local)

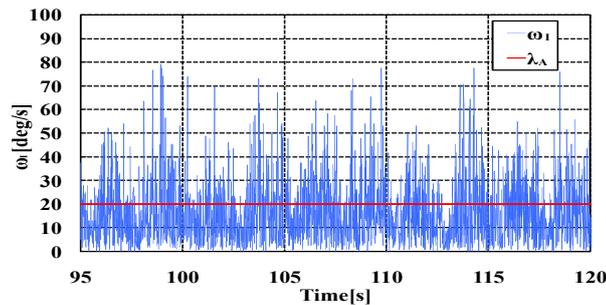


Fig.5(c) ω_1 history of sine wave experiment (Case①:local)

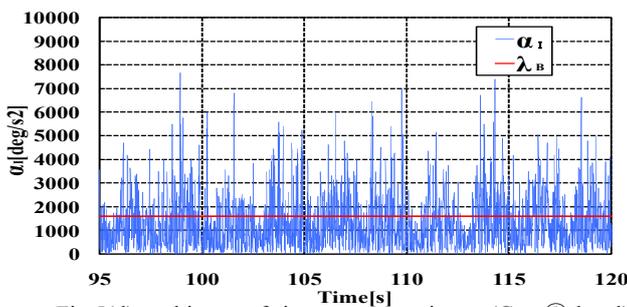


Fig.5(d) α_1 history of sine wave experiment (Case①:local)

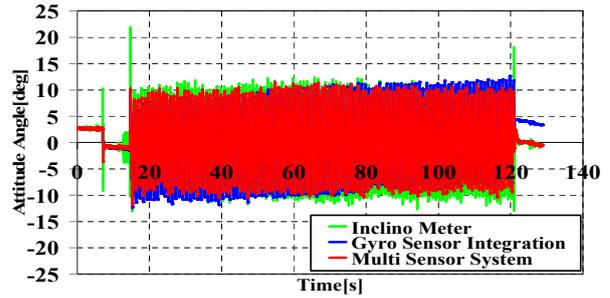


Fig.6(a) Result of sine wave experiment (Case②:overall)

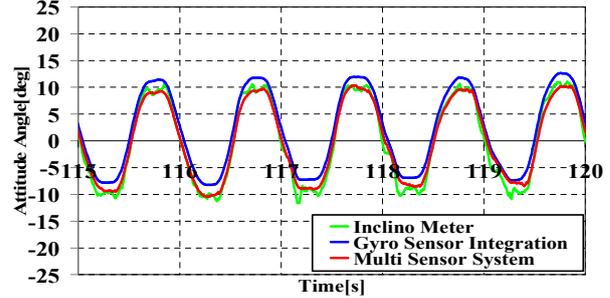


Fig.6(b) Result of sine wave experiment (Case②:local)

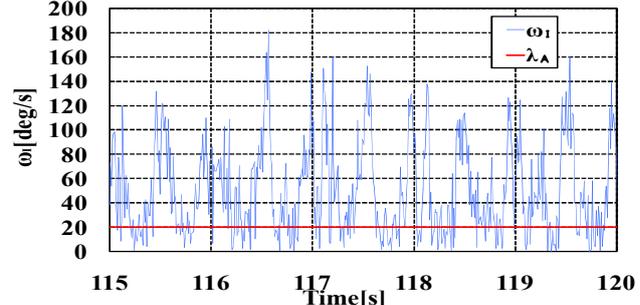


Fig.6(c) ω_1 history of sine wave experiment (Case②:local)

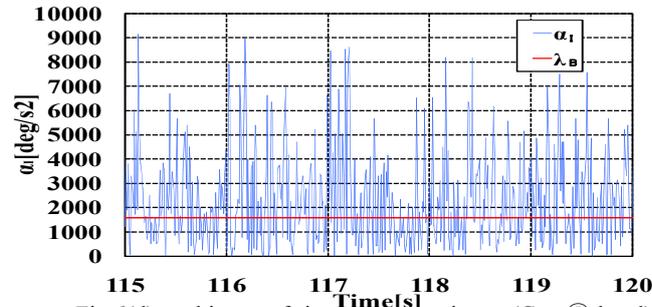


Fig.6(d) α_1 history of sine wave experiment (Case②:local)

3.5 正弦波揺動実験結果の考察

正弦揺動実験として、ジャイロ計、傾斜計および複合センサシステムにおける姿勢角検出を行った。その結果、周波数 0.2[Hz]、1.0[Hz]のいずれの場合においても、ジャイロ計の検出結果は、波形が滑らかでありおおむね正弦波を検出できていることがわかる。しかし、ジャイロ計の検出結果は、時間の経過に伴い正弦波の振幅中心が 0[deg]からずれバイアス誤差が発生していることがわかる。ジャイロ計のバイアス誤差は、そのドリフト量ならびに極性についても再現性がなくバイアス誤差の発生履歴を予測することは困難である。傾斜計の検出結果は、常に振幅中心が零度付近を示しているが、

正弦波の振幅の頂点付近において波形の乱れが発生し、正しく姿勢角を検出できていないことがわかる。

ジャイロ計と傾斜計の長所を組み合わせた複合センサシステムの算出結果は、正弦波の振幅中心は常に零度付近を示していることからバイアス誤差を除去できていることがわかる。また、同時に正弦波の波形も滑らかであり正弦波形状を適確に検出できていることがわかる。

傾斜計より算出した角速度換算値 ω_1 および角加速度換算値 α_1 について、閾値 λ_A 、 λ_B を頻繁に下回っており、傾斜計による複合センサシステムの姿勢角の更新が確実に実施されていることがわかる。しかし、角加速度換算値は誤差成分

が大きく閾値の設定や計算アルゴリズムへの導入方法を今後検討する必要がある。以上のことより、本論文において提案した複合センサシステムは、正弦波揺動に対し有効に機能していることがわかる。

4. 任意揺動実験

4.1 台車走行実験条件

3章において周期的な正弦波揺動環境下における複合センサシステムの有効性を確認した。つぎに任意の揺動環境下における複合センサシステムの有効性を確認するため、任意揺動実験を実施する。任意揺動実験は、非周期かつ高周波な衝撃が印加される環境下における複合センサシステムの機能を確認するものである。任意揺動実験として、台車の上に傾斜計、ジャイロ計、ノートPCなど複合センサシステム一式を載せ傾斜角が約5[deg]のスロープを通過する際の姿勢角を検出する。任意揺動実験において台車を通過させるスロープの概観を Fig.7 に示す。台車に載せた複合センサシステム一式のセットアップの写真を photo3 に示す。なお、任意揺動実験では台車は人が手で押すこととし、移動速度は普通の徒歩の速度とした。

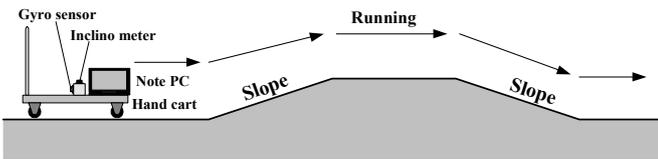


Fig.7 Slope form for random perturbation experiment

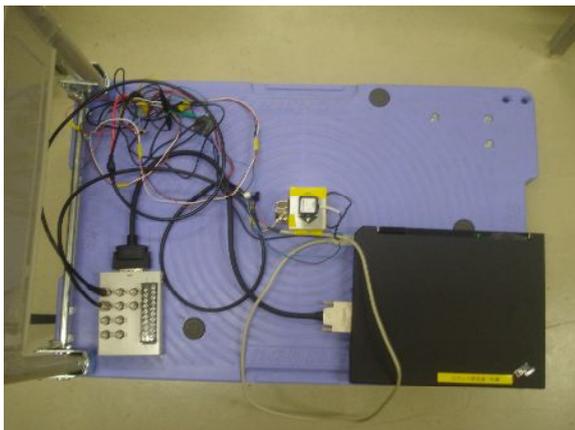


Photo3 Multi sensor system on cart

4.2 台車走行実験結果

任意揺動実験として、台車の上に複合センサシステムを載せスロープを通過させる実験を行った。この台車走行実験の各センサの姿勢角結果を Fig.8(a)~(d)に示す。その結果、ジャイロ計の示す姿勢角は、滑らかさを有しているが、時間の経過に伴いバイアス誤差が発生しており、計測終了地点では、

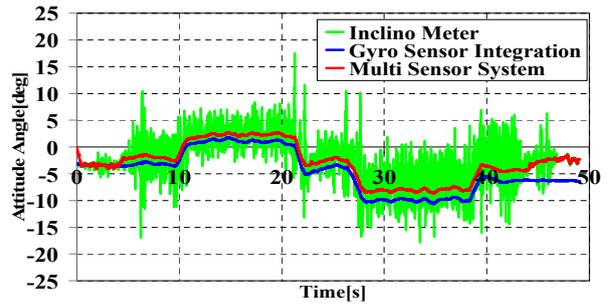


Fig.8(a) Result of slope running experiment (overall)

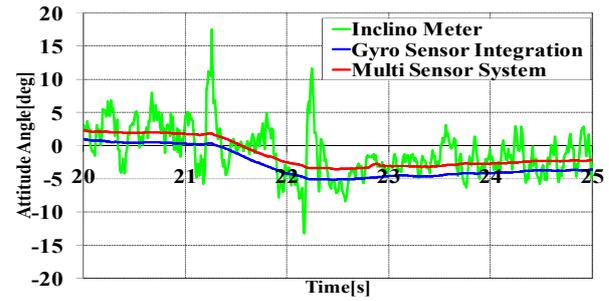


Fig.8(b) Result of slope running experiment (local)

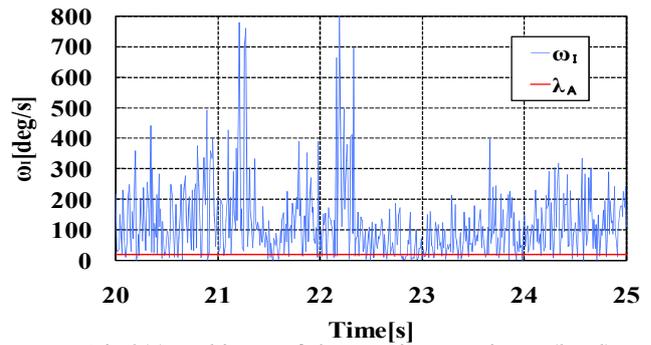


Fig.8(c) ω_1 history of slope running experiment (local)

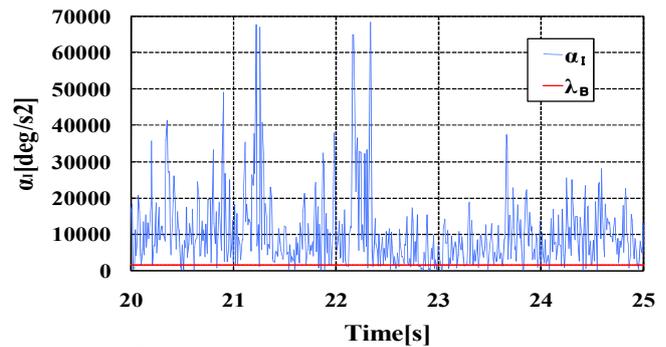


Fig.8(d) α_1 history of slope running experiment (local)

ほぼ水平位置に台車を停止させたにもかかわらず、ジャイロ計の姿勢角に残留オフセットが発生していることがわかる。傾斜計の姿勢角は、台車走行時に受ける衝撃の影響で最大20[deg]近いスパイク状のノイズを出力していることがわかる。しかし、傾斜計出力のスパイク状の振幅中心は、スロープ形状をおおむね捉えていることがわかる。複合センサシステムの姿勢角は、波形の滑らかさを有しバイアス誤差の除去がなされていることがわかる。正弦波揺動実験と同様に、傾斜計より算出した角速度換算値 ω_1 および角加速度換算値 α_1

について、1[sec]あたり数回の頻度で閾値 λ_A 、 λ_B を下回っており、傾斜計による複合センサシステムの姿勢角の更新が確実に実施されていることがわかる。しかし、角加速度換算値の誤差成分は、正弦波実験と同様に大きく、閾値の設定方法や計算アルゴリズムへの導入方法を検討する必要がある。以上のことより、本研究で提案した複合センサシステムは、強い衝撃を伴う環境下においても、有効に機能し常時途切れることなくおおむね姿勢角を計測できていることがわかる。

5. まとめ

移動体などの姿勢制御系を構成する際に用いることのできる高精度な姿勢角検出システムを構築することを目的として、ジャイロ計と傾斜計を組み合わせた複合センサシステムを提案した。ジャイロ計と傾斜計の特徴をタッピング実験を通じて明らかにした。また、ジャイロ計と傾斜計の長所を兼ね備えたセンサシステムを提案した。ここで提案する複合センサシステムは、常時途切れることなく姿勢角情報を提供できるものであり、正弦波揺動実験、任意揺動実験を通じその有効性を確認した。その結果、ジャイロ計から発生するバイアス誤差と傾斜計から発生する衝撃に伴うスパイク状のノイズの影響を完全に除去することができ、複合センサシステムの有効性を確認することができた。本研究で構築した複合センサシステムはさまざまな移動体の姿勢制御系に有用と考える。

参考文献

- 1) 東野, 清水, 野見山, 櫻井: ドリフトを持つ角速度センサを用いた RPRV の姿勢角推定法について, 日本航空宇宙学科誌, **45**, 713/718, (1997)
- 2) 高畑, 松原, 奥出: 加速度誤差分離に基づくピークル走行軌跡・姿勢角推定アルゴリズムの開発, 日本機械学会論文集 C 編, **76-761**, 4/10, (2010-01)
- 3) 平社, 富岡, 石坂: 自律型空中浮遊ロボットによる地形スキャンニングと定高度誘導方式の検討, 第 27 回誘導制御シンポジウム, **S1-2**, 9/12, (2010-5)
- 4) 平社, 富岡, 小澤, 石坂: 複数回転翼機構を有する空中浮遊ロボットの 1 軸姿勢制御実験, 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, **173-1-3**, (2010-3)
- 5) 平社, 松永, 狼: 揺動を伴う衛星トラッキングシステムのアンテナポインティング制御, 日本機械学会論文集 C 編, **67-654**, 377/384, (2001)
- 6) 多摩川精機: ジャイロ活用技術入門, 工業調査会(2002)
- 7) <http://www.patentjp.com/07/R/R100038/DA10079.html>
- 8) 小巻: MEMS ジャイロシリーズ CRS03, 日本ロボット学会誌, **21-1**, 33/35, (2003-01)
- 9) 平社, 石坂, 富岡, 瀬下: 複合センサシステムを用いた姿勢角検出に関する設計検討, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会, 261/262, (2009)

[著者紹介]

平社 信人 (正会員)



2002 年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。2000 年石川島播磨重工業株式会社(現 IHI) 入社。同年、IHI エアロスペースに出向。2009 年群馬工業高等専門学校機械工学科准教授、現在に至る。博士(工学)。自律型飛行ロボット、飛翔体の姿勢制御技術、誘導航法技術、空間安定装置に関する研究に従事。日本航空宇宙学会、日本機械学会、日本ロボット学会の会員。

石坂 卓弥



1988 年生まれ。2009 年群馬工業高等専門学校機械工学科卒業。2011 年群馬工業高等専門学校生産システム工学専攻卒業。同年、東京工業大学大学院総合理工学研究科入学。現在、在学中。姿勢角検出システムの研究に従事。