

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	微分フィルタを利用した剛体の傾斜角計測システムの開発
Author(s)	高原健爾
Citation	福岡工業大学研究論集第39巻第2号
Issue Date	2007-2
URI	http://hdl.handle.net/11478/848
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Author version

Fukuoka Institute of Technology

微分フィルタを利用した剛体の傾斜角計測システムの開発

高原健爾（電気工学科）

大山和宏（電気工学科）

橋本幸男（室蘭工業大学）

Development of a system to measure the tilt angle of a rigid body using the differential filter

Kenji Takahara (Department of Electrical Engineering)

Kazuhiro Ohyama (Department of Electrical Engineering)

Yukio Hashimoto, Non-member (Muroran Institute of Technology)

The purpose of the present study is to construct a system to measure the tilt angle of a robot. The measured object is a rotary joint type arm with a fulcrum, which can move in one direction. This system consists of a gyroscope sensor and two accelerometers. The gyroscope sensor measures the angular velocity of the arm and accelerometers measure the acceleration in the direction of the long axis of the arm and in its perpendicular direction, respectively. The angular acceleration is estimated as the differential value of the angular velocity by a special dynamic system. This system can calculate the angular acceleration accurately, because it is little influenced by noises. The tilt angle of the object is calculated from these values. The measurement system needs no structure, such as a sensing rod, in order to recognize the vertical axis, because the direction of gravity is used as the vertical axis. Furthermore, the proposed system is applicable to objects whose dynamic characteristics cannot be completely known. Our proposed system is confirmed to be useful for the measurement of the tilt angles of arms by numerical calculation.

Keywords : piezoelectricity gyro sensor, acceleration sensor, tilt angle, differential estimation, differential filter

1. はじめに

自立移動ロボットや2足歩行ロボットの制御実現のためには、ロボットの姿勢を直接計測できることが望ましい。多くの場合、ロボットは関節をリンクされた剛体により構成されているので、関節部にロータリエンコーダやポテンシオメータを組み込んでその傾きを計測するのが一般的である。しかしながら、これらを用いる場合には、基準軸が必要であり、その基準軸を検出するための工夫が必要となる。たとえば、ロータリエンコーダや

ポテンシオメータから常に路面に接地するような接触子を出し、路面との角度を検出する方法^{①,②}が用いられたりしているが、測定の際にはそれらの慣性などを考慮しなければならない。また、ロボット本体以外に構造物を取り付けることはあまり好ましいことではない。これに対して、上記のような外界センサを用いることなく、ロボットのダイナミクスと内界センサのみで絶対姿勢を推定する方法^③が提案されているが、この場合には制御対象の構造やパラメータに関する正確な情報が不可欠となる。

一方、これらロボットの姿勢制御のためではなく、身体運動の解析のためのセンサに関する研究が行われている⁴⁾。これらは、身体運動を関節でリンクされた剛体の運動とみなし、座位、立位などの身体の大まかな姿勢や行動を知ろうとするものである。それらの計測法の中には、ジャイロセンサや加速度センサあるいはその両方を用いた方法が提案されている。その思想は、測定対象をできるだけ拘束することなく、体節の角度変化や重力方向に対する傾斜角を測定しようとするものであり、基準軸を得るための構造物を必要としていない。しかしながら、その目的の性格上ロボットの制御に用いるには十分とはいえない。それらの中で、坂口ら⁶⁾は加速度センサとジャイロセンサを用いた計測法を提案し、ロボットの上腕、下腕の角度検出を行い、良好な結果を得ている。しかしながら、この方法では並進運動成分を考慮しておらず、やはり十分とはいえない。

そこで、本研究では支点をもって回転運動する、あるいは支点と共に並進しながら回転運動するような剛体の鉛直方向からの傾斜角度を計測するシステムを提案する。具体的には、加速度センサおよび圧電ジャイロセンサを用いて計測システムを構成し、得られた回転角速度から高精度の微分推定を用いて回転角加速度を求め、計算により傾斜角度を求める。

本システムの大きな特徴は、①重力加速度の向きを基準としており、基準を得るための特別な工作を必要としないこと、②測定対象の物理的な情報を必要としないことである。

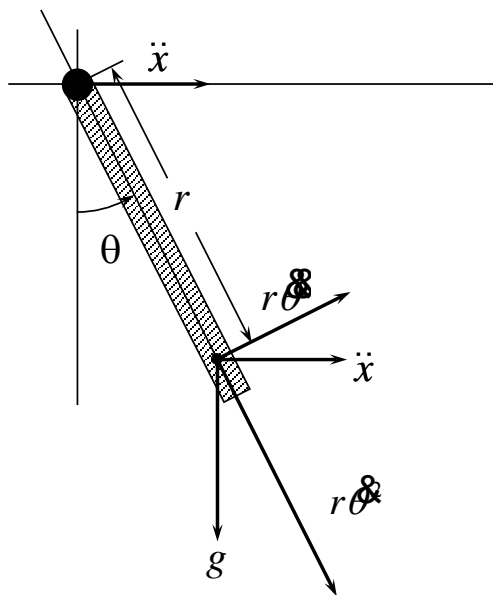


図1 計測対象

Fig.1 Measured object

本論文では、まず測定対象について述べ、次に計測システムについて説明する。さらに、提案するシステムの有効性を確認するために、数値実験を行う。

2. 準備

<2.1> 計測対象と準備 計測対象は図1に示すような回転ジョイント型アームとする。

このような支点をもって回転運動を行う剛体の場合、その傾きを無拘束で計測するには、最も単純な方法として圧電ジャイロセンサにより、回転角速度を検出し、それを積分する方法があげられる。しかしながら、この場合剛体の初期姿勢を何らかの方法で与えておかなければならないばかりでなく、積分処理により、圧電ジャイロセンサのドリフト成分が誤差として累積されてしまう。したがって、剛体の傾きを求めるためには圧電ジャイロセンサのみを用いるのでは不十分である。そこで、以下に示す加速度センサと圧電ジャイロを組み合わせた傾き計測法を提案する。

図1にはこのリンク機構が並進、回転運動する際の加速度を示してある。ここで、 g は重力加速度であり、支点の並進加速度 \ddot{x} は測定可能であるとする。これらの加速度をアームの支点から重心へ方向および回転方向をそれぞれ y_r , y_θ として傾斜角 θ を用いて表すと次式を得る。

$$y_r = r\ddot{\theta} + g \cos \theta + \ddot{x} \sin \theta \quad \dots\dots(1)$$

$$y_\theta = r\ddot{\theta} - g \sin \theta + \ddot{x} \cos \theta \quad \dots\dots(2)$$

したがって、アームの支点から重心へ方向および回転方向の加速度を加速度センサを用いて、回転角速度を圧電ジャイロセンサを用いてそれぞれ測定し、さらに回転角加速度を微分により求めれば、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\ddot{x} y_r - r \ddot{\theta}^2 - g (y_\theta - r \ddot{\theta})}{g (y_r - r \ddot{\theta}) + \ddot{x} y_\theta - r \ddot{\theta}^2} \right) \quad \dots\dots(3)$$

として、傾き θ が得られる。

ここで、特筆すべきことは、回転角加速度を回転角速度の微分によって得ようとすることである。これは、前述のように圧電ジャイロセンサの出力を積分することにより傾斜角を求めるのではドリフト成分の影響が蓄積されるのに対して、その信号を微分することによりドリフ

ト成分の影響を少なくしようとするものである。また、(3)式中圧電ジャイロセンサの出力 θ の二乗項が含まれているが、二乗されることにより、ドリフトの影響は小さくなると思われる。

ところで、回転角速度を微分して回転角加速度を得るとしたが、信号の完全な微分は不可能であり、特に信号に雑音が含まれる場合には、その雑音の影響が大きくなってしまふことがある。一方、この雑音の影響を小さく抑さえようとするれば、位相の遅れが大きくなってしまふ。そこで、本研究では朱らの提案する動的システムを用いた微分推定法⁶⁾を用いて、回転角加速度を求める。次節では微分推定法について述べる。

<2.2> 微分推定法 信号の微分値を推定するために以下のような動的システムを導入する。

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\dot{x}_2(t) = -UR^2 \text{sgn}(U(x_1(t) - y(t)) + |x_2(t)|x_2(t)/2R^2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 U および R は定数である。

この動的システムは一定信号 $y(t)$ の微分推定値を求めるためのシステムであり、 $x_1(t)$ は $y(t)$ に追従することが知られている (付録参照)。したがって、 $x_2(t)$ は $x_1(t)$ の微分値であり、すなわち $y(t)$ の微分推定値となる。

この動的システムにより、次の信号

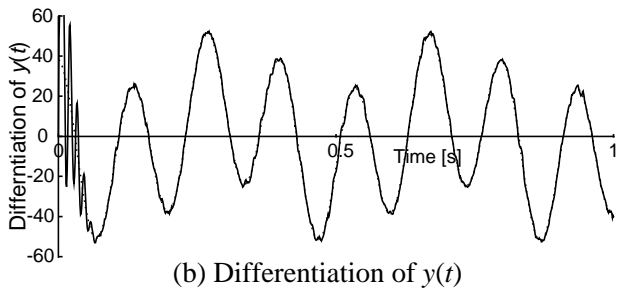
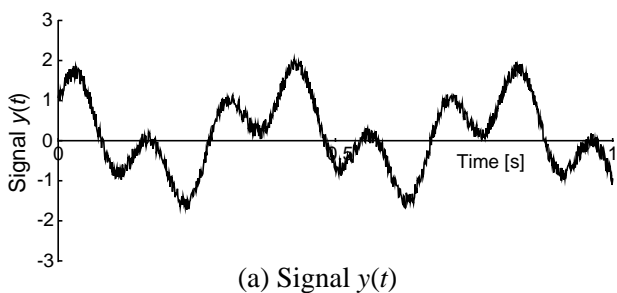


図 2 微分推定の結果

Fig.2 Results of the estimated differentiation

$$y(t) = \cos(5\pi t) + 0.8\sin(15\pi t) + 0.2\sin(\pi t) + d(t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

の微分推定を行った結果を図2に示す。ここで、 $d(t)$ は雑音であり、数値実験には ± 0.2 の間で一様に分布する乱数を用いた。また、動的システムの状態変数 $x_1(t)$ および $x_2(t)$ の初期値をそれぞれ0とし、 $U=1$ 、 $R=200$ とした。図中、(a)は信号 $y(t)$ を示しており、(b)の点線は雑音を加えないときの $y(t)$ の微分信号を、実線は(4)および(5)式で示される動的システムを用いて推定された微分信号を示している。図2より、信号に雑音が含まれているにもかかわらず、その影響をほとんど受けることなく、推定された微分値は約 $0.08[s]$ で真の微分値にほぼ収束していることがわかる。また、その値と真値との間には位相差がほとんどなく、高精度で微分推定可能であることを示している。

本節で述べた微分推定法を用いて、次節で述べる傾斜角計測システムを構築する。

<2.3> 計測システム 先に2.1節および2.2節で述べた内容に基づいて、傾斜角計測システムは図3のように構成される。

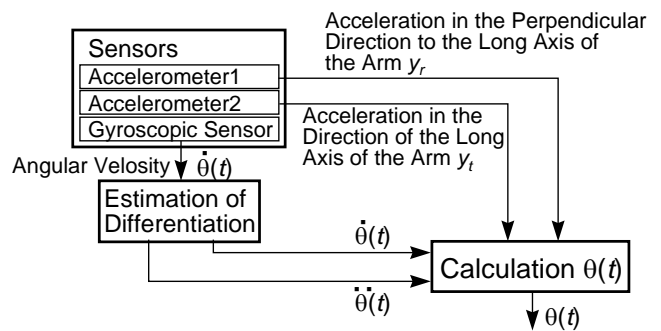


図 3 計測システムの構成

Fig.3 An outline of the measurement system

回転方向およびアーム支点から重心へ方向の加速度は加速度センサによって測定される。ここで、加速度センサにはアナログ・デバイス製 ADXL05AH (周波数特性: DC~1kHz, 検出範囲 $\pm 50G$) ⁷⁾ を、圧電ジャイロセンサには村田製作所製 ENC-05E (感度: $1.11mV/deg/s$, 感度温度変動: $\pm 20\%$ 以内) ⁸⁾ を用いるものとした。また、アームの回転角加速度は先に示した

微分推定のための動的システムをアナログ回路で構成したものを採用した。

本方法は、重力の方向を基準としており、一定の基準を得るための構造物を必要としない。また、傾斜角度を求めるために支点からセンサシステムを取り付ける位置までの距離のみを用いている。したがって、本方法では、測定対象に関する物理的な情報を必要とすることなく、傾斜角度を簡単に測定することができる。

3. 数値実験

提案した計測システムの有効性を確認するために、図4のような測定対象を仮定して、数値実験を行う。

この測定対象では、質量 $M[\text{kg}]$ の棒状振り子の支点が水平に張られたバネにつながれているとする。ただし、ばねは質量をもたず、またたわまないものとする。

平衡位置での支点を原点とし、水平方向に x 軸、鉛直下方向に y 軸をとる。支点から重心までの距離を $L[\text{m}]$ 、棒の重心に関する慣性モーメントを $I[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ 、バネ定数を $k[\text{N/m}]$ として、この測定対象の運動方程式を求めると、

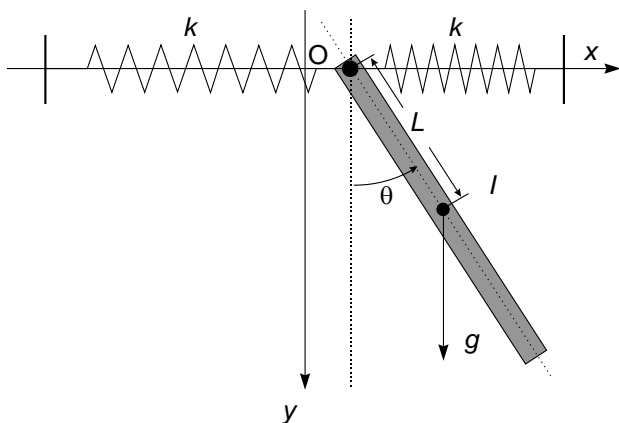


図4 数値実験の測定対象

Fig.4 Object of the simulation

表1 測定対象のパラメータ値

Table1 Parameters of the object

Mass of the arm	[kg]	2.0
Constant of the spring	[N/m]	10.0
Length of the arm	[m]	0.4
Length between the fulcrum and the gravity center of the arm	[m]	0.2
Length between the fulcrum and the sensors	[m]	0.2

$$M\ddot{x} + ML(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) + kx = 0 \quad \dots\dots(7)$$

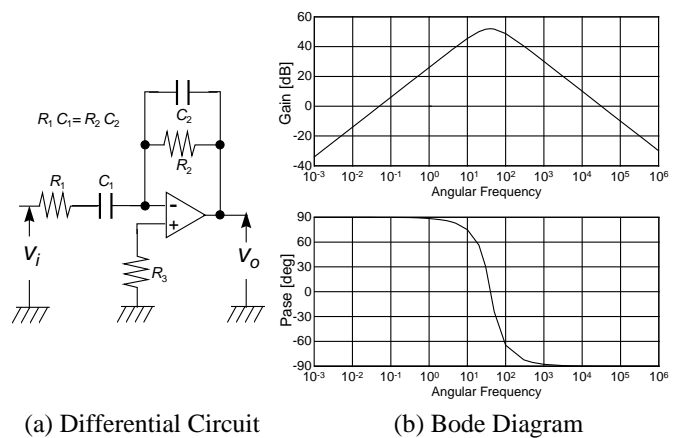
$$(I + ML^2)\ddot{\theta} + ML\dot{\theta}\cos\theta + MgL\sin\theta = 0 \quad \dots\dots(8)$$

を得る。棒上に支点から距離 $r[\text{m}]$ の位置に提案する計測システムを取り付けるものとして、傾斜角度を数値実験により求める。数値実験に用いる値は表1の通りである。

また、この際、圧電ジャイロセンサの出力に、 $20[\text{mV}]$ のドリフトおよび、 $\pm 10[\text{mV}]$ で一様に分布する雑音成分を加えるものとする。さらに、本方法の有効性を示すために、同様の条件で、(9)式で表される微分フィルタを用いて、傾斜角を求める。

$$G_D(s) = T_D s / (1 + \eta T_D s)^2 \quad \dots\dots(9)$$

このフィルタは図5(a)のように構成され、(b)は数値実験に用いる微分フィルタ(ここでは、 $T_D=100, \eta=0.025$ とした)のゲインおよび位相特性である。



(a) Differential Circuit

(b) Bode Diagram

図5 微分回路

Fig.5 Differential circuit

数値実験の結果を図6に示す。同図(a)は提案した計測システムを用いて、棒の傾きを測定した結果であり、(b)は図5の一般的な微分フィルタを用いて測定した結果である。図中点線は傾きの真値を示している。

図6より、提案した計測システムは棒の傾きをほぼ正確に測定できることがわかる。それは、一般的な微分フィルタを用いた場合に比べて、信号に含まれる雑音の影

響や、フィルタ回路による位相のずれがほとんどない良好な結果であると考えられる。

以上のことから、提案した計測システムの有効性を示すことができた。

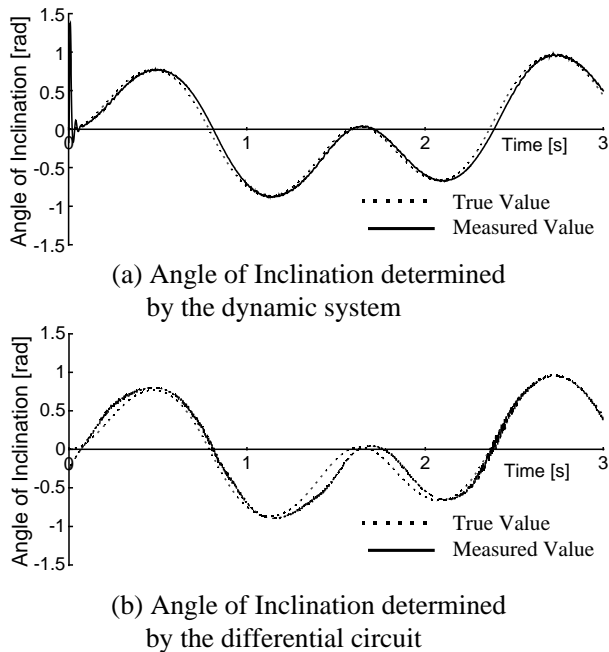


図 6 計測結果

Fig.6 Measurement results

4. おわりに

本研究では、加速度センサと圧電ジャイロセンサを用いた傾き計測システムを提案し、数値実験によりその有効性を確認した。提案したシステムは、重力加速度の方向を基準軸として積極的に利用しているので、一定の基準を得るための構造物を何ら必要としないシステムであった。そして、それは測定対象である剛体の物理的な情報を必要とせず、支点からセンサまでの距離の情報のみを用いて傾斜角を計測できるシステムであった。これは、圧電ジャイロセンサに加わる雑音にほとんど影響されることがない高精度の微分推定フィルタを用いたからであった。

提案したシステムは、測定対象に取り付けるだけで、姿勢角を検出することができるので、ロボットの姿勢角制御のみならず、人体の姿勢検出にも応用可能であると考えられる。

本論文では、支点の一方方向のみの並進を仮定したが、

平面上を自由に移動させる場合の傾斜角検出方法については現在検討中である。また、採用した微分フィルタを実用的なアナログ回路として実現することと、その回路の定量的な特性についても今後の課題である。

文 献

- (1) 平岡延章, 則次俊郎: “ステッピングモータ駆動平衡 2 輪車の閉ループ姿勢制御”, 日本機会学会論文集 (C 編), 591, 154-159 (1995).
- (2) 尾崎弘明, 古賀新: “車輪型倒立振子の設計と制御”, 福岡大学工学集報, 53, 7-10 (1994).
- (3) 松本治, 梶田秀司, 谷和男: “移動ロボットの内界センサのみによる姿勢検出とその制御”, 日本ロボット学会誌, 8, 5, 37-46 (1990).
- (4) 持丸正明: “身体の運動計測技術の動向”, 計測と制御, 36, 609-614 (1997).
- (5) 坂口貴司, 金森務, 片寄晴弘, 佐藤宏介, 井口征士: “加速度センサとジャイロセンサを用いた屈曲動作計測”, 計測自動制御学会論文集, 33, 455-460 (1997).
- (6) 朱星, 土谷武士: “微分推定法を用いたデジタル加速度制御”, 第 29 回 SICE 北海道支部学術講演会論文集, 53-54 (1997).
- (7) 松井邦彦: “電子部品図鑑 33 振動・加速度センサ”, トランジスタ技術 9 月号, CQ 出版社, 東京, 217-219 (1997).
- (8) 村田製作所: “角速度センサ ジャイロスター取扱説明書” (1997).
- (9) 平井一正, 池田雅夫: “非線形制御システムの解析”, オーム社, 東京, 49-52 (1986).