

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760291

研究課題名（和文） 光学エンコーダに基づくロバスト加速度制御の実現

研究課題名（英文） Realization of Robust Acceleration Control Based on Optical Encoder

研究代表者

辻 俊明 (TSUJI TOSHIAKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60434031

研究成果の概要：

光学エンコーダはモーション制御機器の位置を計測するセンサであるが、速度計測・加速度計測に応用した場合にノイズを発生することがモーション制御分野の極めて広範に亘る領域での課題となっている。そこで光学エンコーダの情報に基づく高精度加速度計測技術を確立し、加速度制御の性能を向上することを目的とし、研究を遂行した。同期計数法と呼ばれる高精度速度計測技術を開発し、加速度計測へと拡張した。本研究の成果は以下の3点に要約される。(1)同期計数法の実装による高精度加速度制御の実現と計測精度の定量的評価(2)エンコーダのスリット間隔誤差など理論上現れない技術的課題の解決(3)本技術を実装した多自由度ロボットによる高精度モーション制御の実現

まず、同期計数法の理論的検証を実施した後に一自由度のフライホイール制御系にこれを実装し、加速度制御の性能が従来のもよりも向上されることを確認した。また、加速度制御手法の拡張であるセンサレス力計測に本技術を応用し、力センサとの比較により、その計測性能を評価した(成果(1))。当初はエンコーダのスリット間隔の不均一性に起因して所望の性能が得られなかったが、スリット間隔の不均一性を無効化する手法を提案し、実装することによって理論に近い性能が得られることが確認された(成果(2))。3次元多自由度ロボットおよび自律移動台車に本技術を実装し、衝撃緩和動作をはじめとする高度な運動が実現されることを実験的に示した(成果(3))。また、本研究の副次的な効果として(a)光学エンコーダに基づく広帯域躍度計測が可能となること、および(b)マルチレートサンプリング制御との組み合わせにより更なる性能向上が図られること、が明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	360,000	3,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：加速度制御、モーション制御、センサレス制御、光学エンコーダ、加速度計測

## 1. 研究開始当初の背景

モーション制御系の様々な分野での実用化に伴い、その性能向上に対する要望が高まっている。そのためモーション制御系で最も汎用的に実装される光学エンコーダに基づく高精度計測技術が研究されている。しかし、

- ・全ての速度域で汎用的に利用可能な方式は存在しない
- ・加速度制御にこれを実装した場合にはノイズにより性能が劣化する

などの課題が残されていた。これらの課題を克服することにより、既存のセンサの構成を変えずに制御性能を向上することが可能となるが、極めて広範の分野に亘る課題でありながら多くの課題が残されているのが現状であった。

## 2. 研究の目的

本研究は光学エンコーダの情報に基づく高精度加速度計測技術を確立し、モーション制御系のロバスト性を向上することを目的とする。その理由は下記の通りである。

モーション制御系の性能向上には加速度制御が有効である。また、加速度制御は位置制御と力制御の混在する複合制御系の統一的な設計を可能とすることが知られている。そのため、今後加速度制御はモーション制御の基盤技術になると考えられる。しかしながら、多自由度化に伴う高コスト化やセンサ情報の統合についての問題が生じることから、加速度センサを用いず制御系を実装する必要がある。加速度センサを使用しない場合には光学エンコーダによって得られた位置情報を2階微分するため、微分演算によって増幅されたノイズが性能を劣化させる。そのため本研究では微分演算の高精度化によって加速度計測のノイズを低減する技術を開発し、加速度制御の制御帯域の拡大を試みた。

## 3. 研究の方法

本研究ではまず平成19年度に同期計数法と呼ばれる速度計測法を開発し、加速度計測への拡張および技術的課題の検証を行った。そして詳細に亘る検証結果に基づき高精度加速度制御の基礎原理を明らかにした。その内容に基づいて1自由度フライホイール制御系での評価実験を実施し、従来の技術と比較して本制御系が高い性能を有することを確認した。これと並行して次年度の研究の準備のため3次元6自由度マニピュレータを構築した。平成20年度には本マニピュレータを用いて高度モーション制御の実験を進め、実装評価を行った。

## 4. 研究成果

本研究の成果は以下の3点に要約される。

- ・高精度加速度制御の実現と計測精度の定量的評価
- ・エンコーダのスリット間隔誤差など理論上現れない技術的課題の解決
- ・本技術を実装した多自由度ロボットによる高精度モーション制御の実現

### (1) 高精度加速度制御の実現と計測精度の定量的評価

まず同期計数法の理論的検証を実施した。その内容を以下に述べる。

同期計数法は1つのサンプリング周期間に光学エンコーダが発生するパルス数の変動に同期して速度を計測する手法である。本手法は、計時法において速度分解能が高くなるメカニズムに着目している。計時法において速度計測が高精度になるのは、速度計測がパルスの発生するタイミングに同期して行われることに起因する。つまり、計時法は、パルスに同期して2つのパルス間の平均速度を計算する手法と言えらる。しかしながら、高速度域では1サンプリング周期に複数のパルスが発生するため、パルスに同期させることは不可能である。そこで、同期計数法ではパルス数の変動を検出し、それに同期して速度計測を行う。換言すれば、同期計数法はパルス数の変動に同期して2つのパルス変動間の平均速度を求める手法と考えることができる。

ここでパルス数が変化することをパルス変動(Pulse alteration)と呼ぶ。以下に同期計数法における速度計測の手順を示す。

- 1) それぞれのサンプル点においてその同期 $T_s$ 間に発生したパルス数 $m_e(i)$ を数える。
- 2)  $m_e(i)$ が変化しない場合には速度値 $\bar{\omega}(i)$ を更新しない。
- 3)  $m_e(i)$ が変化した場合に速度計測を行い、速度値 $\bar{\omega}(i)$ を更新する。

パルス変動発生時の速度値 $\bar{\omega}(i)$ は以下の式で導出される。

$$\bar{\omega}(i) = \frac{2\pi \sum_{j=0}^{m_s-1} m_e(i-j)}{P m_s T_s} \quad (1)$$

ここで $P$ は1回転でエンコーダが発するパルスの数を表わす。また、 $m_s$ は2つの連続したパルス変動間のサンプル数である。

同期計数法では、微分演算をパルス変動と同期することによって計時法と等しい速度

分解能を得る。同じ計測遅れで比較した場合、この速度分解能は計測値の平均化やローパスフィルタ(LPF)を用いた場合よりも高いものである。また、同期計数法では、高精度計測の速度域は低速度域に限定されず、全速度域において適用可能である。

同期計数法の計測時間  $T_m$  は(2)式の通りである。また、その時の速度分解能  $Q_v$  を(3)式に示す。

$$T_m = m_s T_s \quad (2)$$

$$Q_v = \frac{2\pi}{m_s(m_s - 1)PT_s} \quad (3)$$

計数法の計測値を  $n$  サンプル分平均化した場合の計測時間および速度分解能は(4),(5)式で表わされる。

$$T_m = nT_s \quad (4)$$

$$Q_v = \frac{2\pi}{nPT_s} \quad (5)$$

(3)式と(5)式を比較することにより、同期計数法が計数法と比較して高い速度分解能を持つことが確認できる。その反面、同期計数法は計測時間が変動し、パルス変動が生じないと計測時間が長くなるという問題を持つ。

$$\omega_a = \frac{2\pi}{PT_s} \quad (6)$$

上記の理論を一軸フライホイールの制御系に実装し、加速度制御の性能が従来のもよりも向上されることを確認した。制御系の構成は図1に示すとおりである。外乱オブザーバに基づく加速度制御系でPD制御を行う。図2に示されるように、最も汎用的に用いられる計数法(M method)と比較してノイズが低減されるために制御系のゲインをより高く設定することが可能となる。その結果加速度制御の帯域が向上されるという結果が得られた。

また、理論上の分解能を各速度計測法で比較したものを図3に示す。従来の高精度速度計測法は特に高速度域において精度が劣化するが、提案法は全ての速度域において高い分解能を有することが確認された。

次に本技術によるセンサレス計測の性能を評価し、加速度センサとの比較を行った。また、加速度制御手法の拡張であるセンサレス力計測に本技術を応用し、力センサとの比較により、その計測性能を評価した。

(2) エンコーダのスリット間隔誤差など理論上現れない技術的課題の解決

光学エンコーダの目盛り間隔は必ずしも均一ではなく、特に4倍で位置を検出した場合には目盛りの角度偏差が大きくなり、速度計測の精度が劣化する。同期計数法では目盛りの角度偏差に起因して不規則なパル

ス変動が正負交互に発生し、ノイズの原因となる。そのため当初は所望の性能が得られなかったが、スリット間隔の不均一性を無効化する手法を検証した結果、以下の手法により誤差が飛躍的に低減されることが確認された。

- 1) それぞれのサンプル点においてその周期間に発生したパルス数  $m_e(i)$  を数える。
- 2)  $m_e(i)$  が変化しない場合には速度値  $\bar{\omega}(i)$  を更新しない。
- 3)  $m_e(i)$  が変化した場合には速度計測を行い、速度値  $\bar{\omega}(i)$  を更新する。

- ・パルス変動の符号が前回のもとの一致した場合(1)式で速度を導出する
- ・パルス変動の符号が前回のもとの逆だった場合(7)式で速度を導出する

$$\bar{\omega}(i) = \frac{2\pi m_e(i-1)}{PT_s} \quad (7)$$

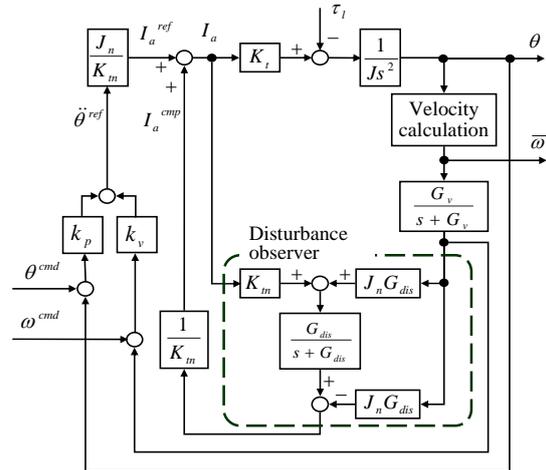


図1 加速度制御系の構成

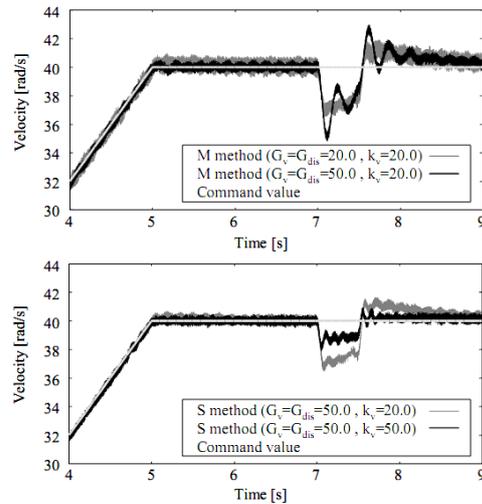


図2 計数法(上)と提案法(下)の性能比較

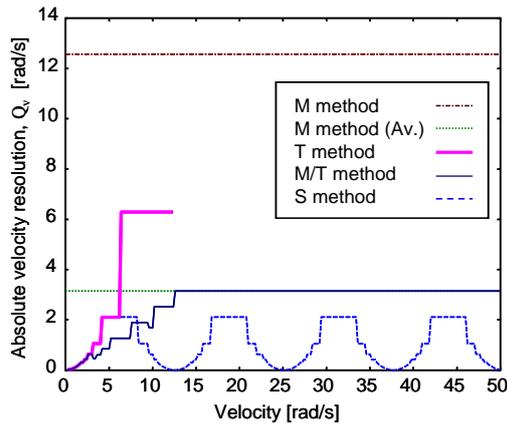


図3 従来法との分解能の比較

上記の手法は性能の向上をもたらす反面、条件分岐によりアルゴリズムが複雑になると言う問題があった。そこで上記の手法と等価の効果を持つ(8)式を(1)式の代わりに用いることでスリット間隔の不均一性に起因する課題が解決されることが明らかになった。

$$\bar{\omega}(i) = \frac{2\pi \left( \frac{1}{2} m_e(i - m_s) + \sum_{j=1}^{m_s-1} m_e(i - j) + \frac{1}{2} m_e(i) \right)}{P m_s T_s} \quad (8)$$

以上の理論を実験機に実装したところ、図4のように理論に近い速度計測性能が得られることが確認された。ここで図4(a)は(1)式を用いた際の同期計数法(S method)の応答と計数法(M method)の応答を比較したものである。高精度計測手法である同期計数法の応答がスリット間隔の不均一性により乱れている。それに対して(8)式を用いた図4(b)の結果では量子化誤差の影響が低減されて滑らかに速度応答値が変化している様子が示されている。

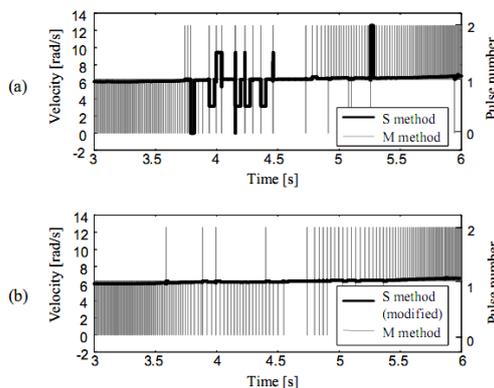


図4 エンコーダのスリット誤差による影響(上)とその補償法を実装した結果(下)

(3) 本技術を実装した多自由度ロボットによる高精度モーション制御の実現

図5に示されるような3次元多自由度ロボットを構築し、本ロボットおよび自律移動台車に本技術を実装し、高度な運動が実現されることを実験的に示した。具体的には衝突力緩和のような高速かつ精度の高い応答を必要とする動作において本技術の有効性が高いことが確認された。

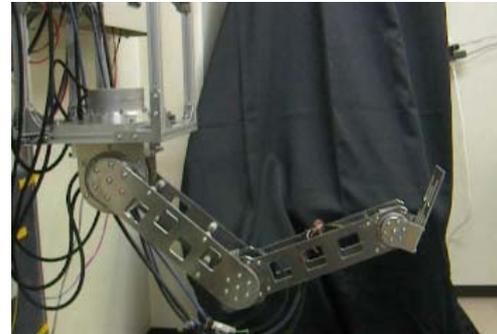


図5 多自由度ロボット

(4) その他

以上の研究成果を纏めたものが IEEE Trans. on Industrial Electronics に2009年2月に原著論文として掲載されている。

また、本研究の副次的な効果として(a)光学エンコーダに基づく広帯域躍度計測が可能となること、および(b)マルチレートサンプリング制御との組み合わせにより更なる性能向上が図られること、が明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① T. Tsuji, T. Hashimoto, H. Kobayashi, M. Mizuochi, K. Ohnishi: A Wide-range Velocity Measurement Method for Motion Control, IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol. 56, No. 2, pp. 510-519, 2009. 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 辻 俊明, 羽生 良輔, 金子 裕良, 阿部 茂: “制御器のコンポネンタ化理論に基づく例外処理の実装,” ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1A1-G18, 2008年6月6日. 査読なし
- ② 羽生 良輔, 辻 俊明, 金子 裕良, 阿部 茂: “ロボットアームの未知オブジェクトに対する衝突緩和制御,” ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 2A1-A23, 2008年6月7日. 査読なし

[その他]

- ① 辻 俊明 他, ファナック FA ロボット財団論文賞, ファナック FA ロボット財団 2008年3月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 俊明 (TSUJI TOSHIAKI)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：60434031

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし