

同期計数法に基づくロバストモーション制御系の構築

プロジェクト代表者: 辻 俊明(理工学研究科・助教)

1 序論

1.1 本研究の目的

ロボットをはじめとするモーション制御系が様々な分野で実用化されるのに伴い、安価かつ高性能な制御系への要望が高まっている。モーション制御系で最も汎用的に利用される光学エンコーダの速度計測ノイズはしばしば制御性能を制限する原因となるため、これを低減する手法が古くから研究されている。筆者らが提案している同期計数法という手法は、高精度計測を全速度域で実現する唯一の計測法であるが、その演算アルゴリズムが複雑となるために演算量が多いことが課題とされていた。そこで本研究では同期計数法のアルゴリズムを簡易化し、高度なロバスト性を有するモーション制御が容易に構築可能となることを示す。

1.2 研究の進め方

まず同期計数法のアルゴリズムについて検証を行い、その簡易化を試みた。そして簡易化により演算量が極めて小さくなる方式を開発した。第2節においてそのアルゴリズムを示す。次にその方式を図1に示した実際のモーション制御系に実装することにより、本アルゴリズムの性能を実証し、高度なロバスト性が獲得されることを確認した。その結果を第3節に示す。

2 簡易化された同期計数法のアルゴリズム

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、高精度計測法として古くから知られる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、 i 番目のサンプリング周期内に発生するパルス数 $m_e(i)$ を数え、そのパターンに着目する。具体的には図2に示すように、パルス数 $m_e(i)$ の変動を検出する。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。そしてこ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。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周期 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のと一致した場合(1)式で速度を導出する

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

- ・ パルス変動の符号が前回のものと逆だった場合(2)式で速度を導出する

$$\bar{\omega}(i) = 2\pi m_e(i-1) / Pm_s T_s \quad (2)$$

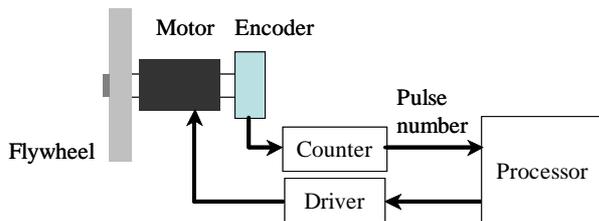


Fig. 1 Setup of experimental system

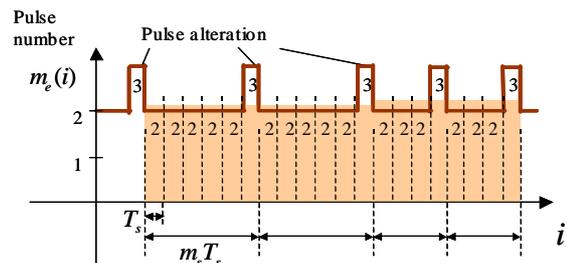


Fig. 2 Typical patterns of pulse number

ここで P はエンコーダが一回転したときに発生するパルス数であり、 m_s は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。しかしながら、条件分岐を含む複雑なアルゴリズムであり、また m_s 個の総和を求めため演算処理数が増えてしまう。そこで等価の性能を持つ、より簡易な下記のアルゴリズムを開発した。

- 1) それぞれのサンプル点においてその周期 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) $m_e(i)$ が変化した場合には速度計測を行い、(3)式により速度値 $\bar{\omega}(i)$ を更新する。

$$\bar{\omega}(i) = \frac{m_e(i - m_s - 1) + m_e(i - m_s) + m_e(i - 1) + m_e(i)}{Pm_s T_s} \quad (3)$$

3 実験による検証

実機の制御系に提案法を実装し、その制御性能を評価した。実機の機構パラメータを表1に示す。単純なPD制御系に \sin 波形の速度指令値を与え、その速度指令値を積分した値を位置指令値として与えた。ここで k_m はトルク定数、 J_n はホイールの慣性モーメントを表わす。速度指令値を $\omega^{cmd} = 20(1 - \cos t)$ 、位置指令値を $\theta^{cmd} = 20(t - \sin t)$ とした。フィードバックの速度値を計数法(M method)で計測した場合と提案法(S method)で計測した場合のそれぞれの結果を図3に示す。この時の制御ゲインは $k_p = 400, k_v = 40$ とした。

次に指令値への追従特性を比較するため、微分ゲイン k_v を60から180まで変化させ、速度偏差を評価した。その時の比例ゲイン k_p およびLPFのカットオフ周波数 G_v は一定とした。速度偏差の平均二乗誤差(RMS)値を図4に示す。高精度計測法で最も知られているM/T法と提案法を比較した。それぞれの制御系で得られる速度値を公平に比較するため、評価に用いる速度値は両方とも計数法で導出している。 k_v が低い時には指令への追従遅れによって速度偏差が大きくなった。M/T法を用いた制御系では k_v が140を越えると偏差が増大した。これは高ゲイン化に伴う振動の励起が制御性能を劣化させているためだと考えられる。一方、提案法では高ゲイン化した時の偏差の増加が小さかった。提案法では速度計測のノイズが小さいために振動の励起が抑えられたと考えられる。偏差はM/T法のものよりも小さく、制御性能が向上されることが確認された。

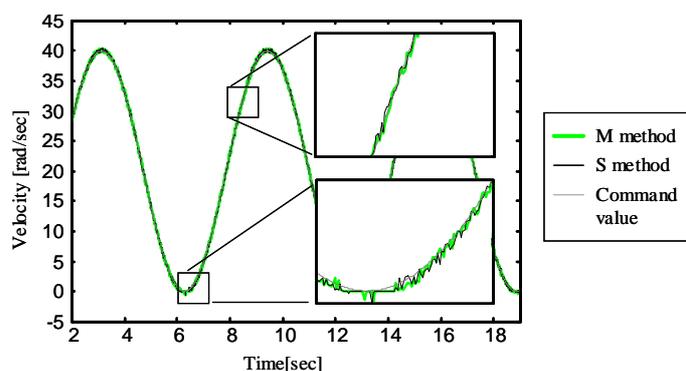


Fig. 3 Velocity response in experiment

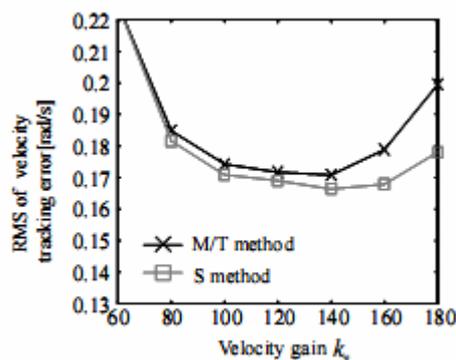


Fig. 4 Velocity tracking error in experiment

Table 1 Experimental parameters

Sampling period	[ms]	1.0
Flywheel MOI	[kgm ²]	0.002
Type of Motor		Maxon RE40
Stall torque	[mNm]	2500
Torque constant	[mNm/A]	60.3
Type of optical encoder		Maxon HEDS5540
Resolution (quadruple)	[PPR]	2000