

1. はじめに

近年、パルスモータやパルス列入力型サーボモータ用の高性能なパルスジェネレータIC（以下PG）が開発され、制御回路の構成が容易になりかつ複雑な動作のプログラムも比較的簡単に実現できるようになった。しかし、発生できるパルス列は、三角動作や繰り返し動作など定型的な動作パターンに限られており、位置や速度の自由軌跡を追従するために必要な任意のパルス列を発生することはできない。そこで、任意に変化する位置や速度を微小時間 dt 毎の数値として入力し、 dt 内に必要なパルス数を高精度な発振周波数で発生することを dt 毎に繰り返しながら要求される自由軌跡を正確な時間で追従できる制御部を開発した。この方式の制御部を持ったパルスモータをパーソナルコンピュータのネットワーク構成で開発した連続系リアルタイムシミュレータ¹⁾の外部操作部として用い良好な結果を得ることができたので報告する。

2. 連続系リアルタイムシミュレータの概要

疎結合方式の並列処理用プロセッサであるパーソナルコンピュータを用いて開発した連続系リアルタイムシミュレータは、図1に示すように、シミュレータ本体（ルート）、ADコンバータ部、DAコンバータ部、パルスモータ部から構成され、各部にはパーソナルコンピュータが搭載されており各部の通信と制御を担っている。システム全体の同期は、各部間を接続しているシリアルリンクを介したメッセージパッシングにより取られている。シミュレーションは刻み巾 dt 毎の繰り返し計算により進行し、ADコンバータなど外部入出力部が用いられた場合は、それぞれの dt 毎の数値データが装置番号と共にリンクを介して入出力される。

パルスモータ制御部²⁾（図2）は、パーソナルコンピュータ（T805、32bit、30MHz）およびこれとバス接続されているPG（日本パルスモータ、PCL-3AM、MAX3MHz）から構成されている。パーソナルコンピュータは、シリアルリンクから装置番号と共に送られてくる位置や速度の数値データが自分のデータであれば取り込み、そうでなければ次のパルスモータ制御部へ転送する。そして、取り込んだデータからパルス数や発振周波数などを計算し、PGの各種レジスタの値をバス経由で設定する。

3. 連分数展開によるパルス発生

PGで発生するパルス列は、パルス数を設定するレ

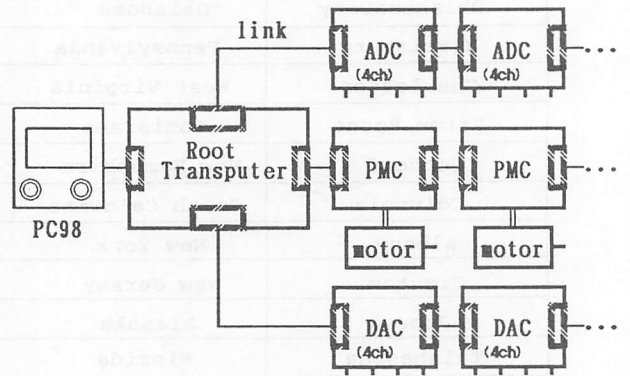


図1 連続系リアルタイムシミュレータ

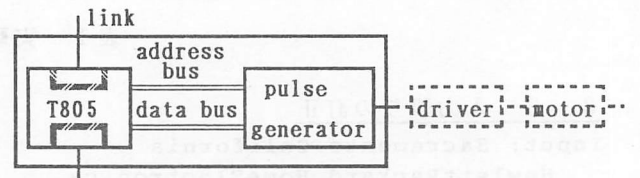


図2 パルスモータ制御部

ジスタ（S）および発振周波数を設定する2個のレジスタ（Q、R）により制御される。発振周波数（ f_{OUT} ）は内部基準クロック（ f_{SYS} ）を基に（1）式で決まり、一般に各レジスタの値は以下のように決定される。

$$f_{OUT} = (Q/R) \cdot f_{SYS} \quad (1)$$

必要とする最高発振周波数 f_{OUTMAX} とレジスタ長で決まるQの最大値 Q_{MAX} からRの値が決められる。

$$R = (Q_{MAX} / f_{OUTMAX}) \cdot f_{SYS} \quad (2)$$

この値をRレジスタにセットし、Qの値を変えることにより（1）式に従って発振周波数を Q_{MAX} 段階に設定できる。したがって図3のようにシリアルリンク経由で送られてきた dt 毎の例えば位置データ p_n から dt 時間に必要なパルス数 M_n と周波数 f_n は、

$$M_n = [p_n] - [p_{n-1}] \quad ([] : \text{小数切り捨て})$$

$$f_n = M_n / dt$$

として求めることができるので、周波数 f_n を発生するQの値を（1）式より求めレジスタQに、パルス数 M_n をレジスタSにそれぞれセットし、 dt 時間パルスモータを駆動できる。そして、この動作を隙間なく繰り返すことにより自由軌跡に追従させることが考えられる。

しかし、このような一般的な方法によってパルス数

M_n を発生する時間(生成 $d t$ 時間)は、発振周波数すなわちその時の Q の値に依存し、その精度は $1/Q$ ($1 \leq Q \leq Q_{MAX}$) 程度である。従って、位置データが正確に $d t$ 毎に送られて来る場合、生成 $d t$ 時間との差が大きいためパルスモータが滑らかに追従できず脱調の原因になる。逆に生成 $d t$ 時間毎にシステム全体の同期を取ると、総時間(例えばシミュレーション時間など)のリアルタイム性が損なわれる。

そこで高精度な発振周波数を実現するため、発振周波数を決定する R と Q の値を求める過程に連分数展開を適用する。すなわち(1)式から

$$f_{OUT}(\text{実数})/f_{SYS}(\text{実数}) = Q(\text{整数})/R(\text{整数}) \quad (3)$$

を得るので、高精度の発振周波数を実現する問題は、任意の f_{OUT} に対して(3)式を満たす R と Q の最適な整数値の組み合わせを求める問題に帰着できる。

任意の実数 $x (= f_{OUT}/f_{SYS})$ を次式のように分子が1である連分数³⁾に展開し、 a_n で打ち切った連分数を整理して q_n/r_n とすると、これが最良近似分数(r_n 以下の分母で q_n/r_n より x を精度良く近似する分数は存在しない)であることが知られている。

$$x = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \dots}}} \approx q_n/r_n$$

しかも、 q_n および r_n は展開された分数を毎回逆に計算することなく、次の漸化式により効率良く求めることができる。

$$\begin{aligned} q_{n+1} &= q_n \cdot a_{n+1} + q_{n-1} & \text{但し、} q_0 &= a_0, r_0 = 1 \\ r_{n+1} &= r_n \cdot a_{n+1} + r_{n-1} & q_{-1} &= 1, r_{-1} = 0 \end{aligned}$$

そして、 q_{n+1} および r_{n+1} の何れかがそれぞれのレジスタ Q 、 R の最大値 Q_{MAX} 、 R_{MAX} を越えるまで展開し、その1回前の値 q_n 、 r_n をレジスタ Q 、 R の値とする。この Q 、 R の値は、レジスタ Q 、 R が保持できるすべての最良近似分数の中で最も良く実数 x (すなわち、 f_{OUT}) を近似する値である。この連分数展開によるレジスタ値を $d t$ 毎に設定することにより常に高精度な周波数のパルスが発生でき、精度の良い $d t$ 時間が確保できる。その結果、図3のような自由軌跡にパルスモータをなめらかに追従させることができる。

4. 実験結果

実験に用いたPGのレジスタ長は、 R および Q が14(bit)、 S が24(bit)である。また $d t$ 毎の位置や速度として受け取るデータは32bit浮動小数点型である。各 $d t$ (1msから500msまで1ms毎) に対して $d t$ 内に発生

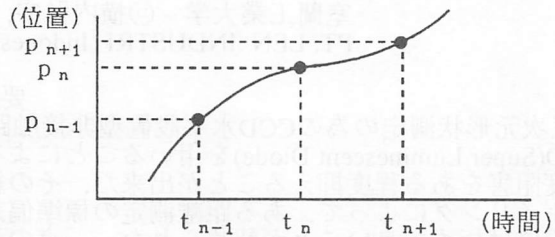


図3 自由軌跡の位置データ

$d t$ (ms)	パルス (個)	$f_{SYS} = 150.000916$		
		f_{OUT}/f_{SYS} Q/R	Q R	ループ(回) 処理時間(μs)
3	103	228.887482	16251	5
		228.887329	71	51
103	1823	117.992805	118	2
		118.0	1	19
464	43	0.61781234	6597	18
		0.61781234	10678	172

表1 連分数展開の精度と処理時間

するパルス数を1個から1パルス毎増加させ最高50KHzまでの領域における各連分数展開に必要なループ回数や R 、 Q の値などを確認した。表1にその一部を示すようにループ回数は高々20回程度であり、その処理時間は200 μs 以下であった。この時間は一般的な利用から想定される $d t$ が数ms以上であるので十分短いと言える。また、得られた Q/R の全領域の平均相対誤差および最大相対誤差は、 1.83×10^{-6} および 6.09×10^{-5} であった。従来方法(各々 1.53×10^{-4} 、0.53)と比較し平均で2桁の精度の向上が得られ、かつ全領域において精度が大きく変動しないことを確認できた。

5. おわりに

パルスモータを用いたオープンループ制御で滑らかな追従制御を実現することができた。一般に広く利用されている偏差カウンタとサーボモータを用いた方式と比較してシステム構成が簡単であり、かつ不確定な整定時間やオーバーシュートなどがなく計算値通りの動作が可能である。また $d t$ の値が実行中変化する場合は、位置や速度のデータと共にその都度の $d t$ の値をこのモータ制御部に送ることにより可変ステップ方式で駆動することができる。これは、シミュレータ本体において可変ステップ方式の積分アルゴリズムを採用した場合のリアルタイムシミュレーションにおいて特に有用である。

<参考文献>

- 1) 中原博史: トランスペュータによる連続系シミュレータのための並列アルゴリズム、SICE北海道支部シンポジウム(1992)
- 2) 中原博史: トランスペュータを用いた汎用多軸モーションコントローラ、1992年精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集
- 3) 遠山啓: 初等整数論、日本評論社(1972)