

# ワンチップマイコンを用いた小型制御機器の開発

## *Development of Miniature Control System Using One-Chip Microcomputer*

北川 貴弘\* 谷口 正志\*  
Takahiro Kitagawa Masashi Taniguchi

(2003年7月15日 受理)

Though automation of instruments is advancing in many fields, conventional control systems do not meet size and the function requirements. Therefore new control systems are required. It is increasingly clear that complicated calculations are necessary for control methods. In such circumstances, a one-chip type microcomputer can serve that purpose.

This study presents a miniature control system using a one-chip microcomputer. The authors examine the control method that uses the output value of the controller as a feedback factor to the controller to add to the PID control.

For the miniature control system, experimental results with a device that makes use of the one-chip microcomputer confirmed that this one-chip microcomputer is sufficient for practical use.

Regarding investigation of the control method, the authors obtained a sufficient result through simulation, but the authors did not obtain a sufficient result through experimentation because of problems with the experimental device.

キーワード：ワンチップマイコン，PIC，PID制御，倒立振り，自走式台車

### 1. はじめに

機器の自動化は、新しい機器の開発と既存の機器のシステム化を組み合わせた形で進められているが、産業分野によっては大きさや機能の点から既存の制御器では対応が困難な場合があり、新しい制御器の開発が求められている。また制御内容についても、従来よりも細かな制御を求められているため、単なるON/OFF制御ではなく、複雑な計算を必要とするものが増えてきている。

一方で近年、民生機器にも汎用的なワンチップタイプのマイクロコンピュータが使われている。これらは専用のICほどの高機能性・高速性は有していないが、比較的小規模な回路の置き換えができる、プログラミングにより処理を容易に変更できる、といった機能を有しているだけでなく、低消費電力であるため乾電池で駆動できる、豊富なバリエーションがあるため目的

に合わせた選択ができる、低コストで制御器が構成できる、という利点を有しているため、今後も広い分野で使用されると考えられる。

そこで今回、複雑な計算を必要とするプロセス制御用の制御器を、ワンチップマイコンを用いて開発したので報告する。

制御内容は、台車の上に棒(振り)を逆さまに立て、棒が押されて傾いた場合に台車を動かして棒が倒れないように制御する、倒立振子の外乱抑制を選択した。

また制御対象には、小型で乾電池駆動が可能であるというワンチップマイコンの特長を生かすため、自走式の台車(電動式のラジオコントロールカー)の上に振子を設けたものを使用した。

### 2. 倒立振子のモデリング

制御器を設計するため、倒立振子のモデリングを行う。ただしモデリングに際しては、制御対象として電動ラジオコンカーを想定しているため、使用するモータ

\* システム技術部 制御システムグループ

の動特性も考慮に入れる。

図1に示すように、台車の位置を  $x$ 、振子の角度を  $\theta$  とする。台車の質量は  $M$  とし、振子は密度が一般的な棒状で長さを  $2l$ 、質量を  $m$  とする。台車と路面の摩擦係数を  $c_x$ 、台車と振子の摩擦係数  $c_\theta$  を、重力加速度を  $g$  とし、台車に掛かる外力を  $f$  とする。

以上の条件において、システムの運動エネルギー  $T$  及びポテンシャルエネルギー  $U$ 、Rayleighの散逸関数  $D$  はそれぞれ以下のように求められる。

$$T = \frac{2}{3}ml^2\dot{\theta}^2 + ml\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 \quad (1)$$

$$U = mgl\cos\theta \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2}(c_x\dot{x}^2 + c_\theta\dot{\theta}^2) \quad (3)$$

Lagrange 関数  $L = T - U$  を求め、Lagrange の方程式を計算することにより以下の式が求まる。

$$\frac{4}{3}ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x}\cos\theta - ml\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta - mgl\sin\theta + c_\theta\dot{\theta} = 0 \quad (4)$$

$$ml\ddot{\theta}\cos\theta + (M+m)\ddot{x} - ml\dot{\theta}^2\sin\theta + c_x\dot{x} = f \quad (5)$$

式(4)(5)を、 $x = \theta = 0$  のまわりで線形化すると、以下の式が求まる。

$$\frac{4}{3}ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x} - mgl\theta + c_\theta\dot{\theta} = 0 \quad (6)$$

$$ml\ddot{\theta} + (M+m)\ddot{x} + c_x\dot{x} = f \quad (7)$$

また今回使用するモータの動特性を一次遅れ系とし、その時定数を  $t_a$  とすると、以下の式で表せる。

$$t_a\dot{f} + f = u \quad (8)$$

ここで  $u$  はモータに対する制御量である。

以上のように求めた式(6)~(8)が、モータの動特性を含めた制御対象を表すモデルである。以降、これらの式を用いて制御器の設計及びシミュレーションを行った。

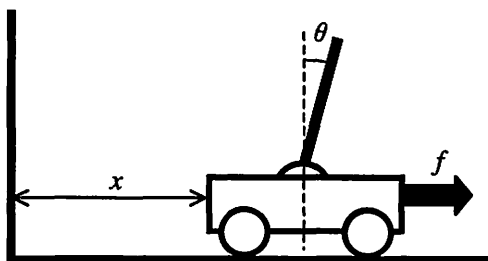


図1 倒立振子モデル  
Model of Inverted Pendulum

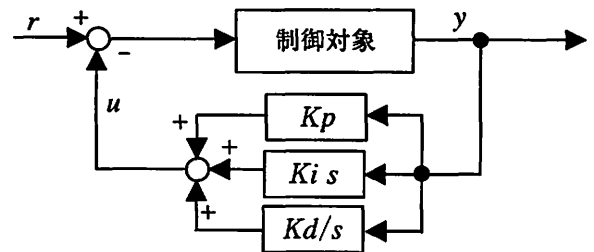
### 3. 制御器の設計

#### (1) 制御器の設計とシミュレーション

今回の制御対象は、振子の角度は測定しているが台車の位置は測定していないので、制御に使用できる状態量は振子の角度のみである。

そこで、振子の角度のみを用いてPID制御による制御器を設計した。なお、制御器の設計方法についてはZiegler-Nichols法の限界感度法やステップ応答法、CHR法など多くの手法がある<sup>1)</sup>が、これらについては参考となる文献が多くあることから詳細については割愛し、ブロック線図のみを図2に示す。

このようにして設計した制御器を用いて、振子の先端に外乱を与えた場合のシミュレーションを行った。



$K_p$  比例ゲイン                       $y$  振子の角度  
 $K_i$  積分ゲイン                       $u$  モータへの出力  
 $K_d$  微分ゲイン                       $r$  目標値  
 $s$  ラプラス演算子

図2 ブロック線図  
Block Diagram

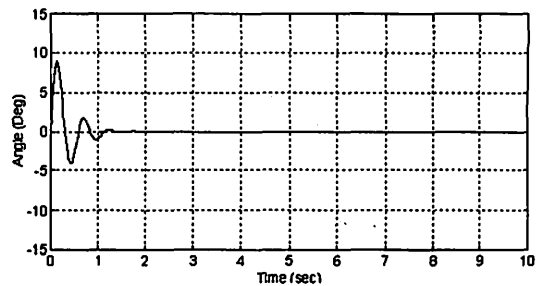


図3 シミュレーション結果 (振子の角度)  
Result of Simulation (Angle of Pendulum)

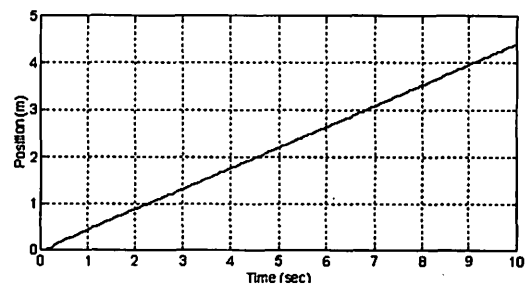


図4 シミュレーション結果 (台車の位置)  
Result of Simulation (Position of Car)

その結果、図3に示すように振子の角度は収束しているが、台車の位置は図4に示すように変化し続けている。これは台車の位置を測定していないため、台車の位置については制御の対象とせず制御器を設計したためである。

このように、振子の角度を測定しただけでは台車位置を制御することが出来ないため、台車の位置を推測し、原点へ戻す制御を行う方法を検討する。

(2) 改良型制御器の設計

台車の位置を制御するため、台車に加えた力をフィードバック制御の要素として利用する制御方法について考える。

最初に前節と同様、振子の角度の目標値を0としてPID制御による制御器を設計する。その上で(A)制御量の目標値を0とする、(B)制御量を1回時間で積分した値の目標値を0とする、(C)制御量を2回時間で積分した値の目標値を0とする、という3つのフィードバック要素を付け加える。

(A)の制御量を0にすることは、台車に力が加わらない、すなわち加速度を0とすることである。台車の加速度を0とすると、台車の速度は一定のまま変化しなくなる。

(B)の制御量を1回時間で積分した値を0にすることは、台車に与えた加速度の積分値、すなわち速度を0とすることである。台車の速度を0とすると、台車の位置は変化しなくなる。

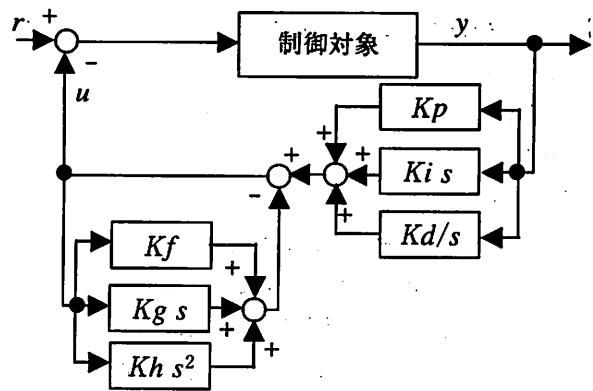
(C)の制御量を2回時間で積分した値を0にすることは、台車に与えた加速度を2回時間で積分した値、すなわち位置を0とすることである。台車の位置を0とすると、台車の位置が原点に戻ってきたことになる。

以上のことから、先の条件(A)~(C)のようなフィードバック要素を付け加えることにより、台車の位置を原点に戻すことが可能であることが分かる。このようにした場合のブロック線図を図5に示す。

(3) 改良型制御器のシミュレーションと考察

(2)節で述べた改良型制御器を用いて、(1)節と同様に振子の先端に外乱を与えた場合のシミュレーションを行った。その結果、図6に示すように振子の角度については収束までの時間が長くなっているが、目標通りの結果が得られている。また台車の位置についても、図7に示すように長い時間を要しているが、振動的に動きながら目標である0に戻ってきている。

以上の結果より、振子の角度および台車の位置ともに期待通りの結果が得られ、今回検討した制御手法の有効性を確認することが出来た。



$K_f$  制御量の比例ゲイン  
 $K_g$  制御量の1回積分ゲイン  
 $K_h$  制御量の2回積分ゲイン  
 $s$  ラプラス演算子

図5 ブロック線図  
Block Diagram

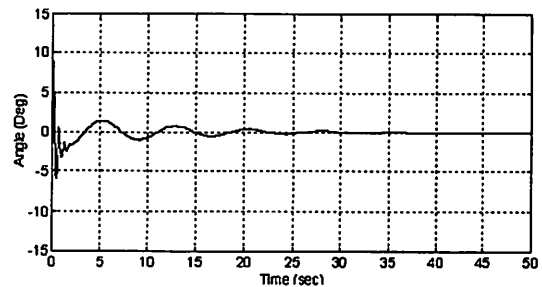


図6 シミュレーション結果(振子の角度)  
Result of Simulation (Angle of Pendulum)

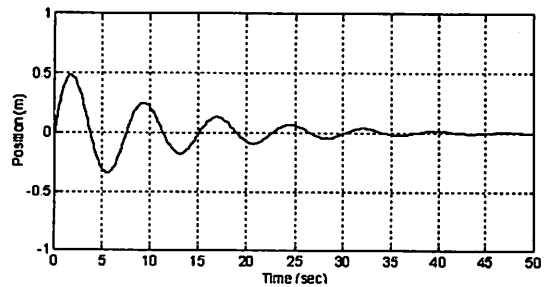


図7 シミュレーション結果(台車の位置)  
Result of Simulation (Position of Car)

4. 実験装置

前章で設計した制御器を用い、ワンチップマイコンで制御が出来るかを確認するため、実際に装置を製作して実験を行った。

(1) 実験装置

実験装置を製作するにあたり、各構成部品の選定を以下の要領で行った。

(A) ワンチップマイコン

ワンチップマイコンは、多くの種類があるため目的に合わせた適切な選択が行える、また開発環境(ソフ

トウェアや書き込み用のROMライターなど)を含めても低コストで開発が出来るなど、様々な利点を持っている米Microchip Technology社の製品の中から、下記の機能を有しているものを選定した。

#### (a) タイマ機能

モータへの出力値は、出力信号の長さにより決定されるため、出力信号の長さを測るタイマが必要である。また制御を一定間隔で行うための時間を測るタイマも必要である。従って、2つのタイマ機能が必要である。

#### (b) 外部信号割り込み機能

ロータリーエンコーダの値をカウントするためには、エンコーダからの2つの信号(A相・B相)を読み取る必要があるが、この信号については常時監視する必要がないので割り込み処理とする。従って、2つの外部信号割り込み機能が必要である。

#### (c) 演算能力

ロータリーエンコーダのカウント能力やモータへの出力間隔、制御用プログラムの構成などから、十分な制御特性を得るためには10msecの間に4000~5000ステップの計算が必要である。そのため、多少の余裕をみると4MHz以上の動作クロックが必要である。

#### (d) プログラム領域およびデータ領域

前章で設計した制御器に基づく制御用プログラムを作成したところ、全部で1500wordsを超える量となった。従って、プログラムを全て格納するためには1500words以上のプログラム領域を有している必要がある。

また作成した制御用プログラムには、82個のデータ領域が必要となった。従って、82bytes以上のデータ領域を有している必要がある。

#### (e) 入出力ポート数

入力ポートとして、ロータリーエンコーダ用2個と動作開始ボタン用1個、リセットボタン用1個の4個が必要である。また出力ポートとして、モータへの出力用1個と、現在の動作状態やエラー内容の表示用4個の合計5個が必要である。

以上の5項目にコストを加えて、入手が容易な機種について比較を行った結果を表1に示す。機能面で全てを満たしているのは16F628と16F873の2機種であり、そのなかでコスト面で有利な16F628を最終的に選定した。

#### (B) 台車

台車は、小型・軽量であることと、低消費電力のため乾電池での駆動が可能であるというワンチップマイコンの特長を生かすため、自走式の台車(電動ラジコンカー)を選定した。

#### (C) モータ

モータについては(B)で選定した電動ラジコンカーの車台に搭載できる模型用のモータを選定した。

#### (D) モータアンブ

今回の制御では台車を前進・後退の両方向へ移動させる必要があるため、正逆転機能を持つモータアンブを選定した。

#### (E) ロータリーエンコーダ

シミュレーションの結果より、360パルス/回転以上の分解能があれば制御が可能との結果が得られたため、360パルス/回転の小型エンコーダを選定した。

表1 ワンチップマイコン(PIC)性能比較  
Comparison of Performance

	12F675	16F628	16F84A	16F873
(a)	○	○	×	○
(b)	○	○	○	○
(c)	○	○	○	○
(d)	×	○	×	○
(e)	×	○	○	○
コスト	低	中	中	高

表2 実験装置構成  
Construction of Experimental Device

名称	仕様・型番等
ワンチップマイコン	Microchip Technology PIC 16F628 動作クロック 20MHz プログラム領域 2048words データ領域 224bytes
台車	株式会社 タミヤ Alfa Romeo156 RACING 1/10th SCALE 寸法 460 × 185 mm 重量 1.7kg (モータ・バッテリー等含む)
モータ	マブチモーター株式会社 RS-540SH 限界電圧 12V 適正電圧 7.2V 適正負荷 0.02N・m 適正負荷時 回転数 14,000rpm 消費電流 6.0A
モータアンブ	株式会社 キーエンス A-07RZ 使用電源 Ni-Cd6セル 最大電流 Ni-Cd Max まで PWM周波数 2,930Hz
ロータリーエンコーダ	光洋電子工業株式会社 TRD-J360-RZ (インクリメンタル型) パルス数 360P/R 寸法 φ50×50mm シャフト径 8mm

(2) システム構成

実験装置の信号の流れを図8に示す。ロータリーエンコーダで振子の角度を測定し、一定間隔ごとに制御量を算出してモータの制御を行う。

(3) 制御プログラム

プログラムの作成を、実用上の対応として以下の点に留意して行った。

(A) 振子の角度に基づくPID制御に使用する変数は、処理の高速化を図るため16bitsのデータとする。

(B) 制御量に基づくフィードバック制御に使用する変数は、精度が必要なため32bitsのデータとする。

(C) ロータリーエンコーダからの入力には常時監視する必要がないので、信号の変化による割り込みで処理を行う。

(D) 制御量の調整を行うタイマ2は、制御を細かく行うために、マイコンが持つ最大の分解能である19bits分解能(0.2μsec間隔)の条件で使用する。

(4) モータ出力の同定

実験装置で使用するモータについて、出力信号と発生力の関係を調べた結果を図9に示す。図9より、前進と後退では出力の勾配が異なること、及び出力が直

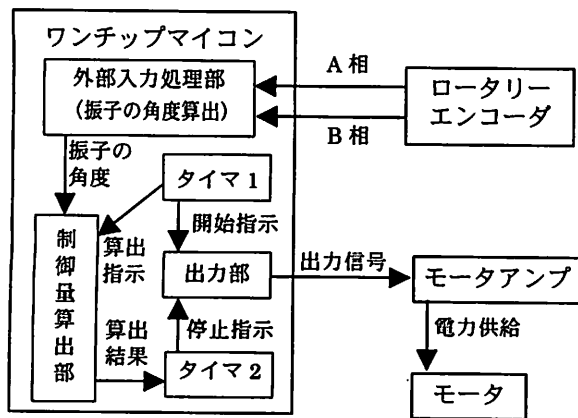


図8 信号の流れ  
Signal Flow

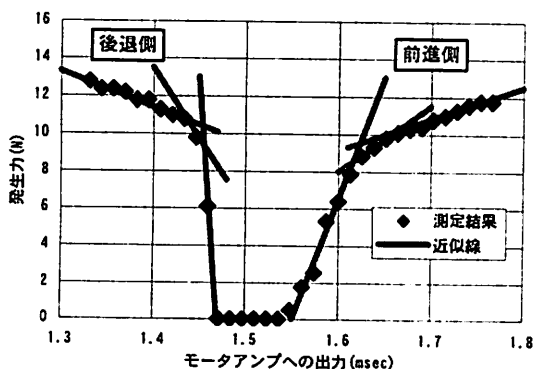


図9 モータ出力測定結果  
Output Power of Motor

線的では無いことが分かった。そこで、前進側・後退側それぞれについて領域を3つに分割し、その領域内で測定結果と合うように近似した直線を作成し、その近似線を用いて制御を行うこととした。

5. 実験結果および考察

(1) 実験内容・結果

実際に製作した装置を用いて、ワンチップマイコンによる制御器で制御が行えることの確認を行った。実験は、振子の先端に外乱を与えた場合に振子が倒れることなく倒立状態を保てるかを確認した。また今回設計した制御器は、台車の位置を測定しなくても原点に戻る制御手法を用いているので、その妥当性の確認も行った。この確認は、制御時に台車が最大どこまで離れたか(最遠位置)の測定結果と、制御終了時に台車がどれだけ離れていたか(最終位置)の測定結果から行った。測定した結果を図10に示す。

(2) 考察

今回検討した制御手法を適応したワンチップマイコンを用いた制御器で、倒立振子の外乱抑制制御を行ったところ、振子を倒さずに倒立状態に戻す、振子の制御については目的を達することが出来た。このことから、複雑な計算を必要とするプロセス制御であっても、ワンチップマイコンを用いた制御器はその処理を十分に行えることが確認できた。

この結果と、今回使用した制御器の製作費はパソコンの価格の1/100以下であることを併せて考えると、このような制御器を、例えば試作機の制御のために占有されているパソコンの代わりに用いることにより大きなコストメリットを得ることが期待できる。

次に制御手法の妥当性について考える。測定結果をみると、最終的に台車が戻った位置はほぼ最遠位置の±15%の範囲に収まっている(図10の実線)。この値

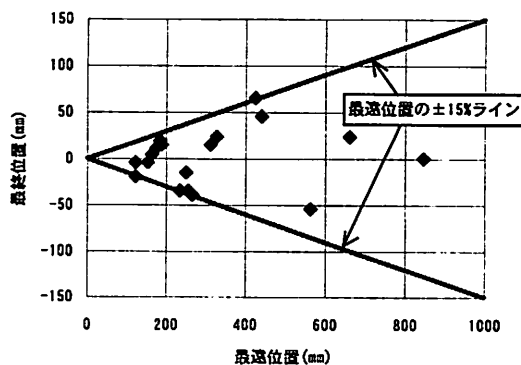


図10 測定結果  
Result of Experiment

は小さくないが、実験に使用した装置が模型用であることを考えると妥当な値といえる。なお、このようなバラツキが生じた理由としては以下のことが考えられる。

#### (A) 積分処理による誤差量の蓄積

制御量の算出時、モータの発生力は作成した近似式から得た値を用いているため、誤差が発生する。個々の誤差量は小さくとも、制御には積分した値を用いているため、誤差量が大きくなった。

#### (B) トルク不足による台車の停止

使用したモータが模型用であったため、回転数が低い時にトルク不足となり、実際には台車が動いていないにもかかわらず、指示通りに動いていると制御器が認識してしまうことがある。そのため、実際の台車の移動量に関係なく計算上は現在位置が0になったと判断し、停止してしまった。

以上の点と、設計手法の有効性は確認できていることから、高い精度が求められる分野であれば制御用のモータを使用することで適用が可能であり、また今回の実験結果程度の比較的低い精度でも問題とされない

分野であれば、このまま適用することが可能である。

## 6. まとめ

倒立振子の制御を対象としてワンチップマイコンで制御器を製作し、複雑な計算を必要とするプロセス制御を行わせた。その結果、制御装置としては期待通りの働きをし、実用性が有ることが確認できた。

倒立振子の制御において、制御量を用いて台車の位置を制御する手法を検討し、シミュレーションにより有効性を確認した。また本手法を用いて実際に台車の位置を制御したところ、原点に近い位置まで戻すことができた。

## 参考文献

- 1) 山本重彦, 加藤尚武: PID 制御の基礎と応用, 83, 朝倉出版 (2002)