

# 福岡工業大学 機関リポジトリ

## FITREPO

Title	ソフトウェアにより実現したPLLによるモーター制御
Author(s)	田中 卓史
Citation	福岡工業大学研究論集 第39巻第2号 P193-P198
Issue Date	2007-2
URI	<a href="http://hdl.handle.net/11478/906">http://hdl.handle.net/11478/906</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher

Fukuoka Institute of Technology

# ソフトウェアにより実現した PLL によるモーター制御

田 中 卓 史 (情報工学科)

## Motor-Control by Phase Locked Loop Implemented in Software

Takushi TANAKA (Department of Computer Science and Engineering Faculty of Information Engineering)

### Abstract

We have developed a method for DC-motor control by PLL (Phase Locked Loop) implemented in software. PLL is a technique of electronic circuits which generates a signal identical with a reference signal. Usually it consists of a voltage controlled oscillator, a phase detector, and a low-pass filter. Rotation of a DC-motor is picked up by an optical interrupter. As a motor generates a signal controlled by a voltage applied, the motor works as the voltage controlled oscillator. The generated signal is compared with a reference signal by the phase detector and PWM-pulses are generated to drive the motor. All functions of PLL-components except a voltage controlled oscillator are realized not by electronic circuits but by softwares of a micro processor.

Key words: *Phase Locked Loop, software PLL, DC-motor control, feedback*

### 1 はじめに

これまでロボットサッカーの研究を行ってきたが [1], ロボットに精密な動作を行わせるために, モーターの回転を精密に制御することが必要になった。直流モータを精密に制御する方法にモータの回転信号を電圧制御発振器の信号と見なし, PLL (Phase Locked Loop) を構成する方法がある [2]。通常, PLL は電子回路で構成されるが [3], この研究では PLL の仕組みをソフトウェア的に実現したので, 比較的簡単な回路構成となっている。この論文ではモーター制御 PLL を実現するために行った考察について述べ, ソフトウェアの詳細と実験結果については稿を改める。

### 2 PLL によるモーターの制御

PLL (Phase Locked Loop) は基準信号に一致した周波数の信号を発振させる技術で [2], テレビの同期回路や局部発信器, CPU の内部クロックの生成などに用いられている。図 1 に示すように, 位相比較器 (Phase Detector), ローパスフィルタ (LPF), 電圧制御発振器 (VCO) から構成されている。

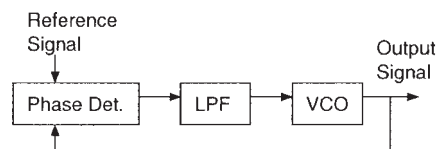


図 1 : 位相ロックグループ  
Fig.1: Phase Locked Loop

位相比較器により基準信号と発振器からの信号が比較される。基準信号よりも発振周波数上がり, 位相

が進もうとすると、位相比較器より発振周波数を下げようように電圧が出力される。逆に、基準信号よりも発振周波数が下がり、位相が遅れようとする、位相比較器は発振周波数を上げるように電圧を出力する。通常、回路的に構成できる位相比較器でリニアに検出できる位相差は360度以下となるので、基準信号と発振信号の周波数が異なると、位相比較器は差の周波数で進相と遅相の信号を繰り返し出力することになる。ローパスフィルターにより信号の高周波成分を取り除けば電圧制御発振器は位相差をなくすように発振周波数が動き、やがて周波数が一致するとロック状態となり、基準信号の周波数が大幅に変化しても変化に追従して同じ周波数の信号を発振するようになる。

直流モーターは電圧を入力、回転を出力とする電圧制御発振器としてみる事ができる。回転信号を取り出し、回転を制御する基準信号との間で PLL (Phase Locked Loop) を構成すると、位相レベルまで一致させてモーターを回転させることが可能になる。

マイクロプロセッサの発達により、モーター制御程度の周波数では PLL の構成要素をソフトウェア的に実現することが可能になっている。この研究では図2に示すように PLL の構成要素のうち、位相比較器と LPF, VCO の機能の一部をソフトウェアにより実現している。

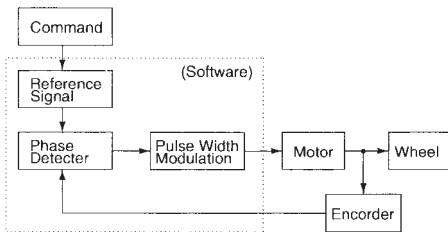


図2：ソフトウェアによる位相ロックループ  
Fig.2: Phase Locked Loop by software

### 3 電圧制御発振器としての直流モーター

直流モーターの回転は電圧に比例するので、モーターに回転エンコーダーをつないで回転信号を取り出せば、直流モーターはそのまま電圧制御発振器となる。しかし、回転を制御するための直流の可変電圧を電力損失を伴わずに作ることは容易でない。サッカーロボットは電池で動作するので、省エネルギーの観点か

ら、可変電圧は用いずに、PWM (Pulse Width Modulation) で回転の制御を行うことにする。PWM 波は回路的に生成するのではなく、ソフトウェア的に生成することで回路の構造を簡単にしている。直流モーターは PWM 波のデューティー比が小さい時はパルス幅に比例して回転が上昇し、ある程度大きくなると、電圧と負荷で定まる回転数に押えられることが予測される。

図3はサッカーロボットのモータードライバーと回転エンコーダー部分の回路を示している。マイクロプロセッサ (PIC16F873) で生成された PWM 波はモータードライバ IC (M54544) を経て、モーター (Namiki 12CL2001) に入力される。モーターと車輪の間に回転エンコーダーを設置している。エンコーダーは赤外光を透明のフィルムに印刷した放射状の線で断続する。断続された光はフォトトランジスタで検出され、シュミットトリガで波形を成形され、マイクロプロセッサの入力となる。

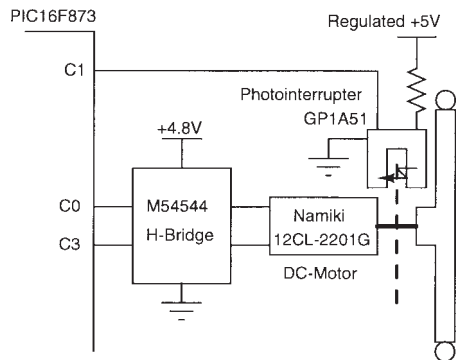


図3：車輪駆動回路と回転エンコーダ  
Fig.3: Wheel driver and encoder

### 4 位相差の検出と PWM 波の生成

位相の異なる同じ周波数の二つの正弦波は乗算を行うと、位相差が直流分として得られる。そこで、正弦波の PLL 回路では乗算の働きを持つリング変調器や平衡変調器が用いられる。一方、矩形波の位相差の比較には排他論理和やセットリセット・フリップフロップが用いられる。排他論理和に入力される二つの信号は真理値が一致しない部分がパルス波として得られ、時間平均をとれば位相差に比例した出力が得られることになる。しかし、位相差に対してリニアなパルス幅が得られるのは基準信号と発振器からの信号の位相差が

0～180度までの範囲である。また、パルス幅が位相差の絶対値に比例するので、基準信号に対して比較信号の位相が進んでも遅れても同じパルスが得られることになる。

一方、セットリセット・フリップフロップを用いて基準信号の立上りでセットし、発振信号の立上りでリセットすれば、0～360度の位相差をデューティー比が0～1のパルス波に変換することができる。エッジトリガなので排他論理和を用いる場合よりもノイズに弱くなる欠点はあるが、そのままモーターをドライブする PWM 波として利用することが考えられる。

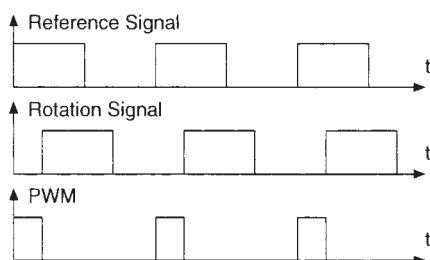


図 4：位相差で生成された PWM

Fig.4: PWM generated by phase difference

PWM 波でモーターをドライブする場合、波の山ではモーターに定格電圧を加え、波の谷ではモーターを回路と切り離れた状態 (ハイ・インピーダンス) にすることが必要である。ハイ・インピーダンスのときはモーターは慣性で回ることになる。

基準信号とモーターからの回転信号の周波数が一致すると、PLL がロックし、軽負荷から重負荷まで位相差が0度から360度の範囲で変化して、回転数が基準周波数に追従するようになる。

モーターの起動時は基準周波数よりモーターの回転による発振周波数 (回転数) が低く、位相が360度以上遅れることが起こる。基準周波数より回転数が低いときはセット信号よりリセットの信号の数が少ないので、相対的にセット状態が多くなり、PWM 波のデューティー比の平均は  $1/2$  より大となる (図 5)。この差は回転数が低いスタート時点ほど大きくなり 1 に近づくと大きな起動トルクが得られる。

ロボットを減速するため、基準信号の周波数を落とすと、慣性によりモーターの回転数が基準信号の周波数を上回るようになる。モーターの回転数が高いとセット信号の数よりリセット信号の数が多く、相対的

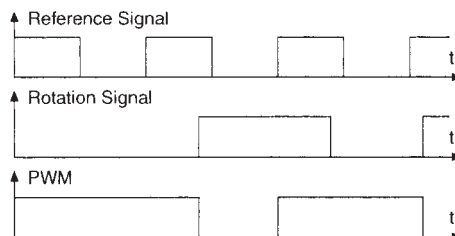


図 5：スタート直後の PWM

Fig.5: PWM just after starting

にリセット状態が多くなって、PWM 波のデューティー比の平均は  $1/2$  以下となり、基準周波数との差が大きいくほど 0 に近づく。

回転数が基準周波数より高いか低いかで PWM 波のデューティー比の平均値は  $1/2$  を中心に変わるが、デューティー比が  $1/2$  のパルスでモーターを駆動したときに回転による発振周波数が基準周波数に近づくとは限らない。モーターの負荷が軽ければ  $1/2$  のパルスでも基準周波数を越え、負荷が重ければ基準周波数に満たないことも起こりうる。

モーターの回転を最速でロック状態に持って行くには図 6 に示すように、回転数が低く位相差が360度以上となる場合はパルス幅のデューティー比を 1 にし、逆に回転数が高くなりすぎて位相差が0度以下 (負) となる場合はデューティー比を 0 にすると良さそうである。すなわち、基準の回転数より低いときは最速で基準回転数に達するように定格電圧を常に加え、逆に回転数が基準周波数より高いときは基準回転数に落ちるまで電圧を加えない。基準回転数になるとモーターに加わる電圧のパルス幅が0～100%変化して、モーターの回転を基準周波数にロックすることになる。

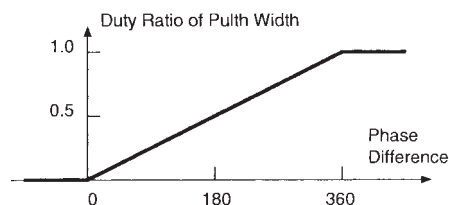


図 6：位相差とパルス幅

Fig.6: Phase difference and pulth width

### 5 電圧制御発振器としてのモーターの問題点

モーターがエネルギーを消費している場合、パルスの幅を変化させてエネルギーを供給する PWM の方式は電圧制御発振器として有効に働くのであるが、動いているモーターおよび、モーターを搭載しているサッカーロボットが慣性を持つため、モーターの電源を切っても回転は暫く持続することになる。すなわち、モーターの増速に対して有効な PWM 波は減速に対してはデューティ比を 0 にしても、モーターをハイ・インピーダンスにするだけなので、自然の摩擦で減速することになる。また、ロボットが下り坂にあればかえって増速することも起こり得る。

慣性で回転しているモーターをより低い周波数の基準信号にロックするには、ブレーキの仕組みが必要になる。直流モーターは発電機としても働くので、回転数に比例した電圧がモーターの両端に現れている。モーターをショートすると回転を妨げるように電流が流れてブレーキがかかる。

これまで回転信号は基準信号に対して 0~360度の範囲で位相が遅れることを想定し、デューティ比 0~1 の PWM 波を生成することを考えていたが、同じように回転信号の方が 0~360度の範囲で進むことも想定し、デューティ比 0~1 の PWM 波で可変ブレーキをかける仕組みを作るのが良さそうである。

### 6 二つの信号の周波数の比較

アップダウンカウンターを用いると 2つの信号の周波数を比較することができる。基準信号でカウンターをアップし、モーターの回転信号でカウンターをダウンすれば、加速時は回転数が基準周波数より低いいためカウンターの値が増加して行き、減速時は基準周波数よりも回転数の方が高くなるのでカウンターの値は減少する。

カウンターの値が 1 以上でモーターに定格電圧を加え、0 でハイ・インピーダンス状態にすれば位相差が 360度以上では常時電圧が加わった状態となる。また、0~360度の範囲ではカウンターの値が 0 と 1 の間を交互に行き来して、セトリセット・フリップフロップとして働き、モータードライブのための PWM 波を生成できる。

さらに積極的にブレーキをかけて減速時も基準周波

数に一致させるには、カウンターの値が 0 と -1 の間でも PWM 波を生成し、状態 0 でハイ・インピーダンス、状態 -1 以下でローインピーダンス (ショート) を行えば良さそうである。

アップダウンカウンターの桁数が十分大きければ、基準信号をスタートさせた時点からの位相角にモーターの回転始めからの位相角を一致させることもできる。静止状態にあるモーターが回転を始めるときは慣性により大幅に位相が遅れる。回転が上がりやがて基準信号の周波数となるが、スタートからの位相角が大幅に遅れているので、基準周波数と回転数が一致してもカウンターは 0 にならず、モーターは遅れを取り戻すために基準信号の周波数を越えて回転をあげ、遅れを取り戻してからロック状態に入る。しかし、この動作はモーターのスタートからの総回転角を制御するには良いが、回転速度を基準周波数に一致させる目的にはオーバーシュートを起こすことになる。

早期に基準周波数に一致した回転にロックするには、カウンターのカウント値に上限と下限を設定しておけば良い。図 7 はカウント値を ±2 に制限したカウンターの状態遷移を表している。初期状態のカウンターは状態 0 にあり、モーターは静止状態にあるとする。状態 0 ではモーターに電圧は加わず、ハイ・インピーダンス状態となっている。

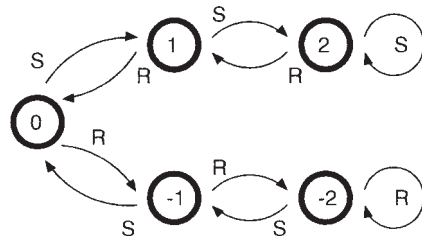


図 7 : アップダウン・カウンターの状態遷移  
Fig.7: State transition of up-down counter

基準信号が加わると、立上りのエッジ S によりカウントアップされ初期状態 0 から状態 1 となる。状態 1 ではモーターに定格電圧が加わりモーターを起動する。モーターは慣性があるので直ちに回転信号 R は出力されず、次ぎの基準信号の立上り S により状態 2 へと移行する。信号 S により状態 2 を何度かループした後、やがて回転信号 R が出始めると、状態 1 と状態 2 の間を行き来する。状態 1 も状態 2 もモーターには定格電圧を出力し、モーターは最速で回転を上げる。回

転速度が上がり、基準信号の周波数をやや越えてR信号が2個続けてくると状態0に移行する。ここで、モーターはハイ・インピーダンスとなり、加速は終了する。次にS信号とR信号が交互に来ると状態0と状態1を行き来するロック状態となる。

動いているサッカーロボットのスピードを落とすために、基準信号の周波数を下げると、S信号よりR信号の数が多くなる。状態0においてR信号が来ると、状態-1となる。状態-1でモーターはショート状態となりブレーキがかかる。次にS信号が来れば再び状態0となり、モーターはハイ・インピーダンスとなり、ブレーキが外れる。状態0と状態-1を行き来して生成されるPWM波により、モーターの回転は減速時も基準信号にロックされ、車のエンジブレーキに似た状態となる。サッカーロボットを急停止する場合はS信号が止まり、R信号だけが連続してでることになる。このときカウンターは状態-2に移行し、常時強力なブレーキがかかる。

## 7 状態数の削減と基準周波数の可変

前節の方法により、基準周波数より回転数が低いときは常時モーターに電圧を加え、回転数が高いときは常時ブレーキをかけて、最速で回転を位相ロック状態に持って行くことができる。位相ロック状態となると、基準信号に対するモーターの回転の位相が0~360度の範囲で遅れる時はデューティー比0~1のPWM波でモーターを加速し、逆に回転が進んで位相差が0~360度となるときは、0~1のPWM波でモーターにブレーキをかけることができる。しかし、この方法もやや問題が残る。

この方式はモーター起動時は状態1と状態2の間を行き来している。ロック状態に移るには状態0に移行するため、基準信号Sの1周期の間に2個の回転信号Rが来ることが必要になる。基準周波数より回転が少しでも高くなればやがてSの1周期に2個のRが来ることが起こるが、急速に回転が上昇している場合は回転が基準周波数の2倍近くに上がって、2個のRが来るとも起こる。従ってこの方式もややオーバーシュートが避けられない。同じことはブレーキについても起こり、状態-2から状態0に移行するため、2個のS信号が必要となり、最悪の場合ブレーキを掛け過ぎて基準周波数の半分まで回転を落としてしまう恐れがある。

図7の状態遷移図において状態±2は±360度以上の位相差のときに、出力を脈動させずにモーターをロー・インピーダンスに保つ働きがあり、LPFの役割を果たしていると見ることができる。しかし、この状態±2は位相ロック状態に移るときのオーバーシュートの原因にもなる。そこで、図8のように状態数をさらに減らしてカウンターの上限の値を±1に設定した場合を考察する。

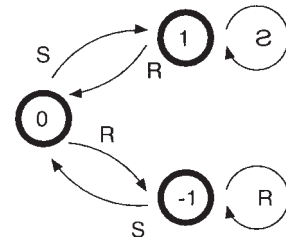


図8：状態遷移  
Fig.8: State transition

モーターの起動時は基準信号Sにより初期状態0から状態1に移る。モーターは定格電圧が加わり、大きな駆動トルクで回転を始める。やがて、回転信号Rが出はじめると、S信号で1、R信号で0となるPWM波がモーターに加わる。位相ロック状態にないPWM波は位相差によりパルス幅がばらばらに生成されるが、平均的にはデューティー比0.5以上となっている。回転はデューティー比0.5で定格電圧を加えたときに、負荷との関係で定まる回転数に向けて上昇する。基準周波数に達すると、パルス幅のデューティー比が0~1で変化するロック状態となる。状態+2を持たないので、加速時に常時、定格電圧が加わった状態がなく、負荷が重いと回転数が基準信号に達せずに、ロック状態にならないことも起こりうる。

基準信号を下げる減速時には状態0と状態-1を行き来し、パルス幅のデューティー比が0~1と変わってブレーキがかかり、基準信号にロックする。図7のように状態-2を持たないため、ロックが外れる場合はブレーキを掛ける平均のデューティー比が最悪で0.5となる。これは自動車の車輪がロックして地面を滑り出すとブレーキの効が悪くなる状態に似ている。

図8の状態遷移は加速時も減速時も速度のオーバーシュートやアンダーシュートを起こさないメリットを持っている。一方、加速時と減速時に位相ロックの掛からないケースが生じる問題がある。しかし、この間

題は慣性のあるモーターの回転を一度に基準周波数に合わせようとする事自体に起因している。この研究では基準周波数もソフトウェアで作り出しているので基準周波数を可変にすれば、この問題は生じなくなる。すなわち、モーターの加速時には基準周波数を徐々に上げ、モーターの減速時には基準周波数を徐々に下げれば図 8 の状態遷移図で常時ロック状態を保つことが可能になる。

## 8 おわりに

サッカーロボットの移動精度を上げる必要性から、ソフトウェア的に PLL を構成し、モーターの精密制御を実現している。サッカーロボットに搭載したマイクロプロセッサは単にモーター制御だけでなく、無線機の設定、送受信のコントロール、コマンド解読などを行っており、左右の車輪からの回転信号も含めて、事象ドリブン型のプログラムを構成している。プログラムはサッカーロボットの他の機能と一体に作っているので、PLL を実現したプログラムは稿を改めて報告する。この研究で構成した PLL はサッカーロボットの車輪にエンコーダーを取り付けて、車輪の回転をフィードバックしたのであるが、新しく作っているロボットは光学マウスの仕組みを利用して移動の検出を行っており、実際の移動により得られる信号をフィードバックして PLL を構成する研究を進めている。

## 参考文献

- [1] 田中卓史, 石井優, 谷口泰敏, 白川弘明: **サッカーロボット Yamakasa の構造と機能**, 福岡工業大学情報科学研究所所報, 第13巻, pp.93-98, 2002.
- [2] 谷腰欣司: **DC モータ活用の実践ノウハウ**, CQ 出版社, 2000.
- [3] 遠坂俊昭: **PLL 回路の設計と応用**, CQ 出版社, 2003.