

ステッピングモータの脱調制御

青森職業能力開発短期大学校

工 藤 光 昭

佐 竹 正 敏

Pull-out Torque Control for Stepping Motor

Mitsuaki KUDŌ
Masatoshi SATAKE

要約 ステッピングモータは自起動領域で回転を開始し、負荷のトルクが脱出トルクを越えると脱調する。脱調すると動力源としては機能を果たさないが、脱調時のトルクを正確に制御できればトルク規制工具（装置）に用いることができる。

一般に、電子機器の生産現場におけるトルク規制工具は機械的機構をもってトルクを規制していることが多い。これらのトルク規制工具はトルク管理を頻繁に行わなければならない。このとき、ステッピングモータの脱出トルクが任意に設定できれば電氣的にトルクを規制できることになり、その再現性が保たれる。

ここでは脱出トルクを一励磁期間に2回印加する高電圧パルス幅の増減により任意に与えることを試みた。さらに、脱調時の振動を回避する回路も付加した。その結果、任意のトルクで脱調制御することができ、ネジの締め付けトルク規制工具等に利用できることを確認した。

I. はじめに

機械部品の締結、電子機器におけるプリント基板のシャン取り付け等に用いるネジ部品の締め付け力が規定の締め付け力になっているかどうかの管理は、品質管理上重要なことである。しかし、実際に締め付けられたネジ部品の規定の締め付け力になっているかどうか調べることは、不可能に近いと言われている¹⁾。したがって、規定の締め付け力をネジ部品に与えるためには、いかに正確にトルクの制御ができるかにかかっている¹⁾。

電子機器組み立て作業における締め付けトルクを規制する工具で代表的な動力源は空気圧と直流モータである。いずれの場合も、これらの動力源の先に取り付けているトルク規制部分（トグル機構等）の管理を頻繁に行なう必要がある。

ここではトルク管理の煩雑さを解消するために、ステッピングモータ（以下、モータという）の駆動回路の工夫によって任意に脱出トルクが制御でき、ネジの締め付けトルク制御に利用できることを確認した。

II. ステッピングモータの挙動

モータの動トルク特性は、励磁巻線に注入される電氣的エネルギーに左右される。

例えば、2電圧駆動方式は巻線電流（励磁電流）の立ち上がり時間を短くして応答速度を向上させるものである。この方式では励磁相切り替え時に一定期間だけ定格電圧よりも高い電圧を印加し、その後定格電圧に切り替えるというものである²⁾。

しかしながら、この方式においても高速領域では十分な励磁電流を供給することができないためトルクが低下する。

図1はモータの挙動を考察するための速度（パルス繰り返し数）-トルク特性（2電圧駆動方式の2相励磁により測定）を示す。この測定はモータ駆動中に負荷トルクを増減させて行ったもの（SCAN法）である。同一速度で引き込みトルク（モータが起動できる負荷トルク）と脱出トルク（加速して一定速度で運転中に負荷トルクを増加していき、脱調が起こるときの負荷トルク）が示されている。

モータは、引き込みトルクよりも小さい負荷トルク

領域（自起動領域）では駆動パルス信号に同期して回転する。しかし、負荷トルクが徐々に増加して脱出トルクを越えると脱調して回転を停止する。このとき、負荷トルクを徐々に減少していき自起動領域に入ると再び回転を開始する。また、負荷トルクを零にしても起動できない場合は、自起動領域に達するまで速度を下げるにより同様に回転を開始することができる。

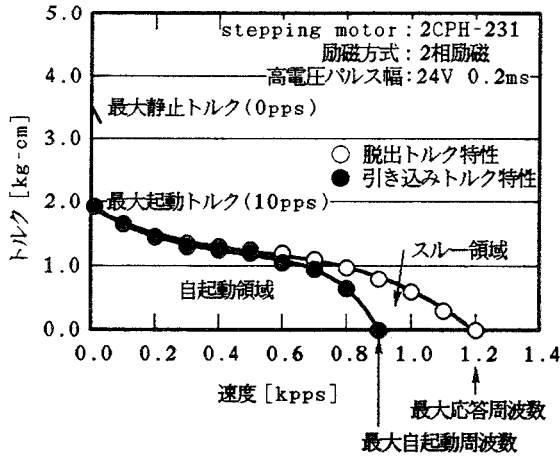


図1 ステッピングモータの速度-トルク特性

このようにモータは脱調し回転が停止しても自起動領域に入るように、負荷トルクを減少したり速度を下げるにより回転を再開できる。

III. 脱出トルクの制御

モータが非飽和領域で使用されている場合、発生トルクはほぼ電圧に比例する。図2に定電圧駆動による電圧-脱出トルク特性を示す。このようにモータの印加電圧の上昇にともない、巻線の平均電流が増加してトルクが大きくなる。

巻線の平均電流を引き上げる方法に定電流駆動回路および2電圧駆動回路があり、それは動トルク特性を改善し速度応答を向上するものであるが、動トルク特性を常に調整できるものではなかった²⁾。

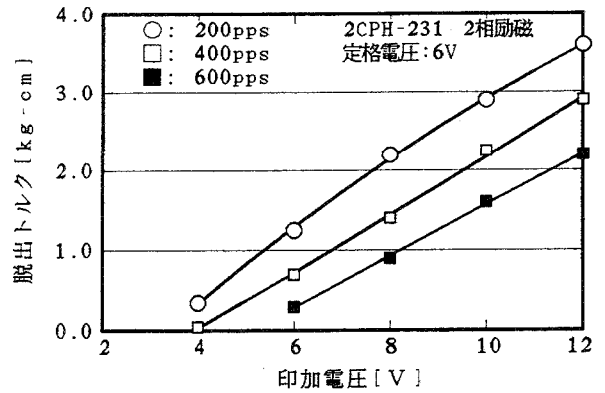
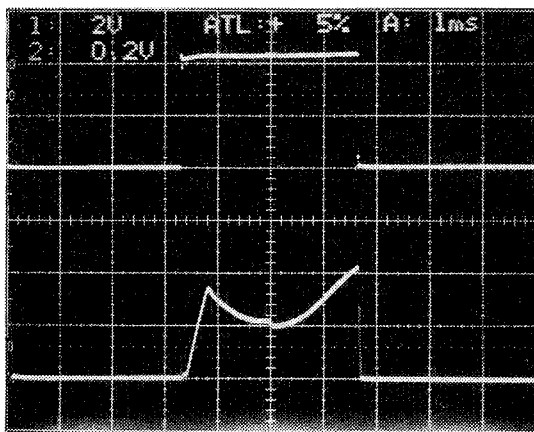


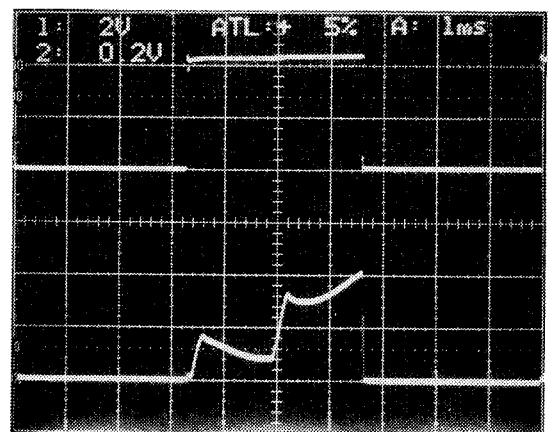
図2 定電圧駆動による電圧-脱出トルク特性

図3は600pps時における一励磁期間に0.4msの高電圧パルスを1回与えた場合と0.2msの高電圧パルスを2回与えた場合の巻線電流波形を示す。供給電圧は高電圧が24V、定格電圧が6V、論理回路が5Vである。励磁期間に高電圧を1回与えた方が巻線電流の立ち上がり時間を短縮する効果は大きい。しかし、一つの励磁期間に2度にわたって高電圧を印加する手法を用いたとしてもほぼ同様の効果を得る。このことから、動特性の向上に主眼を置くのではなく、高電圧パルス幅の連続調整と回路構成の簡素化を考慮して2相励磁における一励磁期間に高電圧パルスを2回与えることとした。

一励磁期間に2回の高電圧を印加する制御信号と定格電圧での駆動を制御する信号を作り出す2電圧駆動制御信号作成回路を図4に示す。この制御信号作成回路はパルス発生回路および高電圧用パルス幅調整回路、励磁制御回路で構成されている。



(a) 高電圧パルス0.4ms 1回



(b) 高電圧パルス0.2ms 2回

図3 一励磁期間に高電圧パルスを0.4msで1回与えたときと0.2msで2回与えたときの巻線電流

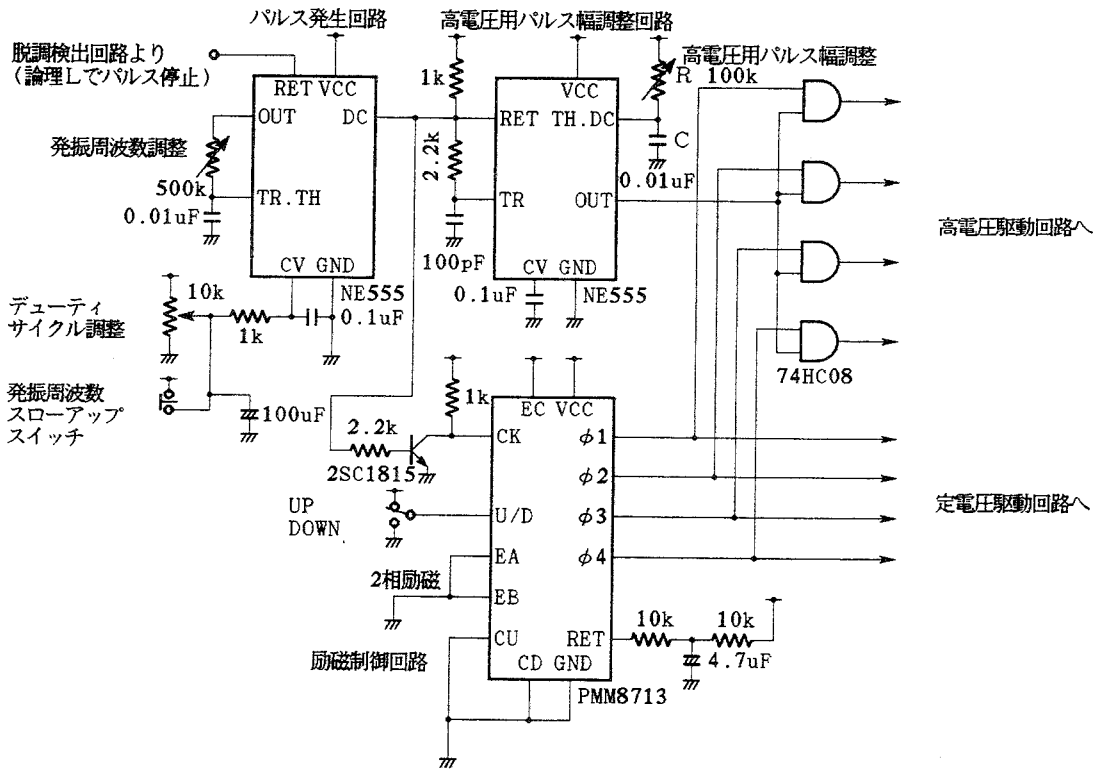


図4 2電圧駆動制御信号作成回路

パルス発生回路は可変抵抗を用いた発振周波数調整機能、デューティサイクル調整機能および発振周波数スローアップ機能を有している。デューティサイクルの調整機能は次段に接続される高電圧用パルス信号発生回路のパルス幅調整範囲を広くするために、短い時間の負論理パルスを発生するための調整に使用される。また、発振周波数スローアップ機能はモータが脱調したとき、負荷トルクを減じても起動できない場合に発振周波数を下げて起動するためのものである。通常この機能は使用されない。

高電圧用パルス幅調整回路は、入力パルスの立ち上がりエッジでトリガする単安定マルチバイブレータ（直結積分トリガ法）を用いている。この方式はトリガ信号の立ち上がりで動作するので、図5のタイムチャートに示すように、回路の出力パルスはトリガ信号に同期し発生する。なお、発生するパルス幅は可変抵抗を用いて調整することができる。

励磁制御信号の発生には PPM8713（専用コントローラIC）を用いている。励磁信号は定電圧駆動回路へ伝

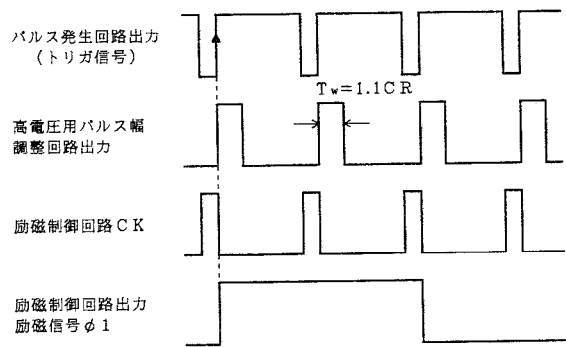


図5 2電圧駆動制御信号作成回路のタイムチャート

達されると同時に高電圧用パルス幅調整回路の出力信号と論理ANDがとられ高電圧駆動回路に伝達される。したがって、図4に示す2相励磁駆動回路では、一つの巻線を見ると励磁期間中に2回の高電圧が印加されることになる。このとき本脱出トルク制御は、一励磁期間に2回印加する高電圧パルス幅の増減によって行っている。

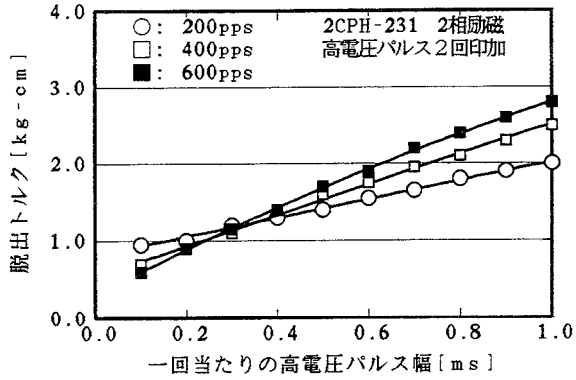


図6 高電圧パルス幅-脱出トルク特性

図6は2電圧駆動回路における2相励磁のパルス幅の設定時間と脱出トルクの関係を示す。このとき被測定モータはDCジェネレータが連結されており、また供給電圧は図3の場合と同じである。すなわち、脱出トルクは高電圧パルス幅にほぼ比例しており、その大きさはパルス幅の調整によって制御できることが示されている。

一励磁期間に2回の高電圧パルスを印加し、その後定電圧駆動に移る2電圧駆動回路（電力増幅回路）を図7に示す。2電圧駆動回路は励磁制御回路の信号を受けて作動する定電圧駆動回路と高電圧用パルス幅調整回路の信号を受けて作動する高電圧駆動回路から構成されている。高電圧駆動回路は励磁パターンが変化する毎に高電圧を一定期間モータに供給している。モータに連結されているDCジェネレータの出力は脱調検出回路に接続されている。

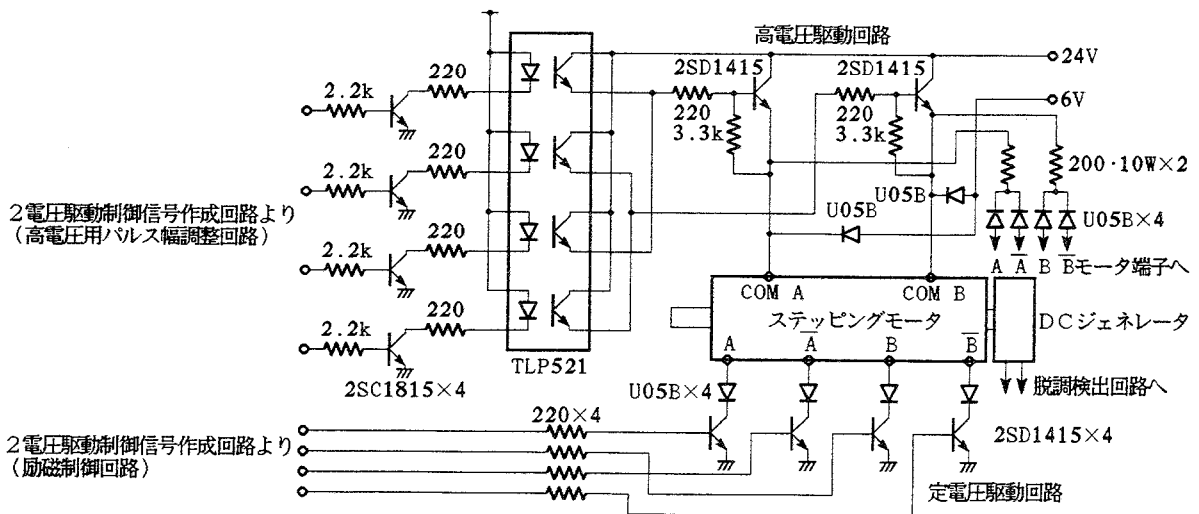


図7 2電圧駆動回路（電力増幅回路）

IV. 脱調検出回路

本システムでは、脱出トルクの制御は高電圧を印加する時間（パルス幅）によって行っている。この場合、負荷トルクが脱出トルクより大きくなるとモータは脱調して停止する。脱調を起こしたとき、モータ軸は±1ステップ以内で反復運動（振動）をしている。この状態でモータ軸に取り付けたビットをネジに当てると、ネジ山がつぶれる。

脱調検出回路はこのような状態を避けるために、脱調状態を検出してパルス発生回路の動作を停止させる信号を発生するものである。ここでは脱調状態の検出にDCジェネレータを用いている。図8はDCジェネレータが連結されたモータの外観を示す。

DCジェネレータは、モータの回転速度に比例する直流電圧を出力する。また、DCジェネレータの出力電圧の極性はモータの回転方向によって決まる。ここでは正転/逆転の区別なく脱調状態の検出を行うので、DCジェネレータの出力電圧は電子回路を用いてその絶対値に変換される。変換された電圧が低い場合は脱調状態であると判断してパルス発生回路にパルス発生抑制信号を与える。図9は脱調検出回路を示す。

脱調検出回路はDCジェネレータの出力信号を積分するための回路、全波整流回路、脱調状態になったことを保持するためのRSフリップフロップおよび再起動スイッチから構成されている。

脱調状態になるとDCジェネレータの出力電圧はかなり低い振動電圧になり、パルス発生回路に与えるパル

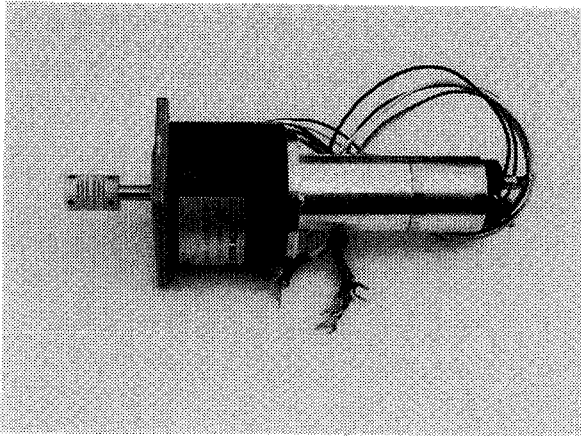


図8 DCジェネレータを連結したステッピングモータ

ス発生抑制信号はLレベルになる。

脱調後、負荷トルクを低減し回転を再開させたいときには、再起動スイッチを押してRSフリップフロップをリセットする。

V. 脱調制御特性

脱調トルクの制御性を確認するために高電圧パルス幅を一定とし脱調時のトルクを測定した。ここでは高電圧パルス幅を0.2msとして脱出トルクの測定を200回行った。図10は脱調したときのトルク値と度数を示したものである。この度数分布から脱出トルクの平均値は0.94kg・cmであり、 0.94 ± 0.04 kg・cmのトルク範囲で脱調が99.5%起きている。このことから脱調トルクの制御が正しく行われていることが確認できた。

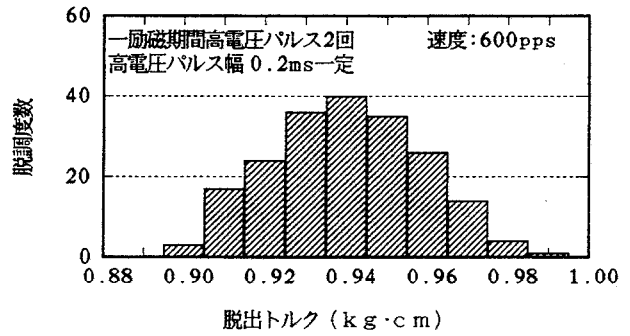


図10 高電圧パルスを一定とした脱出トルク度数分布

VI. おわりに

一般にモータを用いたシステム設計では負荷トルクに対して引込トルクや脱出トルクの大きいものが選定され用いられている。しかし、ここでの使い方は、通常の利用形態と異なり、設定した脱出トルクで脱調させることを目的としたものである。

脱出トルクの制御は、2電圧駆動回路の2相励磁において一つの相の励磁期間に2度与えられる高電圧パルスの幅（印加時間）の増減で行っている。この結果、同一速度においても任意の脱出トルクで脱調させることができる。このとき速やかに脱調状態を検出して脱調時の振動を止める必要がある。ここではDCジェネレータを用いて脱調状態を検出し、パルス発生回路の動作を止めてその振動を回避している。

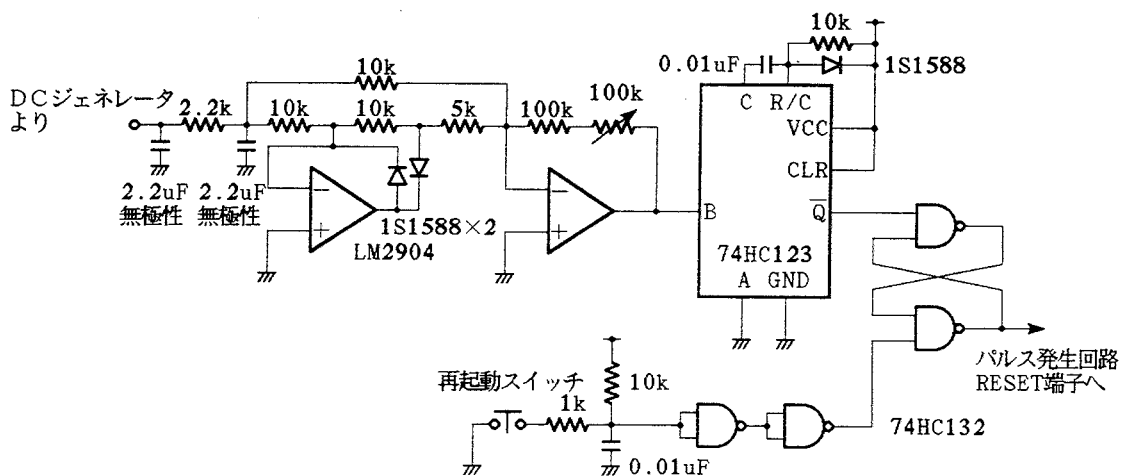


図9 脱調検出回路

本脱制御回路は 2 電圧駆動回路に脱出トルクを制御するための高電圧パルス幅調整回路と脱調検出回路を付加したものである。本装置を用いることによって任意の脱出トルクで脱制御ができることを確認した。

これはネジの締め付けトルク規制工具（装置）としての利用が可能であり、この場合トルクの規制を機械的に行っているものと異なり、校正を頻繁に行う必要がない。したがって、従来頻繁に行われていたトルク管理を大幅に簡素化することが期待できる。

参考文献

- (1) 山本晃 監修、ねじ締め機構設計のポイント、日本規格協会、1986年改訂3版、pp.244-245
- (2) 工藤光昭、ステッピングモータ用2電圧駆動回路の試作、職業能力開発報文誌 第5巻第1号、1993年、pp.93-97