

内96-19

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

空気圧駆動システムの基礎特性
と制御方法に関する研究

申 請 者
楊 清 海
Qing-hai Yang

機械工学専攻 プロセス工学研究

1996 年 12 月

本論文では、空気圧アクチュエータと制御弁により構成された電気—空気圧駆動システムに対し、システムの基本応答特性及びその特性を支配する要因について解明し、これをもとに制御方法、ならびに同方法を適用する空気圧駆動システムの設計について論じている。

空気圧シリンダは小型であるが比較的大きな出力を得やすいこと、さらに安価で使用が容易であることなど多くの利点を有していることから、各種の自動機械のアクチュエータとして広く利用されている。そして最近ではマイクロコンピュータを中心とした電子技術の急速な進歩発展に伴い、ロボットやフレキシブルオートメーションなどの分野でも高速かつ高精度な位置決め機能を求められており、空気圧シリンダに関してもより高度な自動化機構への応用が模索され始めている。しかし、空気圧駆動システムは、空気が圧縮性流体であり駆動時に温度変化すること、摺動部の摩擦力や制御弁の特性に非線形性があることなどの原因で、システムの応答が目標値の近傍で振動的になりやすい。とくに、システムの低速駆動時や停止直前には顕著なスティックスリップ現象が見られる。このスティックスリップ現象はシステムの摺動部の摩擦特性と密接な関係があり、高性能なシステムを設計するために、その発生メカニズムを解明し、システムに影響を及ぼす各パラメータについて十分把握しておくことが必要となってくる。しかし、従来より定性的説明はなされているが、スティックスリップの発生メカニズムについての明確な理論解析はほとんど見当たらない。

つぎに空気圧システムに適用されている制御技術についてみると、新しい制御技術を適用した研究が数多く発表されているが、実際にシステムに悪影響を及ぼす機械摩擦力について十分考慮されていない。このため、これら制御技術をただ適用しようという立場からの研究が多く、実用に供しうるような結果は極めて少ない。一方、空気圧システムの電磁弁をPWM(パルス幅変調)駆動するような制御方式については、摺動部の摩擦力補償が期待できるため、これに関連する技術の進展に関心が寄せられている。ただし、電気サーボシステムのPWM駆動方式においては、できるだけ搬送周波数を高くすることが望ましいのに対し、空気圧システムでは電磁弁のむだ時間と切替時間に制限され、搬送周波数が高くとれず、制御系を設計する時にPWM電磁弁を比例要素と仮定できないといった問題が生じる。すなわち、電磁弁がむだ時間と切替時間を有しており、搬送周波数を高くするほど弁の流量特性が著しく非線形になることから、PWM電磁弁の特性を十分に考慮してシステムの設計を行うことが必要となる。

以上より本研究の目的をつぎに述べる。

(1) 空気圧システムに発生するスティックスリップ現象の発生メカニズムを理論解析により導出し、各パラメータがシステムに及ぼす影響について検討する。また、PWM電磁弁について、弁のむだ時間と切替時間を考慮した数学モデルを確立し、PWM駆動した場合の弁特性について解明する。

(2) (1)で得られた結果より、システムの応答性を向上するために摩擦力補償制御法とDuty比指定PWM駆動法を提案する。そして、数値シミュレーションと実験の両面から検討し、提案する制御法の有効性を確認する。また、その一つの応用として、調節弁用ダイヤフラム・モータのポジション部にパルス幅変調方式を導入し、性能向上を図る。

本論文は8章から成り、以下に各章ごとの概略を述べる。

第1章は緒言であり、空気圧駆動システムの歴史と現状、その技術的な課題を明らかにするとともに、本研究の目的と進め方について述べている。

第2章では流量比例弁による空気圧駆動システムの構成及びシステムの数式モデルについて説明している。比例弁の入・出力特性とシステムに存在する摩擦力の特性を実験で調べ、システムの動特性を表す基礎式を導出した。また、これら基礎式を線形化することによってシステムのブロック線図を導出し、システムの制御構成を解説している。本章の内容は第3章以降の理論解析の基礎となっている。

第3章では、空気圧駆動システムのスティックスリップ現象について理論解析を行い、スティックスリップを発生する範囲と限界を検討している。まず第2章で導出された基礎式に基づいて負荷の運動を規定する微分方程式を確立する。次に非線形振動理論によってこの運動系の特異点の安定性について検討し、そして特異点が渦状点である時のスティックスリップの発生限界を求め、その発生領域を二つの無次元量を用いて整理した。これにより空気圧システムの諸条件が与えられた時に簡単な計算を行うことでスティックスリップが発生するか否かを判断することが可能になった。さらにこれらの各パラメータがスティックスリップの発生メカニズムに及ぼす影響を理論的に検討し、負荷質量、静止摩擦力とクーロン摩擦力との差、空気の圧縮性については小さいほど、逆に粘性抵抗係数については大きいほど、スティックスリップ現象が抑えられることが明らかになった。

第4章では、非線形摩擦力補償を用いた制御法を提案し、その有効性を検討している。システムの減衰率を高めるために、シリンダ両室の圧力をフィードバックした結果、スティックスリップ現象をある程度抑制できるが、システムに機械摩擦力が存在するために制御出力に定常制御偏差が生じてしまう。この問題を解決するために、本研究では、システムに存在する最大静止摩擦力とクーロン摩擦力の実験データを用いて摩擦力補償制御を実現した。設計した制御器は、機械摩擦力の影響を単純に除去するのではなく、制御目標値に近づく時に摩擦力の補償を減らし、目標値から離れる時に摩擦力の補償を強め、定常の時に制御偏差の有無を判定し、最終的に制御偏差がなくなるように補償信号を発生する。数値シミュレーションと実験により、摩擦力補償を用いたシステムがスティックスリッ

ブ現象を発生させることなく良好な応答を得られることが確認できた。

第5章は電磁弁をPWM駆動した場合の数学モデルを導出し、その特性について解析を行っている。電磁弁の動特性はむだ時間と切替の遅れ時間を有するため、変調信号のDuty比と弁開度との関係が非線形になってしまう。本研究では、これらむだ時間と弁開度との相関関係を明らかにすることによって、任意のDuty比入力に対する弁の特性を4つの切替時間パラメータで表現する数式モデルを導出している。この数式モデルにもとづき、PWM電磁弁のDuty比-有効断面積関係を求める方程式を導出することができた。これによって弁の4つの時間パラメータが与えられた時は、簡単な計算によって各搬送周波数の下での電磁弁のDuty比-有効断面積関係を得ることが可能となった。計算結果と実験結果を比較することにより、PWM電磁弁のDuty比-有効断面積の関係は、搬送周波数の低い時に比例関係となる帯域を持ち、搬送周波数が除々に高くなると比例する帯域が崩れ、曲線の傾きが搬送周波数の増加とともに大きくなることが確認できた。計算結果が実験結果とほぼ一致しているため、導出した弁の変位モデルとDuty比-有効断面積方程式の妥当性が確認できたと言える。ここで得られた結果は次章の空気圧駆動システムにPWM制御法を適用する場合の設計根拠となっている。

第6章では、電磁弁をPWM駆動したときの非線形特性を考慮した上で、空気圧駆動システムにPWM制御法を適用する場合について考察を行った。まず、システム設計に当たり、電磁弁の特性を平均有効断面積とDuty比の関係で表示し、制御偏差をゼロにするように定常状態のDuty比の表現式を導出している。次に、システムの出力に現れる搬送周波成分の問題と弁の非線形特性に起因する振動的な挙動の問題について検討を行った。そしてこれらの問題点を改善するために、定常Duty比の表示式に一つの変数を与えて、Duty比指定PWM駆動法を提案している。提案したDuty比指定法により、弁の定常Duty比を弁特性の不感帯及び非線形部分を除いた、良好な範囲にDuty比を指定できることになる。これより、システムの制御流量特性が改善され、応答性が著しく向上することを確認できた。本章の結果により、市販の電磁弁で構成された制御システムにおいて、従来は困難とされていた高搬送周波数制御が簡単に実現できることが証明できた。

第7章では、ダイヤフラム・モータ～ポジション系の性能向上のために、ポジション部にパルス幅変調方式を導入し、その有用性を検討する。具体的には、電磁弁を用いてPWM方式ポジションを試作し、実験的にその有用性を確認するとともに、構成した制御系の厳密な数値計算モデルを構築し理論的な見地からも提案したシステムの有用性を示している。パルス幅変調方式を採用したことにより、従来のシステムに比較して、高性能化が図られ、出力端剛性の周波数帯域の拡大が実現された。

第8章は結言であり、本論文で得られた結果を要約し、結論と今後の研究展望を述べている。