



外乱オブザーバによる非線形システムの制御系設計に関する研究 : 非干渉化制御系の構成法と最適設計法

林, 信男

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1995-09-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1443

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001443>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	リン 信 男 (台湾)
博士の専攻分野の名称	博士(学術)
学位記番号	博い第243号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与の日付	平成7年9月30日
学位論文題目	外乱オブザーバによる非線形システムの制御系設計に関する研究 —非干渉化制御系の構成法と最適設計法—

審査委員	主査 教授 高 森 年
	教授 赤 澤 堅 造 教授 上 田 完 次

論文内容の要旨

概要：

世の中に実存するシステムはほとんど非線形システムであり、しかもそのモデルは正確に分からない場合が多い。特にロボットマニピュレータのような多入出力の非線形システムの場合、各入出力が非線形的に干渉し、制御系の設計が非常に困難である。このようなシステムの制御系を設計する場合、まず何らかの方法で入出力の非線形干渉を非干渉化かつ線形化する事が考えられる。非干渉化することにより、対象のシステムは一入力一出力かつ線形システムとなるので、これより従来の線形制御理論を用いて容易に設計する事が可能となる。

近年多入出力の非線形システムを対象として、微分幾何学的アプローチに基づく非線形制御理論が非常に注目を集めている。中でも非線形システムの厳密な意味での非干渉化及び線形化の研究が進み、そのための条件あるいは制御系の導出法などの研究が多くなされている。ところが、このようなアプローチを現実のシステムに適用しようとする場合、制御系が非常に複雑になる場合が多く現実的な方法とは言えない場合が多い。しかも対象とするシステムのモデルが正確に分かっていなければ非干渉化あるいは線形化制御系を構成する事ができず、現在のところ、特殊な例を除いて現実のシステムでこのようなアプローチが成功した例はあまり見られないようである。

そこで、本論文の第一の目的として、一般的な広いクラスの多入出力の非線形システムを対象として外乱オブザーバを用いて入出力の非干渉かつ線形化する構成法を提案する。提案する構成法は現実の多くの多入出力非線形システムに適用できると考えられ、微分幾何学的アプローチの厳密な非干渉化制御法とは異なり近似的ではあるが、システムの正確なモデルが分からない場合でも適用できるといふ利点がある。しかも制御系も非常に簡単となり、実用性の高い方法であると考えられる。

一方、FAやFMSにおける生産活動がより多様化かつ高度化するに伴い、産業用ロボットの役割がますます高度化し、高速応答・高精度などより高い制御性能を持たせるための制御法の開発が強く要求されている。中でも特に減速機構を用いていないDD(Direct Drive)ロボットはバックラッシュや摩擦等の影響を受けないため、高い制御性能を持たせることができると期待されている。ところが、

ロボットにおいては、関節間の干渉力が非常に大きくなるため、多入出力の非線形制御系として取り扱わなければならない、高速・高精度なモーションコントロールの為の制御系の設計は非常に困難なものとなる。ロボットマニピュレータのこのような非線形干渉を考慮した制御法はこれまでにいくつか提案されてきているが、この研究の多くは、各関節においてロボットを非干渉化するのみで、作業空間における各自由度を入力から見て非干渉化した制御系とはなっておらず、ロボットの作業の意味での非干渉化とは言えない。

そこで、本論文の第二の目的として、先に提案した外乱オブザーバによる非線形システムの非干渉化制御法に基づいて、各関節の干渉力が特に問題となるDDロボットを対象として作業空間における非干渉化法を提案する。これによりロボットの入力からみて作業空間での手先の位置と速度を完全に非干渉化する制御系が自然に得られる。そのため、提案する方法は従来外乱オブザーバを用いたロボットマニピュレータの非干渉化制御法の多くとは異なり、作業空間における手先の運動を入力から見て非干渉化するため、その自由度方向毎に独立に制御系が設計でき、しかもオブザーバの設計と作業空間での軌道制御系の設計を統合的に行う事ができるという利点を持っている。

さらに、第三の目的として本制御系の制御性能を高めるため、提案した外乱オブザーバを用いたサーボ系に2自由度制御系の考えを用い、 H_∞ 最適理論により最適設計を行うことを提案する。本設計法は、制御目的としての参照入力への追従誤差と入力エネルギーを評価関数とし、外乱と観測ノイズの影響を最小化するものである。従来の設計法では、外乱オブザーバとサーボコントローラを別々にした制御系において外乱と観測ノイズを考慮して設計を行う。これに対して本設計法では、さらに入力特性を考慮するため、外乱オブザーバを用いたサーボ系全体に注目した。これにより、外乱オブザーバだけではなくサーボコントローラも同時に決定されるため、外乱とノイズと入力を同時にバランスよく取りながら望ましい追従性能を持つ最適な制御系が比較的簡単に設計できることになる。一方、本研究では制御系の設計が難しい対象、特に非線形特性が強く、正確なモデルが得にくい空気圧系を制御対象として、本最適設計法を空気圧アクチュエータのロボスト制御に適用した。これにより、空気圧系を線形化かつ非干渉化する外乱オブザーバの構成法は状態空間表現で明確にすることになる。また、構成された外乱オブザーバの構成法には空気圧シリンダーの出力信号変位と室内圧力のみを使い、音速と亜音速におけるそれぞれの状態での外乱を簡単に推定できるという利点がある。

以上、提案された外乱オブザーバの構成法、外乱オブザーバによる非干渉化制御法、外乱オブザーバを用いた制御系の最適設計法が各目的にかなうことを確認するため、本論文ではそれぞれの提案方法を試作3軸DDロボットあるいは空気圧シリンダーに適用し、それを用いて行った実験結果によりその有効性を実証する。まとめると本論文の内容は次のようになる。

1. 提案した外乱オブザーバの構成法（高次元外乱オブザーバとVSS外乱オブザーバ）を試作3軸DDロボットに適用し、DSPを用いてディジタル制御系として非干渉化制御系を実現した。これを用いて行った実験結果は従来の外乱オブザーバを用いた場合のと比較され、本構成法の有効性を示す。
2. 提案した外乱オブザーバによる非線形システムの非干渉化制御法に基づいて、3軸DDロボットの作業である作業空間における外乱オブザーバを用いてロボットの入出力を非干渉化する制御法をディジタル制御系として実現した。これを用いて行った実験結果を前項の関節空間における非干渉化制御法と比較することにより本制御法の有効性と実用性を示す。
3. 提案された最適設計法を直動型空気圧シリンダーの位置制御系と速度制御系に適用し、ディジタル制御系を構成することにより、軌道追従の実験を行った。制御系はそれぞれが指定された

参照目標値の重み関数に応じて設計され、望ましい位置制御と速度制御が精度よく行えることを確認する。

論文審査の結果の要旨

世の中に実存するシステムはほとんど非線形システムであり、しかもそのモデルは正確に分からない場合が多い。特にロボットマニピュレータのような多入出力の非線形システムの場合、各入出力が非線形的に干渉し、制御系の設計が非常に困難である。このようなシステムの制御系を設計する場合、まず何らかの方法で入出力の非線形干渉を非干渉化かつ線形化する事が考えられる。非干渉化する事により、対象のシステムは一入力一出力かつ線形システムとなるので、これより従来の線形制御理論を用いて容易に設計する事が可能となる。

近年多入出力の非線形システムを対象として、微分幾何学的アプローチに基づく非線形制御理論が非常に注目を集めている。中でも非線形システムの厳密な意味での非干渉化及び線形化の研究が進み、そのための条件あるいは制御系の導出法などの研究が多くなされている。ところが、このようなアプローチを現実のシステムに適用しようとする場合、制御系が非常に複雑になる場合が多く現実的な方法とは言えない場合が多い、しかも対象とするシステムのモデルが正確に分かっていなければ非干渉化あるいは線形化制御系を構成する事ができず、現在のところ、特殊な例を除いて現実のシステムでこのようなアプローチが成功した例はあまり見られないようである。

そこで、本論文の第一の目的として、一般的な広いクラスの多入出力の非線形システムを対象として外乱オブザーバを用いて入出力の非干渉化かつ線形化する構成法を提案する。提案する構成法は現実の多くの多入出力非線形システムに適用できると考えられ、微分幾何学的アプローチの厳密な非干渉化制御法とは異なり近似的ではあるが、システムの正確なモデルが分からない場合でも適用できるという利点がある。しかも制御系も非常に簡単となり、実用性の高い方法であると考えられる。

一方、FAやFMSにおける生産活動がより多様化かつ高度化するに伴い、産業用ロボットの役割がますます高度化し、高速応答・高精度などより高い制御性能を持たせるための制御法の開発が強く要求されている。中でも特に減速機構を用いていないDD (Direct Drive) ロボットはバックラッシュや摩擦等の影響を受けないため、高い制御性能を持たせることができると期待されている。ところが、ロボットにおいては、関節間の干渉力が非常に大きくなるため、多入出力の非線形制御系として取り扱わなければならない、高速・高精度なモーションコントロールの為の制御系の設計は非常に困難なものとなる。ロボットマニピュレータのこのような非線形干渉を考慮した制御法はこれまでもいくつか提案されてきているが、この研究の多くは、各関節においてロボットを非干渉化するのみで、作業空間における各自由度を入力から見て非干渉化した制御系とはなっておらず、ロボットの作業の意味での非干渉化とは言えない。

そこで、本論文の第二の目的として、先に提案した外乱オブザーバによる非線形システムの非干渉化制御法に基づいて、各関節の干渉力が特に問題となるDDロボットを対象として作業空間における非干渉化法を提案する。これによりロボットの入力からみて作業空間での手先の位置と速度を完全に非干渉化する制御系が自然に得られる。そのため、提案する方法は従来外乱オブザーバを用いたロボットマニピュレータの非干渉化制御法の多くとは異なり、作業空間における手先の運動を入力から見て非干渉化するため、その自由度方向毎に独立に制御系が設計でき、しかもオブザーバの設計と作業空間での軌道制御系の設計を統合的に行う事ができるという利点を持っている。

さらに、第三の目的として本制御系の制御性能を高めるため、提案した外乱オブザーバを用いたサーボ系に2自由度制御系の考えを用い、 H_∞ 最適理論により最適設計を行うことを提案する。本設計法は、制御目的としての参照入力への追従誤差と入力エネルギーを評価関数とし、外乱と観測ノイズの影響を最小化するものである。従来の設計法では、外乱オブザーバとサーボコントローラを別々にした制御系において外乱と観測ノイズを考慮して設計を行う。これに対して本設計法では、さらに入力特性を考慮するため、外乱オブザーバを用いたサーボ系全体に注目した。これにより、外乱オブザーバだけではなくサーボコントローラも同時に決定されるため、外乱とノイズと入力を同時にバランスよく取りながら望ましい追従性能を持つ最適な制御系が比較的簡単に設計できることになる。

一方、本研究では制御系の設計が難しい対象、特に非線形特性が強く、正確なモデルが得にくい空気圧系を制御対象として、本最適設計法を空気圧アクチュエータのロバスト制御に適用した。これにより、空気圧系を線形化かつ非干渉化する外乱オブザーバの構成法は状態空間表現で明確にすることになる。また、構成された外乱オブザーバの構成法には空気圧シリンダーの出力信号変位と室内圧力のみを使い、音速と亜音速におけるそれぞれの状態での外乱を簡単に推定できるという利点がある。

以上、提案された外乱オブザーバの構成法、外乱オブザーバによる非干渉化制御法、外乱オブザーバを用いた制御系の最適設計法が各目的にかなうことを確認するため、本論文ではそれぞれの提案方法を試作3軸DDロボットあるいは空気圧シリンダーに適用し、それを用いて行った実験結果によりその有効性を実証した。

以上のように、本研究は外乱オブザーバによる非線形システムの非干渉化制御に関し一般性を重視した展開を行ったものであり、ロボット制御技術を発展させていく上で重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者林信男は、博士（学術）の学位を得る資格があると認める。