

学位論文題名

Robust Control Design for Systems with both Parametric Variation
and Unstructured Uncertainty

(パラメータ変動と非構造的な不確かさを同時に含むシステムに対するロバスト制御)

学位論文内容の要旨

近年、ロバスト制御の研究が注目されている。これはすべての実際の制御対象が変動や不確かさなどを含んでいることが原因である。制御系設計を制御理論に基づいて行うには制御対象のモデルが必要であるが、モデルは対象に関する知識の不足、環境の変化および制御対象の経年変化、設計のための簡略化の必要性などの要因で不完全なものしかあり得ない。一方、フィードバック制御の基本的な目的としては、系の安定化と制御性能（目標値追従特性、外乱除去特性、低感度特性など）の改善の二つがあげられる。ロバスト制御は制御対象の特性が多少変動しても系の安定性を保証した上で性能が著しく劣化しないく頑健な制御を意味する。制御対象の不確かさはパラメータ変動と非構造的な不確かさの2種類に分けられる。それらを同時に大きく含んでいる制御対象に対して、これまでは、制御の基本的な目的を達成するのは困難であった。本研究は、この問題点に関して新たなロバスト制御系の設計法を提案している。

これまで、ロバスト制御の手法が数多く提案されており、そのうち、主に注目されているのは H_∞ 制御である。 H_∞ 制御において、ロバスト安定性と制御性能を混合感度問題としたシステム設計法はほぼ確立された。しかし、以下の問題点が存在している。

(1) H_∞ 制御で用いられるロバスト安定定理は小ゲイン定理である。確かに、小ゲイン定理は非構造的な不確かさのみを含む制御対象に対してフィードバック系のロバスト安定の必要十分条件を与えている。しかし、パラメータ変動と非構造的な不確かさを同時に含む実際の制御対象に対して、小ゲイン定理ではパラメータ変動を非構造的な不確かさと区別せずノルム変動として扱うため、保守的な条件しか与えていない。この場合、制御性能を劣化させざるを得ない。

(2) H_∞ 制御では、制御性能を評価するのに、公称モデルに対する感度関数のみを用いる。公称モデルに対する感度関数が小さくても、不確かさを含んだ実際の制御対象に対して制御性能が良い保証がない。

一方、パラメータ変動のみを含む制御対象に対しては、Routh-Hurwitz安定の判別条件によって特性多項式のHurwitzロバスト安定の必要十分条件が与えられ、さらに、Kharil'tonov理論 (Kharil'tonov定理およびその拡張) によってパラメータ空間で安定領域を調べる手順を大幅に簡略化する可能性が示されている。

実際の制御対象は殆どパラメータ変動と非構造的な不確かさを同時に含んでいる。これらの制御対象に対して、本研究では、感度低減化問題および非構造的な不確かさに対するロバスト安定問題については、 H_∞ 制御理論と同じように取り扱うが、パラメータ変動に対して、パラメータ空間でKharil'tonov理論に基づき、ロバスト安定性を保証する。

Kharltonov理論はパラメータ空間で多項式のHurwitz安定性の必要十分条件を与えているので、制御性能を劣化させないような制御器が構成できる。

第一は、ロバスト安定化問題とロバスト制御性能問題を考慮するロバスト設計問題を新たに定式化している。前者の問題については、パラメータ変動を非構造的な不確かさと区別して、パラメータ変動に対して、Routh-Hurwitz安定の判別法によって特性多項式のHurwitz安定の必要十分条件を与え、非構造的な不確かさに対して、小ゲイン定理を用いて安定の必要十分条件を与える。その二つの条件を併せると、フィードバック系のロバスト安定の必要十分条件となる。後者の問題については、不確かさが存在する場合に対して、漸近追従と漸近外乱除去を考慮し、公称モデルだけではなく、実際の制御対象に対するロバスト感度低減化問題を考える。

第二は、ロバスト設計問題の混合条件を満たすようにLPF(Lowpass-filter)ループを用いたロバスト制御法(LLR)を提案している。LLR補償器は相補感度関数にローパスフィルタの特性を持たせるように構成される。相補感度関数は低周波域において1に近く、かつ高周波域において低ゲインであるので、低周波域でパラメータ変動が大きく存在し、かつ、高周波域で非構造的な不確かさが大きく存在しても、システムの感度特性とロバスト安定性のトレードオフをバランスよくとることができる。

第三は、Kharltonov理論を用いることにより制御器を構成するための計算を大幅に簡略化可能であることを示している。パラメータ変動モデルの係数が変動のパラメータの実アフィン関数である場合、特性多項式のHurwitz安定性については、パラメータポリトープの露出エッジだけを調べるだけで必要十分であることが知られている。特に、パラメータ変動モデルが区間プラントである場合、すべての設計条件が満たされるかどうかについては、そのCB集合だけを調べるだけで必要十分であることが知られている。

第四は、提案するLLR法をパラメータ変動と非構造的な不確かさが大きく存在する電気推進装軌式車両の走行制御に適用している。キャタピラによって走行する装軌式車両は、現在ではエンジンによって駆動されるのが一般的であるが、高機動性、高効率及び運動操作の簡素化などを達成するため、電気推進システムを用いて駆動することが有望視されている。装軌式車両における走行負荷トルクは、慣性トルク、直進抵抗トルク及び旋回抵抗トルクに分けて考えることができる。慣性トルクは車両の重量によって変わる。直進抵抗トルクは路面状況、坂の勾配度や車両の重量などにより変化する。旋回抵抗トルクは路面状況、坂の勾配度と車両の重量だけではなく、左右履帯の運動速度の比率により大きく変化する。装軌式車両の旋回は一般の自動車のように操作輪の回転方向を変える方法とは異なり、左右履帯の運動速度を変えることにより行われるもので、旋回抵抗は速度の比によって決まる。さらに、装軌式車両の作業環境は複雑であるので、制御対象のパラメータ変動と非構造的な不確かさの両方が大きいという問題がある。電気推進装軌式車両に高走行性能を持たせるためには、これらの不確かさに対して走行速度が影響を受けにくく、かつロバスト安定性を有する補償器が必要である。

本研究では、電気推進装軌式車両のモデルを導出し、パラメータ変動の範囲と非構造的な不確かさの大きさについても同定している。このモデルに対して、LLR法を適用し、走行制御系を構成し、さらに、この制御系が優れたロバスト性と負荷外乱抑圧特性をもつことをシミュレーションおよび実験により検証している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 谷 武 士
副 査 教 授 大 西 利 只
副 査 教 授 島 公 脩

学 位 論 文 題 名

Robust Control Design for Systems with both Parametric Variation and Unstructured Uncertainty

(パラメータ変動と非構造的な不確かさを同時に含むシステムに対するロバスト制御)

多くの制御対象は、非線形性と不確定性を含んでいるので、制御系設計時にはこれらの影響を考慮する必要がある。この問題に対して、非線形性に対しては線形時不変系で近似し、不確定性に対しては範囲のみが既知であるものとして、近似誤差と不確定性をこの線形時不変系の変動とみなすことにより、議論を簡略化する線形系のロバスト制御が盛んに研究されてきた。本論文では、この変動がパラメータ変動と非構造的変動で表現できるものとして、新たな制御系設計法についてまとめており、その主要な結果は次のように要約される。

- ①パラメータ変動と非構造的変動を含んだ制御対象に対して、ロバスト制御問題の新たな定式化を提案した。本定式化に基づいて、制御系を設計すると、パラメータ変動を非構造的変動と区別して対処することになるので、より良い制御性能が期待できる。
- ②定式化された混合条件を満たすように制御器の設計法を提案した。本設計法は、まずLPF (Low Pass Filter) ループを導入し、数值的にLPFのパラメータを決定することによって制御器の構成を行う。
- ③Kharitonov理論を用いることにより制御系構成時の計算が簡略化可能であることを示した。パラメータ変動モデルにおいて、変動するパラメータが線形条件を満たせば、定式化された混合条件については、ごく限られた領域を調べるだけで必要十分であるので、この簡略化方法は有効である。
- ④提案した方法を、電気推進装軌式車両の走行制御に適用し、実機に近いシミュレータ実験装置により検証した。この制御対象は非線形性と不確定性が比較的大きいが、提案した方法を適用することにより、ロバスト安定かつ高速な応答が可能になった。

以上のように本論文は、Kharitonov理論を制御系設計に適用して新たな制御系構成法を提案しており、制御工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。