

## 論文内容の要旨

### 博士論文題目

入力制約と局所最適性を考慮した非線形制御系設計

氏名 佐藤 康之

### (論文内容の要旨)

近年、非線形制御理論の分野で制御 Lyapunov 関数 (CLF) を用いた制御系設計法に関する研究が盛んに行われている。CLF は閉ループ系における Lyapunov 関数の候補となる関数であり、これを用いることで最適性やロバスト性を考慮しつつ制御系がシステムティックに設計できる。しかしながら、この設計法を実際のシステムに適用するためには、理論的に解決すべき問題が残されている。本研究では、CLF を用いた制御系設計法における二つの問題点を解決する。

一つ目は入力制約に関するものである。これまで、CLF を用いた制御系設計では、制御入力の一般化ノルムが制約される非線形システムに対する手法が提案されている。ところが、このノルム制約は、現実の制御問題で現れる制御入力の分割に必ずしも対応できず、例えばサーボ系の設計やフィードフォワードを用いた制御系設計には適用できない。

そこで本研究では、制御入力の分割に対応できる一般的な入力制約として凸入力制約を考え、この制約下での非線形制御系設計法を提案する。具体的には、局所制御 Lyapunov 関数の時間微分を最小化する入力を凸最適化によって導出する。これにより従来ノルム制約の場合の制御系設計法を凸入力制約に一般化できた。

二つ目は、局所的に線形最適制御と一致する大域的逆最適制御則の設計に関するものである。非線形制御を実際のシステムに適用する場合、大域的な漸近安定化だけでなく、局所的に線形制御系と同等の性能を保証することが望ましい。このような観点から、CLF を用いた制御系設計でも、局所的に線形最適制御則と一致するように大域逆最適制御則を設計する方法が提案されている。しかしながら、この設計法は厳密線形化可能な一入力システムにしか適用できない。さらに、バックステッピングと呼ばれる再帰的な設計法を用いているため、制

御系設計のプロセスが非常に複雑になるという問題点がある。

そこで本研究では、ロバスト厳密線形化の座標変換と入力変換を利用することで、厳密線形化可能な多入力システムに対して適用できる制御系設計法を提案する。提案法は、制御 Lyapunov 関数から直接、大域漸近安定化制御則を設計しているため、従来法に比べて設計プロセスが簡略化されている。さらに、線形近似系に対する LQ 最適制御則から容易に変換が可能であるという利点を持つ。

最後に、提案する二つの制御系設計法を磁気浮上系に適用し、数値シミュレーションと実機実験によってその有効性を検証した。

氏名	佐藤 康之
----	-------

(論文審査結果の要旨)

近年、線形制御理論が開発してきた種々の優れた設計手法を非線形システムの制御にも拡張する研究が世界の各地で活発に行われている。本研究もその試みの一つであり、制御 Lyapunov 関数 (CLF) を用いた2つの設計手法に関して新たな知見を与えている。

Lyapunov 関数は動的システムの安定性を論じる上で基本的な概念であるが、非線形の場合はこれを自動的に導出することはできず、対象の物理特性に鑑みて個別に与えるのが普通である。そこで非線形制御系の設計において閉ループ系にとって望ましい Lyapunov 関数(これを CLF と呼ぶ)が与えられたと仮定し、それを達成するフィードバック制御則を導くというアプローチが知られており、本論文ではこれを用いる。

まず、入力制約を考慮した非線形制御系設計法について論じている。CLF を用いて制御入力に関する一般化ノルム制約を満足する設計法は既に提案されているが、仮定がやや厳しく、実用化のために緩和が望まれていた。そこで本論文では、制御入力を分割して凸入力制約に一般化することにより、実用性の高い設計手法を提案している。

次に、局所最適性についての結果を導いている。非線形制御において大域的な漸近安定性が満たされることは不可欠であるが、さらに局所的に線形制御系と同等の性能が保証されれば望ましい。CLF を用いた設計法でも、局所的に線形の最適制御則と一致するような設計法が既に提案されている。しかし、この手法は厳密線形化可能な一入力系にしか適用できず、また再帰的な手続きを含むため複雑であるといった欠点があった。そこで本論文ではこれを改良して多入力システムにも可能な、より直接的な設計手法を提案している。

これらの手法の有効性は、制御対象として磁気浮上系を例にとり、シミュレーションと実機実験により検証している。

このように本論文は非線形制御の理論研究として優れたものであり、知能システム制御の分野において学術上・実用上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。