

氏名	十 河 拓 也
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	論工博第3448号
学位授与の日付	平成11年5月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Studies on Iterative Learning Control for Linear Systems (線形システムに対する反復学習制御に関する研究)

論文調査委員 (主査) 教授 足立紀彦 教授 山本 裕 教授 杉江俊治

### 論 文 内 容 の 要 旨

反復学習制御はロボットマニピュレータ等を一定の時間区間上で与えられた目標軌道へ繰り返しかつ高精度で追従させるための試行運転に基づく制御法である。この制御法は、適当な入力によって試行運転を行い、その出力結果と目標軌道との誤差を用いて入力信号を更新するというプロセスを繰り返すことで誤差を減少させるものである。これまで入力信号の更新を勾配法を用いて行う方法の有効性が実験的に知られていたが、その収束については十分な理論的考察はされていなかった。本論文は、線形システムを対象としてその収束条件や収束速度を理論的に明らかにするとともに、サンプル値系へ適用した場合のサンプル点間の誤差の性質について調べた結果をまとめたものであり、以下の6章から構成されている。

第1章では本研究の背景、従来法の問題点および本論文の概要について述べている。

第2章では連続時間線形システムを対象として入力信号の更新を勾配法を用いて行う反復学習制御について考察を行っている。その反復学習制御は目標軌道との誤差の関数ノルムを勾配法に基づいて最小化するものであり、収束条件は対象のシステムを既知部分と未知部分に分解した場合、未知部分の強正実条件となることが明らかになった。このことによって対象のシステムについて十分な情報があれば未知部分を強正実にすることができることから従来のものより適用範囲が広がれることを明らかにした。また、線形時不変システムの場合に伝達関数を用いて収束条件を判定する方法を明らかにし、構造的不確かさをなわちパラメータが区間として与えられる場合の収束条件も明らかにした。さらに、実システムへ応用する際に重要な入力の有界性や出力の目標軌道への一様収束性のための条件を与えた。

第3章では連続時間線形システムを対象とした反復学習制御の収束速度について考察を行い、測定誤差、初期化誤差およびシステムダイナミクスの揺らぎに対するロバスト性との関連を明らかにしている。

さらに、目標軌道との誤差のノルムに正則化項を加えてこれを最小化する問題とすることで、収束速度が指数関数的になりロバスト性を高めることができることを示した。

第4章では前章までに議論してきた反復学習制御をサンプル値系に適用する際の問題について検討している。反復学習制御では入力信号の更新に用いる入出力信号を記録する必要があるため従来よりサンプル値系として実現されることが多かったが、その場合に生じるサンプル点間における誤差についての詳しい考察はこれまでなされていなかった。そこで、

サンプル周期とサンプル点間における誤差の関係について調べた結果、もとの連続時間線形システムの伝達関数の相対次数が2以下ならばサンプル周期を十分短くすることによって、任意にサンプル点間における誤差を小さくすることができることが明らかになった。これによってサンプル値系の反復学習制御を出力のサンプル点における誤差の最小化問題とする従来から経験的に用いられてきた立場を理論的に裏付けることができた。

第5章では第4章で明らかにしたことを基礎として、サンプル点での誤差の最小化問題としての反復学習制御について考察を行っている。すなわち、離散時間線形システムの出力を連続時間での目標軌道をサンプルしたものへ一致させる反復学習制御について考察を行っている。そして、第2章で連続時間線形システムについて考えた共役システムを用いて入力信号を更新する反復学習制御を離散時間線形システムを制御対象として考察し、その収束条件、収束速度および測定誤差に対す

るロバスト性について明らかにした。また、対象のシステムを既知部分と未知部分に分解した場合、収束条件は未知部分の強正実条件に相当することを示した。第6章では全体のまとめを行っている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、反復学習制御、すなわち一定の時間区間で与えられた軌道への試行に基づいた追従制御法として知られている制御法のうち、勾配法に基づいた手法に関する研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 連続時間線形システムを対象として、入力信号の更新に共役システムを用いる反復学習制御の収束条件を明らかにした。また、不確かさがあるシステムに応用する際にその収束条件は未知部分の強正実条件に相当することを明らかにし、従来の方法より適用範囲が広いことを示した。

2. 連続時間システムを対象とした反復学習制御の収束速度の評価を行った。また指数関数的収束速度を保証してノイズに対するロバスト性を向上させるために正則化項を導入する方法を提案した。

3. 反復学習制御をサンプル値系へ適用する際、もとの連続時間系の伝達関数の相対次数が2以下の場合には出力のサンプル点においてのみ目標軌道に一致させるようにすれば、サンプル周期を十分小さくすることでサンプル点間での誤差も任意に小さくできることを示した。これによって、サンプル値系の反復学習制御の問題はサンプル点における誤差の最小化問題として定式化できることを明らかにした。

4. 離散時間システムの反復学習制御について考察をおこない、連続時間システムの場合と同様に入力信号の更新を勾配法を利用して行う方法の収束条件を明らかにした。

以上要するに、本論文は線形システムに対する、勾配法を応用した反復学習制御の収束性およびサンプル値系へ適用する際の種々の困難を克服する方法を検討したものであり、得られた結果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。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。また、平成11年4月6日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行なった結果、合格と認めた。