

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19760299

研究課題名 (和文) 補償器の選択機構を統合化した反復試行型制御の研究

研究課題名 (英文) On Iterative Learning Control and Iterative Feedback Tuning with A Switching Function of Compensators

研究代表者

浜本 研一 (HAMAMOTO KENICHI)

鹿島建設・技術研究所・主任研究員

研究者番号：70416717

研究成果の概要 (和文)：パワーショベルの掘削や台車の連結・分離のように、対象システムの動的モデルが大きく変化する場合を想定し、反復試行をする中で与えられた動作・軌道に追従できる制御系設計手法に関する研究開発を行った。本研究課題では対象とする系の変化に応じて補償器を選択する機構と反復試行型補償器設計法を統合化した設計手法を与えた。また対象システムの持つ物理パラメータの確率分布を事前情報として得られた場合に反復回数を評価する手法を与えた。

研究成果の概要 (英文)： This research is on iterative learning control and iterative feedback tuning with a switching function of compensators for the target systems whose dynamic model structure is varying according to environment, for example, the excavation of a backhoe or connection and separation of carts. In this research, new design methods are proposed, which is tuning the switch functions and the parameters of compensators simultaneously. And then the iteration number for the proposed method is evaluated based on the probabilistic distribution of the physical parameters of the system as the prior information.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	660,000	3,860,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

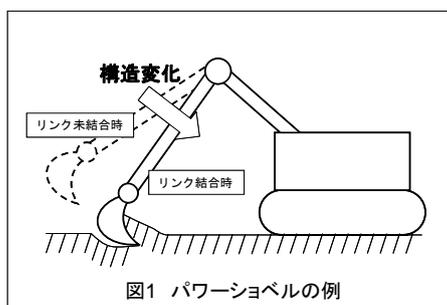
キーワード：制御理論, 反復学習制御, 強化学習, 軌道追従制御, 補償器選択, 台車系

1. 研究開始当初の背景

建設施工や災害救助活動で危険作業を行

う機械の自動化に対する要求は高いにも関わらず、単一の制御法・補償器では対処でき

ない問題点があるため、実用化には依然としてハードルが存在する。例えばパワーショベルでは、バケット内に取り込まれる土砂量を事前に知ることは困難であり、掘削時には対象の構造が変化する(図 1)。同様に複数台車を用いた協調搬送においても単独走行と協調走行では動特性は変化する。さらに狭隘部や、すれ違い時の走行を高精度に行うためには、多様な形状・重量の積載物に応じた補償器の切り替えが必要である。



ゆえに実用化を志向した場合、制御対象の大きな変動に対応して、補償器のパラメータを調整し、必要に応じて補償器そのものを切り替える制御系設計手法の研究が求められている。補償器を調整する制御系設計手法の一つに反復試行型制御系設計手法がある。当該手法では、実試行データに基づいて補償器を調整し、それを反復して行うことで、所期の制御性能をもつ補償器が得られる。一方で最適な補償器を切り替える手法としては強化学習や遺伝的アルゴリズムなどの統計学習理論が挙げられる。それぞれの手法に関しては多くの研究が行われてきたが、両者を統合した制御系設計手法の研究はまだ少なく、十分な研究がなされていない。

2. 研究の目的

本研究課題では、対象の未知量に対応して補償器パラメータの調整を行い、必要に応じて適当な補償器の構造を選択することで、所期の制御性能を達成する新たな反復試行型制御系設計手法の実用化に向けた研究を構想している。本構想の実現に向け、補償器パラメータを調整する手法として、フィードフォワード (FF) 補償器の調整には反復学習制御 (Iterative Learning Control, ILC) 法を、フィードバック (FB) 補償器の調整には Iterative Feedback Tuning (IFT) 法に注目して研究を行う。これらの手法を用いる理由は

- (1) 入出力データから直接補償器パラメータを調整できること
- (2) 本研究課題を行う以前に、ILC 法では対象に応じた補償器構造を用いることがで

きる反復学習制御手法が明らかになっていること

の 2 つである。また FF 補償器と FB 補償器のそれぞれに対して調整方法を分ける理由としては、FF 補償器には軌道追従特性を、FB 補償器には外乱除去特性を持たせるように役割分担をした二自由度系を構成したいからである。

一方切り替えなどの離散事象の学習については、統計学習理論の一つである強化学習を用いる。強化学習により補償器の選択機構を実現する理由は強化学習ではペナルティ関数値など適当な「報酬」を与えることで最適な切り替えパターンを学習することが可能であることにある。

またこれらの反復学習手法において、実用的な観点から事前情報量と所期の性能が得られるまでの反復回数に対する定量的評価手法は重要であるため、上記研究により得られた設計手法に対して反復回数の定量的評価手法の導出を行う。

3. 研究の方法

上記議論より、本研究課題の目的を、ア. ILC 法と補償器構造の選択機構の統合を行うこと、イ. アで導出した手法と IFT 法との統合を行うこと、ウ. 反復試行回数と事前情報量との関係性を定量化すること、とし、以下の項目を研究期間内に明らかにする。

- (1) ILC 法と補償器構造の選択機構を統合するために、必要な制御性能指標を明らかにする。
- (2) IFT 法に対して、リンク系・台車系の受動性やパラメータ線形性に考慮して拡張を行い、(1)で得られた反復試行型制御系設計手法と統合する。
- (3) (1)および(2)の手法に対して、事前に得ている情報量の計量方法の確立と、一定の反復試行回数で得られた補償器の性能の定量的な関係を明らかにする。

(1)では FF 補償器と補償器構造の選択機構の関係を明らかにし、(2)では FB 補償器との関係を明らかにする。(3)では、(1)及び(2)での研究結果を基に、導出された手法に対する事前情報量と反復試行回数の関係を定量化する。

4. 研究成果

本研究課題の主な成果を、研究の方法に従って以下に記し、得られた成果の研究目的に

対する進捗度の自己評価と今後の展望について述べる。

(1) ILC 法と補償器選択機構の統合

本研究では対象とするシステムを次のように仮定する。対象システムはリンク系・台車系のように入力 u が物理パラメータ α に対して線型性があり，システムの状態変数を q とすると次式で記述できるとする。

$$u = f(q, \dot{q}, \ddot{q})\alpha$$

ここで $\dot{q} = dq/dt$ であり， $f(\cdot)$ はシステムの構造から決まる関数で， q, \dot{q}, \ddot{q} のべき乗や $\sin q, \cos q$ との積和で表されるものとする。またシステムの構造 $f(\cdot)$ については既知であるが，物理パラメータ α については未知の場合を考える。

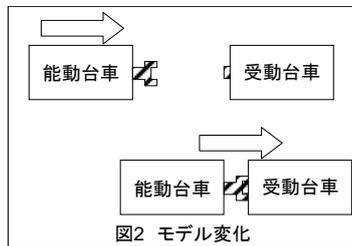
このような対象システムに対して，次のように構造が変動する場合を考える。初期状態では

$$\Sigma_1 : u_1 = f_1(q_1, \dot{q}_1, \ddot{q}_1)\alpha_1$$

であったものが，予め与えられた状態 q_r において

$$\Sigma_2 : u_2 = f_2(q_2, \dot{q}_2, \ddot{q}_2)\alpha_2$$

に切り換わる場合を考える。例として，アクチュエータを有する能動台車の軌道追従制御において，目標軌道の経路上，未知の位置に置かれているアクチュエータを持たない受動台車と結合して動作する場合が挙げられる (図 2)。



さらに，それぞれのシステム Σ_1, Σ_2 に対して q_r の推定値 \hat{q}_r が与えられた時に目標軌道が決まるとする。次の方策を用いて反復試行によって，どちらの系に対しても与えられた軌道に追従させる。

- ②補償器の切り替えは推定値 \hat{q}_r で行う。
- ①パラメータを ILC 法により選択された補償器のチューニングする。
- ③強化学習により追従誤差に応じて推定値 \hat{q}_r を更新する。

α_1, α_2 及び q_r が真値に近づけば，システムの状態も目標軌道を追従するように収束する。強化学習で用いる報酬には，それぞれの状態時の補償器によって生じる追従誤差や試行の反復回数を利用している。本手法により，物理パラメータや切り替えの状態が真値へ収束することを数値シミュレーションにより確認した。

(2) リンク系・台車系への IFT 法の拡張，及び(1)との統合

リンク系や台車系が有する受動性や物理パラメータに対する入力線形性などの特性を利用した Iterative Feedback Tuning 法の拡張法を導出した。提案する手法では次のことがいえる。

- ①システムが受動性を有するため，フィードバック補償器の構造を決める際に，受動性が保持されるように適当な入出力を選ぶことで，閉ループ系の安定性を保証することができる。数値シミュレーションの検証ではシステムの受動性から入出力間に簡易なフィードバックゲインを持つものとしている。
- ②入力が物理パラメータに対して線型であることや予め目標軌道を想定し，その近傍での振る舞いを考慮することで，最適化方向の導出に必要な線型時変システムの計算を容易にしている。

また調整を行うゲインについては物理パラメータに対する線型性を維持するように選択することで (1) で得られた設計手法との統合化が容易になる。また (1) の手法と統合する際は，FF 補償器と FB 補償器がそれぞれに軌道追従特性と外乱除去特性を有するよう二自由度系を構成することが重要である。

各補償器の調整法のチューニングについては次の通りである。

- ①対象システムは入出力に対して非線型であるため，フィードバック補償器の調整には軌道周りでの線型時変システムによる近似を行うために，所期の目標軌道の近傍で対象となる系が振舞うように，まず ILC を用いてフィードフォワード入力の調整を行う。
- ②フィードフォワード入力の調整により得られる系の物理パラメータ推定値を用いて，フィードバック補償器を調整する手法を考案した。

本手法の有効性を数値シミュレーションにより確認した。

(3) 事前情報量に対する反復試行回数の定量的評価

事前情報量と所期の軌道追従性能を達成する反復回数の定量的評価については，(1)の手法を対象とした。研究開始時の目的だけではなく，次の研究課題への対処法

にも利用可能なためである。(1)の手法において Σ_1 としてマニピュレータ単体、 Σ_2 として部材を操作するマニピュレータと考えたときに、 Σ_2 において複数の部材を扱うものとする。その際に部材の物理パラメータが有する分布の大きさに応じて補償器切替えの必要が判定できる。

そこで本研究課題では複数存在する対象システムはモデル構造としては同じであるが、物理パラメータが異なる場合を仮定し、目標軌道、物理パラメータの真値からの偏差及び追従誤差のノルムの上界から学習回数の上限を評価する方法を導出した。また物理パラメータの分布が与えられたときに、事前に学習するパラメータの選択方法について考察を行った。

(4) 研究目的に対する達成度

本研究課題の目的である(1)ILC法と補償器構造の選択機構の統合や(2)リンク系・台車系を対象としたIFT法との統合については、理論的考察が十分に行えており、数値シミュレーションによる検証ができています。(3)反復試行回数と事前情報量との関係性を定量化に関して、ILC法について評価手法が明らかになったことは、今後の実用化を考える上で重要な成果であると考えている。またこれらの制御系設計を検証するためのシミュレーションシステムや実験システムも構築した。理論的な研究が進んだ一方で、実用化を考えた場合、外乱や計測精度への対応策に関する検討が十分でないため、製作した実験環境を活用し今後とも検討を進める。

(5) 今後の展望

- ①外乱・ノイズに対する反復試行型制御手法のロバスト性を確保する手法について検討を進める。対象システムのモデル構造を用いて除去可能な外乱のクラスを明らかにすることや反復試行で得られたパラメータを用いて外乱を除去する手法を検討する。
- ②本研究課題の成果が適用可能なモデル構造を明確にする。まずは閉リンク構造を有するシステムへの対応方法について研究を進める。特に閉リンク構造ではパワーショベルの掘削作業（掘削地盤との相互作用）への適用を考慮した研究を行う。
- ③シミュレーションを活用した反復試行回数の低減化について検討する。実用上、再現性の高い環境を構築することは難しいため、シミュレーションを実動作計測データと併用することで実動作回数を少なくする方法について研究する。
- ④本研究課題の成果を建設機械の自動化

に活用するために、実際の建設機械への適用方法を検討する。適用に際しては、A. 複雑な構造を持つシステムのモデル化手法、B. 事前にモデル化できない地盤などとの相互作用、C. センシング可能な状態変数などを明らかにすること、等が重要であり、理論的発展にも寄与すると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜本 研一 (HAMAMOTO KENICHI)
鹿島建設・技術研究所・主任研究員
研究者番号：70416717

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし