

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760329

研究課題名（和文）非線形性・不確かさ・むだ時間を含むシステムの量子化制御

研究課題名（英文）Quantized control of nonlinear, uncertain, and delayed systems

研究代表者

東 俊一 (SHUN-ICHI AZUMA)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号：40420400

研究成果の概要（和文）：本研究では、実応用を志向した新たな量子化制御理論の確立を目指し、特に、非線形性・不確かさ・むだ時間が含まれる制御対象に対する量子化制御器の設計問題の検討を行なった。その結果、非線形システム、不確かさを含むシステム、むだ時間システムのそれぞれに対し、良好に動作する量子化制御器の導出に成功した。提案した制御器の有効性は、理論解析および数値シミュレーションによって確認した。

研究成果の概要（英文）：This study has addressed a problem of designing quantized controllers for complex systems including nonlinearity, uncertainty, and time delay. By considering the special properties of the difficult elements, we have derived quantized controllers achieving desirable performance in the resulting feedback systems. The performance of the proposed controllers has been analyzed by both theoretical and numerical methods.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2009 年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2010 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：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：量子化制御，量子化システム，非線形システム，不確かなシステム，むだ時間システム

1. 研究開始当初の背景

量子化制御とは？：これまでの制御理論研究において対象としていたシステムは、入出力信号が連続的な値（連続値）となるものであった。一方、現実のシステムでは、入出力信号が離散的な値（離散値）となる場合も多い。たとえば、ON/OFF 型の電磁弁がアクチュエー

タとして使われる場合や、高・中・低の3段階を出力する温度計がセンサとして用いられる場合などである。また、A/D・D/A 変換器の有限語長性によって、デジタル制御における入出力は、厳密には離散値となっていることや、遺伝子ネットワークの制御を考える際には、遺伝子を「発現させる」もしくは「抑制する」という二者択一の選択

しか、制御入力として利用できないこともある。このような離散値信号を含む動的システムの制御は「量子化制御」と呼ばれ、ハードウェアの限界を超える機能を制御アルゴリズムとして実現することが望まれている。

研究動向：量子化制御に関する研究は、古くは半世紀前までさかのぼることができるが、90年代の最後に、安定化に必要な信号の精細さが特徴付けられたことを契機に[Wong & Brockett 1999]、この10年間、盛んに研究がなされてきた。また、それと平行し、連続ダイナミクスと離散ダイナミクスが混在したハイブリッドシステムが注目を集め、それに対する制御理論としても多くの研究成果が得られている。ここ10年で、ようやく、制御対象が比較的単純な場合（線形システム）に対し、その問題の本質が明らかにされ、設計法の基礎が出来上がったといえる。しかしながら、つぎのステップとして実応用に向けた研究が重要と考えられるが、この点からは十分な成果が得られてはいなかった。特に、現実の制御対象には「非線形性」や「不確かさ」、さらには「むだ時間」が必ずといっていいほど含まれているが、そのような「扱いが困難な性質」を含むシステムを対象とした量子化制御は、ほとんど検討されていなかった。

着想に至った経緯：申請者らは、平成18年より、線形の制御対象に対する量子化制御理論の構築に取り組み、「動的量子化器の最適化理論」として、ひとつの枠組みを作り上げた[Minami, Azuma & Sugie 2007, Azuma & Sugie 2008a, Azuma & Sugie 2008b]。そこでは、制御系のロバスト性は考慮していなかったが、数々の実機実験を行なったところ、驚くほどにモデル化誤差や外乱に強いものになっていた。この事実を理論的に解明し、ロバスト性を厳密に保証できる設計法が必要であると感じていた。また、一般に、線形システムに対して作られた制御理論を、非線形システムへ拡張した際には、局所的にしか有効性が保証されなかったり、求解が困難な偏微分方程式を用いたものになることがほとんどである。したがって、実用性という点からは疑問が残る。しかし、申請者らは、上記の線形システムに対する「動的量子化器の最適化理論」の成果を、やや限られたクラスではあるが、非線形システムに対して拡張を行ない、大域的に最適性が保証される解析解を得ている[東, 杉江 2008]。このことは、一般の非線形システムに対しても、実用的な結果が得られる可能性を示唆するものであった。さらに、量子化制御の主要な応用分野として、遺伝子ネットワークなどの

バイオシステムが挙げられるが、そのような応用を考えるにあたっては、「非線形性」や「不確かさ」に加えて、「むだ時間」を考慮にいれることが必須である。

以上のような考察により、非線形性・不確かさ・むだ時間を含むシステムに対する量子化制御理論の構築が現実の制御問題を解決する上で必要になるとの考えに至った。

参考文献：

[Wong & Brockett 1999] Systems with Finite Communication Bandwidth Constraints-II: Stabilization with Limited Information Feedback, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 53, No. 9, pp. 2064/2075 (1999)

[Minami, Azuma, & Sugie 2007] An Optimal Dynamic Quantizer for Feedback Control with Discrete-valued Signal Constraints, Proceedings of 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2259/2264 (2007)

[Azuma & Sugie 2008a] Optimal Dynamic Quantizers for Discrete-Valued Input Control, Automatica, Vol. 44, No. 2, pp. 396/406 (2008)

[Azuma & Sugie 2008b] Synthesis of Optimal Dynamic Quantizers for Discrete-Valued Input Control, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 53, No. 9, pp. 2064/2075 (2008)

[東, 杉江 2008] 離散値入力型制御のための最適動的量子化器：非線形システムへの拡張, 第37回制御理論シンポジウム, pp. 159/162 (2008)

2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究では、実応用を志向した新たな量子化制御理論の確立を目指した。特に、非線形性・不確かさ・むだ時間という、現実のシステムに必ず含まれる性質を考慮にいたした量子化制御器の設計法の開発を具体的な目標とした。

そのために、つぎの3つの課題を設定し、取り組むことにした。

(課題1) 性能解析: 与えられた制御対象に対して、量子化制御器が与えられたとき、その性能を評価する。

(課題2) 制御器設計: フィードバック制御系が所期性能を持つような量子化制御器を導出する。

(課題3) 応用: 実システムへの応用可能性を検証する。

(課題1)では、性能を評価するための公式もしくは評価値の計算アルゴリズムを得るこ

とを目指した。これは、制御対象に含まれる非線形性・不確かさ・むだ時間が制御系に与える影響はどのくらいか？、ということを知るための基本的な課題である。(課題2)では、与えられた仕様を満たす量子化制御器の実用的な設計アルゴリズムの開発を目的としている。(課題3)は、(課題1)と(課題2)の成果が実際にどの程度使えるのかを検証するために設定されている。

3. 研究の方法

現在の入力値に加え、過去の入力情報も利用して現在の量子化出力を定める量子化器を動的量子化器という。この動的量子化器の例としては、制御対象の振舞いを予測して量子化を行うモデル予測量子化器や、信号処理分野で発達してきた $\Delta\Sigma$ 変調器などが挙げられ、その性能は、制御工学者のこれまでの常識をはるかに超えることが知られている。

本研究では、この点に着目し、量子化制御器の構造を、「通常のフィードバック制御器」と「動的量子化器」の結合系と限定した。そして、前者のフィードバック制御器は、従来の制御系設計理論¹で設計されたものを用いることとし、後者の動的量子化器に設計の自由度があるものと仮定した。すなわち、量子化制御器の設計問題を、動的量子化器の設計問題に置き換えることとした。このような設定において、制御対象が、非線形システム、不確かさを含むシステム、むだ時間システムの場合それぞれに対して、有効に動作する動的量子化器の導出を試みた。

4. 研究成果

(1) 制御対象が非線形システムの場合

本研究では、入力アファインシステム²と呼ばれるクラスの非線形システムを扱った。その結果、以下の成果を得た。

① いくつかの仮定の下ではあるが、最適な動的量子化器を、制御対象のパラメータ(非線形関数)で構成される陽な関数系として導出した。本結果は、最適性能の上下界解析を通じて、問題の持つ特殊構造を見つけ出したことで得られたものである。

② 最適量子化器の構造解析を行い、それが、

¹ 制御対象に連続値入力が適用できる場合の制御系設計理論。

² $x(t+1) = f(x(t)) + g(x(t))u(t)$ と記述されるシステム。ここで、 x は状態、 u は入力、 t は離散時刻、 f 、 g はシステムを記述する非線形関数である。

量子化器を含むシステムと含まないシステムの差(誤差システム)によって解釈できることを示した。具体的には「誤差システムの逆システムの近似」を含んでいることを明らかにした。また、制御対象が最小位相系の場合に限って、最適量子化器が安定になることも明らかにした。

③ 最適性能を達成するための量子化器の次数(動的量子化器の状態変数の次元)のタイトな上界が、制御対象の次数の2倍であることを証明した。②と③の結果によって、非線形システムに対する最適動的量子化器のメカニズムが明らかになった。

④ ①はいくつかの仮定がある場合の結果であるが、その仮定が成り立たない場合でも、実用的な動的量子化器を導出する方法を与えた。この結果によって、適用可能な制御対象の範囲を広げることができる。

(2) 制御対象が不確かさを含む場合

このシステムの典型例として、DC/ACインバータが挙げられる。実際、DC/ACインバータでは、接続負荷が一定ではなく、変動が起こることが常である。本研究では、このシステムを対象として、動的量子化器の設計問題を検討した。得られた結果は以下の通りまとめられる。

① 制御対象が変動する場合の動的量子化器の設計アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは、パラメータ依存型線形行列不等式に基づくものであり、比較的短時間で有効な量子化器を導出することができる。

② 通常、DC/ACインバータには、パルス幅変調器が用いられるが、本研究で導出した動的量子化器は、パルス幅変調器に比べて、40%程度高い性能を持つことを数値シミュレーションによって明らかにした。また、未知の負荷(負荷の変動)に対しても、常に安定した性能が得られることも示した。

(3) 制御対象がむだ時間を含む場合

むだ時間を、シフトオペレータ $1/z$ で表現し、既存の成果[Azuma & Sugie 2008a, Azuma & Sugie 2008b]に帰着することによって、有効な動的量子化器が導出できることを確認した。

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2件)

[1] 東 俊一、吉村 僚太、杉江 俊治：変調器のモデルベース設計によるDC/ACインバータの高効率化、計測自動制御学会論文集、

Vol. 46, No. 8, pp. 493/500 (2010) 査読有

[2] 東 俊一, 杉江 俊治: 非線形システムに対するモデルマッチング量子化, 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 7, pp. 356/360 (2009) 査読有

[学会発表] (計 1 件)

[1] Shun-ichi Azuma and George J. Pappas: Discrete Abstraction of Stochastic Nonlinear Systems: A Bisimulation Function Approach, 2010 American Control Conference, Baltimore, MD, USA, June 30, pp. 1035/1040 (2010) 査読有

[その他] (計 3 件)

(1) 受賞

本研究を含む研究代表者の一連の成果に対し, 2011 年度 計測自動制御学会 制御部門 パイオニア賞が授与された (2011 年 3 月 17 日).

参考: <http://www.sice-ctrl.jp/jp/wiki/wiki.cgi/c/academic?page=FrontPage>

(2) 特集号の編集

本研究に関連し, 学術雑誌のゲストエディタに選任され下記の特集号の編集を行った.

[1] 杉江 俊治, 東 俊一 (編集): 特集 量子化制御: 物理と情報をつなぐ新技術, 計測と制御, Vol. 49, No. 11 (2010)

また, 本特集号において 3 本の解説記事を寄稿した.

[2] 南 裕樹, 東 俊一, 杉江 俊治: ハーフトーン画像処理: 画像の量子化による情報圧縮, 計測と制御, Vol. 49, No. 11, pp. 808/813 (2010) 査読有

[3] 東 俊一, 杉江 俊治: 離散値入力フィードバック制御のための動的量子化器, 計測と制御, Vol. 49, No. 11, pp. 795/800 (2010) 査読有

[4] 杉江 俊治, 東 俊一: 量子化制御: 物理と情報をつなぐ新技術, 計測と制御, Vol. 49, No. 11, pp. 771/775 (2010) 査読有

参考: <http://www.sice.or.jp/~journal/moku49-11.html>

(3) 招待講演

本研究を含む一連の研究に関して, 6 件の

招待講演を行った.

[1] 量子化制御: 物理と情報をつなぐ新技術, パイオニア賞受賞記念講演, 琉球大学 千原キャンパス, 3 月 18 日 (2011)

[2] 量子化制御: 物理と情報をつなぐ新技術, IEEE Circuits and Systems Society, Kansai Chapter 技術講演会 ハイブリッドシステムとその応用, 大阪大学 豊中キャンパス, 2 月 9 日 (2011)

[3] 量子化制御: 物理と情報をつなぐ新技術, 計測自動制御学会 中国支部 講演会, 岡山県立大学, 1 月 27 日 (2011)

[4] 量子化制御 II: 動的量子化器の設計, 京都大学 大学院 工学研究科 電気工学専攻 「応用ハイブリッド工学」講義, 京都大学 桂キャンパス, 11 月 17 日 (2010)

[5] 量子化制御 I: 量子化制御の基礎, 京都大学 大学院 工学研究科 電気工学専攻 「応用ハイブリッド工学」講義, 京都大学 桂キャンパス, 11 月 10 日 (2010)

[6] 量子化制御: 動的量子化器によるアプローチ, 計測自動制御学会 北陸支部 講演会, 北陸先端科学技術大学院大学, 10 月 22 日 (2010)

※ すべて一時間以上の講演時間であり, [1] の受賞記念講演を除いて, 講演料が発生した.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 俊一 (SHUN-ICHI AZUMA)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 40420400