

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009 年度 ～ 2012 年度
 課題番号：21360202
 研究課題名（和文）超解像制御とソフトスペック制御
 -超低解像度信号による高機能システムの実現-
 研究課題名（英文）Super-Resolution Control and Soft-Specification Control;
 Realization of Systems with High Functionality
 研究代表者
 杉江 俊治（SUGIE TOSHIHARU）
 京都大学・大学院情報学研究科・教授
 研究者番号：80171148

研究成果の概要（和文）：低解像度信号に基づく制御系設計理論の基礎を構築するために、量子化入力に基づく超解像制御、量子化出力に基づく超解像制御、およびソフトスペック制御の観点から考察し、以下の結果を得た。まず、量子化入力に関しては、動的量子化器をマルチレート系へ拡張し、最適性能および最適動的量子化器の構成法に関する基礎的結果を得た。また、非線形システムへも拡張し、制御入力に対してアファインな非線形システムに対しては、解析的な解を導出した。さらに、新しいツールとして、ランダムディザを利用する手法について検討し、その有効性を理論的に明らかにした。量子化出力制御に関しては、射影を利用することにより観測雑音に耐性のある一つのシステム同定手法を得た。そして、システムモデルと低解像度出力情報に基づいて、システムの状態を高精度で推定する手法に関していくつかの基礎的な結果を得た。一方、ソフトスペック制御に関しては、問題の数学的な定式化を行い、目標状態を含む有界不変集合を安定化する問題という形で記述した。そして、周期入力の場合に関しては、システムの状態が所望の不変閉曲線を辿るような周期入力の設計法を示した。さらに実用安定化による目標軌道の緩い追従を実現する手法を提案し、移動ロボットによりその有効性を実験検証した。

研究成果の概要（英文）：Super-resolution control based on quantized input/output and softly specified control problems are considered to establish a fundamental control framework based on low-resolution signals. As for quantized input control, dynamic quantizers are extended to multi-rate systems, and a design method of optimal dynamic quantizers is proposed with its optimal performance. Also, it is extended to a class of nonlinear dynamical systems. An analytical solution is obtained for input affine systems. Furthermore, a new type of quantizers which utilize dither signals are discussed, and its performance is analyzed. As for quantized output control, a noise tolerant system identification method is proposed based on signal projection. A few methods have been developed to reconstruct the system state based on the system models and the quantized output. As for softly specified control, a mathematical framework is given to describe the stabilization problem in term of bounded finite invariant sets. For systems with periodic input, a method to produce relevant inputs to keep the system trajectory in an invariant set. Furthermore, a method is proposed to achieve soft tracking via practical stabilization techniques, and its effectiveness is validated through some experiments using mobile robots.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
平成 23 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
平成 24 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	8,100,000	2,430,000	10,530,000

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：離散値信号・システム同定・線形制御系・量子化器・非線形システム

1. 研究開始当初の背景

1. 1 本課題の重要性

既存のほとんどの制御系設計理論においては、制御対象の入出力信号は連続値であることを前提にしている。しかし、現実のアクチュエータやセンサではそのような前提を満たせない場合も多い。

たとえば、ON/OFF 型デジタル電磁弁や低解像度の D/A 変換器を用いる場合などである。信号の低解像度化は、制御装置の低コスト化・ロバスト化に直結する。また、近年注目されているネットワークを介した制御システムにおいては、通信容量制約の観点からも入出力信号の低解像度化が望まれている。さらに、低解像度信号制約のもとで実現可能なシステム機能を明確化することは、大規模複雑系を対象としたこれからの制御論に不可欠となる。

このような観点から、低解像度信号に基づいて高機能を実現する制御系設計理論を構築する本研究課題は、次世代制御研究において最も重要なものの一つとなる。

1. 2 関連する研究動向と位置づけ

情報論的観点から信号の解像度に関する研究があるが、実用的な制御手法を与えるものではない。また、モデル予測制御の手法を適用して入力離散値化を行なう方法もあるが、手法が複雑で計算負荷が高い。これに対して、最もシンプルな解決法の一つは、連続信号を離散値信号に変換する量子化器を採用することである。通常の量子化器は静的であり、現時点の連続信号の値だけにに基づき離散値を定める。これに対して、申請者らは、信号の過去の履歴を利用して現在の離散値を定める動的な量子化器に着目し、これを適切に用いれば、粗い精度の離散値入力を用いても、高解像度の連続値入力と同等の制御性能が実現できることを近年示している。

1. 3 着想に至った経緯

申請者らは、動的量子化器に関して、連続時間系において時間分解能を考慮にいたした簡易設計法、および離散時間系において厳密な最適性を保証した動的量子化器の導出などの成果を挙げている。また、非線形系に対しても、動的量子化器とは異なるが、入力が粗い離散値に制約された場合の制御手法を与えている。本研究はこれらを基礎としているが、今後、マルチレートサンプリングやダイナミクスの非線形性などの実用上重要な点を考慮して展開する必要がある。

また、動的量子化器に関する成果は、出力

が量子化された場合（多段階センサによる観測など）には適用できないため、新たに情報復元問題を考える必要がある。

さらに、低解像度の入出力信号を用いる場合、漸近安定性・目標値追従特性といった既存の仕様に固執することは現実的ではなく、非効率な結果を生むことも多い。むしろ問題設定自体を捉え直し、状況が許す限りのソフトスペックのもとで制御系設計を行う枠組みが必要となる。たとえばカモメの飛行では、精密な位置決め制御と捉えるより、羽のラフな制御による安定な概周期運動への移行を制御目的と捉えるほうが自然である。このような観点は低解像度信号を用いた制御の問題のみならず、広く非線形系・生物系の制御において重要となる。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究の目的は低解像度信号に基づく制御系設計理論の基礎を構築することである。低解像度信号に基づく制御系設計理論の基礎を構築するために、以下の諸点に問題を分割する。

- (A) 情報圧縮：量子化入力に基づく超解像制御
- (B) 情報復元：量子化出力に基づく超解像制御
- (C) ソフトスペック制御：機能に応じて緩和表現された制御仕様と、その低解像度信号による達成

(A) では、申請者らの動的量子化器の成果を基礎として、マルチレートサンプリングの場合や、ダイナミクスが非線形の場合へ適用できるようにし、低解像度入力下での制御系設計法を確立する。

(B) では、低分解能センサの出力から、システムの内部状態を推定する方法の検討を行なう。特に、システム情報が不可欠になると思われるので、システム同定を含め、制御に必要な情報量を明確にした上で、これに取り組む。

(A)と(B)を通して、「超解像制御」(ダイナミクスなどの付加的情報を利用することにより、低解像度の信号を用いるにも拘わらず、通常ならばその解像度を超えた信号でなければ達成できない制御性能を、実現する制御法)の確立を目指す。

(C) では、対象システム・制約・機能に応じて制御仕様を適切に緩和することにより、低解像度信号のもとでもこれを自然に達成でき、かつ目標機能を保持する制御系構築の枠

組み（その性質の解析，実現可能条件，具体的な設計法）を確立する。

3. 研究の方法

(A) 情報圧縮

制御対象，制御器，量子化器で構成されるフィードバック制御系を考える。このフィードバック制御系の性能は，量子化の影響量によって測られる。このとき，性能を最適化する量子化器を特徴付け，その性能限界を明らかにする。

特に，申請者らが，平成 17 年度より進めている動的量子化器に関する研究基礎とし，実応用を考えた際に避けることができない

- ・ 複数のサンプリング周期が存在する場合
- ・ ダイナミクスが非線形な場合
- ・ 量子化器を実装するデバイスが簡素な場合
- ・ 制御対象がマルチエージェントシステムのような大規模系の場合

に，上述の問題の解を与える。

これらは，理論研究，シミュレーション実験，実機実験を通して明らかにされる。

(B) 情報復元

低解像度の出力センサ情報からシステムの内部状態を推定するには，システムモデルの精度が重要な役割を果たす。このため，入出力データからシステムモデルを構築するシステム同定に着目し，厳しい観測雑音の下で高精度なモデルを構成する手法を与える。特に物理パラメータとの整合性が良い連続時間モデルの同定手法について考察し，その有効性を数値シミュレーションや実験検証により明らかにする。

また，モデル情報と低解像度の出力センサ情報に基づきシステムの内部状態を推定する手法について検討した。まず，状態に関する拘束条件を陽に考慮し，凸最適化問題として定式化する手法について考察した。つぎに，統計的な情報にもとづき，粒子フィルター等を用いて状態を推定する手法について考察した。シミュレーションや基礎実験によりその有効性を検証した。

(C) ソフトスペック制御

ソフトスペック制御は，目標機能を大まかに保持できる緩い仕様を実現するものである。そのためには制御系が達成すべきこと・達成できることは何かを明らかにする必要がある。本課題では，これらの問題を目標状態への微小時間での到達および可到達性というかたちで定式化し，またそれをフィードバック制御として実装するための条件を可安定性という観点から特徴づける。

また，ソフトスペック制御の実際の設計法として，大きく分けてつぎの二つの方向からアプローチする。

- ・ 入力側からのアプローチ：用いる制御入力を低周波の周期信号（低解像度信号）に固定し，仕様の達成を周期ダイナミクスの安定性に帰着する方法
- ・ 出力側からのアプローチ：指定した範囲への定式化し，それを実現するフィードバック制御器を設計する方法

さらに，申請者らがこれまで集中的に研究を行ってきた各種移動ロボットをモデルに用いて，数値的あるいは実験的にソフトスペック制御の有効性を検証する。

4. 研究成果

(A) 情報圧縮

①マルチレート動的量子化器

従来，動的量子化器は単一周期の離散時間系に対して提案されていたが，それを複数のサンプリング周期が存在する場合について，拡張した。特に，最適性能および最適動的量子化器の構成法に関する基礎的結果を得た。またフィードバック制御系の枠組みでの最適性を考え，その性能限界についても考察した。

②非線形動的量子化器

非線形システムに対する最適な動的量子化器の導出を行った。特に，制御入力に対してアファインな非線形システムに対しては，線形系の場合と同様にして，最適な動的量子化器を解析的に導出できることを明らかにした。さらに，この成果を，入力に対してアファインでない場合へと拡張した。

③ランダムディザ量子化器

離散値入力制御のための新しいツールとして，ランダムディザ量子化器の検討を行った。まず，フィードバック制御系におけるランダムディザ量子化器の性能の上界を導出した。そして，その量子化器が，極めて簡単な構造を持つにも関わらず，高性能な離散値入力制御を実現するものであることを理論的に証明した。また，その量子化器の動作周期と制御性能との関係を明らかにした。

さらに，量子化器を含まない理想的なシステムのインパルス応答行列がすべて同じ符号である場合，一様確率分布によるランダムディザ量子化器がある種の最適性を有することを証明した。

④牧羊犬による羊群の制御

超解像制御が自然界で実践されている例として、牧羊犬による羊群の制御の検討を行った。これをマルチエージェントシステムとしてモデル化し、自然界に存在している超解像制御のメカニズムの一端を明らかにした。

(B) 情報復元

①連続時間モデルの同定

センサの低解像度を補うのはシステムモデルの情報であるため、高精度なシステム同定手法の確立は本課題の基盤となる。特に物理モデルと整合性の良い連続時間モデルの同定に着目した、問題となるのは、観測雑音に耐性のある手法を如何に確立するかである。この問題を、適切な空間への射影を用いる手法で解決した。また入出力データについても、時系列データだけでなく周波数領域データでも扱えるものを提案した。その有効性は詳細な数値シミュレーション検討により、示されている。

また、量子化された出力データに基づいて、対象システムのモデルを求める手法についても検討し、粒子群最適化手法がこれに有効であることを確認した。

②低解像度出力に基づく状態推定

システムモデルの情報に基づき、各時刻の出力観測値からシステム状態の存在範囲を推定することができる、これが出力観測値の時系列情報をもいれば、より高精度な状態推定が可能となる。これを凸最適化問題として定式化し、基礎的な有効性を検証した。

一方、確率統計的な考え方に基づき、低解像度の出力情報からシステムの状態を推定する手法について検討し、粒子フィルターを利用することにより、これが可能であることを確認した。

(C) ソフトスペック制御

①ソフトスペック制御の達成可能条件

目標状態の近傍に緩く留まり続けるという制御仕様を、目標状態を含む有界不変集合を安定化するという形で定式化した（この問題はリミットサイクルの安定化を特殊な場合として含む）。このような仕様は安定な周期アトラクタを持ち得ない線形システムでは決して達成できないため、対象を非線形システムとして扱うことが不可欠である。本課題では、目標状態の微小時間可到達性 (STLC) を仮定すれば極限集合が目標状態を含む不変閉曲線となるような制御入力が存在することを示した。また、その制御を状態フィードバ

ックとして実装する場合には、不連続あるいは時変なフィードバック則を用いることが必須であることを導いた。

②低解像度信号と周期的ダイナミクスの安定性を利用したソフトスペック制御

前項で述べた通り、ソフトスペック制御の達成法の一つは目標状態を含む不変閉曲線を漸近安定化することである。そこで本課題では制御入力のクラスを低周波の周期入力に限定した、システムの状態が所望の不変閉曲線を辿るような周期入力の設計法を示した。またその周期入力の設計には一定の自由度があり、適切に選択すれば不変閉曲線が漸近安定になることを周期ダイナミクスの解析によって示した。これらの結果をヘビ型ロボット、三又ヘビ型ロボットおよび球体型ロボットの移動制御問題に適用し、その有効性をシミュレーションおよび実験によって検証した。

③実用安定化による目標軌道の緩い追従

ソフトスペック制御のもう一つの達成法は、目標状態を含む球状近傍を漸近安定化する、すなわち実用安定化を行うことである。本課題では、目標状態を通り、あらかじめ指定した半径（以下、許容半径）をもつ球面を漸近安定化するフィードバック制御則を設計し、これを三又ヘビ型ロボットの経路追従問題に適用して検証を行った。結果として生じるロボットの移動経路は、目標経路を一定の範囲で逸脱しながら蛇行する曲線となる。またこの方法を実機に適用して実験を行い、指定した許容半径とロボットの挙動の関係を仔細に検証した。特に、許容半径を小さく取れば目標経路からの逸脱は小さくなるがセンサの雑音を増幅して不安定な挙動を示し、許容半径を大きくすると逸脱は大きくなるもののノイズ耐性が向上してゆったりと自然なロコモーションが行えることを見出した。後者はまさにソフトスペック制御が目指していた、緩い制御仕様のロバストな達成を実現した例であるといえる。

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 14 件）

①北卓人, 石川将人, 大須賀公一, 横断関数法を用いた三又ヘビロボットの動的フィードバック制御実験, システム制御情報学会誌, 査読有, Vol.26, No.7, 2013 (採録決定)

②R. Morita, S. Azuma, T. Sugie, Performance Analysis of Random Dither Quantizers in Feedback Control Systems,

SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 21–27

DOI: 10.9746/jcmsi.6.21

③東俊一, 田淵絢子, 杉江俊治, 牧羊犬制御のモデル化, 査読有, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 12, 2012, pp. 882–888

DOI: 10.9746/sicetr.48.882

④東俊一: 量子化信号による制御, 査読有, システム/制御/情報, Vol. 56, No. 6, 2012, pp. 302–305

http://ci.nii.ac.jp/els/110009457712.pdf?id=ART0009928374&type=pdf&lang=jp&host=cinii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1368236975&cp=

⑤J.-H. Park, S. Azuma and T. Sugie: Fault-Tolerant Control for LPV Systems Based on Fault Compensator, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 5, No. 5, 311-318 (2012.9)

DOI:10.9746/jcmsi.5.311

⑥S. Azuma, T. Sugie, Dynamic Quantization of Nonlinear Control Systems, 査読有, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 57, No. 4, 2012, pp. 875–888

DOI: 10.1109/TAC.2011.2167824

⑦ R. Morita, S. Azuma, Y. Minami, T. Sugie, Graphical Design Software for Dynamic Quantizers in Control Systems, 査読有, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 4, No. 5, 2011, pp. 372–379

DOI: 10.9746/jcmsi.4.372

⑧森田亮介, 東俊一, 杉江俊治, マルチレート制御系の動的量子化, 査読有, システム制御情報学会論文誌, Vol. 24, No. 5, 2011, pp. 109–118

DOI: 10.5687/iscie.24.109

⑨杉江俊治, 益田哲也: 量子化出力を用いた粒子フィルタによる状態推定, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 24, No.1, 16--22 (2011.1)

⑩和田 堯, 杉江俊治: 射影に基づく周波数領域でのシステム同定, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 46, No. 9, pp. 532-538 (2010.8)

⑪S. Azuma, T. Sugie, Stability Analysis of Optimally Quantized LFT-Feedback Systems, 査読有, International Journal of Control, Vol. 83, No. 6, 2010, pp. 1125–1135

DOI: 10.1080/00207171003614831

⑫石川将人, 藤野隆弘, 周期ダイナミクスの解析に基づく2リンク三叉ヘビロボットの制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.46, No.5, 2010, pp. 266-273

DOI: 10.9746/sicetr.46.266

⑬石川将人, 北吉良平, 和田堯, 丸田一郎,

杉江俊治, R/C サーボモータのモデリングと劣駆動機械系への応用, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.46, No.4, 2010, pp. 237-244
DOI: 10.9746/sicetr.46.237

⑭Y. Minami, S. Azuma, T. Sugie: Multirate-Sampling Dynamic Quantizers for Non-Minimum Phase Linear Control Systems, 査読有, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 2, No. 4, 2009, pp. 229–235
DOI: 10.9746/jcmsi.2.229

〔学会発表〕(計 16 件)

①石川将人, 非線形システムの新平衡点近傍における有界不変集合の解析, 計測自動制御学会第 41 回制御理論シンポジウム, 2012 年 9 月 19 日, 横須賀

②S. Azuma, Broadcast Control of Multi-Agent Systems, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011 年 12 月 12 日, オランダ (アメリカ)

③M. Ishikawa, a Spherical Mobile Robot with Eccentric Twin Rotors, IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO2011), 2011 年 12 月 9 日, プークェット (タイ王国)

④森田亮介, 最適なランダムディザ量子化器に関する一考察, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011 年 11 月 19 日, 豊橋

⑤T. Sugie, Fault-tolerant control for LPV systems based on fault compensator, 18th IFAC World Congress, Milan, (2011.8.30)

⑥田淵絢子, 牧羊犬制御のモデリング, 第 55 回 システム制御情報学会 研究発表講演会, 2011 年 5 月 19 日, 大阪

⑦濱野 晃, Particle Swarm Optimization を用いた量子化出力下における同定, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 大阪, (2011.5.19)

⑧吉村僚太, 不完全情報に基づくブロードキャスト制御, 第 11 回制御部門大会, 2011 年 3 月 17 日, 沖縄

⑨朱 洪忠, Reconstruction of Plant Output Based on Quantized Measurements for LTI Systems--A Polynomial Fitting Approach, 第 39 回制御理論シンポジウム, 大阪, 2010.9.27--29, pp. 183--186 (2010.9.27)

⑩森田 亮介, フィードバック制御系におけるランダムディザ量子化器の性能解析, 第 39 回制御理論シンポジウム, 大阪, 2010.9.27--29, pp. 223--226 (2010.9.28)

⑪森田亮介, フィードバック制御系におけるランダムディザ量子化器の性能解析, 第 39 回制御理論シンポジウム, 2010 年 9 月 28 日, 大阪

⑫吉村僚太, マルチエージェントシステムのブロードキャスト制御, 第 39 回制御理論シンポジウム, 2010 年 9 月 28 日, 大阪

⑬M. Ishikawa, Control of Snake-like Robot based on Nonlinear Controllability Analysis, IEEE International Conference on Control Applications (CCA10), 2010年9月14日, 横浜

⑭M. Ishikawa, Control of multiple left-invariant systems on Lie groups using less control inputs, SICE Annual Conference 2010, 2010年8月20日, 台北 (台湾)

⑮森田亮介, フィードバック制御系に対するマルチレート動的量子化器, 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010年5月21日, 京都

⑯北村 聡美, 量子化出力を用いた線形システムの状態推定, 第10回制御部門大会, 熊本, 2010.3.16--18, 163-1-2 (2010.3.16)

[その他]

ソフトウェア

動的量子化器設計 CAD ツール「ODQ Lab」

<http://www.robot.kuass.kyoto-u.ac.jp/odq-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

杉江 俊治 (SUGIE TOSHIHARU)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：80171148

(2)研究分担者

石川 将人 (ISHIKAWA MASATO)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20323826

東 俊一 (AZUMA SHUN-ICHI)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号：40420400