

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05889

研究課題名(和文) 実用化を目指したネットワーク化制御における制御性能とデータ量子化の同時最適制御

研究課題名(英文) Simultaneous Optimal Control of Control Performance and Data Quantization in Networked Control Systems Aimed at Practical Applications

研究代表者

残間 忠直 (Zanma, Tadanao)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20324543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：通信技術の発達により、ネットワークを介したリアルタイム制御系(以下、ネットワーク制御系)に注目が集まっている。ネットワーク化制御系の応用例として、無線で制御可能な遠隔医療や無人航空機、センサーネットワークなどの様々な分野が挙げられる。ネットワーク化制御系は、通信路容量を考慮して系を安定化する必要がある。そこで本研究では、可変量子化器を導入して適切にデータを量子化し、制御対象の将来の挙動を予測するためにモデル予測制御を導入し、制約条件を満たしながら量子化パラメータと入力と同時に最適化する手法を提案した。この手法を倒立振り子の制御に適用し、シミュレーションと実験によってその有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：With the development of communication technology, attention is gaining attention to a real-time control system via a network (hereinafter referred to as a network control system). Application examples of networked control systems include various fields such as telemedicine, unmanned aerial vehicles, and sensor networks that can be wirelessly controlled. In the networked control system, various countermeasures are required to stabilize the system. In this research, we have introduced a dynamic quantizer such that the data is appropriately quantized, and model predictive control for predicting plant behavior, and proposed an optimum control of the quantized parameter and the input while satisfying constraints. We applied the proposed method to an inverted pendulum to verify its effectiveness by simulation and experiment.

研究分野：電気工学

キーワード：ネットワーク化制御 最適制御 モデル予測制御

1. 研究開始当初の背景

2020年には日本が世界に先駆けて様々な分野でロボットが実用化されることを目指している。これまで我々は、災害対応や介護用などの制御対象は物理的に離れた距離から制御されることに着目して、通信を介したネットワーク化制御に関して研究してきた。IEEEでもネットワーク制御の論文誌が立ち上がったことなどから、この分野が学術的に重要であることが伺える。ネットワーク化制御では制御対象とコントローラ間で送受信されるデータの量子化(データの間引き)を考慮しなくてはならない。このときデータの量子化が適切に行われないと、制御対象に所望の動作を実現することができない。本研究ではそのような問題に対して、制御対象の制御性能とデータ量子化の最適手法を開発し、理論的にシステムの最適性を保証し、実験検証によって研究の有効性を明らかにする。

2. 研究の目的

官邸主導の「ロボット革命実現会議」では、実用的な災害対応・水中探査・遠隔医療ロボット開発を国が積極的に推進するとしている。これらのロボットは通信を介した制御(以下、ネットワーク化制御)によって、操作者と距離を隔てても操作することが可能となる。ただし、所望の動作をロボットに実現させるためには、ネットワークの容量制限を超えないように適切にデータを量子化する必要がある。制御性能とデータ量子化を一括した新たな設計論を開発する必要がある。本研究では、ネットワーク化制御系における、データ量子化と入力最適制御手法を理論的に開発し、その有効性を実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

制御対象のシミュレーション環境をMatlabで構築し、その状態を任意の量子化幅で取得できるようにし、利用する状態情報によって最適な分解能の制御対象の挙動を明らかにする。はじめに、制御対象とサーバ間のネットワークの実験環境を構築する。ネットワークの通信容量を考慮して最適な量子化幅と最適な入力系列をモデル予測制御によって導出する。これらの有効性をシミュレーションおよび実験によって明らかにする。

4. 研究成果

(1) 最適量子化フィードバック制御

問題設定：

一般的な対数量子化器 $q: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{D}$ は以下のように表される。

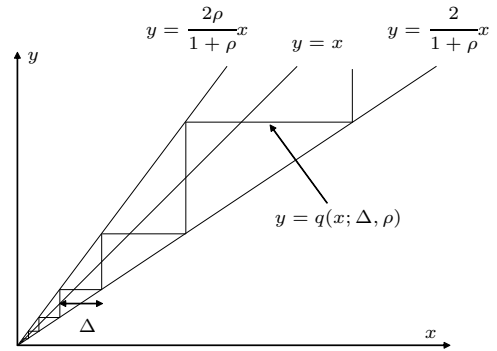


図 4.0.1 一般的な対数量子化器.

Fig. 4.0.1. Standard logarithmic quantizer.

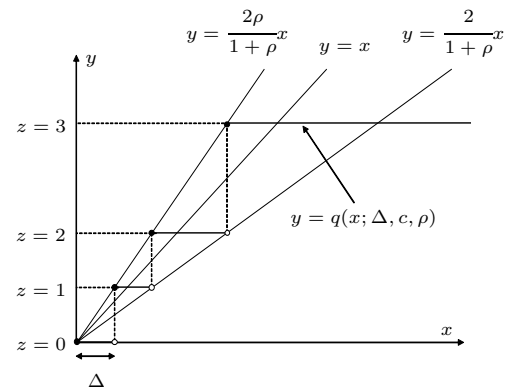


図 4.0.2 提案する対数量子化器 ($M = 3$) .

Fig. 4.0.2. Proposed logarithmic quantizer ($M = 3$).

$$q(x; \Delta, \rho) = \begin{cases} \frac{2\rho^{v+1}}{1-\rho^2}\Delta & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -q(-x; \Delta, \rho) & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (4.0.1)$$

$$v = \left\lceil \log_{\rho} \left(\frac{\rho-1}{\Delta\rho} |x| \right) \right\rceil$$

ここで、 $\Delta > 0$ は量子化幅、 $\rho > 1$ は量子化器の粗さを表す尺度であり、量子化幅が1段増すごとに ρ 倍になることを意味する。また、状態ベクトル $x \in \mathbb{R}^n$ 、 $\Delta \in \mathbb{R}^n$ と量子化器の粗さ指数のベクトル $\rho \in \mathbb{R}^n$ 、 $q(x; \Delta, \rho)$ に対して、量子化器は $q(x; \Delta, \rho) := [q(x_1; \Delta_1, \rho_1) \ \dots \ q(x_n; \Delta_n, \rho_n)]^T$ のように拡張される。

図 4.0.2 に本節で用いる動的対数量子化器 $q(x; \Delta, c, \rho)$ を示す。この量子化器には、基準量子化幅 $\Delta \in \mathbb{R}^n$ および量子化中央値 $c \in \mathbb{R}^n$ のパラメータがある (ρ は固定)。量子化中央値 c は量子化器の原点の座標に対応し、これと基準量子化幅 Δ を時変にすることにより追従制御に拡張できる。基準量子化幅 Δ は量子化器の原点の段の量子化幅で定義され、

$$\Delta_i(k) = \underline{\Delta}_i I_i(k) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.0.2)$$

と変化させることで量子化器の量子化幅の伸縮を実現する。ここで、 $\underline{\Delta}_i > 0$ ($i = 1, \dots, n$) はセンサの最小分解能など

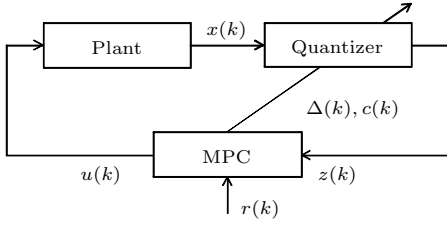


図 4.0.3 量子化フィードバック制御系 .

Fig. 4.0.3. Quantized feedback control system.

で与えられる基準量子化幅である . $I_i(k)$ ($i = 1, \dots, n$) は量子化幅の伸縮のための変数であり, $I_i(k)$ ($i = 1, \dots, n$) が増加すれば量子化幅が拡大し, 減少すれば縮小する . 本節では $I_i(k)$ ($i = 1, \dots, n$) を離散変数として扱う . 本節の量子化器では, 基準量子化幅が存在するため基準量子化幅以下の値が切り捨てられ 0 になること, および量子化器の段数が有限であるためある値以上の入力が入ると量子化器が飽和することが, 図 4.0.1 に示すような一般的な対数量子化器と異なる . 状態の各要素に対する量子化器の段数 M_i ($i = 1, \dots, n$) を飽和値と呼ぶ .

量子化フィードバック制御系を図 4.0.3 に示す . 図 4.0.3 において, 量子化器は制御対象の状態 $x(k)$ を 1 ステップ前の時刻の量子化幅 $\Delta(k-1)$ および量子化中央値 $c(k-1)$ によって量子化し, 符号化された状態 $z(k)$ を MPC に送信する . MPC では, 制御対象の状態 $x(k)$ は直接得られず, $z(k)$ から復号された量子化状態 $q(x(k); \Delta(k-1), c(k-1), \rho)$ のみが得られる . その量子化された状態と制御対象モデルから制御対象の将来の状態を予測し, 最適な量子化パラメータ $\Delta(k), c(k)$ および入力値 $u(k)$ を求める . この最適入力値 $u(k)$ は制御対象に入力され, 同時に量子化パラメータ $\Delta(k)$ および $c(k)$ によって量子化器が更新される .

符号化された状態の各要素 $z_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) とそれを復号して得られる量子化された状態 $q(x_i(k); \Delta_i(k-1), c_i(k-1), \rho_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) を以下のように定義する .

$$z_i(k) = \begin{cases} v_i(k) & \text{if } x_i(k) - c_i(k-1) \geq \Delta_i(k-1) \\ 0 & \text{if } |x_i(k) - c_i(k-1)| < \Delta_i(k-1) \\ -v_i(k) & \text{if } x_i(k) - c_i(k-1) \leq -\Delta_i(k-1) \end{cases} \quad (4.0.3)$$

$$v_i(k) = \left\lceil \log_{\rho_i} \frac{|x_i(k) - c_i(k-1)|}{\Delta_i(k-1)} \right\rceil$$

$$q(z_i(k); \Delta_i(k-1), c_i(k-1), \rho_i) = \begin{cases} \frac{2\rho_i^{z_i(k)}}{1+\rho_i} \Delta_i(k-1) + c_i(k-1) & \text{if } z_i(k) > 0 \\ c_i(k-1) & \text{if } z_i(k) = 0 \\ -\frac{2\rho_i^{z_i(k)}}{1+\rho_i} \Delta_i(k-1) + c_i(k-1) & \text{if } z_i(k) < 0 \end{cases} \quad (4.0.4)$$

符号化された $z(k)$ は整数値であり, この情報量に相当する値 $\sum_{i=1}^k M_i$ は通信路の容量より小さいとする . さらに, 状態の取得に移動カメラなどのビジュアルセンサを用いる場合を想定すると, 1 サプリングでそのカメラが移動できる量には物理的な制約が存在するため, 以下のような仮定を設ける .

仮定 4.1. 量子化器のパラメータについて, 以下の制約を満たすものとする .

(1) 量子化幅 Δ_i ($i = 1, \dots, n$) は以下の制約を満たすものとする .

$$\Omega_i \Delta_i(k-1) \leq \Delta_i(k) \leq \Omega_i^{-1} \Delta_i(k-1) \quad (4.0.5)$$

ここで Ω_i は $0 < \Omega_i < 1$ を満たす定数である .

(2) 量子化中央値 c_i ($i = 1, \dots, n$) は以下の制約を満たすものとする .

$$|c_i(k) - c_i(k-1)| \leq d_i \quad (4.0.6)$$

ここで $d_i > 0$ は c_i の変化の度合いの上限に相当する定数である .

また状態を量子化器が飽和することなく量子化するために以下の制約を設ける .

$$|z_i(k)| \leq M_i - 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.0.7)$$

(4.0.1), (4.0.3) および (4.0.7) 式をまとめると以下のようになる .

$$-\Delta_i(k)\rho_i^{M_i-1} \leq x_i(k+1) - c_i(k) \leq \Delta_i(k)\rho_i^{M_i-1} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.0.8)$$

追従制御を実現するための単純な方法として $r(k) = c(k)$ とする方法があるが, これは量子化器のパラメータに関する制約 (4.0.5) および (4.0.6) 式と状態を飽和せずに量子化しなければならない制約 (4.0.7) 式を同時に満足することができなくなることがあるため, 本節では制約を満足させるために $c(k)$ を設計変数とする .

MPC を用いた量子化フィードバック制御 :

図 4.0.3 の MPC において最適な量子化パラメータ $I(k)$, $c(k)$ および $u(k)$ を決定するため, 以下の評価関数を用いる .

$$V(q(k), \Delta(k-1), c(k-1), r(k)) = \sum_{i=0}^{N_p-1} \left(\|x(i|k) - r(k+i)\|_{2, Q_1}^2 + \|u(i|k)\|_{2, Q_2}^2 + \|\Delta(i|k)\|_{2, Q_3}^2 + \|c(i|k) - r(k+i)\|_{2, Q_4}^2 + \|x(N_p|k) - r(k+N_p)\|_{2, Q_f}^2 \right)$$

ここで, $Q_i \succeq 0$ ($i = 1, 2, 3, 4$) は重み行列であり, $Q_f \succeq 0$ は代数リカッチ方程式

$$A^T Q_f A - A^T Q_1 B (B^T Q_f B + Q_2)^{-1} B^T Q_1 A + Q_1 - Q_f = 0. \quad (4.0.9)$$

を解くことによって得られる．時刻 k において，(4.0.9) 式の評価関数を制約条件下で最小化する $u(k)$ ， $\Delta(k)$ および $c(k)$ を求めることが目的である．(4.0.9) 式の物理的な意味合いについて説明する．(4.0.9) 式の第 1 項によって状態を目標値に近づけ，第 2 項によって入力を抑制する．第 3 項によって Δ を減少させることでより精細な状態を得る．第 4 項によって量子化中央値を目標値に近づける．第 5 項によって予測区間最後の状態をより重要視して安定度を高める．

予測する N_p ステップ分の入力解系列を $U(k) = \{u(0|k), u(1|k), \dots, u(N_p - 1|k)\}$ と表し，同様に予測する量子化幅系列および量子化中央値系列を，それぞれ $\Delta(k) = \{\Delta(0|k), \Delta(1|k), \dots, \Delta(N_p - 1|k)\}$ および $C(k) = \{c(0|k), c(1|k), \dots, c(N_p - 1|k)\}$ と表す．最適入力，量子化中央値および量子化幅系列 $U^*(k)$ ， $\Delta^*(k)$ および $C^*(k)$ は，以下の最適化問題を解くことによって得られる．

$$\{U^*(k), \Delta^*(k), C^*(k)\} = \underset{\{U(k), \Delta(k), C(k)\}}{\operatorname{argmin}} V(q(k), \Delta(k-1), c(k-1), r(k))$$

subject to

$$x(0|k) = q(k), \quad x(i+1|k) = Ax(i|k) + Bu(i|k) \quad (4.0.10)$$

(4.0.2), (4.0.5), (4.0.6) and (4.0.8)

other input/state constraints.

(4.0.10) 式は，線形制約を持つ混合整数二次計画問題に帰着され，これを解いて得られる最適解 $\{U^*(k), \Delta^*(k), C^*(k)\}$ の 1 番目の要素を用いて $u(k) = u^*(0|k)$ ， $\Delta(k) = \Delta^*(0|k)$ および $c(k) = c^*(0|k)$ とする．

(2) 実験結果

提案手法の有効性を実験によって明らかにする．実験に用いた PC は Intel Core 2 Quad CPU Q8200 2.33GHz プロセッサ (3GB メモリ) であり，Matlab R2007b を介してオンライン MIQP を Gurobi ver. 5.6.3 (フリーアカデミック版) によって解く．

図 4.0.4 および 4.0.5 に制御対象のボールバランサ装置およびその模式図を示す．これは平板に置かれたボールを 2 つの DC モータによって平板を駆動することでそのボール位置を制御する装置である．

ボールバランサ装置の離散時間状態空間モデルは次のように与えられる．

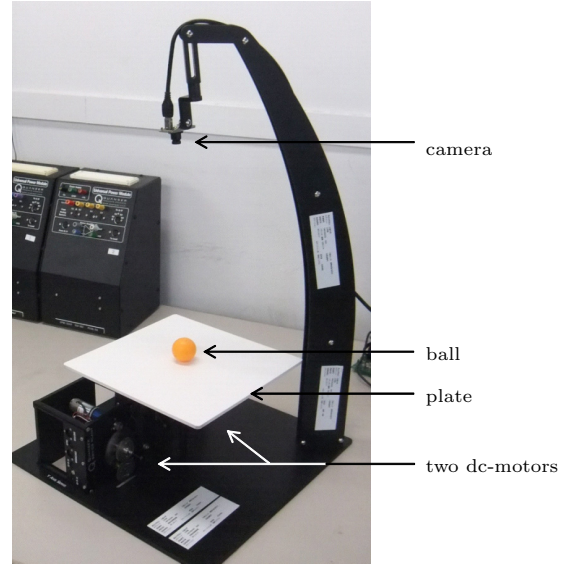


図 4.0.4 ボールバランサ装置

Fig. 4.0.4. Ball balancer experimental setup.

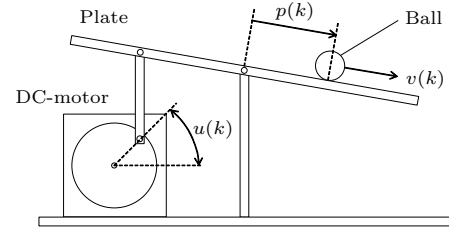


図 4.0.5 ボールバランサ装置 (模式図)

Fig. 4.0.5. Schematic of ball balancer experimental setup.

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0.050 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.00222 \\ 0.0445 \end{bmatrix} u(k)$$

$$x(k) = \begin{bmatrix} p(k) & v(k) \end{bmatrix}^T \quad (4.0.11)$$

ここで $x(k)$ はボールの位置 $p(k)$ [m] と速度 $v(k)$ [m/s] によって構成される状態，そして $u(k)$ [rad] は DC モータの角度である．サンプリング時間は 50 [ms] である．(4.0.11) 式は平板の x 軸および y 軸方向いずれにも用いられる．すなわち，ボールの平板上の x 軸および y 軸方向の状態は独立に制御される．

量子化器の飽和値を $M_i = 2^3 - 1$ ($i = 1, 2$) とする．これは状態の各要素につき 4 ビットの情報量に相当し，通常の A/D 変換より極めて粗い量子化に相当する．さらに状態と入力に以下の制約を追加する．

$$|p(k)| \leq 0.137 \text{ [m]}, \quad |u(k)| \leq \frac{\pi}{9} \text{ [rad]}$$

状態の各要素に対する量子化器の最小量子化幅は，それぞれ $\Delta_1 = 6.19 \times 10^{-4}$ [m] および $\Delta_2 = 1.24 \times 10^{-2}$ [m/s] で与えられている．(4.0.4) 式において $\rho_i = 1.6$ ($i = 1, 2$) とする．(4.0.5) および (4.0.6) 式において， $\Omega_i = 0.7$ ， $d_i = 0.02$

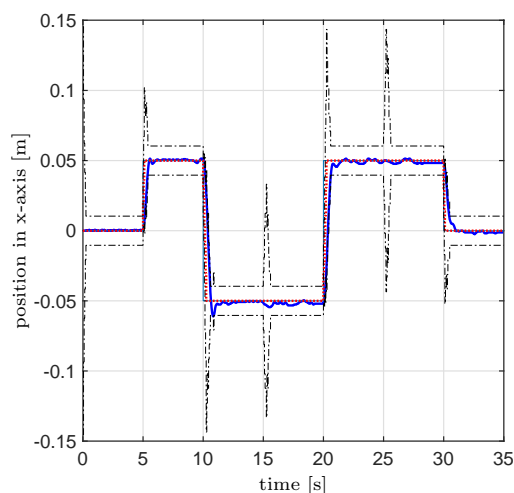


図 4.0.6 x 軸方向ボール位置, (実線: ボール位置, 点線: 量子化中央値, 一点破線: 量子化可能範囲).

Fig. 4.0.6. Ball position in x-axis, (solid: ball position, dotted: quantization center, and dashed: quantizable range).

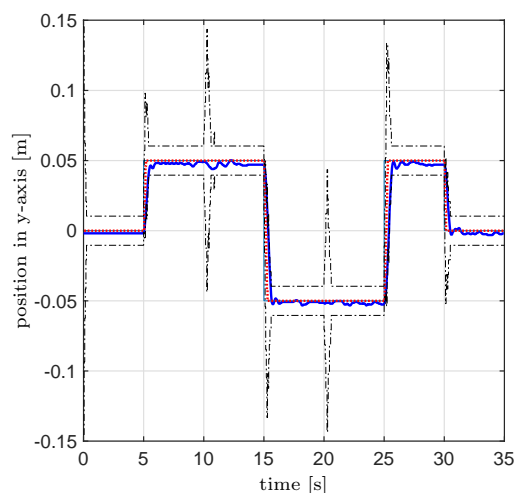


図 4.0.7 y 軸方向ボール位置, (実線: ボール位置, 点線: 量子化中央値, 一点破線: 量子化可能範囲).

Fig. 4.0.7. Ball position in y-axis, (solid: ball position, dotted: quantization center, and dashed: quantizable range).

($i = 1, 2$)とし, (4.0.9)式において, $Q_1 = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$, $Q_2 = 3$ および $Q_3 = Q_4 = I_2$ とする. ボールの初期座標を平板上の中心 $(0, 0)$ とする.

ボールの位置の平板上の目標値 (x, y) [m] として, 0 [s] から 5 [s] ごとに正方形の頂点をとるように, 順に $(0.05, 0.05)$, $(-0.05, 0.05)$, $(-0.05, -0.05)$, $(0.05, -0.05)$, $(0.05, 0.05)$ とし, 最後に $(0, 0)$ となるように設定した.

図 4.0.6 および 4.0.7 に x 軸および y 軸のボールの位置座標・量子化可能範囲をそれぞれ示す. 図 4.0.6 および 4.0.7 より, ボールは目標値に追従し, 量子化中央値は量子化器が飽和しないように適切に変化していることがわかる. これらの結果から, 量子化中央値および量子化幅をオンラインで最適化して変化させることで, 状態を適切に目標値に追従させることができる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 1 件)

(1) Tadanao Zanma, Makoto Azegami, Kang-Zhi Liu, Optimal Input and Quantization Interval for Quantized Feedback System With Variable Quantizer, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 査読有, 64 巻, 2017, 2264-2254

[学会発表](計 29 件)

(2017 年度)(計 9 件)

(1) 残間忠直, 橋本大輝, 高安俊太郎, 劉康志, ネットワーク化制御におけるデータ量子化・欠落補償, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会 2017 年 8 月多様化するモーショ

ンコントロールの応用,

(2) Syuntaro Takayasu, Tadanao Zanma, Masashi Wakaiki, Kang-ZhiLiu, Performance Improvement of Quantized Feedback Control in Multi-Input System, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2017, 2017 年 11 月

(2016 年度)(計 9 件)

(3) Takayasu Syuntaro, Zanma Tadanao, Wakaiki Masashi, Liu Kang-Zhi, Stability and Performance Analysis of Receding Horizon Quantizer in Single-Input System, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2016, 2016 年 12 月

(4) Tokunaga Atsuki, Zanma Tadanao, Wakaiki Masashi, Liu Kang-Zhi, Optimal Dynamic Quantizer and Input Using Model Predictive Control, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2016, 2016 年 12 月

(2015 年度)(計 11 件)

(5) Tadanao Zanma, Takumi Shiratori, KangZhi Liu, Optimization of quantization interval and input in quantized state feedback control system, 2015 年 5 月, 高信頼制御通信研究会(招待講演)

(6) 高安俊太郎, 白鳥匠, 残間忠直, 劉康志, Optimal control for quantized feedback control with variable logarithmic quantizer -Application to ball balancer on plane system-, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015, 2015 年 12 月

〔図書〕(計1件)

(1) 柴田昌明他, 残間忠直(分担), 電気学会, モーションコントロールの先進応用の最新技術, 2018

〔その他〕ホームページ等

千葉大学大学院工学研究院融合履行楽譜基幹工学専攻電気電子工学コースシステム制御研究室

<http://www.sc.te.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

研究代表者

残間 忠直 (ZANMA, Tadao)

千葉大学大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 20324543

〔その他の研究協力者〕

(1) 劉 康志 (LIU, KangZhi)

千葉大学大学院工学研究院・教授

(2) 小岩 健太 (KOIWA, Kenta) 千葉大学大学院工学研究院・助教

(3) 若生 将史 (WAKAIKI, Masashi) 神戸大学大学情報学研究科・講師

(4) THAN ZAW SOE 千葉大学大学院工学研究院・博士課程学生

(5) 白鳥 匠 (SHIRATORI, Takumi)

(6) 大塚 拓也 (OHTSUKA, Takuya)

(7) 徳永 淳樹 (TOKUNAGA, Atsuki)

(8) 藤澤 翔太 (FUJISAWA, Shota)

(9) 高安 俊太郎 (TAKAYASU, Shuntaro)

(10) 橋本 大輝 (HASHIMOTO, Daiki)

(11) 李 広博 (LI, GuangBo) (5~11) 千葉大学大学院工学研究院・修士課程学生

参考文献

- (1) S. Sakaino, T. Sato, and K. Ohnishi, "Precise Position/Force Hybrid Control With Modal Mass Decoupling and Bilateral Communication Between Different Structures," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 266–276, 2011.
- (2) Y. Kang, Z. Li, X. Cao, and D. Zhai, "Robust Control of Motion/Force for Robotic Manipulators With Random Time Delays," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 1708–1718, 2013.
- (3) L. Dongjun, A. Franchi, H. I. Son, C. Ha, H. Bulthoff, and P. Giordano, "Semiautonomous Haptic Teleoperation Control Architecture of Multiple Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1334–1345, 2013.
- (4) W. S. Wong and R. Brockett, "Systems with finite communication bandwidth constraints. I. State estimation problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 9, pp. 1294–1299, 1997.
- (5) —, "Systems with finite communication bandwidth constraints. II. Stabilization with limited information feedback," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 5, pp. 1049–1053, 1999.
- (6) L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, "Network-Induced Constraints in Networked Control Systems - A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 403–416, 2013.

- (7) R. Lu, Y. Xu, A. Xue, and J. Zheng, "Networked Control With State Reset and Quantized Measurements: Observer-Based Case," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 11, pp. 5206–5213, 2013.
- (8) X. Yuanqing, Y. Jingjing, S. Peng, and F. Mengyin, "Stability Analysis of Discrete-Time Systems With Quantized Feedback and Measurements," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 313–324, 2013.
- (9) S. T. Francesco Ferrante, Frederic Gouaisbaut, "Stabilization of continuous-time linear systems subject to input quantization," *Automatica*, vol. 58, pp. 167–172, 2015.
- (10) Y. Sharon and D. Liberzon, "Input to State Stabilizing Controller for Systems With Coarse Quantization," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 4, pp. 830–844, 2012.
- (11) S. Azuma and T. Sugie, "Dynamic Quantization of Nonlinear Control Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, no. 7, pp. 875–888, 2012.
- (12) Y. Niu and D. W. Ho, "Control strategy with adaptive quantizer's parameters under digital communication channels," *Automatica*, vol. 50, no. 10, pp. 2665–2671, 2014.
- (13) K. Liu, E. Fridman, and K. H. Johansson, "Dynamic quantization of uncertain linear networked control systems," *Automatica*, vol. 59, pp. 248–255, 2015.
- (14) N. Elia and S.K.Mitter, "Stabilization of linear systems with limited informations," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 9, no. 46, pp. 1384–1400, 2001.
- (15) H. Richter, "A multi-regulator sliding mode control strategy for output-constrained systems," *Automatica*, vol. 47, no. 10, pp. 2251–2259, 2011.
- (16) B. Zhou, W. X. Zheng, and G.-R. Duan, "Stability and stabilization of discrete-time periodic linear systems with actuator saturation," *Automatica*, vol. 47, no. 8, pp. 1813–1820, 2011.
- (17) Y. Gao and K. T. Chong, "The Explicit Constrained Min-Max Model Predictive Control of a Discrete-Time Linear System With Uncertain Disturbances," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 9, pp. 2373–2378, 2012.
- (18) Q. Li, U. V. Kalabic, and I. V. Kolmanovsky, "Fast reference governors for second-order linear systems with constraints and an input time-delay," *Automatica*, vol. 50, no. 2, pp. 641–645, 2014.
- (19) W. He and S. S. Ge, "Vibration Control of a Flexible String With Both Boundary Input and Output Constraints," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 1245–1254, 2015.
- (20) C.-Y. Lin and Y.-C. Liu, "Precision Tracking Control and Constraint Handling of Mechatronic Servo Systems Using Model Predictive Control," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 4, pp. 593–605, 2012.
- (21) Y.-G. XI, D.-W. LI, and S. LIN, "Model Predictive Control-Status and Challenges," *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 3, pp. 222–236, 2013.
- (22) D. Q. Mayne, "Model predictive control: Recent developments and future promise," *Automatica*, vol. 50, no. 12, pp. 2967–2986, 2014.