

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02157

研究課題名(和文) 不連続あるいは正定でない入力コストを用いた省エネルギー制御

研究課題名(英文) Energy saving control using discontinuous or non-positive definite input cost

研究代表者

山下 裕 (Yamashita, Yuh)

北海道大学・情報科学研究所・教授

研究者番号：90210426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギー消費最小の定常点と状態の目標値が一致しない場合の省エネルギーな最適制御問題を考え、入力コストを最小限の改変で状態量を含む関数とすることで、問題を定式化し漸近安定性を保証する非線形最適レギュレータを構築した。また、アクチュエータが待機パワーを必要とする場合、冗長入力系では状態量の値に応じて非効率なアクチュエータを休止させる動作が省エネルギーに寄与し、そのような動作を行う最適制御器設計法を提案した。さらに、出力値に応じたセンサー値の通信の一時停止を含む制御手法も提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を用いれば、エネルギー消費最小な定常点と目標状態量が一致しない場合にも最適制御手法を用いることができ、アクチュエータ待機パワーを考慮した際の非凸性による困難さを克服できる。これにより、物理的入力を絞る方向で状態を動かすときは素早く、物理的エネルギーを投入しなければならないときは抑制的する非対称フィードバックを数理的に構築でき、また待機パワーを要するアクチュエータを非効率な場合は自動的に休止させることもできるようになる。結果として省エネルギーな制御を汎用的設計手法で導くことができるようになる。

研究成果の概要(英文)：Considering an energy-saving optimal control problem when the target value of the state does not coincide with the stationary point of minimum energy consumption, we formulated the problem by slightly modifying the input cost function from the natural energy consumption and constructed a nonlinear optimal regulator that guarantees asymptotic stability. In addition, when actuators require standby power, the operation of deactivating inefficient actuators according to the value of the state values contributes to energy conservation in redundant input systems. We proposed an optimal controller design method that performs such an operation. We also proposed a control method that includes suspending the communication of sensor values according to output values.

研究分野：制御理論

キーワード：非線形制御 最適制御 省エネルギー制御 待機パワー削減

## 1. 研究開始当初の背景

最適制御はエネルギー消費と状態量の目標値への収束度合いを評価しており、省エネルギー制御を実現すると考えられている。しかし、実際の問題では、目標定常点を維持するのにもエネルギー消費が発生し、エネルギー消費最小の定常点と状態の目標値が一致しない場合が多い。また、アクチュエータを稼働させるだけでエネルギーを消費する場合、冗長入力系では状態量の値に応じて非効率なアクチュエータを休止させるオペレーションが省エネルギーに寄与する。より一般に、状態に応じた機能(通信・センシング・制御など)の一時停止を含む制御手法も望まれていた。

## 2. 研究の目的

上記「背景」で述べられているような、いままでの問題の定式化の範囲から外れる制御問題に対して、どのように対処すべきか考察し、制御系設計手法を開発する。これにより、真の省エネルギー制御のための最適制御を開発する。また、離散的な機能のオン・オフを含む制御をアナログの世界と結び付け、統一的な制御手法を目指す。

## 3. 研究の方法

最終的に以下の3点に関して、研究を進めた。

(1) 「入力オフセットがある場合」に対する最適制御に対する研究: エネルギー消費最小の定常点と状態の目標値が一致しない場合に、その妥協を目指す(Economic MPC, Overtaking 規範など)ではなく、あくまで状態を目標値に収束させ、なおかつ実エネルギー消費をできるだけ近似する最適制御手法を開発する。

(2) アクチュエータの待機パワーを考慮した場合の最適制御問題: 待機パワーを考慮し、必要入力がゼロのときにアクチュエータ休止させる(休止期間は待機パワーを消費しない)問題設定の下での最適制御手法を開発する。その際に生じる非凸性の問題の解決法として、凸緩和による方法と冗長アクチュエータの組み合わせにより合成コスト関数を厳密凸関数にする方法の2通りに関して研究を進める。

(3) センサー値更新コストを抑えるイベント駆動出力フィードバック制御: センサー値更新に伴う通信コストを抑えるためのイベント駆動出力フィードバック制御を線形行列不等式の手法を使い開発する。

## 4. 研究成果

(1) 「入力オフセットがある場合」に対する最適制御に対する研究

1-A) 問題の定式化: 非線形制御対象

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{f}(\tilde{x}) + \tilde{g}(\tilde{x})\tilde{u}$$

および評価関数

$$J_{\text{orig}} = \int_0^{\infty} L_0(\tilde{x} - \tilde{x}_0) + r\tilde{u}^2 dt \rightarrow \min$$

を考える。ここで、 $\tilde{x} \in \mathbb{R}^n$  は状態量ベクトルで、入力  $\tilde{u} \in \mathbb{R}$  は物理的な入力を表し、 $\tilde{u} = 0$  のときに投入エネルギーがゼロであることを意味しているとする。また、 $L_0(\cdot)$  は正定関数、 $r$  は正の係数である。ここで、 $\tilde{x}_0 = \text{const.}$  は目標とする状態量で対応する入力値  $\tilde{u}_0$  が存在し、 $0 = \tilde{f}(\tilde{x}_0) + \tilde{g}(\tilde{x}_0)\tilde{u}_0$  を満たすものとする。注意すべきは  $J_{\text{orig}}$  の定義に含まれる入力コスト項は  $\tilde{u} = 0$  のときに最小値ゼロを持ち、 $\tilde{u} = \tilde{u}_0$  は入力コスト項の最小点ではないことである。一般的な制御理論の流儀に従って目標状態を原点とする座標  $x = \tilde{x} - \tilde{x}_0$ 、 $u = \tilde{u} - \tilde{u}_0$  を導入し、 $f(x) = \tilde{f}(x + \tilde{x}_0) + \tilde{g}(x + \tilde{x}_0)\tilde{u}_0$ 、 $g(x) = \tilde{g}(x + \tilde{x}_0)$  とおくことで、座標変換後の制御対象と評価関数

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$J_{\text{orig}} = \int_0^{\infty} L_0(x) + r(u + \tilde{u}_0)^2 dt \rightarrow \min$$

を得る。状態コスト項と入力コスト項を両方ともにゼロにする定常状態が存在しないため、無限 horizon の最適制御問題としては ill-posed となる。つまり、状態の目標値  $x = 0$  において、入力コストはゼロでなく、評価規範中の積分が発散する。このような状況は一般の制御対象においても良くありうる。たとえば、ほとんどの化学プラントは定常運転時にそれを維持するための何らかのエネルギーを要する。入力コスト項を展開した

$$r(u + \tilde{u}_0)^2 = ru^2 + 2ru\tilde{u}_0 + r\tilde{u}_0^2$$

の右辺第 3 項が定数となり、この項が評価規範中の積分が発散する主な原因となるが、この項を無視した評価関数

$$J_{\text{shift}} = \int_0^{\infty} L_0(x) + ru^2 + 2ru\tilde{u}_0 dt \rightarrow \min$$

を用いても問題は解決しない。つまり、上記第 3 項を無視すると入力コスト項が正定ではなくなり、漸近安定性を保証する最適制御が存在せず、やはり ill-posed な問題となる。

そこで、改変した評価関数

$$J_{\text{new}}(x(0); u(\cdot)) = \int_0^{\infty} L_0(x) + N(x, u) dt \rightarrow \min$$

を考え、最適制御則の下での閉ループ系を漸近安定化し、かつできるだけ  $J_{\text{shift}}$  を近似するようにするという問題を定式化した。

1-B) 要求される条件の導出: まず、漸近安定化するような  $N(x, u)$  の満たすべき条件を導出した。  $J_{\text{new}}$  に対する最適制御問題の値関数

$$V(x_0) = \inf_{u(\cdot)} J_{\text{new}}(x_0, u(\cdot))$$

はハミルトン=ヤコビ=ベルマン方程式

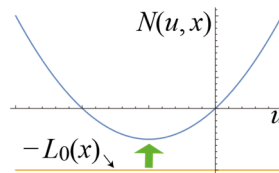
$$L_0(x) + \frac{\partial V}{\partial x} f(x) + \inf_u \left[ N(x, u) + \frac{\partial V}{\partial x} g(x)u \right] = 0$$

を満たす。このとき最適制御則は

$$u = u^*(x) = \operatorname{argmin}_u \left[ N(x, u) + \frac{\partial V}{\partial x} g(x)u \right]$$

で与えられるが、値関数の時間微分を  $x$  の関数で表すと  $\dot{V} = -L_0(x) - N(u^*(x), x)$  のようになり、条件①: 「 $L_0(x) + N(u^*(x), x)$  が正定」ならば  $V(x)$  は正定(値関数の定義より)かつ  $\dot{V}(x)$  は負定になり漸近安定性が成り立つことがわかる。

本研究ではその十分条件として、条件②: 「 $L_0(x) + N(u, x)$  が  $x$  と  $u$  に関して正定」を採用し最適制御計算の開始時には不明の  $u^*(\cdot)$  に寄らないようにした。条件②により、 $L_0(x)$  がある程度大きな  $x$  においては  $N(u, x)$  が負になる  $u$  も許容することを明らかにした(右図参照)。



### 1-C) 提案する新評価規範

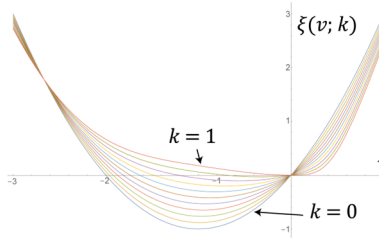
本研究では、正規化した元の入力コスト項  $\xi_0(v) = v(v+2)$  ( $v = u/u_0$ ) をできるだけ近似し、かつ正定な 2 回微分可能関数  $\xi_1(v)$  を考える。そのような関数であれば何でもよいが、ここでは、

$$\xi_1(v) = \begin{cases} v \left( v + 2 - \frac{3v + 8}{16v^3 + 4} \right) & (v \geq 0) \\ v \left( v + 2 + \frac{4(3v + 8)}{v^3/4 - 4} \right) & (v < 0) \end{cases}$$

を例として挙げる。  $\xi_0(v)$  と  $\xi_1(v)$  をパラメータ  $k$  で線形補間した  $\xi(v; k) = (1-k)\xi_0(v) + k\xi_1(v)$  において、パラメータ  $k$  を状態  $x$  の関数で、

$$k(x) = \max \left( 1 - \frac{L_0(x)}{\eta r \tilde{u}_0^2}, 0 \right) \quad (\eta > 1)$$

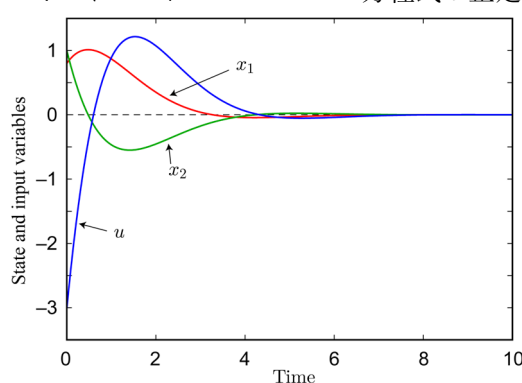
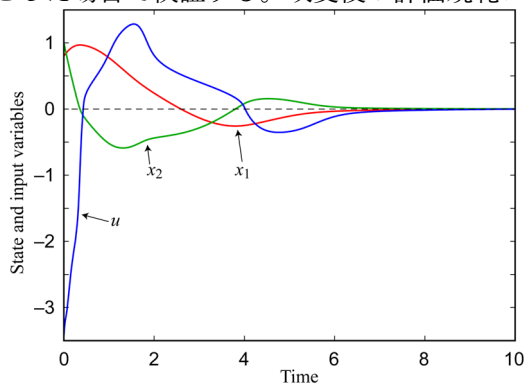
と与えたものを(正規化した)新しい入力コスト項として提案した(右図)。正規化する前の形に戻すと、  $N(u, x) = r\tilde{u}_0^2 \xi(u/\tilde{u}; k(x))$  を評価規範  $J_{\text{new}}$  に与えて最適制御を解けば well-posed で、かつ元の問題を良く近似したコストを最小化する。



### 1-D) 提案法の検証: 制御対象および $J_{\text{shift}}$ を

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \quad J_{\text{shift}} = \int_0^{\infty} x^T x + u(u+2) dt$$

とした場合で検証する。改変後の評価規範に対し、ハミルトン=ヤコビ=ベルマン方程式の正定



解を安定多様体法で求めてシミュレーションした結果を前頁下図左に示す。また、入力コスト項を $u^2$ として通常の最適レギュレータを求めた場合(LQR)を前頁下図右に示す。

提案法でも安定化していることが確認できる。また、提案法は $t=0$ および $t=5$ の近辺で、負の大きな入力を積極的に用いているが $u=1$ のときの入力コストと $u=-3$ のときの入力コストが同じであることを考えると、省エネルギーの観点から妥当な動作となる。実際のコストを比較すると、右の表となり、提案法は実コストに近い入力コスト項を評価して入力コストを抑えているだけではなく、入力コストを消費しない負の入力を積極的に使い、状態を素早く原点近傍に収束させて状態コストも従来法と比べて抑制していることがわかる。

	提案法	LQR
$\int_0^{10} x^T x dt$	1.857	1.913
$\int_0^{10} u(u+2) dt$	5.600	6.509
$J_{\text{shift}}$	7.457	8.422

## (2) アクチュエータの待機パワーを考慮した場合の最適制御問題

**2-A)問題設定** 冗長な入力を持つシステムでは、アクチュエータを適宜休止させるような運転が省エネルギーに寄与すると考えられる。なぜなら、アクチュエータが微量の入力しか出さなくても、休止していないアクティブなアクチュエータは待機パワーを必要とするためである。したがって、制御にその時点で寄与していないアクチュエータを休止させて、待機パワーを削減することが消費エネルギー削減につながる。そのようなエネルギー消費関数は、前項で述べたオフセットが無いのであれば、

$$\rho(u) = u^T R u + c_{\text{ofs}} \zeta(u), \quad c_{\text{ofs}} = (c_{\text{ofs},1}, \dots, c_{\text{ofs},m}), \quad R > 0$$

$$\zeta(s) = \begin{cases} 0 & (s = 0) \\ 1 & (s \neq 0) \end{cases}, \quad \zeta(u) = (\zeta(u_1), \dots, \zeta(u_m))^T$$

となる。ここで $u \in \mathbb{R}^m$ は入力ベクトルである。本研究では、この非凸な関数 $\rho(\cdot)$ を入力コストとして用いた場合の最適制御、および冗長入力を用いて凸関数の問題に帰着させる方法を明らかにする。

## 2-B) 凸緩和を用いた最適制御 非線形の制御対象

$$\dot{x} = f(x) + G(x)u = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i$$

を考える。ここで $x \in \mathbb{R}^n$ は状態ベクトルである。非凸な入力コストを用いた評価規範

$$J(u(\cdot); x(0)) = \int_0^T L_0(x) + \rho(u) dt \rightarrow \min$$

に対する最適制御入力 $u(t) = u^*(t; x(0))$ と、凸緩和した評価規範

$$J_c(u(\cdot); x(0)) = \int_0^T L_0(x) + \rho_c(u) dt \rightarrow \min$$

に対する最適制御入力 $u(t) = u_c^*(t; x(0))$ が一致する条件を以下の定理で求めた。ここで $\rho_c(u)$ は $\rho(u)$ を凸緩和した関数であり、 $\rho_c(u)$ のエピグラフは $\rho(u)$ のエピグラフの凸包と一致する。

**定理:** 凸緩和問題の最適制御が最適特異アークを含まないのであれば、元の問題の最適制御入力と凸緩和問題の最適制御入力は一致する。

この定理により、凸緩和に最適特異アークを含まないのであれば、それを元の問題の解としてよいことがわかり、非凸性に起因する困難さをこの場合は解決できる。

**2-C) High-Low-Mix アクチュエータ構成の提案** 前項の定理で述べた一致条件は事前に検証することが難しい場合があり、また、制御入力の不連続な変化を嫌う制御対象では採用することができない。そこで、本研究では、そのような場合においても冗長アクチュエータの合成したコスト関数が厳密凸になるようなHigh-Low-Mix アクチュエータ構成を提案した。

この構成においては、待機パワーを無視できる小型の補助アクチュエータと通常的大型アクチュエータの組み合わせを用いる。それぞれのコスト関数は

$$\rho_{\text{low}}(u_1) = k_1 u_1^2, \quad \rho_{\text{high}}(u_2) = k_2 u_2^2 + c_{\text{ofs}} \zeta(u_2) \quad (k_2 > k_1)$$

で表されるものとする。ここで、 $u_1, u_2$ は、それぞれ小型アクチュエータと大型アクチュエータが発生するシステムへの入力であり、合計した入力は $u = u_1 + u_2$ となる。本研究では、入力 $u$ をどのように $u_1$ と $u_2$ に分配すべきかというルールを明らかにした。

まず、 $|u_1|$ に対する2種類の上限值を、

$$u_m = \frac{\sqrt{(k_2 - k_1)c_{\text{ofs}}}}{k_1}, \quad u_s = \frac{k_2 u_m}{k_2 - k_1} = \frac{k_2 \sqrt{c_{\text{ofs}}}}{k_1 \sqrt{k_2 - k_1}}$$

のように設定する。この上限値の与え方が本項のキーポイントとなる。システムに印加すべき入力 $u$ が与えられたとき、それぞれのアクチュエータの発揮する入力値を

$$u_1(u) = \begin{cases} u & (|u| \leq u_s) \\ \text{sgn}(u) \cdot u_m & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad u_2(u) = u - u_1(u)$$

とする方法を提案した。この時の合成したコスト関数は

$$\rho_{\text{sum}}(u) = \rho_{\text{low}}(u_1(u)) + \rho_{\text{high}}(u_2(u)) = \begin{cases} k_1 u^2 & (|u| \leq u_s) \\ \rho_p(u) & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$\rho_p(u) = k_2(|u| - u_m)^2 + \frac{k_2}{k_1} c_{\text{ofs}}$$

のように連続かつ厳密凸関数となり、これを用いた最適制御の入力は時間に関して連続となることが期待できる。またこの合成コストは

$$\rho_{\text{sum}}(u) = \min_{u_1+u_2=u, |u_1| \leq \alpha(u)} \rho_{\text{low}}(u_1) + \rho_{\text{high}}(u_2), \quad \alpha(u) = \begin{cases} u_s & (|u| \leq u_s) \\ u_m & (|u| > u_s) \end{cases}$$

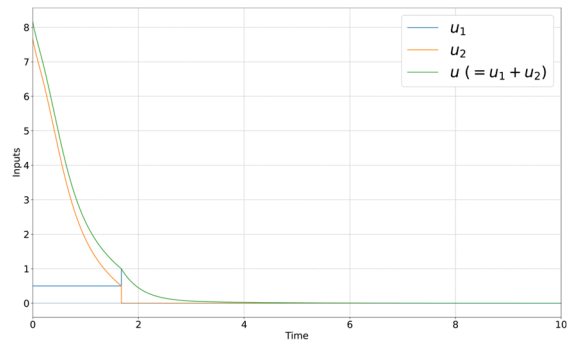
のようにも表現でき、ある  $u_1$  の上限の下での元のコスト関数に基づいた最適入力分配を実現していることがわかる。 $u_1(u)$  は  $|u| = u_s$  を境に不連続であるが、これは、大型アクチュエータを低出力で動作させるのはコスト的に無駄であり、 $u_2$  がアクティブになった直後に、ある程度絶対値が大きな  $u_2$  が採用されるからである。これが2種類の上限值が必要な理由でもある。

2-D) シミュレーションによる検証 以下の問題に対して安定多様体法を用いて非線形制御則を求め、シミュレーションを行った。

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 + (1 - \cos x_2)/2 + u_1 + u_2 \end{pmatrix}, \quad |u_1| \leq \alpha(u_1 + u_2)$$

$$J = \int_0^{\infty} x^T x - (x_1 + x_2)u + k_1 u_1^2 + k_2 u_2^2 + c_{\text{ofs}} \zeta(u_2) dt \rightarrow \min$$

ここで、 $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 2$ ,  $c_{\text{ofs}} = 1/4$  である。 $|u_1|$  に対する2種類の上限は  $u_m = 1/2$ ,  $u_s = 1$  となる。シミュレーションによって得られた入力の応答を右図に示す。初期応答においては2つのアクチュエータが動作し  $u_1$  は上限  $u_m = 1/2$  の値を維持している。必要な入力が小さくなると非効率な大型アクチュエータは停止し、その差を埋めるために  $u_1$  の上限を  $u_s = 1$  に上げて運転を続けている。総入力の時間変化は連続となり、システムは滑らかに動作する。



(3) センサー値更新コストを抑えるイベント駆動出力フィードバック制御

3-A) 問題設定 線形の制御対象

$$x(k+1) = Ax(k) + B(k), \quad y(k) = Cx(k) \quad x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^p$$

に対し、遠隔コントローラ

$$\hat{x}(k+1) = A_c \hat{x}(k) + B_c \hat{y}(k), \quad u(k) = C_c \hat{x}(k), \quad \hat{x} \in \mathbb{R}^n$$

$$\hat{y}(k) = \begin{cases} y(k) & \left( \text{for } \exists i (\hat{y}_i(k-1) - y_i(k))^2 > \sigma_i^2 y_i^2(k) \right), \quad \sigma_i > 0 (i = 1, \dots, p) \\ \hat{y}(k-1) & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

を設計する。 $\hat{y}(\cdot)$  の更新が毎時刻行われるわけではないのでセンサー値更新の通信コストを削減できる。更新のトリガはセンサーユニット側で行われていることに注意する。

3-B) 制御則設計 この問題に対し、本研究では以下の制御則設計法を導いた。設計パラメータ  $\beta \in (0, 1]$  を与え、線形行列不等式(LMI)

$$\begin{bmatrix} \beta X & * & * & * & * & * \\ \beta I & \beta Y & * & * & * & * \\ 0 & 0 & L & * & * & * \\ XA + W_1 C & W_3 & W_1 & X & * & * \\ A & AY - BW_2 & 0 & I & Y & * \\ M & MY & 0 & 0 & 0 & 2I - L \end{bmatrix} > 0, \quad M = [\text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_p) \quad 0_{p \times (n-p)}]$$

の解  $X > 0$ ,  $Y > 0$ ,  $L = \text{diag}(\tau_1, \dots, \tau_p) > 0$ ,  $W_1, W_2, W_3$  より、制御則のパラメータを

$$A_c = Z^{-1}(XAY + ZB_c CY - XBC_c Y - W_3)Y^{-1}$$

$$B_c = Z^{-1}W_1, \quad C_c = W_2 Y^{-1}, \quad Z = X - Y^{-1}$$

と求めることができ、リアプノフ関数

$$V(x, \hat{x}) = (x^T, \hat{x}^T) \begin{bmatrix} X & Z \\ Z & Z \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \hat{x} \end{pmatrix}, \quad V(k+1) \leq -(1 - \beta)V(k)$$

を得ることができる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamashita Yuh, Matsukizono Ryosuke, Kobayashi Koichi	4. 巻 138
2. 論文標題 Asymptotic stabilization of nonlinear systems with convex-polytope input constraints by continuous input	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 110032
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2021.110032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamashita Yuh, Sakano Kiminori, Kobayashi Koichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Asymptotic stabilization with group wise sparse input based on control Lyapunov function approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/rnc.5971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KITAMURA Koichi, KOBAYASHI Koichi, YAMASHITA Yuh	4. 巻 E105A(5)
2. 論文標題 LMI-Based Design of Output Feedback Controllers with Decentralized Event-Triggering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2021MAP0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 YAMASHITA Yuh, SUMITA Haruka, ADACHI Ryosuke, KOBAYASHI Koichi	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Distributed Observer Design on Sensor Networks with Random Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 613 ~ 621
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAP1039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Yuh, Adachi Naoto, Nonaka Ryo, Kobayashi Koichi	4. 巻 145
2. 論文標題 Design of global smooth implicit control Lyapunov function for multiple-integrator system with input constraint	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Systems & Control Letters	6. 最初と最後の頁 104776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sysconle.2020.104776	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KOBAYASHI Koichi, NAKAJIMA Kyohei, YAMASHITA Yuh	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Uniformly Ultimate Boundedness Control with Decentralized Event-Triggering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 455 ~ 461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020MAP0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shun Andoh, Koichi Kobayashi, and Yuh Yamashita	4. 巻 E103-A
2. 論文標題 Self-Triggered Pinning Consensus Control for Multi-Agent Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 443-450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019MAP0009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yuh Yamashita, Yuta Sakai, Koichi Kobayashi
2. 発表標題 Optimal Regulators for Nonlinear Systems with Incompatible State and Input Cost Functions
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sheng Hao, Yuh Yamashita, Koichi Kobayashi
2. 発表標題 Passivity-Based Nonlinear Active Suspension Control Utilizing Relative Information
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sheng Hao, Yuh Yamashita, Koichi Kobayashi
2. 発表標題 Construction of ISS Lyapunov function for Hamiltonian systems
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuh Yamashita
2. 発表標題 Optimal Regulators for Nonlinear Systems with Incompatible State and Input Cost Functions
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Andoh
2. 発表標題 Hierarchical Pinning Control for Consensus of Multi-Agent Systems and Its Application to Vehicle Platooning
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Sheng Hao
2. 発表標題 Robust Active Vibration Controller Design for a Class of Underactuated Nonlinear Systems
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiminori Sakano
2. 発表標題 Stabilization of Nonlinear Systems by Sparse Input with Input Grouping
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shun Andoh
2. 発表標題 Observer-Based Self-Triggered Pinning Control for Consensus of Multi-Agent System
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下 裕
2. 発表標題 オフセット付き入力コストに対する最適レギュレータの定式化について
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会2019-9月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安藤 駿
2. 発表標題 階層型ピニング合意制御による車群制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂野 龍命
2. 発表標題 グループ化されたスパス入力による非線形系の安定化
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安藤 駿
2. 発表標題 自己駆動型切り替えピニング制御と車群制御への応用
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuh Yamashita
2. 発表標題 Control of Bilateral Teleoperation System Consisting of Heterogeneous Manipulators with Communication Delay
3. 学会等名 The 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	小林 孝一  (Kobayashi Koichi)  (50452115)	北海道大学・情報科学研究院・准教授    (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------