

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月17日現在

機関番号：35409

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560280

研究課題名（和文） 複数通信遅れを考慮する遠隔協調操作と予測制御の研究

研究課題名（英文） A Study on Remote Cooperation and Predictive Control
considering Multiple Communication Delays

研究代表者

木村 純壮 (KIMURA JUNSO)

福山大学・工学部・准教授

研究者番号：20243595

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数通信を伴う遠隔協調制御の基礎理論構築・実験実証・技術開発を目的とした。まず、研究用の実験システムを構築し、高度ネットワーク通信制御装置を用いて複数通信システムを開発し、遠隔操作を実施した。次に、各種実験により通信遅れ、制御対象の特性を同定し、基礎的制御実験を行い良好な結果を得た。また、実験システムと類似構造の制御対象に対して制御システムを設計し、制御シミュレーションを実行して性能評価したところ、良好な結果を得た。

研究成果の概要（英文）：This research aims at construction of fundamental theory, proof by experiment, technology development of remote control with multiple communications. At first, experimental system for this research is constructed, multiple communication system is developed using advanced network communication control equipment and teleoperation is executed. Next, some communication delays and property of the plant are identified by various experiments, fundamental control experiment is executed and good results are obtained. And a control system is designed for the plant which is similar to the experimental system, control simulations are executed to evaluate performance and good results are obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：遠隔制御，協調制御，予測制御，通信遅れ

1. 研究開始当初の背景

遠隔地に存在する機械やロボットをネットワークなどの通信を介して遠隔操作する研究が活発に進められてきている。通常の遠隔制御の研究では、通信遅れに対する対策が最重要課題の一つである。制御理論を応用す

る研究では、 H_∞ 制御理論に基づき通信遅れとその変動を一括してモデル誤差とする方法、また、簡易補償を行う方法などが提案されたが、本質的な対策とはならず、精度の高い制御を行うにあたっては、制御性能の限界をもたらしてしまう。これに対し、通信遅れをむ

だ時間として取り扱うことが可能で、直接的に対策を施せる予測制御があるが、これを適用する研究はこれまでのところ事例がなく、十分には活かされていないのが現状である。特にモデル誤差を考慮できる H_∞ 制御理論に基づくロバスト予測制御の適用研究は、必要性・価値が高いと考えられる。

さらに、複数の機械で共同作業を行うような遠隔の協調制御も関心が高まりつつあるが、通信経路が複数に及ぶので、問題が複雑化・高度化して取り扱いが困難である。

2. 研究の目的

本研究では、遠隔操作と協調操作が融合した遠隔協調操作の基礎技術を開発・検討し、実験システムにより実験を実施して性能を評価することを目的としている。すなわち、遠隔地に存在する複数の機械やロボットを遠隔制御して、協調作業の実施を目指した。このような条件では、通信経路が複数になり、制御が非常に困難になる。特に、複数通信のそれぞれの通信遅れとその変動への対策が必要となり、複数通信遠隔フィードバック制御に関して、基礎的に理論研究・実験研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 実験システムの構築

図1, 図2に示すような遠隔協調制御システムを構築した。

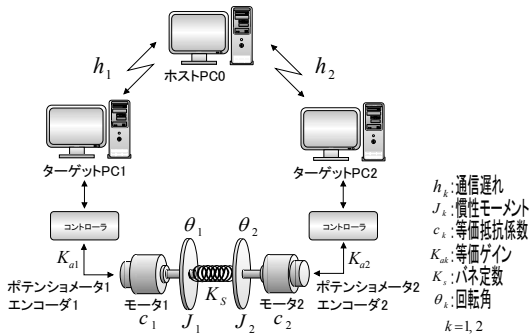


図1 遠隔協調制御システム

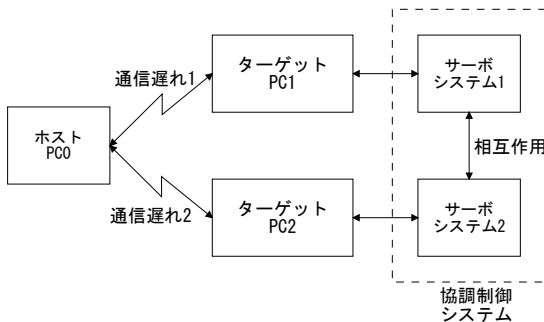


図2 遠隔協調制御システムの構成図

構築した実験システムの写真を図3に示す。



(a) 全景



(b) 駆動部

図3 遠隔協調制御システム全景

実験システムは、ホストコンピュータ1台、ターゲットコンピュータ2台、サーボシステム2台、インターネット通信を用いて構築した。ホストコンピュータとターゲットコンピュータ1, また、ホストコンピュータとターゲットコンピュータ2の間に、それぞれTCP/IP通信を実現し、2つのターゲットコンピュータにはそれぞれサーボシステム実験装置を接続して駆動できるようにしている。これら2台のサーボシステムは、コイルばねで接続したり、多数リンクで接続したりすることが可能で、搬送などの協調作業を模擬している。本実験システムを用いれば、インターネット通信を介して2台の機械・サーボシステムを駆動する遠隔協調制御の実験を実施することが可能である。

(2) 複数通信システムの構築・開発

C#言語により、マルチスレッドを用いてTCP/IP通信にて複数通信を実現できるプログラムを開発した。これを前述のホストコンピュータとターゲットコンピュータ1, ホストコンピュータとターゲットコンピュータ2の間のインターネット通信に用いる。

さらに、高度遠隔制御を実現可能なネットワーク通信制御装置を導入し、簡便に複数通信遠隔制御実験を実施できるように改良を行った。特に、遠隔フィードバック制御の実験実施システムとして利便性を高めている。

本研究で構築した複数通信システムの構成図を、図4に示す。

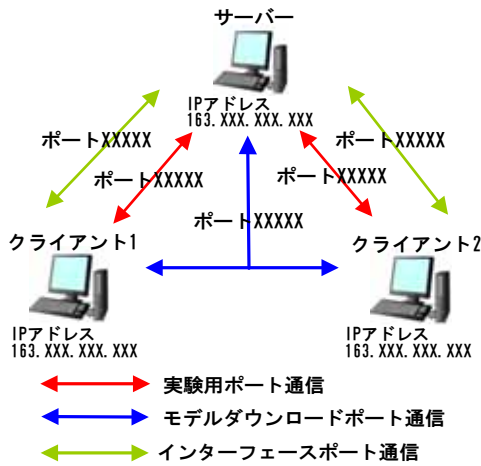
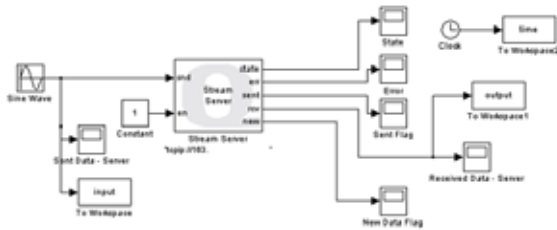
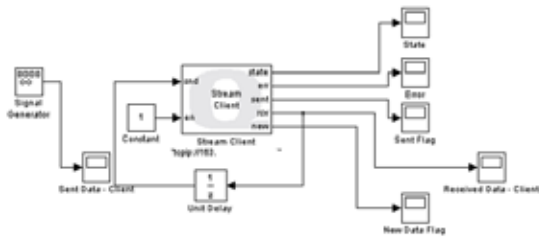


図4 複数通信システムの構成図

また、ネットワーク通信制御のために開発したモデルプログラムを図5に示す。



(a) サーバプログラム



(b) クライアントプログラム

図5 ネットワーク通信制御用モデルプログラム

(3) 複数通信遠隔制御システムの数学モデル

本研究で構築した実験システムを対象に、遠隔協調制御システムを考察し、数学モデルの記述を行った。まず、機械・ロボットの相互作用を考慮しながら協調操作の運動方程式を記述した。また、インターネットなどの通信における通信遅れとゆらぎを、それぞれ

むだ時間とそのモデル誤差・変動として考慮した。ここで、複数の機械・ロボットで協調制御を行うので、複数のそれぞれの機械・ロボットを複数の通信で制御する場合を考えた。したがって、通信経路やむだ時間・むだ時間のモデル誤差は複数、独立して存在する問題を取り扱うことになる。本研究では、このような複数通信遠隔制御の問題を設定し、これに関して詳細に考察を進めた。

図1の遠隔協調制御システムの運動方程式を記述すれば、次式となる。

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1(t) = -c_1 \dot{\theta}_1(t) - K_s \theta_s(t) + K_{a1} u_1(t - h_1) + w_{p1}(t) \\ \theta_s(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) \\ J_2 \ddot{\theta}_2(t) = -c_2 \dot{\theta}_2(t) + K_s \theta_s(t) + K_{a2} u_2(t - h_2) + w_{p2}(t) \end{cases}$$

この運動方程式をブロック線図で表現すれば、図6のように表される。

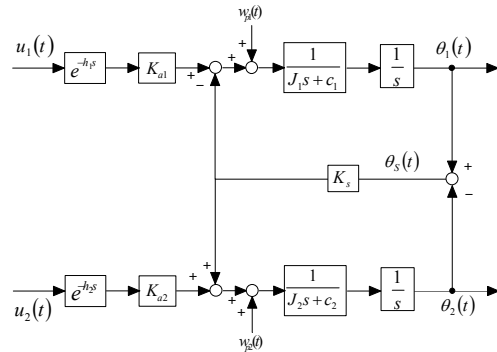


図6 遠隔協調制御システムのブロック線図

したがって、図1の遠隔協調制御システムのノミナルプラントは、次式の状態空間表現となる。

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_{p1} u_1(t - h_1) + B_{p2} u_2(t - h_2) + B_{pw} w_p(t) \\ y_p(t) = C_p x_p(t) \end{cases}$$

ただし、以下である。

$$\begin{aligned} x_p(t) &= [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)]^T \\ &= [\theta_1(t) \quad \dot{\theta}_1(t) \quad \theta_s(t) \quad \dot{\theta}_s(t)]^T \end{aligned}$$

$$\theta_s(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$$

$$w_p(t) = [w_{p1}(t) \quad w_{p2}(t)]^T$$

$$\begin{aligned} y_p &= [x_1(t) \quad x_3(t)]^T \\ &= [\theta_1(t) \quad \theta_1(t) - \theta_2(t)]^T \end{aligned}$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_1}{J_1} & -\frac{K_s}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{c_2}{J_2} - \frac{c_1}{J_1} & -K_s(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}) & -\frac{c_2}{J_2} \end{bmatrix}$$

$$B_{p1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{a1}}{J_1} \\ 0 \\ \frac{K_{a1}}{J_1} \end{bmatrix}, \quad B_{p2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{K_{a2}}{J_2} \end{bmatrix}$$

$$B_{pw} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

むだ時間のモデル誤差と加法的モデル誤差を考慮して、一般化プラントは次のように記述した。

$$\sum_{MR} \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Dw(t) + B_0u(t) + \sum_{i=1}^2 B_i u_i(t - h_i) \\ z(t) = Fx(t) + F_0u(t) \\ y(t) = Cx(t) + D_0w(t) \end{cases}$$

ただし、以下である。

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_m(t) \\ x_p(t) \end{bmatrix}, \quad x_m(t) = \begin{bmatrix} x_{m1}(t) \\ x_{m2}(t) \end{bmatrix}$$

$$w(t) = \begin{bmatrix} w_a(t) \\ w_m(t) \\ w_p(t) \end{bmatrix}, \quad w_m(t) = \begin{bmatrix} w_{m1}(t) \\ w_{m2}(t) \end{bmatrix}$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} z_a(t) \\ z_m(t) \end{bmatrix}, \quad z_m(t) = \begin{bmatrix} z_{m1}(t) \\ z_{m2}(t) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_a & 0 & 0 \\ 0 & A_m & 0 \\ 0 & 0 & A_p \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} B_a \\ B_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{p1} \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{p2} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{p1} & B_{p2} & B_{pw} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} C_a & 0 & 0 \\ 0 & C_m & 0 \end{bmatrix}, \quad F_0 = \begin{bmatrix} d_a I & \\ d_{m1} & 0 \\ 0 & d_{m2} \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 0 \quad C_p], \quad D_0 = [I \quad 0 \quad 0]$$

$$A_m = \begin{bmatrix} A_{m1} & 0 \\ 0 & A_{m2} \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} B_{m1} & 0 \\ 0 & B_{m2} \end{bmatrix}$$

$$C_m = \begin{bmatrix} C_{m1} & 0 \\ 0 & C_{m2} \end{bmatrix}$$

図7は、一般化プラントのブロック線図である。

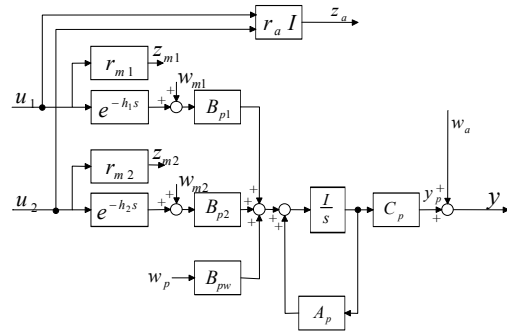


図7 一般化プラント

(4) 複数通信遠隔制御システムの通信遅れ・むだ時間の計測

複数通信に伴う複数の通信遅れ、すなわち、むだ時間とそれらの変動を詳細計測した。導入した高度ネットワーク通信制御装置により高精度計測を行い、測定データを詳細に解析した結果、複数の通信遅れ、むだ時間の変動を確認することができ、むだ時間の計測値を得た。ただし、学内ネットワーク上での通信であったため、これらの通信遅れは比較的小さく、また、それらの変動も微小であった。もっと適度な実験条件を得ることが望まれたが、より遠隔地間の通信環境を実現することは困難であったため、現状のまま研究を進めることにした。

図8は、遠隔通信実験 (sin 関数の送受信) の入出力の測定結果である。実線は入力信号、破線は出力信号を表している。両者を比較すると、位相がずれていることが明白である。これはネットワーク通信に伴う通信遅れである。この位相差を読み取り通信遅れ・むだ時間を決定した。

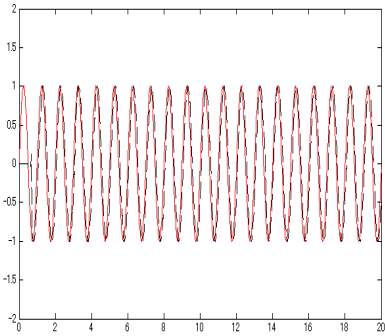


図 8 通信遅れ・むだ時間の計測結果

(5) ローカルシステム同定と最適制御
 遠隔制御の予備研究として、非遠隔状態で、サーボシステム 1 台を制御対象に、システム同定と最適制御系設計および最適制御実験を実施した。一般的なシステム同定法を用いて制御対象のパラメータを推定し、数学モデルを導出した。この結果から、最適制御理論にもとづき、最適レギュレータを設計して制御実験を実施した。実験結果より設計した制御系は、良好に制御を行うことが可能であり、制御の効果を確認することができた。

図 9 にシステム同定用プログラムを示す。

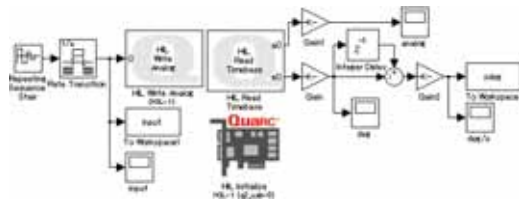


図 9 システム同定用プログラム

図 10 は同定結果を表す。黒は、実測結果、青は、ARX モデルによるシミュレーション結果を表し、両者はよく一致しており、システム同定が良好に実行できたことがわかる。

図 11 は、最適レギュレータにより設計した制御系を用いて最適制御を行う、実験用のプログラムを示す。

図 12 は、最適制御実験結果を示す。(a)は、制御入力応答、(b)は出力応答（回転角度）の結果を表している。また、青実線は、制御実験結果、赤破線はシミュレーション結果を表している。シミュレーション結果と実験結果は、ほぼ一致しており、最適制御が良好に実行できたと判断することができる。

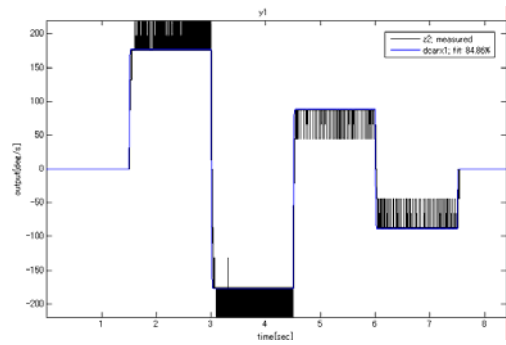


図 10 同定結果

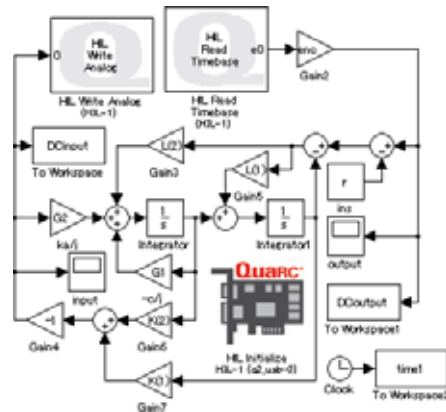
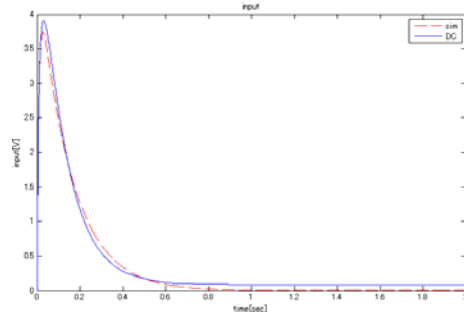
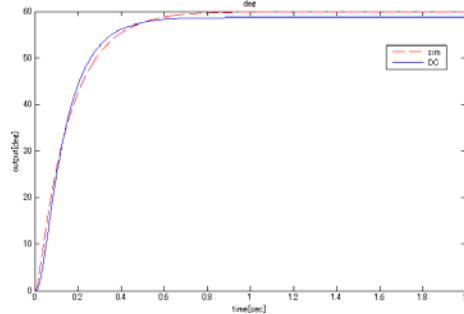


図 11 制御実験用プログラム



(a) 制御入力応答



(b) 出力応答

図 12 最適制御実験結果

(6) リモートシステム同定

遠隔での駆動実験を実施し、この際得られた入出力データにもとづいてシステム同定を行った。本実験では、遠隔通信に伴う通信遅れが含まれている。むだ時間を伴うパルス伝達関数によりシステム同定を実施した結果、通信遅れに対応すると考えられるむだ時間と、制御対象の動特性に対応するパルス伝達関数を推定することができた。本リモートシステム同定実験の結果は、遠隔制御系の設計に有効に利用することが可能である。

(7) 制御システム設計とシミュレーション

複数通信遠隔制御を基礎的に検討するため、構築した実験システムに類似の構造を持った制御対象に対して、制御システム設計の試行と制御シミュレーションを行った。図13にシミュレーション用プログラム、図14にシミュレーション結果を示す。この結果より、設計した制御系は有効に機能して、制御対象を良好に制御することが可能であり、複数通信遠隔フィードバック制御の実施に目処をつけることができた。

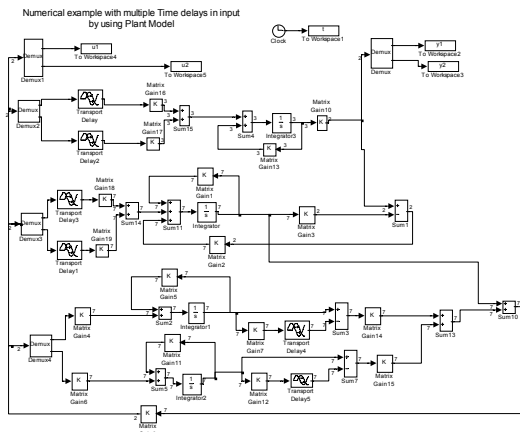


図13 シミュレーション用プログラム

4. 研究成果

本研究の主要な研究成果を要約する。

- 複数通信遠隔協調制御を検討するための実験システムを構築した。
- 高度ネットワーク通信制御装置を用いて、複数通信システムを構築し、実験システムの遠隔制御に用いた。
- 各種の実験から制御対象の特性を計測・解析し、基礎的制御実験を実施した。
- 実験システムと類似構造の制御対象に対して、制御システムを設計し、制御シミュレーションを行って、良好な制御結果を得た。

制御システムの性能向上、高度化など、今後も継続的に改良を重ねて行く必要がある。本結果を応用した複数通信遠隔フィードバック制御実験の実施が課題である。

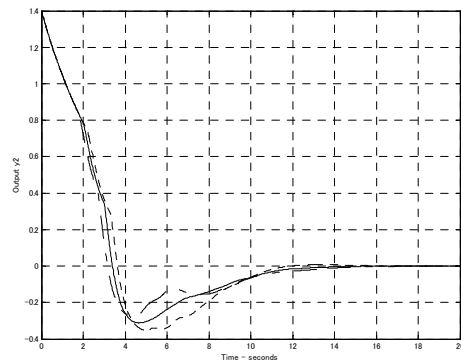
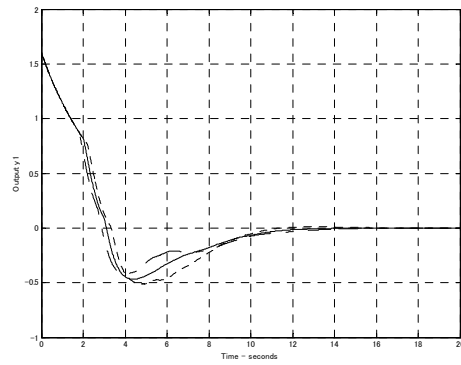


図14 シミュレーション結果

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 木村純壮, ある遠隔協調制御システムの数学モデル, 福山大学工学部紀要, 査読無, 34巻, 2011, 167-172
- ② Junso Kimura, Naoki Kushida: Robust State Predictive Control for Ship Steering System, Proceedings of the CACS 2009 International Automatic Control Conference, 査読有, 2009, 497-502

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 純壮 (KIMURA JUNSO)
福山大学・工学部・准教授
研究者番号: 20243595

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし