

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560297

研究課題名(和文) 自律移動ロボット群によって構築する無線通信網を介したネットワークベース制御

研究課題名(英文) Network based Control composed of autonomous robots via wireless communication

研究代表者

内村 裕 (UCHIMURA, Yutaka)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：00416710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：自律的に移動する複数の移動ロボットによって無線通信を中継することで、無線ネットワーク網を構築し、探索ロボットの活動範囲を拡張すると共に、探索ロボットの移動に追従して動的に配置を最適化するための制御系の開発を目的に研究を行った。このなかで、中継を行う各ロボットの最適な配置位置に制御するため、電波強度とロボットの位置関係を考慮した手法を考案した。また、中継時に発生する遅延を含むシステムの性能を向上するため、性能劣化の要因となる保守性を軽減した制御法を考案した。本研究において製作した複数の移動ロボットを使用し、電波が阻害される屋内環境において検証実験を行い提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This research was conducted to develop a control scheme which optimizes the position of autonomous mobile robots that construct a wireless network by multi-hop relay of the radio communication and expand the area of activities. The relay robots dynamically move following the leader rescue robot which is controlled by a human operator. In this research, a control method that considers the received signal strength and relative location among relay robots was proposed for the optimal deployment of relay robots. In the network system, the time delay in the transmission is crucial, thus a control scheme that reduced conservativeness of the stability condition was proposed. Using robots developed in this research, experiments were conducted for evaluation of the proposed methods and the results confirmed the validity of the proposed methods.

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：ネットワークベース制御 遠隔操作 無線中継 レスキューロボット 遅れ時間系 通信遅延 ネットワークロボット 自律移動

1. 研究開始当初の背景

我が国においては急速な少子高齢化によって労働力人口の減少が懸念されており、都市部・地方の別に依らない均一なサービスの提供が困難になりつつある。こうした状況のもと、離れた場所から高度なサービスを提供できるロボットへの期待は大きく、研究開始当初(2011年)においては、遠隔医療などの分野では一部実用化レベルに達している分野もあったが、未踏の領域が残されていた。

こうしたロボットの遠隔操作のアプリケーションの多くは、固定した2点間を有線ネットワークで接続した制御系を想定しているが、災害時の救援活動などのアプリケーションでは(図1)、ロボット自身が移動するために無線ネットワークを介した制御が不可欠となる。しかし、建物内部では壁や床などによる電波の減衰や干渉が大きいので、通信距離を拡大するためには、複数の中継器による多段の無線中継が必須であった。

また、オペレータが遠隔操作する探索ロボットの移動に伴い受信強度が低下するため、中継器自身も自律的に移動しネットワークを維持する必要がある。この際、ネットワークの通信品質も動的に変化するため、遠隔操作を安定かつ高精度に行うためには、不規則な通信遅延や通信の瞬断(パケットロス)などを考慮した制御手法の構築が必要であると考えられた。

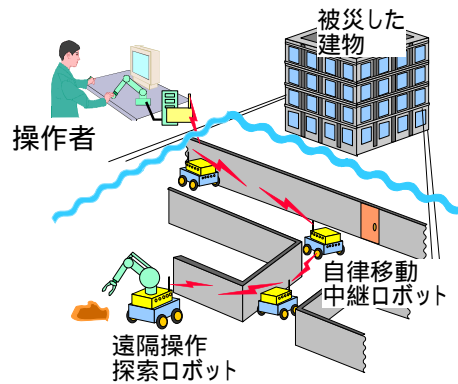


図1 システムの適用イメージ

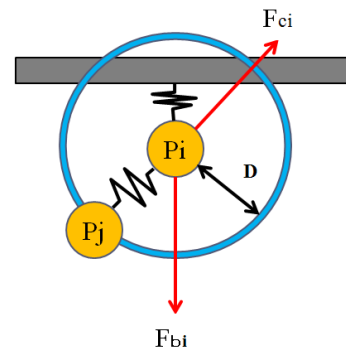


図2 仮想弾性力

2. 研究の目的

本研究は、被災した建物内のような既存の通信インフラが利用できない状況下において、無線ネットワーク中継するロボット群を最適配置することで、遠隔操作される探索ロボットの活動範囲を機動的に拡大することを目的とした。また、無線ネットワーク特有の通信遅延やパケットロスなど通信路の品質劣化がある場合においても、制御系の安定性を確保しながら、操作性や性能を維持するための制御手法を開発することも目的に研究を行った。

3. 研究の方法

無線ネットワークを中継するロボットの配置およびネットワークの遅延等の問題を考慮した制御法に関して、下記のような研究を行った。

- 1) 受信信号強度に基づく仮想力による無線ネットワーク構築のための自律移動ロボットの配置制御
 - 2) 通信遅延を含むシステムにおける安定性と性能を考慮した制御器設計
- 以下では、上記2つの詳細について論じる。

(1) 受信信号強度に基づく仮想力による無線ネットワーク構築のための自律移動ロボットの配置制御

各ロボットの座標情報と受信信号強度からベイズフィルタリングを用いて隣接する

ロボット間の通信環境を推定し、仮想力を作用させることによって環境に対応した中継ロボットの配置制御を実現する。またベイズフィルタの一種であるパーティクルフィタによって中継ロボット間の通信環境を推定し、仮想弾性力に通信環境による補正を与える手法を開発した。

受信信号強度を考慮した仮想弾性法

各中継ロボットは、隣接するロボットとの距離とロボット間の受信信号強度に応じて仮想力を仮定し、中継ロボット間の距離を調整することによって、各ロボット間の通信環境を改善する。ある空間に、ロボットの集合 $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ が存在すると仮定する。 p_i に隣接するロボット p_j, p_{j+1} の間には、以下の式で表される仮想力が作用するように制御する(図2)。

(1) 式において、 R_{m_i} は p_i に隣接する全てのロボット間の受信信号強度の平均値を表し、 R_{ij} は p_i, p_j 間の受信信号強度を表す。(2) 式において、 \vec{d}_{ij} は p_i から p_j に向かうベクトルである。また、 $\text{sgn}(x) = x/|x|$ である。

R_{ij} によってロボット間の受信信号強度を比較し、 R_{ij} の符号が正であれば、 p_i が p_j に近づく方向に仮想力が作用する。また、距離が離れていれば離れているほど、受信信号強度が低ければ低いほど、仮想力は大きく作用する。(3) 式は隣接する全てのロボットに作用する(2) 式の合力である。

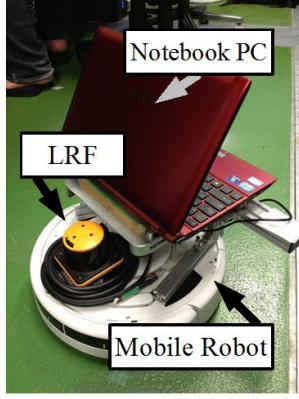


図 3 中継ロボット

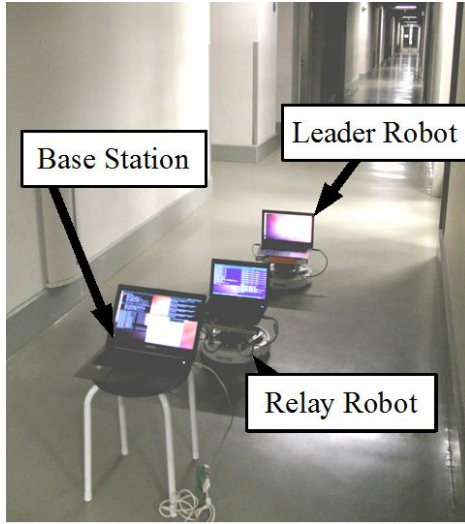


図 4 実験状況

$$\Delta R_{ij} = Rm_i - R_{ij} \quad (1)$$

$$\vec{F}_{R_{ij}} = \begin{cases} \text{sgn}(\Delta R_{ij}) \vec{d}_{ij} R_{ij} & (\Delta R_{ij} \neq 0) \\ \vec{d}_{ij} R_{ij} & (\Delta R_{ij} = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\vec{F}_{C_i} = \sum_j^{N_{R(i)}} \vec{F}_{R_{ij}} \quad (3)$$

また、中継ロボットが障害物や他のロボットと衝突することを防ぐために、障害物回避のための仮想弾性力を加える。ロボット p_i の周囲にある障害物の集合を $NR(i)$ とする。このとき、 p_i と k 番目の障害物 b_k との間には、(5) 式で表される仮想力が作用する。

$$\|\vec{F}_{ib_k}\| = \begin{cases} K_b \frac{D - d_{ib_k}}{d_{ib_k}} & (d_{ib_k} \leq D) \\ 0 & (d_{ib_k} > D) \end{cases} \quad (4)$$

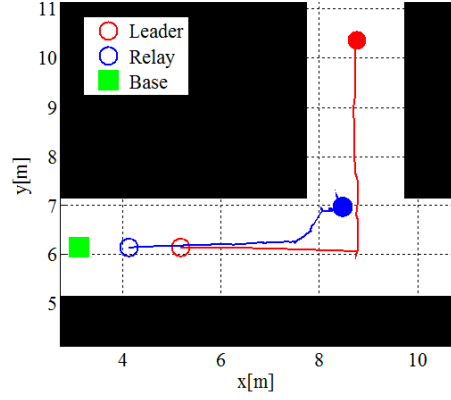


図 5 中継ロボットの移動軌跡

$$\vec{F}_{B_i} = \sum_k^{N_b(i)} \vec{F}_{ib_k} \quad (5)$$

(4) 式において、 K_b は調整ゲイン、 D は障害物回避距離、 d_{ib_k} は p_i と隣接する障害物 b_k との距離である。 p_i と b_k の距離が近いほど、 p_i に対して強い仮想力が b_k と反対方向に作用し、 p_i は b_k から遠ざかる。(3) 式と (5) 式の合力によって、ロボット p_i に与えられる仮想力は下式となる。

$$\vec{F}_i = \sum_j^{N_{R(i)}} \vec{F}_{R_{ij}} + \sum_k^{N_{b_i}} \vec{F}_{ib_k} \quad (6)$$

には、(5) 式で表される仮想力が作用する。

中継ロボットの動作実験

建物内の経路にて、実証実験を行った。本実験に使用したロボットを図 3 に示す。各移動ロボットにはレーザーレンジファインダ（北陽電機社製）を搭載して実験を行った。提案手法を含むアルゴリズムやセンサ値の取得、自己位置推定、モータ制御及び通信などの処理は、移動ロボット上部に搭載したノートパソコンに Linux を OS とするソフトウェアを実装して行った。また実験は、図 4 に示すように、両側を壁で囲まれた通路（分岐路）にロボットを配置して行った。

実験結果

図 5 に中継ロボットの移動軌跡を、図 6 に取得した受信信号強度を示す。図 5 中の L は先頭ロボットを、R は中継ロボットを、B は基地局をそれぞれ表す。黒色の部分は分岐路を構成する壁の位置を示している（通路の幅は 2[m]）。図 6 において、L-R1 (raw) は先頭・中継間の、R1-B (raw) は中継・基地局間の RSSI 値の観測値、L-R1 (LPF)、R1-B (LPF) はそれぞれローパスフィルターを介して制御手法に用いた RSSI 値である。提案手法を用いることで、各ロボット間の RSSI 値が均

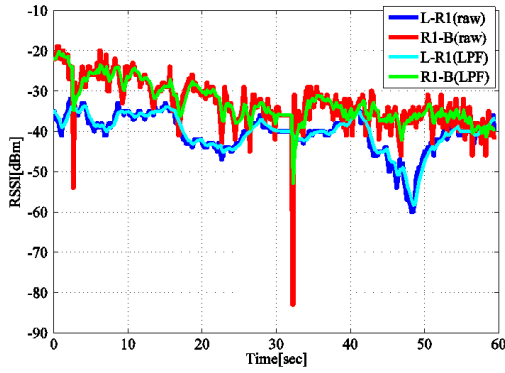


図6 中継ロボット間の受信信号強度

一になるように中継ロボットが移動したことが確認できる。

以上の実験結果から、提案手法によって、中継ロボットが自律的に通信環境を均一する配置となるよう制御されたことを確認した。

(2) 通信遅延を含むシステムにおける安定性と性能を考慮した制御器設計

ネットワークを介した制御系は、通信路および伝送手順において時間遅れが発生する。時間遅れはシステムの不安定化や性能の劣化の原因となるため、時間遅れを考慮したシステムを設計するための手法が必要である。

そこで本研究では性能劣化の要因である従来の汎関数の代わりに、完全二次 Lyapunov - Krasovskii 汎関数を導入することで性能劣化を低減すると同時に、周波数依存重みを設定することで性能向上を図った。

制御対象と制御器

(7) 式に示す時間遅れシステムを想定し、同システムを安定化する制御器を導出する。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + A_d x(t-d) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) &= D_1 w(t) + D_2 u(t) \\ y(t) &= Cx(t) + C_d x(t-d) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 d は時間遅れを表す。また、制御器として(8)式のような出力フィードバックを想定する。

$$\begin{cases} \dot{x}_K(t) = A_K x_K(t) + A_{Kd} x_K(t-d) + B_K y(t) \\ u(t) = C_K x_K(t) \end{cases} \quad (8)$$

(8)式出力フィードバックのパラメータを算出するために、(9)式の完全二次 Lyapunov-Krasovskii 汎関数を導入した。

$$\begin{aligned} V(x_c) &= x_c^T(t) P x_c(t) + 2x_c^T(t) \int_{-d}^0 Q(\xi) x_c(t+\xi) d\xi \\ &+ \int_{-d}^0 \left[\int_{-d}^0 x_c^T(t+\xi) R(\xi, \eta) x_c(t+\eta) d\eta \right] d\xi \end{aligned}$$

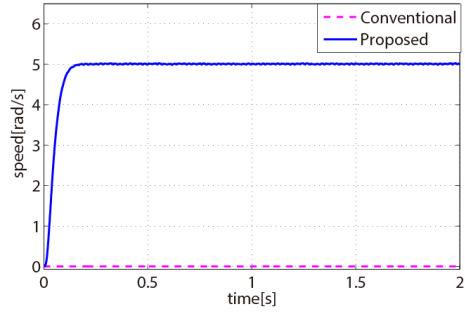


図7 速度制御実験結果

$$+ \int_{-d}^0 x_c^T(t+\xi) S(\xi) x_c(t+\xi) d\xi \quad (9)$$

Lyapunov の安定定理から、同汎関数が正定で導関数が不定であれば、(7)式のシステムは、(8)式の制御器によって安定化される。

そこで、上記条件を満たす行列

$S_k, \Lambda, X, Y, \Sigma_1, \Sigma_2, W_k$ を求め算出し、安定化制御器を以下のように導出した。

$$\begin{aligned} A_K &= S_K^{-1} (\varepsilon \Lambda - XAY - \Sigma_1 CY - XB_2 \Sigma_2) W_K^{-1} A_{Kd} \\ A_{Kd} &= S_K^{-1} (\varepsilon \Lambda_d - XA_d Y - \Sigma_1 C_d Y) W_K^{-1} \\ B_K &= S_K^{-1} \Sigma_1, \quad C_K = \Sigma_2 W_K^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

提案手法を適用した実験による検証

上記のように導出した制御器を含む制御系の性能を検証するため、(11)式に示すような DC モータを制御対象とする外乱抑制問題を設定した。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -108x(t) + w(t) + u(t) \\ z(t) &= w(t) + u(t) \\ y &= 182x(t-d) \end{aligned} \quad (11)$$

同制御対象に対して得られた制御器は、下記の通りである。

$$\begin{aligned} A_k &= \begin{bmatrix} -0.0858 & 1.395 \\ 0.0025 & -0.0786 \end{bmatrix} \times 10^3 \\ A_{kd} &= \begin{bmatrix} 19.31 & -13.09 \\ 1.366 & -0.8467 \end{bmatrix} \\ B_k &= \begin{bmatrix} -0.0017 \\ -0.0001 \end{bmatrix} \\ C_k &= [0.1425 \quad 8.356] \times 10^4 \end{aligned} \quad (12)$$

上述の手順で制御器を設計し、PC ベースの制御装置に実装して DC モータ速度制御実験を行った。モータの回転速度はエンコーダで取得し、ソフトウェアによって算出した制御出力を D/A コンバータを介してモータのサーボドライバに与えた。同装置において、目標速度値を 5 [rad/s] のステップ入力として実験を行った際の応答結果を図

7 に示す。破線は、従来手法の結果であり、制御器のゲインが小さいため目標値に追従できなかった。実線は、提案手法による結果であり、目標値に良く追従し、定常偏差もほとんどないことが分かる。以上の結果から、提案手法が制御器の性能向上に貢献することが確認された。

4. 研究成果

受信信号強度に基づく仮想力による無線ネットワーク構築のための自律移動ロボットの配置制御においては、各ロボットの受信信号強度と位置情報から、中継ロボットを適正配置する手法提案した。同手法は、中継ロボット間に作用する仮想力を導入することで、ロボット間の距離を自律的に調整するもので、解析的な求解が困難な多体問題への数値解を導出するアルゴリズムに相当する。同提案手法の妥当性については、実機を使った実験によって検証した。実際の建物内で行った実験では、無線中継ロボットが提案手法によって無線通信路を中継するように、自律的に配置されることを確認した。

また、通信遅延を含むシステムにおける安定性と性能を考慮した制御器設計においては、時間遅れ系を出力フィードバックによって安定化する制御器を、完全二次 Lyapunov - Krasovskii 汎関数に基づく安定条件によって導出する手法を提案した。また、同時に、制御対象の動特性を考慮した性能重みに基づく性能設計手法を提案し性能劣化を低減した。また、数値例による既存手法との比較によって、提案手法の保守性の低減を確認すると同時に、速度制御実験によって制御性能の向上を確認した。

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 6 件)

- [1] 皆川大樹, 内村 裕, "完全二次 Lyapunov-Krasovskii 汎関数に基づく遅れ時間系の出力フィードバック制御", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, 査読有, Vol.134, pp.276 - 283, (2014), DOI: 10.1541/ieejias.134.276
- [2] Takaaki Imaizumi¹, Hiroyuki Murakami, Yutaka Uchimura, "Deployment control of wireless multihop-relay mobile robots based on voronoi partition", Electrical Engineering in Japan, Vol.184, pp.42 - 51, (2013) DOI: 10.1002/eej.22413
- [3] 小宮康平, 宮下隼輔, 丸岡 泰, 内村 裕, "探索範囲を最適化したマップマッチング法による自律移動ロボットの制御", 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol. 133, No. 5, pp. 502- 509, (2013) DOI: 10.1541 / ieejias.133.502
- [4] 森慶太, 福居文幸, 内村 裕, "二足歩

行ロボットの不整地における安定判別法", 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol. 133, No. 3, pp. 320- 327, (2013), DOI: 10.1541/ieejias.133.320

- [5] 長原 正法, 荒井 慎悟, 内村 裕, "周波数依存性能重みによる変動時間遅れシステムのロバスト H 制御", 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol. 132, No. 6, pp. 616-624, (2012), DOI: 10.1541/ieejias.132.616
- [6] 今泉 貴敬, 村上 博行, 内村 裕, "ボロノイ分割を応用した無線中継移動ロボットの配置制御", 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol. 132, No. 3, pp. 381- 388, (2012), DOI: 10.1541/ieejias.132.381

〔学会発表〕(計 22 件)

国際会議 (7 件)

- [1] Naoya Uematsu, Yutaka Uchimura, Daiki Minagawa, "Model-error feedback for time-delay systems with communication disturbance observer", IEEE International Workshop on Advanced Motion Control Workshop, Vol.1, pp.122 -127, (2014.3) Yokohama
- [2] Daiki Minagawa, Yutaka Uchimura, Daiki Minagawa, "Stabilization of systems with time-varying delay based on complete quadratic Lyapunov-Krasovskii functional", IEEE International Workshop on Advanced Motion Control Workshop, Vol.1, pp.110 -115, (2014.3), Yokohama
- [3] Takaaki Saitou, Masanori Nukada, Yutaka Uchimura, "Deployment Control of Mobile Robots for Wireless Network Relay Based on Received Signal Strength", IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, pp.892 -897, (2013.11), Tokyo
- [4] Yutaka Uchimura, Daiki Minagawa, "H Output Feedback Controller based on Complete Quadratic Lyapunov-Krasovskii Functional for Time Delay Systems", IEEE International Conference on Mechatronics, pp.892 -897, (2013.2), Italy
- [5] Yutaka Uchimura, Masanori Nagahara, "Controller Design based on Complete Quadratic Lyapunov - Krasovskii Functional for Time Delay Systems", IEEE International Conference on Industrial Electronics, pp. 3146- 3151, (2012.10), Canada
- [6] Yutaka Uchimura, Masanori Nagahara, "Frequency-dependent Performance Design for Time-varying Networked System", IEEE International Conference on Industrial Electronics, Vol.1, pp.

- 2503- 2508 , (2011.11), Australia
- [7] Yutaka Uchimura, Takaaki Imaizumi , Hiroyuki Murakami , "Mobile Robot Deployment based on Voronoi Diagram " , International Symposium on Access Spaces , Vol.1 , pp. 71- 76 , (2011.6), Yokohama
- 国内会議 (15 件)
- [1] 齋藤崇彰, 額田将範, 金川拓也, 那谷和輝, 内村 裕, " 環境地図情報と受信信号強度を使用した自律移動ロボット群の配置制御", 電気学会産業計測制御研究会, 2014 年 3 月, 芝浦工大
- [2] 植松直哉, 内村 裕, " 通信外乱オブザーバにおけるモデル誤差を補償した時間遅れシステム系の設計", 電気学会産業計測制御研究会, 2014 年 3 月, 芝浦工大
- [3] 皆川大樹, 内村 裕, " 完全二次 Lyapunov-Krasovskii 汎関数に基づく変動時間遅れシステムの制御器設計", 電気学会産業計測制御研究会, 2014 年 3 月, 芝浦工大
- [4] 齋藤崇彰, 額田将範, 内村 裕, " 受信信号強度に基づく仮想力による無線ネットワーク構築のための自律移動ロボットの配置制御", 電気学会産業応用部門大会, 2013 年 8 月, 山口大
- [5] 皆川大樹, 内村 裕, " 完全二次 Lyapunov-Krasovskii 汎関数に基づく不確かさを考慮した時間遅れ系の出力フィードバック制御", 電気学会産業応用部門大会, 2013 年 8 月, 山口大
- [6] 内村 裕, " [招待講演] ロボット制御の視点で見た無線通信の課題と期待", 情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告], 2013 年 3 月, 東京大
- [7] 齋藤 崇彰, 今泉 貴敬, 武内 啓祐, 額田将範, 内村 裕, " 受信信号強度とベイズフィルタリングによる無線ロボット群の自律配置制御 ", 電気学会産業計測制御研究会, 2013 年 3 月, 千葉大
- [8] 皆川大樹, 内村 裕, " 完全二次 Lyapunov-Krasovskii 汎関数に基づく遅れ時間系の出力フィードバック制御", 電気学会産業計測制御研究会, 2013 年 3 月, 千葉大
- [9] 今泉貴敬, 額田将範, 内村 裕, " アドホックネットワークを構築する中継ロボット群の自律配置", ロボット学会学術講演会論文集, 2012 年 8 月, 札幌
- [10] 今泉貴敬, 額田将範, 内村 裕, " 無線ネットワークを中継するロボット群の配置制御", 電気学会産業応用部門大会, 2012 年 8 月, 千葉工大
- [11] 額田将範, 今泉貴敬, 内村 裕, " 無線ネットワーク中継のための自律移動ロボット群の配置制御", ロボティクスメカトロニクス講演会, 2012 年 5 月, 浜松
- [12] 長原正法, 内村 裕, " 完全二次

Lyapunov-Krasovskii 汎関数に基づく時間遅れシステムの制御系設計", 電気学会産業計測制御研究会, 2012 年 3 月, 横浜国大

- [13] 宮下隼輔, 塚田雄輝, 丸岡 泰, 内村 裕, " 探索範囲を最適化したマップマッチング法による自律移動ロボットの制御", 電気学会産業計測制御研究会, 2012 年 3 月, 横浜国大
- [14] 今泉貴敬, 内村 裕, " ボロノイ分割に基づく移動ロボット群による無線ネットワーク中継", 電気学会産業計測制御研究会, 2011 年 9 月, 琉球大
- [15] 長原正法, 内村 裕, " 周波数依存性能を考慮した変動時間遅れシステムの安定化制御", 電気学会産業計測制御研究会, 2011 年 9 月, 琉球大

[図書] (計 1 件)

- [1] Yutaka Uchimura, "Model Based μ -Synthesis Controller Design for Time-Varying Delay System", Recent Advances in Robust Control - Novel Approaches and Design Methods, Intech, pp. 406- 422 , (2012)
DOI: 10.5772/17380

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcon.mech.shibaura-it.ac.jp/theme/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内村 裕 (UCHIMURA YUTAKA)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号 : 00416710

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

名取賢二 (KENJI NATORI)
千葉大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 70545607