

機関番号：32619

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560241

研究課題名 (和文) 無線ネットワークを通信経路とする触覚フィードバック型ロボットの遠隔制御

研究課題名 (英文) Tele-operation for force-feedback robots with wireless network

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

研究成果の概要 (和文)：

無線ネットワークを介してロボットを遠隔操作し、離れた場所からの救急医療や災害時のレスキュー活動に適用可能なシステムの実現を目指し、無線通信における変動を含む通信遅延に対応した制御手法の構築と同時に、通信強度を指標とした自律移動制御を通信中継ロボットに搭載し実証実験を行った。また、リアルタイム性を有する無線中継機構を開発し、映像情報と制御情報が混在する通信における制御性能への影響を軽減した。

研究成果の概要 (英文)：

This research aims at development of the system operated by remote control via wireless network, which is applicable for the remote medical activity or the rescue activity at disaster field. In the research, a control method that is robust against time-varying delay in wireless network is developed, and relay robots that relay wireless transmission are developed and tested in the field. Additionally, a real-time relay structure was developed, which attenuates the adverse effect for control performance when transmitting video data and control data simultaneously.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：無線通信、ネットワークベース制御、遠隔操作、自律移動、移動ロボット、レスキューロボット、通信遅延

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化社会を迎えた我が国においては、労働人口の減少によって都市部・地方の別を問わない均一なサービスを提供することが困難になりつつある。このような状況下において、遠隔地から高いレベルのサービスを提供できるロボットへの期待は大きく、遠

隔手術など医療分野での開発は一部で実用レベルに達しつつある。しかしながら、現状における遠隔操作のアプリケーションでは、固定した2地点間における操作を実現するのが大半であり、対象が移動しながら複数の通信中継点を経由するような状況は想定されていない。例えば、救急車内での医療行為

を遠隔操作で行う場合や、被災した建物内をロボットが移動しながらレスキュー活動を行う場合には、遠隔側のロボットとの通信を移動局間の中継を含む無線ネットワーク経由で行う必要がある。

そこで、本研究では無線ネットワークを通信経路としたロボットの遠隔操作において、安定かつ高精度な制御を実現することで、より広い適用範囲と機動性の高いアプリケーションへの展開を目標とした実用的な研究成果の創出を目指す。

2. 研究の目的

本研究は無線ネットワークを介してロボットや機械を制御することによって、離れた場所の対象物を遠隔操作することを可能とすることを目指しており、危険な作業の無人化や遠隔手術などのアプリケーションへの応用が期待されている。バイラテラル制御など通信路が制御系のループに含まれるシステムに関する研究は、従来有線のネットワークを中心に行われてきた。これを、無線ネットワークを介して行うことで、より広範な適用範囲と機動性の高い遠隔操作を実現することが可能となる。また、無線ネットワークを適用することによって顕在化する通信遅延をリアルタイムで計測し、制御系の設計において同遅延を陽に扱った制御系を構築することや、遠隔側のモデルが変動した場合にも安定性手制御を行えるようなシステムの実現も目的の一つである。さらに、遠隔作業における操作性を向上するために、遠隔地における操作力をフィードバックするバイラテラル制御を実現することで操作性を向上し、より実用的な研究成果の創出を目指し研究を行った。

3. 研究の方法

無線ネットワークを介して遠隔地のロボットを制御するための要素技術のうち、下記についての研究を行った。

- 1) ネットワークにおける時間遅れを考慮した制御手法
- 2) 通信強度を指標とした通信中継ロボットの自律移動制御
- 3) リアルタイム性を有する無線ネットワークの中継機構の構築

以下では、上記3つの詳細について論じる。

3. 1 ネットワークにおける時間遅れを考慮した制御手法

ネットワーク上で生じる時変（ランダム）な遅れ時間に対する制御法を、実際の無線ネットワークを含む制御系に実装することを目指した研究を行った。具体的には、ネットワークによる遅延を含む制御系に対して、遅延を摂動として扱う μ シンセシスと呼ばれ

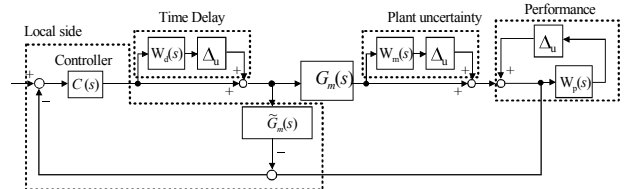


図1 システムのブロック線図

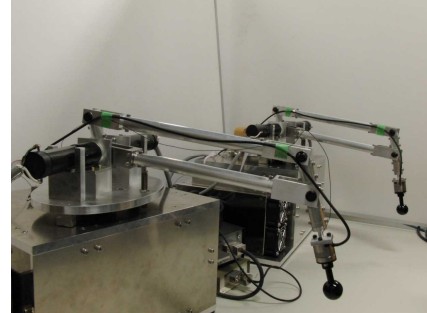


図2 開発した3軸マニピュレータ

る制御手法を適用して、変動する通信遅延を有する場合においても安定な制御系を実現した。

ネットワーク経由での情報を伝達する場合、通信路上の信号の伝達遅延はもとより、ネットワークのメディアアクセスやキューイングなど、通信手順に起因する要因も複合し、制御系の設計において無視することのできない大きさの遅延が発生する。こうした遅延がフィードバックループ中に含まれると、制御性能の劣化につながるばかりではなく、系の安定性に深刻な影響を与える可能性がある。

そこで、変動する遅延の大きさを測定することで、実際と同等の遅延を有する内部モデルを用いることとした。これにより、系の特性方程式から遅延の影響を消去し、ロバスト安定性に基づいた制御器の設計を行い、保守性を低減した。

図1に制御器の設計を行うために使用した制御対象、モデルおよび摂動の重み関数を含むブロック線図を示す。図に示すように本制御においては、制御対象のモデル ($\tilde{G}_m(s)$) を制御器内に有する構造としている。図1を拡大プラントとする制御系に対して、(1)式に示すような $\mu < 1$ を満たすコントローラ $C(s)$ を数値計算を用いて取得した。

$$\mu = \sup_{\omega \in R} \inf_{D \in D} \bar{\sigma}(DG(j\omega)D^{-1}) < 1 \quad (1)$$

$$D_r := \{diag[d_1, d_2, d_3] \mid d_i \in C\}$$

ただし、 $G(j\omega)$ は $C(s)$ の関数である。

図2に本研究で開発した3軸マニピュレータを示す。同マニピュレータでは、駆動用モータをベース付近に設置し、先端重量を軽量化することで運動性能を向上している。モータにはコアレス DC モータを採用し、アーム

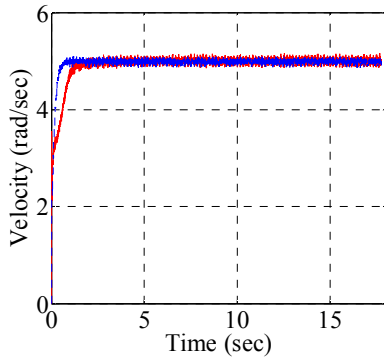


図3 遅延を含む通信における実験結果

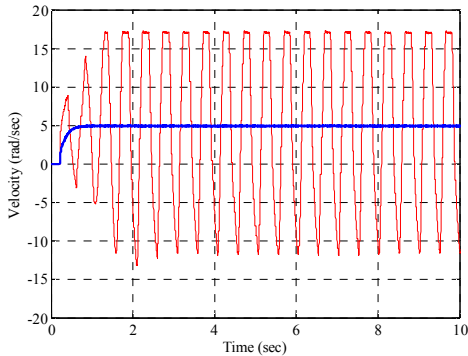


図4 200[msec]の遅延を有する実験結果

先端に加える力はX-Y軸方向で、最大80[N]となっている。

図3、図4に、同マニピュレータの1軸に設計した制御器を実装して行った実験の結果を示す。比較のために、従来研究による制御器の応答を併せて示す。いずれの図においても提案手法の応答を青線で、従来手法の応答を赤線で示す。図3は、遅延を含む無線通信を介して行った実験の結果である。いずれの場合もほぼ同様の応答を示している。一方、図4は200[msec]の遅延を有する場合の実験結果であり、従来手法では不安定になっているのに対し、提案手法が安定性を保っていることが確認できる。この結果から、提案手法の優位性を実証した。

3.2 通信強度を指標とした通信中継ロボットの自律移動制御

基地局とロボットとの間を無線通信で接続し、遠隔地の移動ロボットを操作する場合、無線通信の距離に制限があるため無線通信に支障をきたす恐れがある。このため、通信距離を中継するための中継局を配置することが必要である。そこで、遠隔側のマニピュレータが移動する場合を想定し、通信を中継するノードが自律的に最適な中継点を探索、移動を行うシステムを目指した。

ロボット間の無線通信時に得られる受信信号強度(RSSI)を用いて、移動ロボットの制御を行った。RSSI値は無線通信機器が受信する電波信号の強度を表す値であり、この値が

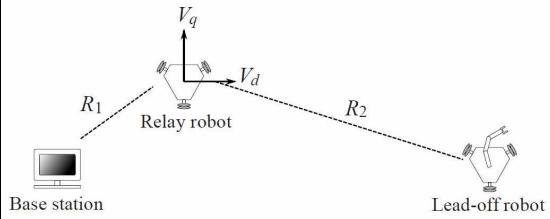


図5 中継ロボットの移動

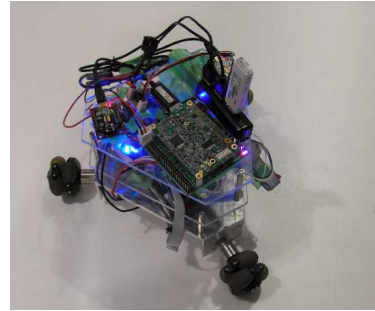


図6 開発した移動ロボット

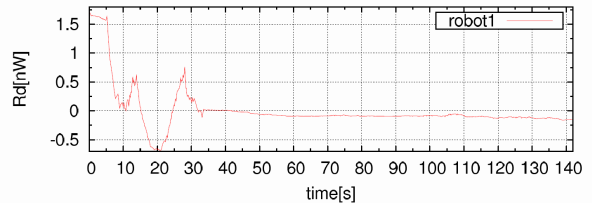


図7 自律移動実験の結果

大きいほどより強い電波信号を受信していることになる。図5に示すように中継ロボットが任意の位置から最適な位置に向かって移動するよう制御した。

図6に開発した移動ロボットの外観を示す。同ロボットは3つの車輪にオムニホイールを装着しており、全方向にホロミックな移動が可能である。コントローラは、ARM9をコアするCPUボード上に実装し、3つのモータへの指令はUSBで接続したH8マイコンベースのモータ制御器に接続している。各モータ制御器は、上位CPUからの指令に応じてモータの速度制御を行った。

図7に本移動ロボットを用いて行った自律移動実験の結果を示す。同図は経過時間を横軸、中継ロボットにおけるR1-R2(RSSIの差)を縦軸としたプロットである。図に示すように、RSSIの差が0付近に収束しており、移動ロボットが中継に最適な位置に移動したことを確認した。

3.3 リアルタイム性を有する無線中継機構の開発

無線ネットワークを利用したリアルタイム制御を行うためには、制御機器だけでなく中継機にもリアルタイム性の高い中継機構

を実装することが必要であり、生じる遅延とジッタを最小限に抑えることが重要である。そこで、リアルタイム OS の一つである RT-Linux を用い、リアルタイム通信用に開発されたプロトコルである RT-Messenger を中継機に適用することにより、リアルタイム性の高い中継機構を構築した。また、同中継機構を用いることで、中継機を含む無線ネット

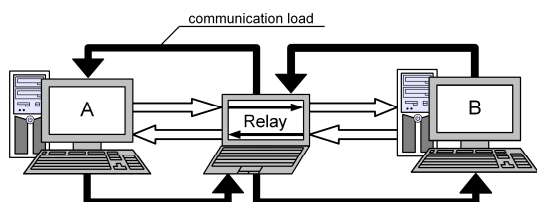


図 8 開発した中継機の構成

ワークのリアルタイム通信における、通信時間の遅延時間及び遅延の変動の最小化を図った。

図 9 に本研究で開発した中継機構の概要図を示す。提案する中継機構では、受信ポートと送信ポートを固定し、パケット受信時の割込のボトムハーフ（ソフトウェア割り込みハンドラ）内で受信・送信処理を完了する。このように、ポートフォワードによる静的ルーティングを実装することで中継処理時間の短縮を図った。また、RT-Messenger はデータリンク層に通信機構が直接実装されているため、従来のプロトコルに比べ 1 つのノード内の送受信処理の時間を短縮する事ができる。同時に、RT-Linux Scheduler は、プロセスの優先度を設定する事が出来る。そのため、RT-Messenger に最も高い優先度を与えて制御指令の通信を行い、通常の通信プロセスを扱う Linux Scheduler を優先度の低いプロセスとして扱うことで、制御指令通信の優先処理をすることができる。

以上のような機構を中継機に実際に実装し、リアルタイム制御のための中継機構の性能評価実験を行ったので図 9 に結果を示す。

通信負荷が無い場合の RTT (Round Trip Time) の計測結果からは、UDP/IP を用いた中継機と、RT-Messenger を用いた提案する中継機との顕著な差が見られなかった。一方、送信周期、受信周期の計測結果を比較すると、RT-Messenger がほぼ一定間隔での送信が出来ていたのに対し、UDP はジッタが大きかった。なお、計測した周期は N 番目のパケットと N+1 番目のパケットの送受信の間隔であるので、間隔が増加に振れた後に減少側に振れ戻っている。

通信負荷が有る場合の結果では、負荷の無い場合に比べて RT-Messenger の RTT の差が 5.90msec であったのに対し、UDP/IP の RTT の差は 76.55msec であった。送信周期につい

	without communication load					
	UDP/IP			RT-Messenger		
	Average μ	Standard Deviation σ	$\mu+2\sigma$	Average μ	Standard Deviation σ	$\mu+2\sigma$
RTT [msec]	2.67	0.69	4.06	2.55	0.50	3.56
Sending cycle [msec]	5.00	0.22	5.44	5.00	0.00	5.00
Receiving cycle [msec]	5.00	0.84	6.67	5.00	0.70	6.40

	with communication load					
	UDP/IP			RT-Messenger		
	Average μ	Standard Deviation σ	$\mu+2\sigma$	Average μ	Standard Deviation σ	$\mu+2\sigma$
RTT [msec]	35.73	22.44	80.61	4.10	2.68	9.45
Sending cycle [msec]	5.00	13.22	31.43	5.00	0.00	5.00
Receiving cycle [msec]	5.00	10.68	26.36	5.00	2.52	10.05

図 9 負荷の有無によるリアルタイム性の比較

ては、RT-Messenger の場合は負荷の有無にかかわらず、一定周期での送信が出来たが、UDP/IP の場合は周期に大きなジッタを生じ、一定周期での送信が出来なかった。

これは、UDP/IP プロセスと通信負荷を与えるプロセスがともに Linux プロセスであるため、Linux Scheduler がこれらのプロセスを並行処理しようとした結果、通信遅延が発生し、一定周期での送信が出来なくなったためと考えられる。一方、提案する中継機では、RT-Messenger プロセスを最も高い優先度で処理を行ったため、負荷プロセスに邪魔をされずに一定周期での送受信が出来た。この結果から、通信負荷に対する、提案する中継機によるリアルタイム性の向上が確認できたとと言える。

4. 研究成果

無線ネットワークを介してロボットを遠隔操作し、離れた場所からの救急医療や災害時のレスキュー活動などに適用可能なシステムの実現を目指した研究を行い、次のような成果を創出した。

1. 変動を含む通信遅延に対応した制御手法の構築：

無線ネットワーク特有の問題である通信時間の遅延について取り組み、遠隔地の制御対象および通信路のモデルを内包する制御器を構成することで、安定性と性能を向上した。また、同制御器の設計においては、構造的不確かさを考慮したロバスト制御設計法を適用し、従来の手法と比較し、より安定余裕が増したことを確認した。

2. 無線通信を中継する移動ロボット群の制御：

建物内のような閉空間で無線を使用すると近距離でも通信が途絶する。これを回避するため、複数の移動ロボットによって自律的に通信の中継を行うシステムを開発した。電

波強度および通信速度の値に基づき、各ロボットを最適な位置に配置するための制御手法を考案し、前年度に開発した全方位移動可能なロボット群に同制御手法を実装した。また、シミュレーションおよび実験を実施した結果、同手法の有効性を確認した。

3. 無線ネットワークの中継機構の構築：

中継ロボット間の制御情報は、画像情報などに比べて優先度が高い。このような情報を優先して中継する通信機構を考案、実験を行い従来の通信方法に比べリアルタイム性の向上を確認した。

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 8 件)

- [1] 山田悠, 吉澤歩, 内村 裕, "リアルタイム制御のための無線ネットワークの中継機構", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, Vol.131, pp.364 - 371, (2011)
- [2] 福岡慶祐, 長原正法, 内村 裕, "ビジュアルフィードバックによるロボットの姿勢安定化", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, Vol.131, pp. 327 - 333, (2011)
- [3] 福居文幸, 猪又健太郎, 内村 裕, "不整地における人型ロボットの安定性の新たな指標", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, Vol.131, pp.259 - 266, (2011)
- [4] 内村 裕, 高橋元一, 那須正, "Development of a time - synchronized wireless sensor network", Electrical Engineering in Japan, Vol.173, pp.46 - 53, (2011)
- [5] 島野浩樹, 内村 裕, "ネットワークベースの制御系における変動通信遅延とモデル化誤差の補償", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, Vol.130, 341-350, (2010)
- [6] 猪又健太郎, 重盛洋, 内村 裕, "上体への外力を考慮した人型ロボットの実時間制御", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, Vol.130, 326-333, (2010)
- [7] Y. Uchimura, T. Nasu, M. Takahashi, "IEEE 802.11-Based Wireless Sensor System for Vibration Measurement", Advances in Civil Engineering, Vol.2010, On line, (2010)
- [8] 内村 裕, "時刻同期性を確保した無線センサネットワーク", 電気学会論文誌 C (電子情報システム部門誌), Vol.128, pp.1528-1534, (2008)

[学会発表] (計 28 件)

■ 国際会議 (14 件)

- [1] Yutaka Uchimura, Masanori Nagahara, "Robust H_{∞} Control for Time-varying Delay System with Frequency Dependent Performance Weights", IEEE International Conference on Mechatronics, 2011 年 4 月, トルコ
- [2] Yutaka Uchimura, Masanori Nagahara, "Control Method for Time-varying System and Its Application for Network Based Motion Control", 6th Europe and Asia Mechatronics Conference, pp.218-223, 2010 年 11 月, 横浜
- [3] H. Yamada, Y.Uchimura, "A Relay Structure of Wireless Network for Real Time Control", 6th Europe and Asia Mechatronics Conference, pp.7-12, 2010 年 11 月, 横浜
- [4] Yutaka Uchimura, Masanori Nagahara, "Model based mu-synthesis control for time-varying network based system", , pp.1914-1919, 2010 年 11 月, 米国
- [5] Yutaka Uchimura, Hiroki Shimano, "Model based networked control for time-varying delay and modeling error", Advanced Motion Control Workshop 2010, pp.64-69, 2010 年 3 月, 新潟
- [6] Kentaro Inomata, Yutaka Uchimura, "3DZMP-based control of a Humanoid Robot with Reaction Forces at 3-Dimensional ContactPoints", Advanced Motion Control Workshop 2010, pp.402-407, 2010 年 3 月, 新潟
- [7] Komiyama Hiroki, Yutaka Uchimura, "Speed Control and Sensorless Force Control with Magnetic Gear", Advanced Motion Control Workshop 2010, pp.325-330, 2010 年 3 月, 新潟
- [8] Yutaka Uchimura, Hiroyuki Shimano, "Network based control with compensation of time-varying delay and modeling error", Proceedings of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.3027-3031, 2009 年 11 月, ポルトガル
- [9] Akira Shimada, Hayato Furukawa, Yutaka Uchimura, "A Movement Control on Indoor Blimp Robots", SICE Annual Conference 2010, pp.490-491, 2010 年 8 月, 台湾
- [10] Yutaka Uchimura, "Wireless Network Based Control with Time Varying Delay", Proceedings of the 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.2962-2967, 2008 年 11 月, 米国
- [11] Yutaka Uchimura, "Wireless Network Based Identification and Control with

Variable Time Delay", Proceedings of 10th International Workshop on Advanced Motion Control, pp.336-341, 2008年3月, イタリア

- [12] Yutaka Uchimura, Tadashi Nasu, Motoichi Takahashi, "Time synchronized wireless sensor network and its application to building vibration measurement", The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.2633-2638, 2007年11月, 台湾
- [13] Yutaka Uchimura, Tadashi Nasu, Motoichi, "IEEE 802.11 Timing Synchronization based Wireless Sensor System for Vibration Measurement", SICE Annual Conference 2008, pp.1698-1703, 2008年8月, 香川
- [14] Yutaka Uchimura, "Time synchronized wireless sensor system for building vibration measurement", Fifth International Conference on Networked Sensing Systems, pp.215-218, 2008年6月, 金沢

国内会議 (14件)

- [1] 長原正法, 内村 裕, "変動時間遅れを有するシステムの制御系設計", 電気学会産業計測制御研究会, 2011年3月, 千葉工大
- [2] 勝田 透, 内村 裕, "無線ネットワーク中継のための移動ロボットの自律制御", 電気学会産業応用部門大会, 2010年8月, 芝浦工大
- [3] 勝田透, 塚田雄輝, 内村裕, "無線ネットワークの自律的な中継を行う移動ロボットの制御", 電気学会産業計測制御研究会, 2010年3月, 東京農大
- [4] 村上博行, 内村裕, "アドホック無線ネットワークのための自律移動ノード配置制御", 電気学会産業計測制御研究会, pp.25-30, 2010年3月, 東京農大
- [5] 山田悠, 吉澤歩, 内村裕, "リアルタイム制御のための無線ネットワーク経路制御", 電気学会産業計測制御研究会, pp.7-12, 2010年3月, 東京農大
- [6] 内村 裕, "通信路上の遅延やパケットロス を考慮したネットワークベース制御", 電気学会産業応用部門大会, pp.91-96, 2009年9月, 三重大学
- [7] 島野浩樹, 内村 裕, "ネットワークベースの制御系における通信遅延の変動と制御対象の不確かさの補償", 電気学会産業応用部門大会, pp.517-522, 2009年9月, 三重大学
- [8] 勝田 透, 内村 裕, "無線ネットワークの自律的な中継を行う移動ロボットの制御", 電気学会産業応用部門大会 2009,

- pp.509-514, 2009年9月, 三重大学
- [9] 内村 裕, "変動する遅延を含む無線ネットワークベースの制御", 平成20年電気学会産業応用部門大会, pp.459-464, 2008年8月, 三重大学
- [10] 名取賢二, 久保亮吾, 内村 裕, 大西公平, "制御システムにおける時変むだ時間の影響に関する一考察", 電気学会産業計測制御研究会, pp.9-14, 2009年3月, 成蹊大学
- [11] 内村 裕, 猪又健太郎, "上体への外力を考慮した人型ロボットの長時間制御", 電気学会産業計測制御研究会, pp.101-106, 2009年3月, 成蹊大学
- [12] 内村 裕, 島野 浩樹, "ネットワークベースの制御系における変動通信遅延の補償", 電気学会産業計測制御研究会, pp.15-20, 2009年3月, 成蹊大学
- [13] 島野浩樹, 内村 裕, "速応性を改善した形状記憶合金アクチュエータの開発", 機械学会年次大会講演論文集, pp.211-213, 2008年8月, 横浜国大
- [14] 猪又健太郎, 内村 裕, "上肢への外力に適応する人型ロボットの長時間制御", 機械学会年次大会講演論文集, pp.163-164, 2008年8月, 横浜国大

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

なし

○取得状況 (計0件)

なし

[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

大西 公平 (OHNISHI KOUHEI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 80137984