

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289112

研究課題名(和文)医療・交通・防災・エネルギーのデペンダブル制御通信のためのマルチレイヤ統合最適化

研究課題名(英文) Multi-layer Network Optimization of Dependable Communication and Control for Medicine, Cars, Disaster Prevention, Energy

研究代表者

河野 隆二 (KOHNO, RYUJI)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90170208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高信頼性が必要な機械間(Machine-to-Machine:M2M)の制御のための通信(制御通信)の最適設計のために制御と通信の制約条件、評価基準を導出した。まず、この設計規範として、従来の平均性能に基づくシステム設計から最悪性能を高く保証する設計規範を用い、Dependabilityを定義した。その上で、制御対象の運動やセンサ特性を定式化し、UWB無線、コグニティブプロトコル、フォールトトレラントルーティング、暗号などの物理層からMAC層、ネットワーク層、アプリケーション層のマルチレイヤ垂直統合方式の考案、それを応用した医療用BANの試作、連携機関と臨床実験、試作評価を行った。

研究成果の概要(英文)：This study has investigated constraint and criterion for optimum design of communication system to control dependable machine-to-machine (M2M). First, a new design criterion to guarantee worst performance enough high has been employed instead of conventional average performance in order to define dependability. Second, motion and sensor characteristics of targeting machines have been mathematically described. Then various multiple layers technologies based on UWB wireless, cognitive protocol, fault tolerant routing, cipher etc. have been proposed and jointly optimized, and medical BAN has been implemented applying these technologies and evaluated them in clinical experiment with collaborating institutes.

研究分野：情報通信工学

キーワード：移動体通信 情報通信工学 高信頼制御通信 医療ICT UWB無線

1. 研究開始当初の背景

超広帯域(UWB: Ultra Wideband)無線は、第3世代広帯域 CDMA に比べても数千倍の超広帯域を用いた数百 Mbps-数 Gbps の超高速伝送、電力スペクトル密度が機器雑音以下で被干渉性に優れ、1 ナノ秒以下のインパルス無線による 30cm 以下の高精度測距が可能で無線技術として注目され、研究開発が進んでいる。そのため、UWB 無線の伝送・測距に関する理論限界、UWB 無線を実現する伝送方式やアンテナ・RF 回路・デバイスなどの設計理論や技術が国内外学会で発表されている。産業界では、本研究代表者が情報通信研究機構(NICT)を兼業して産学官コンソシアムを主導し、UWB 無線の研究、開発、国際標準化(センサーネットワーク・無線 PAN:IEEE802.15.4a や 医療用無線 BAN:IEEE802.15.6)を牽引し、交通、エネルギー、医療などへの応用に注力してきた。また、その医工融合イノベーション創生を H24 年度終了のグローバル COE プログラムで教育に活用した。研究代表者は総務省情報通信審議会 UWB システム委員会作業班を主査し、家電、医療などの応用に適したマイクロ波帯 UWB システムと衝突防止などの目的としたミリ波帯車載 UWB レーダの電波法の技術的条件を審議し、法制化、施行を主導した。その他、環境や制御対象の状況を認識しシステムの構成を適応的に変更し最適化するコグニティブ無線、ソフトウェア無線などの物理層技術を、複数の無線ノード間の協調ダイバーシティ・ネットワーク符号化などの協調通信やコンテンツベースとフリーの Hybrid プロトコルなどの MAC 層技術、ネットワークの物理的特性を考慮したルーティングなどのネットワーク層技術を融合するマルチレイヤ技術の研究が学会で盛んである。本研究では、制御のための通信という視点から、エレクトロニクス層の Embedded デバイスなどの低消費電力、限定計算能力に適したバイオメトリックスや UWB などの物理層のセキュリティ技術と組み合わせた暗号化、認証などのアプリケーション層技術を含めたマルチレイヤ Dependable 技術の統合最適化を研究する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超広帯域(UWB: Ultra Wideband)無線、Secure MAC プロトコル、コグニティブ(Cognitive)ネットワーク、暗号・認証などの物理層から MAC 層、ネットワーク層、アプリケーション層のマルチレイヤ情報通信技術(ICT)の統合最適化により、従来の人間の通信以上に高信頼性が必要な機械間(Machine-to-Machine:M2M)の制御のための通信を対象に、人命に関わる医療、交通、防災、エネルギー供給に安心して導入できる頼りになるデペンダブル(Dependable)無線ネットワークを構築することにある。具体的には、研究代表者が研究開発、標準化、

法制化に注力する UWB 無線、Secure MAC、冗長ルーティングなどの ICT と制御理論を駆使し、制御と通信、伝送と記憶の学術的融合基盤を研究し、新産業創生に貢献する。

3. 研究の方法

本研究では、高信頼性が必要な機械間(M2M)の制御のための通信(制御通信)の最適設計のために制御と通信の制約条件、評価基準を導出する。

次に、この設計規範に基づく Dependability を定義し、制御対象の運動

やセンサ特性を定式化した上で UWB 無線、コグニティブプロトコル、フォールトルーティング、暗号などの物理層から MAC 層、ネットワーク層、アプリケーション層のマルチレイヤ垂直統合方式の考案、それを応用した医療用 BAN の試作、連携機関と臨床実験、試作評価を行う。さらに、医療用 BAN を車、ロボット、ビル、エネルギーの制御に発展させた交通・防災・エネルギー社会基盤に応用するための研究へ発展させる。

(1)M2M 制御のためのデペンダブル無線制御通信ネットワークの環境測定とモデル化

(2)M2M 制御のためのデペンダブル無線制御通信ネットワークの医療用 BAN への応用とその臨床研究

(3) デペンダブル無線制御通信のための制御理論と通信理論の包括的体系化および医療他への応用

(4)M2M 制御のためのデペンダブル無線制御通信ネットワークのための高信頼制御の物理層、MAC 層、ネットワーク層のマルチレイヤ統合技術方式の考案、性能解析

(5)M2M 制御のためのデペンダブル無線制御通信ネットワークのマルチレイヤ統合技術の医療への応用

(6)デペンダブル無線制御通信ネットワークのマルチレイヤ垂直統合最適化技術の実験実証

(7)デペンダブル無線制御通信ネットワークのマルチレイヤ垂直統合最適化技術の医療、交通、防災、エネルギーなどの統合社会インフラストラクチャ応用

4. 研究成果

4.1 無線 BAN のための異なる QoS を考慮した多重化・誤り制御方式に関する研究

Wireless Body Area Network (WBAN) の国際標準規格の 1 つに IEEE802.15.6 がある。本規格では、取り扱うデータを user priority によって 7 段階の優先度を設定することが可能になっている。ただし、これらの優先度に応じた具体的な実現手段は実装依存で、例えば、本研究の対象としている UWB システムでは、規格上は物理層では(default mode と high QoS mode) 二つのモードが定められているだけである。本研究では、優先度に合わせた QoS 実現手法の検討を行い、シミュレーションによる評価を行った。具体的には

default mode においても Hybrid ARQ を適用し、user priority 毎に ARQ や FEC の使い方を選択できるように修正を施すことで、QoS パラメータの有効活用を行えるようにした。加えて、MAC 層の上に多重化層を追加し、異なる QoS を持つデータを同時に送信する場合にも QoS 制御ができるようにした。また、幾つかのチャンネルモデルで評価を行ない、シミュレーション評価の結果、UWB 伝送路において user priority 毎に求められる要件に適した特性を得ることができた。

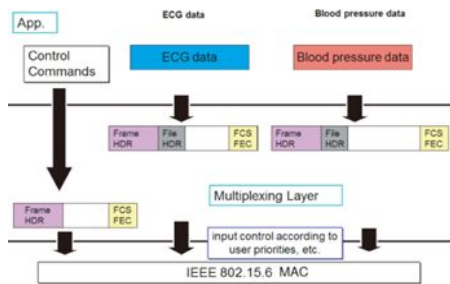


図 4.1 提案での多重化法

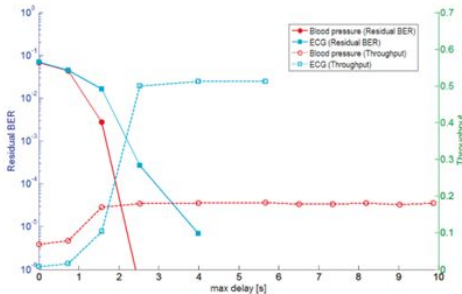


図 4.2 レイテンシに対する残留 BER とスループット特性

4.2 UWB-WBAN におけるユーザ間干渉及びシステム間干渉に対する干渉対策

ワイヤレスボディエリアネットワーク (WBAN) 等に代表される、近距離無線通信の研究が活発であり、またその用途は医療用を含むなど干渉に対する耐性を高め通信の信頼性を高める要求は大きい。一般的な干渉対策の手法としては希望波以外を全て除去、抑制する干渉キャンセラが用いられるが、本研究では通信誤りの原因、干渉元のシステムの種類を認識し、システム内干渉等利用できる場合には干渉を除去せず積極的に利用する方法も含め検討を行っている。本研究では対象システムとして超広帯域 (UWB) 無線による WBAN を対象とし、従来のインパルスレディオ型 UWB (IR-UWB) ではその送信波形としてガウシアンパルスが用いられているが、同一のシステム内の全ての端末で同一の波形を用いるためシンボルの衝突により相互の通信に干渉を与える。このため、IR-UWB では波形以外に拡散符号を用いる等の干渉対策が必要となる。そこで本研究では、波形自体が直交性を持つ波形群を作成可能な修正エルミート波形 (MHP) の利用し、これを直交マッチドフィルタ (OMF) の直交基底として利用することでユーザ間干渉を低減する方法を考案した。また、MHP のもつ直交性を OMF の直

交基底として利用することで、MHP を用いる同一システムの干渉は復調でき、それ以外のシステムからの干渉については除去を行う OMF 構造を提案した。

4.3 移動ロボット追尾のための基幹ノードと位置推定ノードを用いた再帰型測位アルゴリズム

無線センサネットワークでは多数のセンサの情報を集め、統合的に処理することが求められるため、対象物あるいはセンサの正確な位置情報を知ることが非常に重要となる。しかし、広範囲にわたって存在するすべてのセンサノードについて測位を行うためには、多数の位置基準ノードが必要となり、設置コストやシステムのスケラビリティの面で好ましくない。そこで本研究ではセンサノードの位置推定を再帰的に行う、自律分散型の位置推定アルゴリズムについて検討した。具体的には UWB 端末によって構成されるセンサネットワークを想定し、協調位置推定システムを実現するための提案を行い、計算機シミュレーションにより測位精度の評価を行った。想定する無線センサネットワークのシステムモデルを図 4.3 に示す。座標が未知のセンサノードをターゲット、座標が既知のセンサノードをリファレンスと呼ぶものとし、それらの区別をしない場合ノードと呼ぶこととする。リファレンスノード-ターゲットノード間の距離が離れるほど、通信信号の減衰による影響が大きくなり受信機が通信信号を認識するタイミングが変化し、測距情報に大きな誤差が発生すると考えられる。今回はリファレンス-ターゲット間距離を 0.5m から 50m まで 5m ごとに変化させ測距誤差を計算した。また、また無線の出力を 0.01mW、0.05mW、0.1mW と変化させ測距誤差を計算したシミュレーション結果を図 4.4 に示す。この結果より測距誤差はリファレンス-ターゲット間の距離の自乗に比例して大きくなるのがわかる。また、測位誤差が 10cm 以内となるためには 0.01mW では 13m、0.05mW では 14m、0.1mW では 29m 以内のノードから測距する必要が有ることがわかった。

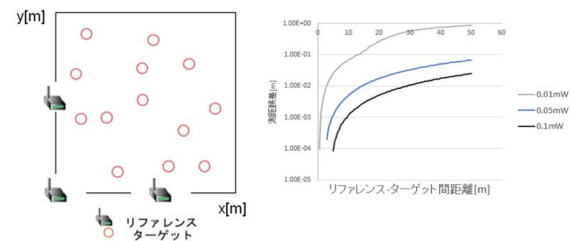


図 4.3 システムモデル図 図 4.4 ノード間距離-誤差特性

4.4 レギュラトリーサイエンスに基づく無線医療機器に用いる IR-UWB 方式の認証と最適化

無線医療機器の医薬品医療機器等法に基づく認証の効率化のための評価は従来あまり行われておらず、電波法と医薬品医療機器

等法を同時に考慮した研究はほとんど見受けられない。本研究では、無線医療機器の On-Board 認証を目指し、電波法と医薬品医療機器等法の両方に基づいた評価を効率的に行うための方法を検討した。具体的には、まず通信距離と SAR を考慮した BER の最適化を行い、所望 BER を満たすために必要な通信距離や SAR の条件を明確化した。さらに、所望 BER を満たした上で Duty-Cycle やパルス幅の制御を行い、生体の温度上昇と通信のスループットの最適化を行った。無線医療機器に対する評価ではリスクである SAR の値や生体の温度上昇とベネフィットである無線通信の BER やスループット等の通信性能がトレードオフの関係となっていることが確認できた。

4.4 WBAN における緊急情報のためのクロスレイヤ誤り制御方式の研究

無線通信を用いた医療や健康モニタリングシステムに関する研究が活発に行われているなかで、WBAN の国際標準である IEEE802.15.6 が策定され、MAC 層における通信方式や雑音などからの誤り対策として誤り訂正符号が決められた。加えて、本規格では、取り扱うデータに対して 8 段階の優先度を設定することが可能になっている。我々は従来研究として、優先度に合わせた QoS 実現手法の検討を行い、シミュレーションによる評価や理論解析を行った。具体的には、複数のデータを同時に扱えるように multiplexing layer を設け、加えて Decomposable code と呼ばれる誤り訂正符号と Weidon's ARQ と呼ばれる再送方式を組み合わせた手法を用いた。しかしながら、本方式に適した MAC プロトコルとの組み合わせや、各層と協調したクロスレイヤ最適化などの課題が残っていた。そこで本研究では、クロスレイヤ設計の第一歩として、最上位の優先度を持つ緊急医療情報に対するクロスレイヤ誤り制御方式を検討した。WBAN ハブから送られるビーコン信号にパイロット信号を付加し、このパイロット信号からチャネルの SINR を推定して誤り訂正符号の符号化率を決定した。加えて、緊急情報のみがランダムアクセスにより通信可能な排他的通信区間 (EAP) での衝突を避けるために、WBAN 内の WBAN ノードの数に応じて EAP を分割した。計算機シミュレーションの結果、従来方式に比べて、これらの手法によって遅延時間を抑えつつ、省電力かつ誤りの少ない誤り率を達成することを確認した。

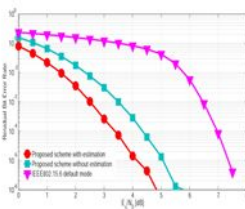
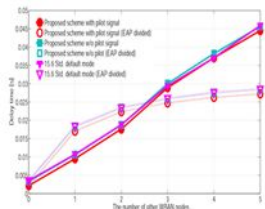


図 4.5 WBAN ノード数に対する 図 4.6 残留 BER 特性
遅延時間特性

4.5 医療用 WBAN のための IEEE 802.15.6 に基づく Superframe の制御方式に関する研究
現在の IEEE802.15.6 の MAC 層の規定では、ビーコン信号が送信されてから次のビーコン信号が送信されるまでの区間 (Superframe) は等しい長さのタイムスロット単位で構成され、スケジュールアクセス区間とランダムアクセス区間の比率もタイムスロット単位で決定されている。しかしながら、現状の標準規格ではスケジュールアクセス区間とランダムアクセス区間の比率に関する規定はされていない。そこで本研究では、アプリケーション要求に基づいて Superframe の制御方式を検討し、医療用アプリケーションに対して新たに MAC ヘッダーを取り入れる提案を行った。具体的には、医療用アプリケーションはスケジュールアクセス区間で通信を行い、通信スロットを予約するために Packet Indication を MAC ヘッダとして取り入れた。つまり、次に生起するパケットの生起時間を Superframe のシーケンス番号とそのスロット番号で示し、ハブはその情報を元にスケジュールアクセス区間のスロット数を決定する。この手法の利点は、送信遅延時間の最低限保証ができる点にある。計算機シミュレーションの結果、制約条件下において医療トラフィックの遅延時間を保証することを示すことができた。

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14件)

(1) Kento Takabayashi, Hirokazu Tanaka, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno,

“Performance Analysis of Multiplexing and Error Control Scheme for Body Area Networks,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 査読有, DOI: 10.1186/s13638-016-0561-0, pp.1-16, (2016-3)

(2) Takumi Kobayashi, Chika Sugimoto, and Ryuji Kohno,

“Interference Cancellation for Intra and Inter UWB systems Using Modified Hermite Poly-nomials Based Orthogonal Matched Filter,” IEICE Transaction of Communications Vol.E99-B No.3 pp.569-577, 査読有,

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e99-b_3_569 (2016-3)

(3) Emtithal Ahmed Talha, Ryuji Kohno, "The Performances Bounds of Super PHY Channel using Concatenated Codes to Transmit WBANs Medical Data via LTE" in International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE) ISSN: 2320-9569, Vol.11, Issue.4, pp80-87, 査読有, <http://ijetee.org/Docs/Volume%2011/Issue%204/15.pdf> (2015-8)

(4) Takumi Kobayashi, Masato Suzuki, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "Space Temporal Interference Cancellation Using TDL Array Antenna and Waveform Based OMF for IR-UWB Systems," ICT Express, Volume 1, Issue 2, September 2015, Pages 71-75, The Korean Institute of Communications Information Sciences, available online at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icte.2015.09.006>, DOI: 10.1016/j.icte.2015.09.006, 査読有, (2015-09)

(5) Akinobu Nemoto, Pham Thanh Hiep, Ryuji Kohno, "Control Access Point of Devices for Delay Reduction in WBAN Systems with CSMA/CA. Communications and Network," 2015, vol..7, No.1, pp.1-11, 査読有, Scientific Research An Academic Publisher, <http://www.scrip.org/journal/cn> DOI: 10.4236/cn.2015.71001(2015-02)

(6) Pham Thanh Hiep, Ryuji Kohno, "Channel Capacity Delay Tradeoff for Two-Way Multiple-Hop MIMO Relay Systems with MAC-PHY Cross Layer," Wireless Personal Communications, 査読有, DOI 10.1007/s11277-014-2104-5(2014-10)

(7) Pham Thanh Hiep, Ryuji Kohno, "Water-filling for full-duplex multiple-hop MIMO relay system," EURASIP Journal on Wireless Communications and

Networking, pp.1-10, 査読有, 2014:174, <http://link.springer.com/article/10.1186/1687-1499-2014-174> (2014-10)

(8) Xiaoan Huang, Chika Sugimoto, and Ryuji Kohno. "Hybrid Radio and Visible Light Communications in Inter-Vehicle Communication." Applied Mechanics and Materials. Vol.548. 2014, pp. 1166-1172. 査読有, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.1166.

(9) Kento Takabayashi, Hirokazu Tanaka, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "Multiplexing and Error Control Scheme for Body Area Network employing IEEE 802.15.6," IEICE TRANSACTIONS on Communications, Vol.E97-B, No.03, pp.564-570, 査読有, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e97-b_3_564 (2014-03)

(10) Mohammed Fatehy, Chika Sugimoto, and Ryuji Kohno, "BAN-BAN Interference Performance Analysis with DS-UWB," International Journal of Computer and Electrical Engineering vol. 5, no. 1, pp. 56-60, 査読有, DOI: 10.7763/IJCEE.2013(2014-1)

(11) Holy. Macha. Randrianandraina, Chika Sugimoto and R. Kohno, "DS-UWB Packet Structure for Inter-Vehicular Communication Based Ranging for Collision Avoidance System", Cyber Journals: Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT), Vol. 3, Issue 11, November Edition, pp.1-9, 査読有, <http://www.cyberjournals.com/Papers/Nov2013/01.pdf> (2013-11)

(12) Xiaoan Huang, Chika Sugimoto, and Ryuji Kohno, "Toward a High Capacity of 60-GHz Ultra-WideBand Radio over Fiber System Based on SCM/DWDM", Cyber Journals,

July Edition, 2013 Volume 3, Issue 7, pp.25-31, 査 読 有 ,
<http://www.cyberjournals.com/Papers/Jul2013/04.pdf> (2013-7)

(13) Mohammed Fatehy, and Ryuji Kohno, "Analytical Markov Model for IEEE 802.15.6 Slotted Aloha MAC," Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering, vol. 51, no. supplement, pp.R-323. 査 読 有, DOI:10.11239(2013-7)

(14) Pham Thanh Hiep, Nguyen Huy Hoang, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "End-to-end channel capacity of MAC-PHY cross-layer multiple-hop MIMO relay system with outdated CSI," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 144, 査 読 有 , DOI:10.1186/1687-1499-2013-144 (2013-5)

[学会発表](計10件)

(1) Keiko Sameshima, Ryuji Kohno, "Evaluation of IR-UWB BAN for Certification based on Regulatory Science," IEEE 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT2016), Boston, USA, 2016年3月20日

(2) Tomohiro Fukuya, Ryuji Kohno, "QoS-Aware Superframe Management Scheme based on IEEE 802.15.6," IEEE 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT2016), Boston, USA, 2016年3月20日

(3) 高林健人、杉本千佳、河野隆二「WBANにおける緊急情報のためのクロスレイヤ誤り制御方式」第38回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2015)、下電ホテル、岡山、2015年11月24日

(4) Takumi Kobayashi, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "Interference Mitigation Method using Orthogonal Matched Filter with Modified Hermite Pulse for UWB-BAN assuming Multi-user and Multi-system Environment," The 9th International Symposium on Medical ICT (ISMICT2015), Kamakura, Japan, 2015年3月4日

(5) 小杉恵太、島圭介、河野隆二、辻敏夫、神鳥明彦、佐野佑子、"非線形振動子に基づくCPGシナジーモデルと運動機能評価"電子情報通信学会ソサエティ大会、徳島大学、

徳島、B-20-7、2014年9月15日

(6) 鈴木雅人、杉本千佳、河野隆二、"アレーアンテナとOMFの組み合わせによる車車間通信のための時空間干渉除去システム," 信学技報 ITS2014-10, pp.13-16、東京大学、東京、2014年8月1日

(7) 大日方裕也、山末耕太郎、杉本千佳、河野隆二、"医療用UWB-BANのためのチャネル情報を用いた干渉対策双方向通信に関する研究," 第2回ヘルスケア・医療情報通信技術研究会(MICT)、大阪市立大学文化交流センター、大阪、2014年7月29日

(8) 佐藤克憲、山末耕太郎、杉本千佳、河野隆二、"低消費電力を考慮した送受信一体化による医療BANのMACプロトコルの一検討," 第2回ヘルスケア・医療情報通信技術研究会(MICT)、大阪市立大学文化交流センター、大阪、2014年7月29日

(9) 稲垣慶太郎、杉本千佳、河野隆二、"移動ロボットのための測位と通信性能向上UWB/INS複合航法システム," 信学技報 RCC2014-1 - RCC2014-21, pp.57-62、機械振興会館、東京、2014年5月29日

(10) Kento Takabayashi, Hirokazu Tanaka, Chika Sugimoto, Ryuji Kohno, "Multiplexing and Error Control Scheme with Modified Hybrid ARQ for Body Area Network employing IEEE 802.15.6 in UWB-PHY," The Second Ultra Wideband for Body Area Networking Workshop (UWBAN-2013), Boston, MA, USA, 2013年10月1日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 隆二 (KOHNO RYUJI)
横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号: 90170208

(2) 研究分担者

落合 秀樹 (OCHIAI HIDEKI)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 20334576

(3) 連携研究者

杉本 千佳 (SUGIMOTO CHIKA)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 40447347
根本 明宜 (NEMOTO AKINOBU)
横浜市立大学・医学部医学情報学・准教授
研究者番号: 20264666
山末 耕太郎 (YAMASUE KOTARO)
横浜市立大学・医学研究科疫学・公衆衛生学部門・特任講師
研究者番号: 50526366