

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20246065

研究課題名（和文） 高密度地震観測システムの実現に向けた無線センサネットワーク基盤技術に関する研究

研究課題名（英文） Study on a fundamental technology of wireless sensor networks toward high-density earthquake monitoring system

研究代表者

森川 博之（MORIKAWA HIROYUKI）

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：50242011

研究成果の概要（和文）：

本研究は、低コスト・高密度な地震観測システムを無線センサネットワークの1つのキラーアプリケーションとして見据え、革新的なコンピューティング技術およびネットワーキング技術を開発することを目的としている。これに向け、省資源ハードリアルタイムオペレーティングシステム、センサノード向けマルチコア CPU、ネットワーク基盤技術、および地震モニタリングシステムの開発に取り組み、これら技術が高い信頼性を要求するアプリケーションにも適用可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

This study aims to construct novel computing and networking technologies of wireless sensor networks toward low-cost and high-density earthquake monitoring systems, which we believe will be a killer application of wireless sensor networks. For the purpose, we worked on developing a compact hard real-time operating system, a multi-core CPU for wireless sensor nodes, and a network fundamental technology. Through actual deployment and management of the earthquake monitoring system, we confirmed the applicability of our developed technologies for applications which need high reliability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2009年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2010年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
総計	35,700,000	10,710,000	46,410,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：無線センサネットワーク，地震モニタリング，構造工学・地震工学，時刻同期，高精度同期サンプリング，タスクスケジューリング

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワークの分野では、省電力化を主な目的として、通信プロトコルやオペレーティングシステムに関する研究が進められてきた。しかしながら、無線センサネットワークを真に実用的な技術とするためには、具体的なアプリケーションを想定したトップダウン的アプローチによってハード

ウェア技術およびソフトウェア技術を統合的に捉え直すことが強く求められている。

また、阪神大震災、スマトラ島沖地震といった巨大地震、2005年末に明らかになった耐震強度偽装事件を契機として、構造物の安全性が大きな注目を集めている。しかしながら、現在の技術による構造物安全性検査には、専門家による精査が必要となり人的コスト

が非常に大きく、低コストによって安全性を判断するための技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、真のユビキタス環境を実現するために必須となる無線センサネットワーク基盤技術の開発である。具体的には、低コストかつ高密度な地震観測システムを1つのキラーアプリケーションとして見据え、無線センサネットワークにおけるハードウェア技術とソフトウェア技術とを統合的に根本から捉え直すことによる、革新的なコンピューティング技術およびネットワーク技術の開発を目的とする。

地震観測システムが無線センサネットワーク技術によって構築可能となり、低コスト化および高密度化が実現されれば、一般住宅や中低層ビルへのシステム導入による全国規模での建造物の安全性向上、建造物の損傷箇所特定技術の構築が可能となる。また、地震観測システムが面的に広域に展開されれば、地震波伝播のより詳細な現象解析までもが実現できる。さらに、地震観測に耐える高精度センシング・低消費電力・頑健性が実現されれば、車や情報家電に含まれる多くの組み込み機器にも応用が可能となり、無線センサネットワーク技術を利用した新しいアプリケーションやサービスが花開くことが期待される。

しかしながら、これまでの無線センサネットワーク研究は、レイヤごとの個別な技術開発に閉じており、地震観測システムの構築に必須である高精度センシング・低消費電力・頑健性という3つの要件を実現できない。これに対して、本研究はハードウェア技術とソフトウェア技術とを根本から捉え直し、ハードリアルタイム保証のためのハードウェア支援、無線センサネットワークに特化したマルチコアCPUといったハードウェア技術およびオペレーティングシステム、コンパイラといったソフトウェア技術の統合的な開発を目的とする。さらに、これらの基盤技術を用いて、飛躍的に低コストかつ高密度な地震観測システムを構築することによって、将来の無線センサネットワークアーキテクチャおよびこれらの利用技術を発見・示唆することをも目標とする。

3. 研究の方法

従来の地震観測システムは、地震観測専用が開発されたセンサとデータ収集装置を用い、それらを有線によって接続していた。このため、システム構築コストが数100万円以上と非常に高価であり、設置も地震工学に携わる研究機関の研究施設などに限られていた。

本研究はハードウェア技術とソフトウェア技術とを統合的に検討し、汎用性を維持し

たまま、高精度センシングを低消費電力かつ頑健に実現可能な無線センサネットワークを構築することで、低コスト・高密度な地震観測システムを実現するという点に特色を有する。本研究は以下の4つのタスクから構成される。

(1) 無線センサノードのためのハードリアルタイムオペレーティングシステムの開発

現存する無線センサノード向けオペレーティングシステムはオーバーヘッドの削減のためにベストエフォートによるタスク管理を行っており、従来の地震観測専用装置のような低サンプリングジッタによる高精度センシングは不可能であった。また、ベストエフォートによるタスク管理では、CPUに処理不可能な計算要求が発生する場合が存在し得ることや、時間的制約を満たすか判断することが不可能であることからシステムの頑健性を欠き、地震観測システムのようにユーザーの生命に関わる情報を提供するシステムへの応用は困難である。本研究は、CPUが具備すべきハードウェア支援までも詳細に検討することによって、低オーバーヘッドでハードリアルタイム保証が可能なオペレーティングシステムを開発することによってこれら2つの問題点を解決する。

(2) 無線センサノードのための超低消費電力マルチコアCPUの開発

従来の無線センサノードにおいては割り込みを用いて複数タスクを同時実行していた。無線センサノードにおいてはタスクが非常に軽量なため、割り込みのオーバーヘッドが相対的に大きく、処理すべきタスクと比較して高性能で消費電力の大きいCPUを具備する必要があった。また、ハードリアルタイムタスクが複数存在する場合、全てのタスクの時間的制約を同時に満たすためにCPUを高いクロック周波数で駆動させる必要があり、消費電力の増大を招く。これらの問題に対して、本研究では、CPUをマルチコア化することによって1つのコアに少数のタスクを割り当て、割り込みによるオーバーヘッドを削減するとともに最低限のクロック周波数でも時間的制約を満たせる計算機構を新たに提案し、さらには無線センサネットワークに特化したCPUを開発する。

(3) 地震観測システムのためのネットワーク基盤技術の開発

地震観測システムには以下の5つのネットワーク基盤技術が求められる。これらの基盤技術について、精度・速度などの非機能要件、アルゴリズムについて検討し、PAVENETモジュール上に実装を行う。

高精度な時刻同期：建造物の健全性判断

のためには各観測点の同時刻における加速度データの相関値が必要となる。具体的には、地震工学の見地から1ミリ秒以下の精度による時刻同期が求められ、このような高精度な時刻同期に向けて、MACレイヤで時刻同期処理を行う機構を開発する。

省電力なウェイクアップ： バッテリ持続時間の延長のためには地震発生時のみ加速度センシングを行い、それ以外の時はシンクノードからの計測開始要求を間欠的に確認する省電力制御が求められる。これに向けて、ロングプリアンプル型の間欠的受信待機MACプロトコルを開発する。プリアンプル長およびキャリアセンスアルゴリズムに関して実装を行うとともに消費電力・ウェイクアップ時間の観点から検討を行う。

高速なデータ転送： 地震観測によって取得される加速度データは数100KBとなり、従来の無線センサネットワークでは想定されていない巨大なデータとなる。ロングプリアンプル型のMACプロトコルは省電力な受信待機が可能なものの、データ送受信に対するオーバーヘッドが非常に大きい。高速データ転送に向けて、短いプリアンプルで連続的に転送可能なバースト転送機構を開発する。プリアンプル長、パケットサイズ、エラー訂正符号、ビットエラーレートに関してモデル化を行い実効スループット・消費電力の観点から検討を行う。

異常検出： センサノードの故障や時刻同期が不可能な状態になったときに、故障ノードを検出する機構を開発する。これに向けて、シンクノードが定期的にセンサノードへ生存応答要求を送信するアルゴリズムおよびプロトコルに関して検討を行う。

動的ネットワークスタック技術： 地震観測システムに求められる以上のような多様な要求の実現に向けて、状態に応じてMACレイヤからトランスポートレイヤまでのネットワークアーキテクチャを動的に再構成可能な動的ネットワークスタック技術を開発する。

(4) 超高密度地震観測システムの実展開

本研究では、地震観測システムの展開として以下の2つのシナリオを想定している。具体的には、1つの部屋に8台程度のノードを配置する「部屋への展開」、1つのビルの各フロアに1台以上のセンサノードを展開する「ビルへの展開」の2つの設置シナリオである。従来の地震観測システムでは実現不可能であったこれらのシナリオを実現することで、高精度センシングを実現しつつ低コストおよび応用の広さといった有用性を明らかにする。また、実展開によって取得したデータを積極的に地震工学の研究者や一般ユーザに公開する。

4. 研究成果

前述の目的に向け、無線センサノード向けハードリアルタイムオペレーティングシステムの開発、ネットワーク基盤技術の開発、無線センサノード向けマルチコアCPU設計、時刻同期機構の開発、地震モニタリングシステムの開発の4つの研究を進めた。

(1) 無線センサノードのためのハードリアルタイムオペレーティングシステムの開発

無線センサネットワークにおけるオペレーティングシステムでは多様なタスクを処理しながら、いかにセンサノード全体の消費電力を削減するかが重要となる。PAVENET OSでは、Microchip社のマイクロコントローラPIC18の持つ、動的な割込み優先度とレジスタ自動待避の2つのハードウェア機能を最大限に利用することで、低オーバーヘッドにリアルタイム処理を実現する(図1)。これにより、TinyOSと同等の省資源性や低オーバーヘッドを実現しながらもハードリアルタイム処理を可能としている。PAVENET OSはハードリアルタイム処理をサポートすることで、無線通信資源、計算資源、周辺デバイスの稼働時間をきめ細かく制御し、結果としてセンサノードで消費する電力を削減することを可能とした。

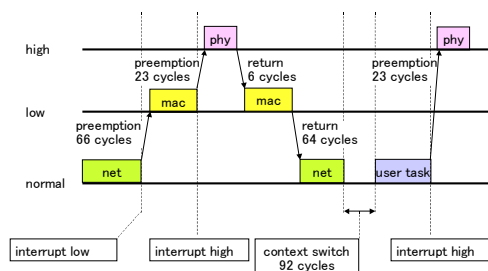


図1 PAVENET OSのコンテキストスイッチ

(2) 無線センサノード向けマルチコアCPUの設計

現存する無線センサノードは、無線通信、計算処理、サンプリング等、複数のタスクを1つのCPUで並列実行しており、スケジューリングの不確定性により測定誤差の増大、パケットロスの発生などの問題が生じる。この問題に対して、CPUをマルチコア化し1つのコアに1つのタスクを割り振ることで不確定性を除去するアーキテクチャを提案し検討評価を行った。

また、マルチコアCPUの設計において重要となるコア間通信アーキテクチャの基礎的設計を行い(図2)、無線センサネットワークの実際のアプリケーションにおいてコア間のデータ通信量を評価することで、設計の妥当性を示した。

さらに、ルーティングのためのリンク推定計算や時刻同期処理など、センサノードに特

有なタスクの解析を行い、実際のセンサネットワークのアプリケーションを動作させた場合にかかるオーバーヘッドなどの評価を行った。

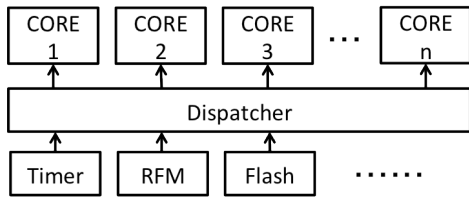


図2 無線センサノード向けマルチコアCPUの基本アーキテクチャ

(3) 高密度地震観測システムのためのネットワーク基盤技術の開発

構造解析においては分散設置されたノード間の揺れ方の相関が重要となるため、すべてのノードが同期してサンプリングを行う必要がある。これに向けて、時刻同期機構、MAC プロトコル、タスクスケジューリングまでも統合的に検討し、最大ジッタが 3.4us となる同期サンプリング機構を開発した (図 3)。

また、本同期サンプリング機構について、非同期タスク存在下でも開発者の保証なく精密な同期サンプリングが可能となるように拡張を行った。

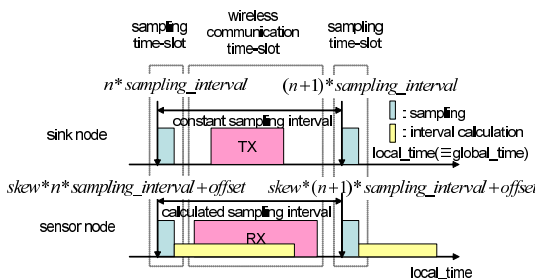


図3 高精度分散同期サンプリング機構

さらに、時刻同期機構について詳細に検討を行った。これまでの無線センサネットワーク向けの時刻同期機構は、時刻同期誤差の確率的な相関を考慮しておらず、誤差がホップ数に対して指数関数的に増大してしまうという問題があった。本研究では、時刻同期補正手法を FIR フィルタとしてモデル化し、誤差を増幅させる原因を特定し、新たな誤差補正手法を開発することで、ホップ数に対する誤差の増大を線形に抑えることを可能とした (図 4)。

構築したモデルに基づき、誤差を低減させる時刻同期パケットのフラッディング手法、および時刻同期誤差をオンラインで推定する手法を開発した。

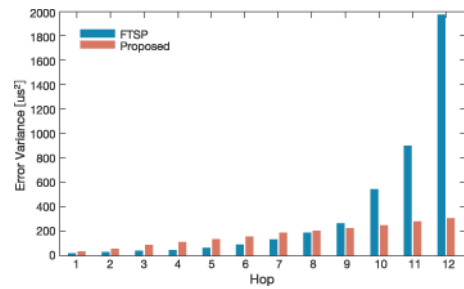


図4 時刻同期機構の誤差評価

(4) 高密度地震観測システムの実装および運用評価

(1)~(3) で開発した基盤技術を用いて、地震観測システムの実装および運用評価を行った。また、取得した地震波形から構造物の健全性を示す層間変型角を算出し、本システムの実用性を示した。2つのCPUを具備するセンサノードを開発し (図 5)、システムの構築を行った。2つのCPUが低速なバスで接続されているためCPU間通信のオーバーヘッドは大きいものの、加速度値の信号処理、ネットワーク処理を切り分けることにより、高精度なサンプリング、頑健なネットワークの実現に有効であった。

また、本システムを秋葉原ダイビルに8台構成で設置し、数十個の実地震の取得に成功している。さらに、利用者が簡単にアクセス可能なように、RESTful インタフェースによって地震モニタリングシステムにアクセス可能とする基盤技術の開発を行った。

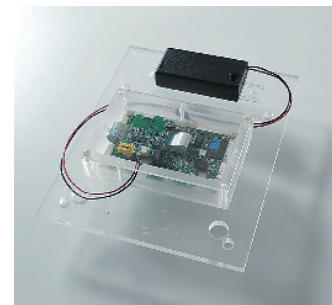


図5 地震モニタリング向けセンサノード

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5件)

1. 森川博之, ユビキタスセンサネットワークが切り開く新たな世界, 応用物理, vol. 80, no. 3, pp. 189-pp. 194, Mar. 2011. (査読有)
2. 猿渡 俊介, 森川 博之, 社会創造に資するセンシングプラットフォーム, 情報処

- 理学雑誌, vol. 51, no. 9, pp. 7-14, September 2010. (査読有)
3. 猿渡 俊介, 森川 博之, ユビキタスセンサネットワーク, 日本ロボット学会誌, vol.28, no. 3, pp.284-287, April 2010. (査読有)
 4. 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, 無線センサノードのためのハードリアルタイム保証が可能な仮想マシン, 電子情報通信学会論文誌, vol. J92-B, no. 1, pp. 130-139, January 2009. (査読有)
 5. P. Poupyrev, P. Davis, and H. Morikawa, A Media Access Protocol for Proactive Presence Discovery in Ubiquitous Wireless Networks, IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B, No.11, pp. 3639-3647, Nov. 2008.
- [学会発表] (計25件)
1. 鈴木 誠, 森川 博之, 無線センサネットワークにおける時刻同期のための定期的散布プロトコル, 電子情報通信学会総合大会, B-20-19, 東京, Mar. 14, 2011. (査読無)
 2. 石田 繁巳, 瀧口 貴啓, 猿渡 俊介, 森川 博之, ブルームフィルタを用いたウェイクアップ型無線通信システムにおける ID 長の影響, 電子情報通信学会総合大会, B-5-146, 東京, Mar. 14, 2011. (査読無)
 3. 瀧口 貴啓, 石田 繁巳, 岸 孝彦, 丹羽 栄二, 見並 一明, 猿渡 俊介, 森川 博之, ウェイクアップ型無線通信におけるビット不一致許容 ID マッチング, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2010-176, 沖縄, Mar. 3, 2011. (査読無)
 4. S. Ishida, T. Takiguchi, S. Saruwatari, M. Minami, and H. Morikawa, Implementation of Bloom-Filter-Based ID Matching for Wake-up Wireless Communication, Internet of Things 2010 Conference (IoT 2010), Tokyo, Japan, Dec. 1, 2010. (査読無)
 5. T. Yamamoto, S. Saruwatari, and H. Morikawa, Energy-Efficient Upload Engine for Participatory Sensing, in Proceedings of International Workshop on Ubiquitous Service Platforms (IWUSP 2010), Kyoto, Japan, Oct. 5, 2010. (査読有)
 6. S. Ishida, T. Takiguchi, S. Saruwatari, M. Minami, and H. Morikawa, Evaluation of a Wake-up Wireless Module with Bloom-Filter-Based ID Matching, in Proceedings of 8th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT2010), Kuching, Sarawak, Malaysia, June 15, 2010.
 7. 大原 壮太郎, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 森川 博之, 無線センサノード向けマルチコア CPU におけるコア間通信に関する検討, 電子情報通信学会総合大会, B-20-58, 宮城, Mar. 16, 2010. (査読無)
 8. Eko Rianto Drajat, 猿渡 俊介, 森戸 貴, 南 正輝, 森川 博之, バッテリレス WSN における位置情報を用いたデータ収集プロトコルの評価, 電子情報通信学会総合大会, B-20-23, 宮城, Mar. 16, 2010. (査読無)
 9. 瀧口 貴啓, 石田 繁巳, 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, ブルームフィルタを用いたウェイクアップ型無線通信システムの消費電力評価, 電子情報通信学会, 無線通信システム研究会, RCS2009-254, 福岡, January 21, 2010. (査読無)
 10. 鈴木 誠, 大原 壮太郎, 猿渡 俊介, 今泉 英明, 倉田 成人, 南 正輝, 森川 博之, 無線センサネットワークにおける時刻同期の誤差分布に関する検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-20-6, 新潟, Sep. 15, 2009. (査読無)
 11. 大原 壮太郎, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, 無線センサノード向けマルチコア CPU におけるタスク分割手法, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟, B-20-20, Sep. 15, 2009. (査読無)
 12. 大原 壮太郎, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, 無線センサノードにおけるシングルコア CPU の問題点に関する定量的評価, 情報処理学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム研究会, UBI-23-6, 京都, July 16, 2009. (査読無)
 13. 鈴木 誠, 大原 壮太郎, 猿渡 俊介, 倉田 成人, 南 正輝, 森川 博之, 無線センサネットワークにおける時刻同期誤差伝播の解析, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2009-15, 京都, July 16, 2009. (査読無)
 14. T. Takiguchi, S. Saruwatari, T. Morito, S. Ishida, M. Minami, and H. Morikawa, A Novel Wireless Wake-up Mechanism for Energy-efficient Ubiquitous Networks, In Proceedings of the 1st International Workshop on Green Communications (GreenComm'09), Dresden, Germany, June 18, 2009. (査読有)
 15. S. Saruwatari, M. Suzuki, and H. Morikawa, A Compact Hard Real-Time Operating System for Wireless Sensor

- Nodes, in Proceedings of Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2009), Pittsburgh, USA, June 17, 2009. (査読有)
16. 瀧口 貴啓, 森戸 貴, 猿渡 俊介, 南正輝, 森川 博之, Bloom Filter を用いたウェイクアップ型無線通信の消費電力評価, 電子情報通信学会総合大会, B-5-96, 愛媛, Mar. 17, 2009. (査読無)
17. 森戸 貴, 猿渡 俊介, 南正輝, 森川 博之, バッテリレス無線センサネットワークにおけるデータ収集プロトコルの設計と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2008-157, 沖縄, Mar. 3, 2009 (査読無)
18. 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 倉田成人, 南正輝, 森川 博之, 地震モニタリングに向けた高精度分散同期サンプリング, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2008-91, 愛知, Jan. 22, 2009. (査読無)
19. M. Suzuki, S. Saruwatari, N. Kurata, M. Minami, and H. Morikawa, A Quantitative Error Analysis of Synchronized Sampling on Wireless Sensor Networks for Earthquake Monitoring, in Proceedings of The 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2008), Raleigh, NC, USA, November 5, 2008. (査読有)
20. 大原 壮太郎, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 南正輝, 森川 博之, 無線センサノード向けマルチコア CPU の低消費電力性に関する初期的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2008-59, 沖縄, Oct. 22, 2008. (査読無)
21. N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa, Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System using Wireless Sensor Networks, in Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Beijing, China, Oct. 12, 2008. (査読有)
22. 倉田 成人, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 森川 博之, ユビキタス構造モニタリングシステムの実建物での実証実験, 日本建築学会学術講演会, 11041, pp. 495-496, 広島, Sep. 18, 2008. (査読無)
23. 瀧口 貴啓, 森戸 貴, 猿渡 俊介, 南正輝, 森川 博之, ウェイクアップ型無線モジュールにおける通信時の消費電力に関する検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-79, 東京, Sep. 16, 2008. (査読無)
24. 金 昊俊, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 倉田 成人, 南正輝, 森川 博之, 地域規模の高密度地震モニタリングに向けた同期サンプリング機構の初期的評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-20-22, 東京, Sep. 16, 2008. (査読無)
25. S. Ohara, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa, A Prototype of A Multi-Core Wireless Sensor Node for Reducing Power Consumption, in Proceedings of The 2008 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2008), pp. 369-372, Turku, Finland, July 28, 2008. (査読有)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 振動測定システム、センサノード及び管理ノード

発明者: 倉田成人, 小鹿紀英, 森川博之, 猿渡俊介, 鈴木誠

権利者: 倉田成人, 小鹿紀英, 森川博之, 猿渡俊介, 鈴木誠

種類: 特許

番号: 特願 2008-175956

出願年月日: 2008年7月4日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森川 博之 (MORIKAWA HIROYUKI)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号: 50242011

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし