

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 6 月 5 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300023

研究課題名（和文） 可動ノードを用いた無線センサネットワークの長寿命・高信頼化手法の開発

研究課題名（英文） Developing long-lived and reliable wireless sensor networks using mobile sensor nodes

研究代表者

伊藤 実 (MINORU ITO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90127184

研究成果の概要（和文）：無線センサネットワーク（wireless sensor network: WSN）は、限られたバッテリー容量で長期間の動作を要求される。本研究では、移動能力のない通常のセンサ（静止ノード）に加えて、移動可能なセンサ（可動ノード）を一部導入した WSN に対して、可動ノードを適切に移動させることにより対象領域全体を長期間センシングするための手法を開発した。計算機シミュレーション、テストベッド等により、本手法の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：A wireless sensor network (WSN) is required to be long-lived with a limited amount of battery for each sensor node. In this research, we have developed a method for sensing the target field and prolonging the WSN lifetime by using mobile sensor nodes as well as usual static sensor nodes. We have confirmed effectiveness of the proposed method through computer simulation and test bed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	7,900,000	2,370,000	10,270,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：センサネットワーク，可動ノード，長寿命化

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク（wireless sensor network: WSN）では、広域に設置された多数の小型センサがセンシングした情報を（各センサ自身1つのノードとして）無線マルチホップ通信することで、環境情報の収集や移動物の追跡等を行う。特別なインフラが不要なため、大規模農地での温度等の管理、国境警備での監視、極地探査等の危険な領域の調査などへの利用が期待されている。各センサは小型バッテリーによりセンシング及び無線通信を行うため、一部のセンサに過度の負担が

掛かると早期に電池切れが起こる。また、過酷な環境による故障の発生もありうる。しかし、個々のセンサの修復は困難なことが多く、WSN 全体として対象領域を長期間センシングすることは重要な問題である。

WSN の省電力化を図る研究の多くは、一度配置されると位置が固定する静止ノードのみの使用を想定している。例えば、バッテリー残量が少ないセンサのデータ送受信頻度を下げることにより寿命を延ばす手法が提案されている(Tang ら[Infocom 2006, pp.1-12])。しかし、センサの故障に関する考慮はされて

いない。近年、車輪とモータ等を備え、対象領域を自由に移動できる可動ノードを利用した研究が行われ始めた。例えば、可動ノードのみから成る WSN において、故障や電池切れを起こしたノードに対して、他の可動ノードが適切な位置に移動しバックアップする手法が提案されており、WSN の長寿命化が可能なが示されている (Wang ら [Infocom 2005, pp.2302-2312]). しかし、静止ノードに比べ可動ノードは約 2 倍のコストであるため (Wang ら [ICNP 2003, pp.315-324]), この手法では WSN の設置コストは高くなる。静止ノードに加え、一部可動ノードを導入し、センサ故障によりネットワークが分断したときに、可動ノードの移動により修復する手法も提案されている (Mei ら [WWASN 2006]). しかし、可動ノードの移動に掛かる電力消費のみに着目し、ノード間の通信コストを考慮していない。次に、 k 重被覆 (k -cover: 対象領域のどの地点も少なくとも k 個のセンサのセンシング範囲にある) の概念は WSN の信頼性の尺度の 1 つであるが、 k 重被覆を実現するセンサ配置を求め、少ない電力消費で可動ノードを移動させる手法が提案されている (Wang ら [MobiCom 2007, pp.39-50]). しかし、すべて可動ノードであり、ノード間の通信コストを考慮していない。また、 k 重被覆を実現するための条件は、領域をセンシング範囲に基づくグリッドに分割し、各グリッドに k 個のセンサを配置するというシンプルではあるが非常に冗長なものになっている。

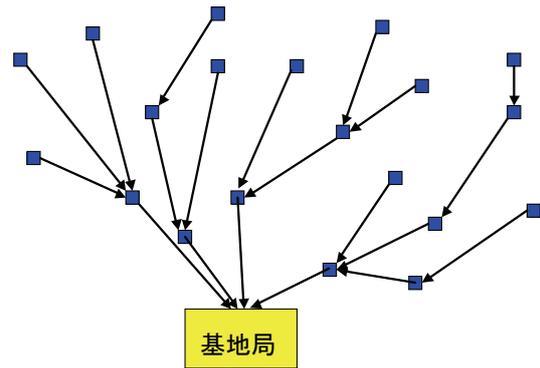
2. 研究の目的

本研究では、右図のように、対象領域に配置された各センサから基地局にマルチホップ通信でセンシングしたデータを収集する WSN を考える。この WSN は静止ノードと可動ノードから構成されるものとする。本研究の目的は、このような WSN が与えられたとき、センシング対象領域を 100%カバーしつつ、できる限り長期間稼働するように、データ収集木を構築し、かつ、可動ノードの適切な移動先を決定する手法を開発し、その手法の評価を行うことである。さらに、より信頼性の高い WSN を実現するため、 k 重被覆の制約も課した場合も考察する。本研究では、データ収集木のモデルとして次の 2 種類を考えた。

(1) 送信データ一定型: 末端センサから基地局にマルチホップ通信でデータを収集する過程で、どのセンサの送信データ量もあるサイズを超えない。例えば、各センサがセンシングするデータが少量である、あるいは、異常検知システム等で通常状態では送信データがあまりないような WSN の抽象モデルである。

(2) 送信データ累積型: 中継ノードでは、送られてきたデータに自身のデータを加えて、

次のノードに送信する。従って、基地局に近



づくにつれ、一般に、送信データ量は増加する。例えば、画像等のデータ量の多いものをセンシングする WSN の抽象モデルである。

理論的には、送信データ累積型は送信データ一定型より一般的な問題設定であり、問題の難易度も高い。本研究では、まず送信データ一定型の解決策を考察した後、その知見を生かして、送信データ積算型に取り組んだ。以下では、送信データ累積型について述べる。

3. 研究の方法

本研究で考える WSN では、初期状態において、センシングの対象となる領域 (平面で障害物は無いとする) 内に 1 つの基地局、および、複数の静止ノードと可動ノードが配置される。それらの位置はすべて既知とする。各センサノードは、自身を中心とする半径 r の円内の温度や湿度等のデータを周期的にセンシングし、全ノードをつなぐ木構造のネットワーク (データ収集木) に沿ったマルチホップ通信で、センシングしたデータを基地局に送る。静止ノード、可動ノードとも初期バッテリー量は同じ B とし、 t 時間で消費するセンシングや機器維持等の電力量 αt で与えられる。可動ノードは速度 v で移動可能で、距離 l 移動するための電力量は βl で与えられる。また、あるノードがデータ量 n を距離 d 離れたノードに送信するための電力量は γnd^p で与えられる。ここで、 α, β, γ は機器に依存した係数、 p は電波の減衰係数である。例えば、電波が球面上に拡散するとき $p=2$ で、完全な指向性があれば $p=0$ である。簡単のため、消費電力さえ掛ければ、電波の到達距離 d は任意に延ばせるとする。可動ノードの移動制御は基地局で集中的に管理され、強い電波で各可動ノードに移動先の指示を直接届けられるとする。同様に、データ収集木も基地局で構成し、各ノードに必要な情報を直接送信する。静止ノードは、センシング、機器の維持、データの送信により電力を消費する。可動ノードは、それらの電力消費に加えて移動に伴う電力消費もある。

対象領域全体をセンシングするという条件の下で WSN の稼働時間の延長を目的として、可動ノードを適切な位置に移動させる。しかし、時間の経過によりあるノードがバッテリー切れを起こすと、可動ノードの最適な位置も変化する。従って、基地局では、各可動ノードの適切な位置、および、その時の適切なデータ収集木を定期的に計算する。直観的には、すべての静止ノード、可動ノードが同じ割合で徐々にバッテリーを消費し、すべてが同時にバッテリー切れを起こし、WSN の機能を停止するのが理想的な解である。しかし、そのような解が常に存在するとは限らず、存在するとしても求めることは困難である。

簡単のため、各ノードでセンシングして得られるデータ量は同じ n であるとする。あるノードが送信するデータ量は mn で与えられる。ここで、 m はデータ収集木におけるそのノードの子孫の数（自身を含む）である。従って、送信データ一定型のように最小被覆木を構成すると、基地局に近いノードほど送信データ量が多くなり、電力消費も大きくなる。そこで、各ノードの電力消費を平等に近づけるためには、送信データ量に応じて電波の到達距離を調整する工夫が必要である。具体的には、末端ノードは、自身のデータしか送信しないので、基地局に近い遠距離のノードに強い電波で送信し、一方、基地局に近い送信データ量の多いノードは、近距離のノードに弱い電波で送信する。

4. 研究成果

(1) すべてのセンサの位置が与えられたとき、それらのセンシング範囲が対象領域を k 重被覆しているかどうかを幾何学的に厳密に判定することは計算量が掛かり、現実的ではない。そこで、 δ - k 重被覆と呼ばれる効率的な k 重被覆判定が行えるための十分条件を求めた。具体的には、対象領域を間隔 δ のグリッドに分割し、グリッドの各格子点にチェックポイントを設ける。次に、 k 重被覆性を保証するため、センサのセンシング範囲を半径 $r - \delta/\sqrt{2}$ に制限し、各チェックポイントが k 個以上のセンサのセンシング範囲内にあるかどうかを調べる。 $\delta \rightarrow 0$ にすれば、この十分条件は必要十分条件にいくらかでも近づけられるが、チェックポイント数も増加する。精度と効率性がトレードオフになっているので、状況に応じて δ の値を決めることになる。この十分条件は、Wang ら [MobiCom 2007, pp.39-50] が与えた条件を含む、より一般的なものである。性能の差を比較するために、実験を行った。実験では、 $100\text{m} \times 100\text{m}$ のフィールドに 300 ノードをランダムに配置した。これはランダムに配置した場合、フィールドがほぼ確実に 3 重被覆以上されるようなノード数であ

る。そのため、全ての場合において 1~3 重被覆されていると判定されることが期待される。100 回のランダム配置に対して提案手法と Wang らの手法を適用し、1 重被覆、2 重被覆、および 3 重被覆を満たしたと判定された割合を比較した。ただし、提案手法では δ の値を 0.5m から 16m まで変化させ、それぞれについての実験を行った。Wang らの手法では、ノードのセンシング半径より、グリッドは $\sqrt{10\text{m}}$ 四方と固定される。その結果、 $\delta \leq 16\text{m}$ のとき、本手法は Wang らの手法よりも優れた精度で判定できることを確認した。例えば、Wang らの手法では 3 重被覆であると判定されたのは 4%であったのに対して、提案手法では、 $\delta \leq 12\text{m}$ のとき 3 重被覆であると 100%判定できた。計算時間について、Wang らの手法は 0.13ms であるのに対し、我々の手法では $\delta = 1\text{m}$ のとき 159ms、 $\delta = 8\text{m}$ のとき 2ms、 $\delta = 12\text{m}$ のとき 1ms であった。Wang らの手法では計算時間は非常に短い、我々の手法において $\delta = 1\text{m}$ でも短い計算時間を実現しており、許容範囲内の計算時間で高い精度で判定できることが確認できた。

(2) 対象とする問題は NP 困難であるため、遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm: GA) を用いた近似アルゴリズムを考案した。本アルゴリズムは可動ノードの移動先と、基地局を根としてすべてのノードを含むデータ収集木を決定する。本アルゴリズムはノードの初期配置の時点から適用され、 k 重被覆を保つ解が算出できなくなるまで何度も適用する。しかし、GA は大域的な探索能力に優れているが、解の一部を改善するような、最終的な調整能力には難点がある。そこで提案手法では、負荷均等木構築法と呼ばれる局所探索法を組み合わせることで解の改善を行った。以下、負荷均等木構築法について述べる。

まず、基地局に最も近いノードは、最適解において必ず基地局に直接データを送信する。もしその他のノードが基地局に直接データを送信しないならば、そのノードでの通信に要する電力は $\gamma m_1 n d_1^p$ となる。ここで、 m_1 はそのノードの子孫の数（この場合には全ノード数）、 d_1 は基地局との距離である。次に、基地局に 2 番目に近いノードも基地局に直接送信すると仮定する。そのノードでの通信に要する電力は $\gamma m_2 n d_2^p$ となる。ここで、 m_2 は子孫の数、 d_2 は基地局との距離である。もしその他のノードが基地局に直接データを送信しないならば、また、その他のノードの位置も無視するならば、 $\gamma m_1 n d_1^p$ と $\gamma m_2 n d_2^p$ ができる限り平等になるように、 m_1 個と m_2 個に子孫を配分するのが最適である。同様の考え方で、基地局に近いノードから順に、基地局に直接送信するとして、各ノードの最適な子孫の配分数が得られる。

以上の操作は、あるノードに着目したとき、

そのノードから基地局に直接送信するよりも、それまでに選ばれたノードを経由する方がコストが低いことが分かるまで繰り返される。この時点で、基地局に直接送信するノードの集合、および、各ノードの子孫数が決定する。次に、それらの決定した各ノードを基地局とみなし、上記と同様の考え方で、そのノードに直接接続するノード集合、および、各ノードの子孫数を決定できる。すべてのノードの接続が決まるまで繰り返せば、全体のデータ収集木が構成できる。

(3) 本手法によって保たれるフィールドの k 重被覆時間を評価するため、数百ノードの WSN で、本手法の一部の機能を無効化したアルゴリズムとの比較実験を行った。この実験では、提案手法の可動ノードの移動先決定およびデータ収集木構築の性能を評価するため、静止ノードと可動ノードの両方を用いて実験を行った。フィールドの大きさは、 k 重被覆の際に過剰なノードが出ない程度にノード数によって調整した。50m×50m を基本的な大きさとした (100 ノードで $k=3$ の場合)。静止ノード、および可動ノードの初期位置は、フィールド内に一様分布乱数を用いて与えた。可動ノードを用いない手法と比較して、本手法は k 重被覆時間が約 1.8 倍長いことを確認した。これより、可動ノードは k 重被覆時間を長く保つために、有効であることが分かった。次に、負荷均等木構築法を用いた場合は、用いない場合に比較して k 重被覆時間が約 1.2 倍長いことを確認した。これより、負荷均等木構築法の有効性も示された。さらに、本手法は Wang らの手法よりも k 重被覆時間が約 1.4 倍長いことを確認した。これより、提案手法がより長い k 重被覆時間を実現する可動ノードの移動先を計算することが確認でき、提案手法の可動ノードの移動先の決定および k 重被覆判定手法は Wang らの手法よりも有効であることが示された。また、上記(1)で示したように、Wang らの手法では、初期配置の直後は k 重被覆を満たすと判定されない場合が多かったが、30 試行のいずれも可動ノードを移動させることで、 k 重被覆を満たすことができた。また、ノード数が増えるに従い、 k 重被覆時間は減少している。これは、基地局に送信しなければならないデータ量がノード数の増加と共に増え、特に基地局周辺のノードの通信のための電力消費が増加するからである。本手法による 30 試行の評価値の最良値と最悪値のばらつきは 84%~109%の範囲内に収まっており、極端に性能の悪い解を出力しないことが確認できた。本手法は 300 ノードの $k=3$ の場合で 120 秒程度であり、現実的な時間内で計算可能である。

(4) 全ノードに占める可動ノードの割合によって、 k 重被覆時間に対する手法の有効性は変化する。ノード数が同じならば、可動ノード

の割合が大きい方が明らかに有利であるが、一方、可動ノードは静止ノードよりもコストが掛かる。そこで、可動ノードの割合が k 重被覆時間に与える影響について評価するため、100, 200, および、300 ノードの WSN で $k=3$ として、可動ノードの割合を 0%から 100%まで 5%刻みで変化させ、それぞれについて本手法による k 重被覆時間を 30 回計測した平均値を求めた。ノード数にかかわらず、可動ノードの導入割合が 0%から 20%にかけては k 重被覆時間が急激に増加しており、20%以上では増加はゆるやかになるという傾向が見られた。これは、可動ノードの割合が 20%以下で、その効果 (フィールドの k 重被覆の完成やバッテリー消費が激しいノードのサポート) がほぼ発揮されることを示す。提案手法を使用する場合、可動ノードの割合は 20%前後が妥当であることが確認できた。

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 12 件) すべて査読有

① 高松悠, 孫為華, 山内由紀子, 安本慶一, 伊藤実: すれ違い通信を活用した複数携帯電話端末による省電力協調動画ダウンロード手法, 情報処理学会論文誌, 53, 2, pp.783-794 (2012).

② A. Ahmed, K. Yasumoto, Y. Yamauchi and M. Ito: Probabilistic Coverage Methods in People-Centric Sensing, Journal of Information Processing, 52, 10, pp.2902-2919 (2011).

③ 小谷和也, 孫為華, 木谷友哉, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 交差点鳥瞰映像の協調撮影と共有を目的とした車間通信プロトコル, 情報処理学会論文誌, 52, 6, pp.1980-1992 (2011).

④ 布川雄大, 孫為華, 安本慶一, 伊藤実: MANETによるワンセグ難視聴端末救済手法, 情報処理学会論文誌, 52, 2, pp.829-838 (2011).

⑤ 清川皓太, 山本眞也, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 3D 仮想空間を用いた情報家電のためのリモコンフレームワーク, 情報処理学会論文誌, 52, 2, pp.596-609 (2011).

⑥ A. Ahmed, K. Yasumoto, M. Ito, N. Shibata and T. Kitani: HDAR: Highly Distributed Adaptive Service Replication for MANETs, IEICE Trans. on Information and Systems, E94-D, 1, pp.91-103 (2011).

⑦ 勝間亮, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 無線センサネットワーク長寿命化のためのノード集合の分割に基づくスリープスケジューリング手法, 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用, 3, 3, pp.140-153 (2010).

⑧ 栗山恭嘉, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一,

伊藤実: 都市や観光地における混雑状況を考慮した多数ユーザ同時巡回スケジューリング手法, 情報処理学会論文誌, 51, 3, pp.885-898 (2010).

⑨ 花野博司, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 携帯電話端末への低コスト動画広告配信を目的とした WiFi 併用協調ダウンロード方式, 情報処理学会論文誌, 51, 2, pp.440-452 (2010).

⑩ 武兵, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 天気変化を考慮した観光スケジュール群の探索アルゴリズム, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, 3, 1, pp.87-97 (2010).

⑪ 勝間亮, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 移動センサノードを用いたデータ収集型 WSN での k 重被覆時間の最大化手法, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, 2, 3, pp.75-86 (2009).

⑫ 山本眞也, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 実・仮想空間を跨るインタラクションを実現するための QoS 適応機構とその評価, 情報処理学会論文誌, 50, 2, pp.765-776 (2009).

[学会発表] (計 55 件)

① 勝間亮: WSN の k 重被覆維持時間最大化のための分散計算によるスリープスケジューリング手法, 情報処理学会 DICOMO2011 シンポジウム (2011 年 7 月 6 日 宮津市).

② 藤本恭平: オブジェクトの監視・追跡を行う無線マルチメディアセンサネットワークの稼働時間延長および QoS 確保のためのルーティング手法, 情報処理学会 DICOMO2011 シンポジウム (2011 年 7 月 6 日 宮津市).

③ K. Yasumoto: Distance and Time Based Node Selection for Probabilistic Coverage in People-Centric Sensing, IEEE SECON 2011 (2011 年 6 月 29 日 Salt Lake City, USA).

④ W. Sun: Improving Mobile Terrestrial TV Playback Quality with Cooperative Streaming in MANET, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (2011 年 3 月 29 日 Cancun, Mexico).

⑤ J. Kuroiwa: A Self-Stabilizing Algorithm for Stable Clustering in Mobile Ad-hoc Networks, International Conference on New technologies, Mobility and Security (2011 年 2 月 10 日 Paris, France).

⑥ Y. Takamatsu: Energy Aware Cooperative Download Method among Bluetooth-Ready Mobile Phone Users, International ICST Conference on Mobile and Ubiquitous System (2010 年 12 月 8 日 Sydney, Australia).

⑦ K. M. Therry: Cost-Efficient Deployment for Full-Coverage and Connectivity in Indoor 3D WSNs, 情報処理学会 DICOMO2010 シンポジウム (2010 年 7 月 9 日 下呂市).

⑧ 勝間亮: WSN 稼働時間延長のためのスリープスケジューリング手法, 情報処理学会 DICOMO2010 シンポジウム (2010 年 7 月 7 日 下呂市).

⑨ 柴田直樹: モバイルアンカノードを用いた低コストな水中センサノードの位置推定法, 情報処理学会 MPS 研究会 (2010 年 5 月 21 日 前橋市).

⑩ R. Katsuma: Extending k-Coverage Lifetime of Wireless Sensor Networks with Surplus Nodes, International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (2010 年 4 月 27 日 Seattle, USA).

⑪ A. Ahmed: DAR: Distributed Adaptive Service Replication for MANETs, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (2009 年 10 月 13 日 Marrakech, Morocco).

⑫ R. Katsuma: Extending k-Coverage Lifetime of Wireless Sensor Networks Using Mobile Sensor Nodes, International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (2009 年 10 月 13 日 Marrakech, Morocco).

⑬ A. Ahmed: DASR: Distributed Adaptive Service Replication for MANETs, 情報処理学会 DICOMO2009 シンポジウム (2009 年 7 月 10 日 別府市).

⑭ 勝間亮: 過剰にノードを用いることによるセンサネットワークの稼働時間延長方式, 情報処理学会 DICOMO2009 シンポジウム (2009 年 7 月 10 日 別府市).

⑮ 松本啓司: 水面を移動可能なアンカノードを用いた水中センサネットワークのノード位置推定手法の提案, 情報処理学会 MBL 研究会 (2009 年 5 月 7 日 宮古島市).

[図書] (計 1 件)

① R. Katsuma, Y. Murata, N. Shibata, K. Yasumoto and M. Ito: Maximizing Lifetime of Data Gathering Wireless Sensor Network, IN-TECH Book "Sustainable Wireless Sensor Networks" Chapter 19, pp.431-451 (2011).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等
<http://ito-lab.naist.jp/themes/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 実 (MINORU ITO)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学
研究科・教授
研究者番号：90127184

(2) 研究分担者

安本 慶一 (KEIICHI YASUMOTO)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学
研究科・教授
研究者番号：40273396

柴田 直樹 (NAOKI SHIBATA)
滋賀大学・経済学部・准教授
研究者番号：40335477

村田 佳洋 (YOSHIHIRO MURATA)
広島市立大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号：40362834

孫 為華 (WEIHUA SUN)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学
研究科・助教
研究者番号：40517520

(3) 連携研究者

山内 由紀子 (YUKIKO YAMAUCHI)
九州大学・システム情報科学研究所・助教
研究者番号：10546518

木谷 友哉 (TOMOYA KITANI)
静岡大学・若手グローバル研究リーダー
育成拠点・助教
研究者番号：40418786