

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(A)  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20240006  
研究課題名(和文) 大規模ユビキタスネットワークのリアルタイム・シミュレーション技術の開発  
研究課題名(英文) Real-time network simulation for large-scale ubiquitous network  
研究代表者  
東野 輝夫 (HIGASHINO TERUO)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：80173144

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、都市環境においてユビキタス通信機能を利用することで人や車の行動がどのように変化するかを迅速に予測・評価できるようにするため、十万ノード規模で人や車が移動する現実的な都市環境を構築し、ユビキタス通信機能を利用したネットワークシステムをできるだけ忠実且つ高速にシミュレーションするための技術開発を行った。まず、シミュレーションを高速に実行するために、MAC 層のシミュレーション処理を簡略化することで、シミュレーション全体の効率を向上させる手法を考案した。また、都市環境を忠実に再現できるよう、シミュレーションミドルウェアの開発、及び現実的なモビリティモデルの構築を行なった。さらに、シミュレーションによる性能評価作業を効率に実施するため、システムが保持する多数のパラメータを網羅的かつ効率良くテスト可能な手法を考案した。

## 研究成果の概要(英文)：

In this research, we have developed a simulation framework that simulates mobile and ubiquitous networking systems with realistic pedestrian and vehicle mobility in urban environment. This allows developers to predict and evaluate the impact of those ubiquitous computing and communication capability on the activities of pedestrians and movement of vehicles. First, we have proposed an abstraction method for the MAC layer to improve scalability of wireless network simulation. In order to model urban environment in a realistic way, we have proposed a simulation middleware that is able to read digital map data and to generate realistic mobility. Using those systems, we can comprehensively and efficiently evaluate the system performance and capabilities. We have also proposed a method to efficiently reduce the total amount of exhaustive test scenarios required for target system validation and performance verification under different environmental settings.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
2009 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			
総計	26,700,000	8,010,000	34,710,000

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：無線通信，ユビキタスネットワーク，シミュレーション，リアルタイムシステム

## 1. 研究開始当初の背景

将来のユビキタスネットワーク社会においては、第4世代携帯電話網を含め、アドホック・ネットワーク、車車間通信、WiMAXなどの広帯域無線通信ネットワークが、互いの連携による柔軟な相互接続性を実現し、それらに接続された多数の移動情報端末や移動センサにより、地域適応的できめ細かい情報通信が可能なネットワーク社会へ移行していくシナリオが描かれている。このようなユビキタスネットワーク環境を実現するには、十万ノード規模で人や車が移動する現実的な都市環境下でユビキタス通信機能を利用したネットワークサービスを実現した場合に、人や車の行動がどのように変化するかを、できるだけ迅速且つ正確に予測・評価できることが望ましい。また、総務省の「安心・安全な社会の実現に向けた情報通信技術のあり方に関する調査研究会」の報告書などにおいても、都市部での災害時に避難者の携帯電話や車両から得られる十万オーダーの移動情報をリアルタイムに可視化して防災センターなどで表示する技術や、その情報を元にどのような避難指示情報をどの地域の人間や車両に与えると最も被害を減らすことができるかを高速にシミュレーションし、リアルタイムに提示するシステムの開発などが、安心・安全な社会を実現するための社会基盤システムとして早急に実現されるべき技術であると提言されており、都市スケールでのシミュレーション・可視化技術の実現に対する期待は極めて大きい。

従来、国内外の研究機関において、大規模有線ネットワークを対象としたシミュレーション・エミュレーション技術が数多く研究・開発されている。例えば、北陸先端科学技術大学院大学のStarBedプロジェクトでは、512台のPCとそれらをつなぐスイッチにより5,000台規模のノードからなる仮想ネットワークを構築し、実環境に近いシミュレーションを可能としている。米国のジョージア工科大学のFujimoto教授の研究グループでは、マルチプロセッサ計算機やネットワーク上の複数計算機で動作する並列シミュレータGTWを開発し、数万~十万ノード規模のシミュレーションが可能になっている。また、米カリフォルニア大・イリノイ大は共同で光ネットワークを介した多重通信により複数ノードでリソースを共有する並列コンピュータOptIPuterの研究を行っている。これらの研究は主として固定ノードからなる大規模・大容量ネットワークを対象としている。

近年、米国を中心にセンサネットワークやアドホック・ネットワークなど移動体を含む無線ネットワークの研究も活発に進められ、ns-2 wireless extension、GloMoSim、QualNet、

OPNETなど、無線ネットワークの大規模シミュレーションのためのツール開発も進んでいるが、移動端末のモビリティとして、ほとんどのツールがランダム移動などの単純な移動パターンしかサポートしておらず、ユビキタス通信により人や車に与えられた情報がそれらの人や車の行動にどのように影響するかを予測し、避難指示など基地局から散布した情報の伝搬時間や地区毎の伝搬確率などを具体的に評価するために利用できるツールはほとんど存在しない。一方、防災計画の分野では日本が先導的な研究を推進しており、防災科学技術研究所や京都大学防災研究所など多くの研究機関で被災状況予測のためのシミュレーションの研究が行われている。また、渋滞予測などを目的とした交通流シミュレータの研究開発が各国で進められており、米国フロリダ大学のCORSIM、カーネギーメロン大学のGrooveNet、豊田中央研究所のNETSTREAMなどが知られているが、これらのツールにおいても、車車間通信を用いた場合の渋滞状況の変化や信号制御の効果などは十分評価できないのが現状である。同様に多くの社会シミュレータが開発されているが、ユビキタス通信を用いた十万ノード規模のデータの伝搬状況をリアルタイムにシミュレーションする技術はこれまでほとんど実現されていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、都市環境においてユビキタス通信機能を利用することで人や車の行動がどのように変化するかを迅速に予測・評価できるようにするため、十万ノード規模で人や車が移動する現実的な都市環境を構築し、ユビキタス通信機能を利用したネットワークシステムをできるだけ忠実且つ高速にシミュレーションするための技術開発を行う。

まず、大規模なネットワークシミュレーションの実現のため、(1)無線ネットワークシミュレーションの開発を行う。また、現実的なシミュレーションの構築のため、(2)シミュレーションミドルウェアの開発、及び(3)現実的なモビリティモデルの構築を行う。さらに、提案するシミュレーション環境において効率良く性能評価が実施できるよう、(4)効率的なテスト手法の実現を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) 無線ネットワークシミュレーションの高速化

無線ネットワークのシミュレーションにおいては、MAC層の処理に多くの時間が費やされることが知られている。このMAC層のシミュレーション処理を簡略化することで、シミュレーションの効率

を向上させる。また、それだけでなく、シミュレーション精度が損なわれないよう、性能評価に欠かせない領域のシミュレーション精度は高く、それ以外のシミュレーション精度は低くなど、領域毎のシミュレーション精度を様々な設定可能な無線ネットワークシミュレーションモデルを考案する。さらに、従来の無線ネットワークシミュレーションにおいては、その規模を高めるために、複数台の計算機を使用したとしても、計算機間の通信オーバーヘッドのため、使用する計算機の台数だけの効果が期待できなかった。計算機間の通信オーバーヘッドが少ない無線ネットワークシミュレーション手法を考案するとともに、研究室の既存の計算機などを含め、百台程度の計算機を高速なギガビット・イーサネットに接続し、大規模な無線ネットワークのシミュレーション環境を構築する。

#### (2) シミュレーションミドルウェアの開発

現実のネットワークシステムの例として、大規模災害時における避難情報収集配信システム、車々間通信を併用した車両誘導制御システム、地下街での緊急時避難誘導システムなど、社会の安全・安心に関連する幾つかのシステムが挙げられる。まずは、これらのシステムを対象に、様々なシミュレーションシナリオの基で性能評価が行えるよう、シミュレーション対象となる領域の動的な変化を表現可能な地理モデル、システムに関わる人間の様々な行動を表現可能な行動モデルを考案することにより、シミュレーションシナリオ構築の効率化及び提案シミュレーション環境についての有効性評価を行う。

#### (3) 現実的なモビリティモデルの構築

モバイルワイヤレスネットワークにおいては、ノードの移動がネットワーク性能に大きな影響を与えることが知られている。特に、モバイルアドホックネットワーク (MANET) を利用し、かつ都市部で動作するようなアプリケーションを設計する際には、ノードの移動を十分に考慮する必要がある。

モバイルワイヤレスネットワークの性能評価においてよく用いられるモビリティモデルに、Random Waypoint Model (RWP) が挙げられる。RWP では、各ノードが他のノードと独立して目的地や速度、停止時間を決定する。このようなランダムモビリティを用いることで、無線システムの性能評価においていくつかの特性を示すことができるが、同時に欠点も存在する。例えば、RWP では、領域中央のノード密度が高く、周辺のノード密度が低くなりやすく、都市部での車々間通信や MANET アプリケーションの性能評価に必要

となるような、様々なノード密度分布を生成することは困難である。一方、トレースベースのモビリティモデルでは、現実的な歩行者の動きを再現することが可能であるが、モビリティモデルに対する要求毎に、新たな観測データが必要とするため、多大なコストを要する。

本研究では、現実の観測から現実的な歩行流を作成するだけでなく、様々な環境での性能評価が行えるよう、様々なノード配置を実現し、かつその性質を維持するモビリティを提案した。

#### (4) テスト手法

無線ネットワークシステムは、様々なプロトコルから構成され、また、それぞれのプロトコルにおいても、様々なパラメータを設定することができる。さらに、ノードの数や密度、モビリティなどシステムで考慮すべき環境要因も多数存在し、いくつかの要因は互いに密接に関連してシステムの性能に影響を与えている。そのため、パラメータの変更などシステムの設定を調整する際には、そのパラメータだけでなく関連するパラメータを調整する必要がある場合も考えられ、単一の要因が性能に与える影響だけでなく、複数の要因が性能に与える影響を把握することが重要となる。そのような要因を発見するためには、膨大なテストケースとそれに関わるテスト、また、テストケースから得られた性能値の解析に、多くの労力や計算機資源を必要とする。特に、多数のノードから構成され、ノードの配置やモビリティや、ハードウェアのプロファイル、利用するプロトコル、その他多数のパラメータを考慮しなければならない無線ネットワークシステムをテスト対象とする。無線ネットワークを対象としたシミュレーションや実地実験は時間や労力を要するため、なるべく少ないテストケースで主要因を発見できることが好ましい。

本研究では、ネットワークシステムに対する性能評価が効率的に行えるよう、ネットワークシステムを対象としたテスト手法の技術開発を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 無線ネットワークシミュレーションの高速化

十万ノード規模のネットワークを対象としたシミュレーションを実現するため、本研究では、MAC 層におけるパケット送受信の成否を確率に基づき決定する確率事象駆動型モデルを考案した。このモデルでは、あらかじめノード周辺のトラフィックを確率分布としてモデル化し、その確率分布に基づきパケット送信やパケ

ット受信の成否を決定する。また、提案モデルと従来の離散事象駆動型モデルは、ノード単位で切り替えることが可能で、評価対象領域には詳細な離散事象駆動型モデルを使用し、残りの領域には提案モデルを使用するなど、評価目的やシミュレーションに使用する計算機資源に応じ、柔軟なシミュレーションを行うことができる。評価実験において、MAC層に関わるシミュレーション処理負荷を1/10に削減し、パケット送受信に要する処理を高速に実行できることを示した。また、ネットワークトラフィックが飽和していない状況においては、提案手法により、ほぼ正確な通信待機時間が導出され、シミュレーション精度が維持されていることを確認した。さらに、ネットワークトラフィックが飽和している場合においても、提案モデルと離散事象駆動型モデルを組み合わせることにより、シミュレーションの精度を保ちつつ、シミュレーション実行時間を削減できることを示した。

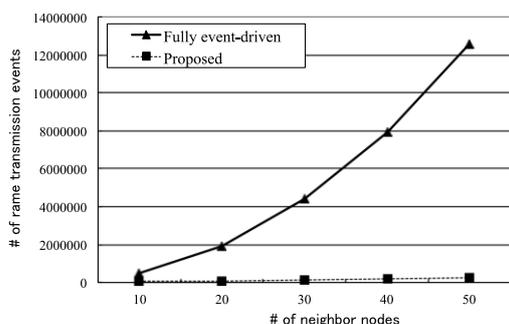


図1. 従来手法と提案手法によるシミュレーション負荷の比較

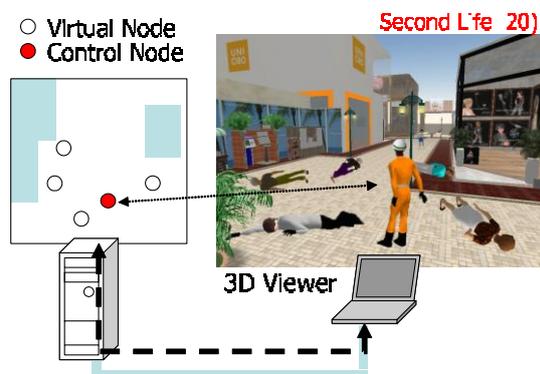
また、この高速化手法を発展させ、複数の計算機を利用し、大規模な無線ネットワークを対象としたシミュレーションを実現する方法を考案した。ネットワークシミュレーションでは、MAC層における通信待機時間を導出するために、パケットを送信する度に、周辺ノードの通信状態を確認する処理が必要となる。その際、周辺ノード数の二乗に比例する計算時間が費やされるが、複数の計算機を利用する場合には、さらに計算機間の通信オーバーヘッドが必要となる。提案手法では、各ノードが生成するネットワークトラフィックを確率分布としてモデル化し、周辺ノードによる通信の影響を予め数的に計算することにより、シミュレーション時の通信オーバーヘッドを大幅に削減している。評価実験では、従来方法と比較し、通信オーバーヘッドを1/6に削減し、大規模なネットワークを対象としたシミュレーションを高速に実行できることを示した。

## (2) シミュレーションミドルウェアの開発

ネットワークシステムのシミュレーションシナリオを効率良く記述及び実行できるよう、シミュレーションミドルウェアの研究開発を行った。本研究では、無線ネットワークを利用した災害支援システムを対象に、災害現場の動的な状況を簡潔に表現及び実現できる地理モデル、救急隊や被災者などその役割に応じた人々の行動を簡潔に表現及び実現できる行動モデル、さらに、個人が持つ情報に応じ行動を決定できる行動制御モデルを提案した。また、このモデルを利用し、避難支援システムを対象とした性能評価事例を示した。避難支援システムは、災害情報を避難者に与えることで避難効率を向上させることを目的としたシステムで、例えば、時々刻々と変化する災害状況に応じ、被災者毎に適切な避難経路を提供することができる。提案するこれらのモデルを利用することで、このようなシステムに対し、災害地域、被災者の位置、通信状況など、様々な状況下でのシステムの効果を網羅的に評価できることを示した。避難支援システムから提供する情報量に対し、避難行動が完了した時間を測定する実験を行った結果、6割程度の被災者に情報を提供できれば、これにロコミの効果が加わり、十分に効率よく避難行動が行えることがわかった。

また、我々の研究グループで開発したネットワークシミュレータMobiREALをベースに、3D仮想空間や小型実機端末との連携機能を開発した。この機能を利用し、VoIPを対象とした評価実験を行い、帯域や遅延等のネットワーク評価だけでなく、人の実感に基づいたシステム評価が行えることを示した。これらの研究成果は、ネットワークシミュレーションの分野で著名な国際会議PADS2009に採録された。

図2. 3D仮想環境と小型実機端末の連携



## (3) 現実的なモビリティモデルの構築

人や車が移動する現実的な都市環境の基で、ユビキタス通信機能を利用したネットワークシステムを、評価するため、モビリティ

モデルの研究開発を行った。

従来のモビリティモデルでは、現実の歩行者で観測されるような細かな移動を実現することで、現実的なモビリティモデルの再現を行っていた。一方、本研究では、歩行者の移動はシンプルで、かついくつかの簡単な観測から実世界のモビリティの再現を目指す。まず、現実の都市の歩行者の動きを再現するために、Urban Pedestrian Flows (UPF)を考案した。この手法では、いくつかの道路において観測された歩行者の平均密度から、指定された複数の経路における歩行流を線形計画法により導出する。また、大阪駅前において実証実験を行い、計測した歩行流と提案手法により導出した歩行流を比較し、高々 8%程度の誤差で各経路の歩行流を再現できることを示した。さらに、MobiREAL 上で、UPFが簡単に利用できるようなシナリオ作成ツールを開発した。この研究成果は、国際 Journal 論文誌 Ad Hoc Networks に採録された。

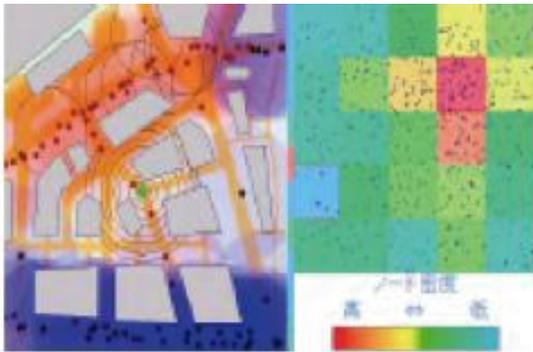


図 3. UPF により再現した大阪駅前の歩行流

また、Weighted Way Point モビリティを拡張し、様々なノード密度分布を実現する Waypoint モビリティモデルを生成する手法を考案した。この手法では、ノードの移動とノード密度分布の関係性を解析し、指定されたノード密度分布を実現するだけでなく、そのノード密度分布を維持し続けることができるノード移動の重み付けを導出する。評価実験では、ノードが均一に散らばっている状況や、ノード密度の高い領域や低い領域が交互に並んでいるような状況など、様々なノード密度分布に対し、それらを実現するノード移動の重み付けを導出できていることを示した。また、このモビリティモデルを利用することにより、様々なノード密度分布のもとで性能評価が行えることを示すため、MANETのルーティングプロトコル AODV を対象とした評価実験を行った。評価実験では、ノード密度分布の違いにより、構築される経路が大きく異なるなど、ネットワーク性能の関連性を簡単に評価できることを示した。この研究成果は、アドホック・ネットワーク分野で

著名な国際会議 MASS 2011 に採録された。

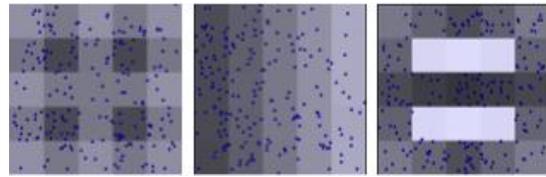


図 4. 提案手法により実現されたノード密度分布

#### 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 3 件)

1. 上野 瑛次郎, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, "任意のノード密度分布を実現可能な Waypoint モビリティモデルの提案", 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 53, No. 1, pp. 232-242, 2012.

2. 中田 圭佑, 前田 久美子, 梅津 高朗, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, "災害現場の被災者や救援者の行動記述とそれを用いたネットワークシミュレーション環境の提案", 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 50, No. 9, pp. 2327-2339, 2009.

3. Kumiko Maeda, Akira Uchiyama, Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi, Keiichi Yasumoto, Teruo Higashino, "Urban pedestrian mobility for mobile wireless network simulation", Ad Hoc Networks, 査読有, Vol. 7, No. 1, pp. 153-170, 2009

[学会発表] (計 9 件)

1. Eijiro Ueno, Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino, "A Simple Mobility Model Realizing Designated Node Distributions and Natural Node Movement", The 8<sup>th</sup> IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2011), pp. 302-311, 2011. 10. 19, Valencia, Spain.

2. Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino, "Modeling and Evaluation of Rescue Operations Using Mobile Communication Devices", The 19<sup>th</sup> Annual Meeting of the IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2011), pp. 188-196, 2011. 7. 26, Singapore.

3. 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, “モバイルワイヤレスネットワークに影響を与えるノード移動制約特定手法の提案”, 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2011) シンポジウム論文集, pp. 1367-1375, 2011年7月8日, 京都府 (最優秀論文賞)

4. 上野 瑛次郎, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, “ネットワーク性能に対するノード密度分布の影響を評価するためのモビリティ生成手法”, 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], 2010-MBL-56, pp. 1-8, 2010年11月12日, 兵庫県 (優秀論文).

5. 村中 慎治, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, “確率事象駆動型モデルを利用した無線ネットワークシミュレーション高速化手法の提案”, 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], 2010-MBL-53, pp. 1-8, 2010年3月27日, 東京都

6. 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, “多様な無線ネットワークシステムを対象とした性能評価及び試験手法の提案”, 第17回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 159-164, 2009年10月8日, 北海道 (優秀論文賞).

7. Keisuke Nakata, Kumiko Maeda, Takaaki Umedu, Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino, “Modeling and Evaluation of Rescue Operations Using Mobile Communication Devices”, 2009 ACM/IEEE/SCS 23rd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS 2009), pp. 64-71, 2009.6.24, Lake Placid. USA.

8. 中田 圭佑 前田 久美子 梅津 高朗 山口 弘純 東野 輝夫, “災害救助・避難訓練を目的とした無線ネットワークシステムの開発支援環境の提案”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, DS-2, 2008年7月10日, 北海道 (野口賞).

9. Kumiko Maeda, Keisuke Nakata, Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino, “Hybrid Testbed Enabling Run-time Operations for Wireless Applications”, The 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS 2008), pp. 135-143, 2008.6.4, Roma. Italy.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東野 輝夫 (HIGASHINO TERUO)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 80173144

### (2) 研究分担者

山口 弘純 (YAMAGUCHI HIROZUMI)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 80314409

梅津 高朗 (UMEDU TAKAAKI)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号: 10346174

廣森 聡仁 (HIROMORI AKIHITO)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号: 90506544

### (3) 連携研究者

安本 慶一 (YASUMOTO KEIICHI)  
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  
(H20まで分担者、H21から連携研究者として参画)

中田 明夫 (NAKATA AKIO)  
広島市立大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 60295839

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

中村 嘉隆 (NAKAMURA YOSHITAKA)  
公立はこだて未来大学・情報アーキテクチャ学科・助教  
研究者番号: 40452528

内山 彰 (UTIYAMA AKIRA)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・特任助教  
研究者番号: 70555234

田島 滋人 (TAJIMA SHIGETO)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 90273614

孫 為華 (SUN WEIHUA)  
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