

## 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5月25日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360175

研究課題名（和文）情報ポテンシャルによる分散ネットワーク最適化

研究課題名（英文）Distributed network optimization based on information potential

研究代表者

大鐘 武雄 (OHGANE TAKEO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：10271636

研究成果の概要（和文）：

指向性制御機能を持つ端末で構成された無線分散ネットワークにおいて、3つの検討を行った。(1) ネットワーク符号化においてチャネル容量の和を最大にするビームを近似的に求める手法を開発し、最もよい特性が得られることを明らかにした。(2) 経路探索手法について検討し、指向性制御を考慮することで、同時に通信可能な端末数を増加させ、スループットを改善できることを明らかにした。(3) 2ステップリレーにおいて送信ノードの最適ビームを近似的に導出する手法を開発し、最適解と同等の特性が得られることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In the wireless mesh network with nodes capable beam-forming, we have obtained the following three major achievements. (1) The approximate solution for maximizing sum-capacity has been developed and its high performance has been shown in network-coded links. (2) An suboptimum routing has been proposed for a wireless mesh network with nodes capable beam-forming and its high throughput performance has been indicated. (3) We have derived an approximated solution for the optimum beam-forming at the source node in a two-step relay.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2012年度	0	0	0
2013年度	0	0	0
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

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：無線分散ネットワーク，ルーティング，指向性制御，ネットワーク符号化，

## 1. 研究開始当初の背景

セルラや無線LANなど、無線ネットワークの多くはシングルホップである。マルチホップを想定したメッシュ状のネットワークは、最適経路選択が複雑となる。実際、図1に示

す通り、無線ネットワークはノード間に同時に複数のリンクが生じている。

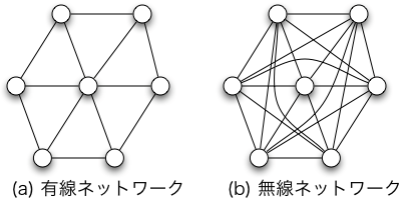


図1 有線/無線ネットワークの違い

このように、有線ネットワークでは、グラフ理論による経路表現が可能であるのに対し、無線ネットワークはよりアナログな表現が適していると考えられる。しかし、従来の経路選択は、これまでの有線ネットワークでの研究を応用したものであった。

## 2. 研究の目的

無線ネットワークでは、あるノードの信号は、到達範囲のすべてのノードで受信可能である。ただし、各ノードで得られる情報量は、そのSNRに応じた量となり、ノード毎に異なる。このような環境で、複数の経路からある経路を選択する方法をアナログ的に表現すること、そして、最適経路選択手法を開発することが本研究の目的であった。

## 3. 研究の方法

あるノードが有する情報量をポテンシャルで表すと、図2のように表現できる。

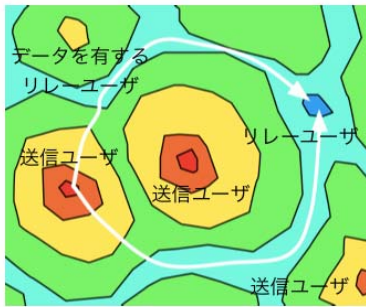


図2 情報ポテンシャルの概念

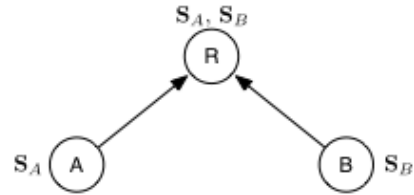
図2において左の送信ノードと最も近いのは中央にある別のノードである。しかし、このノードにも送信すべきデータがある場合は、これを迂回して、右のリレーノードに転送すればよい。このような概念を、ポテンシャルという物理量で表現できないか、当初取り組みを行った。しかし、ポテンシャルに各ノードの指向性制御を組み込むことが困難であったことから、まずは、より具体的な物理量として、チャンネル情報を用いて、無線ネットワークを実現する上の、諸課題の解決に取り組んだ。

## 4. 研究成果

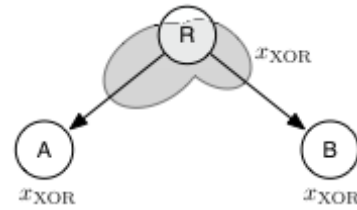
### (1) ネットワーク符号化における指向性制御について

無線ネットワークにおけるトラヒック量軽減手法として、双方向中継におけるネットワーク符号化が知られている。しかし、中継ノードが2つの終端ノードへどのように指向性制御を行うかに関する議論は、これまで行われていなかった。

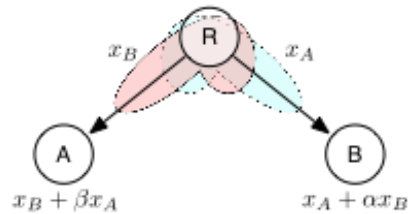
図3に、ネットワーク符号化 (NC) の概念と指向性制御を示す。(a)は各ノードからの信号を受信するフェーズである。



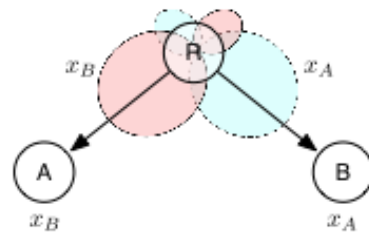
(a) 受信フェーズ



(b) ネットワーク符号化



(c) アナログネットワーク符号化



(d) SDMA

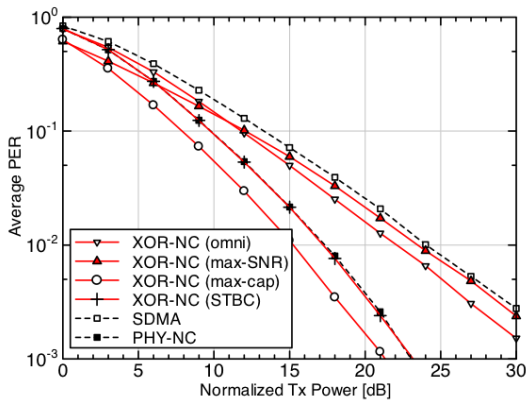
図3 ネットワーク符号化と指向性制御

中継ノードの送信時には、同時に2つのノードに送信するある一つの指向性パターンを生成する必要がある。ここでは、各ノード間のチャンネル容量を求め、これらの和を最大とする指向性制御 (max-cap) を行うものとした。これは、どちらか一方のチャンネル容量が低い場合には、その伝送に失敗しても他の

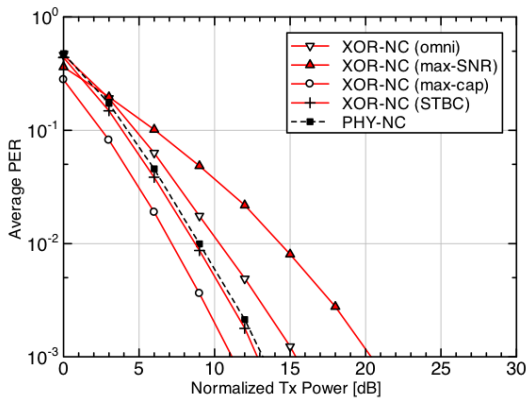
リンクで成功させることを重視した概念である。数式表現は割愛する（詳細は文献：論文①を参照）が、解析的に解を求めることができなかつたため、高 SNR 条件と仮定して近似解を導出した。なお、比較対象として、固有値解析で簡易に求められる SNR の和の最大化指標（max-SNR）も併せて検討した。

また、他のシステムとしては、アナログネットワーク符号化（PHY-NC）や、空間分割多元接続（SDMA）についても併せて評価を行った。また、ビーム生成を必要としない無指向性（omni）と時空間ブロック符号化（STBC）も検討した。

図 4 に各手法の誤り率特性を示す。変調方式は QPSK、畳込み符号化を行い、中継ノードから見た角度広がり は 60 度、終端ノードの角度差は 90 度である。この図から、提案手法（○記号）の優位性が明らかであり、ネットワーク符号化とさらに改善できる手法であることがわかった。



(a) 送信 2 素子，終端 1 素子



(b) 送信 2 素子，終端 2 素子

図 4 ネットワーク符号化時の誤り率特性

## (2) 指向性制御を考慮した最適ルーティングについて

各ノードが指向性制御可能な場合、近傍のユーザが通信している場合、それを妨害することなく送信可能となる場合がある。その概念

を図 5 に示す。この図では 2 つの組が通信しようとしている。(a)のように 2 つの組がある程度離れている場合、各端末間で最大比合成ビームを生成すれば、あまり影響を与えることなく通信が可能となる。一方、(b)のように非常に近傍にある場合は、完全に干渉を与えないビームを生成すればよい。このように、指向性制御を考慮すれば、無線メッシュネットワークにおいて、同時に複数の経路を実現することができる。

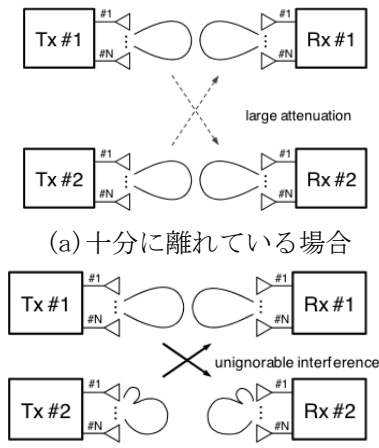


図 5 指向性制御による干渉回避

しかし、これまでは、指向性制御はある 2 ノード間のリンクレベルで行われてきた。実際には、無線ネットワーク全体のスループットを考慮して、経路と指向性制御を考慮すべきであると考えられる。その例を図 6 に示す。

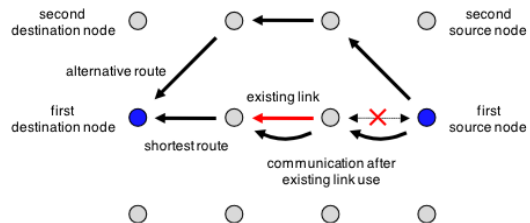


図 6 経路選択の例

この図では、中央の赤いリンクですでに通信が行われている。このとき、右の青いノードから、左の青いノードへ通信を行う場合、赤いリンクの通信が終了するまで待つ方法と、上の迂回経路を選択する方法が考えられる。このとき、両者のスループットを、指向性制御も考慮しながら選択することが必要となる。

さらに、キューの順番も重要である。図 7 のように最初に呼が発生したノードの送信を優先させると、次のノードが大きな迂回をしなければならない場合も考えられる。

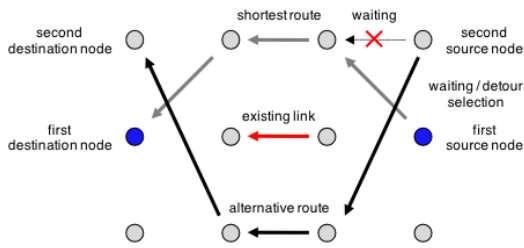


図7 先着順割り当て

しかし、図8のように次のノードの送信も加味して考慮すれば、青いノードの迂回経路を下側に取りることによって、次のノードも送信可能となり、結果的に通信時間を短縮できる。ここでは、このようなキューイングも考慮して、指向性制御を考慮した経路選択の有効性を評価した。

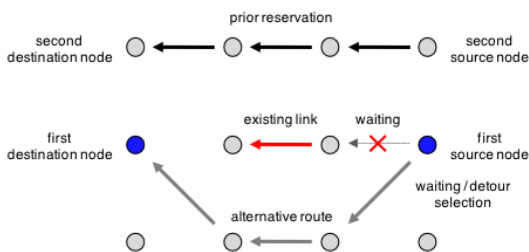


図8 スループット基準割り当て

図9に、ここで検討したネットワークトポロジーを示す。ここでは簡単のため、距離減衰のみ考慮した。また、スループットはチャンネル容量を用いて求めている。送信側の素子数は1~3素子とし、チャンネル情報、各ノードの通信状態（通信中かどうか）はすべて既知とした。

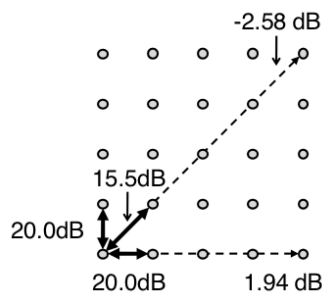


図9 ネットワークトポロジー

図10はトラヒックモデルを表す。どのノードも固定長のパケットのみを生成する場合と、可変長のバースト性トラヒック（切断対数正規分布）を生じる場合を考慮した（詳細は文献：論文②を参照）。以上のモデルにおいて、システム全体のスループットを評価した。なお、可変長の場合は、各ノードがftpかhttpのどちらかのみを利用を考慮し、それぞれのノード数を変えることで、ftpと

httpトラヒックの割合を変化させた。

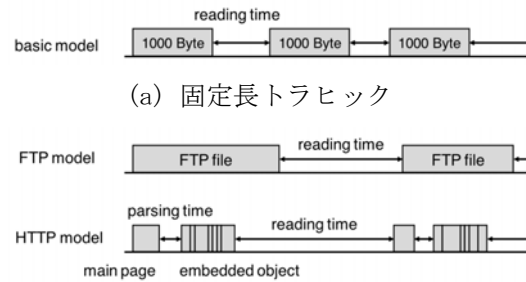


図10 トラヒックモデル

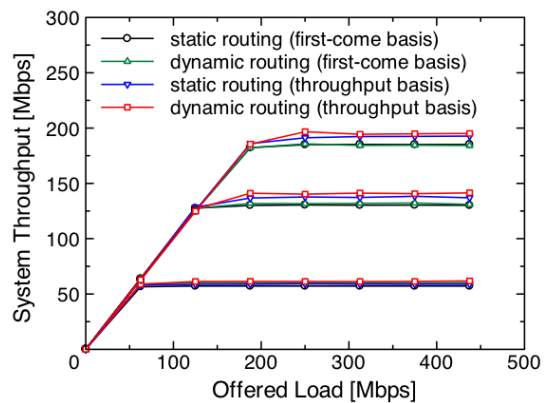


図11 固定長トラヒックにおけるシステムスループット特性

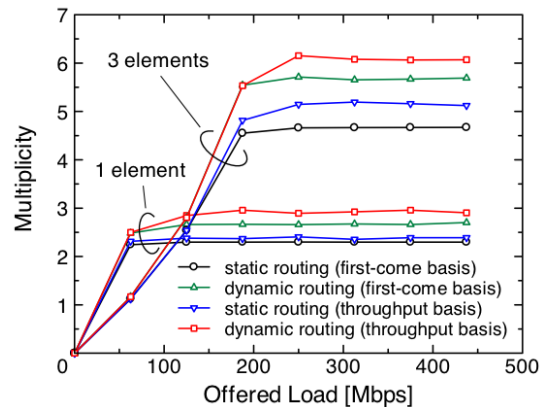


図12 固定長トラヒックにおける同時通信リンク数

図11に固定長トラヒックにおけるシステムスループットを示す。staticルーティング（静的経路選択）とは、迂回経路を選択せずに常に最短経路を選択する手法である。なお、図中の下部は素子数1の場合であり、中間が2素子、上部が3素子の場合である。このように、素子数が増加することで、トラヒックもほぼ比例的に改善することがわかる。また、中でも、動的に迂回経路を選択し、スループットを最大化する順にキューイングする手法が最もよい特性を与えることがわかった。

その理由を示す例として、図 12 に同時通信リンク数を示す。図から、3 素子の場合に、同時リンク数が平均的に約 6 リンクまで到達することがわかる。また、多重数は、動的経路選択と、スループット基準割り当ての場合に最も多くなることから、システムスループットの改善量が最大となったと推定される。

以上は、基本的な固定トラヒックであったが、予約型の MAC プロトコルを想定すると、バースト状のトラヒックも考慮する必要がある。図 13 に可変長バースト性トラヒックモデルでのシステムスループット特性を示す。なお、ここでは十分に生起トラヒックが高く、システムスループットが飽和した状態を考慮している。

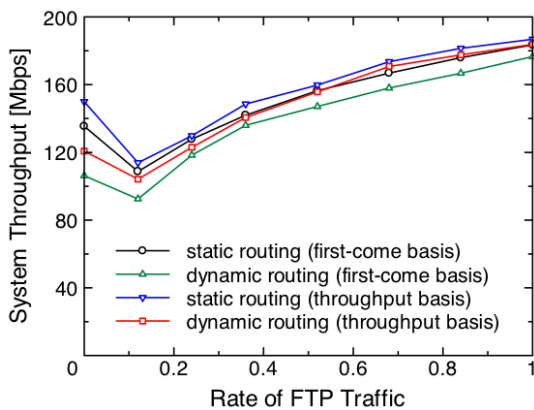


図 13 可変長バースト性トラヒックにおけるシステムスループット特性

この場合は、固定長のときとは異なり、静的経路選択が最も特性がよかった。これは、図 14 の平均ホップ数からわかるように、動的経路選択では、迂回経路が多発し、ホップ数が大きくなっていることが原因と考える。固定長トラヒックの場合は、各リンクの通信が比較的すぐに解放されるのに対し、可変長の場合は、非常に長く占有される場合があるためと考えられる。

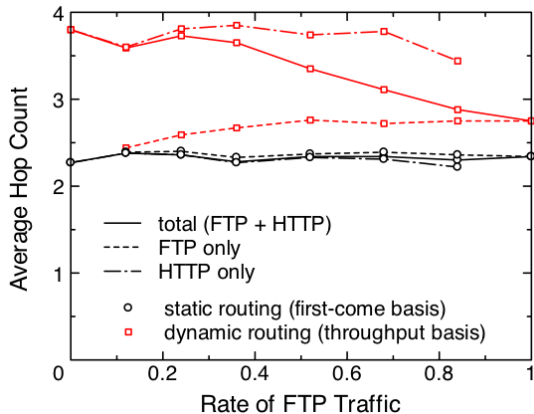


図 14 平均ホップ数特性

以上から、さらにトラヒックの性質や、具体的な MAC プロトコルも考慮した、経路選択手法が重要であることもわかった。これは今後の新たな研究展開につながると考えられる。

### (3) 2 ステップリレーにおける指向性制御

無線メッシュネットワークにおいて、直接通信が困難な場合には、リレーを行う手法が有効である。このような場合、最適な指向性制御を解析的に求めることが困難であったため、繰り返し手法が従来用いられてきた。ここでは、近似解を導出し、繰り返し手法とほぼ同等の特性を、非常に少ない処理量で実現できることを示す。

図 15 にシステムモデルを示す。第一フェーズでは始点から終端ならびに中継ノードへ、第二フェーズでは中継ノードから終端ノードに送信するものとする。また、(a) は中継ノードならびに終端ノードが 1 素子の場合、(b) はすべてのノードが複数の素子を有する場合である。

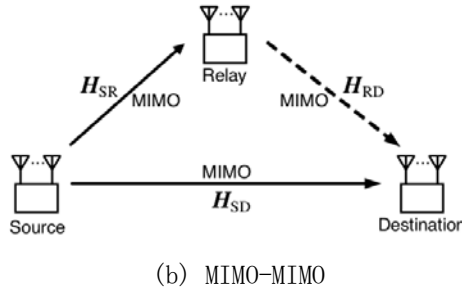
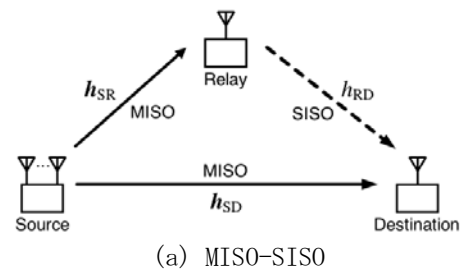


図 15 2 ステップリレーモデル

紙面の都合上、数式は割愛する（詳細は文献：論文③を参照）が、終端ノードで、第一フェーズと第二フェーズの両受信信号を最大非合成すると仮定すると、その SNR を最大にする送信指向性を求めることが可能となる。ただし、解析的には求められないため、これまでは最急降下法が用いられてきた。

ここでは、ラグランジェの未定係数を用いて得られた式中の一部の変数を定数と置き換えることで、近似的に解析解を求める手法を開発した。

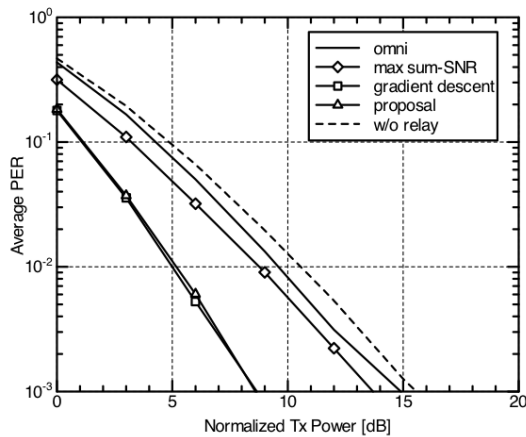


図 16 2 ステップリレーの誤り率特性 (始点 2 素子, 中継・終点 1 素子)

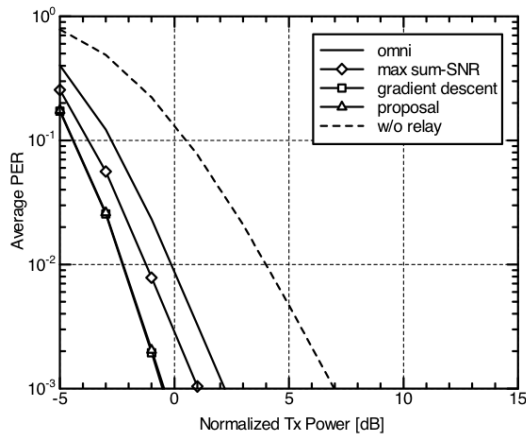


図 17 2 ステップリレーの誤り率特性 (全ノード 2 素子)

図 16, 17 は各素子数における誤り率特性である。明らかに、最急降下法による最適解は他のどの手法よりもよい特性を示し、また、提案する近似解も、ほぼ同じ特性を示すことがわかった。

## 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 3 件)

① S. Matsuya, J. Webber, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, Optimum transmit beamforming in an interactive wireless relay system with network coding, Proc. IEEE PIMRC 2010, 2091-2096, 2010, 査読有

② D. Takeda, J. Webber, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, A fundamental study on routing and scheduling for multi-hop wireless networks with adaptive array,

Proc. WPMC 2011, 383-387, 2011, 査読有

③ N. Kiyomi, J. Webber, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, A Study on transmit beamforming at source node in MISO-SISO/MIMO-MIMO AF relays, Proc. IEEE VTC 2012 Spring, ページ番号なし, 2012, 査読有

[学会発表] (計 8 件)

① 松谷早希子, 双方向無線中継システムにおける送信ビーム生成, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2009 年 11 月 26 日, 東工大, 東京都目黒区

② 松谷早希子, 双方向 MIMO 無線中継システムにおける送信ビームの検討, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2011 年 1 月 21 日, 屋久島環境文化村センター, 鹿児島県熊毛郡屋久島町

③ 武田大樹, アダプティブアレイを用いた無線マルチホップネットワークのルーティングに関する基礎的検討, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2011 年 5 月 26 日, 機械振興会館, 東京都港区

④ 清見直史, MISO/MIMO-AF リレー伝送における始点送信ビーム生成, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2011 年 11 月 18 日, 名古屋国際会議場, 名古屋市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大鐘 武雄 (OHGANE TAKEO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 10271636

(2) 研究分担者

小川 恭孝 (OGAWA YASUTAKA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 70125293

西村 寿彦 (NISHIMURA TOSHIHIKO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号: 70301934

ウェバー ジュリアン (WEBBER JULIAN)

北海道大学・大学院情報科学研究科・博士研究員

研究者番号: 90466425

(3) 連携研究者

なし