

## 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 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22240001

研究課題名（和文） 空間的な情報補填を可能にするアルゴリズムの研究

研究課題名（英文） Studies on Algorithms for Insufficient Spatial Information

研究代表者

岩間 一雄（IWAMA KAZUO）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：50131272

研究成果の概要（和文）：不完全情報をいかに扱うかが現代アルゴリズムの大きな課題になっている。本研究では「空間的な情報の不完全性を克服できるアルゴリズムに関して、その設計技法と評価手法を含めた総合的体系を作り上げること」を目的として研究を行った。結果として、グラフ問題、アルゴリズム的ゲーム理論、乱化に関する基礎理論の様々な問題において、空間的な情報の不完全性を克服できるアルゴリズムの設計と解析に成功した。

研究成果の概要（英文）：One of the main challenge in modern algorithm design is to cope with insufficient information. In this study, we try to construct a general framework for design and evaluation of algorithms that can cope with insufficient spatial information. As a result, we give design and analysis of such algorithms for various problems in several fields such as graph problems, algorithmic game theory and randomized computation theory.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
2011 年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2012 年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
年度			
年度			
総計	38,300,000	11,490,000	49,790,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：アルゴリズム理論・グラフ問題・アルゴリズム的ゲーム理論・乱化計算

## 1. 研究開始当初の背景

不完全情報をいかに扱うかが現代アルゴリズムの大きな課題になっている。例えば、商品や為替の相場の様に時々刻々と変化する系に対するアルゴリズムを設計する場合、将来の入力の変動が予測出来ないという条件のもとで現在の行動を決定するアルゴリズムを設計する必要がある。更にその行動の良さをなんらかの形で定量的に評価し、保証する必要がある。不完全情報の克服には情報

の補填が不可欠で、そのことを可能にするアルゴリズムの設計は90年代以降のアルゴリズム研究において常に主流の一角を占めてきた。

我々は一貫してこのテーマに取り組んできた。情報補填を主な目的としたアルゴリズムの研究は順調に進んできたが、今までの研究はどちらかと言えば時間的な情報の不完全性つまり将来の情報は原理的に得られないという困難に立ち向かうものであった。し

かし、情報の不完全性は勿論これだけではない。例えばインターネットの広範な部分に広がるデータは原理的には完全なデータとして存在するものの、それを欠損なく取得するのは極めて困難である。更には、世の中の人間活動はある種のゲームとして説明されることが多いが、この場合も敵対者の情報を得ることは難しい。ゲーム理論は古くから研究されているが、同質のプレイヤー間の均衡という側面からの研究が多く、異種のプレイヤー間のゲームを適切にモデル化し、アルゴリズム的側面からの戦術の設計と評価の研究は未だ緒についたばかりである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、前節で述べたような空間的な情報の不完全性を克服できるアルゴリズムに関して、その設計技法と評価手法を含めた総合的体系を作り上げることである。空間的不完全情報の典型例として、(i)グラフによってモデル化される大規模ネットワークの接続情報と (ii)経済活動に代表される敵対者の戦略に関する情報を取り上げる。こうした情報は、時間的不完全情報における将来の情報等とは違って、原理的には完全な形で存在する。従って、全体の情報を得るのは様々な理由で困難であったとしても、一部の情報を選択したりあるいは逆にできるだけ偏らないように取ってくることは可能である。こうして前者のグラフ問題の場合には、ネットワークが全体の構造で決まるある性質をもつかどうかを、非常に少ない一部の情報のみで推定することが可能になる場合が存在することが分かっている。しかし、現時点ではそうした可能性は個々の具体的問題に対して研究されているのが現状で、具体的問題を超越した一般性の高い結果を得ることが世界的競争的になっている。

(ii)の敵対者の戦略に関する情報の不完全性については、時間的情報の不完全性で利用される競合比を評価に使用することが提案され、従来の均衡理論とは全く異なった枠組みで議論することが可能になった。しかし、競合比で重要となる最適戦略（神様の戦略）をどのように設定するべきかに関しては未だ論争があって、(i)のグラフ問題に比べればより課題が多い。時間的情報の不完全性の研究成果を生かして、まずこの競合比解析のためのモデルを整備することが最初の具体的な目標となる。

## 3. 研究の方法

以下のテーマ分担に基づき研究を遂行した。(1) グラフ問題グループ（伊藤，加藤，徳山，山下，Avis）：性質検査，定数時間アルゴリズム等。(2) アルゴリズム的ゲーム理論グループ（岩間，宮崎，川原，堀山）：デ

ジタルオークション，安定マッチング，オンラインアルゴリズム等。(3) 乱化に関する基礎理論グループ（玉置，森住，ルガル，渡辺）：SAT に対する乱化アルゴリズム，PCP 理論による近似度の下限，回路計算量，量子計算における質問計算量等。

研究の進展をアルゴリズム設計の分野全体へと波及させるため，以下の4項目を推進した。(1) 研究集会の実施。(2) 海外研究者の招聘。(3) ポスドク研究員の雇用。(4) 研究成果の公表と社会的啓発。

## 4. 研究成果

以下では，本研究における成果のうち，主な結果のみを選択して述べる。

### (1) ナップサック問題に対する定数時間近似アルゴリズム

ナップサック問題は重さと価値を持つ  $n$  個のアイテムからナップサックに詰めるアイテム集合を選び，ナップサック内のアイテムの総価値を最大化する問題である。ただしナップサックは容量  $C$  を持ち，ナップサック内のアイテムの総重量が  $C$  を超えてはならない。

本研究ではナップサック問題に対する  $O(\log(1/\epsilon)/\epsilon^4)$  時間  $\epsilon$  近似アルゴリズムを示した。ここで  $\epsilon$  近似アルゴリズムとは  $2/3$  以上の確率で出力と最適解の絶対誤差が  $\epsilon$  以下となる乱択アルゴリズムのことを表し，アルゴリズムには全アイテムの総価値・総重量が  $1$  に正規化された入力を与えられる。

本研究では更に部分和问题に対する  $\epsilon$  近似アルゴリズムも示した。部分和问题はナップサック問題において各アイテムの重さが各々の価値に等しいという制約を加えた問題である。アルゴリズムの計算時間は  $O(1/\epsilon^2)$  であり，したがってナップサック問題に対する上記のアルゴリズムを部分和问题に対して実行した場合と比べると計算時間が改善されている。

### (2) 最大重み有向森問題の定数時間近似

最大重み有向森問題とは，各辺に重みがついた有向グラフ  $G$  が入力として与えられ， $G$  の有向森で辺の重みの和が最大になるものを求める問題である。ここで有向グラフ  $G$  の有向森とは， $G$  の無閉路な部分グラフで，各頂点の入次数が高々  $1$  のものである。

$n$  を入力グラフの頂点数とする。本研究では，入力グラフの最大重み有向森の重さを，次数制限モデルにおいては質問計算量  $O(dW^3/\epsilon^3)$  で，平均次数モデルにおいては質問計算量  $O(dW^3/\epsilon^4)$  で，高い確率で誤差  $\epsilon n$  以内で見積もるアルゴリズムを提案した。

また特殊な場合として，グラフの各辺の重

みがすべて1 のときは、最大重み有向森の重さを質問計算量  $O(1/\epsilon^3)$  で近似するアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは計算量が頂点の次数に依存していないため、グラフが密であっても定数時間で近似できる。

### (3) PageRank ゲームにおけるナッシュ均衡判定

ウェブページの著者は自分の PageRank を上げることに関心がある。彼らの利己的な行動を研究するために、J. Hopcroft, D. Sheldon らは PageRank ゲームを提案した。PageRank ゲームでは、それぞれのウェブページの著者（プレイヤーと呼ばれる）は、有向グラフのそれぞれの頂点に対応し、PageRank を最大化するように自分の頂点から辺を配置したり取り除いたりする。

本研究では、PageRank ゲームにおいて、プレイヤーの行動の結果として得られたグラフがナッシュ均衡かどうかを決定するという問題を考えた。この問題に対して、グラフが木である場合には、 $O(n^2)$  時間アルゴリズムを、一般である場合には、 $O(2^k n^4)$  時間アルゴリズムを与えた。ここで、 $k$  はグラフのすべての二重連結成分における頂点の最大次数を表す。

### (4) 定員付き研修医の病院配属問題

研修医の病院配属問題においては、各病院は受け入れ可能な研修医数の上限を宣言する。しかし、地方における研修医不足などを考慮すると、研修医を一定数確保するために研修医数の下限も宣言したい。本研究では、病院が上下限を宣言できるモデルを提案し、その計算複雑さを議論した。以下ではこの上下限を満たす配属を実行可能マッチングと呼ぶことにする。

まず、安定な実行可能マッチングが存在するか否かの判定は多項式時間で可能なことを示した。次に、安定な実行可能マッチングが存在しない場合に実行可能マッチングの中で「より安定」なものを見付ける問題を考えた。安定マッチングとはブロッキングペアの存在しないマッチングのことである。そこで「より安定」を「よりブロッキングペアが少ない」と定義し、ブロッキングペア数最小の実行可能マッチングを求める最適化問題を提案した。本問題が近似すら難しいこと、すなわち  $P=NP$  でないならば、任意の正定数  $\epsilon$  に対して多項式時間  $(|H|+|R|)^{1-\epsilon}$ -近似アルゴリズムが存在しないことを示した。ここで  $H$  と  $R$  はそれぞれ病院と研修医の集合である。また、多項式時間  $(|H|+|R|)$ -近似アルゴリズムを与えることにより、この近似下限が最適であることを示した。

さらに、より良いアルゴリズムを求める 2 つの方向性を議論した。1 つは指数時間厳密

アルゴリズムである。解のコストが  $t$  である場合に  $O((|H|+|R|)^{t+1})$ -時間の厳密アルゴリズムを与えた。もう 1 つは、解のコストの計り方の変更である。解の質をブロッキングペアの数ではなく「ブロッキングペアに含まれる研修医の数」と定義した場合、この最適化も NP 困難であるが、多項式時間  $\sqrt{|R|}$ -近似アルゴリズムを与えることが出来た。

### (5) 片側に同順位を許した安定マッチング問題に対する 25/17 近似アルゴリズム

安定マッチング問題は、同数 ( $n$ ) の男女と各人の異性に対する希望リストが与えられたときに、安定なマッチングを求める問題である。マッチング  $M$  において、ペアになっていない男性  $m$  と女性  $w$  に対し、「 $m$  は  $M$  での相手よりも  $w$  を好み、 $w$  は  $M$  での相手よりも  $m$  を好む」の両方が成り立つとき、 $(m, w)$  を  $M$  のブロッキングペアという。ブロッキングペアを持たないマッチングが安定マッチングである。

希望リストに同順位を許し、かつリストが不完全で良い場合、最大サイズの安定マッチングを求める問題は NP 困難であることが知られている。この問題に対するこれまで最良の近似度は 1.5 であった。本研究では、同順位が片方の性だけに現れる部分問題に対して、この近似度を 25/17 (約 1.47) に改良した。改良の度合は僅かであるが、1.5 の壁を破れるか否かは大きな問題であったので、本問題に対する大きな貢献である。改良にあたっては、本問題を整数計画問題として定式化し、その線形計画緩和問題の最適解をプロポーザ型アルゴリズム上での選択のヒントとして利用した。

### (6) 消費電力問題における混雑度に最適に追従するオンラインアルゴリズム

オンライン消費電力問題は複数の省電力レベルを持った機器が省電力状態に移行するまでの待機時間をどのように設定すれば消費電力を抑えられるのかという最適化問題である。本研究では ON と OFF の 2 状態を持つ機器を考える。

サービスの要求が次々と到着し、次にいつ到着するのかわからないという状況で、ON と OFF の状態をうまく制御して消費電力を最小化したい。これは有名なオンライン問題であるスキーレンタル問題を連続的に扱ったものである。

オンラインアルゴリズムは競合比と呼ばれる、アルゴリズムの性能とあらかじめ全ての入力がわかっていた場合の最適アルゴリズムの性能の比の最悪値をもって評価される。既存研究では競合比 2 の決定性アルゴリズム、競合比約 1.58 の乱択アルゴリズムが最適であると知られている。既存の最適アル

ゴリズムは、入力が開散としている場合においては競合比は最悪値に近い値となり無駄の多い制御になるが、最適アルゴリズムは一通りしかないことが示されていたためこの問題は解決されていなかった。

本研究では、競合比がそれぞれ 2, 1.58 を微小な正の数  $\epsilon$  だけ超えることを許すことで、アルゴリズムの設計に柔軟性が得られることに着目し、混雑の度合いに追従して、待機時間を自動調整する実用的な決定性、乱択アルゴリズムを提案した。これらのアルゴリズムは開散とした入力に対しては比が 1 に近づいていき、良い性能を得ることができる。また決定性アルゴリズムについては待機時間の最適な設定を得ることができた。

(7) 線形計画法による幅 1 の制約充足問題に対する頑健なアルゴリズム

最大制約充足問題とは、充足される制約の数を最大化する割当てを求める最適化問題である。頑健なアルゴリズムは、ほとんど全て（例えば 99 パーセント）の制約を充足できるような例題に対し、最適解に近い（例えば 98 パーセント充足する）割当てを出力する。本研究では、幅 1 の制約充足問題という広汎な制約充足問題のクラスに対し、線形計画法による頑健なアルゴリズムを与えた。また、ある種の線形計画法により頑健なアルゴリズムを構築できることと、制約充足問題が幅 1 という性質を満たすことが同値であることを示した。

(8) 完全性を持つ質問効率のよい非適応的 Long Code Test

Long Code Test は性質検査と近似困難性の分野の基本的な問題である。Long Code とは  $f(x)=x_i$  の形の関数、つまり入力の 1 ビットにのみ依存する関数である。Long Code Test では、ブール関数族のオラクルが与えられ、それらの関数族が同じ Long Code であるか、または、任意の 2 つの関数の  $\text{corss influence}$  が小さいか、を識別しなければならない。本研究では、完全性を持ち非適応的なクエリを  $q$  回行うテストの健全性  $s$  がどれだけ小さくなるかを研究した。我々は  $s=(2q+3)/2^q$  である Long Code Test を与えた。ここでは  $q=2^k-1$  の場合のみを考えている。我々のテストは Samorodnitsky, Trevisan のハイパーグラフ linearity test に適切なノイズ分布を付加したものである。健全性の解析のために、O'donnell, Wu の Invariance Principle タイプの議論を用いた。

既存の結果では、Hastad, Khot が 2005 年に  $s=1/2^{\{q-4q^{1/2}\}}$  を示している。Chen は 2009 年に、“適応的”な質問を許したテストで  $s=q^{3/2}/q$  を得ている。“ほとんど”完全性を持つテストに関しては、

Samorodnitsky, Trevisan が  $s = 2q/2^q$ , Austrin, Mossel が  $s=(q+o(q))/2^q$  を示した。

(9) 2 変数完全基底上の論理式に対する SAT アルゴリズムと平均計算量の下界

論理式はファンアウト数が 1 であるような論理回路のことである。本研究では、回路で使用できる素子として、任意の 2 変数論理関数を許した論理式に対し、充足可能性を判定する厳密指数時間アルゴリズムを与えた。さらに、応用として、線形サイズの論理式がある明示的な関数を近似することが困難であることを示した。

(10) オラクル同定問題の量子質問計算量

現在の計算機は古典力学の法則に従っており、この計算機モデル上での計算を古典計算と呼ぶ。それに対し、1980 年代に量子力学の法則に従う新たな計算機構として、量子計算が提唱された。量子計算は現在の計算モデルよりも高速な計算が期待され、計算機科学及びその物理との境界領域における重要な一分野である。

本研究で扱うオラクル同定問題とは、長さ  $n$  の 2 進列を持つオラクルが与えられ、その列をオラクル質問によって特定する問題である。本問題は量子計算における基本的問題の一つで、グローバ探索に代表される探索問題の一般化である。オラクル質問の形式、質問に対する答えの決定方法はオラクルモデルによって変わり、本問題の質問計算量もオラクルモデルに依存する。本研究では、オラクル同定問題に対して 2 種類のオラクルモデルを考え、それぞれのモデルに対して量子アルゴリズムの設計と量子質問計算量の解析を行った。

第一の結果は、古典的なパズルである偽コイン問題を扱う。偽コイン問題とは天秤を用いて与えられたコイン集合から偽コインをすべて見つける問題である。仮定として、天秤からは“釣り合う”または“傾く”の情報しか得られないとし、偽コインの枚数を知っているものとする。天秤の動作はオラクルとしてモデル化することができ、この問題の質問計算量は天秤の使用回数に対応する。我々はこの問題の量子質問計算量が古典質問計算量に対して 4 乗根まで減少することを示した。また、クエリに制限を加えた場合に得られる下界についても解析し、その制限のもとでタイトな量子質問計算量を与えた。

第二の結果は、DNA 配列の検査に関係のあるオラクルモデルについて能力を解析する。このオラクルはオラクル列がクエリ列を部分列として持つかどうかを返すオラクルである。我々はこの問題の量子質問計算量が古典質問計算量の  $3/4$  倍以下になることを示

した。また、このオラクルに対しては量子計算は能力が発揮しにくいと考えられ、これをほとんどタイトな下界を与えることで示した。

#### 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 59 件)

① David Avis, Hiroyuki Miyata, Sonoko Moriyama. Families of polytopal digraphs that do not satisfy the shelling property. *Comput. Geom.*, 46(3):382-393, 2013, 査読有.

DOI: 10.1016/j.comgeo.2012.10.005

② Wolfgang W. Bein, Kazuo Iwama, Jun Kawahara, Lawrence L. Larmore, James A. Oravec. A randomized algorithm for two servers in cross polytope spaces. *Theor. Comput. Sci.*, 412(7):563-572, 2011, 査読有.

DOI: 10.1016/j.tcs.2010.08.022

③ Holger Dell, Valentine Kabanets, Dieter van Melkebeek, Osamu Watanabe. Is Valiant-Vazirani's isolation probability improvable? *Computational Complexity*, 22(2):345-383, 2013, 査読有.

DOI: 10.1007/s00037-013-0059-7

④ Keiko Imai, Akitoshi Kawamura, Jiri Matousek, Daniel Reem, Takeshi Tokuyama. Distance  $k$ -sectors exist. *Comput. Geom.*, 43(9):713-720, 2010, 査読有.

DOI: 10.1016/j.comgeo.2010.05.001

⑤ Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki, Hiroki Yanagisawa. Approximation algorithms for the sex-equal stable marriage problem. *ACM Transactions on Algorithms*, 7(1):2, 2010, 査読有.

DOI: 10.1145/1868237.1868239

⑥ Toshiya Itoh, Osamu Watanabe. Weighted random popular matchings. *Random Struct. Algorithms*, 37(4):477-494, 2010, 査読有.

DOI: 10.1002/rsa.20316

⑦ Taisuke Izumi, Samia Souissi, Yoshiaki Katayama, Nobuhiro Inuzuka, Xavier Defago, Koichi Wada, Masafumi Yamashita. The Gathering Problem for Two Oblivious Robots with Unreliable Compasses. *SIAM J. Comput.*, 41(1):26-46, 2012, 査読有.

DOI: 10.1137/100797916

⑧ Naoki Katoh, Shin-ichi Tanigawa. Rooted-Tree Decompositions with Matroid Constraints and the Infinitesimal Rigidity of Frameworks with Boundaries. *SIAM J. Discrete Math.*, 27(1):155-185, 2013, 査読有.

DOI: 10.1137/110846944

⑨ Naoki Katoh, Shin-ichi Tanigawa. A Proof of the Molecular Conjecture. *Discrete & Computational Geometry*, 45(4):647-700, 2011, 査読有.

DOI: 10.1007/s00454-011-9348-6

⑩ Kazuhisa Seto, Suguru Tamaki. A satisfiability algorithm and average-case hardness for formulas over the full binary basis. *Computational Complexity*, 22(2):245-274, 2013, 査読有.

DOI: 10.1007/s00037-013-0067-7

⑪ Yuichi Yoshida, Masaki Yamamoto, Hiro Ito. Improved Constant-Time Approximation Algorithms for Maximum Matchings and Other Optimization Problems. *SIAM J. Comput.*, 41(4):1074-1093, 2012, 査読有.

DOI: 10.1137/110828691

[学会発表] (計 66 件)

① David Avis, Kazuo Iwama, Daichi Paku. Verifying Nash Equilibria in PageRank Games on Undirected Web Graphs. ISAAC 2011, December 7, Yokohama, Japan.

② Jinhee Chun, Takashi Horiyama, Takehiro Ito, Natsuda Kaothanthong, Hirota Ono, Yota Otachi, Takeshi Tokuyama, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno. Base Location Problems for Base-Monotone Regions. WALCOM 2013, February 15, Kharagpur, India.

③ Richard Cleve, Kazuo Iwama, Francois Le Gall, Harumichi Nishimura, Seiichiro Tani, Junichi Teruyama, Shigeru Yamashita. Reconstructing Strings from Substrings with Quantum Queries. SWAT 2012, July 6, Helsinki, Finland.

④ Shantanu Das, Paola Flocchini, Nicola Santoro, Masafumi Yamashita. On the computational power of oblivious robots: forming a series of geometric patterns. PODC 2010, July 27, Zurich, Switzerland.

⑤ Evgeny Demenkov, Alexander S. Kulikov, Ivan Mihajlin, Hiroki Morizumi. Computing

All MOD-Functions Simultaneously. CSR 2012, July 6, Nizhny Novgorod, Russia.

⑥ Koki Hamada, Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki. The Hospitals/Residents Problem with Quota Lower Bounds. ESA 2011, September 5, Saarbrücken, Germany.

⑦ Hiro Ito, Shin-ichi Tanigawa, Yuichi Yoshida. Constant-Time Algorithms for Sparsity Matroids. ICALP 2012, July 10, Coventry, United Kingdom.

⑧ Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki, Hiroki Yanagisawa. A  $25/17$ -Approximation Algorithm for the Stable Marriage Problem with One-Sided Ties. ESA 2010, September 8, Liverpool, United Kingdom.

⑨ Akitoshi Kawamura, Jiri Matousek, Takeshi Tokuyama. Zone diagrams in Euclidean spaces and in other normed spaces. Symposium on Computational Geometry 2010, June 15, Utah, USA.

⑩ Gabor Kun, Ryan O'Donnell, Suguru Tamaki, Yuichi Yoshida, Yuan Zhou. Linear programming, width-1 CSPs, and robust satisfaction. ITCS 2012, January 9, Cambridge, USA.

⑪ Yoshikazu Kobayashi, Akihiro Kishimoto, Osamu Watanabe. Evaluations of Hash Distributed A\* in Optimal Sequence Alignment. IJCAI 2011, July 22, Barcelona, Spain.

[図書] (計4件)

① 伊藤 大雄, 宇野 裕之 (編). 離散数学のすすめ. 325 ページ, 現代数学社, 2010.

② 増澤 利光, 山下 雅史. 適応の分散アルゴリズム. 307 ページ, 共立出版, 2010.

[その他]

ホームページ等

<http://www.lab2.kuis.kyoto-u.ac.jp/~iwanma/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩間 一雄 (IWAMA KAZUO)  
京都大学・情報学研究科・教授  
研究者番号: 50131272

### (2) 研究分担者

エイビス デイビッド (AVIS DAVID)

京都大学・情報学研究科・教授  
研究者番号: 90584110

宮崎 修一 (MIYAZAKI SHUICHI)  
京都大学・学術情報メディアセンター・准教授  
研究者番号: 00303884

玉置 卓 (TAMAKI SUGURU)  
京都大学・情報学研究科・助教  
研究者番号: 40432413

### (3) 連携研究者

伊藤 大雄 (ITO HIRO)  
電気通信大学・情報理工学研究科・教授  
研究者番号: 50283487

加藤 直樹 (KATOH NAOKI)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 40145826

徳山 豪 (TOKUYAMA TAKESHI)  
東北大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号: 40312631

山下 雅史 (YAMASHITA MASAFUMI)  
九州大学・システム情報科学研究所・教授  
研究者番号: 00135419

渡辺 治 (WATANABE OSAMU)  
東京工業大学・情報理工学研究科・教授  
研究者番号: 80158617

堀山 貴史 (HORIYAMA TAKASHI)  
埼玉大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 60314530

川原 純 (KAWAHARA JUN)  
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: 20572473

森住 大樹 (MORIZUMI HIROKI)  
島根大学・総合理工学研究科・助教  
研究者番号: 50463782