

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2006～2008  
 課題番号： 18700059  
 研究課題名（和文） P2P型計算グリッドに適した集合通信操作のためのアルゴリズムに関する研究  
 研究課題名（英文） A study on algorithms for collective communications in P2P-based computational grids  
 研究代表者  
 大下 福仁 (OOSHITA FUKUHITO)  
 大阪大学・大学院情報科学研究科・助教  
 研究者番号： 20362650

研究成果の概要：近年、多くの分野の研究で巨大な計算能力が求められており、多数のプロセッサをネットワークで接続した P2P 型計算グリッドはその要求に応えるものとして期待されている。本研究では、P2P 型計算グリッドで頻繁に利用される集合通信操作の効率化を行うことで、P2P 型計算グリッドにおける処理の効率化を目指す。そのためには、プロセッサ等の異種混合性を考慮したアルゴリズム、環境の動的変化に対する高い自己適応能力をもつアルゴリズムが求められる。本研究では、集合通信操作をはじめとするさまざまな問題について上記の性質をもつアルゴリズムを提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	210,000	3,410,000

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：計算グリッド、分散システム、異種並列計算環境、スケジューリング、故障耐性

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初より、並列計算の実行環境として計算グリッドが注目を集めていた。計算グリッドとは、ネットワークで接続された多数のプロセッサを一つの並列計算環境とみなしたもので、潜在的に非常に大きな計算能力を秘めている。生物学をはじめとした多数の分野において、ゲノム解析、たんぱく質の構造解析、新薬の開発などに大きな計算能力を必要としており、計算グリッドによる並列処理が用いられていた。さらに巨大な計算能力を利用可能とするための手法として、一般

の家庭に設置されている無数の家庭用 PC を構成要素の一部とした計算グリッドが提案されている。そのような計算グリッドでは、構成要素のプロセッサが無数に存在するため、少数のサーバが全プロセッサを管理する集中型の運用は不可能である。そのため、サーバをもたず、各プロセッサが自律的に動作する P2P 型の運用が必要となる。しかし、計算グリッドに関する当時の技術の多くは集中型の運用を前提としており、P2P 型の運用に向けた手法の開発が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、P2P型で運用される計算グリッド（P2P型計算グリッド）において効率的な並列処理を実現するために、集合通信操作を中心にP2P型計算グリッドに適したアルゴリズムの開発を目指す。集合通信操作とはプロセッサグループ間でデータ通信を行う操作であり、例として入力データを全プロセッサに送信するために使用されるブロードキャスト、各プロセッサで得られた結果を収集するために使用される収集操作などが挙げられる。多くの並列処理では、集合通信操作を通信プリミティブとして頻繁に利用しており、集合通信操作を効率化することで並列処理全体を効率化することができる。

具体的には、効率的な集合通信操作を実現するために、以下の性質を全て満たすアルゴリズムの開発を目指す。

- (1) 高性能なプロセッサ、高速なネットワークを積極的に利用するなど、プロセッサの異種混合性を考慮した動作を行う。
- (2) 計算グリッドを構成するプロセッサ・ネットワークの能力は時々刻々と変化するため、そのような動的な変化に自動的に追従する自己適応能力を有する。
- (3) P2P型計算グリッドはサーバをもたないため、各プロセッサは局所的な情報のみをもとに動作する。

## 3. 研究の方法

本研究では、上記の性質を全て満たすアルゴリズムを開発するために、以下の順で研究を行った。

- (1) 異種混合性を考慮したアルゴリズムの設計手法の開発
- (2) 自己適応能力を有するアルゴリズムの設計手法の開発
- (3) 上記(1)(2)で得られた設計手法を統合することによる、全性質を満たすアルゴリズムの設計手法の開発

上記(1)～(3)の各段階では、さまざまな問題に対してアルゴリズムを提案することで、アルゴリズム設計手法の開発を行った。提案したアルゴリズムは、理論による性能保証またはシミュレーションによる実験評価を行い、その有効性を示した。

## 4. 研究成果

本研究では、研究の方法で述べた(1)(2)の段階において、さまざまな問題に対して効率的なアルゴリズムを提案した。一方、(3)の段階については、現在検討中である。以下では、(1)(2)の段階で得られた成果について、具体的に記述する。

### (1) 異種混合性を考慮したアルゴリズムの設計手法の開発

#### ① 異種並列計算環境におけるスケジューリングアルゴリズムの開発

本研究では、異種並列計算環境において短い時間で独立タスクアプリケーションを実行するアルゴリズムを提案した。また、そのアルゴリズムを集合通信操作に対しても適用できることを示した。異種並列計算環境とは、計算能力の異なるプロセッサ、ネットワークで構成される並列計算環境をモデル化したものである。独立タスクアプリケーションとは、互いに依存関係のない多くのプログラム（タスク）で構成されるアプリケーションである。独立タスクアプリケーションの例として、さまざまなパラメータに対するシミュレーションの実行などが挙げられる。パラメータ等の入力データは一つのサーバで保管されていることが多いため、その入力データを異種混合性を考慮しながら効率的にプロセッサへ転送して実行することが必要である。本研究では、異種並列計算環境として、単方向1ポートモデルを用いた。単方向1ポートモデルとは、各プロセッサがデータの送受信を同時に実行できないと仮定したモデルであり、現実的な仮定であるとされているものの従来の研究ではほとんど考慮されていなかった。上記の仮定のもとで、独立タスクアプリケーションの実行時間を最小化する問題を最適化問題として定義し、アルゴリズムの開発を行った。

その結果、計算機ネットワークがDAG (directed acyclic graph)を構成する場合に対して、多項式時間の最適アルゴリズムを提案した。さらに、任意のネットワークに対して、近似率が $3/2+\epsilon$  ( $\epsilon$ は任意の定数)である近似アルゴリズムを提案した。また、集合通信操作を同様に最適化問題として定義した場合、上記のアルゴリズムをそのまま適用できることを示した。

#### ② 多組織グリッドにおける協力的スケジューリングアルゴリズムの開発

本研究では、複数の組織が計算資源を提供して構成する多組織グリッドにおいて、各組織に一定の利益を保証しながら全タスクの実行時間を削減するアルゴリズムを開発した。

従来のアルゴリズムは、計算グリッドに投入された全タスクの実行時間の最小化を目標としていた。そのため、複数の組織が同時にタスクを投入した場合、全タスクの実行時間を最小化するために、一部の組織のタスクが優先的に実行され別の組織のタスクが遅れて実行されるという不公平が起こっていた。組織間に不公平が発生すると、不利益を

被った組織が計算グリッドから脱退し、計算グリッドの能力が低下する可能性がある。本研究では、それを回避するために各組織に一定の利益を保証しながら全タスクの実行時間を削減するアルゴリズムを開発した。各組織が提供する計算資源の能力は異なると考えられることから、計算グリッドを異種並列計算環境としてモデル化してアルゴリズムの検討を行った。具体的には、各組織において、投入したタスクの計算時間が、自身の計算資源で局所的に計算する場合に比べて遅くならないという制約（協力制約）を考慮して、全タスクの実行時間の最小化を検討した。

その結果、協力制約によって、全タスクの実行時間の悪化が  $m$  倍 ( $m$  は組織の数) となる場合が存在することが分かった。これは、各組織に上記のような利益の保証を行うと、実行時間が許容できないほど増加することを意味する。そこで、協力制約を緩和し、各組織の実行時間が局所的な計算時間の  $\alpha$  倍になってもよいという緩和協力制約を考慮して、実行時間の最小化を検討した。その結果、緩和協力制約による実行時間の悪化を  $\alpha/(\alpha-1)$  倍に抑えるアルゴリズムを提案した。

(2) 自己適応能力を有するアルゴリズムの設計手法の開発

① モバイルエージェントを用いたゴシップアルゴリズムの開発

本研究では、モバイルエージェントにおいて、代表的な集合通信操作のひとつであるゴシップ（全対全通信）を行う効率的なアルゴリズムを提案した。モバイルエージェントとは、プロセッサ間を移動しながら自律的に動作するプログラムであり、自己適応能力を有するシステムの設計に頻繁に利用されている。モバイルエージェントにおけるゴシップを実現することで、プロセッサ間のデータ通信をモバイルエージェントにより実現することができる。本研究では、システムの通信コストをモバイルエージェントの移動量として定義し、できるだけ少ない移動量でゴシップを実現するアルゴリズムについて検討した。従来研究では、モバイルエージェントをひとつのプロセッサに集合させること（集合問題）により、モバイルエージェント間の全対全通信を実現していた。本研究では、モバイルエージェントを集合させずに、個別に一对一通信を行うことで全対全通信の実現に要する移動量の削減を検討した。

その結果、さまざまな形状のネットワークにおいて、ゴシップの実現に必要な移動量の上界、下界を得ることができた。成果をまとめたものが表 1 である。表 1 において、 $N$  はネットワークを構成するプロセッサの数、 $E$

は通信リンクの数、 $k$  はモバイルエージェントの数を表す。表 1 から分かる通り、本研究で提案したアルゴリズムの移動量は漸均的に下界と一致している。これは、提案アルゴリズムが全て漸均的に最適なアルゴリズムであることを意味する。また、従来の集合問題では、任意のネットワークにおける移動量の下界が  $\Omega(N^2)$  であると知られており、本研究により全対全通信に必要な移動量を大きく削減できたといえる。

表 1. 成果一覧

形状	モデル	移動量	
		上界	下界
リング	同期	$O(N)$	$\Omega(N)$
木	非同期	$O(N)$	$\Omega(N)$
完全	方向あり 非同期	$O(\text{Mlog}k)$	$\Omega(\text{Mlog}k)$
完全	方向なし 非同期	$O(N)$	$\Omega(N)$
任意	非同期	$O(\text{Mlog}k+E)$	$\Omega(\text{Mlog}k+E)$

② 生態系パラダイムを用いた 1 対 1 通信アルゴリズムの提案

本研究では、無線 LAN 環境において複数の端末ペア間の 1 対 1 通信を効率的に実現する経路選択アルゴリズムを提案した。無線 LAN 環境とは、有線により接続された固定のアクセスポイントと無線通信能力をもつ端末により構成されるネットワーク環境である。端末は、無線通信によりアクセスポイントへ接続することで、有線ネットワークを介して他の端末と通信を行うことができる。無線 LAN 環境において効率的な通信を実現するためには、多くの端末が接続しているアクセスポイントや多くの通信が集中している有線リンクを回避した経路選択を行う必要がある。また、ネットワークの状況は、各端末が選択する経路の変化や障害の発生等により時々刻々と変化する。そのため、そのような動的変化に対して適応的なアルゴリズムが求められていた。

本研究では、高い適応性をもつアトラクター選択を利用することで効率的なアルゴリズムを開発した。アトラクター選択とは、大腸菌が環境に適応する仕組みをモデル化したもので、動的変化に対する適応性を実現する仕組みとして注目されている。本研究の提案手法と既存の貪欲法に基づく手法をシミュレーションにより比較した結果が図 1 である。シミュレーションでは、1000 ラウンド経過時に約半数の有線リンクの通信性能を低下させ、4000 ラウンド経過時にもとの通信性能へ復旧させている。提案手法は、環境変化が発生したあと徐々にスループットが増加し、既存手法より高いスループットを維持している。この結果から、提案手法が動的変化

に対する高い適応性をもつことが分かる。

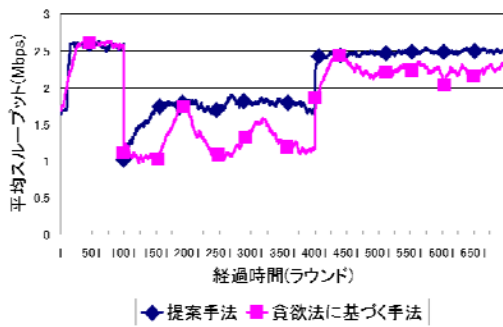


図 1. シミュレーション結果

### ③ 生態系パラダイムを用いたクラスタリングアルゴリズムの提案

本研究では、動的なネットワークにおいて、ノードのクラスタリングを行うアルゴリズムを提案した。クラスタリングとは、大規模ネットワークを複数の部分ネットワーク（クラスタ）へ分割することである。クラスタリングを行うことで、ネットワークに階層構造を付与することができ、集合通信を含むネットワークの処理の効率化に利用することができる。さまざまな処理の効率化を実現するためには、クラスタ数の最小化が必要であり、従来は貪欲的な方法を用いてクラスタ数の最小化を実現していた。しかし、動的なネットワークで貪欲的な方法を用いると、ネットワークの変化に対応してクラスタ構成も変化するため、クラスタ構成を変化させるための更新オーバーヘッドが大きいという問題が発生していた。

本研究ではアトラクター選択の仕組みを利用することで、少ないクラスタ数を維持しながら更新オーバーヘッドを削減するクラスタリングアルゴリズムを提案した。本研究では、36 台のセンサ端末実機で構成したネットワークにおいてアルゴリズムを実装し、その有効性を確認した。1 ラウンド当たりの平均クラスタ数とクラスタ変更回数（更新オーバーヘッド）を示したものが図 2 である。従来手法、提案手法ともパラメータを変化させることで振る舞いを変化させることができ、クラスタ数を少なくする場合、クラスタ変更回数が多くなることが分かる。しかし、同じクラスタ数を与えるパラメータで比較した場合、提案手法が従来手法に比べて少ないクラスタ変更回数となることが分かる。この結果から、提案手法が効率的なクラスタ構成を少ない更新オーバーヘッドで実現していることが分かる。

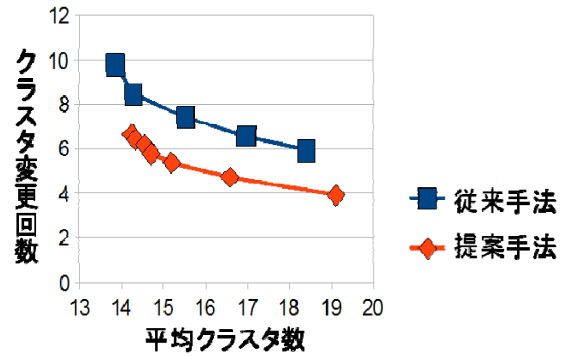


図 2. 実証実験の結果

### ④ 故障封じ込め能力を保存した自己安定アルゴリズム合成手法の提案

本研究では、高い故障耐性をもつ 2 つの自己安定アルゴリズムを、その故障耐性を保ちながら合成する手法を提案した。計算グリッドは多数のプロセッサで構成されており、並列処理の実行中に故障が発生すると考えられる。そのため、故障が発生しても処理を継続できるような高い故障耐性が必要とされる。高い故障耐性をもつ代表的なアルゴリズムとして、メモリ書き換えなどの一時的な故障が発生しても正常な状態へ自動的に復帰する自己安定アルゴリズムがある。また、さらに高い故障耐性である故障封じ込め能力をもった自己安定アルゴリズムも提案されている。故障封じ込め能力をもつ場合、あるプロセッサで発生した故障はその周囲の少数のプロセッサにしか影響を与えず、他のプロセッサは故障を考慮することなく処理を続けることができる。

一般に、複数のアルゴリズムを合成することにより、適用範囲を広げるなど、アルゴリズムの有効性を高めることができる。自己安定アルゴリズムについても、複数のアルゴリズムを合成する手法が提案されている。しかし、従来の合成手法では、故障封じ込め能力をもつ 2 つのアルゴリズムを合成した場合、その能力が失われることが分かった。

そこで、本研究では、故障封じ込め能力を保ちながら 2 つの自己安定アルゴリズムを合成する手法を提案した。これにより、既存のアルゴリズムの合成により、新たな故障封じ込め自己安定アルゴリズムを開発することができ、故障耐性をもつアルゴリズムの設計を容易化することができた。

### ⑤ P2P 環境における資源探索アルゴリズムの開発

本研究では、P2P 環境において、資源探索を少ない通信量で行うアルゴリズムを提案した。計算グリッドにおいてもタスクを実行する際に適切なプロセッサを探索する必要があり、本研究で提案したアルゴリズムを適

用することができる。提案したアルゴリズムはランダム構造による探索を基本とする。すなわち、資源をもつノードは自身の情報をインデックスとしてランダムに選択したノードへ散布する。資源を探索するノードは、クエリをランダムに選択したノードへ散布し、インデックスをもつノードへクエリが届けば、その情報をもとに目的の資源へアクセスできる。

提案したアルゴリズムでは、資源の人気度に応じて散布するインデックスの数を自動的に調整することで、ネットワーク全体の通信量の削減を行った。具体的には、人気度の高い資源については多くの数のインデックスを散布し、人気度の低い資源については少ない数のインデックスを散布する。これにより、人気度の高い資源では、一度の探索に要するクエリの数を削減することができる。逆に、人気度の低い資源では、インデックスの散布に必要な通信量を削減することができる。図3は、シミュレーションにより、提案アルゴリズムの通信量と理論的な期待最小通信量の比較を行った結果である。実験では時間2T、6T、10T経過後に環境変化を発生させており、それにより最小通信量に変化している。提案手法 ARSP はその変化に素早く追従して少ない通信量で資源探索を実現していることが分かる。

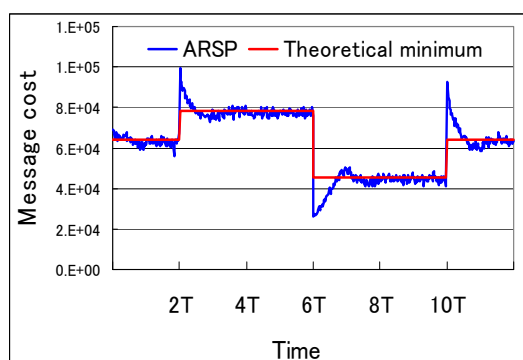


図3. シミュレーション結果

## 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10件)

- ① Daisuke Kadono, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, An ant colony optimization routing based on robustness for ad hoc networks with GPSs, Ad Hoc Networks, 2009, in press, 査読有
- ② Tomoko Izumi, Taisuke Izumi, Fukuhito

Ooshita, Hirotugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, A biologically inspired self-adaptation of replica density control, IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E92-D, no.5, pp.1125-1136, 2009, 査読有

- ③ Yu Wu, Fukuhito Ooshita, Hirotugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Distributed construction protocols of probabilistic degree-weighted peer-to-peer overlays, IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E92-D, no.4, pp.563-574, 2009, 査読有
- ④ Yukiko Yamauchi, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, Yoshiaki Katayama, Hirotugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Hierarchical composition of self-stabilizing protocols preserving the fault-containment property, IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E92-D, no.3, pp.451-459, 2009, 査読有
- ⑤ Yu Wu, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, A message-efficient peer-to-peer search protocol based on adaptive index dissemination, IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E92-D, no.2, pp.258-268, 2009, 査読有
- ⑥ 乾広二, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 構造化オーバーレイネットワークにおける故障耐性向上のための経路多重化法, 電子情報通信学会論文誌, vol.J91-D, no.5, pp.1261-1274, 2008, 査読有
- ⑦ Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Move-optimal gossiping among mobile agents, Theoretical Computer Science, vol. 393, no. 1-3, pp. 90-101, 2008, 査読有
- ⑧ 西川元, 山内由紀子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, モバイルアドホックネットワークにおける公平性の高い自己安定相互排除プロトコル, 電子情報通信学会論文誌, vol.J91-A, no.2, pp.279-284, 2007, 査読有
- ⑨ Fukuhito Ooshita, Susumu Matsumae, and Toshimitsu Masuzawa, Scheduling for independent-task applications on heterogeneous parallel computing environments under the unidirectional one-port model, IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E90-D, no. 2, pp.403-417, 2007, 査読有

- ⑩ Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, and Toshimitsu Masuzawa, Self-adaptive mobile agent population control in dynamic networks based on the single species population model, IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E90-D, no. 1, pp.314-324, 2007, 査読有

[学会発表] (計25件)

- ① Rikiya Hasegawa, Yu Wu, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, A resource replication protocol based on node density for mobile ad hoc networks, the 8th International Conference on Applications and Principles of Information Science, 2009年1月12日, 沖縄県中頭郡
- ② Yukiko Yamauchi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Output stability of self-stabilizing protocols against topology changes and transient faults, the 8th International Conference on Applications and Principles of Information Science, 2009年1月12日, 沖縄県中頭郡
- ③ Susumu Matsumae and Fukuhito Ooshita, Upper bound on cell size for hierarchical GAF, the 8th International Conference on Applications and Principles of Information Science, 2009年1月11日, 沖縄県中頭郡
- ④ Gen Nishikawa, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, A stable clustering algorithm for mobile ad hoc networks based on attractor selection, the 1st International Workshop on Technologies for Ambient Information Society, 2008年11月28日, 兵庫県淡路市
- ⑤ Yukiko Yamauchi, Takeshi Itou, Gen Nishikawa, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Clustering algorithm for mobile ad-hoc networks to improve the stability of clusters, the IASTED International Conference on Sensor Networks, 2008年9月29日, Crete, Greece
- ⑥ Yukiko Yamauchi, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, Yoshiaki Katayama, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Timer-based composition of

fault-containing self-stabilizing protocols, International Symposium on Intelligent Distributed Computing, 2008年9月18日, Catania, Italy

- ⑦ 大下福仁, 泉朋子, 泉泰介, An analysis of a generalized multi-organization scheduling on unrelated parallel machines, 電子情報通信学会技術研究報告 (COMP2008-32), 2008年9月11日, 愛知県名古屋
- ⑧ 松森雄信, 西川元, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, アドホックネットワークの経路構築における非協調行動の抑制手法について, 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2008-38), 2008年7月18日, 京都府京都市
- ⑨ Daisuke Kadono, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, A robust based ant colony optimization routing for ad hoc networks with GPSs, the 2008 International Conference on Wireless Networks, 2008年7月15日, Las Vegas, USA
- ⑩ 西川元, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, A wireless LAN network routing protocol based on attractor-selection, 情報処理学会研究報告 (2007-MPS-67), 2007年12月21日, 東京都江東区
- ⑪ Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Optimal moves for gossiping among mobile agents, the 14th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, 2007年6月7日, Castiglione, Italy
- ⑫ Yu Wu, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, An adaptive randomized searching protocol in peer-to-peer systems, the 22nd Annual ACM Symposium on Applied Computing, 2007年3月14日, Seoul, Korea

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大下 福仁 (OOSHITA FUKUHITO)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号：20362650

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし