

## 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 4月 2日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560408

研究課題名（和文） 情報不完備ゲームに基づくMAC層プロトコルのモデル化と利己的ユーザへの対応

研究課題名（英文） Modeling of MAC Protocols Based on Incomplete Information Games and Countermeasures against Selfish Users

研究代表者

榊原 勝己 (SAKAKIBARA KATSUMI)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10235137

研究成果の概要（和文）：

ランダム・アクセス・ネットワークにおいて、他ユーザによる検知が困難と考えられるMAC層のパラメータ変化に着目し、ゲーム理論の枠組みの中で、非協力的な利己的ユーザが取るべき戦略を明らかにした。利己ユーザを含むスロット付アロハ方式に基づいた非協力アロハゲームに対し、正規ユーザ数を不明とすることにより非完備情報性を導入し、より現実的な、非完備情報における非協力アロハゲームを再構築した。そして、参加ユーザが判断基準とする利得に応じて、利己的に振舞うべきと判断する閾値が大きく変化することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In a random access network, a node generally controls its packet transmission according to the specified backoff algorithm. Some nodes may disobey the backoff algorithm and behave selfishly in order to obtain more bandwidth share. We consider a scenario where a new node is ready to join a slotted ALOHA-type random access network and has to decide whether he should behave honestly or selfishly without the knowledge of the number of selfish nodes in the network. Numerical results indicate that selfish behavior is not always amply rewarded and that it provides a selfish node with less payoff than honest behavior in some cases.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：移動体通信, 情報通信工学, ネットワーク, ゲーム理論, 非協力ゲーム, 通信プロトコル, 利己的行動

## 1. 研究開始当初の背景

BluetoothあるいはIEEE 802.11規格に準拠した無線LAN製品の実用化と普及、無線センサーネットワークあるいは無線アドホック・ネットワークに関する研究・開発の促進等、来るべきユビキタス情報化社会の実現に向けた通信インフラの

整備は加速的に発展しつつある。通常の無線通信システムでは、法的規制あるいは技術的困難さ等のため、ハードウェアあるいはソフトウェアによる通信プロトコルの改変は、ほぼ不可能なものとなっている。また、通信システム（プロトコル）の設計に際して、プロトコルの改変あるいは改変

による影響は全く考慮されていない。すなわち、コンピュータ・ウイルス等のセキュリティに関する事項を除き、通信システムのユーザは、通信プロトコルの改変を行わない「協力的」であるものとして想定され、全ユーザの協力により通信システム全体のパフォーマンス(回線利用効率あるいは公平性等)が最大化されるように設計されている。

しかしながら、無線センサーネットワーク等の小規模かつ簡易な通信システムでは、その利便性・簡易性のため、端末に埋め込まれている通信プロトコルのパラメータ等を各ユーザが変更することは、現状よりも簡易であるものと予想される。このため、自己(あるいは自己を含む一部のグループ)のみが通信回線を優先的に利用できるように恣意的な改変を行うユーザ(利己的ユーザ)の出現を否定することはできない。利己的なユーザの出現は、通信システム全体のパフォーマンスに負の影響を与えることは明らかである。このような状況では、利己的なユーザが(他者の犠牲の下で)取るべき戦略を予見・分析し、利己的なユーザの出現が、一般の協力的なユーザのパフォーマンスに与える影響を最小化・回避できる通信プロトコルを設計することは不可欠なことである。

一方において、通常の通信システムにおける協力的な状況とは異なり、社会における経済活動では、個々の行動主体(個人、法人)の目的が自己の利益を追求することに存在する局面が多くを占めている。このように、複数の意思決定主体が存在する状況における意思決定の理論として発展してきた「ゲーム理論」は、通信システムにおける利己的ユーザの戦略を決定、予見する有力な数学的ツールとなりうる事が期待される。

## 2. 研究の目的

通信プロトコルの階層構造を考慮すると、特に無線通信システムにおけるプロトコルの改変は、物理層における送信電力、データリンク層における MAC 層パラメータ、ネットワーク層におけるルーティングを目標とすることが予想される。本研究では、このうち、他ユーザへの露見が少ないと考えられる MAC 層におけるパラメータの改変、特に ALOHA 等のランダムアクセス方式のパラメータ改変に着目し、

- (1) 利己的ユーザが通信プロトコルの MAC 層パラメータの改変という意味において取るべき戦略を、N 人情報不完備ゲームの枠組みの中で明らかにする(平成 21 年度)。
- (2) 利己的ユーザの戦略が、一般の協力的なユーザのパフォーマンスに与える影響を明らかにすると共に利己的ユーザの検出法を設計し、評価キットによる実装実験を行う(平成 22 年度)。
- (3) 利己的ユーザの存在に依存することなく一

般ユーザの性能を維持できる MAC 層パラメータの設計手法を構築する(平成 23 年度)の 3 点を目的とする。

はじめに、他ユーザに関する情報が不完全な場合(情報不完備ゲーム)に、利己的ユーザが一般ユーザの犠牲の下で取るべき最適な戦略を明らかにするとともに、この改変が、利己的ユーザと一般ユーザの回線利用効率、エネルギー効率、公平性等の性能に与える影響を理論的に示す。また、この戦略がナッシュ均衡あるいはパレート最適となっているか否かを証明する。次に、利己的ユーザの存在が開示された場合に、通信システム全体のパフォーマンス劣化を最小限に抑制するための戦略(通信プロトコル)を明らかにする。また、この戦略がナッシュ均衡あるいはパレート最適となっているか否かを証明する。そして、計算機上に、一般ユーザと利己的ユーザが存在する仮想通信システムを構築し、計算機シミュレーションにより、理論解析により求められた結果の正当性あるいは適応範囲を明らかにすると共に、研究開発用に流通している無線センサーネットワーク評価キットを用いて、利己的ユーザと一般ユーザの戦略をフィールド実験により検証する。最後に、利己的ユーザの影響を最小限にとどめる MAC 層パラメータの設計手法を構築する。

## 3. 研究の方法

研究期間内において、以下の方法、手順で研究を実施した。

- (1) 利己的ユーザを含む通信システム野 N 人情報不完備ゲームとしてのモデル化

利己的ユーザが MAC 層プロトコルを改変する際に考えられる戦略と利得関数を明らかにし、N 人情報不完備ゲームとしての取り扱いが可能となるようなモデル化および定式化を行う。特に、利得関数の定式化に際しては、様々な状況(各ユーザが知りうる情報の種類、ユーザ間における部分的な協力の有無等)が考えられ、その物理的意味を熟慮の上、実施した。

- (2) ナッシュ均衡およびパレート最適性に関する解析

利己的ユーザと一般ユーザの各々の戦略と利得関数を定式化した後、N 人情報不完備ゲームにおけるナッシュ均衡の存在の有無あるいはパレート最適性に関して解析を行った。

- (3) 計算機シミュレータの構築

利己的ユーザを含む仮想的な MAC 層プロトコルを計算機上に構築し、シミュレーションによる評価環境を整備した。

(4) 他ユーザへの影響の評価と利己的ユーザ検出法の設計

利己的ユーザの戦略により、他ユーザが受ける影響を理論的に評価した。また、他ユーザに関する情報が不完全な状況において、利己的ユーザの存在をどのようにして、どの程度までの情報(利己的ユーザ数, 利己的ユーザの戦略, 利己的ユーザの利得関数など)を検出するかを定め、その検出法を設計した。

(5) 計算機シミュレータによるデータ収集

設計した利己的ユーザ検出法を、整備した計算機シミュレータに適用できるようにプログラミングし、設計方式の性能を検証した。

(6) データ整理

理論解析および計算機シミュレーションから得られた膨大なデータを整理し、本研究より考案された MAC 層パラメータ設計手法の有効性を検証した。

(7) 研究成果の発表と報告書の作成

平成 22~23 年度に得られた結果を電子情報通信学会第 1 種研究会においてを行なった。また、適切な時期に国内外研究論文誌に研究成果をまとめて投稿した。

4. 研究成果

(1) 非協力アロハゲーム

① バックオフ・パラメータ

スロット付アロハ方式では、各ユーザはスロット時間に同期してパケットの送信を試みる。指数バックオフアルゴリズムを用いる場合、各ユーザはバッファ内パケットの連続送信失敗回数  $i$  に応じて、スロット開始時に確率  $r\alpha^{\min[i,m]}$  で再送する。ここで、

- $r$ : 送信確率初期値 ( $0 < r \leq 1$ )
  - $\alpha$ : バックオフ係数 ( $0 < \alpha \leq 1$ )
  - $m+1$ : バックオフステージ数 ( $m = 0, 1, \dots$ )
- である。以降、 $[r, \alpha, m]$  の組をバックオフパラメータと呼ぶ。

② 新規参加ユーザの行動選択

バックオフパラメータ  $[r, \alpha, m]$  に従ってパケット送信を行うユーザを「正規ユーザ」と呼ぶ。これに対し、バックオフ係数  $\alpha$  による送信確率の減少をせず、バックオフパラメータ  $[\tau, 1, 1]$  を持つものを「利己的ユーザ」と呼ぶ。正規ユーザの送信確率遷移を図 1 に示す。

ネットワーク内に  $N$  人のユーザが存在し、 $k$  人の正規ユーザと  $N - k$  人の利己的ユーザの両グループが競合しているものとする。このネットワークへ 1 人の新規ユーザが参入するシナリオ

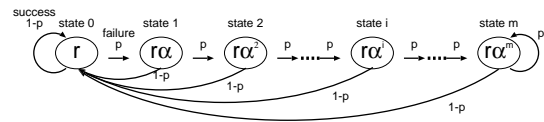


図 1. 正規ユーザの送信確率遷移図

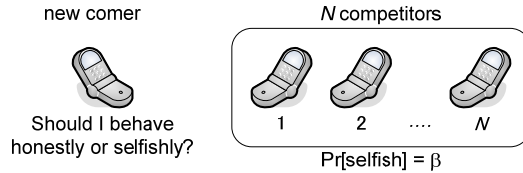


図 2. シナリオ

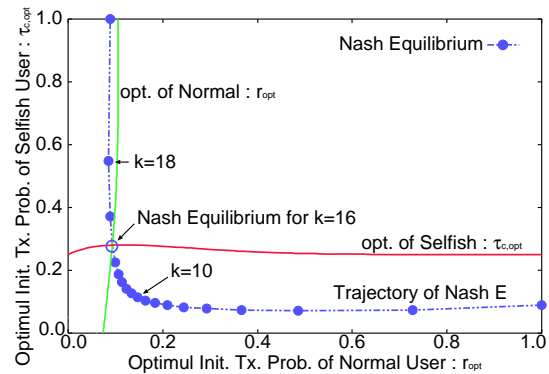


図 3. 最適戦略とナッシュ均衡の軌跡

を想定する。なお、各ユーザは常にパケットを持っていると仮定する(図 2 参照)。新規参加ユーザは、自己または属するグループのスループット(利得関数)が高くなるよう、正規ユーザあるいは利己的ユーザのどちらとして行動するかを選択する。

いま、新規ユーザを含む全ユーザは、ユーザ数  $N$  および  $k$ 、バックオフパラメータ、利得関数等のゲームに関する情報を全て知っているとする。この条件の下で、正規ユーザグループと利己的ユーザグループをプレイヤー、送信確率の初期値  $r$ 、 $\tau$  を戦略、スループットを利得とする 2 人ゲームを「非協力アロハゲーム」と定義する。

ゲーム理論では、最適戦略(敵対プレイヤーの戦略に対する各プレイヤーの最適反応)が交わる点であるナッシュ均衡が解となる。ナッシュ均衡は全プレイヤーが戦略変更の誘因を持たない均衡点である。図 3 に、 $N = 19$ 、 $\alpha = 0.9$ 、 $m = 5$  に対する両グループの最適戦略 ( $k = 16$ ) を実線で示す。すなわち、 $r = 0.09$ 、 $\tau = 0.28$  がナッシュ均衡となり、 $k = 16$  におけるゲームの解として各ユーザのスループットを算出することができる。また、 $k$  の変化に対するナッシュ均衡の推移を図 3 に併記する。図 3 より、ナッシュ均衡は正規ユーザ数  $k$  の変化により、

大きく推移する。したがって、新規ユーザの行動選択は $k$ の値に大きく依存すると考えられる。

## (2) 非完備情報アロハゲーム

前節で定義した非協力アロハゲームは、全ユーザが $N$ および $k$ の値を把握しているという条件の下でモデル化されていた。しかし、実際には利己的ユーザを検知することは容易ではなく、ネットワーク内の正確な正規ユーザ数 $k$ を把握するのは困難である。したがって、新規ユーザが正規ユーザ数 $k$ に関する正確な情報をもたない「非完備情報アロハゲーム」を定義する(図1参照)。

非完備情報アロハゲームにおいて、新規ユーザは自身が正規となるか利己的となるかの行動指標とするため、 $N$ 人中の正規ユーザの割合が $\beta$ であると推定する。すなわち、正規ユーザ数 $k$ は平均 $N\beta$ の二項分布に従うものとし、新規ユーザは次のいずれかを利得関数として行動を選択する。

- 自己のスループット期待値
- 新規参加ユーザが選択したグループのスループット期待値

ここで、正規ユーザ数 $k$ は、新規ユーザが正規を選んだ場合、 $1 \leq k \leq N+1$ であり、一方、新規ユーザが利己的を選んだ場合、 $0 \leq k \leq N$ で分布する。また、スループットの期待値は、 $k$ が既知である条件下でのスループットに $k$ の分布を考慮して算出する。

## (3) 数値結果

### ① 個人スループットを利得とする場合

$N = 19$ ,  $\alpha = 0.9$ ,  $m = 5$ に対し、新規参加ユーザ自身のスループット期待値を $\beta$ の関数として図4に示す。図4より、 $\beta = 0.47$ を閾値として、新規ユーザは $\beta > 0.47$ であれば利己的を選択し、一方、 $\beta < 0.47$ であれば正規を選択すべきであることがわかる。

新規ユーザ自身のスループットに関して、 $\beta$ の閾値と競合ユーザ数 $N$ の関係を図5に示す。新規ユーザが推定する $\beta$ が閾値より大きい(システム内の正規ユーザの割合が高い)場合、新規ユーザは利己的に行動すべきである。競合ユーザ数 $N$ が小さく、かつ、バックオフ係数 $\alpha$ が小さいとき、新規ユーザが利己的に行動すべき領域が広がる。また、 $\beta$ に関する閾値は $N$ が無限大に漸近すると収束すると予想されるが、その証明は未解決である。

### ② グループスループットを利得とする場合

図3と同じ値に対し、新規ユーザが属するグループのスループット期待値を $\beta$ の関数として図6に示す。図6より、 $\beta$ が $0.1 \sim 0.3$ 近傍の場合を除き、新規ユーザは利己的に振舞うべきである。また、図4と異なり、 $\beta$ の閾値は3点存在している。

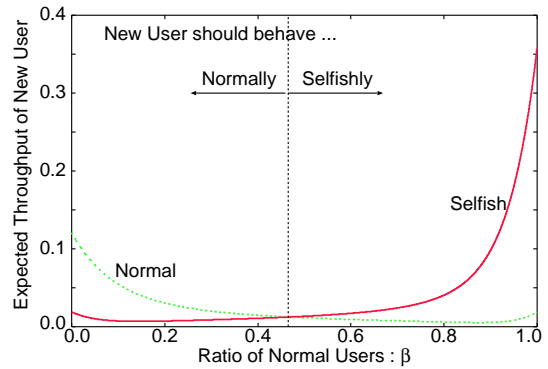


図4.  $\beta$ に対する新規ユーザ個人のスループット期待値 ( $N = 19$ ,  $\alpha = 0.9$ ,  $m = 5$ )

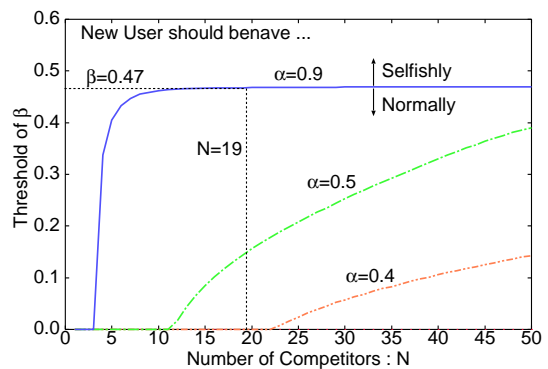


図5. 個人スループットを利得関数とする場合の新規ユーザ(正規・利己)判定閾値 ( $m = 5$ )

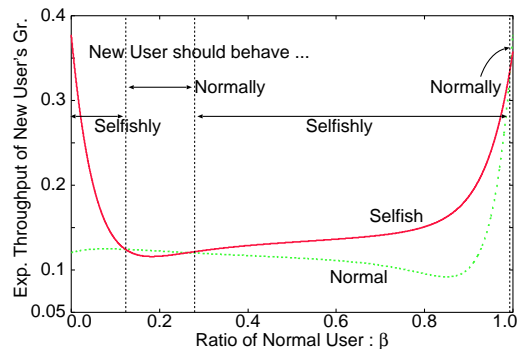


図6.  $\beta$ に対する新規ユーザのグループスループット期待値 ( $N = 19$ ,  $\alpha = 0.9$ ,  $m = 5$ )

新規ユーザ所属グループのスループットに関して、 $m = 5$ に対する $\beta$ の閾値と競合ユーザ数 $N$ の関係を図7に示す。図7より、 $\alpha = 0.9$ の場合では、 $N \geq 13$ で $\beta$ の閾値が3個存在している。また、個人スループットの結果と同様に、 $N$ ,  $N$ および $\alpha$ の値が小さいとき、新規ユーザが利

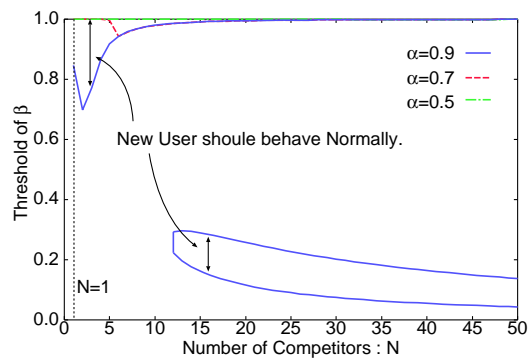


図 7. グループスループットを利得関数とする場合の新規ユーザ(正規・利己)判定閾値 ( $m = 5$ )

己的に行動すべき領域が広がる。しかしながら、高いバックオフ係数  $\alpha = 0.9$  をとっている場合でも、新規ユーザは正規選択時により多くの領域で不利になるという点で個人スループットの結果と異なることがわかる。

#### (4) まとめ

本研究では、バックオフパラメータを改変する利己的ユーザを含む非協力アロハゲームに対し、正規ユーザ数を未知とする非完備情報性を導入した。そして、非協力アロハゲームを再構築することにより、非完備情報アロハゲームを定義した。  $N$  ユーザのネットワークに新しく参加するユーザが、正規、利己的のどちらを選択すべきかに関して考察を行った。ここで、新規ユーザはネットワーク内の正規ユーザの割合を  $\beta$  と推定すると想定した。個人とグループの 2 種の利得関数に対して、新規ユーザが利己的に振舞うべきと判断する  $\beta$  に関する閾値の存在を数値例により示した。その結果、個人スループットを利得関数とする場合、正規ユーザを選択した時でも、有利な状態が存在することを示した。一方、グループの利得を考えた場合、多くの場合で利己的ユーザを選択すべきであることを示した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 榊原勝己, 武次潤平, "On the effect of an invertible code on block undelivered probability in cooperative multi-hop relaying networks," 電子情報通信学会英文論文誌 EA 分冊, 査読有り, 第 E92-A 巻, 第 10 号, pp.2492-2494, 2009 年 10 月.
- ② 榊原勝己, 伊藤大地, 武次潤平, "Effect

of an MDS code on the outage probability in cooperative multi-hop relaying networks," in Proceedings of the 9th IEEE Malaysia International Conference on Communications (MICC2009), 査読有り, CD-ROM, 2009 年 12 月.

- ③ 勝間田健, 榊原勝己, 武次潤平, "IEEE 802.11 DCF/トークンパッシング融合アクセス方式における安定的な動作切替法の提案," 電子情報通信学会論文誌 B 分冊, 査読有り, 第 J93-B 巻, 第 5 号, pp.794-798, 2010 年 5 月.
- ④ 榊原勝己, 武次潤平, "A new IEEE 802.11 DCF utilizing freezing experiences in backoff interval and its saturation throughput," Journal of Communications and Networks, 査読有り, 第 12 巻, 第 1 号, pp.43-51, 2010 年 2 月.
- ⑤ 榊原勝己, 金谷會城, 武次潤平, "On an ALOHA game with unknown selfish nodes," in Proceedings of the 10th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT2010), 査読有り, CD-ROM, 2010 年 10 月.
- ⑥ 榊原勝己, 伊藤大地, 武次潤平, "Outage probability of cooperative multi-hop relay networks with MDS codes at link-level," in Proceedings of the 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC2010), 査読有り, CD-ROM, 2010 年 11 月.
- ⑦ 榊原勝己, 伊藤大地, 武次潤平, "Link-level performance of cooperative multi-hop relaying networks with MDS codes," Journal of Communications and Networks, 査読有, 第 13 巻, 第 4 号, pp.393-399, 2011 年 8 月.
- ⑧ 榊原勝己, 小林秀次, 武次潤平, "Outage probability of random relying of MDS codeword blocks in cooperative multi-hop networks," in Proceedings of the 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT2011), 査読有, CD-ROM, 2011 年 10 月.
- ⑨ 榊原勝己, 小林秀次, 武次潤平, "Performance of random relaying of MDS codeword blocks in cooperative multi-hop networks over random error channels," Cyber Journals: Multidisciplinary Journals

in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT), 査読有, 第 2 巻, 第 12 号, pp.15-21, 2011 年 12 月.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 武次潤平, 戸野桂詩, 榊原勝己, “複数センサノードで検出されるターゲットの最尤法を利用した位置推定に関する検討,” 電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会, 新潟, no.B-20-27, 2009 年 9 月.
- ② 武次潤平, 中村元和, 中谷卓史, 榊原勝己, “無線 LAN における MAC プロトコル不正が TCP ダウンロードトラフィックに与える影響に関する検討,” 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 仙台, no.B-6-144, 2010 年 3 月.
- ③ 金谷會城, 榊原勝己, 武次潤平, “非完備情報・非協力アロハゲームへの新規参加ユーザの振舞いに関する検討,” 平成 22 年度 (第 61 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 総社, no.10-11, 2010 年 10 月.
- ④ 金谷會城, 榊原勝己, 武次潤平, “非完備情報における非協力アロハゲームに関する考察,” 第 12 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS2010), 松江, no.C-01, 2010 年 11 月.
- ⑤ 武次潤平, 榊原勝己, “IEEE 802.11 DCF を用いた無線 LAN におけるバックオフ測定値分布のモデル化に関する検討,” 電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会, 札幌, no.B-6-56, 2011 年 9 月.
- ⑥ 武次潤平, 榊原勝己, “IEEE 802.11 無線 LAN における不正検出のための正規バックオフ測定値推定法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 (情報ネットワーク研究会), 旭川, vol.111, no.409, IN2011-129, pp.53-58, 2012 年 1 月.
- ⑦ 武次潤平, 榊原勝己, “IEEE 802.11 DCF を用いた無線 LAN における指数バックオフ不正に対するバックオフ値測定に関する検討,” 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山, no.B-6-23, 2012 年 3 月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榊原 勝己 (SAKAKAIBARA KATSUMI)  
岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号:10235137

### (2) 研究分担者

武次 潤平 (TAKETSUGU JUMPEI)  
岡山県立大学・情報工学部・助教  
研究者番号:10405483