

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21800003

研究課題名（和文）ユビキタスネットワークのための次世代高機能トランスポートプロトコル

研究課題名（英文）Next Generation Transport Protocol with High Functionality for Ubiquitous Networks

研究代表者

西山 大樹 (NISHIYAMA HIROKI)

東北大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：90532169

研究成果の概要（和文）：

異種ネットワークの融合体である統合 IP ネットワークにおいて様々なサービスを展開するためには、現在の TCP に代わる新たな次世代高機能トランスポートプロトコルの開発が必須である。本研究では、性質（帯域、遅延、エラー率）の不均一性が高い統合 IP ネットワークにおいても通信効率や通信品質の面で優れた性能を発揮できるプロトコルを考案し、シミュレーションによりその有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

Next generation network is an aggregation of heterogeneous networks integrated by using Internet Protocol (IP). To deploy various kinds of network services over such IP-based networks, developing new transport protocols which outperform the de-facto standard protocol, i.e., Transmission Control Protocol (TCP), is essential. In this research, advanced technologies to enhance the functionality of transport layer are invented, which allows us achieving highly efficient communication and ensure quality of services even in heterogeneous network environments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	810,000	243,000	1,053,000
2010 年度	720,000	216,000	936,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,530,000	459,000	1,989,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワーク，プロトコル，IP，TCP，QoS，輻輳制御，無線，トランスポート

1. 研究開始当初の背景

1980 年代に登場した TCP (Transmission Control Protocol) は、インターネットの爆発的普及と共に一躍ネットワークの標準プロトコルとして確固たる地位を築いた。しかし、その利用範囲の急速な拡大に伴い、様々

な問題が顕在化してきた。無線環境でのスループット低下、競合するユーザ間の公平性の問題などはその最たるものである。

TCP の性能を改善すべく、これまでに国内外問わず様々な研究が行われてきたが、その多くは TCP がそうであるように End-to-End を大原則とするものであった。End-to-End モ

デルでは、ネットワークノードが TCP の輻輳制御に直接関与することは許されており、エンドノード（送信ノードまたは受信ノード）が輻輳制御を行う。そのため、TCP の性能改善は、エンドノードにおいて如何にネットワークの輻輳状態を正しく推測するかという点に重点が置かれている。エンドノードにおいて測定可能、かつネットワークの輻輳状態と因果関係がある指標としては、瞬間的スループットやパケット転送遅延があり、実際にこれらを利用した輻輳制御プロトコルが多数提案されている。Microsoft Windows Vista の標準 TCP として採用された Compound TCP も、その制御にパケット転送遅延の時間変動を利用している。しかしながら、輻輳制御に有用かつエンドノードで入手可能である情報は極限られており、それ故に性能の大幅な改善は見込めない。例えば、Compound TCP は既存の TCP との親和性を重視して設計されており、無線環境でのスループット向上や、公平な帯域の利用といった性能の大幅改善を期待できるものではない。

これに対し、輻輳制御機能の大幅な強化が可能であるとして近年注目を集めているのが XCP (eXplicit Control Protocol) を初めとするネットワーク支援型のプロトコルである。ネットワーク支援型の最大の特徴は、ネットワークノードが各フローの輻輳制御に直接関与できる点である。トラフィックの変動を測定可能なネットワークノードでは、輻輳制御に有用な情報を多数得ることができる（トラフィック量やフロー数、キューイング遅延など）。従って、End-to-End 型に比べ、よりネットワークの状態に適した送信レート制御が可能になる。ただし、ネットワークノードから送信ノードへ情報あるいは指令が伝わるまでにはタイムラグが存在するため、制御メカニズムにはフィードバック制御理論が必須となる。それ故、厳密な制御により性能を高めようとするとはノード間で交換が必要な情報量が増加し、結果としてパケットヘッダやオーバーヘッドの増加が避けられなくなる。このような処理負荷の増大は到底受け入れ難いものであり、多くのネットワーク支援型プロトコルが抱える大きな課題となっている。

以上の通り、現在の TCP に代わるトランスポートプロトコルの研究開発は、End-to-End の原則の保持を前提として TCP の改良を試みる動きと、ネットワーク支援を利用した新たなプロトコルの創出を試みる動きの2つに大別される。ここでは前者を第1のアプローチ、後者を第2のアプローチと呼ぶことにするが、両アプローチはそれぞれ機能・性能面、または処理負荷・実装展開の点で壁にぶつかっている。研究代表者は、これまで第2のアプローチに関する研究開発を行ってきたが、やは

り高機能化に伴う処理負荷の増大という課題にぶつかった。しかし、その解決に取り組む過程において、新たな第3のアプローチを着想するに至った。第3のアプローチとは、第1と第2のアプローチを融合させることにより、両者の欠点を補い、オーバーヘッドが少なく機能面にも優れたプロトコルの創出を目指すものである。しかし、第1と第2のアプローチのそれぞれで主流の輻輳制御メカニズムは全く異なる独自性の強いものであるため、単純に併用または組み合わせるだけではそれほど効果がない。そこで、それぞれが採用している輻輳制御法を理論レベルで設計・融合させる必要があり、本研究はこれにより不均一性が高い IP ネットワークにおいて優れた性能を発揮する次世代トランスポートプロトコルの創出を目指すものである。

2. 研究の目的

IP による異種ネットワークの融合が加速し、それに伴い TCP の力不足が叫ばれているわけだが、最も解決が急がれる問題は、無線アクセスネットワークとインターネットの相互接続によって発生する問題である。ユビキタスネットワーク構築へ向けた近年の無線通信技術の発達により、様々な無線ネットワークを介してインターネットに接続できるようになった。高速化に拍車がかかる携帯電話網はもちろん、Wi-Fi による無線 LAN 接続、導入が加速する WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) 網、超高速インターネット衛星 (WINDS) など、通信方式は様々である。このような無線ネットワークを介して通信を行う場合に問題となるのが、帯域の利用効率と QoS 制御である。

まず、帯域の利用効率について述べる。TCP の場合、無線ネットワークと有線ネットワークが統合された環境では、データのロスが無線部のエラーに起因するの还是有線部の輻輳に起因するのかを区別することが難しく、誤った判断により通信レートが著しく低下し、帯域を有効に利用することができない。本研究では、データのロス原因に影響を受けない送信レート調節法を設計することにより、無線環境における高スループットの達成を図り、帯域の効率的利用の実現を目指した。

次に、QoS 制御について述べる。無線アクセスネットワークの場合、1つの基地局がカバーエリア内の全ユーザを収容することになるため、基地局にトラフィックが集中する。このような場合、帯域を無駄なく利用しつつ、

QoS のポリシーに従って分配することが求められるが、TCP では実現不可能である。現状では、ISP (Internet Service Provider) や通信事業者の多くが、各ユーザの通信レートが一定量を超えた場合に制限することによりトラフィックの集中緩和を図っているが、それだけでは QoS 制御を実現することはできない。そこで、本研究では QoS のポリシーとして公平性を考え、競合するユーザが平等に帯域を利用できる制御法を開発することを目指した。

以上の通り、本研究は高効率かつ QoS 保証といった高機能性を実現することを目指すものである。また、前述の通り、第 3 のアプローチを試みることににより高機能性のみならず低処理負荷で実装展開が容易なプロトコルの創出を目的とした。

3. 研究の方法

本研究が目指す制御プロトコルの特徴は、現在の TCP と同様に End-to-End の原則保持を前提とした第 1 のアプローチと、End-to-End の原則を超えたネットワーク支援の利用により高機能化を図る第 2 のアプローチの融合にある。そこでまずは、この提案プロトコルの拠り所となる制御理論の構築を行った。関連研究のアプローチを参考にしながら、どのような制御理論がどのような機能・性能の実現に利用できるのかを検討するとともに、各制御理論の長所と短所を分析した。分析結果に基づき、理論の取捨選択や融合、さらには新しい理論を導入することにより、高機能性を実現可能な制御理論の構築を図った。理論構築は、数式によるモデル化や数値解析をベースに行った。続いて、制御メカニズムの設計に着手した。どのような制御をネットワークのどの部分で行うか、それらをどう連携させるかについて検討した。輻輳制御メカニズムを基にした提案プロトコルを開発では、必要な情報の取得方法やノード間の情報交換の方法などを検討する際、現在標準となっている TCP/IP のプロトコルスタックやレイヤ構造を考慮し、既存ネットワークとの親和性を可能な限り維持できるように工夫した。その後は、動作確認及び性能評価をネットワークシミュレータ (NS2: Network Simulator version 2) を用いて行った。

以上に示した一連の作業、つまり制御アルゴリズムの考案、パラメータの調節、ネットワークシミュレータによる実験と性能評価を繰り返し行うことにより、提案プロトコルを完成させた。この過程においては、実験結果は無線アクセスネットワークの通信方式

の影響を受ける可能性があるため、様々な通信方式を想定した実験を行い、任意の通信方式の下での提案プロトコルの有効性について評価を行った。提案プロトコルのプロトタイプが完成した後は、シミュレーションによる本格的な性能評価を行った。ネットワークの遅延、帯域、伝送エラー率、ユーザ数などについて様々な状況をシミュレートし、既存の代表的なプロトコルとの性能比較なども行い、本研究が目的とする高効率性や QoS 制御の点における提案プロトコルの有効性や優位性を確認した。

4. 研究成果

(1) 平成 21 年度の成果概要

初年度である平成 21 年度は、性質が不均一なネットワークの代表例である衛星ネットワークとアドホックネットワークにおける TCP 通信に重点を置いて研究を行った。衛星ネットワークは地上ネットワークと比較して遅延が非常に大きいことで知られるネットワークである。一方、アドホックネットワークはネットワークの形が変化することによってデータのロスが頻繁に発生し得るネットワークとして知られている。そして、これらのネットワークでは TCP の性質が大幅に低下することが指摘されている。そこで、まずはその現象について詳しく解析を行うと同時に、問題を解決するための基礎技術について研究を行った。ネットワークのボトルネック部分に比較的实现が容易なパケットマーキング機構を導入することにより、通信端末がネットワークの状態に合わせた通信制御を行うことが可能になり、ネットワークの不均一性が通信に与える影響を抑制し、TCP を大幅に上回る性能を実現できることを示した。

(2) 平成 22 年度の成果概要

平成 22 年度は、性質の不均一性の中でも特に TPC の通信性能に大きな影響を与える伝送エラーに着目した。無線ネットワークでは電波強度が時間的・空間的に激しく変化するため、伝送エラーによる IP パケットの喪失が発生する。これは、携帯電話はもちろん、WLAN (Wireless Local Area Network), WiMAX など無線通信一般に言えることである。一方、TCP は IP パケット喪失の原因はネットワークの混雑であるとの前提で設計されているため、結果として伝送エラー率が高いネットワークでは通信性能が大幅に低下する。この課題を克服するため、IP パケットの喪失の原因がネットワークの混雑であるか、それとも伝

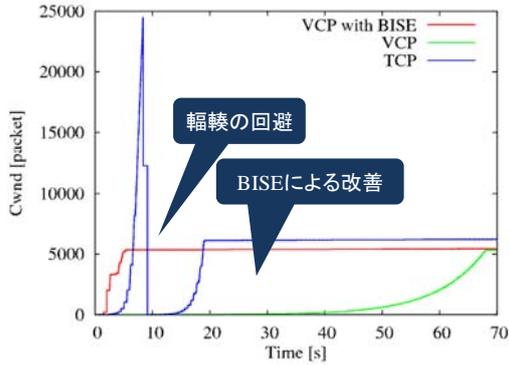


図 1: 輻輳ウィンドウ制御の比較

送エラーであるかを推測するための制御技術について研究を行った。初年度の研究結果も活用した結果、ネットワークの中継装置に比較の実装が容易なパケットマーキング機構を導入することにより、送信端末がネットワークの状態を容易に推測することが可能となり、ネットワーク状態の変化に適応した通信制御が実現可能であることを示した。

(3) 技術の概要

本研究の成果として位置づけられる主な提案技術として、本研究報告では、ネットワークの帯域や遅延の違いの影響を受けることなくスループットを増加させることを可能にする BISE (Bandwidth-Independent Start-up Extension) と、伝送エラーが頻発する無線ネットワークでも高スループットを維持することを可能にする WLTE (Wireless Loss Tolerant Extension) の 2 つを取り上げる。本研究では第 3 のアプローチを試みるにあたり、比較的既存のネットワークとの親和性が高い VCP (Variable-structure congestion Control Protocol) と呼ばれるプロトコルをベースとしたが、VCP は幾つかの問題点を抱えており、それを解決するために考案したのが BISE と WLTE である。以下ではそれぞれの技術的な特徴と、シミュレーションによる性能評価の結果を示す。

① BISE

VCP は TCP と同様に輻輳ウィンドウサイズを制御することによってスループットを調節するが、通信開始時やネットワーク帯域に余裕がある場合の輻輳ウィンドウ調節に問題を抱えている。図 1 において、青のグラフが TCP の輻輳ウィンドウ制御の様子を、緑のグラフが VCP の輻輳ウィンドウ制御の様子を表している。通信開始時やネットワーク帯域に余裕がある場合、TCP と VCP は Multiplicative Increase (MI) と呼ばれるアルゴリズムでウィンドウを増加させるが、

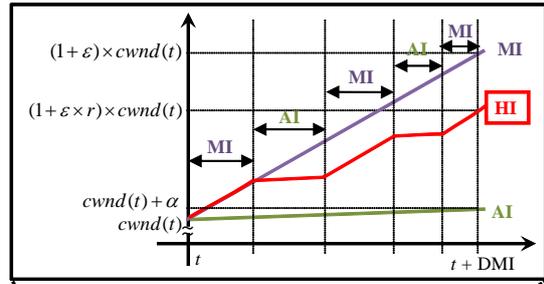


図 2: HI アルゴリズムの概略

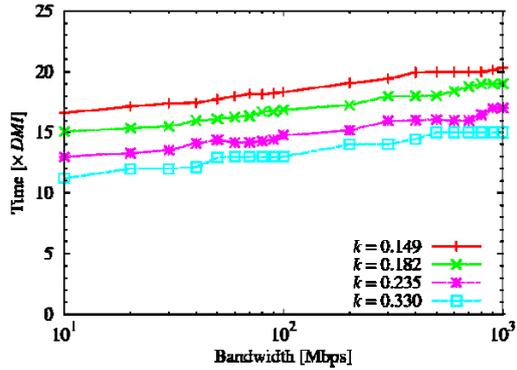


図 3: スループットの上昇にかかる時間

その増加スピードが異なる。積極的に増加させる TCP では、輻輳が誘発されることが指摘されている一方、VCP では輻輳ウィンドウが十分な値まで増加するまでに長い時間が必要となる。そこで提案方式では、新たに Hybrid Increase (HI) と呼ばれるアルゴリズムを利用した BISE を導入し、これにより図 1 の赤のグラフのような適切な輻輳ウィンドウ制御を実現する。

HI アルゴリズムによる輻輳ウィンドウ制御の概略を図 2 に示す。HI アルゴリズムは、MI アルゴリズム及び Additive Increase (AI) と呼ばれるアルゴリズムを効果的に組み合わせることによって、MI と AI の間の任意の増加速度を実現するアルゴリズムである。そして、その特徴は、MI と AI の混合比率をネットワークの帯域や遅延に合わせて適切に設定することによって、どのようなネットワークにおいても一定時間でスループットを上昇させることが可能な点にある。図 3 は帯

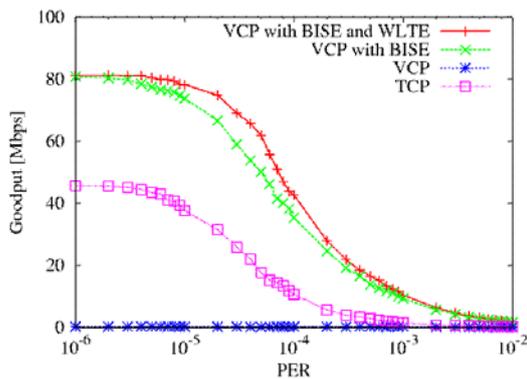


図 4: WLTE によるスループットの改善

域が異なるネットワークにおける VCP 通信で提案技術 BISE を利用した場合の結果を示しており、縦軸はネットワーク帯域の 80% までスループットが上昇するまでに必要な時間を示している。ネットワーク帯域が大きいほど僅かに必要な時間が延びる傾向はあるものの、10Mbps から 1Gbps といった幅広い範囲のネットワークにおいてほぼ同程度の時間でスループットを上昇可能であることが分かる。なお、図中の k はスループットの増加速度を制御するパラメータであり、ネットワーク帯域や遅延とは無関係である。

②WLTE

WLTE は伝送エラーが頻発する無線ネットワークにおける VCP のスループット向上を実現するために考案した技術であり、その特徴は VCP のパケットマーキング機構を利用した送信側へのネットワーク状態の通知に基づいたパケットロスの原因推定にある。

一般に、送信側におけるパケットロスの検知方法としては、再送タイムアウトの発生と、重複 ACK の受信といった異なる 2 つの方法がある。もし、ネットワークが伝送エラーがほとんど発生しないような有線ネットワークであれば、再送タイムアウトの発生は重度の輻輳によるものと推測される一方、重複 ACK の受信は軽度の輻輳によるものと推測され、実際この推測はほとんどの場合において正しい。しかしながら、伝送エラーが頻繁に発生する無線ネットワークにおいては、伝送エラーによる突発的で集中的なパケットのロスがタイムアウトを引き起こすこともある。つまり、タイムアウトの発生や重複 ACK の受信などの従来の方法のみでは、ネットワークの状態を正確に推測することは困難である。

一方、VCP では、ネットワークの混雑度合いに関する情報がパケットマーキングによ

って各送信端末に伝達されている。そのため、この情報を有効に活用することによって、パケットロスの原因を推定することができる。ただし、1 点だけ注意が必要である。それは、パケットマーキングによる情報伝達では、ネットワーク側と送信側の間に時間的なズレが存在することである。そのため、推定した原因が必ずしも正しいとは限らないことも考慮する必要がある。

上記を踏まえ、WLTE では次のように輻輳ウインドウの制御を行う。まず、再送タイムアウトが発生した場合は、無条件でネットワークが輻輳状態にあると判断し、TCP と同様に輻輳ウインドウサイズをリセットする。これは、パケットマーキングによって伝達される情報の信頼性が完全ではないことから、重度の輻輳の可能性が疑われる再送タイムアウトの場合は、保守的な判断をすることが賢明であるという考えに基づいている。一方、重複 ACK の受信によってパケットロスを検出した場合は、パケットマーキングによって伝達されるネットワーク状態に関する情報に基づき、パケットロスの原因を推測する。ネットワークの輻輳が原因と推定されれば、TCP と同様に輻輳ウインドウサイズを半減させて送信レートを減少させることにより、更なる輻輳の発生を回避することを試みる。他方、パケットロスの原因が伝送エラーであると推定されれば、輻輳ウインドウを減少させることに意味は無いため、輻輳ウインドウの値を維持することによってスループットを保つ。以上が WLTE の輻輳ウインドウ制御アルゴリズムであるが、その有効性は図 4 に示す実験結果から明らかである。

最後に、BISE 及び WLTE のそれぞれの効果を明確に表すシミュレーション結果として図 5 から図 8 を示す。各図は輻輳ウインドウの時間変動を示しており、図 5 は TCP、図 6 は VCP、図 7 は VCP に BISE のみ適用、図 8 は VCP に BISE と WLTE を適用した場合である。BISE 及び WLTE が輻輳ウインドウサイズ、つまりはスループットの安定化に大きく貢献していることが確認できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 西山大樹, Nirwan Ansari, 加藤寧, “Wireless Loss-Tolerant Congestion Control Protocol Based on Dynamic AIMD Theory”, IEEE Wireless Communications, 査読有, vol. 17, no. 2, 2010 年, pp. 7-14.
2. 池田好宏, 西山大樹, Nirwan Ansari, 根元義章, 加藤寧, “Extensions of VCP to Enhance the Performance in High BDP and Wireless Networks”, Proceeding of

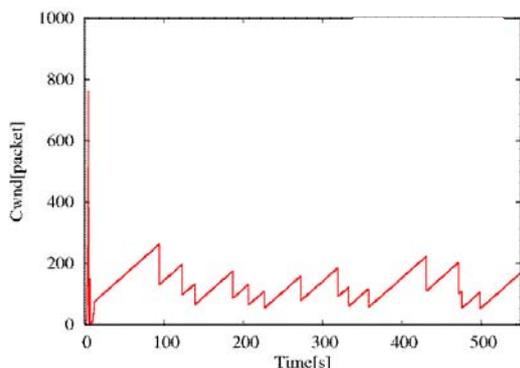


図 5: 輻輳ウィンドウの時間変動
(TCP の場合)

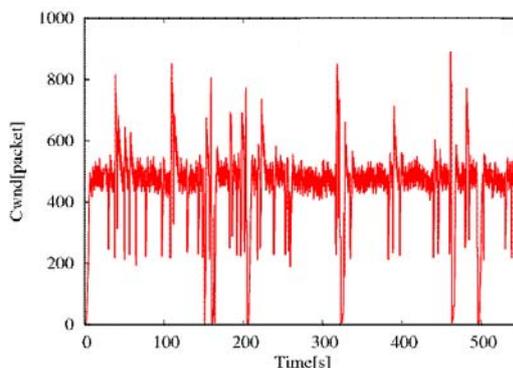


図 7: 輻輳ウィンドウの時間変動
(VCP に BISE のみ適用した場合)

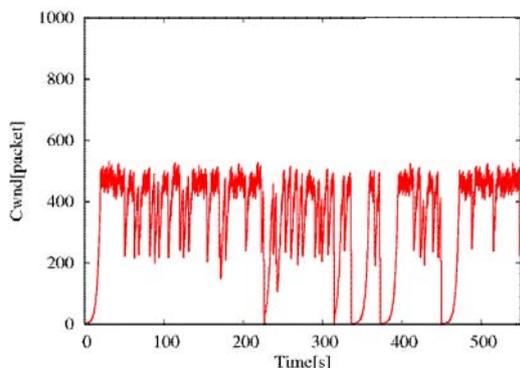


図 6: 輻輳ウィンドウの時間変動
(VCP の場合)

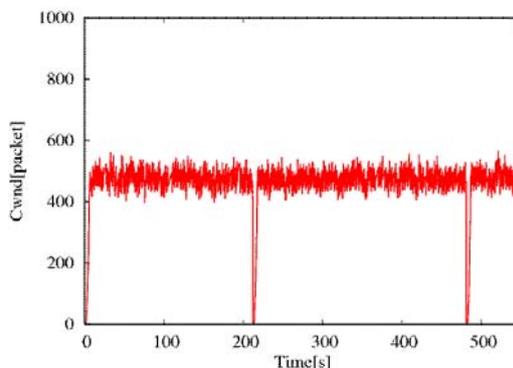


図 8: 輻輳ウィンドウの時間変動
(VCP に BISE と WLTE を適用した場合)

IEEE Wireless Communications & Networking Conference 2010 (WCNC 2010), 査読有, 2010 年, pp. 1-6.

[学会発表] (計 4 件)

1. 池田好宏, 西山大樹, 加藤寧, “高遅延無線環境におけるネットワーク支援型トランスポートプロトコルの再送制御に関する一検討”, 電子情報通信学会衛星通信研究会, 2010 年 7 月 23 日. 北見工業大学 (北海道).
2. 本田学, 西山大樹, 加藤寧, “Efficient Usage of the Bandwidth on the Satellite and Ad Hoc Network”, Joint Conference on Satellite Communications 2009 (JC-SAT2009), 2009 年 10 月 30 日, 新公会堂 (奈良県).
3. Daniel Silva, 西山大樹, 加藤寧, “Performance Evaluation of TCP over Hybrid Satellite/MANET Networks”, 電子情報通信学会衛星通信研究会, 2009 年 7 月 10 日, 小樽市民会館 (北海道).
4. 池田好宏, 西山大樹, 加藤寧, “高遅延無

線環境におけるトランスポートプロトコルに関する一検討”, 電子情報通信学会衛星通信研究会, 2009 年 6 月 3 日, KDDI 研究所 (埼玉県).

[その他]

- (1) ホームページ
<http://www.it.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
西山 大樹 (NISHIYAMA HIROKI)
東北大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 90532169
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし