

氏名（本籍）	つのだ 角田	ひろし 裕	（島根県）	
学位の種類	博士（情報科学）			
学位記番号	情博第317号			
学位授与年月日	平成17年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻			
学位論文題目	非静止衛星統合型広域ネットワークの高度な通信制御方式に関する研究			
論文審査委員	（主査）東北大学教授 根元 義章			
	東北大学教授	白鳥 則郎	東北大学教授	加藤 寧
	東北大学講師	和泉 勇治		

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

先進国を中心として世界的にユビキタスコンピューティングに対する期待が高まる中、その一方では固定電話、携帯電話、インターネットへのアクセスなどの通信手段すら未整備な地域が存在する。そして、これらの地域間では得られる情報の量、密度共に圧倒的な差が生じている。この問題はデジタルデバイド問題と呼ばれ、世界的にも解決が望まれている問題である。しかし、情報インフラの整備には多くの時間とコストが必要であり、現状の光ファイバのような有線を基本とした方式では、全世界に情報ネットワークを行き渡らせることは事実上不可能である。

そのような背景の中、デジタルデバイドを解消し、ユビキタスコンピューティングへの流れを世界的に加速させるために、衛星通信は大きな注目を集めている。衛星通信の持つ、広域性、同報性、回線設定の柔軟性、耐災害性は地球上の至る所に対して即座にかつ安全に通信手段を提供できるからである。災害時を考慮したバックアップネットワークの構築や、緊急時の通信用ネットワークの即時構築などの活用も期待でき、衛星通信を統合したネットワークの実現は社会インフラとして非常に価値が高い。通信衛星の中でも、近年特に注目されているのは静止衛星よりさらに低い軌道の衛星を利用した非静止衛星によるネットワークである。非静止衛星ネットワークの利用により、静止衛星が有する高遅延や端末の小型化問題の多くの解決が期待できる。

本研究の目的は次世代ネットワークの要素として不可欠な、非静止衛星統合型ネットワークの構築である。非静止衛星ネットワークの優れた特性を十分に生かすためには、地上ネットワークの標準プロトコル TCP/IP による既存の地上ネットワークへの統合が不可欠である。そこで、本研究では、非静止衛星ネットワークの衛星の移動が、通信制御の根幹であるインターネット層とトランスポート層に大きな影響を与えると考え、これら二つの層に関する問題に取り組んだ。

### 第2章 非静止衛星統合型広域ネットワークにおける通信制御の課題

非静止衛星統合型ネットワークを実現する上での課題を明らかにするべく、非静止衛星、特に低軌道衛星ネットワークを対象としてその特徴を詳細に調査した。

非静止衛星ネットワークの大きな特徴は、ネットワークを構成するノードである衛星が時々刻々と移動し続ける上、その移動速度は地上の移動体より遥かに大きい。これは、ネットワークが基本的に静止している地上インターネットとは大きく異なる性質であり、インターネットの標準プロトコル TCP/IP の非静止衛星ネットワークへの

適用に際しての困難な点である。以下に、非静止衛星ネットワークの性質から生じる問題を説明し、その問題が TCP/IP のプロトコル階層のどの層に相当するか述べる。

まず、第 1 の問題はハンドオーバーが集中的に発生することである。衛星のカバレッジは広大であり、衛星の高速な移動によってカバレッジも同時に移動する。その結果、単位時間当たりにカバレッジ端を越えてハンドオーバーを実行するノード数は、地上の移動体ネットワークと比較して大幅に増加すると考えられる。また、利用者数は地域によって異なることから、大都市等の利用者が非常に多い地域ではハンドオーバーの集中的な発生が顕著となる。ノードのハンドオーバーはノードがネットワーク内の位置を変えることであり、ノードの移動管理処理を必要とするため、結果的に集中的なハンドオーバーは移動管理のコストを増加させる。現在、インターネットにおいては、移動管理はインターネット層において行う方法が主流であることから、この問題はインターネット層における問題である。

第 2 の問題は通信中のハンドオーバーによって、ノードのネットワーク内の位置が変化した場合、送受信ノード間の通信経路が変化することである。非静止衛星ネットワークの軌道構成によっては、ハンドオーバーの前後の経路の衛星ホップ数に大きな差が生じ、遅延も大幅に増減する可能性がある。通信経路の品質は通信の両端で制御を行うトランスポート層のプロトコルの制御に影響を与えることから、この経路の変化の取扱いはトランスポート層の課題となる。

最後に、第 3 の問題は非静止衛星ネットワークが無線リンクで構成されていることである。無線リンクでは、伝送中の誤りが有線リンクよりも遥かに高い確率で発生する。誤りを含んだパケットは廃棄されるが、現在のインターネットではこの誤りによるパケットロスを正しく取り扱うことはできず、トランスポート層で行われる伝送量の制御に影響する。無線リンクにおける TCP の性能劣化の問題は地上ネットワークでも指摘されているが、非静止衛星ネットワークが位置する宇宙空間という問題から更に困難な課題となる。

### 第 3 章 地理的位置情報を活用した端末の移動管理方式

第 3 章では、第 2 章で指摘した問題のうちの一つである移動管理の高コスト化に対する解決策を提示する。

非静止衛星ネットワークにおいて移動管理が高コスト化する原因の中心は、既存の移動管理方式では、移動管理の処理の一つである位置登録がハンドオーバーに伴って発生することである。非静止衛星ネットワークではハンドオーバーが頻発するため結果的に位置登録も頻発し、位置登録に要する通信のコストが増加する。

そこで、本章ではハンドオーバーと位置登録処理を分離し効率的な移動管理方式を実現するために、地理的位置情報を活用した移動管理方式を提案した。ネットワーク内の論理的な位置を基準としてノードの位置を管理する従来方式と異なり、提案方式では地理的位置を基準とするために、衛星の移動がノードの位置に影響しない。その結果、位置登録の通信は基本的にハンドオーバーの発生であり、独立ノードの移動によってのみ発生する。

また、提案方式では、位置情報のみではノードの宛先衛星を一意に決定できないという、宛先衛星の曖昧性に起因する経路制御の複雑化を避けるために、通信中のノードの移動管理には衛星の軌道情報を併用する。軌道情報を取り入れることにより、宛先衛星の曖昧性を大幅に緩和し、経路制御を簡略化できる。

シミュレーションを通じて移動管理によって発生する通信のコストを既存の移動管理方式と比較し、提案手法はコストを大幅に削減できることを示した。

### 第 4 章 ホップ数の観測による経路変動の検知と再送制御への応用

第 4 章では、非静止衛星ネットワークのトポロジ変化や通信の両端のノードがハンドオーバーすることによる通信経路の変化によって、伝送制御の一部が誤動作することを指摘している。

インターネットの一般的な伝送制御プロトコルである TCP ではパケットロスを輻輳と解釈し、パケットの再送と共に輻輳を解消するために送信量を低下させる。しかしながら、TCP では単なるパケット到着順序の逆転とパケットロスを厳密に区別することはできない。第 2 章で指摘したように、非静止衛星ネットワークではハンドオーバー時に通信経路が変化し得るため、後から送信されたパケットが先発のパケットを追い越し先に受信側に到着する場合がある。現行の TCP では、このような非静止衛星ネットワークで発生する通信経路の変化によってパケット到着順序が

逆転した場合にも、誤って再送を実行し送信レートを削減してしまう可能性がある。

本章ではこの問題を解決するために、IP ヘッダの TTL フィールドの情報を利用し、再送制御の誤作動を回避する手法を提案した。TTL フィールドの情報からパケットを転送した衛星数を判断可能であるため、その情報を基に確認応答の送信タイミングを制御することで再送制御の誤作動を回避する。

提案手法の効果を確認するため、*ns* を用いてシミュレーションを行い、TCP Reno と提案手法について、それぞれ送信側 TCP の送信レートの変化を比較した。その結果、提案手法を用いた場合、パケットの到着順序の逆転時にも送信レートが低下しておらず、再送制御の誤作動を回避できていることが確認できた。

## 第 5 章 適応型帯域推定と SACK による無線リンクに適したトランスポートプロトコル

第 5 章では、非静止衛星ネットワークを構成する無線リンクでの誤りによって発生するパケットロスが TCP の性能を悪化させる問題に対して取り組む。TCP は無線環境でのパーストエラーやランダムエラーにより性能が劣化する問題があり、利用できる帯域を必ずしも有効に使っていないため、そのような環境でも効率的で高信頼な通信を提供し、なおかつ既存の TCP との親和性を悪化させない通信プロトコルが期待されている。

本章では、親和性を重視する立場から、親和性を維持しつつ、非静止衛星ネットワークの無線リンクでの性能を改善するプロトコルを提案した。提案手法は、利用可能帯域を推定し送信レートの制御に利用する TCP Westwood に着目し、Bandwidth Estimation と Rate Estimation という二つの帯域推定アルゴリズムを状況に応じて切替えることで親和性を維持する。そして、受信済パケットの情報を通知することができる TCP SACK オプションを組み合わせることで効率的な再送と正確な帯域推定を実現する。

*ns* を使用したシミュレーションにより、既存の TCP との親和性を維持しつつ、無線環境での性能を改善できることを示した。また、TCP Westwood に存在する既存の TCP に帯域を奪われる問題についても、RTT の最小値を再設定することにより、改善可能であることを示した。更に、提案プロトコルが短時間のコネクションにおける転送性能および、RTT が異なるコネクション間の公平性を改善することができることを確認した。

## 第 6 章 結論

本論文では、ユビキタスコンピューティングの実現や地球規模でのデジタルディバイドの解消を目指し、非静止衛星ネットワークを統合した次世代の広域ネットワークを構築するための基本技術の確立に取組み一定の成果を得た。

プロトコル階層において下位の層で発生した問題はそのまま上位層に影響する。そこで、本研究では上位層に先だって下位層の問題の解決が急務であると考え、特にインターネットのプロトコル階層におけるインターネット層とトランスポート層の課題について取り組み、一定の解決策を与えた。本分野の今後の課題は上位層、すなわちアプリケーション層の問題を明確化し、解決策を与えることである。特に、ネットワーク管理の側面からの研究が不可欠である。なぜなら、非静止衛星ネットワークは、地球規模のネットワークであるとともに、ネットワークを構成するノード自体が移動するこれまでに類を見ないネットワークだからである。特に、ノードが移動することはネットワークの構成管理、障害管理の面に大きな影響を与える。時々刻々と変化するネットワークの構成をリアルタイムに把握し、発生した障害の箇所を正しく特定できるような、非静止衛星ネットワークに適したネットワーク管理アーキテクチャが今後必要とされることが考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

非静止衛星ネットワークと地上ネットワークがシームレスに接続される統合型ネットワークは、ユビキタスコンピューティングの実現や地球規模でのデジタルデバイドの解消に大きな役割を果たすものとして期待されている。しかし、非静止衛星ネットワークと地上ネットワークはこれまで個別に発展をしてきており、統合化に向け多くの課題を解決する必要がある。筆者は非静止衛星ネットワークと地上ネットワークの統合に必要な通信制御方式について研究を進め、多くの有用な知見を得た。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、非静止衛星、特に低軌道衛星ネットワークを対象として、その特徴を詳細に調査し、地上ネットワークとの統合について解決しなければならない要件を明らかにし、統合に向けた設計指針を与えている。

第3章では、非静止衛星ネットワークにおいて衛星の高速な移動による衛星の切り替えが集中的に生じることから、効率的なノードの移動管理方式の確立が重要であることを述べ、地理的位置情報を活用した移動管理方式を提案している。提案方式は、地理的位置情報と軌道情報を併用してノードの位置を管理するものである。シミュレーションにより移動管理コストが大幅に削減でき、提案方式が優れていることを示している。これは有用な成果である。

第4章では、非静止衛星ネットワークのトポロジー変化によりパケットの到着順序が逆転し、再送制御の誤動作が発生することを指摘している。誤動作を回避するためトポロジーの変化を衛星ホップ数の変化から検出し、確認応答の送信タイミングを制御する方式を与えている。提案方式が、従来方式に比べ優れた性能を有することをシミュレーションにより示している。

第5章では、無線リンクで生じるパケットロスにより発生する不要な輻輳制御の影響を削減するにあたり地上ネットワークで利用されている既存のプロトコルとの共存が不可欠であることを指摘し、新しい輻輳制御方式を提案している。提案方式は選択的確認応答を活用して損失したパケットをより正確に把握し、さらに2種類の帯域推定方式を使い分けるところに特徴がある。シミュレーションにより、提案方式は、既存プロトコルとの親和性を確保しつつ無線環境での性能を改善し、またコネクション間の公平性が維持できることを示している。これは実用上有用な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、非静止衛星ネットワークと地上ネットワークのシームレスな統合を実現するために、経路制御、輻輳制御について研究を進め、非静止衛星統合型ネットワークの構築に有用な知見を与えたもので、システム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。