

## 審査の結果の要旨

氏 名 山田 和弘

本論文は「IPレイヤにおけるバイキャストリングアーキテクチャを実装した高速移動通信システム」(A High Speed Mobile Communication System implementing Bicasting Architecture on the IP Layer)と題し、現在の高速移動通信システムの通信帯域が求められる要求に対して十分ではないとの認識に基づき、実現すべき高速移動通信システムの将来像を示した上で、それを実現するための具体的手法として、IEEE 802.11gを利用した通信システムを提案している。IEEE 802.11gは本来、固定または低速の移動体向け通信用に開発された無線通信メディアであるが、通信性能だけでなく経済性を考慮に入れる鉄道事業者の視点で、経済性に優れるIEEE 802.11gを高速移動に適用するため、ハンドオーバー時にIPレイヤでバイキャストリングする手法を提案・構築し、実証実験の結果を示して、提案システムの実用性を明らかにしている。本論文は、英文で記述され、8章から構成されている。

第1章は「Introduction」で、高速移動環境からのインターネットアクセスニーズが益々高まっている一方、地上と高速移動体を接続する無線伝送路の通信帯域が地上ネットワークに比較して大きく劣っており、その広帯域化が求められているという本研究の背景と概要を述べている。

第2章は「Technological Surveys of Train Communication Systems and the Ideal Communication System for the Future」と題し、鉄道通信システムの現状を俯瞰し、唯一の無線通信メディアにより高速鉄道通信を実現することの困難を指摘し、高速鉄道における将来目指すべき無線通信システムについて議論している。高速鉄道は、都市、郊外、山間部、トンネルなどさまざまな地形を移動するという地理的条件から、最適な無線通信メディアは移動する全域にわたって唯一ではないとの考察を行っている。その結果、高速鉄道における将来目指すべき無線通信システムでは、地上局～移動局間に複数の無線通信メディアを構築し、列車の移動とともに変化するアクティブな無線通信メディアの間でトラフィックの分散送信を行うMedia Convergence Systemを提案している。

第3章は「Proposal of a High Speed Communication System based on IEEE 802.11g」と題し、Media Convergence Systemにおいては通信性能が不十分な通信メディアを結合しても、満足できる通信パフォーマンスを得ることはできないとし、Media Convergence Systemにおいて軸となる通信メディアの必要性を述べている。この通信メディアとして、通信性能、経済性に優れるIEEE 802.11gを選定し、IEEE 802.11gを利用した高速移動通信システムの設計を行っている。設計では、レイヤ2にIEEE 802.11gを利用するため、IEEE 802.11gの規格自体には改良を施さず、レイヤ1とレイヤ3を適切に設計することで、目標とする10MbpsのTCPスループットを実現する手法を提案している。レイヤ1の設計においては、高利得アンテナを開発するとともに、通信点間に構成されるフレネルゾーンを丁寧に解析した上で、高速移動環境における実測データを自由空間モデルと比較・評価している。試験結果より、高速移動環境でも10MbpsのTCPスループットを実現するための目安となる-81(dBm)の電界強度を得るためには、地上局間隔を500(m)程度とするのが最適であることを導出している。レイヤ3の設計においては、移動局となる鉄道車両の移動経路が事前予測可能であるという特性を最大限利用し、データトラフィック転送中にMobile IPのレイヤ3ハンドオーバーを実行する手法を提案している。

第4章は「Communication Performance Evaluation of the IEEE 802.11g Communication System based on a Singlepath Configuration」と題し、第3章で設計したIEEE 802.11gを利用した高速移動通信システムを東海道新幹線に構築し、実証実験を実施した結果を報告している。実証実験の結果、提案システムの通信パフォーマンスは、

平均RTTが9.95(ms), 平均TCPスループットはMode 1で9.86(Mbps), Mode 2で13.7(Mbps)であった。なお, Mode 1とは移動局が通信中の地上局に接近しながら通信するモード, Mode 2とは移動局が通信中の地上局から離脱しながら通信するモードである。また, 高速移動に起因してIEEE 802.11gリンクが5.2%の確率で無線リンクの構成に失敗することを報告している。この無線リンク障害とレイヤ2ハンドオーバーにおけるTCPの動作を詳細に解析し, 無線リンクの切断だけが課題ではなく, TCPがRT0を待つことによる自発的な通信中断によりTCPが通信不能に陥ることを指摘している。この通信不能時間率について統計的に算出しており, Mode 1で9.9%, Mode 2で18.1%であった。この時間率の低減について課題提起し, 通信システム改善のための要求条件として次の3項目を挙げている。(1)レイヤ2のリンクダウン中においてもトラフィックフォワーディングが可能であること, (2)レイヤ2ハンドオーバーに起因するTCPのタイムアウトを発生させないこと, (3)すべてのトランスポート層プロトコルに適用可能であること。

第5章は「Proposal of the Bicastig-Multipath Mobile IPv4」と題し, 第4章で課題提起したTCPの通信不能時間率低減のための3つの要求条件を満足させるためBicastig-Multipath Mobile IPv4を提案している。これは地上・車上間に2本の無線リンクを冗長的に構成し, Multipath Mobile IPv4によりそれらを別のIPルート(パス)として識別し, 2本のMIPv4トンネル相互間でバイキャストを行うアーキテクチャである。Multipath Mobile IPv4プラットフォームについて解説するとともに, 2本のパス上におけるトラフィックの負荷分散方法について, ①パケット毎の負荷分散, ②宛先IPアドレスに基づく負荷分散, を比較検討し, ①パケット毎の負荷分散ではパケット到着順序の逆転をTCPがパケットロスと判断し不用意にウィンドウ制御を実行する問題を指摘し, ②宛先IPアドレスに基づく負荷分散が望ましいと結論づけている。

第6章は「Bicastig Architecture of the Bicastig-Multipath Mobile IPv4」と題し, Bicastig-Multipath Mobile IPv4におけるバイキャストアーキテクチャの設計を行うとともに, 通信システムへのBicastig-Multipath Mobile IPv4の実装手法を詳説している。特にレイヤ2ハンドオーバーにおけるバイキャストの制御については検討している。レイヤ2ハンドオーバーが開始された直後にTCPは送信を停止するため, レイヤ2ハンドオーバーを検知した後にバイキャストを開始しても対象トラフィックはすでに存在せず, TCPはタイムアウトを待たなければならないことを指摘し, レイヤ2ハンドオーバーの予測に基づいてバイキャストを開始する必要性を述べている。車上局が受信する電界強度を繰り返し測定し, レイヤ2ハンドオーバーの直前には特徴的な変化があることを発見し, その動作をトリガとしてレイヤ2ハンドオーバーを予測する手法を提案している。提案手法では車上局がMode 2で動作する際には88.2%の精度で, Mode 1で動作する際には設定パラメータに依存するもののMode 2と同程度の精度でレイヤ2ハンドオーバーの予測が可能であることを明らかとしている。

第7章は「TCP Performances in the Bicastig-Multipath Mobile IPv4」と題し, 第5章, 第6章で提案・設計したBicastig-Multipath Mobile IPv4を, IEEE 802.11gを利用した高速移動通信システムに実装し, 東海道新幹線を利用して実証実験を行った結果を報告している。実験結果より, 第4章で掲げた3つの要求条件を満足した上で, 16.4(Mbps)の平均TCPスループットを実現するとともに, 通信不能時間率を0.67%にまで低減したことを明らかとしている。

第8章は「Conclusion」で, 本論文を総括している。

以上のように, 本論文は, 将来の高速鉄道通信システムの理想型としてMedia Convergence Systemを明示するとともに, Media Convergence Systemの軸となる無線通信メディアとしてIEEE 802.11gを利用した高速移動通信システムを提案している。その上で, IEEE 802.11gを利用した高速移動通信システムを実現するため, Bicastig-Multipath Mobile IPv4を提案し, その実用性を東海道新幹線という実環境下で実証実験により明らかにしている。提案手法はIPレイヤにおけるバイキャストにより移動通信の安定性向上に寄与するものであり, 鉄道事業者において重要なだけでなく, 電子情報学上貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。