

光で列車と通信する

中川 伸吾
輸送情報技術研究部
(旅客システム 研究員)

関 清隆
信号通信技術研究部
(主任研究員)

松原 広
同
(同 研究室長)

中村 一城
同
(通信 副主任研究員)



なかがわ しんご



まつばら ひろし



せき きよたか



なかむら かずき

はじめに

近年、移動体通信技術は目覚ましい発展を遂げており、サービス事例も続々と出現してきています。一般向けのサービスとしては、2009年2月に国内初のサービスが開始されたモバイルWiMAXが注目されています。サービスエリアは2009年11月末時点で三大都市圏や都道府県庁所在都市周辺の一部にとどまりますが、エリア内では在来線並みの速度での移動中もおおむね利用可能になっています。

鉄道における旅客サービスとしての移動体通信は、2006年に開始された、つくばエクスプレスでの無線LANサービスが先駆的事例となっています。また、新幹線でも、2009年3月に、東海道新幹線（東京～新大阪）を走行するN700系車両において無線LAN接続サービスが開始されました。これは沿線の漏洩同軸ケーブルを活用するもので、他のサービスのように基地局を新たに設置する必要がなく、鉄道環境に特化したサービスとして注目を集めています。

一方、大容量の無線通信技術として、レーザー光通信技術があります。これは、通信装置が対向する通信装置に対してレーザー光を送出し、これを用いてデータ伝送を実現する技術です。既に人工衛星を用いた通信やビル間通信で、数Gbps程度の通信を行った実績があり、大容量無線通信技術としての可能性が注目されています。

場所に捉われないネットワーク接続環境（モバイルコンピューティング環境）に対する需要が今後ますます高まることが予測される中、鉄道においても大容量のモバイルコンピューティング環境を提供できれば、鉄道の利便性向上につながられます。本稿では、鉄道環境における高速・大容量な移動体通信の実現に向けた、レーザー光通信技術について進めている研究・開発についてご紹介します。

レーザー光通信の鉄道環境への適用

レーザー光を連続的に通信相手に当てる方法として

は、レンズによってレーザー光を拡散させる方式など、いくつかのものが考えられます。それぞれを試作して実験・評価した結果、レーザスキャン方式を採用して開発を進めることとしました。

レーザスキャン方式は、レーザダイオードから放射されるレーザービームを可動式のミラーで反射し、列車の進行に合わせてミラーの向きを動かすことで連続的な通信を行う方式です。受信側の装置は自らの位置を送信側の装置に認識させるためにビーコン光を発し、送信側の装置はこれをもとにして、ミラーの向きを調整します。

この方式により列車・地上間の連続的な通信を実現するイメージを図1に示します。通信装置を列車の最後尾と沿線の地上に設置し、互いに相手のビーコン光に向けてレーザー光を発することで双方向通信を行います。以下、列車側の通信装置を車上装置、地上側の通信装置を基地局と呼びます。原理的に通信装置は1対1での通信しか行えない（同時に複数台との通信はできない）ことや、列車が線路に沿って長い距離を移動することから、基地局を地上に連続的に配置した上で、列車の走行に合わせて基地局を切り替えることが必要になります。これをふまえると、この仕組みを実現するためには以下が課題になります。

(1) 列車の走行に伴って両通信装置の相対的な位置が高速

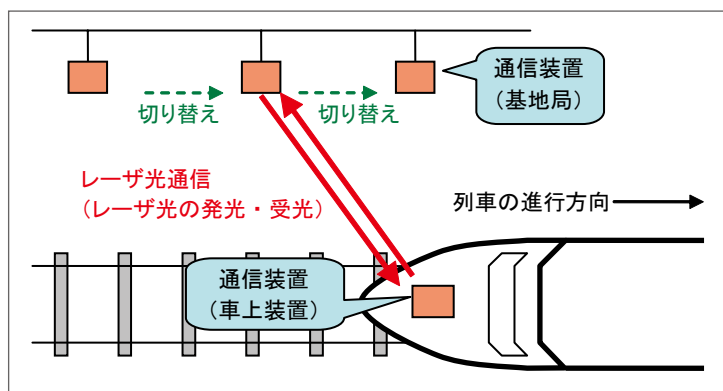


図1 鉄道環境におけるレーザスキャン方式での通信イメージ

表1 通信装置の大きさ・性能

大きさ(外枠)	幅37cm, 奥行26cm, 高さ16cm
重量	9kg
通信距離	10~100m
送信出力	+1 dBm
送信ビームサイズ	距離100m伝搬時で1m
受光光量	-6dBm~-34dBm
受入許容角度	±0.15°
レーザー光の強度	クラス1M



図3 通信装置の外観

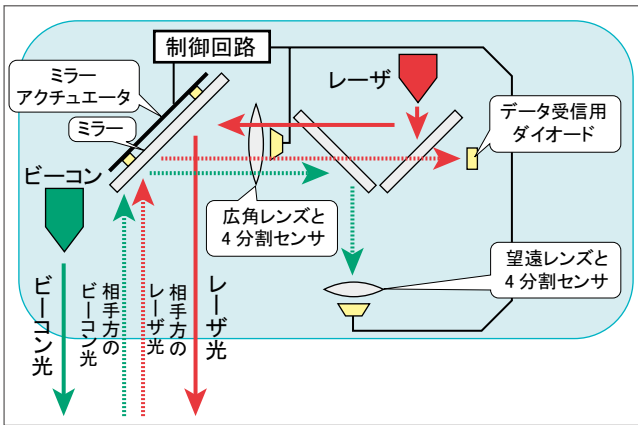


図2 通信装置の構成図

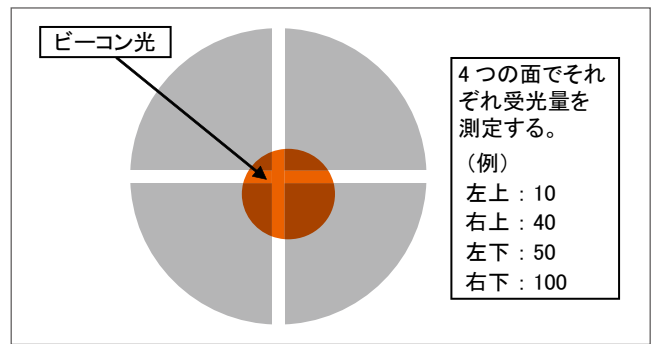


図4 4分割センサ模式図

に変化しても、高精度な追尾を行い、通信を維持する必要があります。また、列車の振動にも対応しなければならない。
 (2) 列車の走行に合わせて、基地局の切り替えを高速に行わなければならない。

レーザーキャン方式による通信装置の構成

開発した通信装置の大きさや性能を表1に示します。車上装置と基地局とは装置としては同一のものです。沿線作業員や乗務員、旅客などにレーザー光が当たる可能性があることから、レーザー光の強度はJIS規格 (JIS C 6802「レーザー製品の安全基準」) において「裸眼で安全」(レンズ等で集光しない限り安全) とされるクラス1Mのレベルに抑えています。通信性能は理論上、物理層レベルで伝送速度1.25Gbpsとなるように設計しています。

通信装置の構成を図2に、外観を図3に、それぞれ示します。レーザー光とビーコン光はそれぞれ波長の異なる赤外光であり、通信装置は相手側の発するビーコン光を目標に、ミラーの角度を制御してレーザー光を向け、双方向通信を実現します。ミラーの制御には、ミラーを上下・左右方向に傾けられる2次元ミラーアクチュエータを用いています。

通信の高速な確立・維持のために通信装置で行われる処

理の流れは以下のとおりです。

- (1) 対向する通信装置が発するビーコン光を受けた通信装置は、入射したビーコン光をミラーで反射し、4分割センサ (図4) で受光する。4分割センサは4つに分割された面それぞれの受光量を計測できるセンサであり、装置内に2つ存在し、それぞれ視野の広い広角レンズ、視野の狭い望遠レンズを通して受光するよう配置されている。
- (2) 最初に、広角レンズ側の4分割センサによってビーコン光を検知する。4分割センサはビーコン光の受光量を計測して制御回路に送る。
- (3) 制御回路は受けたビーコン光の量から相手装置の存在方向を計算し、ミラーアクチュエータにミラー角度を調整するための制御信号を送る。
- (4) ミラーアクチュエータは、受信した制御信号によってミラーの角度を調整し、4分割センサの中央にビーコン光の光軸が当たるようにする。
- (5) さらに精密なミラー角度の調整を、望遠レンズ側の4分割センサを用いて行う。処理手順は(2)~(4)と同様である。この様にミラーの方向を制御することで、正確に相手装置に向けてレーザー光を発射でき、また相手装置からのレーザー光を正確に受光できるようになる。

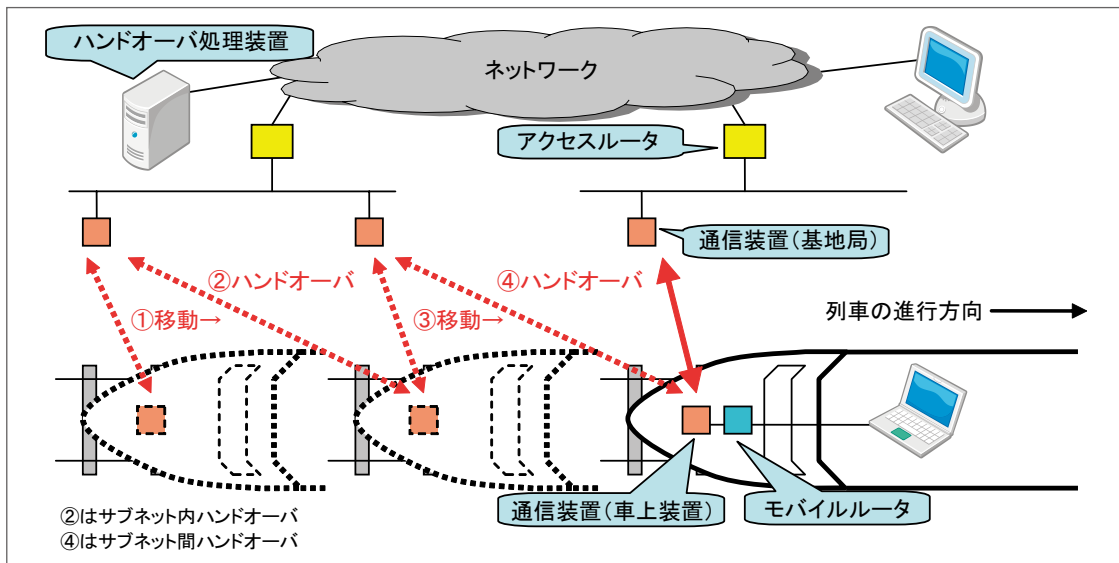


図5 ハンドオーバのイメージ

以上の処理を繰り返すことで、列車の走行中でも2つの通信装置が互いに相手を捕捉しながら通信を継続することができます。広角レンズを用いた場合は広範囲のビーコン光を検知でき、望遠レンズを用いた場合はビーコン光の方向を精密に測定できるので、この2つのセンサを併用することで、双方の長所を活かした高速・精密な相手装置の捕捉・追尾を実現しました。

基地局の高速な切り替え

本システムを鉄道環境に適用する場合、列車の走行に伴って使用する基地局を切り替える機構が必要になります。この切り替えのことをハンドオーバと呼びます。ハンドオーバの際には通信が一時的に途切れるため、ハンドオーバは高速に行われなければなりません。

本システムにおけるハンドオーバのイメージを図5に示します。鉄道沿線にネットワークを構成する場合、データの伝送量やネットワークの長さなどの面から、区間ごとにサブネットを構成して、基地局を接続するネットワークを分割しておくことが必要です。そのため本システムでは、ハンドオーバを行う2台の基地局が同一サブネット内にあるケースと、異なるサブネットにあるケースの2種類のハンドオーバが必要となります。なお、本システムは将来性を考慮し、IPv6 (Internet Protocol version 6, 従来のIPアドレスによる通信を拡張したもの) に対応した移動ネットワーク通信プロトコルを使用しているため、ハンドオーバ処理もこれに対応する必要があります。

地上・車上間のデータの流れを図6に示します。例えば地上から車上のパソコンへデータ伝送を行う場合、地上側

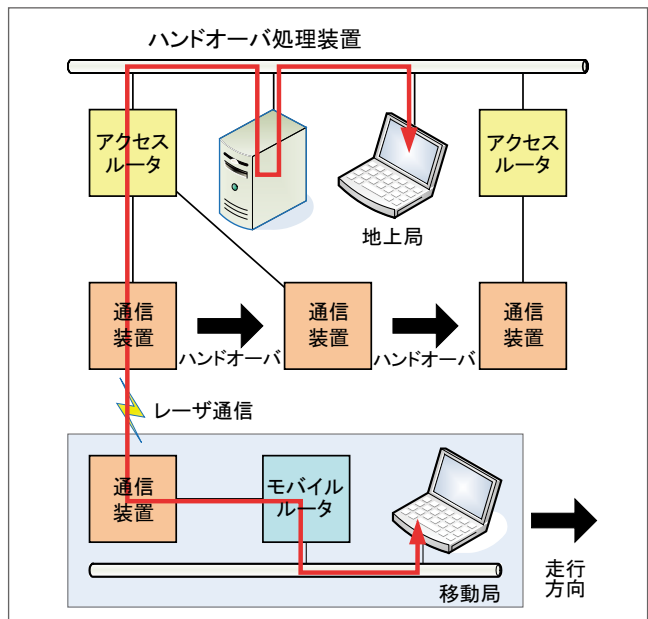


図6 地上・車上間のデータの流れ

では目的の列車のモバイルルータ (接続機器) と接続しているアクセスルータを、ハンドオーバ処理装置を用いて検索します。ハンドオーバ処理装置はモバイルルータの存在するサブネットの情報を管理しています。データは、ここで検索されたアクセスルータに送られ、アクセスルータによって目的の列車とつながっている通信装置に送られ、さらにレーザー光通信で車上側に送られ、モバイルルータによって車上のPCに届けられます。

サブネット内ハンドオーバは、両ルータが互いの間の通信経路の設定を切り替えることで成立します。サブネット間ハンドオーバの場合は、これに加えて、モバイルルータ

の新たなサブネットにおけるIPアドレスの取得，両ルータ間の通信の確立が必要になります。以下，この2種類のハンドオーバーの流れと高速化手法について述べます。

1. サブネット内ハンドオーバー

サブネット内ハンドオーバーは(1)通信装置の捕捉，(2)捕捉した旨のモバイルルータへの通知，(3)通信ルートの構成，の3つの処理から成ります。(1)は前述の捕捉・追尾機構を用いて高速に行います。(2)は，移動体通信プロトコル Mobile IPv6を用いた場合はこの通知は行われず，モバイルルータはアクセスルータが定期的に送信する制御情報を待たねばならないため，車上装置とモバイルルータの間をデータ伝送用とは別に制御情報用のケーブルで接続し，車上装置が(1)の終了をモバイルルータに通知することで高速化しました。この通知を受けたモバイルルータが，アクセスルータにルート要求を送信し，その返事を受信した時点でルートが構成されてハンドオーバーは完了します。

2. サブネット間ハンドオーバー

上記処理の終了後，サブネット情報を取得して，このハンドオーバーが2種類のどちらであるかを判定し，サブネット間ハンドオーバーであれば続けてネットワーク層ハンドオーバーと呼ばれる処理を行います。

ネットワーク層ハンドオーバーは，Mobile IPv6を利用した場合，一般に1秒以上を要します。本システムの適用環境やアプリケーションによっては，1秒程度の通信遮断であっても大きな問題となるため，以下のように本システムのネットワーク構造に特化した高速化手法を適用しました。(1)本システムではモバイルルータが接続するサブネット内のアクセスルータは常に1つであり，通信経路が複数ありえることはないので，経路選択時に複数の経路を探索するために生じる遅延を除去しました。(2)モバイルルータの数が限られている(多くても列車編成の数しか存在しない)ので，サブネット間の移動に伴いモバイルルータが新しいサブネット内での一時アドレス(一時的なIPアドレス)を取得する際に他のモバイルルータと重複するアドレスを取得しないように各モバイルルータの設定を行い，重複確認のために生じる遅延を除去しました。

本システムでのネットワーク層ハンドオーバーは，(1)モバイルルータが新しいサブネット内での一時アドレスを取得する，(2)モバイルルータの固有アドレスと取得した一時アドレスとを地上側のハンドオーバー処理装置に送る，(3)ハンドオーバー処理装置が両アドレスの対応関係を受理し，モバイルルータの存在するサブネットについての位置情報



図7 自動車を用いた性能評価試験

を更新する，という手順で行います。

性能評価試験

開発した通信システムの性能を確認するため，評価試験を行いました。まず，通信装置の静的特性を把握するため，2台の通信装置を対向させて固定し，それぞれにPCを直結して両PC間の通信のスループットを測定しました。その結果，両装置を320m離れた状態で最大923Mbpsのスループットが得られました。さらに，最長で360m離れた状態でも，スループットが最大791Mbpsに落ちるものの，通信が可能であることを確認しました。

次に，動的特性を把握するため，地上に3台の基地局を100mの間隔で直線上に設置し，車上装置を自動車に乗せて，地上・車上間のスループットを測定しました(図7)。その結果，時速100kmで走行した場合でも最大656Mbpsのスループットが得られました。ハンドオーバー時の通信安定までには1秒程度を要しました。理論的には最短0.03秒でハンドオーバーできるはずであり，原因としては自動車の振動が大きいことが考えられますが，今後性能はさらに向上するものと考えています。

おわりに

鉄道環境におけるレーザスキャン方式での通信の実現には，障害物や天候によるレーザ光の減衰，地上ネットワークの構成方法など，検討すべき点がほかにもあります。装置の小型軽量化，通信性能向上，ハンドオーバー性能の向上などと合わせ，引き続き開発・検証を進めていきます。

なお，本システムの開発は慶應義塾大学との共同研究で実施しているものです。RRR