

ロボット遠隔操縦を可能とする広域モバイル通信アーキテクチャ

栄藤 稔[†] 高畑 実[†] 林 宏樹[†] 田村隆幸[†]

[†] NTT ドコモ 総合研究所
239-8536 横須賀市光の丘 3-5
E-mail: †etoh@ieee.org

あらまし ロボット遠隔操縦のための広域通信アーキテクチャを提案する。このアーキテクチャの特徴は 3G 以降の広帯域セルラー網と WiFi のホットスポット, WiMAX のホットゾーンを組み合わせた IP 統合網を通信インフラストラクチャとして仮定し, その上で遠隔ロボット操縦に使える接続の認可・認証方式, モビリティサポート, 通信障害と QoS 変動にロバストなネットワーク接続制御方式を備えたところにある。移動ロボットが用いる通信プロトコルには, 既に標準として存在する SIP(Session Initiation Protocol), HIP(Host Identity Protocol) を用いている。筆者らは, 以上の標準プロトコルにロボット制御のためのメディア伝送機能, QoS 制御機能を集約して移動ロボットの標準通信モジュールを提供することを検討している。

キーワード ネットワークロボット, 遠隔操縦, マルチホーミング, モバイル網, SIP, HIP

Wide-Area Mobile Communication System Architecture that Enables Robot Remote Control

Minoru ETOH[†], Minoru TAKAHATA[†], Kouki HAYASHI[†], and Takayuki TAMURA[†]

[†] Research Laboratories, NTT DoCoMo
3-5 Hikarionoka, Yokosuka, 239-8536
E-mail: †etoh@ieee.org

Abstract We propose a wide-area communication system architecture that enables a long-range remote control of networked mobile robots. The features that characterize the system architecture consists of two parts: an authorization and authentication mechanism of control connection, and a network control mechanism for mobility support and multi-homing connection against communication failure and poor network QoS. As for the implementation, we use two existing standards, SIP (Session Initiation Protocol) and HIP (Host Identity Protocol) respectively. We anticipate the proposed architecture will be promoted as a standard robot remote control software module together with multimedia data transmission and QoS control parts.

Key words Networked Robot, Remote Control, Multi-homing, Mobile Network, SIP, HIP

1. はじめに

2001 年大西洋を挟んで遠隔操作による外科手術のデモンストレーションが行われた [1]。IRCAD/EITS (Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif/European Institute of TeleSurgery) 主催の Lindberg Operation と呼ばれるこの実験では, フランスのストラズブルの患者に対して 15,000km 離れたニューヨークから外科医が遠隔ロボットアームにより胆嚢除去手術を行った。ここでは 10Mbps の ATM 専用線を用意し, ロボットアームの制御に加えてモニタ画像の実時間伝送, Voice over IP (VoIP) による音

声伝送を補助情報として用いられている。この実験は通信事業者の提供する長距離通信網を用いて高度な作業が行えることを象徴的に示したことに意味がある。

この長距離遠隔通信の操作対象を, 固定された手術ロボットからより一般化された生活補助・医療福祉・災害救助・治安・農耕など幅広い分野で活躍できる移動, あるいは可搬ロボットとすれば, その産業上の価値は大きい。少子高齢化で労働人口が減少する中で, 経済成長を達成するには, 資本投下あるいは経済全体の生産性を向上させる以外にない。この中でサービス産業における労働生産性を向上させるために, 上記分野で, 通信メディアとして音声・画像の他に "遠隔操作" が提供される

ことは今後重要となってくるとされる。その際、移動ロボットの応用に専用線ではなく、より多くのアプリケーションに親和性のある IP モバイル網を用いてロボット遠隔操作通信盤を提供したい。以上が本研究の背景である。

このような背景でロボットを長距離遠隔操作・操縦^{注1)}するために解決しなければならない技術課題は多い。以下は、その課題を全て網羅するものではないが、本研究に関連があり、重要と思われる技術課題を示す。

- 遠隔制御アルゴリズム: 通信遅延下でマニピュレータを安定に制御するための遅延補償アルゴリズム [2]

- マンマシンインターフェース技術: 操作者系およびマニピュレータ系のインタフェース技術 [3]~[5] であって、力学フィードバックの伝達手法、音声・画像の環境情報伝達提示手法が技術課題となる(例: 図 1 における画像提示やフィードバック提示手法)。

- 統合ロボット通信システム: Web ブラウザと統合されたネットワークロボット操作技術や多対多の操作系の構築技術が課題となる [6](図 2 参照)。

- 遠隔制御データ伝送技術: 通信プロトコルとペイロードの設計が課題となる [3], [7], [8]。例えば、図 1 におけるロボット制御に適した RTP/UDP のトランスポート設計がある。

筆者らの提案は、統合ロボット通信システムと遠隔制御データ伝送技術に属するものであって、以下が特徴となる。

- 広域高速移動: これまでの事例が有線網 + WiFi の組み合わせによるネットワークロボットであったことに対し、屋外を含む広域・高速移動を許す移動を前提とする。これにより、応用範囲が災害救助や農耕作業にも将来拡張できる。

- IP 統合網: 広域高速移動をサポートするセルラー網^{注2)}と WiFi のホットスポット(半径数十 m)、WiMAX のホットゾーンを組み合わせた IP 統合網を通信環境として仮定する(後述)。

- SIP を用いたセッション管理: キャリアの提供する公共モバイル網において、移動ロボットを特定するための認証・課金、通信セッション管理、移動管理を統一的に行う枠組みとして Session Initiation Protocol(SIP) [9] を用いる。これは VoIP で用いられている枠組みと同一であり、広く使われているセッション管理手法である。移動ロボットで使用されるメディア種別を相互通知するために、SIP の語彙拡張が必要となる。

- マルチホーミングを用いた頑健化: 通信障害と QoS 変動にロバストなネットワーク接続制御方式を実現するために複数の通信経路を同時に保持し、通信の安定化をはかる“マルチホーミング”を実現する。本稿では Host Identity Protocol(HIP) [10] による例を示す。

我々の知る範囲では以上の高速広域移動ロボットのための通信アーキテクチャを議論した例は無い。上記機能を既存の標準プロトコルから構成し、メディア伝送機能、QoS 制御機能を集

約して移動ロボットの標準通信モジュールを広く遠隔ロボット応用に提供することが本研究の目的となる。ここでは、我々のアプローチは特定のアプリケーションを想定するものではないが、一般性を失うことなく、図 1 にある一対一操作系がモバイル網を介して接続されている形態を念頭に話を進める。本稿では、まず次章でセルラー網の現状と仮定する近未来のモバイルインターネットを説明する。そして、後続の章で以上の構想を述べ、実装状況を報告する。

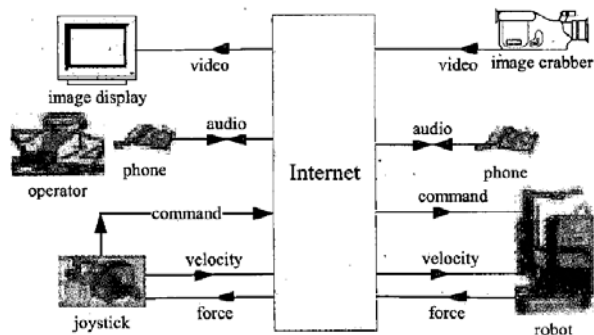


図 1 ネットワークロボットの構成例 1 [3]

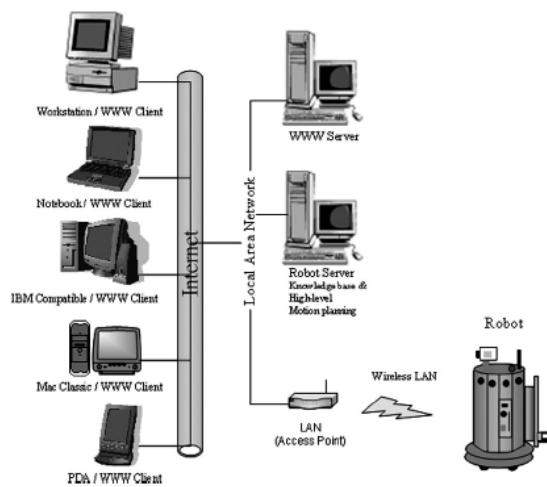


図 2 ネットワークロボットの構成例 2 [6]

2. ワイヤレスブロードバンド化と IP 統合網の出現

第 3 世代セルラーネットワーク (3G 網) の時代に入り、携帯電話の機能は飛躍的に進化を遂げた。2000 年までは携帯電話は一對の話者による電話が主な応用であったが、i-mode に代表される網のウェブ閲覧、電子メール交換サービスが携帯電話に導入されることにより、携帯電話が情報端末となった [11]。

セルラー網と WiFi/WiMAX の組み合わせ、さらなる高速無線アクセス方式の登場により、モバイル網のブロードバンド化は確実に進展するものと思われる。表 1 にセルラー網のブロードバンド化の流れと Personal Area Network(PAN) および LAN の能力を示す(表中 UWB, Super3G についてはそれぞれ

(注 1): ロボットを高速移動させる意味で操縦、一般的には操作と述べることにする。

(注 2): 本稿では、高速ハンドオーバーを保証する“セルラー網”と WiFi/WiMAX を含めた一般的な意味での“モバイル網”を区別して用いる。後者は IP 統合網でもある

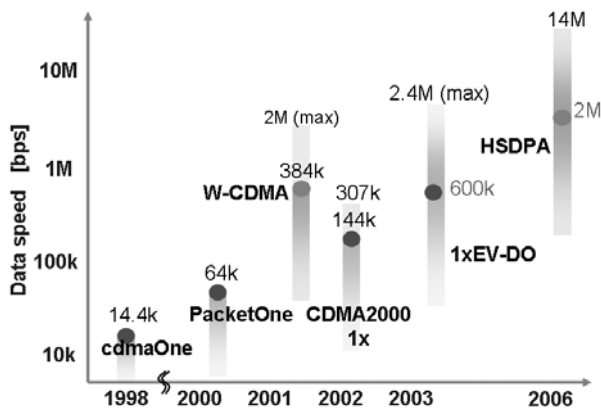


図 3 日本におけるセルラー網の速度向上

表 1 ワイヤレスアクセスの進化

	WCDMA (R99)	CDMA2000 (1xEV-DO Rev.A)	HSDPA/ HSUPA	WIMAX (802.16e)	Super3G
周波数帯域	5MHz	1.25MHz	5MHz	1.25~20MHz	5~20MHz
ピーク速度	下り	384 kbps (2Mbps)	14Mbps	~75Mbps	30~100Mbps
	上り	384 kbps	1.8Mbps	~75Mbps	

	ZigBee (802.15.4)	Bluetooth 1.1/1.2 (802.15.1)	Bluetooth 2.0 (802.15.1)	802.11 b/g/a	UMB (802.15.4a)
周波数	(668M, 915M) 2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz/5GHz	3.1G~10.6GHz
伝送速度	~250kbps	~720kbps	~2.1Mbps	~54Mbps	~480Mbps

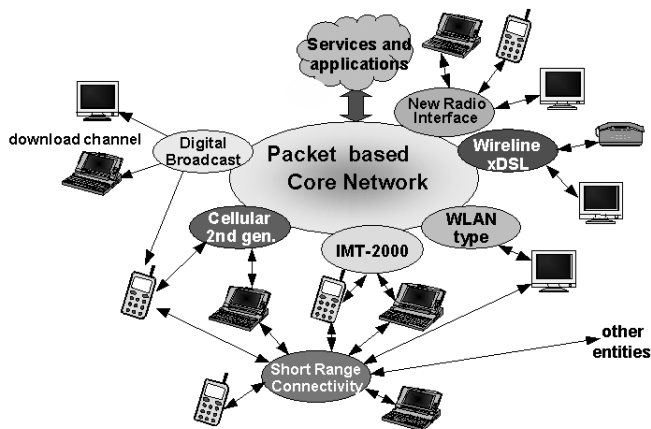


図 4 ワイヤレスアクセスの IP 統合 [12]

れ、文献 [13], [14] を参照). 伝送速度だけでなく遅延時間も重要な性能指標である. 実際のデータリンク層およびネットワーク層の packets 伝送遅延時間については実装依存の部分があるので、ここでは示していないが、Voice over IP (VoIP) が十分実現できる性能 (一方向 100msec 以下) に達していると考えてよい.

以上の無線アクセス方式の多くは 2010 年をめどに実現され、今後のネットワークは広域高速移動に対しても常時接続を保障する数百 Kbps 以上の帯域を持つ 3.5 世代セルラー網と数 Mbps 以上の帯域を持つ他の高速ワイヤレス網を組み合わせ、さらに LAN/PAN を利用して相補的なモバイル網が構成されていくことになる [12], [15] (図 4 参照). 網との親和性と単純化

された相互運用性からネットワーク層のプロトコルは IP で共通化され、音声 (電話)・データ・映像通信を 1 つの IP ネットワーク上で提供・運営する方向でネットワークが統合されていくことになる. これを本稿では IP 統合網、あるいは簡単にモバイル網と呼ぶことにする.

遠隔操作ロボットでは広帯域低遅延性能が要求されるため、WiFi や他の代替高速アクセス網の活用は必須となると考えられる. 高速ワイヤレスネットワークのセル半径は一般的に小さく、広域を移動するロボットを安定して操作することは困難と考える. 本研究の前提となっているマルチホーミング技術利用の理由はここにある. マルチホーミングでは、操作者とロボット間の通信経路を複数確保し、必要に応じて情報の送受信を行う回線を切り替えるアプローチをとる.

異種網を統合した際、課題となるのが、様々なレイヤで生じる接続切り替え (ハンドオーバ) である. これには、セルラー網での基地局の切り替え、WiFi アクセスポイントの切り替え、アクセス網の切り替え (3G ~ WiFi) 等様々である. これらをサポートする機能を通常 “モビリティサポート” と呼ぶ.

利用者が通常セルラー網で IP 接続を行い、高速移動する際、このモビリティサポートを意識することはない. 一つのネットワークに閉じている場合、IP の下位レイヤがそれをサポートしているからである. 網主導で、端末が意識することなく、モビリティサポートを行う技術には多くの議論がある. 密結合 v.s. 疎結合 [16] の議論やネットワーク主導による IP モビリティ実現 [17] などが検討が注目されている.

一方で、端末にモビリティサポート機能を分担させるアプローチがある. これにより、ネットワーク層 (IP) 以上でのモビリティサポートができれば、アクセス手段に依存することなく、ユーザがいつでもどこでも誰とでもシームレスなコミュニケーションが可能となる. 本稿でのモビリティサポートはこちらにフォーカスして議論する.

3. 移動ロボットのための通信アーキテクチャ

移動ロボットを制御するために必要な通信手順を単純化すると以下となる.

(1) ロボットの IP ネットワーク上で到達可能なアドレスを知りセッションを確立する. これは “マクロモビリティ” サポートとも呼ばれる.

(2) セッション確立後、ロボットの移動に対して、以後は、モビリティ (すなわちハンドオーバ) をサポートしたマルチホーミングのプロトコルにより通信を継続する. このモビリティサポートは、 “マイクロモビリティ” あるいは “エッジモビリティ” サポートとも言われる.

最初のステップを実現するために SIP を用いる. 後者のモビリティをサポートするプロトコルとして、本稿では HIP の例を述べる. HIP の使用を前提として SIP の動作を説明するために、順序は逆になるが、はじめに HIP によるモビリティを伴うマルチホーミング機能を説明する.

3.1 マルチホーミング

WiFi と 3 G 網によるマルチホーミングを適用すると仮定し、

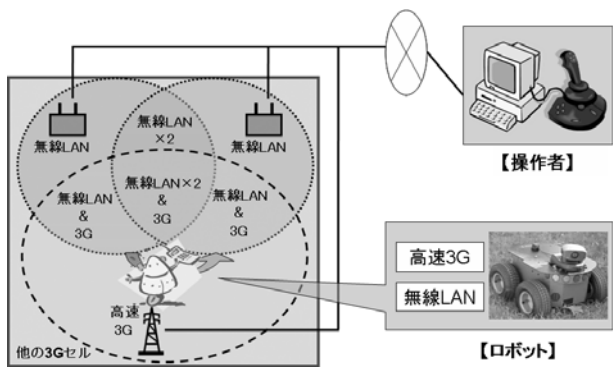


図5 WiFi-3G マルチホーミングの例

遠隔操作ロボットの移動にともなって接続し得る通信回線が変化する場合の典型例を図5に示す。マルチホーミング技術を適用することで、冗長性確保による通信の安定性向上のみならず、異種ネットワークを含む接続先の候補を増やし、遠隔操作ロボットの行動範囲を広げることにも可能と考える。マルチホーミングを実現するためには、いくつかの実装方法がある。アプリケーションでの実装[18]、SCTP[19]による実装、HIP[10]による実装、Mobile IP[20]による実装が考えられる。これら4つの方法について特徴を以下に述べる。

- アプリケーションでの実装: アプリケーションでIPアドレスを管理し、マルチホーミングを実現する方法。下位層の構成によらず、実現できるため、自由度は高い一方で、実装環境と応用に構成が依存する。

- SCTP (Stream Control Transmission Protocol): OSI 参照モデルのトランスポートレイヤでの実装方法。SCTPはストリームコントロール機能を有しているため、同じSCTPアソシエーションの中であれば、複数のデータストリームを並行して独立に通信することが可能である。また、データストリームの優先度は任意に変更可能であるため、ネットワークの状況やロボットの用途などに応じて、データの優先度付けを行って各データストリームを送る場合に有効な機能だと考えられる。しかし、そもそもTCPの延長であり、再送制御や輻輳制御の仕組みを備えているため、厳しいリアルタイム性を要求されるアプリケーションには適していない。また、モビリティを標準でサポートしていないため、遠隔操作ロボットのように移動する度に異なるネットワークへ再接続する場合には工夫が必要である。

- HIP (Host Identity Protocol): トランスポート層とネットワーク層の間での実装方法。Rendezvous Serverをネットワーク上に配置することで、端末が接続しているネットワークが変更されるたびに、逐次IPアドレスのアップデートを行い、モビリティをサポートする。また、IPv4/IPv6両者のネットワークに接続可能であり、両者間のハンドオーバも可能である。セッション確立後は、通信はIPsec[21]で行われるため、秘匿性に優れている。一方で、HIPが実装されているアプリケーション間でしか通信を行えない、HIP Rendezvous Serverが必要であることから、そのための系全体のHIPへのマイグレーションが容易ではない。

- MIP (Mobile IP): ネットワーク層での実装方法。MIPにはIPv4とIPv6、それぞれのネットワーク用に規格があり、MIPのIPv6用の規格では標準でマルチホーミング機能をサポートしている。MIPはHome Agent(HA)と呼ばれるサーバをネットワーク上に持ち、端末が移動して接続しているネットワークが変更になった場合にも、HAにアドレスを登録しなおすことでモビリティをサポートする。MIPを利用するにはネットワークがMIPをサポートしていることが前提となる。現在主流のIPv4ネットワークでは性能が限定的である。IPv4用のMIPとIPv6のMIPの相互接続性を保つ仕組みが必要となる。

以上から、移動ロボットには通信のリアルタイム性が求められること、ロボット遠隔操作に必要なプロトコルスタック標準を定義することは有用と考えられることから、HIPおよびMIPの利用が有望な候補と考えている。今回は、IPsecでの通信が標準で、モビリティをサポートしており、かつIPv4、IPv6の違いを吸収できる先進性からHIPによる実現を考える。

HIPはIETF(Internet Engineering Task Force)のInternet-Draftで規定されている通信プロトコルで、マルチホーミングによるモビリティとIPsecによるセキュリティを確保した通信が可能なることを特徴としている。HIPではIPアドレスではなく、HI(Host Identifier)と呼ばれる識別子によって各端末を識別している。アプリケーションはこのHIを用いて通信を行う。IPアドレスにより、端末の識別とロケーションの管理を同時に行う他の通信プロトコルと異なり、HIPではHIにより端末を識別し、IPアドレスによりロケーションを管理する。そのため遠隔操作ロボットの移動に伴うIPアドレス変更の場合やIPアドレスが複数ある場合でもHIは一定であり、アプリケーションは常にHIだけを認識しておけば良い。なお、通信を行う際、HIを128bitにハッシュしたHIT(Host Identity Tag)と呼ばれるbit列を用いて送信先を指定している。HITはIPv6と同じアドレス形式をとる。HIPにおけるIPsecではESP(Encapsulated Security Payload)方式で暗号化が行われる。HI自体が公開鍵となっており、通信開始時にセッションを確立する中でHIを交換し、互いの公開鍵を取得する。その鍵を用いて暗号化したデータを送受信する。暗号化通信により、パケットの中身を第三者に盗聴、改竄される恐れを軽減できるため、ロボットの不正操作を防止可能となり、遠隔操作の安全性が向上する。

3.2 セッション管理

HIPとSIPを用いて通信セッションを確立するための手順を説明する。まず、モバイルホストであるロボット(以下、ホストRobot)は予め自らのIPアドレス及びHIをSIP Serverに登録しておく。また、ホストRobotが用いるモバイル網のハンドオーバに伴うIPアドレスの更新時には逐次SIP Serverに通知して登録を更新するものとする。

その後は、以下に述べるシーケンスに基づく(図6参照)。

(1) INVITE: 操作者側のホストMasterはSIP Serverに対して、SIP INVITEメッセージを送信する。主な情報は、接続先のロボットを示すSIP URI(Uniform Resource Identifier)である。SIP URIはサービスのIDを示し、ここでは接続先のHIを含む。

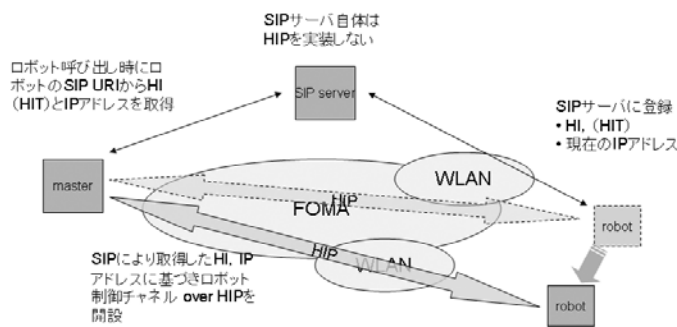


図 6 SIP によるセッション管理

(2) OK レスポンス: SIP Server は、ホスト Robot とホスト Master を中継する機能を持ち、ホスト Robot の HIT 及び IP アドレスを OK メッセージにより、ホスト Master に返す。

(3) メディアネゴシエーション (オプション): 必要に応じてメディア情報を、INVITE メッセージや OK メッセージのボディの中に SDP (Session Description Protocol) で記述して、やり取りすることも可能である。メディア情報には、ロボットに搭載するカメラ映像のコデックの種類、フレームレートの値、データ送受信に用いるトランスポートプロトコルの種類などがある。

(4) HIP アソシエーション確立: ホスト Master は、取得したホスト Robot の IP アドレスに対して、HIP Initiator パケットを送信することで HIP アソシエーションを開始する。その後は、パズルによる DoS アタック防止、Diffie-Hellman による公開鍵交換、データトランスポート (IPsec ESP) のネゴシエーションにより、HIP アソシエーションを確立する。

なお、SIP による HIP の扱いは、IP アドレスに加えて Host Identity の受け渡しを考慮する必要がある^(注3)。

4. 課題

ここまで、ネットワークの現状と遠隔操作ロボットを実現するための通信アーキテクチャの構想を述べてきたが、まだ多くの課題が残っている。3つのトピックを選んで議論する。

4.1 モビリティサポートの最適性について

本稿では、SIP と HIP の組み合わせを最初のトライアルとして実装するアプローチを述べた。同様の議論は他のアプローチ [23], [24] にも見られる。一方で、SIP-HIP に替わるアプローチとして SIP-MIP の例 [25], [26] がある。

位置登録 (すなわち前述のマクロモビリティサポート)、セッションの起動・制御機能を SIP で実現することは、ほぼ問題ないであろう。課題は SIP との組み合わせとなる動的なマルチホーミング・ハンドオーバーサポートの機能を効率よく実現できるプロトコルの選定である。現在のところ SIP-HIP と SIP-MIP のアプローチに大きな差は無いと考えている。今後予見されるモバイル網との親和性の問題を見極めて評価していきたい。その意味で経済性を考慮しなければならないため厄介な問題で

あるが、実装負荷、既存アプリケーション、システムとの親和性、ハンドオーバー時の瞬断特性、遅延を評価していきたい。

4.2 実装、QoS 制御について

図 7 に現在実装中のロボット遠隔制御用プロトコルスタックを示す。

ロボットと操作者の間で送受されるデータについてロボットが撮影・録音する実時間ビデオ、音声に加えて力学系操作とそのフィードバックデータ、さらに近接センサ、ロータリエンコーダ、バッテリー残量などの各種センサ情報を想定している。その際、許容される遅延時間、必要となる帯域、ロボットの状況に応じてデータ送受の優先制御、すなわち QoS 制御が必要となるが、それを実装するためのアダプテーションレイヤ (図中 QoS モジュール) の実装について議論している研究事例はないと思われる。モバイルマルチメディアの世界では、画像と音声のデータをどのように分割し (再) 送受、誤り訂正するかというアダプテーションレイヤ [27] の最適化方法論がほぼ確立している。一方でマルチメディアデータと混在する力学操作コマンドとフィードバックのネットワークアダプテーションについては、方法論にまで昇華して議論されていないのが現状である。これまで、高速固定 IP 回線 + WiFi 接続であれば問題とならなかった課題が見えてくると思われる。

4.3 広域モバイル網での遅延

前節で、ロボット遠隔操作のための QoS 制御の方法論確立が研究課題であると述べたが、そもそも広域モバイル網がどれだけ進歩するかという見極め、アーキテクチャ論も重要となる。帯域の比較から固定網に比べて数十 msec の遅延とデータリンク層の再送処理 [28] によりジッターが増えるのは確実である。

“操作する”メディアの QoS 要件は画像や音声よりも厳しい。セルラー網の packets 接続では、有線網のそれと比べて遅延時間が長いという欠点があり、これまで力覚・触覚フィードバックがメディアとして取り上げられてこなかった。ここで、遠隔操縦ロボットを議論している一番の理由は、ブロードバンドモバイル網によって克服される新しいフロンティアがここにあるからである。音声メディアの主観品質は遅延時間が一方 150msec を超え始めると急激に落ちる [29]。これが音声メディアに許される遅延の限界といえる。一方で、仮想空間の物体操作に用いる触覚情報の許容遅延は約 30ms 程度との報告がある [30]。さらに、人間の高度な把持機能を現実の遠隔ロボッ

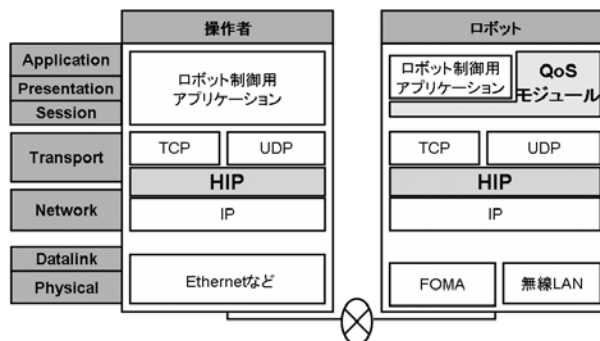


図 7 HIP によるロボット制御プロトコルスタック

(注3): 拡張の議論 [22] があるが、ここではメッセージに付帯させる

トに実装しようとするれば、触覚センサは広い周波数領域の触覚情報を検出すると共に、それを再現する触覚ディスプレイや高速なフィードバック制御が求められる。例えば、手術用鉗子を遠隔で操作するシステム[31]では、広い帯域を再現可能なニアモータ、位置情報から高精度な反力推定を行うロバスト制御理論、制御周期 10kHz の高速駆動により鋭敏な触覚フィードバックを実現している。これをより遅延の大きなモバイル網で行うことが究極の目標となる。

5. おわりに

ブロードバンドモバイル網の進化に相まってネットワークロボットを広域高速移動を前提として操作することが可能になりつつある。遠隔操作によるロボットから触覚情報を得て、あたかも自らの手の延長としてそのロボットを操作できる未来のコミュニケーションメディアが実現できれば、生活・医療福祉の有効な手段になると期待している。以上は、ブロードバンドモバイル網によりはじめて達成できる応用である。

本稿では、そのようなネットワークロボット応用を支援するための汎用通信アーキテクチャを提案し、その課題を述べた。現在 3G セルラー網と WiFi のマルチホーミングを前提とした実験系を実装中である。以後のレポートでは、ここで議論した課題をさらに検討し、実験結果を報告したい。

文 献

- [1] J. Marescaux, J. Leroy, M. Gagner, F. Rubino, D. Mutter, M. Vix, S. E. Butner and M. K. Smith: "Transatlantic robot-assisted telesurgery", *Nature*, 413, pp. 379–380 (2001).
- [2] F. P. Hokayem and W. M. Spong: "Bilateral teleoperation: An historical survey", *Automatica* (2005). to appear.
- [3] X. Xie, Z. Du and L. Sun: "The design and implementation of real-time internet-based telerobotics", *Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, Vol. 2, pp. 815–819 (2003).
- [4] 亀川 哲志, 松野 文俊: "ヘビ型レスキューロボット KOHGA", *画像ラボ*, 16, 7, pp. 55–60 (2005).
- [5] V. Kumar, G. Bekey and A. Sanderson: "Assessment of International Research and Development in Robotics", chapter 7. *Networked Robots*, <http://www.wtec.org/robotics/> (2006).
- [6] R. Luo, K. Su, S. Shen and K. Tsai: "Networked intelligent robots through the internet: issues and opportunities", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, pp. 371–382 (2003).
- [7] P. Li, W. Lu and Z. Sun: "Transport layer protocol reconfiguration for network-based robot control system", *Proc. IEEE Networking, Sensing and Control*, pp. 1049–1053 (2005).
- [8] L. Peter, Xiaoping, M.-H. Meng, P. Liu and S. Yang: "An end-to-end transmission architecture for the remote control of robots over ip networks", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10, pp. 560–570 (2005).
- [9] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley and E. Schooler: "IETF RFC 3261", <http://tools.ietf.org/html/3261> (2002).
- [10] R. Moskowitz, P. Nikander, P. Jokela and T. Henderson: "Host identity protocol", <http://www.ietf.org/html.charters/hip-charter.html> (2006).
- [11] M. Etoh and T. Yoshimura: "Wireless video applications in 3G and beyond", *IEEE Wireless Communications*, 12, 4, pp. 66–72 (2005).
- [12] ITU-R WORKING PARTY 8F: "Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000" (2003). Recommendation ITU-R M.1645.
- [13] J. Kim, S. Lee, Y. Jeon and S. Choi: "Residential HDTV distribution system using UWB and IEEE1394", *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 52, 1, pp. 116–121 (2006).
- [14] "Requirements for evolved UTRA (E-UTRA) and evolved UTRAN (E-UTRAN)", 3GPP TR 25.913 (2005).
- [15] M. Etoh Ed.: "Next Generation Mobile Systems: 3G & Beyond", Wiley (2005). ISBN: 0-470-09151-7.
- [16] M. Buddhikot, G. Chandranmenon, S. Han, Y.-W. Lee, S. Miller and L. Salgarelli: "Design and implementation of a WLAN/cdma2000 interworking architecture", *IEEE Communications Magazine*, 41, 11, pp. 90–100 (2003).
- [17] P. Roberts and J. Kempf: "Network-based localized mobility management", <http://www.ietf.org/html.charters/netlmm-charter.html>.
- [18] A. Habib, N. Christin and J. Chuang: "Taking advantage of multihoming with session layer striping", *Proceedings of the 9th IEEE Global Internet Symposium*, pp. 102–107 (2006).
- [19] R. Stewart, M. Ramalho, Q. Xie, M. Tuexen and P. Conrad: "Stream control transmission protocol (sctp) partial reliability extension", *IETF RFC3758* (2005).
- [20] 古閑 宏幸, 原口 浩朗, 飯田 勝吉, 尾家祐二: "通信品質を考慮したマルチホーム通信メディア最適化機構の設計と実装", *通信技研*, 105, 627, pp. 173–176 (2006).
- [21] S. Kent and R. Atkinson: "Security architecture for the internet protocol", *IETF RFC2401* (1998).
- [22] H. Tschofenig, J. Ott, H. Schulzrinne, T. Henderson and G. Camarillo: "Interaction between SIP and HIP", *IETF Internet-Draft* (2006). <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-tschofenig-hiprg-host-identities-03.txt>.
- [23] T. Henderson: "Can SIP use HIP?", *Proc. Workshop on HIP and Related Architectures* (2004). http://hiprg.piuha.net/workshop/henderson_sip_hip.pdf.
- [24] J. So, W. Jidong and D. Jones: "SIP mobility management hybrid SIP-HIP scheme", *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*, 2005, pp. 226–230 (2005).
- [25] J.-W. Jung, R. Mudumbai, D. Montgomery and K. Hyun-Kook: "Performance evaluation of two layered mobility management using mobile ip and session initiation protocol", *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, pp. 1190–1194 (2003).
- [26] N. Sattari, P. Pangalos and H. Aghvami: "Seamless handover between wlan and umts", *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th*, Vol. 5, pp. 3035–3038 (2004).
- [27] T. Stockhammer, H. Jenkac and C. Weiss: "Feedback and error protection strategies for wireless progressive video transmission", *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 12, 6, pp. 465–482 (2002).
- [28] M. Etoh and T. Yoshimura: "Advances in wireless video delivery", *Proceedings of the IEEE*, 93, 1, pp. 111–122 (2005).
- [29] "Application of the e-model: A planning guide", *ITU-T Recommendation G.108* (1999).
- [30] 石橋 豊: "触覚メディア通信のための適応型サービス品質制御方式の研究", *電気通信普及財団研究調査報告書*, No. 20, pp. 575–585 (2005).
- [31] 名取賢二, 辻俊明, 矢向高弘, 大西公平: "ネットワークを介したバイラテラル遠隔制御", *電気学会論文誌 D*, 126, 2, pp. 161–167 (2006).