

# Technology Reports

ユーザインタフェース研究特集 — ケータイの新たなカタチ —

## リアルサービスの開拓に向けた触力覚メディア

多様化するユーザーニーズに応える新たなサービスの創出を目指した取組みとして、電話（聴覚メディア）、映像サービス（視覚メディア）に続く第3のコミュニケーションメディアとしての触力覚メディアを解説する。新たな表現手法としての「触れるメディア」と産業の生産性向上に向けた「操作するメディア」は、共に進化することで、現在多くの分野で人手に頼っているリアルサービスの開拓やモバイル通信との融合サービスが可能になる。

先進技術研究所

たかはた みのもる たむら たかゆき  
高畑 実 田村 隆幸  
はやし こうき十  
林 宏樹

### 1. まえがき

音声、メールや映像など、さまざまなメディアを用いたサービスが発展する中、さらに多様化が進むユーザーニーズに応える魅力的なサービスの創出が期待されている。そこで、従来の電話（聴覚メディア）や映像サービス（視覚メディア）の利用に加え、第3のメディアとして触力覚の利用を可能とすることで、新たなサービス分野への貢献を目指している。特に人と人をつなぐ役割を果たすコミュニケーションメディアによって、より豊かな生活を実現しようとする取組みは重要である。しかし、コミュニケーションメディアとしての触力覚は、十分に開拓されていない領域の1つであり、技術は発展途上にある。コミュニケーション

に有効な触力覚メディアを実現するには、デバイス要素のほか、通信特性を考慮した手法の開発が重要であり、これまで課題解決に向けた技術提案や特性の見極めを進めてきた。触力覚と関係が深い技術項目として、触覚ディスプレイ・センサ、ロボット応用技術、堅牢性を高めた通信技術、無人化施工の高度化、バイラテラル制御が挙げられる。

本稿では、触力覚メディアを「触れるメディア」と「操作するメディア」に分解し、それぞれに対応する技術項目について、これまでのドコモの取組みを中心に解説する。

### 2. 触れるメディア

「触れるメディア」と「操作するメディア」は共に進化しながら、デバイスのブレイクスルーと合わせて、将来

の超臨場感コミュニケーション<sup>\*1</sup>へ発展できると考える（図1）。

「触れるメディア」は、新たなユーザーインタフェース、表現手法としての可能性の追求と位置付けられ、計測し伝達する感覚のきめ細やかさが重要である。物体に触れて確かめる、あるいは物体を持って何かを行う、といった動作の際、触覚は重要な役割を果たす。その触覚は皮膚感覚と深部感覚に分けられる。前者は皮膚表面下の受容器によって生じるとされ、物体表面の凹凸や冷温感といった感覚にかかわる。後者は、筋や腱といった皮膚表面より深いところにある受容器によって生じるとされ、物体の重さや硬さといった感覚にかかわる。単なる触覚あるいは触感などの言葉からは皮膚感覚が主に想起されやすいので、本稿では深部

† 現在、移動機開発部

\*1 超臨場感コミュニケーション：音や映像の高精細化や多次元化に加えて、触覚のような人のもつ五感を有効に活用できる技術などを実現することで、遠く離れた場所でも自然な共有感覚を生み、高い臨場感を得られるコミュニケーションの概念。

感覚の重要性をかんがみて触力覚を用いる。

## 2.1 触覚ディスプレイ・センサ

近年、タッチパネルなどのセンサや各種デバイスの進展がめざましく、また、活発な研究が行われている[1]。タッチパネル式の携帯機器の普及は、最も利用者に近い存在であるモバイル機器の新たなデバイスが、使い方次第で大きな魅力を感じさせられることを示した。また、従来から利用されているデバイスの組み合わせも、依然有望と考えられ、タッチパネルに振動を付加した例では、特に騒音下での操作時間短縮効果を示した[2]。

振動子のように外部から機械的な刺激そのものを与えず、受容器に接続されている神経に対する電気刺激により、触覚の呈示を試みる電気触覚ディスプレイがある(写真1)[3]。写真1のデバイスでは、アルファベット文字の呈示に成功しており、機

械的な駆動部が不要なため、モバイル環境との親和性が高いと考えられるが、呈示可能な感覚の種類や解像度、安定性などの課題があった。

次に、コミュニケーションメディアとしての触覚ディスプレイ・センサを考察する。低遅延の要求が強い通信サービスの1つに、リアルタイムのオンラインゲームがあり、3GPPにおいては、端末間の片道遅延は75ms未満が望ましいとされている[4]。一方、通信を介してバーチャルな物体の硬さを知覚できる5指力覚ディスプレイ(写真2)を筑波大学岩田・矢野研究室と共同で開発して検証を行ったところ、オンラインゲームの先の値より、小さな通信遅延に対しても影響を受けることが示された[5]。なお、バーチャルな環境に限れば通信遅延の影響を回避する予測技術[6]の適用が効果的であるが、予測困難な実世界の対象に触れた感覚を伝送するには、なるべく低遅延のネットワークが望まれる。

リアリティのある触力覚をモバイ

ルで再現するデバイスの実現はまだまだ困難だが、地道な要素開発が求められる分野である。

## 2.2 ロボット応用技術

実体に触れられるロボットを応用することで、直感的に理解が容易なメディアが実現可能になると考えられる。ドコモでは、新たな概念のコミュニケーション研究の一環として、無線端末の一種であるロボットそのものをコミュニケーションメディアとしてとらえる、分身インタフェースの研究を行ってきた(写真3)。写真3の実験は、遠隔のロボットを自らの分身として用い、人の身振り

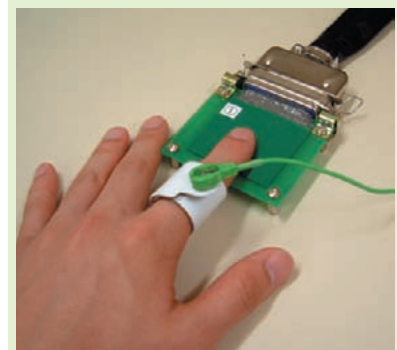


写真1 電気触覚ディスプレイ

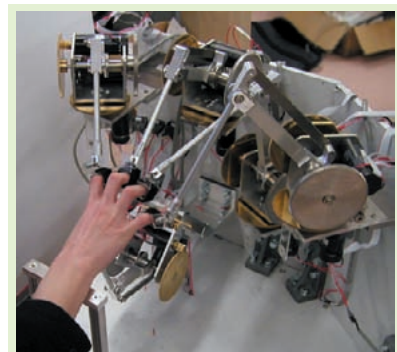


写真2 5指力覚ディスプレイ

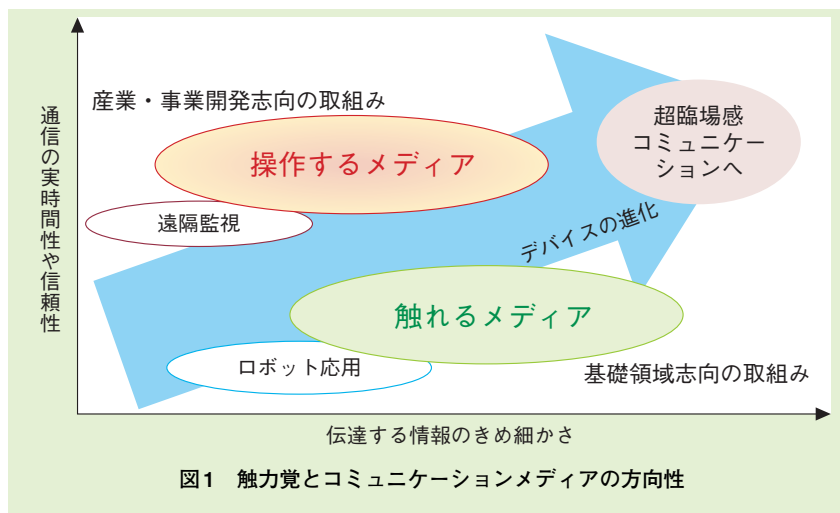


図1 触力覚とコミュニケーションメディアの方向性

手振りによる実体的な動作を、通信経路で遠方のロボットの動作にてリアルタイムで再現し、存在感そのものを伝える試みである[7]。また、バーチャルヒューマノイドは、東北大学内山・近野研究室と共同で開発した軽量高速アームを含むロボットに対して、ヘッドマウントディスプレイ（HMD：Head Mounted Display）を用いてCG映像を重ね合わせる形で表示し、いわば手で触れられる映像を実現するものである。これを、物理的なインタラクションが行える表現手法として提案し、そのエンターテインメント性をアンケートにより分析した[8]。非言語のコミュニケーションは、場面によって重要な役割を果たすと思われ、ロボットが普及する将来には、有用なユーザインタフェースの形態の1つと考えられる。

### 3. 操作するメディア

「操作するメディア」は、生産性向上と安心・安全の両立および新産業開拓に向けた挑戦である。ここで各種年表などを参考に、通信コスト



写真3 分身インタフェースの実験

のあゆみを図2に示す。電気通信の発明以前の飛脚のような通信手段は、実世界の物を運ぶリアルサービスとみることができ、高価であった。しかし、今では通信のあらゆる機能が極めて効率化され、さまざまなサービスを誰もが安価に利用できる。通信システムの構築と運用には大変な手間がかかるものの、個々の通信については人の手を直接介さずに膨大な情報のやりとりが可能であり、サービスを受ける側と提供する側の仕事のタイミングや場所が異なる、いわばバーチャルサービスが現出している。これは、時間と空間の両方で仕事の集約を可能にした技術革新と考えられる。

一方、農林水産、建設土木、医療介護、教育など、依然人手に頼るリアルサービスがあり、通信との融合により、生産性向上が見込める分野が少なからずあると思われる。ただしその際には、コスト削減と提供品質の確保のため、生産性向上と安心・安全の両立が求められる。その

ため、分野ごとに、遠隔監視・支援などの機械による自動化が適した仕事と、遠隔操作などの人と機械との協調が必要な仕事がある。特に後者で、通信による集約効果と安全性を確保しながら高度な作業を行う場合は、通信の特性を考慮した高い信頼性とリアルタイム性の確保が重要であり、本稿で紹介する「操作するメディア」は、その一手段になり得ると考える。

### 3.1 堅牢性を高める通信技術

人の周辺知覚や動作実現は巧みな神経系の働きによる。外部と関係する体性神経系は、中枢から筋肉などへ向かう遠心性神経と、末梢の感覚器から中枢へ向かう求心性神経があるが、遠隔操作では遠心性の運動指令に比べ、求心性の情報膨大である。求心性神経は遠隔操作される遠端側において通信のアップリンクに相当するため、その意味でダウンリンクが主体である現状のモバイル網

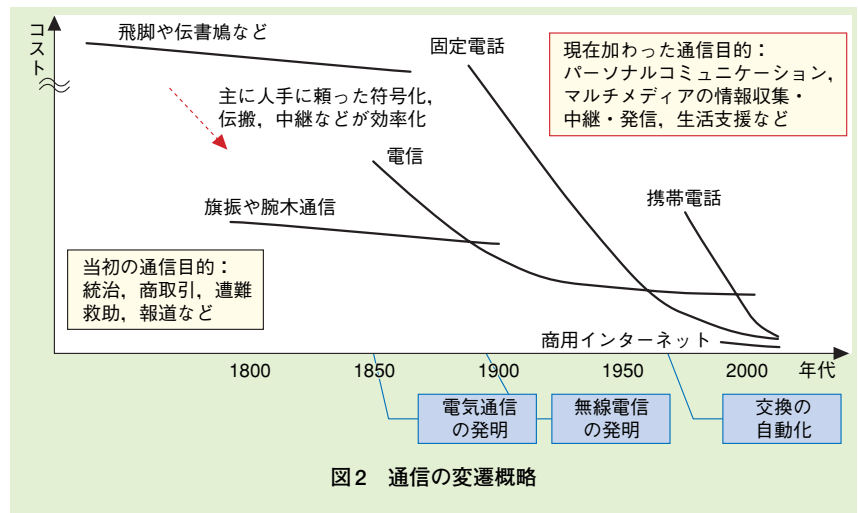


図2 通信の変遷概略



は、必ずしも遠隔操作に最適化されてはいないが、広い範囲をカバー可能である。そこで、さまざまな通信経路を組み合わせる手法による信頼性確保が重要となる。また、人が情報を参照する場合であれば、先のオンラインゲームなどの一部の例を除き、わずかな情報の伝送遅れが問題となることは少ないが、人と機械との協調作業や機械が情報を用いる場合には問題があるため、切替え時間などの短縮も重要である。これらの課題を解決すべく、複数の通信経路を選択的に利用可能な通信手法を開発してきた[9][10]。ただし、用途に応じた構成が必要であり、今後のネットワークやソフトウェアの進化に伴い、使いやすい実装が求められる。

### 3.2 無人化施工の高度化

無線通信を用いた遠隔操作の実用例の1つに無人化施工がある。危険な場所や立入り禁止区域の工事を、区域外の安全な場所から建設機械を遠隔操作して行う方式で、すでに多数の施工例がある。しかし、特定小電力無線<sup>\*2</sup>や簡易無線<sup>\*3</sup>など、利用できる無線リソース<sup>\*4</sup>が極めて限られた業務用無線の利用が主流となっており、通信距離や通信容量の制約が大きかった。そこで、これらの問題に対応するため、株式会社フジヤやキャタピラジャパン株式会社と共同で、HSDPA (High Speed Down-link Packet Access) を経由した無人化施工実験を実施した (図3)。

また、通信遅延や通信周期の短縮化が施工効率に与える影響を分析し

た[11]。施工中はほぼ常時接続の状態になるため、同時に通信する台数や現場ごとの通信環境は要検討であるが、既存の無人化施工システムよりも通信周期を短縮化した場合には、施工効率を向上可能であることを示した。

操作コマンドをやり取りするFOMA端末の接続先は、関東地方のサーバであり、掘削施工の試験現場となった雲仙普賢岳との間で、往復1,000kmを超える長距離のIPパケットの伝送を組み合わせた接続を行ったが、FOMA網による遠隔操作が可能であることが実証できた。さらに、建設機械からの情報に基づき、操作ユニットに対して簡易な触覚フィードバックを加えることにより、GUI<sup>\*5</sup>に限らず、現場の熟練オペレータが大型建設機械を遠隔操作する場合であっても、操作性の向上が可能となる一例を示した[12]。日本の地理的特性と総合力を活かせる分野であり、実績とノウハウの蓄積が望まれる。

### 3.3 バイラテラル制御

遠隔操作において、遠く離れたロボットがどのように環境に触ったかの感触 (触力覚情報) をオペレータに伝達することにより、さらに安全で効率的かつ自然な操作が実現できる。また、これまで難しかった作業も可能になると考えられる。ただし、従来の音や映像の通信は、情報の取得と再生とがお互いに直接影響を与えないが、触力覚の通信は本質的に双方向 (バイラテラル) であり、作用反作用の法則を遠隔どうしで成立させることに特徴がある。このため、特に鋭敏な触力覚情報を伝送しようとする場合には、リアルタイムの情報を非常にきめ細かく送受し合うことが必要であるが、無線通信経路の場合には問題が生じる。先に述べた堅牢性を高める通信により、回線を維持できる場合であっても、無線通信では不可避なチャネル変動や誤り回復のための再送が発生し、アプリケーションからは通信遅延のゆらぎ (ジッタ) として観測さ

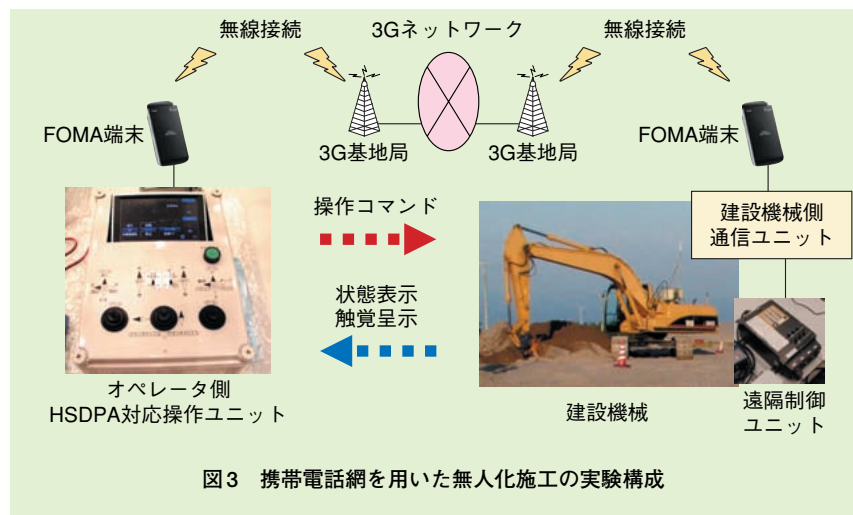


図3 携帯電話網を用いた無人化施工の実験構成

\*2 特定小電力無線：無線局免許が不要で誰でも使える無線。空中線電力は0.01W以下で到達距離が数百メートルと短い。遠隔操作の周波数帯は429MHz帯で40ch利用できるが、チャンネルと距離が近いと混信が問題となるため、多くの台数を運

用する場合にはうまく周波数を選択する必要がある。

\*3 簡易無線：映像送信や無線中継に利用される無線。50GHz帯は広帯域で、到達距離は数キロメートルにおよぶものの、指向性が非常に強く、移動する場合には常

にアンテナを追尾する必要があり、重機などの遮へい物で途絶する場合がある。

\*4 無線リソース：ここでは、ユーザーごとに使うことができる周波数帯域幅や送信電力など。

れる。その結果、触力覚として余計な外乱が加わってしまう。予測可能な外乱は不安定さの原因となるが、そのような状況であっても、通信状況に応じて安定性を保つ技術を慶應義塾大学 大西研究室と共同で研究・検証してきた[13]。位置と力の制御は基本的に両立しない（位置を合わせようとする操作性が悪くなる。一方、力を合わせると位置が定まりにくくなる）ため、位置と力の共通次元である加速度を基にした制御を行うとともに、機械的摩擦や通信に起因する外乱を各々補償して安定化している。さらに鋭敏な触力覚を伝送可能にするため、動作部の軽量化と処理の高速化を図った。開発した実験システムを図4に示す。操作側のマスタ装置と遠隔側のスレーブ装置は同様の構成であり、各制御装置はダイレクトドライブ<sup>\*6</sup>のDCモーターを駆動し、アームを動作させる。アームの動作は、光学式

ロータリーエンコーダ<sup>\*7</sup>を用いて測定している。アーム先端部でおおよそ1~2 $\mu$ mの変位が分かる精密な位置情報が得られる。また、25~100 $\mu$ sごとのタイミングで、動作部の慣性モーメントを用いて広帯域の力情報を計算し、制御を行う。狭帯域もしくは高価な力センサを用いることなく、位置情報と力情報とを双方向で通信することで、触力覚の伝送を可能にしている。

### 3.4 展示と検証

2009年に「触力覚メディア」と題して2種類のデモシステムを出展した。1つはEthernetでマスタ装置とスレーブ装置との間を接続したシステムで、柔らかなゴムボールや人の手を押したときの感覚、堅いガラス瓶をたたいたりアームでなぞったりする感覚、そして物体のつつるあるいはざらざらした感覚を伝送するものであり、触力覚とはどういうもの

なのか訴求するものであった。もう1つは、ネットワークエミュレータにより無線環境を疑似したシステムで、遠隔でギターに触れたときに振動する感覚を伝えるものであり、通信を介して触力覚を伝送することの理解を促すものであった。合計1,000名以上の来場者に体感いただき、多様な感覚の触力覚の通信を実証して、将来の可能性の一端を理解してもらえたと考える。

なお、ネットワークエミュレータのほか、実際の無線LANやHSDPAを経由した触力覚の伝送を確認しているが、通信遅延やジッタが大きいくほど感覚の劣化は避けられなかった。また、布などの対象物体は伝送が難しく、人が感じている非常に幅広い品質の触力覚の伝送には遠いのが現状である。このほか、実用化には小型化や安全対策、多自由度化などの課題があるが、さらなる検討により、新たなコミュニケーションメ

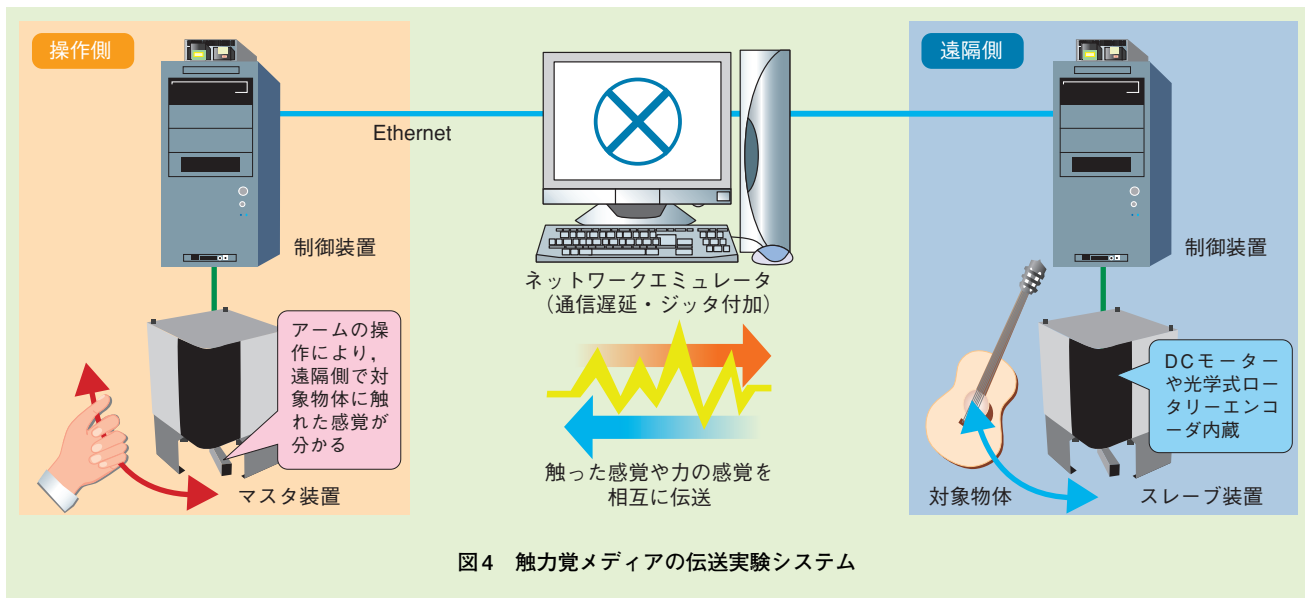


図4 触力覚メディアの伝送実験システム

\*5 GUI：表示にコンピュータで生成したグラフィックを用い、ユーザの指示はポインティングデバイスによる直感的操作を行えるようにしたもので、的確なポインティングのため、さまざまに工夫されたデバイスが用いられている。

\*6 ダイレクトドライブ：ギアやベルトなどの機構を介さずにモーター軸の出力を直接伝える方式。遊びが少なく、回転方向の変化に対しても精密な制御が可能。

\*7 光学式ロータリーエンコーダ：アナログの機械的な回転を、電気的なパルス（デ

ジタルの符号化列）に変換して出力するロータリーエンコーダで、光学素子と回転するディスクとを用いて構成される。

ディアにかかわる有用な知見蓄積が可能と考える。

## 4. あとがき

本稿では、コミュニケーションメディアとしての触力覚メディアが切り開く今後の可能性と、技術項目ごとの通信特性や課題を述べた。外界の情報を素早く的確にとらえて行動することは生物の生存に不可欠な要件であり、我々が普段の生活の中でごく当たり前前に駆使している感覚を伝えることが、通信技術の今後の発展にとって自然の流れであり、LTE<sup>\*8</sup>以降さまざまな条件が整ってくると考えられる。しかし、最近注目を集める3Dのケースに見られるように、方向性の創造もさることながら、普及の予見も非常に難しい分野であり、今後も幅広い視野で、さまざまな専門分野との連携に

よる新たな価値創造を目指していきたい。

### 文 献

- [1] 篠田 裕之, ほか: “特集「触覚技術」,” 計測と制御, Vol.47, No.7, pp.547-615, Jul. 2008.
- [2] 福本 雅朗, 杉村 利明: “タッチパネルにクリック感を付加できる ActiveClick,” インタラクション2001 予稿集, pp.25-26, 2001.
- [3] 林, ほか: “触覚通信実現を目指した触感の客観的評価,” 本誌, Vol.13, No.3, pp.40-43, Oct. 2005.
- [4] 3GPP TS22.105 V9.0.0: “Services and service capabilities,” 2008.
- [5] 田村, ほか: “遅延環境下における5指力覚通信の評価,” 本誌, Vol.15, No.3, pp.49-52, Oct. 2007.
- [6] 河野 義広, 宮田 昌廣, 埴 大, 米倉 達広: “Dead Reckoningを用いたリアルタイムWebゲームの設計と評価,” 信学論(D), Vol.J91-D, No.12, pp.2833-2843, Dec. 2009.
- [7] 中野, ほか: “新概念通信特集—新しい通信の創造に向けて—,” 本誌, Vol.11, No.1, pp.6-62, Apr. 2003.
- [8] 三浦 郁奈子, 近野 敦, 庄司 道彦: “人間との物理的インタラクション可能なバーチャルヒューマノイド,” VR学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.305-314, Sep. 2007.
- [9] 林 宏樹, 田村 隆幸, 高畑 実, 柴藤 稔: “遠隔操作ロボット用通信モジュール,” ロボット学会誌, Vol.26, No.3, pp.277-283, Nov.2008.
- [10] 田村, ほか: “移動網・固定網間のシームレスな通信トラフィック移行技術,” 本誌, Vol.17, No.1, pp.33-39, Apr. 2009.
- [11] 林 宏樹, 田村 隆幸, 三鬼 尚臣: “無人化施工における通信遅延と通信周期が施工効率に与える影響の分析と改善提案,” 建設施工と建設機械シンポジウム, No.23, Nov. 2009.
- [12] 林 宏樹, 田村 隆幸, 高畑 実: “油圧ショベル遠隔操作における触覚フィードバックを用いた操作性の向上,” ロボット学会学術講演会, 3H3-05, Sep. 2009.
- [13] 高畑, ほか: “リアルタイムロボティクスによるハプティック通信技術,” 本誌, Vol.15, No.3, pp.53-56, Oct. 2007.

\*8 LTE: 3GPPの第3世代移動通信方式の拡張規格。