

インターネットを介したロボットの遠隔操作の現状

高 橋 貢 (h02gs519@stu.hirosaki-u.ac.jp)*

D. N. ネンチエフ (nenchev@cc.hirosaki-u.ac.jp)*

*弘前大学知能機械システム工学専攻

1 はじめに

近年のインターネットの急速な普及により、通信プロトコルの標準化・操作環境の標準化が進み、様々な情報をインターネットを使って交換できるようになった。これにより、いつでも、誰でも、どこからでも、遠隔地の情報を得ることが容易になった。ロボティクスの分野においても、遠隔制御によってロボットを制御する技術（テレロボティクス）は原子力施設内の危険物のハンドリング、海中作業や爆発物などの危険物処理のために研究が進められてきた。今日では、外科手術の中の重要な一分野である〔1〕。一方、テレロボティクスをネットワークと結びつけた新たな分野が開拓された。標準通信プロトコルと標準ヒューマンインターフェースをインフラストラクチャとし、これらと実世界観測操作技術であるロボティクスを融合させることにより、「いつでも誰でもどこでも」使える遠隔環境観測操作システムを実現する。これがネットワークロボティクスである〔2〕。ロボットは、情報を力学的エネルギーに変換できる唯一の汎用知能化機械であると考えると、ネットワークを介した遠隔操作技術の確立は、情報化社会のあり方に関わる極めて重要な技術であり、今後の発展が期待される。本稿では、まず、コンピュータネットワークを介したテレロボティクス技術の問題点を提示し、それらを克服するためのアプローチを紹介する。また、近年のインターネットを利用した遠隔操作システムの動向、それらの問題点及び今後のインターネット上で遠隔操作システムを実現していくまでの課題を紹介する。

2 ネットワークロボティクスにおける問題点

実際に遠隔操作する場合、通信遅れによる不安定現象が最大の問題となる。マスタスレーブシステムが専用の通信回線で接続され、通信遅れが向きによらずほぼ一定であれば、Anderson と Spong 〔3〕が提案したスキヤッタリング変換を用いて、通信部が受動性を満たす安定な制御系が構成できる。しかし、ネットワーク通信では、回線負荷の変化やパケット再送などにより遅れ時間が変動し、通信部では向きによっても遅れ時間が異なる。したがって、時変システムとなるために、スキヤッタリング変換を用いても安定性が保証されないことがあり、現在その対策が検討されている〔4〕。Niemeyer と Slotine は、彼らの提唱するウェーブ変数の概念を拡張し、この問題に対する一つの解決策を導いている〔5〕。

制御理論の分野で注目されている $H\infty$ 制御や μ -解析・設計は、バイラテラル制御系の解析・設計ツールとして非常に有効である〔6〕。Leung と Francis らは〔7〕、通信部の遅れ要素を摸動とみなして、ロバスト安定性を考えることで、遅れ補償が可能であることを示している。

また、従来のテレオペレーションシステムではスレーブマニピュレータの位置・姿勢情報を座標値などで与えることで操作していたため、操作者がスレーブ側を目標の状態へ導くためには、スレーブマニピュレータがとりうる姿勢や動作についての知識などが必要であった。さらに、微細な情報機器の組み立てや細胞操作のように、スレーブ側のセンサの出力をモニタしながら作業を行うなどといった場合には操作者の熟練を必要としていた。このようなマ

スタ・スレーブシステムの問題点を知能化によって解決しようとした初期の試みに Ferrell, Sheridan らのスーパバイザリコントロール（管理制御）システム [8] がある。これは、人間による操縦のみによって作業を実施するのではなく、システム側にいくつかの自律的な機能を用意し、システムは人間の指示があると用意された機能コマンドを実行するものである。人間はロボットの作業の結果をモニタしていて、状況に応じて新たな指示を出すなどすることで作業を遂行していく。ただ、このようなシステムは、あらかじめ用意した機能コマンドは繰り返し実行できるが、使用環境に応じた数多くの機能を用意することは極めて困難であり、臨機応変さにも欠けるという問題があった。

テレオペレーションの知能化における臨機応変性の問題を改善するために、より知的なテレオペレーションシステムでは、マスター・スレーブ方式を基本としつつ、おののの側に入出力装置とそれを処理するルーチンを持たせている。この双方の座標系を結合することで、操作者の操縦を可能とし、さらに計算機による支援を加えることで高度で知的なシステムを目指している [9]。ワールドモデルと制御座標に基づくテレオペレーションシステムにより、例えば、対象物の姿勢の維持はシステムにまかせ、人間はおおまかな並進移動のみを指示するといったことが可能になる。このような人間とシステムの重疊協調方式はシェアードコントロールと呼ばれている。このような協調方式を用いることで、作業の実行を人間とシステムで分担できるだけでなく、システムの作業の自動計画を人間が補助したり、逆に人間の負担軽減のためにシステムが作業状況を評価し生データを抽象化して提示してくれるようなことも可能になる。

3 インターネットを用いたロボット操作システム

現在、いくつかのロボットがインターネットに接続され、Web ブラウザを介して操作できるようになってきている。これらのシステムの多くは、ヒューマンインターフェースとして Web ブラウザ、通信プロトコルとして HTTP などの WWW で標準的に用いられている通信プロトコルを用いて実現されている。このように、現在のコンピュータネットワーク環境で標準的に使用されているツールを用いることで、いままで特定の使用者のみに利用されてきた遠隔ロボットシステムから、一般の人々でも操作できるようなシステムに移行しつつある。ここでは、インターネットに接続されたロボットシステムの現状を紹介する。

3.1 CGI を用いた遠隔制御システム

CGI (Common Gateway Interface) とは、外部のアプリケーションで生成した情報を Web サーバー経由でブラウザに送るためのインターフェースの総称である。このタイプの典型的な遠隔操作システムの例を Fig. 1 に示す。通常、Web サーバーでは静的な情報（イメージやテキスト）をブラウザに送信する。ところが、CGI を使えば動的な情報をブラウザに送ることが可能になる。CGI スクリプトは渡された情報を加工したり、他の情報を基にして新しいデータを生成することができる。ここで生成されたデータは、HTML ファイルやイメージファイルと同じようにブラウザに表示する。

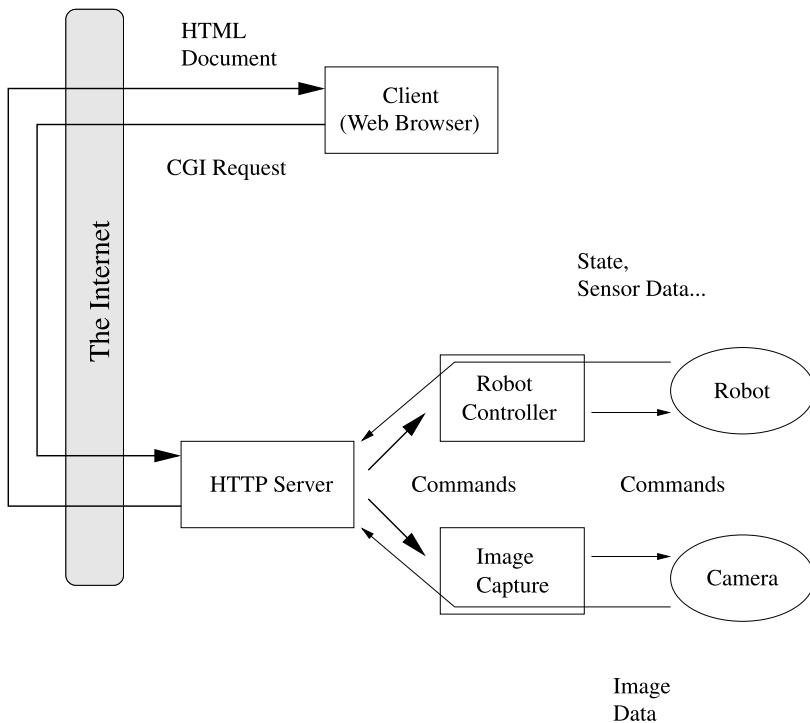


Fig. 1 : Framework of a CGI based teleoperation system

CGI はサーバをコントロールするために HTTP を拡張したもので、静的なドキュメントや画像だけではなく、特定のコマンドをサーバ側で実行することで動的なドキュメントを得るために作られたインターフェースである。そのため実装は非常に簡単ではあるが、次のような制限を持つ。

- 一つのリクエストに対して新しいプロセスを起動しなければならない。
- 応答として必ず HTML の文書を返さなければならない。
- 応答の結果は、静的なものである。

このような制限があるために直接口ボットが動作環境に影響を与えることなく、時間遅れが影響しない応用に対して利用されることが多い。

3.2 SSIを用いた遠隔制御システム

SSI (Server Side Include) を使用すれば CGI や特定のプログラム言語を使うことなく、動的なコミュニケーションが可能となる。SSI コマンド使い、Web ページにアクセスする時、サーバ内のプログラムを実行することが可能となる。しかし、パラメータなどの送信はできず柔軟な制御する場合は用いられることは無く本当の意味でのインタラクティブな制御はできない。

3.3 Javaを用いた遠隔制御システム

Java は単にホームページにアニメーションを付加するためのツールなどとも思われがちであるが、もともと Java 環境、Java 言語と Java ベースのプロセッサなどから成るプラットフォームに依存しないネットワーク向きの技術である。Java 言語は、WWW などに適したオブジェクト指向言語で、これまでのオブジェクト指向言語の欠点のいくつかを

取り除いたものである。例えば、ポインタ、メモリの直接アクセス、オペレータのオーバーロード、多重継承、拡張コンストラクタなどの機能は排除している。また、例外ハンドラやガベージコレクション機構、マルチスレッドを導入している。JavaはWWWあるいはInternetの分散環境向けであり、クライアントが要求したときにアプリケーションをダウンロードするサーバベースで動作する。

Javaを用いて構成した場合の例をFig. 2に示す。CGIを用いたシステムでは、その制限により時間遅れに対して影響の少ない応用に適用されてきた。CGIを用いた場合には前述した制限のために、より応答性を必要とする応用には向いていない。そのため、最近ではJavaの通信機能を用いて、すべての操作ソフトウェアを構築しているシステムも多く提案されてきている。この場合、遠隔操作に必要なすべてのソフトウェアが、最初にクライアント側に送付されプログラムの起動後はClient/Server間でその接続を維持し、すべてのデータ交換をHTTPサーバを経由せずに各コントロールサーバと行うことができ、データ形式にも制限は無い。Javaを使って遠隔操作システムを構築する利点として

- HTTPのように応答をHTMLで記述する必要は無い
- 接続を維持でき、様々なアプリケーションプロトコルを利用できる
- 動的なページを構成できる

などが挙げられる。

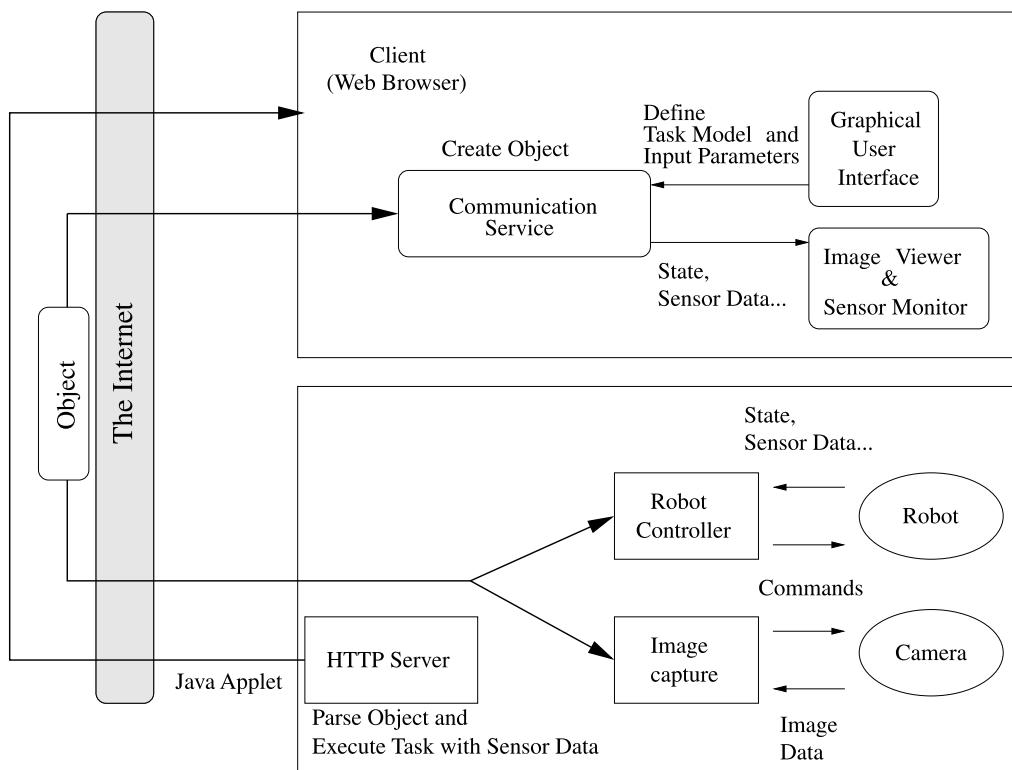


Fig. 2 : Framework of a Java based teleoperation system

また従来の知的テレオペレーションシステムでは、マスター側から、実行すべきコマンド名やいくつかの点の座標などコマンドのパラメータがスレーブ側に送られ、そのパラメータをスレーブ側のルーチンが処理することで遠隔作業を実現していた。この場合、送られ

るのは座標などの情報のみで、その情報の扱い方はスレーブ側のルーチンのみが知っている。また、スレーブ側ではマスタ側の操作者の目標とする状態は分からず、ただその時々の入力を受け取って処理をし、センサを持ったスレーブロボットであればその出力を返すということの繰り返しによって一つの作業を成し遂げていた。

このような問題を解決するために考案されたのが Java などのオブジェクト指向の考え方を取り入れたテレオペレーションシステムである。このシステムの特徴は、マスタ・スレーブ間の通信にオブジェクトを用いるという点にある。Fig. 2 に示すようにテレオペレーションにオブジェクトを用いることによって、情報のみではなく、その情報の扱い方をも送ることができるようになる。従来連続的に送っていたスレーブロボットの位置・姿勢の座標値に代わって、「何をどういう状態にするのか」というような作業の具体的な目的を一つのオブジェクトとして送ることができる。これにより、スレーブ側のルーチンを変更せずに新しい作業タイプを追加することが可能となる。またスレーブ側のセンサを用いてフィードバックをかける作業を行う場合には、動作のみならず、センサの出力に応じてどのように位置や姿勢を制御すべきかといったことまでまとめて送ることが可能である。これにより半自動的に作業を行うことが可能となり、マスタ側の操作者の負担を減らすことができる。

3.4 その他のシステム

Client/Server 間の応答性、信頼性の向上を図るために、CORBA (Common Object Request Broker Architecture) や RMI (Remote Method Invocation) などを使ったシステムも開発されつつある。CORBA は、分散オブジェクトシステムの通信モデルであり、IIOP (Internet Inter ORB Protocol) というアプリケーション層通信プロトコルを用いた分散アーキテクチャである。また、RMI は、Java の分散オブジェクトモデルのミドルウェアである。これらの分散オブジェクトモデルは、現在のインターネット上で、マルチメディア通信の分野で幅広く使われつつあり、将来の標準仕様の一部になることが期待される。

この分散オブジェクトモデルを用いた例として、比留川らのオフライン遠隔操作システム [10] がある。このシステムは、VRML で記述されたクライアント側の遠隔ロボットシミュレータ内で、作業の手順を教示し、作業教示終了後動作データを作業ロボットへ送付し実行させるというものである。ここで、逆キネマティクスなど計算量の多い部分を別の CORBA Server 内で計算をし、クライアント側の応答速度をあげている。このアプローチをロボットコントロールに応用することで、単一のマシン上の計算量を軽減し、クライアントサーバ間の応答性の向上が期待できる。

4 ネットワークロボティクスの実例

現在、いくつかのロボットがインターネットに接続され、ネット越しに動かすことができるようになっている。WWW の標準化、ブラウザの多機能化が進むにつれ、多くのソフトウェアは Web ブラウザ上で動くのが普通になると考えることができ、ロボットを動かすためのソフトウェアもその例外でないという革新的な考えを持つ人の同好会的研究会、その名も “Robot on the Web” が、1998 年開催された。そこからいくつかの例を紹介し、現状も加える。

- University of Southern California's Mercury Project

当時 University of Southern California にいた Ken Goldberg らによって開発された宝探しロボットが世界で最初に本格的に採用された例であろう。これは、ロボットアームを HTML によって動かし、砂の中に埋まった品物をカメラで探すというシステムで

ある。このシステムの構成を Fig. 4 に示す。Web ブラウザをインターフェースに、HTTP を通信プロトコルに採用したことにより 100 万ヒット以上になった。これは最も多くの人に使われたテレオペレーションシステムの一つであろう [11]。また、現在ではこれの代わりに新たに The TeleGarden というロボットが Web に接続されている。これはロボットを遠隔操作しエンドエフェクタに取り付けられたカメラで円形に設置された花壇の画像を見るというシステムである [12]。ただし、この庭園に種を播くためには、会員になり、植物を育てるのが好きだということを示さなければならない。

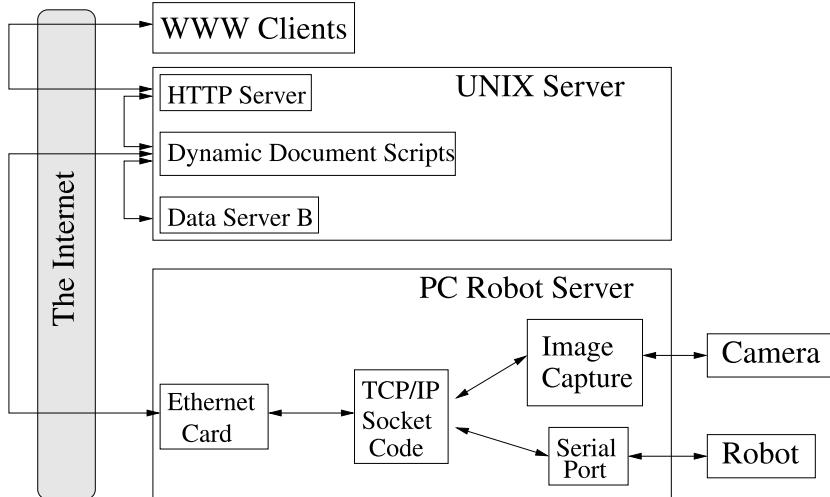


Fig. 3 : Treasure hunt robot system

- A New Robotics Niche

これは、University of Western Australia で開発された 6 自由度マニピュレータにおける遠隔操作システムである。Java applet で、設計されたユーザインターフェスから操作を行う。ロボットの周りには 3 台のカメラが装備されており、様々な角度から現在の状態を把握できる。このロボットシステムにおいては、ロボットの自由度が大きく制御計算が大きくなりサーバに多大な負荷がかかるという問題点において、CORBA を使用しその負荷を軽減させるという試みをしている [13][14]。

- Puma Paint Project

Java で構成された二次元の電子キャンバス上に絵を描かせ、この絵を実際に Puma ロボットを使い実世界のキャンバス上に描くというシステムである。色は、4 色用意されており、これはロボットが自動的に交換するが、キャンバスにあたる紙は、サイトを管理している Stein 自身が交換しなければならなかった [15]。

- Khepera Mobile Robot

移動ロボットは、数多くインターネットに接続されているが、その一つが Khepera mobile robot である。このシステムの構成を Fig. 4 に示す。これはインターフェースの中央に設置されたカメラの映像を見て迷路内のロボットを操作して移動するというシステムである。ロボットへの指令は CGI を用いている [16]。

この他にも多数のロボットがインターネットに接続され誰でも操作可能となっているが、アクセスの多さなどから、サイトを終了している場合も多々ある。

また筆者らも、インターネットを介して全方向移動型のロボットシステムを前年度構築した [17]。このシステムにおいては、single board computer (SBC) と micro computer を組み合わせ、モバイルロボットを任意に動作させるコントローラの開発を行った。また、無線 LAN 環境の構築とネットワークカメラの利用により、ロボットの視点で周辺状況を把握しつつ、Web ブラウザ上からロボットを制御できる環境を構成した。ロボットの無線制御における全体像とそれを実装したモバイルロボットを Fig. 5 に示す。無線 LAN 以下がロボットに組み込まれる部分である。

本システムでは、SBC をルータとして用い、新たに構築したサブネット内にネットワークカメラを接続することによりカメラを視覚センサとして用いるシステムを提案した。また、一時的に両ネットワークの疎通を行うために Proxy ARP [18] を行った。これで、別々のコリジョン・ドメイン（物理ネットワーク）をサブネット分割することなく、仮想的に 1 つのネットワークに見せかけることが可能となる。

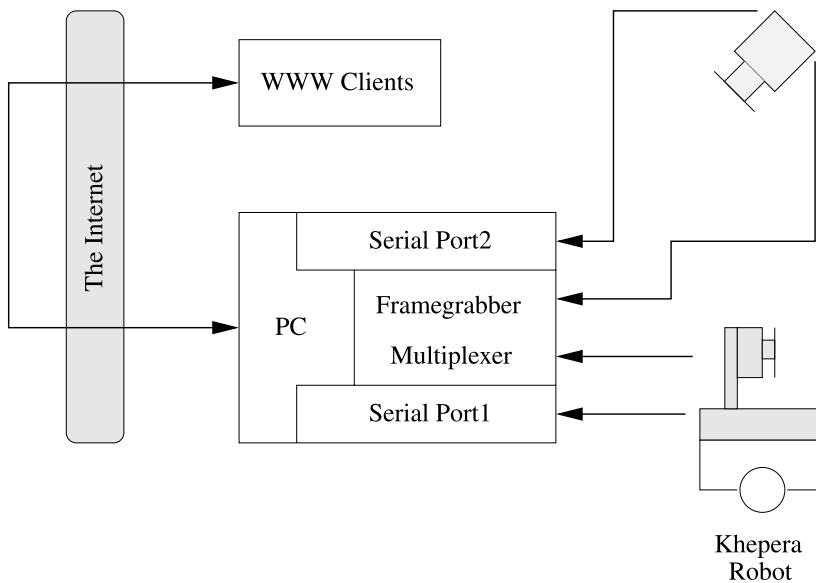


Fig. 4 : The Khepera mobile robot system

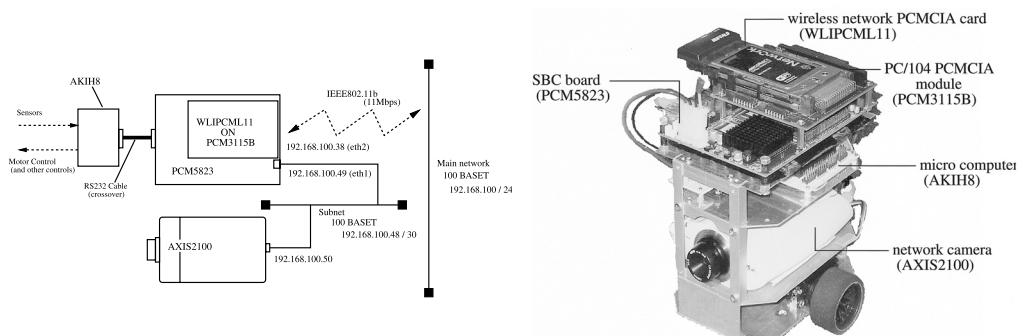


Fig. 5 : Overview of the robot controller and mobile robot of Motion Synthesis Lab.

5 ネットワークロボティクスの応用

上記で示したように現在数多くのロボットがインターネットに接続され実際に一般的にシェアされている。しかし、これらは部屋の中を散歩する、美術館鑑賞など、エンターテインメントに属する応用に限られている。本節ではエンターテインメントも含め、ネットワークロボティクスの応用の可能性について述べる。

5.1 遠隔学習

近年、大学教育においてさまざまな形で授業にマルチメディアを活用する試みがなされている。現在、インターネットを用いて大学や大学院レベルの教育を行うフレームワークおよびそれを支援するソフトウェアの構築等も検討されており、これらは「バーチャル・カレッジ」[19] または、「ディスタンスラーニング」[20] と総称されている。

大学は構造的危機に直面しているだけでなく、高額な施設設備をかかえているため、それを授業料に上乗せしている大学という伝統的なシステムは生き残れない。それに遠隔学習がとってかわると言う意見も出ている。アメリカには少なくとも3,000のバーチャル・カレッジがある。しかし、学士号が出せるものとなると2,000くらいである。それでもアメリカで学士号が出せる3,300あるカレッジと大学の内、三分の二が遠隔学習の機会を提供していることになり、毎年500万人がバーチャル・カレッジで学んでいる [21]。

しかし、どのレベルまでの教育が行うことができ、どのレベルの教育に需要があるのかという定義は現状では、不可能で更なる調査が必要になってくる。

5.2 エンターテインメント

前述した例からも分かるように、単に遠隔の場所を見るというだけでも、エンターテインメントとしての需要はかなりある。例えば美術館鑑賞、実際のデパートで商品を見る、あるいは観光地の景色をカメラで確認するなどが考えられる。また、観光地等の遠隔地にいるヒトと経験を共有できるロボットシステム、“テレコミュニケーター”[22] という新たなシステムも研究されている。

このような応用のために問題となるのは、画像の質である。特に、美術品の芸術性や商品の質を確認するには、繊細な画像が求められる。これを実現するには更なる大容量通信回線、圧縮技術、大域保証を行える通信プロトコルなどが必要であろう。

5.3 遠隔健康モニタリング

21世紀初頭から始まる高齢化社会を目前に控え、一つの有望な応用は遠隔健康モニタリングである。これは、日常生活における睡眠、食事、入浴、排泄等の生理活動を、利用者が意識することなく無拘束に長時間測定し、このデータを遠隔の管理センターに送付して解析し、何らかの異常があれば直ちに診断・治療を行うという考え方である。日常生活下で測定可能な生理量としては、ベットでは体温・体動・睡眠時間・心電図心拍数・呼吸数、浴槽では、脈波伝播速度、トイレでは体重・排泄量・血液成分などが上げられる。例えば、視覚センサを用いて睡眠時無呼吸症候群と言われる疾病的自動診断システムが開発されている [23]。

また、より簡易なシステムとしては、家庭用給湯ポットに使われたどうかが分かるセンサを付け、このデータを監視センターに送付することにより、独居高齢者の安否確認を行うシステムはすでに試験運用されており、製品化も予定されている。この他にも、多くの企業が実用化へ向けて研究開発を行っている。

このような応用を拡大していくためには、生理量などの無拘束計測技術、「誰でも使える」ためのヒューマンインターフェイス、セキュアな通信暗号化技術、家庭内で機器を容

易に接続するための技術等の開発が必要であろう。このうちの前2者は、ロボティクスの研究者がアドバンテージを持つ技術ではないだろうか。

5.4 遠隔マニピュレーション

遠隔マニピュレーションは、多くの需要を持っている。例えば、僻地での遠隔手術や、遠隔からの家庭保守、簡単な介護作業等が挙げられる。ただ、残念ながらマニピュレーションの技術は、このような応用に十分耐えるほど、成熟していないのが現状ではないだろうか。例えば、器用さや高信頼性を要求されるマニピュレーション技術、通信遅延時間があつても簡単に使えるようにするための自律動作計画技術、対象物の認識や位置決定のための視覚技術等は大きな改善が必要である。また、空間を共有する人間を傷付けないための安全性の確保も重要である。

6 おわりに

本稿では、インターネットを介してWebブラウザ上から操作する遠隔ロボットシステムについて述べてきた。現在インターネットに接続された遠隔ロボットシステムの多くは、単に既存の自律ロボットシステムにインターフェースとしてWebブラウザを用い、利用範囲を拡張したに過ぎない。しかしながら、ロボットを自在に動作させるには、センサからの大量な情報を処理し、それを踏まえた望ましい制御信号を実時間でロボットに入力する必要があり、操作者と操作対象間で信頼性のある操作を行うには、時間遅延が大きな問題となり通信媒体、通信手順を細かく規定する必要がある。それを実現するためには、Webブラウザ、通信プロトコルの拡張を行い、Client/Server間の時間遅れ保証が可能な通信プロトコルの導入や効果的なインターフェースを実現する必要がある。通信プロトコルに関しては、次世代インターネットプロトコルIPv6(IP version 6)が有望であると考えられている。しかし、これはもちろんネットワーク層だけの問題ではなく、下位の物理層においても、現在より広帯域幅をもつ光ケーブルネットワーク等の普及が前提となることは明らかである。これらの採用により現在通信遅れの不安定性をある程度払拭ができる、安定な制御機構を構成できると考えることができる。しかし、現状ではロボットにいくつもの自律機能を持たせ、オペレータが管理者として制御に携わり、ロボットに高いレベルの指令を与えるスーパーバイザリコントロールは最も利用価値が高いと思われる。

ネットワークの標準化が進むにつれてネットワーク環境とロボティクスとの結びつきはますます強くなるだろう。しかしながら、WWW環境を利用したロボット研究はまだ始まったばかりである。今後汎用化と能動マルチメディアの一部としてますますの発展が望まれる。

参考文献

- [1] 比留川博久：“テレロボティクスからネットワークロボティクスへ,” 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 458-461, 1999.
- [2] 原功：“インターネットを利用した遠隔操作システム,” 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 477-480, 1999.
- [3] R. J. Anderson and M. W. Spong : “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501, 1989.
- [4] 小菅一弘, 村山英之, 竹尾光治：“ネットワークの通信条件の変化を考慮したバイラテラルマスタスレーブマニピュレータ, “ロボティクス・メカトロニクス講演会’96講演論文集, Vol. B, pp. 1309-1312, 1996.

- [5] G. Niemeyer and J.-J. E. Slotine : "Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet," *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1909-1915, 1998.
- [6] 佐野明人, 藤本英雄：“マスタスレーブシステムの制御系設計の動向,” システム／制御／情報, Vol. 42, No. 7, pp. 356-362, 1998.
- [7] G. M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian : "Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ -Synthesis," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 1, pp. 105-116, 1995.
- [8] W. R. Ferrell and T. B. Sheridan : "Supervisory control of remote manipulation," *IEEE SPECTRUM*, No. 10, pp. 81-87, 1967.
- [9] 佐藤知正, 平井成興：“ワールドモデルを利用したテレオペレータシステムの構成法,” 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 4, pp. 353-362, 1986.
- [10] H. Hirukawa and I. Hara : "The Web Top Robotics," Preprints of IROS' 98 *Robots on the Web*, pp. 49-54, 1998.
- [11] K. Goldberg and S. Gentner : "A Feasibility Study for Internet Robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 7, No. 1, pp. 35-40, March 2000.
- [12] The Telegarden : <http://telegarden.aec.at/>
- [13] K. Taylor and B. Dalton : "A New Robotics Niche," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 7, No. 1, pp. 27-34, March 2000.
- [14] Australia's Telerobot on the Web : <http://telerobot.mech.uwa.edu.au/>
- [15] Matthew R. Stein : "Interactive Internet Artistry," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 7, No. 2, pp. 28-32, June 2000.
- [16] P. Saucy and F. Mondada : "Open Access to a Mobile Robot on the Internet," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 7, No. 1, pp. 41-47, March 2000.
- [17] 高橋 貢, 三上承徳, D. N. ネンシェフ：“無線LAN環境におけるLinuxを搭載した組込みロボットコントローラ,” 日本機械学会 [No.02-6] ロボティクス・メカトロニクス講演会’02 講演論文集, 1A1-F01, 2002.
- [18] ProxyARP Subnetting HOWTO : <http://tldp.org/HOWTO/mini/Proxy-ARP-Subnet/>
- [19] 御手洗理英：“インターネット上のバーチャル・カレッジ,” コンピュータと教育, No.053-002, 2001.
- [20] 野坂大喜, 中野京子, 他：“ネットワークを利用したディスタンスラーニングシステムによる遠隔情報処理教育支援に関する研究,” 弘前大学総合情報処理センター広報HIROIN, No.18, pp. 51-57, 2002. 10
- [21] 濱野保樹：“大学教育におけるマルチメディアの活用,” 私情協ジャーナル, Vol. 6, No. 1, 1997.
- [22] 藤田雄太郎, 佐藤千秋, 妻木勇一：“ウェアラブルロボットT 1 の開発,” 日本機械学会 [No.02-6] ロボティクス・メカトロニクス講演会’02 講演論文集, 1A1-F06, 2002.
- [23] 西田佳史, 森武俊, 溝口博, 佐藤知正：“視覚情報による睡眠時無呼吸症候群診断方法,” 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 274-281, 1998.