

# ネットワークを利用した遠隔操作システムに関する研究

西嶋 隆 今井 智彦

## Development of Remote Control System for Network Robot

Takashi Nishijima and Tomohiko Imai

あらまし 近年、インターネットを用いた通信サービスが多様化し、文字情報だけでなく音声や動画の伝送も行われている。今後、ネットワーク通信において、データの転送遅延や遅延揺らぎに関する高品質化や広帯域化が進めば音声、動画の伝送は福祉、医療、アミューズメントなどに応用され、さらに様々な物理的な遠隔操作にも展開されていくと考える。本研究では、ネットワーク（インターネットやイントラネット）を利用した遠隔監視用移動型ロボットの操作システムを試作した。ユーザの利便性を考慮して、遠隔操作のユーザインタフェースにはJava applet を用い、Web ブラウザから操作可能にした。また、通信データの転送遅延や遅延の揺らぎによる操作性の悪化を改善するため、画像圧縮率変更機能、ローカルマップを生成し表示する機能、ロボットの半自律移動機能を提案し、アプリケーションレベルでの操作性改善に関する評価実験によりその有効性を確認した。

キーワード ネットワークロボティクス、ブラウザ、Java、遠隔操作

### 1. はじめに

現在、インターネットは一般家庭にも普及し、主にWWW やe-mail に代表されるようなアプリケーションが用いられている。特に、EC (Electronic Commerce) においては、顧客の利便性やベンダ側のソフト開発コスト削減等の理由から Web アプリケーションが多用され、ユーザインタフェースには Web ブラウザが使われる。一般的にはこのような Web アプリケーションは文字情報や画像情報の通信手段として用いられ、エンドツーエンドのQoS (転送遅延時間、通信帯域保証) はあまり問題にならない。しかし、リアルタイム性を厳しく要求するような遠隔制御などにおいては QoS が問題となる。IP (Internet Protocol) 網におけるサービスの多様化を背景に、今後は遠隔医療、遠隔介護、遠隔監視など、遠隔地の物理的操作を行うサービスも多く現れてくると考える。

現在、IETF (Internet Engineering Task Force) において転送遅延、遅延揺らぎ等のネットワーク品質を補うために、RSVP (Resource Reservation Protocol) 及びネットワークリソース確保が可能なルータを用いたインテグレートドサービス (IntServ) やディファレンシエートドサービス (DiffServ) の標準が規定されてきた。また、光伝送に WDM (Wave Division Multiplexing) 方式を用いた超高速光伝送技術も開発されてきている[1][2]。しかし、近年インターネット上で IP パケットは指数関数的に増加しており、上述したような新技術が広域 IP 網に素早く対応することは難しいと考える。

本研究では、現状のイントラネットやインターネットで遠隔操作する移動型監視ロボットの操作システムを試作し、通信データの転送遅延や遅延揺らぎによる操作性悪化を改善するためのアプリケーションレベルでの手法について検討する。また実際に提案手法を遠隔操作移動監視ロボットに実装してその評価実験を行った。今までに IP 網や専用回線を利用した遠隔操作ロボットの研究はなされており[3][4]、様々なアプローチで通信遅れなどを補う手法の提案、実験がなされてきたが[5]、それぞれの手法は遠隔操作タスクに依存するところが大きい。

今回試作したシステムはオフィスや工場内の巡回監視の遠隔操作を想定しており、ユーザはある程度遠隔地の地形を把握しているが、ロボット側に静的なマップを保持しても対応できないような状況を考えている。また、ユーザは会社や自宅からなどのあらゆる場所から遠隔操作することを想定し、利便性から Web アプリケーションとして試作する。また、操作インタフェースには汎用の Web ブラウザ (Internet Explorer や Netscape Navigator) を用い Java applet を起動する方法を採用。2章に提案手法、3章にシステムの構成、4章に提案手法の評価実験、5章に実験結果及び考察、6章にまとめる。

### 2. 操作性改善の提案手法

本章では、アプリケーションレベルでの操作性改善の手法を提案する。例えば、インターネット経由で移動ロボットを操作して遠隔地のオフィスの廊下を巡回して遠

隔監視をする作業を想定する．この作業には遠隔地の画像提示が必須である．また，操作するためにはロボットの周囲の状況把握が必要である．しかし，画像提示がなされて周囲の状況が把握出来たとしてもネットワークのデータはリアルタイム性に欠けるためロボットが周辺に接触する危険性はあり得る．このような危険性のあるネットワークを介したロボットをより安全に操作するために2つの方法を検討する．1つはネットワークに送出するデータ量を極力減らし，通信負荷を軽減させ輻輳を起りにくくすること，もう1つはロボットにある程度の自律機能を付加して衝突の危険を回避することである．

### 2.1 通信データ量の削減による方法

データ量の削減による方法として，本システムにおいては遠隔画像の圧縮率を可変にして通信する画像データ量を変更できるインタフェースを提案する．画質とリアルタイム性はトレードオフの関係である．ユーザはネットワークリソースが少なく画像更新レートが低いと感じれば高圧縮にしてデータ量を少なくすればよい．反対にネットワークリソースが十分にあると感じるときや，どうしても高品質な画像が必要な時は低圧縮にし，高品質の画像を提示させればよい．

また，移動操作時に左右や後方の環境を把握するためには複数のカメラを使って全周囲の画像情報を提示すればよいが，全周囲を画像表示することはデータ量の観点から好ましくない．そこで，超音波センサを用いて作成した局所的な地図を提示する．具体的にはサンプリングしたデータをハフ変換[6]し，周囲の直線(壁)を検出し，マップ情報としてユーザ側に送信して，applet 上に局所的な地図(これを以降ローカルマップと呼ぶ)を提示する．このデータ量は高々数十 Byte であり画像情報に比べておよそ 1/1000 ~ 1/10000 と格段に小さい．また，ハフ変換は雑音に強く，センサの誤検出の影響を少なくする．ただ，正確なローカルマップを得るには多数のサンプリングが必要だが，リアルタイム性とはトレードオフの関係であり，タスクを考慮して適切に決定しなくてはならない．ローカルマップの生成方法は次のとおりである，まず超音波センサのサンプリング開始時の位置を原点とし，周囲の測長データのサンプリングとハフ変換が終了するまで座標系を固定する．その間，ロボットの移動量は移動ロボットの駆動軸にあるエンコーダで逐次記録しており，移動量から座標変換して固定された座標系においてハフ変換する．ハフ変換が終了するとまた新たな座標系を取り直してサンプリングを開始する．この操作を繰り返すことでローカルマップを繋げていく．図1にその様子を示す．ロボットが順路を一巡するとユーザ側には全体のマップが生成されることになる．これによりカメラから見えない方向の壁の把握ができる．

### 2.2 半自律走行機能による方法

超音波センサデータのハフ変換による周囲の壁までの距離と角度情報及びユーザからの動作命令からロボット

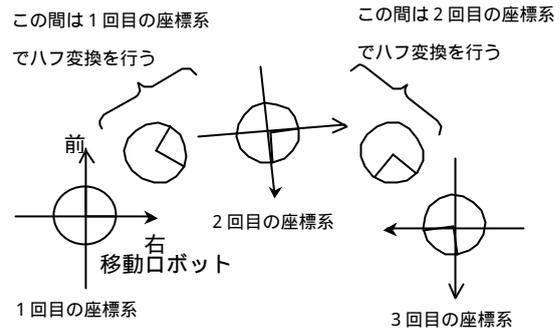


図1 ローカルマップ生成時の座標系

Fig.1 The coordinate axis of local map

の移動する方向を自動的に決定する半自律走行を実装する．この方法にはポテンシャル法を用いる．今回は障害物までの距離に反比例した反発力とユーザの指示方向のベクトル合成で動作方向を決定する方法で行う．これにより周囲の壁に接触しそうになるとユーザの意志を反映した方向に回避して安全性が高まる．またポテンシャルの局所的な最小値からはユーザからの指示で脱出する．

## 3. 遠隔操作ロボットシステム構成

今回試作した遠隔操作移動型監視ロボットのシステム構成を図2に示す．システム構成の主要素はユーザ PC，Web サーバ，中継サーバ，ロボット制御 PC，画像サーバ，遠隔監視ロボットであり，IP 網で繋がれている．以下にそれぞれの要素について説明する．

### 3.1 ユーザ PC

ユーザ PC はネットワークインタフェースを備え，Web ブラウザがインストールされている．ユーザインタフェースは Java applet を用いた Web アプリケーションであるため，OS に依存せず，Web ブラウザがあればどこからでも操作可能である．遠隔画像の表示には Java の Media Tracker クラスを用い，ローカルマップ表示には Java2D クラスを用いる．今回は GUI に Java Swing を用いているため，ブラウザに Internet Explorer (以下 IE) や

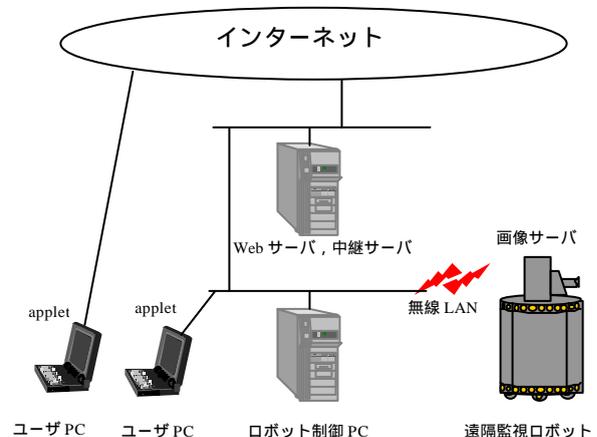


図2 システム構成

Fig.2 Components of remote control system

Netscape Navigator を用いる場合は Java Plug-in が必要であるが、アクセス時に自動で Sun サイト[7]からダウンロードする。今回の実験ではユーザ PC の OS に Windows98、ブラウザは IE5.0 を用いた。ユーザインタフェースを図 3 に示す。左上部がローカルマップ表示、左下部はバッテリーやロボットの座標情報等。右上部は遠隔画像、右下部はロボット移動やカメラコントロール、画像圧縮率変更用のスライダーなどのインタフェースを設ける。図 4 にローカルマップの一例を示す。

### 3.2 Web サーバ, 中継サーバ

これら 2 つのサーバは LinuxOS を用いた同一 PC 上に実装する。Web サーバには Apache server を用いる。これにロボット操作の HTML と Java クラスファイルを用意しておくことでユーザからのアクセスに応じてユーザ PC へ applet のバイトコードをダウンロードする。中継サーバはユーザ PC とロボット制御 PC とのデータ中継、ユーザ PC と画像サーバとのデータ中継及びハードディスクに遠隔画像データを格納する作業を行う。また、アクセスしてきた複数のユーザを排他制御し、ロボットの操作権利の管理もここで行う。ロボットの操作権利は先にコネクションが成立した人にある。後からアクセスしてきたユーザには操作権利が無いが遠隔画像は提示され操作者と共有する。この中継サーバは Java で実装する。

### 3.3 画像サーバ

画像サーバは移動ロボット上のコンピュータに実装する。役割は中継サーバを経由してユーザ PC から送られてくるデータ(画像圧縮パラメータ, カメラ動作制御パラメータ)をもとに、画像をキャプチャー、圧縮して中継サーバに画像データを送信するスレッドを生成する。送信する画像ファイルの圧縮には JPEG 圧縮方式を用いている。JPEG 圧縮には IJG(Independent JPEG Group)[8]で開発された JPEG6b ライブラリを用いる。この JPEG 画像をコマ送りで表示することで遠隔地を監視する。画像圧縮の度合いは、ユーザが applet 上のインタフェースから 100 段階で変更できる。図 5、図 6 に低圧縮率及び高圧縮率で圧縮した遠隔画像をそれぞれ示す。また、画像サーバは RS232C 経由でカメラの動作の制御も行う。これは WindowsNT 上に MS-VisualC++ で実装する。

### 3.4 ロボット制御用 PC

ロボット制御用 PC には主に二つの役割があり、一つは中継サーバとの通信、もう一つはロボット制御である。それぞれは別のプロセスで、共有メモリを介して通信をする。共有メモリにはユーザからの動作命令情報、ロボットからの各種データ(位置情報, 超音波センサ情報, バッテリー情報等)や更新フラグなどがあり、ここに書く情報を各プロセスが適切に処理する。ロボットからの超音波センサデータをハフ変換し、ローカルマップを生成する働きや半自律走行の制御もここで行う。これらは LinuxOS を用い C 言語で実装する。また、ロボット実機との通信は無線 LAN 経由で行う。

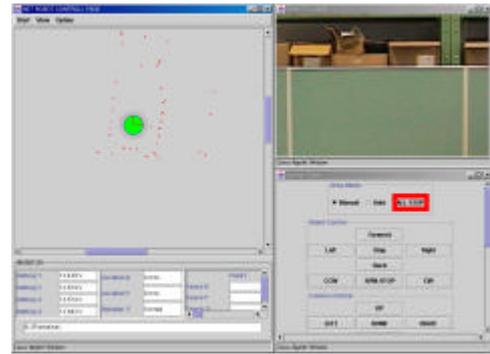


図 3 ユーザインタフェース

Fig.3 User Interface

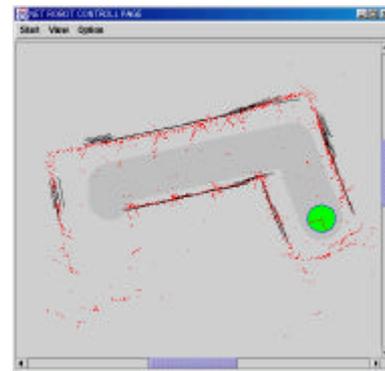


図 4 GUI 上のローカルマップ

Fig.4 Local map on the GUI



図 5 低圧縮率画像

図 6 高圧縮率画像

Fig.5 Low compressed image Fig.6 High compressed image



図 7 移動監視ロボットの外観

Fig.7 Remote Surveillance Mobile Robot

### 3.5 遠隔操作ロボット

図7に遠隔操作移動型監視ロボットの外観を示す。本機はNOMAD-XR400(元Nomadic Technologies,Inc.製)上にパン,チルト,ズーム可能なカメラVC-C3(Canon製)を搭載している。ロボットは前後左右斜め,回転移動が可能で,円筒の胴体には一周24個の超音波センサが上下に搭載されており,周辺の障害物までの距離を15mmの分解能でおおよそ150mmから4000mm程の範囲で取得できる。超音波センサはレーザや画像処理を用いて測長するシステムに比べて測定精度は劣るが,安価にシステムが構成でき,環境の明るさは問題にならない。更に人体に危険性がないという特徴がある。そのため市販の移動型ロボットには多用される傾向がある。

### 4. 提案手法の評価実験

試作した遠隔操作システムにおいて操作性の評価実験を行った。実験タスクは開始点からコの字型の通路を通過して目的地にある掲示板の文字がユーザPC上ではっきり読みとれるようにロボットの位置を微調整する。測定項目は,後述する実験条件におけるタスクに要する時間,及び操作のしやすさの主観評価であり10点満点の10段階評価とする。(操作しやすく感じる程評価ポイントが高くなる。)図8に実験に用いた通路の寸法,また図9に実験環境の写真を示す。

実験では提案手法を評価するために,1)画像圧縮率変更機能の有無による操作性への影響,2)ローカルマップ表示機能の有無による操作性への影響,3)半自律走行機能の有無による操作性への影響を調べる。1)から3)のそれぞれの機能(因子)が,有るまたは無いの2水準で実験計画を行う。この実験条件は3因子2水準の実験であり,被験者は一人あたり8通りの実験を行う。表1に8通りの実験条件を,表2にそれぞれの実験条件での特徴を示す。

これらの実験から次の3つの項目を評価する。

- (1)各提案機能の有無によるタスク完了時間の平均の差の検定。
- (2)分散分析による各提案機能の有意性の検定。
- (3)各機能付加による主観評価ポイントの変動値の評価。

### 5. 実験結果及び考察

実験は8人の被験者で行った。また,事前に遠隔操作の練習を行い,その後ランダムな順序で実験を行った。

#### 5.1 各提案機能の有無によるタスク完了時間の平均の差の検定について

図10から図12に各機能(圧縮率変更機能,ローカルマップ表示機能,半自動走行機能)が有る場合と無い場合での全員のタスク完了時間を示す。なお,各ボック

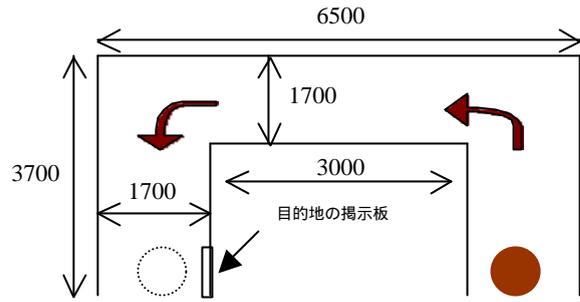


図8 実験に用いた通路

Fig.8 The path for this remote operation test



図9 実験環境

Fig.9 The surroundings of experimentation

表1 実験条件

Table.1 Experimentation condition

	圧縮率変更機能	ローカルマップ表示機能	半自律走行機能
条件1	無し	無し	無し
条件2	有り	有り	有り
条件3	有り	無し	無し
条件4	無し	有り	無し
条件5	無し	有り	有り
条件6	有り	無し	無し
条件7	無し	有り	無し
条件8	有り	無し	有り

表2 各実験条件の特徴

Table.2 The feature of the each experimentation condition

	無し	有り
圧縮率変更機能	画質変更不可 画像鮮明 約60Kbyte/枚 約4.7Frame/sec	画質変更可 画像鮮明~不鮮明 約60K~2Kbyte/枚 約4.7~6.8Frame/sec
ローカルマップ表示機能	周辺の障害物情報がGUIから得られ無い	周辺の障害物情報がGUIから得られる。
半自律走行機能	すべてマニュアル操作	自動で静止障害物を回避

スチャートの髭の上下はそれぞれ最大値，最小値，箱の中央は平均値，箱の上下は平均値に標準偏差を加減した値を示している．更に図10から図12のそれぞれの機能が有る場合と無い場合において，タスク完了時間の平均の差の検定を行った．(ここではサンプル数大として近似的に正規分布に従うとした．)結果を表3に示す．

表3よりローカルマップ表示機能と半自律走行機能は，両方ともその機能がある場合と無い場合でタスク完了時間の母平均が同一であるという帰無仮説は棄却された．従って，この二つの機能はタスク完了時間を短縮させるのに有効であることが示された．また，画像圧縮率変更機能は棄却域に入らないことからタスク完了時間に影響を与えていないことが示された．その理由は今回の実験は所内LANで行ったため，各実験条件の特徴(表2)にもあるように，画像データ量が変化しても画像更新レートはあまり変化が無いためであると考えられる．このことは，今回のタスクにおいて画像圧縮率が上がり画質が少々悪くなくても更新レートが保たれば操作にあまり影響が無いことを意味している．すなわち，今回のような高品質な画像を要求しないタスクの場合はこのようなインターフェースが用意されていると，余計なネットワーク負荷をかけないで済むと考える．

### 5.2 分散分析による各提案機能の有意性の検定

全員のデータからタスク完了時間に影響を与えている要因を分散分析で調べた．表4に分散分析表を示す．この結果から，ローカルマップ表示機能と半自律走行機能はタスク完了時間を変動させるのに，1%の有意水準においても有意であることがわかる．今回の遠隔操作タスクにおいては，これら2つの提案手法は有効であるといえるが画像圧縮率変更機能は有意ではないといえる．このことは5.1節と同様に解釈することができる．

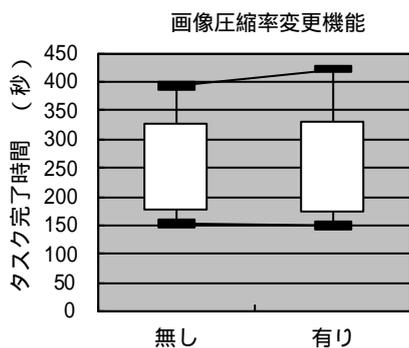


図10 圧縮率変更機能の有無とタスク完了時間  
Fig.10 The relation between the image compress function and the task completion time

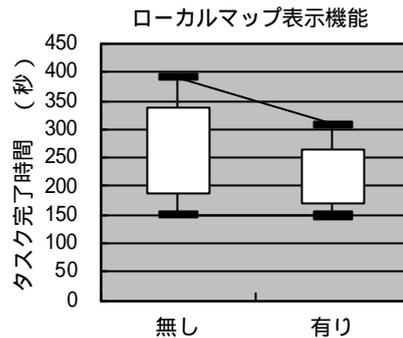


図11 ローカルマップ表示機能の有無とタスク完了時間  
Fig.11 The relation between local map indication function and the task completion time

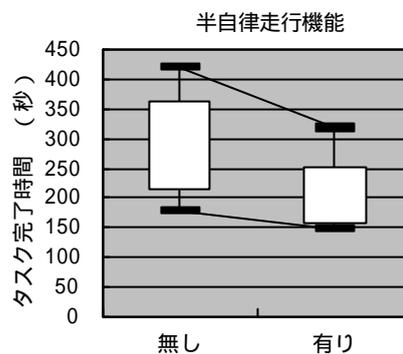


図12 半自律走行機能の有無とタスク完了時間  
Fig.12 The relation between the semi-auto driving function and the task completion time

表3 タスク完了時間の平均の差の検定

Table.3 Statistical test of hypotheses of difference in the task completion average time

	Z	判定	備考
画像圧縮率変更機能	0.013		$ Z  > Z_{0.05} = 1.96$
ローカルマップ表示機能	2.654	**	$ Z  > Z_{0.01} = 2.58$
半自律走行機能	5.191	**	

表4 分散分析表

Table.4 Dispersion analysis table

要因	SS	f	V	F	判定	備考
M	532383.0	1	532383.0	-		F <sub>4</sub> 7.7 21.2
A	20.3	1	20.3	0.13		
B	4680.3	1	4680.3	29.12	**	
C	16562.0	1	16562.0	103.03	**	
e	642.0	4	160.7			
計	554288.6	8	-	-		

M: 平均 e: 残差 A: 画像圧縮率変更機能  
B: ローカルマップ表示機能 C: 半自律走行機能  
\*: 有意水準0.05 \*\*: 有意水準0.01

### 5.3 各機能付加による主観評価ポイントの変動値の評価

本節では各機能を付加することにより評価ポイントがどの程度変動するのかを8つの実験条件から導かれる評価ポイントの分解式の連立方程式より推定した。この評価ポイントの変動値(推定値)が正に大きいほど操作をやりやすく感じたことを表す。また逆に負になれば操作がやりにくくなったということになる。図13に被験者全員の各機能付加による評価ポイントの変動値の最大値、最小値、平均値を示す。

この結果から、ローカルマップ表示機能と半自律走行機能の評価ポイントの変動値が高いことがわかる。また、この二つは全員の評価ポイントの変動値が正にあり、被験者全員がこれらの機能により操作が容易になると感じていることがわかる。画像圧縮変更機能においては、評価ポイントが負の値になっている被験者もいる。これは被験者の中にはこの機能がない方が操作は容易と感じる人がいることがわかる。5.1節と5.2節の結果と照らし合わせてみると、主観的な評価ポイントの変動値が上昇するとタスク完了時間が短縮すると考察できる。

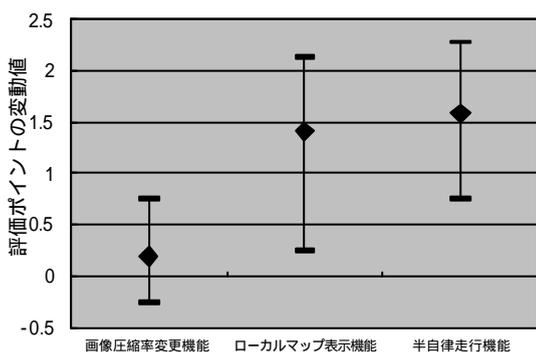


図13 各機能付加時の主観評価ポイントの変動  
Fig.13 Subjective score of the each function

## 6. まとめ

本研究ではWebブラウザをユーザインタフェースとするIP網を用いた遠隔操作監視移動ロボットのシステム

を試作した。また、IP網での通信データの転送遅延や遅延揺らぎによる操作性悪化を補うアプリケーションレベルでの手法を提案してシステムに実装した。遠隔操作実験を行い、その結果を処理して評価してみたところ、提案する機能の一つである超音波センサを用いたローカルマップを表示するインターフェースは通信データの削減の面や操作性の向上の面で有効であった。また、ロボットの半自律走行機能は、ローカルマップ表示機能よりも操作性の向上に有効であり、主観評価もよい傾向がみられた。一方、画像圧縮変更機能は今回の実験タスクにおいては操作性や被験者の主観評価には影響を与えていなかった。

今後は、このような遠隔操作システムを本研究所のロボットプロジェクト(介護、福祉、癒し)において福祉支援の研究に応用して行く予定である。

## 文献

- [1] Brian E. CARPENTER 寺元昌作(訳): “通信インフラストラクチャを目指したIPネットワーク” 電子情報通信学会誌 Vol.83 No.4 pp.257-262 2000年4月
- [2] 米田進: “IP系伝送技術の動向” 電子情報通信学会誌 Vol.83 No.4 pp.276-279 2000年4月
- [3] 平松, 森, 納谷, 大里: “Javaアプレットを用いたネットワーク型ロボットインタフェース” 情報処学会論文誌 pp.3315-3323 Dec.1998
- [4] 前山, 油田, 原田: “移動ロボットの遠隔操作による美術館鑑賞” 日本ロボット学会誌 Vol.17 No.4, pp.486-489, 1999
- [5] 例えば, 松丸隆文: “通信回線ISDNを介したロボットの遠隔操作” 日本ロボット学会誌 Vol17 No.4, pp481-485, 1999
- [6] 森俊二, 板倉梅子: “画像認識の基礎” オーム社1990
- [7] Java Plug-in URL [http://java.sun.com/products/plugin/index\\_ja.html](http://java.sun.com/products/plugin/index_ja.html)
- [8] IJG jpeg6b Library URL <http://www.ijg.org/>