

ネットワーク負荷に対応する作業環境提示技術の研究

今井 智彦* 飯田 佳弘* 藤本 英雄** 佐野 明人**

Research on Display Method of Working Environment Considering Network Load

Tomohiko Imai*, Yoshihiro Iida*, Hideo Fujimoto** and Akihito Sano**

あらまし ネットワークロボティクスにおいて、画像情報は操作者が作業状態を確認する際に利用する非常に重要な情報である。しかし、ネットワーク負荷の状態により通信遅れが変動するため、安定した画像情報のやり取りができない。このため、操作者が作業状態を確認することが困難となり、作業精度など操作性が低下する。そこで、ネットワーク負荷を計測してこの結果を基に操作者にとって作業に必要なエリアのサイズまたは画質を変化させて、伝送する画像情報量を調整することにより、操作性の低下を防ぐという手法を提案し、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、画像伝送、ネットワーク負荷、通信遅れ

1. まえがき

近年の急速な情報通信技術の発展に伴い、インターネットを代表とするコンピュータネットワークが社会に広く普及しつつある。一方、ロボティクスの分野ではテレロボティクスの研究が長い間続けられてきており、これをネットワークと結びつけられないかという発想からネットワークロボティクスという分野が拓かれて現在研究が盛んに行われている[1]。

ネットワークロボティクスにおいて、画像情報は操作者が作業状態を確認する際に利用する非常に重要な情報である。画像情報が必要な作業には、へき地での遠隔手術、遠隔からの家庭保守や簡単な介護作業などのような遠隔マニピュレーションがある。また、画像情報が必要となる応用例には、工場内の機器監視などがある。工場内の機器監視には通常監視専用の回線を使用する。しかし、最近は工場内で生産管理情報等のやり取りをするために LAN が構築されつつあるので、これを利用できれば工場内の監視設備を簡素化でき、設置する際のコストを抑えることができると考える。

このようにネットワークを通じて遠隔地との間で画像情報をやり取りすることは有益である。しかし、ネットワークには通信遅れという問題がある。離れた場所にある機器間を直接回線で接続した場合、通信遅れはほぼ一定となる。一方、インターネットのように他の機器が接続されている場合、ネットワークの利用状況により通信遅れは変動する。通信遅れが変動すると、画像情報の提示間隔がばらついたり提示頻度が低下するなど安定した画像情報のやり取りができなくなる。このため、操作者が作業状態を確認することが困難となり、作業精度など操作性が低下する。

ネットワークロボティクスにおいて通信遅れの変動に対処するための研究としては、力覚情報を対象とし、通信遅れの変動を補償した上で安定性を保証して操作性の低下を防ぐ研究[2][3]が行われている。また、力覚情報と画像情報を対象とし、これらの配分を作業状態により変更して操作性の低下を防ぐ研究[4]などが行われている。

そこで本研究では、画像情報を対象とし、通信遅れの変動を緩和するためにネットワークの状態に応じて画像情報量を調整し、安定した画像情報のやり取りができるようにすることにより操作性の低下を防ぐという手法を提案する。画像情報は非常にデータ量が大きいため、ネットワークを通じてやり取りするためには画像圧縮手法を用いてそのデータ量を低減する必要がある。しかし、画像情報をそのまま圧縮すると全体的に画質が劣化するため、操作者がそれを見ながら作業を行うと操作性が低下する。そこで画像情報には作業にとって重要な部分と

*メカトロ応用部

Mechatronics Division

**名古屋工業大学 機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute
of Technology

必要ではあるが特に重要ではない部分があると考え、重要な部分は鮮明に見えるように高画質にして、高頻度で伝送する。特にそうではない部分はある程度見える位の低画質にして、重要な部分の伝送の妨げとならないように低頻度で伝送する。このとき、ネットワークの状態に応じて重要な部分の大きさまたは特に重要ではない部分の画質を変化させることで画像情報量を調整する。

2. 画像提示手法の検討

2.1 ネットワーク負荷の計測

ネットワークの状態に応じて画像情報量を調整するためにはネットワーク負荷の計測を行う必要があると考え、この計測手法には通信遅れを計測するという簡易なものから現在利用できる帯域幅を計測するという高度なものまである。これらを計測して画像情報量を調整することにより通信遅れの変動を緩和することができる。

現在利用できる帯域幅を計測できればこれに合わせて画像情報量を調整できると考えた[5]。計測用パケットを送出して往復の通信遅れを計測してこの結果より計測時点でのネットワークの利用可能帯域幅を推定する[6]。しかし、この手法について実装したところ計測に時間がかかるという欠点を持っていることが判明した。ネットワークの通信遅れは変動するので、計測をできる限り早く行い通信遅れの変動に対応することが重要であると考え、今回この計測手法を用いるのは不適切であるとする。

そこで、計測に時間がかからない手法を考える。伝送している画像データの送受信比と通信遅れを計測する手法を考え、これにより画像情報量を調整できると考えた。マスタサイトは一定時間ごとに受信した画像データ量をスレーブサイトへ報告する。スレーブサイトはこの報告とそれまでに送信した画像データ量を比較することによりネットワーク負荷の状態を判断する。これと同時に、一定時間内にマスタサイトからスレーブサイトに報告がない場合はネットワークの通信遅れが大きいため現状の画像データを伝送するのに不十分な状態であると判断する。この計測手法は簡易なため画像提示システムに対する負荷が少なくすむことから今回はこの手法を用いた。

2.2 画像データの動的操作

スレーブサイトは、ネットワーク負荷の計測結果を基に操作者にとって作業を行うために重要な部分の大きさまたは特に重要ではない部分の画質を変化させることにより、画像情報量を調整する。

ネットワークが現状の画像データを伝送するのに十分な状態と判断した場合は比例関数的に画像データ量を多くすることにより、画像伝送による通信遅れの変動が起こらないように配慮した。逆に現状の画像データを伝送するのに不十分な状態と判断した場合は指数関数的に画像データ量を少なくすることにより、ネットワーク負荷を抑えつつ画像伝送が可能となるように配慮した。これ

により、ネットワークの状態に応じて、安定した画像情報のやり取りができるようにする。

3. 画像提示システムの実装

図1に今回実装した画像提示システムの構成図を示す。本研究では、スレーブサイトのCCDカメラ(VC-C3, キヤノン製)で捕えた作業環境の画像情報に対して、作業内容に応じて重要であると思われる部分を中心としたエリアを操作者があらかじめ指定する。このエリアの中心部分は、カラートラッキングビジョン(TRV-CPW5, 富士通(株)製)によって常にトラッキングされる。図2に操作者によるトラッキングエリアの指定方法を示す。操作者がマウスによりメニューを選択すると、マウスカーソルを中心に四角形状の枠が表示される。それを作業を行うために重要な部分に合わせてマウスをクリックすると、その部分を中心に四角形状の枠が形成される。以後、この枠で囲まれたエリアのことをトラッキングエリアと呼ぶ。

図3に実装したシステムの画像圧縮・伝送方式の概略図を示す。スレーブサイトのカメラで捕らえた作業環境の画像情報は非常にデータ量が大きいため、そのままネットワークを利用してマスタサイトに伝送するのは困難である。このため、画像圧縮手法を用いて画像データ量を低減する必要がある。一般に、動画データはMPEGなどの動画圧縮方式を利用して圧縮される。しかし、提示する画像を均一の画質にするため、画像データ量を低減するために部分的に画質を変更することができない。また、画像データの一部が欠落した場合、正常な画像提示に復旧するまでに時間がかかる。一方、JPEGなどの静止画像圧縮方式を利用した場合、提示する画像を個々に取り扱うので部分的に画質を変更することができる。

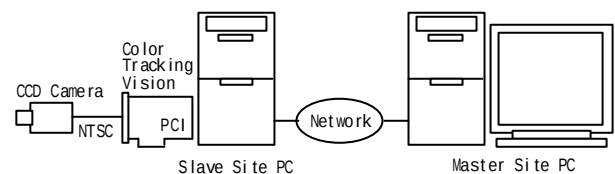


図1 画像提示システム構成図

Fig.1 System configuration of image display

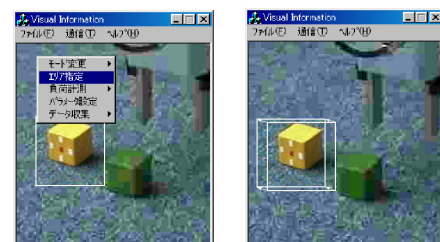


図2 メニューによるエリア指定

Fig.2 Selecting a tracking area using popup menu

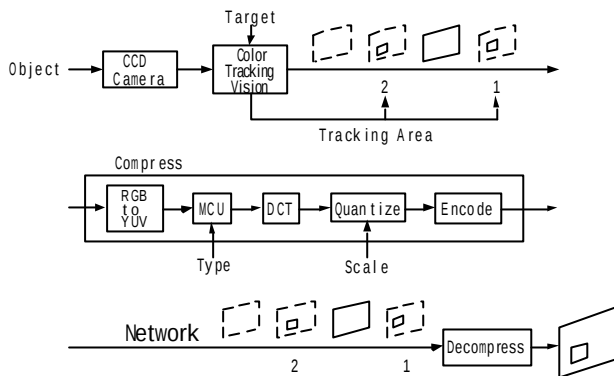


図3 画像の圧縮・伝送方式

Fig.3 Block diagram of compression and transmission of visual data

また、欠落した画像データだけを破棄することにより正常な画像提示に復旧することができる。このため、本研究では画像圧縮に静止画像圧縮方式の1つである JPEG を使用する。JPEG では画質を変更するパラメータである Type, Scale を変えることにより画質および画像の圧縮率を変更できる[7]ことから、画像データ量の調整が可能となる。

コンピュータネットワークを用いて情報伝送する際に、主に利用されている通信プロトコルは TCP と UDP である。TCP は信頼性のあるデータ伝送を行うことができるが、その反面信頼性を確保するために多くの処理を行っている。UDP は信頼性のないデータ伝送を行うが、TCP と違い信頼性を確保する処理がない分だけ処理が簡素化されている[8]。本研究では、カメラで捕らえた画像情報を確実に伝送することよりもできる限り速く伝送することの方が重要であると考え、通信プロトコルに UDP を用いてトラッキングエリア内外の画像データを伝送した。

4. 実験

今回の実験では操作性を、「操作者が効率的かつ容易に位置精度よく作業を行えるかどうかの指標」とし、提案した手法により操作性の低下を防ぐことができることを実験により示すことを試みた。

図4に実験システムの構成図を示す。各機器は LAN(帯域幅:10Mbps)に接続した。実験中のネットワーク負荷の条件を同一にするために画像提示システムとロボット制御システムのネットワークを分けた。また、ネットワークに負荷を加える実験を行う際は、プロトコルアナライザを用いて 29bytes の UDP パケットを送出してネットワーク負荷の変動を模擬した。

タスクは、「提示画面を見ながら、マスタアーム (JOYARM 三井造船(株)製)によりロボットアーム(PA-10, 三菱重工業(株)製)を操作して、画面左側にある積木 A を画面右側にある積木 B の上に位置精度よく積む」作業

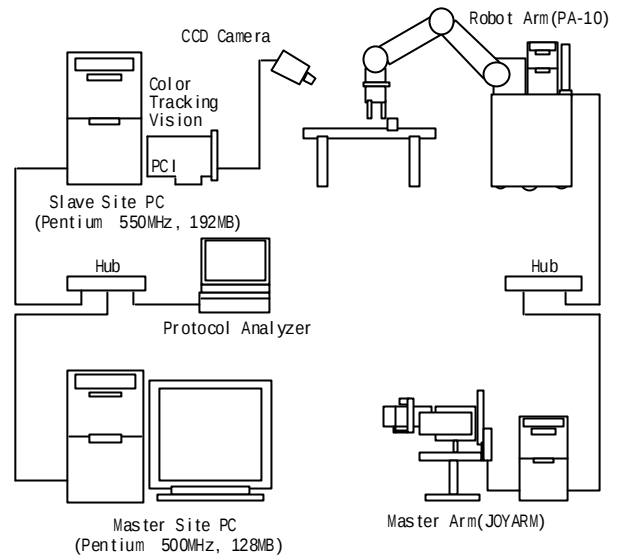


図4 実験システム構成図

Fig.4 Experimental System configuration

とした。このとき、積木は1辺が28mmの立方体のものを使用した。また、2つの積木を80mm離して置き、タスクを実行するごとに積木Bの置く位置を変更した。

実験開始前に、被験者に対して実験システムおよびマスタアームの操作方法の説明を行い、その後数回タスクの練習を行うように指示した。それぞれのタスクに対して、提示画像の水平方向に対する2つの積木の位置決め誤差、ロボットハンドにより積木を把持してから離すまでの時間(これをタスク完了時間とした)とその間のロボットハンドの移動距離を測定した。同時に、被験者に対して提示の快適度(画面の見やすさ)および作業達成度(タスク終了時に積木を位置精度よく積めたかどうかの自己評価)について-3(非常に悪い)~+3(非常によい)の7段階で得点をつけるように指示した。

4.1 予備実験

操作性が低下することなく設定したタスクを実行するのにトラッキングエリアがどの程度のサイズである必要があるかを調査するために、成年男性6名に対して実験を行った。今回のタスクでは画像データ圧縮率が1.3%を下回る画像情報を提示すると操作性が著しく低下することを事前の実験により得ていることからトラッキングエリア外の画像データ圧縮率を1.3%とした。また、エリア内についてはタスクを実行するために必要と考える画質にするため画像データ圧縮率を7.2%とした。図5に画像情報の画質の例を示す。

図6に位置決め誤差の平均と標準偏差、図7にアンケート結果の平均と標準偏差を示す。図6からわかるように、エリアサイズが一辺88pixels以上のときは位置決め誤差の平均が小さい値で推移するが、それを下回るとほぼ倍になった。また図7から、トラッキングエリアのサイズが小さくなると提示の快適度および作業達成度の平均が低い値になる傾向が見てとれる。

表 1 実験条件

Table 1 Experimental conditions

		ネットワーク負荷計測なし	ネットワーク負荷計測あり				
		トラッキングエリアサイズ一定 エリア外の画質一定	トラッキングエリアサイズ一定 エリア外の画質可変		トラッキングエリアサイズ可変 エリア外の画質一定		
ウィンドウサイズ (pixels)		256 × 256					
エリア内の送信レート(Hz)		10					
エリア内外の伝送比率		1:1	1:1	4:1	1:1	4:1	
トラッキングエリアサイズ (pixels)		88 × 88	88 × 88		88 × 88 – 144 × 144		
画像データ圧縮率(%)	エリア内	7.2	7.2		7.2		
	エリア外	1.3	0.9 - 4.1		1.3		
画像データ量(kbytes/sec)		41.8	34.4 - 95.8	20.9 - 36.3	41.8 - 67.1	22.8 - 48.1	
実験条件番号							



(a)非圧縮画像 (b)圧縮画像(エリア内) (c)圧縮画像(エリア外)
データ圧縮率:7.2% データ圧縮率:1.3%

図 5 画像情報の画質例

Fig.5 Examples of Image quality of display

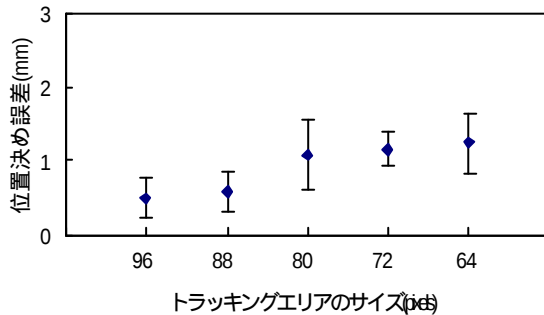


図 6 位置決め誤差

Fig.6 Locational error

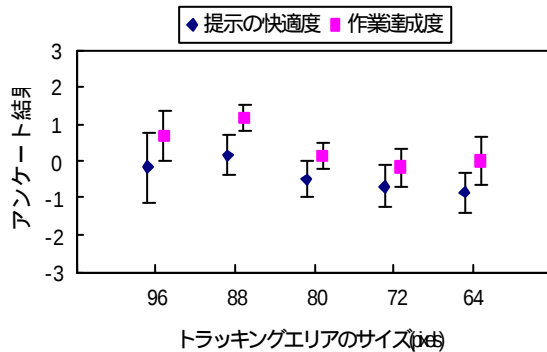


図 7 アンケート結果

Fig.7 Questionnaire result

以上の結果から，トラッキングエリアのサイズが 88pixels より小さくなると操作性が低下することが確認できた．そこで，トラッキングエリアサイズにより操作性が低下しないようにするため，以降の実験ではトラッキングエリアサイズの最小値を 88pixels とした．

4. 2 検証実験

提案した手法の有効性を示すために，成年男女 10 名に対して表 1 に示す 5 つの実験条件 ~ について実験を行った．このとき，ネットワークに対して 1 秒間帯域幅の 80%を占めてその後 1 秒間 0%になるネットワーク負荷を繰り返し加えた．

図 8 に位置決め誤差の平均と標準偏差を示す．図 8 からわかるように， の場合が平均および標準偏差で最も小さい値を示した．これはトラッキングエリア内の画像情報をエリア外に比べて優先的にやり取りしかつエリアのサイズをネットワーク負荷の計測結果を基に可変にすることにより，作業にとって重要な部分の画像情報を他の場合と比べて安定してやり取りすることができたためと考える．一方， の場合が に比べて平均および標準偏差で大きい値を示した．これはトラッキングエリア外の画質が非常に劣化した状態で作業を行うことがあったためまたはトラッキングエリアが作業にとって重要な部分からはずれてしまうことがあったためと考える．

図 9 にタスク完了時間の平均と標準偏差を示す．図 9 からわかるように， の場合が平均および標準偏差で最も小さい値を示した．これは図 8 のときと同様，作業にとって重要な部分の画像情報を他の場合と比べて安定してやり取りすることができたためと考える．一方， の場合が に比べて標準偏差で大きい値を示した．これは被験者のうちの 1 人が位置精度よく作業を行うために作業に時間がかかったためであった．それ以外の被験者はより優位であった．しかし，タスク完了時間が安定しないのは作業を行う際に不利なことであると考え， の場合が優位であると考え．

図 10 にロボットハンドの移動距離の平均および標準偏差を示す．図 10 からわかるように， の場合が平均で

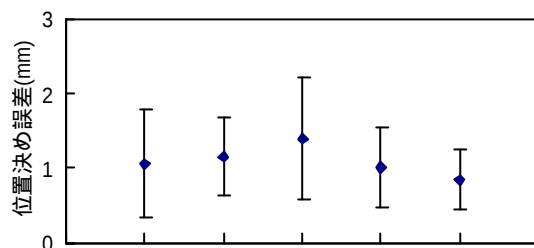


図 8 位置決め誤差
Fig.8 Locational error

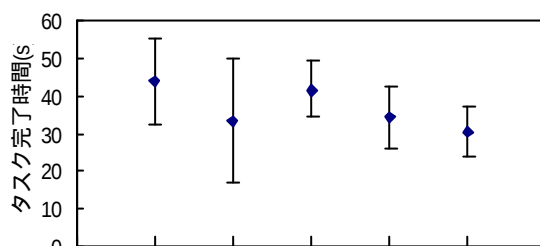


図 9 タスク完了時間
Fig.9 Task completion time

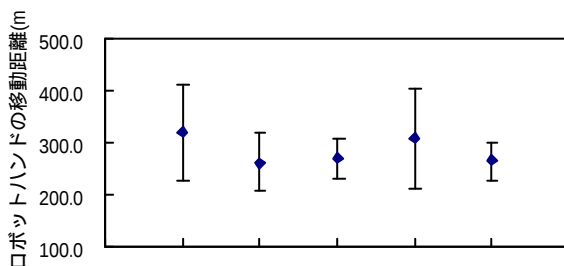


図 10 ロボットハンドの移動距離
Fig.10 Moving distance of robot hand

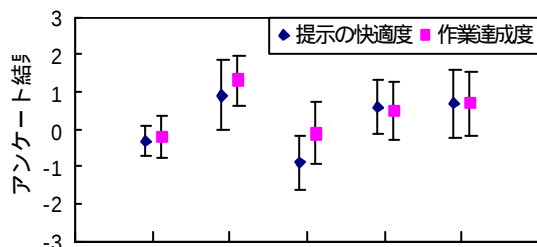


図 11 アンケート結果
Fig.11 Questionnaire result

最も小さい値を示した．これはネットワーク負荷の計測結果を基にトラッキングエリア外の画質を可変にすることにより，積木を積む先を確認するのが容易であったためと考える．一方， の場合が に比べて標準偏差で大きい値を示した．これは の位置決め誤差の平均および標準偏差が に比べて小さい値を示したことから位置精度よく作業を行うためにハンド位置の修正を繰り返したことがあったためと考える．

図 11 に提示の快適度および作業達成度の平均および標準偏差を示す．図 11 からわかるように， の場合が提示の快適度および作業達成度の平均で最も大きい値を示した．これは図 10 の場合と同様，積木を積む先を確認するのが容易であったためと考える．一方， の場合が に比べて提示の快適度の平均で小さい値を示した．このことが， の位置決め誤差が大きい値を示した要因と考える．

4. 3 考察

位置決め誤差，タスク完了時間，ロボットハンドの移動距離，提示の快適度および作業達成度において，すべての場合でネットワーク負荷の計測結果を基に画像情報量を調整した場合がしない場合に比べて優位であったことから，画像情報量を調整することにより操作性の低下を防ぐことができたと言える．このことは提案した手法が有効であることを示している．また，画像情報量を調整した場合の中で と が操作性において優位であった．

の提示の快適度が に比べて平均で大きい値を示すことから操作者にとって提示画像が見やすいのはトラッキングエリア外の画質を可変にしエリア内外のやり取りを同一にした場合であると考えられる．しかし，位置決め誤差については の場合が に比べて平均および標準偏差で小さい値を示したことから作業精度という点では が優位であると考えられる．またタスク完了時間については の場合が優位であり，ロボットハンドの移動距離も に近い値を示した．さらに，表 1 からわかるように， の場合は に比べて画像データ量が少ないのでネットワークを通じて画像伝送するのが容易となる．以上のことから，今回は 4 条件の中で最も操作性の低下を防ぐ画像情報量の調整方法はトラッキングエリアのサイズを可変にしエリア内の画像情報を優先的にやり取りした場合であった．

一方， の位置決め誤差の平均および標準偏差が大きい値を示したのはトラッキングエリア外の画質が非常に劣化した状態で作業をすることがあったためと考える．これは の提示の快適度からも示された． の場合はエリア外の画像伝送がエリア内の 1/4 となるため，一度画質が劣化すると高画質の画像に戻るまでに時間がかかる．このことから，操作性の低下を防ぐためにはトラッキングエリア外もある程度の画質が必要であると考えられる．また，今回はトラッキングエリアの形状を四角形状としたが，これを操作者により任意の形状にした場合については検討していない．任意の形状にすることができれば作

業にとって重要な部分を効果的に提示することができるので今回以上に操作性の低下が防げると考える。

5. まとめ

今回提案したネットワークの状態に応じて画像情報量を調整することにより操作性の低下を防ぐという手法を実装し、実験によりその有効性を示した。今回提案した手法は遠隔操作作業だけでなく、ネットワークを通じて遠隔のものを見るとき、見たい対象がはっきりと決まっている用途にも応用できると考える。例えば、スポーツ観戦における選手の動きや野鳥観察における野鳥のしぐさなどが考えられる。

今後の課題として、作業にとって重要なエリアの形状を操作者が任意に変更できるようにした場合の操作性を検討していく予定である。

謝辞 本研究では、日本自転車振興会の補助により購入された機器を使用している。ここに深く感謝の意を表します。

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, pp458-461, 1999
- [2] 藤本英雄, 佐野明人, 岡本啓史, “インターネットを介した力帰還型バイラテラル遠隔操作”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, 2000
- [3] A.Sano, H.Fujimoto, T.Takai, “Network-Based Force-Reflecting Teleoperation”, Proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, 2000
- [4] 松丸隆文, 川端俊一, 神徳徹雄, 松日楽信人, 小森谷清, 谷江和雄, 高瀬國克, “通信回線 ISDN を利用したロボットの遠隔操作(作業に応じたデータの効率的伝送手法の検討)”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集(CD-ROM), 2CI3-5(1), (2), 1998
- [5] 藤本英雄, 佐野明人, 今井智彦, “ネットワークロボティクスにおける力・視覚の伝送に関する一考察”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第 2 分冊, pp.657-658, 1999
- [6] 藤本英雄, 佐野明人, 今井智彦, “ネットワークロボティクスにおける視覚情報の伝送に関する一考察”, 1999 年映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, pp.95, 1999
- [7] 遠藤俊明, “カラー静止画像の国際標準符号化方式”, インターフェース, pp.160-203, 1991
- [8] D. Comer(村井純, 楠本博之 訳), “TCP/IP によるネットワーク構築(原理・プロトコル・アーキテクチャ)”, vol.1, 共立出版, 1997