

ヒューマン・インタフェースのための通信による 群ロボットのモニタリング手法*

鈴木 剛^{*1}, 横田 和隆^{*2}, 浅間 一^{*3}
嘉悦 早人^{*3}, 遠藤 勲^{*4}

Monitoring Methods of Multiple Robots using Communication for Human Interface System

Tsuyoshi SUZUKI, Kazutaka YOKOTA, Hajime ASAMA,
Hayato KAETSU and Isao ENDO

This paper first discusses cooperation between the human operator and the decentralized autonomous robotic system. To realize cooperation, the operator must know condition of the multi-robot system. Therefore, monitoring methods which let the operator know system's condition are needed. Then strategies of communication between the human interface and agents are discussed. We propose explicit and implicit communication strategies to monitor the system, and several monitoring methods to implement them: time-based and event-based monitoring for the explicit monitoring and eavesdropping messages for the implicit monitoring. We compare the monitoring methods in order to ascertain how much information the human operator can gather in each method using simulation. Finally, the characteristics of each monitoring methods are analyzed.

Key Words: Multi-Robot System, Human interface, Communication, Monitoring, Simulation

1. はじめに

複数台の自律移動ロボットや計算機などから構成される自律分散型ロボットシステムには、複雑な作業や多様な環境への適応性が期待されている⁽¹⁾。従来、この分野における研究では、ロボットの自律化に主な力点が置かれていた。しかし、完全に自律的に作業を行うシステムの構築は技術的に困難であり、むしろ作業に対して人間が介入でき、人間がロボット群と協調して作業を行えるようにする戦略の方が現実的であり、また柔軟なシステムを構築できると考えられる。

本研究では、プラント内の保守・点検や異常箇所の補修といった保全作業のような非定形作業を、人間とロボット群の協調によって行うことを想定する。このような非定形な作業では、どのような事態が発生するか予測が不可能であり、ロボット群に行わせたい作業の内容も状況により変化する。したがって、プラントの状態を人間が判断しながら、状況に応じて任意の時点でロボットに指示できるようにしておく必要がある。

る。また、ロボット群の自律的行動のみでは、あらゆる作業に対処することは困難であるので、それを可能にするには、人間がロボットシステムの機能を補いながら作業を遂行することを考えざるを得ない。

以上述べたような人間とロボット群との協調においては、人間はロボット群の挙動をモニタリングし、ロボット群の稼働状況を把握した上で適切な指示を出したり、操作を行うことが必要となる。本論文では、特にモニタリングに注目し、ヒューマン・インタフェースがロボットシステム全体の情報を収集するためのモニタリングの戦略について議論し、システムの構成要素(エージェント)との通信を用いてこれを実現する手法を提案する。また、本手法の特性を評価し、自律分散型ロボットシステムのモニタリング方法について考察する。特に、ここでは新しいモニタリング手法として、通信内容の傍受というモニタリング戦略についても提案する。

2. 自律分散型ロボットシステムにおける モニタリング

2-1 群ロボットののためのヒューマン・インタフェース
これまで行われてきた、自律分散型ロボットシステムに関する研究では⁽²⁾、各エージェントに通信機

* 原稿受付 1995年12月20日。

^{*1} 准員, 埼玉大学大学院 (〒338 浦和市下大久保 255)。

^{*2} 正員, 宇都宮大学工学部 (〒321 宇都宮市石井町 2753)。

^{*3} 正員, 理化学研究所 (〒351-01 和光市広沢 2-1)。

^{*4} 理化学研究所。

能⁽¹⁾を持たせ、それを使用してロボット群に協調的に作業を遂行させることが主に議論の対象となっており、人間と自律ロボット群とが相互協調的に作業を行うためのヒューマン・インタフェースに関してはあまり議論されていない。また、人間と複数ロボットの協調系に関してこれまで行われている研究⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾では、作業を行うために人間がロボット一台一台を操作しなければならなかったり、逆にロボットの作業計画を人間が行うのみで、直接の操作が行えなかったりしたため、システムの構成や状況が動的に変化するシステムで、人間が複数のロボットと協調してインタラクティブに作業を行うのは困難であると考えられる。

本研究では、図1のような構成の人間-ロボット群システムを想定する。本システムは、人間と複数台の移動ロボット、そして、人間-ロボット間の協調に必要なヒューマン・インタフェースから構成される。ヒューマン・インタフェースは、人間と複数ロボット間で生じる指令や要求、報告など協調に必要な情報交換のための通信機能を有している。このインタフェースを介することによって、他のロボットから見れば、人間もシステム内の構成要素とみなすことができる。このようなシステムにおいて、人間とロボット群との協調を実現するためには、図1(A)の部分である人間-インタフェース間のインタラクションのみならず、図1(B)の部分である、インタフェース-群ロボット間でのインタラクションについても議論する必要がある。特に、情報が各ロボットで分散的に管理されているようなシステムにおいては、人間がロボット群と協調するために、どのように複数のロボットと情報交換するかについて考えなければならない。

本論文では、ロボットシステム内の情報をどのように集め人間に伝えるかといったモニタリング方法に関して議論する。

2.2 群ロボットのモニタリング機能 ここで、人間がシステム内のロボットと協調するためにロボット群を監視する目的で、ロボットのID、位置情報など個別のロボットに関する情報や、システム内の作業状況、通信状況などシステム全体に関わる情報をヒュー-

マン・インタフェースが収集する機能を「モニタリング機能」と定義する。モニタリング機能は、人間とロボットとの協調的作業を支援するための機能であり、システム内の情報を集中的に管理する機能ではない。

インタフェースに関する研究の多くは、カメラやVRなどによる視覚的なモニタリング方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾を用いている。これらの方法では、実画像やCGなどで環境を俯瞰的に観察するものが多く、個々のロボットの動きを視覚的に確認できるため、人間がスーパバイザとして少数のロボットを操作する場合には適している。しかし、人間とロボット群との協調作業を考えた場合、システム内で同時並行的に発生する作業や、それに関係しているロボットの動作などを視覚的に把握するのは不可能である。これらの研究では、このような協調を考えた上での情報の授受に関しては議論されていない。人間とロボット群とが協調的に作業を行うという観点から見ると、自律的に行動しているロボット群から人間に必要な情報を獲得するのは非常に困難であると考えられる。特に、ロボットのエラーを人間が監視するような状況ではなく、作業を協調的に遂行しようとした場合には、協調相手となるロボットが持っている情報、例えば、ロボットの機能や現在位置、作業状況やロボットの状態などをあらかじめ知っておく必要がある。本研究では、このような情報を人間が獲得する手段として、ロボット間で行われる通信を利用したモニタリング機能の実現を提案する。

通信を用いたモニタリングには、次のような特徴が考えられる。図1のようなシステムでは、ロボットが自己の作業や他のロボットとの協調作業のために、多様な情報を交換する通信能力をもともと有しているので、それによって情報を収集し、モニタリングすることが可能となる。また、同じ理由から、モニタリングのために新たなハードウェアやデバイスをシステムに導入する必要がない。表1に人間にとって重要と考えられるシステム内の情報の例を示す。

しかし、その反面、複数のロボットに対してどのように通信し情報収集を行うかが問題となる。さらに、

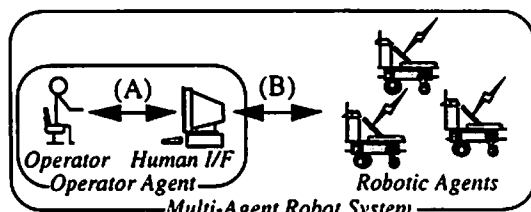


Fig.1 Multi-Agent Robot System

Table 1 Monitored Information

Per agent information	System-wide information
- ID of the agent	- Current status of communication
- Position of the agent	- Current status of all tasks
- Current status of the agent	- Cooperation groups currently in effect
- Capability of the agent	- Changes in environment
- Cooperation group, if the agent is currently participating in one	- Operator actions

どのような通信メディアを使用したとしても、通信の帯域幅が無限に提供されるわけではない。このため、モニタリングのための通信を頻繁に行うと、ロボット間の協調や情報交換のための通信に影響を与え、システム全体の通信パフォーマンスを低下させてしまう。したがって、できる限りシステム内の通信に負荷を与えず、かつ信頼性の高い多くの情報を収集できるモニタリング手法が必要となる。

3. 通信を用いた複数ロボットのモニタリング手法

3.1 通信を用いたモニタリングの戦略 通信を使ったモニタリング戦略は、二つに大別できる。すなわち、明示的通信によるモニタリング(明示的モニタリング)と非明示的通信によるモニタリング(非明示的モニタリング)である。明示的モニタリングでは、ヒューマン・インタフェースは、必要な情報を通信によってロボットに直接問い合わせ獲得する。この戦略では、得られる情報量は多いが、多数のロボットを相手とした場合、通信量が増加し、システム内の通信パフォーマンスを低下させる可能性がある。これに対して、非明示的モニタリングでは、ロボットに直接問い合わせるのではなく、システム内の作業の進行に伴ってロボット間で交わされる通信内容を解析することによって必要な情報を抽出する。この戦略では、モニタリングのための通信による負荷をロボットにかけないため、システム内の通信パフォーマンスを低下させることはない。しかし、得られる情報は通信されている情報量や内容に依存する。表2に各戦略における具体的なモニタリング手法を示す。

3.2 明示的モニタリング手法 明示的モニタリングにおいては、ヒューマン・インタフェースとロボ

ットが直接通信を行うため、その通信のタイミングが重要となる。そこで、通信を行うタイミングとして、時間を基準とした場合と、ロボット内に発生するイベントを基準とした場合とを考える。時間基準の場合は、インタフェースとロボット間で一定の時間間隔で通信を行う。また、イベント基準の場合は、システムまたは個々のロボットにおける特定の事象が起こったときに通信を行う。

3.3 非明示的モニタリング手法 非明示的モニタリングにおいては、新しい手法として、ロボット間で協調のために交わされている通信を傍受するという方法を提案する。これは、主に協調時に行われるブロードキャスト通信をインタフェースが傍受し、その情報を解析して人間へ提供する。この手法では、ロボットと直接通信を行わないので、モニタリングのための通信による負荷をロボットにかけない。このため、システム内の通信パフォーマンスを低下させることはない。ただし、これによって得られた情報は、必ずしも人間に有益であるとは限らない。したがって、収集する情報の選択や、得られた情報の解釈、不足している情報の推論などが必要となり、インタフェース側の負担は大きくなる。

4. モニタリング手法の評価

4.1 モニタリング手法の評価

4.1.1 評価の前提 本章では、3章で提案した各手法の有効性について検討する。具体的には、モニタリングのための通信において、発生する通信負荷と収集できる情報の獲得率の二つを評価した。それぞれの手法において、単位時間当たりの通信回数 F と情報の獲得率 Y を求め比較した。評価に当たり、以下のような仮定をおいた。

(1) 移動ロボットは図2のような十字路とT字路から構成される環境を走行する。

(2) 交差点に挟まれた線分を一セグメントとし、移動ロボットは、セグメントの組合せによって経路を計画し、移動する。

Table 2 Monitoring Methods using Communication

Communication Strategies		Monitoring Methods
Explicit	Time-based	Bi-directional The System Monitor inquires each agent at fixed intervals.
		Uni-directional The agent reports to the System Monitor at fixed intervals.
	Event-based	The agent reports when some events happen.
Implicit	Eavesdropping	The System Monitor eavesdrops messages between agents.

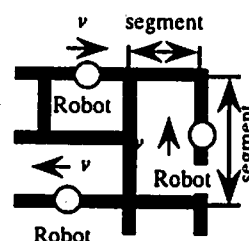


Fig. 2 Environment for Monitoring

(3) 移動ロボットは、一定速度 v で走行し、一つのセグメント内では向きを変えない。

(4) 2台以上のロボットが同じセグメントに進入した場合は通信による衝突回避行動をとる。このとき、先に衝突を検出したロボットは、相手のロボットを特定するために、まず、自分の ID と現在いるセグメント番号をすべてのロボットにブロードキャスト通信する。通信を受けたロボットのうち同じセグメント番号にいるロボットが返答し、回避のための交渉が行われる⁽³⁾。

(5) インタフェースは、ロボットが現在いるセグメントの番号と進行方向を情報として収集する。

4.1.2 Explicit Monitoring まず、Time-based Monitoring について評価する。Bi-directional は一定時間ごとにインタフェースがロボットに情報を要求し、受け取る双方向通信、Uni-directional は、一定時間ごとにロボットが報告する一方向通信である。したがって、一つの情報を獲得するのに、Bi-directional では2回、Uni-directional では1回の通信を行う。

ここで、一定時間 t の間隔で N 台のロボットの情報を収集したとすると、単位時間当たりの通信回数は (N/t) で表される。また、獲得率は、通信を行ったときに、移動ロボットが走行中のセグメントのどの位置にいるかによって変化する(図3)。

通信時に、ロボット R_i が、長さ L_i のセグメントに入ってから l_i の距離にいたとする。 t 秒後に次の通信を行うまでの走行距離 $(v \cdot t)$ が、ロボットがセグメントを通り抜ける距離 $(L_i - l_i)$ よりも小さければ、最初の通信によって得られた位置情報は次の通信時まで信頼できる。しかし、 $(v \cdot t)$ が $(L_i - l_i)$ よりも大きい場合は、その情報を信頼できるのは $(L_i - l_i)/v$ 時間だけである。したがって、システム全体での通信回数と獲得率は次のように表される。

(a) Bi-directional: インタフェースは一定時間 t_a ごとに各移動ロボットに現在位置の報告を要求し情報を受け取る。ただし、 N, v, L_i, l_i はそれぞれロボットの台数、速度、ロボットが走行しているセグメントの長さおよびセグメント内で走行した距離である。ここで、 t_a 時間内に N 台のロボットをモニタするた

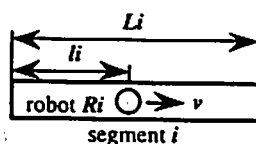


Fig. 3 Definition of Segment

めには $t_a \geq 2 \cdot T \cdot N$ でなければならない。 T は片道の通信時間である。

$$F_a = \frac{N}{t_a}$$

$$Y_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i)$$

$$Y_i = \begin{cases} \frac{L_i - l_i}{v t_a} & \left(\frac{L_i - l_i}{v t_a} \leq 1 \right) \\ 1 & \left(\frac{L_i - l_i}{v t_a} > 1 \right) \end{cases}$$

(b) Uni-directional: 各移動ロボットは一定時間 t_b ごとに現在位置をインタフェースへ報告する。ただし、 t_b 時間内に N 台のエージェントをモニタするためには $t_b \geq T \cdot N$ でなければならない。

$$F_b = \frac{N}{t_b}$$

$$Y_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i)$$

$$Y_i = \begin{cases} \frac{L_i - l_i}{v t_b} & \left(\frac{L_i - l_i}{v t_b} \leq 1 \right) \\ 1 & \left(\frac{L_i - l_i}{v t_b} > 1 \right) \end{cases}$$

Event-based Monitoring に関しては、移動ロボットが報告を行うきっかけとなるイベントを決定しなければならない。ここでは、以下の2種類のイベントについて考察した。Event-based では、モニタリングの効率性は、イベントが発生する頻度に依存する。

(c) Segment entrance event: 各移動ロボットは新しいセグメントに入るごとに現在位置を報告する。

$$F_c = P_c N$$

$$Y_c = \frac{F_c}{N} = \frac{P_c N}{N} = P_c$$

ただし、 P_c は単位時間内に移動ロボットが新しいセグメントに入る頻度である。

(d) Turn event: 各移動ロボットは交差点で曲がるごとに現在位置をインタフェースへ報告する。ただし、 P_d は一台の移動ロボットが単位時間内に交差点で曲がる頻度である。

$$F_d = P_d N$$

$$Y_d = \frac{F_d}{N} = \frac{P_d N}{N} = P_d$$

4.1.3 Implicit Monitoring 非明示的モニタリングでは、情報収集のために通信を行わないので、通信負荷はかからない。また、獲得率はシステム内の通信量に依存する。

(e) Eavesdropping Messages: インタフェースは各移動ロボットが衝突回避時に行うブロードキャスト通信を傍受する。

Table 3 Conditions of Simulation

Velocity of a robot v (m/sec)	0.2
The duration of one-way communication T (sec)	0.18
The number of segment in the map (segments)	201

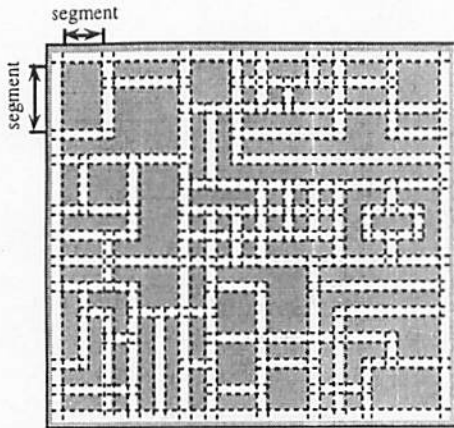


Fig. 4 Simulation Environment

$$F_e = 0$$

$$Y_e = \frac{N P_e}{N} = P_e$$

ただし、移動ロボットは通信時に、互いに現在位置と進行方向を知らせると仮定する。 P_e は移動ロボットが単位時間内に衝突する頻度である。

4.2 シミュレーション ここで、イベントの発生頻度や衝突回避の頻度は、環境やロボットの配置の条件により異なるため一概に定義できない。そこで、前述の解析をもとに、図4のような環境においてシミュレーションを行い、それぞれの手法の評価を行った。

移動ロボットは、スタートとゴールのセグメントをランダムに決定し、その間の最短経路を計画し走行する。また、各ロボットおよびインタフェースは通信機能⁽³⁾を有しており、これにより通信を行う。この通信は、メッセージ・プロトコル・コア⁽³⁾と呼ばれる通信プロトコルを使用して行った。ヒューマン・インタフェースは、各ロボットが走行している間、一つのモニタリング手法を使い、ロボット群から情報を収集する。ここでは、通信の衝突も考慮し、一度に許容量以上の通信が発生した場合には、インタフェースはその情報を取りこぼすこととした。また、ロボットの速度や通信の遅れ時間については、本研究で使用しているハードウェアの値を用いた。

以上の条件下で、ロボットの台数を20台から180

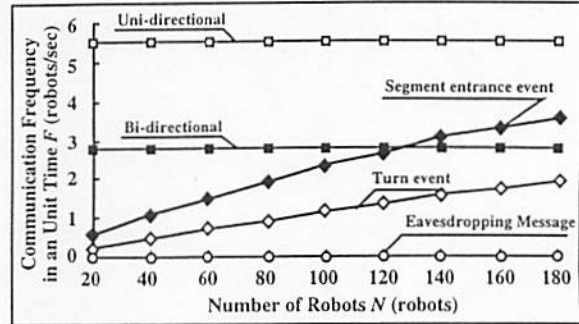


Fig. 5 Communication Frequency

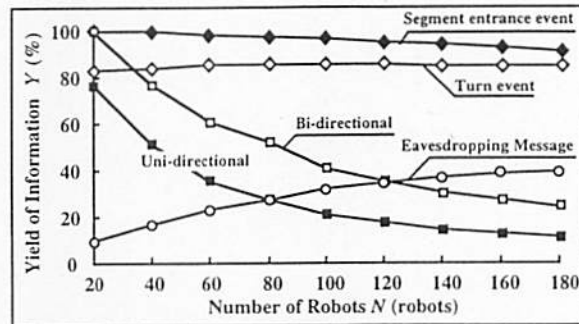


Fig. 6 Yield of Information

台まで変化させシミュレーションを行った。シミュレーションは各手法についてそれぞれ100回行い、その平均を結果とした。表3にシミュレーション条件を示す。

5. モニタリング手法の考察

シミュレーションの結果を図5、図6に示す。図5は環境内のロボット台数に対する、単位時間当たりのインタフェース-ロボット間の通信回数を表している。また、図6はロボットの台数に対する情報の獲得率を表している。

Time-based Monitoringでは、Bi-directional, Uni-directionalとも、ロボットの台数によらず単位時間当たりの通信回数が一定であるため、常に一定の通信負荷がかかる。この手法において、図6の結果は最も密に通信を行っている状態であり、他の通信は行えなくなっている。また、ロボットの台数が増えると、ロボット一台について、次のモニタリングまでの間隔が長くなり、その間の位置情報が得られなくなるので、獲得率が低下する。したがって、多数のロボットが存在する環境下ではTime-based Monitoringは有効ではない。

Event-based Monitoringでは、獲得率は非常に高いが、ロボットの台数とともに通信回数が増加する。

ここで、インタフェースとシステムの間で、単位時間内に通信できる最大の台数、特に本システムでは単位時間内に6台(1/T台)以上の通信が起こった場合、インタフェースはすべての情報を受け取ることができずに通信の取りこぼしがおこり、得られる情報の獲得率は低下する。Event-basedでは、モニタリングの特性は選択するイベントに依存する。シミュレーションでは、選択したイベント(Turn event)と、移動ロボットの作業(目的地への移動)、および収集する情報(位置情報)が、相互に関連していたため、高い評価が得られたと考察できる。

Implicit Monitoringの場合、システムにはモニタリングのための通信負荷がかからないため、常に通信回数は零である。また、情報の獲得率はシステム内の通信量に依存し、システム内で起こるロボット間の通信が多いほど、多くの情報を獲得できる。ただし、この手法でもシステム内の通信が増えて通信の帯域幅を超えると、通信の取りこぼしのため獲得率の低下が起こる。しかし、この場合モニタリングのために通信が飽和しているのではないことに注意する。また、このシミュレーションでは、傍受する情報を位置情報のみとしているため、情報の解釈などを行う必要はなく、このための負担はインタフェースにはかかっていない。他の情報を取り扱う場合には、収集する情報の選択や解釈、推論などを行う必要があり、このときに生じる負荷についても検討しなければならない。

このような各手法の特性については、異なる環境、シミュレーション条件においても、同様の傾向の見られる結果が得られた。これらの特性から、通信を用いたモニタリングにおいては、情報の獲得率の面ではイベントベース、通信負荷の面では傍受が優れているといえる。つまり、システム内のロボットの台数が少ない場合や、通信の帯域幅が充分であり通信を頻繁に行っても通信に影響がでない場合、あるいは、通信負荷よりも情報の獲得率を重視したい場合にはEvent-basedが適しており、逆に、ロボットが多数の場合や通信の帯域幅が少ないなど、あまり頻繁に通信を行えない場合には、通信負荷が全くないEavesdroppingが適していることが明らかになった。

このように、通信負荷と獲得率は同時には成立しないため、システム構成などが動的に変化するシステムでは、その状況に応じたモニタリング手法を選択する必要がある。したがって、自律分散型ロボットシステムにおけるモニタリング戦略では、協調作業やシステムの状態から要求される、通信負荷と情報の獲得率との間のトレードオフによるExplicitかImplicitのど

ちらが有効かの評価が重要となる。さらに、このようなシステムでは、作業状況によっては獲得率は低くても常に情報が必要な場合など、さまざまな場面が考えられる。通信戦略を切り換えて使う場合、この評価に加えて、システムの状態を理解し戦略を切り換えるためのインタフェースの自律性に関する議論が必要がある。

6. おわりに

本論文では、人間が群ロボットシステムの状態を把握するための通信を用いたモニタリング手法について議論した。明示的・非明示的なモニタリング戦略において、傍受という新しい手法も含め、いくつかのモニタリング手法を提案した。各モニタリング手法をシミュレーションにより評価し、それぞれの特性を明らかにした。また、これより、システムの状態に対応した動的モニタリング戦略について考察した。

本手法は、人間とロボット群の協調を実現する要素として、インタフェース-ロボット間のコミュニケーションに重点をおいた。しかし、実際に協調を実現するためには、インタフェースがどのように人間とロボット群の状態を理解するかといったインタフェースの自律性についての議論が必要であり、さらに、人間、インタフェース、ロボット群といった、システム全体における情報の授受について検討する必要がある。

文 献

- (1) 淺間一, マルチエージェントから構成された自律分散型ロボットシステムとその協調的活動, 精密工学会誌, 57-12(1991), 2117-2122.
- (2) Matsumoto, A., ほか4名, Communication In The Autonomous And Decentralized Robot System ACTRESS, Proc. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, (1990), 835-840.
- (3) 尾崎功一・ほか4名, 自律分散型ロボットシステムのための無線通信システムの開発, 精密工学会誌, 61-8(1995), 1136-1140.
- (4) 長谷川公明・ほか3名, 人の直感的動作を利用するマイクロロボット群の遠隔操作システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95講演論文集, No. 95-17, A(1995), 531-534.
- (5) 森島昭男・平井成興, マルチロボットによる作業計画の研究, 第12回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, (1994), 999-1000.
- (6) 木村浩・ほか3名, 人間が操縦するロボットとの協調-動作理解による補助-, 第12回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, (1994), 851-852.
- (7) 中内瑠・ほか4名, RT-Michele: 分散環境に対応したヒューマン・ロボット・インタフェースシステム, 日本ロボット学会誌, 12-3(1994), 431-438.
- (8) Adams, J. A., ほか9名, Cooperative Material Handling by Human and Robotic Agents: Module Development and System Synthesis, Proc. IEEE International Con-

- ference on Intelligent Robots and Systems*, (1995), 200-205.
- (9) Miner, N. E. and Stansfield, S. A., An Interactive Virtual Reality Simulation System for Robot Control and Operator Training, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1994), 1428-1435.
- (10) Gandolfo, F., ほか2名, Visual Monitoring of Robot Actions, *Proc. International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, (1991), 269-275.
-