人間が操作する複数移動ロボットシステムの開発*

中村明生^{*1}, 太田 順^{*2}, 新井民夫^{*2}
柿田 新次郎^{*1}, José BELTRÁN-ESCAVY^{*1}Development of a System for Multiple Mobile Robots Controlled
by a HumanAkio NAKAMURA^{*3}, Jun OTA, Tamio ARAI,
Shinjiro KAKITA and José BELTRÁN-ESCAVY^{*3} The University of Tokyo, Dept. of Precision Machinery Engineering,
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In this paper, we propose an operation method to easily control multiple mobile robot groups by a single human user and build a system in which the human user and the robots achieve tasks cooperatively. We do research on command and monitoring. Regarding command, we divide the orders from the user into levels and consider the relationship between orders and necessary autonomy of the robots. As for monitoring, we give information on a display, which shows the image of the work area. The user can monitor a remote environment and simultaneously obtain information needed for operation. By designing this methodology, our system has a flexible command structure, adaptable to robots of varied capabilities. That is the main advantage of our method. We verified the efficiency of our system by means of experiments.

Key Words: Moving Robot, Human Interface, Group Control, Multiple Robots, Cooperation

1. 序 論

近い将来, 産業分野で使用されている据え置きロボットではなく, 移動機能を有する知的ロボットが社会のさまざまな分野に進出し, 一般的な環境において人間に代わって作業を行うことが期待される。その実現のためにさまざまな研究が行われているが高度な機能を1台のロボットに実装するのではなく, 複数台の協調により, より柔軟な作業の実現とその欠点の補完を意図するアプローチが近年盛んである。これはコスト・サイズ・耐故障性といった面での利点も大きい。

複数ロボットがある環境で作業をするためのアルゴリズム・作業計画等に関してさまざまな研究^{(1)~(7)}が行われてきたが環境依存, 作業依存的なものが多く, 決定的な手法はいまだ提案されていない。これは移動ロボットの環境認識能力の不足, また予想外の事態には満足な対応ができない再計画能力の不備といった要因が考えられる。その際, 人間がロボット側の不備を補えばロボットが自律的には実行困難な作業の実現も

期待できる。

人間が存在することでプログラミングの段階で予想不可能な事態にも対応可能である。また, 人間が役割を変更することでロボットの能力・機能に応じた協調形態が期待できる。人間とロボット群の協調システムについて, 以下の点を考慮する必要がある。

- 一人の操作者が複数ロボットに適切な指令を与えなければならない。
- ロボットが有する機能のバリエーションに応じた指令を考える必要がある。逆に, ある指令を与えるためにはどのような機能が必要か, 明確にすべきである。
- 複数ロボットの情報を人間に提示する必要がある。

従来の人間-ロボット協調に関しては, 遠隔操作の分野で多数の研究^{(8)~(12)}が行われているが, おもに単体を操作対象とする場合が多い。佐藤らの MEISTER システム⁽⁹⁾はそれまでのスーパー・バイザリ制御とは異なり, 人間とロボットの役割が動的に変化する特徴を有しており, 化学実験によって有効性を示している。また, 重量物を扱う場合を想定し, 1台のマスターで複数台のスレイブを制御する研究もある^{(13)~(16)}。小菅ら⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾は, 操作対象物の動きを Gross Motion と Fine Motion に大別し, 人間は Gross Motion を制御することで多数マニピュレータを操作する煩雑さを

* 原稿受付 1998年12月21日。

^{*1} 東京大学大学院 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*2} 正員, 東京大学工学系研究科。

E-mail: nakamura@prince.pe.u-tokyo.ac.jp

克服している。これらの研究ではある特定の機能を有するマニピュレータを対象としており、機能に応じた指令のあり方についての議論はほとんどない。

複数ロボットを対象とした研究もなされている^{(17)~(21)}。長谷川らの研究⁽¹⁷⁾はインタフェース面に重点をおいた研究であるがこれもロボットの機能を固定して論じており、機能に応じた指令という観点からは不十分である。鈴木ら⁽¹⁹⁾は作業として原子力プラント内での点検作業を想定し、また、指令のレベルについて触れているが、組立作業等を含むより一般的な作業について言及していない。

本論文では作業実行状況を監視し、適切な指令を下す人間を取込んだ人間-ロボット群系アーキテクチャを提案する。そのため、以下のアプローチを採用する。一人の操作者が複数ロボットを操作する問題に関しては、複数ロボットを群として扱い、群全体に対して操作指令が与えられ、ロボットの機能・状況に応じて適した個別指令が生成されるとする。また、異なる機能のロボット群に対応する統一的なシステムを構築するために指令をレベル分けし、人間が状況に応じて介入の割合を変更できるものとする。すなわち、人間は個別ロボットを直接操作する段階から対象物の動作を制御する段階まで状況に応じてシステムに柔軟に指令する。また、人間への情報提示は操作画面にスーパーインポーズすることで行う。

作業としてはロボットの移動により実現されるもの、つまり押し操作を中心とする搬送作業を想定して実際のシステムを構築し評価を行う。

本論文の概要を以下に示す。2章で本論文で扱う問題を設定し、操作指令の設計(2.1節)、監視システムの設計(2.2節)を行う。3章で実際のシステムについて説明する。4章ではロボット群による搬送実験を行い、システムおよび手法の有効性を示す。最後に5章で結論を述べる。

2. ロボット群と人間

人間とロボットが協調する場合、両者が情報を共有することが必要となる。これは文献(22)においても指摘されている。一人の操作者がロボットを操作することを考える。ロボットが1台の場合、操作者はその1台に注意を集中することが可能である。しかし、複数台のロボットを対象とする場合、ロボットに対して適切な指令を出し、かつ的確にロボットの状況を把握することは困難である。人間-ロボット群系のキーワードは一对多ということが出来る。ここで、問題を二つに分割して考える。人間からロボット群への情報の流

れ、すなわち指令方法について、ロボット群から人間への情報の流れ、すなわち情報提示方法についてである。

2.1 ロボット群操作 本論文では、複数ロボットを群として扱い、その群に対して指令を送る方式を採用する。また、操作者は群に対して全体的な指令のみを与えるにすぎず、精密な操作性が欠如しており、各ロボットの状況によっては不都合がある場合が想定されるが、その場合は各ロボットが自律的に操作者からの指令を補完する形で行動する。概要を図1に示す。通常は人間からの指令に従うが、センサ情報によってコンピュータから指令が発行される場合や、ロボットのリアクティブな自律行動が発現する場合があり、人間からの指令を補完しつつ作業を実行する。これで人間の制御量の減少を図る。

2.1.1 指令の分類 複数ロボットを一人の操作者が同時に操作する場合、操作者によるロボット操作と、ロボット系の自律的行動が協調するために、作業内容、作業状況に応じて人間とロボットの共同形態を柔軟に変化させることが必要となり、ロボット群を的確に操作するための指令の設計が重要となる。しかし、どのような操作指令を実装すべきか、どのような機能をロボット群にもたせるべきか、ということに関しては不明である。以下の点に注目する必要がある。

- どのような指令の階層構造が人間にとって自然か？
- ロボットの機能実装の際の利便性を考え、どのような構造が適当か？

産業界においては、産業用ロボットを対象としたロボット言語において指令対象・言語処理機能別の分類がなされている。そこでその分類を参考にしてロボット群に対する指令を設計する。ロボット言語の分類に

Fig.1 Concept of the proposed system

ついては、文献(23)、(24)を参考とした。

ロボット言語を参考にしたのは上記の2点に沿っているであろうと考えたからである。指令を分類するにあたり、以下の手順を用いる。

手順1 指令を4種類に分類する。

手順2 さらに、指令内容の面からそれぞれ2レベルに分割する。

手順3 レベル間の機能の差を補完する形で必要となる自律機能を考慮する。

上記の3手順に従って分類することで、系統的な指令設計を目指す。表1にその分類結果を示し、以下、その詳細について述べる。

操作者からの指令を動作主体に対するもの、動作対象に関するもの、作業自体と分類する。動作主体に関してはまずロボット、次には複数ロボットを一括して扱える指令が必要であると考え、ロボット群を考える。すなわち、単体ロボット、ロボット群、作業対象物、作業の4種類が考えられる。分類した指令それぞれについて、動作の逐次指令(経路の逐次指令、直接的に動作を指令するという意味で「直接操作」と呼ぶ)、最終状態の指令(直接的に逐次動作を指令するのではないので、「間接操作」と呼ぶ)の2レベルに分類を行う。

単体ロボット：経路を逐次的に指定するレベル(1-B 直接操作)と目標位置・姿勢を指定して、ロボットが自律的にそこまで移動するレベル(1-A 間接操作)に分類できる。単体ロボットを対象とする場合、最も直感性が高い反面、複数台となった場合、同様の操作を台数分繰返す煩わしさがああり、操作者への負荷の増大が予想される。

ロボット群：単体ロボット同様、経路を指定するレベル(2-B 直接操作)、目標位置・姿勢を指定するレベル(2-A 間接操作)が考えられる。

作業対象物：作業対象物の経路を逐次的に指定するレベル(3-B)、目標位置・姿勢を指定するレベル(3-A)がある。このレベル以上では個々のロボットの動作はシステムが自律的に生成する。

作業：作業全体を指令する場合は、部品の位置・姿勢・状態・組立順序といった作業手順を指令するレベル(4-B)、作業の最終状態を指令して、作業手順まで自動生成するレベル(4-A)に分類できる。物体の組立作業を例にとると、最初に部品Aを位置*a*に、次に部品Bを位置*b*に、次に部品Cを位置*c*に、最後に部品Aの辺に沿わせつつ、部品Bと部品Cを組合せるといった作業手順を指令するのが4-Bのレベルである。

以上、手順1, 2について説明を行ったが、単体ロボットの経路指定レベルから、作業目標指定レベルまで、レベル間の機能差が存在する。この指令レベルの機能差を補完するものとして、ロボットおよびシステムの自律機能を考える。障害物回避機能(obstacle avoidance)、動作計画機能(motion planning)、同期機能(synchronized motion)、自動配置機能(self-disposition of robot)等が考えられる。簡単に説明する。1-Bから1-Aに指令レベルを上げるためには、単体ロボットの障害物回避機能および目標位置までの経路計画機能が必要となる。1-Bの場合は人間が障害物を回避しつつ目標位置までロボットを誘導するため、前述の機能は不要であるのに対し、1-Aの場合は目標位置を設定するのみであるためである。ロボット操作レベル1からロボット群操作レベル2-Bに指令レベルを上げるためには、障害物回避機能と個別ロボット間の同期機能が必要となる。2-Bにおいて人間がロボット群を目標位置まで誘導することは1-Bと同様であるが、ロボット群としてのまとまりをもたせるためにもこれらの機能が必要となる。このように上位レベルの指令を下位レベルの指令から実現するための機能の差分を考えていく。

以上の分類により、以下の結果が得られた。

●指令対象、指令内容に基づき分類を行うことにより、各レベルにおいて必要とされる指令について明確化できた。また、機能に応じた指令を考えることで、例えば障害物回避機能をもっていないロボットはレベル1-Bの直接操作で、ロボット群の経路計画機能を有するロボットは2-Aの間接操作で、とロボット群の有する機能に応じた対応が一つのシステムで可能であ

Table 1 Order levels

	Level	Order Contents	Autonomy to be needed
Task	4-A	Objective	<i>Task planning</i>
	4-B	Process	<i>Motion planning of objects</i>
Object	3-A	Objective (Goal Position)	<i>Motion planning of an object</i>
	3-B	Process (Path)	<i>Self-disposition of robots</i>
Group	2-A	Objective (Goal Position)	<i>Motion planning of a group and each robot</i>
	2-B	Process (Path)	<i>Obstacle avoidance of a group & Synchronized motion</i>
Robot	1-A	Objective (Goal Position)	<i>Motion planning of a robot</i>
	1-B	Process (Path)	<i>& Obstacle avoidance of a robot</i>

る。

●さらに、各レベル間の機能の差を補完するよう自律機能を導入することで、必要となる自律機能が判明した。

●最も単純かつ直感的な操作が可能であると思われる単体ロボットからボトム・アップ的に議論を進行させた結果、系統だった分類が可能となった。

2・1・2 項では本項における指令分類に基づいた実際の操作指令について説明する。作業対象物に指令、あるいはシステムに作業を指令する場合は、高度な自律機能、認識・計画・処理機能がシステムに要求される。本論文においては、あくまで指令対象はロボットおよびロボット群に限定して議論を進める。つまり、3-B から上の部分は人間が担当する部分とし、指令設計は2-A までの部分を対象として行う。

2・1・2 指令の設計 2・1・1 項で行った指令分類に基づき、実際の操作指令の設計を行う。実際に操作する単位としては、群を基本とする。単体ロボットの操作は、構成要素一台の群とみなすことで実現する。

操作指令について、表1に基づき、

1. 指令レベルに基づく操作指令
2. 自律機能に関する操作指令
3. その他

に分類して説明する。なお、コマンド名はイタリック体で表記する。その他はグループ化、ロボット選択、設定等に関するコマンドであり、詳細は省略する。

(1) 指令レベルに基づく操作指令

●直接操作：操作者が逐次的に経路を指定することでロボット、ロボット群を操作する(図2)。

-go forward/backward

-spin turn CW/CCW

-rotate formation CW/CCW

●間接操作：操作者が目標位置を指定、ロボット、ロボット群は自律的に移動する(図3)。

Fig. 2 Examples of direct commands

Fig. 3 Examples of indirect commands

-go to a destination point

-aggregate toward a point/disperse from a point

-aggregate to a line segment/disperse from a line segment

-contouring

-equal distribution on a line segment/a circle

以上、操作指令について述べた。これらの指令を設計するにあたり、ドロー系描画ソフトのツールを参考にした。作業を行う上での必要十分性については、実際に使用を重ねた上で使用された指令、またその頻度を観察することにより検証される。本論文ではその議論は行っていない。

(2) 自律機能に関する操作指令

表1の自律機能を実現するために必要な機能として、

obstacle avoidance-障害物を検知した場合、*following the wall*(壁沿い走行)を行う。

motion planning-目標点に向かって直線軌道で進む。

障害が存在した場合、*following the wall*で回避する。

synchronized motion-複数ロボットが同期をとる。

以上の機能を実装し、その切り替えコマンドを用意した。

2・2 ロボット群監視

ロボット群から人間へ、すなわち多から一への情報の流れについて説明する。複数ロボットを適切に制御するためには操作者が適当な情報を得る必要があるが、ロボット台数が増加するに従ってシステム状況の把握は困難となる。情報過多・不足どちらに偏向した場合も、好ましくない操作の原因となる可能性がある。そこで、操作者にとって最低限必要となると想定される情報およびその提示方法を以下に挙げる。

●操作対象として選択されたロボットの表示：ロボットの輪郭を赤色で縁取りする

●ロボットの位置・姿勢・速度：別ウィンドウに数値で表示する

●接触センサによる物体との接触情報(接触・非接触)：ロボットの周囲を青枠で囲む

●ロボット ID：ロボット下部に緑色数字で表示

●グループ ID：ロボット上部に黄色数字で表示

図4に示すように、作業領域を表示するためのウィンドウに、簡単な図形でかつ色分けして情報を表示することで状態把握を容易とする。画像上に必要情報をスーパインポーズ表示することにより、他に注意を逸らされることなく獲得可能となる。現在選択されていないグループ情報、各ロボットの位置・姿勢・速度等は別のウィンドウを用意し、そこに表示する。これら

Fig. 4 Interface window

Fig. 6 Operation view

Fig. 5 Schematic view of our system

の情報は常に必要なものではないので、別ウィンドウに配置しても問題はない。

3. 操作システムの構成

システムの構成の概念図および実際の操作風景をそれぞれ図5, 6に示す。システムはユーザ・インタフェース、コンピュータ、ロボット、監視の四つのモジュールから構成される。

ユーザ・インタフェース・モジュールはインタフェースへの親和性を考慮し、GUI(Graphical User Interface)を採用する[図7(a)参照]。GUI画面は三つのウィンドウより構成される。インタフェース・ウィンドウ、インフォメーション・ウィンドウ、ツール・ウィンドウである。入力デバイスは市販のマウスであり、特別な機器を必要としない。

インタフェース・ウィンドウ：作業領域の状況を表示するウィンドウ。この画像上でクリック、あるいはドラッグすることでロボット群を選択できる。また、ドロー系ソフトの要領で簡単な図形(点、円、長方形、だ円)等を描くことでロボット群に対する目標点の指示も行ふ。また、2・2節でも述べたとおり、選択情報、接触情報がスーパインポーズ表示される。

インフォメーション・ウィンドウ：ロボットの位

(a) User interface (b) A robot and attachment

Fig. 7 User interface and a robot

置・姿勢・速度等を表示するウィンドウ。また、グループ化の履歴も表示される。履歴中からグループを再度選択することも可能である。

ツール・ウィンドウ：設定およびコマンド発行のためのアイコンが並んでいる。クリックにて入力する。

コンピュータ・モジュールはインタフェースの統括、画像処理、ロボットの制御を担当する。監視モジュールはおもに CCD カメラからなり、画像はコンピュータで処理される。ロボット・モジュールは小形ロボット Khepera とそれに搭載したセンサからなる[図7(b)参照]・Khepera はスイス・ローザンヌ連邦工科大学(Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-EPFL)で開発された小形ロボットである。ここでは赤外線近接覚センサを用いて障害物認識を行い、接触センサを用いて物体との接触検知を行う。また、ロボットの位置・姿勢・接触状態検知用に5個のLED配列をロボット頭部に搭載する。詳細は文献(21)参照。

4. 物体操作作業実験

本章では、3章で提案したシステムの有効性を検証するための物体操作作業実験を行う。一定の条件下でロボット群が対象物を押すことにより簡単な作業を実行する。

4・1 挿入作業実験 5台のロボットを用いて、凸状物体を凹状物体を挿入する実験を行う。図8(a)がロボットの初期配置、図8(b)が目標状態である。なお、画面中央の正方形物体は固定障害物である。実験目的は以下を確認することである。

I. 単体ロボット操作とロボット群操作の効率の違い

II. 直接操作と間接操作の効率の違い

以上の2点を確認するために、表2のとおり機能を限定し、結果を比較する。段階別に内容を説明する。

条件1 単体直接操作：おもに、直接操作コマンド使用。

step 1 1台ごとに直接操作にて対象物近傍に移動させる。障害物回避機能なし。

step 2 1台ごとに直接操作にて対象物周辺の所定の位置に配置する。

step 3 グループ化し、直接操作にて対象物を押し、搬送する。

条件2 グループ直接操作：おもに、直接操作コマンド使用。

step 1 グループ化し、直接操作にて複数台を一括して対象物近傍に移動させる。障害物回避機能なし。

step 2 1台ごとに直接操作にて対象物周辺の所定の位置に配置する。

step 3 グループ化し、直接操作にて対象物を押し、搬送する。

条件3 グループ自律移動：おもに、間接操作コマンド使用。

step 1 グループ化し、対象物近傍に間接操作にて複数台を一括して移動させる。障害物回避機能あり。

step 2 線を画面の上に引き、その線上にグループを等間隔に自動配置させる。

step 3 グループ化し、直接操作にて対象物を押し、搬送する。

条件1と2の結果比較によりIの確認、条件2と3の比較によりIIの確認が可能である。

被験者は2名、試行は表2の各条件につき3回、評

(a) Initial position (b) Final position

Fig. 8 Start and final positions for transporting experiment

価指標は作業時間である。結果を図9に示す。縦軸は被験者2名に対して各3回、計6回の試行の平均時間である。図9より以下のことがわかる。

●条件1, 2の比較により、単体操作に対するロボット群操作の有効性を確認(複数台一括操作の効果)。

●条件2, 3の比較により、直接操作に対する間接操作の効率を確認[ロボット群の直接操作(条件2)の場合、必要以上の障害物回避操作をする傾向が見られる]。

条件1, 2は直接操作なので人間が全作業時間にわたってロボット群操作にかかわる必要があるのに対して、条件3の間接操作の場合は、指令を与える時間のみである(図9の最も右の棒グラフ)。人間がロボット群操作に関わる時間は大幅に減少しているのに対し、同様の作業効果が得られたことで、効率的であるといえる。

条件3の搬送作業の例を図10に示す。[]内はコマンド名、< >内は自律機能である。

(a) 初期配置。ロボットには0~4のIDがつけられ、グループ0として登録されている。その後、グループ化を行う。ロボット0, 1をグループ1、ロボット2, 3, 4をグループ2として登録。長方形領域をマウス・カーソルで描くことで、複数ロボットを一度で選択する[robot selection & group the selected robot]。選択されたロボットは赤色で縁どりされ、操作者に視覚的に選択情報を提示する。

Table 2 Experimental conditions

	Step 1	Step 2	step 3
Condition 1	Single/Direct	Single/Direct	Group/Direct
Condition 2	Group/Direct	Single/Direct	Group/Direct
Condition 3	Group/Indirect	Group/Indirect	Group/Direct

single: a single robot group: a robot group

direct: direct operation indirect: indirect operation

Fig. 9 Conditions and time

Fig. 10 Assembly task

(b) グループ1を選択, グループ1に対し, 目標となる線分を描き, 移動させる [*group selection & define areas & equal distribution on a line segment & execute command*].

(c) グループ1の移動完了. 線分上に等間隔に配置されている. この場合, グループ1に所属するロボットは2台なので, 線分の両端に位置することになる. その後, 姿勢が90°となるようその場旋回させ, 凹物体へ正対させる(アプローチ終了)[*spin turn-B*].

(d) グループ2を選択, グループ2に対し, 目標位置を設定し, 移動させる [*group selection & define areas & go to a destination point & execute command*]. 目標位置は赤色で表示される.

(e) グループ2が移動開始. ロボット2と3が障害物を検知し, 壁沿い走行にて障害物回避を開始する [*obstacle avoidance of a robot*].

(f) グループ2移動中. ロボット3は障害物回避行動から脱し, 目標位置への移動行動へ移行, ロボット2は壁沿い走行続行.

(g) グループ2移動中. ロボット4, ロボット3が目標位置に到達. ロボット2は障害物回避行動から脱し, 目標位置への移動行動へ移行.

(h) グループ2が目標位置に移動完了, グループ

2に対し, 目標となる線分を描き, 移動させる [*define areas & equal distribution on a line segment & execute command*].

(i) グループ2の移動完了. 線分上に等間隔に配置されている. グループ2に所属するロボットは3台なので, 線分の両端, 中央に位置する. その後, 姿勢が180°となるようその場旋回させ, 凸物体へ正対させる(アプローチ終了)[*spin turn-B*].

(j) グループ1を選択, グループ1に前進指令を出し, 凹物体の搬送を開始する [*group selection & go forward*]. 凹物体に接触しているロボットは青枠で囲まれ, 操作者に視覚的に接触情報を提示する.

(k) グループ1による凹物体搬送終了後, グループ2を選択, グループ2に前進指令を出す [*group selection & go forward*]. グループ2が凸物体に接触, 各ロボットが青枠で囲まれる.

(l) 凸物体が凹物体に挿入され, 搬送完了.

4.2 考察 実験を通して, 条件1から3のどの条件においても作業の実現が確認できた. これはロボットの能力・機能に応じた適切な指令を実装してあることによる. 提案システムが機能差のあるロボットの操作に対応していることがわかる.

また, 条件3のときに赤外線センサへのランダムノイズの影響により1台のロボットが壁沿い走行による障害物回避行動から目標点への移動行動への復帰が遅れるエラーがあったが, そのようなエラーの際にも人間が直接操作することにより速やかにエラーリカバリが可能であった.

人間の存在により高機能のロボットを用意しなくても必要最低限の機能を備えたロボットで同等の作業が実行可能であり, 柔軟性・適応性の面で本システムの利点は大きい.

5. 結 論

本研究では人間が複数ロボットを操作し, 作業を実行させるためのシステムの開発を行った. 特徴として,

- 個々のロボットではなく, 複数ロボットを群として扱い, それに対して指令を与える.
- 操作者からの指令不足はロボット側で補完する.
- さまざまな機能のロボットに適用可能な指令形態(表1)をもつ

ということが挙げられる. 総括して, 本研究では

(1) 系統的な操作指令の設計:

人間からの操作指令を分類, 各レベル間の機能差を補完する形で必要となる自律機能を明確化

(2) 監視システムの設計:

操作者への情報を画像として視覚的に表示

(3) 実際のシステムの構築

を行った。その結果、単独操作者による効率的なロボット群操作システムを開発した。このシステムは最も基礎的な押し作業を実行するのみであるが、人間が介在する複数ロボット系の利点については確認できた。また、低機能のロボットに対する指令から段階的に指令を設計することにより、さまざまな機能のロボットに適用可能な指令形態をもつシステムであるといえ、ロボットの機能レベルに応じた人間との協調形態の設計指針を示した。このシステムを基にさらに改良・発展することで、環境や作業条件に適応的、かつ一般的な作業の実行が期待できる。

文 献

- (1) Arai, T. and Ota, J., Motion Planning of Multiple Mobile Robots, *Proc. 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems (IROS'92)*, vol. 3(1992), 1761-1768.
- (2) Parker, L. E., Designing Control Laws for Cooperative Agent Teams, *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, vol. 3(1993), 582-587.
- (3) Rus, D., Donald, B. and Jennings, J., Moving Furniture with Teams of Autonomous Robots, *Proc. 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems (IROS '95)*, vol. 1(1995), 235-242.
- (4) Mataric M. J., Nilsson, M. and Simsarian, K. T., Cooperative Multi-Robot Box Pushing, *Proc. 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, vol. 3(1995), 556-561.
- (5) Kube, C. R. and Zhang, H., The Use of Perceptual Cues in Multi-Robot Box Pushing, *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, vol. 3(1996), 2085-2090.
- (6) Kurabayashi, D., Ota, J., Arai, T. and Yoshida, E., Cooperative Sweeping by Multiple Mobile Robots, *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, vol. 2(1996), 1744-1749.
- (7) Drogoul, A. and Ferber, J., From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots, *In From Animals to Animals 2: Proc. of the Second Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*, (1992), 451-459, MIT Press/Bradford Books.
- (8) Hirai, S. and Sato, T., Object Model For Telerobot, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, (1988), 701-706.
- (9) 佐藤知正・松井俊浩・平井成興, 人間との協同作業を特徴とする遠隔作業ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, 9-5(1991), 602-613.
- (10) Kimura, H. and Kajiura, G., Motion Recognition Based Cooperation between Human Operating Robot and Autonomous Assistant Robot, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, no. 1(1997), 297-303.
- (11) Koide, S., Andou, H., Suzuki, S. and Oda, M., Semiautonomous Teleoperation Control System with Layered Architecture—An Application to Space Robots—, *Proc. 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems (IROS '93)*, vol. 3(1993), 1995-2001.
- (12) Tsumaki, Y., Hoshi, Y., Naruse, H. and Uchiyama, M., Virtual Reality Based Teleoperation which Tolerates Geometrical Modeling Errors, *Proc. 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems (IROS '96)*, vol. 3(1996), 1023-1030.
- (13) Tarn, T.-J., Xi, N., Guo, C. and Bejczy, A. K., Function-Based Control Sharing for Robotic Systems, *In Proc. 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems (IROS '95)*, vol. 3(1995), 16.
- (14) Kosuge, K., Ishikawa, J., Furuta, K. and Sakai, M., Control of Single Master Multi-Slave Manipulator System Using VIM, *Proc. 1990 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1990), 1172-1177.
- (15) 小菅一弘・石川潤・古田勝久・針木和夫・酒井勝, シングルマスタ・マルチスレーブ・マニピュレータシステムの Task-Oriented 制御, 計測自動制御学会論文集, 30-7(1994), 793-801.
- (16) 佐野明人・花井貴史・松下和慶・北川朋亮・藤本英雄, マルチスレーブのグループオペレーションに関する一考察, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no. 3(1996), 801-802.
- (17) 長谷川公明・佐藤知正・野原健美・松井照幸, 人の直観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, 日本ロボット学会誌, 14-4(1996), 567-573.
- (18) Arkin, R. C. and Ali, K. S., Integration of Reactive and Telerobotic Control in Multi-agent Robotic Systems, *From Animals to Animals 3: Proc. Third Int. Conf. Simulation Adaptive Behavior*, (1994) 473-478, MIT Press/Bradford Books.
- (19) Suzuki, T., Fujii, T., Asama, H., Yokota, K., Kaetsu, H., Mitomo, N. and Endo, I., Cooperation between a Human Operator and Multiple Robots for Maintenance Tasks at a Distance, *In Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, (1996), 50-59, Springer-Verlag, Tokyo.
- (20) Nakamura, A., Kakita, S., Arai, T., Beltrán-Escavy, J. and Ota, J., Multiple Mobile Robot Operation by Human, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1998), 2852-2857.
- (21) 柿田新次郎・中村明生・太田順・Beltrán-Escavy, J.・新井民夫, 群ロボットの遠隔操作(第3報: 物体搬送のための操作システム), 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol. 3(1997), 863-864.
- (22) 小林尚登, ロボットと人間のコミュニケーションと協調, 日本ロボット学会誌, 12-6(1994), 796-801.
- (23) 新井民夫, ロボット言語の標準化, 日本ロボット学会誌, 2-2(1984), 136-141.
- (24) 井上博允, ロボット言語の研究課題, 日本ロボット学会誌, 2-2(1984), 87-90.