

## 論文の内容の要旨

論文題目 移動ロボット群操作システムの開発

氏名 中村 明生

本研究では人間が複数ロボットを操作し、未知環境において作業を実行するシステムを開発する。

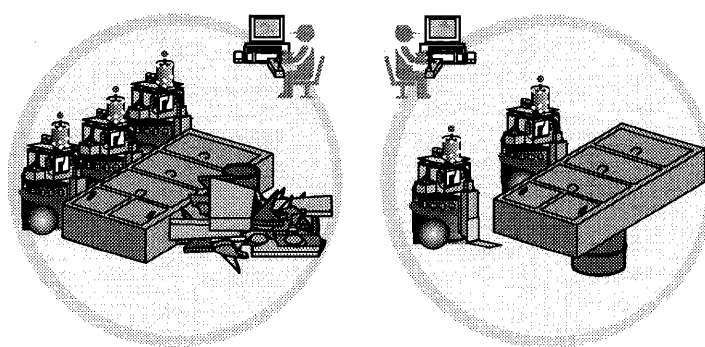
近い将来、移動機能を有する知的ロボットが社会の様々な分野に進出し、人間に代わって作業を行うことが期待される。移動ロボットの実際の適用例としては災害現場や建設現場、原子力発電所等での運用が考えられる。ロボットはそのような人間が作業するには危険な環境でこそ障害物撤去、物資運搬といった作業で活躍すべきである。

しかし、想定環境は部材の寸法・形状の規格化・標準化はなされていない、障害物・作業対象物が区別されていない、またそれらの位置・姿勢等の情報が予め得られていない、といった意味で「未知環境」といえる。そのような作業環境においてロボットが自律的に環境を認識し、作業計画を行い、作業を実行することは現状の技術では困難である。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。これは人間とロボットが互いに機能分担を行うことを意味し、人間が分担割合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。

さらに、想定環境では障害物・対象物が散在し、狭隘空間での作業を余儀なくされることが考えられ、大型ロボットの進入は不可能であり、ロボットの筐体の大きさが限定される。しかしロボット自重に対する可搬重量を考慮すると小型の単体ロボットでは作業実行に不十分であることが考えられる。そこで、複数台のロボットを協調させることで、単体ロボット以上の能力を発揮させるアプローチをとる。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。

以上、本研究では人間の操作下における移動ロボット群による作業実行システムの提案・開発を行う (Fig. 1参照)。



(a) Lifting work (b) Removal of piled objects

Fig. 1 A system for multiple mobile robots controlled by a human

人間-ロボット群システムを設計するに当たり、人間とロボット群の役割・機能分担が重要となる。本研究では高度の知性が要求されるタスク・プランニング等は人間が行い、低レベルな機能をシステムが担当する形で互いに協調することにより作業を実行する。すなわち、作業計画の立案といった高度な知性が要求される問題、または人間にとっては容易に実行可能である反面、ロボット・システムが自律的に実行する場合は計算量が多く、時間がかかる問題を人間が担当し、比較的低レベルの機能で実行可能であり、かつ人間が操作するには煩雑な定型的作業、目標地点への到達といった部分はロボット側が担当する。操作システム構築のために解決すべき問題は以下の3種類である。

(A) ロボット群への操作指令及びロボットの自律機能の設計

複数ロボットを対象とした操作システムに関しては研究例が少なく、また、操作指令の設計及びロボットに付与する自律機能が天下りのであった。操作者対ロボット群という一対多問題のもとで操作者からの指令及びロボット群の自律機能の設計が必要である。

(B) 環境情報獲得

従来研究においては予め環境に関する情報が獲得されており、環境がモデル化されている場合が殆どである。設計初期からその獲得を念頭においた研究例は少ない。ロボット群を投入するのみで環境情報を獲得可能なことが望ましい。

(C) 操作者への情報提示及びインタフェース

操作性を向上させるためにも大局的情報の提示が不可欠である。また、操作者の意思伝達を容易とするインタフェースが必要である。

まず、(A)のロボット群への操作指令及びロボットの自律機能の設計に関して、本研究では操作者対複数ロボットという一対多関係を考慮して、個別ロボットに対して指令するのではなく、ロボット群に対して指令を行う方針を採用する。ロボット群がその冗長性を活かして、与えられた作業を、信頼性よく、かつ効率的に実行できるためには、作業状況に応じて臨機応変に群を組み替えて、群としての作業構造を動的に変化させていくことが必要である。そのためには、操作者が適切な指令を与え、群を操作しなければならない。本研究では指令対象（ロボット群）の自律機能のレベルに応じて操作者とロボット群の役割分担が変化することを考え、指令対象を分類し、指令を設計する。概念設計として、まず、操作者のロボットへの指令レベルと、要求されるロボットの自律機能レベルとの関係をロボット言語研究とのアナロジーに基づき考察する。具体的には、指令を単体ロボット操作レベル、ロボット群操作レベル、対象物操作レベル、作業指令レベルの四階層に分け、さらに操作者がロボット群経路を指定する直接操作レベル、目標位置を指定するのみの間接操作レベルの2種類に分割した。その後、それぞれの階層を実現するために必要なロボットの自律機能レベル（障害物回避機能、同期機能など）を考察した（Table 1参照）。

次に指令分類に基づき、実際の操作指令の設計を行った。実際にプロトタイプシステムを構築し、挿入作業実験を行った。その結果、操作者がロボット群を操作する際に複数ロボットを群として扱い、群に対して指令を与えること、また、操作者からの指令とロボットの自律機能の妥当性が確認できた。

以上により，以下の成果が得られた。

- 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。
- さらに，各レベル間の機能の差を補完するよう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直接操作からボトム・アップ的に議論を進行させた結果，系統的な操作指令の設計が可能となった。

Table 1 Command level classification

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

次に(B)の環境情報獲得に関して，本研究で扱うシステムは操作対象となるロボットが複数台のため，全てを操作者が把握して指令を発行することは困難である。特に，操作者とロボット群が物理的に隔離されている場合，何らかの手段で操作者が作業領域の情報を把握する必要がある。単体ロボットの場合，搭載カメラの画像を提示することも考えられるが，その場合も視界が局所的となり，状況把握が困難である。まして，ロボット群となった場合，各ロボットの局所的な情報を融合して操作者に提示しない限り，操作者が情報量に圧倒され，指令を発行不可能である。操作者に情報を提示するためにはまず，環境の情報を獲得する必要がある。環境情報獲得に関しては，

- (1) 対象物，障害物を計測，位置・姿勢・形状の獲得．
- (2) 個々のロボットの位置・姿勢の同定．

が必要となる．(1) に対しては CCD カメラを搭載した 2 台のロボットによりステレオ視を行い対応する．2 画像の対応付け問題は操作者がロボット上のレーザーポインタを操作して明示的に対応点を指示することで解決する．以上より，

- ステレオ視において左右画像の対応点問題が解決．
- 大型物体を小型ロボットの協調で計測可能．基線長も任意．
- 作業に関係ない無駄な情報認識を省略でき，処理が単純化・高速化．
- 直接的に環境内の一点を指定でき，操作者の抽象的な意志の伝達が容易．

といった利点が考えられる．(2) に対してはロボット上に位置・姿勢計算が容易となるよう考慮して設計したマーカを搭載し，お互いにカメラを用いて位置・姿勢を計測する．これにより，環境（障害物，対象物の有無，位置・姿勢等）に関する情報が未知の場合においてもロボット群を投入するのみで環境情報を獲得可能である（Fig. 2 参照）．以上，ロボットの獲得した局所的情報から操作者へ提示するための大局的情報の生成が可能となった．

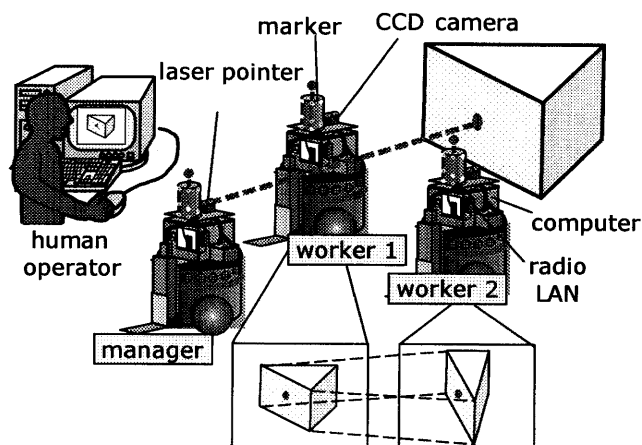


Fig. 2 Environment recognition

(C)の操作者への情報提示に関しては，(B)にて獲得した情報に基づき，計算機内に環境のモデル（仮想環境）を生成し，それを提示することとする．仮想環境は視点の変更が自由であるため，操作者は大局的な情報は仮想環境から，

局所的な情報はロボット搭載カメラからの画像から得ることが可能である。また、(A)で設計したロボット群への指令入力を容易とするために GUI (Graphical User Interface) を設計・実装した。GUI は文字ベースのインタフェースに比較して理解が容易であり、習得が短期間で済むという利点がある。汎用性、ユーザとの親和性を考慮し、Windows アプリケーションとして実装した。

以上(A)～(C)の問題に対してそれぞれ提案した手法に基づき、実際にシステムを構築した。各ロボットはそれぞれコンピュータ、センサ、カメラ、リフト機構を有し、ホスト・コンピュータを介して操作者からの指令を受け取る。

提案した手法を統合し、一つのシステムとして稼動することを確認し、有効性を評価するため、未知環境において対象物の持ち上げ搬送作業を行った。その結果、以下の点を確認できた。

- 指令レベル分類に関して、微調整のような即応性、精度を要求される作業は直接操作、把持位置への移動、対象物持ち上げ後の搬送のような自動化が可能な部分は間接操作といった指令レベルの使い分けが有効であることがわかった。
- 未知環境においてロボットの位置・姿勢を同定し、対象物情報を獲得し、形状モデルを生成可能なことを確認した。計測誤差は奥行き距離に対し5%以内であり、操作者への情報提示のための環境情報獲得としては充分であった。持ち上げ搬送作業における対象物の把持といった局面では高精度のモデルが必要であり、計測誤差の影響により作業が失敗する可能性があるが、操作者の介入により計測誤差を補償可能であり、操作者がシステムに介在している利点を確認できた。
- GUI、特に仮想環境に関してはロボット搭載カメラの画像では局所的なロボット搭載カメラ画像に代わって操作者に大局的情報を提供できた。
- システム全体として作業遂行能力があることを確認できた。

以上により、作業実行状況を監視し、適切な指令を下す人間を取り込んだ人間-ロボット群系アーキテクチャの構築が実現できた。