

人間監視下の単眼視ロボット群による環境認識システム*

中村 明生^{*1}, 太田 順^{*2}
新井 民夫^{*2}, 金子 慎一郎^{*3}A System for Environment Recognition by Multiple Mobile Robots
with Monocular Cameras under Human SupervisionAkio NAKAMURA, Jun OTA^{*4},
Tamio ARAI and Shinichiro KANEKO^{*4} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In this paper, we propose an environment recognition method for operation of multiple mobile robots. Until now, we have been developing a system for multiple mobile robot operation by a single human user. In order that the user operates multiple robots appropriately, he/she must know information of an environment around the robots. Hence we build a virtual environment and show it to the user. To build the virtual environment, we must solve two problems; one is an object recognition problem and the other is a robot-positioning problem. Concerning the former issue, the two robots that equip a monocular camera on each acquire a 3-dimensional position of a point in an environment with a stereo vision method. As for the latter issue, we set markers on the robots by which the robots can measure their relative positions. In each phase mentioned above, the human user gives commands to the robots appropriately. Solving the above problems, we can make a virtual environment in the computer. The virtual environment displays remote site information to the user. We verified effectiveness of the proposed method by experiments.

Key Words: Cooperation, Environment Recognition, Human Interface, Marker, Moving Robot, Multiple Robots, Stereo Vision

1. は じ め に

近年, 複数ロボットの協調作業に関する研究が盛んである⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, ロボット群が完全自律的に全ての作業を遂行することは困難である. そこで筆者らはロボット群を人間が操作するシステムの開発を行ってきた^{(3)~(5)}. 人間が操作する複数ロボットシステムの研究^{(6)~(12)}は数多く行われている. これは複数ロボットが協調し, かつ人間の柔軟な判断力を導入することとなり, 作業の多様化が可能となる有用なアプローチである.

ロボットの活躍場面としては災害現場や建設現場, 原子力発電所等が考えられる. しかし, そのような環境は障害物, 作業対象物の位置・姿勢等の情報が予め得られていない意味において「未知環境」である. モデル化はおろかカメラが設置されていないこともあり, ロボット群を操作するためには作業環境の情報の把握

が必須である. ロボット搭載カメラ画像を人間に提示し, 認識は人間に依存することも考えられるが, そのような画像は視野が狭く局所的である上に複数ロボットからの画像を人間が統合認識することになり, 負担が大きすぎる.

そのため, 物体の位置・姿勢, 形状データ(幾何モデル)及びロボットの位置・姿勢等の環境情報を計測・取得, すなわち環境を認識して情報を統合した上で操作者に提示する必要がある. しかし, 環境の細部に関する情報獲得はコスト・時間などを考えると実用的ではなく, あくまで人間の操作に役立つ範囲の情報でよい. すなわち本論文における環境認識の特徴として,

- 環境中に情報を獲得する機器は設置されていない. ロボット群を作業領域に投入して, ロボット搭載のセンサにより環境情報を獲得する必要がある.
- 複数ロボットシステムであるため作業領域が広くなる. また, ロボットのサイズに比較して対象物体が大きくなる傾向がある. そのため, 柔軟な計測範囲の変更が必要となる.
- 人間が大局的に情報を把握できる程度の精度・操作に必要な部分のみの計測でよい.

* 原稿受付 2001年12月3日.

^{*1} 埼玉大学工学部情報システム工学科(☎338-8570 さいたま市桜区下大久保255).^{*2} 東京大学大学院工学系研究科(☎113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).^{*3} ソニー(株)(☎141-0001 東京都品川区北品川6-7-35).

E-mail: nakamura@cv.ics.saitama-u.ac.jp

といったことが挙げられる。

物体の位置・姿勢・形状情報の獲得問題に関しては能動的手法と受動的手法に大別可能である。能動的方法とは、音波等を発して計測を行う手法である。レーザレンジファインダを用いる方法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、超音波センサを用いる方法⁽¹⁵⁾がそれにあたる。しかし、複数台のロボットが存在する場合、相互干渉が問題となる。さらに複雑な環境下では必要部分のみの計測も困難である。それに対し、受動的手法の代表としてはセンサとしてカメラを用いた手法が挙げられる。形状データと幾何推論によりマッチングして情報を得る方法⁽¹⁶⁾、ステレオ視（例えば文献⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾など）等がある。前者は未知環境には対応できず、後者は対応点問題を解決する必要がある。形状モデルの取得から行う例としてはレーザポインタとロボットアーム上のカメラにより未知環境における物体幾何情報を得る方法⁽¹⁹⁾等がある。以上の方法は個別ロボットによる環境認識手法であり、ロボットを複数用いる事例にそのまま適用できるとは限らない。

移動ロボットの位置同定問題に関しても様々な手法がある。デッドレコニングは累積誤差の影響が無視できない。環境中のランドマークをカメラで観測する方法⁽²⁰⁾⁽²¹⁾は予めランドマークを設置する必要がある。未知環境に対応できない。予めランドマーク等を設置せずにロボット群内の相互位置を同定する手法としてはマーカをロボットに搭載する方法⁽²²⁾⁽²³⁾、あるいはCPS (Cooperative Positioning System⁽²⁴⁾) 等がある。

本論文では上述の議論を踏まえ、複数ロボット操作時の環境情報獲得手法の提案、及びシステムの実装を行う。認識した環境情報は操作者への情報提示用の仮想環境の構築に用いる。具体的には以下を行う。

A). 単眼視ロボット群の協調ステレオ視による環境計測。作業領域の特定部分のみを必要な精度で計測する手法の提案。

B). マーカを用いたロボット群相互位置計測システム。

A) に関して、ロボット装備として CCD カメラは標準的である。装置の簡便性及びロボットが複数協調することを考慮すると専用センサを搭載しなくてもロボスタ性の向上及びロボットの移動機能による計測範囲の拡大が期待できる。対応点問題は操作者がロボット上のレーザポインタにて明示的に指示することで解決する。B) に関してセンサとしてのカメラのみで複数台のロボットの相互の位置・姿勢の獲得が可能となる。

本論文の構成を以下に示す。2 章で環境情報の獲得手法を説明し、3 章で実際のシステムについて述べる。4 章にて実験により提案手法の有効性を検証し最後に

5 章にて結論を述べる。

2. 環境認識手法の提案

本章では、認識すべき環境とロボット群による環境認識手法の概略を述べた後、ステレオ視による対象物形状及び位置・姿勢の計測手法及びロボット相互の位置・姿勢同定手法について説明する。

2.1 認識すべき環境 本論文で対象とする環境と前提について述べる。例えば、図 1 (a) が認識すべき環境とする。ロボット群は作業現場で搬送作業を行う。作業は「移動」+「物体操作」で実現可能であり、操作者に最低限提示すべき情報としてはロボット群内における相対位置・姿勢及びロボットと物体との相対位置・姿勢、物体の形状情報である。

さて、情報の提示でもっとも簡便な方法はロボットにカメラを搭載してその画像を提示することである。しかしカメラ画像は有用ではあるが視野が狭く、局所的である。またロボットは位置・姿勢を常に変え、それにつれてカメラ画像も変化する。ロボットの移動に応じて複数ロボットからの画像を常に頭の中で座標変換しながら大局的に環境を把握することは操作者にとって大きな負担となる。

そこで本論文ではロボット搭載カメラ画像に加え、仮想環境を操作者に提示する。仮想環境は一台のロボットを基準として各ロボット及び環境の一部との相対関係を求めることで構築される。操作者が状況を把握して判断を下し、ロボットがそれを実行するためには、作業に関係する環境の一部、動作対象及び障害となる物体のみを認識すればよい（図 1 (b) 参照）。

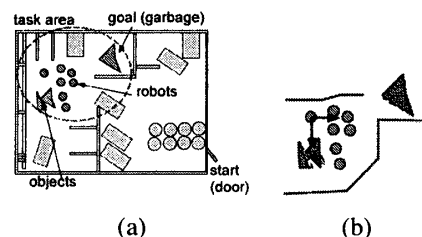


Fig. 1 Environment of interest: (a) Whole environment. (b) Recognized environment.

2.2 提案手法の概要 仮想環境構築のための環境認識手法の要求項目を以下に挙げる。

1. 未知環境に対応。環境認識を補助するような特別な機器は予め設置されていず、ロボット群を投入するのみで環境情報を獲得可能。
2. 計測範囲が広く、物体も多いことが予測されるため計測範囲の変更が容易。
3. 操作者が介在するシステムでの作業達成に十分な精度で、かつ作業内容に応じて必要な情報のみを

選択的に獲得可能。

4. 複数物体の識別可能.

情報獲得のための特別な計測機器をロボットに装備することも考えられるが、実装コストの面では標準的なセンサであるカメラを用いて複数ロボットが協調して計測する手法が実用的である。カメラは各ロボットに標準的に装備されてると想定してよく、協調視覚手法を採用すると複数ロボットの利点を生かすことにもなる。さらに、ロボットの移動機能を考えると計測範囲の変更の面からも有利である。

さらに、精度に関しては操作者が作業領域の概要を把握して指令を下せる程度でよいと考える。移動ロボットの移動誤差が数十 mm 程度であることを考慮すると、高精度が要求される場合は操作者が介入する、あるいはロボットのセンサ（超音波、接触センサ等）で局所的に対処させて数十 mm の誤差を補償する、といったアプローチを採用することで対応可能である。以上より、本章における環境情報獲得手法の要求仕様として下記の 3' を追加する。

3'. 計測基準からの距離に対して誤差を 5% 以内におさめる。

必要情報を選択的に獲得可能、ということに関しては、ロボット群にどれだけの抽象的な指令を下すか、ロボットがどれだけの自律機能をもっているか、に関係する。物体をロボット（システム）が認識している場合、操作者は「物体を動かせ」といった抽象度の高い指令（対象物操作レベル）を送ることができる。また、物体が小さい場合など、状況によってはロボットに逐次の指令あるいはサブゴール列指令（ロボット群操作レベル）を与えて動かす方が都合がよい場合もある。すなわち、ロボット群を操作する際の指令抽象度と認識すべき範囲とは関係をもっており、人間が抽象的に指令を行おうとすればするほどより高い環境認識が必要となり、必要な情報も増大する。指令内容は作業内容・状況に応じて操作者が決定するものであり、それに伴って必要情報を取捨選択できることが望ましい。ロボット群への指令と自律機能に関しては筆者らの別論文⁽⁴⁾を参照されたい。

2.3 物体計測とロボット位置同定 前節で述べた要求仕様に基づく環境認識手法の提案を行う。

2.3.1 物体計測 物体計測は、カメラを搭載した 2 台のロボットによるステレオ視で行う。2 画像の対応付け問題は人間がロボット上のレーザポインタを操作して明示的に対応点を指示して解決する（図 2 参照）。レーザポインタを搭載してある、全ての基準になるロボットを**監督ロボット**、レーザ照射点を見て実際

にステレオ視を行う 2 台のロボットを**作業ロボット**と呼称する。レーザポインタは操作者が上下左右方向に向きを変えることができる。レーザを発するのは監督ロボットのみとし、そのレーザ輝点を複数台のロボットで観測するため相互干渉はない。また、物体表面にレーザを照射するため、周辺光の影響を受けにくい。

操作者はまず、ロボット搭載カメラの実画像を見て、環境中の物体の概略位置・姿勢等の初期状態を把握する。その後、作業に必要な部分を判断し、位置情報を獲得したい部分にレーザポインタを照射する。すなわち、物体計測の初期段階がもっとも操作者に負担がかかる。しかし、以下の利点がある。

- ロボットに搭載されている単眼のカメラのみステレオ視計測ができる。また、ステレオ視の問題である対応づけ問題も解決される。
- 複数ロボットが環境中に散在している場合、その中から自由に作業ロボットを選択して適当な位置に移動させて計測することが可能であるため、計測範囲が柔軟に変更可能である。
- 操作者が明示的に計測点を示すことにより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・高速化される。また、計測点の増減により必要な部分を必要な詳細度で情報獲得可能である。
- 操作者が計測時に個別物体の識別を行いながら計測点を指示することで、物体の重なりが存在する場合においても個別に認識可能である。
- 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なる。

以上の手法で獲得される物体の形状モデルは平面で構成されるが、曲面などを計測する場合は計測点を多くすればよい。範囲を考慮しない場合、平面は最低 3 点のレーザ照射点を計測することで形状モデルが獲得可能であり、仮想環境が構築できる。

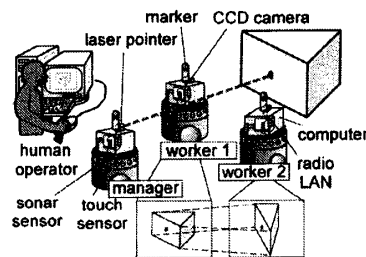


Fig. 2 Environment recognition with three robots.

2.3.2 ロボット位置同定 本論文ではロボット上にマーカを搭載し、お互いにカメラを用いて位置・姿勢を計測する。マーカ（図 3 参照）は、文献⁽²²⁾⁽²³⁾を参考に設計した。位置・姿勢計算手法は文献⁽²²⁾で提案さ

れた手法を拡張したものである。概念図を図4に示す。

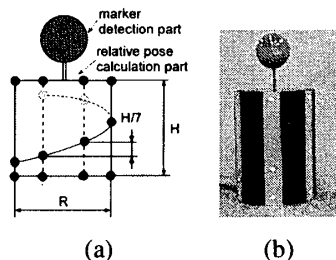


Fig. 3 A marker: (a) LED array on the marker. (b) Marker photo.

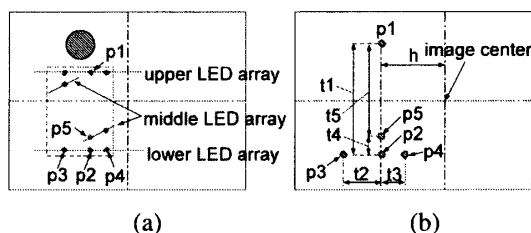


Fig. 4 Conceptual camera image of the marker: (a) Point features of the marker. (b) Parameters.

マーカは球体部と円筒部からなる。球体部はマーカ検出のために、円筒部は相対位置・姿勢計算に用いる。球体部内部には高輝度電球、円筒部表面には点特徴として高輝度LEDを配置してある。球体部はマーカサイズに比較して大きく、また全方位から見て同じ形状であるため、画像列を数画素間隔で走査することで容易に検出可能である。その後、球体部の画像上に占める面積より下部の円筒部の占める画像領域を推定し、その部分のLEDを検出する。検出したLEDに対して点特徴 $P_1 \sim P_5$ の記号付けを行う。ここで、基本的に下部LED列に $P_2 \sim P_4$ 、上部LED列中心に P_1 、中央LED螺旋列中心に P_5 を割り振る。相対位置・姿勢の計算方法としては、図4(b)に示すように、 $\overline{P_1 P_2}$ の垂直距離 t_1 より距離 d 、画像中心からの距離 h より見込み角 ϕ を計算することで相対位置を求め、 $\overline{P_2 P_3}$ 、 $\overline{P_2 P_4}$ の水平距離 t_2 、 t_3 の比より相対姿勢を求める。さらに、 $\overline{P_1 P_5}$ 、 $\overline{P_5 P_2}$ の垂直距離 t_4 、 t_5 の比率により円筒面のどの部分をみているか識別する。サインボードに比較して、以下の長所がある。

- 球体部と円筒部に分割して検出することにより、LED検出成功率が向上。
- 円筒にLEDを配列させることで全方向から同精度の計測が期待可能。
- $P_1 \sim P_5$ のどれかの点が検出不可能だった場合でも、他の点で代替可能であり、ロバスト性が向上。

それぞれの計算式を、式(1)~(5)に示す。式中の変数については図4、図5を参照されたい。 L はLED間

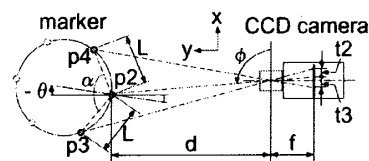


Fig. 5 A marker and a camera.

の距離である。 P_2 、 P_3 、 P_4 を全て検出できた場合は式(3)、 P_2 、 P_3 を検出できて P_4 を検出できなかった場合は式(4)、 P_2 、 P_4 を検出できて P_3 を検出できなかった場合は式(5)を、それぞれ用いる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{f}{h} \quad (0^\circ < \phi < 180^\circ) \quad (1)$$

$$d = \frac{LF}{t_1} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{G_1}{G_2} - \frac{\pi - \alpha}{2} \quad (3)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{-t_2 d}{Lf\sqrt{1+A^2}} - \tan^{-1} \left(-\cot \phi + \frac{t_2}{f} \right) - \frac{\pi + \alpha}{2} \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{-t_3 d}{Lf\sqrt{1+B^2}} - \tan^{-1} \left(-\cot \phi - \frac{t_3}{f} \right) - \frac{\pi - \alpha}{2} \quad (5)$$

ここで、 G_1 、 G_2 、 A 、 B は以下の式(6)~(9)の通りである。

$$G_1 = t_2 f + t_3 f \cos \alpha + (t_2 t_3 - t_3 f \cot \phi) \sin \alpha \quad (6)$$

$$G_2 = t_2 t_3 + t_2 f \cot \phi + t_3 f \sin \alpha - (t_2 t_3 - t_3 f \cot \phi) \cos \alpha \quad (7)$$

$$A = \cot \phi - \frac{t_2}{f} \quad (8)$$

$$B = \cot \phi + \frac{t_3}{f} \quad (9)$$

計測範囲1000[mm]から3000[mm]を仮定する。マーカサイズは R を150[mm]、 H を175[mm]とした(R 、 H は図3(a)参照)。

3. システム構成

3.1 ハードウェア 移動ロボット群操作システム全体のハードウェア構成を図6に示す。ホスト・コンピュータは汎用パーソナル・コンピュータ(Pentium III 450MHz(dual), OS: Windows NT SP4)であり、また各ロボットの上にもそれぞれPC(K6-II 350MHz, OS: Linux)が搭載されている。コンピュータ間の情報の授受は、無線LANを介して為される。各ロボットの上には固定CCDカメラが搭載されており、BSトランスミッターを通じてホスト側に画像が伝送され、画面合成器にて合成されて操作者に提示される。

また、監督ロボットは固定カメラの他にパン・チルト機構付 CCD カメラ SONY 製 EVI-D30 を有しており、このカメラ画像も操作者に提示される。このカメラにはレーザポインタも装着してある。監督ロボットがパン・チルト機構付カメラを装備しているのはその役割上、作業ロボットの動き監視が必要となり広範囲の視覚を有する必要があるためと、レーザポインタを装着することで上下左右のポインティングの 2 自由度を確保するためである。全てのロボットが同一機材をもつことができれば柔軟に役割変更できるが、ここでは監督ロボットの役割を担うロボットを固定とした。

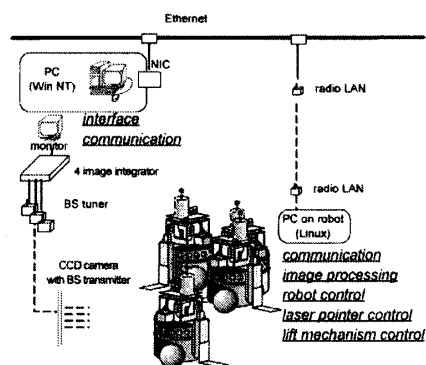


Fig. 6 System hardware.

ロボットは、米国 Nomadic Technologies, Inc. 製の 2 駆動輪式移動ロボット Scout (超音波センサ、接触センサ装備) に、PC、リフト機構、環境認識用機器 (CCD カメラ、レーザポインタ、マーカ) を付加して製作したものである。移動ロボットの外観及び構成図をそれぞれ図 7 (a)、図 7 (b) に示す。

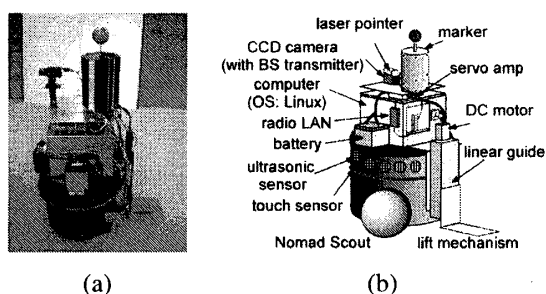


Fig. 7 Robot: (a) Photo of a robot. (b) Hardware architecture of the robot.

3.2 ソフトウェア システムのソフトウェア構成について述べる。ホスト・コンピュータが司る機能は操作者とのインタフェース (GUI)、仮想環境提示、通信である。また、各ロボット上の PC はロボット制御、リフト機構制御、レーザポインタ/マーカ制御、画像処理、通信を司る。ホスト・コンピュータは操作者からの指令を受け取り、各ロボット毎に指令を分割

してロボット側コンピュータに送付する。ロボット側では方向制御、速度制御、目標点までの移動制御、障害物回避等を行う (図 8 参照)。画像処理時はホスト・コンピュータを介して他のロボットと通信を行い、カメラの画像取り込みに合わせてレーザスポット、マーカを自動点滅させ、差分処理を行うことで周辺光の影響にロバストにさせる。

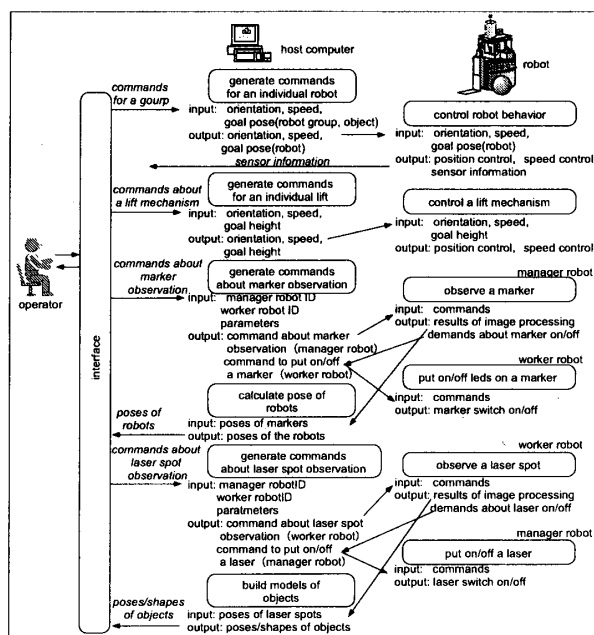


Fig. 8 Commands and robot behaviors.

3.3 情報提示と仮想環境 操作者への情報提示に関しては、仮想環境及びロボット搭載カメラ画像を提示する (図 9 参照)。

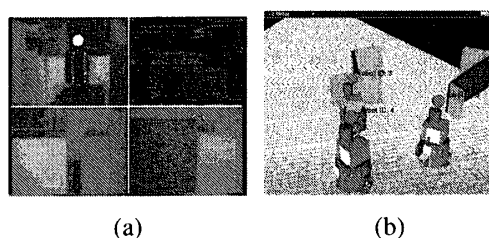


Fig. 9 Information displayed for the operator: (a) Images through CCD cameras. (b) Virtual environment.

2.3 節で説明した物体計測とロボット位置同定に基づき、仮想環境が構築され操作者に提示される。仮想環境は構築の際には操作者に負担がかかるが、構築後は視点を自由に選択できる、GUI(Graphical User Interface)の要領でロボット群を操作できる、などの利点がある。ロボット群を選択して直接操作したり、あるいは物体モデルを仮想環境上でドラッグして対象物の動きを指示することでロボット群に指令を与えるこ

とも可能である。

また、仮想環境構築のために収集された情報はロボット群が指示された場所に移動するための動作計画の際にも用いられる。すなわち、仮想環境は操作者及びロボット両者に有用である。

ロボット搭載カメラ画像は、作業遂行時、特に移動中はロボットの移動方向の生映像を操作者に提示する役割を果たしている。複数台のロボットの固定カメラの画像に加え、監督ロボットのパン・チルト機構付カメラの画像も画面合成器で統合されて表示される。これらの画像により、移動方向に障害物が突然現れる、ロボットが異常な方向に移動している、といった局所的な状況把握が容易となる。全てのロボットにパン・チルト機構付カメラを装着して広範囲な視野を確保することも考えられるが、ロボットの移動方向と異なる方向の画像をロボット台数分提示しても操作者を混乱させるだけであり、カメラ視線方向はロボットの移動方向と同一とする。

操作者は通常は仮想環境を監視し操作を行うが、より局所的な情報が必要な場合はカメラ画像を見る。

- 作業領域周辺の大局的情報：仮想環境。
- 局所的情報：ロボット搭載カメラ画像。

このように必要情報により提示手法を変化させることで操作者の状況把握が容易となる。

4. 実験

4.1 3次元位置計測基礎実験 対象物平面計測実験を行う。まず、図10の通り、作業ロボット2台を対象物の平面に対して平行、かつ、ロボットの間隔が $B \geq L$ 、平面中心とロボットとの角度が $30^\circ < \theta < 60^\circ$ の条件を満たす位置に配置する。この配置はロボットの移動誤差（位置誤差・姿勢誤差）及びカメラの標本化誤差の影響が最小となる配置である（文献⁽⁵⁾参照）。その後、長さ $M \leq B$ の平面の特徴点2箇所 (P_1, P_2) にレーザポインタを照射して3次元位置計測を行う。作業ロボットの位置・姿勢は後方の監督ロボットが作業ロボット上のマーカを計測することで獲得する。この監督ロボットが座標系の基準となる。

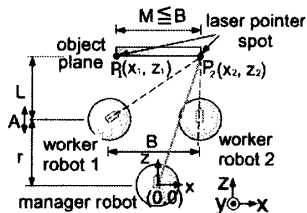


Fig. 10 Disposition of robots in the experiment.

対象平面は水平面に対して垂直かつ接地していることを仮定しており、 P_1, P_2 を上端2点とする長方形形状の平面が計測されることになる。各パラメータは $M=600[\text{mm}]$, $L=500[\text{mm}]$, $B=1000[\text{mm}]$, $A=0[\text{mm}]$, $r=1500[\text{mm}]$ である。

まず、ロボット1, 2が対象平面に正対している状態で、マーカ計測を行う。その結果を表1に示す。ロボット1の x 軸方向に $10[\text{mm}]$ 程度の誤差が存在するが、ばらつきは小さい。また、 z 軸方向（奥行き）はロボット1, 2ともに正確であるといえる。レーザ照射位置計測の結果を表2に示す。最大誤差が $40[\text{mm}]$ 以内であり、距離 $2000[\text{mm}]$ に対して2%以内に収まっている。これは2.2節における仕様3', すなわち距離に対する精度5%以内である。誤差を減少させるためには各種機器の設置誤差、カメラ内部パラメータ誤差等を考慮する必要がある。

Table 1 Poses of the robots.

	worker robot 1		
	$x [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\theta [^\circ]$
theoretical	-500	1500	0
average	-491.9	1502.6	0.3
variance	8.9	7.6	0.9
maximum error	22.5	14.5	1.7

	worker robot 2		
	$x [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\theta [^\circ]$
theoretical	500	1500	0
average	498.2	1501.6	0.1
variance	17.8	4.6	1.4
maximum error	29.9	10.5	2.1

Table 2 Laser spot measurement.

	spot P_1 (left upper)		
	$x [\text{mm}]$	$y [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$
theoretical	-300	745	2000
average	-292.9	744.2	2006.6
variance	15.3	2.2	18.5
maximum error	36.3	5.6	32.3

	spot P_2 (right upper)		
	$x [\text{mm}]$	$y [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$
theoretical	300	745	2000
average	305.5	743.6	1995.1
variance	15.7	0.8	17.9
maximum error	32.7	2.6	30.1

4.2 物体搬送実験 前節の基礎的実験をふまえ、環境認識及び物体搬送の総合実験を行う。操作者が状況を把握して移動ロボットを操作可能であるかを検証する。

図11が実験環境である。作業としては、物体1を押し込み、物体2を環境中央に引き出すことである（図11(b)矢印参照）。物体2を引き出すためにはまず物体1を押し込む必要がある。

手順は(1)ロボットの相互位置を同定し、(2)3次元位置計測を行い簡単な形状モデルを獲得した後、(3)物体を搬送するという3つの局面に分割される。

さて、本研究では操作者が必要と思われる部分をモデル化するという立場をとっている。この場合、2.2節

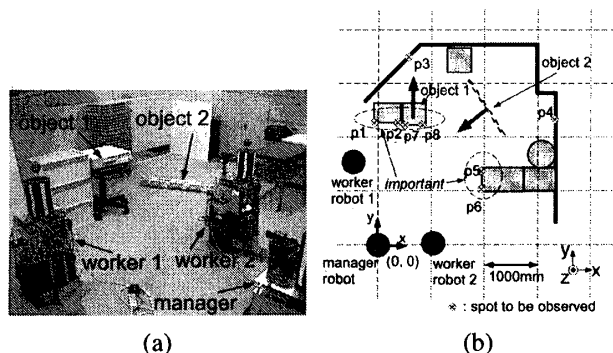


Fig. 11 Experimental environment: (a) Photo of the environment. (b) Target positions of the laser spots.

で述べた通り、比較的小さな物体はモデル化せず、ロボットを直接操縦して移動させることも考えられる。本実験では物体1はある程度大きな物体、物体2は比較的小さな物体を想定しており、前者は対象物操作レベルで動かし、後者はロボット群を操作するレベルで動かすこととする。したがって、操作者は物体1と環境中の障害物の位置・姿勢を計測させる。

物体1は椅子とその上に乗った物体からなり、細かくモデル化するためには多数の点を計測する必要がある。しかし、押し作業による搬送を考えた場合、細部に至るまで形状データを取得する必要はないため、上部の物体を含めて全体を包含するような直方体としてモデル化する。実際にはロボットが実際に押す面（椅子座面の側面）の位置・姿勢情報のみを獲得する。

図11(b)中の×印は3次元位置を観測すべき場所を表しており、それらの点を監督ロボット一台、作業ロボット2台、計3台で計測する。

Table 3 Spot measurement result.

spot	measured value (x, y, z) [mm]	correct value (x, y, z) [mm]	error ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) [mm]
p ₁	(-115, 2447, 651)	(-77, 2276, 666)	(38, 171, 15)
p ₂	(424, 2417, 648)	(428, 2284, 667)	(4, 133, 19)
p ₃	(539, 3931, 844)	(562, 3499, 827)	(23, 431, 17)
p ₄	(3746, 2626, 869)	(3323, 2334, 850)	(422, 292, 19)
p ₅	(2060, 1574, 600)	(1957, 1430, 562)	(103, 144, 38)
p ₆	(2094, 1178, 581)	(1957, 1035, 589)	(137, 143, 8)
p ₇	(492, 2351, 586)	(487, 2227, 613)	(5, 123, 27)
p ₈	(887, 2344, 599)	(850, 2220, 613)	(37, 124, 14)

表3に図11(b)中の×印の計測結果を示す。作業ロボット2台が4.1節の最初で述べた配置をとった場合に計測の誤差は減少する。計測時（仮想環境構築時）、操作者は監督ロボット及び作業ロボットに搭載したカメラの画像を通して環境の概略を把握してp₁, p₂, p₇, p₈が重要であると判断する。その後、それらの点を計測する際にはカメラ画像を見ながら計測に適したロボット配置に移動させる。その結果、p₁, p₂, p₇, p₈の計測誤差は小さく、それ以外の点は比較的大きくなっ

た。これは重要な部分を必要な精度で選択的に計測した結果である。

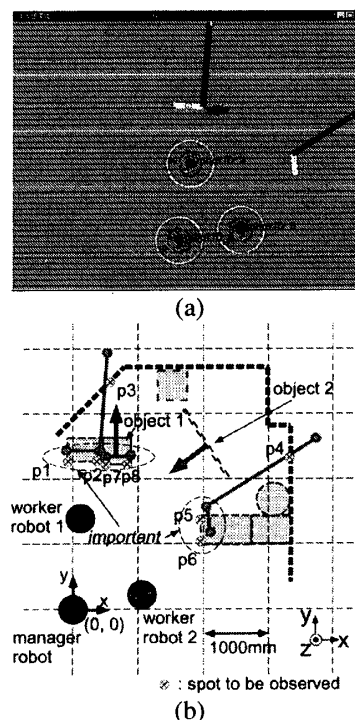


Fig. 12 Experimental results: (a) Virtual environment including observed walls of the objects. (b) Measurement results.

図12(a)は鳥瞰図的に表示させた仮想環境である。また、図12(b)は表3の結果の図示である。図中の灰色の点は計測された点であり、それら結ぶ線は図12(a)の仮想環境中の壁と対応している。

仮想環境構築後は操作者はそれを監視しつつ指令を発行する。図13にロボット群が搬送作業を実行している様子を示す。物体1はモデル化されているため、操作者が仮想環境上にて対象物操作レベルの指令を出すことにより作業ロボット1が自動的に物体1を押し搬送する(図13(a)-(d))。その後、作業ロボット1,2の目的地を仮想環境上で指示し、物体2に接近させるが、物体2はモデル化されていないためにロボットをおおよそその位置に接近させるにとどめる。最終的な位置決めは操作者がロボット上のカメラの画像を見てロボット群操作により逐次的に操作することで行い、物体2を持ち上げ搬送させる(図13(e)-(i))。このとき、監督ロボットも現場に近づけられる。監督ロボットの場合、固定カメラに加えて視線方向を変更可能なパン・チルト機構付カメラも有するため、より広い視界の画像を操作者に提供する(図13(e)-(f))。

以上の通り、作業内容に応じて必要な部分を選択的に計測して仮想環境を構築できた。

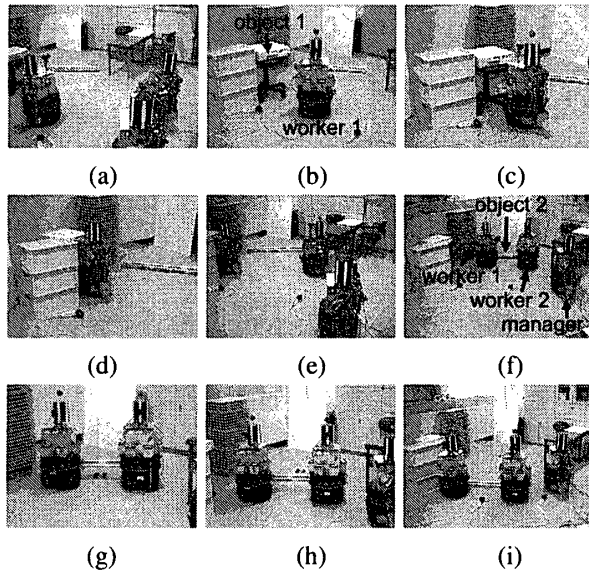


Fig. 13 Task execution: (a) Start. (b) The worker robot 1 approaches the object 1. (c)-(d) The worker robot 1 pushes the object 1. (e) The worker robots approach the object 2. (f)-(g) The worker robots lift up the object 2. (h)-(i) The worker robots transport the object 2.

5. お わ り に

本論文では、複数移動ロボットを操作する人間への情報提示のための環境認識手法を提案し、システム構築を行った。情報提示用の仮想環境構築のためには、(1) 対象物・障害物の幾何モデル獲得及び(2) ロボットの位置・姿勢同定が必要であるが、それぞれに対する解決手法を統合し、未知環境に対応可能な環境情報獲得システムを構築した。複数ロボットが協調することにより、特別な装置を用いることなく予め搭載されている単眼 CCD カメラにて作業に必要な情報獲得できた。また、操作者が情報獲得に介入することで、冗長な情報を省略した選択的環境認識が可能であった。

謝 辞

本研究の一部は(財)立石科学技術振興財団研究助成の援助を受けて行われました。記して、感謝します。また実験を手伝って頂いた松本 孝氏(現日本 IBM 勤務)に謝意を表します。

文 献

- (1) 浅間, 複数の移動ロボットによる協調行動と群知能, 計測と制御, **31**-11 (1992), 1155-1161.
- (2) T. Arai and J. Ota, Let us Work Together -Task Planning of Multiple Mobile Robots-, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, **1** (1996), 298-303.
- (3) José Beltrán-Escavay, *et al.*, Human-Robot GUI System with Group Control for Multiple Mobile Robot Systems - Introduction to Virtual Constraints -, *Int. J. the Japan Society for Precision Engineering*, **33**-3 (1999), 265-270.
- (4) 中村 他, 人間が操作する複数移動ロボットシステムの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), **65**-638 (1999), 4062-4069.
- (5) 中村 他, 人間により操作されるロボット群システムの研究-対象物操作レベルの実装-, 第 5 回ロボティクスシンポジウム予稿集, (2000), 439-444.
- (6) H. Kimura and G. Kajiura, Motion recognition Based Cooperation between Human Operating Robot and Autonomous Assistant Robot, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1997), 197-303.
- (7) J. A. Adams, *et al.*, Cooperative Material Handling by Human and Robotic Agents: Module Development and System Synthesis, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, **1** (1995), 200-205.
- (8) Ronald C. Arkin and Khaled S. Ali, Integration of Reactive and Telerobotic Control in Multi-agent Robotic Systems, *From Animals to Animats 3: Proc. the Third Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*, MIT Press/Bradford Books (1994), 473-478.
- (9) K. Kosuge, *et al.*, Control of Single-Master Manipulator System Using VIM, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1990), 1172-1177.
- (10) 小菅 他, 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.
- (11) T. Suzuki, *et al.*, Cooperation between a Human Operator and Multiple Robots for Maintenance Tasks at a Distance, *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer-Verlag, Tokyo (1996) 50-59.
- (12) 長谷川 他, 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.
- (13) 若林, 足立, 小型レーザレンジファインダ, 日本ロボット学会誌, **13**-3 (1995), 319-321.
- (14) 佐藤, アクティブレンジファインダと距離画像処理, 日本ロボット学会誌, **13**-3 (1995), 311-314.
- (15) 永谷, Howie Choset, 超音波距離センサアレイによる環境情報獲得手法-Arc Transversal Median (ATM) Method の紹介-, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1999), 45-46.
- (16) 長谷川, ディディエジベール, 幾何推論を用いた作業環境モデル生成システム, 日本ロボット学会誌, **6**-6 (1988), 3-11.
- (17) 杉本, 富田, ステレオによる幾何モデリング, 日本ロボット学会誌, **15**-3 (1997), 431-438.
- (18) 丁, 古村, 移動 3 眼ステレオ視を利用したステレオマッチング, 日本機械学会論文集 (C 編), **64**-618 (1998), 546-552.
- (19) 林 他, ロボットビジョンによる物体の凸多面体モデルの自動生成, 日本ロボット学会誌, **10**-3 (1992), 385-393.
- (20) 林 他, 精度と実時間性を考慮した点特徴群の位置・姿勢計測法, 日本機械学会論文集 (C 編), **63**-609 (1997), 1640-1648.
- (21) 関 他, 超音波灯台を用いた移動ロボットの位置検出システムの開発第 2 報 灯台の選択とナビゲーション, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, **1** (1997), 193-194.
- (22) 新井 他, 移動ロボット相互の位置・姿勢実時間計測システムの開発, 日本ロボット学会誌, **12**-3 (1994), 472-478.
- (23) P. Bison, *et al.*, A 'Berber Pole' Beacon for Mobile Robot Cooperation, *Distributed Autonomous Robotics Systems 3*, Springer (1998), 193-202.
- (24) R. Kurazume, *et al.*, Cooperative Positioning with Multiple Robots, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1994), 1250-1257.