

〔原著論文〕

# LARTS/T を用いた 言語主導型マスタスレーブマニピュレーション法

平井成興\* 佐藤知正\*

本論文は、高級言語とマスタスレーブマニピュレータを組み合わせた「言語介在型 テレオペレータシステム (Language Aided Robotic Teleoperator System/Teaching oriented version; 以下, LARTS/T と略す)」および、この LARTS/T を利用した新しい作業の教示・実行法「言語主導型 マスタスレーブマニピュレーション LDMSM (Language Directed Master-Slave Manipulation)」について述べる。

LARTS/T の特徴は、言語による命令とマスタスレーブアームを用いた操縦とを、両者の利点を活かしながら協調的に併用してテレオペレータに作業を実行させたり、作業を教示したりすることができる点にある。また LDMSM の特徴は、作業に先立ち作業内容の概略構造を作業レベルのロボット言語を用いてシステムに与えておくことである。これによりシステムは、作業に必要な空間点（環境）を、その概略構造から導かれる動作手順に沿って操作者が行う実際の作業過程から記憶することができる。すなわち操作者の作業実行が作業のロボット言語による教示にもなっている。

論文では、プロトタイプシステムによる作業実験によって、この教示法がテレオペレータへの柔軟で直観的な教示法となっていること、さらにこのシステムによれば、テレオペレータの環境記憶および応用作業機能が、テレオペレータの即応性を損なうことなく利用できることなどを示す。

## 1. はじめに

宇宙、海底、原子力プラントなどの人間の立ち入れない環境下での作業には、現在、マスタスレーブマニピュレータ（以下、主従腕と略す）をはじめ、各種のステレオペレータ（遠隔作業装置）が用いられている<sup>1)</sup>。しかし、その操作性は悪く、操作者が著しく疲労することが指摘されている<sup>1)</sup>。その理由の一つに、テレオペレータが学習機能やプログラミング機能を持たないため、操作者が同じ操作を何回も繰り返し行わねばならないことがある。

このような遠隔操作作業の問題点に対処するために、テレオペレータの知能化の研究が進められてきた。すなわち、テレオペレータに何らかの知的機能を与え、それにより作業の一部を自律的に実行させ、操作者の負担を軽減しようという考え方である。

Whitney<sup>2)</sup> および Ferrell<sup>3)</sup> らは、テレオペレータに状態空間探索法に基づいたプラナを持たせた監視制御 (Supervisory control: 以下 SVC と略す) 方式により、

作業の一部を自動的に行わせることで操作者の負担を軽減しようとした。SVC のテレオペレータへの適用の研究はその後も Sheridan によって続けられている<sup>4)</sup>。Freedy ら<sup>5)</sup>はテレオペレータが手先の移動先の確率頻度を学習し、次の移動先を予測・提示して、操作者が毎回同じ位置に手先を合わせる労力を省くという手法を提案した。Barber は SVC の自動動作の記述を主目的とし、マスターアームやジョイティック操作のかわりに言語によるスレーブの移動指令を可能にした MANTRAN<sup>6)</sup> という原始的なロボット言語を提案した。

これらの過去の研究の特質を検討すると、Whitney や Ferrell らのようなプラナの利用という構想自体は有効なものであるが、用いられているプラナ自体の能力が低く、仮に現時点での人工知能研究のレベルを考慮しても実用性の点でまだ問題がある。さらにプラナが用いる状態空間を与えるためには、作業対象の配置などの環境情報が必要であり、これは予め何らかの方法でテレオペレータに環境を教示しておかねばならないという、より基

原稿受付 1984 年 7 月 24 日

\* 電子技術総合研究所 制御部

注) ここでは、「テレオペレータ」は遠隔作業装置一般を指し、「マスタスレーブマニピュレータ」は、その一種であって、従腕が主腕の動きに相似的に追従する形式のものを特に指すものとしている。

本的な問題を生じている。Freddy らの手法は、ある程度作業を繰り返した後でないと有効に働くかないと、作業対象の状態が変化したら効力を失うなど、テレオペレータの長所である即応性を損っている。Barber の MANTRAN はロボット言語による自動動作記述の有用性を示したが、プラナの利用と同様に環境の教示の問題がある (SVC 方式における自動動作記述はロボット言語によるプログラミングに帰着し、かつロボット言語によるプログラミングと環境の教示には様々な問題点があるので、それについては別に第 2 章で詳しく論じる)。

以上の考察から著者らは、テレオペレータへの動作に必要な空間点 (以降これを「環境」と呼ぶ) の記憶機能の付与と、それに呼応した柔軟な教示方式の導入がこの問題への実用的で有効な解決策であると考える。本論文ではこの解決策として、高級言語と主従腕システムを組み合わせた言語介在型 テレオペレータシステム (Language Aided Robotic Teleoperator System/Teaching oriented version; 以下、LARTS/T と略す) およびこの LARTS/T を利用した新しい教示法を提案する。

LARTS/T は、高級言語とマスタスレーブマニピュレータを組み合わせたテレオペレータシステムである。この LARTS/T の特徴は、言語によるシンボリックな表現が適した指令と、マスターームによるアナログ的操作が適した操縦とを協調的に併用して、テレオペレータへの作業教示および作業の実行を行なう点にある。これは MANTRAN のようにマスターームやジョイスティックの単なる代替手段として言語命令を用いるのと対照をなす。また LARTS/T を利用した新しい教示法とは、操作者が作業に先立ち高級ロボット言語を用いて作業の概略構造をシステムに与えておくことにより、システムは操作者が行う実際の作業過程から作業環境のデータを抽出し、記憶するというものである。すなわち、この教示法は、環境 (作業に必要な空間点) を Freedy の方式のようにばらばらに覚えるのではなく、目的作業のための一連の動作中に記憶する点およびマスタスレーブマニピュレータによる作業の実行が作業のロボット言語による教示をも兼ねている点にその特徴がある。このような教示的作業方法を言語主導型マスタスレーブマニピュレーション (Language Directed Master-Slave Manipulation; 以降 LDMSM と略す) と名づける。

論文では、またプロトタイプシステムによる作業実験により、この教示法がテレオペレータへの柔軟で直観的な教示法となっていることを示し、さらにこのシステムによればテレオペレータの環境記憶機能および応用作業機能がテレオペレータの即応性を損なうことなく実現、利用できることを示す。

Table 1 Comparison of teaching.

	TEACHING BY SHOWING e.g. PLAY BACK	HAND LEVEL e.g. PAL <sup>③</sup> )	OBJECT LEVEL e.g. AL <sup>④</sup> )	TASK LEVEL e.g. AUTOPASS <sup>⑤</sup> )
I INSTRUCTION READABILITY	-	△	○	◎ ※
II COHERENCY OF PROGRAMMING AND TEACHING	-	○ ※	×	×
III INTUITIVENESS OF ENVIRONMENT DATA INPUT	○ ※	× (KEY-BOARD)	△ (POINTY)	? (CAD/CAM)

◎ Excellent.  
○ Good.  
△ Tolerable.  
× Bad.

- Out of evaluation.  
? Unknown. relating papers are not given.  
※ is realized by LARTS/T.

## 2. 言語主導型マスタスレーブマニピュレーション<sup>⑥</sup>)

LDMSM (言語主導型マスタスレーブマニピュレーション) は、作業手順の大略構造を作業レベルの言語により与え、環境などの具体的な指定は主従腕で示そうという階層的な作業の教示・実行方法である。その具体的な実行手順は 2.2 節で説明される。この方法の特徴は前章でも述べたが、それをより明らかにするために、2.1 節で、テレオペレータをロボットと考え、それに作業を教える様々な方法の比較という観点からの考察を行う。

### 2.1 言語による教示とマスタスレーブによる教示の比較

Table 1 は直接教示 (プレイバック) 方式から作業レベルのロボット言語までの、種々の教示法について特徴を比較したものである。マスタスレーブ操作はこの表では直接教示方式に対応する。

作業内容の理解のし易さおよびプログラムのし易さ (I) では AUTOPASS のような作業レベルの言語表現が優れている。また、一般に言語を用いたプログラム動作は、動作再現性の良さとともに、編集により応用動作がさせられる利点もある。プログラミングと教示の一慣性の観点 (II) からは、多くのロボット言語では両者はほぼ独立に行われ、プログラム中の変数名を知らないと教示ができないという不便さがある。この点については、プログラム中に教示のための指示情報を組み込んでおき、プログラムを解釈しながら教示を行うという PAL の方が優れている (MANTRAN にも未定義位置への移動命令に対し、エラーメッセージを表示する機能があるが、これはあくまでもエラー処理として扱われ、教示のガイドにはなっていない)。一方、実データ入力の直観性の観点 (III) からは、様々な物体の位置・姿勢などの環境データを言語、すなわち数値データにより表現・入力するのはかえってまどろっこしい。これに対し、直接教示方式は動作の全てを示してやる必要があるが、環境データ

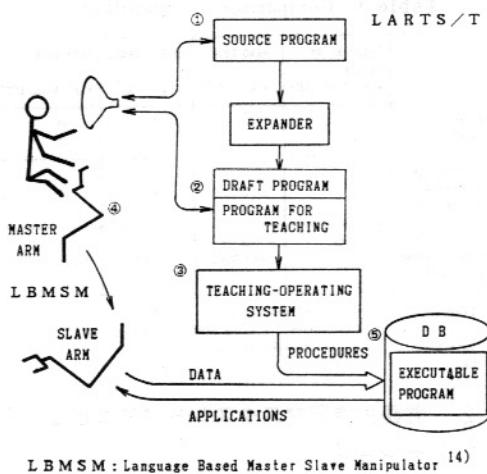


Fig. 1 Teaching-Operating procedure of LDMSM

タ入力の点では直観的で容易である。とくに、初めての環境での作業を考えると、非言語的な直接教示の方が手とりばやい。

こうしてみると、操作や動作手順のような意味を持った指令の表現は作業レベルの言語方式、位置・姿勢などの環境データは直接教示方式が適していることがはっきりとする。このことから、テレオペレータ作業においては両者の利点を活かしつつ融合させた作業方式が有効と考えられる。これが本論文で提案する LDMSM である。

## 2.2 LDMSM の具体的実行手順

LDMSM の具体的な実行手順は Fig. 1 に示すようである。①まず操作者は作業手順をロボット言語 TOL.O (Teaching Oriented Language, Object level, 3-3 参照) のマクロ命令で記述したソースプログラムを作成する。②次に、それをエキスパンダ (これらの LARTS/T の構成機能は次章で詳しく説明される) によって動作レベルの作業手順に自動展開し、ドラフトプログラムを生成する。このドラフトプログラムに、必要に応じて若干の編集を加え、教示用プログラムとする。③続いて、教示・実行システムがこの教示用プログラムを 1 命令づつ解釈しながら次に手先を移動すべき目標点などの必要事項を操作者に指示し、④操作者はこれに従って主從腕を操作して作業を実行する。その際システムに備えられた各種の制御方策 (3.2 節参照) を採用することもできる。こうして作業を実行したら、マスターアームのボタンやメニュー命令からの信号で教示・実行システムに知らせる。⑤システムはこのようにして得られる教示経過に従い、教示用プログラム中の未知変数に環境などの値を割り付け、実行可能プログラムを生成する。

実行終了段階には、作業に関する手順・動作や環境の

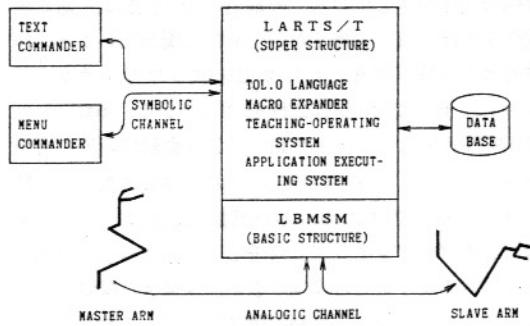


Fig. 2 Overview of LARTS/T

データがプログラムの形で保存されている。これにより、その作業の再実行等の遠隔作業が実現される。

## 3. LARTS/T の構成<sup>11,12)注)</sup>

### 3.1 LARTS/T の概要

LARTS/T は、Fig. 2 に示すような言語介在型主從腕 (Language Based Master-Slave Manipulator, 図中LBMSM と略記) システムをベースックストラクチャとし、それにロボット言語 TOL.O を始めとする LARTS/T ソフトウェア等のスーパストラクチャを被せた 2 層構造の知的遠隔作業システムである。ベースックストラクチャへの操作入力は主腕 (Master Arm) からのアナログ的なチャネルにより、スーパストラクチャへの指令入力はテキストコマンダ (Text Commander) からの言語入力、メニュー命令 (Menu Commander) からの選択入力などのシンボリックなチャネルによりなされる。

スーパストラクチャを構成している TOL.O 言語、エキスパンダ、教示・実行システム、応用作業実行システム等のソフトウェアは Lisp 系言語 PETL<sup>13)</sup> 上の関数のセットとして与えられている。データ型、データベースも PETL のものを基本にしている。

スーパストラクチャとベースックストラクチャの 2 層構造化の特徴は以下の通りである。

LARTS/T ではベースックストラクチャとスーパストラクチャとが、単に上位の監視操作者と下位の部分的自動機能という従属的な縦割りの関係ではなく、2.1 節で説明されたような、それぞれの特徴的機能を分担した対等な協調関係にある。これにより LDMSM では、2.2 節で説明したように、操作者は一つの作業をスーパストラクチャである TOL.O 言語で管理・支援さ

注) 文献 7,11,12) では/T は付いていない。/\* は LARTS の今後の発展を考慮して、各バージョンのキーポイントを記すために付けることにしたものである。

れた流れ（具体的には動作手順）の中で、ベーシックストラクチャである言語介在型主従腕システムを直接操作しつつ作業を行うことができる。いわば LARTS/T は、協調的に働く 2 層構造によって教示支援機能および環境記憶機能を実現している知能的テレオペレーションシステムといえる。

### 3.2 言語介在型主従腕システム<sup>14)</sup>

LARTS/T のベーシックストラクチャである言語介在型主従腕システムは、主従腕用コマンド言語を導入したマスタスレーブマニピュレーションシステムである (Fig. 3)。このシステムの特徴は、主従腕用コマンド言語によって、従来の主従腕システムにはなかった知能的な制御方策の援用が柔軟かつ統一的にできることにある。

たとえば、拘束動作重畠制御方策 (Motion Constraint Imposing) を利用すれば、水の満たされた容器の運搬作業において作業中は手先を水平に保つという拘束動作を (SORI '(A B) '(O O))

という命令一つで従腕に自動的に行わせることができる。これにより操作者は水をこぼさないために容器を水平に保つという動作から開放され、単に容器を初期位置から目標位置まで移動することにのみ専念できる。このようなソフトウェアで実現される拘束動作をソフトウェア道具と呼んでいる。

### 3.3 TOL.O<sup>11)</sup>

TOL.O (Teaching Oriented Language, Object level) は組立／分解作業を主な対象とし、ロボットに作業手順をわかり易い表現で教示するための高級ロボット言語で、対象動作レベルの基本動作命令の上に標準的なマクロ命令を備えることで、作業レベルの表現を可能としたものである。TOL.O の言語仕様のうち、LDMSM 利用する主な命令を Table 2 に示す。

各基本動作命令は腕が操作する対象を中心に表現したものになっており、手先による表現より作業内容が理解しやすいように作られている。なお、この表では動作命令が絶対表現と相対表現とに分けられているが、本論文の LDMSM では 3.6 節の説明のように、すべて絶対表現として具現されている。

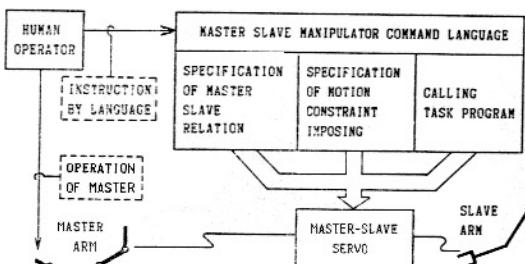


Fig. 3 Construction of LBMSM system

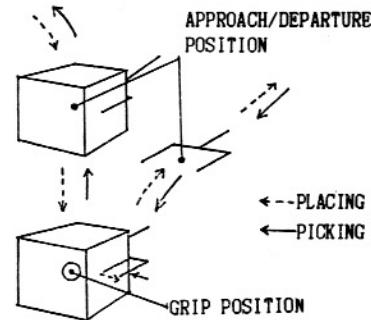


Fig. 4 Basic positions for picking/placing object

Fig. 5 Example of macro expansion

(PICK obj) is expanded as follows:  
(APPROACH obj)  
(MOVE-TO-GRIP obj)  
(GRIP obj)  
(LIFT-UP obj)

この基本動作命令の上に、組立／分解作業の基本操作を表現した基本操作マクロ命令が用意されており、通常の組立／分解作業実行の記述はこのレベルで十分なよう設計されている。これらのマクロは、手が行う動作の基本を、Fig. 4 のように、物体を掴みにいくための安全な接近点 (approach position)，物体を掴む点 (grip position)，物体を置いて手が退避するための安全な点 (departure position)，から構成されていると考え、作成されたものである。Fig. 5 に PICK の展開を示す。

さらに、一連の組立／分解作業もまた、様々な物体に対する基本動作の組み合わせパターンで代表できることから、REMOVE と PICK-PLACE の 2 つの複合作業マ

Table 2 TOL.O primal instructions

ABSOLUTE POSITION MOVEMENT INSTRUCTIONS	(MOVE obj {AT position} {FORCE [-1 <] force-vector} {VELOCITY [-1 <] velocity-vector} {ACCELERATION [-1 <] acceleration-vector}) (COMPLIANCE = compliance-vector) (APPROACH obj -- same as MOVE options --) (MOVE-TO-GRIP obj -- same as MOVE options --) (PUT-IT-ON obj -- same as MOVE options --)	
RELATIVE POSITION MOVEMENT INSTRUCTIONS	(TRANS {obj} {BY relative-position-vector} -- same as MOVE options except AT brace --) (LIFT-UP {obj} -- same as TRANS options --) (DEPROACH {obj} -- same as TRANS options --) (SHIFT {obj} {BY relative-point-vector} -- same as TRANS options except BY brace --) (TURN {obj} {ABOUT position} {BY degree} -- same as TRANS options except BY brace --)	
SIMPLE MACRO INSTRUCTIONS	(PICK obj) (PLACE obj1 ON obj2) (LOAD-TOOL tool)	(UNLOAD-TOOL tool) (SET-TOOL tool ON obj) (UNSET-TOOL tool)
COMPLEX MACRO INSTRUCTIONS	(REMOVE obj {TO holder} {WITH tool {TYPE= [HOLD 1 NON-HOLD]}}) (PICK-PLACE obj1 ON obj2) {WITH tool {TYPE= [HOLD 1 NON-HOLD]}})	

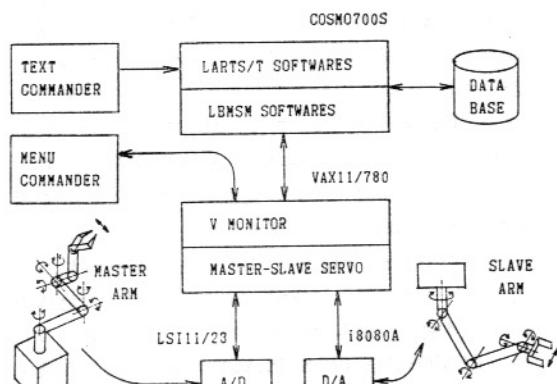
クロ命令が用意されている。 REMOVE の展開例は 4 章で示す。

### 3.4 エキスパンダ

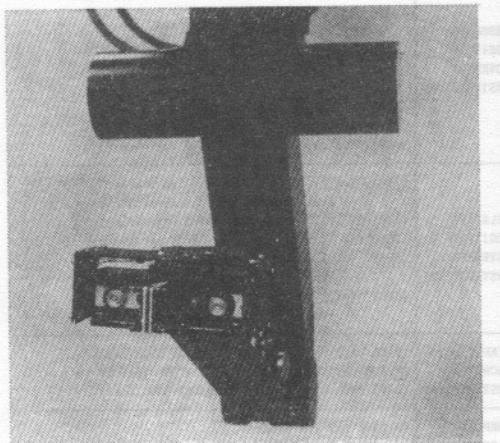
エキスパンダ (MACRO EXPANDER) はソースプログラム中のマクロ命令を展開して動作レベルのドロフトプログラムを生成する。各マクロ命令は展開されたドロフトプログラム中にコメントとして残され、展開プログラムの読み易さが保持される (Fig. 8 (b) 中の::印の部分)。この展開結果をそのまま教示用プログラムとして用いることのできる場合も多いが、必要に応じて命令の插入／削除などの編集もできるようになっている。

### 3.5 教示・実行システム<sup>12)</sup>

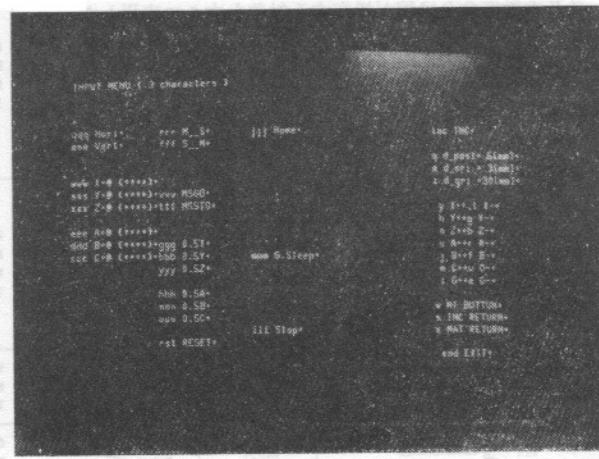
教示・実行システム (TEACHING-OPERATING SYSTEM) は、教示用プログラムを 1 行ずつ解釈して、オペレータに対し次に行うべき動作および教示すべき目標点などを指定した、たとえば下記のようなメッセージを送る。



### (a) Overview of prototype system



(c) Slave arm



(d) Menu commander

(APPROACH CAP AT CAP. APP)

.....次に行うべき動作の指定

press (Bi) at CAP. APP

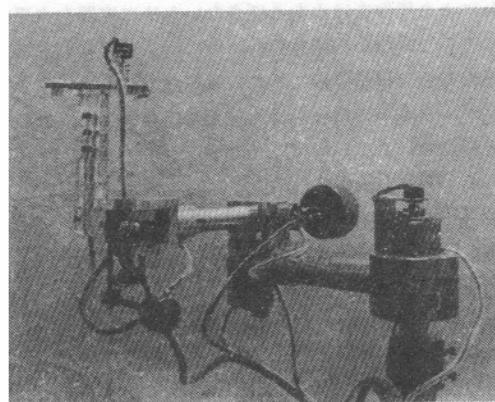
#### ……教示すべき目標点と教示法の指定

オペレータはこのメッセージに従って、主腕やメニュー コマンダを介して従腕を動かして作業を実行し、動作 完了時点で、主腕のボタン (Bi) またはメニュー コマンダによって教示・実行システムに知らせる。CAP, APP 等の変数は教示・実行システムにより自動生成される。

教示システムはこのようにして与えられた実データを用いて教示用プログラムから実行用シーケンスを生成する。具体的には、

(動作名 X Y Z A B C G S)

のリスト形式で記述された動作命令を作成中の実行用シーケンスに付け加えていく。動作名は APPROACH, GRIP などであり、X, Y, Z は手先の X, Y, Z 座標、A, B, C は各軸まわりの回転角、G はグリップの開き幅、



(b) Master arm

Sはデータタイプで、0のときこれが動作データであることを示す(Fig. 8(c) 参照)。

### 3.6 応用作業実行システム

応用作業実行システム(APPLICATION EXECUTING SYSTEM)は教示・実行により生成された実行用シーケンスの各動作命令や主従腕制御用言語をマニピュレータの制御コードに変換してはスレーブアームに送信するインタプリタである。実行用シーケンスは

(初期位置データ 動作1 動作2…動作i…)

のリストで保存されている。動作iはスレーブアームの移動、手先の開閉、拘束動作指定などの命令である。

逆順の生成は、上記のように与えられた実行用シーケンスを以下のような手順で逆にする。

① 実行用シーケンスの初期位置データを変数 FRM に格納する。

② 動作のリストから一つずつ動作を読み出し、それが

A MOVE 動作の命令なら、FRM をデータ引数とした新しい MOVE 動作を生成し逆シーケンスに加える。そして、現在の動作のデータを FRM に格納しておく。

B GRIP 動作なら、FRM を UN GRIP の引数として逆動作を生成し、逆シーケンスに加える。そして GRIP の引数を FRM に格納する。UN-GRIP も同様である。

こうして得られた逆順シーケンスを実行インタプリタにかけると逆順の作業が実現される。

## 4. 実験システム機器構成

LARTS/T の実験システムは、Fig. 6(a) に示すように、4台の計算機、主腕、従腕、2台の端末より構成されている。最上位の計算機 COSM 700 S 上には PETL システムがのっており、その上に TOL.O 言語、エキスパンダ、教示・実行システム、応用作業実行用インタプリタなどの LARTS/T ソフトウェアが具現されている。

中位の計算機 VAX 11/780 には V モニタという簡易モニタがあり、他の 3 台の計算機、メニューコマンダおよびマスタスレーブサーボ制御プログラム間の通信の制御を行っている。下位の計算機 LSI-11/23 は、主腕の各関節のデータ取り込みを行い、Intel i8080 A は従腕の関節角サーボ制御を行う。

主腕は 6 自由度のユニラテラル型の腕(同図(b))を、従腕はアセア型の腕で 5 自由度(同図(c))のものを使用している。メニューコマンダ(同図(d))は、主従腕用コマンド言語により与える諸方策の中で使用頻度の高いものを CRT ディスプレイ上に表示し、キーボードに

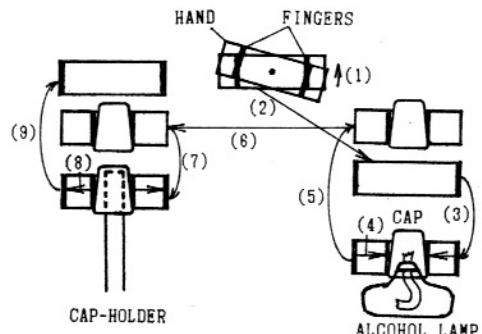


Fig. 7 Outline of experiment of removing cap from alcohol lamp

よりそれらを即座に指定したり、システムの内部状態を確認できるようにしたものである。また、従腕の位置を細かく制御するのに適した増分型制御(手先の位置、姿勢、開き幅がボタンを押すごとに一定量ずつ増減する)モードの使用もできるようになっている<sup>15)</sup>。

## 5. 実験例

このシステムを用いた実験例として、アルコールランプのキャップ外し作業の教示・実行、逆順実行、順実行実験を行った。作業内容の概略を Fig. 7 に示す。

### 5.1 作業の教示・実行の実験

最初に TOL.O の複合マクロ命令でソースプログラム Fig. 8(a) を作成し、それをエキスパンダで展開してドラフトプログラム (Fig. 8(b)) を得る。本実験の場合、このドラフトプログラムをそのまま教示用プログラムとして用いることができる。これを教示・実行システムにかけると実際の教示・実行作業が開始される。

作業の経過模様を Fig. 9 の (a) に、またテキストコマンダ上に示されるメッセージの一部を Fig. 10 に示す。教示・実行の手順は以下のようである。

操作者は教示・実行システムに教示用プログラムを指定したのち、

(1) まず、主従腕制御モードを指定し、ソフトウェア治具に水平拘束を指定して従腕の手先が水平に保たれるように指示し、キャップを把握しやすくする。

(2) (システムから) キャップへの接近点 CAP\_APP の教示要求が示される (Fig. 10 の (2))。これに応じ操作者は、主腕を操作して従腕をランプ上のキャップの付近まで移動する。目標点に到達したら主腕のボタンを押してシステムに(その座標・姿勢)を教える。

(3) キャップの把握点 CAP\_GRIP の教示要求が示される (Fig. 10 の (3))。ここで主従腕制御モードから増分型制御モードに切替え、メニューコマンダの操作に

よりキャップを持つべき目標点まで從腕を移動する。増分型に切替えるのは、スレーブの手先の中心をキャップの中心に細かく合わせるためである。位置が決まつたらキーボードのボタンを押してシステムに教える。

```
(REMOVE CAP)

(a) Source macro program.

(: REMOVE CAP TO CAP-HOLDER)
  (: PICK CAP)
  (APPROACH CAP)
  (MOVE-TO-GRIP CAP)
  (GRIP CAP)
  (LIFT-UP CAP)
  (: PLACE CAP ON CAP-HOLDER)
  (APPROACH CAP-HOLDER)
  (PUT-IT-ON CAP-HOLDER)
  (UN-GRIP CAP)
  (DEPROACH CAP)

";;" indicates comments.

(b) Expanded draft program.

((SEQ -39 0 100 0 0 0 0 0 0)
 (APPROACH 43 124 -30 0 0 -3 -33 0)
 (MOVE-TO-GRIP 97 136 -106 0 0 -3 -33 0)
 (GRIP 95 136 -106 0 0 -3 17 0)
 (LIFT-UP 85 136 -26 0 0 -3 17 0)
 (APPROACH 84 -78 5 0 0 0 13 0)
 (PUT-IT-ON 96 -72 -67 0 0 0 13 0)
 (UN-GRIP 96 -72 -67 0 0 0 -27 0)
 (DEPROACH 85 -72 31 0 0 0 -27 0))

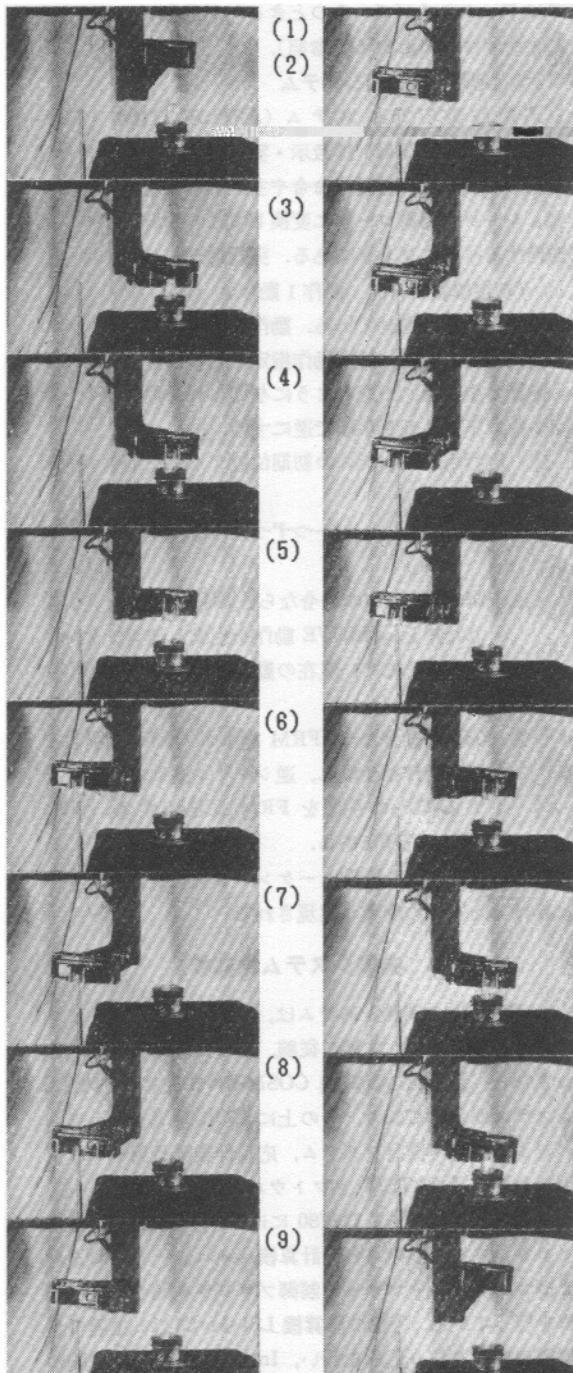
(c) Generated executable sequence.
```

Fig.8 Programs for remove cap from alcohol lamp

- (a) Source program
- (b) Expanded draft program
- (c) Generated executable sequence

```
(:: REMOVE CAP TO CAP-HOLDER)
  (: PICK CAP)
  (APPROACH CAP AT CAP.APP)
    press (M1) at CAP.APP ----(2)
    --[horizontal constraint is put
      from Menu Commander here]--
  (PUTCNSTS (SORI (A B) (0 0)))
  (MOVE-TO-GRIP CAP AT CAP.GRIP)
    press (M1) AT CAP.GRIP ----(3)
    --[incremental mode is selected
      from Menu Commander here]--
  MSGO off INCR on
  (GRIP CAP WIDTH= CAP.WIDTH)
```

Fig.10 Messages displayed on Text commander



(a) Scene of Teaching-Executing. This figure corresponds to the procedure of Fig. 7  
 (b) Scene of reversed sequence.

Fig.9 Scenes from experiments

(4) 同様にして、指先の閉じ幅 CAP. WIDTH を教示する。

(5) 同様にして、キャップを外すための CAP. LIFT を教示する。

(6) キャップホルダへの接近点 CAP-HOLDER. APP を教示するよう示される。ここで再び増分型制御モードから主従腕制御モードに切り換える、接近点を教示する。

(7) キャップをホルダに置く位置 CAP.PUT を教示するよう示される。再び主従腕制御モードから増分型制御モードに切替え、メニュー命令を操作してキャップをホルダーに置き、システムに知らせる。

(8) 同様にして、キャップを離す指の開き幅 CAP. WIDTH を教示する。

(9) 同様にして、キャップから安全な位置まで離れた点 CAP. DEP を教示する。これにより教示を終える。

以上の過程により生成された実行用シーケンス（プログラム）が Fig. 8 の (c) である。

## 5.2 応用作業実験

### 5.2.1 逆順実行

教示により生成された実行用シーケンスを基に、キャップホルダーからアルコールランプにキャップをはめ直す逆実行プログラムを生成し、この実行実験を行った。逆実行の模様を Fig. 9 の (b) に示す。

### 5.2.2 順実行

教示により生成された実行用シーケンスを再実行してアルコールランプからキャップホルダーにキャップを移す実験を行った。

それぞれの作業過程に必要とした時間は、教示が 5 分前後、逆順実行および再実行が 50 秒前後であった。

## 6. 実験結果の考察

本章では 5 章の実験の結果から、LDMSM の特徴を考察する。

### 6.1 作業の知的指導機能の効果

(1) 作業目的の指示を Fig. 8(a) のような高級言語によって先に与えておくので、操作者は自分が行うべき作業内容を構造的かつ簡潔に指示・把握できる。実際に展開すると同図 (b) のように長いものとなる動作記述が同図 (a) の 1 文で済んでいるのも、高級言語の記述能力の効果である。

(2) 教示実行システムが展開結果を解釈しながら、Fig. 10 のような形式で必要事項を操作者に指示する。操作者はこれに従いつつ主従腕を操作すれば良いので、直観的に作業を実行することができる。

(3) この作業実行方法は、いわば、操作者に手順の

確認をしながら作業の実行をすすめてゆくので、動作ミスを防止する効果がある。

### 6.2 環境記憶および応用作業機能の効果

(1) 実行終了段階には作業に関する手順・動作や環境のデータが保持される (Fig. 8 の (c)) ので、その作業の再実行が作業名の指定だけで即座に実現される。この機能により、難しいマスター操縦の要求される作業でも、一度だけ行えば次からの同じ作業は自動的に行うことができる。そして、再実行においては、最初の実行（教示）にかかる時間の大部分を占めていた、物体への安全な接近点、物体の把握点、物体の設置点等への位置・姿勢あわせのための時間が省略されるので、作業時間も短縮される。この機能はテレオペレーション中に何回も現れる作業の実行に有効に利用できる。

(2) 作業の実行シーケンスが 3.6 節の説明のような言語表現により生成されるので、これに基づき作業の逆順実行が Fig. 9(b) のように容易に実現される。この機能は、たとえば、道具を道具箱から取り出す手順を実行／教示し、使い終ったなら自動的に戻す、というようなことに利用できる。

## 7. まとめ

本論文では、テレオペレータへの環境記憶および応用作業機能の付与と、それに呼応した柔軟な教示方式の導入が、テレオペレータの知能化を図る上で重要な問題点であることを指摘し、それへの解決策として LARTS/T とこれを用いて実現可能となる「言語主導マスタスレーブマニピュレーション (LDMSM)」を提案した。

LARTS/T は高級言語と主従腕を協調的に併用できるようにした 2 層構造のテレオペレタシステムである。この LARTS/T を用いた LDMSM の特徴は、作業に先立ち高級ロボット言語を用いて作業の概略構造を与える、環境すなわち作業に必要な空間点をこの構造から導かれる手順に沿った作業の中で記憶する点である。これにより、作業の実行時において、実行すべき動作や教示すべきデータ名などの事項が教示システムから明示されるので、操作者はそれに従いつつ主従腕操作やコマンド支援機器を用いて柔軟かつ直観的に作業を実行できるようになった。また、その作業結果がロボット言語により記述されたプログラムとして保存されるので、その作業の再実行や逆順実行などの応用作業が実現されるようになった。作業実験により示されたように、これらの機能はいずれも遠隔操作作業における操作者の負担軽減に効果がある。

この LARTS/T のスーパストラクチャは人工知能向き言語である Lisp 上に具現されているので、今後、

実用化の期待される高度なプランニング機能やパターン認識機能などの知能的機能の援用も容易である。これらは知的遠隔操作システムとしての LARTS の今後の重要な研究課題である。

また、本論文の範囲における LARTS/T の適した作業対象は専ら作業を記述する言語 TOL.O の仕様に依存している。LARTS/T の適用範囲をより広げていくためには、TOL.O の拡張も進めていく必要があろう。これも LARTS に関連した今後の重要な課題と考えている。

LARTS/T は、作業の進行に従って環境を記憶していく能力のあるテレオペレータシステムであり、非整備環境下での作業の実行に有効に利用できると考えられる。さらにこの LDMSM は、ティーチングペンドントと高級ロボット言語を用いた産業用ロボットへの直観的で柔軟な教示法にも応用可能である。またこの考え方は、単にロボットに留まらず、建設機械や農業機械の知能的操縦へも応用し得るものである。

〔謝 辞〕 本研究を行う機会をお与え下さった当所制御部長の若松清司氏、システム制御研究室長の赤堀寛氏、情報制御研究室長の柿倉正義氏、従腕の整備・調整に御尽力頂いた末広尚士氏、主腕を製作して頂いた当所工作課の皆様、実験に協力頂いた明治大学の堀場隆広氏に感謝致します。また日頃より御討論頂いた制御部の皆様にも感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) E. G. Johnsen and W. R. Corliss, "Teleoperators and Human Augmentation. An AEC-NASA Technology Survey", p. 65, NASA SP-5047, 1967
- 2) D. E. Whitney, "State Space Models of Remote Manipulation Tasks", Proc. 1st IJCAI, pp. 495-507, 1969

#### 平井成興 (Shigeoki HIRAI)

昭和 48 年東工大・工・機械物理卒、50 年東工大大学院修士課程了、53 年東工大大学院博士課程了。同年電子技術総合研究所入所。以来、知能ロボット、知識工学、アドバンストテレオペレータなどの研究に従事。現在所主任研究官。

(日本ロボット学会正会員)



#### 佐藤知正 (Tomomasa SATO)

昭和 46 年東大・工・産業機械卒、48 年東大大学院修士課程了、51 年東大大学院博士課程了。同年電子技術総合研究所入所。以来、超音波ホログラフィを用いた水中撮像、アドバンストテレオペレータ、ハンド

アイシステムなどの知能ロボットの研究に従事。現在所主任研究官。58~59 年米国ウッズホール海洋学研究所客員研究員。

(日本ロボット学会正会員)

- 3) W. R. Ferrell and T. B. Sheridan, "Supervisory control of remote manipulation", IEEE spectrum OCTOBER, pp. 81-88, 1967
- 4) T. B. Sheridan, "Supervisory Control of Remote Manipulators, Vehicles and Dynamic Processes: Experiments in Command and Display Aiding", CONTRACT N 00014-77-c-0256, MIT, 1983
- 5) A. Freedy et al., "A Computer-Based Learning System for Remote Manipulator Control", IEEE Trans. SMC. Vol. 1-4, pp. 356-363, 1971
- 6) D. J. Barber, "MANTRAN: A Symbolic Language for Supervisory Control of An Intelligent Remote Manipulator", DSR 70283-3, MIT, June 1967
- 7) 平井, 堀場, 佐藤, "LARTS: 言語介在型テレオペレータシステム——言語主導によるマスタスレーブマニピュレーション法——", 第 1 回ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 33-36, 1983
- 8) K. Takase, R. Paul and E. J. Berg, "A Structured Approach to Robot Programming and Teaching", IEEE Trans. SMC. Vol. 11-4, pp. 274-289, 1981
- 9) S. Mujtaba and R. Goldman, "AL USER'S MANUAL", Stanford AI Lab. Memo AIM-323, 1979
- 10) L. I. Lieberman and M. A. Wesley, "AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly", IBM J. R. and D., Vol. 21-4, pp. 320-333, 1977
- 11) 平井, 佐藤, "LARTS: 高級言語 TOL.O に基づく作業教示システム——TOL.O の仕様", 第 22 回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 111-112, 1983
- 12) 平井, 佐藤, "LARTS の教示実行法の仕様——LBMS M システムと結合した作業教示例——", 第 22 回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 109-110, 1983
- 13) 電子技術総合研究所, "PETL システム説明書——基本システム編——", 1982
- 14) 平井, 佐藤, "言語介在型マスタ・スレーブ・マニピュレーションシステム, 計測自動制御学論文集, Vol. 20-1, pp. 78-84, 1984
- 15) G. P. Starr, "A Comparison of Control Modes for Time-Delayed Remote Manipulation", IEEE Trans. SMC. Vol. 9-4, pp. 241-246, 1979

本稿は、新潟県立新潟高等専門学校の「機械工学科」にて、昭和 59 年度卒業論文として提出されたものである。  
著者名: 平井成興 (Shigeoki HIRAI)  
監修者名: 佐藤知正 (Tomomasa SATO)  
指導教員名: 佐藤知正 (Tomomasa SATO)  
卒業年: 昭和 59 年度

## Language Directed Master-Slave Manipulation Method Using LARTS/T\*

Shigeoki HIRAI\*\* Tomomasa SATO\*\*

### ABSTRACT

This paper describes LARTS/T, a Language Aided Robotic Teleoperator System/Teaching oriented version. This system incorporates a high level robot language with a master-slave manipulator system. A new teaching-operating method which uses LARTS/T called LDMSM (Language Directed Master-Slave Manipulation) is also described.

The LARTS/T allows the operator to use language instruction and the master-slave operation cooperatively while preserving the merits of each. The most important feature of the LDMSM is that the structural contents of a task is written with a high level robot language and given to the system before-hand. In this way the system can learn spatial points needed for the task (environment) from the task performed by the operator following the movements derived from the structure. As a result of this feature, operating the system serves to teach to the system in the robot language.

In this paper, experiments performed on a prototype system are described. Results of these experiments demonstrate that the LDMSM is a flexible and intuitive teaching method for a tele-operator. They also show that the LARTS/T has the ability to learn environment and execute the tasks in modified ways while maintaining the immediate usability of teleoperators.

Keywords : Advanced teleoperator, Robot language, Language directed master-slave manipulation, Teaching, Environment learning

\* Received July 24 1984

\*\* Automatic Control Division, Electrotechnical Laboratory