

動的再構成可能ロボットシステムに関する研究*
(第5報, ロボットの自己組織化エンドエフェクタの概念と
その機構と制御に関する研究)

福田 敏男*¹, 小野 耕一*², 川内 陽志生*³, 薛 国慶*⁴
新井 史人*¹, 浅間 一*⁵, 大森 弘亨*⁵, 遠藤 勲*⁵

Dynamically Reconfigurable Robotic System
(7th Report, A Study of the Concept, the Mechanism
and the Control
System of the Self-Organizing Endeffector)

Toshio FUKUDA, Koichi ONO, Yoshio KAWAUCHI, Guoqing XUE
Fumihito ARAI, Hajime ASAMA, Hiromichi OMORI and Isao ENDO

This paper deals with a method of constructing manipulators based on the concept of the cellular robotic system (CEBOT). The method proposed here is that the robotic manipulator picks up desired cells sequentially to reconfigure required manipulator forms. The proposed universal manipulator consists of several types of cells which have their own elementary functions, such as rotating, sliding and bending functions. Every cell can communicate with other cells by using the proposed communication protocol. An experimental result of communication among cells is also reported. In this system, the manipulators must reconstruct themselves in order to efficiently execute various tasks. Thus, optimal structure is dealt with in this paper. This method contains a computational method of the optimal structure depending on tasks and an algorithm of the structure planning. This manipulator is constructed by using a large expert manipulator which has an optimal structure planning system. We show an experimental result of an autonomous constructing cellular universal manipulator by using manipulators. This proposed total system includes the outer manipulator and will be applicable to a new kind of universal manipulator system in factories.

Key Words: Robotics, Universal Manipulator, Cellular Robotic System, Optimal Structure Planning, Communication System

1. はじめに

現在, 工場では多品種小量生産が求められ CIM (Computer Integrated Manufacturing) などが導入されて, 単一ロボットに多様な作業を対応させることが必要とされている。このためにはロボットに取付ける多形態のエンドエフェクタが不可欠である。

そこでロボットをある自律的機能を有する要素(以下セルと称する)に分割することにより, システム全体を作業目的や, 作業環境に応じて最適な形に再構成させることのできるセルラ・ロボティクス (Cellular Robotics) CEBOT の一形態である自己組織化エンドエフェクタを提案する。現在までに CEBOT の研究成果としてセル同士の認識, 自動接近結合, 障害物回避, 最適形態化理論について, それぞれ有効な結果を得ている^{(1)~(5)}。

本研究では, まず自己組織化エンドエフェクタの試作セルの設計製作, 制御, そして最適形態化理論を発

展させることについて主に研究を進めていき, 数種類のセルを数多く製作することと, それをもとに最適な構造を決定しその構造体をロボットマニピュレータによって生成し, 制御することを目的とする。

2. 自己組織化エンドエフェクタの機構

本研究では外部マニピュレータなどによって各基本セルを合体させることによってエンドエフェクタを構成することを考えている。その構想概念図を図1に示す。従来の CEBOT では, 移動機構を有するため, 小

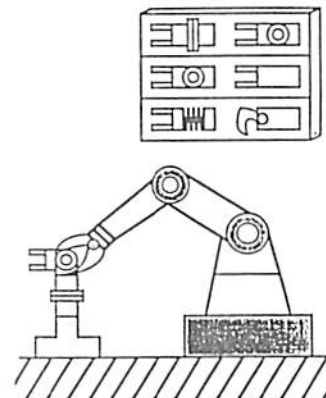


図1 自己組織化エンドエフェクタの基本概念図

* 原稿受付 平成2年4月11日。

¹ 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1)。

² (株)日立製作所小田原工場。

³ 東洋エンジニアリング(株) (〒275 習志野市西浜2-8-1)。

⁴ 名古屋大学工学部研究生。

⁵ 理化学研究所 (〒351-01 和光市広沢2-1)。

形化が困難であったが、本研究では外部装置によってエンドエフェクタを構成させることを考えたため、従来より簡略、小形軽量化した設計を行うことができた(表1参照)。

基本セルとして延長セル、同軸回転セル、屈曲セルを設計し、試作した(図2)。

2.1 結合機構 まず各セルの共通部分としての結合機構であるが、延長セルの構造を図3に示す、結合機構はウォームを用いたセルフロック機構を利用した。これはウォーム機構を利用することにより結合後の剛性を保つことができている。結合はウォーム機構で動く2本のアームにより行われるが、この結合用のアームはセルの最前部に取付けてあることから、爪の形状を改良することによって簡易形のマニピュレータとしても利用できると思われる。

結合用アームの制御には、ポテンシオメータでウォーム軸の回転角を検出し位置制御をかけている。目標位置の与え方としては通常はDI/Oを用いて開くか閉じるかだけを命令として与えるが、D/Aを用いればアームを開く角度をアナログ的に制御することができる。図4にフックをD/Aにより制御した結果を示す。

2.2 同軸回転セルの機構 同軸回転セルは、同軸回転の自由度を持つセルであり、セル中央に同軸回転軸が通っている。そこで同軸回転セルでは、フック機構用のモータを回転軸の中心に持ってきて、モータ

を取り囲むように回転軸を設計した。そしてその軸には、同軸回転用のスパークギヤが取付けてあり、軸を回転させることにより結合機構を持つセル上部を回転させることができる。

回転角の制御は、同軸回転角の角度をポテンシオメータにより検出しハードウェアサーボをかけている。目標角度はD/Aを用いてアナログ的に与えている。

2.3 屈曲セルの機構 従来CEBOTでは屈曲セルは、それぞれ別々の機構を持った垂直屈曲セルと水平屈曲セルが存在し、構造体の関節の使い方によってどちらを使用するのか場合分けが必要であった。本試作機では結合用フックを受ける溝を四角いセルの各側面に作り、アームをどの溝に挿入するかによって水平または垂直の屈曲を選択できるようになった。

各基本セルの中で屈曲セルに要求されるトルクは最も大きいものであるが、本機では約18 kg・cmとなっている。屈曲角の制御はモータの回転角をポテンシオメータで取り込みハードウェアサーボをかけている。また目標角はD/Aを用いてアナログ値を与えている。

2.4 制御システム 本システムの制御系を図5に示す。CPUからの指令により各セルの結合用フックと各ジョイントモータが動作するようなサーボ系を構

表1 セルの仕様

Cell name	weight g	scale(l*w*h) mm
Extention Cell	300	50*50*100
Rotating Cell	508	50*50*100
Bending Cell	605	50*50*150

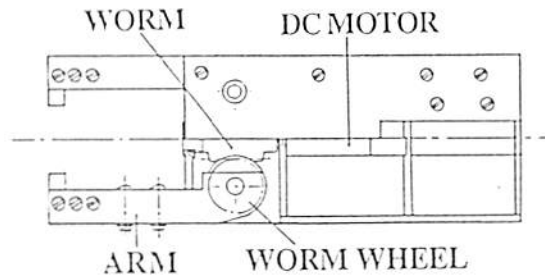


図3 延長セルの構造

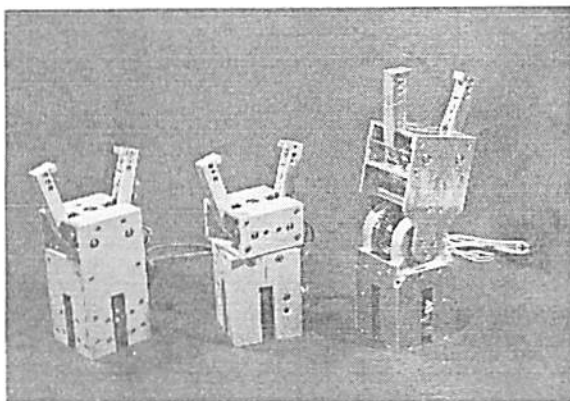
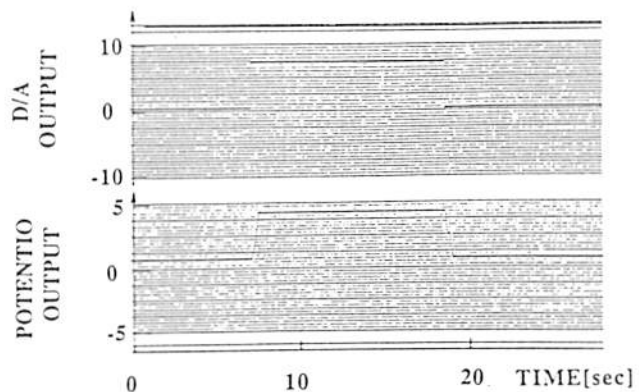


図2 セルの外観(左より、延長セル、同軸回転セル、屈曲セル)



HOOK CIRCUIT (OPEN->CLOSE->OPEN)

図4 フックの制御結果

成している。

フック系は、DI/Oによるon/off制御を行っているが、D/Aによるアナログ入力とすればフックアームの開き角の制御ができ、フックアームをマニピュレータとして作業させることが可能となる。

一方セルが構造体を構成したときの通信ができるようにシリアル通信用のラインを設けてある。現在そのラインは、結合用フックアームの内側にフィンガコンタクトを取付け、そのアームを受ける溝側に焼青銅板を取付けてラインのコネクタとしている。

3. 最適形態について

3.1 最適形態の選定 自己組織化エンドエフェクタは、セル構造化ロボットの一形態なので、目的に応じていろいろな形に再構成させることができる⁽¹⁾。ここでは、図6に示すような3リンクのマニピュレータを構成させ、N個の作業点に対してエンドエフェクタが作業できるような形態を選定することを考える。

具体的には、各リンクのねじれを補正するために必要な3自由度と、中間リンクの長さを調整する1自由度を加えた6自由度のマニピュレータモデル(図7)を考える。図7においてJは関節を、 ϕ は関節の変位量を意味する。原点の位置姿勢ベクトルQと目標位置姿勢ベクトルPを与えるとベースセルおよび目標位置からのセルの接続方向と、セルの持つ基本長から決定される各基本リンクの長さの組合せができる。ここでは各基本リンク長を仮定し、ききに各関節変位 ϕ

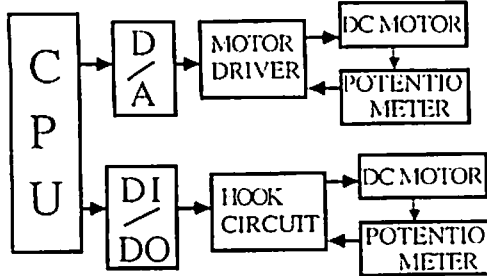


図5 自己組織化エンドエフェクタのシステム図

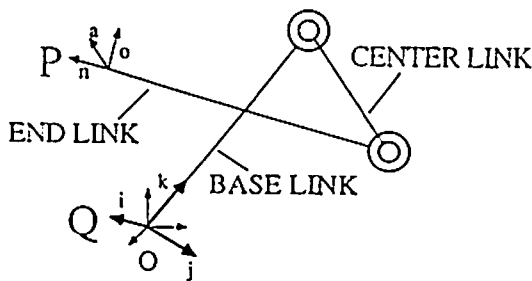


図6 3リンクマニピュレータモデル

～ ϕ_6 を求めておき、次に、各リンクの長さの組合せについて考える⁽⁶⁾。角度を求めるとき問題を次のように定義し解く。「6自由度マニピュレータにおいて、初期状態(各関節変位=0)の位置 P_0 、姿勢 (e_x, e_y, e_z) にある物体を作業点 P_n (姿勢 (e_{ux}, e_{uy}, e_{uz}))にもっていくには各関節変位 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_6$ をどう定めればよいか?」

(A) J_5, J_6, P_n は一直線上にあり e_{ux} の方向を向いているので J_5, J_6 の位置は、

$$\vec{J}_6 = \vec{P}_n - l_6 e_{ux} \dots \dots \dots (1)$$

$$\vec{J}_5 = \vec{P}_n - (l_5 + l_6) e_{ux} \dots \dots \dots (2)$$

(B) $J_2(O), J_3, J_4, J_5$ は、同一直線上にある。

(C) J_5 の回転軸の方向ベクトル e_{5y} は e_{ux} と $\vec{J}_2\vec{J}_5$ とに垂直である。

$$e_{5y} = \frac{\vec{J}_2\vec{J}_5 \times e_{ux}}{|\vec{J}_2\vec{J}_5 \times e_{ux}|} \dots \dots \dots (3)$$

以上の関係からすべての関節変位 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_6$ が求まる。式(3)から与えられる位置を $\vec{J}_5 = (x_5, y_5, z_5)^T$ とすると、

$$\phi_1 = \tan^{-1}(y_5/x_5) \dots \dots \dots (4)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{z_5}{\sqrt{x_5^2 + y_5^2}} \dots \dots \dots (5)$$

$$\phi_3 = \sqrt{x_5^2 + y_5^2 + z_5^2} - l_4 \dots \dots \dots (6)$$

e_{5y} は、式(3)、 $e_{2y} = (-\sin \phi_1, \cos \phi_1, 0)^T$ であり、 e_{2y} と e_{5y} とのなす角が ϕ_4 、 $\vec{J}_2\vec{J}_5$ と e_{ux} とのなす角が ϕ_5 、 e_{5y} と e_{ux} とのなす角が ϕ_6 である。 $\vec{J}_2\vec{J}_5 / (\phi_3 + l_4) = e_{2x}$ とおくと、

$$\phi_4 = \tan^{-1} \frac{(e_{2y} \times e_{5y}, e_{2x})}{(e_{2y}, e_{5y})} \dots \dots \dots (7)$$

$$\phi_5 = \tan^{-1} \frac{(e_{2x} \times e_{ux}, -e_{5x})}{(e_{2x}, e_{ux})} \dots \dots \dots (8)$$

$$\phi_6 = \tan^{-1} \frac{(e_{5y} \times e_{ux}, e_{ux})}{(e_{5y}, e_{ux})} \dots \dots \dots (9)$$

以上で各関節の角度は求まった。

次に各基本リンクの長さであるが、6自由度モデル

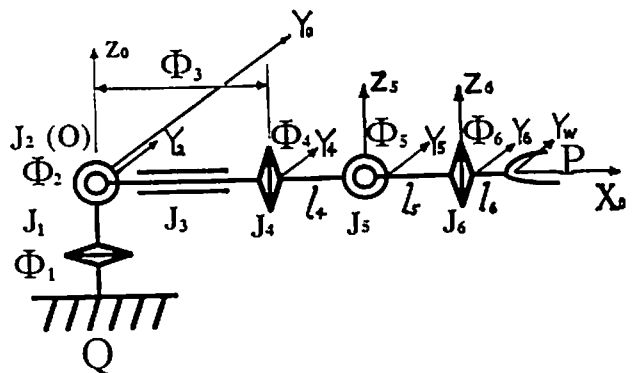


図7 6自由度マニピュレータモデル

にあったように必要関節のセルの長さを考えるとベースリンク長 $b=(2+n)l$, エンドリンク長 $e=(2+m)l$ となり (n, m) の組合せ $(n, m=0, 1, 2, \dots)$ の中から幾何学的拘束条件を満たし形態評価関数を最小にするものを最適形態と決定する。

ただし、幾何学的条件とは、リンク相互干渉条件、関節可動範囲条件、関節間結合可能条件などである。

形態評価関数 S として次のような数式を考えている。

$$S = \sum_{n=1}^N (a_1 P_n + a_2 H_n) + a_3 \sum_{n=1}^{N-1} L_n + a_4 C$$

記号の意味を以下に示す。

N : 作業点の総数

P_n : 作業点 n におけるマニピュレータ先端での位置決め精度に関するパラメータ

H_n : 作業点 n における関節セルの姿勢維持トルクに関するパラメータ

L_n : 作業点 n から作業点 $(n+1)$ へのポーズ変化時における関節セルの変位量に関するパラメータ

C : セルのコストに関するパラメータ

$a_1 \sim a_4$: 重み関数

この形態評価関数 S を最小にする形態候補が最適形態である。

3.2 最適形態の組立順序 最適形態が決定すると次に、その形態にセルを組立てて構造体を作らなければならない。ここでは最適形態決定後の構造体の組立順序について考える。

基本的にセルは、ベースセルから順に下から積み上げることにする (ここでベースセルとは組立の際に構造体の土台となるセルのことをいう)。3.1 節では触れなかったが、最適形態に分岐セルが含まれている場合の分岐の仕方についても考えることにする。

分岐セルは、各々固有の分岐数 $n(k)$ を持っており、

分岐先にそれぞれ $1 \sim n(k)$ の分岐番号がついているものとする (ただし k はセル固有のセルアドレスを示す)。

また1回分岐するごとに分岐順位 J が1ずつ増えていくことにする。すなわちベースセルに近い分岐セルほど分岐順位 J が小さいことになる。

① まずベースセルから順に構造体が最適な形態となるような順番で次々にある機能を持つセルを結合していく。

② 分岐セルを結合したとき、分岐セルの分岐は分岐番号の大きい順に起こるので、分岐番号 $n(k)$ の方向から分岐し、組立てはじめることになる。組立てていくうちにエンドエフェクタセルを結合したとする。そのときは先ほどの分岐セルの $n(k)$ 方向の分岐が終了したと考えて、その分岐セル (分岐順位 J) まで戻り、続いて分岐方向 $n(k)-1$ の分岐先へと分岐していく。

③ 分岐番号1の分岐方向まで組立が終了したとすると、そこで分岐順位 J の分岐セルの組立は終了したものと考えて、その前に分岐した分岐セル (分岐順位 $J-1$) まで戻り②を繰返す。そして分岐順位1 (ベースセルからみて初めて分岐することになる分岐セル) の分岐セルのすべての分岐方向の組立が終われば、構成すべき構造体の完成である (図8)。

構成すべき構造体に closed loop がある場合は、図9のように組立てはじめたベースセル以外のベースセルは、ダミーのベースセルとしてみなす。また一度分岐している分岐セルへの結合するとき、ダミーのベースセルやその分岐セルをエンドエフェクタセルとみなして、結合後分岐順位 J の分岐セルまで戻ることとする。

以上のことを考えて closed loop の有無にかかわらず構造体を構成できる組立順序をフローチャートとしてまとめる (図10)。このアルゴリズムを用いた最適形態の組立順序のシミュレーション例を図11に示す。こ

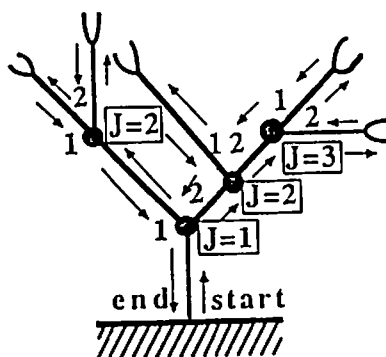


図8 組立手順

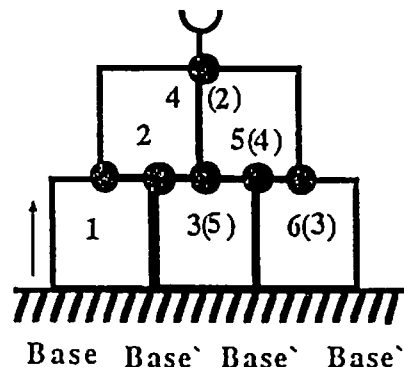


図9 閉ループのある場合の組立手順

れによりグリッパを構成することができる。

4. 通信について

自己組織化エンドエフェクタは、その小形化の必要性から、セルは外部装置によって組立てられるものとした。そこで自動結合に必要な分離時通信⁽³⁾には触れず、セル結合時の通信について考える。

4.1 通信の必要性 自己組織化エンドエフェクタは最適形態を形成した後、構造体を制御したり、セル間でデータを転送するために結合時に通信をする必要があり、また構造体の自己診断機能も必要となる。

試作機では、アームの内側にフィンガコンタクトを設置し、ほかのセルと結合したとき通信信号を送ることが可能である。結合されたセルはその信号を溝の中の接点で受け、セル内のケーブルを通してアームから

その前に結合したセルに信号を送ることになる。セル自身はケーブルを通して必要な情報を送受信できる。

4.2 通信プロトコルについて 試作したセルでは、通信ラインとしてケーブルが2本しかないので、通信はシリアル通信とする。通信信号は、8ビット単位で最低で2回すなわち16ビットをひとつの通信信号として通信する(図12)。この8ビット単位をストップビット側より順にD₆からD₇とする。また送るべきデータの長さに応じてさらに8ビット単位で通信信号の長さが長くなる。通信信号の最初の8ビットは、これから送るデータの内容を表す。最初の1ビットは信号の有効、無効を表し、続く3ビットは送るべきデータの意味(Function Words)を、残る4ビットは次に送るデータの長さを示す。

最初の8ビットが終わると、続いてデータ本体が送られることになるが、最初の8ビットの中で与えられたFunction Wordsによって、データ長(以降LD)の

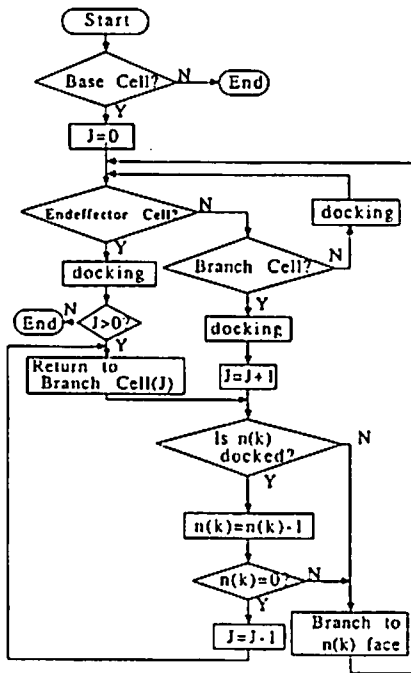


図10 組立のフローチャート

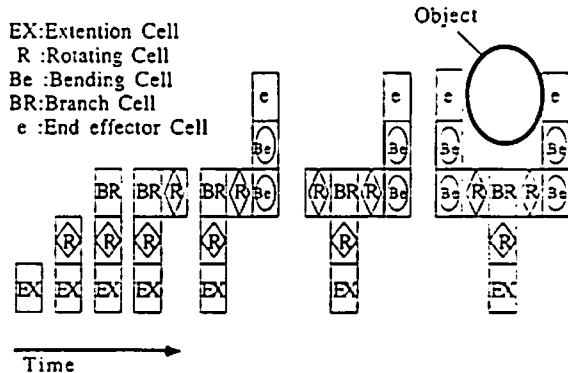


図11 組立順序のシミュレーション例

表2 Function words

Bit	Function
D ₆ D ₅ D ₄	Data Word Type
0 0 0	Address
0 0 1	Control
0 1 0	Data
0 1 1	} Spare
1 0 0	
1 0 1	
1 1 0	} Spare
1 1 1	
1 1 1	Bus reset

表3 コントロール語とその意味

Ctrl	Description
\$0x	Confirmation from Cell[x]
\$10	Attention, next words are Cell-Addresses
\$11	End of Attention, next word is Address
\$12	Check for Cell malfunction
\$2y	Read present actuator position
\$3y	Change actuator to new position
\$4z	End of [z]'s command
	y=0 : Hook coupling mechanism
	y=1 : Bending mechanism
	y=2 : Rotating mechanism
	y=3 : Sliding mechanism

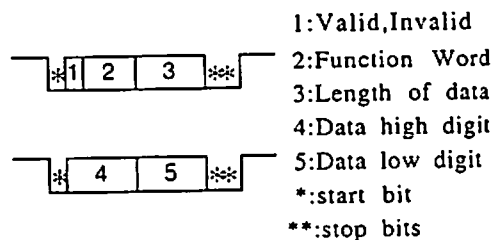


図12 通信プロトコル

意味が変わってくる。

Function Wordsが、コントロール語を示している時はLDは必ず1を示し、次の8ビットは、4ビットずつに分けられコントロール語を示す。

Function Wordsがセルアドレスを表すときには、LDは1~16を示し、LD×4ビットが送信セルのアドレスおよび受信セルのアドレスの長さを示す。データは送信セルアドレス、受信セルアドレスの順に連続して送信される。よってデータはLD×8ビットが送られることとなる。これにより呼び出し可能なセルの数が従来の16個から、2⁶⁴個に増えた。

Function Wordsが単なる数値(データ)を示す場合は、データの長さはLD×8ビットとなる。

ここでFunction Wordsおよびコントロール語についてまとめる(表2, 3)。表2中のビットD₆, D₅, D₄はFunction Wordを示し表3中の\$は以下に続く数字が16進数であることを意味し、x, zはセルアドレスを、yは機構の種類を意味する。また図13にセル間の通信の実験結果を示す。図13はセル1がセル2に対して回線の要求(Function Word \$10)を行ったときのセル1の通信回線(chan 1)、セル2の通信回線(chan 2)の出力状態を示している。通信は8ビットずつ3回、計24ビットの信号が送られており、最初の8ビットでは図12の1(Valid, Invalid)の部分がON、2(Function Word)の部分が(001)、3(Length of data)の部分が(0001)を示している。まん中の8ビットではコントロール語として回線の要求を示す"\$10"(表3参照)が送られている。したがって図12の4(Data high digit)で(0001)を、5(Data low digit)で(0000)を送っている。コントロール語"\$10"の場合はその後送信セル、受信セルのアドレスを送るため、最後の8ビットの上位4ビットは送信セルのアドレスとして(0001)を下位4ビットでは受信セルのアドレスとして(0010)を通信している。各々の8ビットは1ビットのスタートビットおよび2ビットのストップビットでは

さまれている。

4.3 エラーチェックおよび自己診断 通信においてエラーチェックは必要である。ここでは本システムのエラーチェック機構について述べる。まず通信エラーの起こる原因を考え、その対策について述べる。

①送信機の故障：送信機が故障している場合、送信セルは受信セルからの応答を得られないため(送信セルは数回受信セルを呼びだし、その応答を待つ)すべての通信ステップを無効としなければならなくなる。

②受信機の故障：①の場合と同様に、送信セルからの信号を正しく受け取れないため、受信セルは送信セルに応答することができず、送信セル側で通信内容を無効とされてしまう。

③送信セルと受信セルが繋がっていない：セル同士の結合がうまくいっていないかフックアームの損傷などによって通信ラインが途切れて通信ネットワークが構築されていない場合は、①および②が同時に起こっている事態であり、通信内容は無効とされるが、ここで送信セルは構造体がどこまで正常に構築されているかをチェックし不良箇所を探索する。

④誤信号が受信される：セル同士がしっかり結合し通信ネットワークが完成されていても、送信セルが出力した信号と受信した信号が異なる場合がある。特に自己組織化エンドエフェクタのように通信ラインの結合を金属板の接触だけに頼っている場合は、接触抵抗の変化や異物による接点間の絶縁などによってバスラインを流れている信号が正しく伝わらないことがある。自己組織化エンドエフェクタではこのような事態に対応するためハードウェア自体にパリティ機能を持ったものを使用している。このほかにプロトコル自体にエラー検出コードを挿入してチェックを行う方式もあり、ソフトウェアでもチェック機能を搭載すればより確かな誤信号の発見ができるはずである。

以上のことから一時通信を中断し不良箇所を点検修理しなければならない。現段階では、上述の③で述べ

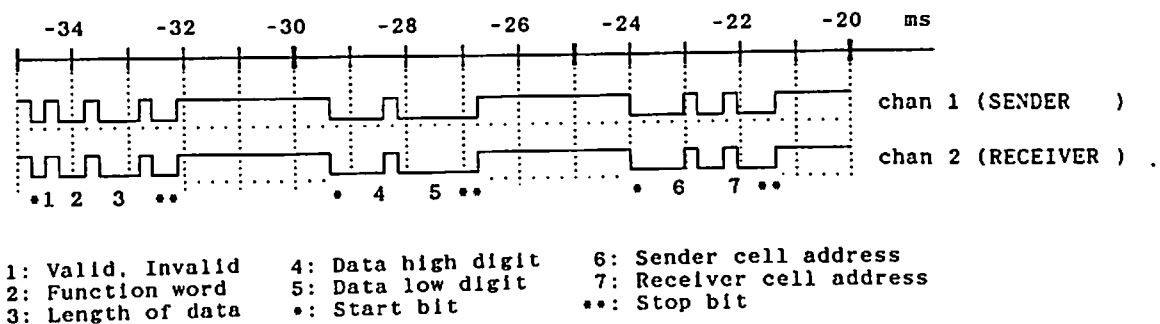


図13 通信実験結果

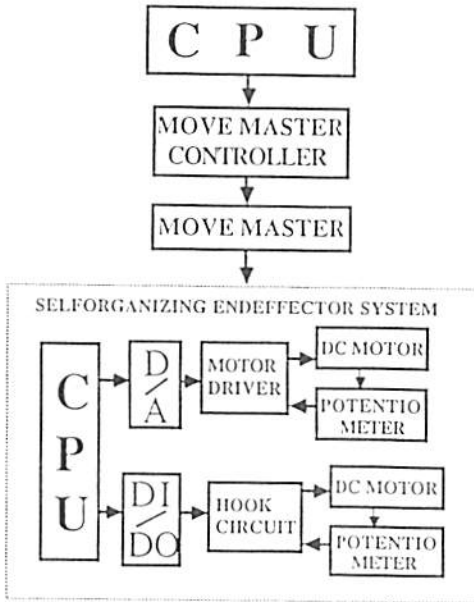
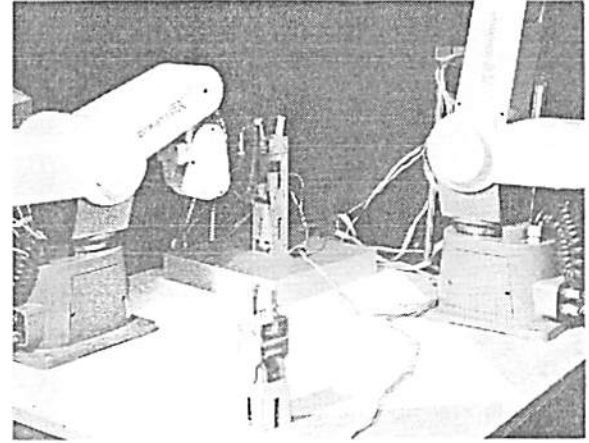


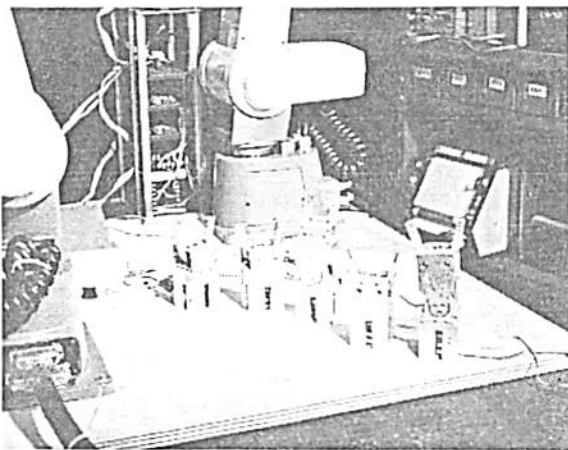
図 14 ムーブマスターシステム図

た通信ラインの切断を考えることによってどこまで構造体が正常であるのかを確かめることができる。

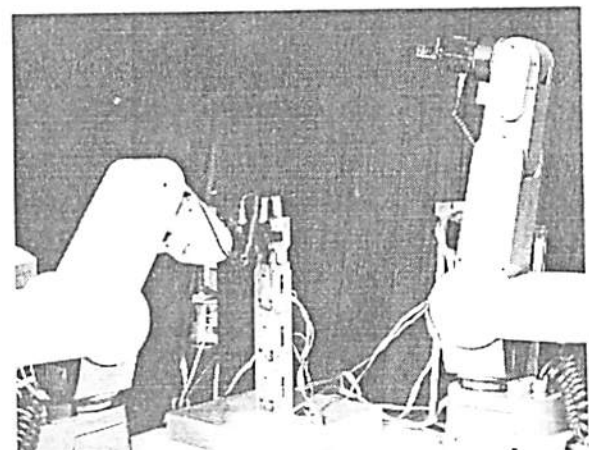
セルが最適形態を構成したときにその構造体を管理するセルをマスターセルとすると、マスターセルは、自分に近いセルから順に信号を送り返答があるかないかを



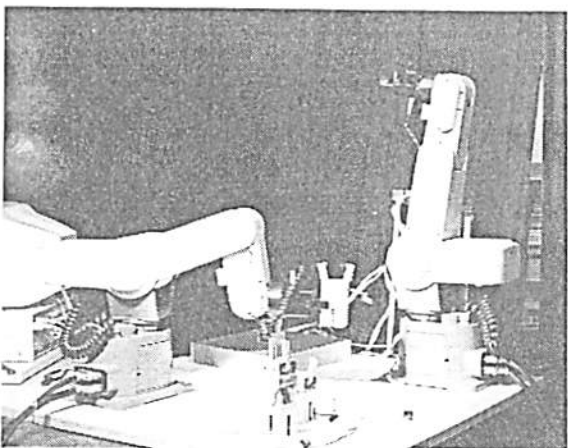
(c) 過程



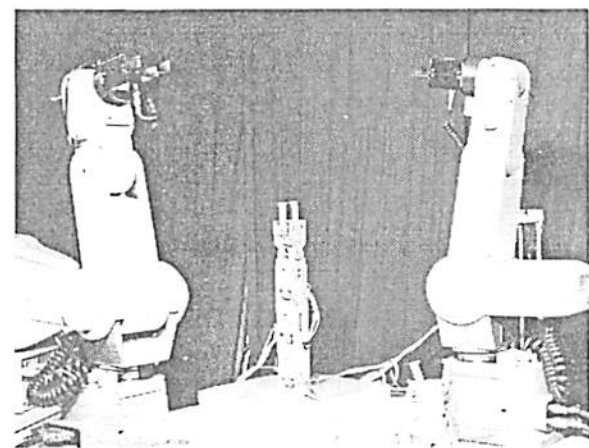
(a) 組立前



(d) 過程



(b) 過程



(e) 組立終了

図 15

確認して返答がなければそのセルが異常であると判断し、そのセルを取り替える。

もし交換しても同じ状態が続くようであれば、交換したセルよりひとつ手前のセルの接点に異常があると判断して、そのセルを取り替えることとする。

このように故障に対してシステム全体を取り替えることなく故障箇所のセルを交換するだけでよいというセル構造化ロボットのフォルト・トレラント性を自己組織化エンドエフェクタは備えている。現段階では通信要求信号に対する応答を受けることによって故障診断をしているが、自己診断用のコントロール語を設定することにより、より細部まで診断が可能とすることが今後の課題の一つとしてあげられる。

5. 組立実験について

自己組織化エンドエフェクタとしての動作機能を試みるために、ロボットマニピュレータによるセルの組立実験を行った。実験に用いた組立用ロボットは、三菱電機(株)製 RV-M1 (通称ムーブマスター)である。このロボットは図 14 に示すように CPU およびコントローラによって制御されている。将来はこの組立ロボットに知能をもたせ、各種のタスクのプランニングを導出する予定である。今回はビジュアルシステムを用いていないため、最適形態およびセルの位置は前もって与えておきロボットが組立可能かどうかを実験した。実験は、数多くあるセルの中から必要な機能を持つセルを抽出して順に組立てていく。ムーブマスターは 2 台あるが、今回は双アームの協調作業は行わず、1 台のロボットで組立を行った。実験結果を図 15(a)～(e)に示す。

(a)は、現在試作したすべてのセルを並べたところである。実験ではこのうち 3 個のセルを結合させる。(b)は、1 個めのセル(延長セル)をロボットマニピュレータが把持しベースセルに結合させようとしているところである。(c)は、2 個めのセル(同軸回転セル)を 1 個めのセルに結合させているところである。(d)は、最後の屈曲セルを 2 個めのセルに結合させ結合用フックを閉じているところである。(e)は、組立が終

了しエンドエフェクタが構成されたところである。

この結果、生成されたエンドエフェクタは 2 自由度を有し、機能することが確認された。ただし延長セルをほかの自由度を持つセルに代えれば 3 自由度になる。問題点としては、アームと溝のはめあいから、結合に精度が要求されることである。

6. ま と め

(1) セラ・ロボティクスの一つとしてロボットの自己組織化エンドエフェクタシステムの概念を提案し、そのうち延長セル、同軸回転セル、屈曲セル、ベースセルを試作しその動作を確認した。

(2) 自己組織化エンドエフェクタの最適形態を構成するためのアルゴリズムを考案し、またその形態を構成するための順序のアルゴリズムを提案し、自己組織化エンドエフェクタのフンキシビリティを示した。

(3) 自己組織化エンドエフェクタの情報通信・制御システムについて考案し、基礎実験によりその可能性を示した。

(4) ロボットマニピュレータにより複数のセルからエンドエフェクタを構成させ、そのとき各セルの持つ機能が有効であることを実験により確認した。

文 献

- (1) 福田・中川、セル構造を有する自己組織化ロボット—その基本概念とセル間の接続制御及び形態決定法について—, 電学論, 107-11, C (1987), 1019-1026.
- (2) 福田・中川、動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 1 報, セラ間の自動接近・結合・分離制御), 機論, 55-509, C (1989), 114-118.
- (3) 福田・中川、動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 2 報, セラ構造マニピュレータの最適形態化), 機論, 55-516, C (1989), 2100-2106.
- (4) 福田・川内・マーチン・浅間、動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 3 報, セラ構造化ロボット“CEBOT”の認識・制御システム), 機論 C, 56-523(1990), 709-716.
- (5) 福田・植山・伊藤・浅間、動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 16 報, シリーズ III の基本構想と設計, 試作結果), 第 7 回ロボット学会学術講演会予稿集, (1989-11), 423-424.
- (6) 辻・江尻、ロボット工学とその応用, 電子通信学会, (1984), 23-46.