

動的再構成可能ロボットシステムに関する研究*

(第3報, セル構造化ロボット“CEBOT”の認識, 通信システム)

福田 敏 男^{*1}, 川内 陽志生^{*2}
マーチン ブス^{*3}, 浅 間 一^{*4}

A study on Dynamically Reconfigurable Robotic Systems (3rd Report, Recognition and Communication System of Cell-structured Robot "CEBOT")

Toshio FUKUDA, Yoshio KAWAUCHI,
Martin BUSS, and Hajime ASAMA

The dynamically reconfigurable robotic system (DRRS) is a new kind of robotic system which is able to reconfigure itself to an optimal structure depending on the purpose and environment. To realize this concept, we proposed the CEBOT (cell-structured robot). Communication is needed in the CEBOT system as follows. When cells are separated, a communication master cell needs to know the other cell's function and position and determine the target cell for docking. Mobile cells should be able to coordinate with other mobile cell. When cells are docked, forming a cell structure/module, a master cell should control the bending joint cell and know which cells the construction is composed of. In this paper, we propose a communication protocol for both cases with optical sensor applicable to CEBOT. Some experimental results are shown by realizing the proposed communication method between cells.

Key Words: Application of Control, Dynamically Reconfigurable Robotic System, Cell Structure, Self-Organizing System, Communication, Protocol, Self-Repairing Robot, Fault Tolerance

1. はじめに

現在, 極限作業用ロボットの開発が国, 民間企業の間で盛んに研究されている。人間では作業困難な場所(宇宙空間, 原子炉内, 深海, 火災プラント内等)において人間の代わりに作業を進めていくロボットとして, 人間がテレ・オペレートする場合も含め多様な環境, タスクにハード/ソフトともにフレキシブルに対応できることが必要である。この条件を満たすものとして著者らはロボットシステムをある機能を有するパーツ(以後セルと称する)に分割し, そのセルを組合せることにより環境, タスクに適合できるシステム(図1参照)を動的再構成可能ロボットシステム, またはセル構造化システム(CEBOT)と称して研究, 発表してきた^{(4),(5),(6)}。再構成可能システムとして研究, 発表されているものは, マシニング・センタに見られるようにシステムの一部を交換するものであったり⁽¹⁾, ま

たシステム全体を再構成するものでも組立作業は人手によらねばならないものである⁽²⁾⁽³⁾。しかし本システムでは, システム全体の形状を変えることが可能であり, その組立作業を人手によらず自動化させるものである。つまりCEBOTはタスクを与えられると, 後はセルがタスク遂行のための最適形態を考えその形態を自動的に組み上げタスクを処理していくことが可能な自律分散協調システムである。そのための自動接近, 結合, 分離および最適形態化については既にその成果を発表している^{(4)~(6)}。最適形態を自動的に構築するためには, セル間の通信システムが下記の理由により必要である:

(1) 分離状態において必要機能を持つセルの存在の有無を認識する。

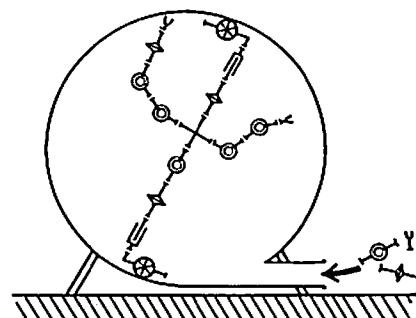


図1 CEBOTの概念図(タンク内作業の例)

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成元年3月22日。

^{*1} 正員, 東京理科大学工学部/名古屋大学工学部(〒464-01 名古屋市中区千代田1)。

^{*2} 学生員, 東京理科大学工学部。

^{*3} Technical University Darmstadt (West Germany, Am Schloßgraben 1 6100 Darmstadt)。

^{*4} 理化学研究所(〒351-01 和光市広沢2-1)。

(2) 存在した場合は多くのセルの中から唯一の被連結セルを決定する。

(3) 最適形態の構築後において構造体を制御する。

そこで本報では、CEBOT が自律分散協調システムであるために必要な分離セル間の認識、通信および結合状態セル間の通信についてそのプロトコル(通信規約)を決めた他のシステムに外乱を与えないために光を応用した通信システムを提案、試作しそれを実現できたため CEBOT の認識、通信システムについて報告する。

2. CEBOT の概説

CEBOT はある機能を有するセルまたはモジュールから構成されるシステムである。ここでセル、モジュ

ールを以下のように定義する。

セル：構造的に見てただ一つの機能を構成しており結合可能な結合面を一つ以上有している知能を持った機能単位。

モジュール：セルが複数個結合されて一まとまりの機能を構成した結合可能な結合面を一つ以上有する知能を持った機能単位。

セルは文字どおり生物の細胞に対応しモジュールは細胞の集合体である組織、器官に対応するものである。セルの種類としては表1に示すものを考える。また今回製作したセル(シリーズII)の外観を図2、図3に示す。図2では CEBOT が分離セルの状態にあり図3ではセルが結合してモジュール状態となり構造体を構築している。各々のセルは自動接近、結合のために8個のLED、3個のフォトダイオード(PD1, 2, 3)をまた障害物回避用として超音波センサ(送信(T)1個, 受信(R)2個)を有しており(図4参照)これらを用いた自動接近、結合、障害物回避に対する本センサ系および実験装置の有効性は既に実験により確認されている⁽⁵⁾。また分離通信のために後で述べるが前面上部に赤外線を送受信可能な回転センサをまたセル内部に結

表 1 セルタイプの分類

| cell type | symbol |
|----------------|--------|
| moving cell | |
| bending cell 1 | |
| bending cell 2 | |
| rotating cell | |
| sliding cell | |

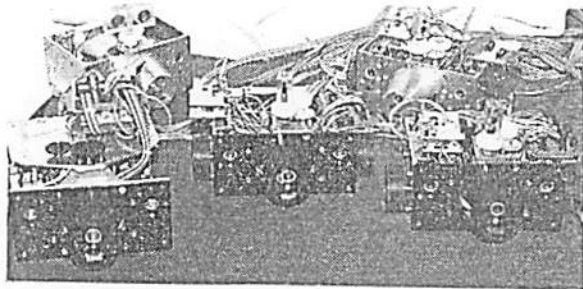


図 2 CEBOT の外観図 (分離状態時)

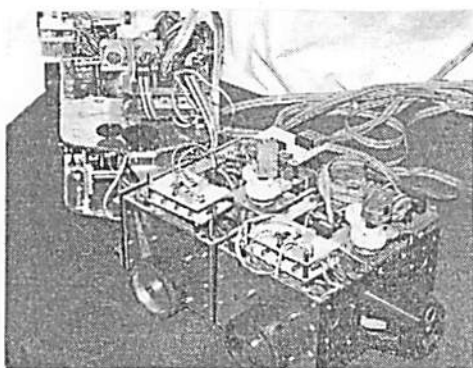


図 3 CEBOT の外観図 (結合状態時)

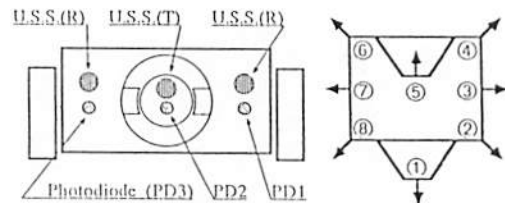


図 4 セルのセンサ配置

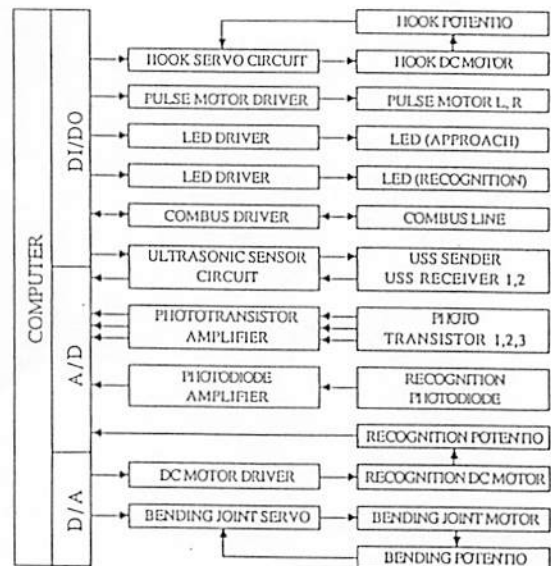


図 5 CEBOT の制御システム図

合通信ライン (以後 COMBUS と称する) として 10 本の通信線が前部連結面と後部連結面の間にありセルが結合することにより連結面のコネクタを会して構造体内に COMBUS を作る事ができる。また移動セルは移動機構としてパルスモータを屈曲セルは屈曲角の制御用機構として DC モータを有している。CEBOT 全体の制御システムを図 5 に示す。

3. 通信の必要性

CEBOT が自律分散協調システムであるためにはセル間の通信が必要である。そこで分離時、結合時に分けてその必要性を述べる。

3.1 分離状態における通信の必要性 与えられたタスクに応じて最適形態を計算し⁽⁶⁾セルを組合せ構造体を構築する際にセル間においての通信が以下に示す理由で必要となる。

(1) 必要機能を持つセルの在、不在を知る。

セルには表 1 に示されるものがあるため、移動セルモジュールは自分の周りに望む機能を持つセルが存在するかどうかを認識する必要がある。

(2) 同一機能を持つ複数個のセルの中から被連結セルを決定する。必要機能を持つセルが複数個存在する時はどのセルと結合するかを決定するために通信をする必要がある。

(3) 被連結セルとの相対角度、相対距離を認識する。

被連結セルを決定した後には被連結セルとの相対角度、相対距離を認識することにより自動接近、結合の際パスプランニングの助けとなる。

(4) セル間の協調制御が可能となる。

移動セルを用いて大きな構造体を運搬する場合で単体の移動セルでは運搬困難であっても複数のセルを同時に用いることで可能になる。

3.2 結合状態における通信の必要性 最適形態を形成した後の CEBOT においては以下の理由から通信をする必要がある。

(1) セル構造体を制御する。

与えられたタスクを遂行するために構造体の制御例えば関節を構成する屈曲セルの屈曲角を制御する必要がある。

(2) セル間でデータの転送を行う。

移動セルの前に他のセルが結合し移動モジュールを形成している場合最前部セルのセンサ情報を後部の移動セルに送る必要がある。例えば他のセルと結合するためにはフォトダイオード (PD) の値が必要であるし、また障害物回避の場合は超音波センサの値が必要とな

ってくる。

(3) 自己診断を行う。

CEBOT の特徴の一つにフォルト・トレラント性が挙げられる。ある部分の故障に対して故障セルを同じ機能を有する正常なセルまたはその機能に相当するモジュールで代替することでシステム全体の健全性を維持することができる。そのために構造体がどのようなセルにより構成され、また異常なセルはどのセルかを自己診断するためにも結合状態における通信の必要性がある。

4. 通信のプロトコル (通信規約)

4.1 分離時通信のプロトコル 分離時通信は、

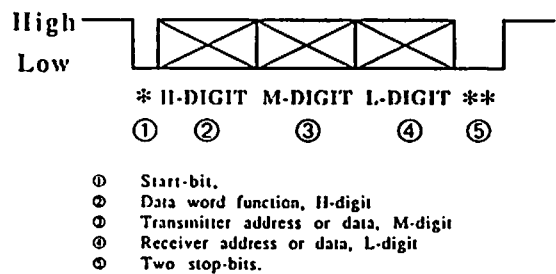


図 6 分離時通信の通信信号

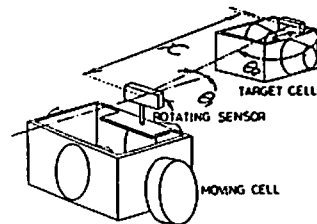


図 7 分離通信の図

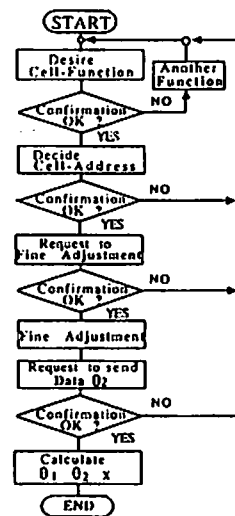


図 8 分離通信のフローチャート

12ビットのシリアル信号を一つの単位として行う。12ビットの信号は4ビットずつ三つ(H, M, L-Digit)に分かれそれぞれH-Digitで通信語の意味, M-Digitで送信セルのアドレス, L-Digitで受信セルのアドレスを送るものとする。また12ビットの信号の前後にスタートビットを1ビット, ストップビットを2ビット有するものとする(図6参照)。通信のエラーチェックはスタート, ストップビットが受信されたか否かでチェックする信号レベルのものと通信ステップに応じた信号が受信されたかをみる通信レベルのものにより行う。H-Digitの通信語によりいろいろな通信形態が可能である。今回は被連結セルの認識, 決定および図7に示される相対角 θ_1, θ_2 , 相対距離 x を通信する基本的シーケンス(図8参照)を定めそのための通信語

表2 分離通信の進め方

| step | DIGIT | | | DESCRIPTION |
|------|-------|------|---|--|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 1 | x | F | x calls cell with function F |
| 2 | 2 | y | x | one cell with function F (address=y) answers |
| 3 | 3 | x | y | x calls y (y stops rotation) |
| 4 | 4 | y | x | waiting for end of adjustment |
| 5 | 5 | x | y | x finishes receiver-adjustment waiting for end of adjustment |
| 6 | 6 | data | | y finishes receiver-adjustment and transmits θ_2 |

Digit1: control-function
Digit2: transmitter-address
Digit3: receiver-address

表3 結合状態時の通信信号

| Pin-No | Name | Description |
|--------|------|------------------------|
| 1 | Bit7 | Data valid, active low |
| 8 | Bit6 | Bus function 2 |
| 2 | Bit5 | Bus function 1 |
| 9 | Bit4 | Bus function 0 |
| 3 | Bit3 | Data bit 3 |
| 10 | Bit2 | Data bit 2 |
| 4 | Bit1 | Data bit 1 |
| 11 | Bit0 | Data bit 0 |

表4 COMBUSの機能語 (function word)

| Bit | Bus function, data word type |
|-------|------------------------------|
| 2 1 0 | Data low digit |
| 0 0 0 | Data low digit |
| 0 0 1 | Data high digit |
| 0 1 0 | Address low digit |
| 0 1 1 | Address high digit |
| 1 0 0 | Control low digit |
| 1 0 1 | Control high digit |
| 1 1 0 | spare |
| 1 1 1 | bus reset |

を表2のように定めた。通信は6ステップよりなる。
ステップ1: ある機能を持つセルを呼ぶ。

受信セルは送信セルにセンサ面をあわせ停止する。(rough-adjustment)

ステップ2: 要求された機能を持つセルは返答する。

それ以外のセルは再びセンサを回転させる。

ステップ3: 被連結セルを決定。

ステップ4: 送信セルはセンサ面を被連結セルへ向け, 回転を停止。(fine-adjustment)

ステップ5: 被連結セルはもう一度センサの面合わせをする。(fine-adjustment)

ステップ6: 被連結セルは θ_2 を転送する。

各ステップにおいて送信セルは一定時間信号を出し返答があれば次のステップに進み返答がない場合はエラーとみなす。この通信方法による通信実験は6.1節で述べる。

4.2 結合時通信のプロトコル 結合通信は, 8ビットの平行信号を一つの単位として行う。8ビット

表5 COMBUSのコントロール語

| Ctrl | Description |
|------|--------------------------------------|
| \$0x | Confirmation from cell [x] |
| \$10 | Attention, next word is address |
| \$11 | End of Attention, next word address |
| \$12 | Check for cell malfunction |
| \$20 | Read value of left photodiode |
| \$21 | Read value of center photodiode |
| \$22 | Read value of right photodiode |
| \$23 | Read value of rotating photodiode |
| \$24 | Read obstacle sensor, left receiver |
| \$25 | Read obstacle sensor, right receiver |
| \$3z | Read present actuator position |
| \$4z | Change actuator to new position |
| | z=0 -> hook coupling mechanism |
| | z=1 -> joint actuator |
| | z=2 -> rotating sensor motor |
| | z=3 -> obstacle sensor, sender |
| | z=4 -> LEDs for attitude finding |

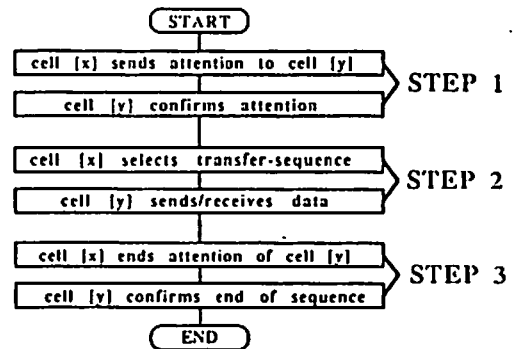


図9 結合時通信のシーケンス

ットの内訳は表3に示されるように大きく三つの部分に分けられる。すなわち信号の有効、無効を決めるために1ビット (data valid)、信号の意味を決める3ビット (function word=機能語)、そして機能語の示す値を送るための4ビット (data bit)である。data validがlowの時、全体の信号を有効とする。機能語の種類と通信ビットとの対応を表4に示す。表4に示されるように機能語は主にデータ、セル-アドレス、コントロール語に分けられる。データという機能語はセル間でセンサデータの転送等を行う場合に用いアドレスは通信の際にセルを呼び出す場合などに用いる。コントロール語は通信信号の意味を示すものである。コントロール語を替えることにより多様な通信が可能となる(表5参照)。通信は3ステップよりなる(図9参照)。また今回定めたプロトコルによる通信の例を表6に示す。ここで移動セル(アドレス0)が自分の前方に結合しているアドレス3のセルに対して左側のフォトダイオードの値を送るように要求しそれに応じてデータを送る通信の例でありこの通信の実験結果を6・2

節で示す。

5. 信号の伝達方法

4章で示したプロトコルを用いて以下に示す方法で信号を伝達する。

5・1 分離時の伝達方法 通信は回転通信センサ

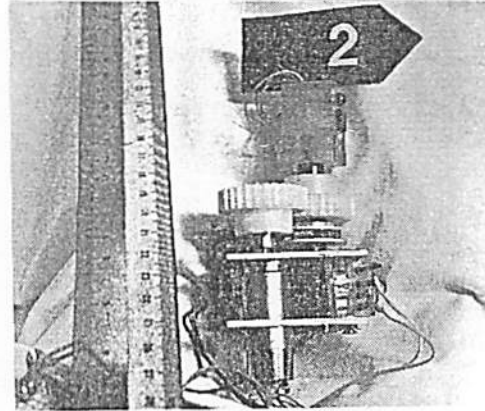


図 11 回転通信センサの外観図

表 6 COMBUS を用いた通信の例 (PDの値を転送する例)

| Cycle No. | sender M S | Data | Type | Description |
|-----------|------------|------|--------|-----------------------------------|
| 0 | ● | \$1 | Ctrl-H | Attention followed by an |
| 1 | ● | \$0 | Ctrl-L | address word (control \$10) |
| 2 | ● | \$M | Addr-H | M: address of master cell |
| 3 | ● | \$S | Addr-L | S: address of slave cell |
| 4 | ● | \$0 | Ctrl-H | Confirmation by |
| 5 | ● | \$S | Ctrl-L | slave cell S |
| 6 | ● | \$2 | Ctrl-H | Photodiode PD1 data |
| 7 | ● | \$0 | Ctrl-L | request (control \$20) |
| 8 | ● | \$M | Data-H | Slave cell S sends 16-bit |
| 9 | ● | \$N | Data-L | photodiode value |
| 10 | ● | \$N | Data-H | M: most, N:next, L:least |
| 11 | ● | \$L | Data-L | significant digit |
| 12 | ● | \$1 | Ctrl-H | Master cell M sends End |
| 13 | ● | \$1 | Ctrl-L | of attention to slave (ctrl \$11) |
| 14 | ● | \$M | Addr-H | M: address of master cell |
| 15 | ● | \$S | Addr-L | S: address of slave cell |
| 16 | ● | \$0 | Ctrl-H | Confirmation by |
| 17 | ● | \$S | Ctrl-L | slave cell S |

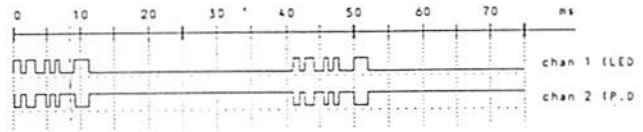


図 12 通信時のLED/PD出力

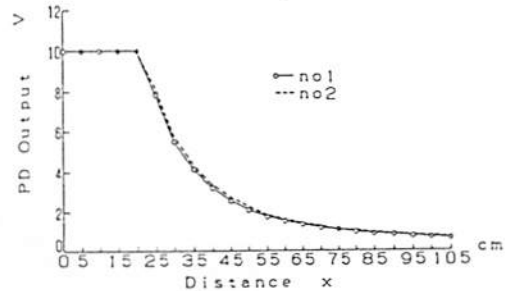


図 13 LED/PDの相対距離と出力電圧の関係

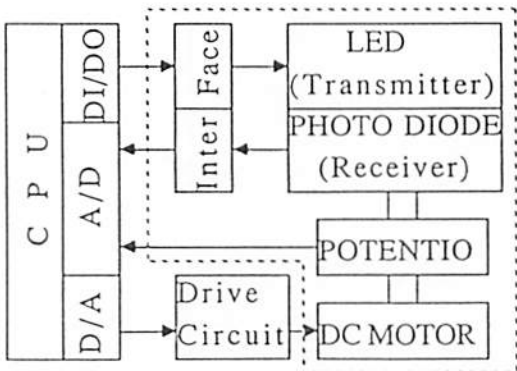


図 10 回転通信センサのシステム図

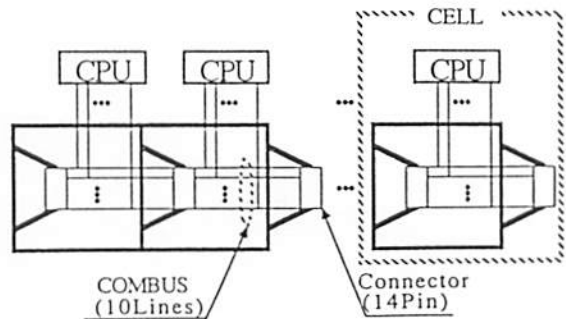


図 14 COMBUSの概念図

により行う (図 10 参照)。回転通信センサはモータで制御され送信器として赤外線タイプの発光ダイオードを一つまた受信器としてフォトダイオードを一つ有している。その外観を図 11 に示す。LED を DI/DO で点滅させることでパルスを送りそれを PD で受け出力を増幅し A/D に取り入れ、しきい値でパルスを認識し受信信号の出力電圧から送信セルまでの相対距離を求める。LED/PD の分離通信におけるそれぞれの出力結果を図 12 にまた LED/PD の相対距離と出力電圧値との関係を図 13 に示す。図 12 では約 1 KBPS で通信が行われていることがわかる。またセンサ面の向きはポテンシオメータで測定する。

5.2 結合時の伝達方法 結合時は 14 ピン-コネクタでつながれた CEBOT 内部にある COMBUS を通して通信を行う (図 14 参照)。信号の ON/OFF は DI/

DO により行いまた受信信号も DI/DO を通して通信する。

6. 通信実験

この通信方法により通信実験を行った。

6.1 分離時の通信実験 分離時通信の目的の一つであるセル機能の自動認識、および相対距離、角度の通信実験について行った。3 個のセルを図 15 に示すように配置しセル 0 がセル 1 と通信するという条件で実験を行った。この時の通信状態を示すモニタの出力結果を図 16 に示す。図 16 では通信の状態をコメント文として表示しており左に示す数字は通信のステップを表しそれぞれ下記の動作がなされている。

- ①-②: 送信セル, 受信セルの初期設定。
- ③-④: 送信セルへセンサ面を合わせる。
- ⑤-⑪: 決められた通信を行う。

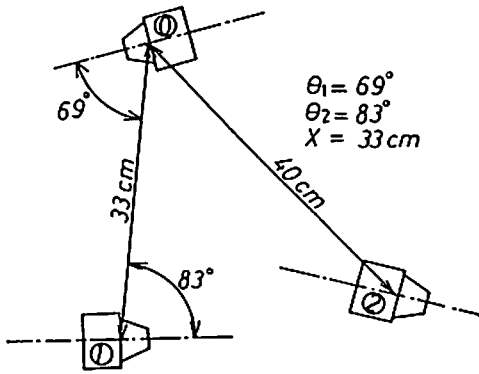


図 15 分離通信実験のセル配置

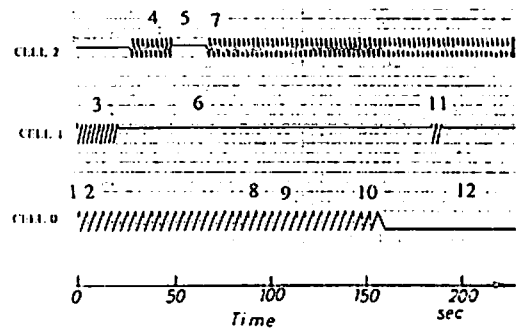


図 17 分離通信時のセンサ・ポテンシヨの出力 (セル 0 がセル 1 を呼ぶ場合)

```

1 sender 20
  MOVING_CELL=1
  TARGET_CELL=2
  BENDING_JOINT_CELL=3
  ROTATING_JOINT_CELL=4
  SLIDING_JOINT_CELL=5
  function ? 1
2
3 cell #1 rough adjustment ended.
4 cell #2 rough adjustment ended.
  data error. 808
  data error. 800
  data error. 0
5 cell #2 has received data 101 .
  ***cell #0 calls cell with function 1.
  cell #1 has received data 101 .
  ***cell #0 calls cell with function 1.
  cell #2 has not the desired function!
  cell #0 has sent data 101
  cell #0 has received data 210 .
  ***cell #1 with function 0 answers.
  cell #1 has sent data 210
  cell #1 has received data 301 .
  ***cell #0 acknowledges receiver 1.
  cell #0 has sent data 301
  cell #0 has received data 410 .
  ***cell #1 sends adjustment request to cell 0.
6
7
8
9
10 cell #0 fine adjustment ended.
  cell #1 has sent data 410
  cell #1 has received data 501 .
  ***cell #0 finishes fine adjustment and
  sends fine adjustment request to cell 1.
11
12 cell #1 fine adjustment ended.
  cell #0 has sent data 501
  cell #0 has received data 62f .
  ***cell #1 finishes fine adjustment and transfers data.
  Transfer sequence ended successfully!
  cell #0 has received theta2 = 67.7
  cell #0 theta 1 = 51.4
  distance x = 29 cm
  
```

図 16 分離通信実験のモニタ出力

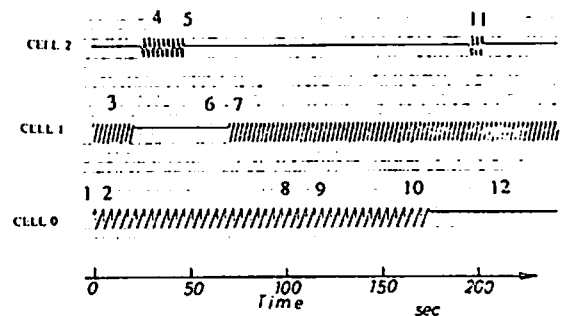


図 18 分離通信時のセンサ・ポテンシヨの出力 (セル 0 がセル 2 を呼ぶ場合)

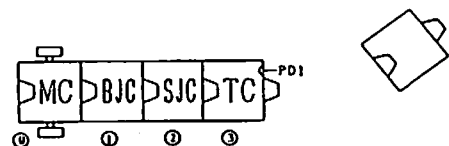


図 19 COMBUS によるデータ転送

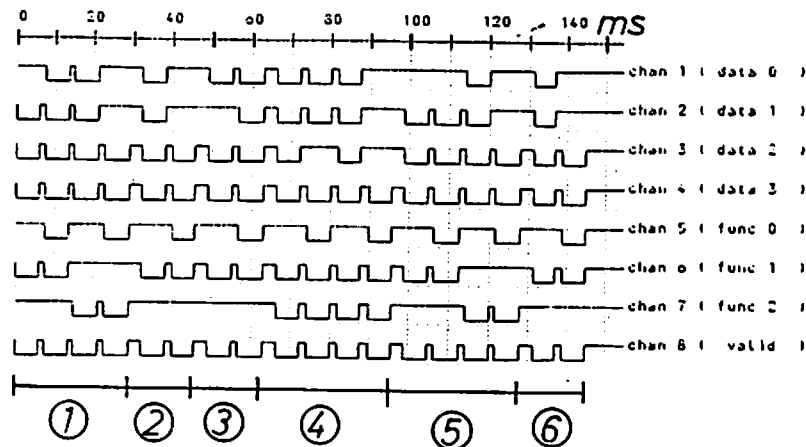


図 20 データ転送の実験結果

⑫ :最後に送信セルは相対距離, 角度を計算する。

これより送信セル, 受信セルの決定はキーボード入力で行い後は自動的に通信が進み最後にセル0は θ_1, θ_2, x をそれぞれ $51.4^\circ, 67.7^\circ, 29\text{ cm}$ と認識していることがわかる。実際の値とは角度にして約 15° , 距離にして 2 cm (6.1%) の誤差が生じている。角度誤差は LED/PD の指向性によるものでより指向性の強い素子を用いることで小さくできるがあまり指向性が強いと通信が行いにくくなる。分離時通信ではセルの機能の認識, 決定がいちばんの目的であり, 被連結セル決定後の自動接近, 結合については既存のセンサシステム (図4) を用いてできるため⁽⁵⁾, 距離, 角度については大まかな値で十分である。また通信の際のセンサの挙動を図17, 18に示す。図17はセル0がセル1と通信する場合で図18はセル0がセル2と通信する場合の回転通信センサのポテンショの出力結果である。ここで図17, 18中の番号は図16のステップ番号に対応している。両図とも要求される機能を持つセルは2度の面合わせ (rough と fine-adjustment) を行い, そうでないセルは一度の面合わせ (rough-adjustment) を行った後に再び回転して次の通信の準備をしている様子が見られる。

6.2 結合時の通信実験 COMBUSによるデータ (PD1) の転送実験を行った (図19参照)。通信のシーケンスは表6に示されているもので信号の定義は表3, 4にありその時のCOMBUSの出力結果を図20に示す。図中のステップでは下記のことが行われている。

- ① :セル0がセル3を呼び出す。
- ② :セル3が返答する。
- ③ :セル0がセル3のPD1の値を要求する。
- ④ :セル3はPD1の値を転送。

⑤ :セル0がセル3との通信の終了を告げる。

⑥ :セル3が応答する。

ここではPD1の出力を16進数で407と転送し本実験の目的が達成されている。通信時間は図より約140msであることがわかる。

7. おわりに

(1) 自律分散協調システムとしてのCEBOTの分離状態および結合状態における通信の必要性を明らかにしその一方法を提案した。

(2) CEBOTの分離状態時の通信のプロトコルを決め分離セル間の認識, 通信をLED/PDを送, 受信器とする試作センサを用いて実現し, この通信方法の有効性を確認した。

(3) CEBOTの結合状態プロトコルを決めてセル間においてフォトダイオードの値を伝達する実験によりその有効性を確認した。

以上CEBOTの認識, 通信システムについて報告した。この認識, 通信により多種, 多数のセルの制御が可能となった。これらのシステムは, 次世代ロボットシステムの一案としてこれからのロボット研究に多くの課題を与えておりまたこれらの課題を研究, 開発することにより多様な環境, タスクに適應できる動的再構成可能ロボットシステムが実現されるものと考えられる。終わりに本研究を遂行するにあたり, 原子力プラント内保全作業用ロボットシステムの研究開発グループ (理化学研究所) の皆様にご援助, ご協力いただき感謝する。

文 献

- (1) 馬嶋, マシニングセンタの無人運転技術, 機械の技術, 32-1(1980), 45-50.

- (2) 鈴木・藤井, モジュール型マニピュレータの制御システム, 第5回日本ロボット学会学術講演会論文集, (1987), 421-412.
- (3) Khosla, P., Kaneda, T. and Schmitz, D., *A Nobel Technology for Manipulators: Reconfigurable Systems*, ISA, 1988-Paper # 88-1643(1988), 1763-1174.
- (4) 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粗接近制御および形態決定方法について-, 電学論, 107-11, C(1987), 1019-1026.
- (5) 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, セル間の自動接近・結合・分離制御), 機論, 55-509, C(1989), 114-118.
- (6) 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, セル構造マニピュレータの最適形態化), 機論, 55-516, C(1989), 2100.

討 論

〔質問〕 館 暲

(工業技術院機械技術研究所)

今後ますます重要となってくるとされるロボット間のコミュニケーションの問題を, いちはやく手掛けられた点に敬意を表す。さて, 具体的なコミュニケーション方法について二点ほど質問いたしたいと思う。

(1) 信号の伝達方式として赤外線発光ダイオードとフォトダイオードを用い, パルス受信信号の強度から送信セルまでの相対距離を求めるとあるが, この方式だと, 送信発光ダイオードの出力特性や電源電圧などに強く依存してしまう。その点は, どのように解決されているのか。

(2) また, 現在ご提案の方式は平面上という大前提のもとに成立しているが, 実際は図1で示されたような作業への適用を考えられていると思われる。その場合にも, この方式の拡張でよいのか。よいとすれば, どのように拡張されるのか。

〔回答〕 (1) LEDとPDの相対距離, 出力電圧特性は図13に示されている。no.1, no.2はセルのアドレスを示しており実線はno.2が発光したときのno.1の出力を, 破線はno.1が発光したときのno.2の出力を示しておりそれぞれ3回の測定の平均を用いている。図13より各セルの特性はほぼ同じであり, 分離通信においては相対距離, 角度は粗な計測であっても他のセンサシステムを用いた自動接近, 結合が達成されるため, また同一の素子, 電源を用いている本システムにおいては, 個々の特性の影響を考慮しなくともよいと思われる。

(2) 著者らはこのシステムの三次元的応用を目指しその基礎段階として二次元における研究を進めているが, 三次元においてはより広範囲の送, 受信の必要がある。この方式を拡張するためには, センサの指向性, 数, 配置を考慮するとともに機構的な工夫(例えばジンバル機構)をする必要がある。