

人間とロボットの協調作業は可能か？ - オフィスロボットシステム HuRIS -

山本 吉伸 佐藤 充 開 一夫 山崎 信行 安西 祐一郎

慶應義塾大学

Abstract

オフィスにおける協調作業で交換される情報はオンラインで扱えるものばかりではない。我々はCSCW(Computer-Supported Cooperative Work)の概念を拡張し、移動型ロボットを用いることで従来では支援できなかった物理的対象に基づく協調作業をも支援するRSCW(Robot-Supported Cooperative Work)システムHuRISを設計・実装した。HuRISでは、もしロボットが実行途中で障害に出会ったり、実行可能な運動命令に変換できないタスクに遭遇した場合はロボットが人間に「依頼」する。しかしながらHuRISを実際に利用した我々の経験から、この「依頼」が必ず受理されるのかという疑問が生じた。本論文ではまず、HuRISの機能及び「依頼」をどのように行なうかについて述べる。次に、人間が行なう依頼とロボットによる依頼を比較した心理実験の結果について報告し、人間とロボットの協調作業について考察する。

Can Robots Cooperate with Us? - Office Robot System [HuRIS] -

Y. Yamamoto M. Sato K. Hiraki N. Yamasaki Y. Anzai

Keio University

Conditions of an office environment are severe for robots. There are many different tasks difficult to accomplish by robots alone. Even if robotics engineering develops, a robot will not be able to fully escape from failure.

We have designed and implemented HuRIS, a system that is based on RSCW as an extension of CSCW. HuRIS can ask a human for help in some failure. This paper presents HuRIS and psychological experiments about "commission" of HuRIS.

1 はじめに

オフィスにおける協調作業支援の重要性は、既に CSCW(Computer-Supported Cooperative Work) 研究において広く認識されている [1][2]。しかし、協調作業で交換される情報(ここでは広く物理的対象も情報と呼ぶ)はオンラインで伝送できるものがすべてではない。例えば鍵などの共通の道具を離れた場所での共同作業に利用しなければならないとき、物理的対象物の転送が望まれる。そこで CSCW を拡張した RSCW(Robot-Supported Cooperative Work, ロボット支援による協調作業)を考える。RSCW のロボットは、産業用ロボットや知能ロボット研究における自律ロボットとは異なり、計算機システムを拡張するデバイスとして捉えることができる。我々は RSCW の考え方に基き、オフィスロボットシステム HuRIS を設計・実装した。

HuRIS のロボット (以下 $HuRIS_{(Robot)}$) は与えられたタスクが実行できない場合、あるいは何か障害に出会ったためにタスクの継続が困難な状況に陥った場合、人間に協力を依頼する。ところが、この「ロボットによる依頼機能」の使用経験から、はたしてロボットの依頼を人間が受理できるのか、という点について考察する必要が生じた。日常業務を観察する限り、我々は同僚から依頼があればほとんどの場合に受理している。しかし、ロボットからの依頼も同様に受理されるかどうかは明らかではない。

本稿ではまず、オフィスロボットシステム HuRIS について述べる。その後、我々の行なった心理学実験について報告し、ロボットの依頼が人間に受理されない場合について考察する。

2 オフィスロボットシステム HuRIS

図 1 は我々の構築した RSCW システム HuRIS の構成を示している。 $HuRIS_{(Robot)}$ はワークステーションからの運動命令を受け付けるほか、音声による指令も受け付けることができる。この機能を実現するために、ホスト側には音声認識装置¹及び音声合成装置²が接続されている。ロボットの前に

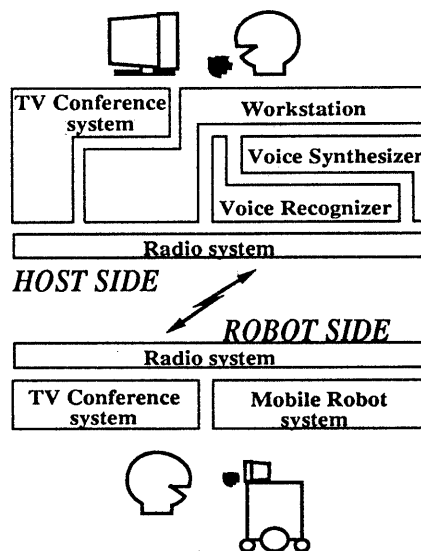


図 1: HuRIS

いるユーザの音声はそのままホスト側に無線を用いて送信される。更に合成した音声をロボット側に伝送することもできる。



図 2: HuRIS: HOST SIDE

より幅広い協調活動を支援するためには、遠隔地にいる共同作業者とのコミュニケーションが重要である。そのため、 $HuRIS_{(Robot)}$ には TV カメラ及び TV モニタを搭載しており、無線による TV 会議システムが利用できるようになっている。TV モニタはオフィスで座って作業する人が最も見やすいと思われる高さに設置されている。もちろん $HuRIS_{(Robot)}$ には超音波センサなどを含む走行システム [3] が実装されており、これらを利用して自律的な走行を行なうことも可能である。ロボットは

¹松下技研 VC171

²NTT シャベリンほう HG

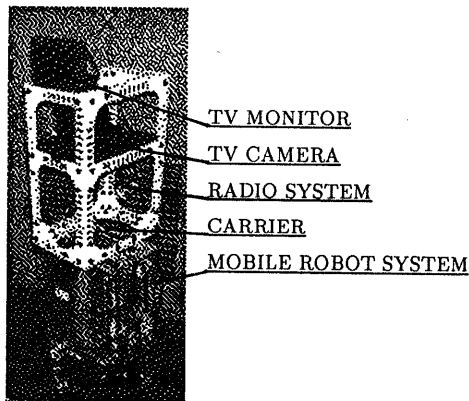


図 3: HuRIS_(Robot): ROBOT SIDE

荷台を装備しており、ここには書類やハンコ、鍵などを載せることができる。図 2, 3はシステムの外観を示している。なお、HuRIS は我々の研究室で実際に稼働している。

2.1 Robot への指令

ロボットに走行を指示するには次の三種類の方法がある。

地図情報による方法 ウィンドウ上に表示されたオフィス地図の一点をマウスでクリックすることにより、目的地を指定する(図 4左)。ロボットは HuRIS に実装されたパスプランナの計算した経路に従って走行する。

モニタによる直接操縦 ロボットに搭載された TV カメラから送信されてくる映像は、X11 window system の一つのウィンドウとして表示されている(図 4右)。このウィンドウの上方をマウスで押し続けることによりロボットは前進する。同様に画面左右をクリックすることで転回する。ロボットに移動を指令するという感覚ではなく、自分で操縦するという感覚で操作できるように工夫されている。

Procedure file による方法 ユーザは、ロボットへの指令を手続き (Procedure) として定義しておく事ができる。決まった場所への移動は Procedure file を呼び出すだけで繰り返し実行できる。テキストエディタによって記述、変更ができる。

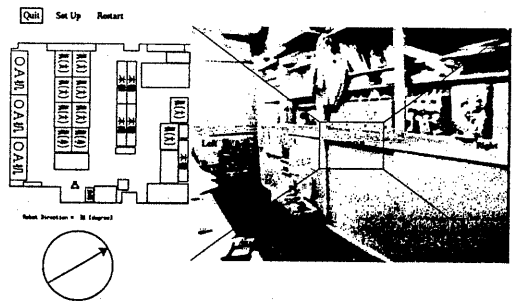


図 4: HuRIS: User Window on WorkStation

Procedure file にはロボットの移動命令だけでなく、他のオペレーションを記述しておくことができる。つまりタスクをオペレータと引数の組の羅列として表現することができる。

(OPERATOR) [ARG1, ARG2,];

ここで ARG_n は OPERATOR への引数である。OPERATOR はマクロと同じものとして理解できる。すなわち OPERATOR はロボット固有の言語仕様で書かれた具体的な運動命令群に展開される。OPERATOR はシステム開発者によってユーザに提供される。例えば、

```
go 350, 300
put A_BOOK, To_RIGHT_SIDE_OF_A_BOOKSHELF
```

この例は座標 (350,300) の地点に移動し、“本”を“本棚右側”に置く、という動作を意味している。

最初ユーザはロボットの荷台に本を載せ、ロボットをスタートさせる。Procedure file での記述は一行ずつロボットに実行可能な制御用言語に変換され、実行される。この例の場合、go 350, 300 は HuRIS のパスプランナーによって下のようなシーケンスに展開される。システム起動時のロボットの位置はユーザによって与えられる。なお j は前進を意味し、引数は cm である。r は右回転で引数は角度である。

```
j 200
r 90
j 200
r 90
j 250
```

なお、現在の HuRIS では次のような OPERATOR が実装されている。

go 目標座標点までの移動。

take ロボットのキャリアに物を載せる動作。

put ロボットのキャリアから物を取り出し、別の場所に移す動作。

Return-Path スタート地点から現在地までの移動の軌跡を逆に辿る。

UserCall ユーザを呼びだし、テレビ会議システムをつなぐ。

2.2 障害からの復帰

HuRIS_(Robot)で実装されたロボットは移動機能を持っている。しかし、「移動」が常に実行できるとは限らない。進路上に障害物があったり、部屋のドアがしまっている場合もある。現在利用可能なロボットでは、これらの障害を完全に回避することは困難である。

また、オフィスで稼働するロボット群が全て同じ機能をもっているとは限らない。アーム機能を持ったロボットであれば、アーム機能を利用したタスク、例えばtakeやputも実行できるだろう。しかし、HuRIS_(Robot)のようにアーム機能を持たないものもあり、ユーザの要求に答えるロボットが常に同じ機能で統一されているとは限らない。ユーザの定義するProcedureにはロボットの機能に依存しない記述が必要である。

HuRISでは、ロボットの運動に障害が発生した具体的運動命令群に展開できないオペレータを実行しようとした場合には割り込みが起り、次に示すような手続きを実行するように設計されている。

```
Stop(); /* 運動の停止 */
switch( ObstacleCase() ){
  /* 障害の種類に応じて文章を選択 */
  case OBSTACLE_FORWARD:
    /* 前方に障害物 */
    /* 音声合成によって 20 秒、
    発話を繰り返し */
    for( ;TimeLimit(20); ){
      Talk(‘‘前方に障害物があり’’ );
      Talk(‘‘進めません’’);
      Talk(‘‘どなたか撤去をお願いします’’);
    }
```

```
break;
case UNKNOWN_OPERATOR:
  /* 実行できないオペレータ */
  Talk(‘‘%s を実行して下さい’’,Unknowns);
  /* 「はい」という音声を待つ */
  Confirm();
  break;
case ....
:
:
}

/* それでも障害が除去されなければ */
if (There_Is_Obstacle() == TRUE) {
  /* ユーザを呼び出し、
  TV 会議システムを起動する */
  UserCall();
  /* ユーザはモニタを見て状況を判断する */
  switch( UserCommand() ){
    case TV_and_MOUSE:
      /* 直接制御で障害を回避 */
      Control_by_TV_and_MOUSE();
      /* その後マップによる目的地の再指示 */
      Map_Information();
      break;
    case NOOP:
      /* モニタに映った付近の人に
      協力を呼びかける */
      /* 障害が除去されれば処理は継続される */
      break;
    case RETURN_PATH:
      Return-Path(); /* 経路を遡り戻る */
      exit();
  }
}
```

このように、エラーによって割り込みが発生した後、「人間への協力依頼」によって回復を図るシステム設計を本論文では Commission Architecture と呼ぶことにする。

なお音声合成による依頼文はテンプレートで定義されている。現在稼働しているシステムでは、put オペレータ用のテンプレート、take オペレータ用のテンプレートが用意されている。このテンプレートは OPERATOR を提供するシステムエンジニアによって定義される。しかしこのままでは、take や put 文で記述された内容が実行されたかどうかは保

証されない。したがって、Procedure の次の文を実行するタイミングが問題となる。Confirm 文はこの問題を解決するために用意されている。Confirm 文が実行されると、HuRIS は音声認識装置を ON にし、依頼したタスクが行なわれたかどうかを確認する。

3 ロボットの依頼

前章までで述べてきた通り、HuRIS_(Robot) は自分の行動上の障害に出会った場合、人間に対して自然言語による依頼を行なう。ところが、研究室で HuRIS を利用した経験から、我々は次の仮説について考察する必要に気付いた。

ある状況 S において、ロボット R が合成音声によって人間 M に依頼 C を行なった場合と、人間 H が人間 M に依頼 C を行なった場合を比較した時、依頼を受けた人間 M の対応は異なる。

HuRIS_(Robot) は主にオフィスでの作業を目的としているが、Commission Architecture による人間への依頼はオフィスワークに限らず応用可能である。しかし、Commission Architecture を実現するためには人間の協力が必要である。しかもその協力は自分の仕事とは無関係である可能性が高い。オフィスワークでは、同僚からなにかの依頼を受けることは頻繁にある。たとえそれが自分と無関係な仕事に関する依頼であっても、些細なことであれば協力する。我々が当初 HuRIS を設計した時、HuRIS の行なう依頼は

- 荷台から荷物を下ろす。
- 荷台に荷物を載せる。

程度のものを想定していたため、これらの仕事は容易に受理されるであろうと予想していた。しかしロボットが実際に研究室内で稼働したとき、ロボットの行なう依頼が相手にされないという状況がしばしば観察された。

我々は、上で述べた仮説を検証する心理実験を計画・実施した。すなわち、被験者に対して「依頼」を行なった時、依頼者が人間であった場合とロボットであった場合についての比較を試みる。

4 実験 1

まず、実験 1 ではロボットが合成音声を用いて依頼を行なった場合と人間の場合を比較する。

4.1 方法

被験者 大学生・大学院生 20 名

実験計画 ロボットが合成音声で依頼する場合と人間が依頼する場合の 1 要因 2 条件の実験計画を用いた。

手続き 被験者は別室より一人だけ実験室に呼ばれ、所定の位置に着席した。被験者にアンケート用紙が渡され、そのアンケートに回答するように求められた。この時、

- 制限時間 20 分以内でできるだけ沢山の設問に答えること。
- アンケートに全て回答し終らない限り、席を立ったり声を出してはいけないこと。

が教示された。実験者は被験者にアンケートへの回答開始を指示し、退室した。数分後、実験室に HuRIS_(Robot) (あるいは人間) が入ってゆき、被験者に退室するよう依頼した。そして退室するかどうかが測定された。

4.2 結果

表 1: Number of Ss who left the room by vocal request

	退室	退室せず
ロボットが依頼	0	5
人間が依頼	15	0

合成音声で退室を求めた場合と、人間が退室を求めた場合を被験者の退室率で比較した(表 1)³。

この実験により、人間 H が人間 M に依頼 C を行なった時には受理されるが、ロボット R が合成音声によって人間 M に依頼 C を行なった時には受理されないという状況が確認された。そこで我々

³フィッシャーの直接法を用いるまでもなく有意な差 ($P < .001$) が認められる。

は、HuRIS で実装された TV 会議システムによる依頼の有効性を調べるために実験 2 を計画した。

5 実験 2

実験 2 では、ロボットを介して人間が依頼した場合と、直接人間が依頼した場合を比較する。

5.1 方法

被験者 大学生・大学院生 30 名

実験計画 ロボットに搭載された TV 会議システムを通して人間が依頼する場合と、人間が直接依頼する場合について比較する。この時

1. 被験者に知られている実験者が依頼した場合 (STAFF-KNOWN == SK)
2. 被験者に知られていない実験者が依頼した場合 (STAFF-UNKNOWN == SU)
3. 実験とは無関係の者が依頼した場合 (OTHERS == O)

について Modality 要因 (人間、ロボット+TV 会議システム) × Authority 要因 (SK, SU, O) の 2 要因 6 条件の実験計画を用いた。

手続き 実験 1 と同様であったが、退室するかどうかを測定するのではなく、依頼開始から退室するまでの時間が測定された。

5.2 結果

表 2: Leaving Rate (via TV MONITOR on ROBOT)

SK	SU	O
80%	80%	40 %

表 2 は、ロボット上に実装された TV 会議システムを通じて退室を依頼した場合の退室率を示している⁴。

⁴直接人間が依頼した場合は如何なる条件であっても退室率は 100% であったのでここでは省略した。

退室率 (最終的に退室したかどうか) をみると、ほとんどの場合で退室していることがわかる。ロボットに TV 会議システムを搭載することは、依頼を受理させるために有効であることが示唆されている。このデータを詳細に分析するために、構成概念として「退室速度」を導入する。退室速度 LV は

$$LV = UL/t$$

で定義される。ここで UL は単位距離、 t は依頼開始から退室までの時間である。従って、依頼にも関わらず退室しなかった被験者の退室速度は 0 である。

図 5 は、被験者に知られている実験者が依頼した場合、被験者に知られていない実験者が依頼した場合、実験とは無関係の者が依頼した場合のそれぞれについての退室速度を比較したグラフである。

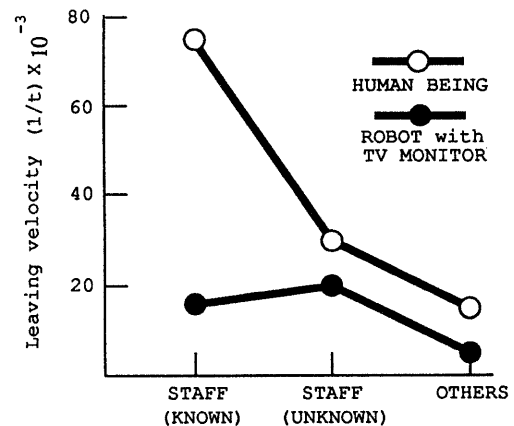


図 5: Percents of Leaving Responses to Each Case

分散分析の結果、Modality 要因 (人間、ロボット + TV 会議システム) の主効果 $F(1, 24) = 40.13, p \leq .05$ 並びに Authority 要因 (SK, SU, O) の主効果 $F(2, 24) = 23.92, p \leq .05$ 、及び交互作用 (人間、ロボット間でグラフの傾きの差) $F(2, 24) = 15.81, p \leq .05$ において有意であった。

6 考察

6.1 実験に関して

各実験の直後、被験者にロボットが入ってきたときにどう思ったかなどを自由に記述させた。合成音声による指示が被験者に聞きとれたかどうかについてはこれによって確認された。

実験1によって、ロボットが合成音声を用いて依頼を行なった場合と人間が直接行くことによって依頼を行なった場合に差が有意であることが明らかになった。これは我々の仮説「ロボットRが合成音声によって人間Mに依頼Cを行なった場合と、人間Hが人間Mに依頼Cを行なった場合を比較した時、依頼を受けた人間Mの対応は異なる。」を支持しているものである。

実験2については、

- 被験者に対して人間が直接依頼した場合とロボットに取り付けられたTV会議システムを通じて依頼した場合
- 知っている実験者が依頼した場合と被験者の知らない実験者が依頼した場合及び無関係な者が依頼した場合の比較
- 人間とロボット+TV会議システムそれぞれの傾き

に有意差があることを示している⁵。

退室の依頼にも関わらず最後まで（実験では4分間依頼し続けた）退室しなかった被験者であっても、非常に迷った被験者と、まったく無視することのできた被験者が認められた。アンケートの結果、「ビデオを介して自分に（だれかが）語りかけているのだ」という認識をもった被験者は退室するか、あるいは非常に迷っていたことがわかった。逆にロボットが喋っているという認識を持っていた場合、被験者は「これは実験の一部に違いない」あるいは「本当に退室を求めているのなら（直接）本人が来るべきだ」と考えていたことがわかった。この結果は、オフィスにおいても適用できると考えられる。すなわちロボットがユーザに依頼する場合は、ロボットが依頼しているという認識をさせるのではなく、どこか別の場所にいるユーザ（それも関係者として権威づけされている者の方が好

ましい）が依頼してきているのだと認識させるべきであると考えられる。

図5では、被験者の知っているスタッフが直接依頼を行なった場合の退室速度が非常に速いことに気付く。これは被験者が依頼に対して何の疑問も抱かずに退室したことを示している。「依頼」として理想的な状態である。しかし、本実験では被験者の知らない人間が直接依頼する場合とHuRISのインタフェースを通して依頼する場合とに注目する必要がある。（たとえスタッフであっても）被験者の知らない人物が依頼を行なった場合、やはり最初は（被験者に与えられている課題を放棄して良いものかどうか）躊躇するようである。しかし、人間では最終的に必ず依頼は受理される。HuRIS_{Robot}のインタフェースはそれに近い退室速度を実現していることが重要である。

6.2 ロボットの依頼

ここで次のような反論を検討する。「ロボットが合成音声で依頼を行なうことが予めユーザにわかっていたとすると、合成音声であったとしても依頼に従うのではないか。この実験では事前に見たことのないロボットが登場するという非常に特殊な場合を扱ったと言えるのではないか。」

たしかに、予めロボットが合成音声で依頼することがあると周知であれば、その依頼は受理される可能性もある。しかしその場合、ロボットの依頼はすでに権威づけされている。本実験で対象となったロボットはどこからも権威づけされていない状態であった。結論として、権威づけされていないロボットがユーザに依頼をしなければならないときは、ロボットが依頼しているという認識をユーザに持たせるよりも、どこか別の場所に依頼主がいるという認識を持たせたほうがよいと考えられる。

本実験と同様の主旨で行なわれた実験はほとんど見られないが、利島[4]は自閉症児の情報処理能力をテストする目的で、合成音声を提示した場合と自然音声を提示した場合について彼らの反応を比較している。この実験では3歳から5歳の健常児と8歳から25歳までの自閉症児に「○○ちゃん、起立」と呼びかけ、その起立反応生起率が測定された。この結果、合成音声を提示した場合の自閉症児の起立反応生起率は健常児のそれに比べて著しく低いことが示された。この実験では、健常児

⁵ なお下位検定は行っていない。

群でも合成音声に対する起立行動の生起頻度が多少落ちることが示されているが、有意差の有無については言及されていない。

音声合成装置の生成する合成音声の品質は、実験にとって非常に重要な意味を持つ。利島は合成音声の言語処理における健常児と自閉症児の汎化能力について比較検討しているが、本実験の結果は言語処理における汎化能力では説明が難しい。合成音声を提示した全ての被験者は、その意味を理解しつつ退室しなかったことに注意を要する。

本実験では被験者に席を立ててはならないことと、声を出してはならないことなどの条件を課した。このような条件がない場合にはロボットの支持に従う被験者もいると考えられる。

7 まとめ

物理的対象の転送を必要とする協調作業は、計算機ネットワークのみでは支援できない。従来の CSCW では扱えない協調作業を支援するため、我々はオフィスロボットシステム HuRIS を設計・実装し、RSCW の可能性を示した。

また、Commission Architecture によって機能的に自律の難しい部分を補うことができること、複数台の機能的に不均一なロボットのいる RSCW 環境でもユーザはロボット固有の機能を考慮した記述をしなくても済むと期待できる。もしあるロボットに実現できない Procedure を含むタスクを与えてしまったとしても、実行不可能の部分のみは協力を要請するので、タスク全体が異常終了してしまふことはない。

一方、Commission Architecture よりもロボットの機能を向上させ、障害の回避を試みるということも考えられる。その場合ユーザの負担は軽減されると期待できる。しかし、障害回避のアルゴリズムが成功して Procedure が継続できるのは、現実世界でおこる障害の極一部に過ぎない。もちろん、障害回避の試みが成功する場合を拡張することも重要なテーマである。しかしながら、完璧なロボットの実現が難しいことを考えれば、最終的には人間の協力を採り入れた Commission Architecture が必要であるというのがここでの主張である。

今後 Commission Architecture を運用していくためには、問題点をより深く研究する必要がある。我々は、システムを実際に稼働した経験から、合

成音声によるロボットの依頼が常にユーザに受理されるとは限らない点に着目し、実験を試みた。

我々の行なった実験の結果、人間が依頼する場合と合成音声を用いてロボットが依頼する場合には有意な差が認められた。また、依頼を受理させるためには TV 会議システムをロボット上に実装することが有効であることが示された。しかしながら、直接人間が依頼する場合と比較すれば有意差が認められる。今後は、直接人間が依頼する場合と比較しても有意差を生じない実装手法について検討してゆく必要がある。

謝辞

本研究の HuRIS を実装するにあたって御指導頂いた筑波大学の油田信一助教授並びに飯田重喜氏に感謝致します。また実験の手伝いをして頂いた当研究室の大隅智春氏、佐藤倫太氏、川杉憲二氏並びに被験者になって下さった慶大湘南藤沢キャンパスの皆様にも感謝致します。また、実験結果の分析を指導して下さいました慶應大学文学部の松井孝雄氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 石井裕, “コンピュータを用いたグループワーク支援の研究動向”, コンピュータソフトウェア, 日本ソフトウェア科学会, Vol.8, No.2, pp.14-26, 1991.
- [2] 阪田史郎, “CSCW におけるマルチメディア技術”, 計測自動制御学会誌, Vol.30, No.6, pp.497-504, 1991.
- [3] 松本勉, 油田信一, “経路地図に従った移動ロボットの自律走行システム”, 日本ロボット学会論文誌, Vol.5, No.5, pp.351-359, 1987.
- [4] 利島保, “自閉症児のコミュニケーション情報の処理特性に関する発達心理学的検討”, 昭和 59 年度厚生省心身障害研究「母子相互作用の臨床応用に関する研究」報告書, pp.130-133, 1984.