

Magic Cards: 紙カードを利用したロボットとのインタラクション

Shengdong Zhao^{†,†††} 中村 晃 ^{†,††}
石井健太郎^{†,††} 五十嵐 健夫^{†,††}

家庭用ロボットに対する作業の指示ユーザインタフェースとして「紙カードを置く」というインタラクション手法を提案する。たとえば、「ここを掃除する」という紙カードを部屋に置いて家を出ると、ユーザが家を出ている間にその場所が掃除される。提案手法は、音声を用いたインタフェースに比べて場所の指示に適している他、タッチパネルやリモコンを用いたインタフェースに比べて機械に苦手意識を持っているユーザに受け入れやすいものと考えられる。本稿では、紙カードのデザインとそれらを用いたインタラクション手法、実装したプロトタイプシステムの内容、および簡単なユーザテストの内容について紹介する。

Magic Cards: A Paper Card Interface for Robot Control

SHENGDONG ZHAO,^{†,†††} KOICHI NAKAMURA,^{†,††} KENTARO ISHII^{†,††}
and TAKEO IGARASHI^{†,††}

Typical Human Robot Interaction (HRI) assumes that the user explicitly interacts with robots. However, explicit control with robots can be unnecessary or even undesirable in certain cases, such as dealing with domestic services (or housework). In this paper, we propose an alternative strategy of interaction: the user implicitly controls a robot by issuing commands on corresponding real world objects and the environment; robots discover these commands and complete them in the background. We implemented a paper-tag-based interface to support such implicit robot control in a sensor-augmented home environment. Our initial user studies indicated that the paper-tag-based interface is particularly simple to use and provides users with flexibility in planning and controlling their housework tasks in a simulated home environment.

1. はじめに

遠くない将来において、家庭用のロボットが普及し、家事全般をこなしてくれるようになることが期待されている。すでに、iRobot 社の Roomba のような掃除専用ロボットが一般向けに発売されており、研究レベルでは、服をたたんだり、料理をしたりするロボットなども開発されてきている^{16),26)}。このようなさまざまな作業をこなすことができる家庭用ロボットが実際に実現した際には、それらのロボットに対してどのようにして指示を出すかが重要な問題になってくると考えられる。

今日、主にロボット用の作業指示インタフェースと

して考えられているものとして、自然言語を利用した音声指示、ジョイスティックやリモコンなどを利用したもの、およびタッチパネルなどのコントロールパネルを利用したものなどが挙げられる。本研究では、これらとはまた異なる新たなロボットとのインタラクション手法の選択肢の一つとして、紙のカードを利用した手法を提案する²³⁾。本手法は、ユーザがロボットに対する指示の書かれた紙のカードを作業を行ってほしい場所に置いておくと、ユーザがいない間にロボットが作業を行ってくれるというものである。さらにロボットからユーザへのフィードバックも、メッセージカードの形でその場所に残すことで行われる。

紙カードによるインタラクションには、以下のようなメリットがあると考えられる。まず、場所の指示を明確に行うことができる。音声による指示では、たとえば「床を掃除しろ」と言ったときに、床のどの部分なのかを的確に指定することは困難である。ジョイスティックやリモコンなどでロボットを直接操作すればもちろん特定の場所で作業させることはできるが、ユー

† JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

JST ERATO Igarashi Design interface Project

†† 東京大学

The University of Tokyo

††† 国立シンガポール大学

National University of Singapore



図 1 基本的なアイデア

ザが操作し続けるのは現実的でない。タッチパネルなどによる方法では、たとえば見取り図や写真を使えば場所の指示はできるが、対象となる現実世界のその場所にカードを置くだけの作業に比べて、限られた画面で操作を繰り返して対象となる場所を見つけるのは手間だと考えられる。

次に、指示を出したという記録が、現実世界にカードの形で残されるので、出した指示の存在を後から確認することが容易である。すなわち、一通りの指示を出したあとで、出かけるまえにもう一度部屋を見渡せば、出した指示の内容をすぐに確認することができる。それに対し、音声指示による方法では、わざわざロボットと対話しないと確認することができず煩雑である。また、タッチパネルなどによる方法でも、確認するためには、メニューから確認作業を選択してその内容をいちいち確認しなければならず、やはり「部屋を見る」だけに比べて煩雑であるといえる。

最後に、紙カードを置くだけ、という作業は、コンピュータ操作に慣れていないユーザ、たとえば高齢者などにとってわかりやすく使いやすいと考えられる。音声対話は認識誤りの可能性が高く、それに対応しながら使用することは困難を伴う。タッチパネルなどによる操作は、ディスプレイに表示された内容を見ながらインタラクティブに操作するという点で、それだけで機械の苦手な高齢者等のユーザには心理的抵抗がある。

本稿では、関連研究について述べたあと、想定する使い方の例を示し、紙カードのデザインについて説明する。次にプロトタイプシステムの実装について紹介し、最後にプロトタイプシステムを利用して行った簡単なユーザテストの結果について報告する。

2. 想定される使い方の例 (シナリオ)

ここでは、紙カードを使ったインタラクションの例を示す。ロボットシステムに対するすべての指示が、パソコンを開いてGUI操作をしたり、リモコンのボタンを押したりといった複雑な操作をすることなく、実環境に紙カードを置くという簡単な動作で実現でき

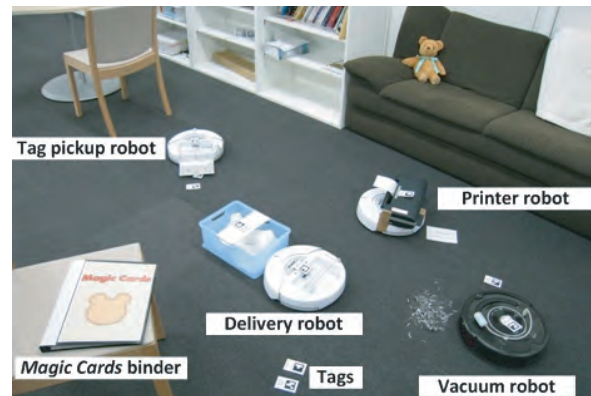


図 2 システム全体図

ている点が重要である。

ユーザが、前の晩に、明日ロボットシステムに実行してもらいたい作業として、「この部屋を掃除する」というカードと、「お昼に」というカードを、掃除してほしい部屋に置く。また、朝にごみ出ししなくてはならないので、「これを目的地A、Bへ運ぶ」というカードをゴミ箱の近くへ置き、「目的地A」というカードと「午前7時半」というカードを玄関の近くへ置いておく。また「目的地B」というカードと「夕方に」というカードをもとの場所においておくことで、夕方に空のゴミ箱をもとに戻すように指示をする。次の日の朝、ユーザは8時ごろに玄関のゴミ箱からごみを持ち出して、仕事に出かける。夕方に仕事をしてもどってくると、置いたカードはすべて回収されて片付けられており、さらに部屋が掃除されてゴミ箱がもとの場所に戻っている。

ユーザがリビングルームで映画を見ることにし、その間に寝室をきれいにしてもらうために、「この部屋を掃除する」というカードと「最初にやる」というカードを寝室におく。また、「この部屋にモップをかける」というカードと「次にやる」というカードを置くことで、掃除したあとにモップがけするように指示をする。部屋の中で特に汚い場所があった場合には「この場所にモップをかける」というカードを当該箇所に置いておく。また、部屋の中に壊れやすいものがある場合、ロボットに近づいてほしくない場合には、「これに近づかない」というカードを置くことで、ロボットが近づかないように指示を出せる。最後に、「いますぐ実行開始」というカードを寝室において部屋を出ると、すぐにロボットシステムが作業を開始する。

何日かシステムを使っていると、同じような作業セットを繰り返し指定していることに気付く場合がある。たとえば、掃除機をかけたあとにモップがけをする、というような作業セットを毎回指定する、といったこ

とが考えられる。そのような場合には、「この一連の作業をまとめて一つにする」というカードを作業指示の際に一緒に置いておくことで、「掃除機をかけてモップがけをする」という新しいカードが作成される。以降はこの新しいカードを一枚置いておくだけで、掃除とモップがけを指示することができる。

3. 関連研究

家事労働は我々の生活において大きな割合を占めるものであり、その効率的な実行が望まれている^{2),10),18)}。iRobot社のRoombaが実際に家庭で使われるようになってきており、その使い方などについて調べた研究がいくつかある^{7),8),27)}。これらの研究では、ロボット技術を実際の家庭生活へ導入するためには、家事作業のやり方や構造に関する配慮が必要であるということが議論されている^{8),28)}。

我々の研究は、ユビキタスコンピューティング²⁹⁾や仮想現実感³⁰⁾、タンジブルユーザインタフェース¹²⁾などといった、HCI領域においてこれまでに提案されてきた手法を参考にしている。

ユビキタスコンピューティングでは、ユーザがコンピュータの存在を意識せずに利用できるようにすることが重要とされており²⁹⁾、そのための基盤技術としてコンピュータが自動的にユーザの状況を認識するための技術が数多く研究されている^{14),19)}。我々の紙カードによるインタラクション手法は、このような基盤システムを仮定した上で、なるべくコンピュータを意識させずにシステムに指示を出すための方法を提供するものである。

仮想現実感の研究では、視覚的なマーカーを利用することで、ビデオ画像中の物体の場所やIDを認識する手法が提案されている^{5),20)}。我々のプロトタイプシステムでは、同じような視覚的なマーカーによってカードやロボットの場所やIDを認識している。

タンジブルインタフェースでは、情報を操るのに、マウスやタッチパネルなどでなく、手でつかめる実物体を利用することが提案されている¹²⁾。我々の紙カードも同じように実物体を利用し、それを実世界に置くことでインタラクションを実現している。

紙を利用したインタフェースの先行研究では、メモ書きのような紙の上の情報と計算機内の情報を同期させることに主眼を置いているものが多い^{9),13),21),24)}。そのような中で、特に我々の研究に関係が深いものとして、2次元マーカーのついた紙カードを壁に貼ることで、計算機と人間が協調しながら作業をすることを実現しているものがある^{15),17),22),25)}。ただ、これら

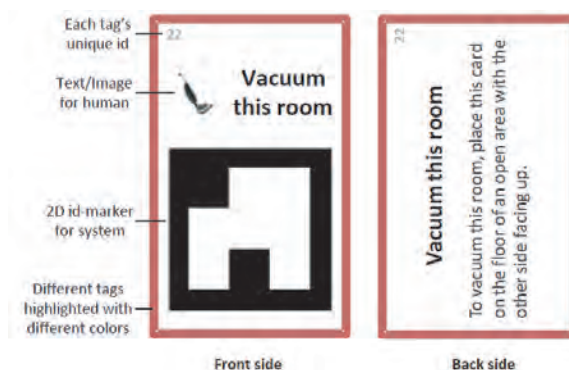


図3 カードデザイン

の主なアプリケーションはホワイトボードシステムであり、ロボットに応用したものではない。

ロボットの操作手法として、アクチュエータの動き直接操作するかわりにタスクレベルで指示を出す、という方法が提案されている^{4),6)}。しかしこれらのシステムは、ロボットの遠隔操作を対象としているものであり、あくまでユーザはロボットの操作に集中していることを想定している。本研究は、ユーザがいない間に家事をするというように、ユーザがロボットに指示をだしたあとはその結果を見るまで一切感知しない、という点でこれらのシステムとは異なるものである。

4. 紙カードによるユーザインタフェース

紙カードによるインタラクションを新たにデザインするにあたって、我々はまず作業を指示する際の自然言語の構造をまねることにした。すなわち、ひとつの文を構成する、主語、述語、目的語、修飾語などに相当するカードを用意し、それらを組み合わせることで、さまざまな作業の指示を可能とすることにした。ただし、主語は基本的にロボットであるので、明示的に指示する必要がない。また目的語は、基本的にカードのおかれた場所によって指示されるものとしている。よって、基本となる指示は、述語に相当するカードを、目的とする対象物の近くに置く、ということになる。

4.1 カードデザイン

カードの外観のデザインは、Collaborage¹⁷⁾を参考にしている。すなわち、カードを見るだけで、人間にとっても計算機にとっても内容が簡単に理解できるようになっている。各カードには、人間のための情報として簡単な自然言語による説明とアイコンが描かれており、計算機のための情報として2次元のマーカーが描かれている。カードの背面には、ユーザが内容を確認するための詳しい説明が記載されている。カードの例を図3に示す。

2次元マーカーとしては、CyberCode²⁰⁾やARTag⁵⁾

などを単純化したような独自開発のものを利用している。マーカーは 3x3 のモノクロのパターンが白地に黒の枠の中に埋め込まれており、120 通りのパターンを識別しその方向を得ることができる。それぞれのマーカーの大きさは 5x5cm であり、2.4x2m の床領域をカバーする 2.5m の高さに設置された 960x720 の解像度のカメラから安定して認識することができている。なお、ID および位置認識のための技術としては、磁気センサーや LED を使ったもの、レーザービーコンを使ったものなど、他の手法を使うことも可能であるが、印刷された 2 次元マーカーをカメラで認識する方法は、バッテリーが不要で安価であるという利点があると考えられる。

4.2 カードタイプ

図 4 に、現在プロトタイプシステムにおいて実装されているカードの種類を示す (1~14)。主な種類は、述語に相当する Action カード、モノを指し示す Object カード、修飾語に相当する Modifier カード、そしてさらにいくつかの制御カードがある。

4.2.1 Action カード

Action カードは、目的とする作業を指定する、もっとも基本的なカードである。将来的には、掃除や洗濯、アイロンがけや部屋の片付け、料理や庭の手入れ、などのあらゆる家事作業に対応したカードが提供されることを想定している。現在のプロトタイプシステムでは、簡単なロボットのみで可能な作業として、掃除、モップがけ、および物体の搬送のみ提供している。

Vacuuming および Mop カードは、掃除機による掃除とモップがけを指示するものである。Vacuum this room (1) と Mop this room (2) はカードの置かれた部屋全体を対象とし、Vacuum this spot (3) および Mop this spot (4) はカードのおかれた場所の近くのみを対象とする。物体の搬送を行うカードは 3 種類がある。Transport this to "Location A" (6) は、そのカードの近くにある物体を、Location A カードの置かれた場所へ移動する作業を指示する。Bring multiple "items" here (7) は、Item1, Item2 などの近くにある物体を、すべてその場所へ集める作業を指示する。この作業はたとえば、複数のおもちゃを集めておもちゃ箱の近くへもってくるようなことに相当する。Take this to "Destinations" (8) は、そのカードの近くにある物体を、"First Destination", "Second Destination" といったカードの置かれている場所へ、順番に移動する。この作業はたとえば、ゴミ箱を朝玄関へ出しておき、夕方また部屋へ戻す、といったことに相当する。これらの作業に付加的な指示を出すものとして

Avoid this object カード (5) がある。このカードを貴重品などの近くに置いておくことで、ロボットがそれらの場所に近づくことを防ぐことができる。この機能は、Roomba に付属するバーチャルウォール機能に相当するものである。

4.2.2 Object カード

Object カード (14) は、ロボットの作業対象となるモノにあらかじめ貼り付けておくことで、システムが認識して操作できるようにする。理想的には、カードなしで画像認識などで処理できることが期待されるが、現時点では画像認識を完全に行うことは難しく、カードを貼り付けることとしている。また、カードが張ってあることで、「この物体はシステムが扱うことができるものである」ということがユーザに明示的に理解できるというメリットもある。

4.2.3 Modifier カード

Modifier カードは、Action カードと一緒に置くことで、主にスケジュールリングにかかわる情報を指定する。

Time カード (9) は、目的とする作業をいつおこなうべきかを指定する。もしこのカードが使われていないときには、システムはできる作業から順に自動的に処理していく。時間の指定の仕方としては、Morning, Noon, Evening, および Night など、一般的な言葉を利用している。これは、パイロットスタディにおいて、このような一般的な言葉の方が「11 時 23 分」といったような時刻よりも使いやすいであろう、というコメントを得ていたことに基づいている。

ただ、ユーザによって、Morning や Evening といった言葉の意味が異なると考えられ、また特定の時間を指定したい場合もあると考えられる。そのような場合には、ホスト PC 上での GUI 操作によって特定の時間を表すカードを作成し、それを印刷して新しいカードとして使うことができるようにしている。

Order カード (10) は、複数の作業を行うときにその順番を指定する。具体的には、Do this first, Do this second, Do this third といったカードが用意されており、これらのカードの近くに置いてある Action カードの内容を順に実行する。

4.2.4 制御カード

制御カードは、制御コマンドに相当するもので、現在出している指示全体を記憶しておくことや、作業全体を一時停止・再開することができるようになっている。

Memorize this set of tasks for future reuse (11) は、現在指定している作業全体を一つの作業として記

録して再利用可能とするものである。まず、ユーザは、通常のカードを利用してシステムに対して一連の指示を出す。このとき、一緒に Memorize カードを置いておく。すると、システムは、作業を行うと同時に、新しいカードを作成してそれを印刷する。次回以降、ユーザは印刷されたカードを一枚おくだけで、一連の作業を指示することができる。この作業のパッケージ化は階層的に行うこともできる。すなわち、Memorize カードを利用して作成したカードを別の Memorize カードによるパッケージ化の一部に含めることができる。

Start activities now (13) は、作業を即座に開始することを指示する。通常、提案システムは、ユーザがカードをおいて指示を出している最中には何もせず、ユーザが作業領域からいなくなったことを確認してからすべての作業を開始する。しかし、Start activities now カードが認識された場合には、その場で即座に作業を開始する。この場合にはユーザの目の前で作業を行うことになる。

Pause activities (12) は、ロボットの作業を一時停止するためのものである。前記のように提案システムはユーザが不在の間に作業することを前提としているが、場合によってはロボットの作業中にユーザが戻ってきたりすることもあると考えられる。この場合に Pause activities カードを用いることで、作業を一時停止することができる。なお、作業を再開するためのカードは用意されていない。作業の再開は、Pause カードを取り去る（カメラから見えない場所にしまう）ことによって指示される。

5. プロトタイプシステムの実装

我々の実装したプロトタイプシステムは、カメラ、ロボット、および PC から構成されている。カメラ・PC 間は USB ケーブルによって接続されており、ロボット・PC 間は bluetooth によってワイヤレス接続されている。

カメラは天井に設置されており、紙カードおよびロボットの位置認識を行う。現在の実装では、4 台のカメラで約 5 x 4m の領域をカバーしている。一台のカメラの解像度は 960 x 780 であり、2.5m 下の床に置かれた 4.5 x 4.5 cm のマーカーを認識することができる。

5.1 使用するロボット

ロボットは大きく分けて、作業用ロボットと補助ロボットの 2 種類がある (図 6)。作業用ロボットは、ごみの吸引によって掃除をするロボット (iRobot Roomba)

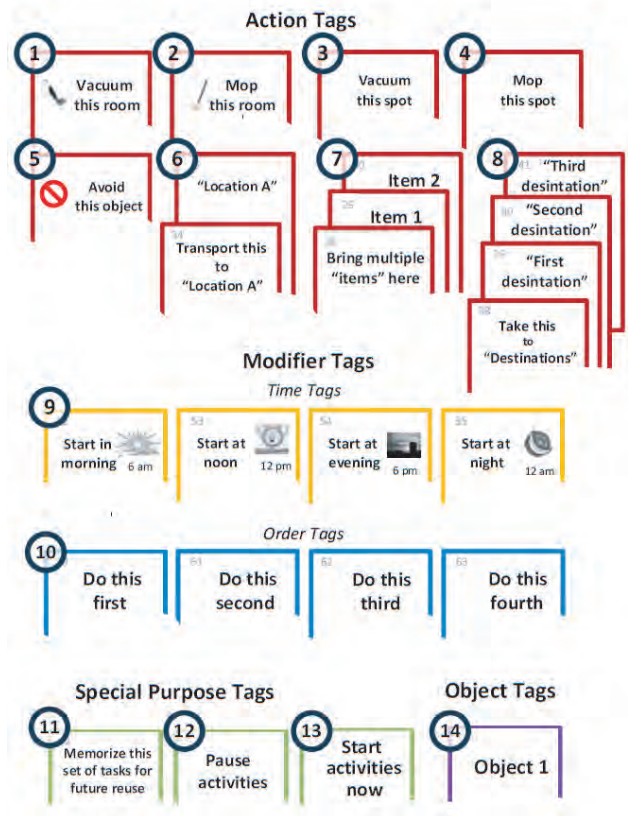


図 4 カードタイプ

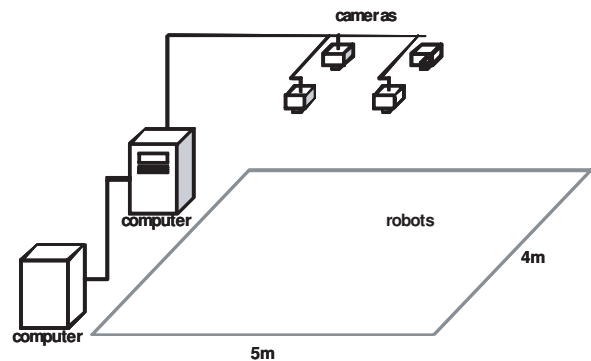


図 5 システム全体構成

、モップをかけるロボット (iRobot Scooba) および、押すことによってモノを運搬するロボット (iRobot Create) の 3 種類をサポートしている。部屋全体あるいは特定の場所をスポット掃除する機能は Roomba および Scooba にあらかじめ用意されているため、それを利用している。モノの運搬については、モノを中心に目的地に向かうようなダイポール場にしたがってロボットを動かすアルゴリズム¹¹⁾を利用している。

補助ロボットとしては、床に置かれた紙カードを回収するカード回収ロボットと、メッセージを印刷して床に残すプリンタロボットの 2 種類を作成した。これらは iRoboto Create を改造したものである。カード



図 6 使用するロボット

回収ロボットは下面に強力な磁石がついており、すべての紙カードの中に薄い鉄板を仕込んでおくことで、回収を実現している。現在はユーザが手作業で磁石についたカードをはがさなければならないが、将来的にはきちんとつかみ上げて回収するようなロボットを作成予定である。プリンタロボットは、iRobot Createの上に電池駆動のモバイルプリンタを搭載したものであり、複数のコマンドをまとめた新しいコマンドカードを作成したり、エラーが起きたときにユーザにその旨のメッセージを残すときに用いる。操作はすべてワイヤレスに行われる。

6. ユーザスタディ

提案手法の妥当性などについての知見を得るために簡単なユーザスタディを行った。参加者は21歳から52歳の8人の女性である。3人が独身で5人が既婚（うち4人が主婦）であった。最初に、簡単なアンケートを実施した後、紙カードのデザインについて意見を聞いた。ここでは、何も説明せずに13種類（オブジェクトカード以外）の紙カードを見せて、どのような内容なのか紙に書いて説明してもらうことによって、どの程度直感的に理解できるかどうかを確認した。このとき、参加者に見せるのはカードの表面のみとし、カードの裏面の説明文はないものとした。最後に実際に紙カードを利用してロボットに指示を出す作業してもらった。参加者への指示は、「この箱をここへ運んでください」というような自然な日本語で行った。このときに使う言葉は、カードに記載されている言葉とはなるべく違う表現を使うようにした。最初に簡単な作業（掃除、モップかけ、物の移動などの単体作業）からはじめて、徐々に難しい作業（単純作業の組み合わせ）を指示してもらった。すべての指定された作業

が終わった後、参加者に自由な指示を出してもらった。

カードを見てその意味を理解できるかを試した実験の結果、8人中6人の参加者は13種類のすべてのカードの意味を正しく理解していた。2人の参加者は8番のカード（複数箇所への運搬）の意味を取り違えており、そのうちの1人の参加者は11番のカード（作業の組み合わせ）の意味がわからないと答えていた。1人のユーザは8番のカードを複数の宛先へメールを出すことだと解釈し、別のユーザは複数の目的地のいずれか一つへ搬送することだと解釈していた。11番の意味がわからないと答えたユーザは、これの使い道がわからないと説明していた。これらの結果から、8番と11番のカードについては再検討が必要であると考えられる。

実際に紙カードを利用してロボットに指示を出す作業については、すべての参加者が問題なく行えることを確認した。すなわち、言葉で指定された作業内容に相当するカードを適切に選び出し、それらのカードを我々のシステムが認識して作業できるような適切な場所に配置することができた。また、参加者は、順番を指定するような作業についても、単純なタスクとほとんど変わらず簡単に指示できると答えていた。最後の自由課題では、いろいろと面白い指示が出された。たとえば、ある参加者は、まず掃除したい場所にあるゴミ箱を別の場所に移動し、そのあとその場所を掃除し、最後にその場所にそのゴミ箱を戻す、というような作業を指示出していた。

事後のアンケートでは、紙カードのシンプルさについて高い評価を得た。特に、もっとも高齢の52歳の参加者は、自分は機械の操作が苦手であるとした上で、紙カードを置くだけというのはボタンを一切押さなくてよい点がすばらしいとコメントしていた。彼女によると、機械のボタンを押すという行為自体が、何かまずいことが起きそうで恐怖を感じるが、カードを置くだけであれば、そのようなことがないので、心理的抵抗がないとのことであった。このようなコメントは、機械の操作に苦手意識をもっているユーザに対して、紙カードによるインタラクシオンが有効である可能性を示しているといえる。

参加者から指摘された問題点としては、まず、ちいさな子供がいる場合に、床に置いたカードをいたずらしてしまうという点があげられる。この点については、モノを床に置くというインタラクシオン手法の根本的な限界であるといえる。次に、今回のプロトタイプでは5台のロボットを利用していたが、狭い家では、できれば1台で済ませたいという意見があった。天井に

カメラを設置することについては、借家では家の改造になってしまうので難しいのではという意見もあった。

現在の実装はプロトタイプシステムであり、実際のロボットの動作にあたっては、ロボット同士がぶつかって乗り上げてしまったり、バッテリーがなくなってしまうといった、不具合が観察された。これらの不具合は、実ロボットを利用している以上、完全にゼロにすることは難しいと考えられる。現在でもエラーメッセージを返すなどの工夫をしているが、自動修復等のより高度な対処方法について検討する必要があると考えられる。

7. 議 論

本稿で紹介したシステムはあくまでもプロトタイプシステムであり、そのままの実用化は困難であると考えられる。まず、マーカーとしてビジュアルマーカーを利用しているが、カメラの死角に入ってしまう問題や照明の問題もあり、将来的には、Ubisense³⁾のような、カメラによらないタグの利用が必要と考えられる。

ロボットについても、現在の実装は、商業的に低価格で入手できるものを利用しているが、将来的には、汎用的なロボットシステムに対応することを想定している。研究レベルでは、さまざまな家事をこなすことができるヒューマノイドロボットなどが開発されてきており、これらのロボットを利用した実証実験なども行っていきたい。

8. ま と め

本稿では、紙カードを利用した家庭用ロボットシステムとのインタラクション手法について提案した。まず、想定される使い方(シナリオ)を説明した後、紙カードのデザインおよび使用方法、プロトタイプシステムの実装について説明し、最後に簡単なユーザテストを行った結果について報告した。紙カードを置くだけ、という操作は、タッチパネルやリモコンを利用した操作に比べて、特に機械操作に苦手意識をもっているユーザに受け入れやすい可能性があると考えられる。また、音声を用いた操作に比べて、紙カードを目的の場所に置くという操作方法は、特定の場所を指示するのに適していると考えられる。今後は、カメラによらない位置計測センサの利用や、より高度なロボットを利用するなどして、より実用的なシステムの開発を行っていきたく考えている。

9. 謝 辞

システムの実装およびビデオ撮影について Mingui Sun 氏に、イラストの作成およびビデオ撮影について Zoey Yu 氏に、ビデオ撮影および編集について竹岡義樹氏、額谷宙彦氏、三宅貴仁氏にご協力いただいた。また、Yotam Gingold 氏をはじめとする JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースのメンバーには研究遂行にあたって有益なアドバイスをいただいた。

参 考 文 献

- 1) ARToolKit. www.hitl.washington.edu/artoolkit/
- 2) The National Survey of Families and Household. [Http://www.ssc.wisc.edu/nsfh/](http://www.ssc.wisc.edu/nsfh/).
- 3) Ubisense. [Http://www.ubisense.net](http://www.ubisense.net).
- 4) Few DA, Bruemmer DJ, and Walton MC. Improved human-robot teaming through facilitated initiative. Proc. RO-MAN '06, (2006), 171-176.
- 5) Fiala M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques. Proc. CVPR '05; (2005), 2.
- 6) Fong T and Thorpe C. Vehicle teleoperation interfaces. Autonomous robots 2004; 11(1): 9-18.
- 7) Forlizzi J. How robotic products become social products: an ethnographic study of cleaning in the home. Proc. HRI '07, ACM Press (2007), 129-136.
- 8) Forlizzi J and DiSalvo C. Service robots in the domestic environment: a study of the roomba vacuum in the home. Proc. of HRI '06, ACM Press (2006), 258-265.
- 9) Heiner JM, Hudson SE, and Tanaka K, Linking and messaging from real paper in the paper PDA, Proc. UIST '99, ACM Press, (1999), 179-186.
- 10) Hersch J and Stratton LS. Housework and wages. The Journal of Human Resources 2002; 37(1): 217-229.
- 11) Igarashi T, Kamiyama Y, and Inami M, A Dipole Field for Object Delivery by Pushing on a Flat Surface, Proc. ICRA2010, (2010).
- 12) Ishii H and Ullmer B, Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms, Proc. CHI '97, ACM Press, (1997), 234-241.
- 13) Johnson W, et al. Bridging the paper and electronic worlds: the paper user interface. Proc. CHI '93, ACM Press, (1993), 507-512.
- 14) Kidd CD, et al. The aware home: A living laboratory for ubiquitous computing research.

- Proc. CoBuild '99, (1999).
- 15) Lange BM, Jones MA, and Meyers JL, Insight lab: an immersive team environment linking paper, displays, and data, Proc. CHI '98, ACM Press, (1998), 550-557.
 - 16) J. Maitin-Shepard, M. Cusumano-Towner, J. Lei and P. Abbeel. Cloth Grasp Point Detection based on Multiple-View Geometric Cues with Application to Robotic Towel Folding. Proc. ICRA 2010, (2010).
 - 17) Moran TP, Saund E, Van Melle W, Gujar AU, Fishkin KP, Harrison BL. Design and technology for collaboration: collaborative collages of information on physical walls. Proc. UIST '99, ACM Press, (1999), 197-206.
 - 18) Olson JT. Role conflict between housework and child care. *Work and Occupations* 1979; 6(4): 430-456.
 - 19) Patel SN, Truong KN, and Abowd GD. PowerLine positioning: A practical sub-room-level indoor location system for domestic use. Proc. Ubicomp '06, (2006), 441-458.
 - 20) Rekimoto J and Ayatsuka Y, CyberCode: designing augmented reality environments with visual tags, Proc. DARE '00, ACM Press, (2000), 1-10.
 - 21) Robinson JA and Robertson C. The LivePaper system: augmenting paper on an enhanced tabletop. *Computers and Graphics* 2001; 25(5): 731-743.
 - 22) Saund E. Image mosaicing and a diagrammatic user interface for an office whiteboard scanner. Proc. CoBuild '99, (1999).
 - 23) Zhao S, Nakamura K, Ishii K, and Igarashi T. Magic Cards : A Paper Tag Interface for Implicit Robot Control, Proc. CHI2009, ACM Press, (2009), 173-182..
 - 24) Siiio, I. and Mima, Y. IconStickers: Converting computer icons into real paper icons. Proc. HCI International '99, (1999), 271-275.
 - 25) Stafford-Fraser Q and Robinson P, BrightBoard: A video-augmented environment, Proc. CHI '96, ACM Press, (1996), 134-141.
 - 26) Sugiura Y, Sakamoto D, Withana A, Inami M, and Igarashi T, Cooking with Robots: Designing a Household System Working in Open Environments, Proc. CHI2010, ACM Press, (2010), 2427-2430.
 - 27) Sung J-Y, et al. Housewives or technophiles?: understanding domestic robot owners. Proc. HRI '08, ACM Press, (2008), 129-136.
 - 28) Taylor AS and Swan L, Artful systems in the home, Proc. CHI '05, ACM Press, (2005), 641-650.
 - 29) Weiser M. The computer for the 21st century. *Scientific American* 1991; 265(3): 94-104.
 - 30) Wellner P. Interacting with paper on the digital desk. *Communications of the ACM* 1993; 36(7): 87-96.