

ロボットが持つ機能の発見を促進するインタラクション設計

小 林 一 樹[†] 山 田 誠 二^{††}

本研究では、家庭用ロボットが多機能化したとき、それらの機能を把握し理解するユーザの負担が大きくなる問題に着目し、ユーザがマニュアルなしで、自然にロボットの機能を発見するインタラクション設計を行う。ユーザがロボットの機能を発見する方法として、ユーザの行為とそれに対して実行されるロボットの機能との因果関係を明確にするアプローチをとり、ユーザの行為に対するロボットの内部状態を段階的に提示するアクションスローピングというロボットの行動設計方法を提案する。具体的なロボットの行動として、ユーザとロボットとの距離に応じて、ロボットの状態提示の速度を変化させる行動を設計し、小型移動ロボットを用いた掃除ロボットに実装した。掃除ロボットの動作実験によって、提案手法を比較的安価なセンサと簡単な行動ルールで実現できることを確認した。

Interaction Design for Acceleration of Finding Robot's Function

KAZUKI KOBAYASHI[†] and SEIJI YAMADA^{††}

In this paper, we deal with a problem which will be caused by robots with a lot of functions in the near future. The problem is that a user using the robots have to read its thick manuals. We then design an interaction in order for users to discover robot's functions easily without reading manuals. The function discovering is defined as "to find relationship between a user's act and a robot's function." We propose a guideline for designing robot's actions, "action sloping", which allows a robot to express its internal state gradually and also allows a user to discover a robot's function naturally by observing robot's actions. We design a concrete robot's action for a sweeping robot, and the robot changes the velocity of the motion for indicating its internal state according to the distance between the robot and its user. In an experiment, we confirm that the robot performing the action sloping can be realized with low-cost infrared sensors and simple rules of actions.

1. はじめに

近年、掃除ロボットやペットロボットに代表されるホームロボットが一般家庭に普及しつつある¹⁾。特に、FriendlyRobotics社の自律芝刈りロボット Robomow[☆]や iRobot社の自律掃除ロボット Roomba^{☆☆}など、エンタテインメントとして楽しむのではなく、実用的な作業を行わせる状況が生じている。このようなロボットが家庭に普及したとき、現状の家電製品と同様に、高機能化や多機能化していくことが見込まれる。しかし、ロボットの高機能化、多機能化に伴い、ユーザビリティに関する弊害が生じてくる。1台のロボットに様々な機能を搭載するため、ユーザに混乱が生じ

やすく、全機能を把握することは難しい。また、多機能ロボットを使いこなそうと考えたときには、膨大なマニュアルに目を通さなくてはならず、特に導入初期においてユーザに大きな負担がかかる。

そこで、本研究ではユーザがロボットとの情報のやりとりを通して、自然に無理なくそのロボットの機能に気づき、理解できるようになるためのインタラクション設計を行う。ここでは、ユーザの行為とロボットの機能との対応関係の発見を機能発見と呼び、ユーザにロボットとのインタラクションを通してロボット内部状態を理解させ、その機能を発見させるアプローチをとる。これまでに、ヒューマンロボットインタラクションの研究分野では様々な研究が行なわれているが、ロボットの機能に気づかせる方法に関する研究はない。小野ら²⁾のユーザとロボットの親和性を高めることによる、ロボットの内部状態の理解を促進する研究や、小松ら³⁾の単純なビープによる態度推定の研究では、ロボットの状態をどのようにして人間に理解させるかという問題を対象としているが、ロボット機能をどの

[†] 総合研究大学院大学
The Graduate University for Advanced Studies

^{††} 国立情報学研究所
National Institute of Informatics

[☆] <http://www.friendlyrobotics.com/robomow/>

^{☆☆} <http://www.irobot.com/consumer/>

ようにして発見させるかという問題には触れられていない。また、ロボットの内部状態と人間の内部状態とのつながりから、心の理論⁴⁾も参考になるが、ロボットの機能発見と関連付けて考えるには飛躍がある。

ユーザが自然にロボットの機能を見えるためには、ロボットの内部状態をどのようにしてユーザに理解させやすくするか、また、どのようにしてユーザの行為を適切なものへ導き、ロボットの機能を実行させるかが重要となる。そこで、本研究では、ユーザの行為に対応するロボットの内部状態を段階的に提示し、ユーザの行為を適切なものへ導く「アクションスローピング」というロボットの行動設計方法を提案する。以下ではアクションスローピングによる機能発見について説明し、掃除ロボットを用いた動作実験について述べる。

2. アクションスローピングによる機能発見

本節では、ユーザがマニュアルを読まずにロボットの機能を自然に発見する方法について説明する。

2.1 ユーザによるロボットの機能発見

新規に家電製品を購入したり、はじめて機械を使う場合など、そのユーザはマニュアルを読んで正しい利用方法を把握する。しかし、マニュアルから必要な情報を探し出したり、実際の機器との対応をとって内容を正確に把握するのは容易な作業ではない。よって、マニュアルを読まずに、機器を使うだけで機能が簡単に把握できればユーザに負担がかからない。

ここでは、ユーザがマニュアルを読まずにロボットの機能を理解する手順として、以下のような3段階で構成されるインタラクションを考える(図1)。

- (1) **ロボットの状態提示** ロボットは自身の状態を人間に提示し、ユーザの介入を促す。
- (2) **ユーザのアクション** ユーザは、(1)のロボットの状態を理解し、適切な行動をとる。
- (3) **ロボットの機能提示** ロボットは、(2)の人間の行動やその結果に対し、適切な作業を実行することで機能を提示する。

この手順に従うことで、ユーザは自分の行動とロボットの行動の対応関係を容易に発見することが可能である。ここでは、この対応関係の発見を、**機能発見**(function discovery)と定義する。

2.2 非言語情報による状態提示

本研究では、言語情報を用いてロボットの状態を伝達する方法は、特定の言語に依存し、実装コストも大きいという理由から、非言語情報を用いる。非言語情報によって確実な情報伝達が可能であるかという問題

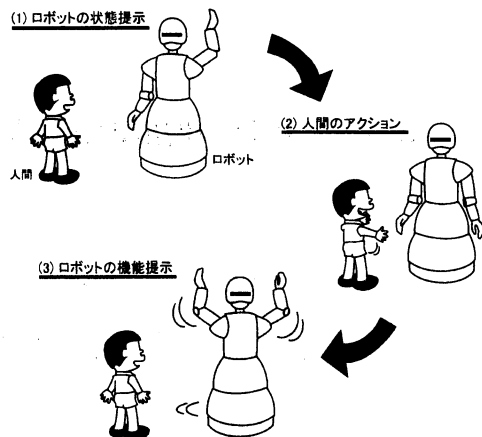


図1 機能発見

があるが、非言語コミュニケーションによって豊かな情報がやりとりされていることを示す先行研究がある。渡辺ら⁵⁾は、うなずきなどの頭の動きが対話において重要な役割を果たしていることを示し、松丸ら⁶⁾は移動ロボットによる進行方向の提示に、レーザーポインタや目のアニメーションを用いた場合のユーザの対応を評価し、その有効性を示している。非言語情報は人間とロボットの社会的インタラクション⁷⁾にとって必須の要素であり、ロボットへの教示に用いられている事例^{8),9)}もある。また、ヒューマンエージェントインタラクション¹⁰⁾の目的である、人間とエージェント(ロボット)間の自然なインタラクションの実現という意味でも、非言語情報を用いる意義がある。さらに、心の理論も人間同士による非言語コミュニケーションを対象にしている。このように、非言語情報を用いた場合でも、伝達される情報は十分な質を保っていると判断できる。

非言語情報といっても、光の点滅や、ビープ音などを用いた様々な状態表現が考えられるが、本研究ではロボットの動きによる表現を採用する。動きを用いたロボットの状態提示に関する研究¹¹⁾では、LEDの点滅やビープ音による表現に比較して、ロボットの動きによる表現が有意にユーザの行動を引き起こすことを示している。

2.3 アクションスローピング

2.1で述べた3段階で構成されるインタラクションに従ってユーザにロボットの機能を見えさせることを考えたとき、(2)のユーザのアクションを、どのようにして「機能を見えるのに適切な行動」に導くかが問題となる。そこで、本研究では、ユーザにロボットの機能を見えさせる方法としてアクションスローピン

グ (action sloping) による機能発見を提案する。アクションスローピングとは、ユーザの行動に応じて、ユーザにとってネガティブな行動からポジティブな行動へと段階的に変化させることを指す。

たとえば、ロボットから一定の距離内にユーザが位置したり通過した場合、特定の機能を実行するように設計されている家事ロボットを考える。具体的な機能としては、ユーザが物体を差出すと所定の場所にその物体を片付けるなど、ユーザとの協調的な作業が挙げられる。ここで、事前に上記のような機能の存在を知らないユーザが、このロボットを使う場面を考える。図2に示すように、ユーザがロボットから遠い場所に位置するときは、ロボットはネガティブな行動をとり、ユーザがロボットの近くに位置するときは、ロボットはポジティブな行動をとるように設計する。このとき、ユーザの位置の変化に応じて、ロボットは自身の行動をネガティブからポジティブに徐々に変化させる。これにより、ユーザは、ロボットとの相対的な位置の変化が、ロボットの行動に影響を与えることを容易に理解できる。さらに、ロボットにポジティブな行動をとらせるため、ユーザはロボットにより接近する行動をとると考えられる。したがって、ユーザはロボットとのインタラクションを通して、ある機能が実行される範囲内に導かれ、ロボットがその機能を実行したときに、ユーザ自身の行動とその機能との対応付けを自然で容易に行うことができる。

2.4 機能発見のポテンシャルモデル

アクションスローピングの利点は、ロボットの行動を段階的 (スロープ) にすることによって、ユーザによるロボットの機能発見を容易にできる点である。図3に、機能発見のポテンシャルモデルを示す。これは、ユーザがある行為を行ったとき、それがロボットの機能に直接関与するかどうかを表すモデルである。横軸はユーザがとりうる行為を表し、縦軸はロボットの任意の機能が発見されるか否かを表している。破線は従来手法での機能の発見しやすさを表しており、たとえば、ユーザがボタンを押して任意の機能を実行する場合などに対応する。ユーザがボタンを押す以外の行為をしても機能の発見には至らないが、ボタンを押したときにのみ、ロボットの任意の機能が実行され、そのユーザの行為とロボットの機能の対応関係が明確になり、図中の直線で表される「機能発見」に到達する。

実線は提案手法での機能の発見しやすさを表している。従来手法とは異なり、ロボットの任意の機能に対応した行為でなくても、ロボットとのインタラクションを繰り返すことによって、その機能に対応したユー

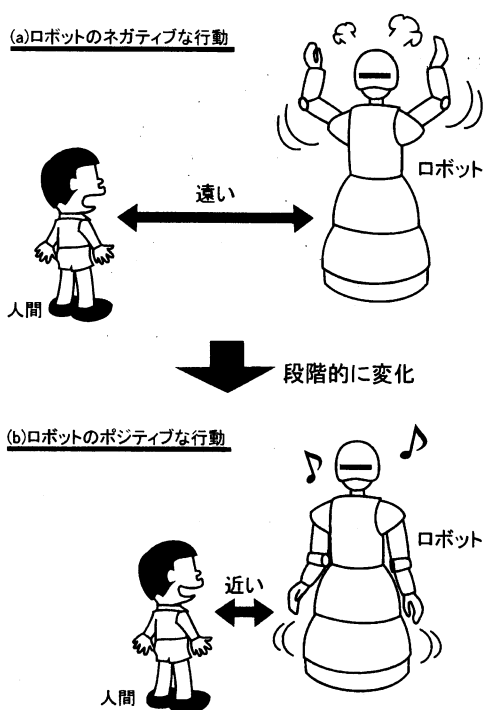


図2 アクションスローピングの例

ザの行為に導くことが可能である。前述のアクションスローピングの例のように、ユーザとロボットとの距離に応じてロボットの行動を、その度に段階的に変化させることで、ユーザの行為を適切なものに遷移させる。

図中の水平方向の矢印は、機能発見に関係するユーザの行為数を表しており、従来手法では、一般に1つのユーザの行為が1つの機能に対応しているだけであるが、提案手法では、機能発見につながるユーザの行為は複数あり、これが機能発見のしやすさに寄与している。

2.5 具体的な行動の設計

アクションスローピングに基づき、ロボットにポジティブ・ネガティブな行動を実装するとき、具体的にどのような行動を設計すれば良いかが問題となる。ロボットの行動は、ハードウェアやタスクの内容に強く依存するが、共通する要素としては、人間にとって理解しやすいポジティブ・ネガティブを表現できること、かつ、段階的な表現が可能なが挙げられる。そこで、本研究では、ポジティブ・ネガティブを表現するのに、ロボットの動作速度を採用する。遅い動作速度をポジティブに対応させ、早い動作速度をネガティブに

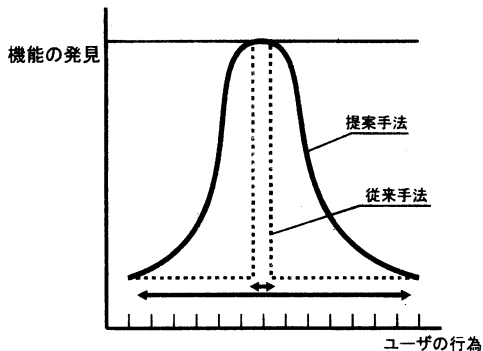


図3 機能発見のポテンシャル

対応させる。速くて無意味な動作は、ユーザにロボットが故障しているかのような印象を与えることを目的としている。したがって、動作が徐々に速くなれば故障の度合いが進行し、動作が徐々に遅くなれば故障が改善されているように見える。

ロボットの行動設計の次に問題となるのは、どのようにユーザの行為を対応させるかである。アクションスローピングはロボットとのインタラクションを繰り返し行うことが前提となるため、ユーザが次にとる行為を予測しやすいものや、連続的な行為が望ましい。また、そのようなユーザの行為をロボットが検出可能である必要もあるため、センサにも依存する。ここでは、図2の例にもあるように、ユーザとロボットとの距離を採用する。距離は比較的安価な赤外線距離センサで容易に測定可能であり、ユーザの行為の連続性という点からも、ロボットの状態表現との対応がとりやすい。

以上をまとめると、ユーザがロボットから離れているときは、速い動作で状態表現を行い、ユーザが近づくに従ってその動作速度が遅くなっていく。よって、ユーザは、次にどんな行為をすればロボットが望ましい状態になるのかを自然に理解し、ロボットに近づく行為を行う。そして、ユーザがロボットから一定距離内に到達したときに、ロボットが任意の機能を実行することで、ユーザは、ロボットに近づけばある機能が実行されることを発見する。次節では、この設計の妥当性を検証するために、掃除ロボットに、距離に応じて状態表現を段階的に変化させるアクションスローピングを実装し、その動作を確認する。

3. 実験

提案手法を実現するためのロボットの動作を、実験によって確認する。ここでは、掃除ロボットの機能の

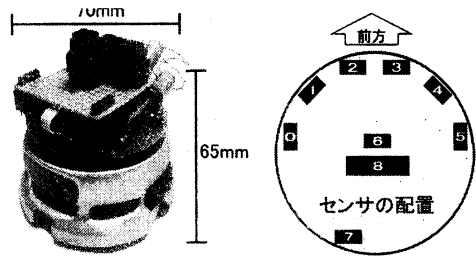


図4 KheperaII

発見を促進するためのアクションスローピングを実装する。

3.1 移動ロボット

実験では、小型移動ロボット KheperaII (図4)を採用する。KheperaIIは周囲に8つの100mmまで検出可能な赤外線近接センサと光センサが一体となったセンサを備え、駆動装置としてインクリメンタルエンコーダ付きDCモータを2つ持つ。CPUはモトローラ68331(25MHz)、RAM 512 Kbyte、Flash ROM 512 Kbyteを搭載しており、C言語でのプログラミングにより、RAM上で任意のプログラムを動作させることが可能である。また、実験用に後方右側の近接センサをKheperaIIの上部に再配置し、上方向をセンシング可能にし、さらに800mmまで検出可能な赤外線距離センサ(SHARP GP2D12)を上部に配置した。

3.2 実験環境

図5に実験環境を示す。ロボットが動作する範囲は400mm×300mmの凹凸のない平面であり、周囲は壁で囲われている。これは、人間が普段の生活で用いる机を模倣したものである。環境中には1つの障害物が配置され、これは机の上のペンスタンドやリモートコントローラなどを想定しており、人間によって簡単に移動可能である。障害物の中には電球を配置しており、これはロボットが壁と障害物とを光センサで判別できるようにするためである。壁と障害物との区別は、提案手法にとって本質的な問題ではなく、実験を円滑に行うための工夫にすぎない。ロボットはこの環境中を移動し、床の掃除を行う。

3.3 ロボットの行動

ロボットの行動設計には行動ベースアプローチを採用し、サブサンプリングアーキテクチャ¹²⁾により、図6に示す3層の制御構造をとる。各階層の行動は非同期に実行され、上位の階層が下位の階層の行為を抑制するなどの制御を行う。下位の階層ほど基本的な行為をとる。各階層はそれぞれ複数の行為から構成されており、センサ値が入力されると1つの階層からは最大

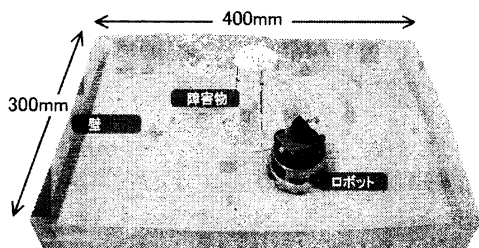


図5 実験環境

1つの行為が出力される。同時に複数の階層からの出力があった場合には、基本的に上位の階層の行為を優先する。図6では数字の大きいものが上位の階層を表す。第1層の障害物回避では、物体との衝突を回避するための行動を行う。第2層ではランダムな方向転換による掃除と、障害物の周囲に沿って進む行動を制御する。第3層では、人間からのインタラクションが発生したときの行動である、アクションスローピングによる状態提示と、障害物の下のみを優先的に掃除する行動¹³⁾を制御する。

ロボットは壁でランダムな方向転換を繰り返し、環境中を自律的に移動し、床の掃除を行う。実装が困難であるため、ロボットには実際にゴミを回収する能力はないが、ここでは移動箇所が掃除されるものとみなす。また、ロボットが障害物の周囲に達したとき、その形に沿って移動を行う。これはユーザに物体の移動を促すことを目的とする行為である。障害物の周囲に沿って移動しているとき、ユーザがその障害物を移動すると、ロボットはアクションスローピングによる状態提示を行うため、その場所で停止し、左右の回転を行う。この左右の回転は、図7に示すように、ロボットの上部にある距離センサの値に応じて速度が変化する。ユーザがロボットの上部から離れた箇所に障害物を構えた場合は素早く左右に回転し、ロボットに近づけるに従って徐々に回転速度が遅くなるようにしている。

ユーザが、距離に応じて変化するロボットの行動に気づき、ロボットの上部からある距離内に障害物を位置させると、ロボットは障害物の下のみを優先的に掃除する。優先掃除機能を実行する。これがユーザが発見すべき機能である。優先掃除機能は、図8に示すように、障害物の下で回転と直進とを繰り返し、障害物がロボットの頭上にある間、その下を優先的に掃除する機能である。優先掃除を終了する場合には、障害物をさらにロボットに近づけ、ロボットが障害物の下から出ていった後に障害物を降ろせばよい。

第1層: 障害物回避

- 前進しているとき、前方に物体があれば停止。
- 後進しているとき、後方に物体があれば停止。

第2層: ランダム方向転換と壁沿い

- 前方に物体がないとき、直進。
- 左前方に光る物体があるとき、反時計周りに壁沿い。
- 右前方に光る物体があるとき、時計周りに壁沿い。
- 左前方に物体があるとき、90° から 180° の範囲で右回転。
- 右前方に物体があるとき、90° から 180° の範囲で左回転。

第3層: インタラクション

- 壁沿い中に障害物が移動されたとき、状態提示行動。
- 状態提示中に頭上の物体を検出したとき、直進。
- 頭上の物体が離れたとき、一定距離後退して 90° から 180° の間で右回転。
- 頭上の至近距離に物体があるとき、直進。

図6 各層の条件と行動

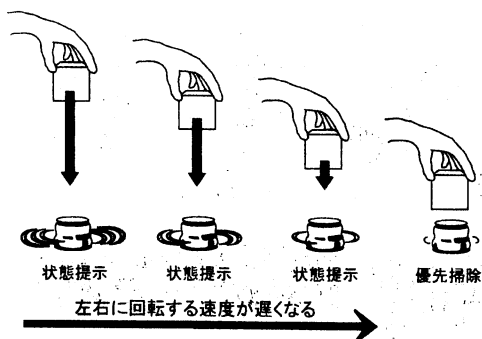


図7 アクションスローピングによる状態提示

- ① 持ち上げる
- ② 保持する
- ③ 降ろす

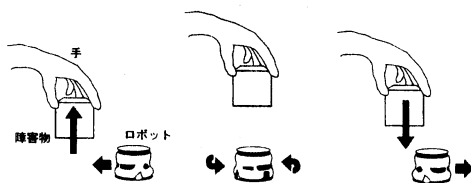


図8 優先掃除機能

3.4 実験結果

図9に動作実験の様子を示す。動作実験によって、比較的安価な赤外線距離センサを用いて、アクションスローピングが実現可能であることが確認された。ロボットは、頭上に障害物が持ち上げられている間、約60°の範囲を左右に回転する。このとき、障害物との距離に応じて回転速度が変化する(回転範囲は変化しない)。この実験では、ロボットの上部のセンサからの距離が、20mm~130mm, 130mm~220mm, 220mm以上の3段階で回転速度を変化させている。また、セ

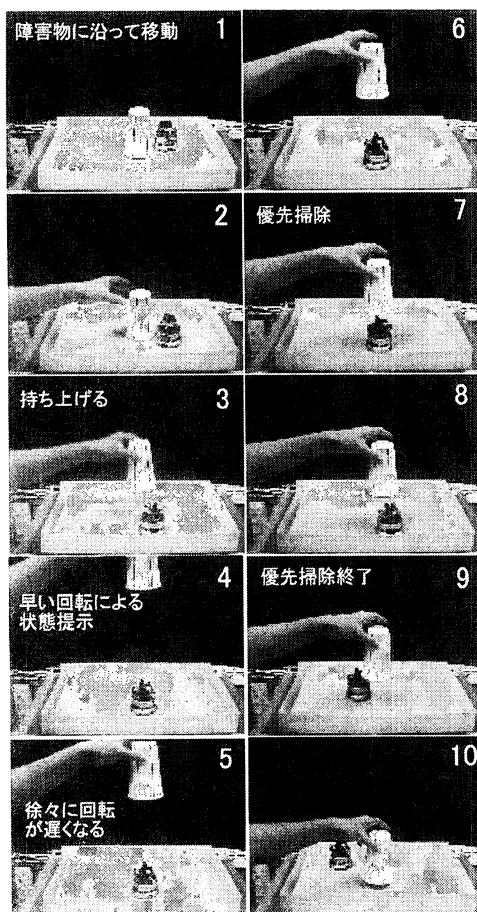


図9 実験の様子

ンサから 5mm～20mm の範囲に障害物があるときは、優先掃除が実行され、5mm 以下の距離になったとき、ロボットは障害物の下から抜け出し、優先掃除が終了する。優先掃除機能の効果的な利用方法は、障害物を他の場所に移動せずに、その場所で持ち上げ、ロボットから一定距離で保持し、降ろすことであり、これはユーザにとって負担が少ない行動であると考えられる。実験では、我々が考える機能発見の手順である、ロボットの状態提示、ユーザのアクション、ロボットの機能提示が実現されている。

4. 考 察

動作実験により、サブサンプションアーキテクチャを用いた、比較的簡単なルールでアクションスローピングが実現可能であることを確認した。実験では、ロボットは状態提示をしている間、その頭上しかセンシ

ングしない。つまり、ユーザがロボットの周囲に障害物を近づけたりしても、ロボットの行動に変化はなく、ロボットの頭上に障害物を位置させたときのみ行動が変化する。このような、ロボットの頭上に障害物を近づける行動を、ユーザが実際に行うかどうか、また、その結果ロボットの機能を発見できるかどうかを、被験者実験によって確認する必要がある。以下に、被験者実験の計画について述べる。

4.1 被験者実験の計画

被験者実験は、動作実験と同様の設定で行う予定である。実験の目的は、掃除ロボットの機能である「優先掃除機能」を被験者が発見できるかどうかを確認することである。被験者にはあらかじめ、移動ロボットが掃除ロボットであることを伝えるのみで、その動作や機能については一切説明せず、「必要であればロボットの作業に協力してください」とだけ教示する。被験者は、アクションスローピングが実装されたロボットを用いる場合と、アクションスローピングが実装されていないロボットを用いる場合の2群に分けられる。アクションスローピングが実装されていないロボットは、左右の回転による状態提示を常に一定速度で続け、ロボット上部から、ある距離内に障害物が位置したときにのみ優先掃除を開始する。評価は、上記の2群間に差があるかどうかを統計的に検証することで行う。

4.2 複数の機能の実装

動作実験においても、計画中の被験者実験においても、ロボットに実装されている機能は「優先掃除機能」の1つのみである。ユーザによる機能発見は、多くの機能が実装され、マニュアルを読んでも全機能の把握が困難な状況において本来の意味を持つ解決方法である。よって、現在、複数の機能を持つロボットの開発を計画中である。ロボット機能の実装は、ハードウェアに依存する部分が大きいため、KheperaIIではなく、SONYのAIBOを使用した実験を準備している。赤外線距離センサに代わり、AIBOのCMOSカメラなどを用いることで、より広い範囲を一度にセンシングできるため、アクションスローピングと組合せることで、ユーザによる機能発見がより容易になると考えられる。

5. ま と め

本研究では、家庭用ロボットが多機能化したとき、それらの機能を把握し理解するユーザの負担が大きくなる問題に着目し、ユーザがマニュアルを読まずに、自然にロボットの機能を発見するインタラクション設計を行った。ユーザが自然にロボットの機能を発見す

る方法として、ユーザの行為とそれに対応するロボットの機能との因果関係を明確にするアプローチをとり、ロボットの内部状態を段階的に提示するアクションスローピングというロボットの行動設計方法を提案した。具体的なロボットの行動として、ユーザとロボットとの距離に応じて、ロボットの状態提示の速度を変化させるという行動を設計し、小型掃除ロボットに実装した。掃除ロボットの動作実験によって、提案手法を比較的安価なセンサと簡単な行動ルールで実現できることを確認した。現在、提案手法の有効性を確認する被験者実験を計画中である。

参 考 文 献

- 1) United Nations Economic Commission for Europe and International Federation of Robotics: *World Robotics 2004 - Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment*, Palais des Nations (2004).
- 2) Ono, T., Imai, M. and Nakatsu, R.: Reading a Robot's Mind: A Model of Utterance Understanding based on the Theory of Mind Mechanism, *International Journal of Advanced Robotics*, Vol.14, No.4, pp.311-326 (2000).
- 3) 小松孝徳, 長崎康子: ビープ音からコンピュータの態度が推定できるのか?—韻律情報の変動が情報発信者の態度推定に与える影響, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.19-26 (2005).
- 4) Baron-Cohen, S.: *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*, MIT Press (1995).
- 5) 渡辺富夫, 大久保雅史: 身体的コミュニケーション解析のためのバーチャルコミュニケーションシステム, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.2, pp.670-676 (1999).
- 6) Matsumaru, T., Iwase, K., Akiyama, K., Kusada, T. and Ito, T.: Mobile Robot with Eyeball Expression as the Preliminary-Announcement and Display of the Robot's Following Motion, *Autonomous Robots*, Vol.18, No.2, pp.231-246 (2005).
- 7) Fong, T.W., Nourbakhsh, I. and Dautenhahn, K.: A survey of socially interactive robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, No.3-4, pp.143-166 (2003).
- 8) Kuniyoshi, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: Learning by watching: extracting reusable task knowledge from visual observation of human performance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 6, pp. 799-822 (1994).
- 9) Niculescu, M.N. and Mataric, M.: Learning and interacting in human-robot domains, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part A*, Vol.31, No.5, pp.419-430 (2001).
- 10) 山田誠二, 角所 考: 適応としての HAI, 人工知能学会誌, Vol.17, No.6, pp.658-664 (2002).
- 11) Kobayashi, K. and Yamada, S.: Informing a User of Robot's Mind by Actions, *Proc. of the third International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems* (to appear).
- 12) Brooks, R.A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.2, No.1, pp.14-23 (1986).
- 13) Kobayashi, K. and Yamada, S.: Human-Robot Cooperative Sweeping by Extending Commands Embedded in Actions, *Proc. of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1827-1832 (2005).