擬人化したモーションによる ロボットのマインド表出

Expressing Robot's Mind by Human-like Motion

小林 一樹

Kazuki Kobayashi

総合研究大学院大学 複合科学研究科 情報学専攻

School of Multidisciplinary Science, Department of Informatics, The Graduate University for Advanced Studies
kazuki@grad.nii.ac.jp, <http://ymd.ex.nii.ac.jp/~kazu/>

山田 誠二

Seiji Yamada

国立情報学研究所, 総合研究大学院大学

National Institute of Informatics, The Graduate University for Advanced Studies
seiji@nii.ac.jp, <http://research.nii.ac.jp/~seiji/>

keywords: Human-robot interaction, robot's mind, motion design, nonverbal communication

Summary

In this paper, we focus on a problem in designing for home robots. There are some design methods for conventional artifacts such as home electric appliances. However, not all methods can be applied effectively for robots. Especially, we deal with the situation in which a robot asks a user to help it by expressing its internal state of mind. We then propose a novel design method “motion overlapping (MO)” by which a robot can perform human-like behavior to express its internal state. We consider that human-like behavior of a robot causes a user to understand its internal state of mind easily. A small sweeping robot which performs “back-and-forth” motion is designed based on MO. In experiments, we compare the expressing by MO with sounding by a buzzer and lighting by a LED as conventional nonverbal expressing. We investigate effects on users' reaction for the sweeping robot. We find that the expressing by MO causes most of the users to help the robot. The differences in the users' reaction are statistically significant. The results show that our proposed method is effective as one of design method for home robots.

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 [WR 04]. そのようなロボットを使って, 単にエンタテインメントとして楽しむのではなく, 人間とロボットが協調的に掃除する [小林 06] などの協調タスクを実現する状況が生じている. 既存の家電製品と比較して, 身体を有するロボットは, タスク遂行時にユーザとより深く関わるようになると予想される.

一般に, ロボットが完全に単独でタスクを達成することは困難であり, 人間の介入を必要とする場合が生じる. たとえば, 図 1 のように, 掃除ロボットには重くて移動できない障害物が作業の妨げになった場合, 人間に依頼して, それを移動してもらう状況が考えられる. ここで問題となるのは, 既存の設計方法がこのような状況に対しても有効であるか否かである.

これまで, 家電製品等の既存の人工物設計に関して, ノーマン [Norman 88] が提案するアフォーダンス [Gibson 79] を利用した人工物の設計方法, サッチマン [Suchman 87] による, 機械に対する人間の行動特性に関する研究,

図 1 人間の介入を必要とするロボット

コンピュータをメディアとして考えたときの人間の自動的な対人的反応に関する研究 [Reeves 96, 竹内 98] などがある. また, より具体的なものでは, ユーザに人工物の状態を知らせる報知音 [和氣 99] やサイン音 [山内 04] の研究があり, JIS:S0013 [JIS 05] では家電製品の報知音が規格化されている. しかし, これらは人間による操作対象としての人工物設計に関する知見や規格であり,

本研究で対象としている図1のような状況では、操作対象がロボットではなく、第3の物体であるという点で異なっている。そのため、既存の設計方法をロボットの設計に適用したとき、期待どおりの機能を果たすとは限らない。よって、そのような状況を仮定した上で、ロボットにとって有効な設計方法を検討し、要素技術を開発することが望まれる。

本研究では、ロボット設計の指針の1つとして、内部状態表出の設計方法を対象にする。既に述べたように、身体を持つロボットにとっての内部状態表出は、ロボット自体の操作に関するだけでなく、第3の物体に対する操作依頼も含まれる。このような3体間の関係を論じた研究として「心の理論」[Baron-Cohen 95]がある。心の理論の枠組みでは、行動主体は、まず目を検出することで他者を認識し、その他者の視線方向の対象を共同注意により把握する。このようにして、自分と他者、対象の3項関係が形成され、他者の意図や心の理解が実現される。本研究においても、ユーザ、ロボット、対象物体の3項関係になっており、心の理論との類似から、ロボットの内部状態を“マインド”と呼ぶ。

ロボットのマインドを表出する方法として、言語(verbal)情報をを用いる方法と、非言語(nonverbal)情報をを用いる方法の2つが考えられる。言語情報をを用いる場合は、「この障害物を移動して下さい」といった自然言語文をロボットに発話させる方法が考えられ、非言語情報をを用いる場合は、報知音や光の点滅などによる表出が考えられる。どちらも伝達効率や実装コストに関して長所・短所を有するが、ロボットの最大の特徴は既存の家電製品にない身体であるため、本研究では非言語情報として、ロボットの動き(モーション)を用いた表出に着目する。

本研究では、ロボットのモーションを用いたマインド表出の設計指針として、人間のモーションとロボットのモーションを重ね合わせる“モーションオーバーラッピング”を提案する。ロボットが人間に障害物の移動を依頼するタスクにおいて、擬人化が難しいと考えられる台車型移動ロボットにモーションオーバーラッピングを適用し、具体的なモーションとしてback-and-forthモーションを実装する。そして、被験者実験によって他の代表的な非言語情報による表出との比較を行い、モーションオーバーラッピングによるマインド表出の有効性を示す。

2. 関連研究

本研究では、台車型の移動ロボットが本体のモーションのみでマインドを表出する。人間のような身体を持たないロボットを用いたとき、そのモーションのみで人間的な表現を行うことは、厳しい制約のために困難な課題だが、表示デバイスや音声合成のような付加的な装置を必要としない利点がある。以下では、非言語情報によってロボットのマインドを人間に伝達する従来の研究を、人

間のような身体を用いる方法と用いない方法の2つに分類した上で、本研究との違いについて述べる。

2.1 人間のような身体を用いたマインド表出

人間のような身体をロボットに持たせ、その動きによってマインドを表出するロボットとして、菅野らが開発した人間型ロボットHadaly-2[菅野 97]や、中田らによる人間型の上半身を持つロボット[中田 01]、小林らによる顔ロボット[小林 96]、BreazealによるKismet[Breazeal 02]、小嶋らによるInfanoid[小嶋 00]、Severinson-Eklundhらによる書類搬送ロボットCREO[Severinson-Eklundh 03]が挙げられる。これらのロボットは、人間の身体やその一部をロボットに持たせることで、人間と同等な非言語情報によるマインドの表出が可能である。それに対し、本研究では人間のような身体を持たない台車型の移動ロボットが、人間の意図を連想させるモーションを行うことでマインドを表出する。

2.2 人間のような身体を用いないマインド表出

小野ら[Ono 00]は、ユーザとロボットの関係を事前に構築することで移動ロボットの不明瞭な発話に対する理解度を高めている。小野らの研究では、親和性を高めるためにソフトウェアエージェントをPC上で飼育し、そのエージェントがロボットに移動する方法を採用しているが、本研究ではそのような過程をとらずに、ロボットのモーションがユーザに提示される。また、松丸ら[Matsumaru 05]は、移動ロボットにレーザポインタや目のアニメーションを表示する装置を用いて進行方向を表現する方法を開発しており、小松ら[小松 05]は単純なピープ音によってコンピュータのマインドを表出する方法を調査している。これらの方法では、マインドを表出する装置が別途必要であるのに対し、提案手法ではこのような付加的な装置を必要としない。シャチ型ロボット[中田 97]や手足を持たないロボットMuu[岡田 05]を用いた研究があるが、それらの主目的は親和感の演出や対話であるため、本研究で仮定している、ユーザとロボットによる協調作業とは状況が異なる。

以上のことから、本研究のように、人間とロボットが協調して作業を行う場面において、人間のような身体を持たない移動ロボットが、人間の意図を連想させるモーションによってマインドを表出する効果を調査した研究はこれまでにない。

3. モーションオーバーラッピングによるロボットのマインド表出

以下では、本研究で対象とする障害物除去タスク、そのタスクにおけるロボットのマインド表出の設計指針や利点を述べ、具体的なモーションの設計方法について説明する。

3.1 障害物除去タスク

自律ロボットが何らかのタスクを行うことを考えたとき、ロボット単独では対処できずにユーザの力を借りる状況や、ユーザが介入した方が効率が改善するなどの状況がしばしば生じると考えられる。そこで、本研究ではそのような状況の代表的なものとして、図 1 で示した“障害物除去タスク”を対象にする。障害物除去タスクは、障害物によりロボットが前進不可能になり、困っているというマインドをユーザに伝え、ユーザがその障害物を除去することで達成されるタスクである。

障害物除去タスクは、ロボットの上位のタスクに付随する場合が多く、一般性が高いと考えられる。たとえば、ツアーガイドロボット [Burgard 98] などの移動ロボットにとって、障害物回避行動は、上位のガイド行動に不可欠である。多くの場合、障害物回避は、(a) ロボットが自律的に障害物を回避する、(b) ロボットが自律的に障害物を除去する、(c) 人間が障害物を除去する、のいずれかによって達成される。特に (b) は、ロボットが除去しても良いかどうかの判断を行う必要があり、実装の困難さから、現実的には (a) か (c) によって達成されると考えられる。このように、障害物除去タスクは、障害物回避行動に付随し、それと同程度の一般性と広い適用範囲を有していると考えられる。

3.2 擬人化したモーションの設計指針

本研究では、ロボットのマインドをモーションによって人間に伝達する方法の設計指針として、モーションオーバーラッピング (motion-overlapping, 以下 MO と呼ぶ) を提案する。これは、図 2 に示すように、人間が日常的に実行する、意味のあるモーションと類似したモーションをロボットが実行することで、それを観察したユーザが人間とのアナロジーを発見し、ロボットのマインド理解が促進されることを期待した擬人化の一手法である。つまり、ユーザは、人間のモーションとロボットのモーションをオーバーラップさせることで、人間のマインドとロボットのマインドをオーバーラップさせる。人間同士のコミュニケーションにおいては、体の一部分を発光させてコミュニケーションを行うことはありえず、言語以外の音だけで他人に意味を伝えることも困難である。それに対し、モーションは人間が置かれた状況に必ず付随し、普遍的に観察できる。したがって、非言語情報を用いたコミュニケーションにおいて、光や音によるマインド表出よりも、MO による表出の方が人間の用いる表出に近いと考えられる。そのため、障害物除去タスクのように 3 項関係をとる状況において、ユーザは、人間の気持を理解するようにロボットのマインドを理解することで障害物に着目し、適切な対応をとることが可能だと考えられる。

図 2 モーションオーバーラッピング

3.3 MO によるマインド表出の利点

提案する MO によるマインド表出には、以下の利点が考えられる。

- 実装性：ホームロボットの多くは、自身が自律移動できるか、何らかのアクチュエータを装備している。よって、モーションを実現することには、何ら付加的な実装を必要としない。
- 表現力：モーションの組合せは、非常に多様である。人間が判別可能なモーションの特性調査などの課題はあるが、音声や光などの既存の非言語情報と比較しても、多様性に関して遜色ない。
- 低ストレス：音声による非言語情報はユーザに注意を向けさせるには適した方法であるが、警報などの例にあるように、緊急性を示す用途が多いためストレスを与えている可能性がある。それに対しモーションは視覚的な情報であるため、ユーザの注意を強制的に引き付けることはなく、緊急性という社会的イメージも定着していない。

上記の 3 つの特性はほぼ自明だと考えられるが、MO によるマインド表出の「有効性」に関しては未知のため、有効性の実験的な検証が必要である。

3.4 移動ロボットにおける MO の適用

MO に基づき、ロボットのマインドをユーザに伝達するための具体的なモーションを設計する。ユーザは、ロボットのモーションを観察することで、人間のモーションとのオーバーラップを行い、人間のマインドを理解するように、ロボットのマインドを自然に理解する。したがって、マインドを推定しやすい人間のモーションをベースにして、ロボットのモーションを設計する。障害物除去タスクにおいて、ベースとなる人間のモーションを考

図3 Back-and-forth モーション

えたとき、障害物が進行の妨げになって困っている人の振舞いが考えられる。たとえば、両手で荷物を持った人が、ドアの前でどうしようか躊躇している様子を見たとき、その人が「困っている」と推定するのは容易である。そこで、このような躊躇をロボットに実行させれば良いが、躊躇を表す行動をどのようにロボットに実装するかという問題がある。この問題は、ロボットのハードウェアに強く依存するが、本研究では移動ロボットを前提にする。移動ロボットを採用した理由は、人間型の上半身を持つコミュニケーションロボット [神田 02] やマニピュレータを実装した研究 [大隅 95, 平田 05] に代表されるように、開発基盤用ロボットとして利用価値が高いためである。

ここでは、鈴木ら [鈴木 01] による、人間の日常的な行為の分析に関する研究を参考にして、移動ロボットの行動設計を行う。鈴木らは論文中において、人間の「躊躇」を「開始された運動が途中で急速に停止され、その後、別の運動に変更されたり、運動が停滞されること」と定義している。この定義を基にして、ロボットのマインド表出行動を、図3のような前後の動きである back-and-forth モーションとした。ロボットは、障害物の手前で停止し、その軌道に沿い、短時間に前後の動きを交互に繰り返す。このようなモーションは、人間が障害物に進行を妨げられ、どうしようか迷っているような躊躇を表出しており、ユーザにとってロボットのマインド推定が自然かつ容易であると考えられる。

上記の back-and-forth 以外にも、左右に素早く回転するといった行動が考えられる。しかし、人間による回転行動との類似性を考えたとき、躊躇行動としては back-and-forth の方が自然である。また、移動ロボットに限らず、マニピュレータなどの異なるハードウェアでも back-and-forth が容易に実装可能だと考えられる。そのため、アナロジーや応用性を考慮したとき、back-and-forth は、障害物除去タスクにおける妥当な行動と考えられる。

4. 実験

提案する MO によるマインド表出の有効性を実験により検証する。ここでは、障害物除去タスクにおける被験者の行動を調査し、他の2つの非言語情報によるマインド表出と比較する。

図4 実験環境

図5 KheperaII

4.1 環境とロボット

図4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、人間が普通の生活で用いる机を模倣したものである。環境中には2つの障害物が配置され、これらは机の上のペンスタンドやリモコン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。実験では、小型移動ロボット KheperaII (図5) 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 モータを左右に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。

4.2 ロボットのマインド表出

自然言語によって「障害物を移動して下さい」とロボットが発話する方法では意味が1つに決定するため、外界の認識精度が低いロボットでは、異なる状況で常に同じ意味を示す発話を繰り返し、ユーザに煩わしさを与えてしまう。ここでは、高度な識別能力を備えていないロボットを仮定し、人間が状況に応じて異なる意味を付与することを期待した、多義的なマインド表出を考える。以下にロボットが行う3つのマインド表出について説明する。

§1 LED ライト

光によるマインド表出として、LED ライトを採用する。家電製品の多くには光によって状態を表示する機能があり、比較対象として光による内部状態表出は妥当と考えられる。LED は直径 6mm で赤色のものを採用し、

これをロボットの上部に設置する．色に関してはロボット本体の配色等を考慮し，できるだけ視認性の高いものとして赤色を選択した．

家電製品における LED ライトの点滅パターンに関して明確な規格がないため，自動車のフラッシュユニットの規格を参考にした．国際規格 (ISO 4082:1981) と国内規格 (JIS D 5707:1998) で同等のものが規定されており，ランプ点灯継続時間が 0.2 秒以上，点滅回数は毎分 60～120 回とある．これを基にして，図 6 に示す，0.2 秒の点灯と 0.2 秒の消灯で構成される 2.5Hz のパターンを採用した．実験では，0.8 秒間に 2 度光るパターンを 1 回として，0.4 秒の間隔をあけて 2 回提示を行う．2 回提示を行うのは，1 回では提示時間が短く，被験者が行動を開始する機会を得るのに不十分と考えたためである．

フラッシュユニットの規格を厳守すれば，1～2Hz の範囲にするのが適当であるが，実装上の問題で信号の微細な調節が困難であり，ビデオ撮影により確認したところ 2.5Hz であった．しかし，この差は 1 回の点灯にすると 0.05 秒の違いであり，肉眼での区別が難しいことから，実験に大きく影響を与えることはないと判断した．

§2 ブザー音

音声によるマインド表出として，ブザー音を採用する．音声は家電製品の状態を知らせる機能として広く採用されており，JIS:S0013 [JIS 05] では報知音として，音の長短の組合せパターンが規格化されている．ロボット上部に 3kHz と 6kHz 付近にピークを持つブザーを設置することで実現する．

ブザー音は JIS:S0013 を参考に，音の長短の組合せパターン (AM 音) を採用する．パターンを決定するにあたり，山内ら [山内 04] によるサイン音の機能イメージの調査研究を参考にした．その調査では，5Hz 以下の矩形波で変調された AM 音の場合は，被験者が「終了」という機能イメージを選択する傾向があり，10～30Hz では「呼出」，40Hz 以上では「警報」という傾向があると報告されている．本研究では，被験者がロボットに注意を向けていることを前提とするため，緊迫感を伴う 10Hz 以上はマインド表出として適切でないと判断し，5Hz 以下の AM 音を採用した．

ここでは，5Hz 以下の AM 音として，上記の LED と同じく，図 6 に示す 2.5Hz のパターンを採用する．ブザー音の音圧は周波数を考慮し，等ラウドネス曲線 (ISO226) に基づき，人間の会話程度 (50～60dB) の範囲に設定した．実験では，0.8 秒間に 2 度音が鳴るパターンを 1 回として，0.4 秒の間隔をあけて 2 回提示を行う．

§3 MO

MO に基づいて設計した back-and-forth を採用する．実装にはロボットに装備されているアクチュエータを用いる．モーションのパターンに関しては既存の規格や実装例がないため，上記の LED とブザーに合わせて，同じ図 6 のパターンを用いる．

図 6 マインド表出のパターン

実験では，ON の 0.2 秒間に前後の移動 (0.1 秒間前進，0.1 秒間の後退) を行い，OFF の 0.2 秒間停止する．ブザー音，LED ライトと同様に，0.8 秒間に 2 度の前後の移動を行うパターンを 1 回として，0.4 秒の間隔をあけて 2 回提示を行う．

4.3 実験方法

被験者は，実験環境中で床の掃除を行うロボットを観察する．ロボットは環境中を自律的に移動して掃除を行い，壁または障害物の手前で停止し，3 つのマインド表出のうち 1 つを実行する．マインド表出後は，障害物がロボットの左にあれば右回転を，右にあれば左回転を一定時間行って方向転換し，その後直進する．ロボットは 1 つの実験でこのような行動を繰り返し行う．

被験者へは，ロボットに関して，小型移動ロボットが掃除ロボットであり，壁で反射を繰り返して掃除すること，実際にはゴミを吸い取れないが，移動した箇所が掃除されると想定すること，自分の机の上をロボットが掃除していると考えるように説明した．また，環境の中にあるものはどれでも触ったり移動できることを説明し，実際に障害物を持ってみるように指示した．最後に「もし必要であれば，ロボットに協力するように」と指示して実験を開始した．マインド表出に関しては一切説明していない．

被験者は LED ライト，ブザー音，MO の 3 つのマインド表出を経験する．マインド表出の順序は被験者毎にランダムであり，1 つの試行時間は 2 分程度とし，実験者が終了を合図した．図 7 に実験の様子を示す．被験者は，机の上に用意された実験環境内で動作するロボットを観察し，椅子に座った状態でロボットへ協力する．被験者は 21 歳～44 歳の男性 11 名，女性 6 名の計 17 名 (大学生 10 名，社会人 7 名) であり，アンケート調査により，掃除ロボットをはじめとする，家事を行うロボットの使用経験がないことを確認した．

4.4 評価方法

評価基準として，できるだけ少ない回数のマインド表出によって，人間がロボットのマインドを理解することが望ましいという考え方を採用する．よって，1 回目のマインド表出で，何人の被験者が障害物を除去したかにより評価する．ロボットは，障害物の手前で停止したと

図 7 実験の様子

き、図 6 のパターンを 2 度実行するが、これを 1 回としてカウントする。他の基準として、被験者が障害物を持ち上げるまでの時間を測定する方法が考えられるが、ロボットの車輪のスリップなどにより、各実験で軌跡が一致せず、障害物に到達するまでの時間が異なるため、採用しなかった。

4.5 実験結果

図 8 に実験結果を示す。グラフは、1 回目のマインド表出時に、障害物を移動させた被験者の人数を表している。被験者に LED が表出されたときは 4 名が、ブザー音では 5 名が、MO では 9 名がマインド表出時に障害物を移動した。尺度水準が順序尺度であるため、ノンパラメトリックな手法であるコクランの Q 検定を用いて比率の差を検定したところ、少なくとも 1 組に有意差 ($Q=7.0$, $df=2.0$, $P=0.03$) があった。この結果を受け、ホルムの方法で全 3 組を多重検定したところ、10%水準で MO-LED ライト間 ($Q=5.0$, $df=1.0$, $P=0.0253$, $\alpha'=0.0345^{*1}$) と MO-ブザー音間 ($Q=4.0$, $df=1.0$, $P=0.0455$, $\alpha'=0.0513$) の

図 8 実験結果

表 1 障害物を移動した理由

	LED	ブザー	MO
1 障害物を動かして欲しそうに感じた	1	3	4
2 状況で判断した	2	3	3
3 分からないが、動かした方が良かった	1	1	1
4 緊急性を感じた	0	2	1
5 その他	0	0	1
合計回答数	4	9	10

2 組の間の差に有意傾向があった。これらの結果により、MO によるマインド表出は従来法と比較して、同等かそれ以上の効果があると考えられる。

表 1 に障害物を移動した理由のアンケート結果を示す。被験者には、障害物を移動した理由について、当てはまるものすべてを選択 (複数回答可) するよう指示した。表中の数字は回答数を表している。MO に関して「障害物を動かして欲しそうに感じた」と「状況で判断した」という回答が多いことが特徴的である。これらは、提案する設計指針である MO の考え方を支持していると考えられる。

5. 考察

実験では、被験者に注意を喚起することが目的ではないため、警告や警報のように大きな音や強い光の使用は、ホームロボットという位置付けからも不適切と考えた。よって、被験者が各マインド表出に気づいていたかが問題となる。実験後のアンケート調査では、すべての被験者が LED の点滅とブザー音に気づいていると回答した。また、MO については 1 名のみが覚えていないと回答している。よって、ほぼ全員がマインド表出に気づいてい

*1 α' はホルムの方法による調整後の有意水準。

ることから、各マインド表出の設定は適切なものであったと考えられる。以下では、実験結果を検討し、MO によるマインド表出の有効性と適用可能性について述べる。

5.1 MO によるマインド表出の有効性

LED ライトとブザー音は既存製品で用いられている方法を参考にしたが、障害物除去タスクに関して、その効果は確認されておらず、最適なパターンであるとは限らない。また、擬人化しないモーションとの比較や、LED ライトやブザー音を用いて擬人化する方法を検討する余地もある。しかし、今回の実験結果は、ブザー音や LED ライトによる表出方法に関して、既存の手法をベースとするだけではマインド表出として不十分な可能性があり、それらと比較した場合に、擬人化したモーションが有望であることを示している。

被験者のアンケート結果をみると、MO によるマインド表出において障害物を移動した理由として、「障害物を動かして欲しそうに感じた」と「状況で判断した」という回答が多い。「障害物を動かして欲しそうに感じた」という回答は、ロボットが擬人化されていることを示している。また「状況で判断した」という回答は、ロボットが直面している状況を、被験者自身の経験としてオーバーラップしている可能性が高い。ロボットのマインド表出とは関係なく判断した可能性も考えられるが、リーブスらや竹内らの研究 [Reeves 96, 竹内 98] にあるように、ロボットに対して被験者が自動的に対人的反応をしているとすれば、被験者自身が内観することは難しい。また、MO とブザー音とのアンケート結果が類似しているが、ブザー音では、障害物を移動した被験者の人数に対して、その理由の回答数が多いため、多義性の高い方法だと考えられる。しかし、多義性との関連に関しては今回の調査対象としていないため、今後の課題である。

5.2 他のロボットやタスクへの適用可能性

実験で用いた back-and-forth モーションに関しては、ロボットが移動可能であれば、ハードウェアを問わず実装が可能である。車輪を備えた移動ロボットだけでなく、犬型の 4 足歩行ロボットをはじめ、多足歩行ロボットなど、移動する能力を有していれば、付加的な装置を必要とせず、制御ソフトウェアの実装のみで実現可能である。特に、ロボットによるタスクの達成に障害物回避行動が含まれる場合は、back-and-forth モーションの必要性も高くなると考えられる。この back-and-forth に限らず、MO に基づいて設計される他のモーションにおいても同様に、ハードウェア制約が弱い性質が期待できる。

さらに、Morris による人間行動の研究 [Morris 77] を参考にし、MO を他のロボットやタスクへ適用する方法を検討する。Morris は「人間が何か動作をしようとするとき、予備的な運動を行う場合があり、これが何を行おうとしているのかを明らかにする手がかりとなる」と述

べている。たとえば、会話中に座ったまま椅子の肘をつかむ動作は「会話を切り上げて立ち上がりたいが、相手に失礼をしたくない」という気持ちを表しているという。このような動作は「意図運動」と呼ばれ、特に、回転椅子をリズムカルに左右に動かすような、特有のリズムで展開される 2 つの運動は「交替性意図運動」と呼ばれる。ここで、実験で用いた back-and-forth モーションを考えると、「直進したいができない」という気持ちを表す交替性意図運動とみなせる。人間は日常生活で他人の意図運動を容易に読むことができるため、被験者がロボットの行動を意図運動とみなし、その意図を解釈した可能性がある。また、LED ライトとブザー音もリズムカルな表現であるが、それらは「予備的な運動」でないため、被験者は意図運動とみなさず、MO ほど効果が現れなかったという解釈もできる。

仮に、人間の交替性意図運動をロボットで再現する方法が有効ならば、「左と右のどちらに行ったら良いか決められない」を表出するのにロボットを「一定のリズムで左右に回転」させるなど、「ロボットのタスクとして行う必要があるが、機能不足で実行できない」という一般性のあるマインドをリズムカルなモーションによって表出できる可能性がある。このような人間の援助を導くようなマインド表出は、人間とロボットによる協調作業の場面において有用だと考えられる。また、リズムカルなモーションは、ロボットの身体的な構造（人間のような身体を持つ/持たない）に強くは依存しないため、比較的容易に実装できる。このように、交替性意図運動は MO の適用において重要な要素だと考えられ、今後、様々なリズムカルなモーションを設計し、ロボットのマインド表出としての効果を評価することで、より汎用性のある実装方法が確立できると考えられる。

6. ま と め

本研究では、既存の人工物の設計方法が、ホームロボットの設計に対してもそのまま有効であるか不明であるという問題を対象にした。特に、ユーザに内部状態を知らせる機能の設計に着目し、ロボットの身体を利用した、擬人化しやすいモーションによる内部状態の表出を設計対象とした。設計指針として、ロボットの行動を擬人化する、モーションオーバーラッピングを提案し、具体的なモーションとして、擬人化が難しいと考えられる小型移動ロボットに、短時間に前進・後退を繰り返す back-and-forth 行動を実装した。そして、被験者実験において、非言語情報を用いた既存の状態表出方法である、ブザー音と LED ライトの点滅との比較を行った。各手法について、掃除ロボットの作業に対する被験者の協力的行動に及ぼす影響を調査したところ、提案手法であるモーションオーバーラッピングによる内部状態表出方法は、既存の方法と比較して同等かそれ以上の効果があることを統

計的な分析により確認した。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Baron-Cohen 95] Baron-Cohen, S.: *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*, MIT Press (1995)
- [Breazeal 02] Breazeal, C.: Regulation and entrainment for human-robot interaction, *International Journal of Experimental Robotics*, Vol. 21, No. 11–12, pp. 883–902 (2002)
- [Burgard 98] Burgard, W., Cremers, A. B., Fox, D., Hahnel, D., Lakemeyer, G., Schulz, D., Steiner, W., and Thrun, S.: The Interactive Museum Tour-Guide Robot, in *Proc. of the Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 11–18 (1998)
- [Gibson 79] Gibson, J. J.: *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates Inc. (1979)
- [平田 05] 平田 泰久, 久米 洋平, 沢田 拓郎, 王 志東, 小菅 一弘: ロボット間の幾何学的関係を必要としない複数移動マニピュレータによる単一物体のハンドリング, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 139–146 (2005)
- [JIS 05] JIS ハンドブック 高齢者・障害者等—アクセシブル・デザイン, 日本規格協会 (2005)
- [神田 02] 神田 崇行, 石黒 浩, 小野 哲雄, 今井 倫太, 前田 武志, 中津 良平: 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット”Robovie”の開発, 電子情報通信学会論文誌 D1, Vol. J85-D1, No. 4, pp. 380–389 (2002)
- [小林 96] 小林 宏, 原文雄: 顔ロボットにおける 6 基本表情の動的時間表出, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 65–73 (1996)
- [小林 06] 小林 一樹, 山田 誠二: 行為に埋め込まれたコマンドによる人間とロボットの協調, 人工知能学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 63–72 (2006)
- [小嶋 00] 小嶋 秀樹: ロボットの社会的発達と「心の理論」の獲得, 情報処理学会 研究報告, Vol. ICS122-3, pp. 13–18 (2000)
- [小松 05] 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)
- [Matsumaru 05] Matsumaru, T., Iwase, K., Akiyama, K., Kusada1, T., and Ito, T.: Mobile Robot with Eyeball Expression as the Preliminary-Announcement and Display of the Robots' Following Motion, *Autonomous Robots*, Vol. 18, No. 2, pp. 231–246 (2005)
- [Morris 77] Morris, D.: *Manwatching*, Elsevier Publishing Projects (1977)
- [中田 97] 中田 亨, 佐藤 知正, 森 武俊, 溝口 博: ロボットの対人行動による親和感の演出, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 1068–1074 (1997)
- [中田 01] 中田 亨, 森 武俊, 佐藤 知正: ロボットの身体動作表現と生成される印象とのラバン特徴量を介した定量的相関分析, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 252–259 (2001)
- [Norman 88] Norman, D. A.: *The Psychology of Everyday Things*, Basic Books (1988)
- [岡田 05] 岡田 美智男, 松本 信義, 塩瀬 隆之, 藤井 洋之, 李 銘義, 三嶋 博之: ロボットとのコミュニケーションにおけるミニマルデザイン, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 189–197 (2005)
- [Ono 00] 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)
- [大隅 95] 大隅 久: 移動マニピュレータの制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 904–907 (1995)
- [Reeves 96] Reeves, B. and Nass, C.: *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places*, Cambridge University Press (1996)
- [Severinson-Eklundh 03] Severinson-Eklundh, K., Green, A., and Hüttenrauch, H.: Social and collaborative aspects of

- interaction with a service robot, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, pp. 223–234 (2003)
- [Suchman 87] Suchman, L. A.: *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*, Cambridge University Press (1987)
- [菅野 97] 菅野 重樹, 渋谷 恒司: 非言語コミュニケーションのための人間形ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 975–978 (1997)
- [鈴木 01] 鈴木 健太郎, 佐々木 正人: 行為の潜在的なユニット選択に働くタスク制約: 日常タスクに観察されるマイクロスリップの分析, 認知科学, Vol. 8, No. 2, pp. 121–138 (2001)
- [竹内 98] 竹内 勇剛, 片桐 恭弘: 人-コンピュータ間の社会的インタラクションとその文化依存性—互恵性に基づく対人的反応—, 認知科学, Vol. 5, No. 1, pp. 26–38 (1998)
- [和氣 99] 和氣 早苗, 上窪 真一, 福住 伸一, 旭 敏之, 広明 敏彦: 音響インタフェース設計手法”報知音多次元設計手法”確立への一考察, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J82-D-II, No. 10, pp. 1721–1728 (1999)
- [WR 04] *World Robotics 2004 – Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment*, Palais des Nations (2004)
- [山内 04] 山内 勝也, 岩宮 眞一郎: 振幅変調音の擬音語表現とサイン音としての機能イメージ, 日本音響学会誌, Vol. 60, No. 7, pp. 358–367 (2004)

〔担当委員: 菊池 英明〕

2005 年 11 月 22 日 受理

著 者 紹 介

小林 一樹(正会員)

2000 年 茨城大学工学部メディア通信工学科卒業。2002 年 同大学院理工学研究科メディア通信工学専攻博士前期課程修了。2006 年 総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻博士後期課程修了。情報学博士。同年 関西学院大学 理工学研究科 ヒューマンメディア研究センター 博士研究員, 現在に在る。ヒューマンロボットインタラクションに関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本ロボット学会 各会員。

山田 誠二(正会員)

1984 年 大阪大学基礎工学部卒業。1989 年 同大学院博士課程修了。工学博士。同年 大阪大学基礎工学部助手。1991 年 同大学産業科学研究科講師。1996 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授。2002 年 国立情報学研究所教授, 現在に在る。人工知能, 特に, ヒューマンエージェントインタラクション, 知的 Web に興味をもつ。情報処理学会, 日本ロボット学会, 電子情報通信学会, AAAI, IEEE, ACM 各会員。