

タスクに埋め込まれたインタラクションを用いた 人間と移動ロボットの協調掃除

Human-Robot Cooperative Sweeping using Embedded Interaction in a Task

小林 一樹*¹
Kazuki KOBAYASHI

山田 誠二*²
Seiji YAMADA

*¹総合研究大学院大学
The Graduate University for Advanced Studies

*²国立情報学研究所
National Institute of Informatics

This paper describes effective interaction design for a cooperative task in which a mobile robot sweeps over a table and a human can help it by picking up an obstacle. For an efficient cooperation, we introduce behaviors of a robot to sweep a region under an obstacle when a human picks up it, and design it based on interaction embedded in a human's operations to achieve a task. This interaction enables a human to easily cooperate with a robot without additional and explicit commands. We made experiments to evaluate the interaction embedded in a task by comparing with other explicit interaction, and the experimental results show our cooperative sweeping is more efficient than autonomous one and our interaction embedded in a task needs less cognitive load than other interaction such as voice or leading the robot by hand.

1. はじめに

ロボット技術の進歩により、掃除ロボットに代表される実用的なタスクを行う家庭用の自律ロボットが普及しつつある。このような実用的ロボットに着目したとき、そのタスクの達成精度が問題となるが、自律ロボットが単体で行える作業には限界がある。たとえば、Roombaのような市販されている掃除ロボットを考えたとき、ロボットのスイッチを入れれば、自動的に移動してゴミを吸い取ってくれるが、家具や椅子などの障害物をロボットが移動させ、その下を掃除するようなこと不可能である。そのため、現実には、ロボットの作業の前後に人間が作業を行う必要が生じてしまう。

しかし、このようにロボットにハードウェア的な制約がある場合でも、ロボットの作業と同時に、人間も作業を行うことができれば、全作業時間の短縮につながるため、人間の負担が軽減されると考えられる。これは、人間とロボットによる協調作業である。このような協調作業を実現させるためには、ロボットが人間に合わせて行動する必要があり、人間-ロボット間のインタラクションをどのように設計するのが重要となる。

人間-ロボット間での協調作業に関する研究として、田窪ら [田窪 02] による人間とロボットによる長尺物運搬に関する研究がある。人間とロボットがひとつの長い板などを一緒に運ぶという協調作業であり、人間の歩調や力の入れ具合などを、共有する板を通して非明示的に伝えることができ、ロボットはその情報をもとにして人間に協調的な行動をとることが可能となっている。また、平田ら [平田 03] は、人間に協調する複数のロボットを用い、各ロボットによって把持された1つの物体を搬送する研究を行っている。人間はロボットに把持された物体に力を加えることで、物体を自由に操作することが可能となっている。

しかし、これらの研究はいずれも、1つの作業を人間とロボットで同時に行うという制約がある、人間とロボットで役割が分担されていない協調作業を対象としている点と、人間とロボットが物理的に接続されている必要があるという点で、協

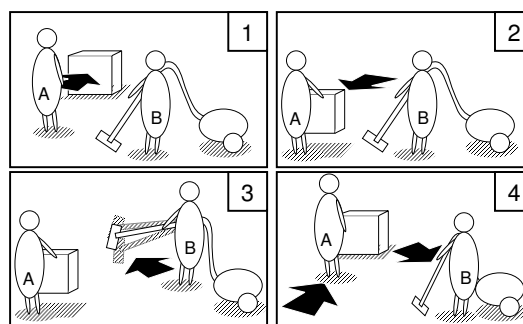


図1 人間による協調的掃除作業

調作業の共通の枠組として考えた場合に柔軟であるとは言い難い。

本研究では、広く人間-ロボット間の協調作業に適用可能であり、人間の負担を軽減する、役割分担された協調作業のための、タスクにインタラクションを埋め込むという、インタラクション設計の指針を提案する。ここでは対象とする協調作業を、一般に最も普及していると考えられる掃除ロボットのタスクである“掃除作業”を取り上げ、提案指針に基づき、限られたハードウェア資源のロボットにおいて行動設計を行う。そして、それらのロボットを用いて実験を行い、人間の負担についての評価を行う。

2. タスクに埋め込まれたインタラクション

2人の人間による協調的な掃除の例を考える。図1において、人間Aは物を移動する役割を、人間Bは掃除機を用いる役割を担うものとする。一度分担を決定してしまえば、Aが物を移動させたのち、すばやくBが空いたスペースを掃除し、また、Bの掃除が終了したときには、Aが速やかに物を元の場所に戻すことができる。これら一連の協調作業では、作業の分担により、相手に対する明示的な指示を行うことなしに円滑な協調作業が可能となっている。

このような効率的な協調作業を、人間とロボットによる協調作業に適用する。たとえば、Aの役割を人間が、Bの役割を

連絡先: 小林一樹, 国立情報学研究所 (総合研究大学院大学),
東京都千代田区一ツ橋 2-1-2, Tel:03-4212-2000, e-mail:
kazuki@grad.nii.ac.jp

ロボットが担うものとする。すると、人間が物を移動させる行動自体が信号となり、ロボットの行動を促すことになる。これは、人間のタスク達成のための行動に、ロボットへの命令が埋め込まれていると考えられることから、タスクに埋め込まれた命令と呼ぶ。そして、この命令の定義を、“人間の行う、タスクを達成するための一連の行動を基準とし、そこから時間的・空間的な変化を最小限にして発行される命令”とする。

上記の例においては、人間のタスクが物体の移動であるので、物体を移動するときの腕の軌跡が、もとの軌跡から大きく逸脱したり、物体を移動するときの速度を極端に遅くするなどして、元々の特徴から大きく変化して、命令のための行動になってしまったときには、タスクに埋め込まれた命令であるとは言えない。

Marroneら [Marrone 01] のジェスチャを用いた掃除ロボットへの教示に関する研究をはじめとする、ロボットに明示的な命令を与えるインタラクションにおいては、人間に課せられたタスクとロボットへの命令とは別のものであり、タスク達成のための行動の実行とは独立にロボットに指示を与える。このように、タスクに埋め込まれた命令を用いない場合は、人間は自分のタスクを実行しながら、それとは別にロボットに適切な指示を与えなければならないので、その分余計に負荷がかかってしまう。

ここでは、タスクに埋め込まれた命令は、人間-ロボット間でやりとりされる情報の1つであることから、タスクに埋め込まれた命令を伴うインタラクションをタスクに埋め込まれたインタラクションと呼ぶ。このタスクに埋め込まれたインタラクションは、人間とロボットが物理的に接続している必要がないという点からも制約が少なく、柔軟な枠組であると考えられる。本研究では、人間-ロボット間で、タスクに埋め込まれたインタラクションが行えるようにロボットの行動設計を行う。

3. 掃除作業におけるインタラクション設計

人間とロボットによる掃除作業の内容を、“環境中の障害物の下も含む床全体の掃除”とする。また、人間のタスクを“障害物の移動”とし、ロボットのタスクを“床の掃除”とする。ロボットのハードウェア資源は、市販の掃除ロボットの持つ資源と同等とする。これにより、ロボット単体では障害物の移動をすることができず、平面上の移動した箇所を掃除することがロボットの唯一のタスクとなる。上記のように、人間とロボットが作業を分担し、それぞれのタスクを行うことで掃除という協調作業が達成される。

人間とロボットが協調的な掃除作業を行う環境として図2のような環境を設定する。人間が日常の作業を行っているような机の上のような場所を想定しており、障害物として図中の箱のような物体を設定した。ロボットが掃除を行う床面は凹凸のない平面とし、周囲は壁などで囲われており机の上から転落することはないものとする。ロボットの他に環境内で移動するものとしては、人間の手、人間が移動させた障害物を想定している。

ロボットには KheperaII を採用する。ロボットは、(1) 障害物回避、(2) ランダムに方向転換して掃除 (自律掃除) という2つの自律的行動を行う。効率良く掃除するための様々な手法が提案されており [Choset 01]、地図の利用など計画的な掃引を行うのが望ましいが、ロボットのハードウェアの制限から、位置推定に信頼性の低いデッドレコニングしか行えない点と、環境中の障害物の位置が変更される毎に、ロボットの地図を更新しなければならず、これらのコストが非常に高いことから、ランダムな方向転換で掃除を行うものとした。また、市販され

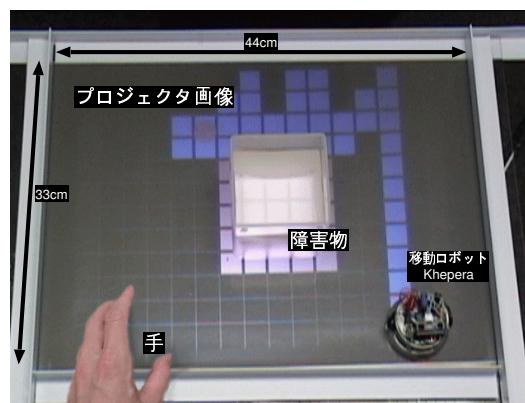


図2 掃除領域

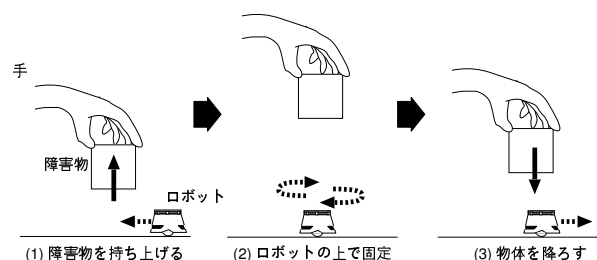


図3 タスクに埋め込まれたインタラクションによる協調掃除

ている掃除ロボットにランダムな方向転換が多く採用されているという点からも、妥当であると考えている。

また、ロボットは図3に示す、タスクに埋め込まれたインタラクションを通じた協調行動 (協調掃除) を行う。人間に割当てられたタスクである“障害物の移動”を行うこと自体がロボットへの命令となっており、人間のタスク達成のための操作に命令が埋め込まれている。ロボットの3つの目の行動である上記の協調掃除は、人間が障害物を持ち上げたときに行われ、手順は以下に示すとおりである。

- (1) ロボットが近づいてきたとき、人間が障害物を持ち上げて、その場所に静止させておく。
- (2) ロボットが障害物の下の領域に入ると、障害物が上にある間はその領域内で方向転換を繰り返す、優先的に掃除を行う。
- (3) 人間が障害物を下に降ろそうとしてロボットに近づけると、ロボットは障害物の下の領域から出て、自律的掃除を行う。

ふつう、障害物の下を優先的に掃除するとき、人間はまず障害物を環境中の別の場所に移動させ、ロボットに明示的な命令を送ることによって、障害物が置いてあった場所を掃除するようにコントロールしなければならない。それに対し、タスクに埋め込まれたインタラクションを通して命令を発行する場合は、人間は障害物の上げ下げだけを行えばよく、明示的な命令を発行する手続きが不要な分、人間の負荷を軽減できると考えられる。

このようなロボットの自律的行動と協調的行動はサブサンプリングアーキテクチャ [Brooks 86] を用いて、(第1層) 障害物回避、(第2層) 自律掃除、(第3層) 協調掃除の3層で構成し、行動を制御している。

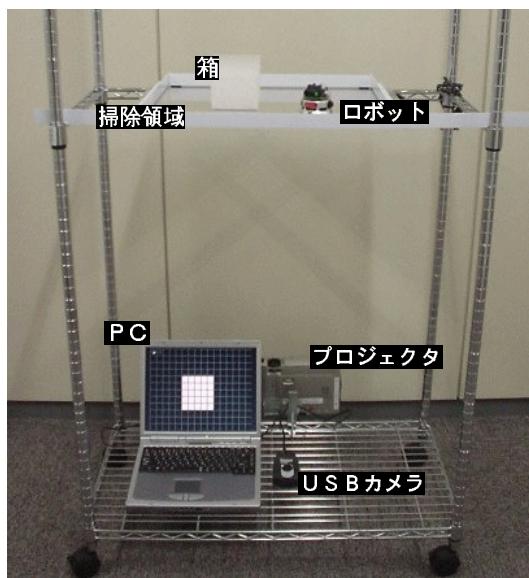


図 4 実験装置

4. 実験

タスクに埋め込まれたインタラクションを用いた 2 つの実験を行う。実験 1 は協調掃除が及ぼす掃除効率への影響を調べるのが目的であり、実験 2 は協調掃除を行ったとき、人間の負荷が軽減されるかどうかを確認することが目的である。

4.1 実験 1: 掃除効率の改善

タスクに埋め込まれたインタラクションを通して協調掃除を行うことによって、掃除効率が改善されるかどうかを実験によって確認する。実験は必要な機能を実装した実機を用いて行い、箱の下を協調掃除した場合と、自律掃除した場合とでの環境全体の掃除時間を比較する。自律掃除とは、前述のランダムに方向転換を繰り返して掃除を行う方法である。

図 4 に示す実験装置を用いることにより、ロボットの掃除した場所を表示することができる。図 2 のように、ロボットに掃除された箇所が点灯してユーザが確認できるようになっている。ロボットには下向きに 2 つの赤外線 LED が取り付けられており、この光を USB カメラで検出したのち、画像処理によってロボットの座標が計算される。得られた座標位置をプロジェクタで投影する画像上の 1 点に変換し、その点が含まれる 1 つのマスを点灯させる。掃除領域は縦 33cm×横 44cm の大きさがあり、この領域を格子状に区切り、縦 12×横 16 個の正方形のマスを構成する。このうち 3×3 個のマス目がロボットの大きさに相当する。

実験は、ロボットが掃除領域の全マスの 98% を覆うまでの時間を測定する。箱の大きさは (3×3), (4×4), (5×5) の 3 種類用意し、協調掃除する場合と、自律掃除する場合とで、それぞれ 12 回の試行を行った。ロボットのスタート位置、箱の初期位置は毎回ランダムに決められる。

協調掃除を行う場合、人間は、ロボットが箱の近くにきたとき箱をテーブルと垂直方向に持ち上げ、箱の下が全て掃除されたら箱を降ろし、その後は掃除が終了するまで何もしない。自律掃除を行う場合は、あらかじめ箱の移動先の場所を決めておき、実験開始直後に移動させ、元の場所がすべて掃除された後で戻す。その後は終了まで何もしない。

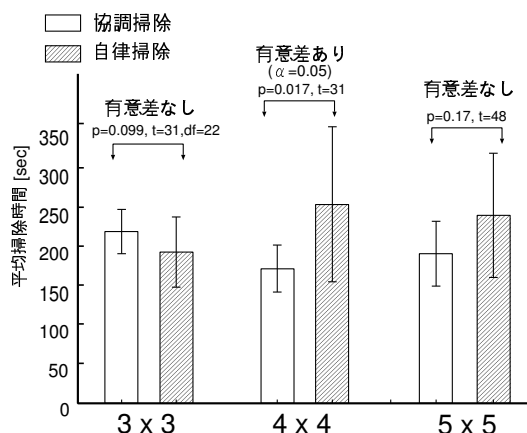


図 5 平均掃除時間とその検定結果

4.2 実験 1 の結果

図 5 にそれぞれの箱の大きさについて、協調掃除時と自律掃除時の平均掃除時間と標準偏差 (エラーバー), 検定結果を示す。それぞれの箱の大きさについて、協調掃除時のデータ群と自律掃除時のデータ群とで平均値 (または代表値) の差を検定したものである。(3×3) については t 検定を、(4×4), (5×5) については、ウィルコクソンの検定を行った。箱の大きさが 4×4 の場合についてのみ、箱の下を掃除した場合としない場合とで、掃除時間に有意な差 ($\alpha = 0.05$) が認められた。

4.3 実験 2: 人間の認知的負荷の測定

タスクに埋め込まれたインタラクションを行った場合の人間の認知的負荷を調べる。人間のタスクに命令を埋め込んでいない、他の 2 つの代表的な明示的手法と認知的負荷を比較することで検証する。

比較対象の手法は、音声によってロボットに命令を与える方法と、手を使ってロボットの進路を遮ることで命令を与える方法とした。これら 2 つの手法は、いずれも箱を移動するタスクとは別に、ロボットに明示的な命令を与えなくてはならない。これらの手法は、コントローラなど専用の装置を用いなくても、人間の身体だけで命令を効率的に表現できる代表的なものと考えられる。

図 6 のように、タスクに埋め込まれたインタラクションによる協調掃除を用いるものを TI、音声による命令を用いるものを VI、手で進路を妨害するものを HI と呼ぶ。前述の実験 1 により、箱のサイズが 4×4 マスのときに箱の下を優先的に掃除すれば、全体の掃除時間が短縮されることが確認されたので、この実験では 4×4 マスの箱において、箱の下のみの掃除を行う。箱の下の領域 16 マスがすべて掃除できたら終了とする。被験者は、TI では、箱をロボットから一定の距離に静止させ、VI, HI では、あらかじめ箱を環境中の別の場所に移動させておき、箱のあった場所付近でロボットに音で命令を与えたり、ロボットに手を近づけるなどして方向転換を繰り返させて掃除をさせる。

実験では、操作時の人間の認知的負荷を計測するために、二重課題法を採用し、実験の被験者に、主課題であるロボットの操作と並行して、副課題として暗算を行ってもらう。本研究では、人間のタスクの性質上、答えの選択や、回答を紙に書くことが非常に困難であるため、実験開始時に提示される 3 桁の数から声に出して 3 ずつ引き算をしてもらうという方法をとる [Crandall 02] [Condron 02]。この計算の単位時間当たりの正答数によって、主課題であるロボットの操作の認知的負荷を

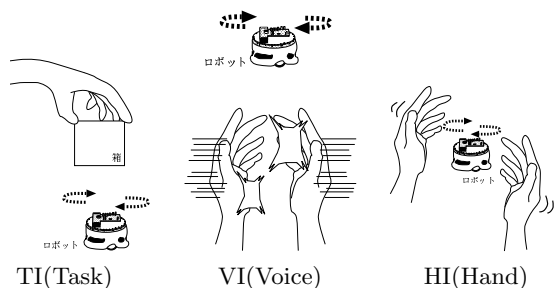


図 6 認知的負荷を比較する 3 つのインタラクション

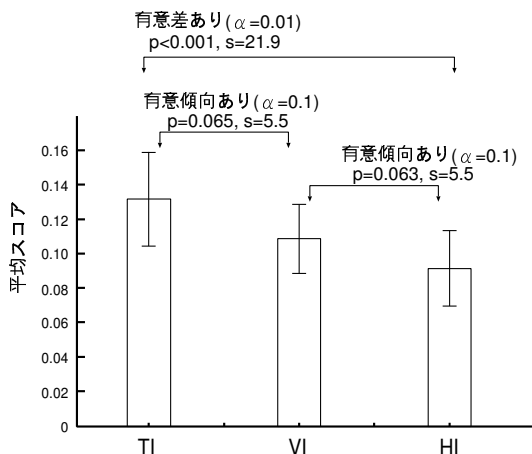


図 7 スコア (正規化後の単位時間当たりの正解数) と検定結果

評価するものとする。

被験者へは、可能な限り素早く計算を行うこと、計算よりもロボットの操作を優先させることを説明した。TI,VI,HI の順序は被験者ごとに変えて行い、ロボットの操作に十分慣れてもらうため、各実験に先立って練習の時間を 5 分ほど設けた。練習後に 3 回の記録を行い、計算に使用される 3 桁の数字は、その都度ランダムに提示した。

4.4 実験 2 の結果

被験者は 7 名で、20 歳後半から 30 歳前半の男性である。図 7 に正規化後のスコア (正規化後の単位時間当たりの計算の正解数) の平均値と標準偏差 (エラーバー)、各実験の代表値の差の検定結果を示す。正規化が必要であるのは、個人の計算能力には差があり、そのままでは比較することができないという理由による。ある 1 人の被験者の TI,VI,HI の合計 n 個の実験データを x_1, x_2, \dots, x_n 、正規化後のデータを y_1, y_2, \dots, y_n とすると、ある i 番目の正規化データは $y_i = x_i / \sum_j x_j$ となる。TI のタスクに埋め込まれたインタラクションを行った場合が最もスコアの平均が高くなっている。TI,VI,HI の正規化後のスコアに差があるかどうかをクラスカル・ウォリスの方法で検定した結果、検定統計量 = 2.195, $df = 2, p < 0.001 (\alpha = 0.01)$ となり有意な差があった。その結果を受けて、TI,VI,HI のそれぞれ 2 組ずつのシェッフェの方法による対比較を行った (図 7 の上方に示す)。(TI,HI) については有意 ($\alpha = 0.01$) であり、(TI と VI),(VI,HI) については有意な傾向 ($\alpha = 0.1$) があった。

5. 考察

実験 1 の結果から、協調掃除により障害物の下を優先的に掃除した場合に掃除効率が改善されることが確認できた。し

かし、障害物の大きさによる違いを見ると、障害物の底面積と環境全体の面積の比率が限られた範囲でのみ有効という結果となっている。これはロボットがランダムに方向転換を繰り返すという掃除戦略を取っていることに起因すると考えられる。また、協調掃除を行わなくても、他の方法でロボットに箱の下を優先的に掃除させることもできるが、協調掃除により効果的な掃除が容易に誘導できることから、提案するタスクに埋め込まれたインタラクションの果す役割は大きいと考えられる。

実験 2 の結果では、明示的な命令を与える 2 つの手法と比較したとき、タスクに埋め込まれたインタラクションを用いたスコアの平均値が最も高く、検定結果では、有意差、または有意な傾向が認められることから、人間の認知的負荷を最小にするものと考えられる。これは、明示的に命令を与えるという行為が人間の負担になっているのではないかという我々の予想を支持する結果であり、その点に着目して提案した、タスクに埋め込まれたインタラクションというインタラクション設計の指針の有効性を示していると考えられる。今回の実験では、明示的な命令発行手法に関して、直感的で容易に命令の発行ができ、外部装置に依存しないということを条件としたため、命令の発行には必ず身体的な負担を伴う。そのため、計算課題への影響の主な原因として、命令発行時の身体的負担が考えられるが、タスクに埋め込まれたインタラクションにより、同じロボットのハードウェア資源で、このような本来必要ない負荷の排除が可能となる。

6. まとめ

本研究では、作業分担された協調作業に着目し、タスクに埋め込まれたインタラクションを用いる設計指針を提案した。掃除作業に適用し、実験を行ったところ、作業時間が短縮し、人間の認知的負荷の軽減され、提案する設計指針の有効性が確認された。

参考文献

[Brooks 86] 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)

[Choset 01] Choset, H.: Coverage for robotics - A survey of recent results, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, Vol. 31, pp. 113-126 (2001)

[Condrón 02] Condrón, J. E. and Hill, K. D.: Reliability and Validity of a Dual-Task Force Platform Assessment of Balance Performance: Effect of Age, Balance Impairment, and Cognitive Task, *Journal of American Geriatrics Society*, Vol. 50, pp. 157-162 (2002)

[Crandall 02] Crandall, J. W. and Goodrich, M. A.: Characterizing Efficiency of Human-Robot Interaction: A Case Study of Shared-control Teleoperation, in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02)* (2002)

[Marrone 01] Marrone, F. and Strobel, M.: CleaningAssistant - a service robot designed for cleaning tasks, in *Proc. Advanced Mechatronic Systems (AIM'01)* (2001)

[田窪 02] 田窪 朋仁, 荒井 裕彦, 林原 靖男, 谷江 和雄: 人とロボットによる長尺物の協調運搬 (仮想非ホロノミック拘束による 3 次元空間内の制御手法), *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 68, No. 667, pp. 906-913 (2002)

[平田 03] 平田 泰久, 小菅 一弘, 浅間 一, 嘉悦 早人, 川端 邦明: キャスタ特性を有した複数の人間協調型移動ロボット (DR Helper) と人間との協調による単一物体の搬送, *日本ロボット学会誌*, Vol. 21, No. 7, pp. 80-88 (2003)