

# 人間とロボットの協調作業における負荷低減のための インタラクション設計

小林 一樹<sup>†a)</sup>      山田 誠二<sup>††,†b)</sup>

Designing Interaction for Low Work-load on Human-Robot Cooperative Work

Kazuki KOBAYASHI<sup>†a)</sup> and Seiji YAMADA<sup>††,†b)</sup>

**Abstract.** 本研究では人間とロボットによる協調作業において、人間の負担軽減のためのインタラクション設計を行い、実験によりその効果を確認した。ジェスチャなどにより、ロボットに直接コマンドを送る方法を用いた従来の研究において、協調作業中に人間が注意を向ける対象は、環境とロボットの2つが存在するため、人間への負担が大きいと考えられる。そこで、人間とロボットの間に直接的な情報のやりとりの必要ない「行為に埋め込まれたコマンドを用いたインタラクション」を提案し、「人間とロボットによる協調掃除」に適用した。被験者実験により、人間の協調掃除時の認知的負荷の測定を行った結果、直接コマンドを送る方法に比べて認知的負荷が軽いことが確認された。

**Keywords.** ヒューマンロボットインタラクション、協調作業、認知的負荷

## 1. はじめに

ロボット技術の進歩により、家庭用ロボットが普及しつつある。AIBOのようなペットロボットや、Roombaに代表される掃除ロボットを購入し、家庭環境でそれらとのインタラクションが生ずる場面がより増してくるのは想像に難くない。また、ツアーガイドロボット [1] も研究されており、近い将来、博物館などの公共施設においてロボットと接する機会も増えてくると思われる。このように、ロボットは産業の場からより一般の人々の近くにその存在を広げている。

上記のような背景のもと、ヒューマンロボットインタラクション (HRI) の分野で様々な研究が行なわれている [2]。力学的機構に焦点を当てたロボット工学とは性質が異なり、HRI はその主眼をインタラクション設計に置いている。インタラクション設計とは、ロボットが外界とやりとりする情報とその処理過程を設計することを指し、研究としては、人間とロボットと

のコミュニケーション方法に関するものが多い。たとえば、ジェスチャ [3]、音声 [4]、ジョイスティックやコンピュータを用いた専用デバイス [5]、複数の方法を複合したもの [6] などが挙げられる。

本論文では、このような研究に代表される人間がロボットに直接コマンドを送信する方法を DCM (Direct Commanding Method) と呼ぶ。DCM を用いた協調作業は HAI のインタラクションモデル [7] を基に、図 1 のように表すことができる。本文中では、人間、ロボット、環境をそれぞれ  $H, R, E$  とし、人間から環境への行為を  $H \Rightarrow E$  のように表す。たとえば、ジェスチャコマンドにより人間が指定した箇所を掃除するロボット [8] では、ロボットは自律的に指定箇所の掃除を行うことが可能であるが、実際には人間が障害物を移動させて広い空間を作るなどの作業が生じる。この場合のインタラクションは以下ようになる。

- $H \Rightarrow R$ : ジェスチャによる掃除箇所の指定
- $R \Rightarrow H$ : ジェスチャの受信確認
- $H \Rightarrow E$ : 障害物の移動
- $E \Rightarrow H$ : 環境の知覚
- $R \Rightarrow E$ : 掃除
- $E \Rightarrow R$ : センシング

このように、人間は環境への行為と知覚のサイクル

<sup>†</sup> 総合研究大学院大学, 〒 101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2 大学院

<sup>††</sup> 国立情報学研究所, 〒 101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

a) E-mail: kazuki@grad.nii.ac.jp

b) E-mail: seiji@nii.ac.jp

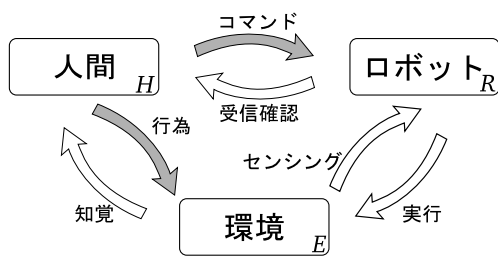


図1 DCM モデル

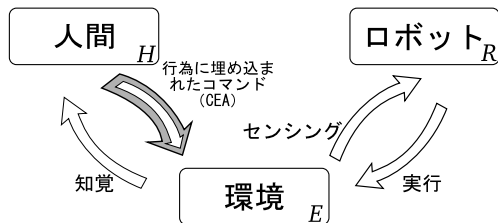


図2 CEA モデル

( $H \Rightarrow E$ ,  $E \Rightarrow H$ ) と、ロボットへのコマンドとその確認のサイクル ( $H \Rightarrow R$ ,  $R \Rightarrow H$ ) との2つのサイクルを持つ。よって、図1のような人間とロボットによる協調タスクにおいて、ジェスチャや音声認識などにより  $H \Rightarrow R$  を改善しようとする従来の研究では、人間が注意しなければならない対象が2つ存在するため、人間の負担を考慮しているとは言い難い。

そこで、本研究では人間の負担をより軽減することを目的として、図2で表される人間とロボットの協調作業のためのCEAモデルを導入する。このモデルでは、人間-ロボット間に直接的なインタラクション  $H \Rightarrow R$ ,  $R \Rightarrow H$  は存在せず、 $H \Rightarrow E$  を通じてコマンドを送ることにより協調作業が成立する。このとき、行為  $H \Rightarrow E$  にコマンド  $H \Rightarrow R$  が埋め込まれた構造になっていることから、このようなコマンドを行為に埋め込まれたコマンド (CEA: Commands Embedded in Actions) と呼ぶ。埋め込みにより、コマンド送信後の受信確認を行わなくてよいので  $R \Rightarrow H$  も不要となる。図2で表されるように、人間からの入出力の減少により、その分の作業負担の軽減が期待できるとともに、ロボットとの通信に必要なプロトコルなどを覚える負担もない。また、ロボットとの直接的な通信が不要なため、人間はロボットの存在を意識せずに、より自然な動作でのタスクの達成が可能となる。

しかし、行為にコマンドを埋め込むことによって人間の負担が増大したり、新たな不具合が生じるのでは

実用的でない。そこで本論文では、第3節で述べるCEAモデルに基づくインタラクションのための設計手順を人間と移動ロボットによる協調掃除作業に適用し、人間と実機による実験を行い、提案モデルにおけるインタラクションの性質について検証する。特に、人間のメンタル面への影響に焦点をあて、協調作業時の認知的負荷について評価を行う。

関連研究として、人間とロボットによる協調作業に関する研究が報告されている。人間とロボットによる長尺物の運搬に関する研究[9]では、一つの長い板などを一緒に運ぶという協調作業において、共有する板を通して人間の歩調や力を伝え、ロボットはその情報をもとに協調的な行動をとることが可能である。複数台のロボットによる物体搬送に関する研究[10]においては、複数の同機能なロボットが、人間では運ぶことが困難な物体を把持する。人間はその物体に力を加えることで、ロボットを操作し、物体の自由な移動を実現している。また、人間とロボットの協調作業のモデリングに関する研究[11]もある。

これらの研究は、我々が提案するインタラクションにおける埋め込みの良い例となっている。しかし、上記のような協調形態はいずれも「力のやりとりをする作業」に限定されている。我々が提案するインタラクションでは力のやりとりだけでなく、力も含めた情報のやりとり全般を対象にしており、より広い作業への適用を前提としている。

## 2. CEAモデルに基づくインタラクションの設計手順

図2の人間とロボットの協調作業のモデルに基づいた、インタラクション設計の手順を提案する。本研究では、1人の人間、1台のロボットを仮定し、人間とロボットの間での情報交換は実時間で同期して行われ、人間とロボットで作業空間(環境)を共有するものとする。以下にその設計手順を示す。

### (1) タスクの分担

与えられた協調タスクを人間のタスクとロボットのタスクに分担する。文献[12]にもあるように、人間がロボットに干渉する時間と作業効率はトレードオフの関係にあり、ここでは人間の干渉する時間が少ないほど良いとする方針をとる。つまり、ロボットには作業量が最大になるように割り当てるものとする。したがって、人間にはロボットへの割り当てが不可能だった作業が割り当てられる。このとき、人間のタスクには口

ロボット操作に関する作業は含まないものとする。

### (2) 協調行動の決定

人間とロボットとの協調行動を決定する。協調行動は与えられた協調タスクの性質に強く依存し、人間とロボットに分担されたタスクの分割状況にも影響されてしまう。したがって、どのような協調行動が最適であるかは、設計者の判断に委ねられるが、次のような場合には適切な協調行動であると考えられることができる。

(a) 人間同士の協調作業で通常用いられるもの。(b) 作業効率の向上が確認されているもの。

### (3) 行為へのコマンドの埋め込み

協調行動に必要な人間からロボットへのコマンドの伝達方法を決定する。ここではジェスチャなどの DCM は用いず、人間に分担された「環境への行為」の実行自体をコマンドとしてロボットに伝達する。このとき、ロボットのソフトウェア/ハードウェア等による制約から、必要に応じて人間の行為を修正し、コマンドを埋め込むものとする。

行為の修正は「環境への行為系列において時間的拡張のみを許す」という条件のもとに行われる。環境への行為系列は 1 つだけとは限らないが、ここでは、人間が通常選択すると考えられる基本的なものとする。行為の修正方法に関しては、次節において具体的な例を用いて説明する。もちろん、修正せずにロボットがセンシング可能であることが最も理想的な埋め込みである。

上記の (1), (2) の手順は、家電製品の設計で用いられている設計手順と同等であると考えられる。本研究では、家電製品とその操作を協調作業であると考えたとき、たとえば洗濯機のような製品においては、洗濯は洗濯機が担当するが、洗濯物を入れるのは人間の役割である。CEA モデルでは「人間が洗濯物を入れたとき自動的にボタンが押され、適切に洗濯機が動作する (ボタンを押すコマンドの埋め込み)」のような設計を目指している。以降ではこの手順を掃除作業に適用した具体的な例を挙げ、CEA の詳細を説明する。

## 3. 協調掃除におけるインタラクション設計

前節の設計手順を用い、1 人の人間と 1 台の移動ロボットによって協調掃除を実現する。協調掃除のゴールは「環境中の物体の下を含む床全体の掃除」とする。以下では先に実験環境とロボットの仕様について述べ、続いてインタラクション設計について記す。

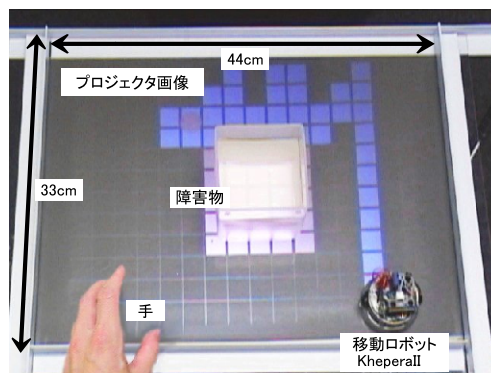


図 3 掃除領域

### 3.1 環境とロボット

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 3 のような環境を設定する。人間が日常の作業に用いる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がある。

ロボットには小型移動ロボットである KheperaII を採用する。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 つ持っている。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、KheperaII の RAM 上でプログラムを動作させることが可能である。

### 3.2 インタラクション設計

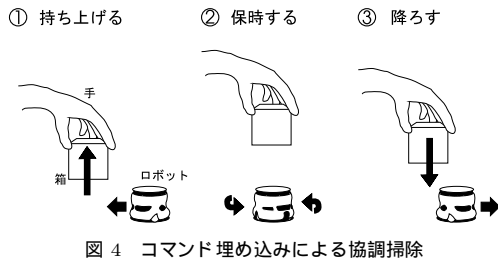
上記の環境とロボットの仕様を考慮した上で、提案手順に従い協調掃除におけるインタラクションを設計する。

#### (1) 作業の分担

「環境中の物体の下を含む床全体の掃除」を人間とロボットとで分担する。ここでは、ロボットに可能な限りの作業を割り当てるが、KheperaII では物体を移動させることが困難であるため、ロボットに「床の掃除」を、人間に「物体の移動」を割り当てる。

#### (2) 協調行動の決定

人間とロボットによる協調行動を「人間が持ち上げた物体の下をロボットが優先的に掃除する」と設定する。



これは、人間同士の協調作業で通常用いられる手段であり、たとえば、人間 2 人での掃除を考えたとき、1 人がイスを移動させたのち、もう 1 人がイスの置かれていた場所を掃除するという行動が行なわれている。また、箱の下を優先的に掃除する方法は、優先的に掃除しない方法に比べて効率的であるという結果が、ランダムに方向転換する移動ロボットを用いた実験により確認されている [13] ため、妥当な協調行動である。

### (3) 行為へのコマンドの埋め込み

ロボットが物体の下の領域を優先的に掃除するためには、その領域を特定するための位置情報が必要である。しかし、ロボット単体でこの情報を取得するのは困難であるため、人間がそれをコマンドとして与えることで、物体の下の領域を優先的に掃除させる。ここでは図 4 に示すように、人間の物体を上下する行為の途中で「持ち上げたまま保持する」という時間的拡張を加えることで CEA を設計する。物体を保持することにより、ロボットは赤外線センサを用いて頭上の物体を検知し、その下の領域を特定することが可能となる。

コマンド埋め込みについて図 5 の状態遷移図を用いて詳しく説明する。これは STRIPS [14] のようなプランニングの探索空間を基にしており、状態がノードによって、オペレータがアークによって表現されている。図中の引数  $x$  は箱の初期位置を、 $p$  はそれ以外の場所を表している。人間の行為の状態を表すものとして、操作対象である箱の状態を記述している。

図 5(a) は人間の分担するタスクを達成するための、基本的な行為の状態遷移であり、(b) は CEA を用いた協調行動の状態遷移である。つまり、(a) は設計手順 (2) までの状態遷移であり、修正前の人間の行為にロボットを協調させるためには、*pickup* をセンシングして箱が *above* の状態のときにタイミング良くその下を掃除しなければならず、これを実現することは非常に高度な技術が要求されることから、現実にはロボット

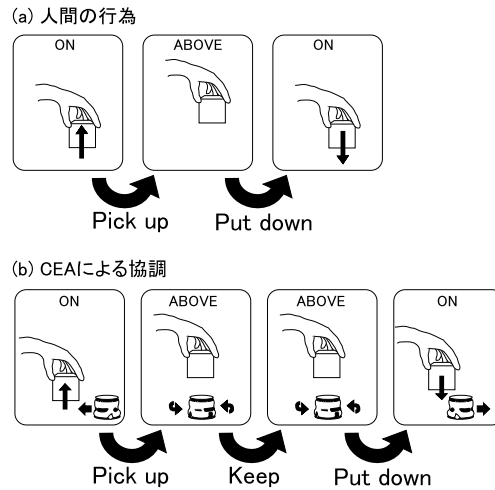


図 5 CEA の状態遷移図

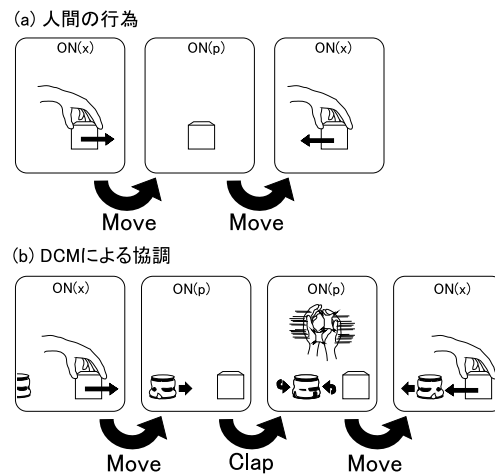


図 6 DCM の状態遷移図

に箱の下を優先的に掃除させることは困難である。そこで、前述のように、協調に必要な情報を人間が提供の方針をとり、(b) のように人間の行為に埋め込むことで実現する。このときに「時間的な拡張のみ」という指針に従い「直前のオペレータを継続する」という意味をもつオペレータ *keep* の追加のみを許す。この埋め込みによりロボットとの協調作業が成立する。

これに対し、図 6 は手をたたいた音をコマンドとしてロボットに送る DCM の状態遷移を表している。(a) は人間のタスク達成のための基本的な行為による状態遷移であり、(b) は DCM によって協調した場合の状態遷移である。(b) では、手をたたくことにより音声でコマンドを発行するオペレータ *clap* が追加されて

いる。ロボットは *clap* による音声信号をセンシングし、方向転換を行うことで優先的に箱の置かれていた領域を掃除する。

図5と図6を比較した場合、CEAを用いた場合は、元の人間の行為である「箱の移動」を時間的に拡張しただけであるのに対し、DCMを用いた場合は「箱の移動」とは関係ない付加的なオペレータ *clap* が含まれており、人間の行為の連続性が失われている。よって、CEAを用いることにより、本来の人間のタスク実行の連続性を保持しつつコマンドを与えることが可能となり、人間のメンタル面での負担軽減が期待できる。

しかし、実際にDCMに比べてCEAが人間の負担を軽減可能であるのか、実験により検証する必要がある。以降では移動ロボットの行動設計について述べたあと、CEAとDCMを用いたときのメンタル面の負担として認知的負担を測定する被験者実験について述べる。

#### 4. 移動ロボットの行動設計

前述のようにして設計された「協調掃除におけるCEAを用いたインタラクション」に従ってロボットの行動設計を行う。

##### 4.1 目標とするロボットの行動

ロボットが分担する作業「掃除」を達成するために、(a) 頭上に物体があるときは、その物体の下を優先的に掃除（協調行動）、(b) 頭上に物体が検知されないときは自律的に掃除、障害物回避（自律行動）、という2つの行動を構成する。本研究では行動ベースアプローチをとり、サブサンクションアーキテクチャ<sup>[15]</sup>を用いて設計を行う。

##### 4.2 サブサンクションアーキテクチャ

ロボットが上記のような行動をとるために、(1) 障害物回避、(2) 掃引、(3) インタラクションの3つの階層で図7のサブサンクションアーキテクチャを構成する。各階層の動作は非同期に実行され、上位の階層が下位の階層の行動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動をとるように構成している。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は、基本的に上位の階層の行為を優先する。次の節では各階層における行為の選択ルールについて述べる。

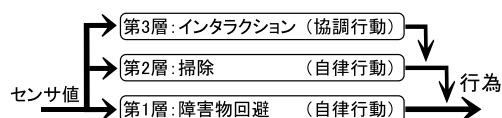


図7 サブサンクションアーキテクチャ

##### 4.2.1 第1層: 障害物回避

障害物回避では、主に静止した障害物と動く物体との衝突を回避するため、以下の行動ルールを用いた。

- 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。

##### 4.2.2 第2層: 掃引

掃引層では、ロボットの自律的な掃除のための行動を制御する。ロボットは、壁や障害物を検出したときのランダムな方向転換と、障害物が無い場合の直進を繰り返すことによって、移動に伴い環境内を掃除する。環境内を効率良く移動する手法として様々なものが提案されている<sup>[16]</sup>が、ロボットのハードウェアの制約上、信頼性の低いデッドレコニングが唯一の位置推定方法であるなどの理由からランダムな方向転換で掃除を行うものとした。また、市販されている掃除ロボットの多くにランダムな方向転換が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。以下に行動ルールを示す。

- 前方に物体がないとき、前進。
- 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。

##### 4.2.3 第3層: インタラクション

インタラクション層では、人間からロボットへのインタラクションが発生したときの行動を制御する。人間が物体を持ち上げている間、ロボットはその物体の下でランダムな回転を繰り返し、人間が物体を降ろしたときに、その物体の下から出ていく。以下に行動ルールを示す。

- 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。

## 5. 実験

人間の負担軽減を確認するための被験者実験を行う。実験では、前節で設計された行動を移動ロボット KheperaII に実装し、二重課題法を用いてロボットと

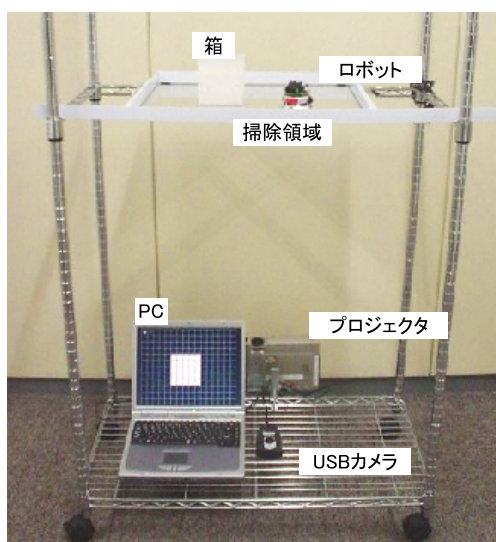


図 8 実験装置

協調しているときの認知的負荷を測定する。従来の DCM を用いた場合と比較することで、CEA を用いた場合の効果を検証する。以下では実験装置についての説明に続き、実験方法、実験結果を示す。

### 5.1 実験装置

図 8 に示す実験装置を用いることにより、図 3 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重心座標が計算される。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 つのセルを点灯させる。掃除領域は縦 33cm×横 44cm の大きさがあり、この領域を縦 12×横 16 の正方形のセルで格子状に区切る。このうち 3×3 のセルがロボットの大きさに相当する。

### 5.2 認知的負荷の測定

CEA を用いた場合の効果を検証するために、DCM を用いた場合との認知的負荷を比較する。DCM の具体的な手段として、音によってロボットにコマンドを与える方法と、手を使ってロボットの進路を遮ることでコマンドを与える方法の 2 つとした。これらの比較対象は、コントローラなど専用の装置を用いず（よってそのような装置の使い方を覚える必要もない）、人間の身体だけでコマンドを送れる最もシンプルなものであり、実装コストの面からも比較対象として適切で

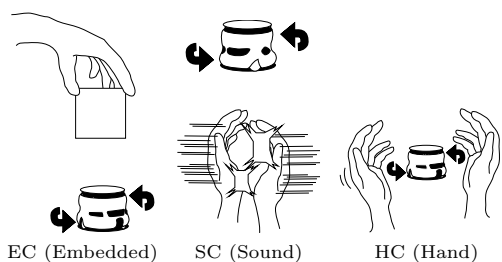


図 9 認知的負荷を比較する 3 つのインタラクション

あると判断した。

ここでは、図 9 のように、CEA による協調掃除を用いるものを EC、音によるものを SC、手で進路を妨害するものを HC と呼ぶ。SC は認知的負荷測定上の制約から、声ではなく、手をたたいてコマンドを送るものとした。SC、HC では人間からの 1 つの音声コマンド、1 回の進路妨害によってコマンドが発行されると、ロボットは直ちに 90° から 180° の間でランダムに方向転換を行い、人間はこの行動を観察してコマンドの受信確認ができる。実験では箱の下を掃除する協調行動時において、箱の下のすべてのセルを掃除するまでの負荷を測定する。箱の大きさは先行研究 [13] で効率の改善が確認された 4×4 セルのものを用いる。被験者は、EC では、箱をロボットから一定の距離に静止させ、SC、HC では、箱を環境中の隅に移動させてから、箱のあった場所付近でロボットに直接コマンドを与え、方向転換を繰り返させて掃除を行う。

操作時の人間の認知的負荷は二重課題法を用いて測定する。被験者は、主課題であるロボットの操作と並行し、副課題として暗算を行う。この暗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操作の認知的負荷を評価する。人間のタスクの性質上、回答を紙に書くことが困難であるため、実験開始時に提示される 3 桁の数から声に出して 3 ずつ引き算をしてみようという方法をとる [17]。このとき、3 桁の数字は実験の都度ランダムに提示される。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と説明した。EC、SC、HC 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、そのあと、3 回の計測を記録した。また、負荷測定の直前に 30 秒間の計算のみの課題を行ってもらい、これを各被験者の計算能力とした。

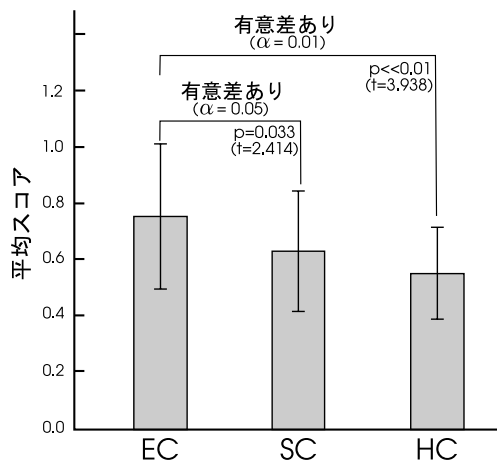


図 11 スコア (正規化後の単位時間当たりの正解数) と検定結果

### 5.3 認知的負荷の測定結果

被験者は 20 歳後半から 30 歳前半の男性 8 名，女性 4 名の計 12 名である．実験の様子を図 10 に，スコア (計算能力で正規化した正解数) の平均値と標準偏差を図 11 に示す．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．グラフにおいて，スコア 1.0 が各被験者のロボット操作なしでの計算能力を意味する．EC を対照群として，各実験の平均値の差の検定を Dunnett の方法を用いて行った結果，EC と SC では 5%水準で有意差があり ( $p = 0.033$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $t = 2.414$ )，EC と HC では 1%水準で有意差があった ( $p \ll 0.01$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $t = 3.938$ )．これらの結果から，EC の認知的負荷が有意に軽いことがわかる．

## 6. 考 察

認知的負荷測定の実験結果では，DCM を用いた 2 つの手法と比較したとき，CEA を用いたもののスコアの平均値が最も高く，検定結果では有意差が認められたことから，CEA によるインタラクションは人間の認知的負荷を軽減することが分かる．これは，DCM による従来の研究は人間が注意を向ける対象が多いために負担となっているという我々の予想を支持する結果であり，コマンド関係の行為  $H \Rightarrow R$ ,  $R \Rightarrow H$  を削除する，CEA を用いたインタラクションの設計を行うアプローチの有効性を示している．

今回の実験では，DCM として採用した手法に関して，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動作を伴う．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，腕の動きなどは専用のコントローラを用いる方法と比べて自然であり，動作に関する困難さはほとんどないと考えている．実際，実験中は SC, HC においては，箱を移動した後は「手をたたく」や「手で進路を妨害する」以外の選択肢がないので，迷う余地がない．また，実験の説明でも述べたとおり，コントローラなどの採用を許してしまうと，それらの使用方法を覚えるといった負担も生じてしまい，実験の主旨から逸脱しかねない．そういった点から，今回採用した 2 つの CEA による手法は実験上，不必要な要素を含まない最も基本的なものであり，比較対象として適切なものであると考えられる．

CEA (EC) と DCM (SC, HC) との違いは，身体的な負担よりも「注意の負担」が大きく影響していると考えられる．SC と HC は，人間の実行と受信確認の頻度が高く (繰り返しが多い)，常にロボットの位置を観測して，適切なタイミングでロボットに命令を与えなくてはならない．それに対し CEA はロボットを意識する必要がなく，環境に注意を向けているだけで良い．腕の動きが認知的負荷に与えている影響を詳しく調査することは重要であるが，CEA を用いてコマンドを送ることで結果的に腕の動きを最小にすることができ，認知的負荷を減らしているのも事実である．このような点から総合的に判断して，CEA を導入することにより，これまでなされてきた多くの DCM を用いる研究の発展に貢献できるものと考えられる．

## 7. ま と め

本研究では，人間とロボットによる協調作業において，人間の負担軽減のためのインタラクション設計を行い，実験によりその効果を確認した．ロボットに直接コマンドを送る方法 (DCM) を用いた従来の研究では，協調作業において人間の負担が大きいという問題に着目し，人間-ロボット間に直接的な情報のやりとりの必要ない「行為に埋め込まれたコマンド (CEA) を用いたインタラクション」を提案した．CEA は，人間の行為にロボットへのコマンドが埋め込まれているため，ロボットの存在を意識せず協調作業が成立することから，人間の負担軽減が期待できる．CEA を広く協調作業に適用するために，インタラクションの設計手順を作成し「人間とロボットによる協調掃除」におい

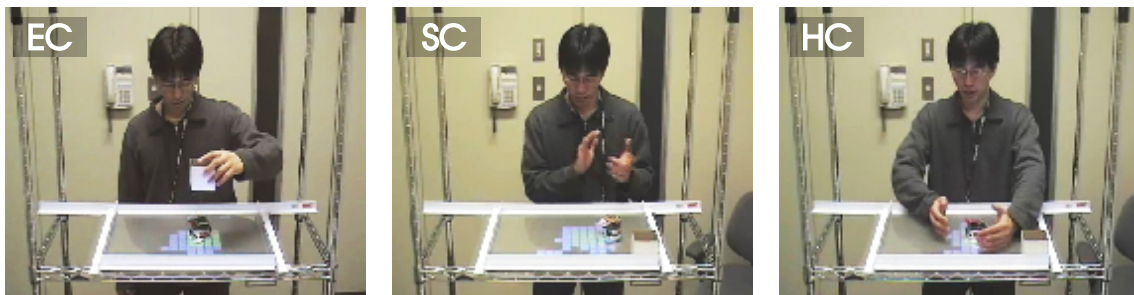


図 10 認知的負荷測定実験の様子

て、STRIPS-like な状態遷移図を用いて CEA を設計した。また、設計された「協調掃除における CEA を用いたインタラクション」に従い、小型移動ロボット KheperaII に行動を実装し、人間の負担軽減を確認するための被験者実験を実施した。実験は二重課題法を用いて協調時の認知的負荷を測定し、CEA を用いた場合と、従来の DCM を用いた場合との比較を行なった。実験の結果、CEA を用いた場合は、DCM を用いた場合よりも有意に成績が優れており、認知的負荷が軽いことが確認された。したがって、提案手法により人間の負担が軽減可能であるため、今後社会に浸透しつつある人間-ロボット間の協調作業において、CEA を用いたインタラクションは重要な役割を果たすと考えられる。

#### 文 献

- [1] W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, D. Hahnel, G. Lakemeyer, D. Schulz, W. Steiner and S. Thrun: "The interactive museum tour-guide robot", Proc. of the Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI/IAAI), pp. 11-18 (1998).
- [2] T. W. Fong, I. Nourbakhsh and K. Dautenhahn: "A survey of socially interactive robots", Robotics and Autonomous Systems, **42**, 3-4, pp. 143-166 (2003).
- [3] S. Waldherr, R. Romero and S. Thrun: "A gesture based interface for human-robot interaction", Autonomous Robots, **9**, 2, pp. 151-173 (2000).
- [4] S. Lauria, G. Bugmann, T. Kyriacou and E. Klein: "Mobile robot programming using natural language", Robotics and Autonomous Systems, **38**, 3-4, pp. 171-181 (2002).
- [5] D. Katagami and S. Yamada: "Active teaching for an interactive learning robot", Proc. IEEE Workshop Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'03) (2003).
- [6] K. Severinson-Eklundh, A. Green and H. Hüttenrauch: "Social and collaborative aspects of interaction with a service robot", Robotics and Autonomous Systems, **42**, pp. 223-234 (2003).
- [7] 山田, 角所: "適応としての hai", 人工知能学会誌, **17**, 6, pp. 658-664 (2002).
- [8] F. Marrone and M. Strobel: "Cleaningassistant - a service robot designed for cleaning tasks", Proc. of Advanced Mechatronic Systems (AIM'01) (2001).
- [9] 田窪, 荒井, 林原, 谷江: "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, **68**, 667, pp. 906-913 (2002).
- [10] 平田, 小菅, 淺間, 嘉悦, 川端: "キャスト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, **21**, 7, pp. 80-88 (2003).
- [11] 池浦: "ロボット-人間協調システムのモデリング", 日本ロボット学会誌, **18**, 3, pp. 331-336 (2000).
- [12] J. W. Crandall and M. A. Goodrich: "Characterizing efficiency of human-robot interaction: A case study of shared-control teleoperation", Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02) (2002).
- [13] K. Kobayashi and S. Yamada: "Human-robot interaction design for low cognitive load in cooperative work", Proc. of the 13th International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN-2004) (2004).
- [14] R. E. Fikes and N. J. Nilsson: "STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving", Artificial Intelligence, **2**, pp. 189-208 (1971).
- [15] R. A. Brooks: "A robust layered control system for a mobile robot", IEEE Journal of Robotics and Automation, **2**, 1, pp. 14-23 (1986).
- [16] H. Choset: "Coverage for robotics - a survey of recent results", Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, **31**, pp. 113-126 (2001).
- [17] J. E. Condrón and K. D. Hill: "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, **50**, pp. 157-162 (2002).