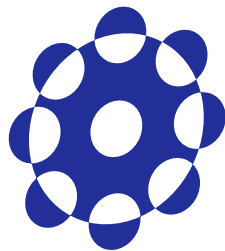


平成17年度 博士学位論文

行為に埋め込まれたコマンドによる
ヒューマンロボットインタラクションの設計

小林 一樹



総合研究大学院大学
複合科学研究科 情報学専攻

平成18年3月

目次

第 1 章	序論	3
1.1	はじめに	3
1.2	本論文の構成	5
第 2 章	ヒューマンロボットインタラクション	7
2.1	ヒューマンロボットインタラクションとは	7
2.1.1	相互作用としての知能	7
2.1.2	ロボットと身体性	8
2.1.3	インタラクション設計	9
2.1.4	構成論的アプローチ	10
2.1.5	まとめ	11
2.2	ロボットの役割による分類	12
2.3	ツールとしてのロボット	12
2.3.1	ジェスチャの利用	12
2.3.2	力の伝達	13
2.3.3	自然言語の利用	14
2.3.4	遠隔操作	15
2.3.5	教示の利用	17
2.3.6	意図の伝達	17
2.3.7	適応の利用	19
2.4	ソーシャルアクターとしてのロボット	21
2.4.1	心理状態の表現	22
2.4.2	身体的特徴の利用	24
2.4.3	言語の利用	30

2.4.4	社会的役割の利用	32
2.5	本研究の位置付け	36
第 3 章	人間の行為に埋め込まれたコマンドによるロボットとの協調	39
3.1	はじめに	39
3.2	人間の行為に埋め込まれたコマンド (Extended CEA)	42
3.2.1	行為の変更方法	43
3.2.2	アクションコーディングシステム	43
3.2.3	新しい行為「KEEP」の付加	44
3.2.4	ECEA の適用手順	45
3.3	実験	47
3.3.1	実験 1:人間とロボットによる掃除タスク	47
3.3.2	実験 2:ECEA を用いた場合の認知的負荷	52
3.4	考察	56
3.4.1	高度なタスクの達成	56
3.4.2	認知的負荷の軽減	60
3.4.3	ECEA の汎用性	61
3.4.4	A-2 レベルにおける埋め込み	62
3.4.5	ECEA の適用範囲	64
3.4.6	各手法の比較	66
3.5	まとめ	67
第 4 章	ロボットの行為に埋め込まれたコマンドの人間への影響	69
4.1	はじめに	69
4.2	ロボットの行為に埋め込まれたコマンド (ECEA-R)	69
4.2.1	ロボットから人間へのコマンド送信	70
4.2.2	DCM-R	71
4.2.3	CEA-R	73
4.2.4	ECEA-R	75
4.3	実験	77
4.3.1	協調掃除タスク	77
4.3.2	環境とロボット	78

4.3.3	ロボットの行動	78
4.3.4	コマンドの設計	79
4.3.5	実験方法	84
4.3.6	実験結果	86
4.4	考察	86
4.4.1	各コマンドの設計の妥当性	86
4.4.2	ECEA-R の有効性	88
4.4.3	多義的なコマンド	90
4.4.4	ECEA-R の設計方法	92
4.4.5	ECEA-R と擬人化の関係	92
4.4.6	他のロボットへの適用可能性	94
4.4.7	実験の設定	94
4.5	まとめ	95
第 5 章	結論	97
5.1	本研究の成果	97
5.2	今後の課題と展望	98
謝辞		103
参考文献		105
研究業績		117
付録 A	被験者実験の測定データ	121
A.1	人間の行為に埋め込まれたコマンドに関する実験	121
A.2	ロボットの行為に埋め込まれたコマンドに関する実験	134
付録 B	実験装置	135
B.1	USB カメラ画像から投影画像への変換	135

目次

2.1	3 項インタラクション	8
2.2	Robovie	9
2.3	人間とロボットによる協調作業	10
2.4	状況依存モジュールに基づくアーキテクチャ	11
2.5	ジェスチャによるロボットの制御	14
2.6	力の伝達によるロボットの制御	15
2.7	自然言語によるロボットの制御	16
2.8	遠隔操作によるロボットの制御	16
2.9	ロボットへの教示	17
2.10	意図の伝達	18
2.11	適応のための HAI モデル [139]	20
2.12	心の理論とロボット	23
2.13	感情や態度の伝達	25
2.14	ロボットによる非言語情報の利用	26
2.15	シャチ型ロボットによる身体表現 [78]	27
2.16	くま型ロボットによる身体表現 [81]	27
2.17	人間型の上半身を持つロボットによる身体表現 [80]	28
2.18	しぐさや形状の影響	29
2.19	池浦らの移動ロボット [29]	30
2.20	Butler らの移動ロボット [10]	31
2.21	SHRDLU の画面	31
2.22	ペットロボット	33
2.23	Scholtz の 5 つのインタラクションモデル [103]	35

2.24	行為の 7 段階理論 [90]	36
2.25	本研究の方向性	37
3.1	DCM モデル	41
3.2	CEA モデル	42
3.3	基本的な 4 つの A-1 ユニット	44
3.4	コーヒーを作る課題における記述例	44
3.5	時間的拡張の記述例	45
3.6	協調作業の設計手順	46
3.7	掃除領域	48
3.8	物体移動の典型例	50
3.9	ECEA 適用後の物体移動	50
3.10	KheperaII と追加されたセンサ	51
3.11	各層の条件と行動	52
3.12	人間とロボットによる協調掃除タスクの様子	53
3.13	実験装置	54
3.14	認知的負荷を比較する 3 つの手法	55
3.15	認知的負荷測定実験の様子 (EC)	57
3.16	認知的負荷測定実験の様子 (SC)	58
3.17	認知的負荷測定実験の様子 (HC)	59
3.18	スコア (正規化後の単位時間当たりの正解数) と検定結果	60
3.19	平均掃除時間	61
3.20	AIBO ERS-7	63
3.21	ゴミ捨て行為の典型例	64
3.22	ECEA 適用後のゴミ捨て行為	64
3.23	手をかざす方法 (DCM) によるロボットの制御	65
4.1	人間の介入を必要とするロボット	70
4.2	DCM-R モデル	72
4.3	CEA-R モデル	74
4.4	ECEA-R によるコマンドの例	76
4.5	実験環境	78

4.6	KheperaII	79
4.7	各層の条件と行動	80
4.8	LED ライトによるコマンド (DCM-R)	81
4.9	ブザー音によるコマンド (DCM-R)	82
4.10	JIS:S0013 に基づく強注意音の例	83
4.11	行為に埋め込まれたコマンド (ECEA-R)	84
4.12	ロボットの経路	85
4.13	実験の様子	87
4.14	最初の障害物の前のコマンドで障害物を移動した被験者数	88
4.15	ECEA-R による擬人化の促進	93
5.1	機能発見	100
B.1	四角形から四角形への変形	136
B.2	三角形から三角形への変形	136

表目次

3.1	ECEA と保持する物体の特徴	66
3.2	手をかざす方法 (DCM) と保持する物体の特徴	66
3.3	各手法と人間にかかる負担	67
4.1	障害物を移動した理由	89
4.2	各コマンドに気づいたか	89
4.3	実験の設定	95
5.1	ユーザのメリットと設計者のメリット	98
A.1	被験者 1	122
A.2	被験者 2	123
A.3	被験者 3	124
A.4	被験者 4	125
A.5	被験者 5	126
A.6	被験者 6	127
A.7	被験者 7	128
A.8	被験者 8	129
A.9	被験者 9	130
A.10	被験者 10	131
A.11	被験者 11	132
A.12	被験者 12	133
A.13	各被験者の実験結果	134

第 1 章

序論

1.1 はじめに

1921 年にカレル・チャペックの R.U.R. (Rossum's Universal Robots) [12] が公演されてから 80 年ほどが経つ。今世紀に入り、彼の造語である「ロボット^{*1}」という言葉自体も様々なメディアによって取り上げられ、一般にも広く認知されている。Trilobite^{*2}や Roomba^{*3}, Robocleaner^{*4}, RV-2^{*5}などの掃除ロボットに代表される様々なロボットが市販され、家庭用ロボットが年々普及しつつある [125]。しかし、現在の技術レベルではロボットが作業のすべてを自律的に行うことは不可能であり、ロボットが作業を行うのと同時に、人間も何らかの作業を行い、補助する必要がある。つまり、現状ではすべてをロボットに任せることはできないが、人間の負担をある程度減らすことは可能である。

では、より人間の負担を減らすためには何をすれば良いのか。1 つはロボット自体をより賢くすることである。より知的なロボットを作り、人間の意図をくみとり、自ら判断して行動することができるロボットを開発すれば、人間は作業を行う必要がない。このような、知能が個体（ロボット）の中で完結するという立場をとり、より知的なシステムを作ろうとするアプローチは従来からの人工知能研究の考え方である。しかし、現実的には、すべての作業を自律的に行うロボットの開発は非常に困難である。それに対し、もう 1 つの方法は、人間とロボットの関わり方を改善する方法である。ロボットが分担する作業と

^{*1} ロボットの語源はチェコ語で「労働」を意味する Robot だと言われている。R.U.R. で登場するロボットは、クローン人間のイメージに近い。

^{*2} http://www.toshiba.co.jp/tcm_hac/ebyt/trilobite/

^{*3} <http://www.irobot.com/>

^{*4} <http://www.robocleaner.de/>

^{*5} <http://www.uama.com.hk/>

人間が分担する作業を調節し、全体としてより良い状態を目指す。これは、知能が個体の中に閉じることなく個体間や環境間の相互作用（インタラクション）にあるとする立場をとって知的システムを構築するアプローチである。

ここでは、後者のインタラクションを重視したアプローチをとり、ロボットを用いるときの人間の負担軽減を達成する。人間-ロボット-環境間のインタラクションを1つの知的システムとみなしたとき、全体の振る舞いによって任意の目的が達成される。その振る舞いを決定するためには、人間-ロボット間や人間-環境間、ロボット-環境間でどのような情報がやりとりされ、どのように処理されるかを設計する必要がある。このような、情報のやりとりに関する設計をインタラクション設計と呼ぶ。

本研究では、人間の負担を軽減させることを目的として、「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設計を提案する。ロボットが自律的に全ての作業を行うことができない場合、人間は必要に応じてロボットを直接制御する。このとき、リモコンや音声によってロボットにコマンドを与えて制御する方法が考えられる。ロボットを操作することにより、人間が直接作業するよりは負担が軽減されるが、ロボット制御に関する作業は、もともと人間が分担する作業には含まれないため、そのため、その分の付加的な負担が生じるという問題がある。それに対し、もともと人間が分担している作業の実行自体がロボットにとってコマンドになれば、直接制御する方法に比較して人間の負担は軽減される。これが行為に埋め込まれたコマンドである。

本論文では、行為に埋め込まれたコマンドに関する2つの実験を行っている。1つ目の実験は、人間が分担しているタスクを達成するための行為にコマンドを埋め込んだとき、人間の負担が軽減されるかを調査したものである。2つ目の実験は、人間の行為に埋め込むのではなく、ロボットの行為に人間へのコマンドを埋め込んだとき、人間に対してどのような影響があるのかを調査したものである。2つの実験に共通していることは、高度な能力を持つロボットを想定していない点にある。ロボットの能力としては先に挙げた市販されている掃除ロボットと同程度である。1つ目の実験では、比較的低機能なロボットであっても、インタラクションを適切に設計することで協調作業のような高度な作業が可能であり、それによって人間の負担軽減が可能であることを示す。2つ目の実験では、環境の認識が十分に行うことができないロボットであっても、ロボットの行為にコマンドを埋め込むことにより人間の行動を適切に誘導できる可能性があることを示す。これら2つの実験を通して、コマンドを人間の行為に埋め込む場合とロボットの行為に埋め込む場合との両面から、提案する「行為に埋め込まれたコマンド」の有効性を評価・検証する。

1.2 本論文の構成

以下に本論文の構成を示す．

第 1 章：序論

対象とする問題，目的，アプローチについて述べるとともに，本論文の構成を示す．

第 2 章：ヒューマンロボットインタラクション

まず，ヒューマンロボットインタラクションとはどのようなものであるかを説明する．続いてヒューマンロボットインタラクションに関する研究事例を示し，最後に本研究の位置付けを述べる．

第 3 章：人間の行為に埋め込まれたコマンドによるロボットとの協調

行為に埋め込まれたコマンドに関する 1 つ目の実験について述べる．人間の行為にコマンドを埋め込むことにより，比較的低機能なロボットであっても，インタラクションを適切に設計することで協調作業のような高度な作業が可能であり，人間の負担が軽減されることを示す．

第 4 章：ロボットの行為に埋め込まれたコマンドの人間への影響

行為に埋め込まれたコマンドに関する 2 つ目の実験について述べる．ロボットの行為にコマンドを埋め込むことで，人間にどのような影響を与えるかを調査する．環境の認識を十分に行うことができないロボットであっても，ロボットの行為にコマンドを埋め込むことにより人間の行動を適切に誘導できる可能性があることを示す．

第 5 章：結論

本論文の結論と，今後の研究課題について述べる．

第 2 章

ヒューマンロボット インタラクション

2.1 ヒューマンロボットインタラクションとは

2.1.1 相互作用としての知能

従来からの人工知能研究の考え方の 1 つとして，世界を主体と外界で分けたとき，知能が主体の中で閉じるとする記号仮説・計算主義[74] がある．小脳の機能を実現しようとしたホンダの二足歩行ロボット [27] や，大脳の機能を実現しようとした Shakey[88]，SONY の AIBO[21] を用いた歩行学習に関する研究 [28] をはじめとする知能ロボットの研究は，知能が個体の中で閉じるとする立場をとっていると考えられる．これに対し，知能は個として閉じず，個体-個体間や個体-環境間のインタラクション（相互作用）に存在とする相互作用主義がある [74, 37]．個体間のインタラクションに着目したものでは，人工知能研究としてマルチエージェント [34, 67, 70] の研究があり，知能ロボットに関する研究として群ロボット [5, 4, 75] の研究がある．山田ら [136, 138] は複数台の移動ロボットによる箱押し作業において，ロボット間の明示的な通信を行わずに，すべてリアクティブな行動によって協調作業を実現している．また，個体-環境のインタラクションに着目したものでは，行動ベースロボット [8, 63] やリアクティブプランニング [137] の研究がある．特に，人間-コンピュータ間のインタラクションに焦点を当てたものをヒューマンコンピュータインタラクションと呼び，人間とコンピュータを含む，全体としての知的システムの構築を目的とする．（以降，「システム」というとき，特に断りのない限り，インタラクションとしての知的システムを指す．）同様に，人間-ロボット間のインタラクションに焦点を当てたものをヒューマンロボットインタラクションと呼び，システム全体とし

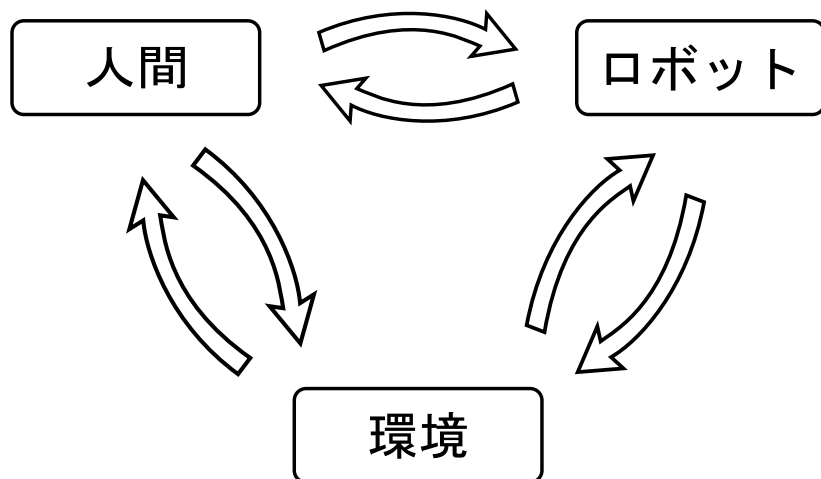


図 2.1 3項インタラクション

ての知的な振舞いを追求する。近年では、コンピュータやロボットをはじめ、人間が擬人化する対象をエージェントとして統括して扱う、ヒューマンエージェントインタラクション[139, 140] という考え方が登場している。

ヒューマンロボット（エージェント）インタラクションを考えたとき、現実的には図 2.1 のように、人間-ロボット間のインタラクションの他に、人間-環境間、ロボット-環境間を含む、3 項インタラクション [74] を考える必要がある。たとえば、掃除ロボットを用いて部屋の掃除をする場合、ロボットは自律的に掃除をするが、人間から指示があったときは、そちらを優先する。人間も同様に、部屋の状態を確認しつつ、必要に応じてロボットの操作を行う。ロボットが完全に自律動作し、人間が不在のときに作業を行うのであれば、ロボットと環境のインタラクションのみを考えれば良いが、家庭用ロボットを前提とすると、多くの場合は、人間とロボットが同じ空間を共有すると考える方が自然である。

2.1.2 ロボットと身体性

インタラクションは、それを支える個々の物理的要素の特性と分離して考えることはできない [60]。つまり、物理空間で行動するエージェントは、必ずその身体の大きさ、重さ、形状、運動能力などの制約を受けることとなり、エージェント-環境間、もしくは、エー



図 2.2 Robovie

ジェント-エージェント間のインタラクションにおいて、それらの制約と切り離してインタラクションを扱うことはできない。このように、インタラクションを支える物理的要素の特徴であり、制約を与えるものを身体性と呼ぶ。インタラクションの主体であるエージェントの身体性は、近年注目されつつある [3, 61]。寺田ら [121] は、身体性の制約が認知機能、特に視覚認識に果す影響が大きい [99] ことに注目し、視覚を有するエージェントが、自身の身体性に基づいて内部表現を獲得する手法について議論している。また、神田ら [47, 45, 48] は、人間とのインタラクションを重視して、研究用プラットフォームとして人間型ロボット Robovie (図 2.2) を開発している。

2.1.3 インタラクション設計

インタラクション設計とは、人間やエージェント、環境の間でやりとりされる情報と、その処理過程を設計すること [139] である。インタラクションとしての知的システムの構築を考えたとき、それを支える個々の物理的要素の特性（エージェントの身体性や人間の身体性）を特定しても、不確定な要素が多く、システムの振る舞いを決定することができ

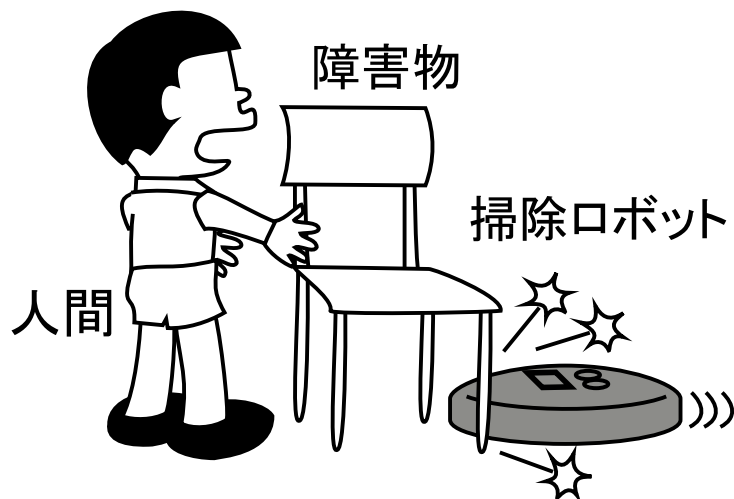


図 2.3 人間とロボットによる協調作業

ない．よって，システムがある目的を達成するためには，インタラクションを支える主体（人間やエージェント）や環境の間でどのような情報がやりとりされ，その情報がどのように処理されるかを適切に設計する必要がある．

インタラクション設計を行うためには，システムの目的が明確になっている方が望ましい．たとえば，図 2.3 のような，人間とロボットが協調して部屋を掃除する場合を考える．人間が障害物の移動を担当し，ロボットがゴミの回収を担当することで，システム全体として掃除作業の達成を目的とする．この例のように，ロボットの身体性やシステムの目的は，人間，ロボット，環境の間でやりとりする情報と，その処理過程を設計するときの制約となるため，インタラクション設計はこれらの要素を考慮して行う必要があるとともに，ロボットの技術開発もインタラクション設計の一部として扱われる．インタラクション設計とはトップダウンなアプローチである．

2.1.4 構成論的アプローチ

インタラクション設計がトップダウンなアプローチであるのに対し，ボトムアップなアプローチである，構成論的アプローチ [36] がある．構成論的アプローチは，認知ロボティクス [3] の分野において，環境と相互作用しながら経時的に発展するシステムの原

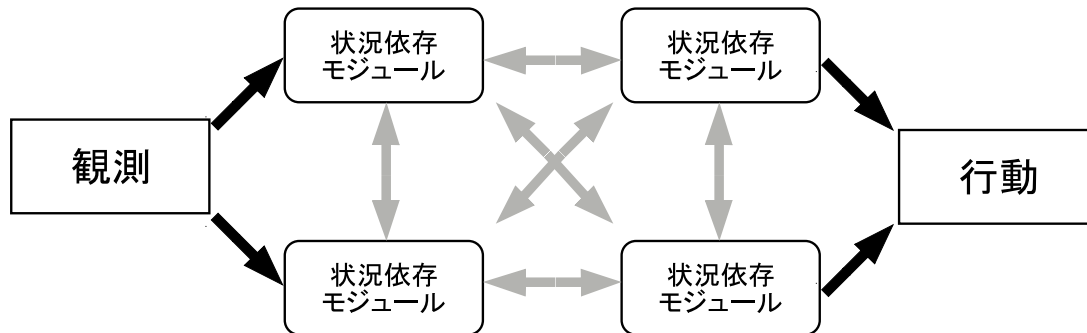


図 2.4 状況依存モジュールに基づくアーキテクチャ

理を探究することを目的に，仮説と検証の繰り返しによって実現される方法論である．特に，人間とロボットとの円滑なコミュニケーションに関する研究においては，前もってロボットに人間との関わり方を明確に記述しておくことができないために，トップダウンな設計方法を適用するのは難しい．石黒ら [35] は，特定の環境で特定の動作のみを実行するモジュールを数多く準備しておく，状況依存モジュールによるアーキテクチャ（図 2.4）を提案している．状況依存モジュールによるアーキテクチャは，数多くの状況に依存したモジュールと部分的に決定された遷移ルールのみで構成されている．反射的行動に基づくアーキテクチャである，サブサンプリングアーキテクチャ [8] との違いは，並列実行可能な反射行動を最小単位にしておらず，モジュールのネットワーク構造を完全に決定していない点である．

2.1.5 まとめ

上記のように，ヒューマンロボットインタラクションは，ロボットと人間によるインタラクションとしての知的システムの構築を目的とする研究分野である．しかし，何をもって知的システムとするかは，対象とする問題に依存する．高度な協調作業の達成をもって知的システムと呼ぶことも可能であり，円滑なコミュニケーションの成立をもって知的システムと呼ぶことも可能である．また，車輪のみを持つ移動ロボットを用いたものから，人間型ロボット（ヒューマノイドロボット）を用いたものまで，様々なロボットの身体性が研究対象となっている．以降では，インタラクションを重視した，ヒューマンロボット

インタラクションに関係の深い究事例を紹介する。

2.2 ロボットの役割による分類

ここでは、ヒューマンロボットインタラクションに関する研究を、ロボットの役割によってツールとしてのロボットとソーシャルアクターとしてのロボットの2つに分類する。この分類はコンピュータの役割に基づく分類 [19] を参考にしているが、ロボットを「コンピュータ+身体」と考えれば、ヒューマンロボットインタラクションに関する研究に適用することは妥当であり、本研究の位置付けを明確にする上でも有効であると考えられる。

ツールとしてのロボット

ロボットを道具（ツール）として扱うことを重視した研究。人間の作業を支援することを目的としてロボットを用いているもの。掃除ロボットや書類配送ロボットなどが挙げられる。

ソーシャルアクターとしてのロボット

ロボットを社会的行為者（ソーシャルアクター）として扱うこと重視した研究。人間どうしの社会的な関係のように、人間-ロボット間で社会的な関係を構築することを目的としたもの。

2.3 ツールとしてのロボット

ロボットをツールとして扱う場合、ロボットが自律的に考え適切に行動できれば人間が介入する必要はない。しかし、現在の技術ではロボットを完全自律で行動させることはできない。そのため、人間が適宜作業に介入し、ロボットを適切に制御する必要がある。以下では、どのようにして人間がロボットを制御しているかに着目して分類を行う。

2.3.1 ジェスチャの利用

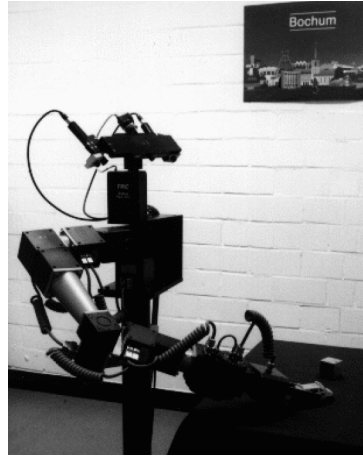
ロボットをツールとして扱うとき、人間がジェスチャを用いることでロボットを制御する方法がある。Triesch ら [123] は、3自由度のステレオカメラとアームを持つロボット（図 2.5a）を用い、人間の手形状の認識とトラッキングを行うシステムを構築してい

る．Marrone ら [65, 110] は家庭用のサービスロボットとしてクリーニングロボット（図 2.5b）を提案しており，人間が指でさした場所の掃除を行うロボットを開発している．また，Waldherr ら [129] においても，掃除タスクにおいて，ユーザが Amelia という移動ロボット（図 2.5c）を特定の場所にジェスチャで移動させる問題を扱っている．その実験では，ニューラルネットベースとテンプレートベースとのジェスチャ認識を比較している．

村嶋ら [71] は，あらかじめ意味を決めておくジェスチャではなく，人間によって即興的に作られた未知のジェスチャをロボットが学習するシステムに関する研究を行っている．自動走行する車椅子（図 2.5d）を用い，ユーザが車椅子から降りているときに，ジェスチャで車椅子の操作を行うことを想定している．自動車椅子は，ジェスチャの意味を推定し，推定した意味を行動で提示し，その行動に対する人間の反応をみて評価する．未知のジェスチャを切り出す方法として，何か意図を持ったジェスチャは何回か繰り返されるというヒューリスティックを用い，人間の反応の認識には，「人間の指示に合致した行動をロボットがとった場合には同じジェスチャか，それを少し小さくしたジェスチャを行う．指示と異なるときは，他のジェスチャを行う．また，一般に意思が伝わらないとジェスチャは大きくなる」というヒューリスティックを採用している．このシステムを用いたときのユーザの負荷に関する実験は行われていないが，周期的な運動は脳に負担をかけないという報告 [102] があるように，ジェスチャの繰り返しがユーザの負担にならないのであれば，さらに有用性が高くなると考えられる．

2.3.2 力の伝達

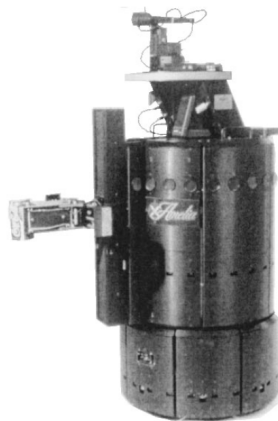
物体を搬送するツールとしてロボットを用いた研究がある．人間とロボットによる長尺物や机などの物体運搬（図 2.6a,b）に関する研究 [117, 1, 24, 76] や複数のロボットによる物体搬送（図 2.6c）に関する研究 [25] がある．これらの研究では，人間が力を伝えることでロボットの制御を実現している．人間とロボットの協調タスクのモデリングに関する研究 [31] においては，「力のやりとり」を通して人間の行動にロボットが同調し，物体搬送を行う手法などについて議論されている．また，屋外での人間とヒューマノイドロボットとの協調作業に関する研究 [144, 145] においても，人間とヒューマノイドロボットが一つの物体を協力して運ぶ作業を実現（図 2.6d）しており，物体を通した力の伝達によってロボットを制御している．



(a) Triesch らのロボット [123]



(b) CleaningAssistant[110]



(c) Amelia[129]

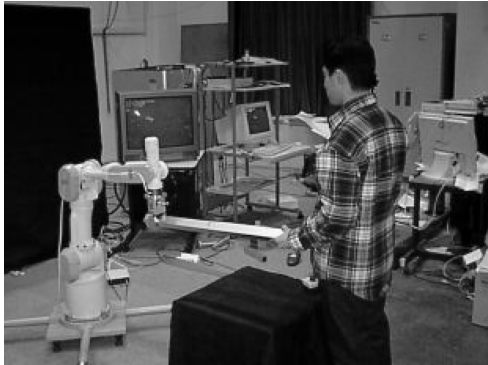


(d) 村嶋らの知的車椅子 [71]

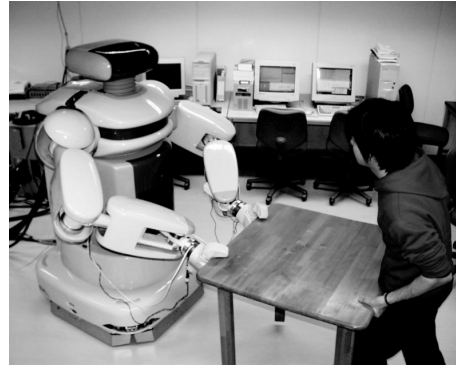
図 2.5 ジェスチャによるロボットの制御

2.3.3 自然言語の利用

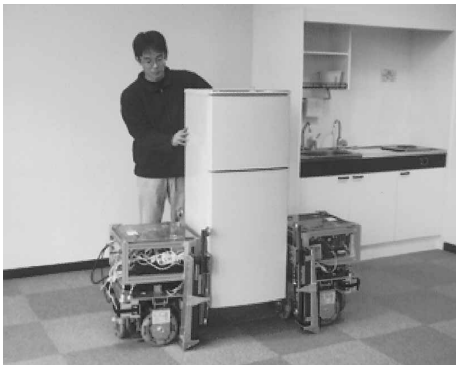
自然言語を用いてロボットを制御する方法に関して、梶川ら [43] の音声によるロボットの位置制御に関する研究が挙げられる。ロボットに対し、「もうちょっと」といった曖昧な表現を用いた指示を行うことでロボットの位置制御を実現している。また、Lauria ら [64] は、自然言語による小型移動ロボット（図 2.7a）のプログラミングに関する研究を



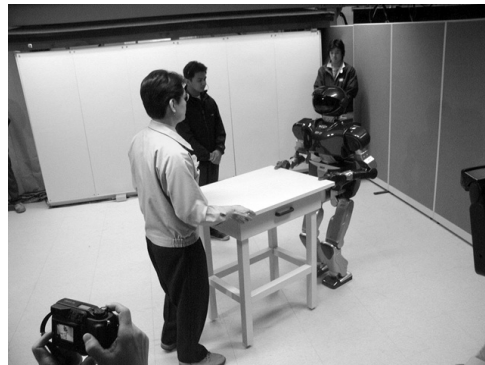
(a) Hayashibara らのシステム [24]



(b) MR Helper[76]



(c) DR Helper[25]



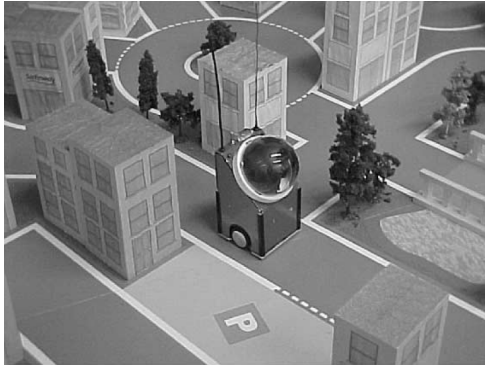
(d) HRP-2P[145]

図 2.6 力の伝達によるロボットの制御

行っている．吉崎ら [146] においては，人間が音声で指示したものを認識する，視覚と音声入力統合されたロボットに関する研究（図 2.7b）を行っており，視覚認識のロバスト性と効率の向上を実現している．植田ら [124] は，機械の持つ機能をツリー構造による整理された形式でユーザに提示する方法を提案し，コピー機を想定したインタフェースを実装し被験者実験を行っている．実験の結果，従来の操作方法と比較して，初心者のエラー回数やタスク達成速度が改善されることが報告されている．

2.3.4 遠隔操作

遠隔地からロボットを操作し，作業に従事させる場合，通信遅延が大きな問題となる．ユーザが直接制御を行おうとしても，フィードバックが遅く，リアルタイムでの操作が困

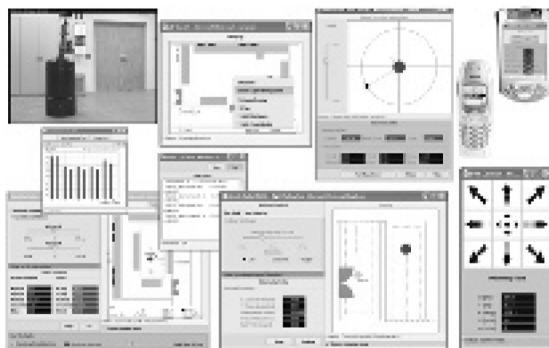


(a) Lauria らの小型移動ロボット [64]

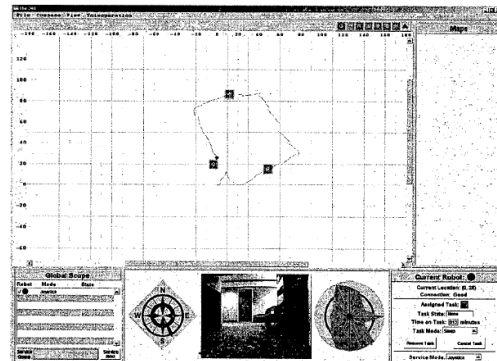


(b) 吉崎らの移動ロボット [146]

図 2.7 自然言語によるロボットの制御



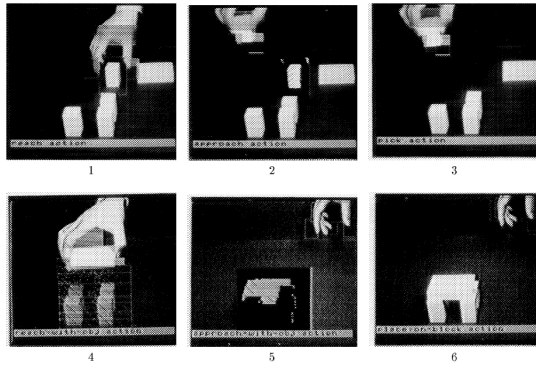
(a) Khamis らの操作画面 [51]



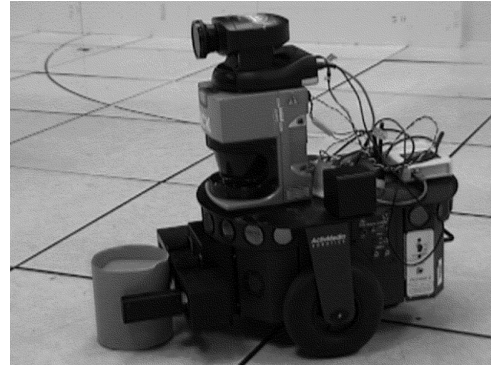
(b) Crandall らの操作画面 [16]

図 2.8 遠隔操作によるロボットの制御

難なため、非常に操作が難しい。このような問題に対し、ユーザとシステムのインタラクションに着目した、移動ロボットの遠隔操作に関する研究 [51] がある (図 2.8a)。また、Crandall ら [15, 16] は、人間がロボットに介入する度合いと、ロボットのパフォーマンスに着目し、ロボットの自律性を調節できるシステム (図 2.8b) を開発している。



(a) ロボットによる行為の認識 [59]



(b) 移動ロボット Pioneer 2DX[87]

図 2.9 ロボットへの教示

2.3.5 教示の利用

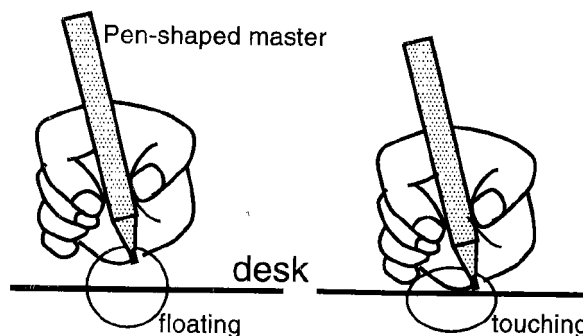
ロボットに何らかの作業を遂行させる場合に，人間がロボットに教示することで望ましい動作を学習させる方法がある．國吉ら [59, 62] は，人間が行った動作をカメラ撮影によってロボットが模倣するシステム（図 2.9a）を開発している．Nicolescu ら [87] はロボットの移動経路を制御するのに色のついた複数のボールを用い，ロボットに色を提示して教示するシステム（図 2.9b）を開発している．あらかじめ通過すべき順序でボールの色を教示することで，ロボットは適切な経路を自動的に生成して移動することが可能である．また，Kaplan ら [49] は，犬型ロボットに行動を学習させる方法として，動物のトレーニング方法である，クリックトレーニングを導入し，ロボットへの教示を実現している．

2.3.6 意図の伝達

明示的にロボットに命令を送るのではなく，ロボットに人間のしぐさを読み取らせ，自律的に動作させる方法がある．寺田ら [120] はアフォーダンス [50] に基づき，自律移動椅子（図 2.10a）を開発している．自律移動椅子は，人間が椅子に座りたいという意図を示すしぐさを行ったときに人間に近づく．佐藤ら [100, 101] は，ペン型インタフェースによってロボットアームを制御するタスクにおいて「ペンを持つ手が机に触れれば微動，触



(a) 自律移動椅子 [120]



(b) ペンの使い方の違い [101]

図 2.10 意図の伝達

れなければ粗動を意図している」(図 2.10b) というヒューリスティックを用い、ロボットアーム挙動を切り替えるシステムを開発している。一般に、意図理解には特定のタスクに関する膨大な知識やモデルが必要とされ、その処理コストも高い。

人間の意図理解に関するものとして、デネット [17] による志向姿勢に関する研究がある。デネットは、人間が自律システムの行動を理解するとき、その振舞いの複雑さに応じて、物理姿勢、設計姿勢、志向姿勢、の3つの姿勢 (stance) をとると述べている。以下に各姿勢について説明する。

物理姿勢 あるシステムの行動を予測するとき、その物理的組成やそのシステムへの影響の物理的性質を決め、ニュートン力学をはじめとする物理学の法則に関する知識を用いて任意の入力に対する出力を予測することを「物理姿勢をとる」という。この戦略は常に实际的だとは限らないが、原理的には常に有効だというのが物理科学の定説である。

設計姿勢 対象の物理的組成の実際の細部は無視され、その対象がある設計意図を持っているのを前提として、様々な状況で設計どおりにふるまうと予測することを「設計姿勢をとる」という。目覚まし時計を例に挙げると、時計の仕組み（ネジ巻き式、バッテリーなど）を知らなくても、いつ時計が鳴るかは誰でも予測できる。人工物だけでなく、多くの生物学的対象（植物と動物 / 腎臓と心臓 / 雄しべと雌しべ）も設計姿勢から予測可能なふるまいをする。これは、物理システムであるとともに、設計システムでもあると解釈できる。

志向姿勢 ある対象のふるまいを予測するための戦略。物理姿勢と設計姿勢と並ぶ戦略。志向姿勢は、ふるまいを予測する対象に信念や欲求などの心的状態を持つ合理的行為者として扱うことで成立する。（デネットはこの戦略によって対象のふるまいが十分予測可能であれば、それがシステムであっても信念者と呼ぶものとしている。）その対象の世界における位置や目的から、それが持つはずの信念を推測すること、また、どんな欲求を持つはずかを推測し、最終的にその信念に照らしてその対象（合理的行為者）が目的を達成するために行動するだろうと予測することを「志向姿勢をとる」という。

2.3.7 適応の利用

ロボットが効率的に作業を遂行するために、環境に適応して行動することが求められる。山田ら [139] は適応のためのヒューマンエージェントインタラクションの研究において、エージェントによる効率的な適応を実現するインタラクションモデルを提案している。山田らはエージェントとして Microsoft Agent に代表される擬人化エージェントのようなソフトウェアエージェントからロボットまでを対象としており、広い範囲への応用を視野に入れたモデルの提案を行っている。山田らはエージェントのタスクを自律的タスクと対話的タスクに分類した上で、それぞれのタスクにおけるタスク達成のためのインタラクションと適応のためのインタラクションについて論じている。自律タスクとは、自律ロボットや自律ソフトウェアエージェントが人間とのインタラクションなしに単独で達成するタスクである。したがって、自律エージェントは環境とのインタラクションを行うことで情報を獲得し、物理的、または論理的操作などの行為を行う。このような自律タスクのインタラクションは図 2.11(a) のように表される。

エージェントを A 、環境を E で表し、エージェントから環境への行為を I_{AE} 、エージェントによる環境の知覚を I_{EA} と表す。また、エージェントの環境への適応を L_E^A として

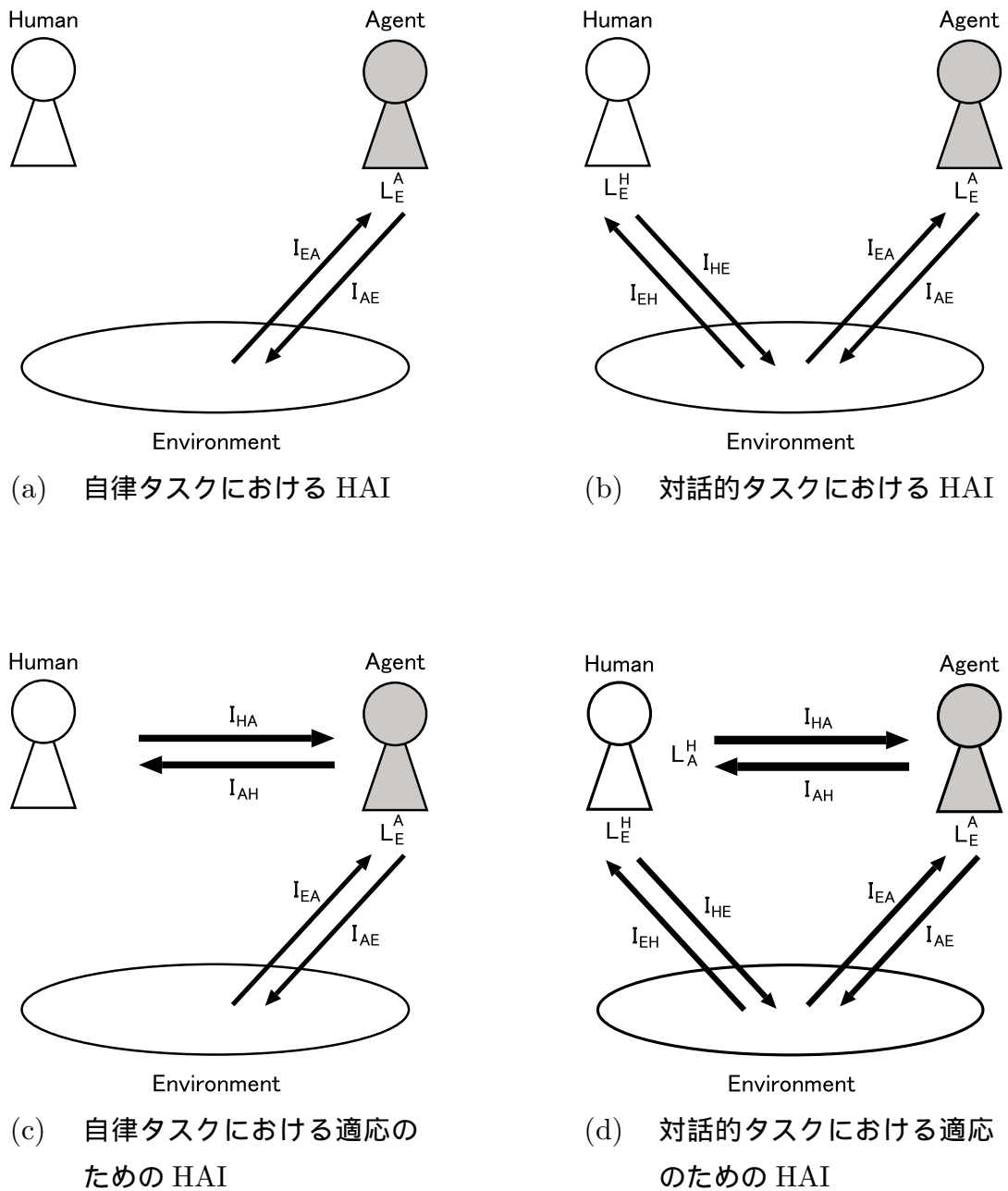


図 2.11 適応のための HAI モデル [139]

いる．これに対し，対話的タスクとは，エージェントと人間との情報伝達を基に達成されるタスクを指し，エージェントが人間同士の会話を仲介するといった研究が代表的である．このような対話的タスクにおいて，人間とエージェントが情報伝達する際，音声や表情，ジェスチャなどによって情報を表現する必要がある．山田らはこのような情報の外化に必要な媒体を情報メディアとして環境に含めている．対話タスクのインタラクションは図 2.11(b) のように表わされる．(a) と同様に，エージェントの情報を外化する環境への行為を I_{AE} ，エージェントによる環境（外化情報）の知覚を I_{EA} ，人間の情報外化に伴う環境への行為を I_{HE} ，人間による環境の知覚を I_{EH} とする．また，エージェントの環境への適応を L_E^A とし，人間の環境への適応を L_H^H のように表している．

ここで山田らは，これまで行なわれてきた機械学習におけるエージェントを環境に適応させる試みは，可能な限り環境とのインタラクションのみにより行うことで自律適応を目指してきたことに注目し，そのような適応の実現困難な点を問題視している．そこで，人間-エージェント間に新たに適応のためのインタラクションを導入し，これが人間とエージェントの適応を促進する，現実的で有効なアプローチであると主張している．このような適応のためのインタラクションを導入した自律タスクにおける HAI を図 2.11(c) に，対話的タスクにおける HAI を図 2.11(d) に示す．それぞれ，人間からエージェント I_{HA} ，エージェントから人間 I_{AH} へのインタラクションが追加されており，これが導入前との違いである．導入によってどの程度人間の学習 L_E^H やエージェントの学習 L_E^A が効果的または効率的に実現できるかは I_{HA}, I_{AH} でどのような情報がやりとりされるかによって決定し，それらを導入する際の人間の負担が大きすぎる場合には， I_{HA}, I_{AH} を実現できるメリットに見合わないとしている．このことから，学習の効果的な実現のためには I_{HA}, I_{AH} をどのように設計するかが重要な問題であり，このような設計問題を指して適応のための HAI 設計と呼んでいる．

2.4 ソーシャルアクターとしてのロボット

ロボットを社会的存在として扱う多くの研究 [20] がある．それらは人間の心理や身体動作，言語や社会的役割を持たせることで人間との関係を構築することを目的としている．特にロボットの身体を活用することで非言語情報の伝達を有効に利用している例が多くみられる．人間が用いる非言語情報に関しては，網羅的な研究として Morris[68] による非言語的社会信号に関するものや，Vargas[127] による研究が詳しい．また，HAI[139] の目的も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であり，エー

ジェントを擬人化して扱っている点からもソーシャルアクターとしてのロボットと関係が深い。

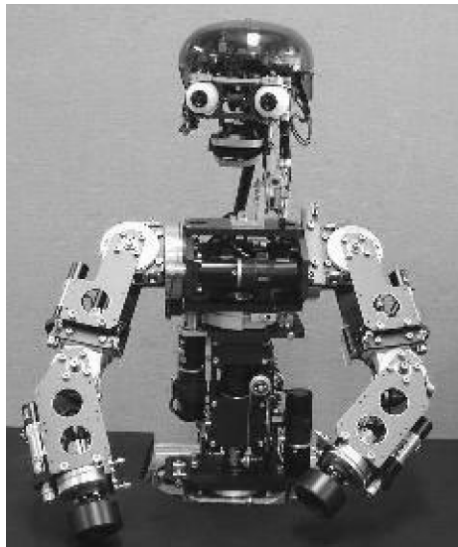
2.4.1 心理状態の表現

人間は相手の意図や心理、態度を敏感に読みとることで自身の振る舞いを変更し、適切に行動することができる。ロボットに人間のような心理を持たせることができれば、人間はロボットを社会的な存在として受け入れることができると考えられる。

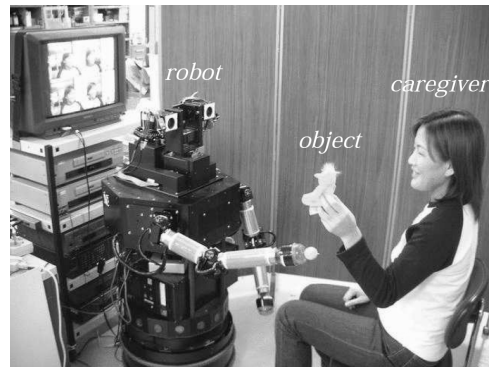
心の理論

ロボットに人間のような心理を持たせることで社会的関係の構築を図る研究がある。コミュニケーションにおいて、人間は互いに相手の意図や気持ち、つまり心を推察している。このような相手の心を読むしくみを論じたものとして「心の理論 [6]」がある。小嶋 [55] は、心の理論における他者の心を読む能力をロボットに実装するにあたり、幼児型ロボットである Infanoid (図 2.12a) を開発し、社会的インタラクションを通してコミュニケーション能力を獲得していく発達モデルに関する研究を行っている。長井ら [72, 73] も同様に、学習によって心の理論における共同注意を獲得するロボット (図 2.12b) に関する研究を行っている。牛田らは心を持った機械の実現のためには、(1) 人間にとって自然な方法で対話できること、(2) 自律的に行動して人間と協調できること、(3) 対話を通して人間に親近感や安心感など精神的価値を与えることを挙げており、機械の心と意識のモデルとして MaC モデル (Mind and Consciousness Model) [126, 77] を提案している。小野や今井ら [94, 93, 32, 33] は、ユーザとロボットとの親和性を高めることにより、ロボットの心理状態の理解を促進する研究を行っている。実験において、被験者はまず、ソフトウェアエージェントを PC 上で飼育する。そして、そのエージェントが PC のモニタから移動ロボットのモニタに遷移する様子を観察する。PC 上から移動ロボットにエージェントが移動するシステムは ITACO システム (図 2.12c) と呼ばれる。遷移後、エージェントを表示したロボットは障害物の前で援助を要求する聞き取りにくい音声を発話する (図 2.12d)。実験の結果、エージェントを飼育した経験のあるグループは、経験のないグループよりも、援助する率が有意に高く、エージェントの飼育経験により、親和性を持つようになることが示されている。

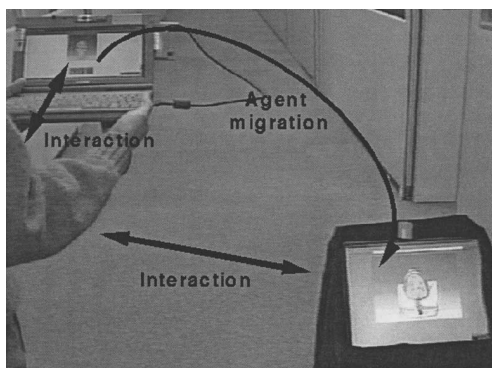
板倉 [40] は、心の理論を利用し、5, 6 歳児を対象に人間型ロボットを用いた誤信念課題の実験を行っている。誤信念課題とは、ある事象を見た人とそれを見ていない人との心



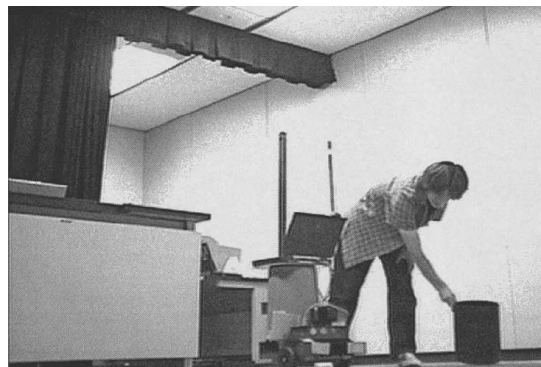
(a) Infantoid[55]



(b) 養育者とロボット [72]



(c) ITACO システム [32]



(d) 援助を要求するロボット [32]

図 2.12 心の理論とロボット

的な差異はどのようなものを答える課題である。被験者に次のような劇を見せる例がある。「サリーがおもちゃを青い箱に隠し、部屋の外へ出ていく。入れ替わりにアンが入ってきて、おもちゃを青い箱から赤い箱に移してしまう。その後、再びサリーが部屋に戻ってくる。」この劇を見た被験者に「サリーはどちらの箱を探すか？」と質問する。「青い箱」と答えれば、他者であるサリーの心的状態を自分自身に帰することができたといえる。これまでの発達心理学の研究により、ヒトの3才児は誤信念課題に答えるのは難しく、5、6才児は見ることと知ることの関係を理解できるようになり誤信念課題に正答することが

明らかになっている。板倉は、上記の例のサリーに人間型ロボットを用いた場合と、人間が行う場合との2つの映像を用意し、それぞれの映像を5, 6歳児に提示する実験を行っている。実験の結果、「どちらの箱を探すか」という問いには、正しく「青い箱」と回答しロボットと人間の差はないが、「どちらにおもちゃが入っていると思うか」という心理動詞を用いた問いに対しては、人間の場合では正しく「青い箱に入っていると思う」と答えられるが、ロボットの場合では答えがランダムになると報告している。この結果を受け、心理動詞をロボットに帰属させるような振る舞いを考えることが、今後の重要な課題だと述べている。

感情と態度

ロボットに感情を持たせることで社会的な関係の構築を目指した研究がある。Breazealら[7]は、言語の内容には踏み込まず、韻律パターンに着目し、賞賛、拒否、注意、快適といった感情的な意図の認識と表現を行うロボット(図2.13a)を開発している。Moshkina[69]らは、犬型ロボットであるSONY AIBO(図2.13b)を用いて、感情と個性の計算モデルを実装する研究を行っており、被験者実験の結果、感情モデルを持たせたロボットの方が人間にとってより楽しいと感じるインタラクションが可能であることを示している。また、小松ら[58, 56]の単純なビープ音による態度推定の研究がある。実験では、電話中にコンピュータが発していると想定した、周波数の異なるビープ音を提示し、被験者が合意、非合意、中立のうち、どの態度を感じるかを調査している。実験の結果、態度の判定に一定の傾向が発見されている。この研究は、ビープ音という非常に単純な刺激に対しても、人工物による態度表出が可能であることを示した先駆的なものである。

2.4.2 身体的特徴の利用

相手のしぐさや容姿などの身体的特徴が人間どうしのコミュニケーションにおいて果たす役割は大きい。以下ではロボットやエージェントの身体的特徴が人間に及ぼす影響を考慮した研究を示す。

ロボットのしぐさや形状

適切なしぐさを行わせたり、形状を工夫することで社会的関係を構築しようとする研究がある。ここではロボットに限定せず、ロボットにおいても実装可能であると考えられるヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究も示す。渡辺や石井ら

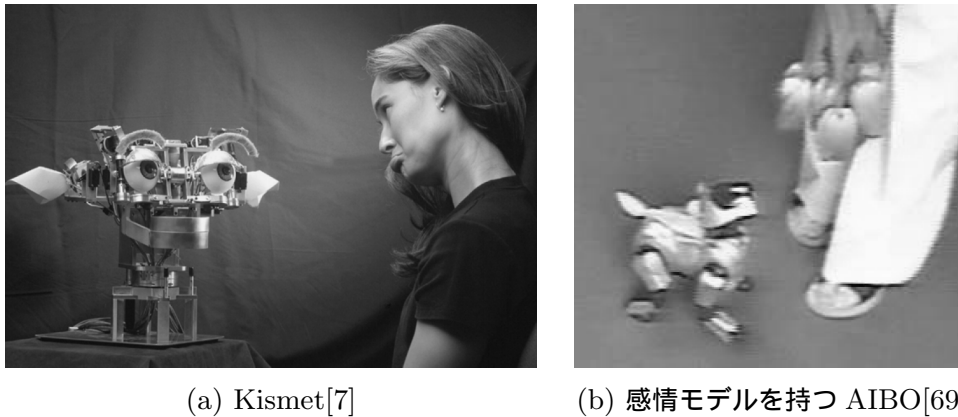


図 2.13 感情や態度の伝達

[132, 39, 131] は，うなずきにおける頭部の動きが，対話において重要な役割を果たしていることをバーチャル空間におけるアバターを用いた実験によって示している．また，バーチャル空間のアバターを実空間で再現した研究 [133, 130] においては音声からコミュニケーション動作を生成する InterRobot (図 2.14a) を開発している．石井ら [38] はバーチャル空間での二者のコミュニケーションにおいて，視点や自分のアバターの存在の有無などが，どのように話者に影響するかを調査している．実験の結果，横並びよりも対面させた方が評価が高く，自分のアバターと視線を重ねるような位置に視点を設定するユーザーにとっては，自分のアバターを半透明にする方がより好まれることが示されている．菅野ら [113] は，ジェスチャに代表される非言語情報と身体構造との密接な関係に着目し，非言語コミュニケーションのための人間型ロボット Hadaly-2 (図 2.14b) を開発している．末永ら [112] は，Human Reader と呼ばれる知的インタフェースを提案し，ユーザの頭部の動きや手指の動きを画像処理によってコンピュータで利用可能な形態に変換し，非言語情報を積極的に利用した実時間で動作するシステムを開発している．

また，ロボットの身体を用いた表現による人間心理への影響を調査した研究 [79] がある．中田ら [78] は，オオカミの社会的行動に基づいてロボットの対人行動を設計し，人間に対する親和感の演出方法を提案している．実験ではシャチ型のロボット (図 2.15) を用い，首の縦方向の動きによって，人間の動きに対して受容的な行動をとるなどしている．また，人間とロボットとのコミュニケーションを円滑にすることを目的として，くまのぬ



InterRobot[133, 130]



HadalY-2[113]

図 2.14 ロボットによる非言語情報の利用

いぐるみの形をしたロボット（図 2.16）が行うインタラクションの様式と，それに対する被験者の印象の関係を分析した研究 [81] や，人間型の上半身を持つロボット（図 2.17）の身体動作とそれに対する人間の印象を，物理特徴量としてラバン特徴量を用いて分析した研究 [80] がある．

神田ら [46] は，人間とかかわろうとする知能ロボットが人間に与える印象についての評価実験を行っている．実験では，ロボットが自らの意図を表現するために視線制御を行っており，これが愉快性や活動性についての印象に良い影響を与えることを示している．松丸ら [66] 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（図 2.18a）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．Severinson-Eklundh ら [105] は，サービスロボットにおけるインタラクションの社会的側面についての研究において，オフィス環境における書類の回収・配送を行う移動ロボット（図 2.18b）上に CREO（図 2.18c）と呼ばれる 4 自由度の頭と手を持つ人間型のロボットを配置し，簡単なジェスチャによるユーザへのフィードバックを実現している．

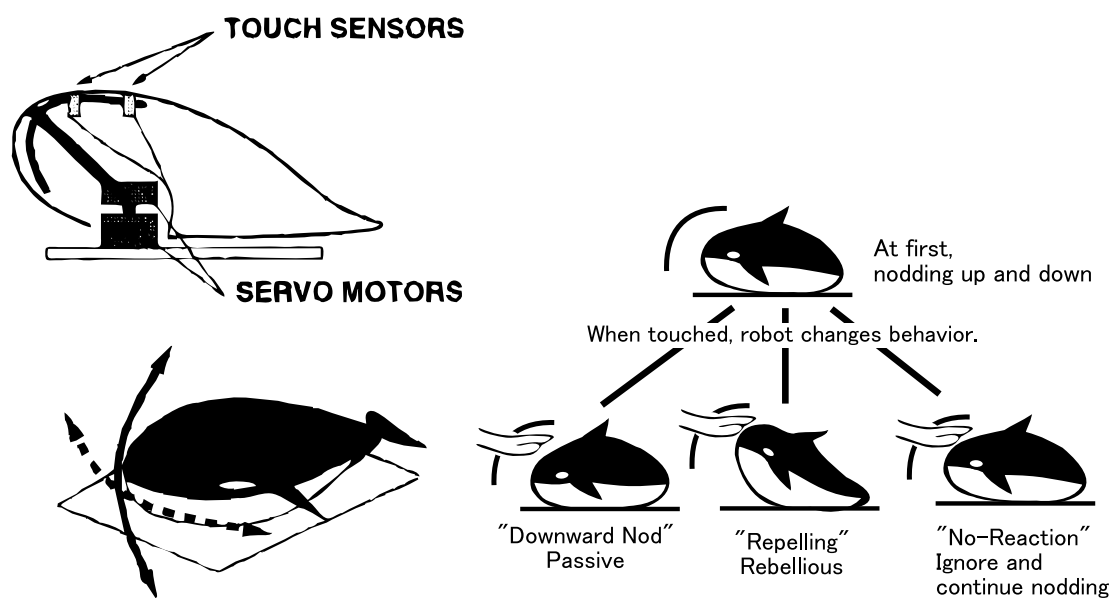


図 2.15 シャチ型ロボットによる身体表現 [78]

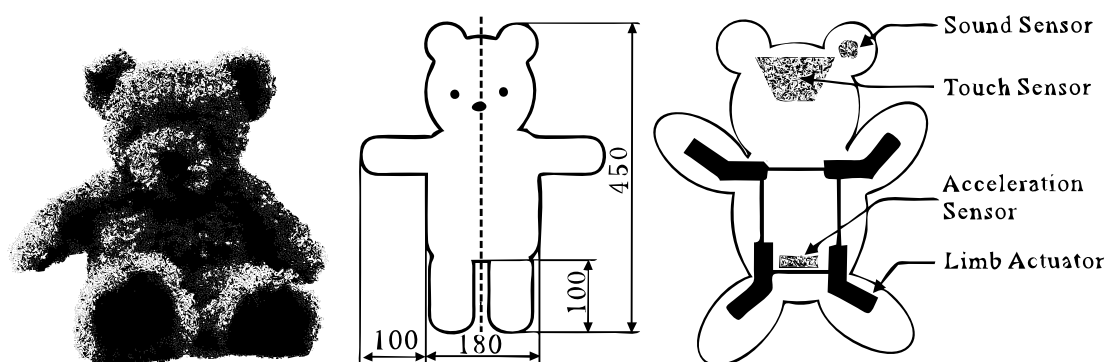


図 2.16 くま型ロボットによる身体表現 [81]

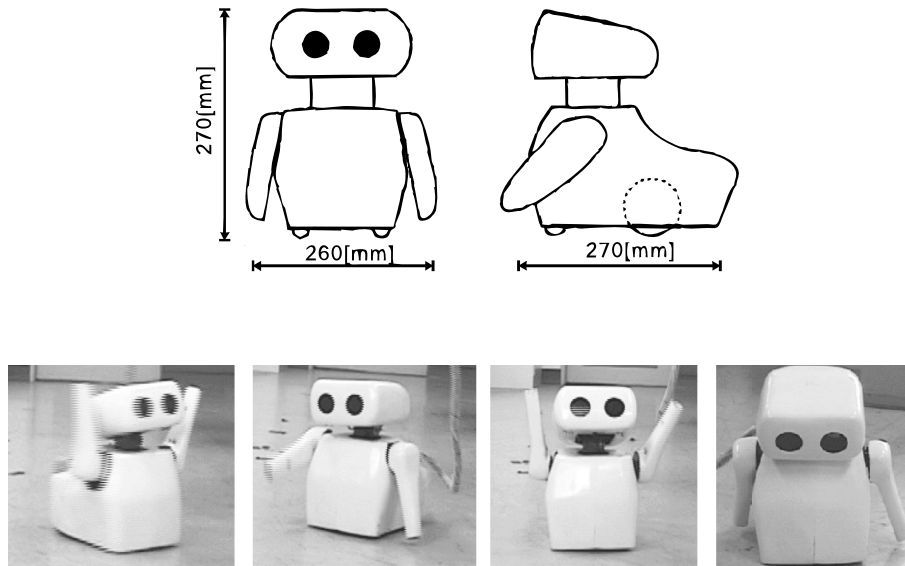


図 2.17 人間型の上半身を持つロボットによる身体表現 [80]

ロボットの動作速度

ロボットの動作速度が人間に与える影響を調査した研究がある。池浦ら [29] は、人間心理に脅威を与えないような動きをするロボットの必要性を主張し、シンプルなロボット（図 2.19）の動きに対する人間心理への影響を調査している。実験では、被験者の皮膚電気反射を測定し、実験後の聞き取り調査との相関をみることで評価している。実験用ロボットとして机の上に設置された直方体の箱を採用し、これが座っている被験者に近づく。このとき、ロボットの加速度や速度を変化させ、被験者の皮膚電気反射を測定する。実験の結果、ロボットの動き出しの加速度が大きいことが脅威を感じさせる要因となることが示されている。また、加速度が大きい場合と、最大速度が大きい場合とで明確な差はでていないが、加速度に関しては「驚き」、最大速度に対しては「恐れ」という感情を抱く傾向があることを考察している。

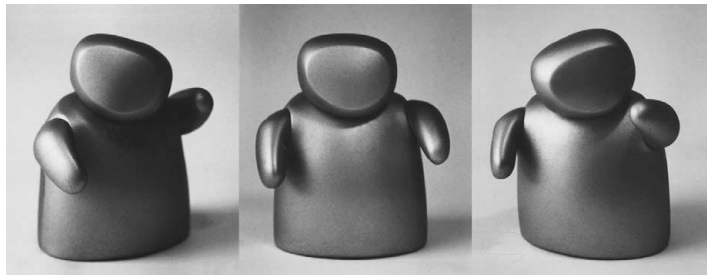
柴田ら [106] は、人間と動作空間を共有するロボットは、人間心理に好ましい必要があるとした上で、人間らしい動きをさせることの重要性を主張し、ロボットアームを用いた実験を行っている。実験の結果、上肢運動（産業用ロボットアーム）の動きに対する人間



(a) PMR-2R with eyeball expression[66]



(b) 移動ロボットと CREO[105]



(c) CREO[105]

図 2.18 しぐさや形状の影響

らしさに関して、以下のような知見を得ている。

速度ピークの位置 動作時間内における速度ピークの位置に依存し、速度ピークが動作前半の適切な位置にあると被験者は人間らしさを感じる。速度ピークが後半にあるものに対しては人間らしさを感じない。

最大速度 動作速度のパターンは同じでも、最大速度が異なる場合、最も人間らしさを感じさせる最大速度が存在する。その速度よりも早くなると人間らしさを感じない。

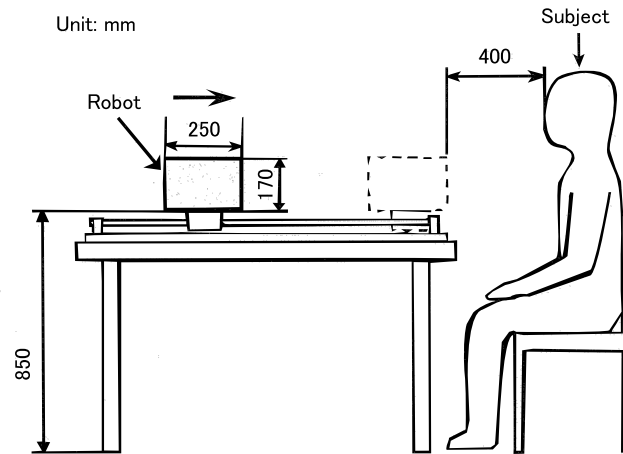


図 2.19 池浦らの移動ロボット [29]

人間らしさは快い 人間らしいという感情は快さに基づく感情に関係が深い．最大速度が一定の場合には，慎重さが人間らしさに関係する．

人間に受け入れられる条件を調査したものとして，パーソナル移動ロボット（図 2.20）の移動スピード，対人距離，外見のデザインに対する人間心理への影響に関する研究 [10] がある．

池浦ら [30] は，ダンシングロボットの動作計画に関する研究を行っており，ベースとなる多自由度のモデルから必要最小限の自由度を選択することで動作計画を容易にする方法を提案している．

2.4.3 言語の利用

自然言語を使うことによって，人間と同じような対話ができればロボットを社会的な存在として受け入れることが可能である．自然言語処理研究の初期に作られたものとして SHRDLU [135] が有名である．SHRDLU では，ディスプレイに表示された積み木の世界（図 2.21）において，ユーザが自然言語でディスプレイ内のロボットアームに命令を出し，状態を変化させることができる．

岩橋 [41] は人間とロボットとの言語コミュニケーションによる相互理解実現のために，

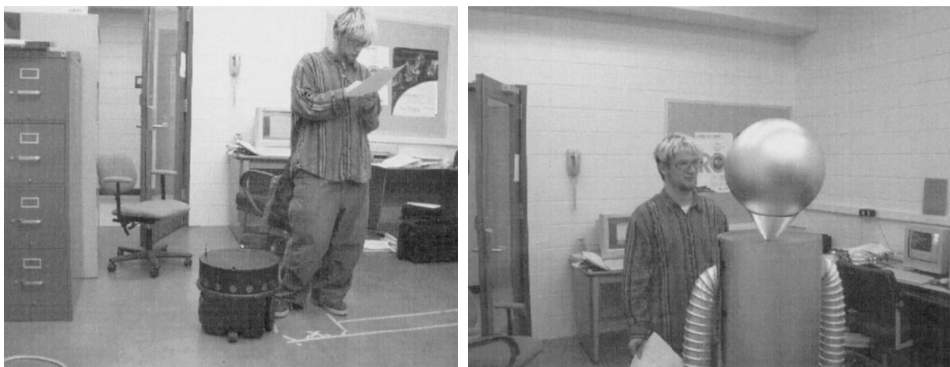


図 2.20 Butler らの移動ロボット [10]

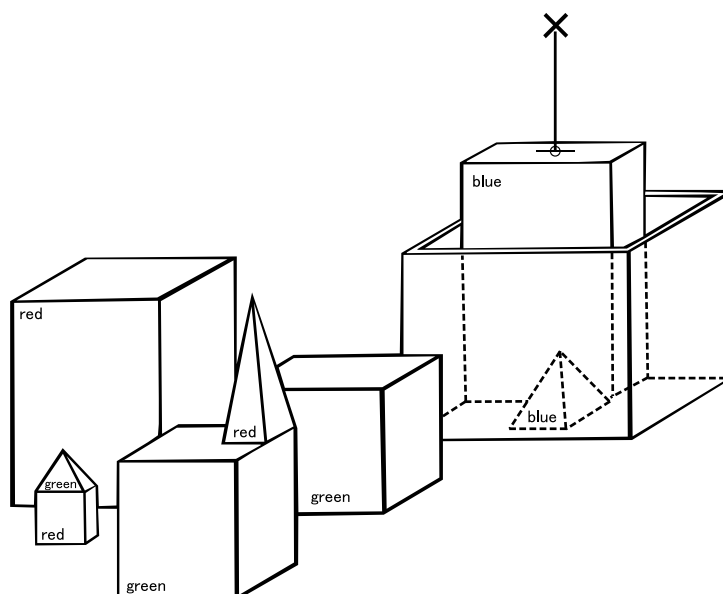


図 2.21 SHRDLU の画面

ロボットによる言語獲得に関する研究を行っている．田中ら [118] は，閉じた記号系としての言語処理と，閉じた制御系としてのロボットの行動を統一的に扱うため，仮想世界の中に存在する複数のソフトウェアロボットと音声対話によってインタラクションすることができるシステムを開発している．大久保ら [92] は，「覚醒 不覚醒」という言語に含まれる2つの態度を，韻律とスペクトル包絡の特徴によってどの程度表現できるかの試聴評価に関する研究を行っている．実験では，話者の内的な評価を表す指標として「快 不快」，「覚醒 不覚醒」という2つの態度を採用している．実験刺激として，プロのナレータが対話の中で意図的に心的態度を含んで発話した音声をを用い，そこから韻律パターンを抽出し，合成音声を作成している．被験者実験の結果，原音声のスペクトル包絡を保存すれば「快 - 不快」の特徴を残せ，韻律を保存すれば「覚醒 - 不覚醒」という特徴が合成音声に残せるという知見を得ている．

2.4.4 社会的役割の利用

人間社会における役割をロボットに演じさせることで社会的関係を構築する研究がある．たとえば，教師と生徒の関係や医者，友人，ペットといったものが挙げられる．

ペットとしての役割

柴田 [107, 108] はアザラシ型ロボット（図 2.22a）を開発し，ユーザがロボットに触れたり，撫でるといった身体的なインタラクションを通して楽しみや心理的な安寧を得ることを報告している．納谷ら [83] においても同様に，人間の触覚に着目し，人間-ロボット間の触覚インタラクションに関する研究を行っている．エンタテインメントとしての利用に関して，Arkin ら [2] による，動物行動学に基づく感情モデルに関する研究がある．

医者としての役割

自然言語処理研究の歴史で初期に作られた ELIZA [134] は，あらかじめ用意したキーワードとのパターンマッチングを行うことで精神科医をシミュレートしたプログラムである．ユーザはキーボードから自然言語を入力することによってコンピュータとのインタラクションを行う．シンプルな手法によるプログラムであるが，被験者実験では，人間が真剣に ELIZA と対話する様子が観察されている．



アザラシ型ロボット：パロ [108]



SONY の犬型ペットロボット AIBO[2]

図 2.22 ペットロボット

仲間としての役割

人間に対する態度や行動を対人行動と呼び，人間に対するのと同様な態度や行動を人間以外の人工物に対してとることを疑似対人行動と呼ぶ．山本 [141] は，ある対象に対する仲間意識や共感に着目しており，人為的あるいは工学的に対人行動を引き起こす条件として，仲間ではない存在がその前提となると考察している．また，西田 [89] は人間とロボットとの意思疎通を可能にする条件を特定するために，自律移動椅子とのコミュニケーション [120, 119] やウェイターエージェントを例題として扱っている．

人間の社会的役割の考慮

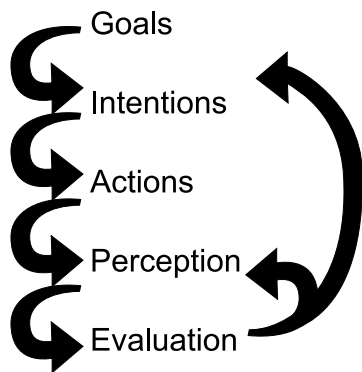
人間の社会的役割の違いによってインタラクションを分類した Scholtz による研究がある [103]．Scholtz は，以下に示すシナリオにおいて，人間とロボット間のインタラクションを人間の役割の違いで分類している．

Scholtz のシナリオ： ある老人養護施設は，入居者の介護のために何台かのロボットを導入している．管理者は施設内に分布しているロボットを監視して適切に機能しているか，また，入居者が介護されているかを，人間によるものかロボットによるものかに関わらず確認する．何名かの人間の介護士はロボット操作の専門家であり，その時の彼らの職務に応じてロボットを補助する．彼らのようなオペレータ

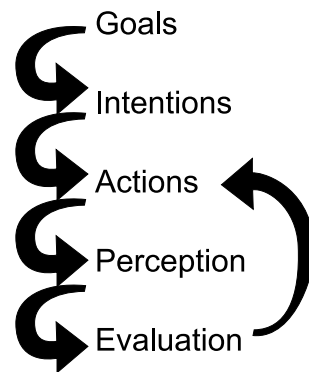
は、ロボットのソフトウェアパラメータを調節するための PDA のような携帯端末を持つ。この養護施設はメカニックを雇っており、彼らはロボットの物理的な能力の調整が必要になったとき（カメラが取りはずされたときなど）に呼び出される。介護ロボットは日課である食事の補助や支給物の配布、施設内での移動補助を行う。監視ロボットは入居者をモニターし、その断続的なビデオデータを送信するだけでなく、緊急時には管理者や近くの人間の介護士に警告を出す。多くの場合、人間の介護士と介護ロボットはチームとして行動する。重大な局面では、介護士はロボットに補助させるために、あらかじめ計画されたロボットの行動を破棄することができる。たとえば、入居者が倒れるなどの緊急事態により、その人を部屋の別の場所に移動しなくてはならないときが想定される。ロボットは入居者と対話可能であるとともに、ロボットの能力に気づいていない施設への訪問者とも対話することが可能である。

このようなシナリオにおいて、Scholtz は図 2.23 (a, b, c, d, e) に示す 5 つのヒューマンロボットインタラクションモデルについて説明している。これらは Norman の HCI モデルを基に作成されている。Norman のモデルとは、図 2.24 に示す行為の 7 段階理論 [90] のことを指す。その理論は、人間がどのように作業を行うかをモデル化したものであり、名前のとおり 7 段階の行為で構成されている。2 ~ 4 が実行過程であり、5 ~ 7 が評価過程である。このような行為遂行のサイクルにおいて、絶え間ないフィードバックループが存在している。多くの場合、この 7 段階すべてを経由する必要はない。

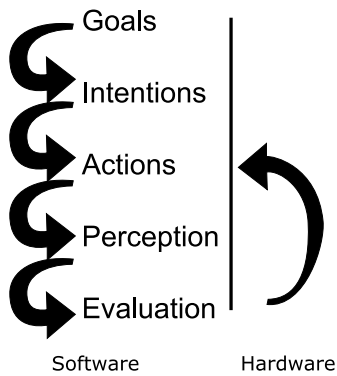
図 2.23 においては、「行為の詳細化」と、「外界の状況の解釈」が省略された形になっている。図中の矢印はフィードバックループを表わしており、図 2.23(a) の管理者-ロボット間のインタラクションにおいては、管理者の役割は全体の監視と制御であるので、管理者の主な行為ループは「外界の知覚」-「結果の評価」間と「ゴール/意図の形成」-「結果の評価」間となる。図 2.23(b) のオペレータ-ロボット間では、オペレータの役割がロボットの内部ソフトウェアモデルの変更であるため、主なループは「行為の実行」-「結果評価」間となる。図 2.23(c) のメカニック-ロボット間においては、メカニックはハードウェアの変更を扱い、オペレータのインタラクションと似ているが、その違いはソフトウェアではなくハードウェアの変更を対象としているため、初期の段階ではソフトウェアとハードウェア両方の観察が必要になる点である。図 2.23(d) の同僚（看護士）-ロボット間のインタラクションでは、看護士は管理者が定めた、より大きなゴール/意図の範囲内でロボットに命令を与えることができる。そのため、主なループは「(管理者が定める範



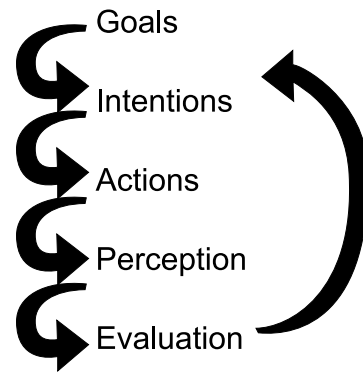
(a) 管理者-ロボット間



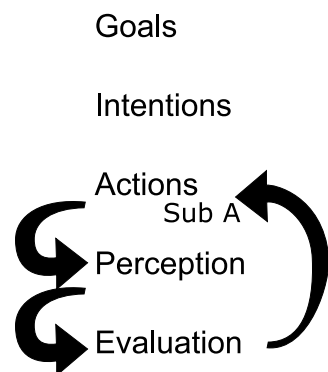
(b) オペレーター-ロボット間



(c) メカニック-ロボット間



(d) 同僚 (看護師)-ロボット間



(e) 傍観者 (訪問者)-ロボット間

図 2.23 Scholtz の 5 つのインタラクションモデル [103]

- | | |
|-------------|----------------------------------|
| 1. ゴールの形成 | (Formulation of the goal) |
| 2. 意図の形成 | (Formulation of the intention) |
| 3. 行為の詳細化 | (Specification of the action) |
| 4. 行為の実行 | (Execution of the action) |
| 5. 外界の状況の知覚 | (Perception of the system state) |
| 6. 外界の状況の解釈 | (Interpretation of the system) |
| 7. 結果の評価 | (Evaluation of the outcome) |

図 2.24 行為の7段階理論 [90]

囲内での)「ゴール/意図の形成」-「結果の評価」となる。また、必要に応じて、オペレータのインタラクションに切り替えることも可能である。図 2.23(e) の傍観者-ロボット間のインタラクションでは、傍観者に下位の行為の実行を許しており、たとえば、ロボットのすぐ目の前を横切ることによってロボットを停止させるようなものを指す。このように、「ゴール/意図の形成とは関係しないのが特徴的であり、「(下位の) 行為の実行」-「結果の評価」というループを形成する。

上記のように、Scholtz は異なるタイプのユーザによって異なるインタラクションが生じるというモデルを提案し、そこでやりとりされる情報を明確に示している。しかし、これらのモデルを用いた具体的な実験等を行なわれておらず、想定したシナリオにおける思考実験にとどまっている。

2.5 本研究の位置付け

図 2.25 に関連研究と比較したときの本研究の位置付けを示す。図 2.25 はロボットの役割がツールであるのか、ソーシャルアクターであるのかの2軸で表現したものである。ツール軸に関しては、使用時にユーザに負担をかけないものがより望ましいものであるという基準を採用し、ロボットをツールとして使用するとき、ユーザの負担が軽いと考えられるものを原点からより離れた位置に配置している。また、ソーシャルアクター軸に関しては、人間と同じよう関係を築くことが可能なソーシャルアクターがより望ましいという基準を採用し、人間に近い扱いが可能なものを原点から離れた位置に配置している。図中には「力の伝達」や「ペットロボット」などのキーワードを付記しているが、それらは研

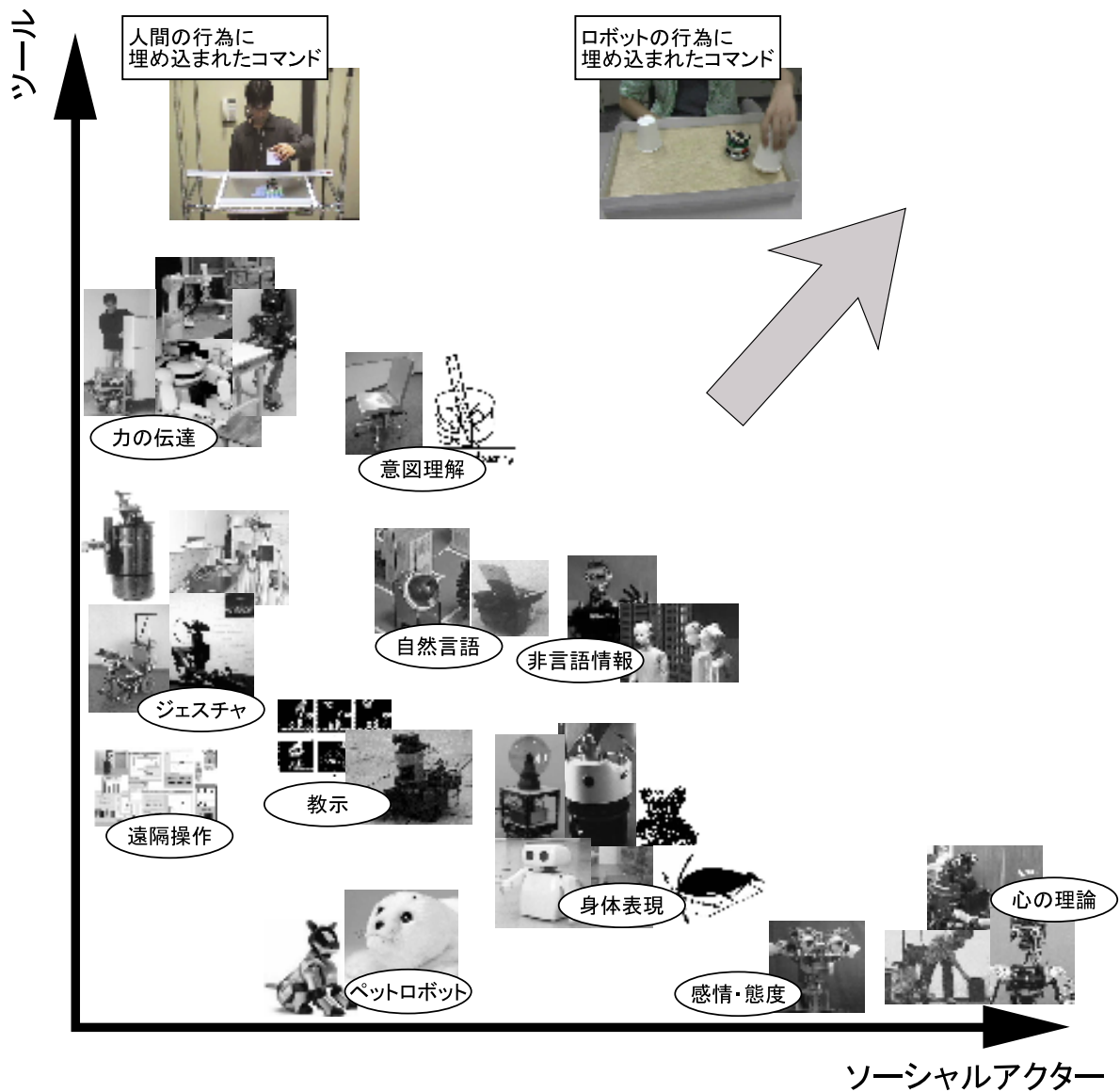


図 2.25 本研究の方向性

究例を表すラベルである。また、配置に関しては、本研究との関係をおおまかに示すことが目的であるため、図上の配置や距離は厳密なものではない。

本研究では人間の行為に埋め込まれたコマンド（第 3 章）とロボットの行為に埋め込まれたコマンド（第 4 章）の 2 つの内容を扱う。これらは図中の上部に配置した。「人間の

行為に埋め込まれたコマンド」を最上部に配置した理由は、既存の手法と比較してユーザへ負担がかからないためである。遠隔操作やジェスチャでロボットにコマンドを送信する場合には、操作方法やジェスチャを覚える必要がある。力の伝達に関しては特殊なコマンド送信方法を覚える必要がないためユーザに負担がかからないが、研究例にもあるとおり物体の搬送に関するタスクに限定された手法である。それに対し、提案手法はコマンド送信するための特殊な方法を覚える必要がなく、適用範囲も広い。さらに、意図理解のような複雑な処理が不要であり、ロボットの動きが緩慢になる要素がない。

「ロボットの行為に埋め込まれたコマンド」を図中の右上に配置した理由は2つある。1つは「人間の行為に埋め込まれたコマンド」が適用可能であるため、ツールとして負担のかからないものになっていることである。そのため、ツール軸でみたとき原点から離れた位置に配置されている。もう1つは、ロボットから人間に対して依頼をする場合に、人間へのコマンド（依頼）をロボットの行為に埋め込む方法によって人間が受け入れやすいものになっている点が挙げられる。これは、人間がロボットを社会的な存在として受け入れているために、ロボットのコマンドが理解しやすくなっていると考えられる。そのため、ソーシャルアクター軸からみたときに、原点から離れた位置に配置した。第4章で考察しているが、ロボットからのコマンドが理解しやすくなった原因を特定するためには、より多くの実験を行うことが望ましい。しかし、ツールとしてのロボットに社会性を持たせることで、結果的に作業効率を改善することが可能だと考えられる。

本研究の目指す方向は「ツールとして洗練されたソーシャルアクター」である。作業を実行する上でユーザの負担を軽減し、さらにユーザと社会的関係を築くことで、より適切な使い方に導くようなロボットが望まれる。これにより、ユーザが使用するうちに自然にロボットの機能を発見できるインタラクションによって、生産性が大きく向上すると考えられる。

第 3 章

人間の行為に埋め込まれたコマンド によるロボットとの協調

3.1 はじめに

近年，家庭用の実用ロボットが登場してきた．例えば，Roomba という掃除ロボット^{*1}は自律的に部屋の中を動きまわり，床の掃除を行う．そのロボットは単純な反射行動で経路を決定するが，製品としては初の本格的な家事ロボットとして注目されている．

しかし，実際に家庭でロボットを用いる場面を考えると，人間が干渉しなければならない場面が多々ある．たとえば，上記のような掃除ロボットはスイッチ 1 つで動作を開始するが，その前に人間がロボットのために部屋を整理する必要がある．これはロボットが単純な反射を繰り返し，環境の地図も持たないので，特定の領域に留まらないようにするためである．また，ある領域を集中的に掃除させたい場合には，リモートコントローラによって Roomba の移動を制御することができる．ここでは，このような人間がロボットに直接命令（コマンド）を送信して制御する方法を DCM（Direct Commanding Method）と呼び，HAI（Human Agent Interaction）のインタラクションモデル [139] をもとに，図 3.1 のように表す．本文中では，人間，ロボット，環境をそれぞれ H , R , E と記述し，人間から環境への行為を $H \Rightarrow E$ のように表す．したがって，上記のインタラクションは次のようになる．

- $H \Rightarrow R$: コントローラによるロボットの制御
- $R \Rightarrow H$: ロボットからのコマンド受信応答

^{*1} <http://www.irobot.com/consumer/>

- $H \Rightarrow E$: 障害物の移動
- $E \Rightarrow H$: 環境状態の知覚
- $R \Rightarrow E$: 掃除
- $E \Rightarrow R$: 環境状態のセンシング

このモデルでは、 $H \Rightarrow E$ は人間のタスクを達成するための行為、 $H \Rightarrow R$ はロボットを制御するための行為として区別される。このようなロボットへの干渉は、Roomba のような単純なロボットのみには当てはまることなく、今後ロボットが高機能化していった状況においても同様である。つまり、ロボットが完全自律で行動しない限り、人間の介入を必要とする。したがって、人間の行動をロボットの設計に取り入れるのが1つの現実的な解決策であると考えられる。

一方、人間の行動を設計に取り入れている例がある。実用化されているものでは、自動ドアや自動水栓などが挙げられる。ここでは、このような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手法を行為に埋め込まれたコマンド (CEA: Commands Embedded in Actions) と呼び、図 3.2 のモデルを提案する。自動ドアの制御システムをロボットとみなすと、そのインタラクションは以下ようになる。

- $H \Rightarrow R$: なし
- $R \Rightarrow H$: なし
- $H \Rightarrow E$: 移動
- $E \Rightarrow H$: 環境状態の知覚
- $R \Rightarrow E$: 扉の開閉
- $E \Rightarrow R$: 環境状態のセンシング

このように、人間の行為そのものがロボットにとってコマンドとなるので、人間は本来の目的である「移動」を達成するだけでよく、コマンドの受信確認 $R \Rightarrow H$ も不要である。その結果、CEA モデルでは人間への入出力が減少しておりユーザの負荷が軽く、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。

しかし、CEA の問題点は、コマンドの埋め込み対象が人間の行為そのものであるために、扱えるコマンドはタスクに強く依存し、人間とロボットの間で生じるインタラクションの時間も短く、必然的に単純なコマンドしか埋め込めない。つまり、より高度なタスクの達成は困難である。実際、DCM で例示した掃除タスクへの CEA の適用は直観的には難しい。そこで、CEA をもとにして、自由度の高いコマンドの埋め込みを可能にするこ

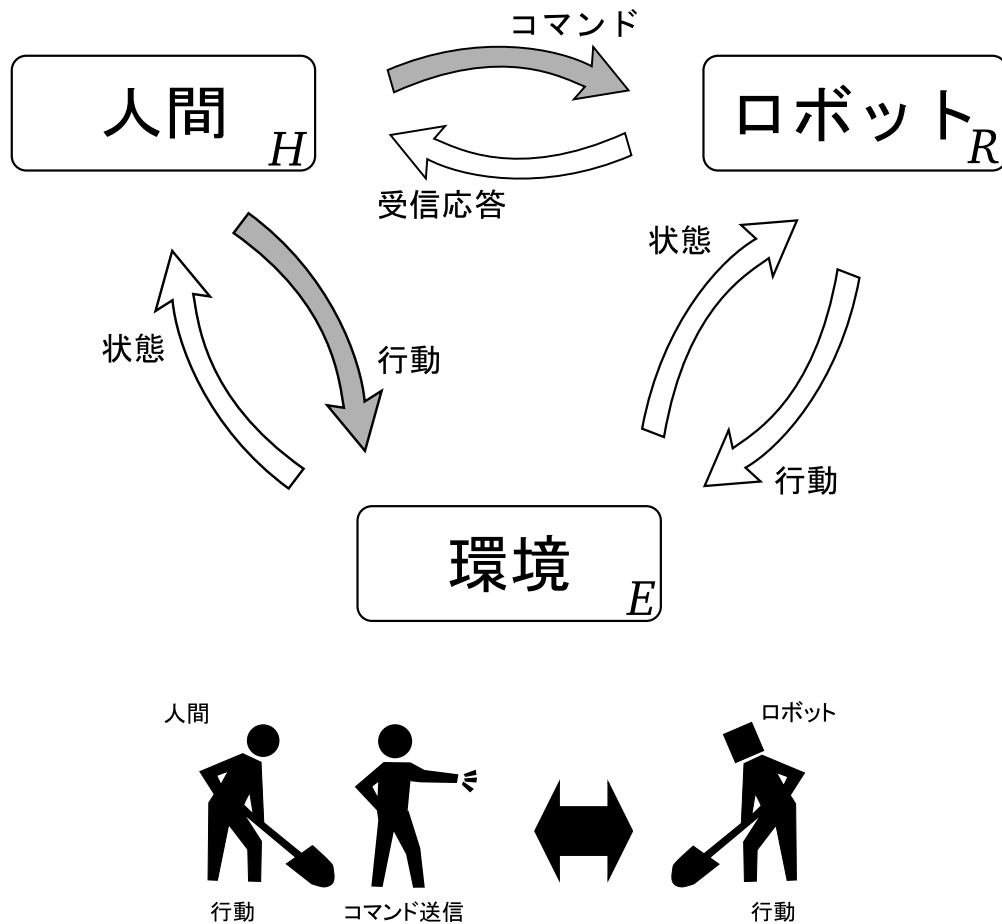


図 3.1 DCM モデル

とで、より高度なタスクの達成を実現する、ECEA (Extended CEA) を提案する。

ECEA は、図 3.2 の CEA での人間の行為 $H \Rightarrow E$ に付加的な行為を加えることにより実現する。人間の行為の分節化を行い、その区切りにおいて新たな行為を付加することにより、ロボットへのコマンドを埋め込むための領域を確保する。人間の行為が増加したことにより、ロボットの制御をより緻密に行うことができ、高度なタスクの達成が可能である。しかし、これによって人間の負担が増加しては意味がない。したがって、新たに付加される行為を、人間の負担を最小限にする行為に限定する必要がある。ここでは、付加される行為を、直前の行為の終了状態を継続する行為に限定する、時間的拡張による ECEA を提案する。この手法は、行為を付加する前の状態と比較したときに、行為の軌跡（手の

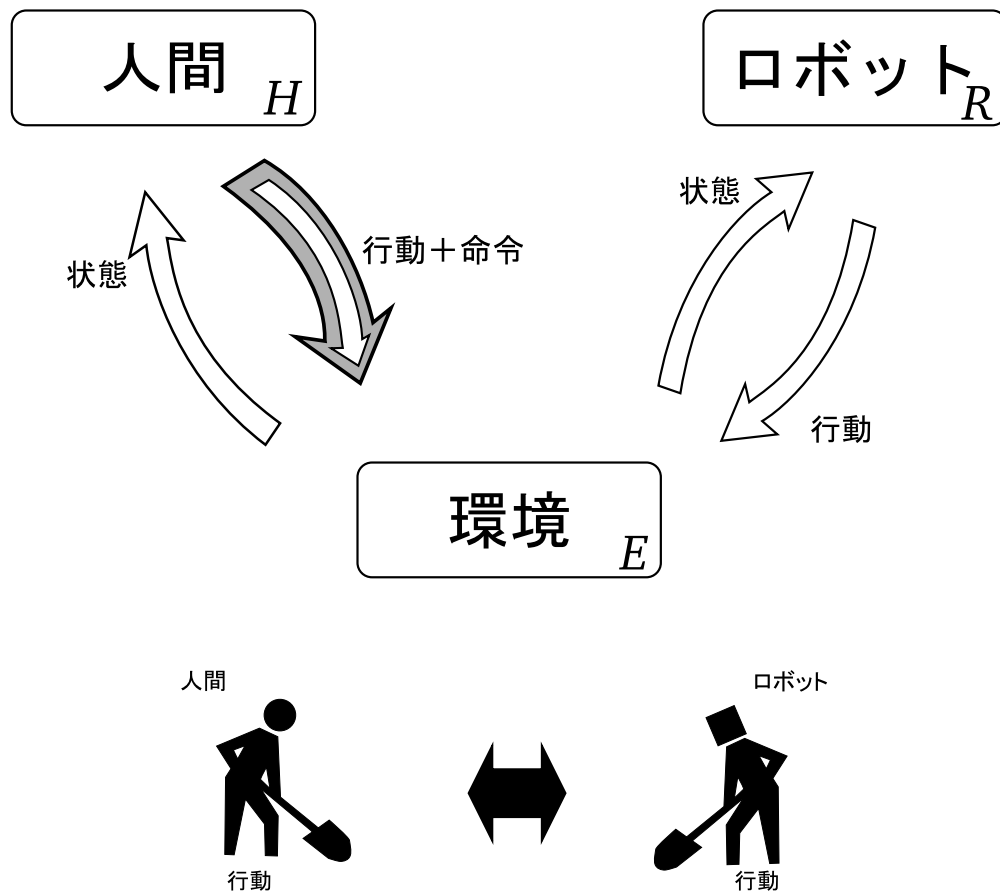


図 3.2 CEA モデル

動きなどの軌跡) が同一で、実行時間のみを変化させるため、人間は自然な行為を行うだけでよい。

以降では関連研究を示したのち、ECEA についての詳細を記す。そして、ECEA を人間とロボットによる掃除タスクに適用し、協調タスクを実現する。さらに、実験により、DCM を用いた場合の人間の負担と比較することで、その効果を検証する。

3.2 人間の行為に埋め込まれたコマンド (Extended CEA)

すでに述べたように、CEA では埋め込みの対象となる人間の行動を変更することができないため、埋め込み可能なコマンドは人間の行動に強く依存し、人間とロボットの間で

生じるインタラクションの時間も短く、単純なコマンドの埋め込みに制限される。しかし、元の人間の行動を最小限に変更し、多くのコマンドを埋め込むことができれば、負担をかけずに、より高度なタスクを達成できる。

3.2.1 行為の変更方法

一般に人間の行為は連続しているため、変更を行う場合、どこにどのように変更を加えれば良いかが問題となる。この問題に対処するには、行為を客観的に記述する方法が必要である。また、変更後にユーザがその行為を実行するため、理解しやすい変更である必要がある。理解しやすいければ、それを実行するのも容易であると考えられる。

行為の記述方法として、Schwartz ら [104] は脳損傷患者の日常的な行為を分析するためにアクションコーディングシステムを用いている。アクションコーディングシステムとは、「その場面にある物の位置の変化や状態の変化などの、1 つの変更を含む行為を最少単位とする」という定義のもとに、行為を分節化して記述する方法である。マイクロスリップなどの人間の行為分析の研究 [97, 114, 115] においても採用されており、信頼性の高い方法であるといえる。

また、アクションコーディングシステムと同様な分節化の基準を用いた、人間の行為に関する研究がある。Newtson ら [85, 86, 84] は実験において、被験者に役者の演じる映像を見せ、「自然で意味のある行為の区切り」であると判断したときにボタンを押すことを指示した。その結果、映像における区切りの位置が被験者間で統計的に有意に一致した。また、この区切り付近のみの数枚の静止画像と、この区切付近だけ除いた画像とを別の被験者に見せ、正しい順序に並べるように指示し、理解度を評価した。その結果、情報量は同じにもかかわらず、区切り付近のみの方が理解度が高かった。これらの知見から、行為の変更を考えたとき、区切り以外の場所で変更を行うよりも、新たな行為を区切りと区切りの間に付加する方が、人間にとって理解しやすいと考えられる。

以上の理由から、行為の記述方法としてアクションコーディングシステムを採用し、理解しやすさや実行しやすさの点から、新しい行為を区切りの間に付加する方法をとる。次節ではアクションコーディングシステムの詳細を記す。

3.2.2 アクションコーディングシステム

アクションコーディングシステムは、行為を 2 つのレベルのユニットとして記述する。コード化には複数人の観察者があたり、ユニットの定義をもとに協議しながら行う。ある

- (1) MOVE (x) TO (location) VIA (instrument) BY (manner)
- (2) ALTER (x) TO (location) VIA (instrument) BY (manner)
- (3) TAKE (x)
- (4) GIVE (x)

図 3.3 基本的な4つの A-1 ユニット

- 砂糖の袋を開ける:
ALTER sugar pack TO open BY tearing
- コーヒーに砂糖を入れる:
MOVE sugar TO in coffee VIA pack BY pouring

図 3.4 コーヒーを作る課題における記述例

場面において、物の位置の変化あるいは状態の変化のような変更を1つ含む行為を、行為の最小単位である A-1 ユニットと定義する。また、A-1 が集まって1つのタスクを形成するものを A-2 ユニットと定義する。ここでは、A-1 レベルの記述のみを用いる。

Schwartz らの分析 [104] では、コーヒーを作る課題の観察から、図 3.3 の基本的な4つの A-1 が見出されている。たとえば、「砂糖の袋を開ける」行為と「コーヒーに砂糖を入れる」行為は、それぞれ図 3.4 のように記述される。MOVE と ALTER には TAKE と GIVE が含まれている場合があり、5 秒以上間隔をあけて物体に作用する行為がなかったり、MOVE や ALTER の途中で、もう片方の手によって活動が行われたときは独立した TAKE や GIVE によって記述している。このコーディングシステムは再現性と簡潔な表現を重視しており、記述の方針として、(a) 記述対象を認識しやすく一般的なもの（開く／閉じる、オン／オフなど）に限定し、(b) 最もタスクに関連する題材を選択する、という2つの原則を採用している。次節では、CEA の具体的な拡張方法について述べる。

3.2.3 新しい行為「KEEP」の付加

CEA の最大の利点は、人間の行為が自然で、負担が軽い点にある。したがって、拡張後の行為と拡張前の行為とで、変化が最小になっているのが理想的である。これは行為の軌跡の差と、実行時間の差を最小にすればよい。ここでは、軌跡は変更せずに、実行時間を変化させる方法を取り、これを時間的拡張と呼ぶ。具体的には「停止」や「速度の変化」

- 元の行為:

TAKE sugar pack

ALTER sugar pack TO open BY tearing

- 時間的拡張後の行為:

TAKE sugar pack

KEEP taking (砂糖の袋を持った状態を継続)

ALTER sugar pack TO open BY tearing

KEEP altering (袋を開け終わった状態を継続)

図 3.5 時間的拡張の記述例

などの行為を指し、この拡張された時間領域において、より多くのコマンドを埋め込むことを考える。アクションコーディングシステムにおける時間的拡張を「直前の A-1 ユニットの終了状態を継続するユニット (KEEP) の追加」と定義する。たとえば、砂糖の袋を開ける行為の時間的拡張は図 3.5 のように表現される。時間的拡張では、ALTER などに含まれる TAKE や GIVE を独立して記述するものとする。図 3.5 では KEEP は TAKE の直後と ALTER の直後に追加されており、それぞれ、「砂糖の袋を持った状態を継続する」、「袋を開け終わった状態を継続する」であり、身体位置を維持することを意味する。継続する時間はロボットが行うタスクに依存するため、ロボットの設計段階で自由に設定できる。また、CEA の拡張は時間に限らず、空間的な拡張も考えられるため、ここでは、様々な拡張を総称して ECEA と呼ぶ。また、ECEA は CEA を包含するものであるが、以下では ECEA の性質を明確にするため、人間の行為を全く変更しないものを CEA、時間的拡張を行うものを ECEA として区別する。

3.2.4 ECEA の適用手順

ECEA を適用する場合、人間のどの行為の直後に KEEP を付加すれば良いか、ロボットはどのような行為をとれば良いかが問題となる。そこで、「任意のサブタスクを達成するように、人間とロボットの行為を同期させる」という方針をとる。サブタスクとは、協調タスクを構成する下位のタスクを意味する。たとえば、人間とヒューマノイドロボットで荷物の運搬をする協調タスクを考え、人間は荷物をロボットに渡す役割を、ロボットは受け取った荷物を自律的に目的地まで搬送する役割を担うものとする。このとき、人間が

- (1) 重視する方針の決定
例) 作業効率の向上
- (2) ロボットの仕様を決定
例) ヒューマノイドを使用
- (3) タスクの分担
上記の制約下でロボットがどこまで自律的に行動するかを決定．すべて自律的に行うのが理想的だが，多くの場合，人間の介入が必要となる．
例) 物体の搬送はロボットが行うが，物体を乗せるのは人間．
- (4) CEA の適用
人間の行為と同期してサブタスクを達成するようにロボットの行為を設計．
例) 人間が物体を持ち上げると，ロボットが接近するなど．
- (5) ECEA の適用
KEEP と同期してサブタスクを達成するようにロボットの行為を設計．
例) 人間が物体を持ち上げる姿勢を維持すると，ロボットが接近するなど．

図 3.6 協調作業の設計手順

荷物を持ち上げようとする行為に同期して，ロボットが人間に接近するように設計する．これにより，「荷物の受け渡し」というサブタスクが達成される．この場合，人間の行為に変更がないので，CEA の適用に相当する．さらに，ECEA による KEEP を付加して「持ち上げようとする姿勢の維持」を行うことで，人間とロボットの同期のタイミングに柔軟性を持たせることができ，「受け渡し」の達成を容易にする．

図 3.6 に協調作業全体の設計手順を示す．ECEA は効率の向上よりも，認知的負荷の軽減を目的とする．よって，(1) 効率を重視するなどの方針や (2) ロボットの仕様，(3) 人間のタスク分担は，ECEA の適用に先立って決定している必要がある．次に (4)CEA の適用を試みる．CEA は人間の行為に何も付加しないので，この段階で，ロボットの行為を設計するのが望ましい．最後に，(5)ECEA の適用によって，CEA では実現不可能であるロボットの行為を設計する．この手順を必要に応じて繰り返し行い，協調作業を設計する．

3.3 実験

ここでは CEA と ECEA を実際のタスクである，人間 1 人とロボット 1 台による掃除タスクに適用する．また，その掃除タスクにおいて，ECEA を用いた場合と DCM を用いた場合との認知的負荷を比較し，ユーザの負担を評価する．

3.3.1 実験 1:人間とロボットによる掃除タスク

実験 1 では，ECEA の適用により，高度なタスクが達成可能であるかどうかを確認する．

環境とタスク

図 3.7 に示す環境において掃除タスクを行う．この環境は，人間が日常のタスクに用いる机の上を想定しており，障害物として図中の箱を設定する．箱は，机の上に固定しない，ペン立てやテレビのリモートコントローラなどを想定している．机の表面は凹凸のない平面とする．以上の環境において，タスクを「環境中の物体の下を含む床全体の掃除」とする．

移動ロボット

小型移動ロボットである KheperaII を採用する．KheperaII は周囲に 8 つセンサを備え，それらは 100mm まで物体の検出が可能な赤外線近接センサと光センサが一体となっている．駆動装置としてインクリメンタルエンコード付き 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 上でプログラムを動作させることが可能である．

ロボットは本体に備えるセンサのみを使用し，ローカルな情報によってリアクティブな行動をとる．よって，記憶や外界の複雑なモデルを持たず，学習も行わない．これに関しては，計画的に二次元平面をカバーする方法 [13] に関する研究があるが，車輪のスリップのために位置を正確に決められない問題があり，リアクティブロボットで実現するのは難しい．そのため，ロボットは単純な条件反射による行動をとるが，ここでは問題を簡単にし，ECEA の効果を検証するには必要十分であると判断した．このようなロボットは生産コストを低く抑えられ，使用時にロボットへの教示が不要で，すぐに利用可能という利

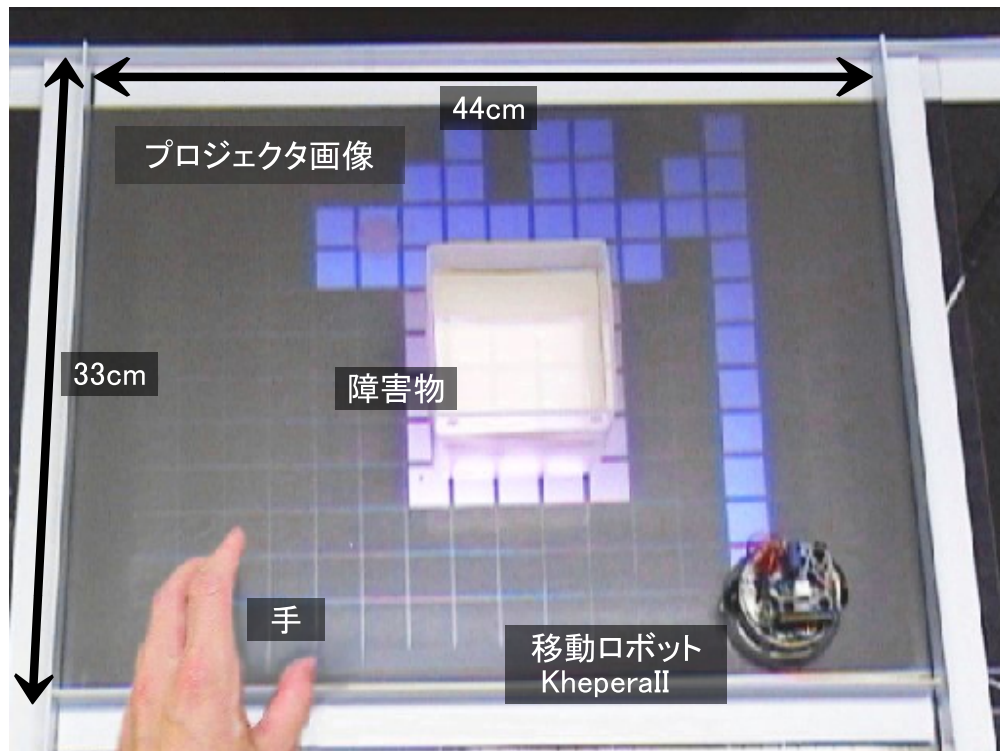


図 3.7 掃除領域

点があるため、価格と性能のバランスのとれた、一般家庭向けのロボットとして需要が見込まれる。

タスクの分担

ここでは、人間のタスクを環境中の物体の移動、ロボットのタスクを環境中の床の掃除と分担する。タスクの分担に関して、群知能やマルチエージェントにおける異種のロボット / エージェントどうしの協調形態 [5, 75] や非均質なロボット群での分散的作業分担を扱った研究 [96] が参考になる。また、協調的な作業のプランニングに関しては、Grosz[23] らの Shared Plan に関する研究や、室内環境におけるマルチロボットの問題解決においては、プランニングとスケジューリングを行う中央システムが各ロボットと通信を行う形式をとる、GOFER アーキテクチャ [95, 11] が用いられている例がある。しかし、人間とロボットのタスクをどのように分担するかは難しい問題であり、基本的にはタ

スクやロボットの性能に依存するため、一般的な指針を示すのは困難である。ここでは、ハードウェア上の制約からロボットが自律的に物体を把持したり正確な位置に移動することが困難であることを考慮して上記のような分担に決定した。ロボットは「床の掃除」を達成するために、ランダムな方向転換を繰り返して環境全体の掃除を行うものとする。また、ロボットはゴミを吸い取る機能を備えていないが、移動箇所が掃除されるものと想定する。ここでは、人間のタスクに恣意的なタスクを分担させないように注意し、人間だけで掃除タスクを実行する場合を考え、その一部分を分担させるようにした。

CEA と ECEA の適用

ロボットがランダムな方向転換で掃除を行うだけでは、障害物の下が掃除されず、タスクは達成されない。そこで、CEA と ECEA を適用することで、この問題に対処する。ここでは、ECEA の適用方法に従い、任意のサブタスクを達成するように、人間とロボットの行為を同期させる。つまり、人間が物体を持ち上げたときに、ロボットがその下を素早く掃除する、優先掃除というサブタスクを実現する。これにより、物体を移動し、元の位置に戻すまでの時間が最短になる。

図 3.8 にアクションコーディングシステムによる、「物体の移動」を達成する人間の典型的な行動を示す。(1) 物体を把持し、(2) 持ち上げ、(3) 降ろし、(4) 放す、というのが最も単純な行動である。このとき、ロボットに物体の下を優先的に掃除させるため、

- (a) 物体を持ち上げたときロボットが物体に近づく
- (b) ロボットの頭上に物体があるときその下を掃除
- (c) 物体を降ろしたときロボットが物体の下から出る

という3つの行動が必要となる。(a) と (c) は CEA の適用によって、(b) は ECEA の適用によって図 3.9 のように記述できる。図 3.9(2) MOVE object TO z に「(a) 物体に近づく」、(3) MOVE object TO x に「(c) 物体の下から出る」という行動がそれぞれ対応する。また、(2) と (3) の間に時間的拡張である(2') KEEP を追加する。この KEEP は「箱を持ち上げ終わった状態を継続する」という意味を持ち、「(b) 物体の下を掃除」という行動が対応する。

ロボットの行動実装

前節で述べた、ランダムな方向転換による掃除と、人間の行為に埋め込まれたコマンドを受け取り、協調タスクを実現するロボットを実装する。図 3.10 に示すように、ロボッ

- | | |
|----------------------|---------------|
| (1) TAKE object | |
| (2) MOVE object TO z | (z: 垂直方向のある点) |
| (3) MOVE object TO x | (x: 物体の初期位置) |
| (4) GIVE object | |

図 3.8 物体移動の典型例

- | | |
|----------------------|---------------|
| (1) TAKE object | |
| (2) MOVE object TO z | (z: 垂直方向のある点) |
| (2') KEEP moving | (物体を保持) |
| (3) MOVE object TO x | (x: 物体の初期位置) |
| (4) GIVE object | |

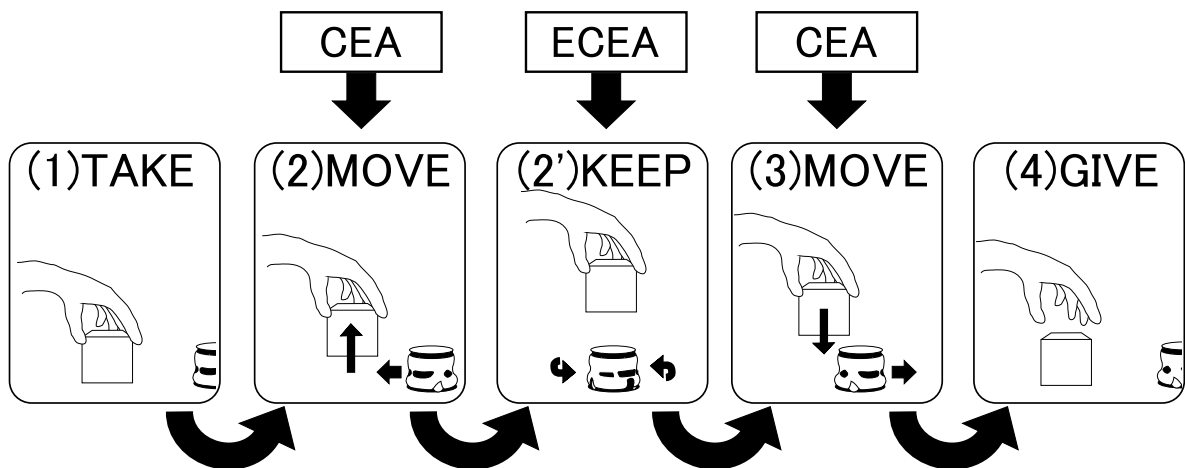


図 3.9 ECEA 適用後の物体移動

トの上部には、頭上の物体を検出するための近接センサと、物体が持ち上げられたかどうかを検出する赤外線センサとを追加した。物体の持ち上げ検出用センサは、斜め上方向に固定され、一回に一方方向のみのセンシングを行うため、ロボットは定期的に回転して周囲をセンシングする。

実装にあたり、行動ベースアプローチをとり、3層構造のサブサンクションアーキテクチャ [8] を用いた。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



図 3.10 KheperaII と追加されたセンサ

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には，基本的に上位の階層の行為を優先する．

図 3.11 に各層の行動ルールを示す．ここ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，物体が持ち上げられたかどうかを検出するための回転を制御する．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，CEA と ECEA を実現する行動を制御する．

実験 1 の結果

図 3.12 に人間とロボットによる協調掃除タスクの様子を示す．これは，動画像から 1 秒毎に静止画を抽出したものであり，ある時間から 10 秒間の様子を示している．図 3.12 (01) ～ (05) では，ロボットは壁を検出する毎にランダムな方向転換を行っている．(06) で持ち上げられた物体を検出し，(07) で物体のある方向に移動している．(08) ～ (10) では，物体がロボットの頭上にあるため，箱の下を優先的に掃除する．

CEA と ECEA の適用により，単純反射を行うロボットであっても，人間が分担された

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物体サーチ

- 前方に物体がないとき，前進，720° 回転，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．

第3層: インタラクション

- 持ち上げられた物体を検出したとき，その方向に直進．
- 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 3.11 各層の条件と行動

タスクを行うだけで，適切なタイミングでの動作を必要とする，高度な協調タスクが達成されている．

3.3.2 実験 2:ECEA を用いた場合の認知的負荷

実験 1 で高度なタスクが達成可能であることが分かったが，このとき人間の負担にはどのような影響があるのだろうか．ECEA には新たな行為（KEEP）が付加されているため，その影響を調べる必要がある．ここでは，DCM によるノンバーバルの典型的な 2 つの手法と，ECEA の認知的負荷を測定し比較する．

実験装置

ロボットには実際にゴミを吸い取る機能が実装されていないため，図 3.13 の実験装置を用い，掃除された箇所を掃除領域に表示した．ロボットに下向きに 2 つの赤外線 LED を取り付け，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を計算する．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ことで，図 3.7 のように，被験者に分かりやすく示される．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．

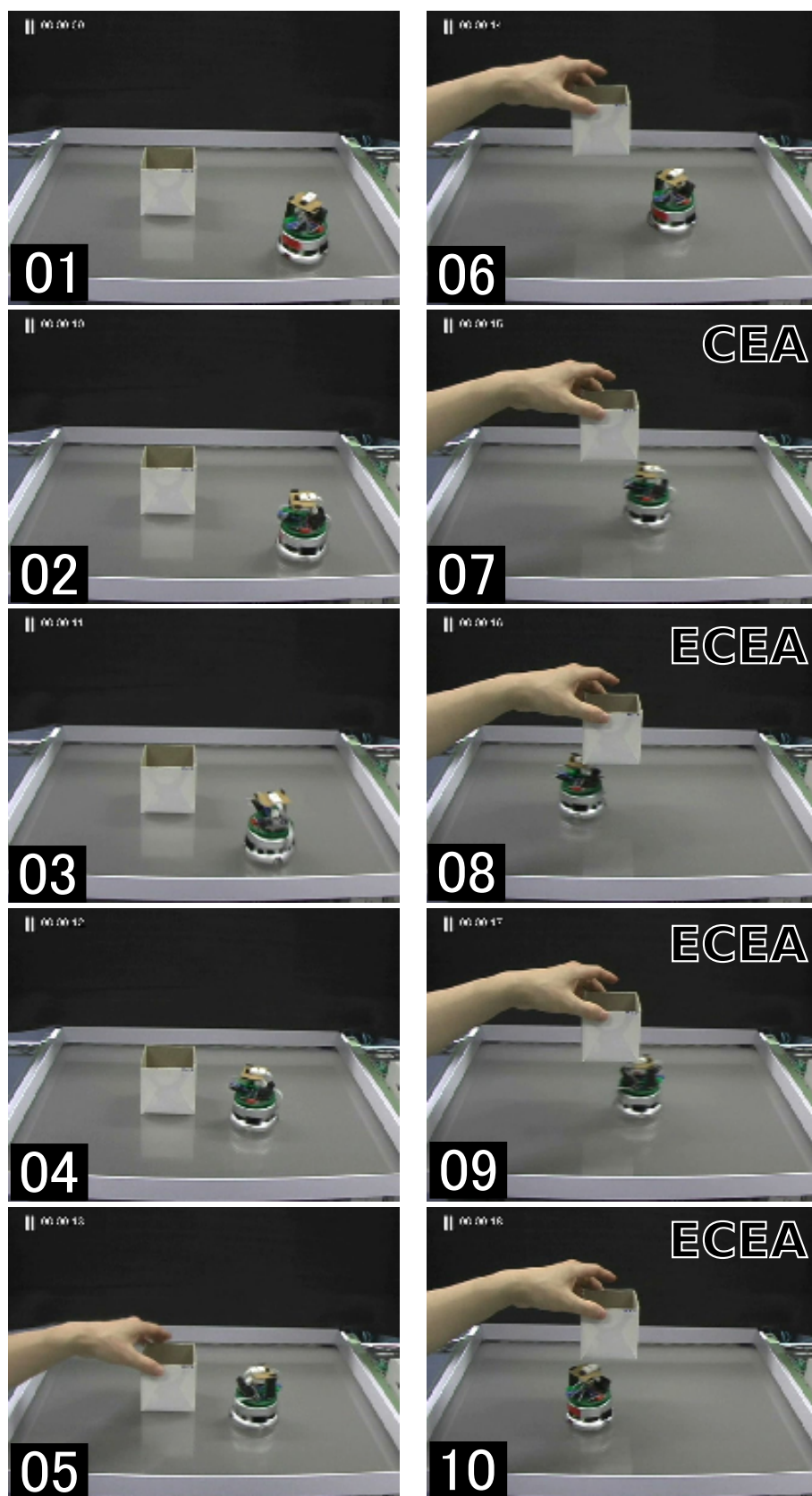


図 3.12 人間とロボットによる協調掃除タスクの様子

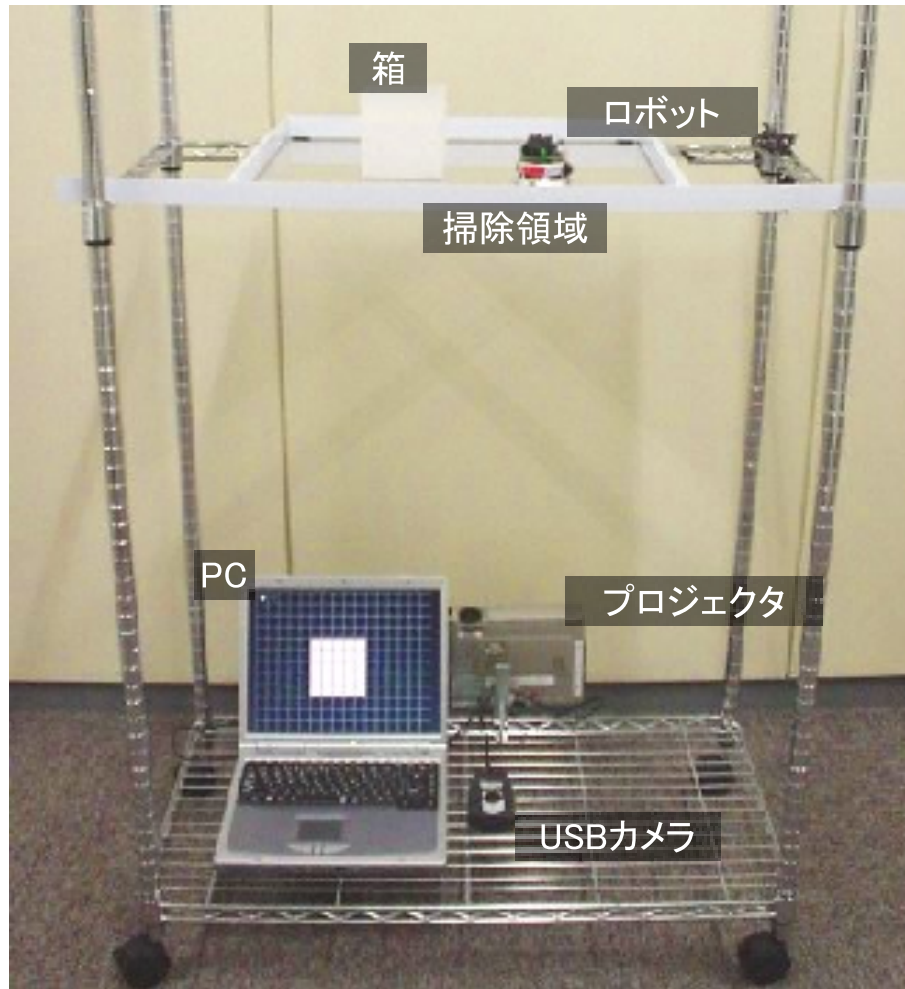


図 3.13 実験装置

比較対象

比較対象となる DCM の具体的な手段は、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）、ノンバーバルな手法として直観的で実行しやすいため、比較対象として適切であると判断した。

ここでは、図 3.14 のように、ECEA による協調掃除を用いるものを EC、DCM による

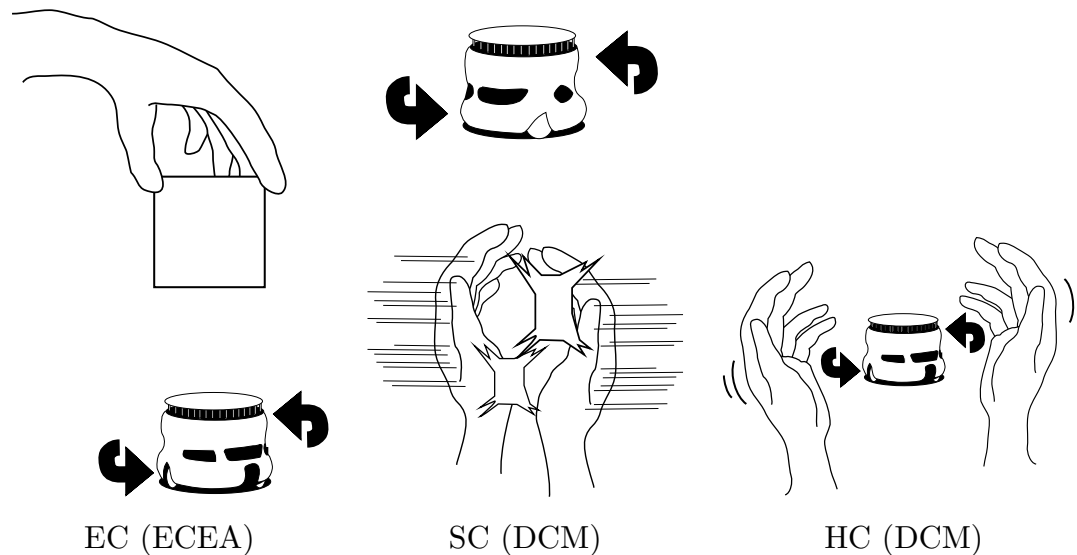


図 3.14 認知的負荷を比較する 3 つの手法

音を用いるものを SC，同じく DCM による手で進路を妨害するものを HC と呼ぶ．SC は認知的負荷測定方法の制約から，声ではなく，手をたたいてコマンドを送るものとした．SC では人間からの 1 つの音声コマンドが発行されたとき，HC では 1 回の進路妨害によってコマンドが発行されたとき，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う．人間はこの方向転換を観察してコマンドの受信確認ができる．これら 2 つの DCM のロボットへの実装は，図 3.11 に示す第 3 層のルールである「頭上の物体が離れたとき」という条件を「一定音量以上の音を検出されたとき」，または「進行方向に物体が検出されたとき」に置き換えて実装している．そのため，ソフトウェア的にほぼ同等の実装コストである．これら 2 つの手法では，ロボットに直接コマンドを与えることが行為の目的であり，いずれもユーザのタスク達成のための行為ではない．

認知的負荷の測定方法

ロボットが箱の下に入ってから，箱の下のすべてのセルを掃除するまでの間，測定を行う．EC では，被験者は箱をロボットから一定の距離に静止させる．SC，HC では，箱を環境中の隅に移動させてから，箱の初期位置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る．箱の初期位置はピンク色の領域で表示される．

ロボット制御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制御と並行し、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。暗算は、実験開始時に提示される3桁の数から声に出して3ずつ引き算を行う[14]。声に出すのは、答えを紙に書くことが困難であるという理由による。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を要求した。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時間を5分ほど設け、その後、EC、SC、HCそれぞれ3回ずつ計算の記録を行った。また、負荷測定の直前に30秒間の計算のみの課題を実施し、これを各被験者の負荷なしでの計算能力とした。EC、SC、HCの実験の様子をそれぞれ図3.15、図3.16、図3.17に示す。

実験2の結果

被験者は24歳から32歳までの、男性8名女性4名の計12名である。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3.18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($p < 0.01, \alpha = 0.01, t = 3.938$)。

また、各手法の平均作業時間を図3.19に示す。EC、SC、HCの平均掃除時間はそれぞれ20.89秒、21.46秒、18.25秒であった。ECを対照群として、作業時間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($p = 0.952, \alpha = 0.05, t = 0.260$)、ECとHC($p = 0.380, \alpha = 0.05, t = 1.203$)ともに有意差はなかった。これらの結果から、ECは作業効率を保ちつつ、認知的負荷が有意に軽いことがわかる。

3.4 考察

3.4.1 高度なタスクの達成

実験1では、ECEAの実タスクへの具体的な適用方法を示すとともに、人間とロボットによる協調タスクという、互いの行動が同期して成立する高度なタスクを実現した。CEAのみを用いた場合では、人間とロボットの間には瞬間的なインタラクションしか生

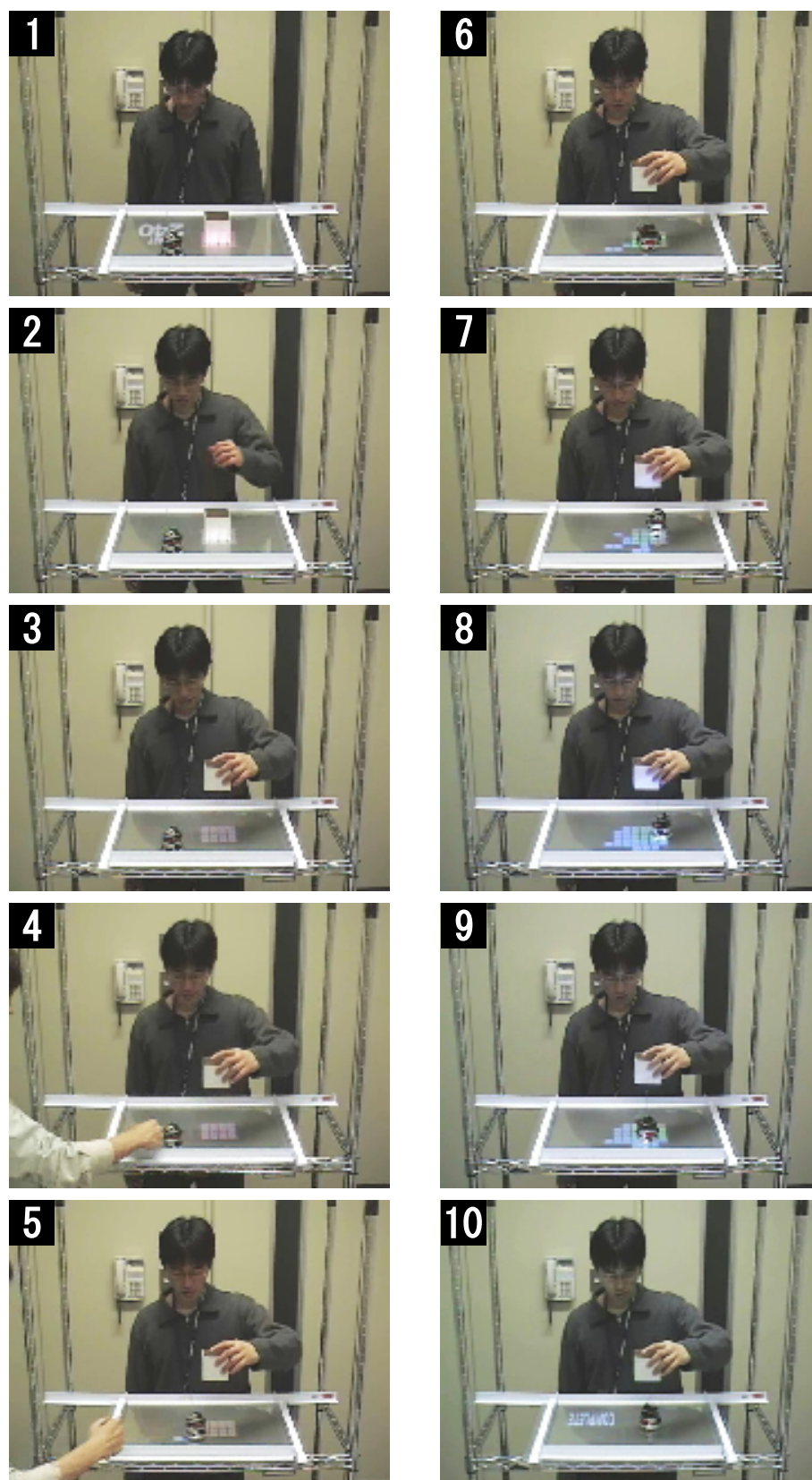


図 3.15 認知的負荷測定実験の様子 (EC)

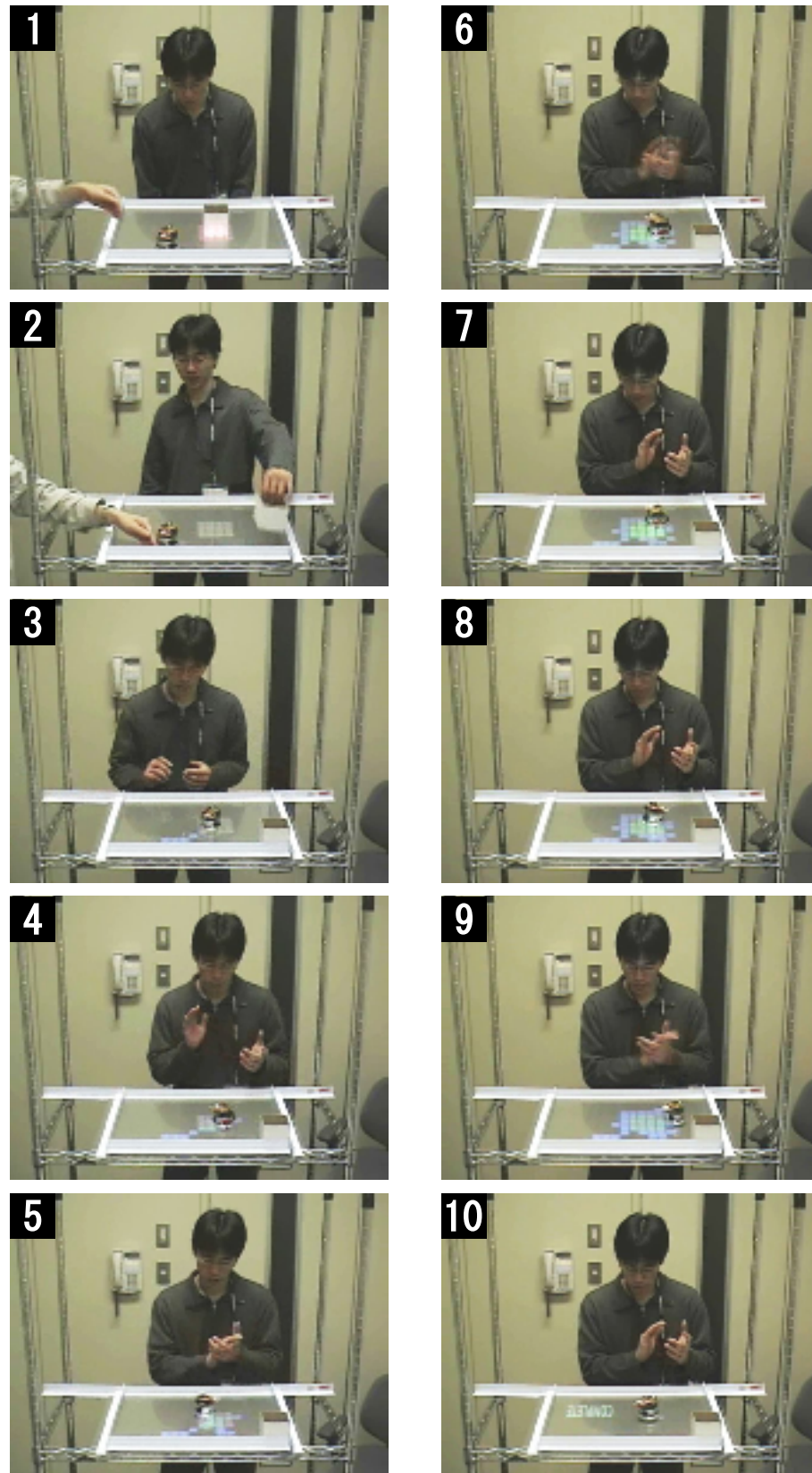


図 3.16 認知的負荷測定実験の様子 (SC)

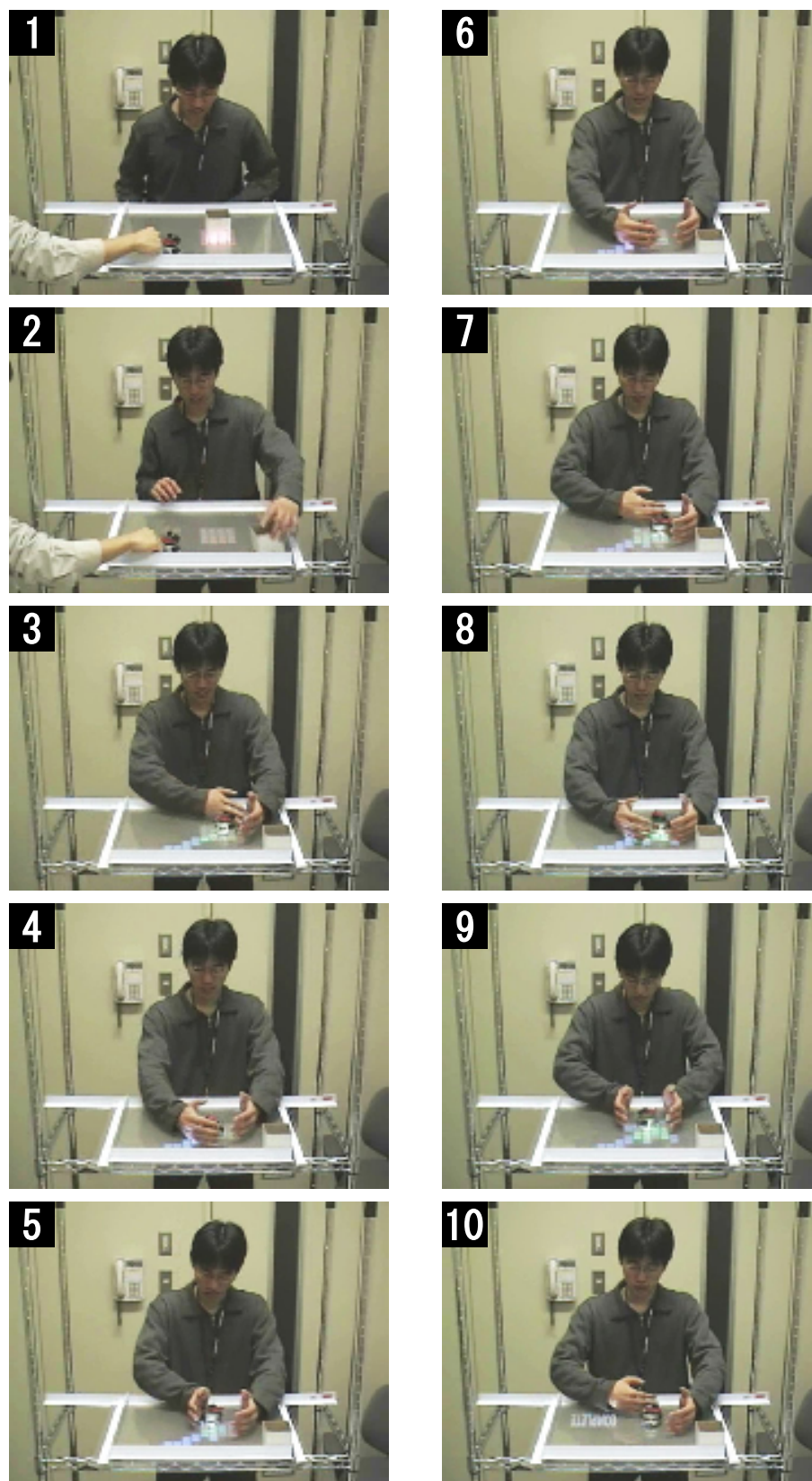


図 3.17 認知的負荷測定実験の様子 (HC)

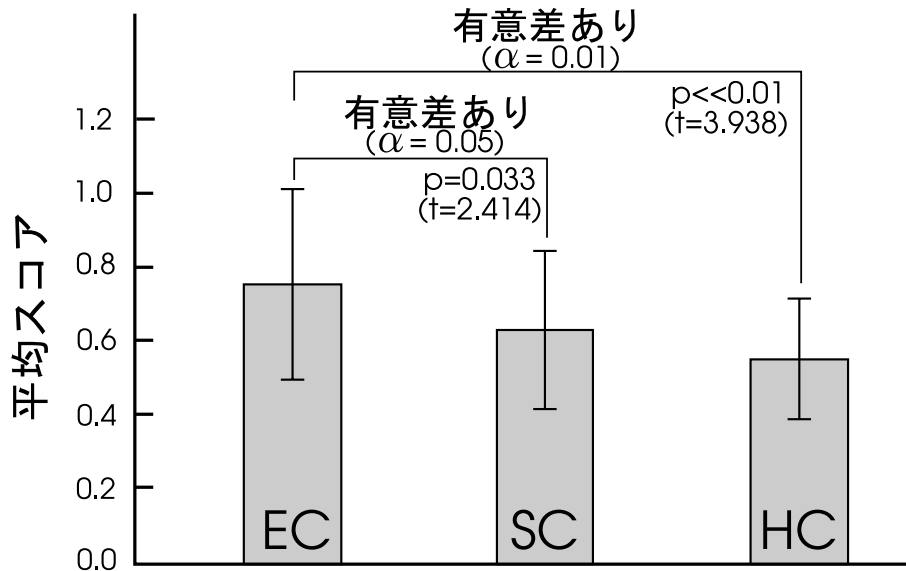


図 3.18 スコア（正規化後の単位時間当たりの正解数）と検定結果

じず，継続的なコマンドが通信できないために，物体の下の優先的な掃除は実現できない．また，実験 2 のように，DCM で特定箇所を優先的に掃除すると，ユーザは自分の本来のタスクを実行できないため，協調タスクにはならない．

協調タスクの達成には，図 3.8, 図 3.9 で示した人間の行為をその区切りで記述する方法の貢献が大きいと考えられる．この方法は，人間の行為とロボットの行為との対応が取りやすく，対象となるタスクに適したコマンドの埋め込みが容易である．しかし，どの行為にコマンドを埋め込むかの選択はタスクの内容やロボットの機能に強く依存するため，一般的な基準を示すには至っていない．実験では，ユーザのタスクとロボットのタスクに順序制約があったため，これを協調タスクにより解決した．

3.4.2 認知的負荷の軽減

実験 2 によって，時間的拡張による ECEA は，新たな行為（KEEP）が付加されているものの，DCM を用いて同じ目的を達成しようとした場合よりも，人間の認知的負荷が軽い．これは，実験のタスクのように，DCM によるコマンド送信が繰り返し必要となる場合に顕著な傾向であり，この場合は ECEA の適用によって高い効果が得られる．また，

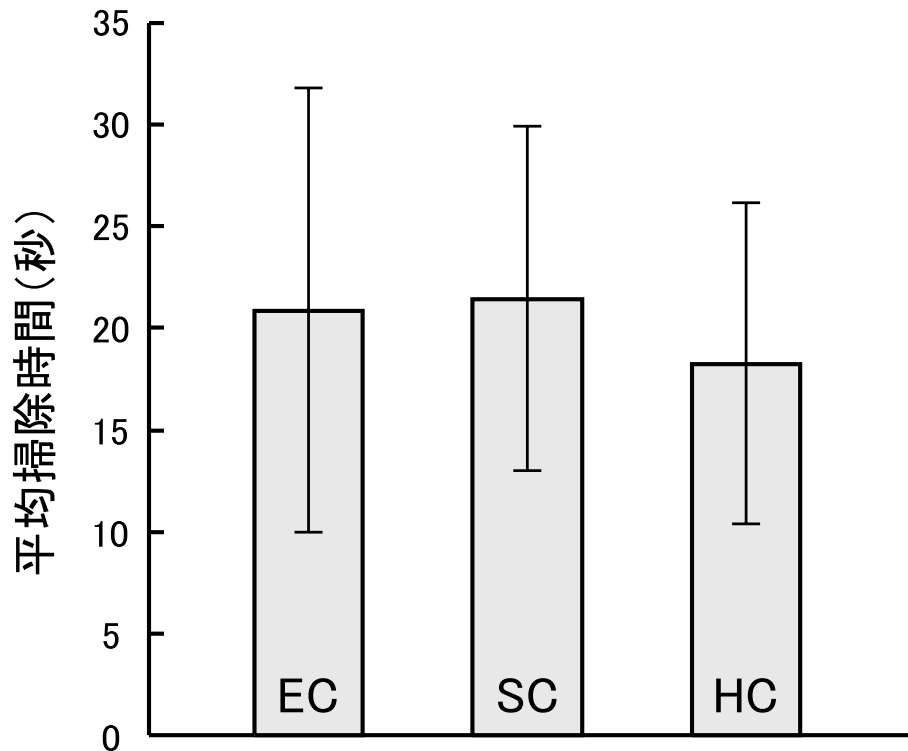


図 3.19 平均掃除時間

実験 2 のユーザのタスクは、人間同士でタスクを分担する場合と同様のタスクであり、恣意的な行為ではないため、自然な方法で実行できる。しかし、行為に埋め込まなくても、別の何らかの方法でコマンドを繰り返し送れば、認知的負荷は軽減されるかもしれない。たとえば、実験のタスクで考えると、ロボット上に手をかざすことで手の形と同じ領域を掃除することが可能である。ところが、この方法では手の形より大きい領域をうまく扱うことができない。ECEA のメリットは、タスク達成のための行為に埋め込むことで、物体の下領域のみを無駄なく掃除でき、さらにコマンド送信が唯一の目的となる恣意的な行動が不要な点にある。

3.4.3 ECEA の汎用性

他のシステムへの応用を考えたとき、時間的拡張による ECEA は、ユーザのある行為が継続されるため、その行為がコマンドか否かがロボットにとって区別しやすくなるとい

う特徴がある．たとえば，部屋の電灯をつけて，まぶしいと思って手をかざすと，その行為の継続が明るさを調節するコマンドになっているシステムが考えられる．手をかざし続ける行為を徐々に暗くするコマンドに，逆に，暗いと思って上を見上げ，そのまま上を見続ける行為を徐々に明るくするコマンドに対応づける．人間に明確なタスクがなくても，埋め込みが可能であり，手をかざす行為を行ってから継続するかどうかを決定することができるため，使い勝手が良い．このようなシステムは，比較的簡単な画像処理や安価なセンサによって容易に実現できると考えられる．

また，より複雑なタスク例として，ゴミ回収ロボットを考える．現実的な制約として，ロボットはゴミの識別が不可能であるとする．人間から離れた場所に位置するゴミ箱に紙屑などを捨てようとしたとき，ロボットが近寄ってきてゴミを回収すれば，人間に負担がかからず，ロボットもゴミの識別をする必要がない．ここでは，SONY の AIBO を用いて ECEA を適用する．図 3.20 に示すように，AIBO は主な非接触センサとして，1 つの CMOS イメージセンサと，2 つの赤外線距離センサを備える．人間が離れたゴミ箱に紙屑などを捨てる典型的な行為は図 3.21 に示すように，(1) 紙屑をつかむ，(2) ゴミ箱を探す，(3) 紙屑をゴミ箱に移動する，のように記述することができる．これらに時間的拡張の ECEA を適用し，図 3.22 の (2') に示す，ゴミ箱を探す行為の終了状態（後ろを振り向いた姿勢など）の継続を意味する KEEP を付加する．この KEEP をイメージセンサによるオプティカルフローの計算や，赤外線センサによって検出する．KEEP が検出されたとき，AIBO はその方向に移動して人間からゴミを受け取る．よって，人間はゴミを離れたゴミ箱に持っていく必要はなく，AIBO にゴミを渡すことでタスクを完了する．このように，KEEP を付加することで，ゴミを捨てる行為とその他の行為との区別を明確にすることが容易となる．

ここで例示したように，ECEA はロボットの構成やタスクに依存せず，その適用範囲は広いと考えられる．

3.4.4 A-2 レベルにおける埋め込み

本章で採用したアクションコーディングシステムでは，行為の最小単位である A-1 ユニットののみを使用している．しかし，複数の A-1 がまとまって構成される A-2 ユニットのレベルにおける区切りでは，A-1 よりもマイクロスリップが生起しやすいという報告 [115] がある．マイクロスリップとは行為の淀みであり，躊躇などの急激な行為の変化を指す．そのため，行為と行為との「隙間」とみなせ，時間的拡張による ECEA と比較し



図 3.20 AIBO ERS-7

て、行為が停止するという点で類似している．したがって、ロボットがマイクロスリップを検出できれば、人間の行為を変更しない、完全な埋め込みによってロボットを制御することが可能である．現在は A-1 ユニットのレベルにおける議論のみであるが、A-2 ユニットに着目し、複数のサブタスクで構成されるような、より複雑なタスクを対象にし、マイクロスリップの自動検出を検討する必要がある．アクションコーディングシステムのように行為を記述する方法として、古典的なロボット行動の記述方法である STRIPS[18] が挙げられる．また、人間の行為を視覚的にとらえ、行為の自動記述に向けた取り組み [122] や、人間の行為の分節化をカメラ画像から自動的に特定する試み [82] がある．これらの技術を応用することで、人間の行為の自動記述とマイクロスリップの検出を実現できる可能性がある．

また、マイクロスリップが生じやすい領域に埋め込まれたコマンドは、他の領域に埋め込まれたコマンドよりも、ユーザが気づきやすい可能性がある．たとえば、ユーザが説明書を読まずにロボットを使う場面を想定したとき、ユーザの行動における躊躇などがきっかけとなり、自分の行為とロボットの行為との対応関係に自然に気づく可能性がある．このような、ロボットの新規導入コストを軽減する、マニュアルフリーマシンの開発も今後検討したい．

- (1) TAKE object
- (2) SEARCH trash can
- (3) MOVE object TO trash can

図 3.21 ゴミ捨て行為の典型例

- (1) TAKE object
- (2) SEARCH trash can
- (2') KEEP searching (ゴミ箱を探す姿勢を継続)
- (3) MOVE object TO robot

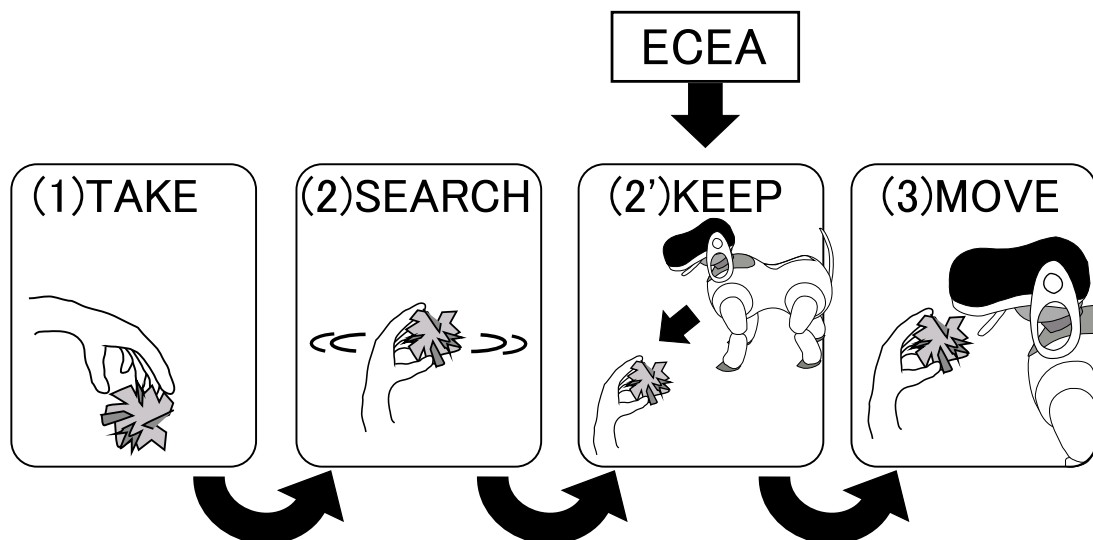


図 3.22 ECEA 適用後のゴミ捨て行為

3.4.5 ECEA の適用範囲

3.4.2 でも少し触れたが，図 3.23 に示すように手をロボットの上でかざすことでロボットに直接コマンドを送る方法(DCM)が考えられる．ここでは，手をかざす方法と ECEA による物体を保持する方法との比較を行い，適用範囲について検討する．

ECEA によって物体を保持してロボットにコマンドを送る方法の長所は，物体の下

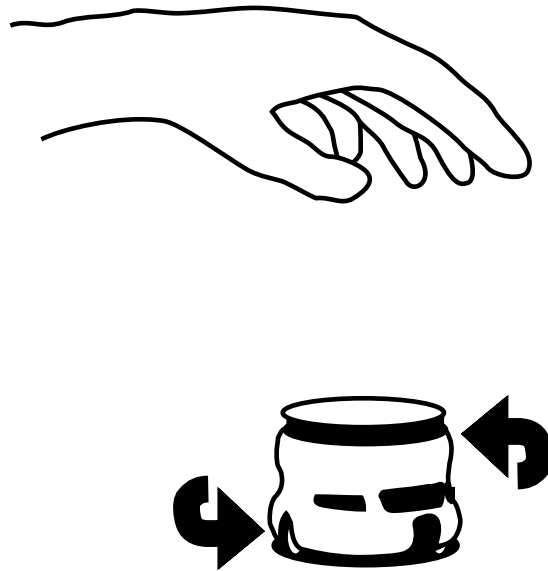


図 3.23 手をかざす方法 (DCM) によるロボットの制御

掃除を考えたときに、物体の形や面積に依存せず掃除できることである。それに対し、ECEA の短所は、物体を持ち上げ続けるという性質上、重い物体を保持する場合には人間に負担がかかることである。一方、手をかざしてコマンドを送る方法の長所は、物体を持ち上げないので物体の重さに依存しない点であり、短所は物体の面積が手の面積より大きくなると、手を移動してロボットをコントロールしなければならないため、人間に負担がかかることである。人間の負担に関して、各手法と保持する物体の特徴（重さと底面積）をまとめたものを表 3.1 と表 3.2 に示す。

表中の「○」は人間に負担がかからないことを示し、「×」は人間に負担がかかることを示している。ECEA では軽い物体であれば物体の底面積には依存せず有効であり、手をかざす方法では物体の重さに依存せず底面積が人間の手より小さい場合に有効である。

本章で行った ECEA の実験 (EC) においては、軽くて底面が狭いものを採用しているため、手をかざす方法も有効であると考えられる。このような物体の移動を伴う掃除作業に関して、物体の重さ・底面積と人間の負担の関係を明確にすることで ECEA の適用範囲を示すことができると考えられる。しかし、物体を保持する場合には重さだけでなく、物体の形状にも依存すると考えらるため、個々のケースで調査する必要がある。現段階で

表 3.1 ECEA と保持する物体の特徴

底面 重さ	広い	狭い
重い	×	×
軽い		

表 3.2 手をかざす方法 (DCM) と保持する物体の特徴

底面 重さ	広い	狭い
重い	×	
軽い	×	

は, ECEA によって物体を保持する場合には, 人間には持ち上げられなかったり, 持ち続けるのが困難であるような重い物体には適さないと考えられる。

3.4.6 各手法の比較

各手法と人間にかかる負担の関係を表 3.3 に示す。表中の「」は人間に負担がかからないことを示し, 「×」は人間に負担がかかることを示す。「優先掃除」とは, 本章の実験においてロボットが物体の下を優先的に掃除することである。実験では優先掃除中における人間の認知的負担を測定したが, この他に優先掃除の前後における人間の負担を考える必要がある。表に示すとおり ECEA を用いた場合では「優先掃除前」と「優先掃除後」で, 人間が分担しているタスクを達成するための行為からの逸脱がないため, 負担がかからないことが自明である。しかし, 「優先掃除中」においては, ECEA を用いて KEEP を

表 3.3 各手法と人間にかかる負担

手法 状況	ECEA 物体を保持	DCM1 手をたたく	DCM2 手で進路妨害	DCM3 手をかざす
優先掃除の前		×	×	×
優先掃除の中		×	×	
優先掃除の後		×	×	×
総 合		×	×	

導入しているため、「物体を保持する」という付加的な行為があり、この影響を実験的に調べる必要があった。

DCM の各手法は「優先掃除前」において、物体を別の場所に移動し、「優先掃除後」において、移動した物体を元の場所に戻すという行為が必要となるため、明らかに付加的な行為を実行している。よって、その付加的な行為が人間にとって負荷になるという意味で、表中において「×」と示している。ただし、DCM3 の手をかざす方法は、「優先掃除中」にも人間の負荷が軽減されると考えられる。また、3.4.5 でも述べているように、物体の形状や広さに依存するが、KEEP による物体の保持と同等の効果があると考えられる。しかし、優先掃除の前後を含めて総合的にみたとき、ECEA による方法が最も良い方法であるといえる。

3.5 まとめ

本章では、既存システムにおける人間の負担軽減の要因を説明する、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モデル（CEA モデル）を新規に構築した。その上で CEA モデルを拡張し、より高度なタスクへの適用を可能にするインタラクションモデルである ECEA（Extended CEA）を提案した。ECEA モデルの構築において、CEA の利点である「ユーザの自然な行為によるコマンド発行」という特徴を最大限引き出すために、行為を区切って記述するアクションコーディングシステムを導入した。これにより、あるタスクを実行する際の人間の行為と、ロボットの行為との対応関係を明確にで

き、「ユーザの直前の行為の終了状態を継続する」という時間的拡張が可能となった。時間的拡張による ECEA を実際の掃除タスクに適用したところ、人間が環境中の物体の保持を継続することで、ロボットが物体の下を優先的に掃除するという、協調タスクが実現された。さらに、行為には埋め込まず、従来の直接コマンドを送る方法 (DCM) によって同じタスクを実現した場合の人間の認知的負荷を測定し、ECEA を適用した場合との認知的負荷を比較したところ、ECEA の方が有意に負荷が軽いことが分かった。今後、より複雑なタスクへの適用を検討することで、提案手法の発展が期待できる。

第 4 章

ロボットの行為に埋め込まれた コマンドの人間への影響

4.1 はじめに

第 3 章において，人間によるタスクを達成するための行為にロボットのへのコマンドを埋め込んだとき，コマンド発行に関する動作が不要になり，協調掃除作業において人間の認知的負荷が軽減することを確認した．それでは，逆に，ロボットによるタスクを達成するための行為にコマンドを埋め込むことは可能であろうか．可能であるとすれば，ロボットによる行為に埋め込まれたコマンドはユーザにとってどのような影響があるのだろうか．本章では，ロボットによる行為に埋め込まれたコマンドが人間に及ぼす影響について調査するとともに，その利用価値について考察する．

4.2 ロボットの行為に埋め込まれたコマンド (ECEA-R)

ここでは，ロボットが人間にコマンドを送る必要性を述べ，ロボットから人間に直接コマンドを送る方法 (Direct Commanding Methods by Robots, 以下 DCM-R と呼ぶ) と，コマンドをロボットの行為に埋め込んで送る方法 (Commands Embedded in Actions by Robots, 以下 CEA-R と呼ぶ) ，その拡張である ECEA-R (Extended CEA-R) について，それぞれ説明する．



図 4.1 人間の介入を必要とするロボット

4.2.1 ロボットから人間へのコマンド送信

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 [125]．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 [54, 53, 52] 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 4.1 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などが考えられる．このような協調作業を考えたとき，ロボット側から人間を適切な作業（行

動) にガイドすることで、人間の負担を軽減することができる。たとえば、互いに作業の終了を待つ必要がある協調作業においては、ロボットが人間に作業を促したり、ロボットが自分の作業が終了したことを通知することによって、人間は常にロボットを監視する必要がなくなる。このように、ロボットから人間への情報提示は、人間に行動を促すという意味においてコマンドとみなすことができる。以降では、ユーザに行動を促すための情報提示をコマンド送信と呼ぶ。

4.2.2 DCM-R

人工物から人間に対して情報を提示する方法に関して、ノーマン [90] が提案するアフォーダンス [22] を利用した人工物の設計方法、サッチマンによる、機械に対する人間の行動特性に関する研究 [111]、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 [98, 116] などがある。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 [128] やサイン音 [143, 142] の研究があり、JIS:S0013 [42] では家電製品の報知音やアイコンを使用した視覚的な提示方法が規格化されている。報知音を用いてロボットから人間にコマンド (情報) を伝達するとき、報知音を発することはロボットが分担しているタスクを達成するための行為とは独立して行うことができる。たとえば、人間とロボットによる協調掃除タスクを考える。人間は環境中の物体の移動を分担し、ロボットは床の掃除を担当する。このとき、ロボットから人間に報知音を用いてコマンドを送信することは、ロボットの分担である床の掃除とは独立して行うことができる。そのため、コマンド送信は人間に対して直接的であるという理由で、これを DCM-R (Direct Commanding Methods by Robots) と呼ぶ。

図 4.2 に、DCM-R のインタラクションモデルを示す。DCM-R の特徴は、人間とロボット間に直接的なインタラクションが存在することである。たとえば、上記の人間と掃除ロボットによる協調掃除タスクの場合では次のようなインタラクションになる。

- $R \Rightarrow E$: 掃除
- $E \Rightarrow R$: 環境状態のセンシング
- $H \Rightarrow E$: 物体の移動
- $E \Rightarrow H$: 環境状態の知覚
- $R \Rightarrow H$: ロボットによるコマンド送信
- $H \Rightarrow R$: 受信応答

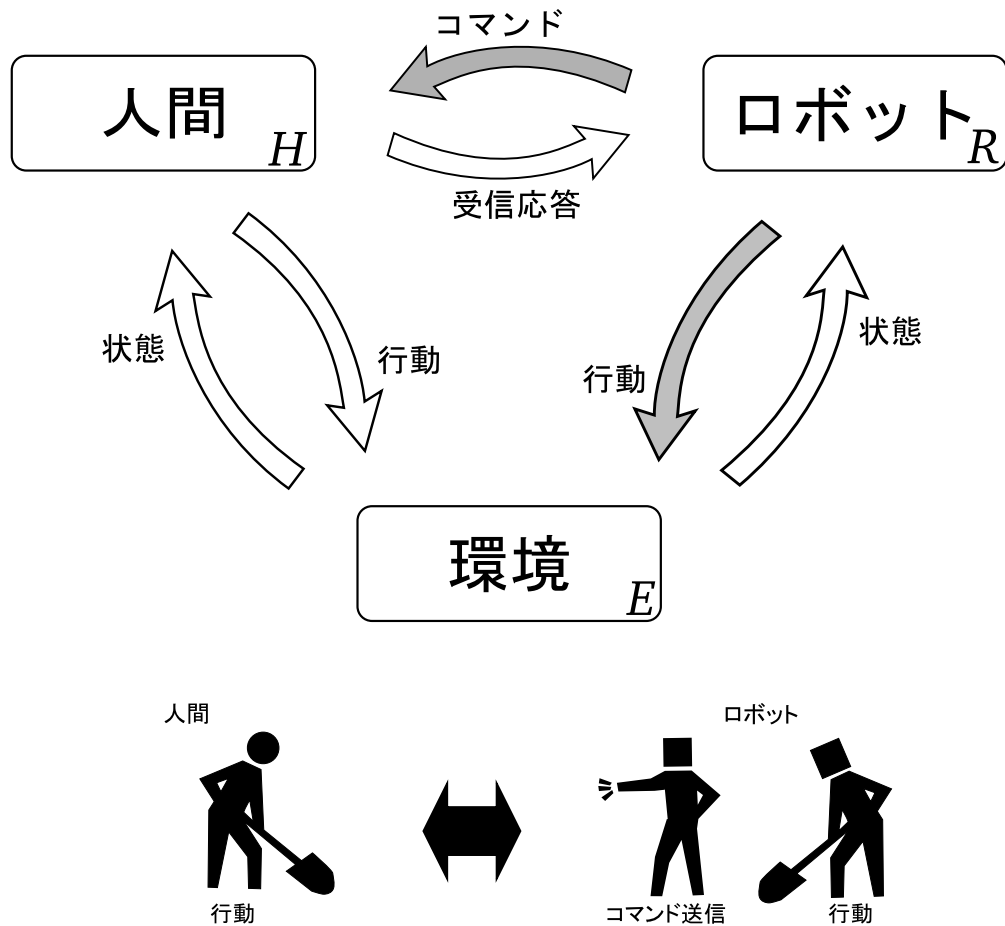


図 4.2 DCM-R モデル

このように、ロボットは床の掃除とは別に、コマンドを送信するための行為を行う。この場合コマンドとは、ユーザに障害物の移動を促すものや、ロボットの作業終了を知らせるものなどが考えられる。また、コマンドを送信する方法としては、報知音の他にアイコンを点滅させるなどの方法が考えられ、コマンドの内容に応じて様々なものを採用することが可能である。

DCM との違いは、コマンドの送信者が人間からロボットになっている点にある。DCM の場合には人間にかかる負担を重視して設計するが、DCM-R の場合にはロボットにかかる負担を考慮する必要はない。ただし、追加するハードウェアや、コマンドの表現方法といったコストや人間にとっての分かりやすさを重視する必要がある。

4.2.3 CEA-R

コマンドを人間に直接送信する DCM-R に対し、ロボットがタスクを達成するための行為にコマンドを埋め込む方法が考えられる。第 3 章においては、人間の行為にコマンドが埋め込まれているが、ここでは同様な考え方を採用し、ロボットの行為にコマンドが埋め込まれているものを考える。人間に対して直接コマンドを送るのではなく、ロボットの行為の実行に伴ってコマンドを送信するので、これを CEA-R (Commands Embedded in Actions by Robots) と呼ぶ。

図 4.3 に CEA-R のインタラクションモデルを示す。CEA-R の特徴は、人間とロボット間の直接的なインタラクションがないことである。たとえば、DCM-R の例と同様に、人間とロボットによる協調掃除タスクを考える。人間は環境中の物体の移動を分担し、ロボットは床の掃除を分担する。このときのインタラクションは次のようになる。

- $R \Rightarrow E$: 掃除 + コマンド送信
- $E \Rightarrow R$: 環境状態のセンシング
- $H \Rightarrow E$: 物体の移動
- $E \Rightarrow H$: 環境状態の知覚
- $R \Rightarrow H$: なし
- $H \Rightarrow R$: なし

ロボットは人間に物体の移動を依頼するためのコマンド発行を、掃除を行う行為に伴って行う。DCM-R とは異なり、コマンドを送信する目的のみの行為を行わない。人間はロボットが掃除を行う様子を観察することでコマンドの受信を行う。ここでは、直接的なコマンドに対する応答が不要という意味で、 $H \Rightarrow R$ を「なし」としている。

現時点で明らかな CEA-R の利点は、実装コストに関係するものであり、以下の 2 つが挙げられる。

- 付加的なデバイスが不要
- コマンド設計が不要

ロボットは分担するタスクを達成するだけなので、コマンドを送信するための新たなデバイス（スピーカやディスプレイなど）を追加する必要がない。また、新しく追加したデバイスにおいて、どのようにコマンドを表現するかといったコマンド設計が不要である。

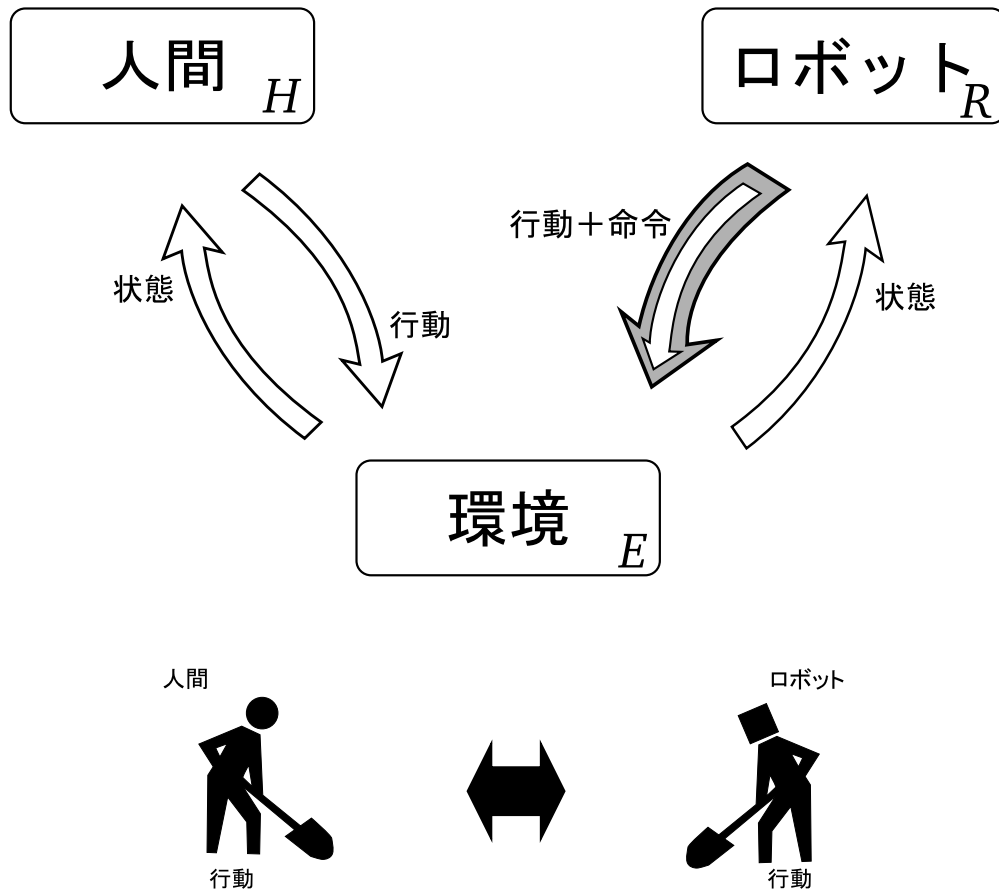


図 4.3 CEA-R モデル

CEA との違いは、コマンドの埋め込み先が人間の行為からロボットの行為になっている点である。ロボットによるタスクを達成するための行為そのものがコマンドであるため、市販の掃除ロボットなど、あるタスクを実行するロボットはすべて CEA-R を用いているといえる。ただし、それらのロボットにおいて CEA-R を意図的に実装しているわけではない。よって、人間に対するコマンドを送信したい場合に、その効果が得られる保証はなく、逆にコマンドを送信する意図はなくても人間にコマンドとして解釈される可能性があるなど不確定さが問題となる。

4.2.4 ECEA-R

ここでは、第3章と同様に、CEA-Rの拡張を考える。CEA-Rの利点は、主に設計者・開発者側にとっての利点である。しかし、コマンド送信において重要であるのは、設計したコマンドがユーザにとって理解しやすいことである。CEA-Rでは、ロボットの行為にコマンドが完全に埋め込まれているため、コマンドと、タスクを達成するための行為が区別できない。よって、コマンドが送信されているかどうかの判断はユーザ側に全て委ねられ、これがユーザにとって負担となり、理解しにくいものになっている可能性がある。そこで、CEA-Rを拡張して、ユーザにとってコマンドとしてより識別しやすく拡張したECEA-R (Extended CEA-R)を提案する。

拡張の方針としては、コマンドが人間に認識しやすいことを重視し、ロボットの行為を変更する。第3章では、時間的な拡張を導入しているが、ここでは空間的な変更も含めた、時空間的拡張を考える。第3章における時間的拡張をそのまま適用しない理由としては、第1にロボットの動作に関するコストを考慮する必要がないことが挙げられる。人間の場合には、動作を少なくすれば負担軽減につながるが、ロボットの場合には、その動作を少なくしても人間にとっての利点はない。第2に、ロボットがKEEPを行った場合、動作を停止するため、ユーザが観察したときロボットが故障していると誤解される危険がある。コマンドを送信しているのであれば、送信していることを人間に示す方がフィードバックの原則[90]を満足し、使いやすい人工物として妥当である。具体的な時空間的拡張は、ロボットの分担するタスクに強く依存するため、設計手順の詳細を示すのは難しいが、ここでは抽象的な設計方針として、次のような方針を採用する。

- 直前の行為を実行するためのデバイスを用いてコマンドを設計する。
- 直前の行為と区別しやすい表現によるコマンドにする。

このような方針を採用した理由として、第1にタスク達成のための行為との連続性の保持が挙げられる。埋め込まれている以上、元の行為との関係を維持する必要がある、それが「同じデバイスを用いる」という方針に反映されている。第2に、コマンドを送信している状態を人間に分かりやすくするため、コマンドを送信する直前の行為とは明確に区別されていなければならない。しかし、直前の行為とコマンドとの区別を明確にしようとすると、タスク達成のための行為との連続性が失われる。現時点ではより具体的な設計手順を示すことはできないが、そのような問題を考慮した設計手順の確立は今後の課題であ

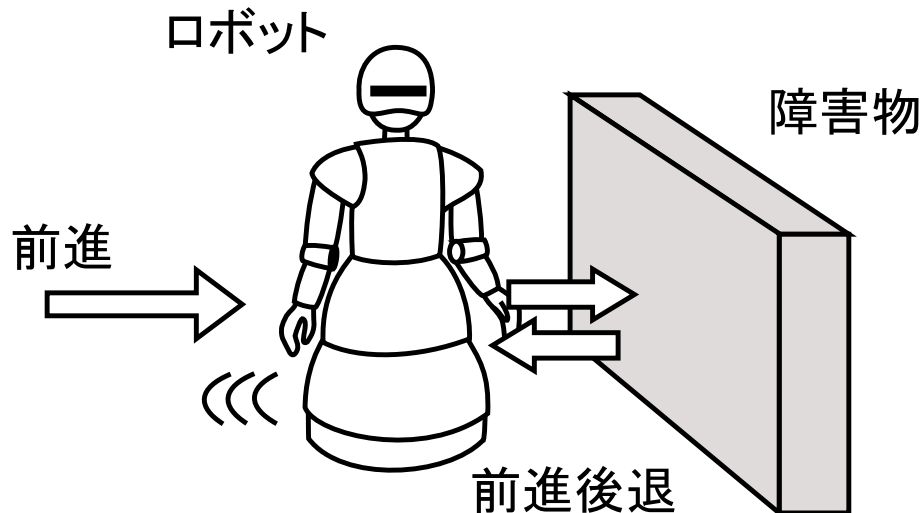


図 4.4 ECEA-R によるコマンドの例

る．このように，ECEA-R は CEA-R と同様に，付加的なデバイスが不要という利点を持ち，CEA-R の問題点であるコマンド設計の自由度を改善するものである．

ECEA-R の例として，ロボットが障害物の除去をユーザに依頼するタスクを考える．コマンドを送信する直前の行為が「直進」であった場合，コマンドを表現するのに「直進」を実行するのに用いたデバイスを使用する．移動ロボットである場合には「車輪」を用い，二足歩行ロボットである場合には「足」を用いてコマンドを表現する．簡単なものでは，直前の行為を繰り返すという方法が考えられる．よって，図 4.4 に示すように，直前の行為である「直進」と，状態を元に戻すための「後退」を交互に実行することでコマンドを表現することができる．特に「後退」は「直進」と反対の行為であるため，ユーザにとって区別しやすいコマンドである．また，直線の行為をコマンドの表現に用いているため，タスク達成のための行為との連続性が維持されている．

どのように「直前の行為」を決定するかという問題があるが，これはロボットの実装アーキテクチャに依存する．たとえば，サブサンクションアーキテクチャ [8] を採用した場合には 1 つの要素行動，もしくは 1 つのリアクティブルールに相当し，状況依存モジュール [35] を採用した場合には 1 つのモジュールに相当する．

ECEA-R を用いたコマンド設計は，ロボットが実行する直前の行為に依存するため，

CEA-R より自由度が高いものの、DCM-R と比較するとデバイスが限定されている分、自由度は低い。この自由度の問題は、設計者の負担とユーザの理解しやすさのトレードオフの関係になっている。よって ECEA-R により、人間にとって理解しやすいコマンドが送信可能であるかを実験的に検証する必要がある。

4.3 実験

ECEA-R による方法を用いたときの人間への効果を調査する。人間への効果とは、具体的にはロボットからのコマンドを人間が受け入れ、人間が適切に行動を行うかどうかを指す。ここでは、協調掃除タスクにおける被験者の行動を調査し、他の 2 つの代表的な DCM-R による方法と比較する。

4.3.1 協調掃除タスク

実験のタスクとして、人間とロボットによる協調掃除タスクを採用する。協調掃除タスクにおいて、人間の分担は「物体の移動」であり、ロボットの分担は「床の掃除」とする。このタスクは、物体の下を含む床全体を掃除することで達成されるため、人間は適切なタイミングで物体を移動する必要がある。ロボットは人間に物体の移動を依頼するコマンドを送る。このとき、ロボットの分担である「床の掃除」の実行に必要なデバイスを用いてコマンドを送信するものは ECEA-R である。それに対し、「床の掃除」の実行には関係ないデバイスを用いたコマンドは DCM-R に分類される。

協調掃除タスクにおいて、ロボットは人間に対し障害物の除去を依頼するが、これは先に述べた図 4.1 の障害物除去タスクに相当する。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 [9] 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。よって、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。協調掃除タスクではロボットの分担は移動を伴って実行されることから、より一般性のある障害物除去タスクにおける調査とみなすことができる。

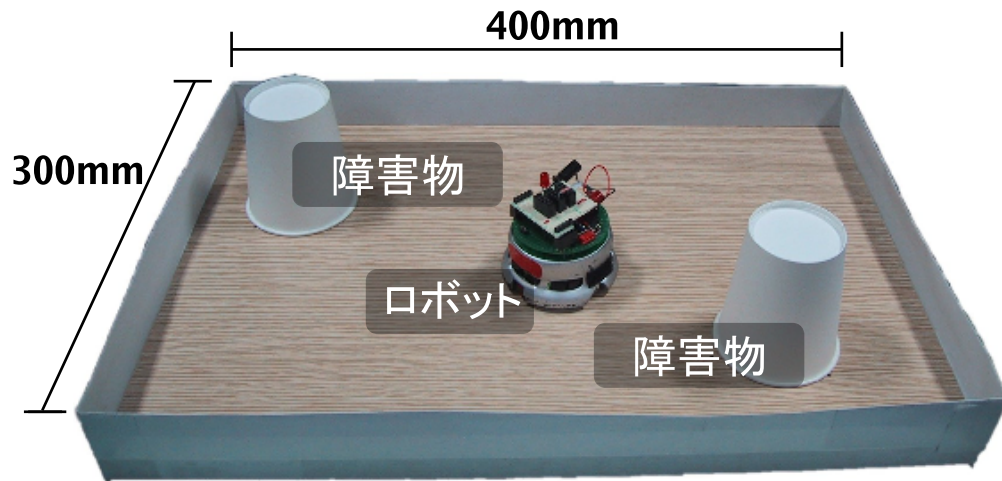


図 4.5 実験環境

4.3.2 環境とロボット

図 4.5 に実験環境を示す．ロボットが動作する範囲は $400\text{mm} \times 300\text{mm}$ 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 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 4.6) 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．

4.3.3 ロボットの行動

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コマンドを送信する．コマンド送信後は，障害物がロボットの左前方にあれば右回転を，右前方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．また，コマンド送信中に障害

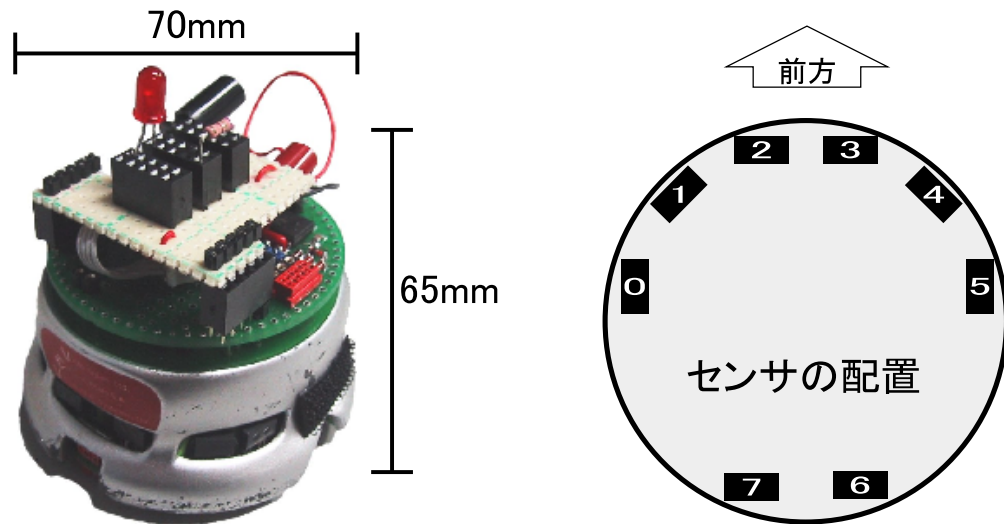


図 4.6 KheperaII

物が移動された場合は、直進を行う。ロボットは1つの実験でこのような行動を繰り返す。ロボットは障害物を移動するように人間に依頼するコマンドを送信するが、ロボット自身では壁と障害物の区別を行うことができない。そのため、壁や障害物の手前で常に同じようにコマンドを送信する。ロボットの行動実装には行動ベースアプローチを採用し、3層から構成されるサブサンクションアーキテクチャを用いた。図 4.7 に各層の行動ルールを示す。各層は並列に処理されるが、数字の大きいものが上位の階層を表し、2つ以上の層から同時に出力があった場合には、上位の階層が下位の階層の出力を抑制する。

第1層では至近距離にある障害物回避に関する行動ルールを記述し、第2層では壁や物体で反射を繰り返して掃除する行動についてのルールを記述している。最後の第3層では、コマンドの送信についての行動ルールを記述している。コマンドの送信方法には ECEA-R によるものと、2種の DCM-R による方法を採用した。具体的なコマンド送信方法に関しては 4.3.4 で述べる。

4.3.4 コマンドの設計

ロボットから人間にコマンドを送信する場合、自然言語などの言語情報を用いる方法が考えられる。しかし、ECEA-R は、ロボットが分担しているタスクを達成するための行

第1層: 障害物回避

- 前進しているとき，前方の至近距離に物体があれば停止．

第2層: 掃除

- 前方に物体がないとき，前進．
- 左前方に物体があるとき，右に 90° 回転．
- 右前方に物体があるとき，左に 90° 回転．

第3層: コマンド送信

- 正面に物体を検出したとき，コマンドを送信．
- コマンド送信中に物体が移動されたとき，直進．

図 4.7 各層の条件と行動

為に，コマンドを埋め込む方法であるため，非言語情報によるコマンドが必要である．もし，ロボットの分担するタスクが自然言語を発するものであった場合には，自然言語を発する行為に埋め込む必要があるが，ここでは自然言語の使用は対象外とする．よって，実験では DCM-R として，多くの工業製品などでも用いられている，比較の実装が容易な非言語情報による光や音を用いた方法を採用する．光，音，ECEA-R によるコマンドの表現パターンは同一のものを採用した．コマンドはロボットが物体を検出したときに送信されるが，DCM-R によるコマンドの場合には物体を検出したとき一旦停止し，その後コマンドを送信する．ECEA-R の場合には停止せずに，そのままコマンドを実行する．以下にロボットが行う3つのコマンド送信方法について説明する．

DCM-R(1): LED ライトによるコマンド

光を媒体としたコマンドとして，LED ライトを採用する．工業製品の多くには光によって状態を表示する機能があり，その方法をコマンド送信に適用した．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．

ここでは，LED ライトの点滅パターンとして，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

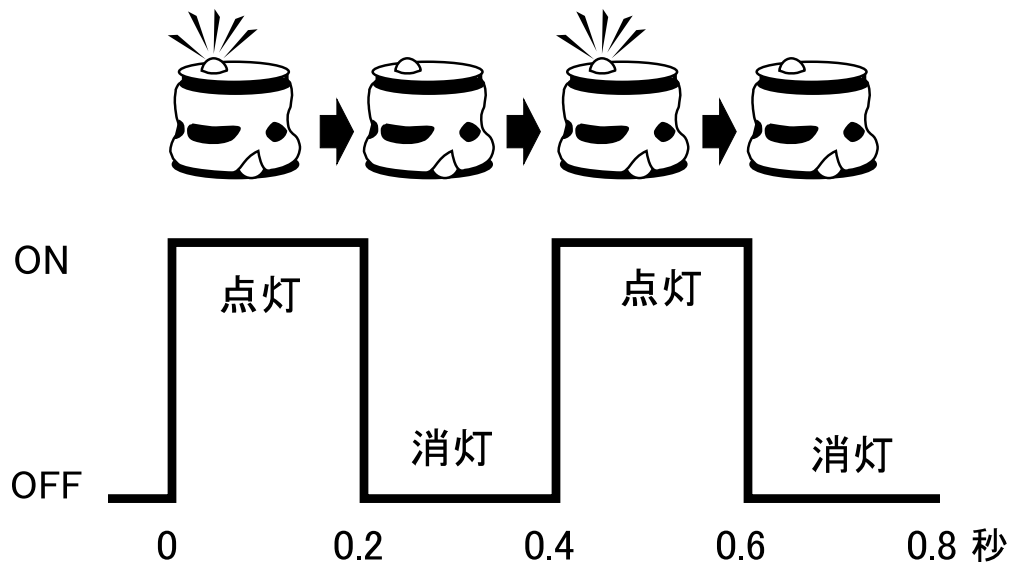


図 4.8 LED ライトによるコマンド (DCM-R)

る．これを基にして，図 4.8 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．0.4 秒の間隔をあけているのは，消灯の時間と区別し，2 回の提示を明確にすることで被験者が行動を開始するタイミングをつかみやすくする狙いがある．

フラッシュユニットの規格を厳守すれば，点滅周波数は 1～2Hz の範囲にするのが妥当であるが，実装上の問題で信号の微細な調節が困難であった．実装後，ビデオ撮影により確認したところ 2.5Hz の点滅周波数であった．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．

DCM-R(2): ブザー音によるコマンド

音声を媒体としたコマンドとして，ブザー音を採用する．音声は人工物の状態を知らせる機能として工業製品に広く採用されており，JIS:S0013 [42] では報知音が「ユーザが製品を正しく使用するための情報を伝える目的で，製品から発せられる音」として定義され

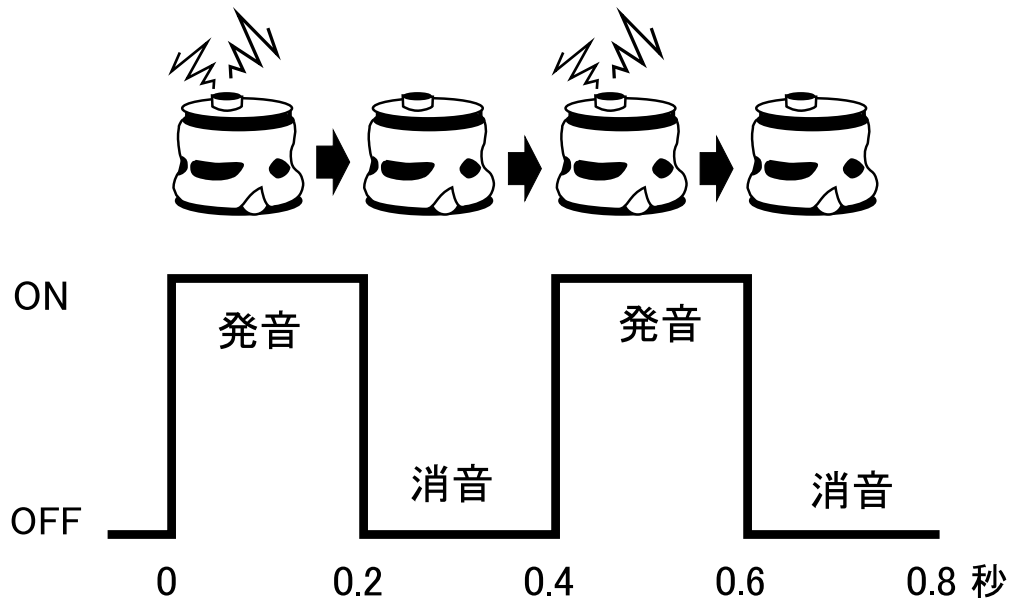


図 4.9 ブザー音によるコマンド (DCM-R)

ている．JIS:S0013 では一定の周波数による報知音を対象としている．そこで，ロボットの上部にブザーを設置し，一定周波数の音（3kHz と 6kHz 付近にピークを持つ）を発音できるようにした．

ここでは，発音パターンとして，JIS:S0013 の規格を参考にした．JIS:S0013 では様々な音の長短の組合せが定義されている．それぞれのパターンは，受付・スタート音，停止音，基点音，終了音，弱注意音，強注意音などに分類されている．報知音の意味を障害物の除去を依頼するコマンドにあてはめるのは難しいため，ロボットから発せられるブザー音のパターンとして図 4.9 に示す，最もシンプルと考えられる発音と消音の時間が同一のパターンを作成した．これは，図 4.8 の LED ライトによるコマンドと同一のパターンである．このパターンは JIS:S0013 における強注意音のパターン（図 4.10）と最も類似しており，JIS の方が 0.05 秒消音時間が短くなっている．

ブザー音の音圧は周波数特性を考慮し，等ラウドネス曲線（ISO226）に基づき，耳障りな大音量を避け，人間の会話程度（50～60dB）の範囲に設定した．実験では，LED と同様に，0.8 秒間に 2 度音声が鳴るパターンを 1 回として，0.4 秒の間隔をあけて 2 回提示を行う．

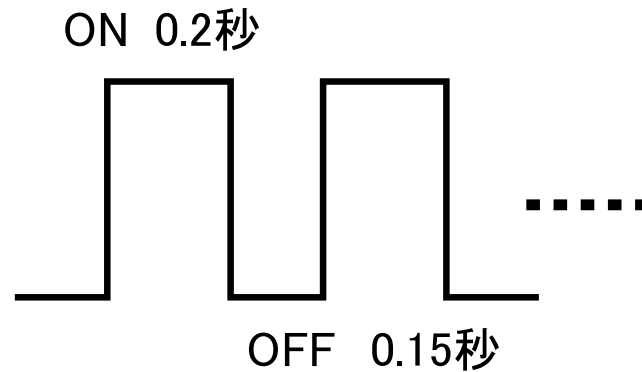


図 4.10 JIS:S0013 に基づく強注意音の例

ECEA-R: 行為に埋め込まれたコマンド

ECEA-R の設計は、ロボットが分担しているタスクを達成するための行為に強く依存する。協調掃除タスクにおいて、ロボットの分担は床の掃除であり、これを達成するための行為は、図 4.7 の行動ルールに基づき「壁での回転」と「直進」である。特に、ロボットは物体を検出したときコマンドを送信するため、コマンドを送信する直前の行為は「直進」である。「直進」を行うのに必要なデバイスはロボットの車輪であるため、車輪を用いてコマンドを設計する。ここでは、図 4.4 の例のように、「直進・後退」を繰り返してコマンドを表現する。「直進」は直前の行為であり、「後退」はその反対の行為に相当する。よって、ユーザがコマンドして識別しやすい表現であると同時に、タスク達成のための行為との関連も十分保持されている。このような表現は ECEA-R の一例にである。当然同じデバイスを用いた表現であっても、人間が観察したときの印象が異なると考えられる。ここで採用した表現は、直前の行為を繰り返すものであるため行為の連続性が高く、行為に埋め込まれているコマンドとして典型的なものだと考えられる。

「直進・後退」のような動作によるコマンドは既存の人工物設計における規格が存在しないため、図 4.11 に示ように、LED ライトとブザー音のパターンと同一とした。実験では、ON の 0.2 秒間前後の移動（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。

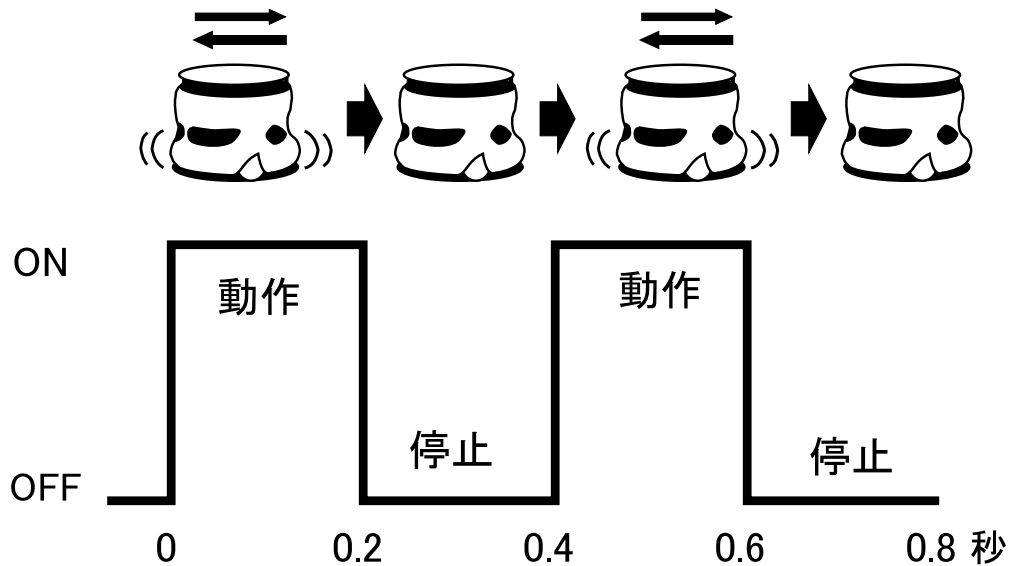


図 4.11 行為に埋め込まれたコマンド (ECEA-R)

4.3.5 実験方法

被験者へは、小型移動ロボットの目的は床の掃除であり、壁で反射を繰り返して自律的掃除すること、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を説明し、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指示した。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、実際に障害物を移動できることを確認させた。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。被験者には、障害物を移動する役割に関しては説明せず、曖昧な指示を与えている。また、ロボットのコマンド送信に関しても一切説明していない。

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つのコマンド送信方法のうち1つを実行する。このとき、図 4.12 に示すように、ロボットは最初に壁に向かって直進し（経路 1）、壁を検出したときにコマンドを送信する。続いて 90° 回転し、障害物に向って直進する（経路 2）。各実験でロボットは同じ経路をたどる。しかし、経路 2 以降は、車輪のスリップなどの影響で次の目標物に向かうように制御することはできなかった。そのため、すべての被験者に共通している設定は、最初に壁の

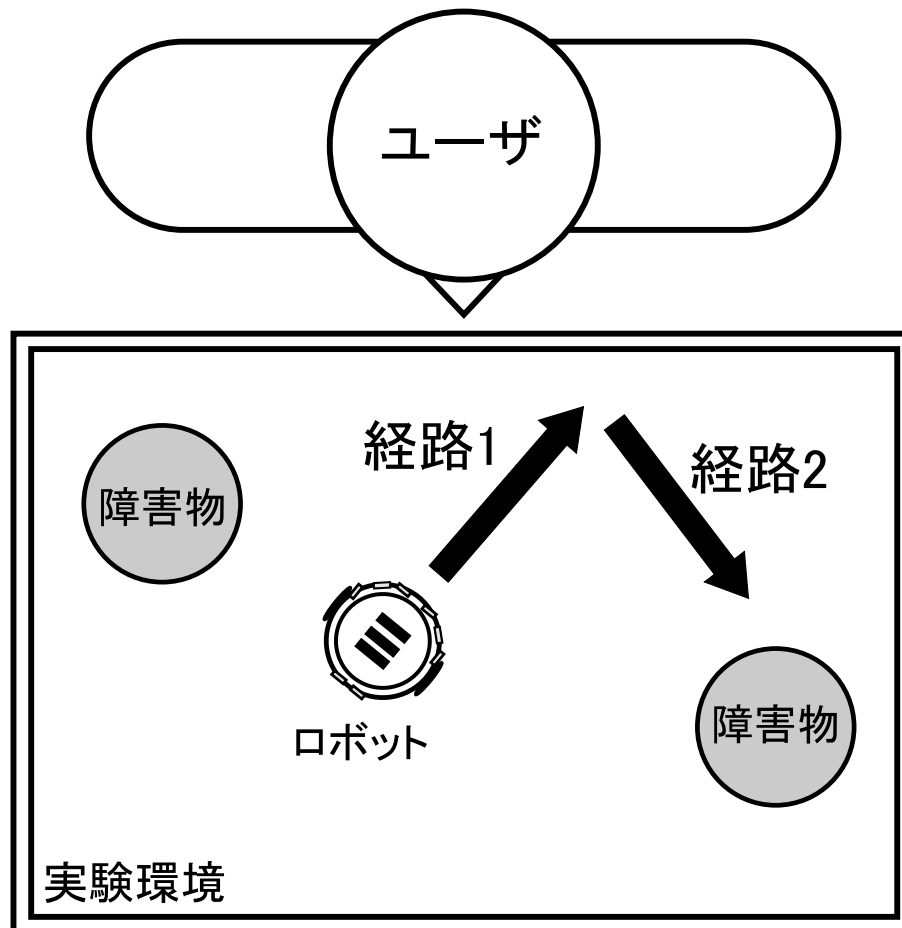


図 4.12 ロボットの経路

手前でのロボットによるコマンド送信を観察し，その次に障害物前でのコマンド送信を観察することである．このような経路を設定した理由は，ロボットが壁の前でも障害物の前でも同じコマンドを送信することを示すためである．実験では，異なる状況においても同じコマンドを送信するロボットに対して，被験者がどのように振舞うかを調査する．

被験者は LED ライト，ブザー音，ECEA-R の 3 つのコマンドをすべて経験する．各コマンドの提示順序は被験者毎に異なり，ランダムに決定した．1 つの実験の試行時間は 2 分程度とし，実験者が終了を合図した．図 4.13 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，ロボットに対して親和性が低いと考えられる，21 歳～44 歳の男性 9

名，女性6名の計15名（大学生9名，社会人6名）に依頼した．

4.3.6 実験結果

図4.14に実験結果を示す．グラフは，障害物の前での最初のコマンド（図4.12の経路2の直後）によって障害物を移動させた被験者の人数を表している．実験の評価方法として，被験者が障害物を持ち上げるまでの時間を測定して効果を検証する方法も考えられるが，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に差があるため採用しなかった．

図4.14に示すように，LEDライトによるコマンドの場合では4名が，ブザー音によるコマンドでは4名が，ECEA-Rによるものでは8名が経路2の直後のコマンドで障害物を移動した．各コマンドによって障害物を移動させた被験者数の尺度水準は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克兰の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（ $Q=5.3$, $d.f.=2.0$, $P=0.07$, $\alpha=0.1$ ）があることが分かった．この場合，LEDライトとブザー音によるものが同じ人数であるため，ECEA-RとLEDライト間，ECEA-Rとブザー音間の2組で比率の差があると考えられる．この結果は，ロボットによるコマンドの理解しやすさや受け入れやすさと関係が深いと考えられる．よって，ECEA-Rによる方法は従来法と比較して同等以上の理解しやすさ，受け入れやすさを有すると考えられる．

表4.1に障害物を移動した理由のアンケート結果を示す．上記の障害物前での最初のコマンドによって障害物を移動した被験者に対し，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．ECEA-R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．また，ブザー音に関しては，移動した被験者数が4名であるのに対し，回答数が8と倍の数になっているのが特徴的である．

4.4 考察

4.4.1 各コマンドの設計の妥当性

LEDライトやブザー音の設計では，ユーザに不快感を与えることを避けるため，眩しい光や大音量は採用しなかった．よって，実験において被験者が各コマンドに確かに気づいていたかが問題となる．表4.2に実験後のアンケート調査結果を示す．LEDライトに

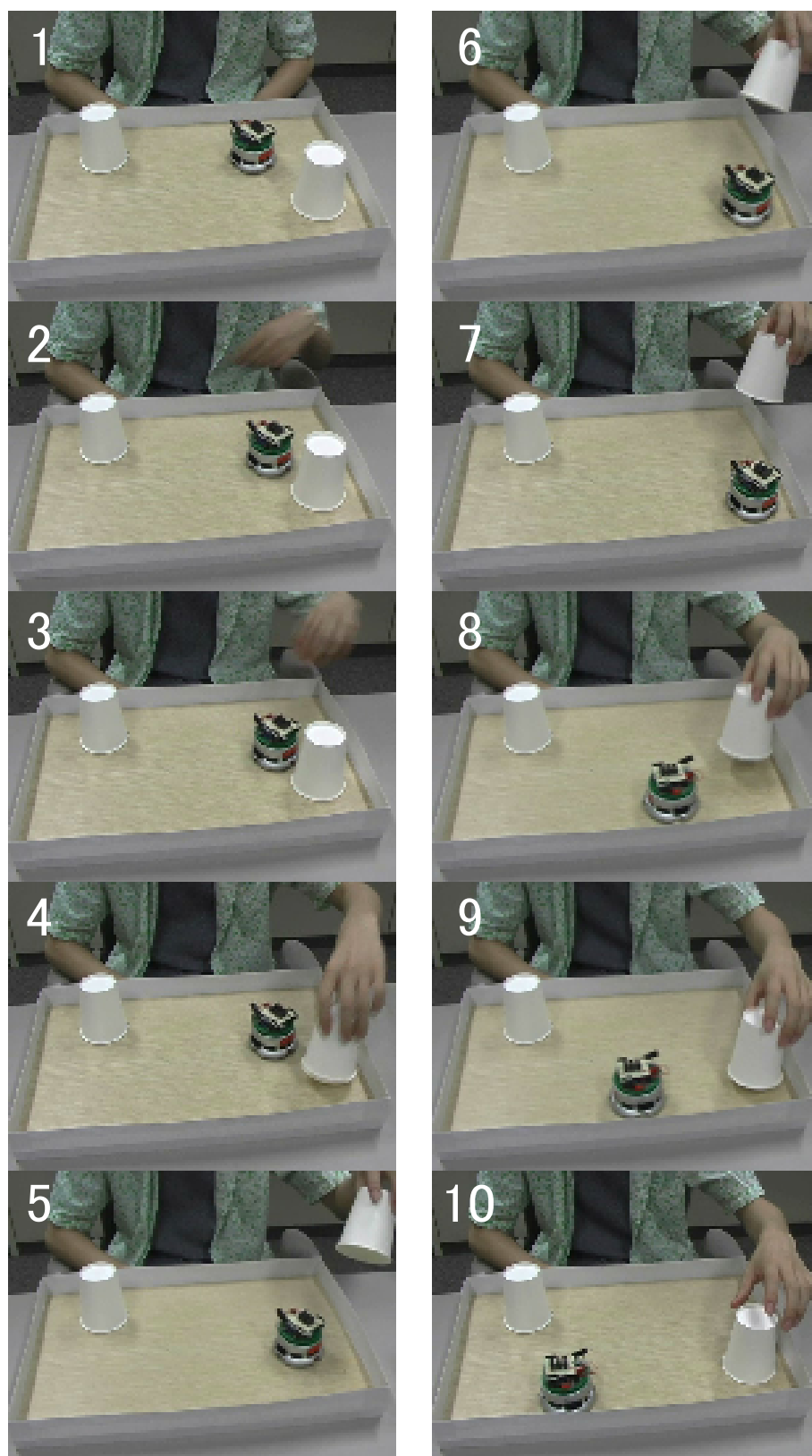


図 4.13 実験の様子

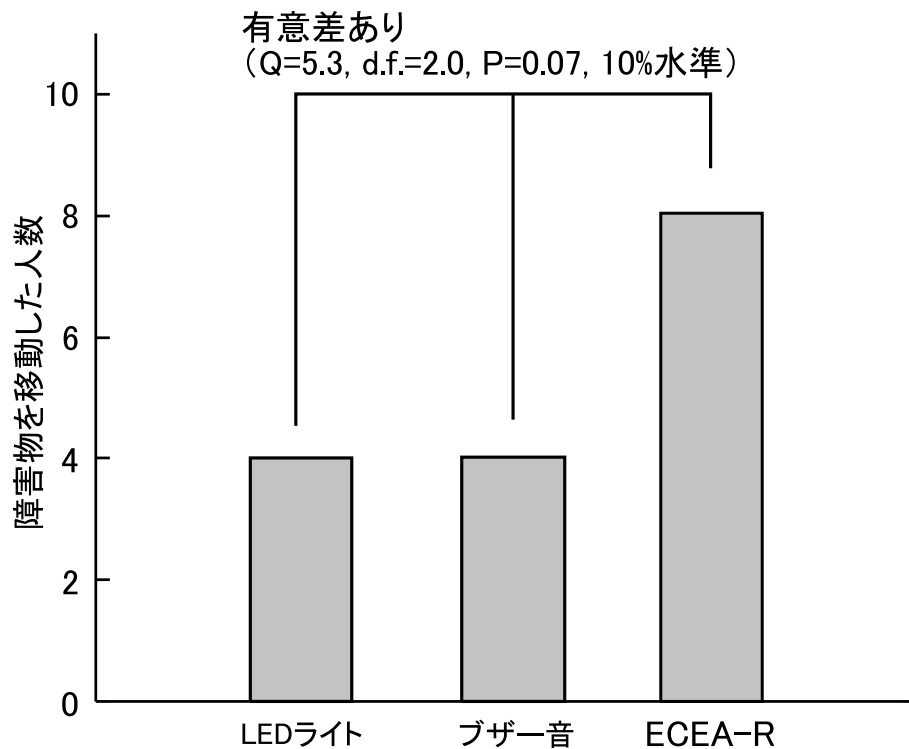


図 4.14 最初の障害物の前のコマンドで障害物を移動した被験者数

対しては 15 名中 14 名，ブザー音に対しては 15 名全員，ECEA-R に対しては 15 名中 14 名がコマンドに気づいたと回答している．よって，ほぼ全員がコマンドに気づいていることから，各コマンドの設定は妥当なものであったと考えられる．

4.4.2 ECEA-R の有効性

実験の結果，障害物の前での最初のコマンド（図 4.12 の経路 2 の後）によって障害物を移動させた被験者数は ECEA-R によるものが最も多く，統計的な検定の結果，LED ライトやブザー音による従来の方法と比較して，ECEA-R は同等であるか，それ以上の効果があることが示された．よって，ECEA-R の利点は，従来の手法と同等かそれ以上の効果を有すると同時に，ロボットに付加的なデバイスが不要であり，設計者の負担が少ない点にあるといえる．

ECEA-R の効果は，被験者がロボットの依頼を理解し，それを実際に実行に移したことで示されている．よって，ECEA-R による方法は人間にとって理解しやすく，行動を起こすのに十分な動機を与える方法であると考えられる．被験者のアンケート結果をみると，ECEA-R 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

表 4.1 障害物を移動した理由

	LED ライト	ブザー音	ECEA-R
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	2	3
3. 分からないが、動かし た方が良く感じた	1	1	1
4. 緊急性を感じた	0	2	1
5. その他	0	0	0
合計回答数	4	8	9

表 4.2 各コマンドに気づいたか

	LED ライト	ブザー音	ECEA-R
気づいた	14	15	14
覚えていない	1	0	1
合計	15	15	15

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」という回答からは、被験者がロボットを擬人化していることが考えられる。また、「状況で判断した」という回答からは、ECEA-R による方法がロボットの行為に埋め込まれているために、「床の掃除をしている」という状況をより明確にし、被験者が援助するのに十分な動機を与えた可能性が考えられる。

ブザー音による方法でもアンケート結果は「障害物を動かして欲しそうに感じた」と「状況で判断した」に多くの回答を集めている。しかし、ブザー音の場合では障害物を移動した被験者が4名であるのに対し、回答数は8となっている。これは、被験者の理解に迷いが生じていると考えることができる。つまり、ブザー音によるコマンドは様々な解釈が可能であるため、被験者がコマンドの意味を決定するの時間がかかり、その結果ロボットがコマンドを送信している間に障害物の除去ができなかった可能性がある。LED ライトによる方法に関しても、被験者の意見にばらつきがあり、コマンドの解釈が難しかったと推察される。ECEA-R による方法は、ロボットの行為に埋め込まれているため、掃除タスクとの関連が強い。そのため、人間がそれを観察したとき、コマンドの意味を理解しやすいと考えられる。

しかし、リーブスらや竹内らの研究 [98, 116] 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、被験者自身が障害物を動かした理由を内観することは難しい。よって、障害物を動かした理由を明確にするためには、実験中に被験者が行動を行うのに先立って理由を言ってもらうなどの方法を採用する必要がある。今回の実験結果からは、ECEA-R によってロボットのタスクを明確にできたことと、被験者がロボットを擬人化して「援助したい」という気持ちにさせたことが主な要因であると考えられる。

4.4.3 多義的なコマンド

4.4.2 で述べたように、コマンドの効果は人間によってコマンドが適切に解釈されるかどうか鍵となる。よって、ロボットが自然言語を用いて「障害物を移動してください」と発話したり、ディスプレイに文字を表示するなどすれば簡単に解決できると考えられる。しかし、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外界の認識精度が低いロボットを用いた場合、異なる状況でも常に同じ意味を示す発話を繰り返すことになる。これは、状況と一致しないコマンドを送信するために、ユーザに煩わしさを与えてしまう可能性がある。一般にロボットは画像処理や赤外線近接センサ、

ソナーなどを用いて外界の情報を自律的に取得するが、これらの情報から対象物がどのような性質を持っているかを特定するのは技術的に困難である。人間であれば、重そうな物体であるのか、軽そうな物体であるのか、固定してある物体か、移動できる物体であるかなどを比較的容易に予測することができるが、これはロボットにとって難しい課題である。実験で採用した協調掃除タスクにおいては、ロボットは人間によって移動可能な物体であるか、そうでないかを判断する必要があるが、そのような判断をすることは技術的に困難であった。よって、多義的なコマンドである ECEA-R は、ロボットによる高度な外界認識能力が不要であるという利点を持つ。

実験では比較対象として、LED ライトとブザー音という従来の人工物設計で用いられている方法を参考にしたが、人間に障害物の移動を依頼するコマンドとして、実験のパターン（図 4.8，図 4.9）が最適なものであるとは限らない。しかし、実験で用いたパターンは ECEA-R と同様に多義的なコマンドとなっている。よって、人間に緊急性を印象づけるような、強い光やサイレンのような音を、外界の認識能力が低いロボットに採用するのは適切ではない。ロボットに高度な外界認識能力を必要としないという意味では、今回の実験設定は妥当なものであったと考えられる。しかし、多義性の程度問題もある。つまり、1つのコマンドがいくつの意味を持ちうるのかは、コマンドの理解しやすさに影響を与えると考えられる。これについては、様々なタスクにおいて、光を媒体とする場合や音を媒体とする場合について、それぞれ網羅的な実験が必要となる。今回の実験では ECEA-R による効果を調査することが目的であったため、従来法を適用して傾向を観察したが、異なる設定での調査については今後の課題である。現時点では、従来法をベースとするだけでは人間に対するコマンドとして不十分な可能性があり、それらと比較した場合に、ECEA-R は有望であるといえる。

また、多義性に関して、自然言語によっても「それ」や「これ」といった、意味が1つに決定しないようなものが可能である。よって、自然言語を用いてそのような言葉や文字を提示する実験も考えられる。今回の実験で自然言語を対象外とした理由は、自然言語を発声させる場合、ロボットにスピーカの制御機能や表示装置を別途実装する必要や、それに伴うソフトウェア開発が必要であるため、比較の実装コストがかからない非言語情報によるコマンドの効果を調査するのが妥当であると考えたためである。

4.4.4 ECEA-R の設計方法

現段階では、ECEA-R の設計方法を示すには至っていない。これは、4.4.2 と 4.4.3 で述べたように、ECEA-R の効果はロボットの分担するタスクとの関連性と、コマンドの多義性に強く影響されると考えられるものの、人間の理解しやすさとの関係が明確になっていないためである。実験では、前進・後退という ECEA-R を採用したが、たとえば、左右に小刻みに回転するといった動作が考えられる。このようなコマンド表現は直前の行為とは関係ない行為であるため、前進・後退に比較して、タスク達成のための行為との関連性が低い。今後、上記に代表されるような、様々なコマンド表現による ECEA-R を実装し、その効果を確認していくことにより、タスクとの関連性やコマンドの持つ多義性と、人間にとっての理解しやすさとの関係が明らかになると考えられる。

また、ロボットが同じ行動をしても、アピアランスの違いによって、人間に異なる印象を与えるという報告 [44] がある。そのため、小松らの研究 [57] にあるように、ロボットの行動とアピアランスとの関係性の詳しい調査や、動物のような外見とその行動 [109] との関係性の調査などを行うことで、適切な埋め込み方に関する知見を得る必要がある。

4.4.5 ECEA-R と擬人化の関係

4.4.2 では、被験者のアンケート結果から、被験者が ECEA-R による方法でロボットを擬人化した可能性を述べた。この要因として、ECEA-R による方法はロボットの動きを採用していることが考えられる。被験者はロボットの動きを観察したとき、人間の動きとの類似性を発見する。そして、人間のある動きが、人間のある心理状態に対応したとき、ロボットがある内部状態（心理状態）になっていると対応付けする。実験においては、ロボットが障害物の前で「行ったり来たり」する前進・後退を繰り返すため、「困っている」と解釈することができる。ロボットが「困っている」と理解できれば、その原因を取り除くために、人間は障害物を移動する行動をとる。ロボットの心理状態を理解することは、実際に行動をとる動機として十分だと考えられる。図 4.15 に示すように、ECEA-R ではロボットの動きを採用しているため、人間の心理状態に結び付きやすい。これに対し、LED ライトやブザー音による方法では、人間が身体のみを用いて体を発光させたり、ブザー音のような一定周波数の音の繰り返しで発話を行うことは通常では考えにくいいため、人間の心理状態に結び付けることが難しいと考えられる。

今回の実験では、このような擬人化の促進が生じていることを裏付ける結果を得られて

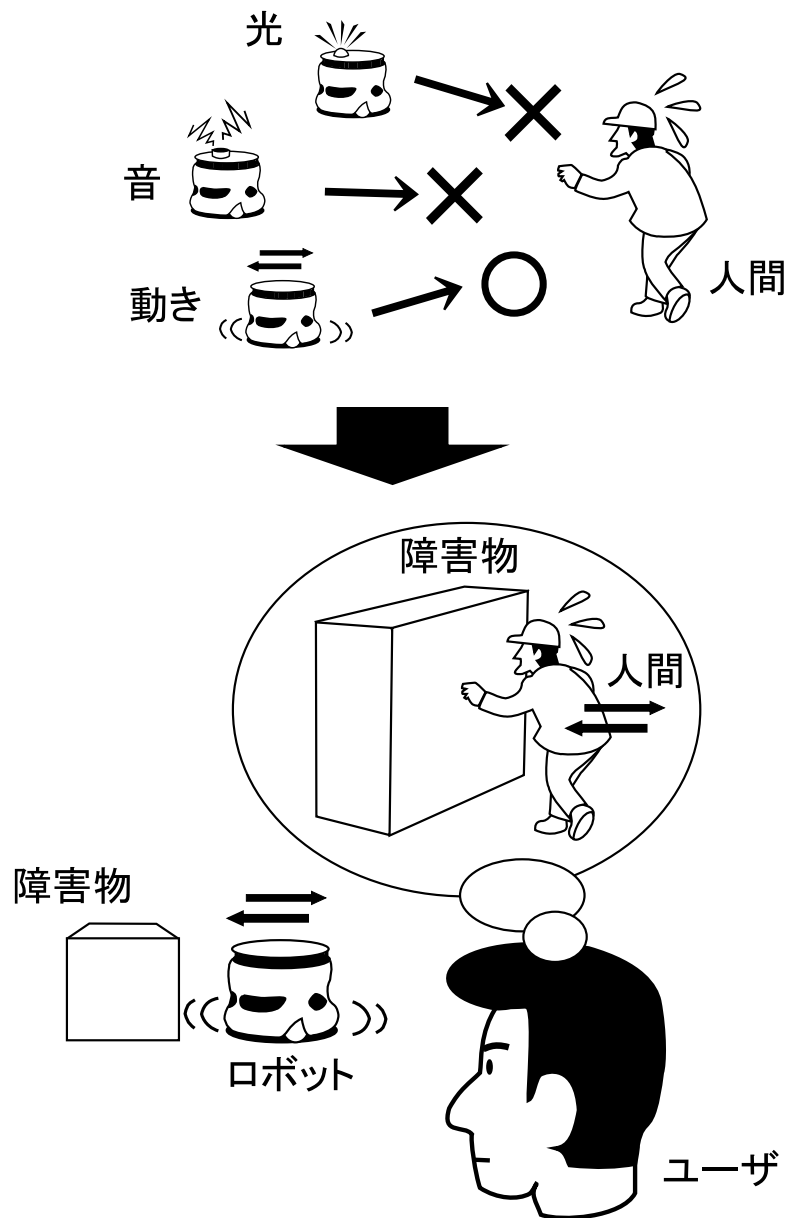


図 4.15 ECEA-R による擬人化の促進

いない．今後の展開として，擬人化を意識して設計した ECEA-R や DCM-R を用いて比較実験し，埋め込みと擬人化の関係を明らかにすることが望まれる．

4.4.6 他のロボットへの適用可能性

実験で用いた ECEA-R による前進・後退の動きは，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に障害物回避が含まれる場合は，障害物の除去を依頼するコマンドとしてそのまま適用することができる．移動ロボットは，人間型ロボットの上半身を実装したコミュニケーションロボット [45] やマニピュレータを実装した研究 [91, 26] に代表されるように，開発基盤用ロボットとして採用される事例が多い．そのため，ECEA-R を適用可能な場面も多いと考えられる．

4.4.7 実験の設定

ECEA-R と DCM-R の比較に関して，表 4.3 に示すように，埋め込みの対象として「ロボットの動き」と「ロボットの動き以外」のものに分類することができる．ここで「動き」を取り上げたのは，既存の人工物と比較したときロボットの最大の特徴は，その身体を活用した「動き」にあるからである．

今回の実験では，表中の A と D との比較を行なった．ECEA-R は「動き以外」の音や光を用いる行為にも埋め込み可能であり，DCM-R に関しても同様に「動き」によるコマンド送信が可能であるため，タスクを適切に設定することによって B と C の比較が可能である．B と D の比較に関しても，ロボットの分担するタスクが音声を発するものに設定した場合，音声に ECEA-R を埋め込み (B)，光で DCM-R を設計 (D) すれば比較実験が可能である．また，A と B や C と D の比較も可能である．しかし，A と C の比較は不可能である．DCM-R はタスクの実行とは無関係のデバイスによって実行されなければならない，「動き」で DCM-R を設計する場合，ロボットのタスクは「動き以外」(B) でなければならないからである．このような表で整理したとき，埋め込み対象として「動き」または「動き以外」のどちらか一方に対して実験を行うのが一般的であると考えられるが，今回の実験で A と D の比較を行ったのは，ロボットが分担するタスクとして「動き」を伴う可能性が高いという理由による．掃除作業や運搬作業など，ロボットを導入す

表 4.3 実験の設定

	ECEA-R	DCM-R
動き	A	C
動き以外	B	D

る事例において，ロボットのタスクは「動き」が主たるものになる．よって，A に着目したとき，ECEA-R と DCM-R を比較するには，D を選択する以外にない．

今後の課題として，この表に基づき可能な組合せの実験を蓄積することで ECEA-R と DCM-R の性質を明かにしていくことが挙げられる．

4.5 まとめ

本章では，ロボットがタスクを達成するための行為に，人間へのコマンドを埋め込む方法（ECEA-R）が，人間に与える影響を調査した．人間の行為にロボットへのコマンドを埋め込んだ場合の利点については第 3 章で明らかとなったが，ロボットの行為に埋め込んだ場合の効果に関しては未知であった．表面的には ECEA-R を採用することで付加的な装置や実装が不要なため，設計者の負担軽減につながるが，ユーザに対する影響を明らかにする必要がある．そこで，ECEA-R と，従来法の行為に埋め込まずに直接ユーザにコマンドを送る方法である DCM-R との比較実験を行った．実験では協調掃除タスクを仮定し，机の上の掃除を行う掃除ロボットに対し，被験者が協力するかどうかを観察した．実験の結果，ECEA-R によって多くの被験者がロボットの作業に協力する行動をとり，従来法と比較して同等かそれ以上の効果があることが分かった．ECEA-R の効果に関してはより詳しい調査を行うのが望ましいが，ECEA-R によってロボットが高い外界認識能力を備えていなくても人間に煩わしさを与えず，理解しやすいコマンドによって人間を適切にガイドできると考えられ，その発展に期待できる．

第 5 章

結論

5.1 本研究の成果

本研究の目的は「行為に埋め込まれたコマンド」の有効性を調査することであった。行為に埋め込まれたコマンドは行為主体の行為に伴ってコマンドを送信するものである。行為主体として考えられる対象は人間とロボットである。そこで、1 つ目の実験では人間の行為にコマンドを埋め込んだ。それに対し、2 つ目の実験ではロボットの行為にコマンドを埋め込んだ。

本論文では「行為に埋め込まれたコマンド」を共通のキーワードとして、異なる行為主体における実験を行ったが、その評価基準は 1 つである。それは「人間の負担」である。人間の負担を軽減するような技術開発を重視して実験を行った。人間とロボットとの関係を考えたとき、負担以外にも様々な面から評価することが可能である。人間に脅威を与えないようなロボット、人間を楽しませるロボット、人間に親和感を抱かせるロボットなどロボットに求められている要素は実に多様である。しかし、本研究ではロボットの実用性に焦点を当てた。それは、ロボットの存在を考える上で最も基本的な要素だからである。「便利だからロボット使う」というのは、非常に明確で簡潔な理由だと考えられる。

人間の負担を考えたとき、ユーザとしての視点と設計者としての視点に分けることができる。そこで、人間の行為に埋め込む場合とロボットの行為に埋め込む場合における、ユーザのメリットと設計者のメリットを表 5.1 にまとめる。表 5.1 は第 3 章と第 4 章の実験結果に基づき、コマンドを埋め込まない方法と比較したときのメリットを示している。

表 5.1 に示すとおり、2 つの実験ではユーザからの視点を重視して、行為に埋め込まれたコマンドを用いた場合の被験者実験を行った。設計者の視点に関しては被験者実験を実施していないが、各実験におけるロボットの実装段階を想定した上で、妥当と考えられる

表 5.1 ユーザのメリットと設計者のメリット

	人間の行為に埋め込む場合	ロボットの行為に埋め込む場合
ユーザ	<ul style="list-style-type: none"> ○ 認知的負荷の軽減． 	<ul style="list-style-type: none"> ○ コマンドの意味が理解しやすい可能性がある．
設計者	<ul style="list-style-type: none"> ○ 高性能ロボットの開発が不要． 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 高性能ロボットの開発が不要． ○ 付加的なデバイスが不要．

ものを表に示した．

ユーザのメリットは，認知的付加の軽減と，コマンド意味が理解しやすいことである．ユーザの行為にコマンドを埋め込むこと（CEA）により，ロボットに対して直接コマンドを送信する作業が不要となる．さらに，拡張したコマンドの埋め込み（ECEA）においても作業時のユーザの認知的負荷を軽減できる．また，ロボットの行為にコマンドを埋め込むことにより，コマンドの意味が理解しやすいものにできる可能性がある．このように，ユーザのメリットとして，作業時とコマンド理解時の負担軽減が挙げられる．

設計者のメリットとして共通するものは，高性能なロボットの開発が不要な点である．第 3 章，第 4 章で行った実験では，いずれも市販されている掃除ロボットと同程度のロボットを採用しており，現在の技術で十分に実装可能である．本論文で行った実験では，人間がロボットの作業に介入することを前提としているが，このような前提は完全な自律ロボットが開発されるまで実用的な方法として用いられる．完全自律ロボットの開発には技術的な課題が多く，その実現には時間がかかると考えられる．提案手法は，人間がロボットの作業に介入するアプローチであり，その時の技術レベルに合わせてインタラクションを設計することが可能である．そのため，今後ロボット技術が高度になっていく過程においても適用可能な手法であると考えられる．

5.2 今後の課題と展望

今後の課題として，人間の行為に埋め込まれたコマンドに関しては，他のタスクや移動ロボット以外のロボットに適用して効果を確認することが挙げられる．実験で扱ったも

のは ECEA の一例にすぎない。ECEA は、広い適用範囲を持つ可能性があるものの、多くの適用事例を通してそれを検証する必要がある。また、そのような事例を踏まえて設計方法を改良していくことが望ましい。また、ロボットの行為に埋め込まれたコマンドに関しては、ECEA-R が有効である理由や適用範囲を明確にする必要がある。実験では ECEA-R の実装方法の 1 つを採用したにすぎず、ロボットが異なる動作でコマンドを表現した場合でも同様な結果になるとは限らない。実験結果からは、ECEA-R が有効である可能性を示すにとどまっており、擬人化しやすさとの関係を明確にする必要がある。

ECEA は人間の行為に埋め込まれたコマンドを拡張し、より複雑なコマンドをロボットに送信する方法を提供するものであるが、ユーザの視点からみたとき 1 つの問題が考えられる。それはコマンド送信方法がユーザにとって発見しにくいものである可能性である。実験では被験者にコマンド送信方法を教示しているが、KEEP という行為はユーザにとって発見しにくいものかもしれない。これは実験的に確認する必要があるが、KEEP に限らず、ロボットをより便利に使う方法をユーザに発見させることは重要な課題である。そこで、ここではマニュアルを読んだり、他人から教示を受けることなく、ユーザに自分でロボットの機能を発見させることを目的として、マニュアルフリーマシンを提案する。以下ではマニュアルフリーマシンについて説明する。

マニュアルフリーマシン

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、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。

ここではマニュアルを読まずに使える機械である、マニュアルフリーマシンを提案する。マニュアルフリーマシンとしてのロボットを考えたとき、その機能を理解する手順として、図 5.1 に示す、3 段階で構成されるインタラクションが考えられる。

(1) ロボットの内部状態表出

ロボットは自身の内部状態を表出し、ユーザの介入を促す。

(2) ユーザの行為

ユーザは (1) のロボットの内部状態を理解し、適切な行動をとる。

(3) ロボットの機能実行

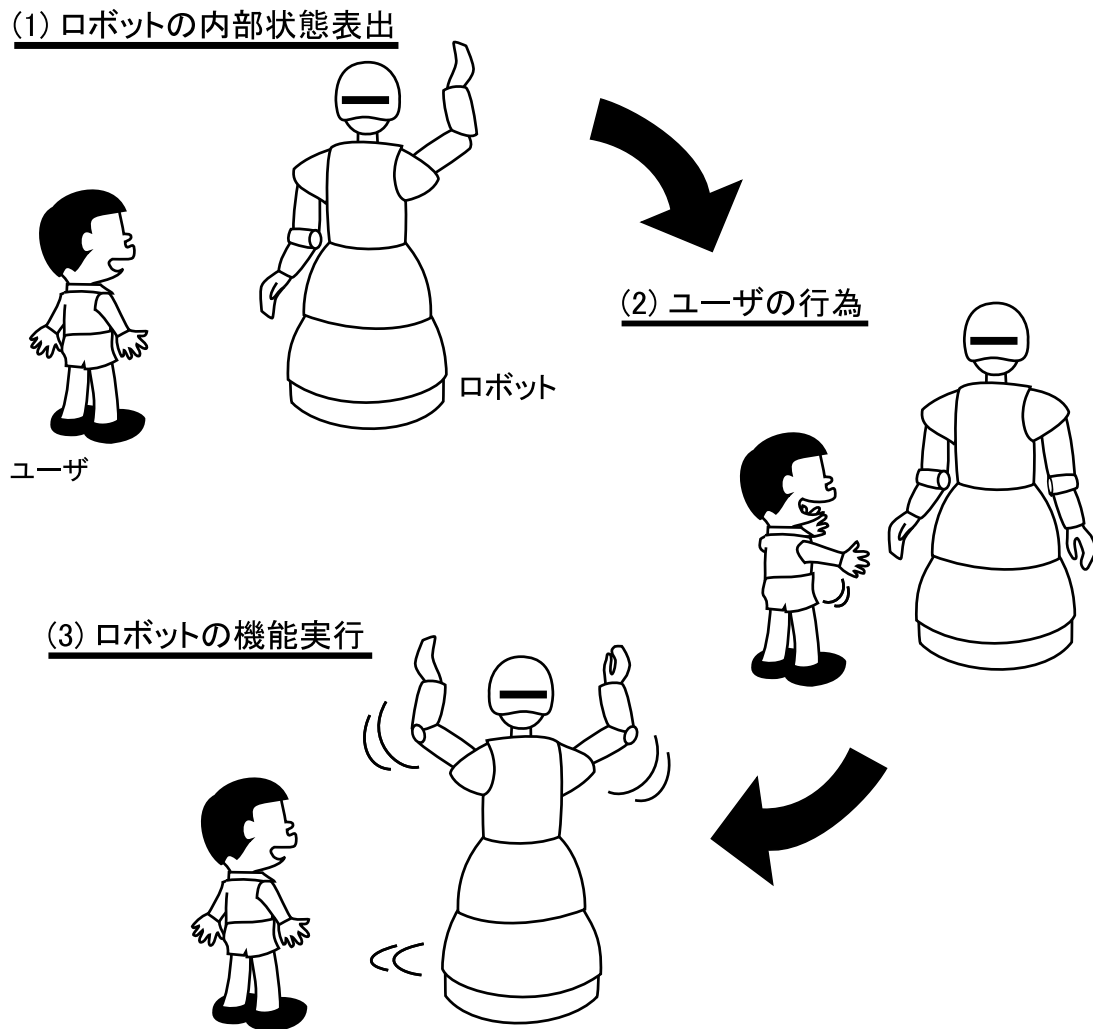


図 5.1 機能発見

ロボットは (2) の人間の行動やその結果に対応した機能を実行する。

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見出すことが可能だと考えられる。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。

第3章では、ユーザの負担を軽減するための方法について述べたが、予備知識がないユーザにとって、ECEAを用いたロボットを制御を行うことは難しい可能性がある。ユー

ザがタスクを達成するための行為にコマンドを埋め込んでいるため、変更が最小になっているものの、同じ状態を維持する行為をユーザが発見するのは困難であると考えられる。それに対し、第4章では、ロボットの行為にコマンドを埋め込むこと（ECEA-R）で、ユーザの協力的な行動を誘導している。

ここで、ECEA-R を用いて、ユーザに ECEA による制御方法を発見させることを考える。上記の機能発見の手順において、ECEA によるロボットの制御をユーザが発見すべき機能と設定したとき、ECEA-R を用いることで、(1) ロボットの内部状態表出と (2) ユーザの行為を達成することが可能であると考えられる。ただし、機能発見はロボットに多くの機能が実装されているときにユーザの負担を軽減するため、「(2) ユーザの行為」で想定すべき行為は多数存在すると考えるべきである。そのため、どのようにしてユーザによる特定の行為を導くかという問題や、人間の行為をロボットが識別するための技術開発に取り組む必要がある。ロボットのみならず、多くの家電製品においてマニュアルフリー化が達成されれば、多機能化に伴い複雑化している機器を使う煩わしさからユーザが解放されることが考えられる。

謝辞

本論文の執筆に際しては、多くの方から貴重な援助をいただきました。ここ数年にわたって私を支援してくれた全ての方に感謝の意を表します。その方々の協力なくしては本論文は完成しなかったでしょう。本当にありがとうございました。

私の指導教官である国立情報学研究所の山田 誠二教授は、総合研究大学院大学に入学してから4年間に渡って辛抱強くご指導くださいました。私の研究活動の大半は山田教授とのミーティングで占められていると言っても過言ではないほど熱心にご指導いただきました。ここに厚く感謝いたします。

博士論文審査委員である国立情報学研究所の佐藤 健教授、古山 宣洋助教授、公立ほくろ未来大学の小野 哲雄教授、慶應義塾大学の今井 倫太助教授は、審査やミーティングを通して貴重なご意見をくださいました。ご多忙でありながら、私のために時間を割いてくださいましたことを厚く感謝いたします。ありがとうございました。また、国立情報学研究所の相澤 彰子教授、武田 英明教授、杉本 晃宏助教授には、研究が未熟なうちから多くのアドバイスをいただきました。ここに厚く感謝いたします。

山田研の皆様には日頃の研究から個人的な相談に至るまでお世話になりました。間瀬 心博氏、榎野 憲克氏、Ganesan Velayathan 氏、李 鵬氏、山崎 あぐり氏、Richard Nadine 氏、秘書の神田 涼氏に感謝いたします。また、山田研 OB でもある東京工業大学の片上大輔助手には研究アドバイスはもとより、様々な活動で支援していただきました。大変ありがとうございました。

総合研究大学院大学での4年間がより充実したものであったのは多くの同僚の存在です。濱崎 雅弘氏、山中 秀夫氏、川崎 直之氏、尾崎 亮太氏、沼 晃介氏、中山 記男氏、大向 一輝氏、関 洋平氏、Pattara Kiatisevi 氏、Jumpot Phuritatkul 氏、Tuangthong Wattarujeeekrit 氏、梶山 朋子氏、東京大学の宇都宮 聖子氏、小澤 武氏、松崎 和賢氏、横浜国立大学の上松 大輝氏に感謝いたします。特に濱崎氏とは日頃から研究に関して議論を重ねることができ、視野を広げることができました。ありがとうございました。

本論文は実験に参加していただいた被験者の皆様の協力なしには完成させることができませんでした。この場を借りてお礼を申し上げます。ご協力ありがとうございました。

ここで名前をあげさせていただいた方々は、私が感謝したい人のほんの一部にすぎません。大学のスタッフの方々や研究所のスタッフの方々、友人など多くの方々が研究を支援し、温かく見守ってくれ、本論文に良い影響を与えてくれました。また、今この論文を読んでいる方にも感謝いたします。私の論文を読んでいただき、ありがとうございます。ご意見お待ちしております。

最後に長野と茨城で暮らす家族に。長きにわたり、私に研究を行う機会を与えてくれたことに深く感謝します。両親の一三，寛江，それから，早苗，玲奈，ちま子，今朝子には本当に感謝しています。苦しいときが幾度もありましたが，その度に励ましてくれ，心の支えとなってくれたことは忘れません。本当にありがとう。

2006 年 3 月

小林 一樹

参考文献

- [1] H. Arai, T. Takubo, Y. Hayashibara, and K. Tanie. Human-robot cooperative manipulation using a virtual nonholonomic constraint. In *Proc. of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000.
- [2] Ronald C Arkin, Masahiro Fujita, Tsuyoshi Takagi, and Rika Hasegawa. An ethological and emotional basis for human-robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, No. 3–4, pp. 191–201, 2003.
- [3] 浅田稔, 石黒浩, 國吉康夫. 認知ロボティクスの目指すもの. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 2–6, 1999.
- [4] H. Asama, K. Ozaki, Y. Ishida, and I. Endo. Development of task assignment system using communication for multiple autonomous robots. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 122–127, 1992.
- [5] 浅間一. 複数の移動ロボットによる協調行動と群知能. 計測と制御, Vol. 31, No. 11, pp. 1155–1161, 1992.
- [6] Simon Baron-Cohen. *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*. MIT Press, 1995.
- [7] Cynthia Breazeal and Lijin Aryananda. Recognition of affective communicative intent in robot-directed speech. *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 83–104, 1 2002.
- [8] Rodney A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 1, pp. 14–23, 1986.
- [9] Wolfram Burgard, Armin B. Cremers, Dieter Fox, Dirk Hahnel, Gerhard Lakemeyer, Dirk Schulz, Walter Steiner, and Sebastian Thrun. The interactive museum tour-guide robot. In *Proc. of the Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 11–18, 1998.

- [10] John Travis Butler and Arvin Agah. Psychological effects of behavior patterns of a mobile personal robot. *Autonomous Robots*, Vol. 10, No. 2, pp. 185–202, 2001.
- [11] P. Caloud, W. Choi, J. C. Latombe, C. Le Pape, and M. Yim. Indoor automation with many mobile robots. In *Proc. 1990 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 67–72, 1990.
- [12] カレルチャペック. ロボット (R.U.R). 岩波文庫, 1989.
- [13] H. Choset. Coverage for robotics - a survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, Vol. 31, pp. 113–126, 2001.
- [14] 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*, Vol. 50, pp. 157–162, 2002.
- [15] J. W. Crandall and M. A. Goodrich. Experiments in adjustable autonomy. In *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2001.
- [16] J. W. Crandall and M. A. Goodrich. Characterizing efficiency of human-robot interaction: A case study of shared-control teleoperation. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002.
- [17] Daniel C. Dennett. *The Intentional Stance*. MIT Press, 1987.
- [18] R. E. Fikes and N. J. Nilsson. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, Vol. 2, , 1971.
- [19] B. J. Fogg. *Persuasive Technology: Using Computers to Change What We Think and Do*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 2003.
- [20] Terrence W Fong, Illah Nourbakhsh, and Kerstin Dautenhahn. A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, No. 3–4, pp. 143–166, 2003.
- [21] 藤田雅博. Robot entertainment system aiibo の開発. *情報処理*, Vol. 41, No. 2, pp. 146–150, 2000.
- [22] James J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates Inc., 1979.

-
- [23] B. Grosz and C. Sidner. Plans for discourse. In P. Cohen, J. Morgan, and M. Pollack, editors, *Intentions in Communication*, pp. 417–444. MIT Press, 1990.
- [24] Y. Hayashibara, Y. Sonoda, T. Takubo, H. Arai, and K. Tanie. Assist system for carrying a long object with a human – analysis of a human cooperative behavior in the vertical direction –. In *Proc. of 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1999.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明. 人間型ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 23–25, 1997.
- [28] G. S. Hornby, S. Takamura, J. Yokono, O. Hanagata, T. Yamamoto, and M. Fujita. Evolving robust gaits with aibo. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3040–3045, 2000.
- [29] 池浦良淳, 大塚英樹, 猪岡光. 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察. 人間工学, Vol. 31, No. 5, pp. 355–358, 1995.
- [30] 池浦良淳, 中里央, 猪岡光. 人間の舞踊動作に基づくダンシングロボットの動作計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 927–933, 1997.
- [31] 池浦良淳. 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, Vol. 18, No. 3, pp. 331–336, 2000.
- [32] 今井倫太, 小野哲雄, 中津良平, 安西祐一郎. 協調伝達モデル: 関係性に基づくヒューマンロボットインタフェース. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J85-A, No. 3, pp. 370–379, 2002.
- [33] 今井倫太. ロボットの注意機構と発話生成そして身体表現. 情報処理, Vol. 44, No. 12, pp. 1221–1226, 2003.
- [34] 石田亨, 桑原和宏. 分散人工知能 (1): 協調問題解決. 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, pp. 945–954, 1992.

- [35] Hiroshi Ishiguro, Takayuki Kanda, Katsumi Kimoto, and Toru Ishida. A robot architecture based on situated modules. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1617–1623, 1999.
- [36] 石黒浩. 知能ロボットへの構成論的アプローチ. 情報処理, Vol. 44, No. 11, pp. 1118–1122, 2003.
- [37] 石黒浩, 神田崇行, 宮下敬宏. コミュニケーションロボット—人と関わるロボットを開発するための技術. オーム社, 2005.
- [38] 石井裕, 渡辺富夫. 身体的バーチャルコミュニケーションシステムを用いた virtualactor の対話配置の評価. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 4, No. 2, pp. 43–50, 2002.
- [39] 石井裕, 渡辺富夫. 聞き手の VirtualActor の頭部動作を矛盾的に止めた身体的コミュニケーションの合成的解析. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 9–16, 2002.
- [40] 板倉昭二. ヒト・サル・ロボットから探る, 心の進化と発達. 生命誌ジャーナル夏号, 2003.
- [41] 岩橋直人. ロボットによる言語獲得: 言語処理の新しいパラダイムを目指して. 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 49–58, 2003.
- [42] 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.
- [43] Shinya Kajikawa, Shigeyoshi Hiratsuka, Tadashi Ishihara, and Hikaru Inooka. Robot position control via voice instruction including ambiguous expressions of degree. In *Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN'03)*, 2003.
- [44] Takayuki Kanda, Takahiro Miyashita, Taku Osada, Yuji Haikawa, and Hiroshi Ishiguro. Analysis of humanoid appearances in human-robot interaction. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 62–69, 2005.
- [45] 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.
- [46] 神田崇行, 石黒浩, 石田亨. 人間–ロボット間相互作用にかかわる心理学的評価. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 3, pp. 362–371, 2001.

-
- [47] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平. 人-ロボットの対話におけるロボット同士の対話観察の効果. 電子情報通信学会論文誌 D1, Vol. J85-D1, No. 7, pp. 691–700, 2002.
- [48] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平. 人間と相互作用する自律型ロボット robovie の評価. 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 315–323, 2002.
- [49] F. Kaplan, P. Oudeyer, E. Kubinyi, and A. Miklosi. Robotic clicker training. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 38, No. 3-4, pp. 197–206, 2002.
- [50] 川村久美子. アフォーダンス理論がもたらす革命. 武蔵工業大学 環境情報学部 情報メディアセンタージャナル, Vol. 4, No. 2, 2001.
- [51] Alaa M. Khamis, Francisco J. Rodríguez, and Miguel A. Salichs. Remote interaction with mobile robots. *Autonomous Robots*, Vol. 15, No. 3, 2003.
- [52] Kazuki Kobayashi and Seiji Yamada. Human-robot interaction design for low cognitive load in cooperative work. In *Proc. of the 13th International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN-2004)*, 2004.
- [53] Kazuki Kobayashi and Seiji Yamada. Interaction design with commandsembedded in actions for human-robot cooperative task. In *the 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents*, pp. 301–306, 2004.
- [54] Kazuki Kobayashi and Seiji Yamada. Human-robot cooperative sweeping by extending commands embedded in actions. In *Proc. of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1827–1832, 2005.
- [55] 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.
- [56] T. Komatsu. Can we assign attitudes to a computer based on its beep sounds? In *Proceedings of the Affective Interactions: The computer in the affective loop Workshop at Intelligent User Interface 2005*, pp. 35–37, 2005.
- [57] 小松孝徳, 山田誠二. ロボットが表出する情報と外見がユーザの態度推定に与える影響. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS'05), pp. 471–478, 2005.
- [58] 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.

- [59] Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue. 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.
- [60] 國吉康夫, ベルトゥーズリユク. 身体性に基づく相互作用の創発に向けて. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 29–33, 1999.
- [61] 國吉康夫. ロボットの知能 —創発実体主義の挑戦—. 計測と制御, Vol. 42, No. 6, pp. 497–503, 2003.
- [62] 國吉康夫. 機械はコツを身につけられるか. 日経サイエンス, 1 2004.
- [63] 久野義徳. ビヘービアベーストロボットの行動. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 8, pp. 1178–1184, 1993.
- [64] Stanislao Lauria, Guido Bugmann, Theocharis Kyriacou, and Ewan Klein. Mobile robot programming using natural language. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 38, No. 3–4, pp. 171–181, 3 2002.
- [65] F. Marrone and M. Strobel. Cleaningassistant - a service robot designed for cleaning tasks. In *Proc. of Advanced Mechatronic Systems (AIM'01)*, 2001.
- [66] Takafumi Matsumaru, Kazuya Iwase, Kyouhei Akiyama, Takashi Kusada1, and Tomotaka Ito. 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.
- [67] 森山甲一, 沼尾正行. 環境状況に応じて自己の報酬を操作する学習エージェントの構築. 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 6, pp. 676–683, 2002.
- [68] Desmond Morris. *Manwatching*. Elsevier Publishing Projects, 1977.
- [69] Lilia Moshkina and Ronald C. Arkin. Human perspective on affective robotic behavior: A longitudinal study. In *Proc. of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2443–2450, 2005.
- [70] 村上陽平, 石田亨, 河添智幸, 菱山玲子. インタラクション設計に基づくマルチエージェントシミュレーション. 人工知能学会論文誌, Vol. 18, No. 5, pp. 278–285, 2003.
- [71] 村嶋照久, 久野義徳, 島田伸敬, 白井良明. 人間と機械のインタラクションを通じたジェスチャの理解と学習. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 590–599, 2000.
- [72] 長井志江, 浅田稔, 細田耕. ロボットと養育者の相互作用に基づく発達の学習モデル

- による共同注意の獲得. 人工知能学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 122–130, 2003.
- [73] 長井志江, 細田耕, 森田章生, 浅田稔. 視覚注視と自己評価型学習の機能に基づくブートストラップ学習を通じた共同注意の創発. 人工知能学会論文誌, Vol. 19, No. 1, pp. 10–19, 2004.
- [74] 長久保晶彦, 國吉康夫. ヒューマノイド・インタラクション研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 979–982, 1997.
- [75] 長田正. 群知能ロボット総論. 計測と制御, Vol. 31, No. 11, pp. 1119–1124, 1992.
- [76] Kentaro Nakai, Kazuhiro Kosuge, and Yasuhisa Hirata. Control of robot in singular configurations for human-robot coordination. In *Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN'02)*, 2002.
- [77] 中嶋宏, 森島泰則, 山田亮太, Scott Brave, Heidy Maldonado, Clifford Nass, 川路茂保. 人間–機械協調システムにおける社会的知性. 人工知能学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 184–196, 2004.
- [78] 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.
- [79] 中田亨. ペット動物の対人心理作用能力のロボットにおける構築. PhD thesis, 東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻, 2001.
- [80] 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.
- [81] 中田亨, 高大成, 森武俊, 佐藤知正. 人とロボットのインタラクションにおける生成印象と情報伝達の相関分析. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 5, pp. 667–675, 2001.
- [82] 中田亨. 人間行動の分節化と認識 — 自動で見張る防犯カメラに向けて. 画像ラボ, Vol. 16, No. 10, pp. 50–55, 2005.
- [83] 納谷太, 篠沢一彦, 小暮潔. 人とロボットとの触覚インタラクション. 情報処理, Vol. 44, No. 12, pp. 1227–1232, 2003.
- [84] D. Newtonson, G. Engquist, and J. Bois. The objective basis of behavior units. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 35, No. 12, pp. 847–862, 1977.
- [85] Darren Newtonson. Attribution and the unit of perception of ongoing behavior.

- Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 28, No. 1, pp. 28–38, 1973.
- [86] Darren Newton and Gretchen Engquist. The perceptual organization of ongoing behavior. *Journal of Experimental Social Psychology*, Vol. 12, pp. 436–450, 1976.
- [87] M.N. Nicolescu and M.J. Mataric. Learning and interacting in human-robot domains. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, Vol. 31, No. 5, pp. 419–430, 2001.
- [88] Nils J. Nilsson. Shakey the robot. Technical Report 323, AI Center, SRI International, 333 Ravenswood Ave., Menlo Park, CA 94025, Apr 1984.
- [89] 西田豊明. 人とロボットの意思疎通. 情報処理, Vol. 44, No. 12, pp. 1214–1220, 2003.
- [90] Donald A. Norman. *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books, 1988.
- [91] 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.
- [92] 大久保雅史, 望月亮, 小林哲則. 心的態度表現に寄与する韻律/スペクトル包絡特徴の評価. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J88-D-II, No. 2, pp. 441–444, 2005.
- [93] Tetsuo Ono and Michita Imai. Reading a robot’s mind: A model of utterance understanding based on the theory of mind mechanism. In *Proc. of Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 142–148, 2000.
- [94] Tetsuo Ono, Michita Imai, and Ryohei Nakatsu. 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.
- [95] C. Le Pape. A combination of centralized and distributed methods for multi-agent planning and scheduling. In *Proc. 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 488–493, 1990.
- [96] L. E. Parker. A performance-based architecture for heterogeneous, situated agent cooperation. In *AAAI’92*, 1992.
- [97] Edward S. Reed and Denise Schoenherr. The neuropathology of everyday life: On the nature and significance of microslips in everyday activities. 1992.
- [98] Byron Reeves and Clifford Nass. *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places*. Cambridge

- University Press, 1996.
- [99] 佐々木正人. からだ：認識の原点. 東京大学出版会, 1987.
- [100] T. Sato, Y. Nishida, J. Ichikawa, Y. Hatamura, and H. Mizoguchi. Active understanding of human intention by a robot through monitoring of human behavior. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 405–414, 1994.
- [101] 佐藤知正, 西田佳史, 市川純理, 畑村洋太郎, 溝口博. ロボットによる人間の意図の能動的理解機能. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 97–104, 1995.
- [102] Stefan Schaal, Dagmar Sternad, Rieko Osu, and Mitsuo Kawato. Rhythmic arm movement is not discrete. *Nature Neuroscience*, Vol. 7, No. 10, pp. 1137–1144, 2004.
- [103] Jean Scholtz. Theory and evaluation of human robot interactions. In *The 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03)*, 2003.
- [104] M. F. Schwartz, E. S. Edwards, M. Montgomery, C. Palmer, and N. H. Mayer. The quantitative description of action disorganization after brain damage: A case study. *Cognitive Neuropsychology*, Vol. 8, pp. 381–414, 1991.
- [105] Kerstin Severinson-Eklundh, Anders Green, and Helge Hüttenrauch. Social and collaborative aspects of interaction with a service robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003.
- [106] 柴田論, 猪岡光. 評定尺度法によるロボット運動の心理的評価. 人間工学, Vol. 31, No. 2, pp. 151–159, 1995.
- [107] 柴田崇徳. 人の心を癒すメンタルコミットロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 7, pp. 943–946, 1999.
- [108] 柴田崇徳. 人とロボットの身体的インタラクションを通した主観的価値の創造—アザラシ型メンタルコミットロボットの研究開発—. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 200–203, 2000.
- [109] Peter J. B. Slater. *An Introduction to Ethology*. Cambridge University Press, 1985.
- [110] Matthias Strobel, Jörg Illmann, Boris Kluge, and Fabrizio Marrone. Gesture recognition in a spatial context for commanding a domestic service robot. In *Proc. of the 33rd International Symposium on Robotics (ISR)*, 2002.

- [111] Lucy A. Suchman. *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*. Cambridge University Press, 1987.
- [112] 末永康仁, 間瀬健二, 福本雅朗, 渡部保日児. Human reader:人物像と音声による知的インタフェース. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J75 D-II, No. 2, pp. 190–202, 1992.
- [113] 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.
- [114] 鈴木健太郎, 三嶋博之, 佐々木正人. アフォーダンスと行為の多様性 —マイクロスリップをめぐる—. 日本ファジィ学会誌, Vol. 9, No. 6, pp. 826–837, 1997.
- [115] 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.
- [116] 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—互惠性に基づく対人的反応—. 認知科学, Vol. 5, No. 1, pp. 26–38, 1998.
- [117] 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.
- [118] 田中穂積, 徳永健伸. ロボットとの会話 —人工知能からのアプローチ—. 情報処理, Vol. 44, No. 12, pp. 1247–1252, 2003.
- [119] Kazunori Terada and Toyoaki Nishida. An active-affordance-based method for communication between humans and artifacts. In *Sixth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES'02)*, pp. 1351–1356, 2002.
- [120] Kazunori Terada and Toyoaki Nishida. A method for human-artifact communication based on active affordance. In *AAAI'02 Workshop on Intelligent Situation-Aware Media and Presentations*, 2002.
- [121] 寺田和憲, 中村恭之, 武田英明, 小笠原司. 視覚を有するエージェントのための身体性に基づく内部表現獲得手法. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 8, pp. 893–901, 2003.
- [122] Robert Thibadeau. Artificial perception of actions. *Cognitive Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 117–149, 1986.

-
- [123] Jochen Triesch and Christoph von der Malsburg. Robotic gesture recognition. In *Proc. of the Bielefeld Gesture Workshop*, pp. 233–244, 1997.
- [124] 植田一博, 遠藤正樹, 鈴木宏昭, 堤江美子. 課題分割の可視化によるインタフェース. *認知科学*, Vol. 9, No. 2, pp. 260–273, 2002.
- [125] 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.
- [126] 牛田博英, 平山裕司, 中嶋宏. デジタルペット—心を持った機械達—. *情報処理*, Vol. 41, No. 2, pp. 127–136, 2000.
- [127] Marjorie F. Vargas. 非言語コミュニケーション (石丸正 訳). 新潮社, 1987.
- [128] 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.
- [129] Stefan Waldherr, Roseli Romero, and Sebastian Thrun. A gesture based interface for human-robot interaction. *Autonomous Robots*, Vol. 9, No. 2, pp. 151–173, 2000.
- [130] Tomio Watanabe and Masashi Okubo. Sensory evaluation of expressive actions of interrobot for human interaction and communication support. In *Proc. of the 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2001)*, pp. 44–49, 2001.
- [131] Tomio Watanabe, Masashi Okubo, and Masao Inadome. Virtual communication system for human interaction analysis. In *Proc. of the 7th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 1998.
- [132] 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.
- [133] 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基. 発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム. *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 66, No. 648, pp. 251–258, 2000.
- [134] Joseph Weizenbaum. Eliza – a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM*, Vol. 9, No. 1, pp. 36–45, 1966.
- [135] Terry Winograd. *Understanding Natural Language*. Academic Press, 1972.

- [136] Seiji Yamada and Jun'ya Saito. Adaptive action selection without explicit communication for mutirobot box-pushing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, Vol. 31, No. 3, pp. 398–404, 2001.
- [137] 山田誠二. リアクティブプランニングにおける学習. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 38–43, 1995.
- [138] 山田誠二, 斎藤淳也. マルチロボットによる箱押しのための明示的通信を用いない適応的行為選択. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 6, pp. 818–827, 1999.
- [139] 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.
- [140] 山田誠二, 角所考. IDEA : 適応のためのインタラクション設計. 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 279–288, 2005.
- [141] 山本吉伸. 疑似対人行動 — 誘発の条件. 認知科学, Vol. 1, No. 2, pp. 95–99, 1994.
- [142] 山内勝也, 岩宮眞一郎. 周波数変調音の擬音語表現とサイン音としての機能イメージ. 日本生理人類学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 115–122, 2005.
- [143] 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.
- [144] K. Yokoyama, J. Maeda, T. Isozumi, and K. Kaneko. Application of humanoid robots for cooperative tasks in the outdoors. In *Proc. of IEEE/RSJ IROS Workshop on Explorations towards Humanoid Robot Applications*, 2001.
- [145] Kazuhiko YOKOYAMA, Hiroyuki HANDA, Takakatsu ISOZUMI, Yutaro FUKASE, Kenji KANEKO, Fumio KANEHIRO, Yoshihiro KAWAI, Fumiaki TOMITA, and Hirohisa HIRUKAWA. Cooperative works by a human and a humanoid robot. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2985–2991, 2003.
- [146] 吉崎充敏, 中村明生, 久野義徳. ユーザと環境に適応する指示物体認識のための視覚音声システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 7, pp. 901–910, 2004.

研究業績

学術論文

1. 小林一樹，山田誠二：擬人化したモーションによるロボットのマインド表出，人工知能学会論文誌，Vol.21，No.4，pp. 380–387, 2006.（採録決定）
2. 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.

国際会議論文（査読付き）

1. Kazuki KOBAYASHI, Seiji YAMADA: Informing a User of Robot's Mind by Motion, In Proc. of the 3rd International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems (CIRAS'05), 2005.
2. Kazuki KOBAYASHI, Seiji YAMADA: Human-Robot Cooperative Sweeping by Extending Commands Embedded in Actions, In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05), pp. 1827–1832, 2005.
3. Kazuki KOBAYASHI, Seiji YAMADA: Interaction Design with Commands Embedded in Actions for Human-Robot Cooperative Task, In Proc. of the 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents (ICARA'04), pp. 301–306, 2004.
4. Kazuki KOBAYASHI, Seiji YAMADA: Human-Robot Interaction Design for Low Cognitive Load in Cooperative Work, In Proc. of the 13th International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN'04), pp. 569–674, 2004.

国内発表

1. 小林一樹, 山田誠二: ユーザにロボットの機能を気づかせるインタラクション設計, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2005, pp. 561-567, 2005.
2. 小林一樹, 山田誠二: ユーザにロボットの機能を気づかせるインタラクション設計, 第 19 回人工知能学会全国大会, 3B2-02, 2005.
3. 小林一樹, 山田誠二: 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, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2004, 2004.
4. 小林一樹, 山田誠二: 人間とロボットの協調作業におけるタスクに埋め込まれたインタラクション, 日本認知科学会第 21 回大会, pp. 216-217, 2004.
5. 小林一樹, 山田誠二: 人間とロボットの協調作業におけるタスクに埋め込まれたインタラクション, 第 5 回 AI 若手の集い, 2004.
6. 小林一樹, 山田誠二: 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, 第 18 回人工知能学会全国大会, 2B3-04, 2004.
7. 小林一樹, 山田誠二: タスクに埋め込まれたインタラクションによる人間と移動ロボットの協調掃除, 第 31 回知能システムシンポジウム, 1C2-3, 2004.
8. 小林一樹, 山田誠二: 仮想的にロボットのハードウェア機能を実現するヒューマンロボットインタラクション実験システム, インタラクション 2004, 2004.
9. 小林一樹, 山田誠二: 人間と小型移動ロボットによる協調的な掃除, 第 21 回ロボット学会学術講演会, 2003.
10. 小林一樹, 山田誠二: 人間と小型移動ロボットによる協調掃引, 第 17 回人工知能学会全国大会, 1D1-02, 2003.

その他

1. Kazuki KOBAYASHI, Seiji YAMADA: Human-Robot Cooperative Sweeping using Commands Embedded in Actions, New Frontiers in Artificial Intelligence: Joint Proceeding of the 17th and 18th Annual Conferences of the Japanese Society for Artificial Intelligence, LNCS, Springer, 2005.

受賞

1. 第 18 回人工知能学会 全国大会 優秀賞 (2004.6)
小林一樹, 山田誠二: 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 .

付録 A

被験者実験の測定データ

A.1 人間の行為に埋め込まれたコマンドに関する実験

表 A.1～表 A.12 に被験者実験の測定データを示す．各表の「年齢」欄にはアルファベットが記入されており，「M」は男性を，「F」は女性を表す．以下に表の各項目の説明を記す．

「全体」	測定時間全体の長さを意味しており，単位は秒である．
「開始」	ロボットが掃除領域に入った瞬間の時刻．
「有効時間」	ロボットが掃除領域に入ってから，その領域が全て掃除されるまでの時間．
「正解数」	被験者が「有効時間」内に暗算を行ったときの正解した数．暗算において，直前の数との計算（3 ずつの引き算）が正しいものの数をカウントした．
「単位正解数」	1 秒あたりの正解数．
「平均」	「単位正解数」の平均値．
「標準偏差」	「単位正解数」の標準偏差値．
「正規化」	計算のみの単位正解数で正規化した各試行の単位正解数．
「正規化平均」	「正規化」の平均値．
「正規化偏差」	「正規化」の標準偏差．

表 A.1 被験者 1

No.	1			
年齢	30M			
実験順序	HC,SC,EC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	22.02	11.99	35.72
開始	0	7.58	6.92	6.49
有効時間	30	14.44	5.07	29.23
正解数	18	7	2	13
単位正解数	0.6	0.485	0.394	0.445
平均		0.441		
標準偏差		0.037		
正規化		0.808	0.657	0.741
正規化平均		0.736		
正規化偏差		0.062		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	30.46	20.3	18.59
開始	0	5.63	6.49	7.09
有効時間	30	24.83	13.81	11.5
正解数	17	7	5	4
単位正解数	0.567	0.282	0.362	0.348
平均		0.331		
標準偏差		0.035		
正規化		0.498	0.639	0.614
正規化平均		0.583		
正規化偏差		0.062		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	22.9	19.57	47.71
開始	0	6.13	6.61	7.72
有効時間	30	16.77	12.96	39.99
正解数	19	4	6	20
単位正解数	0.633	0.239	0.463	0.500
平均		0.401		
標準偏差		0.116		
正規化		0.377	0.731	0.790
正規化平均		0.632		
正規化偏差		0.182		

表 A.2 被験者 2

No.	2			
年齢	24F			
実験順序	HC,EC,SC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	23.6	20.19	19.94
開始	0	5.63	5.74	6.49
有効時間	30	17.97	14.45	13.45
正解数	24	10	10	10
単位正解数	0.8	0.556	0.692	0.743
平均		0.664		
標準偏差		0.079		
正規化		0.696	0.865	0.929
正規化平均		0.830		
正規化偏差		0.099		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	24.85	19.21	38.89
開始	0	5.26	6.61	5.26
有効時間	30	19.59	12.6	33.63
正解数	22	10	7	22
単位正解数	0.733	0.510	0.556	0.654
平均		0.573		
標準偏差		0.060		
正規化		0.696	0.758	0.892
正規化平均		0.782		
正規化偏差		0.082		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	21.64	15.16	19.44
開始	0	6.49	5.38	5.75
有効時間	30	15.15	9.78	13.69
正解数	23	7	2	7
単位正解数	0.767	0.462	0.204	0.511
平均		0.393		
標準偏差		0.135		
正規化		0.603	0.267	0.667
正規化平均		0.512		
正規化偏差		0.175		

表 A.3 被験者 3

No.	3			
年齢	25M			
実験順序	SC,HC,EC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	17.86	23.26	42.57
開始	0	6.71	7.95	5.85
有効時間	30	11.15	15.31	36.72
正解数	16	4	5	13
単位正解数	0.533	0.359	0.327	0.354
平均		0.346		
標準偏差		0.014		
正規化		0.673	0.612	0.664
正規化平均		0.650		
正規化偏差		0.027		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	43.82	32.9	35.1
開始	0	7.83	7.22	6.97
有効時間	30	35.99	25.68	28.13
正解数	14	10	8	8
単位正解数	0.467	0.278	0.312	0.284
平均		0.291		
標準偏差		0.015		
正規化		0.595	0.668	0.609
正規化平均		0.624		
正規化偏差		0.031		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	26.8	28.02	17.73
開始	0	6.61	6.49	7.22
有効時間	30	20.19	21.53	10.51
正解数	16	7	7	2
単位正解数	0.533	0.347	0.325	0.190
平均		0.287		
標準偏差		0.069		
正規化		0.650	0.610	0.357
正規化平均		0.539		
正規化偏差		0.130		

表 A.4 被験者 4

No.	4			
年齢	26M			
実験順序	SC,HC,EC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	23.37	41.97	48.19
開始	0	7.83	8.81	8.2
有効時間	30	15.54	33.16	39.99
正解数	11	5	19	20
単位正解数	0.367	0.322	0.573	0.500
平均		0.465		
標準偏差		0.106		
正規化		0.878	1.563	1.364
正規化平均		1.268		
正規化偏差		0.288		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	33.15	30.33	40.62
開始	0	8.93	8.81	8.57
有効時間	30	24.22	21.52	32.05
正解数	11	8	9	9
単位正解数	0.367	0.330	0.418	0.281
平均		0.343		
標準偏差		0.057		
正規化		0.901	1.141	0.766
正規化平均		0.936		
正規化偏差		0.155		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	18.59	28	36.34
開始	0	6.97	6.83	8.56
有効時間	30	11.62	21.17	27.78
正解数	17	5	11	13
単位正解数	0.567	0.430	0.520	0.468
平均		0.473		
標準偏差		0.037		
正規化		0.759	0.917	0.826
正規化平均		0.834		
正規化偏差		0.065		

表 A.5 被験者 5

No.	5			
年齢	32M			
実験順序	EC,HC,SC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	19.58	19.7	31.81
開始	0	4.52	5.14	4.89
有効時間	30	15.06	14.56	26.92
正解数	27	5	8	14
単位正解数	0.9	0.332	0.549	0.520
平均		0.467		
標準偏差		0.096		
正規化		0.369	0.611	0.578
正規化平均		0.519		
正規化偏差		0.107		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	26.9	15.17	19.58
開始	0	5.51	5.14	5.14
有効時間	30	21.39	10.03	14.44
正解数	29	8	4	5
単位正解数	0.967	0.374	0.399	0.346
平均		0.373		
標準偏差		0.021		
正規化		0.387	0.413	0.358
正規化平均		0.386		
正規化偏差		0.022		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	28.39	17.12	25.2
開始	0	4.39	4.89	4.77
有効時間	30	24	12.23	20.43
正解数	26	13	6	8
単位正解数	0.867	0.542	0.491	0.392
平均		0.475		
標準偏差		0.062		
正規化		0.625	0.566	0.452
正規化平均		0.548		
正規化偏差		0.072		

表 A.6 被験者 6

No.	6			
年齢	26F			
実験順序	EC,SC,HC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	22.64	15.3	16.77
開始	0	6.36	5.88	5.75
有効時間	30	16.28	9.42	11.02
正解数	20	7	6	4
単位正解数	0.667	0.430	0.637	0.363
平均		0.477		
標準偏差		0.117		
正規化		0.645	0.955	0.544
正規化平均		0.715		
正規化偏差		0.175		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	38.29	23.72	50.87
開始	0	6.24	5.38	6.12
有効時間	30	32.05	18.34	44.75
正解数	25	11	7	13
単位正解数	0.833	0.343	0.382	0.291
平均		0.338		
標準偏差		0.037		
正規化		0.412	0.458	0.349
正規化平均		0.406		
正規化偏差		0.045		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	32.9	20.8	22.02
開始	0	5.26	5.51	5.26
有効時間	30	27.64	15.29	16.76
正解数	25	12	5	7
単位正解数	0.833	0.434	0.327	0.418
平均		0.393		
標準偏差		0.047		
正規化		0.521	0.392	0.501
正規化平均		0.472		
正規化偏差		0.057		

表 A.7 被験者 7

No.	7			
年齢	26F			
実験順序	HC,SC,EC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	42.33	13.33	29.97
開始	0	5.75	6.97	5.75
有効時間	30	36.58	6.36	24.22
正解数	14	8	1	3
単位正解数	0.467	0.219	0.157	0.124
平均		0.167		
標準偏差		0.039		
正規化		0.469	0.337	0.265
正規化平均		0.357		
正規化偏差		0.084		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	28.65	18.47	34.25
開始	0	6.13	6.37	5.87
有効時間	30	22.52	12.1	28.38
正解数	15	4	3	3
単位正解数	0.5	0.178	0.248	0.106
平均		0.177		
標準偏差		0.058		
正規化		0.355	0.496	0.211
正規化平均		0.354		
正規化偏差		0.116		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	23.99	21.54	18.23
開始	0	6.36	6.36	6.61
有効時間	30	17.63	15.18	11.62
正解数	15	4	3	3
単位正解数	0.5	0.227	0.198	0.258
平均		0.228		
標準偏差		0.025		
正規化		0.454	0.395	0.516
正規化平均		0.455		
正規化偏差		0.049		

表 A.8 被験者 8

No.	8			
年齢	25F			
実験順序	HC,EC,SC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	18.11	24.97	17.24
開始	0	5.62	6.24	6.6
有効時間	30	12.49	18.73	10.64
正解数	19	7	8	6
単位正解数	0.633	0.560	0.427	0.564
平均		0.517		
標準偏差		0.064		
正規化		0.885	0.674	0.890
正規化平均		0.817		
正規化偏差		0.101		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	15.77	33.03	25.19
開始	0	5.14	6.85	6.24
有効時間	30	10.63	26.18	18.95
正解数	20	3	11	7
単位正解数	0.667	0.282	0.420	0.369
平均		0.357		
標準偏差		0.057		
正規化		0.423	0.630	0.554
正規化平均		0.536		
正規化偏差		0.085		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	24.23	46.62	19.57
開始	0	6.24	7.22	5.99
有効時間	30	17.99	39.4	13.58
正解数	18	5	9	3
単位正解数	0.6	0.278	0.228	0.221
平均		0.242		
標準偏差		0.025		
正規化		0.463	0.381	0.368
正規化平均		0.404		
正規化偏差		0.042		

表 A.9 被験者 9

No.	9			
年齢	24M			
実験順序	SC,HC,EC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	48.19	20.93	28.24
開始	0	4.67	4.89	4.78
有効時間	30	43.52	16.04	23.46
正解数	25	23	9	13
単位正解数	0.833	0.528	0.561	0.554
平均		0.548		
標準偏差		0.014		
正規化		0.634	0.673	0.665
正規化平均		0.657		
正規化偏差		0.017		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	25.94	27.52	22.14
開始	0	5.51	5.13	5.26
有効時間	30	20.43	22.39	16.88
正解数	24	8	17	11
単位正解数	0.8	0.392	0.759	0.652
平均		0.601		
標準偏差		0.154		
正規化		0.489	0.949	0.815
正規化平均		0.751		
正規化偏差		0.193		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	38.66	17.13	36.44
開始	0	4.9	5.14	5.38
有効時間	30	33.76	11.99	31.06
正解数	25	16	7	15
単位正解数	0.833	0.474	0.584	0.483
平均		0.514		
標準偏差		0.050		
正規化		0.569	0.701	0.580
正規化平均		0.616		
正規化偏差		0.060		

表 A.10 被験者 10

No.	10			
年齢	26M			
実験順序	SC,EC,HC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	28.5	24.47	22.25
開始	0	9.05	7.34	6.49
有効時間	30	19.45	17.13	15.76
正解数	13	6	5	8
単位正解数	0.433	0.308	0.292	0.508
平均		0.369		
標準偏差		0.098		
正規化		0.712	0.674	1.171
正規化平均		0.852		
正規化偏差		0.226		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	20.91	28.5	26.18
開始	0	6.97	8.44	6.37
有効時間	30	13.94	20.06	19.81
正解数	11	2	7	6
単位正解数	0.367	0.143	0.349	0.303
平均		0.265		
標準偏差		0.088		
正規化		0.391	0.952	0.826
正規化平均		0.723		
正規化偏差		0.240		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	21.04	26.57	13.58
開始	0	6.73	6.61	6.24
有効時間	30	14.31	19.96	7.34
正解数	17	3	6	1
単位正解数	0.567	0.210	0.301	0.136
平均		0.215		
標準偏差		0.067		
正規化		0.370	0.530	0.240
正規化平均		0.380		
正規化偏差		0.119		

表 A.11 被験者 11

No.	11			
年齢	25M			
実験順序	EC,HC,SC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	60.93	20.55	24.71
開始	0	5.5	5.77	5.38
有効時間	30	55.43	14.78	19.33
正解数	26	50	13	9
単位正解数	0.867	0.902	0.880	0.466
平均		0.749		
標準偏差		0.201		
正規化		1.041	1.015	0.537
正規化平均		0.864		
正規化偏差		0.232		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	45.14	18.84	24.1
開始	0	5.13	5.38	7.09
有効時間	30	40.01	13.46	17.01
正解数	30	34	11	14
単位正解数	1	0.850	0.817	0.823
平均		0.830		
標準偏差		0.014		
正規化		0.850	0.817	0.823
正規化平均		0.830		
正規化偏差		0.014		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	23.37	17.38	19.56
開始	0	4.77	5.5	5.26
有効時間	30	18.6	11.88	14.3
正解数	33	17	9	11
単位正解数	1.1	0.914	0.758	0.769
平均		0.814		
標準偏差		0.071		
正規化		0.831	0.689	0.699
正規化平均		0.740		
正規化偏差		0.065		

表 A.12 被験者 12

No.	12			
年齢	26M			
実験順序	EC,SC,HC			
	EC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	32.05	29.35	34.15
開始	0	5.62	5.74	5.99
有効時間	30	26.43	23.61	28.16
正解数	22	17	14	19
単位正解数	0.733	0.643	0.593	0.675
平均		0.637		
標準偏差		0.034		
正規化		0.877	0.809	0.920
正規化平均		0.869		
正規化偏差		0.046		
	SC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	21.15	21.04	21.89
開始	0	7.22	5.62	6.12
有効時間	30	13.93	15.42	15.77
正解数	22	7	10	7
単位正解数	0.733	0.503	0.649	0.444
平均		0.532		
標準偏差		0.086		
正規化		0.685	0.884	0.605
正規化平均		0.725		
正規化偏差		0.117		
	HC			
	計算のみ	1	2	3
全体	30	17.13	17.73	23.86
開始	0	5.75	5.63	6.61
有効時間	30	11.38	12.1	17.25
正解数	23	4	5	9
単位正解数	0.767	0.351	0.413	0.522
平均		0.429		
標準偏差		0.070		
正規化		0.458	0.539	0.681
正規化平均		0.559		
正規化偏差		0.092		

A.2 ロボットの行為に埋め込まれたコマンドに関する実験

表 A.13 に第 4 章で行った実験の結果を示す．性別は「M」が男性を，「F」が女性を意味している．

表 A.13 各被験者の実験結果

No.	年齢	性別	LED	ブザー	ECEA-R
1	25	M	1*	1**	1***
2	30	M	0***	0*	0**
3	24	M	0**	0***	0*
4	25	M	1*	1***	1**
5	23	M	0**	1*	1***
6	43	F	0**	0***	0*
7	29	F	0*	1***	1**
8	44	F	1***	0*	1**
9	29	F	0***	0**	0*
10	27	M	0*	0**	1***
11	36	M	0**	0***	0*
12	27	M	0**	0*	0***
13	26	M	1***	0*	1**
14	21	F	0*	0**	0***
15	26	F	0**	0*	1***

「1」: 障害物を移動した 「0」: 障害物を移動しなかった

* 試行順序 1 番目, ** 試行順序 2 番目, *** 試行順序 3 番目

付録 B

実験装置

B.1 USB カメラ画像から投影画像への変換

図 B.1 のような，任意四角形（USB カメラ画像）から任意の四角形（投影画像）への変換を考える．このような四角形の変換は複雑であるため，図 B.2 のように各四角形に対角線を引き，三角形 2 つの変換に置き換えて行う．

三角形から三角形への変換はアフィン変換として扱えるので，旧座標 (x, y) から新座標 (u, v) への変換は以下の式によって表現される．

$$\begin{cases} u = ax + by + c \\ v = dx + ey + f \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

ここで，図 B.2 に示すように 1 つ三角形に着目する．各座標の対応は次のようになる．

$$(p_0, p_1) \rightarrow (q_0, q_1) \quad (\text{B.2})$$

$$(p_2, p_3) \rightarrow (q_2, q_3) \quad (\text{B.3})$$

$$(p_4, p_5) \rightarrow (q_4, q_5) \quad (\text{B.4})$$

x 座標については以下の連立方程式を解くことにより，未知の係数 a, b, c を求めることができる．

$$\begin{cases} q_0 = ap_0 + bp_1 + c \\ q_2 = ap_2 + bp_3 + c \\ q_4 = ap_4 + bp_5 + c \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

同様に y 座標については以下の連立方程式を解くことにより係数 d, e, f を求めることができる．

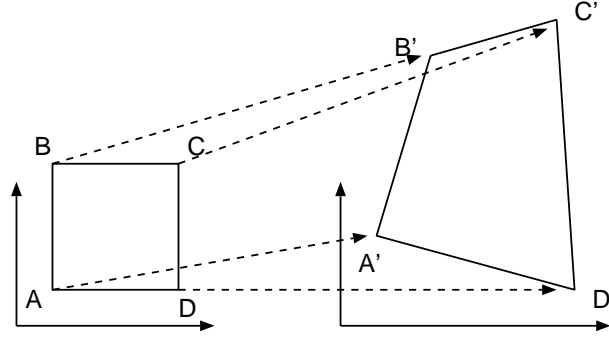


図 B.1 四角形から四角形への変形

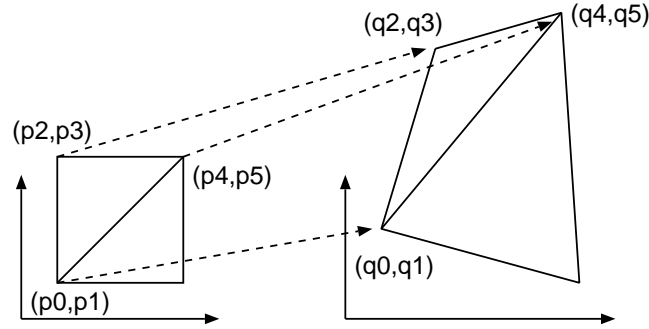


図 B.2 三角形から三角形への変形

$$\begin{cases} q_1 = dp_0 + ep_1 + f \\ q_3 = dp_2 + ep_3 + f \\ q_5 = dp_4 + ep_5 + f \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

これらの連立方程式を解いて、未知の係数を求めると以下のような。

$$a = \frac{(p_1q_2 - q_0p_3 - p_1q_4 + q_0p_5 + p_3q_4 - q_2p_5)}{(p_1p_2 - p_0p_3 + p_0p_5 - p_1p_4 - p_2p_5 + p_3p_4)} \quad (\text{B.7})$$

$$b = \frac{(q_0p_2 - p_0q_2 + p_0q_4 - q_0p_4 - p_2q_4 + q_2p_4)}{(p_1p_2 - p_0p_3 + p_0p_5 - p_1p_4 - p_2p_5 + p_3p_4)} \quad (\text{B.8})$$

$$c = \frac{(p_0q_2p_5 - p_0p_3q_4 + p_1p_2q_4 - p_1q_2p_4 - q_0p_2p_5 + q_0p_3p_4)}{(p_1p_2 - p_0p_3 + p_0p_5 - p_1p_4 - p_2p_5 + p_3p_4)} \quad (\text{B.9})$$

$$d = \frac{(p_1q_3 - q_1p_3 - p_1q_5 + q_1p_5 + p_3q_5 - q_3p_5)}{(p_1p_2 - p_0p_3 + p_0p_5 - p_1p_4 - p_2p_5 + p_3p_4)} \quad (\text{B.10})$$

$$e = \frac{(q_1p_2 - p_0q_3 + p_0q_5 - q_1p_4 - p_2q_5 + q_3p_4)}{(p_1p_2 - p_0p_3 + p_0p_5 - p_1p_4 - p_2p_5 + p_3p_4)} \quad (\text{B.11})$$

$$f = \frac{(p_0q_3p_5 - p_0p_3q_5 + p_1p_2q_5 - p_1q_3p_4 - q_1p_2p_5 + q_1p_3p_4)}{(p_1p_2 - p_0p_3 + p_0p_5 - p_1p_4 - p_2p_5 + p_3p_4)} \quad (\text{B.12})$$

画像の変換には逆変換式を用いる。これは次式のようになる。

$$\begin{cases} x = \frac{bf-ce-bv+eu}{ae-bd} \\ y = \frac{cd-af+av-du}{ae-bd} \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

この計算式を用いて，USB カメラ画像から抽出・計算したロボットの中心座標を，投影画像の1点として変換する。