

全身情動表出ヒューマノイドの
構成と表現に関する研究

Study on Configuration and Expression
of Whole-body Emotion Expression
Humanoid Robot

2013年 2月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科
生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

遠藤 信綱

Nobutsuna Endo

摘 要

これまで産業用ロボットに代表されるように、製造業分野においてロボット技術の応用が生産能力や効率を飛躍的に向上させ、その発展に大きく貢献してきた。そして現在では、社会の少子高齢化に伴う労働人口の減少や高齢者に対する介護支援、また、エンターテインメント分野などサービス産業の発展に対してロボット技術を応用することによりそれらの問題を解決しようという取り組みがなされており、次世代の労働力や新たな介護支援、受付案内サービスや情報支援などの様々な分野の課題に対するアプローチとして大きな期待が寄せられている。

しかしながら、従来の産業用ロボットは、人間とは物理的に隔離された環境において、教示やプログラミングといった手続きで人間からの指示を受け、作業を遂行するだけのものであった。人間の支援をするロボットは、人間と近接した環境下において、人間とのスムーズなコミュニケーションを通して活動することが求められる。ロボットのこういった活動を実現するためには、ロボットの物理的な安全性の確保のみならず、人間に心理的にも好ましい存在になることが必要である。一方で、人間の生活環境において、ロボットは人間と同様の形態であることが、その既存環境への適応性という観点から望ましい。しかしながら、ヒューマノイドロボットの設計においては、ユーザ心理の側面から妥当な要件設定ができるほどには、ユーザ心理に基づく実証的知見が十分ではなく、この観点によるヒューマノイドロボットの設計論は未確立である。

そこで、このような設計論の構築を目指し、その基礎的知見を得るために、ヒューマノイドロボットの構成および表現が人間に与える心理的影響を評価することを本研究の目的とする。

具体的には、人間との同様のコミュニケーション手段を備えるヒューマノイドロボットを開発し、これを用いた心理学実験を行うことで評価する。

本研究は、コミュニケーション手段の要素としてのロボットの構成および表現方法に着目し、これらについての様々な条件を設定した実験を行い、個々の条件が与える心理的影響を評価することで、人間とのコミュニケーションの観点によるヒューマノイドロボットの設計論を構築するという長期的目標に対する第1歩として位置付けられる。

本論文は、以下に示す7章から構成されている。各章の要約を示す。

第1章にて序論として本研究の研究背景と目的、その意義と関連研究の動向について

て述べた。

第 2 章では、本研究の実験プラットフォームとしたヒューマノイドロボット KOBIAN シリーズについて述べた。具体的には全身情動表出ヒューマノイド KOBIAN, KOBIAN-R, HABIAN, そして、人間形ソフトロボットハンド Waseda Soft Hand シリーズの開発について述べた。まず、全身情動表出ヒューマノイドロボット KOBIAN について説明している。これは、表情表出可能な頭部、人間同様の表現が可能な 7 自由度腕部、人間形ソフトハンド、人間同様の膝伸展 2 足歩行が可能な脚部を持ち、環境認識のために両眼にカメラを備える等身大のヒューマノイドロボットである。次に、この KOBIAN 頭部を改良し、情動表出能力を向上させた改良機 KOBIAN-R の開発について説明した。また、KOBIAN の下半身を脚式から車輪式に変更したヒューマノイドロボット HABIAN の開発についても説明した。さらに、主に軟素材によって構成された人間形ソフトハンド Waseda Soft Hand シリーズの開発についても説明した。

第 3 章では、KOBIAN および KOBIAN-R の情動表出能力の評価について述べた。ロボットの内部状態の伝達は、人間とロボットのコミュニケーションにおいても有効であり、ここでは、KOBIAN と KOBIAN-R の表現能力評価について述べた。まず、KOBIAN の表情表現能力の評価について説明した。KOBIAN の表情は、「喜び」や「驚き」、「嫌悪」の感情をわかりやすいよう表出することができるが、「怒り」や「悲しみ」、「恐れ」については表出できないことを確認した。また、表情各部と各感情の表出の関係について解析と考察を行った。次に KOBIAN-R の表情表現能力の評価を行い、「恐れ」以外の感情をわかりやすいように表出できることを確認した。さらに、KOBIAN の全身での情動表出の効果について評価している。表情単体では僅かな認識率しか得られなかったものも、特定の情動表出姿勢と組み合わせることで、より高い認識率を得られることがわかった。また、情動表出姿勢作成プロセスについて、専門家の意見を取り入れることの有効性が示された。

第 4 章では、ロボットの自律的行動に着目し、移動および反射・反応的行動、そして心理モデルによる感情の動的変化が与える印象を評価した。まず、KOBIAN の視標追従歩行の開発について述べた。本手法では、短期 FFT 型オンライン歩行パターン生成と前庭動眼反射を基にした視標追従動作を統合し、2 足歩行ロボットによる反射・反応的行動生成を実現した。次に、この行動中の情動表出について評価した。移動有りの場合と無しの場合を比較し、移動により意図された情動が読み取りづらくなることを確認した。しかし、その情動が読み取れた場合には、移動がその情動の強さを補強することが明らかになった。さらに、心理モデルと統合し、外界からの刺激に対して動的に情動を変化させ、それによる行動の変化を実現している。印象を評価したところ、ロボットが外界からの刺激に反応し、自律的に行動したとしても、情動表出無

しではロボットの意図が理解しづらく、何をしているのかわからない、親近感も湧かないと感じられ、情動表出と組み合わせることで、ロボットの意図がわかりやすくなり、何をしているのかがわかる、親近感も湧くことが確認された。また、移動を伴う自律的行動自体が、社会においてロボットがより重要な役割を果たせる、という印象に寄与することがわかった。

第5章では、ロボットのハードウェア構成が与える印象について評価している。ロボットのハードウェア構成は特に機能要件に束縛されるものであり、また、技術の進展度合いに依存するものである。ここでは、その構成の違いが、人間に与える印象にどのように影響するのかを論じた。KOBIAN と HABIAN の全身を用いた感情表現を人間に提示し、それぞれに対する印象について評価した結果、KOBIAN のほうが HABIAN に比べてより活動的な印象を与えること、また、逆に不安感を与えることが確認された。

第6章では、ロボットハンドの触感について評価した。触感は人間の感覚過程において、より生理的な作用が強く、ロボットハンドの設計はユーザとの親和性に大いに影響すると考えられる。そこで、ロボットハンドの素材特性、形状、力の入れ方が、その触感にどのように影響するのかを評価した。まず、柔らかさについて、柔らかいロボットハンドは心理的により親しみやすく、また安心感を与えることができる、ということが明らかになった。次に、形状について、より好ましいロボットハンド形状を求めるためのプロセスについて説明した。ロボットハンド形状について掌側部の丸みが重要であり、丸いほうがポジティブな触感を与えられることが確認された。また、この丸みの変化だけで、柔らかさ、厚さといった実際には変更していない形状パラメータについての印象も変化することが明らかになった。さらに、握りの強さについて触感の評価を行った。握りの強さを増加させていくと、硬く、危険な印象を与えられることが確認された。一方で、他の評価値については、単調増加の関係にはなくピークが存在し、与えたい印象について適した握りの強さがあることが示唆された。

最後に、第7章では、以上の研究成果を総括した。また、今後の展望として、様々な構成に対応可能なフレームワーク構築の可能性、ユーザ基準のヒューマノイドロボット開発・評価フレームワーク構築の可能性、さらにはヒューマノイドロボットの医療福祉分野への応用の可能性について言及した。

以上、本論文では、ヒューマノイドロボットの構成と表現が人間に与える心理的影響について報告した。特に、全身情動表出ヒューマノイドロボット KOBIAN シリーズおよび人間形ソフトハンド Waseda Soft Hand シリーズを開発し、様々な心理実験を通して、ロボットの構成や表現による人間への心理的影響を定量的に評価した。

本研究の成果は、ヒューマノイドロボットの開発とその心理学的評価に分けられる。前者については、そのユーザとのコミュニケーションの観点からの設計プロセスの事例として、他のヒューマノイドロボット以外のロボットおよびサービスにおいても適用可能だと考えられる。また、後者により得られた知見は、今後のヒューマノイドロボット開発においても基礎的知見として有用であると考えられる。

全身情動表出ヒューマノイドの構成と表現に関する研究
生命理工学専攻 遠藤 信綱

目 次

第1章	序章	1
1.1	はじめに	1
1.2	本研究の背景	1
1.3	本研究の目的と意義	11
1.4	本論文の構成	15
第2章	全身情動表出ヒューマノイドロボットの開発	19
2.1	はじめに	19
2.2	KOBIANの開発	20
2.3	KOBIAN-Rの開発	46
2.4	HABIANの開発	88
2.5	人間形ソフトハンドの開発	91
2.6	まとめ	106
第3章	情動表出の評価	109
3.1	はじめに	109
3.2	情動表出とその評価手法	109
3.3	KOBIANの表情	110
3.4	KOBIAN-Rの表情	120
3.5	全身情動表出	125
3.6	まとめ	134
第4章	移動と反射・反応的行動の印象評価	135
4.1	はじめに	135
4.2	移動と反射・反応的行動の手法	136
4.3	視標追従歩行における印象評価	147
4.4	心理モデルとの統合	165
4.5	心理モデルとの統合による印象評価	172
4.6	まとめ	184

第5章	脚式ロボットと車輪式ロボットの印象評価	185
5.1	はじめに	185
5.2	外観の与える印象とその評価手法	186
5.3	KOBIAN と HABIAN の印象評価	188
5.4	まとめ	196
第6章	ハンドの触感の評価	197
6.1	はじめに	197
6.2	接触インタラクションとその評価手法	197
6.3	柔らかさに関する印象評価	198
6.4	形状に関する印象評価	201
6.5	握りの強さに関する印象評価	209
6.6	まとめ	211
第7章	結論と今後の展望	213
7.1	結論	213
7.2	今後の展望	216
付録		229
参考文献		257
謝辞		271
研究業績		

第1章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 本研究の背景
- 1.3 本研究の目的と意義
- 1.4 本論文の構成

1.1 はじめに

本論文では、情動表出ヒューマノイドロボットの構成と表現について論ずる。

これは、将来、人間の生活環境下において人間の日常生活支援などを行うようになるであろうロボットについて、その設計論を構築するための基礎研究のひとつであり、主に、ユーザとなる人間とのコミュニケーションの観点から、ロボットの構成および表現が人間に与える心理的影響を評価することを目指した研究である。

1.2 本研究の背景

1.2.1 社会的背景

これまで産業用ロボットに代表されるように、製造業分野においてロボット技術の応用が生産能力や効率を飛躍的に向上させ、その発展に大きく貢献してきた。そして現在では、社会の少子高齢化に伴う労働人口の減少や高齢者に対する介護支援、また、エンターテインメント分野などサービス産業の発展に対してロボット技術を応用することによりそれらの問題を解決しようという取り組みがなされており、次世代の労働力や新たな介護支援、受付案内サービスや情報支援などの様々な分野の課題に対するアプローチとして大きな期待が寄せられている。

しかしながら、従来の産業用ロボットは、人間とは物理的に隔離された環境において、教示やプログラミングといった手続きで人間からの指示を受け、作業を遂行するだけのものであった。人間の支援をするロボットは、人間と近接した環境下において、人間とのスムーズなコミュニケーションを通して活動することが求められる。また、ロボットのこういった活動を実現するためには、ロボットの物理的な安全性の確保の

みならず，人間に心理的にも危険性を感じさせない存在になることが必要である。

生活支援を行うロボットと一口に言っても，その様態は多種考えられる．観点の一つとして，その用途に基づいて設計される様態がある．これは，ロボットの用途を特定の支援作業に限定した場合に設計される様態である．例えば，皿洗いという作業を目的として設計されるロボットは，その可動範囲を台所の流し場に限定できる．さらに，皿と水，洗剤を扱えばよい構成になるであろう．これはハードウェアの外部空間において作業を行なわなくてもよいので，箱型の洗浄機になる．また，ベッドから車椅子への移乗を助けるロボットを考えると，この機能はベッドもしくは車椅子本体がそれを行ってもよいので，独立した機械は必要ないかもしれない．こうした単機能の支援ロボットは，その目的が設計当初から限定されるために，究極的に対象作業を行うのに必要な様態として設計される．

別の観点として，「何でもできるように」設計される様態がある．可能な作業のラインは開発プロジェクトの達成目標にて実際は制限されるが，こうした観点に立つ設計工程では，理想的に「何でもできそうな」様態としてハードウェアを決める．人間の生活環境は人間中心に整備された環境であるから，その環境での作業パフォーマンスに優れるハードウェアの形態は，人間と同様のものになる．ロボット工学が，未だ人間と同等の機能・性能を持つヒューマノイドロボットを構築できていないとしても，多くの研究者が，そのときそのときの技術を用いて，ヒューマノイドロボットを開発してきた．また，「ロボット」という語の起源でも明らかのように，多くのSF作品において，ヒューマノイドロボットが「人間の代わりに……」という未来状況を志向してきた．ヒューマノイドロボットは多くの人間が思い描くロボットの究極の様態なのである．

さて，この「何でもできそう」なヒューマノイドロボットは，どのように設計すればよいのであろうか．用途指向のロボットは，その用途が限定されているがために，厳格に事前定義された作業を遂行すればよく，それゆえ，その作業に必要な機能を搭載していれば十分である．ヒューマノイドロボットの設計においては，機能要件のみでは十分でない．人間は人間のような存在に対してある種の親近感や期待を抱く，と筆者は考えている．脚がついているなら人間と同じように歩けるだろう・走れるだろう，手があるのなら人間と同じようにものを扱えるだろう，音が聞こえるのでなら話の内容も理解できるだろう，などなど．ヒューマノイドロボットは人間と同様の様態であるために，人間はこれを「擬人化」して扱うのである．すなわち，ユーザの期待を敢えて裏切るのでない限り，特にプロダクトとしてのヒューマノイドロボットは人間と同様の機能・性能・振る舞いを持つべきなのである．ここで，「人間と同様」とはどのようなラインであらう．何かを運ぶといった作業性に関するものについては，

従来のロボット工学の分野でよく研究されている。しかしながら、一緒にいて心地よいかどうか安心できるといったユーザの心理に関するものについては未だ十分に研究されていない。

ヒューマノイドロボットの、特にユーザの心理面からの設計論はどのようなものであろうか。すなわち、どのような様態が、どのような心理的影響をユーザにあたえるのであろうか。

機械設計において、設計とは、所与の動作を達成するための様々な要件に基づき、機械構造および設計変数を決定する作業である。究極的には、選定された機械構造および全ての設計変数は、要件に基づいて説明されなければならない。機械力学や材料力学といった機械系の諸工学は、それらの決定に必要な知識体系であると言える。

ヒューマノイドロボットのユーザ心理の側面からの設計論には、人間工学、ユーザインタフェース工学、心理学といった諸科学の知識体系が有用であろう。しかしながら、機械とは違って、ヒューマノイドロボットの歴史は浅く、「人間のようない道具的存在」が実用に供されたことはない。よって、十分な実証による知見は存在せず、先の諸科学の可用性の程度も明らかではない。すなわち、要件が与えられたときにヒューマノイドロボットの様態を決定するための、ユーザ心理を考慮した設計手法は未だ手付かずのまま、ということである。

ユーザの心理に影響を与える観点として、その機能、構成、振る舞いなどが挙げられる。機能とは、「何ができるか」であり、構成とは「どのようなものであるか」であり、振る舞いとは「どのようにするか」である。機能に対し、構成はそれを達成するための静的要素、振る舞いはそれを達成するための動的要素と言い換えることができるであろう。このうち、特に構成の観点は、設計の結果が如実に現れ、また印象において支配的であると考えられる。よって、筆者はヒューマノイドロボットの構成に着目した。

ここまでの議論をまとめると、機械にはまず機能が求められるが、ヒューマノイドロボットのように「擬人化」される機械に対しては、その機能要件は、ユーザが暗に期待するものが「人間のよう」膨大になってしまうので、明示的に定めることが困難になると考えられる。本来的にその機械の構成および振る舞いは機能に従属して定められるので、ユーザ心理的側面からの設計は、実証的知見の不足により、設計論が未確立である。そのような設計論の確立のための前段階として、筆者は特に、設計の結果が顕著に現れる構成に着目し、構成およびそれによって可能となる振る舞いが、どのような心理的效果を持つかを調べることにした。

ヒューマノイドロボットは当然、何らかの構成によって可能となる何らかの振る舞いによって何らかの機能を達成することを目的とする。ユーザの心理への影響に直接

的に作用するのは，ユーザとロボットのコミュニケーションであろう．コミュニケーションのインタフェースおよびプロトコルは，先に見たように，人間と同様のものであるのが望ましい．人間におけるそれは主に，音声や言語情報，表情，身振りによって成り立っている．これらは発信者の内部状態や意図を素早く適切に受信者に伝達できるよう発達してきたものであるから，ヒューマノイドロボットもそれに倣うべきであろう．しかし，このコミュニケーションの機能を達成させるに足る構成のためには技術的課題も多い．また，「不気味の谷」のように，人間への類似性を限りなく高くした構成における逆説的な仮説も提案されている[1]．さらに，漫画といった単純化された表現において，より明確に伝達されることもあるように，どのような構成・表現が，ヒューマノイドロボットにとって重要もしくは適切なものであるかは未だ明確になってはいない．

以上より，本研究では，ユーザへの心理的影響の観点に基づくヒューマノイドロボットの設計論の構築を目指し，その基礎的知見を得るために，ヒューマノイドロボットの構成と表現が人間に与える心理的影響を評価することを目的とする．

1.2.2 人間と人間のコミュニケーション

人間と人間のコミュニケーションとは，情報の伝達のことである．コミュニケーションにおいて伝達される情報には，感情や意思，知識など様々な種類がある．これら伝達される情報をメッセージとここでは呼ぶ．Shannon の提唱した一般的なコミュニケーションモデル[2]に当てはめると，人間と人間のコミュニケーションは Fig. 1.1 のようになる．送り手は，ある情報からメッセージをつくり，それを何らかの表現手段（言語やジェスチャなど）で記号化し，受け手の受信チャンネル（視覚，聴覚など）に届ける．受け手は受信チャンネルに届いた信号を解釈し，どのようなメッセージであるかを認識する．

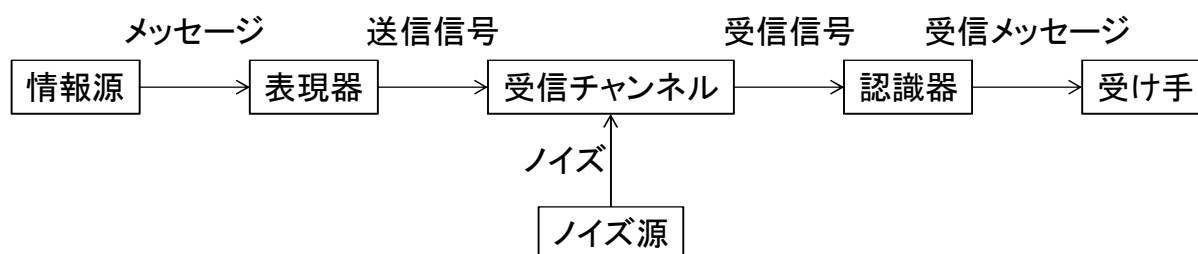


Fig. 1.1 Communication model (松尾[3]を一部改変)

メッセージ伝達の媒体となる送信信号およびそれを生成する表現器に着目すると、様々な媒体および表現手段があることがわかる。

まずは言語情報による表現が挙げられる。この場合の言語は、メッセージ内容を言葉によって記号化し、それを音声もしくは文字によって物理的に実現した表現である。即ち、メッセージはまず言葉という媒体に載せられ、言葉は音声もしくは文字という媒体に載せられる。受け手はこれを聴覚もしくは視覚によって受信する。この言語メッセージは、統語論的知識や意味論的知識、また語用論的知識を用いて、そのメッセージ内容は認識・解釈される[3]。

人間と人間のコミュニケーションにおいては、言語情報のみならず、表情や視線、音声の調子（パラ言語）、ジェスチャなど非言語情報が重要な役割を果たしている。Mehrabian は、コミュニケーションにおいて伝達されるメッセージ全体の印象について、メッセージの各要素が次のような割合で作用するとしている[4]。

$$\text{メッセージ全体の印象} = 0.007 \times (\text{言語情報}) + 0.38 \times (\text{音声}) + 0.55 \times (\text{表情})$$

表情や音声の調子、ジェスチャなども物理的には音声や動作によって実現されるが、これらによるメッセージは言葉ではない別の媒体に載せられた上で、音声や動作といった媒体に載せられる。受け手は主に聴覚や視覚、さらには触覚によって受信する。非言語メッセージがどのような知識およびメカニズムによって認識・解釈されるかは、神経科学や心理学の分野でよく研究されている。

(1) 表情

表情は特に、感情や意思を伝達する顔面の動作である。

表情研究に最初に着手したのは Darwin である。Darwin はヒトの表情の起源について、進化や神経系の働きから説明をした。また、ヒト表情と感情の関連には文化や民族を超えた普遍性があると結論付けた[5]。

Ekman らは、表情研究により、ヒトの感情を6つの基本感情（怒り、喜び、驚き、嫌悪、悲しみ、恐れ）として分類し、また文化や民族を超えた普遍性を持つと結論付けた [6]。また、表情のコーディング方法として FACS（Facial Action Coding System）を開発した[7]。これは顔面の表情筋の動きをいくつかの Action Unit として表現し、その組み合わせにより表出表情を特定するものである。

一方で、漫画における表現のように、表情筋配置に拠らない、各感情についての特徴的なプロトタイプ表出表情も考えられる。星野は、線画による表情を用いて、感情

認識の実験を行った[8]. Kostov らは表情表出写真を基にして表情の特徴を符号化し、漫画調の表情表現およびそれに基づく表情判定を実現した[9].

(2) 視線

コミュニケーションにおける視線の役割として、注意の共有やコミュニケーションにおける話者制御、好意・敵意の伝達が挙げられる。これらは、ある特定の方向への注視や視線の移動、目と目を合わせるアイコンタクトによって実現される。

共同注視は他者の視線の先に自分の視線を向ける動作であり[10]、この行動は乳児期から見られる[11]。Kendon は、アイコンタクトが話者交代を示すシグナルであることを実験的に示した[12]。Exline は、相手への注視が親交を意味するのに使用されているとした[13]。

特に、Agyle と Dean はアイコンタクトの機能として次の5つを挙げている[14]。

- (i) 情報探索
- (ii) チャンネル開放のシグナル
- (iii) 隠蔽と露出
- (iv) 社会的関係の構築と認識
- (v) 親和葛藤理論

(i)は、例えば、話者が相手からの反応を見てフィードバックするというものである。(ii)について、例えば相手が明後日の方向を見たままであると、その人はチャンネルを閉じているが、自分の方を見ているのであれば、聞く態勢ができているということである。(iii)は、自分を見てほしかったり、逆に見てほしくなかったりすることを示すもので、例えば、何かまずいことをしてしまった人が、内面を見られたくないために、視線を逸らすといった行為が挙げられる。(iv)は、特に表情と組み合わせて用いられるもので、好意や友情、支配、服従といった社会的関係を構築ないしは確認する行為である。例えば、微笑みとともに相手を見つめるのであれば、それは好意を示すものであるし、相手を威圧的な表情で見下げるのであれば、社会的上下関係を確認させる行為といえる。(v)は相手との親密さを一定に保とうとする働きに、アイコンタクトが用いられる、というものである。相手との親密さはアイコンタクトだけではなく、表情や相手との距離、話している内容などにも依る。例えば相手との距離が近くなると親密度が増してしまうため、アイコンタクトの量を減らす、といった行動である。

(3) ジェスチャ

身体動作による表現であるジェスチャもコミュニケーションにおいて頻繁に使用される。

Matarazzo らは、聞き手の頷きが話し手の発話にどのように影響するかを調べた[15]。面接場面設定において、面接官が頷きを入れるか入れないかによって、被面接者の発話時間に変化がみられた。頷くことは会話の促進につながると考えられる。

Ekman らは、ジェスチャを5つに分類した[16]。

- 表象 (Emblem) : 言葉の代わりに用いられる動作。言葉に置換できる動作
- 例示子 (Illustrator) : 発話とともに用いられ、対象を指し示したり、形状や動作を表現したりする動作
- 調整子 (Regulator) : 頷きのように発話の流れの制御に用いられる動作
- 感情表示 (Affect display) : 驚きや喜びを表す際に手を挙げたりするように、感情を表現する・強調する動作
- 適応子 (Adaptors) : 状況に適応するための動作

近年では特に、神経科学におけるミラーニューロンの発見に伴い、他者行動の理解に、身体動作が関わっているのではないかと、という仮説が提出され、それを指示する実験結果も多く報告されている[17]。また、言語の起源が身体動作にあり、言語の獲得・発達に、ミラーニューロンが関係しているとの仮説も存在する。

(4) パラ言語

パラ言語とは、発話のうちの言語内容以外の情報のことである。例えば、声の大きさや調子・音程の変化などである。

先述したように Mehrabian はメッセージ全体の印象においてパラ言語が果たす役割を大きく試算している[18]。Fairbanks らは、同じ発話内容であっても、発話のピッチ周波数の違いによって異なる情動として認識されることを示した[19]。他にも、音の調子と表情の比較[20]、身体動作との関係[21]などについて研究が行われている。

(5) 対人距離

人間同士のコミュニケーションでは、多くの場合で同じ場所を共有している。同じ

場所といっても空間的に全く同じ場所を同時に占めるわけではなく、ある距離を置いて近接した空間を共有している、ということである。この距離を対人距離という。

Hall は、この対人距離を 4 つに分類した[22].

- 密接距離 (intimate distance) : 15~45 [cm]. ごく親しい人に許される距離
- 個体距離 (personal space) : 45 ~120 [cm]. 相手の表情が読み取れる距離
- 社会距離 (social distance) : 120~360 [cm]. 相手に手は届きづらいが、容易に会話ができる距離
- 公衆距離 (public distance) : 360 [cm]~. 複数の相手が見渡せる距離

この距離は親密さの程度によって変動する[23].

対人距離に関しては特に、距離の取り方によって緊張などの生理的反応が変化することが知られている。McBride らは相手との距離によって皮膚コンダクタンスが変化し、緊張度合が変化することを示した[24].

(6) 外観

外観、人間の場合は特に服装は、その人がどのような人物、身分、性格なのかが現れやすく、それに応対する人間の態度や行動に影響を与える。

服装の違いによって与える印象が異なることを初めて実験的に確認したのは Hamid である[25][26]. DeLong らは制服が与える印象について、男女でその感じ方が異なることを示した[27]. また、Bushman らは、依頼者の服装によって、被依頼者の行動が影響を受けることを実験にて確認した[28].

(7) 触れ合い

皮膚と皮膚による触れ合いもまた、人間同士のコミュニケーションあるいはインタラクションにおいて重要な役割を果たしている[29].

触れ合いによる効果については臨床あるいは看護分野において多くの研究が行われている[30][31][32]. また、触れ合いといっても、性別や相手との関係性、触る部位、文脈・状況によって、その意味や効果は変化する[33][34]. 特に、Hertenstein らは、触り方の違いによって、感情を伝達することができることを示した[35].

以上のように，人間同士のコミュニケーションにおいて，非言語情報が果たす役割は大きく，関連研究が盛んに行われている．筆者は非言語情報によるコミュニケーションが，人間とロボットのコミュニケーションにおいても重要であると考ええる．

1.2.3 これまでのヒューマノイドロボットおよび人間とロボットのコミュニケーションに関する研究

ヒューマノイドロボットおよび人間とロボットのコミュニケーションについて，多くの大学や研究機関，企業によって盛んに研究や開発が行われている．

早稲田大学の研究グループにおける2足ヒューマノイドロボットの研究としては，1973年に開発されたWABOT-1がまず挙げられる．加藤はまず「ロボット」という言葉を“作業する手と移動する足と意識する頭とが一体となっていて，外界情報および内界情報を取り入れて自律的に行動する機械”と定義し，その要件として次の8つの仕様を定め，それらを満たすものとしてWABOT-1を開発した[36]．

- A) 人間型の2足歩行機械によって移動する
- B) 人間型の両側人工の手によって作業する
- C) 手足には固有覚として各関節に角度センサを取り付ける
- D) 2足で移動するための平衡機能を付与する
- E) 手には作業用の接触感覚をつける
- F) 遠隔受容器として人工の目を備えさせる
- G) ミニコンピュータを頭脳として使用する
- H) 人間（操作者）との対話は音声（日本語）で行わせる

この世界初のヒューマノイドロボットにおいて既に，人間とのコミュニケーションが念頭に入れられている．その後，早稲田大学の高西や菅野らによって，ロボットの各要素・各機能の研究開発が進められた．近年の成果を概観する．

まず，2足歩行技術について，小椋は人体運動シミュレータとしてのWABIAN-2を開発し，人間のように膝を伸ばした2足歩行を実現した[37][38][39]．しかし，WABIAN-2は視覚や聴覚といった感覚器官を持たず，人間のように視聴覚からの入力に対して自身の運動を変化させることはできない．近藤はオンライン歩行パターン生成法を開発し，1歩毎に2歩先からの歩行パターンをオンラインで変更しながらの歩行を実現した[40][41][42]．ただ，人間における反射および反応的動作の応答時間は100[ms]オーダーであり，こうした動作に対する2足歩行の安定化はなされていない．

感覚や心理，頭脳について，三輪は **WE-4RII** を開発し，さらに，ロボットの心理状態をモデル化し，情動方程式によって心理状態の遷移を実現した[43][44][45][46][47]. これは，心理学分野において得られた感情マッピングの知見を拡張し，基本6感情を3次元の感情空間にマップし，その感情空間において定義された情動ベクトルの遷移を，力学系の運動方程式と同様の方程式によって記述し，さらにそのパラメータを行列表形式で記述することにより，個性の表現まで可能な，計算機における心理状態を実現したものである．これにより，感覚器からの入力に対して，様々な反射・反応といった出力が可能なロボット・システムの構築が可能になった．また，伊藤はカオスニューラルネットワークをロボットの心理モデルに組み込み，それにより計算機における記憶のコーディング化を実現した[48][49][50]. しかしながら，具体的に，どのような反射・反応動作および表現がより適しているのか，さらにはどのようなロボットの構成がパーソナルロボットには適しているかについては，研究が進められていない．また，**WE-4RII** は据え置き型のロボットであるので，人間とのインタラクション実験を行なうにはまだ不十分である．

藤江は非言語情報を用いる対話システムを開発し，**ROBISUKE**[51][52]によりその有効性を実証した．ただし，**ROBISUKE** は中型の車輪移動式ロボットであり，その表情表出能力は十分ではなく，藤江も“人間と同等のパラ言語表出機能を実現するためには，人間形のロボットであることが望ましいが，例えば表情などを表出するために十分なデバイス，もしくは自由度として何が必要かは明らかではない”と述べている[53].

米マサチューセッツ工科大学の **Breazeal** らの研究グループは，“**Social Robots**”として **Cog**[54]や **Kismet**[55][56][57][58][59][60][61]，**Leonald**[62][63][64][65]といったロボットを開発し，人間とのインタラクション実験を数多く行っている．**Kismet** は仮想動物型の頭部ロボットであり，目，瞼，眉，耳，口，音声による感情表現が可能であり，また，視覚・聴覚の感覚入力を備える．感情・注意・動機づけ・行動などの計算機モデルを持ち，表情や音声，視線，首の動作による人間とのインタラクションが可能である．**Leonald** は小型な仮想動物型の全身ロボットである．**Kismet** に比べ，腕や手，胴体，足，触覚を備える．しかしながら，これらのロボットは動物型であり人間型ではなく，また固定されており移動することはできない．

東京理科大学の小林らは，人間によく似せた外観の女性頭部ロボット **SAYA** などを開発している[66][67][68][69]. 形としては全身を備えるものの，胴体以下は動かなく，また移動することはできない．

ロボットの開発というより，人間とロボットのインタラクションにおける評価については，**ATR** を中心とした研究グループにおいてよく進められている．特に，石黒・

神田らは、Robovie シリーズや ASIMO などを用いて、人間とのインタラクションにおけるロボットの評価を行った[70]. また、上出はヒューマノイドロボットの心理的評価手法として PHIT を提案している[71]. しかしながら、これらの研究において使用されているロボットは、Robovie や ASIMO という外観や構成、そして表現形態が著しく異なり、統制すべきパラメータが統制されていないといえる. さらに、これらのロボットはヒトの備える表情と同等の表現器を有しているとはいえず、前項で挙げたコミュニケーションの要素、特に非言語コミュニケーションの要素をすべてサポートしているとはいえない.

人間と同様に顔、腕、胴体、脚を持ち歩行が可能な全身型のヒューマノイドロボットとしては Albert HUBO[72]や、HRP-4C[73]や Kibo 3 が挙げられる. しかし、これらの中で、そのコミュニケーションにおける評価が包括的に行われているものはない.

以上、概観するに、人間と同様に、表情表出可能な頭部や腕部、手、胴体、下肢を備えた全身型のヒューマノイドで、なおかつそれによるコミュニケーションにおける心理的評価を包括的に行っているロボットおよび研究事例は無い.

1.3 本研究の目的と意義

1.3.1 本研究の目的

ヒューマノイドロボットの構成および表現が人間に与える心理的影響を評価することを本研究の目的とする.

具体的には、人間との同様のコミュニケーション手段を備えるヒューマノイドロボットを開発し、これを用いた心理学実験を行うことで評価する.

さて、加藤が提案したヒューマノイドロボットの要件を、より一般的に書き直すと次のようになる.

- A') 2足による移動
- B') 両手による作業
- C', D') 内界のセンシング
- E', F') 外界のセンシング
- G') 知能
- H') コミュニケーション

このうち、特に A' と H' についてその評価まで含めて両立させた事例はない. そこ

で、筆者は A'~H'の全ての要件を満たすヒューマノイドロボットを本論文において「全身情動表出ヒューマノイドロボット」として提案する。本来であれば、それぞれが「ヒューマノイドロボット」と呼ばれるべきであるが、既に人間の一部の構造や機能、振る舞いを再現するロボットに対してこの語が用いられているので、それらとの明確な区別として、また、本論文において着目している構成や機能、振る舞いを明確化するために、「全身情動表出ヒューマノイドロボット」という概念を提案する。

全身情動表出ヒューマノイドロボットは、人間同様の頭部・胴体・四肢を備え、人間同様の2足歩行により移動し、人間同様の両手により作業し、各関節の角度やトルク、姿勢といった内界のセンシングや視覚・聴覚といった外界のセンシング機能を持ち、人間同様に音声のみならず表情や視線、ジェスチャなどのコミュニケーション手段を可能とするロボットである。

この全身情動表出ヒューマノイドロボットが実現されれば、これまでの機械・システムでは代替不可能だった人間の労働の多くが、ロボットによって代替可能になると考えられる。特に、家事や介助といった人間生活支援分野において適用範囲は広がるだろう。しかしながら、そのような分野においては人間と近いがゆえに、ユーザ（被支援者や共同作業者）と如何にうまく協調・共存していけるかが課題となる。「ユーザとうまくやっていたらいい」ロボットをどのように設計するか、特にユーザの心理面からの明確なロボット設計論はまだない。そこで筆者は、「ユーザの心理的観点からのヒューマノイドロボットの設計論」を提案する。この設計論があれば、将来の人間生活支援のためのロボット・サービスの設計・提供が容易になると考える。この設計論構築のためには、ヒューマノイドロボットの構成や振る舞いが、ユーザである人間の心理にどのような効果・影響を与えるか、という関係を明確化することが必要である。その関係の明確化のためには、その心理評価実験を可能とするプラットフォームが無ければならない。即ち、全身情動表出ヒューマノイドロボットというプラットフォームをまずは開発しなくてはならない。そして、それによる心理的影響の評価実験を行うことで、ヒューマノイドロボットの構成・振る舞いと人間心理の関係の明確化し、ユーザの心理的観点からのヒューマノイドロボットの設計論の構築へと繋がる (Fig. 1. 2)。

本研究は、コミュニケーション手段の要素としてのロボットの構成および表現方法に着目し、これらについての様々な条件を設定した実験を行い、個々の条件が与える心理的影響を評価することで、人間とのコミュニケーションの観点によるヒューマノイドロボットの設計論を構築するという長期的目標に対する第1歩として位置付けられる。

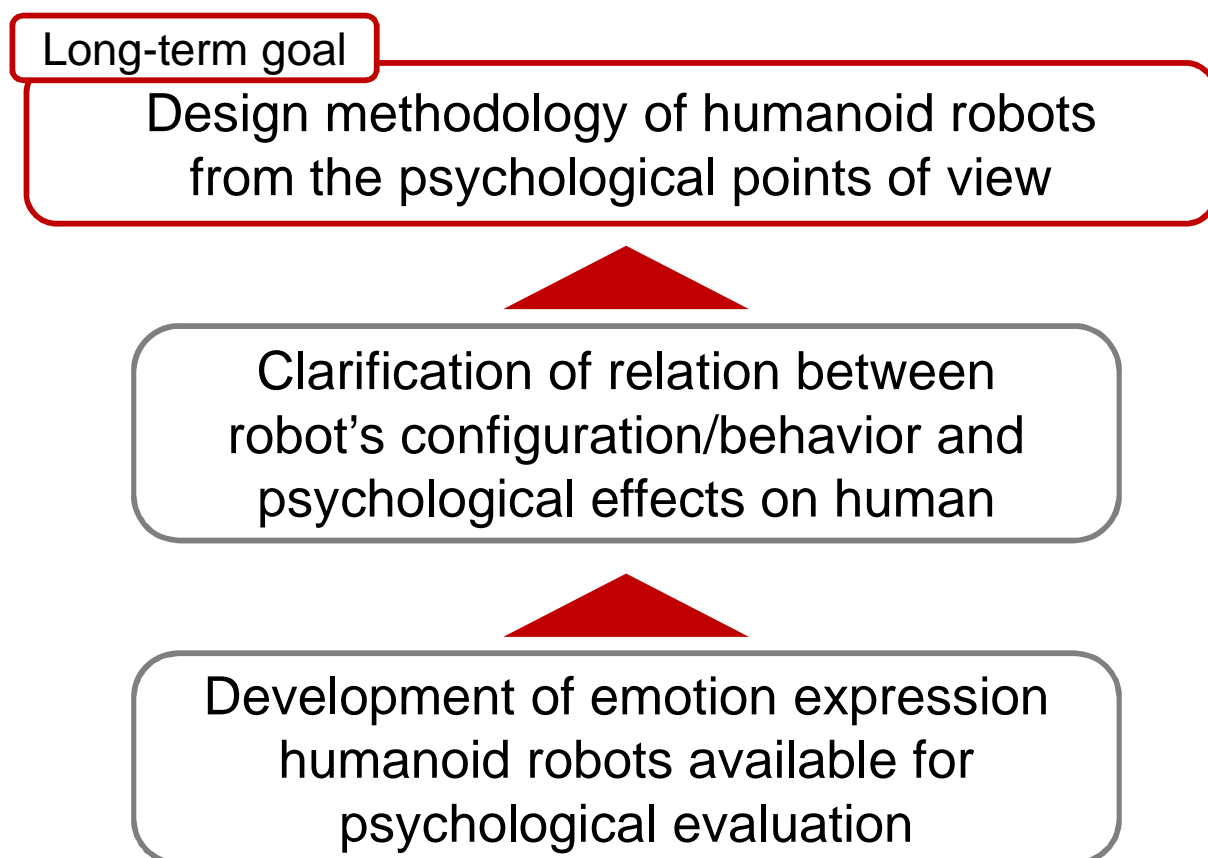


Fig. 1. 2 Long-term goal of this research

1.3.2 本研究の意義

将来、人間の生活を支援するロボット・サービスを設計・提供する際に、明示的に与えられる特定の機能要件のみを満たしていても、ユーザに容易に受け入れられるとは考えられない。人間は感情に従う動物である。即ち、快適性や信頼性、使いやすさ、安心感といった心理的に受け入れやすいものをユーザは望むのである。

携帯電話や小型音楽再生機といった昨今の一般消費者用電子機器に限っても、連続稼働時間やストレージ容量といった機能的側面よりも、その外観や使い勝手の良さといった非機能的側面がより重視される傾向にある。

こうした、非機能的要件が重要視される状況において、それをどのように設計に盛り込んでいくか、という設計論は未だ構築されていない。これは、機械工学やソフトウェア工学といった諸工学を駆使することで、機能的要件に適合する設計プロセスが実現できていることと対照的である。機能的要件については、既存の諸工学において既に多くの設計論が存在しているが、非機能的要件については、未確立である。

将来、立ち上がるであろう人間の生活支援ロボット・サービスにおいても、このことは同様である。ある機能を実現するにはどのような構成や振る舞いをどのように設計すればよい、という設計論はあっても、ユーザにどのような存在としてロボットが感じられるべきか、また、認知されるべきか、そして、そのためにはどのようにロボットを構成し、どのような振る舞いをすればよいか、といった観点からの設計論は未確立である。

こういった設計論を構築する上で、参考になるのが心理学や認知科学、人間工学である。これらにおいては、何らかの刺激を人間に提示し、それを人間の行動や神経系の反応に基づいて評価する。即ち、対象となる刺激を独立変数、人間の心的現象を従属変数として、その関係を取り扱う。これらの評価実験のコレクションにより、人間の心的過程のモデル化が可能となる。このモデル化により、ユーザの心理的側面からの設計論の構築が可能となると考える。

しかしながら、ロボットという比較的なじみの薄い新しい存在に対しては、評価実験が十分に行われているとは言い難い。前節で概観したように、WABOT-1 を起点としてこの半世紀の間に、要素技術としては大分進んできているが、人間と同様のコミュニケーション手段を備える総合的な全身型ロボットは数えるほどしか存在しないし、また、包括的かつ統制された心理評価実験は行われていない。

本研究では、ヒューマノイドロボットの構成および表現が人間に与える心理的影響を評価することを目的とする。具体的には、人間との同様のコミュニケーション手段を備えるヒューマノイドロボットを開発し、これを用いた心理学実験を行うことで評価する。本研究の意義は次の通りである。

(a) 人間との同様のコミュニケーション手段を備える全身型ヒューマノイドロボットの統合技術の構築

これまでに、人間とのインタラクションやコミュニケーション、さらには人間環境において活動可能なロボットおよびロボット技術の研究開発は数多く行われてきた。しかしながら、それらを一個のロボット・システムとして統合した例は多くない。

そこで、本研究において、感情を表出可能な表情や意図伝達・環境認識のための眼、ジェスチャが可能な胴体や腕、移動のための下肢を備え、感情表現や追従動作、動的な感情変化が可能な全身情動表出ヒューマノイドロボットを開発することで、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から、各要素技術を統合する。

これにより、要素技術の散発的な心理評価に留まらず、総合的な心理評価を可能とするロボット・プラットフォームを提供できる、と考える。

(b) 人間の心理的側面からのヒューマノイドロボット設計論構築のための、基礎的な心理的評価

ロボットの心理的評価においては多くの先行研究があるものの、その多くは各要素についての散発的な評価ばかり、もしくはロボット・プラットフォームが統制されていないものが多かった。

そこで本研究においては、統制されたロボット・プラットフォームを用いて、表情表出、全身情動表出、移動、反射・反応的行動、動的な感情変化、移動様式によるハードウェア構成、触感に関する心理評価を行う。

これにより、人間の心理的側面からのヒューマノイドロボット設計論構築の一助になると考える。

1.4 本論文の構成

本論文は、ヒューマノイドロボットの構成と表現が人間に与える心理的影響の評価を軸として、以下の示す7章から構成されている。

まず、本章では、前述の通り序論として本研究の研究背景と目的、またその意義と関連研究の動向について述べる。

第2章では、本研究の実験プラットフォームとしたヒューマノイドロボット KOBIAN シリーズについて説明する。具体的には全身情動表出ヒューマノイド KOBIAN, KOBIAN-R, HABIAN, そして、人間形ソフトロボットハンド Waseda Soft Hand シリーズの開発について述べる。

次に第3章では、KOBIAN および KOBIAN-R の情動表出能力の評価について説明する。先に述べたように、ロボットの内部状態の伝達は、人間とロボットのコミュニケーションにおいても有効である。ここでは、その基礎的な表現能力評価を行なう。

第4章では、ロボットの自律的行動に着目し、移動および反射・反応的行動、心理モデルによる感情の動的変化が与える印象を評価する。

第5章では、ロボットのハードウェア構成が与える印象について評価する。ロボットのハードウェア構成は特に機能要件に束縛されるものであり、また、技術の進展度合いに依存するものである。ここでは、その構成の違いが、人間に与える印象にどのように影響するのかを論ずる。

第6章では、ロボットハンドの触感について評価する。ハンドは、人間同士のコミュニケーションにおいても頻繁に使われ、人間とロボットのコミュニケーションにお

いても同様の役割を果たすと考えられる。また、触感は人間の感覚過程において、より生理的な作用が強い。そこで、ロボットハンドの素材特性、形状、力の入れ方が、その触感にどのように影響するのかを評価する。

最後に第7章では、これらの研究成果を総括し、本研究によって得られた知見をまとめ、本研究の将来性について示す。

特に、第2章において、研究に用いたプラットフォーム開発について説明し、第3～6章においてそれらを用いた評価実験について説明する。先述したように、本研究はヒューマノイドロボットの構成と表現が与える心理的影響に関するものであり、構成により可能となる表現による心理的影響と、構成そのものによる心理的影響に大別することができる。前者を第3章および第4章に、後者を第5章と第6章において取り上げている。

本論文の構成を Fig. 1.3 に示す。また、開発の流れを Fig. 1.4 に示す。この図において、赤色が本論文において開発されたものであり、山形括弧に関連する章番号が示されている。

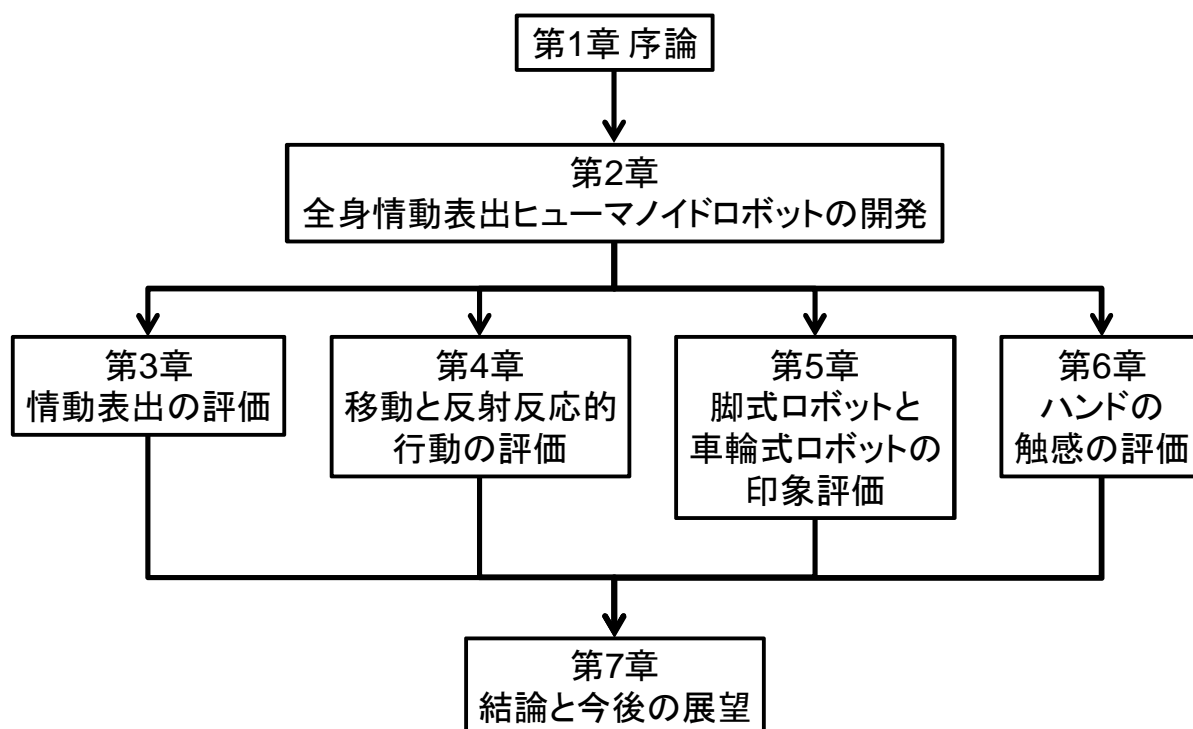


Fig. 1.3 Configuration of this thesis

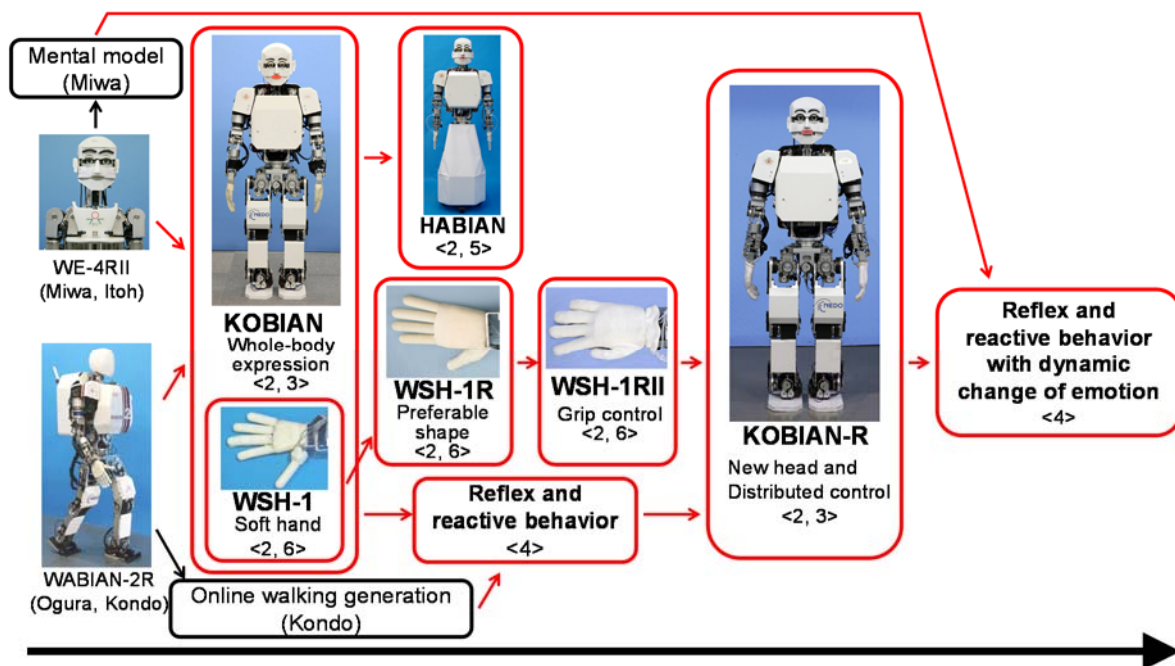


Fig. 1. 4 Flow of the developments in this thesis

第2章 全身情動表出ヒューマノイドロボットの 開発

- 2.1 はじめに
- 2.2 KOBIAN の開発
- 2.3 KOBIAN-R の開発
- 2.4 HABIAN の開発
- 2.5 人間形ソフトハンドの開発
- 2.6 まとめ

2.1 はじめに

第1章では序論として、ヒューマノイドロボットの設計論構築の必要性とそこにおける本研究の位置づけ、本研究の目的と意義について述べた。

本章では、本研究の実験用プラットフォームとしたロボット・システムの開発について述べる。まず、全身情動表出ヒューマノイドロボット KOBIAN について説明する。これは、コミュニケーション手段としての情動表出機能と移動能力としての2足歩行に特に着目して開発されたロボットであり、表情表出可能な頭部、人間同様の表現が可能な7自由度腕部、後述される人間形ソフトハンド、人間同様の膝伸展2足歩行が可能な脚部を持ち、環境認識のために両眼にカメラを備える等身大のヒューマノイドロボットである。次に、この KOBIAN 頭部を改良し、情動表出能力を向上させた改良機 KOBIAN-R の開発について説明する。KOBIAN および KOBIAN-R の制御系が何を目的とし、何をどのように実現しているかも説明する。また、KOBIAN の下半身を脚式から車輪式に変更したヒューマノイドロボット HABIAN の開発についても説明する。さらに、人間形ソフトハンド Waseda Soft Hand シリーズの開発についてもここで説明する。

2.2 KOBIAN の開発

2.2.1 開発コンセプト

人間の室内生活環境で、人間の指示に基づき活動するロボットに求められるコミュニケーション形態として、最も適切なものは、人間と同じコミュニケーション形態である、とわれわれは考えている。人間のコミュニケーションにおいては一般的に音声情報による意図の伝達が行われているが、実際にはその言語情報よりも非言語情報のほうがより支配的な役割を果たしている。非言語情報には、表情、視線、身体動作、パラ言語などがあり、特に表情の果たす役割は大きい[4]。表情は、情動を表出するものであり、エクマンは、喜び、悲しみ、怒り、嫌悪、驚き、恐怖を基本6感情として挙げており、表情表出が文化的普遍性を持つことを示した[6][74]。

われわれはこの情動表出という機能に着目し、上記のプロトタイプシステムとしてのロボットの要件として、ユーザである人間にとってわかりやすい情動表出を設定した。人間にとってわかりやすい情動表出を目的とした際に、どの程度ロボットの外観を人間に近づけるか、ということは重要である。石黒らや小林らは、人間に酷似したアンドロイドロボットを開発し[68][75]、人間らしさを探求しているが、人間との類似性が或るレベルに達すると親和性が激減するという不気味の谷現象も報告されており[1]、全く人間に似せたロボットであることが必ずしも最良の解であるとは限らない。全く人間に似せたハードウェアを実現できたとしても動作など外見以外の類似性がネガティブな印象を与えるかもしれず、またそれらの類似度を人間に限りなく近づけることも困難である。一方で、三輪らは、人間の外観を単純化し、感情に対応した表情も大げさに表出することで、人間にとってわかりやすい情動表出が可能なヒューマノイドロボット WE-4[44]を開発した。

WE-4 は人間とロボットのインタラクション実験のためのプラットフォームとしてつくられ、多くの自由度やセンサ入力を備えるが、上半身のみのロボットであって、移動能力はない。人間の生活空間で活動するサービスロボットは、その空間に適した移動能力が必要である。移動能力を持つロボットは人間に対し能動的に働きかけることができ、ものを運ぶなどといった実用的タスクが可能となる。人間の生活空間において必要な移動能力はどのようなものであろうか。人間の生活空間は人間に適した環境となっている。最近でこそ車椅子等の補助器具に対してバリアがないようになってきてはいるが、基本的には2足歩行の人間に適した環境である。それ故に、人間の生活環境に適したロボットの移動形態は2足歩行である、とわれわれは考えた。

情動表出と2足歩行という2つの観点に着目し、われわれは本プロジェクトのプロ

トタイプロボットの第一次試作機として、情動表出可能な2足歩行ヒューマノイドロボット KOBIAN を開発した。KOBIAN の基本コンセプトは、WE-4 と WABIAN-2 の統合である。要求仕様を次のとおりに定めた。

- 人間同等のサイズ
- バッテリ内蔵での2足歩行
- 視覚による環境認識
- 情動表出

2.2.2 設計仕様

2足歩行ロボットの設計においては、歩行実現のためにシビアな制約が存在し、重量やサイズ、電源系、アクチュエータ、制御系など、様々な要因をうまくまとめ上げなければならない。WE-4 は平均的な成人男性の身体寸法に対し、20%程度大きいサイズであり、また移動するものではなかったために、KOBIAN 全体の構成は、WABIAN-2 の設計を全面的に採用した。

全ての関節はエンコーダ付 DC モータを特殊電装製モータドライバで駆動する方式とし、エンコーダのカウント読み取りおよびモータドライバへの速度指令出力は、I/O ボード（図工, HRP Interface Board）を介して、KOBIAN 背中に搭載された組込 PC によってなされる構成である。搭載された I/O ボードで制御可能な総自由度数は 48 であり、両脚に 12、腰に 2、体幹に 1、両腕に 14、両手に 8、首に 4、頭部に 7 を割り当てた（Table 2. 1, Fig. 2. 1）。この構成により、WABIAN-2 と同様に膝を伸ばした 2足歩行が可能となっている。KOBIAN の全身写真を Fig. 2. 2, 主要寸法を Fig. 2.3, 顔以外の各関節可動範囲を Fig. 2.4 に示す。

Table 2. 1 DoF configuration of KOBIAN

部位	自由度
表情	4
眼	3
首	4
腕	14
手	8
体幹	1
腰	2
脚	12
合計	48

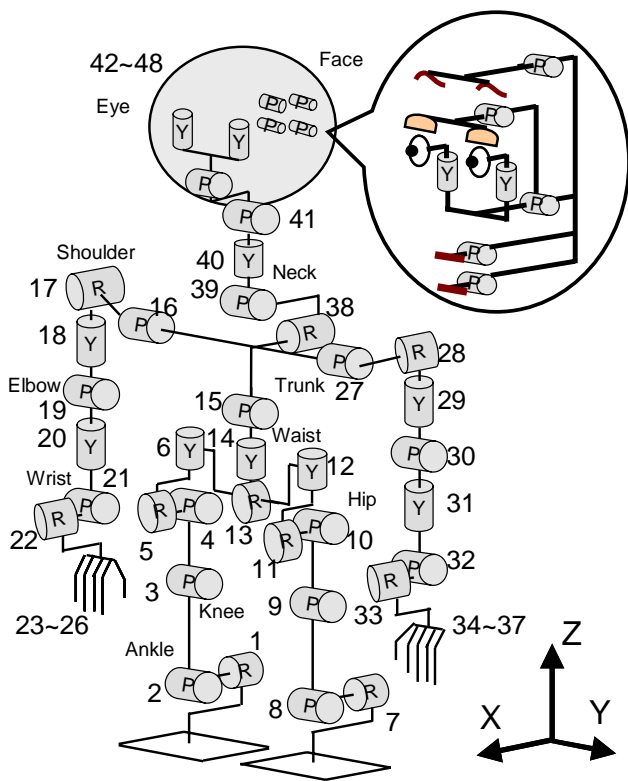


Fig. 2. 1 DoF configuration of KOBIAN

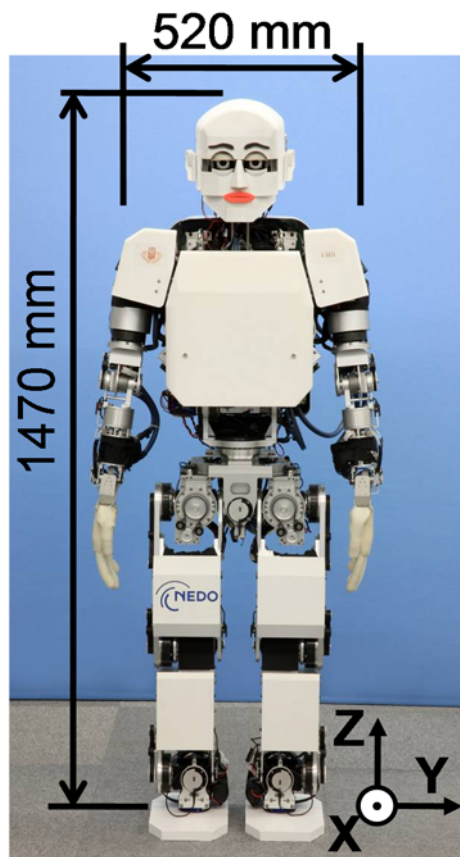


Fig. 2. 2 KOBIAN

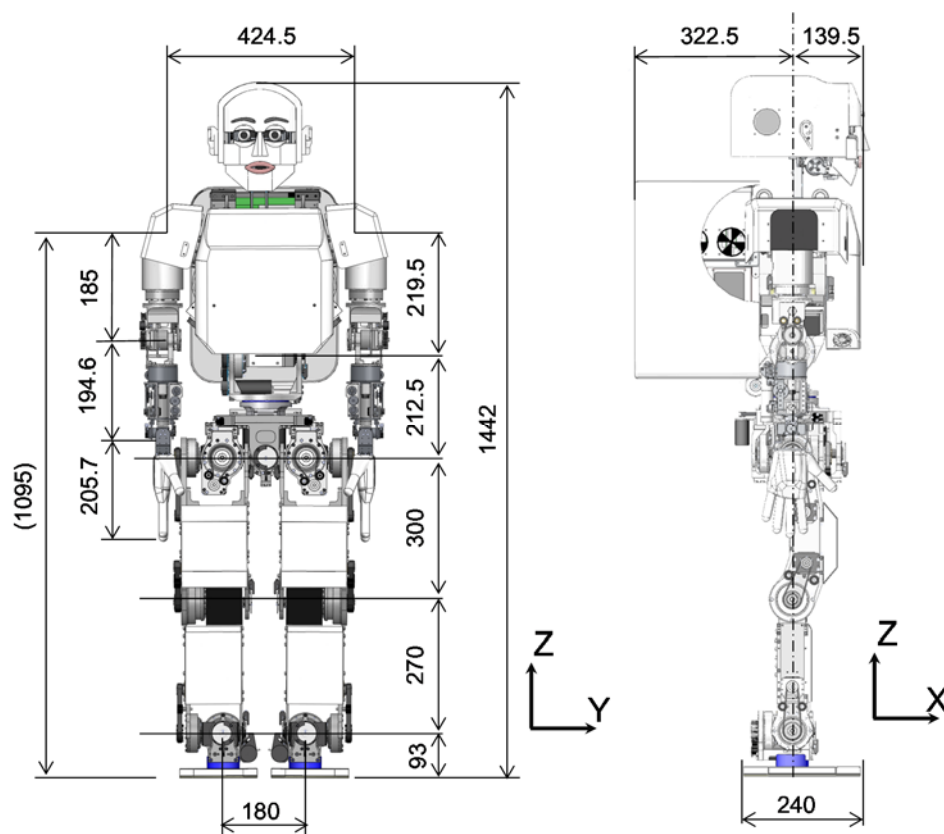


Fig. 2. 3 Main dimension of KOBIAN

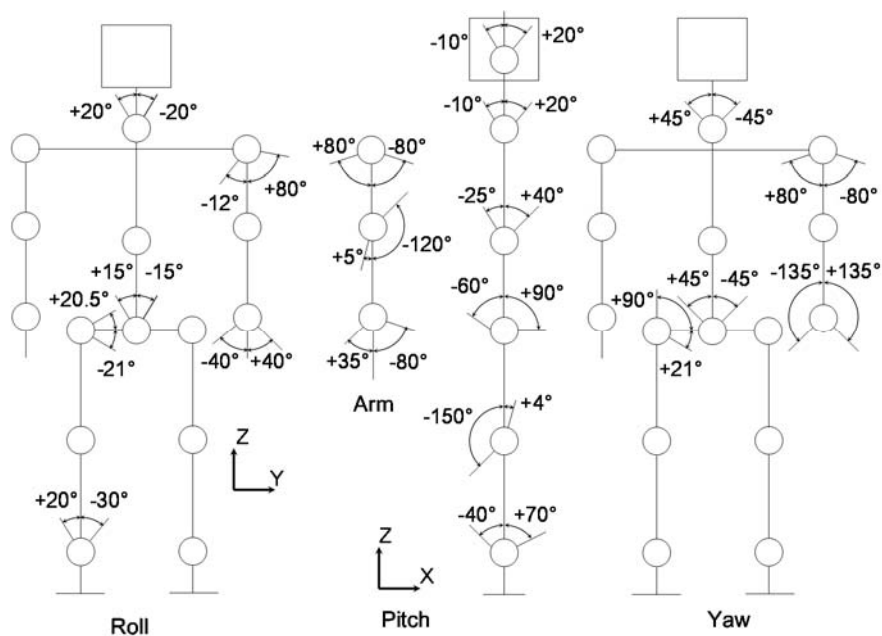


Fig. 2. 4 Movable rage of each joint of KOBIAN

2.2.3 ハードウェア構成

KOBIAN の胴体や下半身は WABIAN-2 のものとほぼ同様である。ここでは、KOBIAN にて追加された頭部・首部および視覚センサについて概説する。

(1) 頭部・首部

KOBIAN 頭部の基本コンセプトは、WABIAN-2 の体に載せるために、WE-4 の頭部の軽量化・小型化である。加えて、電源系および I/O ポートの制限から、可能な限り自由度数を少なくすることとした。また、首部の機構は WE-4 と同じ自由度構成とした。

WE-4 の頭部重量は 7.5[kg] である。KOBIAN 頭部は、2 足歩行を成立させるため、全体の総重量から体の分を差し引き 3.5[kg] を上限とした。

WE-4 の頭部サイズは人間と比べて大きい。今回のロボットでは、体のサイズが人間と同程度であるので、頭部のサイズも人間に出来る限り近付けることとした。

表情については、笑顔と困惑の表情を表出できることとした。これは人間とのインタラクションにおいて、ロボットが人間の指示を理解できたかどうかを表出するのに有用であると考えたからである。さらに、表出表情は左右対称とした。これは、基本的な表情は左右対称な動きで表出されるためである。

先に述べたように、我々は人間とそっくりなロボットよりは、単純化された、マンガ表現のようなロボットが有効であり、そのため、ロボットの表出表情についても、人間と同じ機構や形状で実現される必要はない、と考えている。

(i) 目・瞼

眼の向きは注意方向や意図伝達に有用である。また見ている物体との距離を得ることもできる(今回のロボットも WE-4 も目に CCD カメラをつける)。そこで、自由度は WE-4 と同じく、両眼 Pitch と各眼 Yaw の計 3 自由度とした。

眼の Yaw の機構について、WE-4 ではワイヤとトーションばねによる拮抗駆動となっていたが、これは組立およびメンテナンス時においてとても扱いにくいものだった。そこで、今回のロボットではタイミングプーリによる機構にした。

下瞼の開閉の自由度については、動作量が比較的小さいことから無くすこととした。

上瞼については、WE-4 では、Pitch 軸周りと Roll 軸周りの回転が可能であり自由度は 4 自由度であるが、覚醒・不覚醒を示すのに、開閉の 1 自由度 (Pitch) で十分とし、

Roll 軸周りの回転を無くした。瞼は、硬い素材でつくと機構部に干渉してしまうので、人肌ゲルを用いた。また、WE-4 と同じく両眼 Pitch と上瞼 Pitch の連動機構をつけている。眼・瞼部ユニットを Fig. 2.5 に示す。

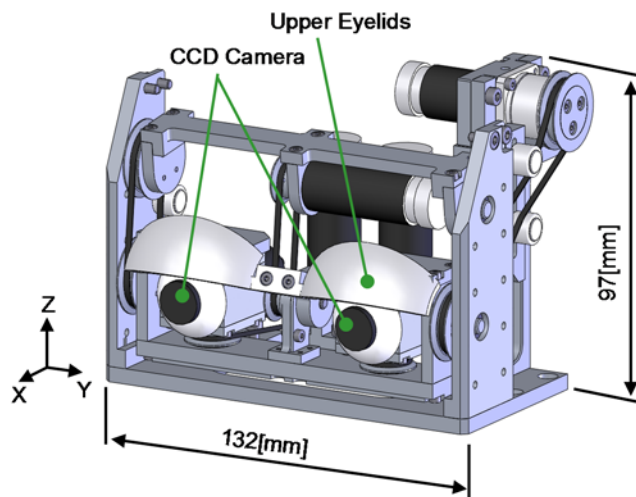


Fig. 2.5 Mechanical design of the eye and eyelid

(ii) 眉

眉毛は WE-4 では、片眉につき、両端 2 点と 3 分点の 2 点の計 4 点をそれぞれ独立に上下動させる機構であり、自由度は両眉で 8 自由度である。しかし、Fig. に示すように、外装が機構と分離していないので、簡単に取り外しすることはできないし、組立・メンテナンス時に扱いづらいものとなっている。

今回のロボットでは、眉両端の位置を固定、回転自由とし、その間に設けた動作点を上下動させることで、両眉で 1 自由度とした。

ワイヤなどの機構部品が外から見えないように、Fig. 2.6, Fig. 2.7 に示す磁石を用いた機構とした。この機構は、様々な外装や眉毛形状に対して簡単に対応できる (Fig. 2.8)。

眉毛の材料は軟質素材のセプトンを用いた。

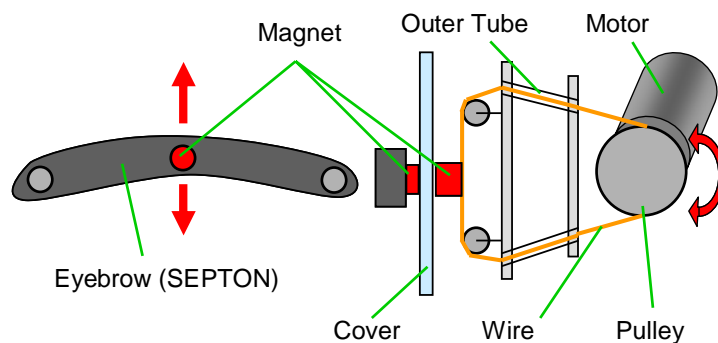


Fig. 2. 6 Driving mechanism of the eyebrow

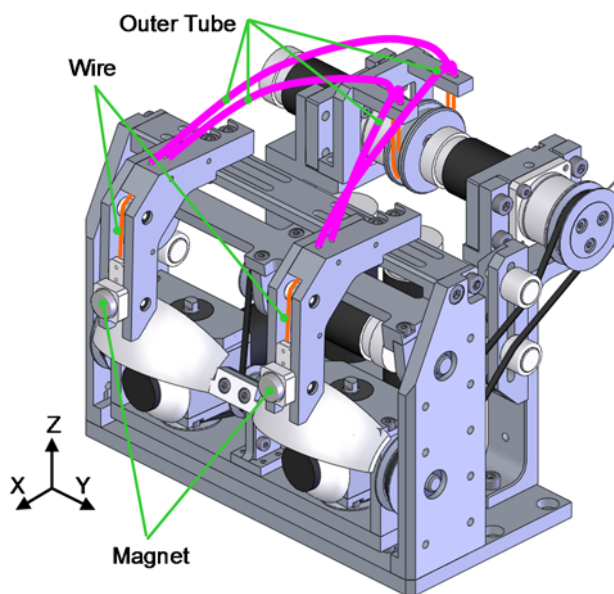


Fig. 2. 7 Mechanical design of the eyebrow

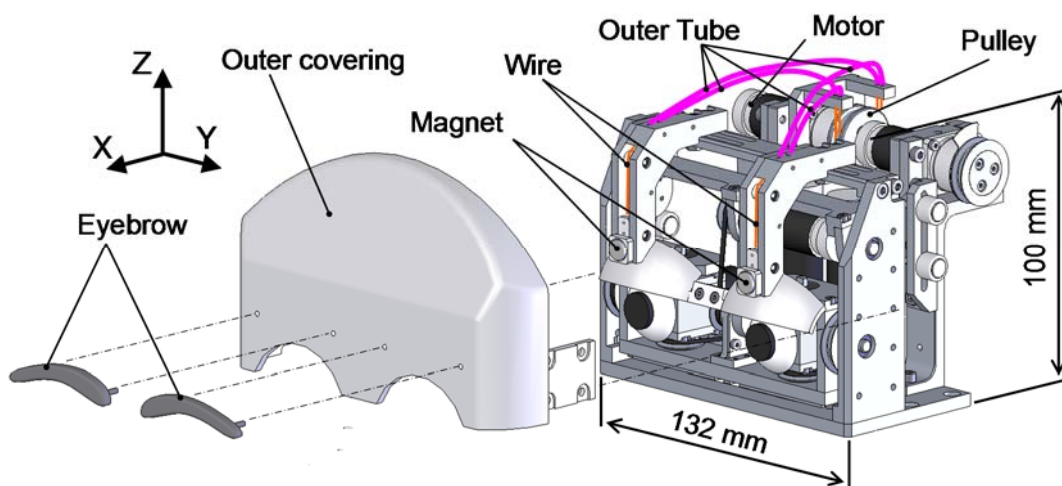


Fig. 2. 8 Exploded view of the eyebrow and the outer covering

(iii) 口

WE-4 では顎の開閉 1 自由度と口唇 4 自由度(各口角 2 自由度)である。口唇は紡錘型のばねとワイヤによる機構であるが、組立およびメンテナンス時においてとても扱いにくいものである。勿論、口の横幅を変化させることができるなど、表現性は高い。

今回のロボットの口の表情については、口唇の形状を、喜びといったポジティブな表情では下向きの三角ないしは谷形、不満や困惑といったネガティブな表情では上向きの三角ないしは山形、その他驚きや呆然といった中間的な表情では菱形ないしは一文字に変化させ、口唇の横幅は変化させないこととした。自由度は、顎の開閉 1 自由度と口角の上下の 1 自由度の計 2 自由度とした。

口唇の機構の駆動点を Fig. 2. 9 に示す。口唇の材料は軟質素材のセプトンを用いた。

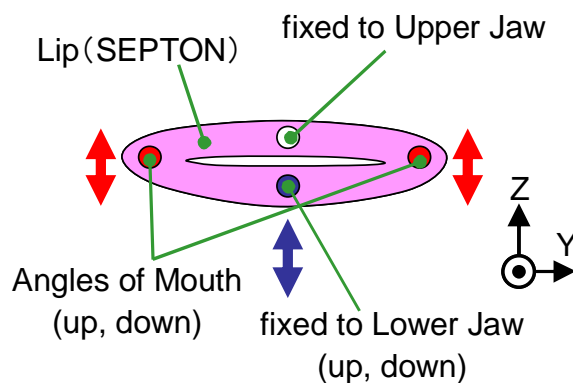


Fig. 2. 9 Control points of the mouth

KOBIAN 頭部の顔面外装は WE-4RII と同様のものとした。KOBIAN 頭部の正面写真および頭部内部機構図を Fig. 2. 10 および Fig. 2. 11 に示す。

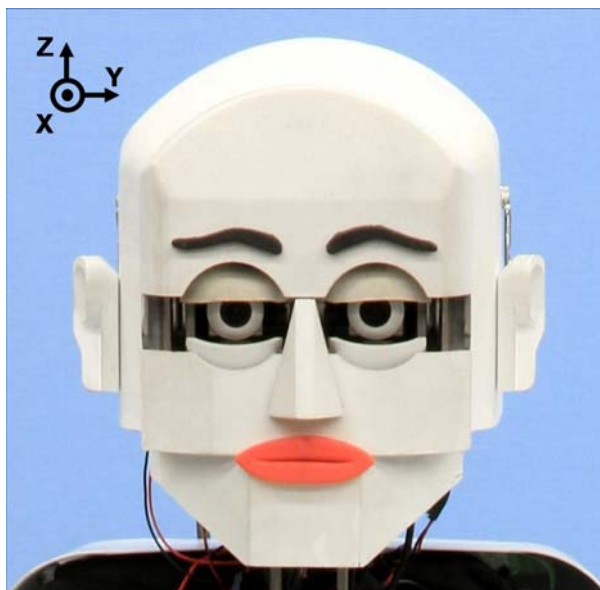


Fig. 2. 10 Front view of the face

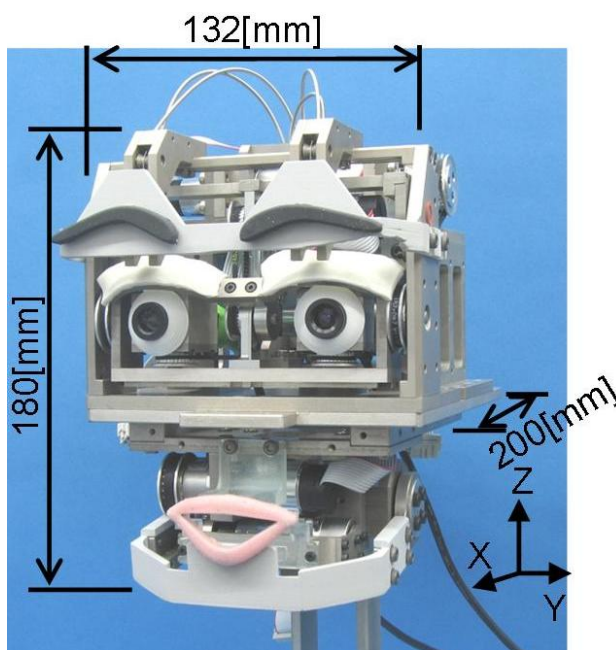


Fig. 2. 11 Mechanism of the head

この KOBIAN 頭部について、表情表出のための自由度を WE-4RII から大幅に減少させたので、表情表出能力の低下が考えられた。その表出能力の評価については第 3 章にて述べる。ここでは通常表情および第 3 章の評価実験において得られた各感情において最も高い表情認識率となった各表情写真を、KOBIAN の頭部が表出可能な表情例として載せる (Fig. 2. 12~Fig. 2. 19)。

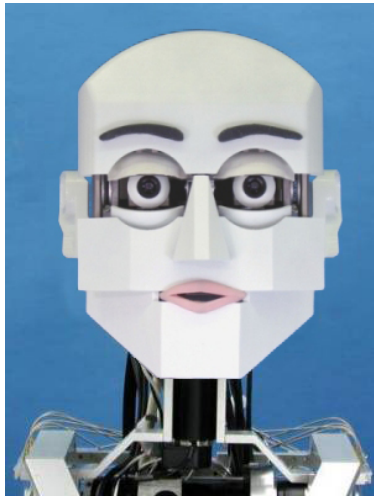


Fig. 2.12 通常表情



Fig. 2.13 怒り

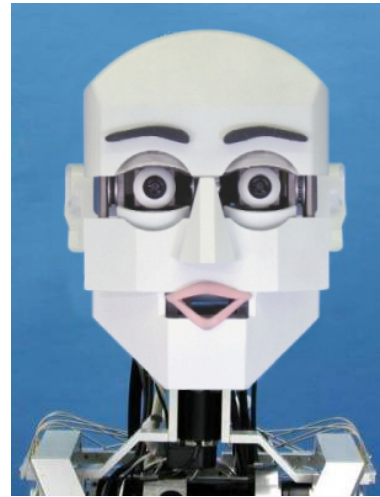


Fig. 2.14 喜び

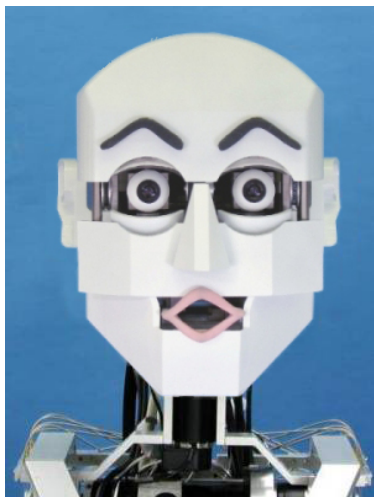


Fig. 2.15 驚き



Fig. 2.16 嫌悪

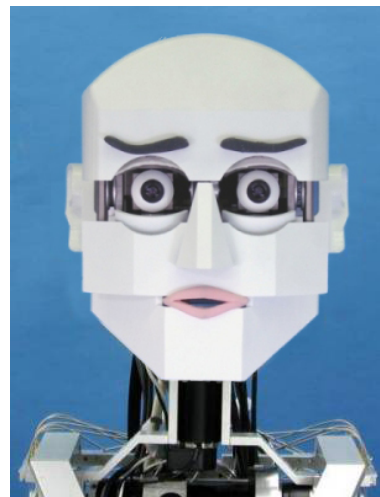


Fig. 2.17 悲しみ

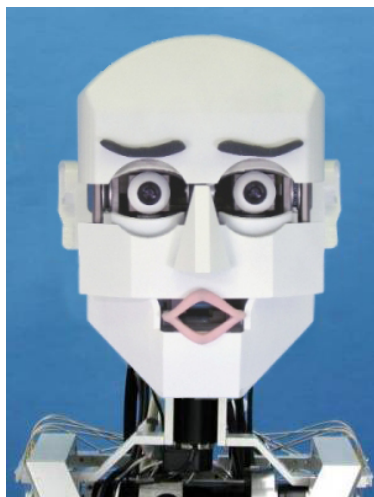


Fig. 2.18 恐れ

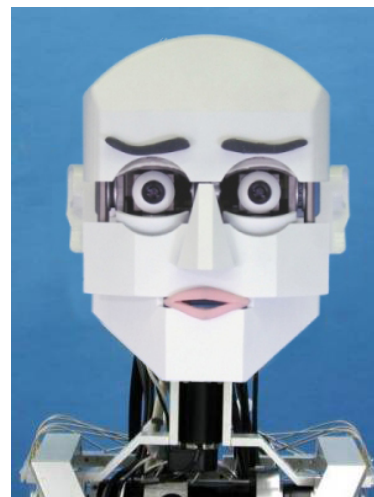


Fig. 2.19 困惑

(iv) 頭部および首部

頭部7自由度分のモータドライバ（特殊電装製）は後頭部内に格納した。モータドライバへの速度指令ライン，モータドライバ電源ライン（48[V]），エンコーダ信号ライン，エンコーダ電源ライン（5[V]）は全て後頭部下部・首後部のジャンクション回路にてまとめられ，ハーネスを通してKOBIAN背中の制御PCやDC-DC電源変換器，電源切替回路に接続されている。

頭部ハードウェアは4自由度の首ユニットを通して胴体と接続されている。首ユニットはWE-4のものと同様の自由度構成であり，KOBIANのサイズ・重量に合わせて小型・軽量化を行った。Fig. 2. 20に頭部全体のCAD図，Fig. 2. 21に首ユニットのCAD図，Fig. 2. 22に頭部機構・頭部外装・首ユニットの分解図を示す。

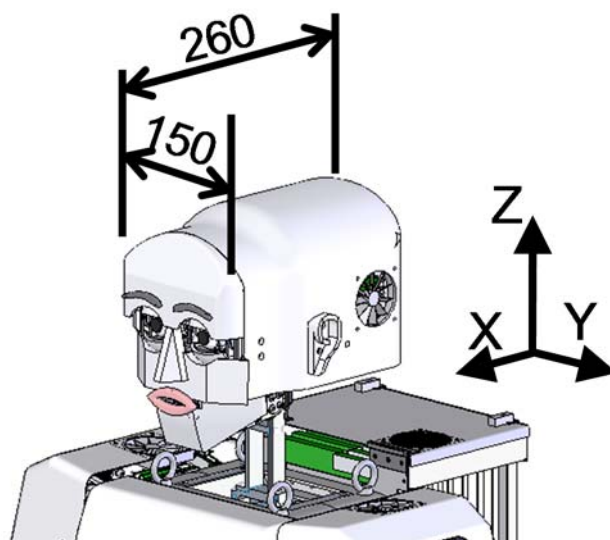


Fig. 2. 20 Isometric view of the head

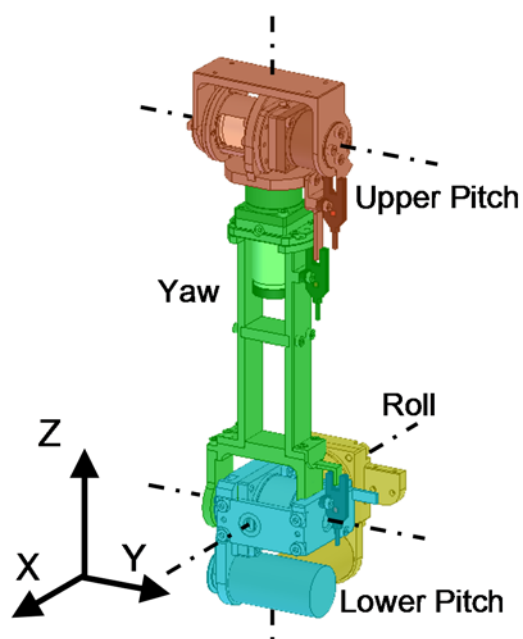


Fig. 2. 21 CAD drawing of the neck

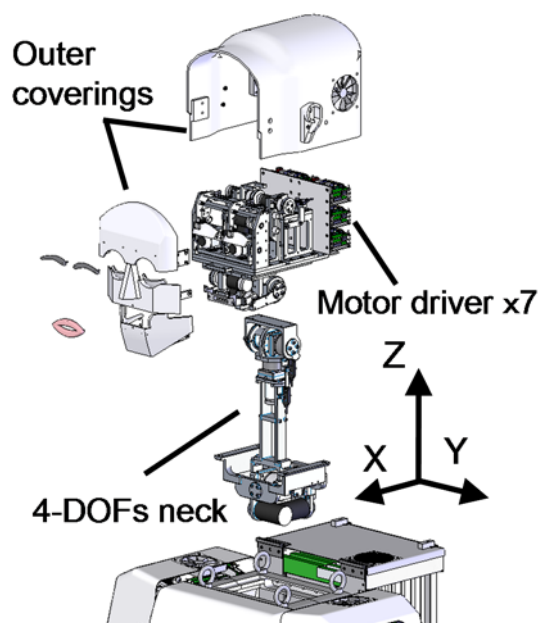


Fig. 2. 22 Exploded view of the head, the neck, and the outer covering

(2) 視覚センサ

視覚センサとして，両眼に株式会社 ARTRAY の USB 接続カラーCMOS カメラ (ARTCAM-022MINI) を搭載している (Fig. 2. 23, Table 2. 2)．レンズには画角 60[deg] のものを付けた．

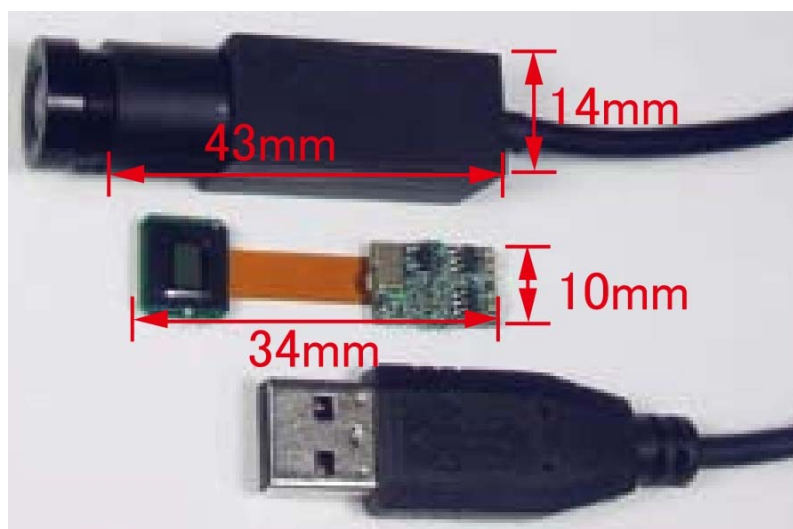


Fig. 2. 23 Overview of ARTCAM-022MINI [76]

Table 2. 2 Specification of ARTCAM-022MINI [77]

項目	仕様
センサ	CMOS
有効画素数	752(H)×480(V)
有効撮像面積	4.51(H)×2.88(V) [mm]
画素サイズ	6.0(H)×6.0(V) [μ m]
感度	4.8 [V/Lux-sec] (550[nm])
カラー配列	RGB
フレームレート	60 [fps], 30 [fps]
シャッタースピード	1/32967~1 [s]
ケース寸法	14(W)×14(H)×43(D) [mm]
電源電圧	5 [V] (USB 給電)

(3) 全身を用いた情動表出

WE-4RII が上半身のみのロボットでありその情動表出は上半身のみによるものだったのに対して, KOBIAN は下半身をもち, 全身を用いた情動表出が可能である (Fig. 2. 24). この全身情動表出パターンの作成については第 3 章にて説明する.

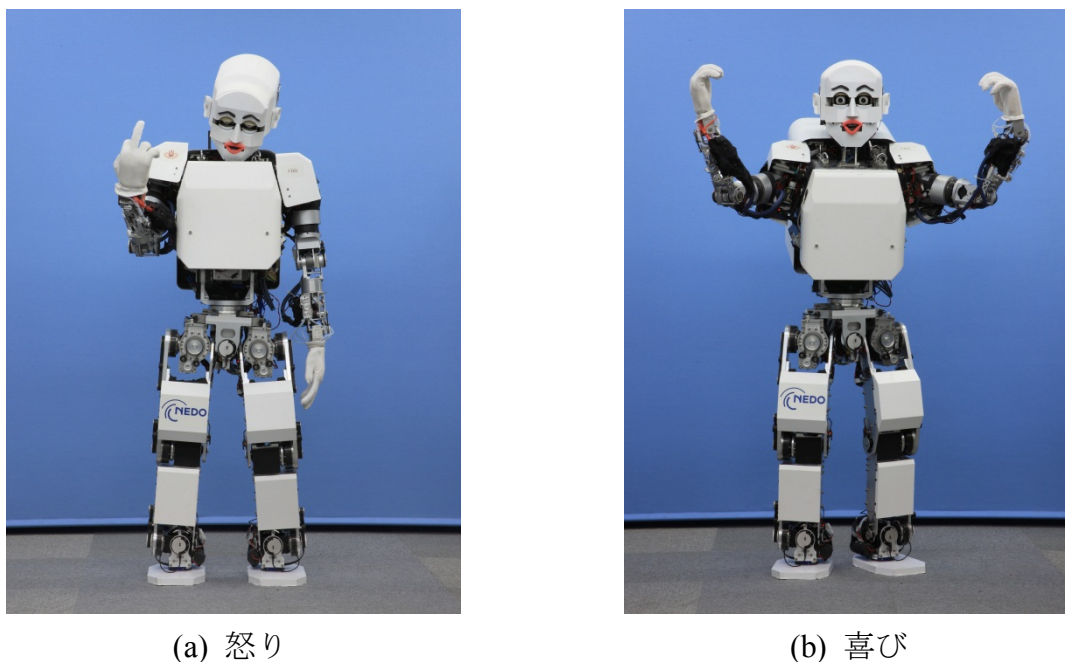


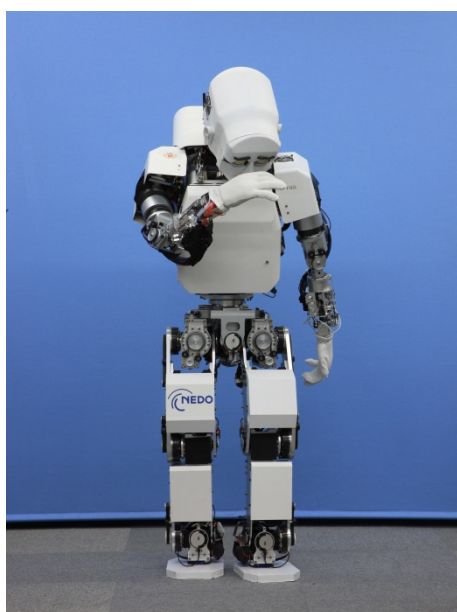
Fig. 2. 24 Whole-body emotion expressions of KOBIAN (1/2)



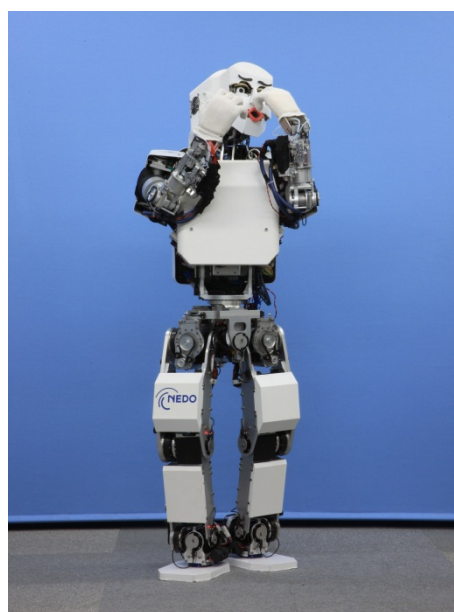
(c) 驚き



(d) 嫌悪



(e) 悲しみ



(f) 恐れ

Fig. 2. 24 Whole-body emotion expressions of KOBIAN (2/2)

2.2.4 制御システム構成

KOBIAN は本体に関節制御用 PC を搭載しており，外部 PC で生成された運動軌道（歩行パターン）ファイルを Ethernet を介して読み込み，パターンに応じて各関節を制御する．制御システム構成図を Fig. 2. 25 に示す．

この制御システムは，外部からのエネルギー供給を必要としない完全にワイヤレスな

ロボットを目指しているために、電源としてリチウムイオンバッテリーを採用した。また、外部電源の供給による動作も可能である。CPU として Intel 社製の Pentium M (1.6[GHz]) を搭載した PC/AT 互換 CPU ボードにより、I/O ボードを介して DC モータ 48 個を制御する。I/O ボードとしては HRP Interface Board [78]3 枚、6 軸力覚センサ用レシーバボード[79]1 枚の計 4 枚の PCI バス用拡張ボードを用いた。また各 DC モータの駆動回路として、本体にモータドライバ (特殊電装製[80]) を搭載した。この制御 PC の OS は、実時間性とタスクスイッチング時の OS のフットプリントの短さを考慮し、リアルタイム OS である QNX Neutrino 6.3.0[81]を選定した。

また、背中上部に画像処理のためのラップトップ PC (SONY VAIO type G[82], Windows XP) を搭載した。このラップトップ PC は USB 2.0 を介して、両眼のカメラ画像を得て、画像処理により画像平面内の視標の位置を計算し、Ethernet を通して運動制御 PC に送る (Fig. 2. 26)。

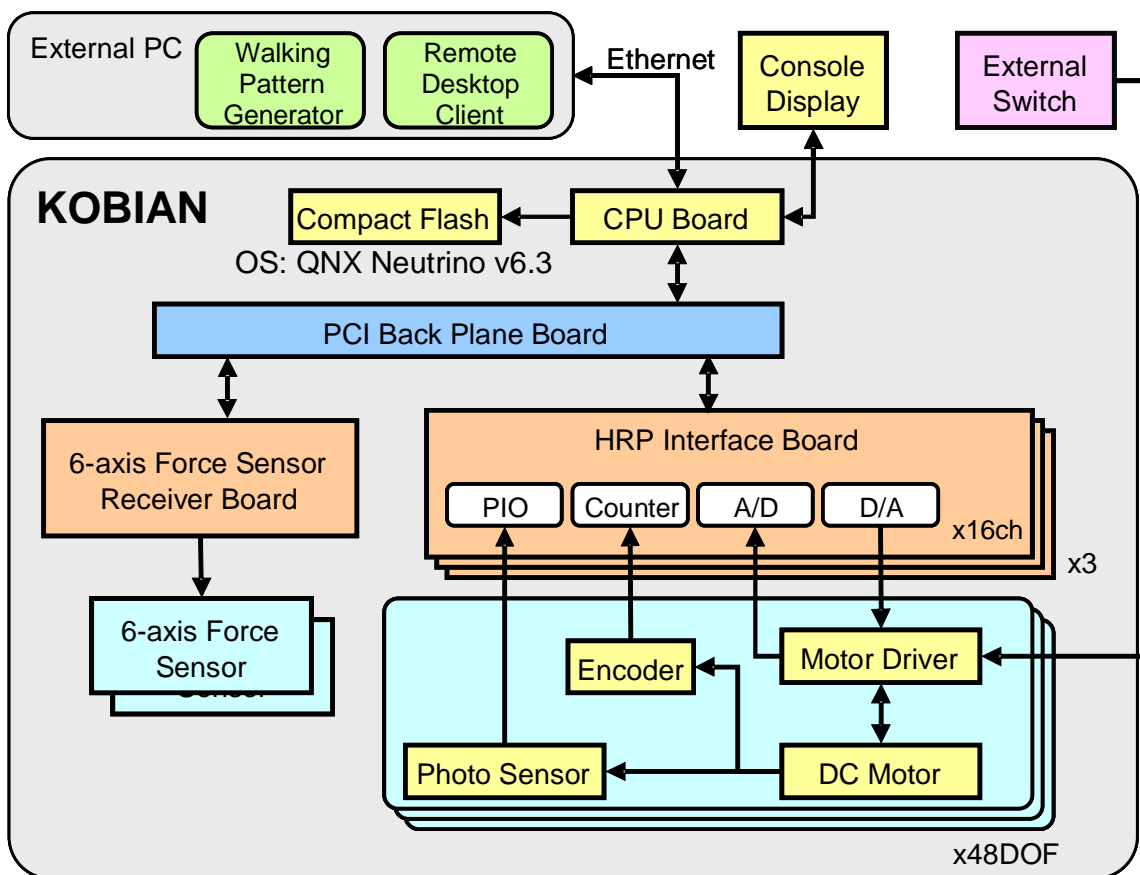


Fig. 2. 25 Cotrol system configuration of KOBIAN

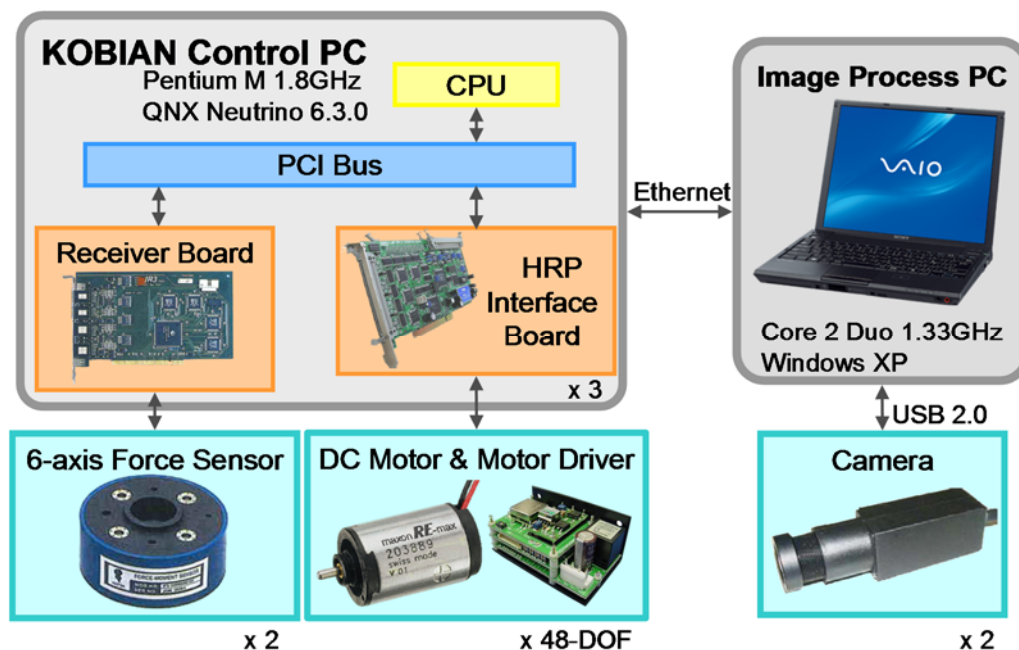


Fig. 2. 26 Control system configuration of KOBIAN (including image processing)

2.2.5 制御プログラム構成

KOBIAN の前身となった 2 体のヒューマノイドロボットである WE-4RII と WABIAN-2 の制御プログラムについて、次のような特徴がある。

WE-4RII は人間とのインタラクションを目標につくられており、ロボットの運動制御は無期間の周期的スレッドにて実装されている。多くのモータは速度制御のモータドライバにより駆動されており、制御 PC における位置制御の周期は 2[ms]である。モータの位置制御に要しないセンサの計測値取得や、10[ms]オーダの関節軌道設定は別のスレッドにて実行されている。特に、WE-4RII が移動しない据え置き型のロボットであることから、運動学のみを考慮した関節軌道設定となっている。

一方、WABIAN-2 の制御プログラムは、2 足歩行実験を行うことを目標につくられている。運動制御は有期間の周期的関数にて実装されている。この期間は、事前に作成される運動軌道ファイルによって決められ、基本的には、この 1 回の歩行実験を行う間にロボットの運動制御が可能となる。全てのモータは速度制御のモータドライバにより駆動されており、制御 PC における位置制御の周期は 1[ms]である。ジャイロセンサ計測値取得以外の処理は全て main スレッドにて実行される。即ち、ユーザインタフェースやセンサ計測値取得、関節軌道設定、位置制御などは全て 1 つのスレッドにて順々に 1[ms]周期で実行されている。関節軌道設定については、予め作成された運動軌道を逐次補間し、歩行安定化制御および逆運動学演算が行われ、動力学をも

考慮されている。

その他の相違点も含めて，Table 2. 2 にこれらの特徴を示す。

Table 2. 3 Comparison between the control program of WE-4RII and WABIAN-2

	WE-4RII	WABIAN-2
目的	インタラクション	歩行実験
運動制御期間	無期間	有期間
運動制御スレッド	別スレッド	main スレッド
位置制御周期	2 [ms]	1 [ms]
運動軌道生成タイミング	逐次生成	事前にパターン生成
関節軌道生成方法	逆運動学	逆運動学，歩行安定化制御
安定性	据え置き型なので考慮しない	パターン生成時点で考慮 歩行安定化制御
OS	Windows XP	QNX Neutrino
ユーザインタフェース	GUI	CUI
開発言語	C++	C
プログラミングパラダイム	オブジェクト指向	手続き指向
変数・データの管理	オブジェクト	グローバル変数

特に，WABIAN-2 の運動制御がマルチスレッド化していない点は重要である。まず開発プロセス（プログラミング）において，運動制御のロジックおよびタイミングが不必要にその他のロジックおよびタイミングの影響を受けてしまうことが挙げられる。インタラクティブなロボットのプログラミングにおいては，非周期的なセンシングイベントや，オペレータによるユーザインタフェースからのイベントに対応しなければならない。これらに対応した処理は運動制御を行う main スレッドにて実行されるため，運動制御の周期を厳密に守るよう常にその周期の残り時間（制御周期から運動制御に要する時間を差し引いた時間）内に収まるよう注意しなければならない。全てのイベント処理において，それを処理する時間が残り時間内に収まれば問題ないが，そうではない場合は，制御周期を「またぐ」ロジックとして記述されなければならない。本来のイベント処理のデッドラインが 1[ms]よりはるかに長く，また優先度が運動制御よりも格段に低かったとしても，そうしなければならないのである。もしこれが順守されなければ，運動制御周期がずれてしまい，安定な歩行は実現できない。

また，処理のモジュール化も困難である。main スレッド上で実行されるために，上

述の「不当なテクニック」を要するので、たえず処理時間に注意しなければならない。特に新しい処理を追加した際には、それが本来的には既存の処理に影響を与えない（もしくは、与えたとしても一部である）のに、制御周期内でいくらかの処理時間を取るために、既存の全ての処理の時間を短縮する必要が出てしまう。

さらに、このシングルスレッド構成により、歩行実験以外の諸機能に切り替える際に、運動制御関数を「抜ける」必要が生じてくる。例えば運動軌道ファイルを読み込むには、それが 100[ms]オーダの処理時間を要するために、運動制御関数から抜けなければならない。これに、データがグローバル変数の配列として静的に（コンパイル時に）管理されていることにより、同時に読み込まれるパターンの数と時間長が制限されることが加わって、ロボットはいくつもの種類・時間長のパターンを連続して出力することができない（途中でロボットを吊り上げ、運動制御を切る必要がある）。

一方で、WABIAN-2 の制御プログラムは、リアルタイム OS である QNX を採用していることで、数十もの関節の位置制御を周期 1[ms]で実現できているという利点がある。表現力が乏しいが CUI を採用していることもこれには効いている。

KOBIAN は、当然のことながら、2足歩行が実現できなければならないので、制御プログラムの性能・精度においては WABIAN-2 と同等のものを目標にし、QNX Neutrino を OS として採用することにした。主な運動生成は、WABIAN-2 と同様に、事前に作成されたパターンを読み込み出力するパターン再生と安定化制御によるが、インタラクションにおいては WE-4RII と同様にイベント駆動を可能とした。また、他のロボットプログラミングのフレームワークやライブラリからも運動制御が利用できるようにし、他の開発者が KOBIAN を利用した研究アプリケーションを開発しやすいようにした。さらに、開発・改良がしやすいように、次節で述べるハードウェア構成の変更に対応しやすいように、プログラムのモジュール化をこころがけた。

(1) アーキテクチャ

制御プログラムのアーキテクチャを Fig. 2. 27 に示す。これに示すように、レイヤ型のアーキテクチャを採用した。これにより、ハードウェアや制御機器、ロボットの動作の種別などの細かい違いを各レイヤ内に局所化させることができる（モジュール化）。レイヤ間のオブジェクトの結合は Dependency Injection (DI. 依存性の注入) パターンにより実現する。具体的には、上位レイヤのオブジェクトは下位レイヤのオブジェクトの具象クラスを直接的にも間接的にも持たず、下位レイヤのオブジェクトのクラスの機能仕様のみを定めた抽象クラス（インタフェース）への参照を所持する。各レイヤのオブジェクトの生成・設定およびレイヤ間のオブジェクトの接続は、設定

ファイルに基づき Configurator がプログラム実行時に行う。

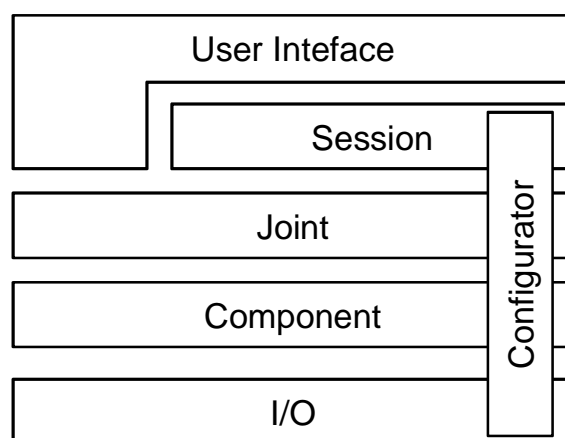


Fig. 2. 27 Layer architecture

例えば I/O レイヤにある D/A 変換ボードについては、あるデジタル値を入力として、それに対応したアナログ電圧値を出力することが機能仕様である。この仕様はほとんどの D/A 変換ボードにおいて本来的であり、必ず存在すると言ってよいものであるが、それをどのようなプログラミングの命令・手続きによって実現するかは、各製品によって異なる。「何を行うか」が機能仕様であり、「どのように行うか」が機能実装である。I/O レイヤにおいてはまず D/A 変換ボードの機能仕様のみを定めた DABoard 抽象クラスがあり、特定の製品のプログラミング命令・手続きの実装を定めた HRPIInterfaceBoard クラスや ContecDABoard クラスなどが、その抽象クラスを継承する。

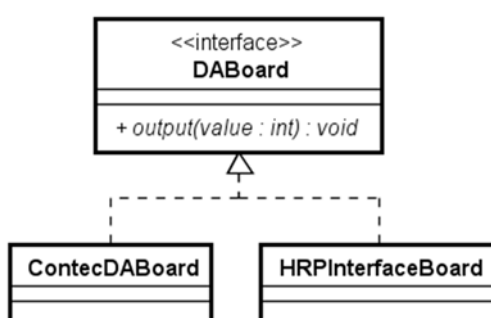


Fig. 2. 28 Extension of abstract class

この D/A 変換ボードを用いるモータのクラスが Component レイヤにあるが、これは特定の機能実装である ContecDABoard クラスや HRPIInterfaceBoard クラスなどのオブジェクトを直接的にも間接的にも所持せず、これらの継承先である DABoard 抽象

クラスへの参照を所持する。Configurator がこれらのオブジェクトの生成・設定・接続を行う。

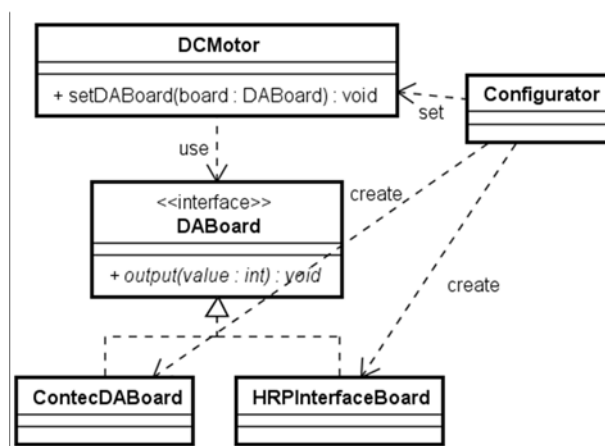


Fig. 2. 29 Dependency Injection

こうした機能仕様と機能実装の分化により，各レイヤ，各クラスのモジュール性が高まり，ロボットの仕様や搭載機器の変更・拡張に対して，制御ソフトウェアの変更・拡張が非常に容易になる。

(a) I/O レイヤ

I/O レイヤは，制御 PC と外部機器の接続を担うレイヤである。Fig. 2.n の制御システム構成図に示すように，D/A 変換ボード，A/D 変換ボード，パルスカウンタボード，PIO ボード，6 軸力覚センサ受信ボードが KOBIAN には搭載されている。これらのボードそれぞれの機能仕様およびそれぞれの製品に対応した抽象クラスおよび具象クラスを作成している（抽象クラス：DABoard，ADBoard，CNTBoard，PIOBoard. 具象クラス：HRPInterfaceBoard，JR3，ContecDABoard，InterfaceCNTBoard）。

(b) Component レイヤ

Component レイヤは，I/O ボード等の外部機器の先に接続されているコンポーネントを表現するレイヤであり，モータ，エンコーダ，電流センサ，フォトセンサ，力センサ，6 軸力覚センサなどを表すクラス群がある。

(c) Joint レイヤ

Joint レイヤは，下位のモータやエンコーダなどのコンポーネントを用いて実現されるロボットの関節を表現するレイヤである。回転関節を表す RevoluteJoint クラスがあり，control()メソッドを持っている。このメソッドは上位レイヤから，周期的に呼び

出されることによって、担当する関節の位置制御を行う。

(d) Session レイヤ

Session レイヤは、ロボットの関節群をどのように動かすか、を表現するレイヤである。KOBIAN は、WABIAN-2 のようなパターンによる 2 足歩行、WE-4RII のようなセンシングによるインタラクティブな動作、他のアプリケーションからの運動指令による動作など、様々な「動作の仕方」を実現しなければならない。これらは任意のタイミングで一連の動作が実現できればよく、動的に各動作（各セッション）を切り替えることで、動作モードを変更する。具象クラスは動作モードの分だけあるので、関節の位置をリセットするオフセット（PhotoOffsetSession クラス）や、ホームポジションに関節を動かす動作（ClearSession クラス）なども存在する。

(e) User Interface (UI) レイヤ

UI レイヤは、ロボットのオペレータがどのようにロボットを操作するか、を記述するレイヤである。PC における UI としてキャラクタ・ユーザ・インタフェイス (CUI) やグラフィカル・ユーザ・インタフェイス (GUI) があるが、これらは使用するプラットフォームや開発環境などによって適切に選択されるものである。従って、UI レイヤから見れば下位のレイヤは Model-View-Controller (MVC) アーキテクチャパターンにおける Model に該当し、UI レイヤは View と Controller である。KOBIAN の制御ソフトウェアにおいては、開発やテストの容易性を考慮して、附録 A にて紹介する TUI の構築フレームワークを用いている。

(2) 関節制御スレッド

ロボットの各関節は、制御専用スレッドにおいて、制御周期 1[ms]毎に位置制御される。別スレッド化することにより、ユーザイベントなどの時間的影響を受けないようにしている。また、そのとき設定されている目標値に基づき位置制御を行うので、目標値が更新されなければ、関節はそのまま動かない。Session がアクティベートされていないと目標値は更新されないため、動作モード切替のためにロボットを吊り上げる必要がなくなった。

動作モードを表す各 Session は、アクティベートされていれば、この制御スレッドにおいて、関節の位置制御より前に、Session の状態に対応した処理が実行される。

デッドラインが 1[ms]よりも格段に長い動作の処理は、それ用に別スレッドをつくり、共有メモリなどを介して、制御スレッドにて実行される Session に指令を与える。

こうして、処理の分断されたコーディング無しに、周期の異なる動作を簡単に記述することができる。

(3) Session の状態遷移

動作モードを表す Session の状態については Active/Inactive で表現しても良かったが、最も使われるパターン再生などの動作においては、一連の動作を繰り返すことが多い。繰り返し処理は内部状態の適切な管理を要するため、多くの動作モードそれぞれにおいて繰り返しのための似たような状態遷移を記述するのは開発の手間になる。そこで、Active 状態に 3 つのサブ状態を用意した (Fig. 2. 30)。

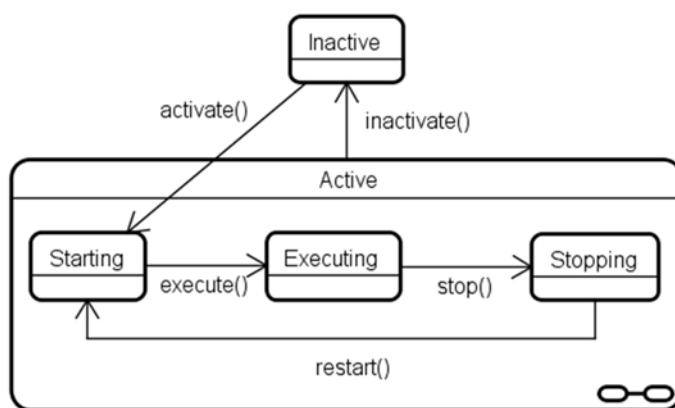


Fig. 2. 30 State transition of Session instance

Executing 状態はその動作のメインの処理を実行している状態である。Starting 状態と Stopping 状態はその前後に要する動作を実行している状態である。例えば歩行パターン再生においては、まさに当該パターンを再生している状態が Executing 状態であり、事前に関節を開始位置までに動かしたり、安定化制御のオンオフを設定したりする状態が Starting 状態、パターン再生後に止まったまま安定化制御のオンオフを設定したり次の再生パターンの待ち受けをする状態が Stopping 状態である。

Session の各状態における処理は、Starting 状態は onStart()メソッドに、Executing 状態は onExecuting()メソッドに、Stopping 状態は onStop()メソッドに、というようにその状態に対応したメソッドに記述する。これらのメソッドは制御スレッドにて制御周期毎に呼び出される。

状態遷移はユーザによる入力のみならず、プログラムによる自動的な遷移も可能である。activate()や execute()などの状態遷移メソッド呼び出し時に自動的にコールバック

クされる `onActivate()` や `onExecute()` メソッドにて状態遷移が可能かどうかのチェック処理を追加することもでき、開発者が適宜カスタマイズしやすいようにしている。

(4) Configurator

制御プログラムが Fig. 2. 27 の構造を採っていることで、静的に（コンパイル時に）構成や動作が決定される必要が無く、動的に（プログラムの実行時に）構成や動作を決定することが可能になった。個々のプログラムモジュールが、特定のロボット構成に束縛されずに、その本質的動作のみに注力することが可能になり、また、ロボットアプリケーションの開発者も同様にその焦点を絞ることができるようになった。

このような動的に構成可能な（configurable）制御プログラムは、特定のロボットの制御プログラムを実現するための構築フレームワークと言える。特定のロボット制御のために、configurable な箇所を特定の構成パラメータに設定するものが Configurator である。

Configurator は構成設定ファイルに基づき、各レイヤのインスタンス群を生成し、レイヤ間のインスタンスの接続を行う。God class とならないよう、レイヤ毎に Configurator は分化している。構成設定ファイルを変更することで、制御プログラム本体の再構築（再コンパイル、再リンク）無しに、異なるハードウェア構成のロボットに対応できる。

(5) ロボットの全身運動

基本的な全身運動の実現方法は、小椋および近藤のものと同様である。本研究で開発した制御ソフトウェアでは、上述の Session の仕組みによって、これらが関節の位置制御とは別のレイヤにおける動作モードにひとつに過ぎないため、開発・メンテナンス・拡張しやすくなっており、動作モード切替のためにいちいちロボットを吊り上げなくて良い、ということである。また、次節で述べるように、KOBIAN はその自由度構成を変更することになった。こうした変更に対して全身運動 Session クラスをいちいち変更する必要がないよう、用いる自由度構成を動的に設定可能なように改良している。KOBIAN の視標追従運動のアルゴリズムについては、第 4 章にて述べる。

(6) ユーザインタフェース

開発した制御ソフトウェアにおいて、UI レイヤは本質的な問題領域ではないため、

視標追従を行うためには、制御 PC の制御プログラムと画像処理 PC の画像処理プログラムが連携しなければならない。このプログラム間の情報共有には Takalib の非同期通信モジュール SharedData を用いている。この非同期通信のおかげで、運動生成周期 30[ms]に対し画像処理周期 33[ms]というタイミングのミスマッチを解消できた。

また、ロボット研究では、他の開発者と協同してロボット開発を行うことがあり、他の開発フレームワークとの連携を求められることがある。実際に KOBIAN がロボット用ミドルウェアロボット用ミドルウェア YARP (Yet Another Robot Platform) [83] と接続して動作する事例があった。この事例では、他の開発者が開発した YARP アプリケーションと KOBIAN の制御プログラムが YARP メッセージを送り合い、移動する視標に対して、KOBIAN が追従しそのハンドでリーチングする。このような動作をするためには、従来の (WABIAN-2 の) 制御プログラムでは、全身運動を統括する関数を変更し、そこに命令を追加する、というメンテナンス性を激減させる方法を採用しかなかった。しかしながら KOBIAN の制御プログラムでは、先述した動作モードの動的変更が可能な Session の仕組みにより、新規に Session クラスを作成し、プログラム動作中に当該 Session オブジェクトをアクティベートするだけで良い。実際、開発したのは YARP メッセージの送受信と解釈を行うサーバモジュールと、Session として所望の運動を実現する KzSession だけであった。この事例における各コンポーネントの関連図を Fig. 2. 32 に、KOBIAN のリーチング動作の様子を Fig. 2. 33 に示す。

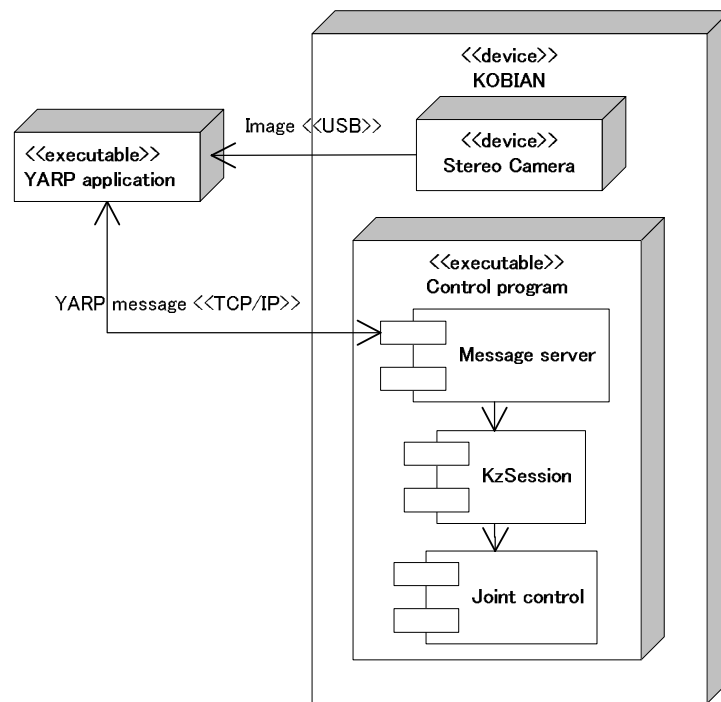


Fig. 2. 32 Collaboration with YARP application

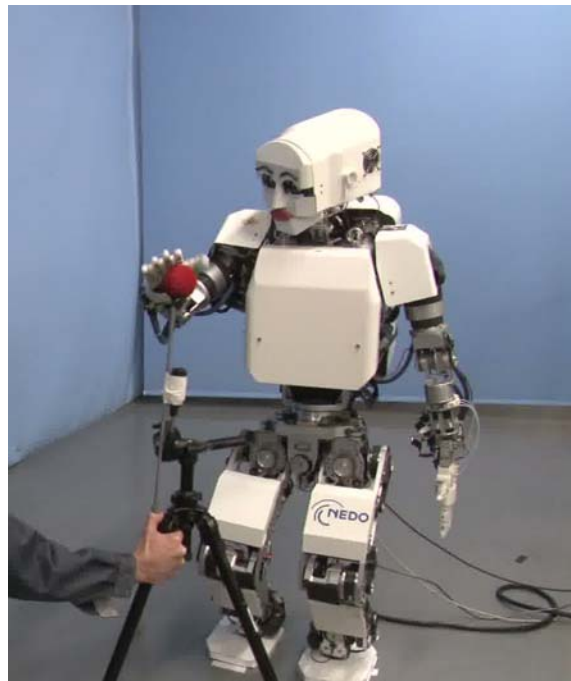


Fig. 2. 33 Snapshot of reaching behavior

2.3 KOBIAN-R の開発

2.3.1 開発コンセプト

KOBIAN 頭部を設計した際、筆者はいくつかの問題に直面した。人間サイズより各部が一回り大きい据え置き型の WE-4RII から自立して運動できる等身大のヒューマノイドロボット KOBIAN へと移行したため、ロボット頭部を人間並みの大きさに小型化せねばならず、また全身運動に対応させるため、軽量化を行う必要があった。さらに、モータドライバなどの制御基板も頭部に実装する必要が生じたが、駆動系の電圧を考えると頭部にとってはかなりオーバースペックとなる、大電流に対応した大型のモータドライバを用いるしかなかった。これによって頭部の実装スペースに不足が生じたこと、さらには制御システムとして WABIAN-2 に倣い集中制御を用いており、実装可能な I/O ボード数が 3 枚に制限されたことにより、KOBIAN の頭部自由度数は WE-4RII の頭部に対し 22 から 7 自由度へと大幅に縮小せざるを得ず、また KOBIAN 頭部は人間の頭部と比べ特に前後方向に大きいものとなってしまうていた (Fig. 2.20)。

また、KOBIAN 頭部の表情認識率評価実験の結果、KOBIAN 頭部は一部感情の表情認識率が低く全ての感情に対して十分な情動表出能力を持っているとはいえないことがわかった (第 3 章)。KOBIAN は全身での情動表出を実現したが、実環境で人間のサポートを行うロボットは、例えば何かを運んでいる最中に後ろで大きな音がして驚く、といった状況に置かれる場合もあり、常に全身での情動表出ができる環境にあるとは限らない。したがって、表情の表出能力を向上させることが必要であると考えた。

高い表情表出能力を持ち、2 足歩行が可能であるロボットの実現のため、下のような特徴をもつ新頭部を開発することとした。

- 十分に感情を読み取りやすい表情表出能力を持つ
- 2 足歩行ロボット頭部として十分に小型軽量

具体的には、感情の読み取りやすさの評価基準として、Ekman ら[6]が提唱する基本 6 感情 (怒り, 悲しみ, 喜び, 驚き, 嫌悪, 恐れ) の表情認識率を用い、新頭部はこれらの高い表情認識率を持つことを目標とした。また、頭部サイズは日本人の成人女性の平均寸法に基づいて製作された KOBIAN の胴体に適合するものとした。この新頭部を搭載した全身情動表出 2 足ヒューマノイドロボットを KOBIAN-R

(KOBIAN-Refined) と名付けた。

以下、十分に感情を読み取りやすい表情の選出方法、このモデル表情を表出可能な KOBIAN-R 頭部ハードウェア構成, KOBIAN-R を駆動するための制御システム構成と制御プログラム構成について説明する。

2.3.2 モデル表情の選出

(1) 自作 CG による表情の探索

第3章において述べる KOBIAN と WE-4RII の表情認識率を比較する実験の結果、KOBIAN 頭部は特に「怒り」と「悲しみ」の認識率が WE-4RII 頭部と比較して大幅に低下していること、また、「恐れ」の表情は KOBIAN, WE-4RII のどちらも表現できていないことが明らかになった。

したがって、KOBIAN 頭部で基本6感情すべてを高い認識率で表出するためには、特に「怒り」、「悲しみ」と「恐れ」の表情の見直しが必要になった。これらの感情の KOBIAN-R 頭部に搭載する表情を決定するため、CG による予備実験を行った。実験のため2組のCGを作成した。1組は WE-4RII, KOBIAN で高い認識率を得ていた感情の表情を正確にトレースしたCGである。作成したCGとそのもとになった写真を Fig. 2.34 に示す。それぞれ WE-4RII の表情から認識率の高かった「怒り」、「喜び」、「悲しみ」、「驚き」の感情の表情より、KOBIAN の表情から「喜び」、「嫌悪」の感情の表情よりCGを作成した。ここで、WE-4RII, KOBIAN とともに、「恐れ」と判別された表情が存在していなかったため、WE-4RII と KOBIAN をもとにした「恐れ」のCGは作成しなかった。

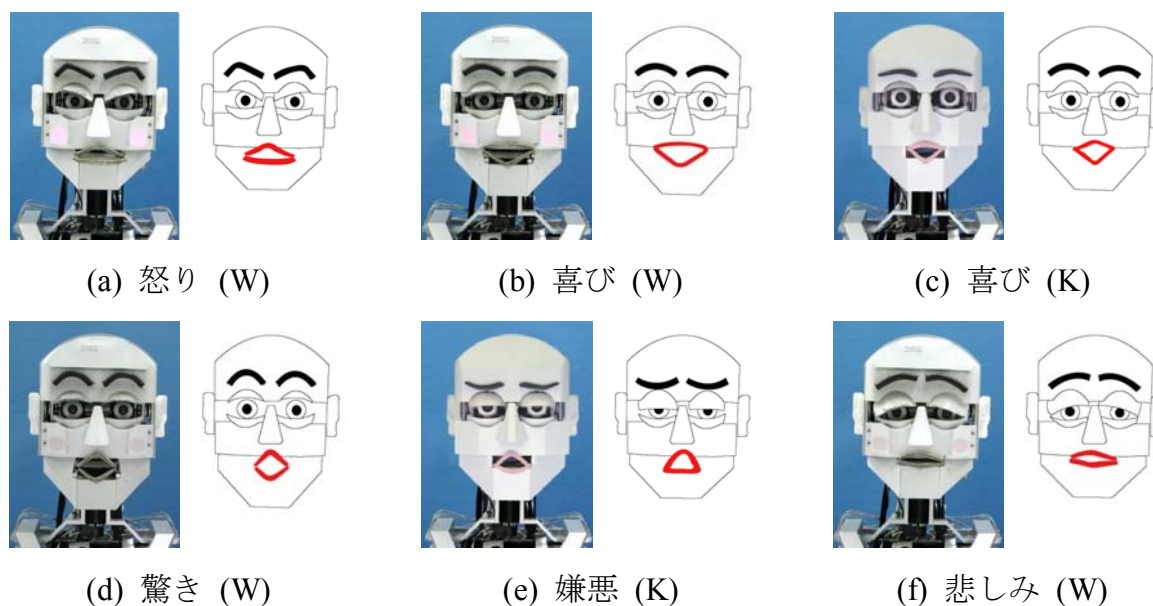


Fig. 2. 34 Pictures of WE-4RII and KOBIAN that have high facial recognition rates of some emotions are traced into CGs ((W)means that facial expression pictures of WE-4RII are traced into those CGs and (K)means that facial expression pictures of KOBIAN are traced into those CGs).

もう 1 組は主に「恐れ」の表出を目指し、人間の表情に関する文献や漫画を参考に得られた表情を CG に落とし込んだものである。この際、「恐れ」を感じる際の人間の表情の特徴としては、以下のような特徴があることがわかった。

- 眉は内側が互いに閉じ、外側は鋭角に下がる[6]
- 上瞼、下瞼が上がる[6] [84]
- 口は開き、唇は後方に引かれて緊張する[6] [84]

また、漫画など抽象的な表現においては、「恐れ」の表現は上記の人間の表情の特徴を再現することに加え、眉を大きく歪ませるといった大げさな表現が多く用いられる。さらに、顔色の表現として、顔色を青くする、または暗くすることが多く行われることが分かった。

Ekman らの実験に用いられた写真からは顔色を読み取ることはできないが[85]、実験により高い表情認識率が確認されているため、この実験では、顔色の表現を用いずに「恐れ」の表情を作成し、認識率を調査することとした。

これらの CG を用い、実験への協力に同意した 20 名(男性 20 名、平均年齢 21.5 歳)の実験参加者に対し、アンケートを行った。この結果、WE-4RII と KOBIAN の表情

をトレースしたCGの間で、WE-4RIIの「悲しみ」の表情とそれをもとにしたCGを除いて実機の写真とそれをもとにしたCGより得られる表情認識率の間に有意な差が認められないことが分かった (Fig. 2. 35). このことから、CGを用いて表情を探索することの有用性が確認されたといえる. ここで、「悲しみ」の表情認識率についてはCGと実機の写真の間に差が出ているが、これはWE-4RIIが「悲しみ」を表現する際、頬の色をわずかに青く染めるといふ表現で顔色の表現を用いているのに対し、CGにおいては顔色を付加しなかったためであると考えられた. これにより、KOBIAN頭部の外観デザインにおいても顔色の表現が表情認識率に影響を与えることが示されたといえる.



Fig. 2. 35 Comparison of the recognition rates of the real machine and CG

また、各感情について表情認識率が高かった表情を Fig. 2. 36 に、表情認識率を Fig. 2. 37 に示す. この結果から、すべての感情において漫画調の表情の方が人間の表情をもとに作成された WE-4RII や KOBIAN の表情より高い認識率を持つことがわかった. 一方、この実験においては「恐れ」について表情認識率が十分高い表情を発見することはできなかった.

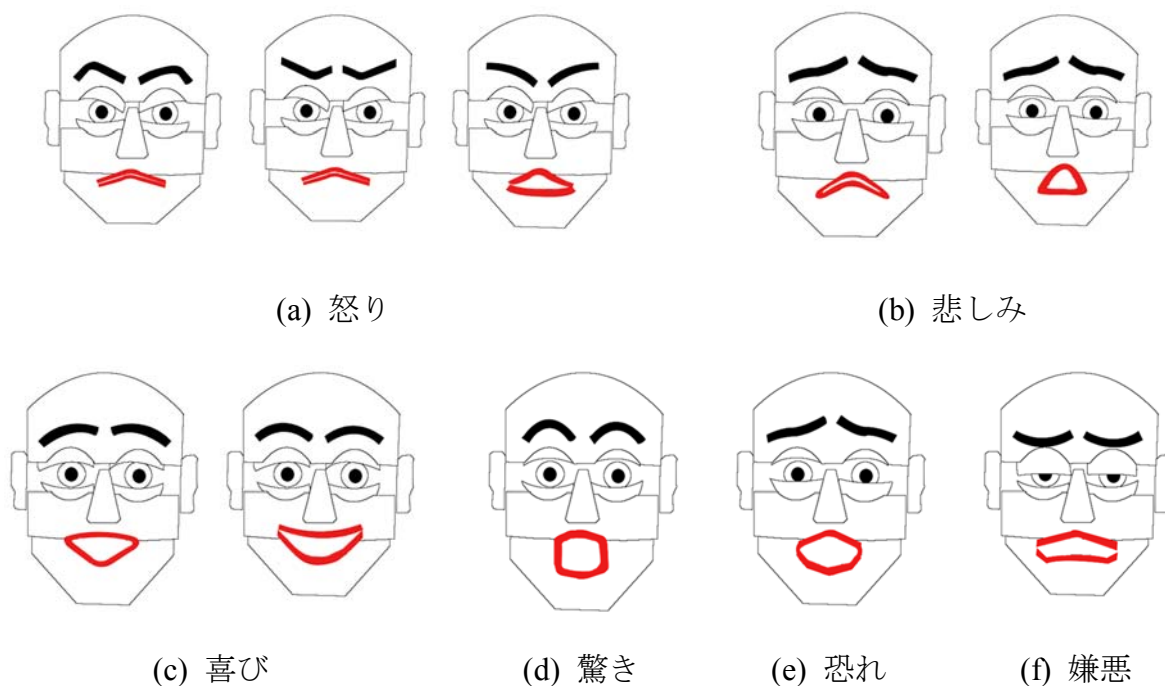


Fig. 2. 36 Self-made CGs that have the highest recognition rates



Fig. 2. 37 Recognition rates of the CGs based on WE-4 and KOBIAN, and the self-made CGs of cartoony expressions

(2) アマチュア漫画家の作成した CG による表情の探索

上述の実験の結果において、漫画調の表情の表情認識率が人間らしい表情の認識率を上回ったことにより、KOBIAN 頭部の外観デザインには、人間の表情をもとに表

情パターンを適用するのではなく、漫画調の表情を探索し、これを実現する方がより高い認識率を得る表情を表出できることが予想された。このことから、本研究では表情の作成を漫画調の表現を得意とするアマチュア漫画家に依頼することにした。

この方針に従い、表情作成プログラム (Fig. 2.38) を7人のアマチュア漫画家に渡し、表情を作成してもらった。アマチュア漫画家に直接CGを作成してもらうのではなくプログラムを手渡したのは、アマチュア漫画家が作成した表情の間の比較を容易にし、また可動範囲などハードウェアでの実現性の中で表情を作成してもらうためである。

このプログラムにはTable 2.4のように顔面各部に25自由度が設定されており、画面上のスライダを操作して表情を作成できるようになっている。表情作成プログラムの自由度は、比較対象とするWE-4RII, KOBIANの表情および前述のCGによる予備実験で選定した表情をすべて再現できる自由度であること、人間の筋配置より表現できるであろう眉・瞼・唇の形状を可能な限りカバーするという観点から設定された。

また、このプログラムには顔色やしわといった表現は搭載せず、これらの表現を用いた方が感情を伝えやすい表情を作成できるとアマチュア漫画家が判断した場合にはそれらの表現を後から描き込んでもらうこととした。これは、これらの表現は位置、色など自由度の設定に大きな幅があるためと、プログラムでこれら全ての調整機能を実現することが困難であったためである。

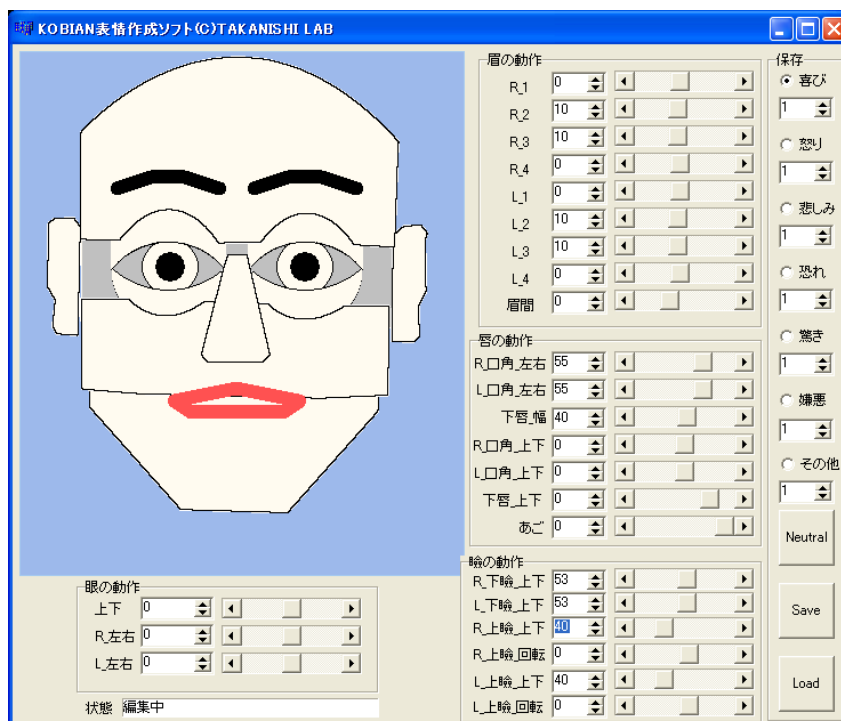


Fig. 2.38 User interface of the facial expression program

Table 2. 4 DoF setting of the facial expression program

部位	自由度	可動部
眼	3	両眼 Pitch, 各眼 Yaw
上瞼	4	各瞼 Pitch, 各瞼 Roll
下瞼	2	各瞼 Pitch
眉	9	各眉 Z 方向×4, 眉間距離
顎	6	各口角 Y・Z 方向, 下口唇 Y・Z 方向
計	25	

この結果, 基本 6 感情の表情 CG が合計 75 枚作成された. 表情作成プログラムの自由度のうち眉間の距離を調節する自由度に関してはほとんど動かされていなかったため, 実機では搭載の必要がないと考えた. また, プログラムの自由度以外の要素, 顔色やしわなどについてアマチュア漫画家からは明確な回答を受けることができなかった. しかし, (1)の実験より KOBIAN 頭部の外観デザインにおいても顔色が印象に影響を与えることが示唆されたため, 今回の実験では漫画, アニメの表現を参考に顔色の表現を付加した CG を作成, これらの表現によって表情認識率の向上を図ることができるかもあわせて検討することとした.

WE シリーズの研究においては表情に顔色が付加されているが, 顔色を付加する位置の詳細な検討は行われていなかった. そこで, 今回は WE-4 で用いられた頬に円形に顔色を付加する表現に加え, 漫画, アニメにおいて多く用いられている額, 鼻のまわりに顔色を付加する表現も合わせて検討した.

顔色の表現を付加する感情は, 漫画, アニメなどで顔色の表現が付加されることが多い「怒り」と「恐れ」の感情とした. 具体的には, 先の実験において顔色の表現なしに最も認識率が高かった Fig. 2. 36(a) および Fig. 2. 36(e) の表情に, 「怒り」の表現では赤色の顔色を, 「恐れ」の表現では青色の顔色を付加し, 表情認識率にどの程度影響が出るのか調査を行った. 実験に用いた CG を Fig. 2. 39 に示す.

これらの CG を用い, 実験への協力に同意した 58 名 (男性 51 名, 女性 7 名, 平均年齢 21.5 歳) の実験参加者に対し, アンケートを行った. 結果を Fig. 2. 40 に示す.

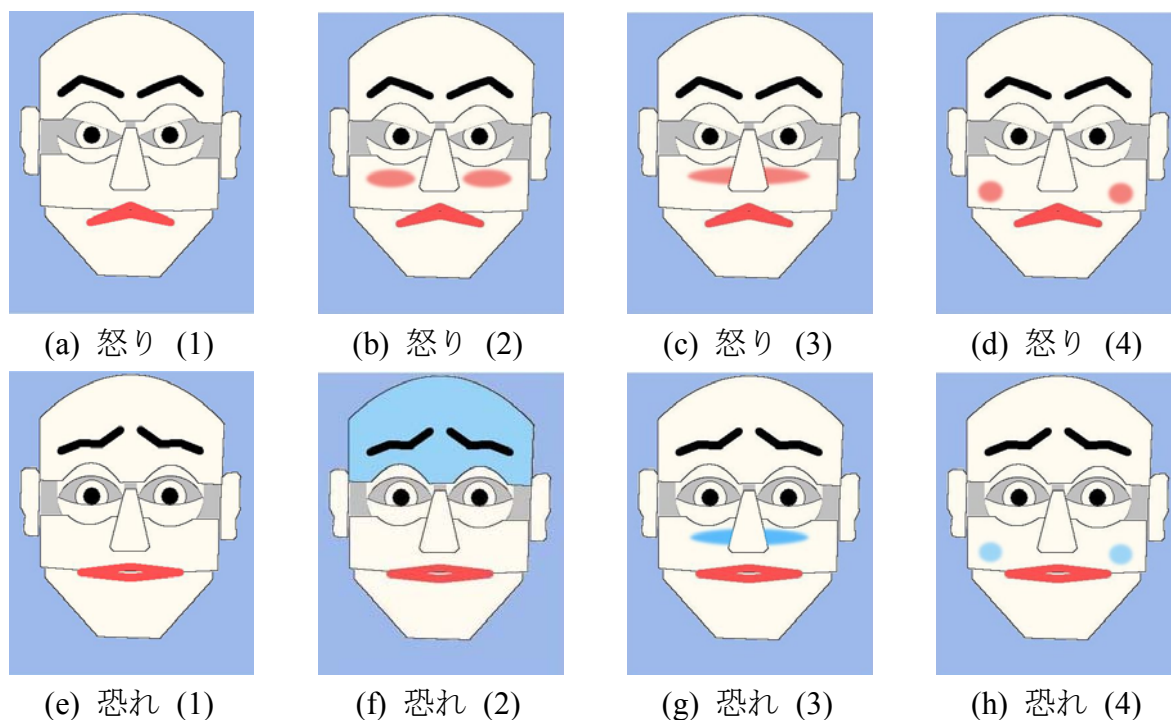


Fig. 2.39 Facial expression CGs with facial color

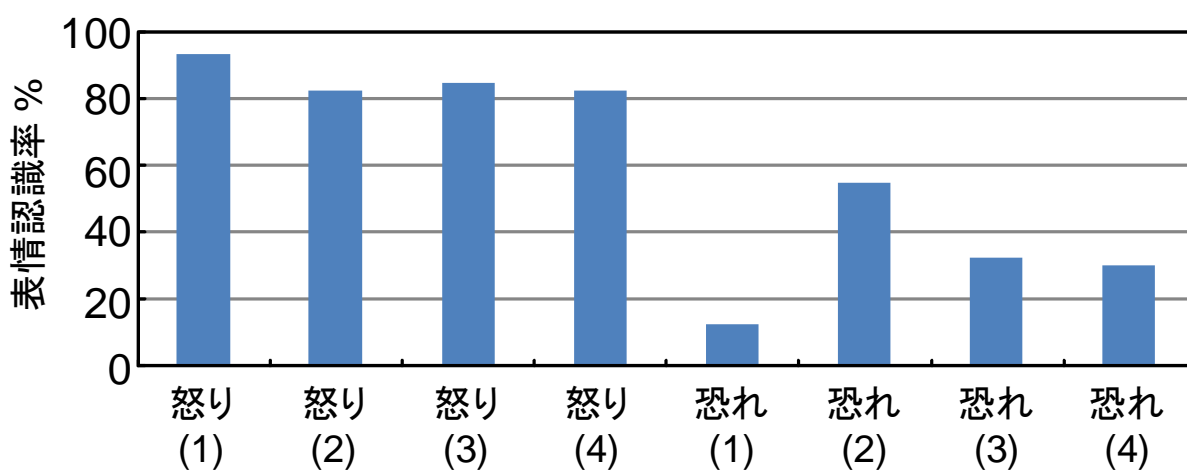


Fig. 2.40 Recognition rates of the facial expression CGs with facial color

まず、顔色の印象への影響調査の結果として、「怒り」の表情の表情認識率は、顔色の表現を付加しない Fig. 2.39(a) が 93.1%であったのに対し、赤色の顔色を鼻の周りに付加した Fig. 2.39 (b) が 82.1%, Fig. 2.39 (c) が 84.5%, WE-4RII と同様に頬の周りに顔色を付加した Fig. 2.39 (d) が 82.1%となった。このことから、「怒り」の表情については顔色の表現を付加しても認識率には大きく影響を与えないことが示唆された。これは、顔色を付加しない表情でもすでに表情認識率が十分高くなっている

ことで、表情認識率の上昇の余地がなかったため、顔色の表現を付加したことで感情が入り混じって見えてしまい、感情認識率の向上につながらなかったためではないかと考えられる。

また、「恐れ」の認識率は顔色の表現を付加しない Fig. 2. 39 (e) が 12.3%であったのに対し、青色の顔色を額全体に付加した Fig. 2. 39 (f) が 54.4%，鼻の周りに付加した Fig. 2. 39 (g) が 32.2%，WE-4RII と同様に頬の周りに顔色を付加した Fig. 2. 39 (h) が 29.8%となった。このことから、全体として「恐れ」の表情については青色の顔色の表現が有効であり、その中でも特に額全体を青色にした Fig. 2. 39 (f) の表現が特に認識率を向上させることが分かった。一方、(1)の実験において最も認識率が高かった Fig. 2. 41(a)の表情は今回の実験では感情認識率が 12.3%であり、Fig. 2. 41 (c)の表情が 23.1%の認識率を獲得したため、顔色を付加しない条件下においてより認識率が高い表情であることが分かった。したがって、KOBIAN-R で実現する表情としては Fig. 2. 41 (c) に Fig. 2. 41 (b) の顔色の表現を付加した Fig. 2. 41 (d) の表情が最も適切であると考えた。これらの結果から、KOBIAN-R においては十分効果が確認された青色の顔色を実機の額に搭載することとした。

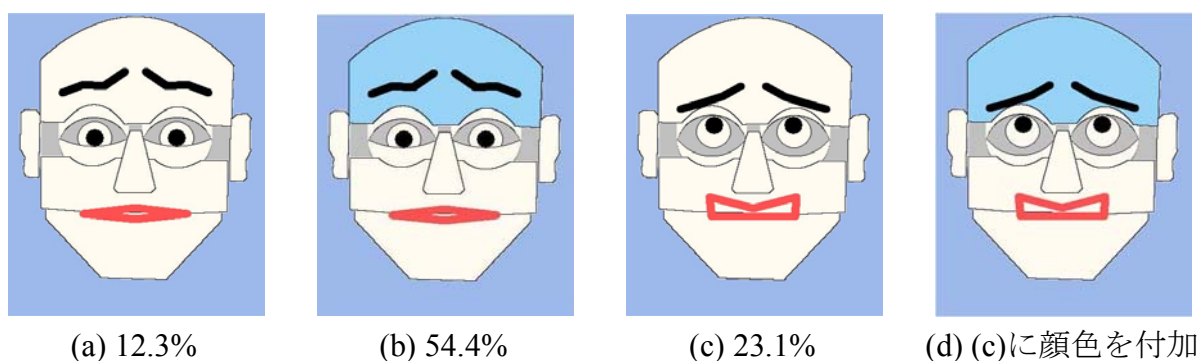


Fig. 2. 41 Fear expression with facial color

これらをまとめ、基本 6 感情すべてで最も高い認識率を得た表情の CG および認識率を Fig. 2. 42, Fig. 2. 43 に示す。この実験から、すべての感情において WE-4RII, KOBIAN を超える高い認識率を持つ表情を得られたといえる。

また、Table 2. 4 の自由度設定からは左右非対称の表情の作成が可能になっている。アマチュア漫画家の作成した CG の中には Fig. 2. 44 のように左右非対称の表情も含まれており、その中には Fig. 2. 44 (a) が「怒り」の認識率 98.2%を獲得し、最も認識率の高かった Fig. 2. 42 (a) も 100%であることからほぼ同等の表情認識率を得たものもあった。このように、左右非対称の表情にも高い表情認識率を得るものがあることが分かった。したがって、KOBIAN-R 頭部にも、左右非対称の自由度を設け、表出できる表情に幅を持たせることとした、

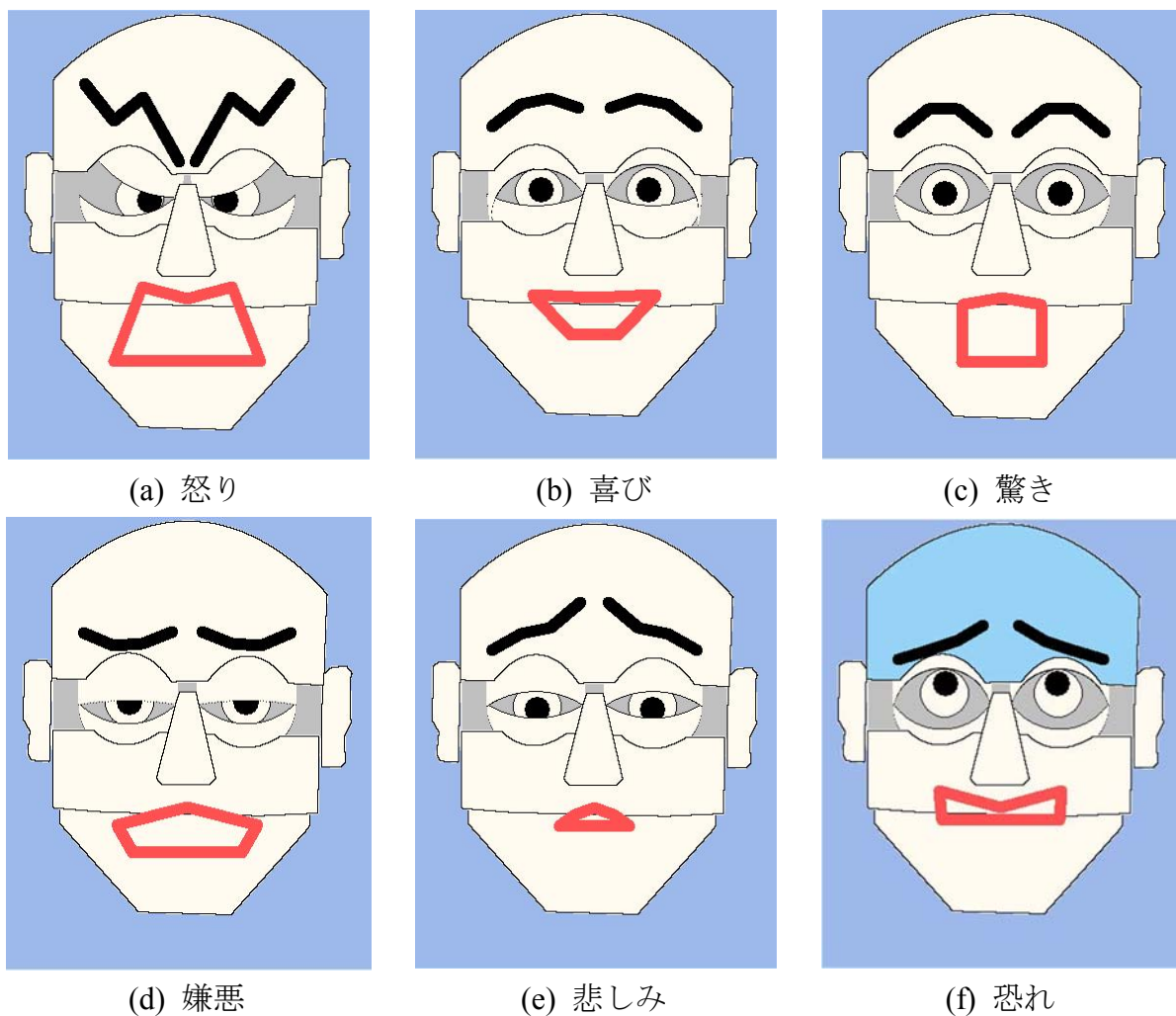


Fig. 2. 42 Cartoonists-made CGs with the highest recognition rates

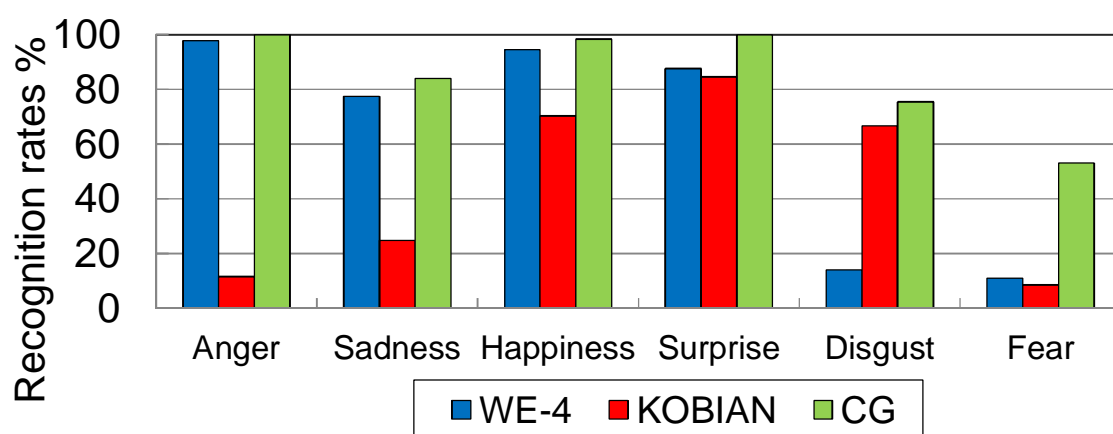


Fig. 2. 43 Comparison of the facial recognition rates among the CGs made by cartoonists, the pictures of WE-4, and the pictures of KOBIAN 表情との表情認識率の比較

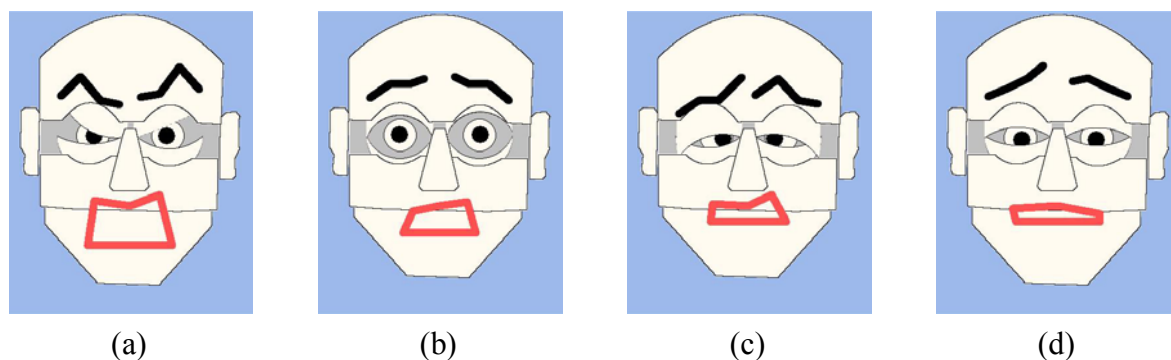


Fig. 2. 44 CGs of asymmetric facia expression

2.3.3 頭部ハードウェア構成

まず, Fig. 2. 42 に示された表情を全て実現する自由度配置を検討した. この際, 左右非対称な表情の実現も考慮に入れると, 頭部全体で Fig. 2. 45, Table 2. 5 に示す 24 自由度を必要とすることがわかった. KOBIAN において発生したオーバースペックなモータドライバを使用したことで頭部内のスペースが不足するという問題を解決するため, 2.3.4 にて説明する小型モータコントローラユニットを開発した. さらに, 自由度数が KOBIAN 頭部から大幅に増加したことにより, 各部の機構に小型集積化が求められた. したがって, 頭部の小型化のため, すべての部分が新規に設計された. 詳細を以下に示す.

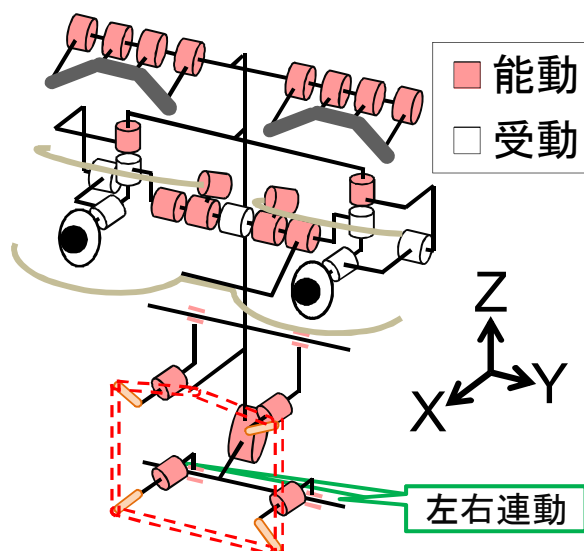


Fig. 2. 45 DoF configuration of KOBIAN-R head

Table 2. 5 KOBIAN-R 頭部の自由度構成 (LR は左右独立, Z は上下方向, Y は左右方向の自由度を表す)

部位	自由度	自由度方向
眼	3	Pitch, Yaw×LR
瞼	上瞼	Pitch×LR, Roll×LR
	下瞼	Pitch
眉	8	Z×4×LR
口唇	上唇	Y×LR, Roll×LR
	下唇	Y, Roll×LR
顎	1	Pitch
計	24	

(1) 眼

眼は KOBIAN 頭部と同様に, 左右共通の Pitch 軸 1 自由度, 左右独立の Yaw 軸 2 自由度の 3 自由度により構成される. 眼の機構を Fig. 2. 46 に示す. KOBIAN 頭部では, Pitch 軸上に Yaw 軸モータが配されることで Pitch 軸周りに大きなクリアランスを必要としていた. KOBIAN-R 頭部は搭載スペースの面からこのクリアランスを確保するのが難しかったため, Pitch 軸と Yaw 軸のモータ配置を独立させたジンバルによる機構を搭載した. このジンバル機構の小型化および可動角実現のために CMOS カメラの先端部の周りに摺動性に優れる PTFE のスリーブを被せ, この周りを金属部材が滑る構造とすることでベアリング代わりとなるようにした.

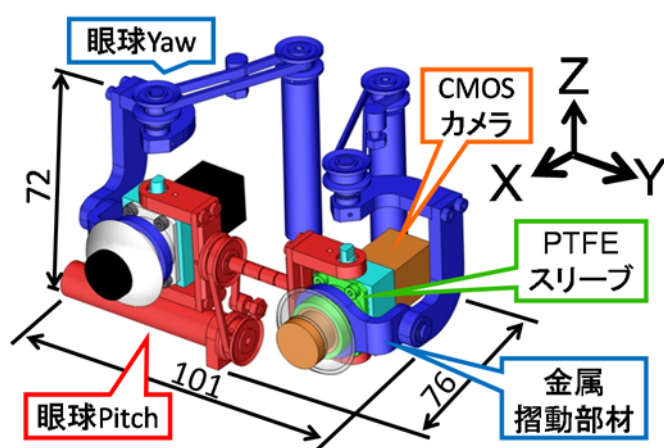


Fig. 2. 46 Mechanism of the eyes

(2) 眼瞼

眼瞼は、上瞼の左右独立の Pitch 軸と Roll 軸，下瞼の Pitch 軸の合計 5 軸により構成される。眼の機構のクリアランスを設けるためには、これらの自由度を限られたスペース内に配置するため、各 Pitch 軸はリンク機構により動力を伝達し、瞼周辺からモータを遠ざけることで機構の混雑を避けた (Fig. 2. 47)。また、Roll 軸は直動型超音波モータ TULA-70 (テクノハンズ製) により、ワイヤを駆動し、動力を上瞼に伝える機構により小型化を図った (Fig. 2. 48)。Roll 軸の可動角は Fig. 2.40 の表情をすべて実現できるように、右瞼を例とすると $+30[\text{deg}]$ 、 $-15[\text{deg}]$ とした。上瞼は動作条件によっては眼の Yaw 軸のリンクと干渉するため、人肌ゲル (エクシールコーポレーション製) を用いて成形した。

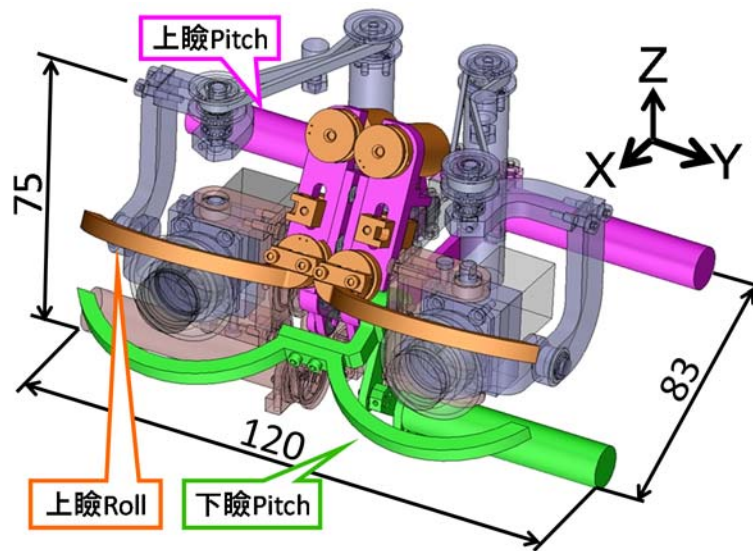


Fig. 2. 47 Mechanism of the eyelids

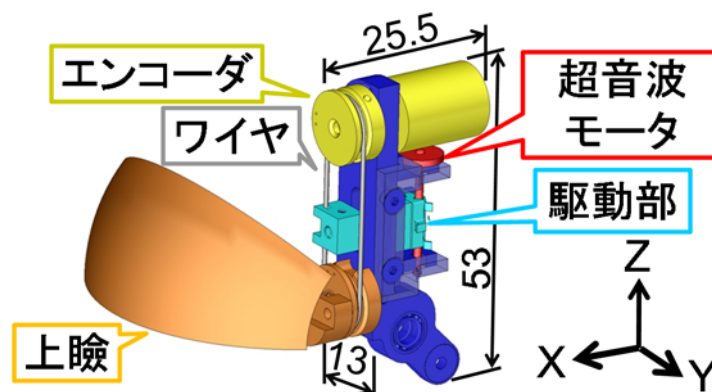


Fig. 2. 48 Mechanism of the upper eyelid

(3) 眉, 額

眉の制御点は眉の両端2点と中央部に均等に2点の合計4点がある. KOBIAN 頭部と同様, 眉に取り付けた磁石を外装の裏から間接的に駆動する方式を採用したが, 上瞼部に Roll 軸が追加されるため, 眉の機構は特に前後方向の寸法を抑える必要があり, KOBIAN 頭部のワイヤによって磁石の付いた移動部をスライドさせる駆動方式ではワイヤガイドの大きさのため自由度数分並べるのはスペースの都合上不可能だった. このため, Fig. 2. 49 のように前額外装裏側に金属薄板を取りつけたリンクを配し, このリンクをワイヤで駆動することで金属薄板の曲げを利用したプッシュプル動作を実現する機構とした.

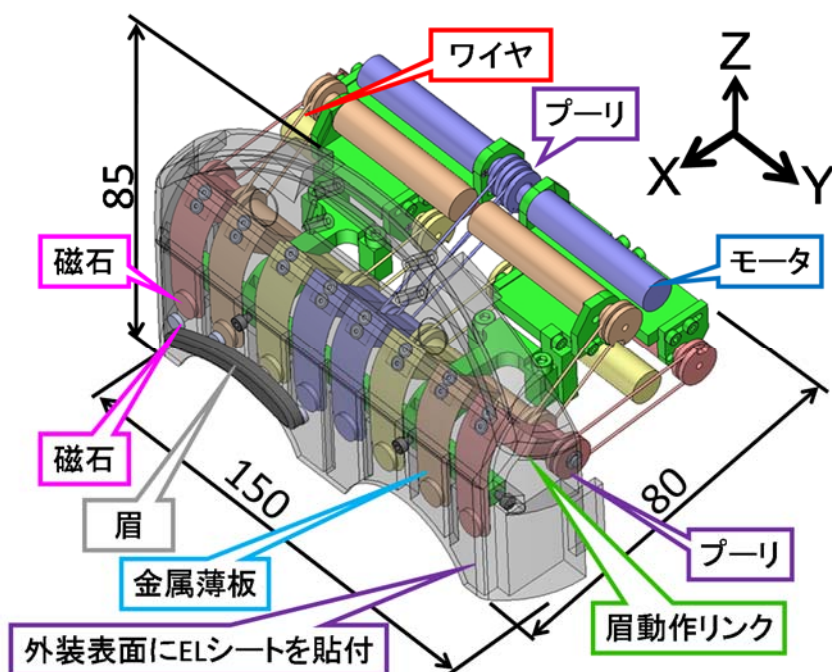


Fig. 2. 49 Mechanism of the eyebrow and the forehead

眉機構の1自由度分の詳細図を Fig. 2. 50 に示す. ワイヤにより動力を伝達し, 磁石の取り付けられた金属薄版が押したり引いたりされることで, 金属薄版を変形させながら磁石が上下に駆動される. これに外装表面の磁石が追従し, 眉の軟素材を変形させる仕組みとなっている. 額外装裏側に金属薄板の幅で突起を設けることによりレール状の構造とし, 左右方向へのずれを防ぐ構造とした. この機構により, KOBIAN-R 頭部は WE-4RII, KOBIAN と比較して眉は格段に広い可動域を得ることができるようになった (Fig. 2. 51). 眉は繰り返しの大変形に耐えるため軟素材セプトン (クラレ製) により成形され, 裏面に磁石が接着されている.

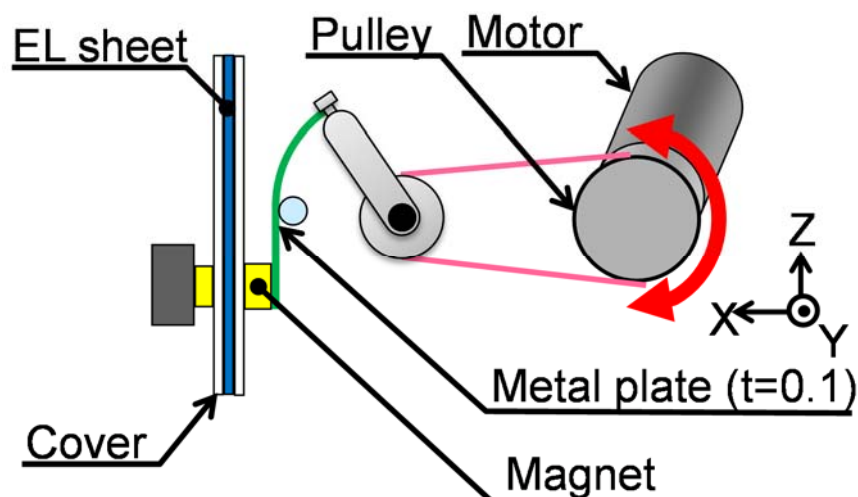


Fig. 2. 50 Driving mechanism of the eyebrow

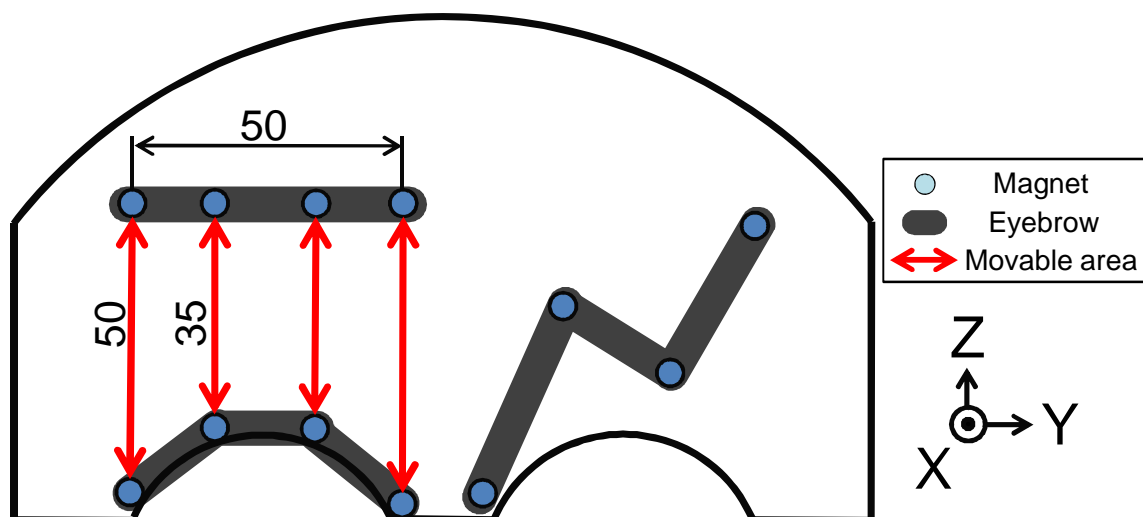


Fig. 2. 51 Movable range of the eyebrow

額は Fig. 2. 42(f)のように「恐れ」の表現の際青くなることが効果的である。また、額外装は、眉の駆動に磁石を用いるため、可能な限り薄くする必要があり、かつ全体を均一に青に変色させる必要があった。これらの条件を満たす青色発光の無機 EL シートを額外装の間に挟み込むことで、顔色の表現を可能にした。EL シート表面の外装には EL シートの原色である濃い青色を透けさせず、かつ発光時の光を可能な限り透過すること、眉を動作させる磁石の磁力を十分透過させること、顔色にむらが出ないため、均一な厚さであること、つなぎ目がないことが求められた。これらを実現するため、0.5[mm] 厚のプラ板をバキュームフォームにより変形させて外装を成形した。

(4) 口

口唇の機構には、要求表情の実現のため Fig. 2. 52 のように5つの方向に引っ張られて変形する機構を採用した。上唇の中央の1点は外装に固定され、その他の4つの点は上唇4自由度，下唇3自由度，顎1自由度を設けることで、それぞれ上下，左右方向に動かすことが可能である。また，人間と同様に顎の構造の中で下唇の動く範囲を持たせ，また顎全体を動かすことで自然な表情を実現できるようにした。

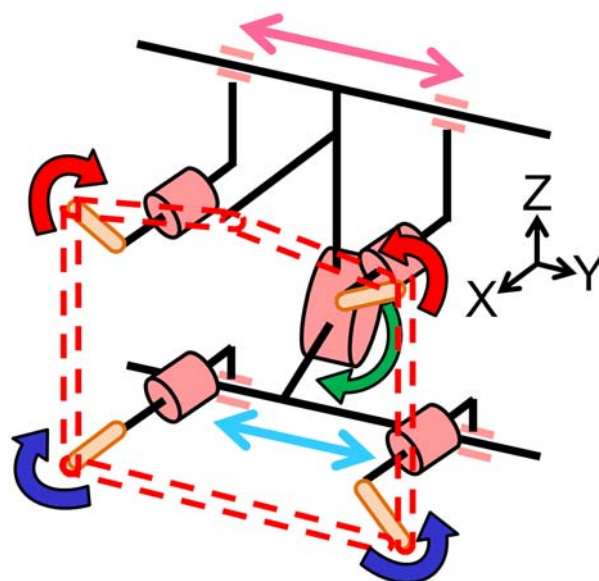


Fig. 2. 52 DoF configuration of the mouth

口唇は例えば上唇と下唇を左右でつなぐ部分では自然長である「通常」から最大変形時の「怒り」の感情への移行時に，自然長から4倍以上に大きく変形する必要がある。このため，口唇の素材および接合点にはこの繰り返し変形に耐えられることが求められた。KOBIAN 頭部の口唇は最大の変形でも自然長から1.5倍程度の変形であり，口唇素材にセプトンを用い，成形時にねじ頭を埋め込む構造により機構を実現していたが，同様の方法ではねじが口唇素材から抜けてしまうことありえたため，KOBIAN-R 頭部においては Fig. 2. 53 のようにスチールウールを円柱状にまとめ，ほぐした先をセプトンに埋め込んだまま成形し，ねじ頭を埋め込んだ場合と比べセプトンと接合部の接触面積を増加させることで口唇を大きく変形させても接合部が抜けにくい構造とした。さらに，セプトンの成形後にスチールウールを瞬間接着剤で固め，円柱状にして機構部のアームに取り付けた。

口唇および顎の機構を Fig. 2. 54 に示す。口唇の可動域は，Fig. 2. 55 のように WE-4，KOBIAN と比べ大きな増加を達成した。

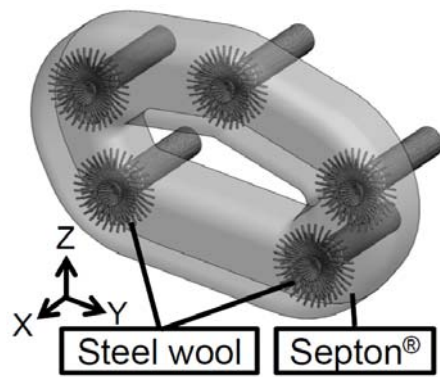


Fig. 2. 53 Mechanical connection of the lip

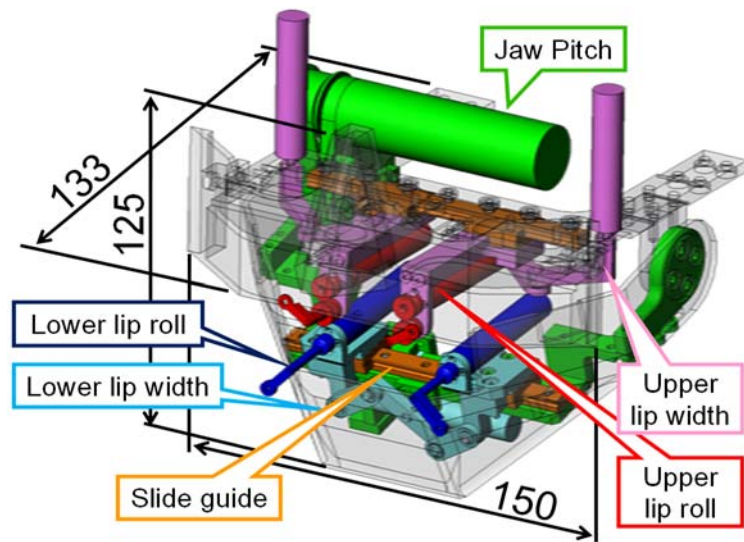


Fig. 2. 54 Mechanism of the lip and the jaw

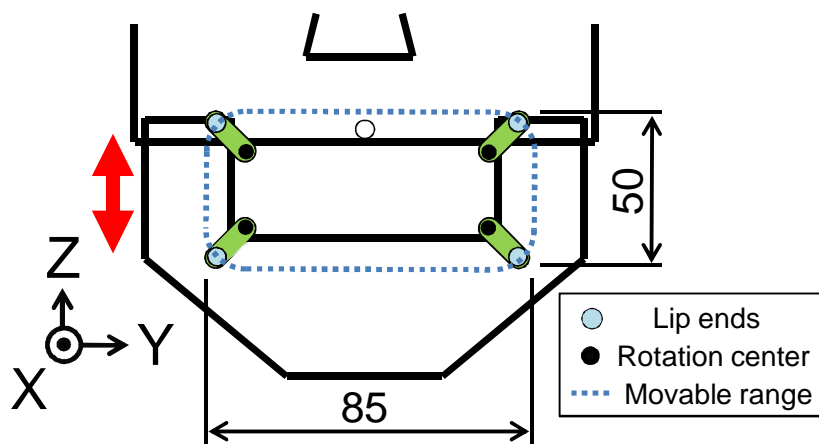


Fig. 2. 55 Mavable range of the mouth

(5) 頭部

頭部全体の機構を Fig. 2. 56 に、外装を含めた全体像を Fig. 2. 57 に示す。外装を含めた頭部の外形寸法は成人女性の平均頭部寸法内に収まり、重量も KOBIAN 頭部の 2.4[kg] に比べ 1.7[kg] と軽量化を果たした。寸法、重量の削減は 2.3.4 にて述べるモータコントローラユニットを用いることにより達成された。

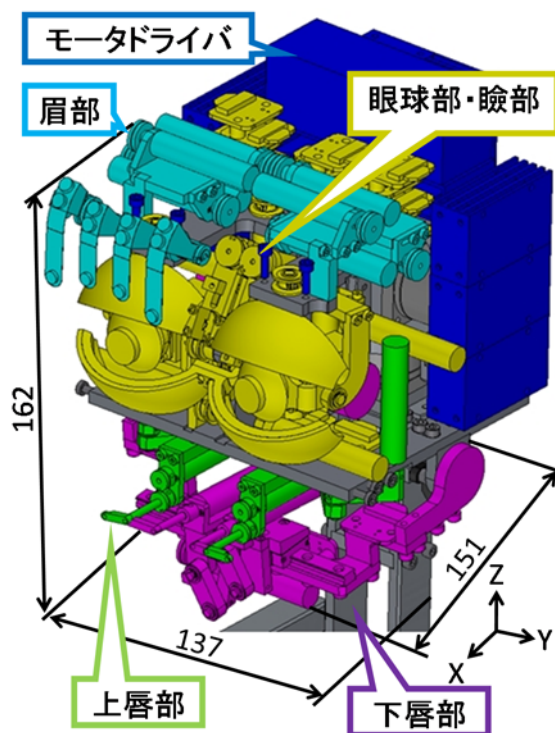


Fig. 2. 56 CAD drawing of the mechanism of KOBIAN-R head

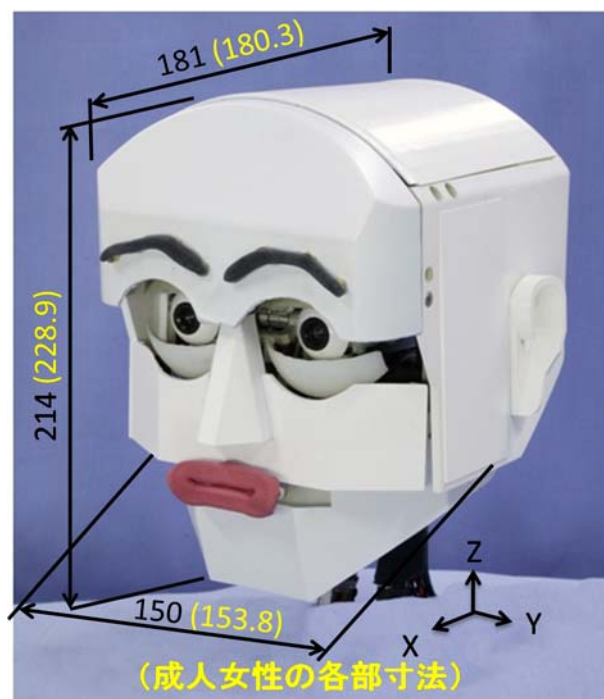


Fig. 2. 57 Overview of KOBIAN-R head

2.3.4 制御システム構成

ここでは、KOBIAN-R における頭部の自由度の増加のために対応するための制御システムの改良について説明する。

具体的には、超小型モータコントローラユニットを開発し、頭部の 24 自由度および顔色の制御、触覚・嗅覚センサの処理を、このモータコントローラユニット 7 個により行う構成とした。

(1) 開発コンセプトと要求仕様

KOBIAN の制御システムは 1 台の制御 PC によって全身のモータの制御やセンサ処理を行う集中制御システムであった。そのため、各部にあるすべてのモータやセンサを制御 PC に接続する必要があるため、新たなモータなどの要素を追加する際に配線を考慮しなすなければならなかった。また、制御 PC の I/O の数が制約となるため拡張性が低いという問題点があった。これに対して分散制御システムでは、モータやセンサを部分ごとに搭載した制御装置によって制御し、この複数の制御装置が協調し全身を制御する。これにより末端のモータから制御 PC まで信号線を配線する必要はなく、I/O や A/D も容易に増減できるため拡張性も向上する。

ヒューマノイドロボットに向けたモータドライバとしては、伊東らによる小型大出力モータドライバ[86]や松井らによるDASH-4プロセッサモジュール[87]などがある。などがある。これらは、シリアル通信などによる通信でモータドライバに指令を行う制御ボードと、その指令によりモータを駆動するモータドライバにより構成されるシステムであるが、モータドライバ自身も通信を行うため、新たなモータドライバを開発する際に通信のためのコンポーネントを搭載する必要がある。より拡張性を高めるために、新規開発箇所を低減できるようにモジュール化されたシステムが求められる。

新たにモータコントローラの開発コンセプトは次の通りである。

- 制御モジュールと追加機能モジュールにより構成
- DC モータの電流・速度・位置制御が可能
- 複数のモータ制御およびアナログ信号処理が可能
- ロボット各部に収められるサイズ

分散制御システムであれば、例えばモータコントローラそのものを変更することにより、種類の異なるモータを制御することができる。しかし、ヒューマノイドロボットのように、種類や定格出力などが異なる様々なモータを搭載している場合、それぞれに合わせて多様なモータコントローラを開発するか、もしくは様々なモータに対応できる汎用性の高いモータコントローラを開発する必要がある。しかし後者の場合、汎用性が高い分サイズは大きくなる。2足ヒューマノイドロボットにおいてはその構成部品をすべてボディ内に搭載する必要があるため、サイズは大きな問題となる。よって様々なモータに合わせたモータコントローラを開発する必要があるが、それをすべて一から開発していたのでは開発効率が悪い。そこで、モータ制御や信号処理など様々な使用できる制御モジュールと、モータドライバなどの追加機能モジュールに分

けることで、異なるモータを使用する場合にもモータドライバのみを開発すればよくなり、開発効率を向上させることができる。

制御モジュールと追加機能モジュールが通信インタフェースにより接続されるシステムでは、モジュールごとに独立させることはできるが、各モジュールに通信用のドライバなどが必要となる。新規開発する際の開発要素を低減するため、各モジュールは通信インタフェースを用いずに直接接続するものとする。また、モジュールをスタックしたもののサイズを抑えるためには、各モジュールのサイズを合わせて小さくする必要がある。そこで、制御モジュールの両面に基板間コネクタを配し、両面に追加機能モジュールをそれぞれスタックできる構造とすることにより、追加機能モジュールを小さくできる。

当然、このモータコントローラは情動表出のための24自由度、無機ELシートによる顔色表出、触覚・嗅覚のための合計21[ch]のアナログ信号出力センサを有するKOBIAN-R 頭部へ搭載するため、要求仕様を以下のように決定した。KOBIAN-R 頭部は人間頭部と同程度の大きさであるため、小型でなければ搭載できない。

- 1つのモータコントローラユニットで小型DCモータを4自由度制御および4[ch]アナログ信号処理
- モータ定格電流0.3[A]
- 60×30×20[mm]以内のサイズ

(2) モータコントローラユニットの構成

モータコントローラユニットは1つの制御モジュールと1つないし2つのモータドライバモジュールより構成される。

(i) 制御モジュール

分散制御を実現するため、制御PCとモータコントローラユニットによるマスタ・スレーブ方式で通信を行う。各モータコントローラはモータの電流・速度・位置制御およびA/Dコンバータによるアナログセンサ情報取得を担い、それらと通信し全体としての動作を生成する役割を制御PCが担うシステムとした。各モータコントローラを制御PCとスター型などに接続すると通信線が多くなるため、ライン型接続を採用した。そこで通信インタフェースには、差動通信であるためノイズに強いRS-485を用いた。

制御モジュール (Fig. 2. 58) の制御装置には, 1 チップでエンコーダカウンタや A/D コンバータなど多くの機能を備えることと扱いやすさを考慮して, ST マイクロエレクトロニクス社の ARM マイコン STM32F103VG を用いた. また, これに加えて RS-485 のトランシーバ IC などを搭載した.

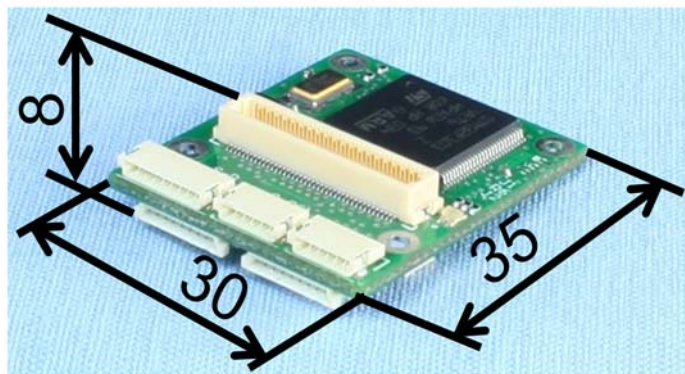


Fig. 2. 58 Controller module

(ii) モータドライバモジュール

この制御モジュールに組み合わせるモータドライバモジュール (Fig. 2. 59) を製作した. ST マイクロエレクトロニクス社のモータドライバ IC である L6227Q や, モータ駆動電流を計測するための電流センサおよびエンコーダ用ラインレシーバ, インクリメンタル型エンコーダの原点復帰に用いるフォトセンサ用のコネクタを搭載しており, PWM 制御により 1 モジュールあたり 2 つのアクチュエータを制御することができる.

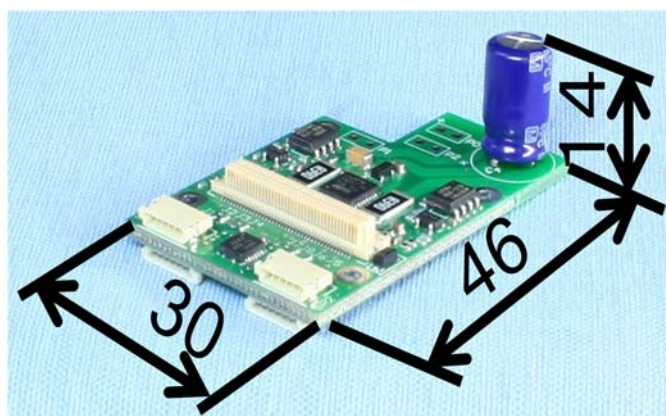


Fig. 2. 59 Motor driver module

(3) モータコントローラユニット

制御モジュールにこのモータドライバモジュール2枚を組み合わせることで、小型DCモータ4軸制御および8[ch]のアナログ信号処理が可能なモータコントローラユニット (Fig. 2. 60) となる. 内部システム構成を Fig. 2. 61 に、仕様を Table 2. 6 に示す. KOBIAN-R 頭部における各種センサの配置を Fig. 2. 62 に示す.

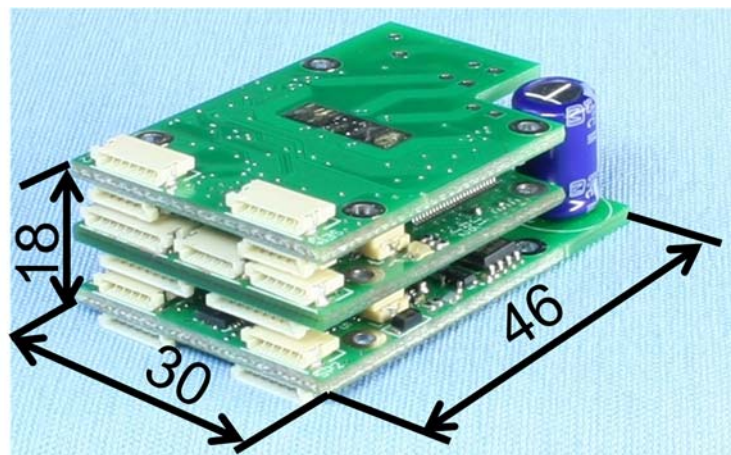


Fig. 2. 60 Motor controller unit

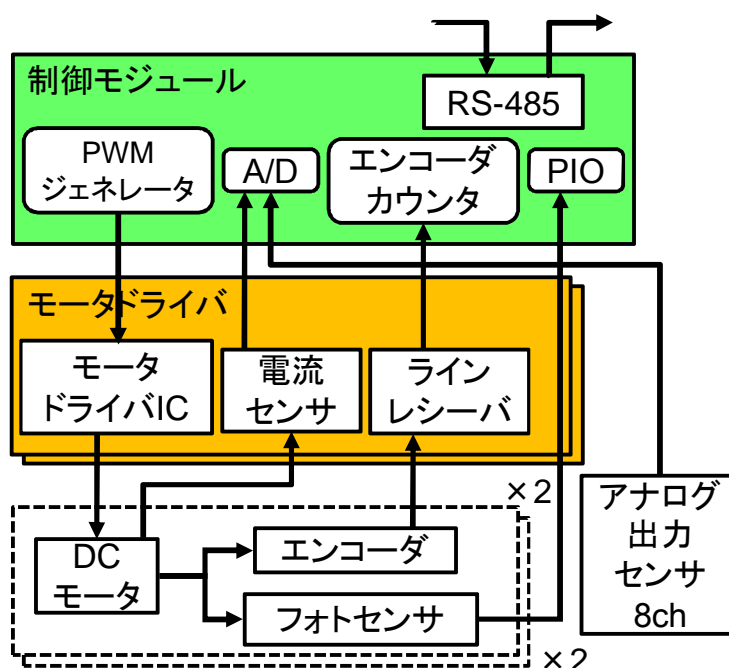
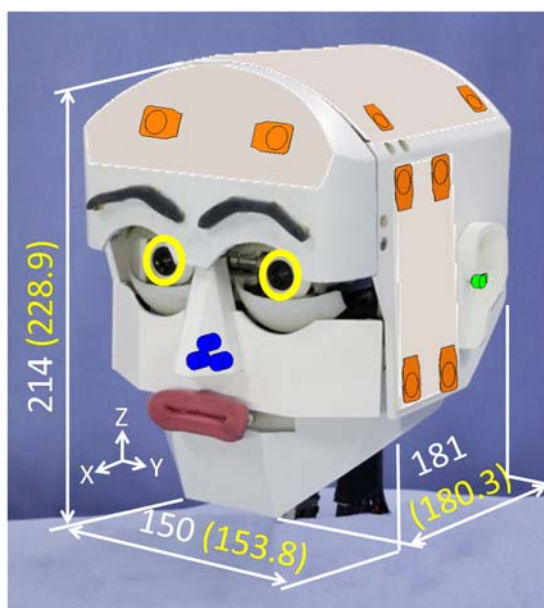


Fig. 2. 61 Control system configuration of the motor controller unit

Table 2. 6 Specification of the motor controller

項目	諸元
制御周期	72 [MHz]
制御自由度数	4
駆動定格電圧	8~52 [V]
センサ処理	フォトセンサ・エンコーダ 4 [ch] 電流センサ 4 [ch] A/Dコンバータ 8 [ch]
モータ制御	電流・速度・位置制御
モータ保護	電流リミット・停止スイッチ
通信インタフェース	RS-485 (全二重, 半二重)
外形寸法	46×30×18 [mm]
重量	20 [g]



- : Camera ●: Tactile sensor
- : Microphone ●: Olfactory sensor

Fig. 2. 62 Sensors in KOBIAN-R head

(3) 全体の制御システム構成

KOBIAN-R 全体の制御システム構成を Fig. 2. 63 に示す. 基本的には, KOBIAN の集中制御システムに, 上述のモータコントローラによる分散制御システムが追加され

た形となっている。

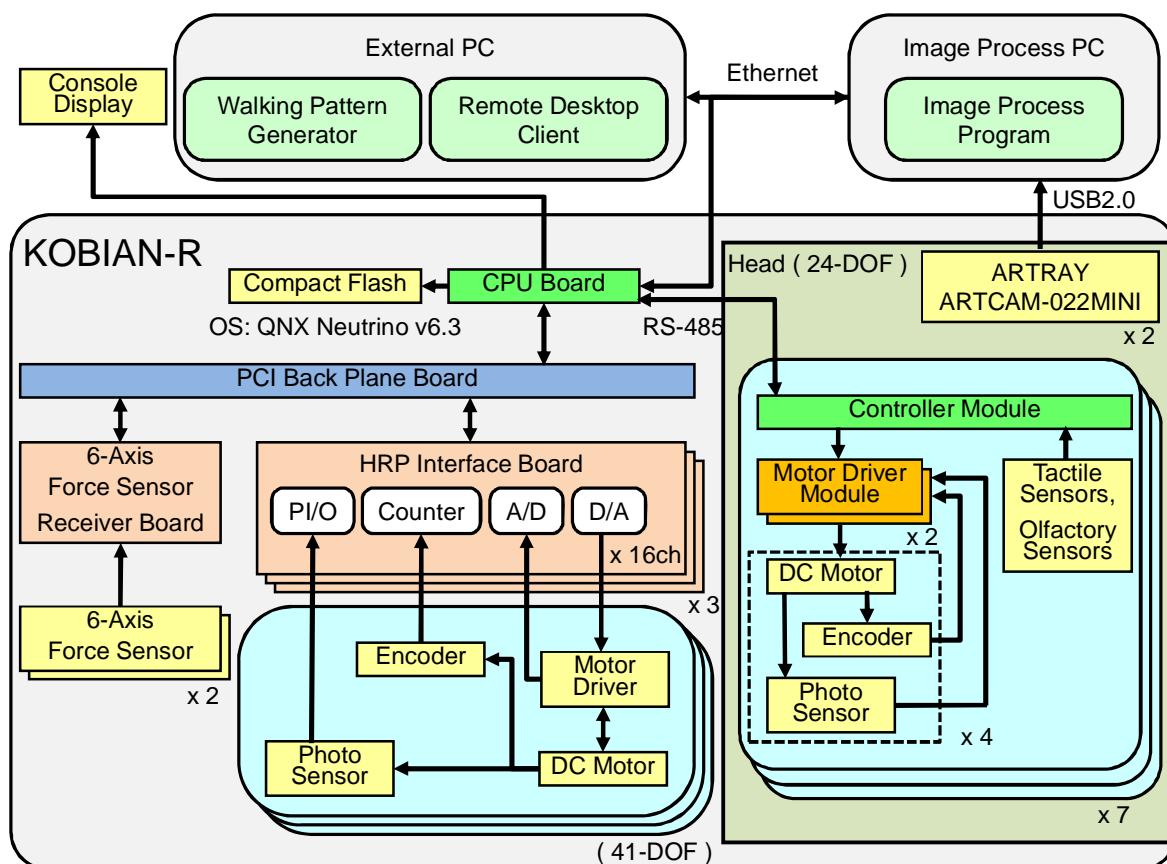


Fig. 2. 63 Control system configuration of KOBIAN-R

2.3.5 制御プログラム構成

KOBIANは全関節が制御PCにて集中制御されるホモジニアス（等質）な構成だったが、KOBIAN-Rは部分的に分散制御されるヘテロジニアス（異種混合）な構成である。このようなJointレイヤの大幅な構成の変更に対して、上位レイヤが受ける影響が最小限になるように全体の制御プログラムを開発したことは、2.2.5にて述べた。ここでは分散制御のためのプログラムモジュールの開発について述べる。

(1) 集中制御と分散制御の違い

まず、集中制御と分散制御のプログラミングの観点からの違いについて述べる。

KOBIANの集中制御の最大の特徴は、2.2.4で示したように、PCIインタフェイスのI/Oデバイスを用いていることである。PCIデバイスはCPUのI/Oポートにマッピング

グされ、その I/O 命令の実行時間は出力で 1[μ s]以下、入力で 1~2[μ s]である。よって、1つの関節の位置制御(エンコーダカウント読み取りとモータドライバへの D/A 出力)に要する時間は高々 5[μ s]となる。これを 48 自由度分行うとして合計約 250[μ s]であり、その他の計算処理を含めても、全関節を 1[ms]で制御することができている。この 1[ms]という値は、他のロボット・システムと比べて比較的高速であり、これ以上の速い周期が必要になるケースはあまり無いと考えられる。制御周期に対し関節制御の I/O 時間が比較的短いということは、プログラミングにおいて制御スレッドから呼び出される各関節の制御メソッドの所要時間、即ちスレッドが呼び出しメソッドにコントロールを奪われる時間を気にする必要が少なく、ということである。このことは、下位(関節制御)のモジュール設計が上位(運動軌道制御)の要求仕様(制御周期および軌道更新周期)をあまり気にしなくて良いということであり、上位の制御周期がせいぜい 1~10[ms]というオーダであれば、下位モジュールを比較的自由に呼び出し得る(呼び出す側が厳密なプログラミング制約を下位モジュールから課せられない)。

一方で、KOBIAN-R にて部分的に導入された分散制御は、シリアル通信 RS-485 を用いている。転送速度は CPU ボードに搭載されたシリアル通信コントローラチップの仕様により最大 115,200[bps]となっている。関節制御に要する時間は通信プロトコルに多少依存する。プログラミングと将来の拡張性の観点から、イベント駆動型の通信プロトコルを用いるとして、1 パケットに要する最小の情報量をバイト単位で試算すると、宛先コントローラ識別、パケット長、パケット種別、パラメータ (3[byte])、CRC (16[bit]) として合計 8[byte]となる(ある 1つのコントローラ上の 1つのモータに位置制御目標値を与えるメッセージを想定)。1[byte]あたりにスタートビットとストップビットが付加されるので、8[byte]は 80[bit]となる。よって、このパケットの送信に要する時間は 0.69[ms]となる。集中制御が 5[μ s]であるのに対し非常に長い。さらに KOBIAN-R 頭部の全 24 自由度それぞれに対してこのパケット送信を行うことを想定すると 17[ms]かかることになり、制御周期 1[ms]に収まりきらない。実際には位置制御目標値送信だけではなく(制御周期と異なる周期で良いだろうが)コントローラやモータ、接続されているセンサなどの状態の受信も必要であろうから、この通信所要時間はより長くなる。このように、制御に要する時間が長くなると、これらを実現する下位モジュールのメソッドを上位から呼び出すのに細心の注意が要る。何故ならばそのメソッドを実行するのに相当な時間を要する、つまり、呼び出しスレッドのコントロールが長いあいだ通信に奪われてしまうからだ。それだけでなく、全自由度の制御に要する時間が制御周期 1[ms]を超えているので、これまでの集中制御構成のための制御スレッドには容易に組み込めない。

ここまでに述べた KOBIAN, KOBIAN-R における集中制御と分散制御の比較を

Table 2. 7に示す。以降、KOBIAN-R 分散制御の設計方針や通信プロトコルを概説しながら、上述の問題にどのように対処しているかを述べる。

Table 2. 7 Comparison between centralized control and distributed control

	集中制御 (KOBIAN, 48 自由度)	分散制御 (KOBIAN-R 頭部, 24 自由度)
I/O インタフェイス	PCI	RS-485
転送速度	133 [Mbps]	115.2 [kbps]
1 自由度の位置制御に要する入出力	入力・出力	出力
1 自由度の位置制御に要する時間	5 [μ s]	0.69 [ms]
担当自由度の位置制御に要する時間	250 [μ s]	17 [ms]
関節制御モジュールの呼び出し制約	緩い	厳しい

(2) 分散制御の設計方針

前節 2.2.5 項にて述べたように、KOBIAN の制御プログラムは、開発性や拡張性、メンテナンス性を重視して、多くのモジュールや実構成を **configurable** にしている。しかし、そもそものハードウェアが 1 ロボットの中で固定化されているのであれば、このメリットは短期的には享受できない。この固定化は集中制御を採用していることに起因する（逆に、KOBIAN を製作した当初はその開発時間の短縮のために、WABIAN-2 と同じ集中制御で良しとした、と言える）。

分散制御を採用するのは、将来のハードウェア改良の難易度を下げるためである。2.3.3 で述べたように KOBIAN-R の頭部構成は、その目的を達成するための実証実験をベースに決定されているが、ロボットの研究開発においては継続的な機能・性能向上が求められるので、今後さらに構成の変更や機能の拡張などが要求されることは想像に難くない。集中制御方式ではそれらの度に再配線や I/O の再割付が必要となり、これらに要するコスト（時間と労力と金銭）がかなり高いが、分散制御方式を採用することでこれらのコストを大いに低減できる。

分散制御方式がハードウェア構成の **configurability** 向上に寄与するのであれば、それを動かす制御プログラムや通信プロトコルも十分な **configurability** を持たなければ片手落ちである。この観点に基づき KOBIAN-R の分散制御システム（モータコントローラおよびその制御プログラムモジュールに構成されるシステム）を VAJRA (VARIABLE/VARIOUS JOINT SYSTEM FOR ROBOT APPLICATION) と名付けた。2.2.5(1)の制御プロ

グラムのレイヤーアーキテクチャ (Fig. 2. 27) において, VAJRA は Joint, Component, I/O レイヤーに相当する. よって, 制御プログラムに容易に組み込めるよう, それぞれのレイヤーにおける機能仕様を定めたクラス (RevoluteJoint や DCMotor, Encoder, ADBoard など) をそれぞれ継承した代理クラスが, VAJRA のプログラムモジュール群には存在する. 以降, 通信の文脈でモータコントローラユニットを指す場合は, VAJRA ノードと呼ぶ.

(3) 制御モード

VAJRA モータコントローラユニットによって可能な DC モータ制御については前節において述べた. ただ, KOBAN-R 頭部には DC モータ以外による表出機構が存在する. 上脛 Roll の超音波アクチュエータと額の無機 EL シートである. これらは実は PWM により駆動させることができる (無機 EL シートはインバータに PWM を印加し, そのデューティにより発光量を調節できる). よって, これらのデバイスも同じモータコントローラ・モータドライバにて制御される. このモータコントローラにおける制御モードを Table 2. 8 に示す. これらはモータ (ないしは各出力デバイス) 毎に設定可能である.

Table 2. 8 Control mode of VAJRA motor controller

制御モード	説明
セットアップ	初期値. 何もしない
スタンバイ	ゼロ速度指令 (PWM デューティがゼロ)
シャットダウン	終了
PWM 制御	PWM デューティを制御
電流制御	電流を制御
速度制御	速度を制御 (速度はエンコーダにより計測)
位置制御	位置を制御
PTP 制御	事前に設定された周期で Point-To-Point 制御
超音波モータ位置制御	PWM デューティで速度を操作し, エンコーダで位置計測

(4) 通信プロトコル

通信インタフェースである RS-485 は物理層の電氣的接続の仕様のみを定めたもの

であり、その上位のプロトコルは開発者に任されている。通信プロトコルは一般に、イベント駆動方式とタイムトリガ方式に大別される。イベント駆動方式の場合、ネットワーク上のあるノードが通信を必要になったタイミングで通信が開始される。タイムトリガ方式の場合、ネットワーク上の全てのノードが一定周期のタイミング信号を共有し、そのタイミング信号に同期してそれぞれのノードがパケットを送信する。

KOBIAN-R は基本的に動作し続ける機械であり、前節で述べたように下位の関節制御はある制御周期で処理が繰り返されることによって実現されているが、これは制御 PC で関節の位置制御を行うという構成に因るものである。よって、本来的にはタイムトリガ方式の通信プロトコルの方が親和性が良いと考えられる。しかし、KOBIAN-R の分散制御ネットワークにおいては各ノード（制御 PC と各 VAJRA ノード）それぞれが自律的に送信する必要はなく、制御 PC が各 VAJRA ノードへの指令を行うため通信路の使用権をコントロールするマスタノードであればよいので、タイムトリガ方式を用いる利点は少ない。また、制御 PC がマスタノードであることは、通信タイミングを制御 PC にてコントロールすることができ、イベント駆動方式を用いても周期的通信を実現できるということである。さらに、タイムトリガ方式は実装が難しく、イベント駆動方式と比較して上位のモジュールに課す制約が厳しい。モータコントローラユニット自体は KOBIAN-R 以外にも様々な応用が考えられるので、利用制約の少ないイベント駆動方式の方がモジュール性が高く、有利である。これらの理由により、通信プロトコルにはイベント駆動方式を採用した。

通信単位はパケット方式とした。RS-485 の全二重マルチドロップ接続としており、KOBIAN-R ではマスタノードである制御 PC が各 VAJRA ノードへ指令を行う一対多の論理ネットワークとなる。マスタノードが送信ラインにパケットを送信し、予め固有の ID が割り当てられている各 VAJRA ノードはその送信先 ID (1 バイト目) を読み、自分宛のものであるかを判断する。自分宛のものである場合は指令種別を読み、マスタノードに返信するもの（要返信パケット）であれば、（マスタノードから見た）受信ラインに返信パケットを送信する。マスタノード受信時は、マスタノードは送信元 ID (1 バイト目) を読み、それが直前に送った要返信パケットの送信先 ID と一致しているかをチェックする。もし、それが異なっていたり、所定のタイムアウト時間を過ぎても返信パケットが来なかったり、パケットサイズや指令種別が不正であったり、CRC が不正であったりするときは、何らかの異常が起きているものと判断し、パケットの再送を行う。このように、マスタノードがその送信・受信ラインの双方を実質的にコントロールする。以降、「送信」・「受信」はマスタノードから見た通信方向とする。

通信パケットの仕様を Table 2.9 に示す。送信・受信時で同じ仕様である。対象 ID

は、マスタノード送信時は送信先の VAJRA ノードの ID，マスタノード受信時は送信元の VAJRA ノードの ID である。返信不要パケットのときのみ，全 VAJRA ノード宛を意味するブロードキャスト ID (255) が使用できる。サイズは指令種別以降のサイズであり，パケットの全体サイズから 2 を差し引いたものである。指令種別は後述する。パラメータは不定サイズであり，指令種別によってはゼロサイズもあり得る。最後の 2 バイトはパケットの誤り検出チェックサムであり，対象 ID からパラメータまでのバイト列を用いて計算される。

Table 2. 9 Packet specification

名称	サイズ	説明
対象 ID	1 [byte]	送信先 VAJRA ノード ID もしくは送信元 VAJRA ノード ID
サイズ	1 [byte]	指令種別以降のパケットサイズ
指令種別	1 [byte]	指令種別
パラメータ	指令種別に依存	指令種別固有の送信・受信パラメータ
CRC	2 [byte]	巡回冗長検査による誤り検出チェックサム

指令種別は VAJRA ノードが何をしなければならないかを定めたものである。主に使われる指令種別を Table 2. 10 に示す。指令種別には固有のパラメータがあり，送信時と受信時によってこのパラメータ内容は異なる。また，それぞれの指令種別毎に，送信パケットに対し要返信か返信不要かが決まっている。

READ_MEMORY 指令は，VAJRA ノードの公開メモリとしてマップされた実メモリの内容を読む。これには VAJRA ノード ID や A/D 変換器各チャンネルの値，モータの制御パラメータなどが 2[byte]で格納されている。WRITE_MEMORY 指令は，この公開メモリのうち書込可能なものの内容を書き換える。各種制御パラメータ（モータの制御ゲインや可動範囲，PTP 制御におけるサイクルなど）の変更はこれによって行われる。各制御モードにおける制御値（角度，角速度など）についてはそれぞれ専用の実測値読込指令と目標値書込み指令を用意している。

Table 2.10 分散制御の指令種別

指令種別	返信の有無	送信パラメータ		返信パラメータ		説明
		内容	サイズ	内容	サイズ	
READ_MEMORY	要返信	メモリアドレス	2 [byte]	メモリ内容	2 [byte]	メモリ内容を読む
READ_CURRENT_POSITION	要返信	モータ番号	1 [byte]	モータ角度	2 [byte]	1つのモータの実測角度を読む
READ_CURRENT_POSITION_ALL	要返信	無し	-	全モータ角度	2 [byte]×4	全モータ (4つ) の実測角度を読む
READ_CURRENT_VELOCITY	要返信	モータ番号	1 [byte]	モータ角速度	2 [byte]	1つのモータの実測角速度を読む
READ_ADC	要返信	無し	-	全 A/D 値	1 [byte]×8	全ての A/D チャンネル (8[ch]) の値を読む。 解像度は 8[bit]
WRITE_MEMORY	返信不要	メモリアドレス +メモリ内容	2+2 [byte]	-	-	メモリに書き込む
SET_CONTROL_MODE	返信不要	制御モード+ 対象モータ (複数)	1+1 [byte]	-	-	制御モードを設定する
SET_CURRENT_POSITION_AS_ZERO	要返信	モータ番号	1 [byte]	成否	1 [byte]	1つのモータの角度をゼロにオフセットする
SET_PWM_FREQUENCY	返信不要	タイマ番号+ PWM 周波数	1+2 [byte]	-	-	PWM 用タイマの周波数を設定する
SET_VELOCITY_REFERENCE	返信不要	モータ番号+ 角速度	1+2 [byte]	-	-	1つのモータの目標角速度を設定する (速度制御モード時)
SET_PWM_REFERENCE	返信不要	モータ番号+ PWM デューティ	1+2 [byte]	-	-	1つのモータの目標 PWM デューティを設定する (PWM 制御モード時, 単位は千分率)
SET_POSITION_REFERENCE	返信不要	モータ番号+ 角度	1+2 [byte]	-	-	1つのモータの目標角度を設定する (位置制御モード時)
SET_BROADCAST_POSITION_REFERENCE	返信不要	全モータの角度	2×n [byte]	-	-	全 VAIRA ノードの全モータの目標角度を設定する (位置制御モード時)

さて、(1)において分散制御の通信における所要時間を試算したが、このときの試算の前提は、各自由度当たりの所要時間を自由度数分けたものが全自由度の所要時間になる、というものであった。例えば READ_CURRENT_POSITION 指令について、送信パケットは、指令種別と送信パラメータ合わせて 2[byte]、総サイズ 6[byte]である。これに対する返信パケットは、指令種別と返信パラメータ合わせて 3[byte]、総サイズ 7[byte]である。送信と返信を合わせると 5[byte]に対し総サイズ 13[byte]となる。4 自由度分を考えると、16[byte]に対し総サイズ 52[byte]。オーバーヘッドが 1.6 あり、個々の自由度に対して個々に通信を行うのは効率が悪くなる。1 つの VAJRA ノードは複数の自由度を持っているので、4 自由度の実測角度をまとめて読み込む指令として READ_CURRENT_POSITION_ALL 指令を用意している。この場合の送信パケットは、指令種別と送信パラメータで 1[byte]、総サイズ 5[byte]、返信パケットは、指令種別と受信パラメータで 9[byte]、総サイズ 13[byte]である。送信と返信を合わせると 10[byte]に対して総サイズ 18[byte]となり、オーバーヘッドは 0.8 倍である。また、通信の総量は 52[byte]から 18[byte]と、約 35%に減っている (Table 2. 11)。時間に直すと、115,200[bps]においては 4.51[ms]が 1.56[ms]に減少した、ということである。

Table 2. 11 Comparison of the packet size between instructions for reading measured angles

条件	送信パケット		返信パケット		送受信パケット		オーバーヘッド
	指令種別+パラメータ	合計	指令種別+パラメータ	合計	指令種別+パラメータ	合計	
1 自由度毎	2	6	3	7	5	13	1.6
1 自由度毎×4	8	24	12	28	20	52	1.6
4 自由度まとめて	1	5	9	13	10	18	0.8

これと同様のことを、位置制御目標値指令についても行う。ここで、KOBIAN-R 頭部に搭載している出力デバイスは、DC モータ 22 個、超音波モータ 2 個、無機 EL シート 1 個の計 25 個であり、VAJRA ノードは 7 個である。SET_POSITION_REFERENCE 指令において、指令種別と送信パラメータを合わせて 4[byte]、総サイズは 8[byte]である。これを 25 個分行うとすると 100[byte]と 200[byte]であり、オーバーヘッドは 1 である。目標値指令は返信不要なので同一バス内に存在する全 VAJRA ノードに対し 1 つのパケットによるブロードキャスト送信を使用できる。SET_BROADCAST_POSITION_REFERENCE 指令は、指令種別と送信パラメータ合わせて $1+2\times 4\times 7=57$ [byte]が実際であるが、必要なのは 25 個分なので、 $1+2\times 25=51$ [byte]。総サイズは

61[byte]なので、オーバーヘッドは0.2程度である。通信の総量は200[byte]から61[byte]と約30%に減少している。時間に直すと、115,200[bps]においては17.4[ms]が5.3[ms]に減少した、ということである (Table 2. 12)。以上の指令種別による通信量の比較を Fig. 2. 64 に示す。実測角度読込および目標値設定ともに、指令種別を工夫することで通信量の大幅な低減を実現していることがわかる。

Table 2. 12 Comparison of the packet size between instructions for setting position references

条件	送信パケットサイズ [byte]		オーバーヘッド	通信時間 [ms]
	指令種別+パラメータ (必要分)	合計		
1 自由度毎	4	8	1	0.7
1 自由度毎×25	100	200	1	17.4
ブロードキャスト	51	61	0.2	5.3

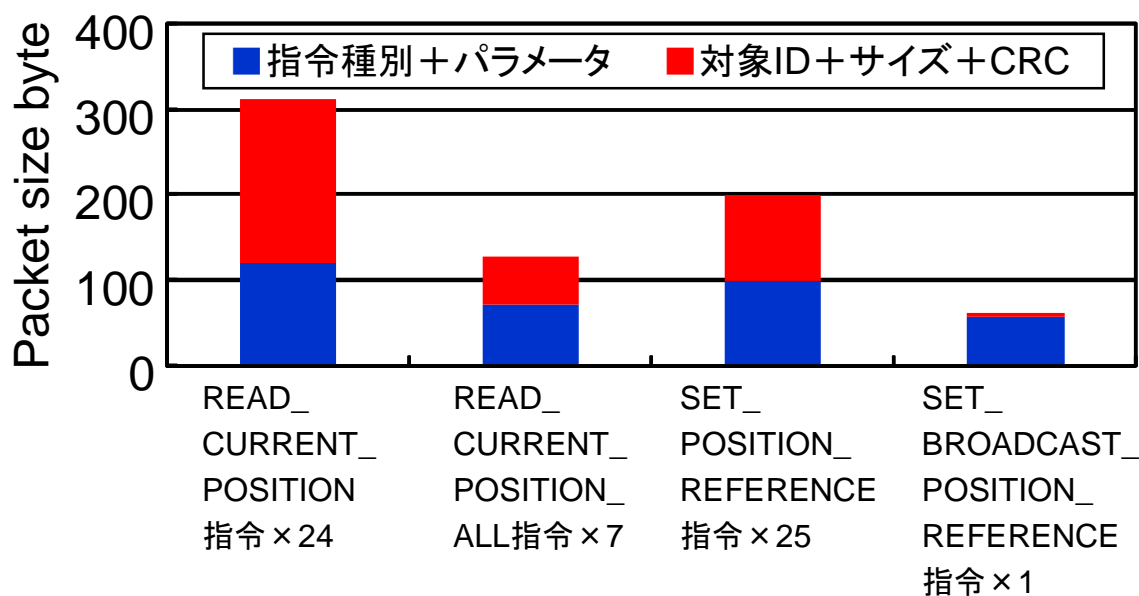


Fig. 2. 64 Comparison of the packet size between instructions for setting position references

(5) 送信のコントロール方式

ここまで見てきたように、通信は一定の無視できない時間を要する。(4)でブロードキャストによる通信時間の低減を説明したが、それでも5.3 [ms]の時間がかかってしまっている。これは呼び出しスレッドのコントロールが奪われる時間なので、ロボッ

トの制御スレッド (1[ms]周期) からは呼び出せない。

そこでまず、返信不要の送信のみを行うスレッドを分ける。VAJRA ノードに送信したいスレッドは、この「送信スレッド」に依頼する方式にした。送信処理を行いたいユーザスレッドは送信パッケージを「送信スレッド」のパッケージキューに投げるだけで (非同期呼び出し)、このユーザスレッドのコントロールはすぐに戻る (ノンブロッキング)。一方、パッケージキューに投げられた (送信処理を依頼された) 「送信スレッド」は、そのタイミングから送信処理を行う。送信パッケージキューが空であるときは、キューにパッケージが投げられるまで「送信スレッド」は停止する。このワークスレッド方式の並行処理により、VAJRA ノードに送信したいユーザスレッドは送信時間分コントロールを奪われなくなる。

ただし、これはあくまでの返信不要の送信タスクについてのみ有効な手段である。VAJRA ノードから情報を得たいユーザスレッドは、必然として返信パッケージを待たなければならない。ここで、返信不要の送信のみを行う「送信スレッド」と、要返信の送信を行うユーザスレッドで、通信路を同時に使用しないよう同期を取ることになる。即ち、両者とも、通信路がロックされていないければ、通信路をロックし、送信処理を行い、通信路ロックを解放する。通信路がロックされていれば、ロックが解放されるまで待つという排他的処理を行っている。

以上を図示したものが Fig. 2. 65 である。四角はスレッドが実行状態にあることを示し、色で処理区別を表している。返信不要の送信を行いたいユーザスレッド (A) が、時刻 t_1 において返信不要の送信を実際に担当する「送信スレッド」(B) に送信処理依頼を投げる。するとスレッド B は実際の送信処理を行う。スレッド A はその送信完了を待つことなく、自分の処理を続行する。時刻 t_2 において同様のことが発生しているとして、スレッド B における送信処理が完了する時刻 t_4 より前の時刻 t_3 において、VAJRA ノードから情報を得たい、即ち送受信を行いたいユーザスレッド (C) がまず送信を行おうとする。しかし、通信路は先にスレッド B によって使用されているので、時刻 t_4 までスレッド B の送信処理完了を待つ。時刻 t_4 になりスレッド B が送信処理を終えると、スレッド C は送信処理と受信処理を開始する。その送受信処理完了時刻 t_6 より前の時刻 t_5 においてスレッド A がスレッド B に送信処理依頼を出しても、スレッド C が通信路を使用しているためスレッド B はそれを待つ。スレッド A はそれに関係なく自分の処理を続行する。時刻 t_6 においてスレッド C が送受信処理を完了すると、スレッド B が先ほど依頼された送信処理を行う。

このように、返信不要の送信処理を専用のワークスレッドに分けることで、まずは返信不要の送信処理に要する時間分を、アプリケーション側 (ユーザスレッド) が奪われぬ構成とした。これにより、アプリケーション側の処理と、送信時間をどうに

かするための処理が明確に分離され, VAJRA を用いたプログラム開発が容易になり, 時間的予測性が高まる. また, 通信の転送速度を速くすることができた際にも, プログラムの再構成が不要になる (転送速度のスケールアップに対し, この構成はスケラビリティを持つ).

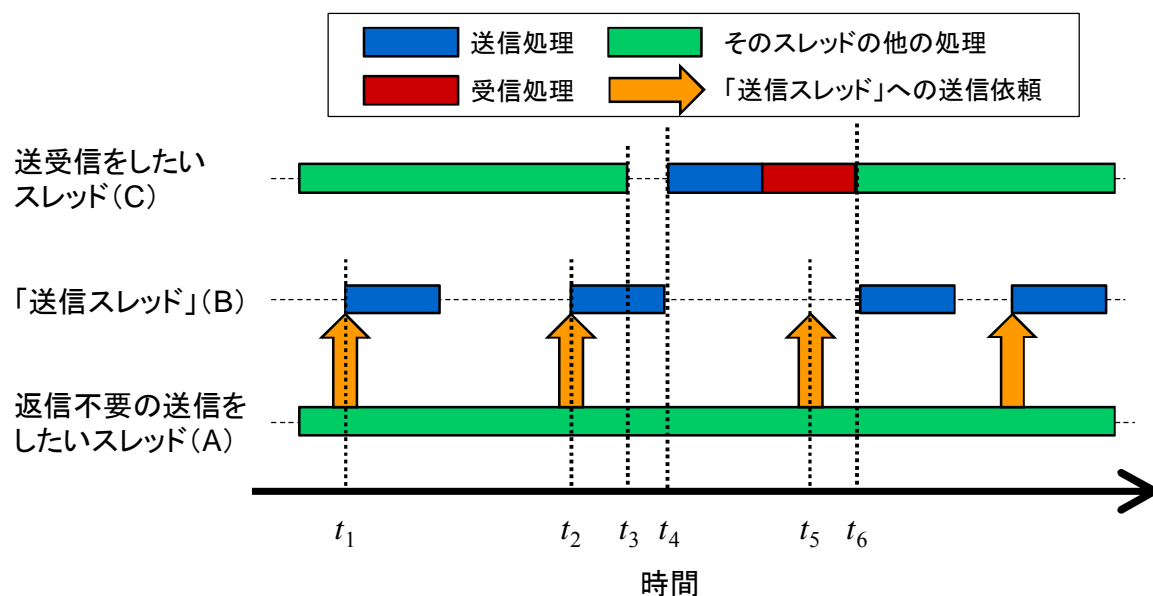


Fig. 2.65 Transmission control by worker thread

この構成により, 制御スレッドは SET_BROADCAST_POSITION_REFERENCE 指令などの返信不要な指令を, 送信処理時間分だけスレッドのコントロールを奪われることなく, デッドライン 1[ms]の処理内において呼び出すことができるようになった. ただ, 先述したように実際の送信処理は 5.3[ms]ほどかかるので, 制御周期 1[ms]毎には呼び出せない. しかし, 制御 PC におけるこの制御周期自体は集中制御の関節の位置制御のためである. 分散制御の関節は VAJRA のモータコントローラユニットにおいて 1[ms]で位置制御されているので, 制御 PC が 1[ms]で目標値指令を送信する必要はない. 2.3.4 で説明したように, モータコントローラユニットによるモータ位置制御の整定時間は短くても 30[ms]程度なので, 制御 PC からの目標値指令送信周期もこれと同程度で良い. また, KOBAN-R 頭部においては, 下半身による実時間歩行安定化制御は必要ないので, 目標値の更新周期がこの程度でも問題は無いと考えられる.

(6) 送受信タスクの実行方式

返信不要送信処理を非同期式として実現したことについては(5)において説明した.

では、実測関節角度や A/D 変換器によるセンサの計測値を制御プログラムが取得するといった、送受信セットの処理については、どのように行うべきだろうか。

まず実測関節角度の取得については、そもそも分散制御なので、各関節の時定数と制御ゲインに基づいた整定時間で目標角度に到達しているはずである（そうなるように各モータコントローラユニットを構成・設定している）。なので、制御プログラムの制御周期 1[ms]毎に実測関節角度を取得する必要はない。

センサ計測値についても、制御周期 1[ms]毎に取得する必要はないと考えられる。このセンサ計測値のサンプリング周期はセンサの個数および解像度とトレードオフの関係にあり、必要以上のサンプリング周期とするわけにはいかない。センサを用いてどのようなことをロボットにさせたいかというユーザアプリケーション側が考えるべき問題である。2.2.5 で見たように KOBAN-R の制御プログラムにおいては基本的には、ユーザアプリケーションが実現したいロボットの運動軌道設定を **Session** として記述する。これは制御周期 1[ms]毎に実行されるが、そもそも全ての処理をここに記述する必要はない（別の周期実行スレッドでセンサ計測値を取得し、そこで大まかな軌道をつくって、**Session** に指令する構成が容易に実現可能である）。ただ、非同期でセンサ計測値取得を行う処理が用意されていれば、制御スレッドから 1[ms]でない周期で呼び出し可能で、しかも時間的予測が可能なので開発がしやすい。

つまり、制御スレッドから呼び出し可能な送受信処理依頼ができれば、ユーザアプリケーション側にとって開発がしやすい構成となる。これはセンサ計測値の取得のみならず、実測角度取得やその他の制御設定の確認、エラーの検出などにも同様に使用できるはずである。そこで、一般的な送受信セットの処理を一つのタスクとして実行するイベント駆動型送受信タスク実行方式を実現した。

一般的な送受信タスクにおける送受信データを表現するには、対象となる VAJRA ノード ID、指令種別、送信パラメータのバイト列、受信パラメータのバイト列があれば良い。また、送信パラメータはユーザスレッドがつくるとして、指令種別と受信パラメータに対する処理（受信後の処理）も表現されなければならない。ユーザスレッドがそれを定義するとして、非同期呼び出しなので、この処理はユーザスレッドでは実行されず、ワークスレッドにて実行される。よって C++ プログラミングにおいては関数ポインタもしくはハンドラオブジェクトによって処理が表現される。ここで、ワークスレッドを **CommandExecutorThread**、ワークスレッドに対するタスク（送受信データと受信後の処理）を **Command**、送受信データを **Query**、受信後の処理を **QueryHandler** とする。ほとんどの受信後処理は実際には関数ポインタ（より正確にはメンバメソッドポインタ）を用いて実装されているが、ハンドラオブジェクトを用いる場合の方が一般化された説明になるので、関数ポインタ版は省略する。これらをク

クラス図として表したのが Fig. 2. 66 である。

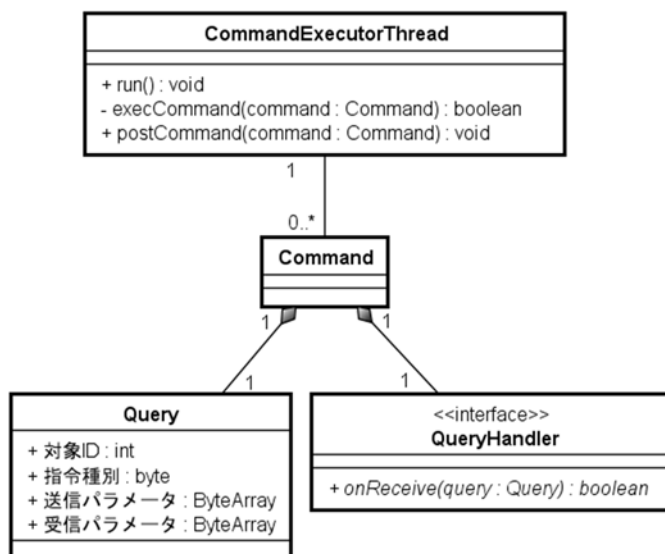


Fig. 2. 66 Class diagram of send-and-receive task

CommandExecutorThread は別スレッドにて run メソッドを実行する。run メソッドのアクティビティ図を Fig. 2. 67 に示す。まず、Command のキューに Command が追加されるまで停止する。ユーザスレッドは CommandExecutorThread#postCommand メソッドにより Command を追加する（送受信タスクを依頼する）。一方、Command キューに Command が追加された時点で CommandExecutorThread は、キューから Command を取り出し、execCommand メソッドに Command を渡して実行する。このメソッドでは Command#Query の対象 ID、指令種別、送信パラメータに基づき送信パケットを作成し、これを VAJRA ノードに送信し、返信を待つ。返信が来たら受信パケットをチェックし、エラー（通信におけるエラー）があれば execCommand メソッドから抜け、エラーを返り値として返す（そして再度当該メソッドを実行する）。エラーが無ければ、Command#Query の受信パラメータをセットし、これを Command#QueryHandler #onReceive メソッドに渡して実行する。この実行結果をチェックし、execCommand メソッドの返り値として返す。この返り値がエラー（この場合は指令種別固有のエラー）であれば、再度 execCommand メソッドを実行する。エラーでなければ、Command キューをチェックし、新たに追加された Command があれば同様の送受信タスクを実行する。無ければキューに追加されるまで停止する。通信におけるエラーと指令種別固有のエラーのどちらもログとして記録されるが、このエラーに対してどのように対処するかはユーザアプリケーション次第である。

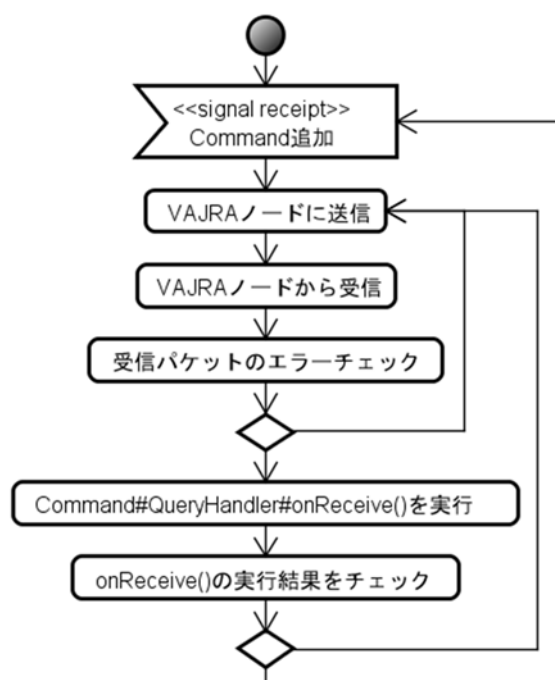


Fig. 2. 67 Activity diagram of CommandExecutorThread

この構成により，ユーザスレッドは送受信タスクにブロックされないで間接的に送受信タスクを実行できる．(5)で説明した返信不要送信処理の動作と合わせると，ユーザスレッドと各スレッドの時間的動作は Fig. 2. 68 に示すとおりになる．Fig. 2.63 におけるスレッド C がワーカースレッドになった形である．時刻 t_1 においてユーザスレッドが返信不要の送信処理を「送信スレッド」に依頼する．すると「送信スレッド」は直ちに送信処理を実行する．この処理が時刻 t_2 になるまでに終わっていれば，ユーザスレッドが CommandExecutorThread に送受信処理を依頼した時刻 t_2 において，すぐさま CommandExecutorThread は送受信処理を実行する．これが終わるのが時刻 t_4 だとして，それより前の時刻 t_3 においてユーザスレッドが「送信スレッド」に送信処理を依頼した場合，その送信処理は時刻 t_4 になった時点で行われる．同様にこの処理が終わるのが時刻 t_6 だとして，それより前の時刻 t_5 においてユーザスレッドが Command ExecutorThread に送受信処理を依頼した場合，その送受信処理は時刻 t_6 になった時点で行われる．また，これが終わるのが時刻 t_8 だとして，それより前の時刻 t_7 においてユーザスレッドが Command ExecutorThread に送受信処理をさらに依頼した場合，その送受信処理は時刻 t_8 になった時点で行われる．いずれの場合も，ユーザスレッドは通信時間による影響を受けない．

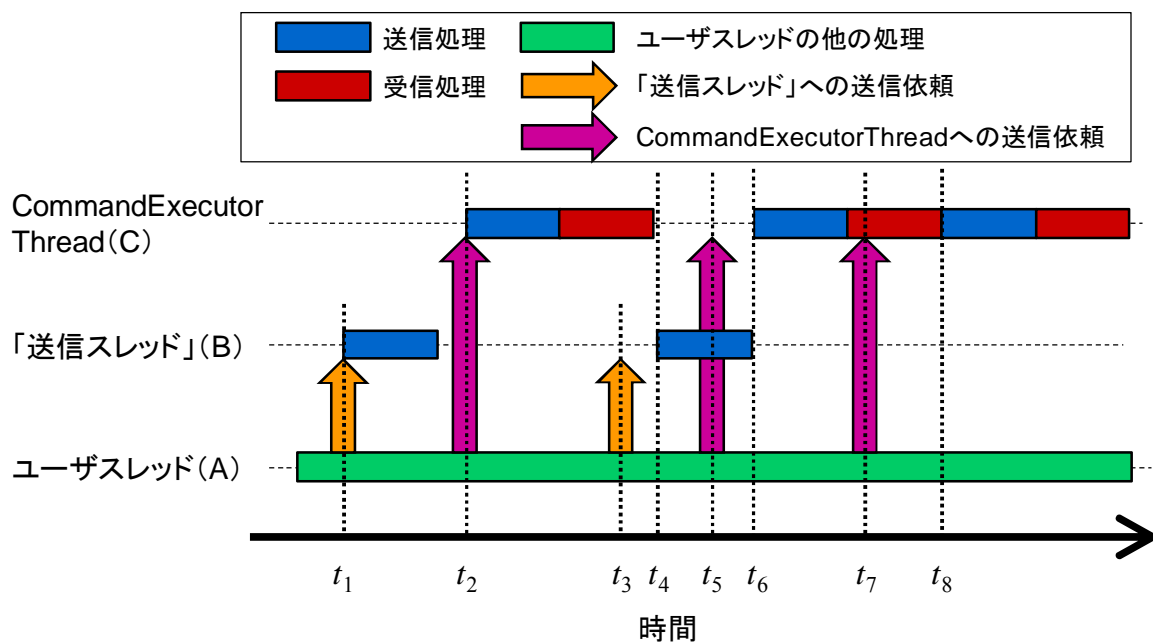


Fig. 2. 68 Timing chart of send-only task and send-and-receive task

この送受信タスクの仕組みを利用するのは、先述したように、実測角度取得やセンサ計測値取得，その他の制御設定確認，モータコントローラ内部のエラー検知などである。これら制御プログラムにおいて必要と考えられる標準的機能はAPIとして用意している。Fig. 2. 68のような一般的な場合を想定すると，送受信タスク単体に注目した際（送信パケットキューやComman キューの状態を気にしないという条件）は，その送受信タスクがいつ完了するかがわからない。そこで，各モータコントローラ・各モータの状態をタイムスタンプ付でキャッシュする領域を設けている。これにより，各キューの状態をきちんと管理しなくても，キャッシュのチェックにより送受信タスクの完了を検知できる。また，送受信タスクはユーザが自由に作成できるので，受信後処理内にユーザスレッドに通知する仕組みをつくることも可能である。

(7) 時間的予測

以上の構成により，分散制御の通信周りを整理できた。ユーザスレッド (KOBIAN-R においては制御スレッド) において通信時間によるブロッキングが起らないようにした。ワークスレッドにより，非同期で送信処理および送受信処理を実行する方式を実現した。Fig. 2. 65 および Fig. 2. 68 の図に示すことができるように，非同期呼び出しを用いても各処理の完了時刻は予測することができる。即ち，分散制御におけるプログラミング開発の容易性と時間的予測性の双方を同時に実現した，ということである。

る。

さて、(4)で試算したように、1つのモータコントローラユニットに対して `READ_CURRENT_POSITION_ALL` 指令を用いた送受信所要時間は約 $1.6[\text{ms}]$ である。KOBIAN-R 頭部にはこれが7個ついているので、全モータコントローラに対する送受信所要時間が $11.2[\text{ms}]$ となる。ただし、実際の処理においてはモータコントローラ内での処理時間と CPU ボードのシリアル通信コントローラチップの受信処理時間がある。これは実測でそれぞれ $20[\mu\text{s}]$ と $400[\mu\text{s}]$ であった。これを加味して試算すると $13.9[\text{ms}]$ となる。(5)で試算したように全関節への位置制御目標値指令の送信処理時間が $5.3[\text{ms}]$ なのでこれと足しても $20[\text{ms}]$ 以下である。よって、KOBIAN-R の制御プログラムにおいては $30[\text{ms}]$ 周期で全関節に対する位置制御目標値設定と実測角度取得が可能である。また、センサ計測値取得については、`READ_ADC` 指令を用いるとすると、送信パケットサイズは $5[\text{byte}]$ なので、送信所要時間は $0.454[\text{ms}]$ 、受信パケットサイズは $13[\text{byte}]$ なので、受信所要時間は $1.53[\text{ms}]$ 、送受信所要時間は $1.93[\text{ms}]$ となる。KOBIAN-R 頭部のセンサは、触覚に $18[\text{ch}]$ (頭頂部： $4[\text{ch}]$ 、右側頭部： $4[\text{ch}]$ 、左側頭部： $4[\text{ch}]$ 、前額部： $2[\text{ch}]$)、嗅覚に $3[\text{ch}]$ なので合計 $21[\text{ch}]$ 。1モータコントローラにつき $8[\text{ch}]$ 計測可能なので、所要モータコントローラ数は3個である。よって全センサの計測取得のための送受信所要時間は $5.78[\text{ms}]$ となり、先の位置制御目標値設定と実測角度取得と合わせて、 $30[\text{ms}]$ 周期で実現できる。

(8) 動的構成設定

KOBIAN-R 頭部において、そのハードウェア構成は2.3.3に示したように固定化されている。しかし、今後の開発において新たな出力デバイスが追加されることは十分に考えられる。(2)で述べたように、分散制御がハードウェアの `configurability` 向上に寄与するのならば、制御プログラムにおいてもこの `configurability` を確保しなければならない。この場合の `configurability` は、VAJRA ノードが増えても容易に対応可能ということである。

制御 PC であるマスタノードから見ると、各 VAJRA ノードは全て1本のバス上に存在する。論理ネットワーク構成としては、各 VAJRA ノードはそれぞれ平等な存在であるが、物理的にはライン接続なので、マスタノードからの「距離」がそれぞれ異なる。この距離の違いにより、物理的なエラー(断線など)がある場合は、ある VAJRA ノード以降のノードはマスタノードから見えなくなってしまう。

このような状況に対応可能な、即ち、より使い勝手が良く、エラー耐性が優れるものを実現するには、制御プログラム側はネットワーク上に存在する VAJRA ノードを

不定のものとして扱い、ユーザによる構成設定と合致するかをチェックする仕組みが必要である、と考えた。このような、プログラムのコンパイル時ではなく、プログラムの実行時に、プログラムの内部構成が設定されることを動的構成設定と呼ぶ。

実行時に制御プログラムはまず、構成設定ファイルを読み込む。構成設定ファイルは CSV ファイルであり、その書式は Fig. 2. 69 のようになっている（カンマおよび行区切りを表罫線として簡略表示している）。1 行目はヘッダであり、2 行目以降が各出力デバイスそれぞれの設定である。1 行 1 列目には、使用する VAJRA ノード数、シリアル通信のポート番号、転送速度がセミコロン区切りで記入されている。2 行目以降の 1 列目は各出力デバイスの VAJRA ネットワーク内での絶対 ID である。SET_BROADCAST_POSITION_REFERENCE 指令は全ノードに対し 1 つの送信パケットを投げ、その送信パラメータは目標角度の配列であるが、この順番を定めるのが絶対 ID である。各 VAJRA ノードは自分の持つ各出力デバイスにそれぞれどのような絶対 ID が割り当てられているかを知り、ブロードキャスト指令に対応することができる。2 列目以降は各出力デバイスがどの VAJRA ノードに属し、ノード内でどのような相対 ID を持ち、どのような出力デバイス (DC モータや超音波モータなど) なのか、また制御設定はどのようなものかを定義する。2 列目以降の順番は定義されないで、読込処理において、ヘッダの順番に合わせて解釈される。

行\列	1	2	3	4	5	...	m
1	[ノード数];[ポート番号];[転送速度]	uCID	motorID	motorClass	gearRatio	...	positionLimitMax
2	[モータ絶対 ID]	[ノード ID]	[モータ相対 ID]	[モータ種別]	[減速比]	...	[最大可動角]
3	[モータ絶対 ID]	[ノード ID]	[モータ相対 ID]	[モータ種別]	[減速比]	...	[最大可動角]
...
n	[モータ絶対 ID]	[ノード ID]	[モータ相対 ID]	[モータ種別]	[減速比]	...	[最大可動角]

Fig. 2. 69 Format of the configuration file

制御プログラムが構成設定ファイルを読み込んだのち、制御プログラムは構成設定ファイルに定義された全 VAJRA ノードそれぞれに対し、存在確認を行う (READ_MEMORY 指令により、VAJRA ノード ID が書き込まれているメモリ内容を返信してもらう)。これによりネットワーク内に存在する (利用可能な) VAJRA ノードがわかり、欠落があればエラーとしてユーザに返すことができる。あとは、設定ファイルの内容に基づき、各 VAJRA ノードの各出力デバイスの制御設定を

WRITE_MEMORY 指令により書き込み, それらを READ_MEMORY 指令で読み込み, チェックするだけである. 以上の仕組みにより, 動的構成設定が実現できた.

(9) 制御プログラム内での関節表現と全体の構成

KOBIAN の制御プログラムが Fig. 2. 27 に示すレイヤアーキテクチャの構成をしており, 関節がその Joint レイヤにおいて RevoluteJoint クラスとして表現されていることは 2.2.5(1)において説明した. Session は関節群を RevoluteJoint インスタンスへの参照の配列として扱い, また, ユーザインタフェイスも同様に扱う. RevoluteJoint のメソッドを呼び出すことで, 位置制御の制御パラメータの変更や目標角度を設定することができる. この呼び出しは同期・ブロッキングであるが, 非常に呼び出し時間が短いので, 制御スレッドで実行される Session から呼び出しても, ユーザインタフェイスのスレッドから呼び出しても, 呼び出し時間による問題は特に無い.

分散制御システム VAJRA を用いている関節については, 通信を直接行くと, 同期・ブロッキングな呼び出しとなり, その通信時間による問題があったが, ここまでに説明してきたように, ワークスレッド方式による非同期・ノンブロッキングな呼び出しを実現したので, 制御スレッドなどから容易に呼び出し可能となった.

したがって, RevoluteJoint クラスを継承した, VAJRA 用の Adapter クラスである VajraJoint クラスを定義してやれば, 制御スレッドや Session, ユーザインタフェイスなどにおける変更無しに VAJRA の関節を扱うことができるようになる. KOBIAN-R 制御プログラムにおける関節・I/O 周りの呼び出しに関する静的構成図を Fig. 2. 70 に示す. この図において VajraSystem は, VAJRA ノードへの指令をメソッド化した API クラスである (ADBoard インタフェイスを継承しているのは, モータコントローラに A/D 変換器があるためである). この図が表すように, KOBIAN-R の制御プログラムは, Fig. 2. 63 の制御システム構成と同様に, KOBIAN の制御プログラムに VAJRA 関係のものをほぼ追加しただけの構成となっている. これが可能になったのは, 2.2.5 において説明した KOBIAN 制御プログラムの構成と, この項にて説明した分散制御の通信周りの構成のおかげである.

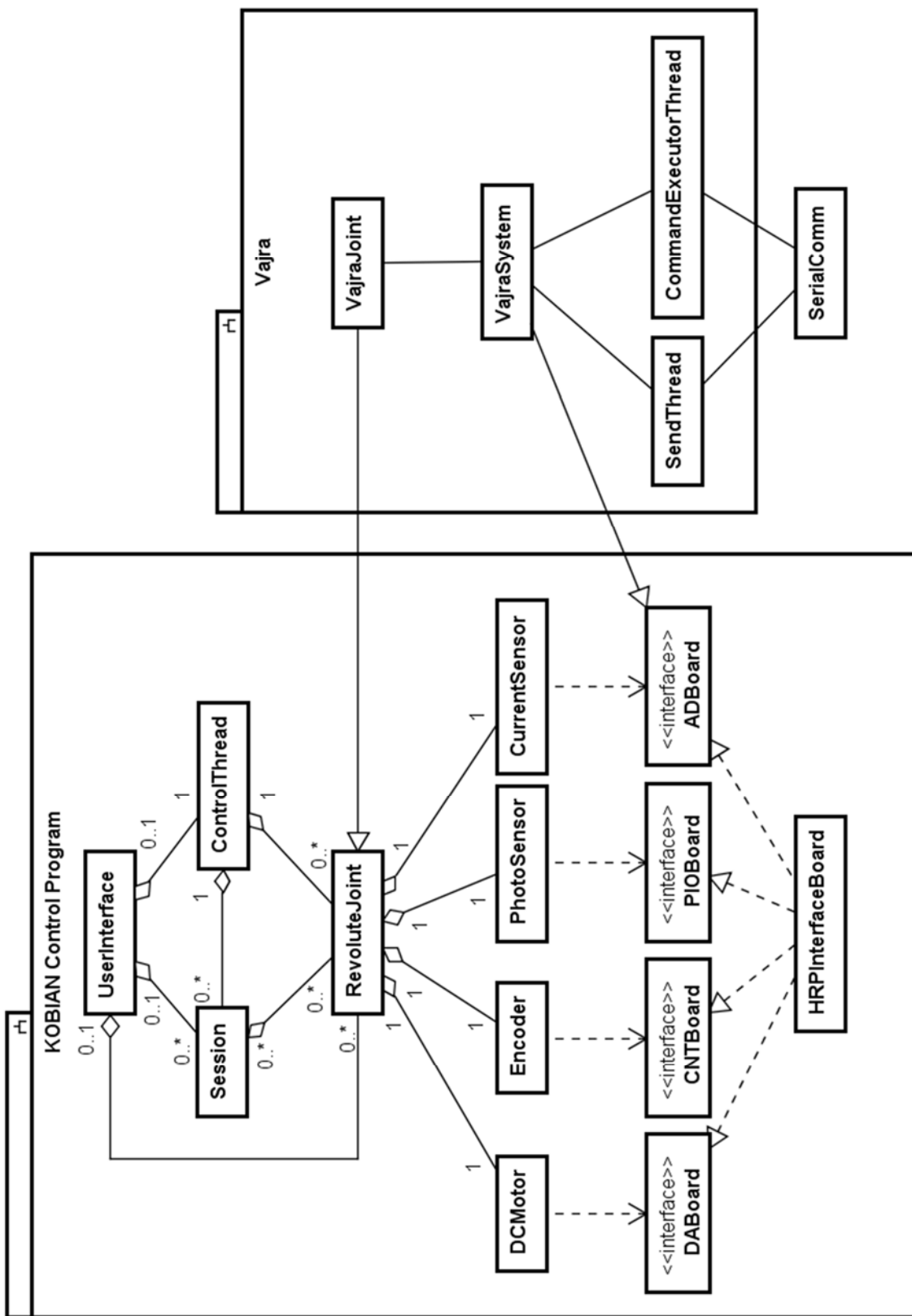


Fig. 2. 70 Class diagram of the control program of KOBIAN-R

2.4 HABIAN の開発

2.4.1 開発コンセプトと要求仕様

現在の2足歩行技術は、人間の生活環境において十分な安定性を持っているとは言えない。人間の生活環境のうち、段差のない平坦な絨毯の上といった限定された環境下においては、脚式よりも車輪式のほうがまだ優位である。

そこで、KOBIAN の下半身である脚を台車に変更したヒューマノイドロボット HABIAN を開発した。

HABIAN の台車モジュールの要求仕様は次のとおりに定めた。

- ・その場で旋回できること
- ・移動速度 1[m/s]
- ・20[mm]程度の段差を越えられること
- ・1時間以上のバッテリー駆動
- ・シリアル通信にて制御できること

2.4.2 ハードウェア構成

ここでは、KOBIAN との主たる差異である下半身の台車モジュールについて説明する。

上記の要求仕様を満たすものとして、日本 SGI 社の BlackShip を選定した。BlackShip の CAD および仕様を Fig. 2. 71, Table 2. 13 に示す。

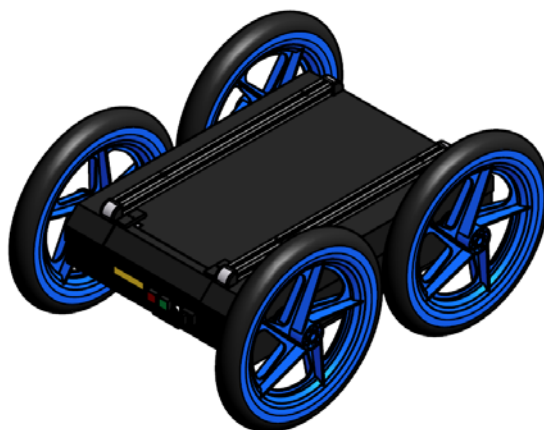


Fig. 2. 71 BlackShip

Table 2. 13 Specification of BlackShip

外形寸法	640×460×310 [mm]
タイヤ直径	310[mm]
本体重量	約 20[kg] (バッテリー込)
バッテリー	24[V] 8[Ah] (鉛蓄電池)
駆動モータ	DC24[V] 90[W]×2 (MaxonMotor 社製)
内蔵センサ	エンコーダ×2, バッテリ残量計×1 バッテリー電流計×1, モータ電流計×2
ペイロード	最大約 40[kg]
移動速度	最高約 1[m/s]
接続方法	RS232C
連続稼働時間	約 2~3 時間 (走行条件により増減)

KOBIAN と全高を合わせるため、アルミフレームで構成されたやぐらをこの BlackShip の上に設けている。

HABIAN の自由度構成を Fig. 2. 72, Table 2. 14 に, 全体像を Fig. 2. 73 に示す。

Table 2. 14 DoF configuration of HABIAN

Part	DoFs
Face	4
Eye	3
Neck	4
Arm	7 x 2
Hand	4 x 2
Trunk	1
Waist	1
Wheel	2
Total	37

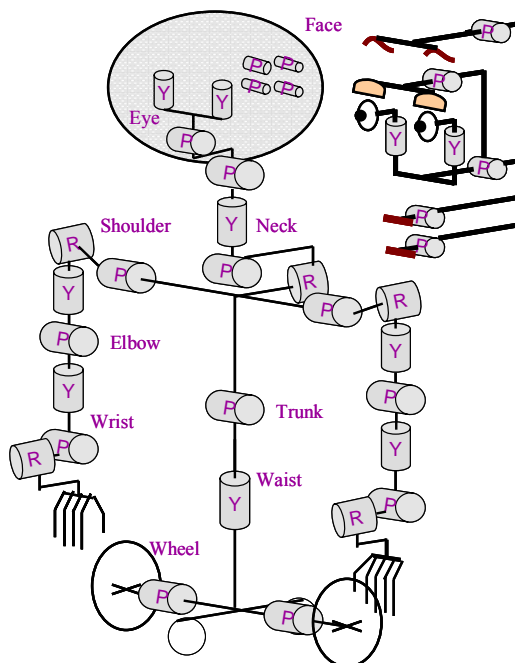


Fig. 2. 72 DoF configuration of HABIAN

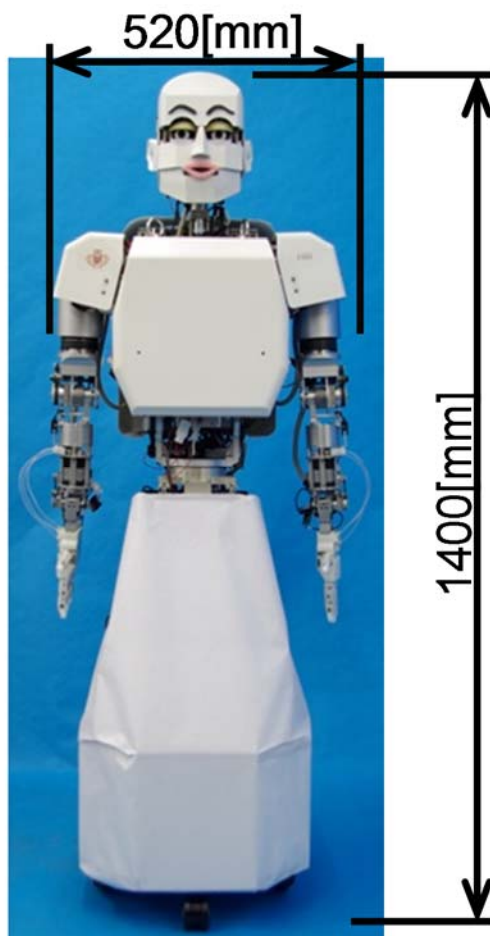


Fig. 2. 73 HABIAN

2.4.3 制御システム構成

HABIANの制御システムを Fig. 2. 74 に示す. KOBIANと比較して, 脚の6軸力覚センサおよびその受信ボードが無くなり, 台車モジュールを追加した形となっている.

WSH の幾何学的形状は人間同様 5 指を有する。一方，搭載ロボットが 2 足歩行ヒューマノイドロボットという特殊性から力学的・幾何学的仕様の拘束を受け，可能な限り小型軽量，つまり少自由度であることが好ましい。このことから上述したヒトの手の 22 自由度から自由度を減らすことを考え，要求仕様における把持・ジェスチャを最大限満たす最小自由度構成とした。

まず，把持に関して，球や円筒状等の簡易形状の物体把握，インタラクションとして握手が可能であることを目標とした。これにより把持機能を，握りおよび掴みに限定することによって，第 1 指とそれに対向する他の 4 指による締め付け，および第 1 指の内外転の計最少 3 自由度が考えられる。

次に，ジェスチャに関して，以下のジェスチャを行うことを目的とした。

- (i) ピース
- (ii) 手を広げる
- (iii) 手を閉じる
- (iv) 指をさす

これらの形状に関してそれぞれまとめることの出来る指を Table 2.15 に示す。なおまとめられる指の番号はそれぞれ第 1 指から第 5 指までの番号に対応する。

Table 2.15 ジェスチャと指の組み合わせ

No.	ジェスチャ	まとめられる指
1	ピース	145/23
2	手を広げる	12345
3	手を閉じる	12345
4	指を指す	1345/2

この表の No.1 および No.4 から第 2 指・第 3 指がそれぞれ別々に屈曲伸展し，かつ第 4 指・第 5 指とも別々に屈曲伸展する必要があることがわかる。したがってこれらを最少構成で満たすには第 1 指・第 4 指・第 5 指をまとめた屈曲伸展と第 2 指および第 3 指の屈曲伸展が独立している必要がある。

これら 2 点より目標達成には，

- (i) 第1指・第4指・第5指の屈曲伸展
- (ii) 第2指の屈曲伸展
- (iii) 第3指の屈曲伸展
- (iv) 第1指の内外転

が必要であることがわかる。

また、上記動作における各指の屈曲伸展は可動角の限界か把持物体への干渉による停止までの動きであり、中間状態の各関節角度を規定するものではない。すなわち把持物体に受動的にならうことが可能であれば各屈曲伸展状態をそれぞれ1自由度で構成することが可能となる。このことより目標達成のために最少自由度4を設定した。

サイズに関しては、人間との相似形を考え、ハンドの搭載機である KOBIAN の身長との比をとり、Table 2. 16 に示す設定とした。各指の太さはワイヤのテンション-曲げ-ストロークの関係を一貫させるため、第2指の 15[mm]に合わせた。

WSH シリーズの自由度構成を Fig. 2. 75 に示す。

Table 2. 16 Finger length

部位	長さ mm
第1指	73.5
第2指	70.6
第3指	80.3
第4指	71.4
第5指	54.5

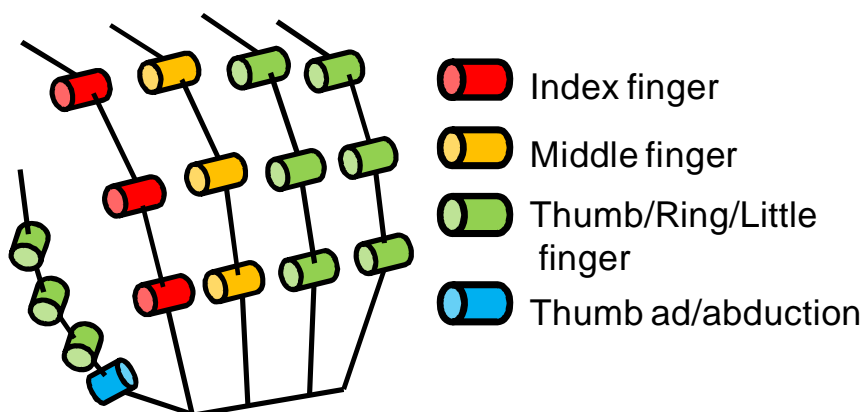


Fig. 2. 75 DoF configuration of WSH series (same color means coupled DoF)

2.5.2 Waseda Soft Hand #1

人間形ソフトロボットハンド Waseda Soft Hand #1 (WSH-1) は、軟素材により構成されたロボットハンドの第1次試作であり、ロボットハンドの柔らかさが触感に与える影響を調査するために開発された。

(1) 指部機構

上述した各指屈曲伸展を1自由度で行なうために、WE-4RII[]でも用いられてきた劣駆動構成を採用し、能動1自由度で指の屈曲・進展運動に必要なその他の2自由度分の駆動を実現した。ただし、シャフト、ベアリング、プーリといった硬い金属部材による構成ではなく、柔らかい素材により指を構成した。軟素材シリコン(ELASTOSIL M8520, 旭化成ワッカーシリコン製)により棒状に成形された部材に半円筒面の切欠きを設け、断面形状を一様にしないことで、ワイヤ引張で各関節が屈曲伸展する構造とした (Fig. 2.76)。ワイヤは屈曲・伸展の両方向に引っ張る構造とした。

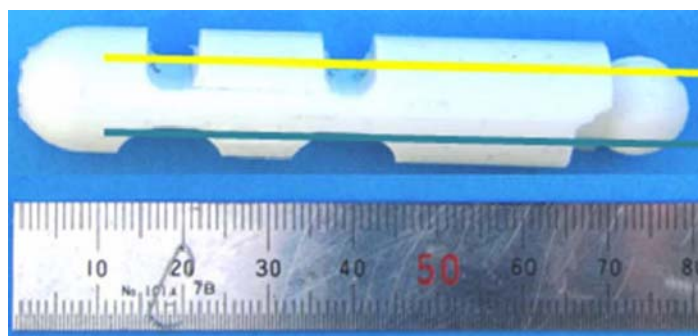


Fig. 2.76 Finger casted with soft silicone

親指以外の指の第3関節 (MCP) は屈曲・伸展を能動自由度とし、内転・外転・ねじれを受動自由度とした (Fig. 2.77)。この機構は楕円体によるボールジョイントとした。この機構により、内転・外転・ねじれを引き起こす外力に対する弾性が実現できる。楕円体ボールジョイントの受部には硬さと摺動性を兼ね備えた樹脂素材 PEEK を用いた。

親指の第3関節の内転・外転運動の機構には円筒形ジョイントを用いた (Fig. 2.78)。この受部には POM で製作したハウジングを用いた。

さらに、各指には、人肌ゲル (エクシールコーポレーション製) で成形された厚さ 1.5[mm]の皮を被せた。

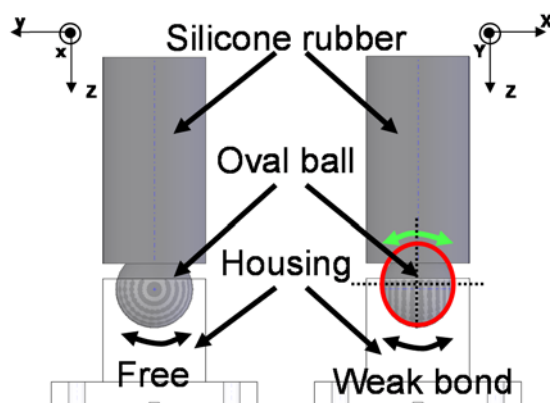


Fig. 2. 77 Mechanism of MCP joint of index, middle, ring, and little fingers

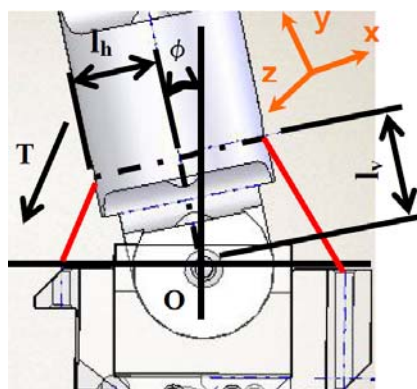


Fig. 2. 78 Mechanism of MCP joint of thumb

(2) 掌部構造

人間とのインタラクションを図る場合、軟素材で構成された人間に近い感触のハンドの方が、従来用いられてきた機械的で硬質なハンドよりも物理的・心理的に好影響を与えるとの仮説に基づき、これを検証している（第6章）。このため、WSH-1の掌は軟素材・硬質素材の両素材で同様の形状・構造が容易に実現できる必要があった。

そこでCADで作成した3次元データを用いて自由形状樹脂を作成することが可能な光造形機で型を作成し、その型で軟素材、硬質素材を成形するようにした。軟質素材には成人の手とほぼ同じ硬度の人肌ゲル硬度5（エクシールコーポレーション製）を用いた。また、掌の中に人の中手骨を模したアルミパイプを組み込んだ。各部材の位置関係はレントゲン写真から実測し、その値（Table 2. 17）に基づいて配置した。また、このアルミパイプの中を指駆動のためのワイヤが通る構造となっている。

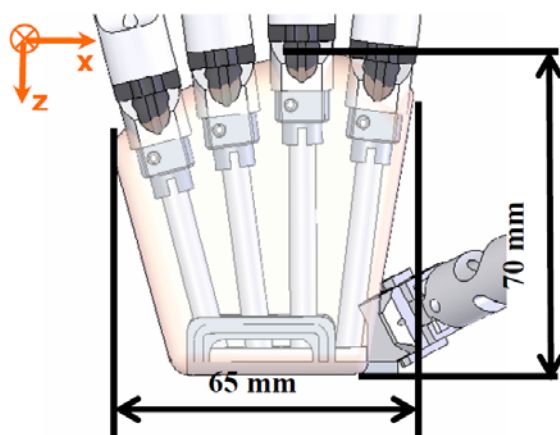


Fig. 2. 79 CAD drawing of the palm of WSH-1

Table 2. 17 Intermetacarpal angle

部位	第5指となす角 °
第2指	24
第3指	17
第4指	9

(3) 駆動モータの選定

指を駆動するのに必要なモータ発生張力は次式によって求めた。

$$T \cdot l_t = (F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3) + (M_1 + M_2 + M_3) \quad (2.1)$$

ここで, F_n : 指腹にかかる力, l_n : 各関節から力の作用点までの距離, M_n : 各関節の弾性によるモーメント, T : ワイヤ張力, l_t : 指の中立面から駆動ワイヤまでの距離である (Fig. 2. 80). この計算により選定したモータ仕様を Table 2. 18 に示す。

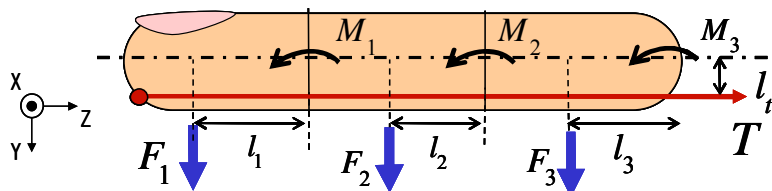


Fig. 2. 80 Statics of finger

Table 2. 18 Motors used in WSH-1

	部位	モータ	減速比
1	親指・薬指・小指の屈曲・伸展	maxon RE-max 17 4.5W	157:1
2	人差し指の屈曲・伸展	maxon RE-max 17 4.5W	84:1
3	中指の屈曲・伸展	maxon RE-max 17 4.5W	84:1
4	親指の内転・外転	maxon RE-max 17 4.5W	157:1

(4) 全体の構造

指駆動のためのモータは前腕部に収めた。前腕部を含めた WSH-1 を Fig. 2. 81 に示す。重量は 550[g]である。

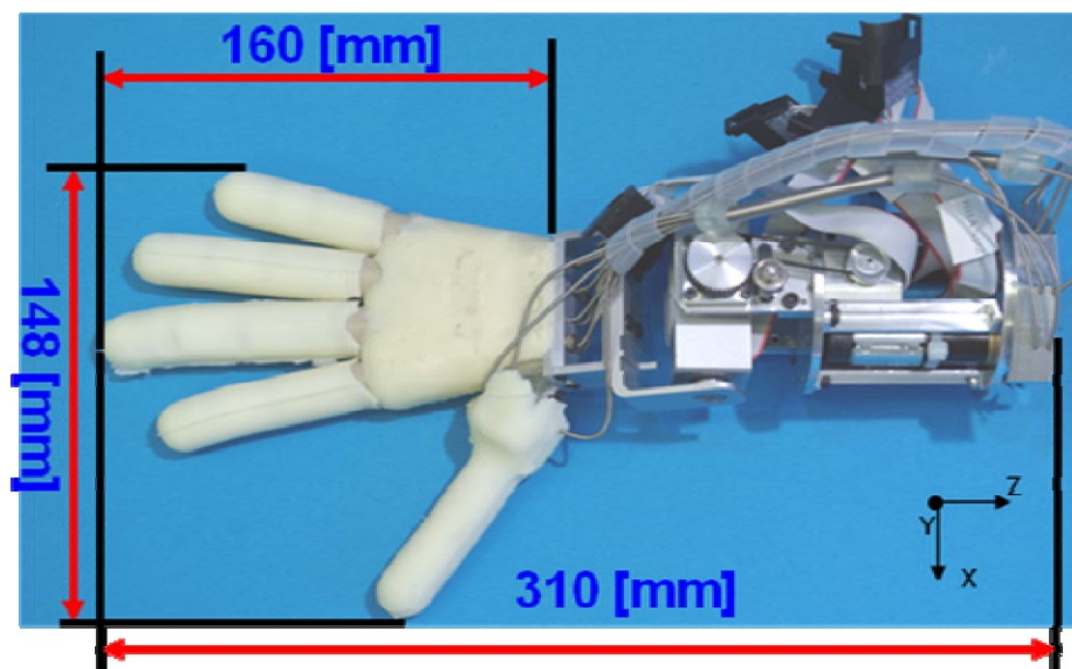


Fig. 2. 81 WSH-1

2.5.3 Waseda Soft Hand #1 Refined

人間形ソフトロボットハンド Waseda Soft Hand #1 Refined (WSH-1R) は、軟素材により構成されたロボットハンドの第2次試作であり、ロボットハンドの形状が触感に与える影響を調査するために開発された。

(1) 指部・掌部機構

基本的な構造は WSH-1 と同様である．しかし，WSH-1 ではワイヤが指のシリコン部材を傷付けるという問題があった．これを解決するために，指部材の中に PTFE 製のパイプを入れ，その中をワイヤが通る構造とした．また，WSH-1 では屈曲・伸展の両方向にワイヤが引っ張る機構としていたが，WSH-1R では屈曲方向にのみ引っ張り，伸展方向はワイヤ張力を弱めることでシリコンの弾性により戻る機構とした．また，WSH-1 では現親指以外の第 3 関節に橈円体ボールジョイントを用いていたが，これは抜けやすかったので，内転・外転・ねじれ自由度の弾性は，軟素材の弾性により実現することにした実 WSH-1R の指部構造を Fig. 2. 82 に示す．

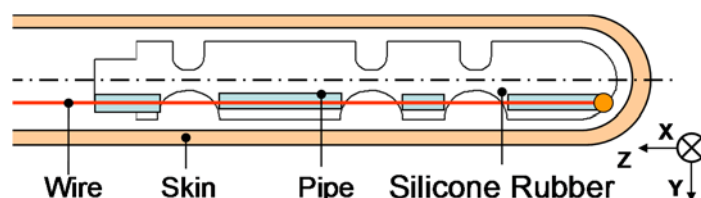


Fig. 2. 82 Cross-section view of the finger of WSH-1R

WSH-1R の掌部構造は WSH-1 とほぼ同様である．ただ，上述したように親指以外の第 3 関節の橈円体ボールジョイント機構を廃したので，この受部が無くなっている．

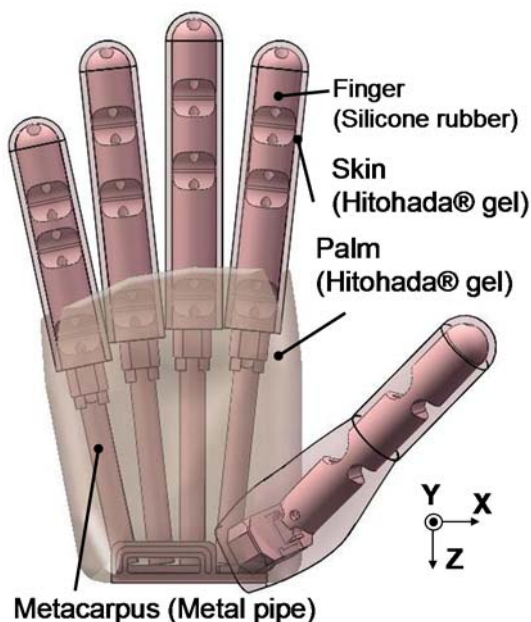


Fig. 2. 83 CAD drawing of WSH-1R

(2) テンションイコライザ機構

WSH-1 の親指・薬指・小指は 2 本のワイヤを途中でそれぞれ 3 つに分岐させ、それらが各指の屈曲・伸展運動を担当していた。しかしながら、この機構では、1 本の指が把持対象物に当たったとき、他の 2 本の指がそれ以上動かなくなってしまう。これを解決するために、ここにテンションイコライザ機構を設けた (Fig. 2. 84)。こうした機構にはプーリを用いることが一般的だが、それでは機構サイズが大きくなってしまい、KOBIAN の前腕部には収まらない。そこで、摩擦の小さい PTFE 製の半弦形状のパイプをプーリの代わりに用いた。これにより小型のテンションイコライザ機構 (Fig. 2. 85) を実現することができた。

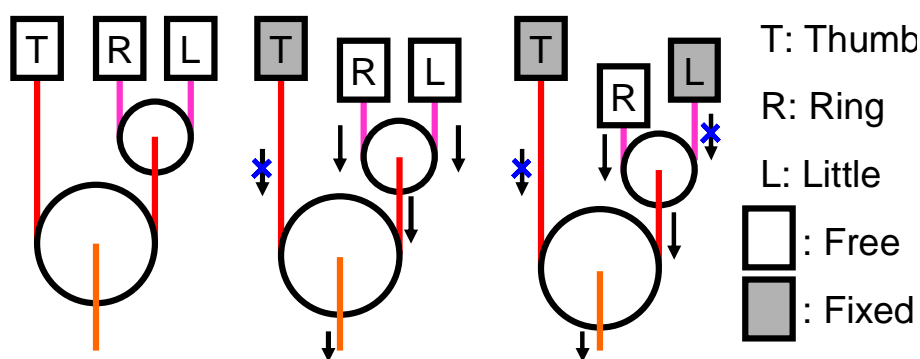


Fig. 2. 84 Mechanism of the tension equalizer

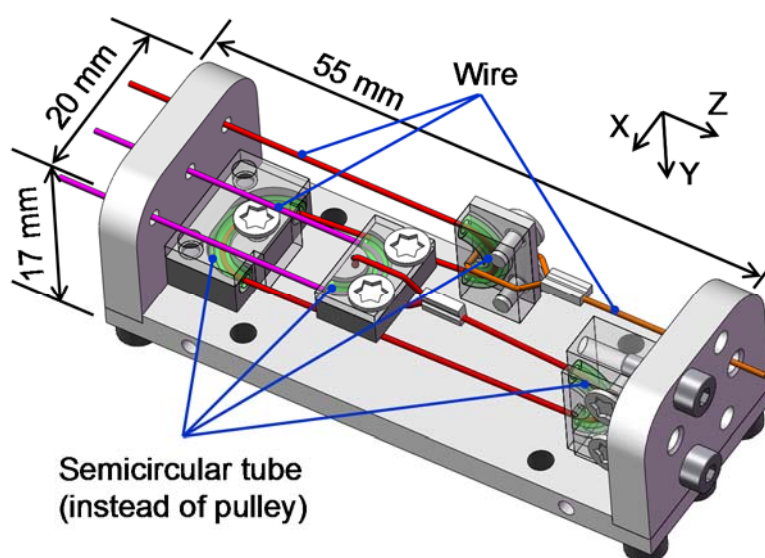


Fig. 2. 85 Mechanical design of the tension equalizer

(3) 全体の構造

WSH-1 と同様に，WSH-1R においても指駆動のためのモータは前腕部に収めた．指伸展のためのワイヤを廃したことで，前腕部から掌根元までのワイヤ本数を半分にすることができた．WSH-1R の全体図を Fig. 2. 86 に示す．重量は 960[g] である．掌の形状決定については第 6 章にて述べる．

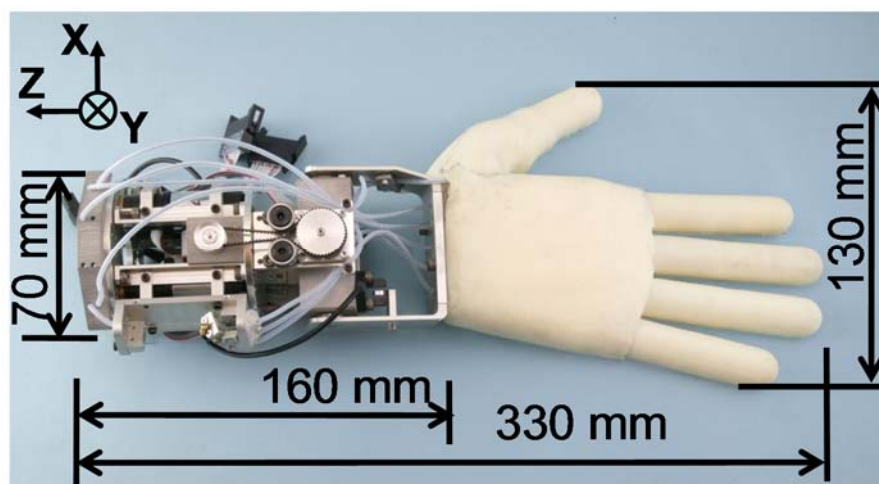


Fig. 2. 86 WSH-1R

2.5.4 Waseda Soft Hand #1 Refind II

人間形ソフトロボットハンド Waseda Soft Hand #1 Refined II (WSH-1RII) は，軟素材により構成されたロボットハンドの第 3 次試作であり，ロボットハンドの握手時の握りの強さが触感に与える影響を調査するために開発された．

(1) 指部・掌部構造

WSH-1R の掌は人肌ゲル硬度 5 を用い，その内部に中手骨を模したアルミパイプを組み込んだ構造をしている．しかし，手首や腕を動かした際，中手骨およびその先の指が大きく振動してしまうという問題があった．

そこで，WSH-1RII の指には，Fig. 2. 87 に示すように，以下の改良を行った．

- ・シリコンチューブ

- 周囲のシリコンと接着し，ずれるのを防ぐ．

- 熱収縮チューブ
強く引いた際、ワイヤおよびシリコンチューブが周囲のシリコンを破断するのを防ぐ
- ねじ
ワイヤにテンションが掛かっていない際、指が接合部から抜けるのを防ぐ
- アクリル板
指のねじり方向への変形を抑制する
- ゴムシート
指の復元力を増加させ、ワイヤにテンションが掛かっていない際に指が規定の位置に戻るようする

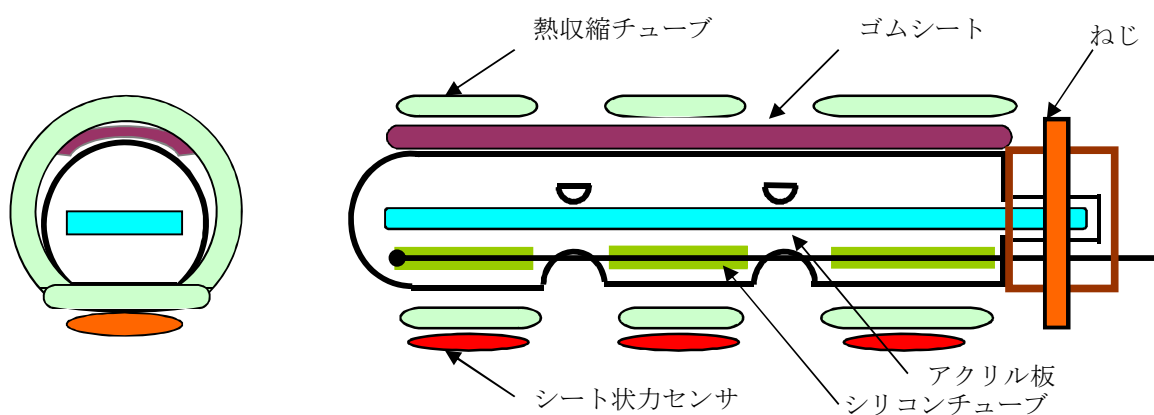


Fig. 2. 87 Structure of the finger of WSH-1RII

掌の付け根部分をシリコンで成形し、その上から人肌ゲルによる複合成形することで、インタラクションの際に物理的・心理的な悪影響を与えることなく、剛性の向上を図った。

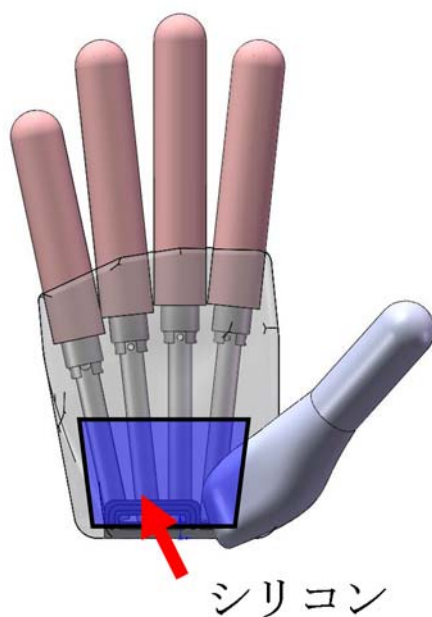


Fig. 2. 88 Structure of the palm of WSH-1RII

(2) 握力センサの搭載

WSH-1RII は握手時の握りの強さが触感に与える影響を評価することを目的として開発されている．そこで，ハンドの握力を制御するために握力センサとしてシート状力センサ FlexiForce[®]（ニッタ製，Fig. 2. 89）を搭載した．FlexiForce は各指腹の人肌ゲルの内側に配置されている（Fig. 2. 90，Fig. 2. 91）．また，この力センサを用いた指屈曲力制御のブロック線図を Fig. 2. 92 に示す．



Fig. 2. 89 Sheet-type force sensor FlexiForce[®]

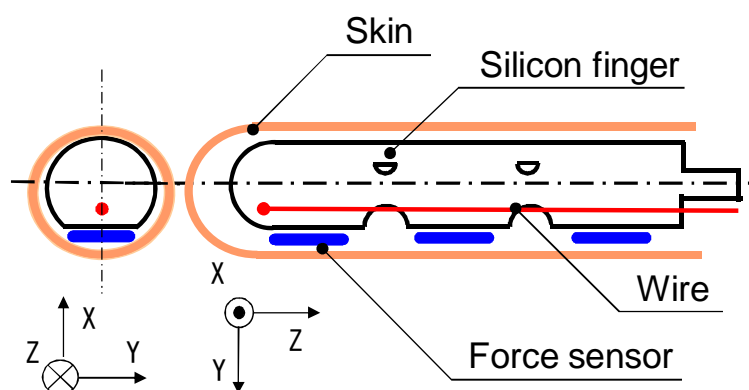


Fig. 2. 90 Mount positions of the force sensors in finger

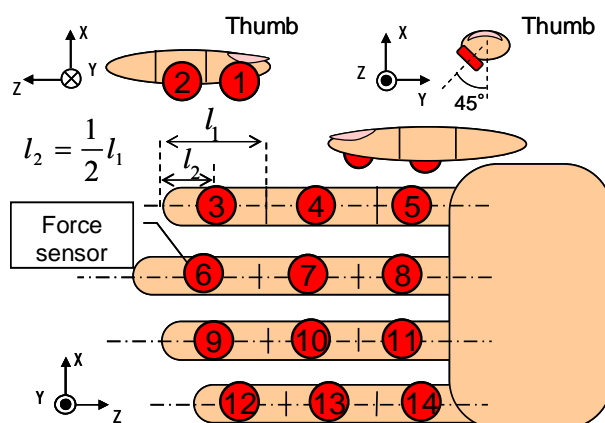


Fig. 2. 91 Mount positions of the force sensors in hand

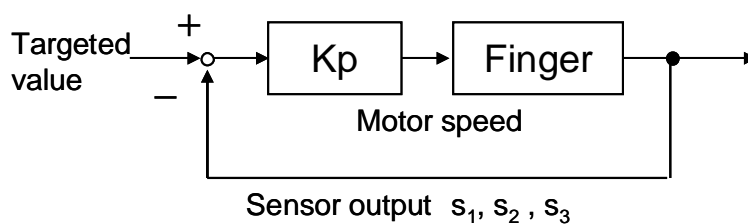


Fig. 2. 92 Control of bending force of the finger

(3) モータの再選定とテンションイコライザの改良

WSH-1RIIにて握手時の握力を調整するためにモータの再選定およびテンションイコライザの改良を行った。

まず、人間同士の握手においてどの程度の力が各指にかかるのか実験を行った。実験協力者（男性12名、平均年齢24歳）の手にFlexiForceを貼り付けられ（Fig. 2. 93.

貼付位置は Fig. 2. 91 と同じ), その人が思う「普通の握手」および「強い握手」を行った. そのときの各センサの計測値を Fig. 2. 94 に示す.

この計測値を元に式(2.1)を用いて各モータに必要なワイヤ張力を計算した (Table 2. 19). これにより, 親指の内転・外転用以外のモータは再選定する必要があることがわかった.

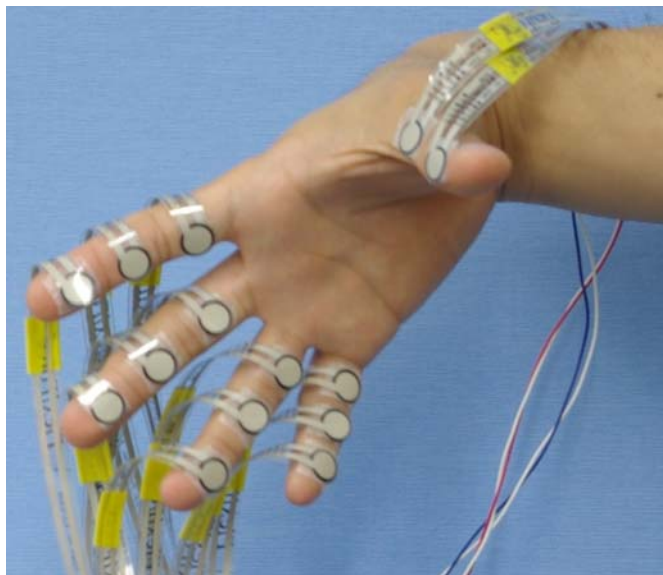


Fig. 2. 93 Mounting FlexiForce on human's hand

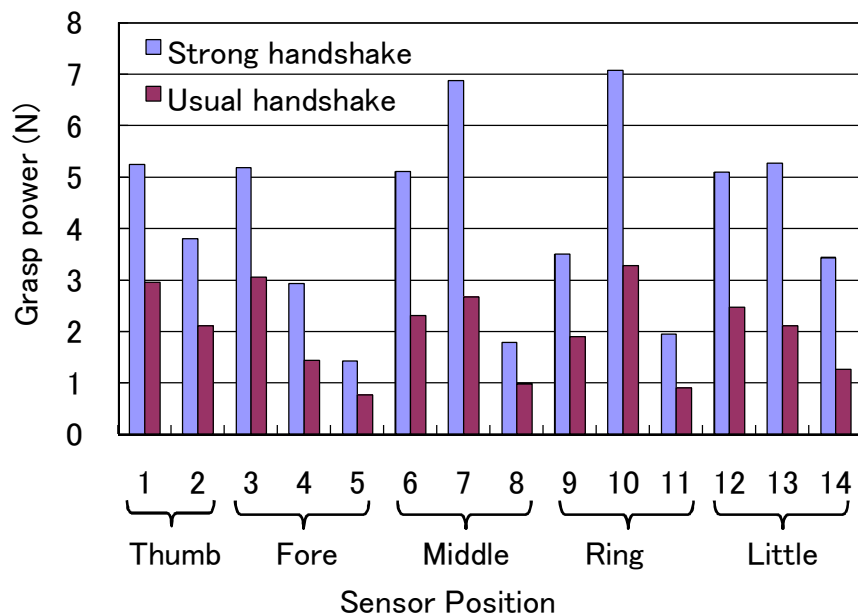


Fig. 2. 94 Grip strength of human's handshaking

Table 2. 19 Calculation of the wire tension

モータ番号	1			2	3	4
駆動自由度	親指 屈曲	薬指 屈曲	小指 屈曲	人差し指 屈曲	中指 屈曲	親指 内転外転
WSH-1/1R での発生張力 [N]	39.9	19.4	19.4	36.2	36.2	67.6
実験結果より計算された張力[N]	37.2	60.3	57.7	45.4	65.4	24.5
WSH-1RII での発生張力 [N]	57.4	86.1	86.1	50.7	67.8	67.6

親指・薬指・小指屈曲についてはテンションイコライザ機構の再検討が必要であった。というのは、Fig. 2. 84 の機構では、親指・薬指・小指の張力の分配が2:1:1となっていたが、実験結果ではおよそ2:3:3である。そこで、に示すように、2段プーリを用いたテンションイコライザ機構を用いることにした。

再選定したモータを Table 2. 20 に示す。また、この再選定によって各指で発生可能な張力は Table 2. 19 に付記している。なお、人差し指屈曲のための張力の変更は、モータの先に取り付けられたプーリ径の変更によるものである。

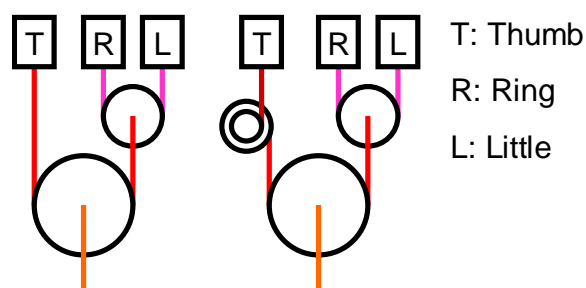


Fig. 2. 95 Mechanism of the tension equalizer of WSH-1RII

Table 2. 20 Motors used in WSH-1RII

	部位	モータ	減速比
1	親指・薬指・小指の屈曲・伸展	maxon RE25 20W	128:1
2	人差し指の屈曲・伸展	maxon RE-max 17 4.5W	84:1
3	中指の屈曲・伸展	maxon RE-max 21 6W	109:1
4	親指の内転・外転	maxon RE-max 17 4.5W	157:1

(4) 全体の構造

WSH-1R の全体図を Fig. 2. 86 に示す．重量は 1.3[kg]である．

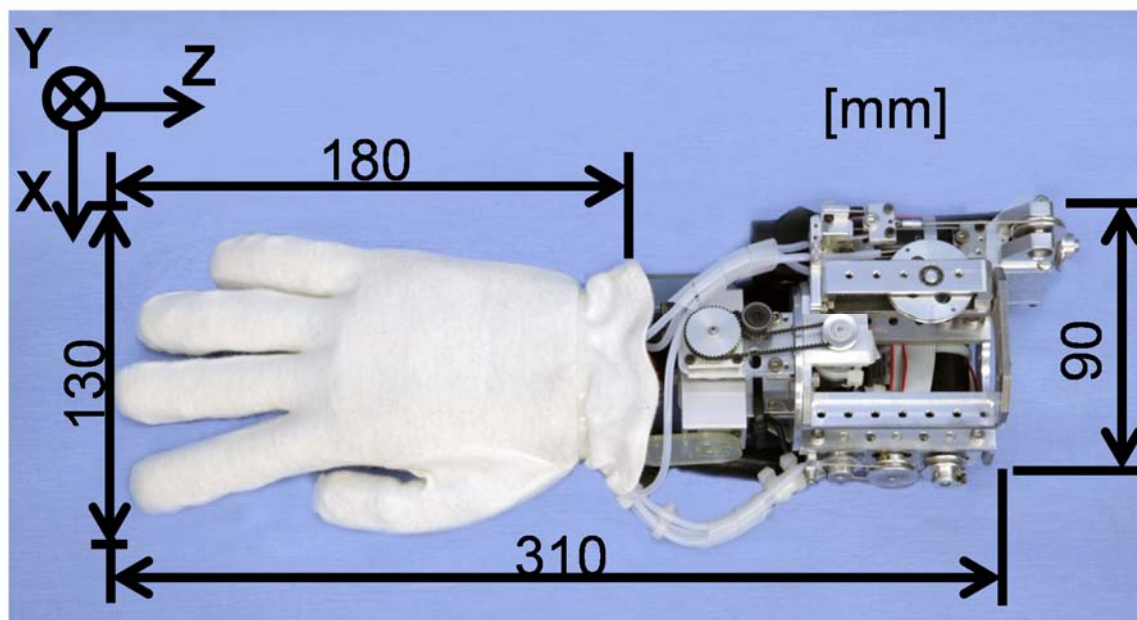


Fig. 2. 96 WSH-1RII

2.6 まとめ

本章では，本研究の実験用プラットフォームとしたロボット・システムの開発について述べた．

まず，全身情動表出ヒューマノイドロボット KOBIAN について説明する．これは，表情表出可能な頭部，人間同様の表現が可能な 7 自由度腕部，人間形ソフトハンド，人間同様の膝伸展 2 足歩行が可能な脚部を持ち，環境認識のために両眼にカメラを備える等身大のヒューマノイドロボットである．次に，この KOBIAN 頭部を改良し，情動表出能力を向上させた改良機 KOBIAN-R の開発について説明した．これらのロボットの基礎的な情動表出能力の評価については第 3 章で述べる．制御システムおよび制御プログラム構成についても説明した．多くの自由度を備え，それらを速い制御周期で制御し，実時間性を確保しながらも同時に高い開発性・メンテナンス性・拡張性を持つ制御系を開発した．

また，KOBIAN の下半身を脚式から車輪式に変更したヒューマノイドロボット HABIAN の開発についても説明した．これを用いた印象評価実験については第 5 章で

述べる.

さらに, 人間形ソフトハンド **Waseda Soft Hand** シリーズの開発についても説明した. このロボットハンドを用いた触感についての評価については第6章で述べる.

第3章 情動表出の評価

- 3.1 はじめに
- 3.2 情動表出とその評価手法
- 3.3 KOBIAN の表情
- 3.4 KOBIAN-R の表情
- 3.5 全身情動表出
- 3.6 まとめ

3.1 はじめに

本章では，開発した KOBIAN および KOBIAN-R の情動表出能力の基礎的評価について述べる．

第1章で述べたように，本研究では，人間とロボットのコミュニケーションにおいても，人間同士のコミュニケーションと同等の方法が有効である，という立場をとっている．

筆者は，人間同士のコミュニケーション手段の中でも特に，内部状態の表現に着目した．感情や意図といった内部状態が適切に伝達されることは，指示出しや協調的タスク遂行の上で重要な役割を担う，と考えられる．適切な内部状態の表現は，ロボットが人間の指示を認識できたかの成否や，ロボットがこれから行う行動の意図を如実に示すからである．

こうした工学的見地からだけではなく，内部状態の表現は心理的にも有効である．人間の身近で活動することになるロボットは，暗黙的にも人間のメンタルサポートを部分的に行うことになるだろう．その際には，人間の感情状態に合わせて，共感してみせるといったはたらきが有効になるのは明らかである．

3.2 情動表出とその評価手法

情動表出能力を評価するための手法として，感情認識率を用いた．感情認識率は，三輪の研究でも用いられており，ロボットの情動表出が実際に人間にとってどれくらいわかりやすいかを示す指標である．感情認識率は，主に視覚刺激を人間に提示し，それに対して人間がどのような表現として感じたかをアンケートに回答し，それを集

計することで得られる．式(3.1)に感情認識率の計算式を示す．

$$r(p_i, e_j) = \frac{N_{i,j}}{N} \quad (3.1)$$

ここで， p_i ：表出刺激（写真や動画）， e_j ：回答された感情， $N_{i,j} : (p_i, e_j)$ ：の回答数， N ：被験者人数である．

3.3 KOBIAN の表情

3.3.1 評価実験の目的

WE-4 に比べて KOBIAN では，表情表出のための自由度を大幅に減少させたので，表情表出能力の低下が考えられた．その表出能力低下および要求として設定した喜びと困惑の表出が可能であるかを評価した．

3.3.2 評価実験の方法

KOBIAN の設計の際には，目標の表情パターンを厳密には定めなかったため，ある表情が，筆者の仮定する感情を十分に表現できない可能性があった．そこで本実験では，ロボット頭部の表情表出部（口，上脛，眉）のそれぞれの可動範囲内で特徴的な点を定義し，それら離散化された点の組み合わせ表情を網羅的に作成し，被験者には，無感情表出写真 1 枚と評価対象となる表情表出写真 1 枚を同時に提示し，選択肢（「怒り」，「喜び」，「驚き」，「嫌悪」，「悲しみ」，「恐れ」，「困惑」，「その他」）の中から最も相応しいと感じるものを選択してもらった．これを，作成した全ての写真について行なった．比較のため，WE-4 の 6 表情についても同様に調査した．写真を提示する順番は実験参加者毎にランダムとした．

この評価実験は百名以上を対象としたため，その実施においてできるだけ効率的な方法が求められた．また，本調査では，調査方法として，ランダムな順番で提示される十数～数十枚の表情表出写真それぞれに対して，無感情表出写真と比べてどのような感情を表出していると思われるか直感で回答してもらう必要があった．

これを紙媒体で行なう場合，対象者数が多いために回答用紙が莫大な枚数になってしまうこと，ランダムな順番にするために印刷するファイル数が人数分必要となるこ

と、データ入力に莫大な手間とコストを要することが問題となる。

そこで、Web アンケートシステムを開発し、これを用いることで、これらの問題を解決した。この Web アンケートシステムについては附録にて説明する。

3.3.3 実験日程と 実験参加者

この実験は2007年9月8日から11日の間に行なわれた。

実験参加者は、早稲田大学の学生・院生・助手ら計127名（男性118名，女性9名）であった。平均年齢は23.2歳であった。

3.3.4 提示表情

提示した WE-4 の表情表出写真を Fig. 3. 1, KOBIAN の表情表出写真を Fig. 3. 2 に示す。

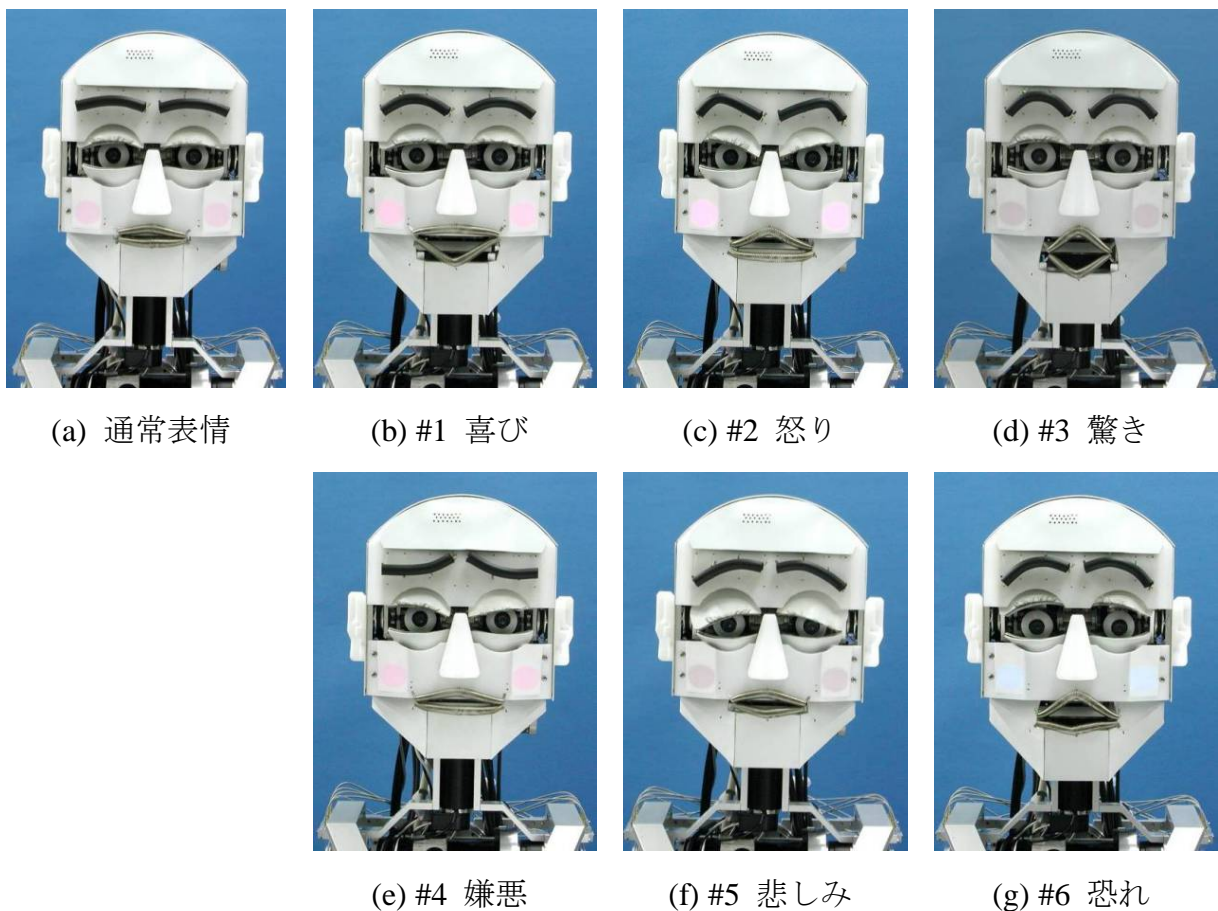


Fig. 3. 1 Facial expressions of WE-4



Fig. 3. 2 Facial expressions of KOBIAN (1/2)

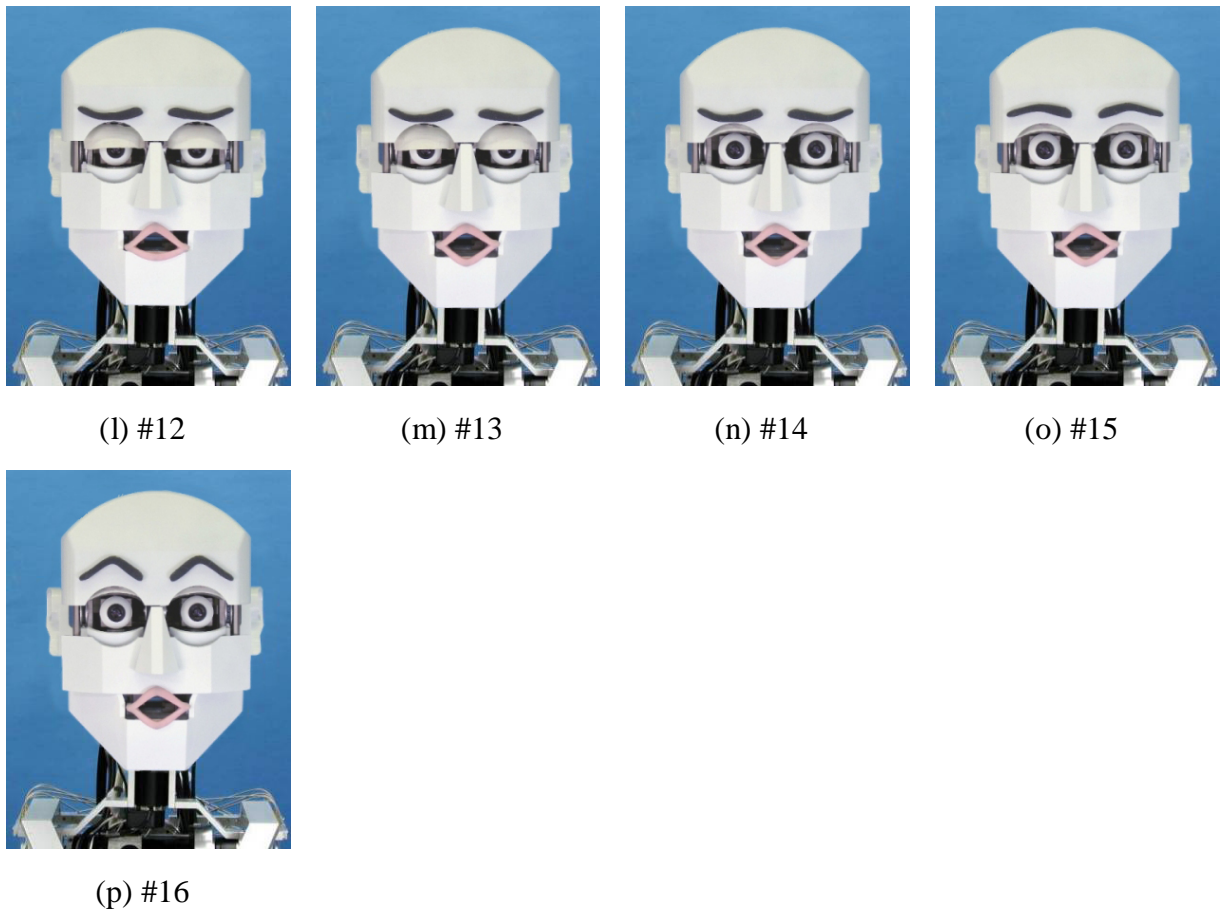


Fig. 3.2 Facial expressions of KOBIAN (2/2)

3.3.4 結果

結果を Table 3. 1 に示す. 各感情について, 最も多くの回答を獲得した表情を, その感情を表出する表情とし, これについてのグラフを Fig. 3. 3 に示す.

全体として, KOBIAN に認識率は低く, WE-4 に比べて, 被験者の受ける印象が分散している.

今回のロボットの要求表情の一つである「喜び」については, 68%となり 26 ポイント低下した. 「驚き」については, 84%となり 5 ポイント低下した. 「困惑」については, 最高で 46%であるが, WE-4 のではそれよりも格段に低い. そもそも Fig. 3. 1 (e) は, 開発時に行った評価実験では「嫌悪」が 75%だったものである. その評価実験では写真の提示が 6 枚一度であり, 選択肢に「困惑」はなかった.

各感情の, 最も高い認識率を獲得した KOBIAN の表情を Fig. 3. 4 に示す.

Table 3. 1 Facial expression recognition rates of WE-4 and KOBIAN

	anger	happiness	surprise	disgust	sadness	fear	perplexity	other
WE_1	0.00	94.57	2.33	0.00	0.00	0.00	0.78	2.33
WE_2	97.67	0.00	1.55	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00
WE_3	0.00	9.30	87.60	0.00	0.00	0.78	0.78	1.55
WE_4	16.41	0.00	0.78	14.06	28.13	6.25	28.13	6.25
WE_5	0.00	0.00	0.00	1.55	77.52	0.00	9.30	11.63
WE_6	0.00	2.34	42.97	8.59	13.28	10.94	15.63	6.25
KOB_1	2.34	6.25	65.63	0.00	0.00	0.00	2.34	23.44
KOB_2	9.30	0.00	0.00	39.53	1.55	0.00	4.65	44.96
KOB_3	3.10	0.00	6.20	7.75	24.81	8.53	44.19	5.43
KOB_4	7.75	0.00	0.00	62.79	6.98	0.00	13.18	9.30
KOB_5	6.98	1.55	0.00	47.29	1.55	1.55	17.05	24.03
KOB_6	0.00	70.31	21.09	0.00	0.00	0.78	0.00	7.81
KOB_7	3.88	2.33	1.55	31.01	0.78	0.00	5.43	55.04
KOB_8	1.55	34.11	6.20	7.75	0.78	0.00	2.33	47.29
KOB_9	0.78	57.36	39.53	0.00	0.00	0.00	0.00	2.33
KOB_10	11.63	0.00	0.78	46.51	0.00	0.00	3.88	37.21
KOB_11	9.30	0.00	11.63	10.08	11.63	7.75	41.86	7.75
KOB_12	7.75	0.00	0.00	66.67	2.33	0.00	11.63	11.63
KOB_13	9.30	0.00	0.00	65.12	4.65	0.00	10.08	10.85
KOB_14	11.63	0.00	9.30	12.40	8.53	10.08	42.64	5.43
KOB_15	0.00	12.40	77.52	0.00	0.00	0.00	0.78	9.30
KOB_16	2.33	11.63	84.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.55

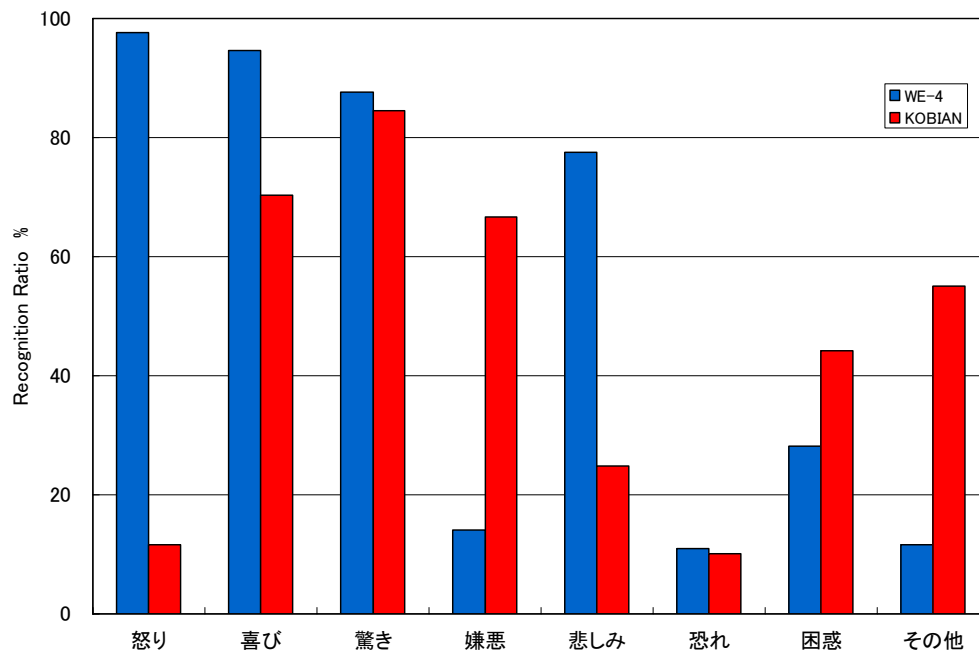


Fig. 3. 3 Facial expression recognition rates of WE-4 and KOBIAN

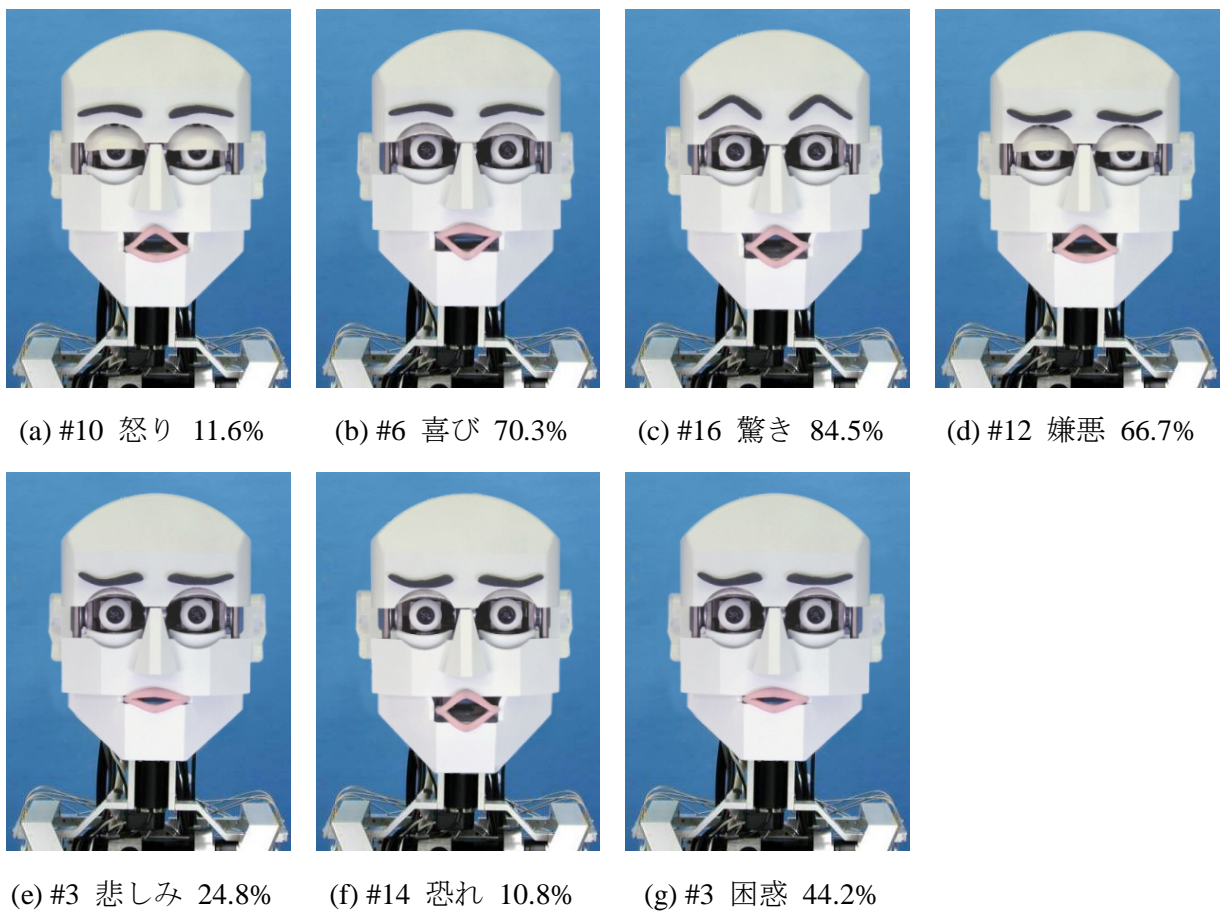


Fig. 3. 4 KOBIAN's Facial expression that have the highest recognition rate

3.3.5 考察

この評価実験では、あくまで写真を用いた場合の静的な表情の認識率の差が明らかになっただけで、動きや音声、腕、全身といった他の伝達手段を併用すれば、さらに認識率は高まると考えられる。

また、この被験者は若い理工系の学生であり、この結果をそのままロボットの評価とするのは早計である。

今回のロボットの表情の機械的な自由度の削減については前述したとおりであるが、さらに顔色表出を無くしている。「喜び」の認識率が落ちたのはこれらが原因であると考えられる。

(A) 困惑

「困惑」の認識率は低いが、そもそも困惑という感情自体が人間の基本的な感情に含まれることが他研究においても少ないこと、また、困惑の生じる状況というのは認識の失敗の場合であり、前後の文脈（コンテキスト）の影響を強く受けることが、この一因になっていると考えられる。

WE-4 に比べて KOBIAN の方が「困惑」の認識率が高いが、WE-4 開発時にはこの表情が要求仕様に入っていないとなく、また、KOBIAN のように各自由度の特徴点を網羅的にカバーする表情群を提示していないことが原因であると考えられる。

(B) 怒り

Fig. 3.3 (a) において、WE-4 と KOBIAN の「怒り」の認識率の差は他に比べて格段に大きい。これは、第2章において述べたように、KOBIAN の目的とする使用状況において、この感情表出の必要性が無くて、設計時にこの感情の表情を度外視したため、特徴を網羅的にカバーした表情群の中でも高認識率を獲得する表情が無かった、と考えられる。

また、KOBIAN において削減した自由度が「怒り」の表情表出のために特に重要なものであるかもしれない、ということが示唆される。

(C) 嫌悪

WE-4 の「嫌悪」写真 (Fig. 3.1(e)) は、開発時の評価実験では 81.3% を獲得してい

たのにも関わらず、本評価実験では、上位から順に、「悲しみ」・「困惑」ともに 28.13%、「怒り」 16.41%、「嫌悪」 14.06%（WE-4 の嫌悪認識率最高得点）となり、回答のばらつきが大きい、即ち、感情を認識されづらい表情である、という結果が得られた。

この点に関して、前回と今回の実験方法と違いは最も注目されるべきである。前回では、通常表情表出写真 1 枚と各表情表出写真 6 枚が同時に実験協力者に提示され、それぞれに対して、選択肢（怒り・喜び・驚き・嫌悪・悲しみ・恐怖・その他）を当てはめていく、という形式であった。それに対して今回は、各表情表出それぞれが、通常表情表出写真と同時に提示され、選択肢（怒り・喜び・驚き・嫌悪・悲しみ・恐怖・困惑・その他）を当てはめていく、という形式であり、各表情表出写真が全て同時に提示されることはなかった。

つまり、前回の実験方法では、その他を除く選択肢 6 つに対して、各表情表出写真 6 枚が同時に提示されているので、実験協力者が意識的にせよ無意識的にせよ、選択肢と各表情表出写真が 1 対 1 対応すると捉えてしまった可能性がある。加えて、前回の実験協力者は高西研究室の学生のみであったため、同研究室であることの様々な人間心理的・社会的影響があった可能性が考えられる。

(D) 表情各部の影響

眉毛を上げ、上瞼を開いた表情では、「驚き」と認識されることが多い。上瞼を閉じ気味にしたときは「嫌悪」が多い。眉毛をしかめて上瞼を開いたときは「困惑」が多い。このような傾向が見られる。

そこで、このような表情各部と感情認識率の関係を調べるために、数量化 I 類を用いて分析を行なった。

数量化 I 類とは、説明変数にカテゴリ変数を用いる場合の重回帰分析であり、カテゴリ変数である説明変数により、連続変数である従属変数がどの程度説明されるのかを定量的に分析する解析手法である。

本実験においては、説明変数として、口形状（「—」、「▽」、「△」、「◇」）、上瞼の見開き具合（閉じ気味、通常、見開き）、眉形状（通常、谷形、山形）の 3 変数を、従属変数として、各感情についての認識率を用いた。

数量化 I 類では、重回帰分析と同様に、重相関係数（ R ）、決定係数（ R^2 ）、補正決定係数（ R'^2 ）、偏相関係数が得られる。これらについて次で説明する。

重相関係数 R :

回帰式で予測される値と実際の観測値との相関係数を意味し、絶対値が 1 に近

いほど当てはまりの良い回帰式が得られたということがわかる。

決定係数 R^2 :

回帰式の説明率を表し，従属変数が説明変数による回帰式で説明できる割合を示す。

補正決定係数 :

決定係数は統計における自由度が多くなると増加するという特徴を持っており，これを補正したもの。

偏相関係数 :

ある説明変数と従属変数の相関で，他の説明変数の影響を除去した場合のもの。

数量化 I 類による解析結果を Table 3. 2 に示す。

Table 3. 2 Result of quantification method I

感情	補正決定係数	偏相関係数		
		口	上脛	眉
怒り	0.40	0.59	0.59	0.46
喜び	0.41	*0.72	0.60	0.36
驚き	0.69	*0.64	0.72	**0.85
嫌悪	0.94	0.61	**0.98	**0.82
悲しみ	0.54	*0.64	0.72	**0.83
恐怖	0.52	0.21	**0.80	**0.82
困惑	0.64	0.38	0.76	**0.89

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

先の各係数のうち，重相関係数と決定係数については付録で示し，ここでは特に重要な補正決定係数と偏相関係数について記載した。

今回の調査において，補正決定係数が意味するのは，各感情認識率に対する表情の影響の寄与率であり，簡単に言えば，各感情認識率について，その予測回帰式によって説明できる割合の程度である。偏相関係数が意味するのは，各感情認識率の程度と，表情各部の相関である。

p 値が意味するのは，「表情各部の形状と各感情認識率の程度の相関は 0 である」という帰無仮説を棄却するときの危険率である。ただし，これは（統計における）自由度を増やすと容易に少なくすることができるので注意しなければならない。

さて、補正決定係数および偏相関係数ともに、「怒り」の認識率などでまずまず高めの値が得られているが、これは、Fig. 3. 3で見られるような表情認識率の低さと照らし合わせると不自然である。これは、数量化I類の適用において、表情認識率の絶対的な大きさではなく、その値の範囲内での認識率の程度を従属変数と用いていることに起因する（回帰式が値の範囲において求められるので、予測値と実測値の相関自体は高くなる）。回帰式が正しく求められても、これは認識率という絶対的な基準から見て有用ではない。そこで、補正決定係数および偏相関係数に対し、表情認識率をかけることで、表情認識率に対する、表情各部の形状による影響を見積もることができるのではないか、と考えた。Table 3. 3にこの結果を示す。

Table 3. 3 Result of quantification method I (corrected)

感情	補正決定係数	偏相関係数		
		口	上脛	眉
怒り	0.05	0.07	*0.07	*0.05
喜び	0.29	*0.50	*0.42	*0.25
驚き	0.58	*0.54	*0.61	**0.72
嫌悪	0.63	0.41	**0.65	**0.55
悲しみ	0.13	*0.16	*0.18	**0.21
恐怖	0.05	0.02	**0.08	**0.08
困惑	0.28	0.17	*0.33	**0.39

*p<0.05, **p<0.01

Table 3. 2 では、補正決定係数（寄与率）により予測回帰式の有用性が、偏相関係数により表情各部との相関が示されていたが、これに認識率の程度という絶対的な基準を考慮することで得られた Table 3. 3 では、補正決定係数（寄与率）により表情認識率に対する表情の有用性が、偏相関係数により感情認識率と表情各部それぞれとの相関が示された、と考えられる。

補正決定係数を見てみると、KOBAN の表情は、特に「驚き」と「嫌悪」の感情表出について効果を持つことがわかる。それらより劣るが、「喜び」と「困惑」についても弱いながらも効果を持つと言える。

偏相関係数を見ると、口形状と上脛の開き方が「喜び」の認識のためには重要であり、「驚き」・「嫌悪」の認識のためには口・上脛・眉の全てが重要であり、「困惑」の認識のためには上脛・眉が重要であることが示唆される。

3.3.6 本節のまとめ

この節では、KOBIAN の表情表出能力について評価した。

KOBIAN は WE-4 に比べて、全体的に表情表出能力が低下したが、WE-4 よりも向上した感情も中にはみられた。KOBIAN で特に低かった感情は、設計時に意図されていなかったためと考えられる。

KOBIAN の表情作成はパラメータを網羅的に設定したので、数量化 I 類による回帰分析を行った。これにより、表情各部の形状が認識率に影響する度合いを導出した。

WE-4 の表情について、その開発時に行なわれた調査よりも認識率が大幅に低下しているものがあるが、これは実験協力者の違いに依拠すると考えられる。

この実験により、WE-4 のように人間の表情を参考につくられても、必ずしも十分な認識率を得られるわけではないことが示唆される。そこで、この KOBIAN 頭部の改良においては、第 2 章で示したように、モデル表情の綿密な検討を設計前に行なうこととした。

3.4 KOBIAN-R の表情

前節で示したように KOBIAN の表情表出は十分なものとは言えなかった。そこで、第 2 章で示したプロセスに基づき、モデル表情を選出し、これを実現する頭部を開発した。

ここでは、この KOBIAN-R 頭部の評価実験について説明する。

3.4.1 評価実験の目的

この評価実験の目的は、KOBIAN-R 頭部の表情表出能力の評価である。

また、これまで表情表出能力の評価は静止画によって行われていたが、実際にロボットが活動する状況では、ロボットは常に動作し続けているので、動画による評価も行うこととした。

3.4.2 評価実験の方法

(A) 静止画

WE4-R11, KOBIAN, KOBIAN-R の写真およびアマチュア漫画家作成のCG それぞれにつき1枚の「無感情」の表情と、6枚の各感情の表情を用意した。それぞれの感情の表情は「無感情」の表情を参考に横に示し2枚セットで実験協力者に提示され、実験協力者ごとにランダムな順番にして回答してもらった。実験に用いた表情表出写真について、WE-4のものはFig. 3.1と、KOBIANのものはFig. 3.4と同じである。KOBIAN-RのものはFig. 3.5（漫画家作成のCG表情）とFig. 3.6（写真）に示す。

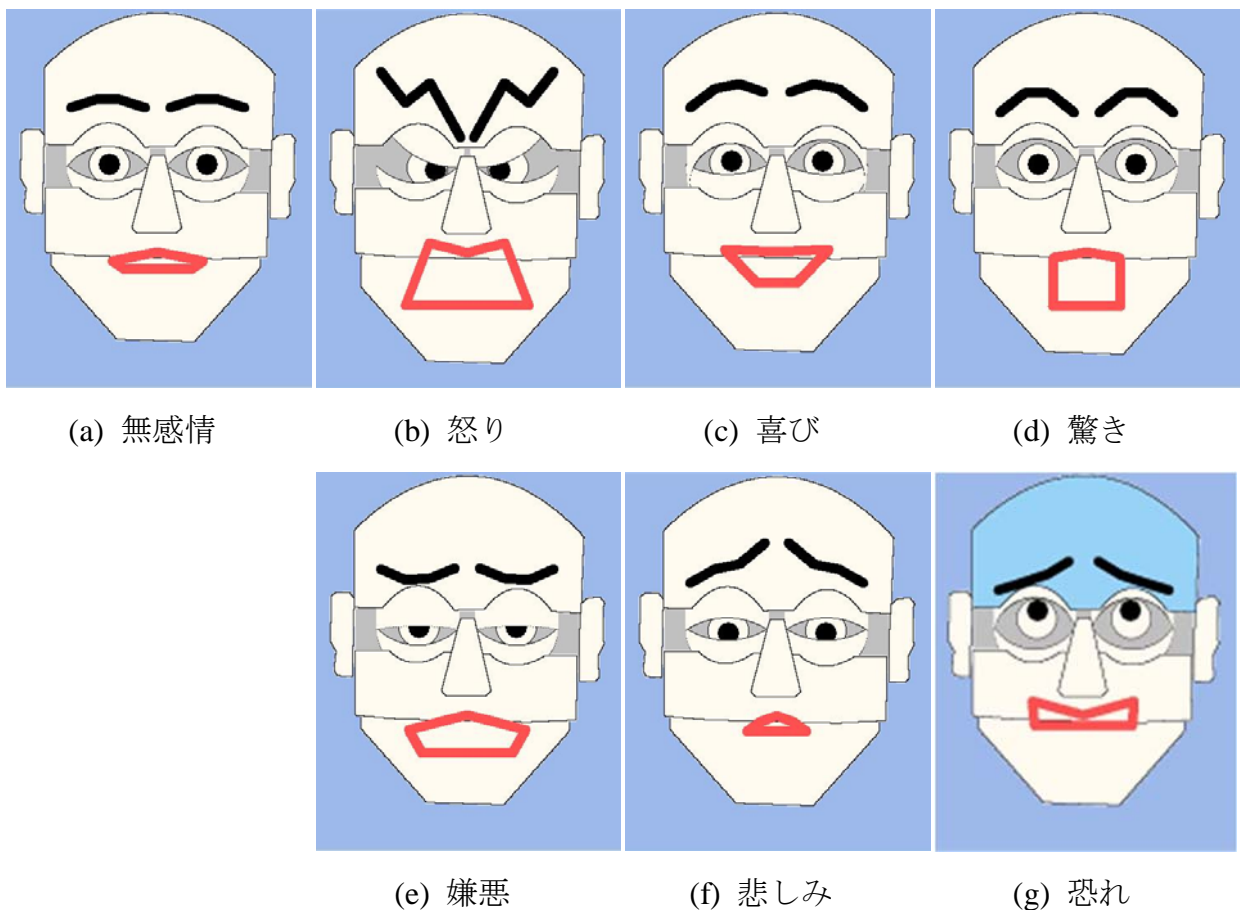


Fig. 3.5 Cartoonists-made facial expression CGs of KOBIAN-R

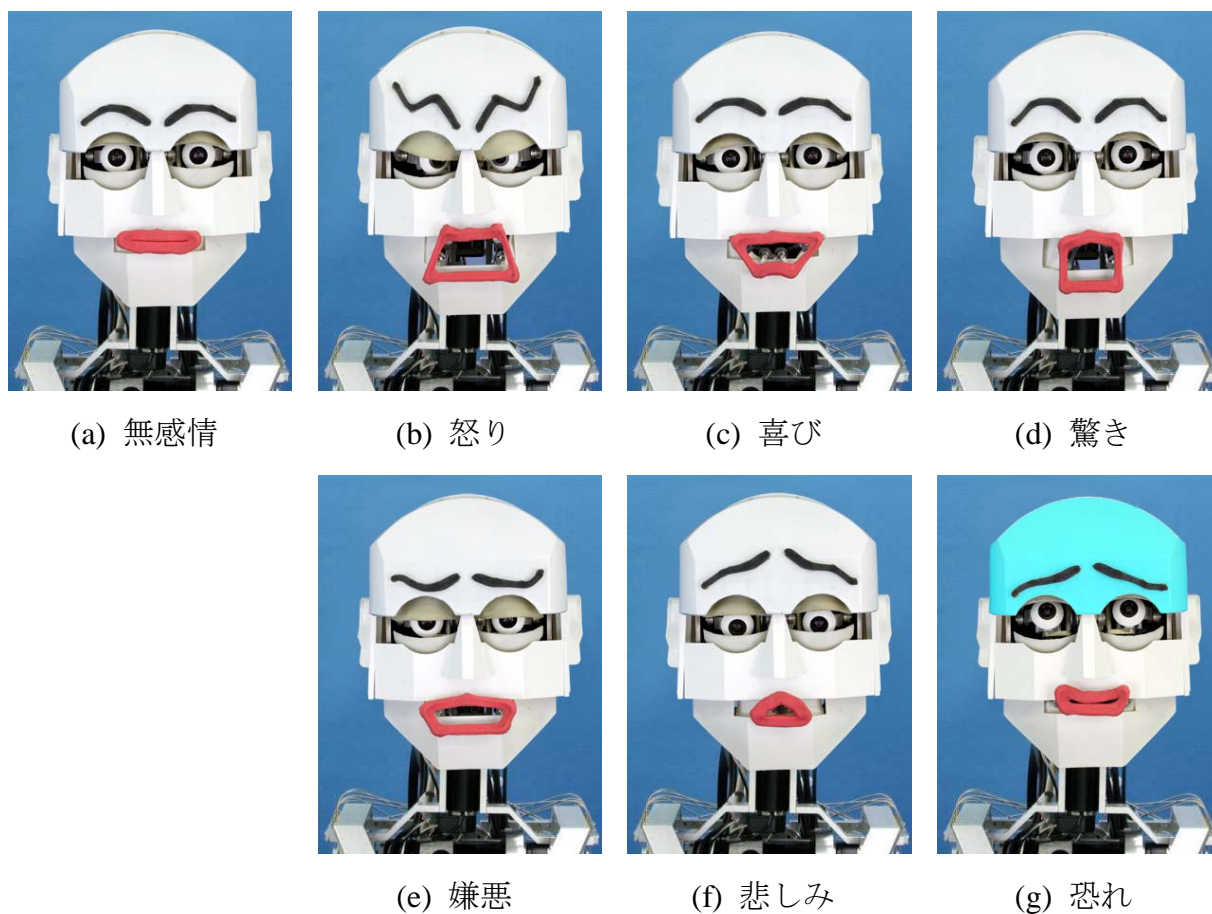


Fig. 3. 6 Pictures of facial expressions of KOBIAN-R

(B) 動画

実機に搭載された際、各表情は動的に表出される。動的な表出と静止画の印象はどの程度異なるのかを調査するため、「無感情」の表情から各感情の表情に 300[ms] の間に移行する動画を用い、表情認識率の評価実験を行った。

3.4.3 実験参加者

実験参加者は、早稲田大学の学生ら計 27 名（男性 25 名，女性 2 名）であった。平均年齢は 20.3 歳であった。

3.4.4 結果

(A) 静止画

実験の結果を Fig. 3. 7 に示す.

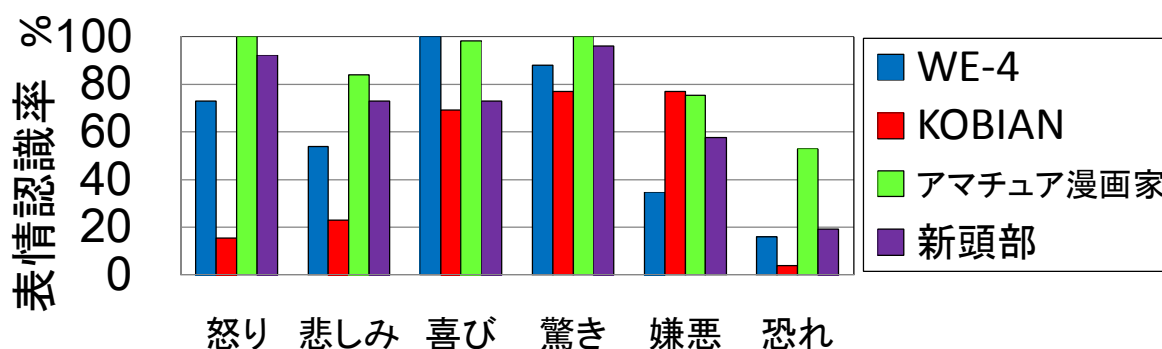


Fig. 3. 7 Comparison of facial expression recognition rates among WE-4, KOBIAN, CGs by cartoonists, and KOBIAN-R

この実験の結果、KOBIAN-R 頭部の表情認識率は KOBIAN 頭部に比べ高いことがわかったが、「恐れ」の感情についてはアマチュア漫画家作成の CG より低い認識率しか得られなかったことがわかる。それぞれの感情を見てみると、「怒り」の認識率は KOBIAN 頭部が 15.4% であるのに対し KOBIAN-R 頭部は 92.3% と約 75% 上昇した。「悲しみ」の認識率は 73.1% で、50% 近く上昇した。「驚き」の認識率は 96.2%、「嫌悪」の認識率は 57.7% であったが、これらは KOBIAN 頭部とほぼ同程度だった。一方で、「恐れ」においてはアマチュア漫画家作成の CG の認識率が 53.0% であったのに対し、実機の認識率は 19.2% しか得られず、35% の下降となった。これに加え、Fig. 3. 6 (g) は「恐れ」を意図して表出されたものだったが、実際には「その他」の認識率が最も高かった。この原因として、CG と実機との差異が考えられる。具体的には、CG には存在していない陰影、隙間から見える機構などの要素が影響したことにより、アマチュア漫画家の意図が十分に伝達されなかったためと考えられる。アマチュア漫画家の意図をさらに効果的に得るためには、アマチュア漫画家に実機を用いて表情を作成してもらう方法が考えられる。

(B) 動画

実験の結果を Fig. 3. 8 に示す.

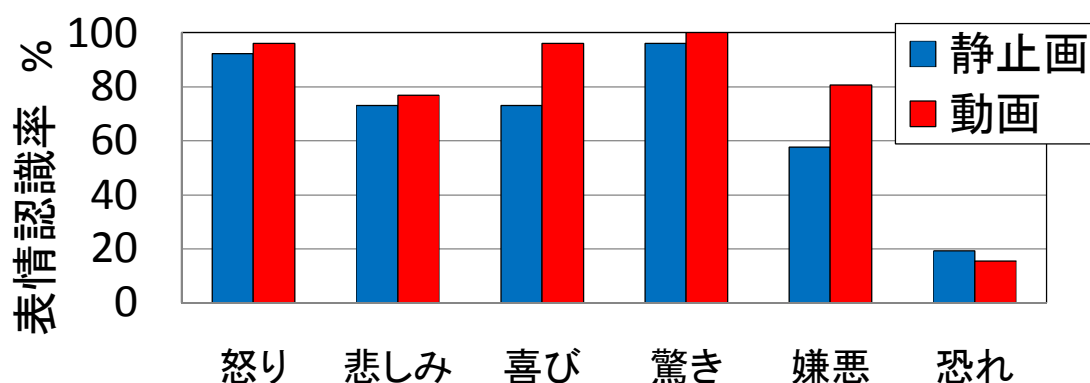


Fig. 3. 8 Comparison of facial expression recognition rates between pictures and videos

実験の結果、動画による表情認識率は、「喜び」と「嫌悪」において、特に静止画より高くなった。「無感情」の表情と比較して、顔面各部のどの部分がどの程度変形したか、という情報が変化の過程を伴って示され、静止画より明確になったことで、各表情の詳細を読み取りやすくなったためであると考えられる。

3.4.5 考察

一部の表情に関して、表情認識率がアマチュア漫画家の方の作成した表情に届かなかった理由として考えられることは、以下の4つが挙げられる。

- ・ 口唇の成形の問題
- ・ 上瞼の形状の問題
- ・ 影の発生の問題
- ・ 額の色の問題

最も大きな理由として考えられることは、口唇の成形の際に原型の形が悪く、口唇がすべての辺で原型から伸展する方向で形を作られず、「喜び」については下唇幅、「無感情」については左右端の口唇が収縮方向で形を作る状況となっていたことが原因と考えられる。

今後再実験を行い、原型をすべての口唇の辺の最短の組み合わせで構成することで、すべての表情を正しく表出できる口唇を成型する必要がある。

次に、上瞼の形状がある、上瞼の形状は表情作成ソフトにおいては、干渉などを考えずに表情が作成できたため、「喜び」の表情においては、上瞼の外側の終端が下瞼の終端に乗り上げたような形状が見られた。これは実物のハードウェアでは干渉によ

り実現が困難であるという問題がある。

また、表情作成ソフト上の表情は2次元だったため影の影響が無いが、今回実際のハードウェアを製作した際に3次元となったことで発生した影が影響している可能性もある。

さらに、額を「恐れ」の表情の際青く変化させるための無機ELシートには発光前から色が付いており、見る角度によっては発光前から額が少し青く見えることも影響している可能性がある。これについては、無機ELシート上面のシートの材質を変えたり、シートの枚数を増やしたりすることで対応する必要がある。

また、この実験では表情の評価を正面からのみしか行わなかったが、顔は正面だけでなく、斜めから見ることによって印象が変化することは先行研究より指摘されているため、これがKOBIAN-R 頭部についても当てはまるかを確認するため、今後は斜め方向からの評価も実施する必要がある。

3.3.6 本節のまとめ

この節では、KOBIAN-R の表情認識率について評価した。

KOBIAN-R の認識率は全体的に向上しており、第2章で説明したモデル表情選出手法の有効性を支持するものであると考えられる。

また、動画において表情認識率の変化がみられたことは、感情によって表情表出の速度や軌道を変化させることで、認識される表情表出の度合いを変えられる可能性を示唆すると考えられる。

3.5 全身情動表出

KOBIAN の全身を用いた情動表出パターンの作成と評価を行なった。

この節は、2つの評価実験によって構成される。

1. 自作の情動表出姿勢についての評価
2. 表現についての職能を持つ者が作成した情動表出姿勢についての評価

このプロセスの下に、KOBIAN の全身での情動表出パターンが決定された。

3.5.1 自作の情動表出姿勢についての評価

(1) 評価実験の目的

この評価実験の目的は、KOBIAN の表情単体での情動表出に比べて、全身を用いた情動表出がどのような効果を持つのか、を明らかにすることである。

(2) 評価実験の方法

この実験を行う際に、どのような全身情動表出姿勢が各感情を表現するのに適切であるかが不明であった。そこで WE-4RII の上半身のみでの情動表出姿勢を参考に下半身を含めた情動表出姿勢を作成した。

また、各感情の姿勢について、対応する表情表出をしているものと、していないものを含めた数種の写真を作成した。3.3 で得られた表情単体の情動表出と併せて、表情単体、姿勢単体、表情+姿勢の3水準それぞれについてのデータが得られることになる。

実験で提示された各写真については附録に示す。写真のため各姿勢がわかりづらくなることを考慮し、左斜めから撮影した写真も同時に提示した。また、俯いた姿勢などでは表情が読み取りづらくなることを考慮し、表情をわかりやすい方向から頭部を撮った写真も同時に提示した。

実験参加者は早稲田大学の学生および助手 30 名（男性 29 名、女性 1 名）であり、平均年齢 26.0 歳であった。

(3) 評価実験の結果

実験結果のうち、各感情表出姿勢+感情表出表情がどの程度の認識率を獲得したかの表などは附録で示す。ここでは、各感情についての最高認識率を表情のみの場合と比較して Table 3.4, Fig. 3.9 に示す。

Fig. 3.9 を見ると、全体的に感情認識率が高くなっていることがわかる。特に、「怒り」、「悲しみ」、「恐怖」、「困惑」といった、表情のみでは高認識率を得られなかった感情について著しい。ただ、「喜び」については逆に低下した。

感情全体で、認識率は平均で 33.5 ポイント増加した。

Table 3. 4 Comparison of recognition rates between facial expression and whole-body emotion expression

	表情のみ	体のみ	表情+体
怒り	12.8	40.0	77.3
喜び	68.4	20.0	40.0
驚き	84.3	71.4	100.0
嫌悪	65.0	60.0	93.3
悲しみ	26.5	80.0	93.3
恐れ	8.6	20.0	60.0
困惑	46.2	53.3	86.7

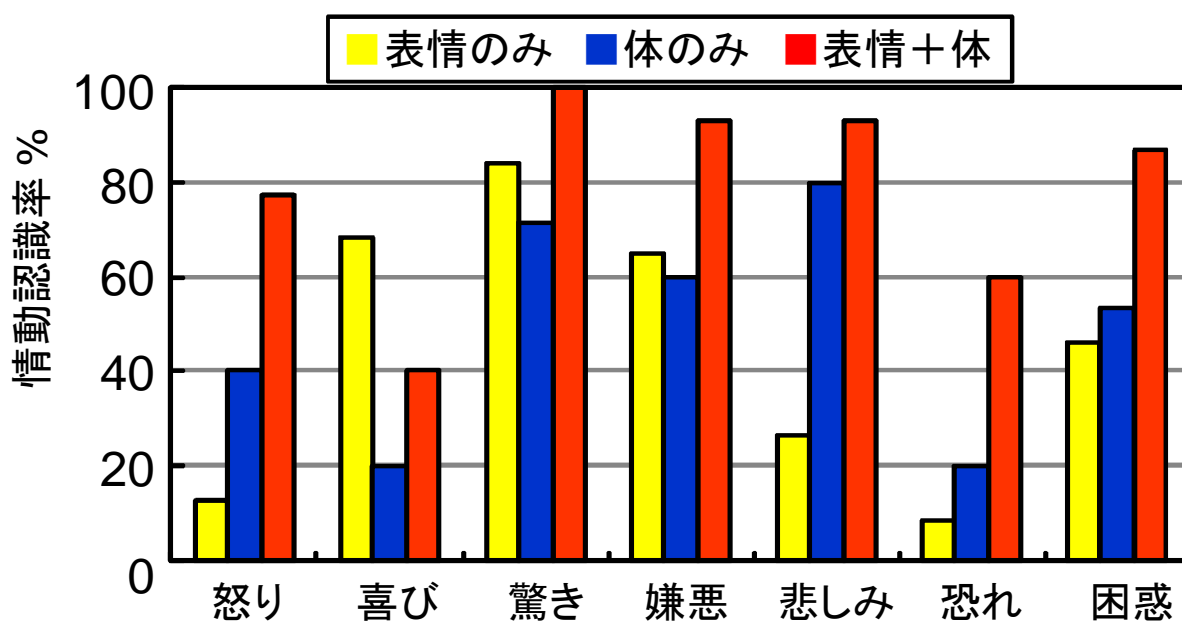


Fig. 3. 9 Comparison of recognition rates between facial expression and whole-body emotion expression

(4) 考察

全体として感情認識率が向上したことから、全身による感情表出が、人間の認識にとって重要であると言える。

「怒り」については、そもそも表情のみではとても認識率が低かったが、全身の姿勢とネガティブな表情の組み合わせにより、高認識率を獲得した。このことにより、

怒りを伝達するのに全身の姿勢が有用であると言える。

「喜び」については、表情のみの場合の認識率よりも低下してしまった。驚きと認識されてしまうことが多かったことから、表出姿勢として相応しくないものを選んでしまった恐れがある。言い換えれば、驚き成分の多い表出姿勢を作成してしまったということである。

「驚き」については、もともと表情のみでも認識率が高かったが、さらに全身の姿勢を組み合わせることで、確実な伝達が可能となった、と言える。ただ、無感情表出表情の場合も高認識率を得ているので、全身のみの表出でも有用である、と言える。

「嫌悪」については、驚きと同様に表情のみでも認識率が高く、全身の姿勢と組み合わせることでさらに確実な伝達を可能とした、と言える。

「悲しみ」は、全身の姿勢による表出と組み合わせることで、最も認識率が向上した。無感情表出表情の場合も高い認識率を得られているので、特に全身の姿勢が重要であると言える。

「恐れ」については、全身の姿勢による表出と組み合わせることで認識率が向上した。さらに、無感情表出表情の場合は「その他」と認識されることが多かったことから、姿勢のみではなく、表情と姿勢の組み合わせで効果を持つと言える。

「困惑」については、表情のみでも低くはなかったが、全身の姿勢との組み合わせで向上した。無感情表出表情との組み合わせの場合は認識率が53.3%に落ちていることから、表情のみもしくは姿勢のみでも有用であるかもしれないが、表情と姿勢の組み合わせによって確実な伝達が可能になった、と言える。

全体として、認識率が向上したことにより、ロボットの全身を用いた情動表出の有効性が示唆された。ただし、この評価実験では実験協力者数が少なく、また属性も偏っているため、早急な予断は禁物である。今後さらに対象者を広げて評価すれば、これらの傾向がより明確に現われてくると考えられる。

(5) 本節のまとめ

この項では、ロボットの全身情動表出が情動認識率の向上にどの程度寄与するかを評価した。

特に、「怒り」、「悲しみ」、「恐怖」、「困惑」といった、表情のみでは高認識率を得られなかった感情について、認識率の向上が顕著であった。一方で、「喜び」については逆に低下してしまった。

また、感情によって、表情が支配的であるもの、逆に全身の姿勢が支配的であるもの、さらには両者の組み合わせで効果を発揮するものがあることが明らかになった。

しかしながら、全ての感情について十分な認識率を得ているとは言い難い。そこで次項では、表現についての職能を持つ専門家に全身での情動表出姿勢を作成してもらい、それを評価する。

3.5.2 表現についての職能を持つ者が作成した情動表出姿勢についての評価

(1) 評価実験の目的

前項の実験においては、十分な情動認識率を得ていない感情があり、また、その作成方法も作成者である筆者の感覚に拠っていると言える。

そこで、より表現についての専門的職能を持っているとされる方々に情動表出姿勢の作成を行なってもらい、情動表出能力の向上を図ることにした。

(2) 評価実験の方法

情動表出姿勢の作成については、漫画家の大窪宏明氏と写真家の木村氏にお願いした。まず予備的に作成したものについて情動認識率の評価を行ない、次にその結果を受けて改良して頂いた。最終的に作成された情動表出姿勢を Fig. 3. 10 に示す。実験参加者は早稲田大学の学生および助手 33 名（男性 29 名，女性 1 名）であり、平均年齢 26.0 歳であった。



(a) 怒り（漫画家）



(b) 怒り（写真家）

Fig. 3. 10 Whole-body emotion expression of KOBIAN (1/4)



(c) 喜び (漫画家)



(d) 喜び (写真家)



(e) 驚き (漫画家)



(f) 驚き (写真家)

Fig. 3. 10 Whole-body emotion expression of KOBIAN (2/4)



(g) 嫌悪 (漫画家)



(h) 嫌悪 (写真家)



(i) 悲しみ (漫画家)



(j) 悲しみ (写真家)

Fig. 3. 10 Whole-body emotion expression of KOBIAN (3/4)



(k) 恐れ (漫画家)



(l) 恐れ (写真家)



(m) 困惑 (漫画家)



(n) 困惑 (写真家)

Fig. 3. 10 Whole-boy emotion expression of KOBIAN (4/4)

(3) 評価実験の結果

この結果を、Fig. 3. 11 に示す。

まず、「喜び」について、前項の自作の「喜び」表出パターンは 40%と少なかったが、写真家のものが 90.7%と高認識率を獲得した。「怒り」についても、自作の 77.3%に対し、漫画家 80.6%、写真家 83.9%と向上がみられた。また、「困惑」についても、

自作の 86.7%に対し、漫画家・写真家ともに 93.5%と向上がみられた。その他の感情については向上がみられなかったが、「驚き」や「悲しみ」については、ほぼ 80%を獲得した。

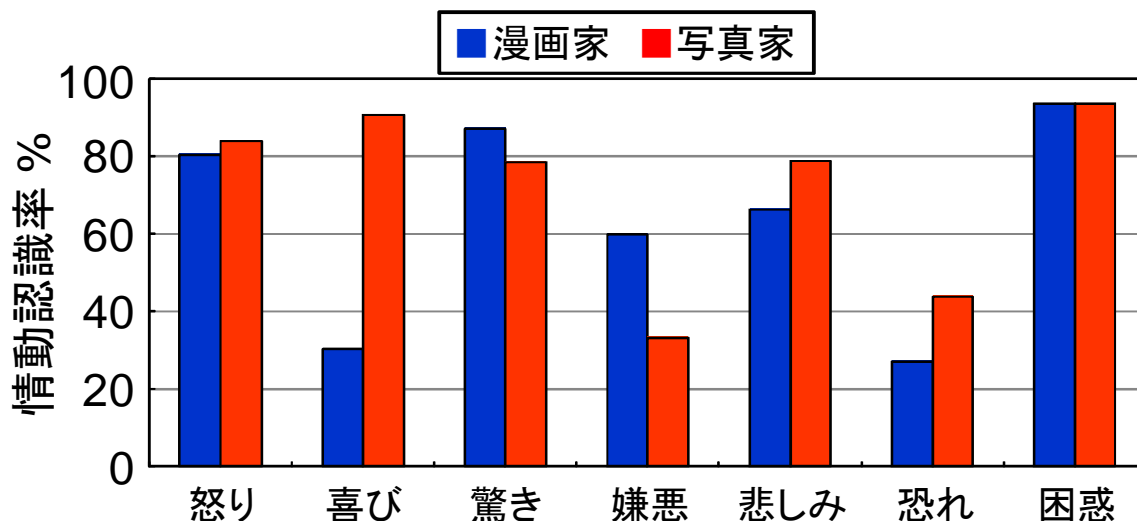


Fig. 3. 11 Comparison of whole-body emotion expressions made by cartoonist and photographer

(4) 考察

まず、「喜び」・「怒り」・「困惑」の認識率が特に向上した点から、専門家の意見を伺うという手法の有効性が示唆される。ただし、認識率が向上しなかった感情もあり、曲がりなりにも KOBIAN を開発した当人である筆者の方が、一週間程度で全身情動表出作成を依頼された専門家よりも、ロボットの特性をある程度把握していた点もある、ということがあり得る。

Fig. 3. 10 のそれぞれの感情についての両専門家作成の全身情動表出を見比べてみると、全体的なロボットの姿勢や腕の表現が似通っていることがわかる。「怒り」については左右の差さえあれど、中指を突き出している。「喜び」については両手を振り上げている。「嫌悪」については顔を背け、腕を前に突き出し、防御姿勢を取っている。「悲しみ」については俯きかげんで頭もしくは顔に手を近づけている。「恐れ」については体を反らし、防御姿勢を取っている。「困惑」については正面ではなく右の方に目をやっている。これらの共通点が見出されることは非常に興味深い。というのは、表情だけではなく、全身の姿勢にも感情に関する類型が存在していることが示唆されるからだ。一方で、似通った姿勢・腕の表現に見える「喜び」については認識率にけっこうな差が存在する。両者は特に手の表現や肘の角度が異なるが、この程度

でこんな差が出るということは、前項で示した表情と体の場合と同様に、組合せ問題である、と考えられる。

(5) 本節のまとめ

この節では、人間の表現についての職能を持つ専門家であると考えられる漫画家と写真家に、KOBIANの全身情動表出を作成してもらい、それによる認識率の向上を目指した。

その結果、「喜び」や「怒り」、「困惑」といった感情においては向上がみられた。一方で、その他の感情については向上がみられなかった。

また、それぞれに作成してもらった全身情動表出姿勢を見比べてみると、感情についての表現が似通っていることがわかった。

3.6 まとめ

本章では、KOBIANの基礎的な情動表出能力の評価について説明した。また、どのようなプロセスや要因が、ロボットの情動の伝達にどのように影響するかについて考察を行った。

第3節では、表情自由度の減少が情動表出に与える影響を評価した。また、表情各部と各感情の表出の関係について解析を行った。

第4節では、意図する感情の表出のための表情作成について、1つのプロセスを示し、これによる表情の評価を行うことでその有効性を示した。

第5節では、全身での情動表出の効果について評価した。表情単体では僅かな認識率しか得られなかったものも、特定の情動表出姿勢と組み合わせることで、より高い認識率を得られることが示された。また、情動表出姿勢作成プロセスについて、専門家の意見を取り入れることの有効性が示された。

第4章 移動と反射・反応的行動の印象評価

- 4.1 はじめに
- 4.2 移動と反射・反応的行動の手法
- 4.3 視標追従歩行における印象評価
- 4.4 心理モデルとの統合
- 4.5 心理モデルとの統合による印象評価
- 4.6 まとめ

4.1 はじめに

本章では、ロボットの自律的行動に着目し、移動および反射・反応的行動が与える印象を評価する。

ロボットは本来的に、人間の代わりに何らかの力学的仕事を行うものであり、動力源のエネルギーを運動エネルギーに変換する機械である。他の機械とロボットを分かつ要素として、ロボットが自動的あるいは自律的に作業を行うことが挙げられる。つまり、他の機械が人間の明確な操作の下に動作するのに対し、ロボットはそれなしに自律的に動作することが特徴であり、ユーザもそれを期待する。

一方でユーザの操作ないし介入なしに動作し得る存在は、本質的に危険を感じさせる存在であると言える。アイザック＝アジモフの「I, Robot」[88]では、ロボットが人間に危害を加えないための設計原則が提示され、これは現在でも多くのロボット工学者に支持されている。また、街中におけるある大きさ以上の動物は鎖に繋がれたり、檻に入れられたりして、その活動範囲を制限されている。これらの事例は、自律的に活動する存在が、潜在的に危険であることを示している。

実用化されている産業用ロボットの多くは、人間よりも大出力のアクチュエータを備えているが、その動作はほとんどプログラミングされたものである。しかしながら、その動作範囲は人間から空間的もしくは時間的に隔離されていることが義務付けられている。

筆者が対象としているヒューマノイドロボットは、人間の生活環境下で活動することを念頭に置いている。また、等身大のロボットなので、そのサイズおよび重量より生じる運動は、人間にとっても危険なものである。さらに、固定型ではなく移動する

ことができる。移動できるということは、ロボットの動作範囲内が時間的に一意に定まらない、つまり、ロボットとの「間合い」を人間側のみで決めることができない、ということである。このとき、人間からはロボットという存在がどのように見えるのだろうか。そして、その印象は、ロボットのどのような行動によって変化するのであるだろうか。

この、ロボットが「間合い」を決めることに加担するという事は、ロボットが自律的に移動するという事である。この自律的な行動について、三輪はWE-4RIIと心理モデルを用いて外界の刺激に応じた反射・反応的な行動生成を実現した[47]。しかしながら、WE-4RIIは上半身のみの固定型ロボットであったので、移動については実現されていない。そこで、近藤が開発した2足歩行ロボットWABIAN-2のためのオンライン歩行パターン生成法[41]を用いることで、移動を含めた反射・反応的行動が実現できると考えた。

本章では、情動表出2足歩行ヒューマノイドロボットの移動を含めた反射・反応的行動の実現およびこれの印象評価、そして心理モデルとの統合による動的な感情変化についての印象評価について説明する。

4.2 移動と反射・反応的行動の手法

4.2.1 全体のアーキテクチャ

KOBIANの移動形態は2足歩行である。外界からの感覚入力に基づいてオンラインで歩容を変更しなければならないが、これには近藤による短期FFT型オンライン歩行パターン生成法を用いた。この生成法では、2歩先(2秒先)の足部の軌道を1歩毎に(1秒毎に)動的に与えることができる。

一方で上半身の運動生成には、まず高西による前庭動眼反射に基づいた視標追従[89]を用いた。これは視覚センサからの視標位置入力に基づき、眼・首・体幹を人間のように連動させ、視標追従動作を可能とするものである。ここで、視覚センサのサンプリング周期は33[ms]である。

KOBIANの視標追従歩行はこの両者を合わせた形となっている。そのデータフロー図をFig. 4.1に示す。短期FFT型オンライン歩行パターン生成のプログラムにおける歩行パターンの最小時間単位は30[ms]である。1歩分(0.96[s])の歩行パターン(32時点)がまとめて、ロボットの関節制御プログラムモジュールに渡され、関節制御プログラムモジュールでは、各30[ms]の間の歩行パターンを1[ms]で線形補間し、位置制御目標値としている。しかしながら、KOBIAN両眼の視覚センサのサンプリング

周期は 33[ms]であり、周期のミスマッチがあった。

そこで、まず、ロボット全身の関節制御を部位に基づき 2 群に分けた。腰 Roll 以下の下半身・脚の関節群と、腰 Yaw 以上の上半身の関節群である。下半身の関節制御は、近藤の手法そのままに短期 FFT 型オンライン歩行パターン生成法および実時間歩行安定化制御に任せ、上半身の関節制御は、前庭動眼反射に基づいた視標追従に任せた。この方法だと、実時間歩行安定化制御の対応可能範囲によっては、上半身の加速で歩行が不安定になるという潜在的な問題があるが、体幹 Pitch のゲイン (Fig. 4.1 における Waist gain) を調整することで、不安定な歩行にならないようにした。

このように上半身と下半身に分けたが、上半身の関節のパターン更新周期は 30[ms]のままとした。これはプログラムの改変が非常に困難だったためである。そこで、付録に示す自作ライブラリ Takalib の非同期通信モジュール SharedData を用いた。これにより、視覚センサのサンプリング周期 33[ms]、通信における情報の更新周期 10[ms]、上半身の関節のパターンの更新周期 30[ms]の非同期な情報伝播構成とした。画像取得・処理時間を無視すると、最大遅れは 40[ms]となる。画像取得・処理時間を加味しても 90[ms]であり、特に問題となる遅れとは考えられない。

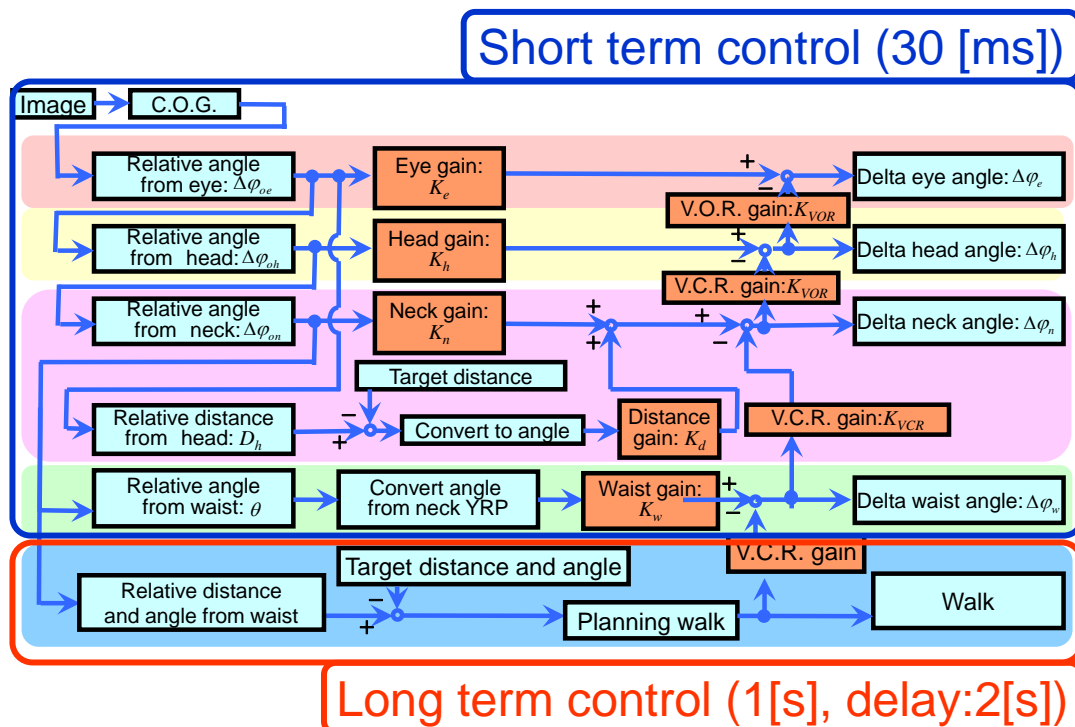


Fig. 4. 1 Data flow of the visual tracking walking

4.2.2 前庭動眼反射を基にした上半身の視標追従動作の生成

(1) 画像の取得と処理

第2章で示したように、視覚センサからの画像の取得および画像処理は、KOBIANの運動制御PCとは別のPCで行なわれる (Fig. 4. 2).

画像処理PCはUSB 2.0を介して、両眼のカメラ画像を得る. 更新周期はそれぞれ30[Hz]である.

視標は単色の球体であり, 次の手順でカメラ画像平面内の視標の位置を求める. まず, 画像に対して, RGB表色系からHSV表色系へ変換を行ない, 色相画像(H)に対して上限と下限の閾値による色域抽出を行なう(色相抽出画像). また, 彩度画像(S)に対して下限の閾値で抽出する(彩度抽出画像). そして, 両者の論理積を求め(色相彩度抽出画像), ノイズを消す(視標抽出画像). その重心をカメラ画像平面内の視標位置とする. 詳細な流れをFig. 4. 3に示す. この方法は, RGBの3次元色空間における3点の色座標指定による抽出であるWE-4RIIの方法より, 直感的で使いやすい.

求められた視標位置は, TCP/IP on Ethernetの非同期通信モジュールを通じて, 運動制御PCへと送られる.

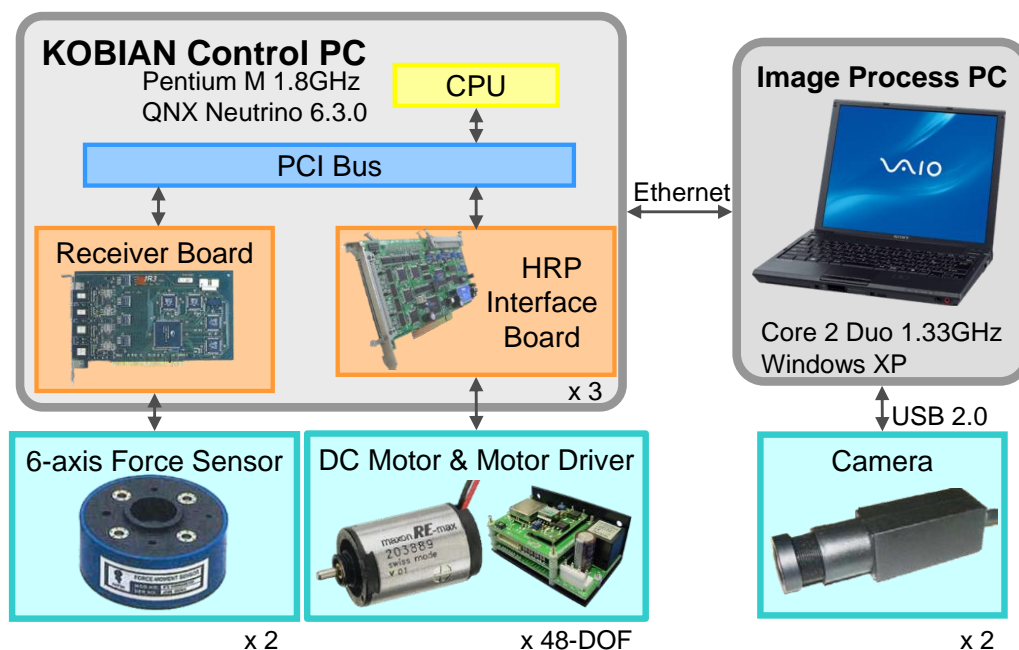


Fig. 4. 2 Control system configuration of KOBIAN

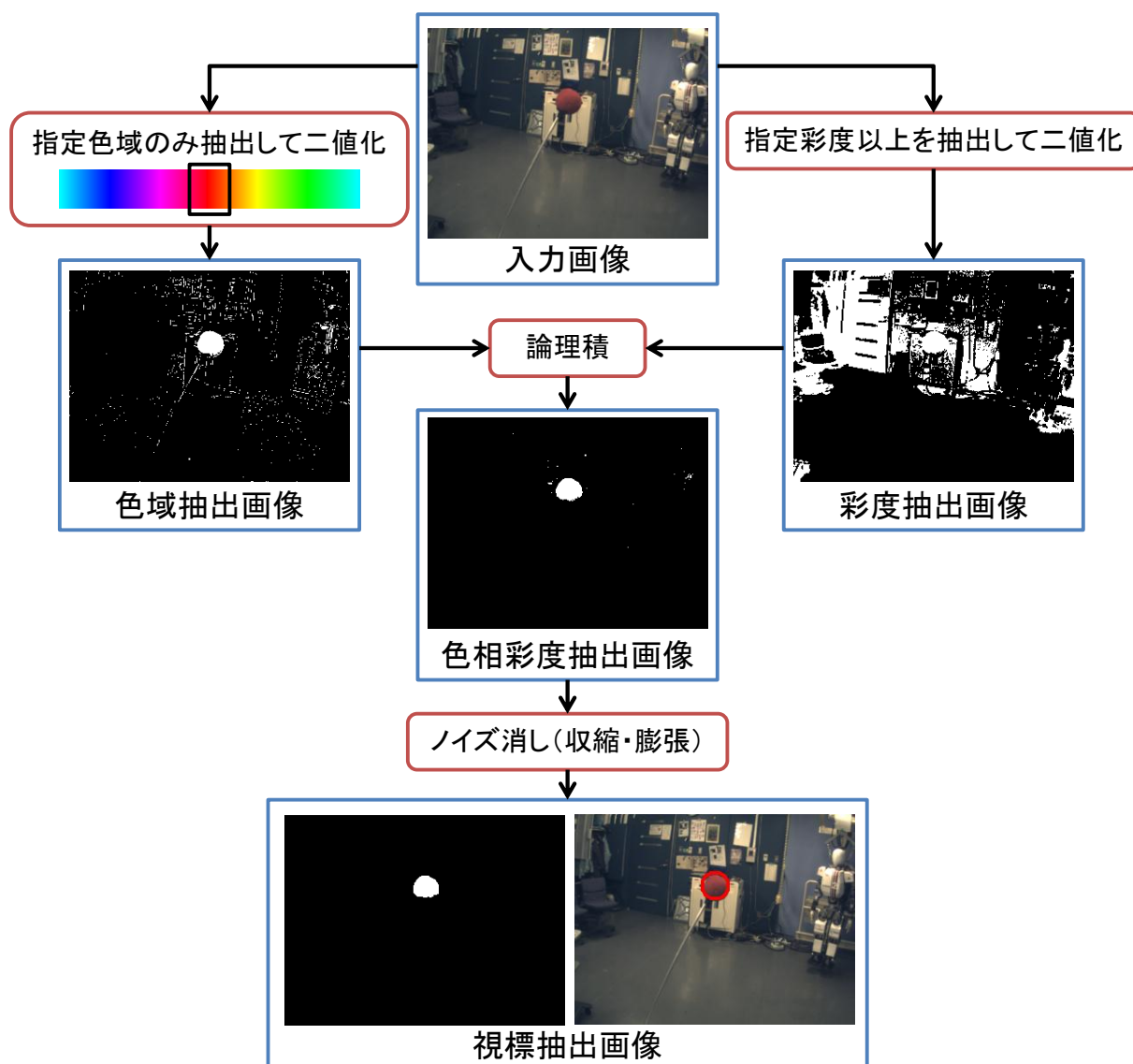


Fig. 4. 3 Flow of the image processing of visual target extraction

(2) 前庭動眼反射を基にした上体の動作

上半身による視標追従運動生成については、WE-3[1]に実装された前庭動眼反射 (Vestibulo-Ocular Reflex., V.O.R.) のアルゴリズムを拡張した。

V.O.R.とは、視覚画像がぶれないように、頭部の動きを相殺する反射的な眼球運動である。WE-3のV.O.R.では、頭部に対する視標の相対角度 $\Delta \varphi_{oh}$ は、カメラ画像平面内の視標の位置より計算される眼に対する視標の角度を φ_{oe} と両眼の角度 φ_e から求められ、頭部の目標角度差分 $\Delta \varphi_h$ は次のように求められる：

$$\Delta\varphi_{oh} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\Delta\varphi_{oe}(R) + \varphi_e(R)) + \tan(\Delta\varphi_{oe}(L) + \varphi_e(L))}{2}\right) \quad (4.1)$$

$$\Delta\varphi_h = K_h \cdot \Delta\varphi_{oh} \quad (4.2)$$

ここで、式(4.1)は両眼の輻輳角の計算であり、 K_h は頭部の追従ゲインである。眼の目標角度差分 $\Delta\varphi_e$ は、頭部の動作を補償した次のV.O.R.の式で求められる。

$$\Delta\varphi_e = K_e \cdot \varphi_{oe} - K_{VOR} \cdot \Delta\varphi_h \quad (4.3)$$

上式により、眼はオーバシュートすることなく視標に追従し、また人間のように、まず眼が追従し、それより遅く頭部で追従することができる。

以上は眼の頭部に対するV.O.R.であるが、頭部の首に対するV.C.R.、首の体幹に対するV.C.R.と拡張し、また、体幹・腰のPitchとYawの視標への追従動作を実装し、上半身全体による視標追従を実現した (Fig. 4. 1 の上部青枠部分)。

4.2.3 短期FFT型オンライン歩行パターン生成法の改良

上述のV.O.R.ベースの上半身による視標追従をさらに拡張し、2足歩行による移動を含めた視標追従アルゴリズムを開発した。オンライン歩行パターン生成には近藤によるFFTベースのオンライン歩行パターン生成法[7]を用いた。

特に、視標との距離と相対角度に応じて歩幅と旋回歩角を増減するようにした。ただし、使用したオンライン歩行パターン生成には1.6[s]、即ち、約2歩の遅れがあり、2歩未来の分を考慮しないとオーバシュートする。視標との実際の距離から目標距離を差し引いた分を L 、視標との相対角度を θ 、ある時点 k における次の歩幅を l_{k+1} 、旋回歩角を φ_{k+1} 、 L 進むまでのステップの分割数を K とすると、

$$l_{k+1} = L/K \quad (4.4)$$

$$\varphi_{k+1} = \theta/K \quad (4.5)$$

オーバシュートしないためには $K \geq 4$ であるが、安全を考えて $K=6$ と設定した。また、 $l_{k+1} \leq 0.2[\text{m}]$ 、 $\varphi_{k+1} \leq 5[\text{deg}]$ とした。これにより、距離と相対角度に応じた歩幅および旋回歩角の調節ができるようになった。

旋回のための遊脚の歩容は、Fig. 4. 4に示すように、立脚足に対して直立状態となる腰と遊脚足の位置・方向を中継として設定するようにした。これにより、旋回時に遊脚中の脚が立脚中の脚に干渉することがなくなる。

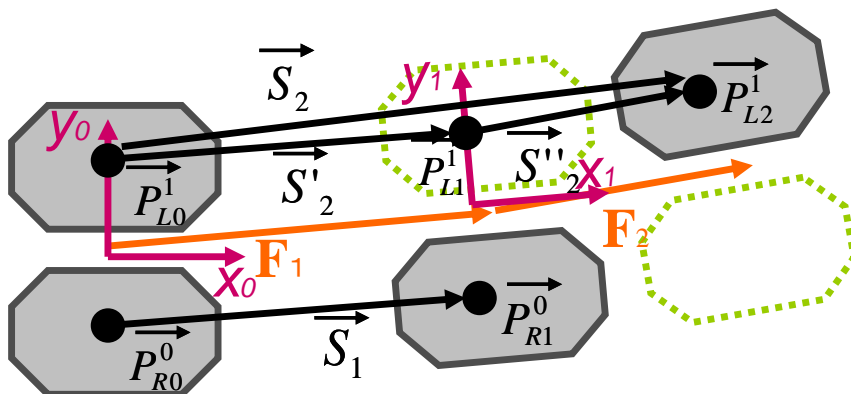


Fig. 4. 4 Gait generation using a relay point in turning

4.2.4 視標追従歩行の性能評価

以上に示した視標追従歩行の評価実験を行った。

視標位置をロボットに対し前方 1.5[m], 左方 0.75[m], 高さはロボットの目の高さ (1.35[m]) に固定した (Fig. 4. 5). 視標との目標距離を 0.8[m], 目標相対角度を 0.0[deg], 距離不感帯を 0.2[m], 角度不感帯を 15.0[deg], 歩行周期を 0.96[s/step] に設定した。

この固定された視標への追従の様子を Fig. 4. 6, ロボットと視標との距離の遷移を Fig. 4. 7, 足先軌道を Fig. 4. 8 に示す. 16 歩で収束し, 最終的な偏差は 0.07[m] となった。

また, 動く視標への追従の様子を Fig. 4. 9 に示す。

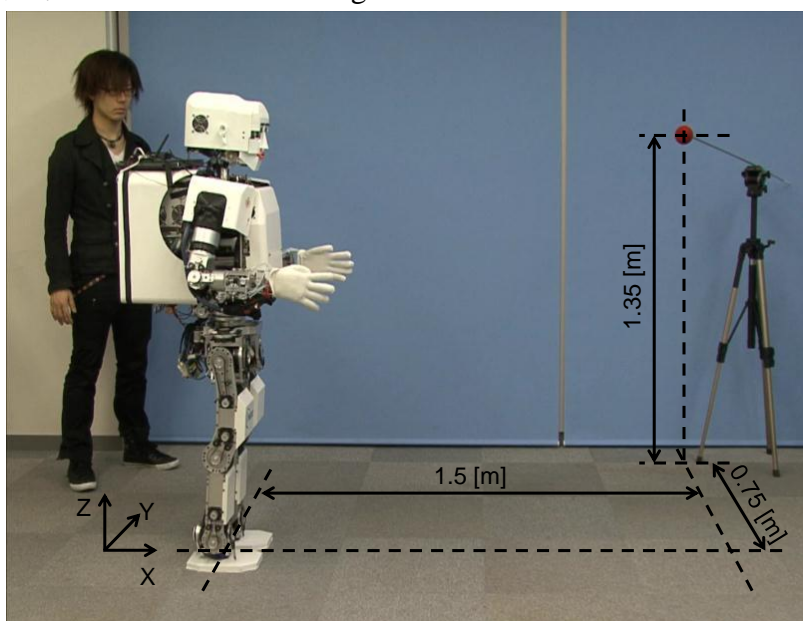


Fig. 4. 5 Experimental setup

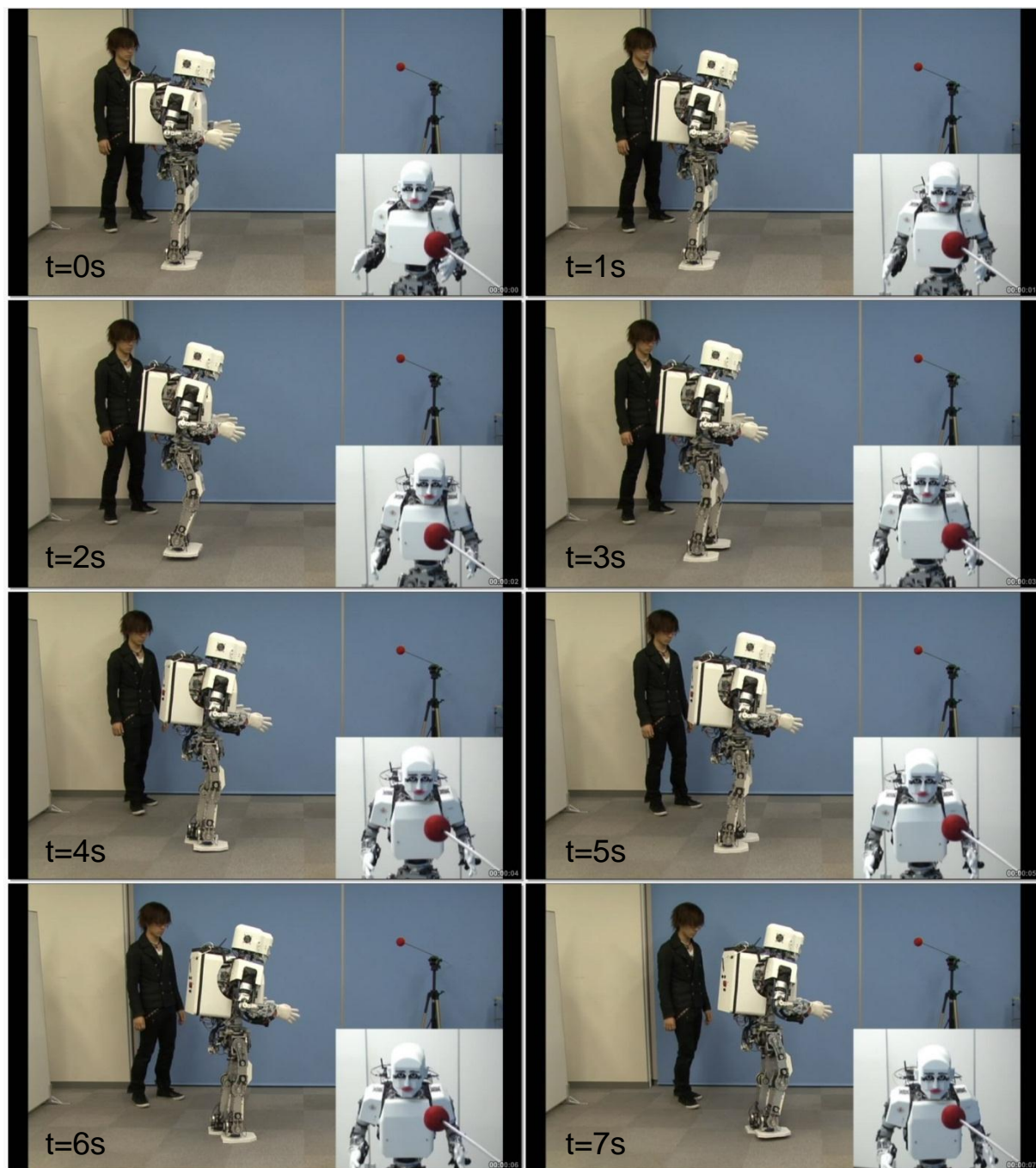


Fig. 4. 6 Experiment of visual tracking walking for fixed target (1/2)

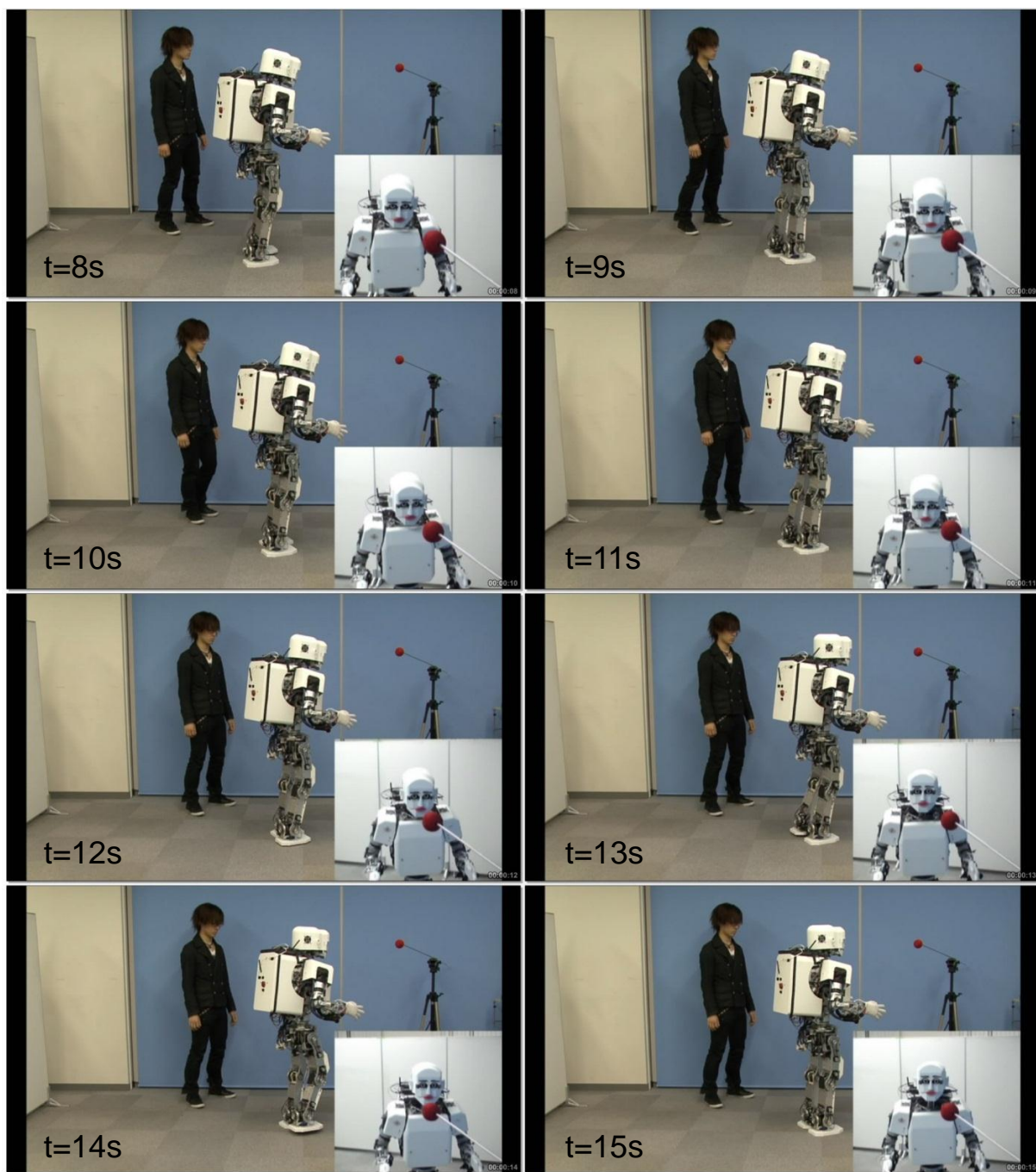


Fig. 4. 6 Experiment of visual tracking walking for fixed target (2/2)

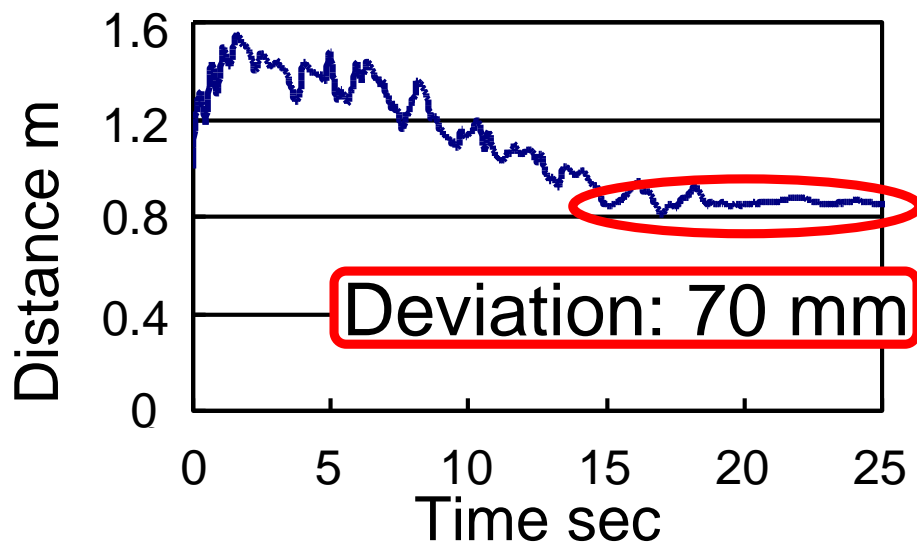


Fig. 4. 7 Change of the distance to the fixed target

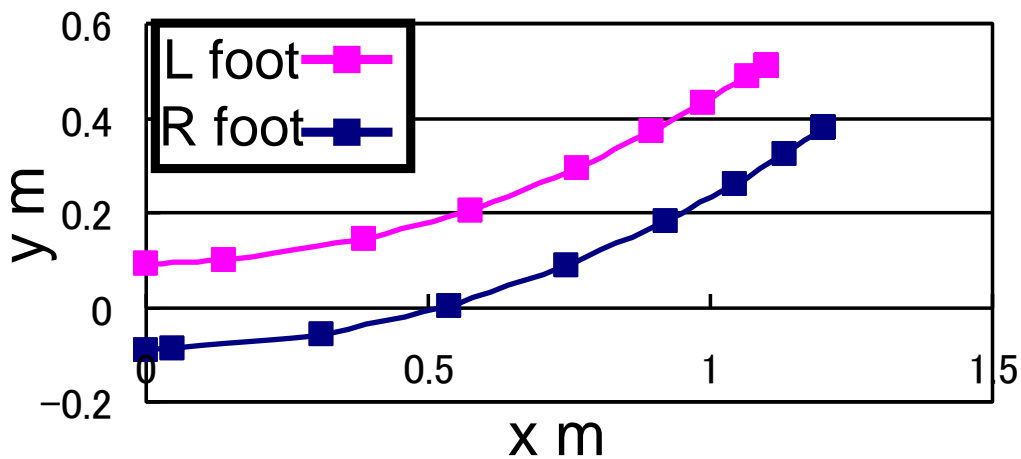


Fig. 4. 8 Foot trajectory



Fig. 4. 9 Experiment of visual tracking walking for moving target (1/2)



Fig. 4. 9 Experiment of visual tracking walking for moving target (2/2)

4.3 視標追従歩行における印象評価

4.3.1 実験設定

KOBIANの感情表現について、歩行を含めた行動が感情の認識にどのように影響するか評価を行なった。

まず、4人の役者の演技を動画撮影およびモーションキャプチャ VICONにより計測した。役者の手前1[m]程度前方の顔の高さに視標を固定し、役者は各感情（平常、喜び、驚き、嫌悪）について自由に演技した（Fig. 4. 10, Fig. 4. 11, Fig. 4. 12）。動画分析により、視標との距離のとり方、姿勢、腕を用いた表現が特徴的であった（Table 1）。



Fig. 4. 10 Actor's performance of *happiness*



Fig. 4. 11 Actor's performance of *surprise*



Fig. 4. 12 Actor's performance of *disgust*

Table 4. 1 Features of emotional behaviors of actors

Emotion	Distance	Upper body posture	Arm gesture
Neutral	Constant	Upright	None
Happiness	Approach	Bend forward	Unfurl
Surprise	Incertitude	Incertitude	Haul
Disgust	Avoidance	Bend backward	Move forward

この動作特徴に基づいた動作パターンを、先述した視標追従歩行に取り入れた。KOBIANの感情付視標追従歩行の様子を Fig. 4. 13 (平常), Fig. 4. 14 (喜び), Fig. 4. 15 (驚き), Fig. 4. 16 (嫌悪) に示す。

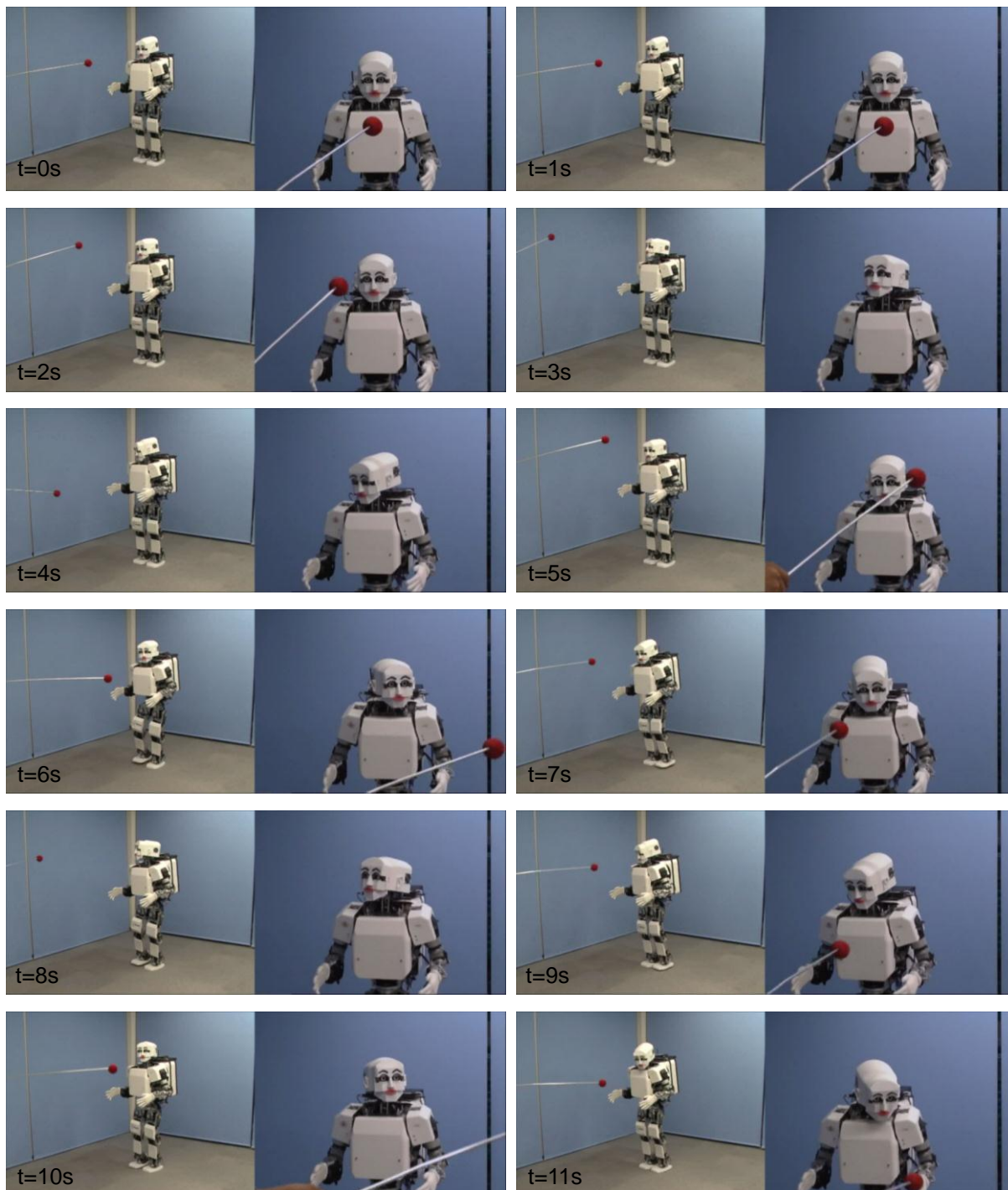


Fig. 4. 13 Visual tracking walking with *neutral* behavior (1/2)

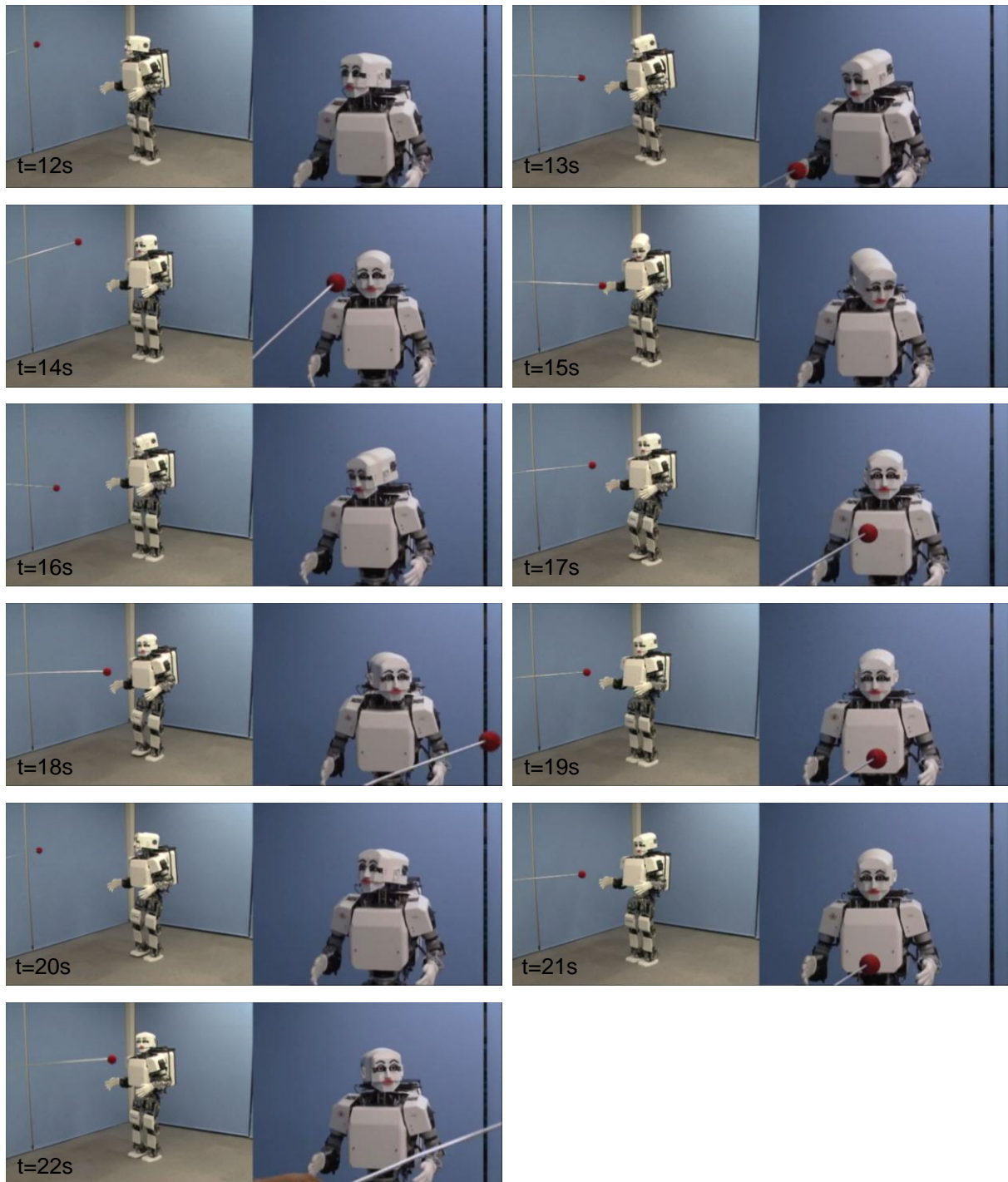


Fig. 4. 13 Visual tracking walking with *neutral* behavior (2/2)



Fig. 4. 14 Visual tracking walking with *happiness* behavior (1/2)



Fig. 4. 14 Visual tracking walking with *happiness* behavior (2/2)



Fig. 4. 15 Visual tracking walking with *surprise* behavior (1/2)

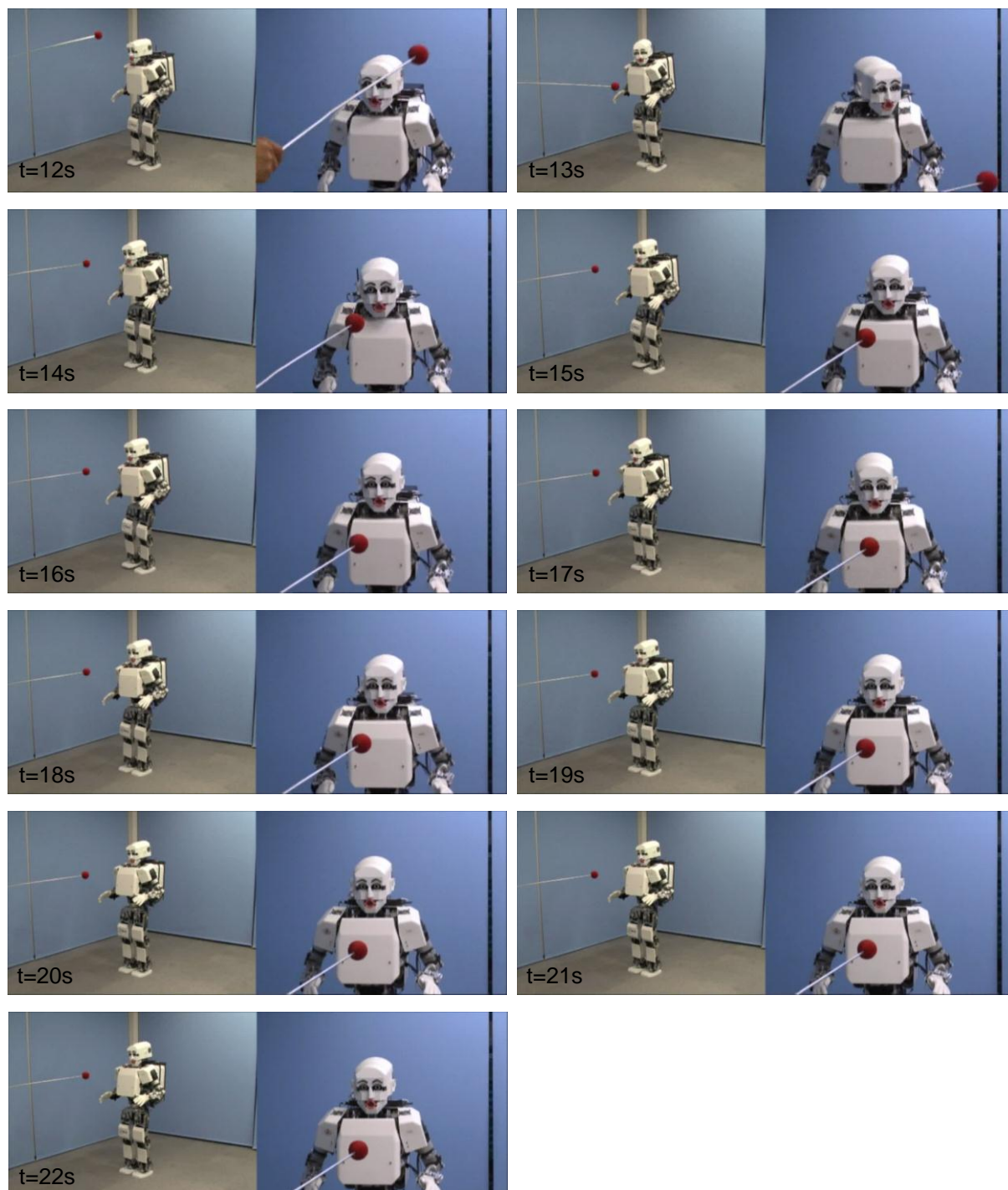


Fig. 4. 15 Visual tracking walking with *surprise* behavior (2/2)



Fig. 4. 16 Visual tracking walking with *disgust* behavior (1/2)

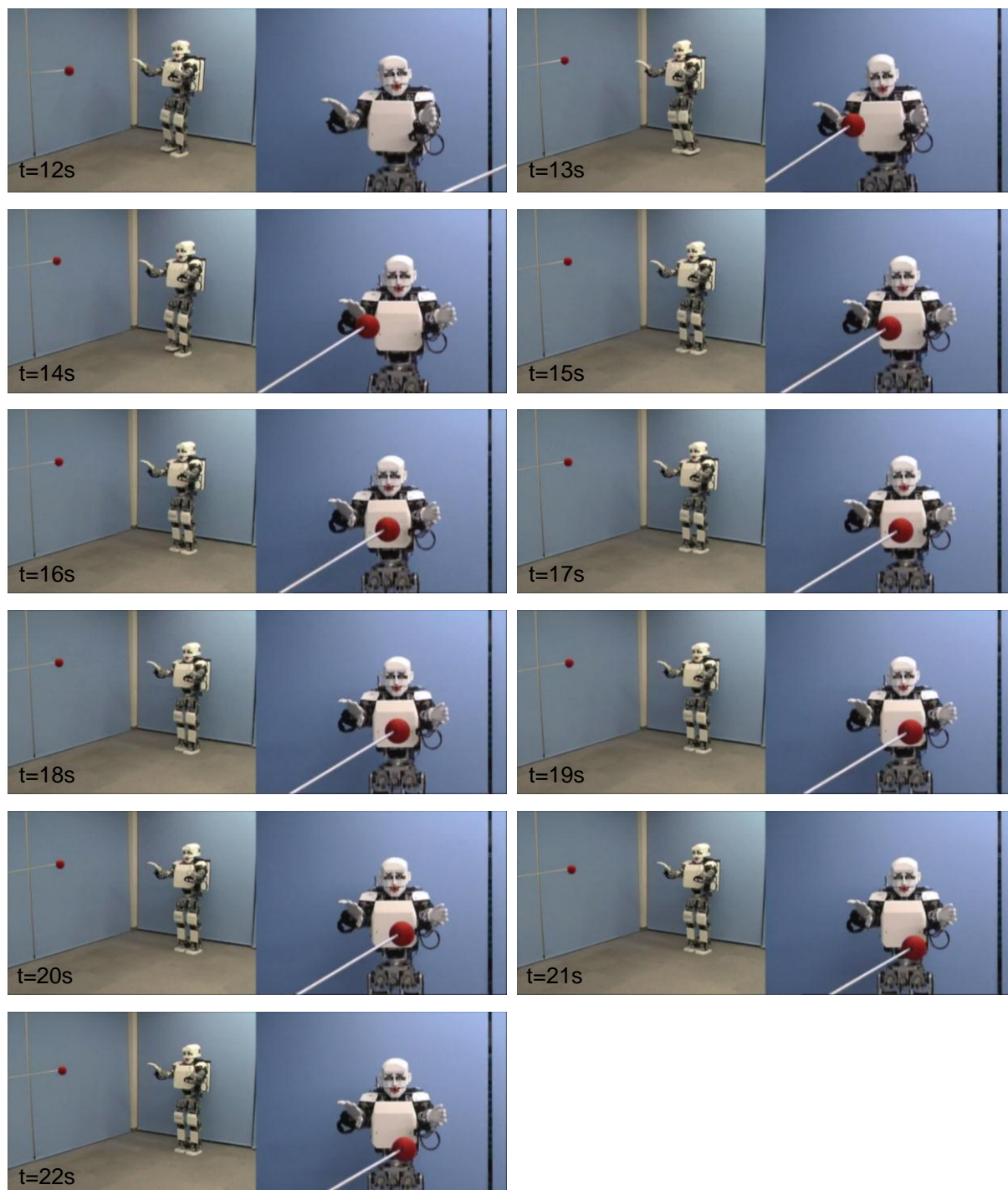


Fig. 4. 16 Visual tracking walking with *disgust* behavior (2/2)

また、各感情（平常、喜び、驚き、嫌悪）について、上記の眼・頭・首・胴体と歩行を用いて視標追従し腕の表現のある動画、眼・頭・首のみで視標追従する動画（腕の表現無し）、眼・頭・首・胴体のみで視標追従する動画（腕の表現無し）、眼・頭・首・胴体のみで視標追従し、腕の表現のある動画を作成した（Table 4. 2）。動画はそれぞれ、Fig. 4. 13～Fig. 4. 16に示したように、全身が映したものと、表情がわかりやすいよう上半身を正面から映したものを作成した。

これらの動画を用いて、情動認識率およびその強度を調査するためのアンケートを行なった。29名の実験協力者（男24名、女5名、平均年齢26.8歳）は、動画を視聴し、KOBIANがどんな感情（平常、喜び、怒り、驚き、嫌悪、悲しみ、恐れ、その他・自由回答）を表現しているか、その感情の強さはどれくらいかを回答した。動画はプロジェクタを用いてロボットの等身大のサイズで提示された。動画の順番は実験協力者3、4人毎にランダムにされた。

なお、「無反応」とはロボットが視標に追従することなく、腕の表現も無しに、その場で停止するだけの動画である。また、「平常 C」は「平常 B」と同じ動画となるので、提示していない。

Table 4. 2 Condition of videos

#	眼・頭・首の追従	胴体の追従	腕の表現	歩行による追従
A	Yes	No	No	No
B	Yes	Yes	No	No
C	Yes	Yes	Yes	No
D	Yes	Yes	Yes	Yes

4.3.2 実験結果と考察

(1) 情動認識率

情動認識率の結果をTable 4. 3に示す。各動画について、実験者によって意図された感情を背景色で表し、最も回答が多かった感情を赤太字で表す。また、意図された感情毎（「平常」（「無反応」含む）、「喜び」、「驚き」、「嫌悪」）のグラフをFig. 4. 17～Fig. 4. 20に示す。

Table 4. 3 Result of emotion recognition rate

動画	平常	怒り	喜び	驚き	嫌悪	悲しみ	恐れ
無反応	72.4	3.4	0.0	3.4	0.0	6.9	0.0
平常 A	79.3	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0
平常 B	55.2	0.0	0.0	17.2	0.0	0.0	0.0
平常 D	44.8	0.0	10.3	13.8	0.0	0.0	0.0
喜び A	10.3	0.0	41.4	31.0	0.0	0.0	0.0
喜び B	6.9	0.0	17.2	41.4	3.4	0.0	3.4
喜び C	3.4	0.0	20.7	37.9	0.0	0.0	0.0
喜び D	3.4	0.0	31.0	34.5	0.0	0.0	0.0
驚き A	6.9	0.0	3.4	75.9	0.0	0.0	0.0
驚き B	3.4	0.0	6.9	75.9	0.0	0.0	0.0
驚き C	10.3	0.0	0.0	65.5	0.0	0.0	0.0
驚き D	13.8	0.0	0.0	69.0	0.0	0.0	0.0
嫌悪 A	3.4	6.9	0.0	6.9	41.4	10.3	17.2
嫌悪 B	0.0	0.0	0.0	3.4	51.7	3.4	34.5
嫌悪 C	0.0	3.4	0.0	6.9	44.8	3.4	37.9
嫌悪 D	0.0	0.0	0.0	0.0	44.8	0.0	51.7

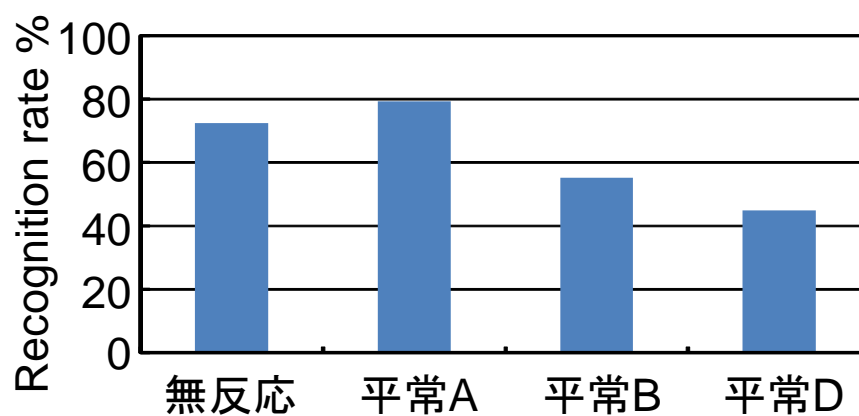


Fig. 4. 17 Recognition rates of *neutral*

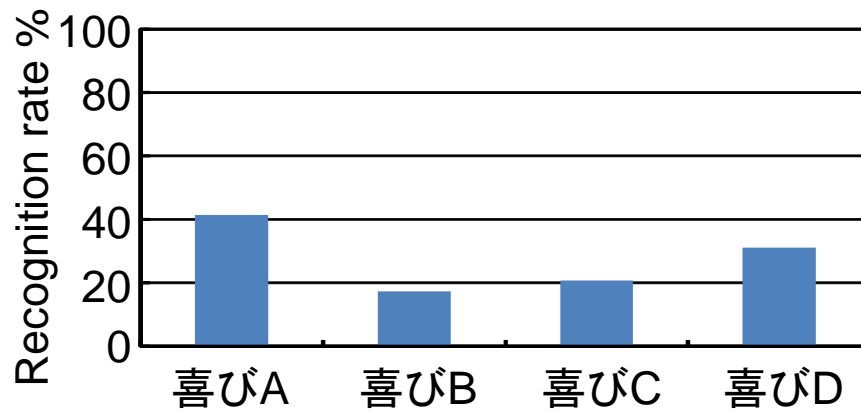


Fig. 4. 18 Recognition rates of *happiness*

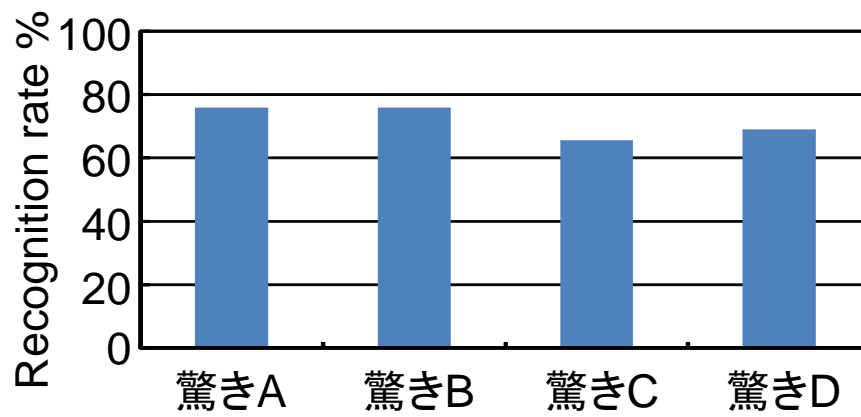


Fig. 4. 19 Recognition rates of *surprise*

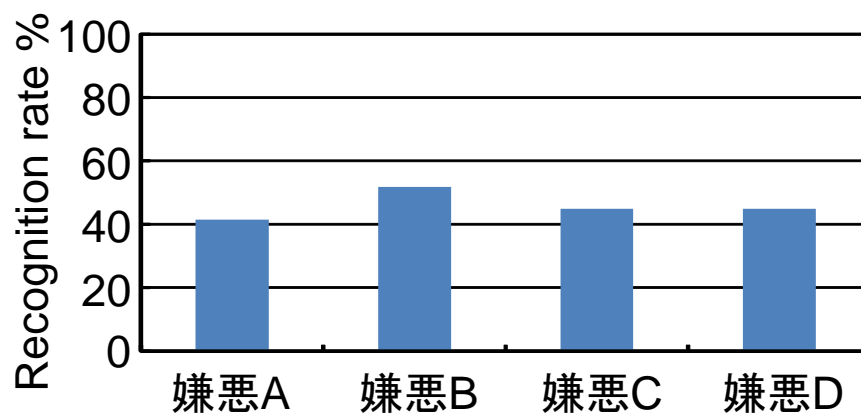


Fig. 4. 20 Recognition rates of *disgust*

「平常」の情動認識率は、腕の表現や移動が加わると減少した。「喜び」や「驚き」といった特定感情回答や「その他」（興味、好奇心など）の回答が増えたことに起因する。これは、視標を追うという行動自体が引き起こしたものだと考えられる。

「喜び」については、全体的に4割以下と低かった。「喜び A」以外では「驚き」回答の方が多かった。第2章で示したように、KOBIANの「喜び」表情自体が「驚き」と認識されることが多いので、これも同様の要因によるもの（口唇の形状以外が「驚き」表情に近い）と考えられる。しかしながら、「喜び B」・「喜び C」・「喜び D」と順番に「驚き」回答が減少し、「喜び」回答が増加した。これは腕の表現や接近行動により、より「喜び」と認識されやすくなったと考えられる。

「驚き」について全体的に認識率は高かった。「驚き B」・「驚き C」・「驚き D」と順番に「平常」回答が増加した。そもそも「驚き」という感情自体が瞬発的なものであり、「驚きながら行動する」という行動が不自然だったと考えられ、これが「驚きではない（が、表情も特に変わっていないので他の感情とも思えない）」回答としての「平常」回答増加の原因の一つと考えられる。

「嫌悪」については全体的に半分程度の認識率だった。特に、「嫌悪 A」・「嫌悪 B」・「嫌悪 C」・「嫌悪 D」と順番に「恐れ」回答が増えた。これは、「恐れ」も「嫌悪」と同様に対象からの回避行動を引き起こし、その回答が多くなったと考えられる。ここで興味深いのは、三輪の感情空間モデル[47] (Fig. 4. 21) では、「嫌悪」・「恐れ」は快感が負の領域に属しているが、「嫌悪」は覚醒度低・確信度高の領域、「恐れ」は覚醒度高・確信度低の領域に属しており、それぞれ対極の領域にあるということである。また、Russelらの提案した快-不快・覚醒-不覚醒の2次元の感情次元モデル[90] (Fig. 4. 22) においては、「嫌悪」・「恐れ」は快感低・覚醒度高の領域に属しているが、その両者の間には「怒り」がある。この実験の「嫌悪」行動においては「嫌悪」・「恐れ」回答が多く、「怒り」回答は僅かであった。つまり、既存の感情モデルとは相応しない結果が得られたということである。既存の感情モデルが主に表情分析を基に得られたものであること、この実験は主にロボットの行動に関するものであること、という違いを考慮すれば、行動における感情モデルは、既存の表情ベースの感情モデルでは不十分である可能性がある、と考えられる。

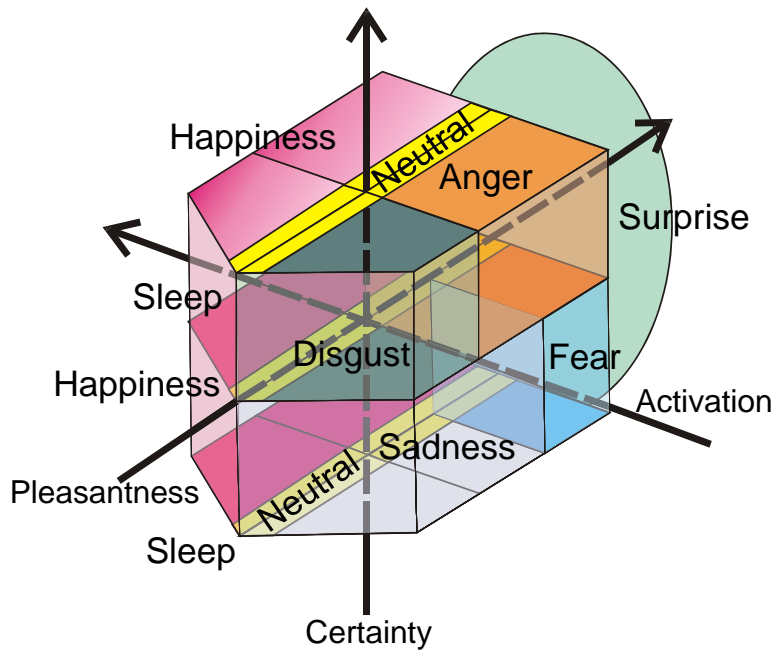


Fig. 4. 21 Miwa's region mapping of emotions [47]

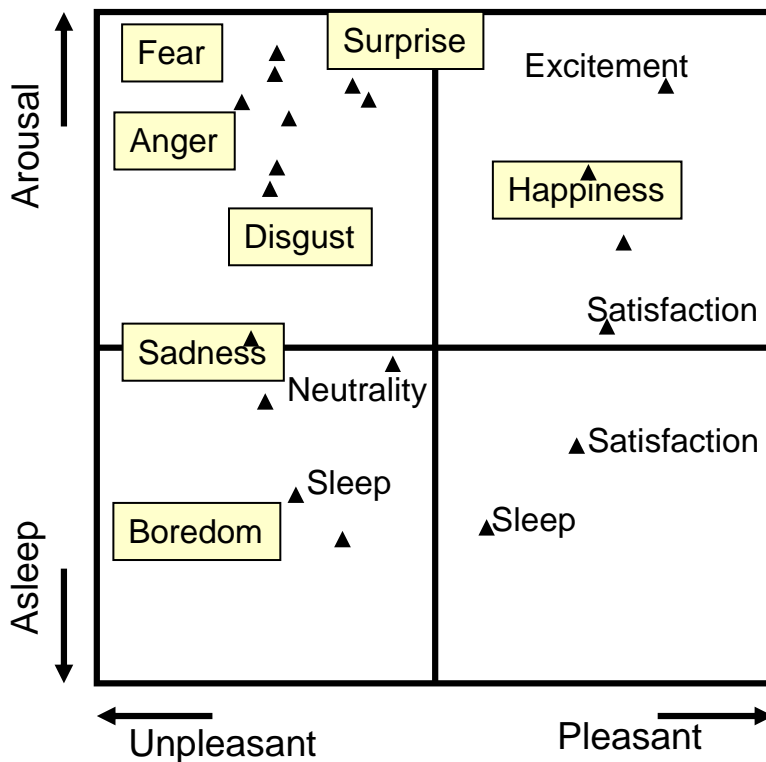


Fig. 4. 22 Russel's multidimensional scaling of emotional facial expressions [90]

(2) 情動強度

情動強度についての結果を Table 4. 4 に示す。各動画について、実験者によって意図された感情を背景色で表し、最も認識率が高かった感情を赤太字で表す。ここで、情動強度はその感情を回答したときの強度の人数分の合計を、その回答人数で除したものである（即ち、強度は平均であり、分散をもつ）。よって、回答人数が1人でも、その人が高い強度をつけた場合は、そのままその強度となるので、Table 4. 3 に示した認識率と合わせて解釈しなければならない。意図された感情についてまとめたものを Table 4. 5 に示す。意図された感情毎（「平常」、「喜び」、「驚き」、「嫌悪」）のグラフを Fig. 4. 23～Fig. 4. 26 に示す。

それぞれの強度およびその分散に基づき、t 検定を行った。多重比較のための補正にはボンフェローニの方法を用いた。有意水準は5%に設定した。

「平常」についての情動強度はほぼ変わらなかった。これはそもそも「平常」自体に強度は存在しないためである。

「喜び」については、情動強度が増加する傾向がみられた。しかしながら、有意差は検出されなかった。これはそもそも認識率が低いので、回答者人数が少ないことに起因すると考えられる。この実験の実験協力者の総人数は29名であり、これを増やせば有意差は検出可能になるのではないかと考えられる。ただし、Table 4. 3 に示した認識率では全体的に「驚き」の方が高かった。「驚き」の強度をみると、胴体までの追従である「喜び B」と、歩行で追従し腕の表現もある「喜び D」の間に有意差が検出された。つまり、腕の表現と移動の組み合わせにより、より驚いてみえることが示唆された。しかしながら、「喜び B」に対し「喜び D」の驚きの認識率自体は下がっているため、たまたま強い強度回答が集中した（よって分散が小さく、有意差の検出につながる）可能性もある。

「驚き」については、首までの追従である「驚き A」に対し、胴体も追従する「驚き B」と歩行で追従し腕の表現もある「驚き D」で情動強度が増加したが、有意差が検出できたのは「驚き B」だけであった。「驚き A」と「驚き B」は同じ認識率であることを考えると、胴体の動作により、より驚いてみえることが示唆された。一方で「驚き B」に腕の表現を加えた「驚き C」は認識率も強度も下がっている。つまり、腕の表現は不適切であったと考えられる。先述したように「驚き」は瞬発的なものであるため、この実験における行動自体が不自然なものであるといえる。

「嫌悪」については、「嫌悪 A」・「嫌悪 B」・「嫌悪 C」・「嫌悪 D」と順番に強度が増加した。特に、「嫌悪 D」は他のどの3つに対しても有意差が検出された。これは、「嫌悪」の視標からの回避行動が、より強く嫌がってみえることに寄与していることが示

唆されたということである。また、同時に「恐れ」の強度も増加していることから、同様のことが「恐れ」についてもいえる。

Table 4. 4 Result of emotion intensity

動画	平常	怒り	喜び	驚き	嫌悪	悲しみ	恐れ
無反応	3.3	4.0	0.0	3.0	0.0	6.0	0.0
平常 A	4.1	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
平常 B	4.5	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0
平常 D	4.3	0.0	3.0	4.8	0.0	0.0	0.0
喜び A	3.3	0.0	4.4	4.4	0.0	0.0	0.0
喜び B	3.5	0.0	5.0	4.1	6.0	0.0	2.0
喜び C	4.0	0.0	5.1	5.1	0.0	0.0	0.0
喜び D	7.0	0.0	5.7	5.9	0.0	0.0	0.0
驚き A	3.0	0.0	6.0	4.3	0.0	0.0	0.0
驚き B	4.0	0.0	5.0	5.2	0.0	0.0	0.0
驚き C	4.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
驚き D	3.8	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0
嫌悪 A	1.0	4.5	0.0	3.0	4.4	2.7	4.0
嫌悪 B	0.0	0.0	0.0	7.0	4.7	3.0	4.7
嫌悪 C	0.0	2.0	0.0	6.0	5.2	2.0	6.1
嫌悪 D	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	0.0	6.4

Table 4. 5 Result of emotion intensity (summarized)

条件	平常	喜び	驚き	嫌悪
A	4.1	4.5	4.3	4.4
B	4.5	5.0	5.2	4.7
C	-	5.1	4.5	5.2
D	4.3	5.7	5.3	6.8

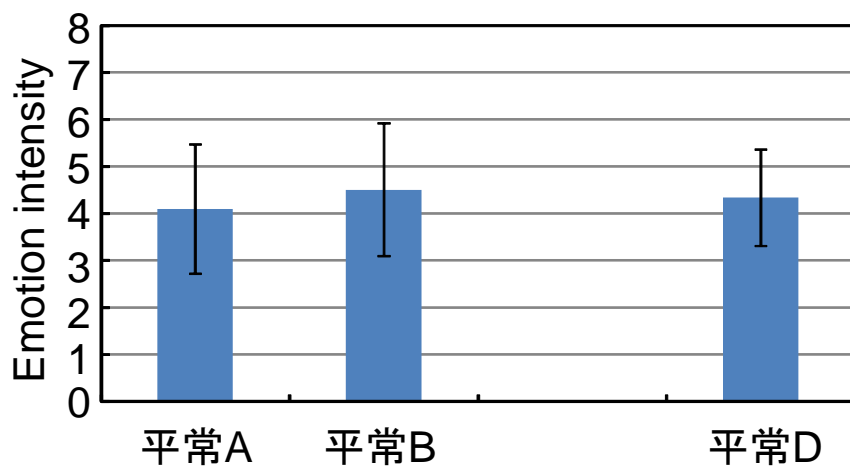


Fig. 4. 23 Emotion intensity of *neutral*

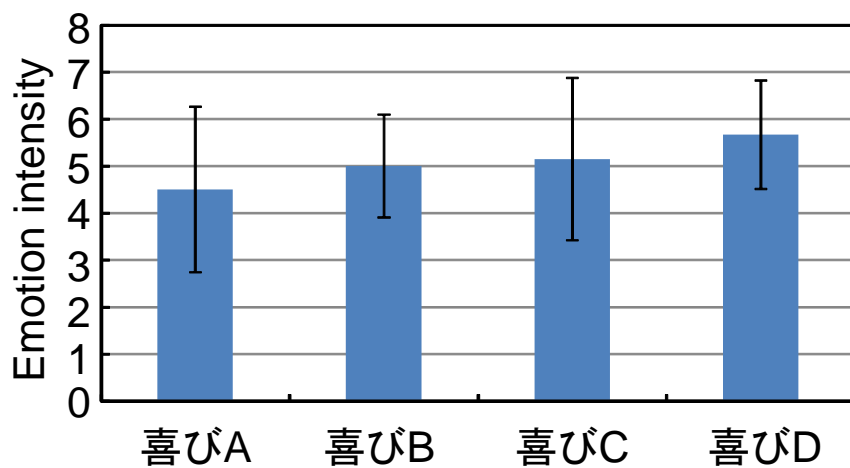


Fig. 4. 24 Emotion intensity of *happiness*

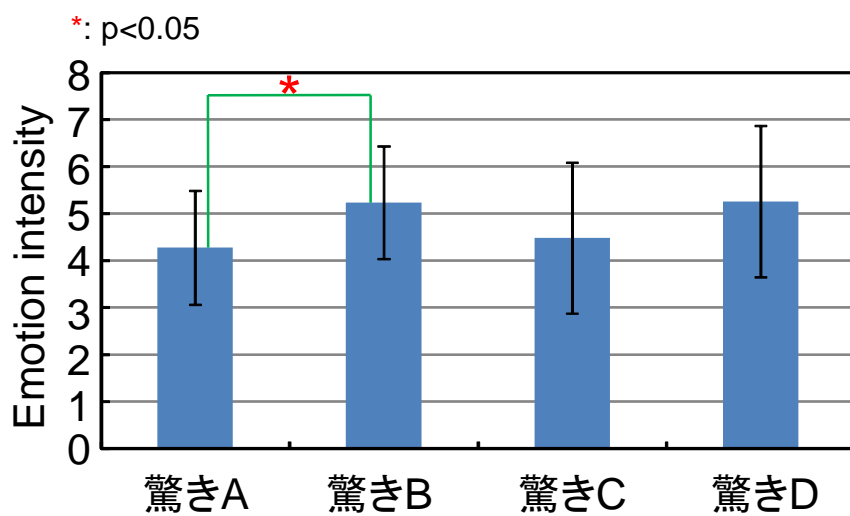
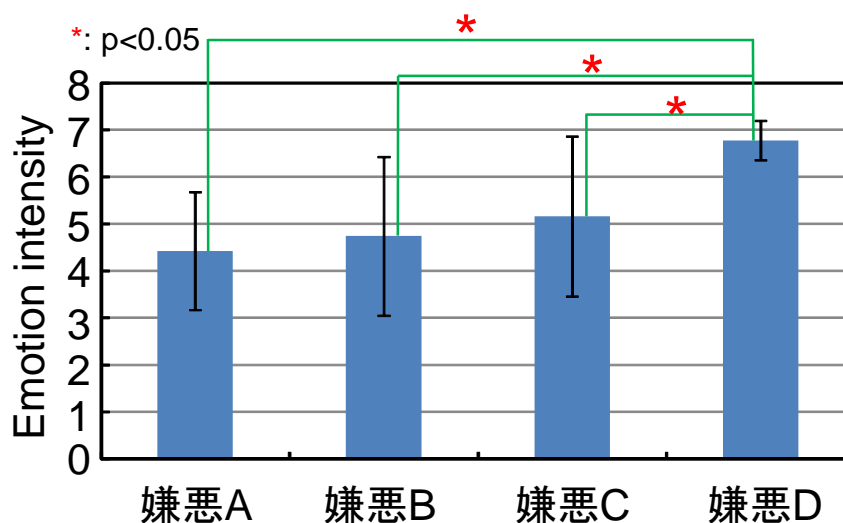


Fig. 4. 25 Emotion intensity of *surprise*

Fig. 4. 26 Emotion intensity of *disgust*

4.3.3 この節のまとめ

この節では、KOBIANの視標追従歩行が感情の認識にどのように影響するかについて、評価実験を行った。

ロボットが各感情時の行動基準は、役者の演技を分析することによって設定した。視標との距離のとり方、姿勢、腕を用いた表現が特徴的であったので、ロボットが同様の行動を取る動画を作成し、これを用いてアンケートを行った。

アンケートの結果、行動の違いによる全体的な情動認識率の増加はみられなかったが、行動の違いによる情動強度の変化はみられた。特に「嫌悪」については、その回避行動が、より嫌がって見えることに寄与することが示唆された。

4.4 心理モデルとの統合

前節までに述べたKOBIANの感情表現は、予め決められた感情について出力しているだけであり、三輪のWE-4RIIのように動的ではない。そこで、三輪の心理モデル[47]を組み込み、ロボットの外界からの刺激により動的に感情が変化し、それに伴って行動も変化するようにした。

上述したように、ロボットが自律的に移動できるということは、対象との距離の取り方を能動的に変化させることができるということである。4.3.1における役者の実験でもみられるように、人間は感情状態によって対象との距離の取り方を変えることが示唆される。つまり、どのような対象に対しても固定化された距離の取り方は存在せ

ず、対象との関係性や個人の性格、内面の心理状態によって距離の取り方は変わる、ということである。

人間の場合について、Hall は対人距離もしくはパーソナルスペース理論を提唱している。対人距離とは、コミュニケーションにおける相手との距離に基づく自己の身体周辺の空間領域であり、次の4つに大別され、それぞれがさらに近接相と遠方相に分けられる[22]。

- 密接距離 (intimate distance) : 15~45 [cm]. ごく親しい人に許される距離
- 個体距離 (personal space) : 45 ~120 [cm]. 相手の表情が読み取れる距離
- 社会距離 (social distance) : 120~360 [cm]. 相手に手は届きづらいが、容易に会話ができる距離
- 公衆距離 (public distance) : 360 [cm]~. 複数の相手が見渡せる距離

これらは、社会的地位、文化や民族、個人の性格によって差があるものの、相手との関係性に基づいて、どの距離範囲までなら近づかれても不快な気分を感じないか、を示す指標となる。

この概念に基づき、ロボットと人間の距離の取り方や接近行動による印象評価は先行研究にて報告されている。Walters らは、人間からロボットへの接近行動とロボットから人間への接近行動について、人間が感じる、接近するもしくは接近を許すのに好ましい距離を調査した[91]。大半の実験参加者は、個人距離までを「好ましい距離」としたが、一方で密接距離までをも「好ましい距離」とする参加者も少なくなかった。Walters らはこの要因を性格の違いによるものではないかと分析している。

パーソナルスペースに関する心理・生理的反応についての定量的な計測は数多く行われているが[92]、Kennedy らは接近行動の際のその距離調整に扁桃体が関わっていることを報告している[93]。扁桃体は情動反応や記憶において主要な役割を果たすと考えられており、情動と距離調整は何らかの対応があり得ると考えた。

そこで、移動する対象とロボットの距離変化により、ロボットの情動が変化し、また情動の変化により対象との距離を調整するような心理モデルを搭載することで、ロボットが外界からの刺激に対し動的に情動を変化させ、さらに移動も含めた行動の変化が実現できると考えた。

心理モデルには、WE-4RII に搭載された三輪の心理モデル[]を用いた。この心理モデルにおけるロボット内部の心理と外界の間の情報の流れを Fig. 4. 27 に示す。まず、外界からの刺激はロボットのセンサにより感知される。そのセンシング情報のうち、例えば脛に触れられるといった反射動作を引き起こす情報は反射モジュールへ伝達

され、反射動作としてロボットの運動を実現する。そうでない情報は認識モジュールへと伝達される。例えば、どのような色の視標を見たとか、どのような匂いを嗅いだとかの情報である。これらは感受個性モジュールに伝達され、そこで、ロボットの個性に応じた、情動ベクトルへの作用外力（情動評価ベクトル）として変換される。感情モジュールでは、この作用外力を2次微分方程式である情動方程式への入力とし、その時点での情動ベクトルを計算する。そして、その情動ベクトルは表出個性モジュールへの入力となり、ここではどのような感情を表出するかが決定される。そして、その表出感情に基づいて、ロボットの表情を変化させるための表情アクチュエータによる運動が実現される。

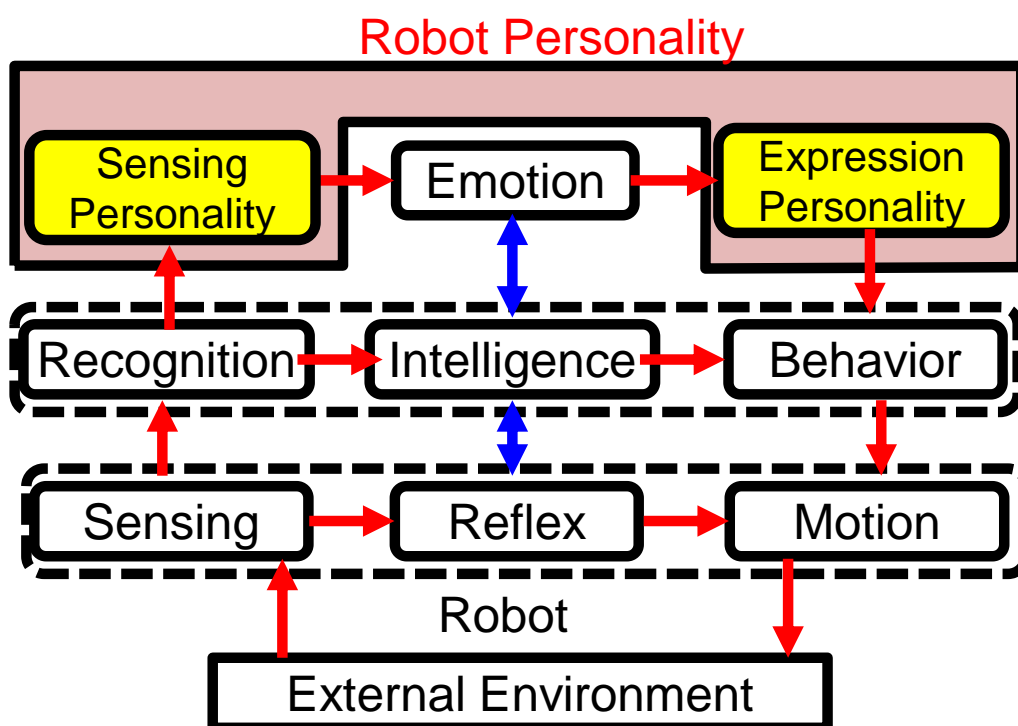


Fig. 4. 27 Miwa's mental model [47]

この心理モデルの感受個性モジュールおよび表出個性モジュール (Fig. 4. 27 の黄色で示した箇所) を、対象との距離変化およびロボットの移動を含めた行動に相応するように設定することで、外界からの刺激に対し動的に情動を変化させ、さらに移動も含めた行動の変化が実現できる。

まず、感受個性モジュールの設定について、このモジュールの出力は先述したように情動ベクトルへの作用外力である。情動ベクトルは快-不快、覚醒-不覚醒、確信-不確信の3次元感情空間における情動の表現であり、この作用外力も同じ3次元ベク

トルである。ロボットは対象である視標に対して好意を持っているとし、視標を見つけている、視標を見失っているといった状態や視標との距離に応じて、作用外力の各成分が変化するような感受個性を設定した。具体的には、視標を見つけている状態では確信度が増加、見失っている状態では覚醒度・快度・確信度が減少、視標がとても近い場合（450[mm]未満）では覚醒度が増加、視標が近い場合（450～750[mm]）では快度が増加、視標が遠い場合（750[mm]以上）では快度が減少とした（Table 4. 6）。

Table 4. 6 Sensing personality setting

Distance to the object	Activation	Pleasantness	Certainty
Find an object	0	0	+
Lose sight of an object	-	-	-
Very near by the object (< 450 [mm])	+	0	0
Near by the object (450~750 [mm])	0	+	0
Far from the object (> 750 [mm])	0	-	0

表出個性モジュールの設定については、WE-4RII と同じく、感情モジュールの出力である情動ベクトルの感情空間内の位置（Fig. 4. 21）に応じて、「喜び」や「驚き」といった感情がまず決まるようにした。この感情状態に対応して、ロボットの表情は決定される。また、腕の動作や視標との距離の取り方については4.3.1のTable 4. 1に示したものと同様にした。

以上の心理モデルによる情報の流れを、4.2.1のFig. 4. 1に示した視標追従歩行の情報の流れと統合した。視標追従は、三輪の心理モデルにおいては反射動作に当たり、Fig. 4. 1における各関節出力・歩行はFig. 4. 27の運動モジュールに該当する。読解性のために、三輪の心理モデルにおいて使用していない知能モジュールを除き、視標追従の情報の流れを簡略化すると、心理モデルと統合された視標追従歩行の情報の流れはFig. 4. 28に示すとおりになる。4.2の視標追従歩行の流れを青枠および青線で、心理モデルによる流れを赤枠および赤線で表している。緑枠はロボットの駆動される部位を表す。

この心理モデルと統合された視標追従歩行をKOBIAN-Rにて実現した。KOBIAN-Rの制御システム構成は4.2におけるFig. 4. 2とほぼ変わらないが、心理モデル関係の計算処理は画像処理PCにて行う方式とした。Fig. 4. 29に心理モデルの各モジュールの配置および情報の流れを示す。KOBIAN-Rにて実現された心理モデルと視標追従歩行の統合動作実験をFig. 4. 30に示す、

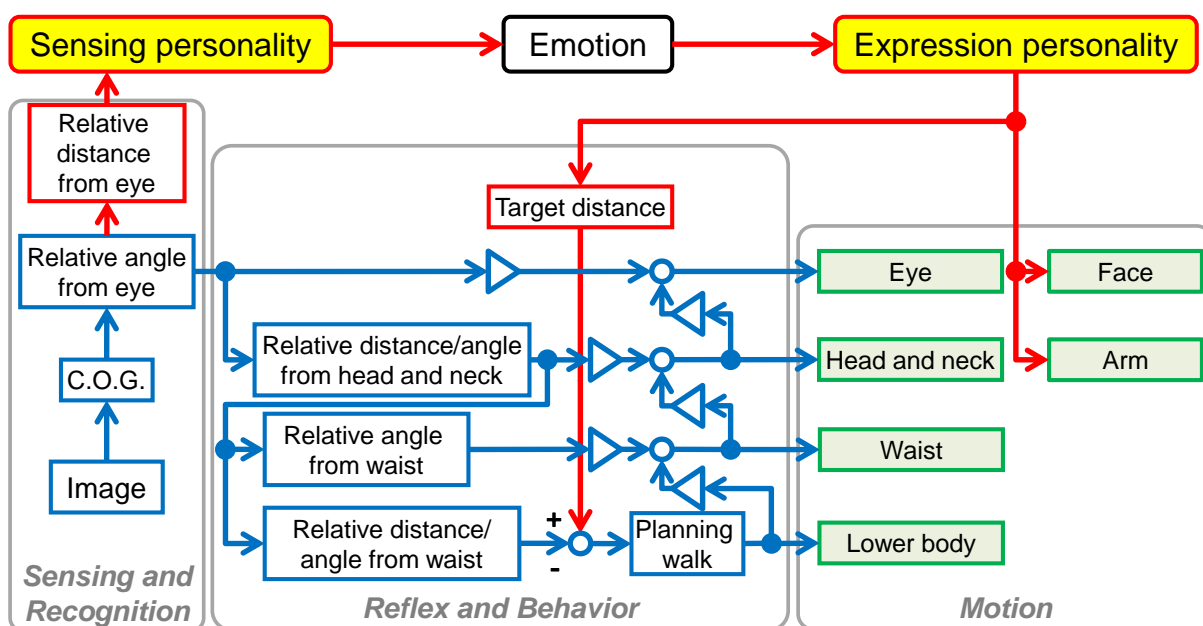


Fig. 4. 28 Information flow of visual tracking walking integrated with mental model

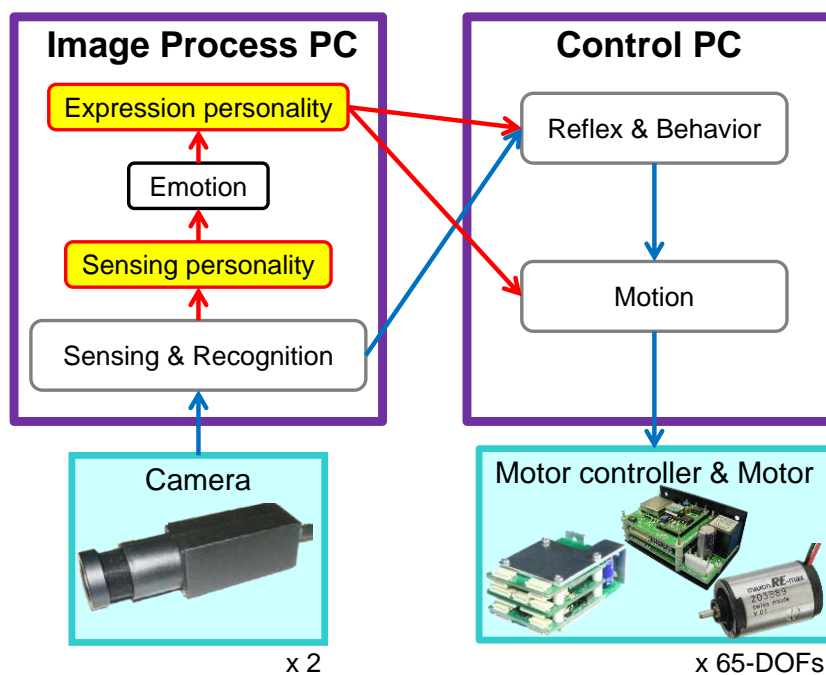


Fig. 4. 29 Information flow and component deployment in KOBIAN-R

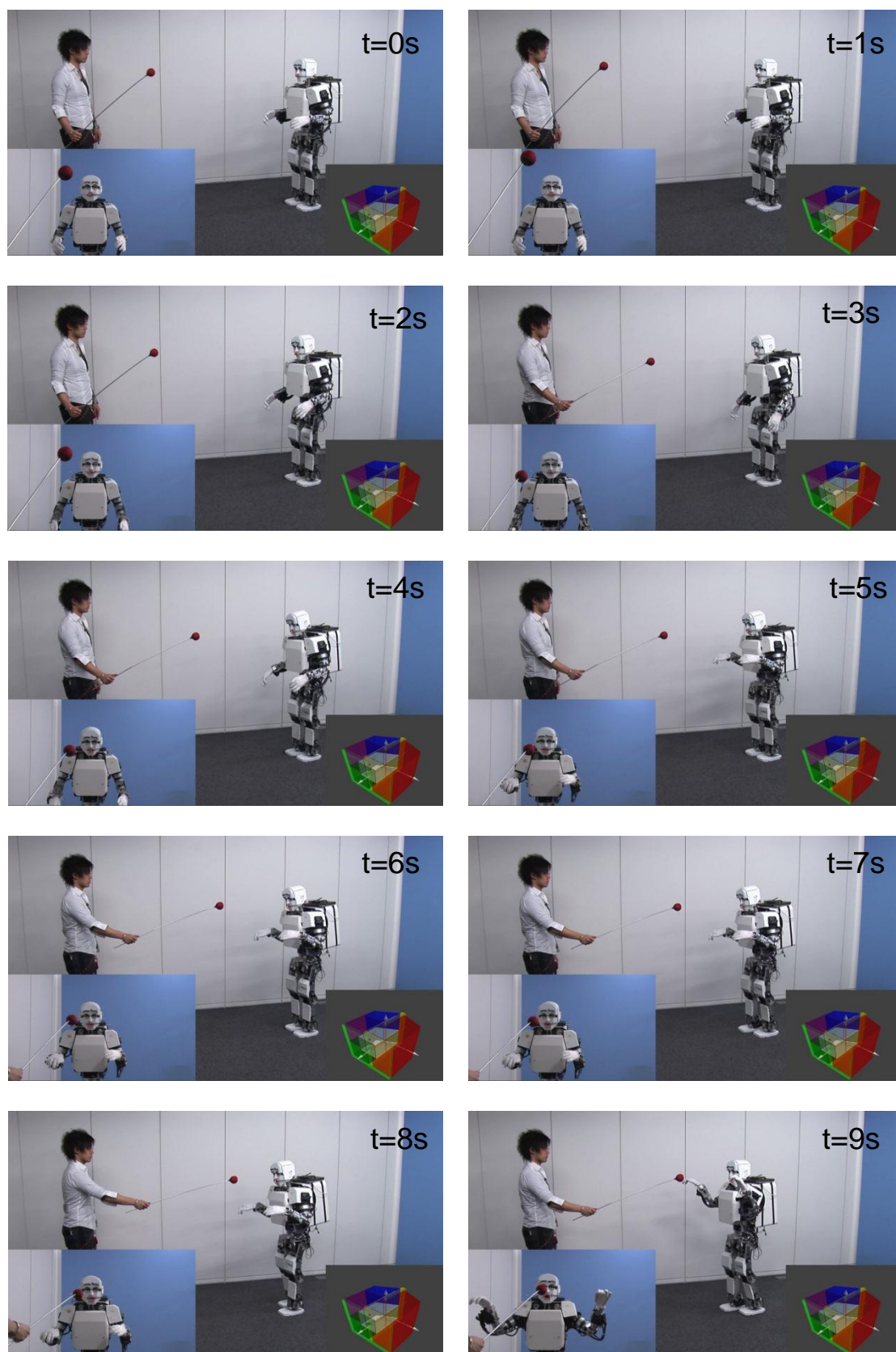


Fig. 4. 30 KOBIAN-R's visual tracking walking with mental model (1/2)

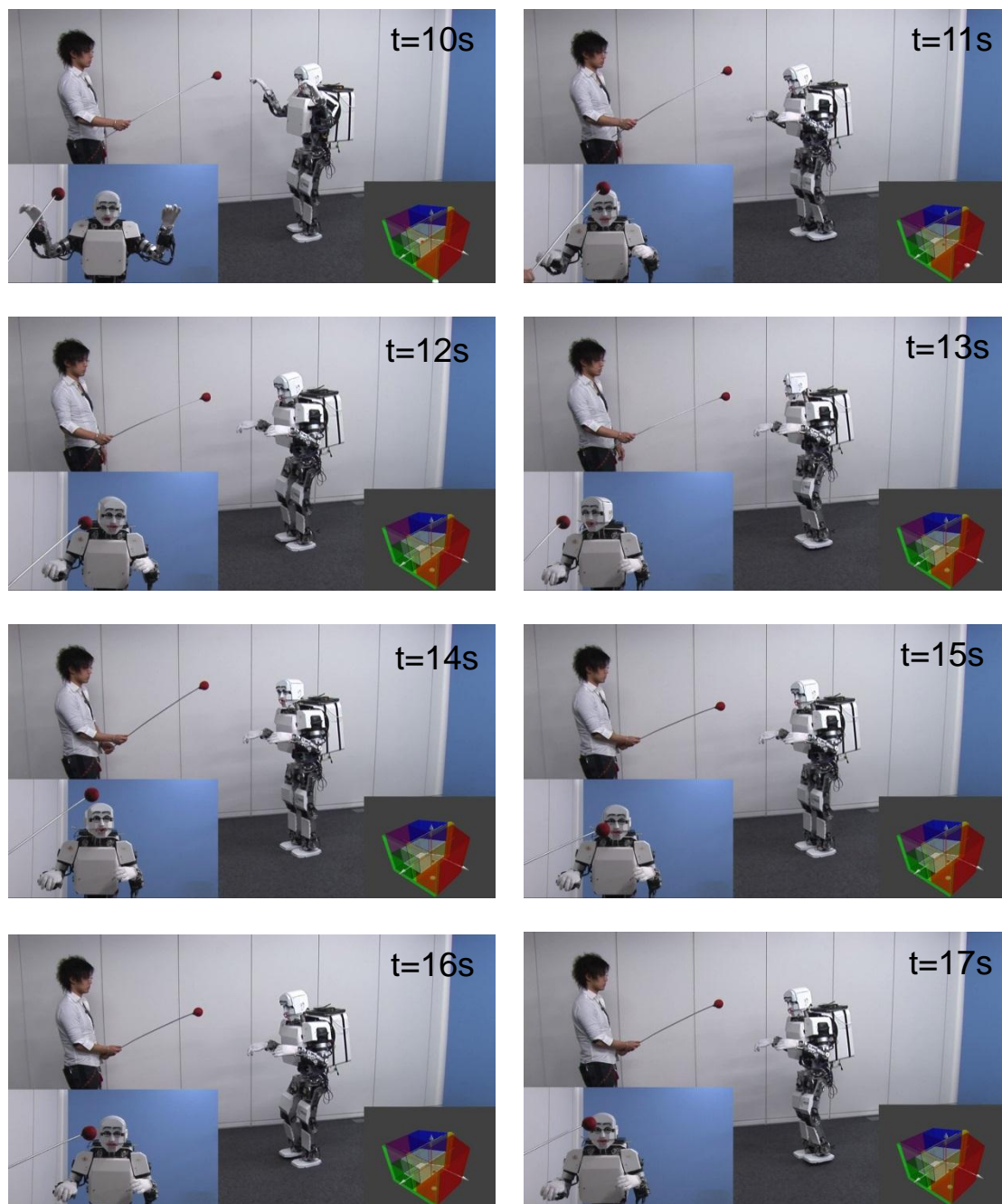


Fig. 4.30 KOBIAN-R's visual tracking walking with mental model (2/2)

KOBIAN-Rは動作実験開始時(0[s]),「平常」感情状態である。視標を見失っていた状態なので快度・覚醒度・確信度が減少し,情動ベクトルは「悲しみ」の領域に遷移する(2[s])。視標を見つけると快度・覚醒度の減少方向への作用外力が止まるので,情動弾性項に基づき快度・覚醒度はゼロに戻ろうとする。一方で作用外力の確信度は増加する。KOBIAN-Rは視標に近づいていき,実験者も視標をKOBIAN-Rに近づける(5~7[s])。視標との距離が近づくと(400[mm])快度も増加する。実験者が

急に視標を近づけると (8 [s]), 覚醒度が増加し, KOBIAN-R は「驚く」(9~10 [s]). 実験者が視標を遠ざけると (600 [mm]), 情動弾性項に基づき覚醒度はゼロに戻ろうとする. この間, 作用外力の快度増加は継続しているので, KOBIAN-R の情動ベクトルは「喜び」領域に遷移する (11 [s]~).

4.5 心理モデルとの統合についての印象評価

4.5.1 実験設定

ロボットの移動および視標への反射・反応的行動, そして心理モデルによる動的な情動変化が, ロボットの印象にどのように影響するのか, 評価実験を行った.

まず, ロボットの行動についての複数条件の動画を撮影した. 各条件の比較を Table 4.7 に示す. 条件 A は対照動画であり, 視標はロボット前方にて動くが, ロボットはその場で立ち続けるだけで何もしない (Fig. 4.31). 条件 B は, WE-4II のような移動しないロボットを想定し, 上半身を使って視標追従する (Fig. 4.32). 条件 C は, 4.2・4.3 と同様に, 上半身だけではなく歩行も用いて視標追従する (Fig. 4.33). 条件 D は, 条件 C に対して心理モデルによる動的な情動変化が可能となっており, 視標との距離により「悲しみ」・「驚き」・「喜び」を表出する (Fig. 4.34). なお, 条件 D の情動変化は Fig. 4.30 のものと同様である. 各条件につき, ロボットの行動全体が観えるように斜めから撮影した動画, ロボットの表情が観えるように正面から撮影した動画の計 2 本を作成した.

Table 4.7 Conditions of videos

#	上半身による追従	歩行による追従	心理モデルによる情動変化
A	No	No	No
B	Yes	No	No
C	Yes	Yes	No
D	Yes	Yes	Yes

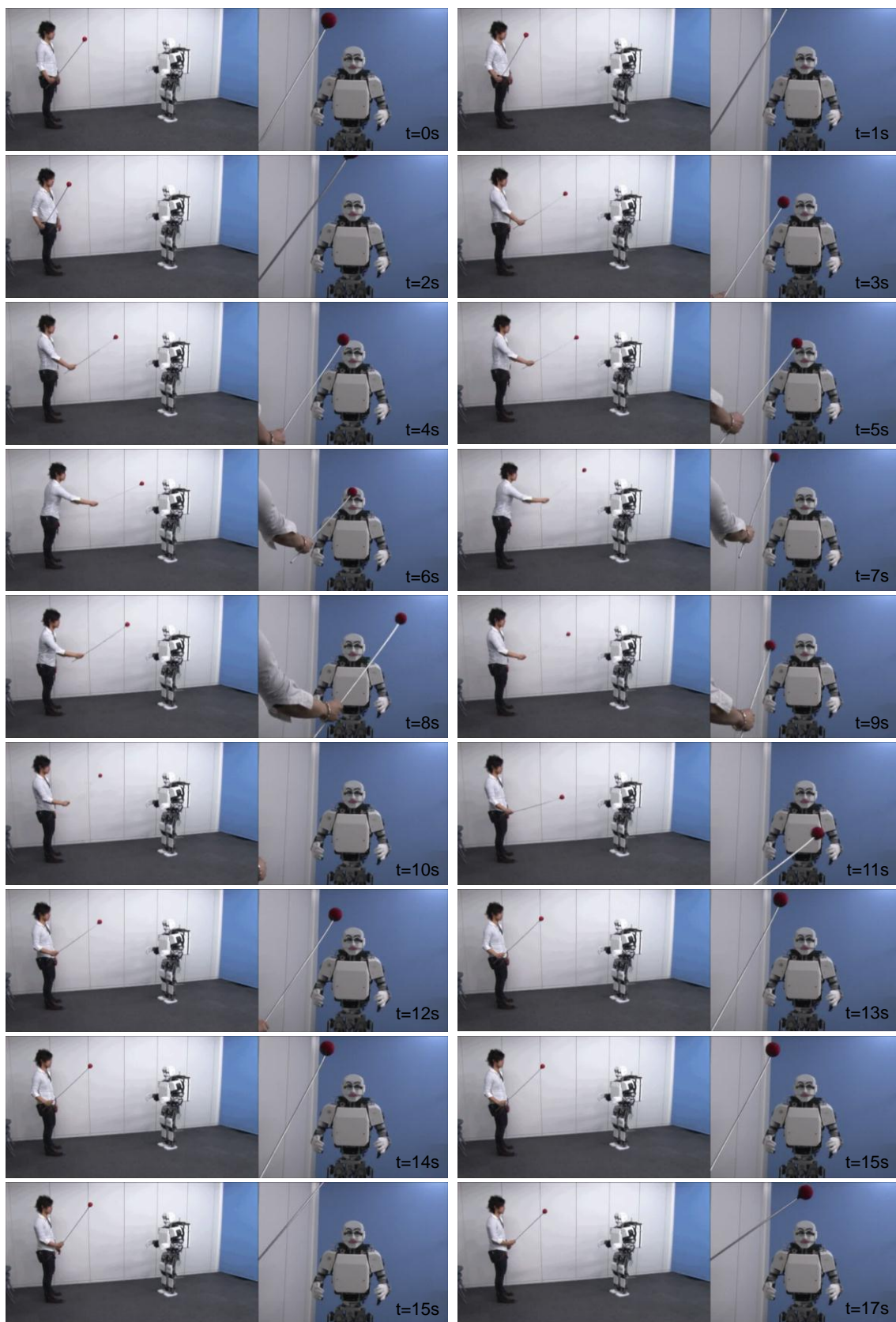


Fig. 4. 31 Condition A: without moving

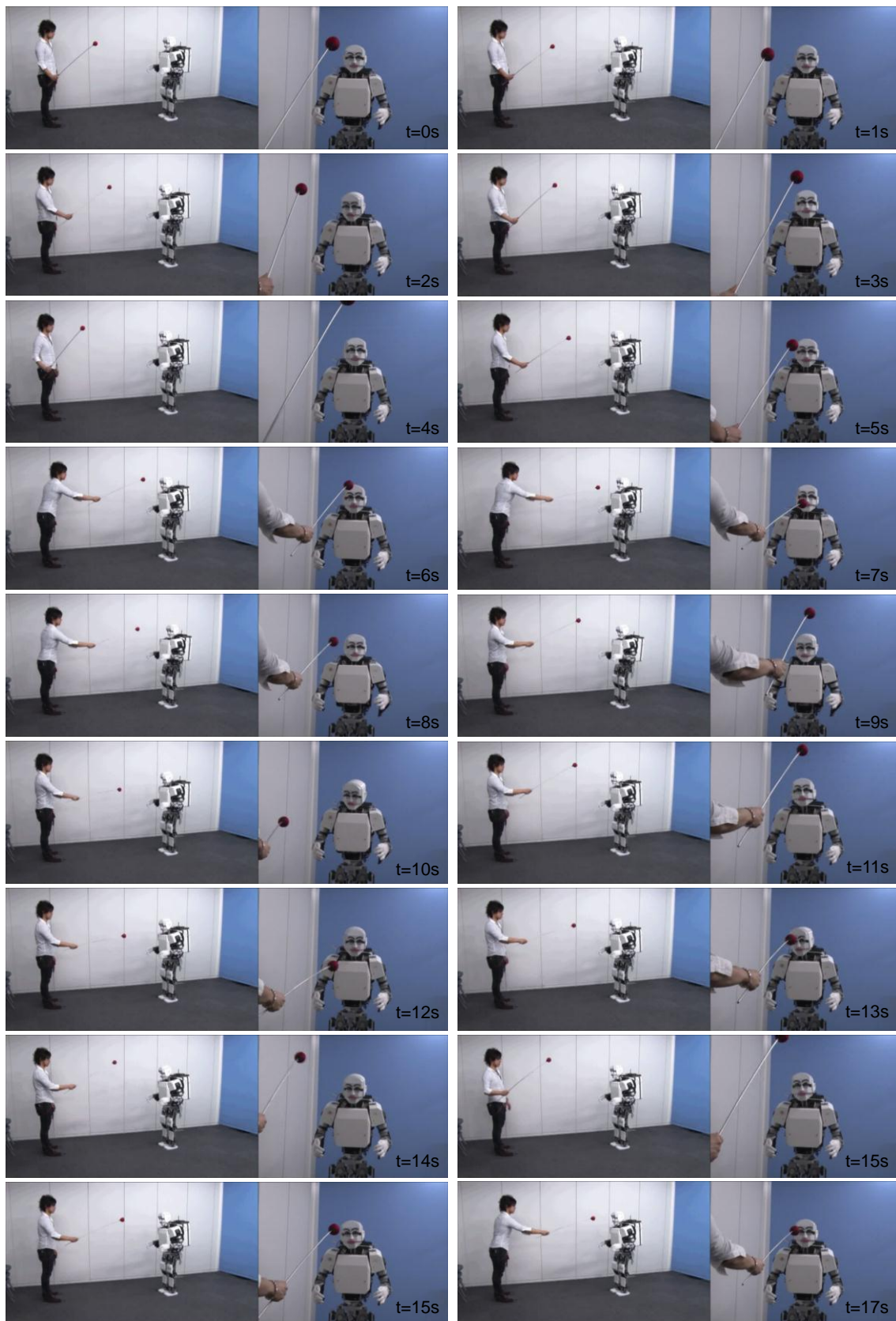


Fig. 4. 32 Condition B: Visual tracking with the upper body

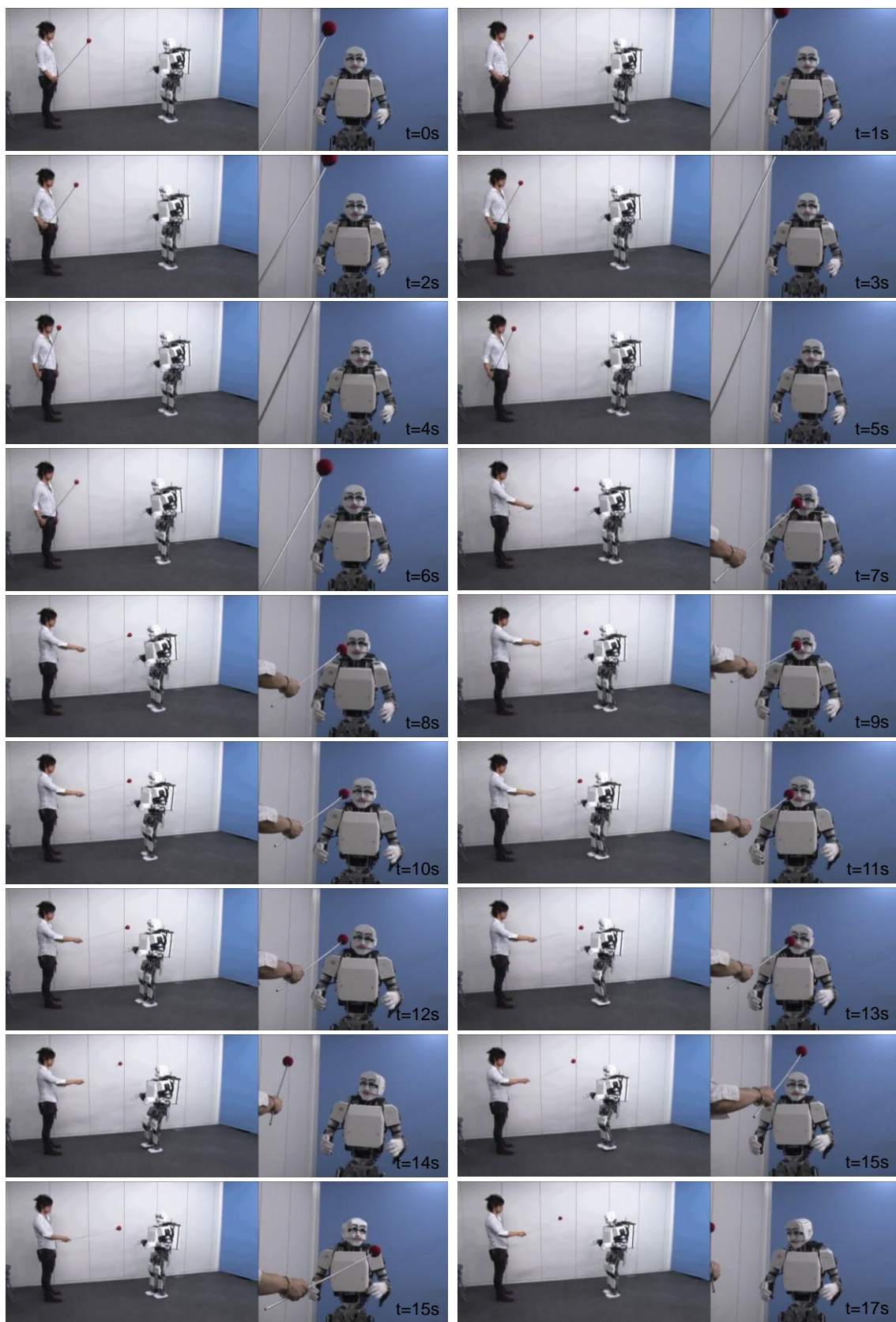


Fig. 4. 33 Condition C: Visual tracking walking

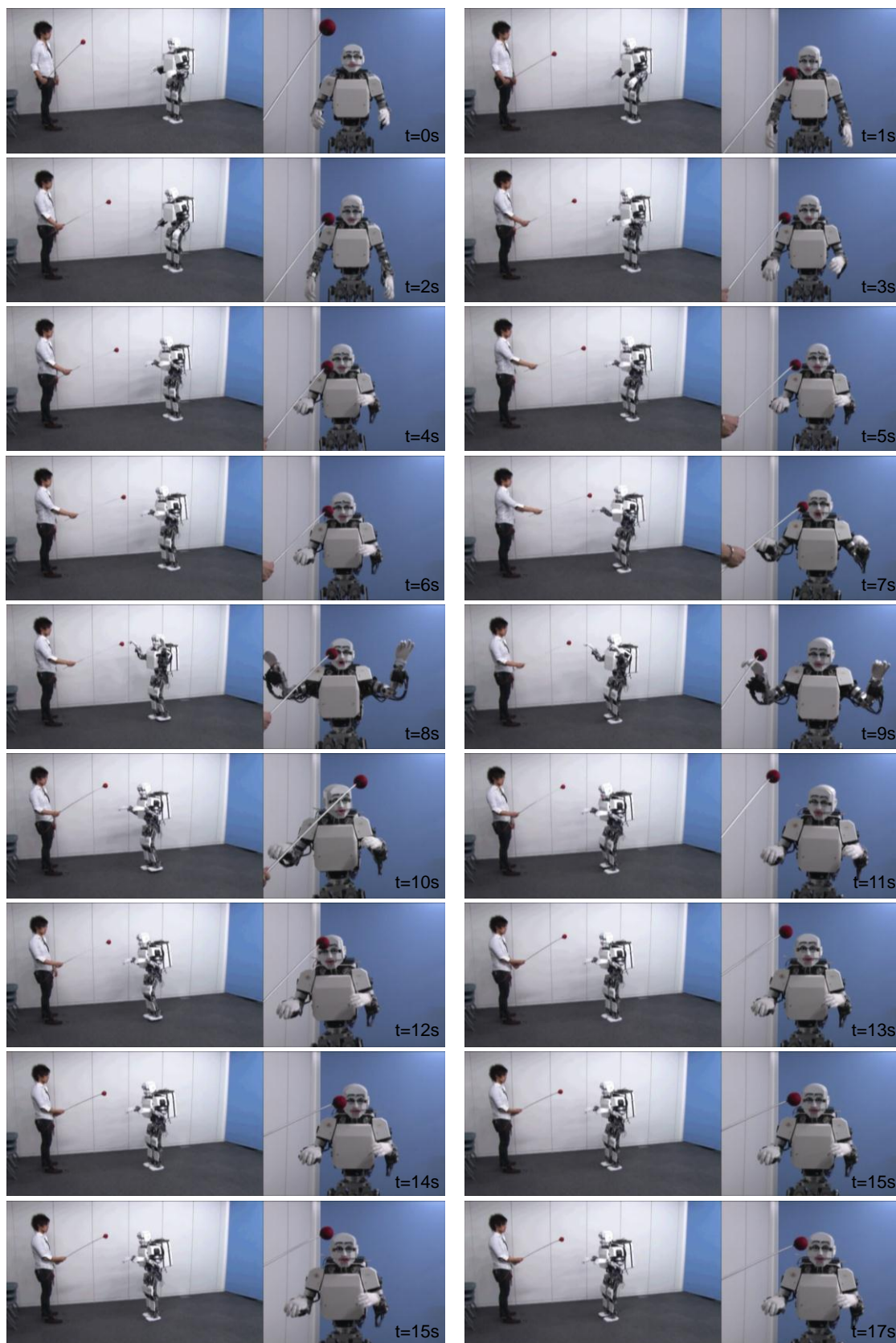


Fig. 4. 34 Condition D: Visual tracking walking with dynamical change of emotion

30名の男女（男性23名，女性7名，平均年齢26歳）がこの評価実験に参加した。実験参加者はスクリーンに投影された各動画を観て，アンケートに回答した。動画はプロジェクタを用いて，ロボットの実寸サイズと同等になるよう投影された。実験参加者は，各条件につき，全体動画・正面動画の順で動画を観てから，アンケート用紙に記入した。各条件の提示順は実験参加者毎にランダム化するようにした。実際は複数の実験参加者が一度に動画を観る場合があったが，この際に実験参加者間で話し合ったり，目配せしたりといったようなコミュニケーションは無かった。Fig. 4.35にアンケート実施場所の様子を示す。

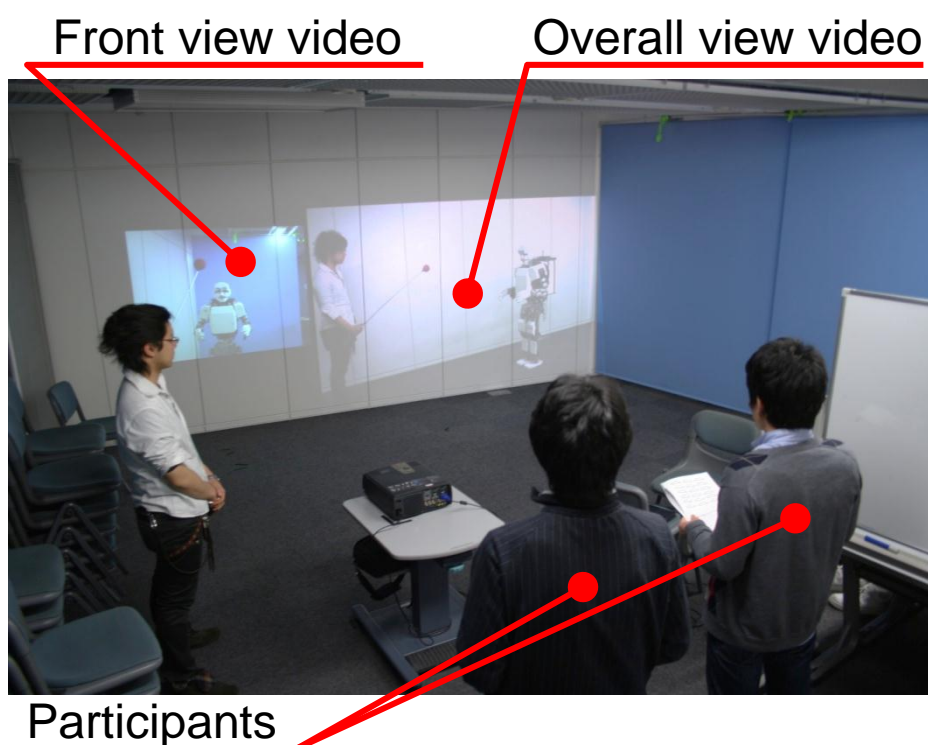


Fig. 4.35 Setting of the place of the questionnaire

アンケート項目はロボットの印象についての54の評価項目とした（Table 4.8）。その内の40項目はPHIT[71][94]から選んだ。実験参加者は54の評価項目それぞれについて，7段階で記入した。

Table 4. 8 Evaluation items in the questionnaire

#	Evaluation	#	Evaluation
1	本当のロボットのように思える	28	必要性を感じない
2	動きがぎこちない	29	外部からの刺激に敏感に反応している
3	これを見て技術の進歩に驚いた	30	いかにもロボットらしい感じがする
4	かわいい	31	人間同士の関係性を壊しそうだ
5	何のために必要かわからない	32	この動きは滑らかだ
6	自分の意思を持っていそうだ	33	見た目のデザインが悪い
7	機能的に優れていると思う	34	この運動能力は低いと思う
8	これにそのうち人間が支配されるのではと思う	35	過度に人間に近すぎると思う
9	見た目は人間らしい	36	動き方に親近感を感じる
10	心を持っていそうだ	37	顔の表現力が豊かだ
11	動作中の音はうるさい	38	やさしい感じがする
12	気持ち悪い	39	動きが激しい
13	これを見てるとロボットとは思えない	40	感じが良い
14	動きが遅い	41	安全そうである
15	認識能力は高い	42	動きが積極的である
16	怖い	43	暖かみがある
17	使用用途がわからない	44	近づきやすい
18	ロボットらしい見た目をしている	45	動きが強気である
19	これがあると人間の存在価値が薄れそうだ	46	明るさを感じる
20	親しみやすい	47	思いやりを感じる
21	これにはコストが高くかかりそうだ	48	動きが派手である
22	この動作音は生活の邪魔にならない	49	面白い
23	悪用される可能性が高そうだ	50	愉快だ
24	人間らしさを感じる	51	動きが陽気である
25	この動作は不自然だ	52	好きだ
26	動きが少ない	53	複雑である
27	この視線による表現は怖い感じがする	54	賢そうである

4.5.2 実験結果と考察

アンケートから得られた各評価項目の評価スコアを SD 法[95]にて分析した。因子分析において固有値の差に基づき 5 因子を抽出した。累積寄与率は 76.25%であった。パーシモニー基準で直交回転させた後の各評価項目の因子負荷量を Table 4.9 に示す

因子 I は、「かわいい」や「好きだ」、「近づきやすい」といったポジティブな主観を示す評価項目が多く含まれたので、因子名を「好意」と名付けた。

因子 II は、用途や必要性、能力に関する評価項目が多く含まれたので、因子名を「有効性」と名付けた。

因子 III は、動作に関する評価項目が多く含まれたので、因子名を「活動性」と名付けた。

因子 IV は、人間や社会との関係に関する評価項目が多く含まれたので、因子名を「社会への影響力」と名付けた。

因子 V は、見た目や動作についてのロボットらしさに関する評価項目が多く含まれたので、因子名を「ロボットらしさ」と名付けた。

(1) 移動による印象

条件 A, B, C の比較を Fig. 4.36 に示す。特に、「好意」・「有効性」・「活動性」・「社会への影響力」について、条件 B と C の間に有意差が検出された。「ロボットらしさ」については有意差が検出されなかった。

条件 C は B に対して「活動性」が増加した。条件 C において移動が加わっているため、より活動的な印象が与えられることは理に適っていると言える。

条件 C は B に対して「社会への影響力」が増加した。これは、移動ができることでロボットが社会においてより重要な役割を果たすことができる、と実験参加者が期待していることが反映された、と考えられる。

一方で、条件 C は B に対して、「好意」と「有効性」が減少している。「好意」について、これはロボットの移動、特に人間への感情表出無しの接近行動が、その意図をよく読み取れないために、怖い印象を与えたのではないかと考えられる。同様に、「有効性」についても、何故そのような行動を取るのかが読み取れなかったから、という説明が可能である。

Table 4. 9 Result of factor analysis (1/2)

Factor	Evaluation item	Factor loading				
		I	II	III	IV	V
好意 N=25	かわいい	-0.77	-0.04	0.06	0.12	-0.02
	好きだ	-0.77	0.04	0.08	0.12	0.14
	近づきやすい	-0.76	-0.08	0.16	0.07	0.04
	明るさを感じる	-0.75	-0.06	-0.22	0.04	-0.08
	やさしい感じがする	-0.75	0.02	0.06	-0.14	-0.14
	愉快だ	-0.72	-0.04	-0.19	0.13	0.08
	暖かみがある	-0.72	-0.05	-0.02	-0.10	-0.07
	感じが良い	-0.69	0.03	0.07	-0.15	0.03
	動き方に親近感を感じる	-0.69	0.09	-0.09	-0.06	0.01
	面白い	-0.69	0.07	-0.14	0.08	0.23
	思いやりを感じる	-0.68	0.05	0.02	-0.14	0.08
	人間らしさを感じる	-0.68	-0.04	-0.18	-0.12	-0.05
	親しみやすい	-0.68	0.04	0.00	0.05	0.15
	動きが陽気である	-0.66	0.02	0.22	-0.11	-0.08
	心を持っていそうだ	-0.58	0.04	-0.11	-0.41	-0.19
	顔の表現力が豊かだ	-0.53	0.01	-0.20	-0.12	-0.10
	見た目は人間らしい	-0.49	0.01	-0.04	-0.17	0.16
	自分の意思を持っていそうだ	-0.48	0.08	-0.22	-0.39	-0.07
	この動きは滑らかだ	-0.47	0.23	-0.15	-0.17	0.13
	これを見て技術の進歩に驚いた	-0.45	0.16	-0.25	-0.33	0.09
	機能的に優れていると思う	-0.39	0.21	-0.22	-0.30	0.08
	外部からの刺激に敏感に反応している	-0.39	0.29	-0.24	-0.16	0.27
賢そうである	-0.38	0.34	0.04	-0.34	0.25	
認識能力は高い	-0.36	0.26	-0.35	-0.12	0.22	
これを見てるとロボットとは思えない	-0.26	-0.20	0.03	-0.22	-0.18	

Table 4. 9 Result of factor analysis (2/2)

Factor	Evaluation item	Factor loading				
		I	II	III	IV	V
有効性 N=9	使用用途がわからない	-0.07	-0.81	0.03	0.10	-0.17
	必要性を感じない	0.05	-0.78	-0.03	0.11	-0.13
	何のために必要かわからない	0.01	-0.75	-0.01	-0.03	-0.17
	この運動能力は低いと思う	0.04	-0.65	0.20	0.09	0.09
	この動作は不自然だ	0.20	-0.62	-0.18	-0.08	0.09
	動きが遅い	-0.12	-0.43	0.08	0.04	0.31
	見た目のデザインが悪い	0.04	-0.40	-0.09	-0.02	0.35
	気持ち悪い	0.26	-0.38	-0.19	-0.28	0.28
	動きがぎこちない	-0.04	-0.32	-0.09	0.10	0.31
活動性 N=7	動きが派手である	-0.28	-0.08	-0.74	0.11	0.04
	動きが強気である	-0.28	-0.13	-0.67	-0.07	-0.03
	動作中の音はうるさい	-0.07	-0.01	-0.57	-0.11	0.14
	動きが激しい	-0.23	-0.10	-0.57	-0.04	0.02
	動きが積極的である	-0.32	0.10	-0.53	-0.10	0.10
	動きが少ない	0.01	-0.49	0.50	-0.18	0.09
	この動作音は生活の邪魔にならない	-0.07	-0.25	0.45	-0.18	0.08
社会 への 影響力 N=6	これにそのうち人間が支配されるのではと思う	-0.16	0.04	0.01	-0.64	-0.19
	過度に人間に近すぎると思う	-0.19	0.06	0.01	-0.64	-0.04
	これがあると人間の存在価値が薄れそう	-0.22	0.08	0.14	-0.63	-0.03
	悪用される可能性が高そう	-0.09	0.04	-0.02	-0.63	0.00
	人間同士の関係性を壊しそう	-0.07	-0.05	-0.02	-0.55	0.00
	怖い	0.28	-0.25	-0.10	-0.35	0.34
ロボット らしさ N=7	本当のロボットのように思える	-0.15	0.13	-0.02	-0.10	0.69
	いかにもロボットらしい感じがする	-0.14	0.02	-0.01	0.17	0.67
	ロボットらしい見たい目をしている	-0.19	-0.17	-0.04	0.26	0.63
	この視線による表現は怖い感じがする	0.31	-0.16	0.08	-0.32	0.47
	これにはコストが高くかかりそう	-0.22	0.12	-0.25	-0.04	0.40
	安全そうである	-0.32	-0.07	0.36	-0.01	0.36
	複雑である	-0.31	0.16	-0.13	-0.09	0.34

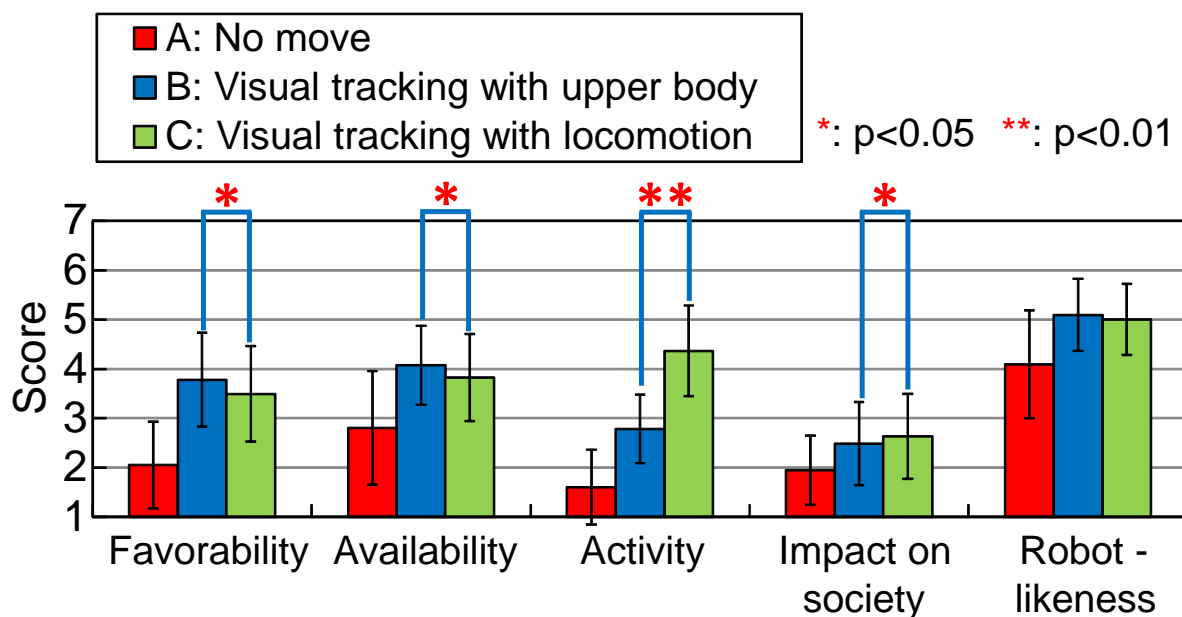


Fig. 4. 36 Comparison of the evaluation scores between conditions A, B, and C

(2) 心理モデルと情動表出による印象

条件 A, C, D の比較を Fig. 4. 37 に示す. 特に, 「好意」・「有効性」・「活動性」・「ロボットらしさ」について, 条件 C と D の間に有意差が検出された. 「社会への影響力」については有意差が検出されなかった.

条件 D は C に対して, 「好意」・「有効性」・「活動性」が増加し, 「ロボットらしさ」が減少した. 条件 D では表情や腕の動きが加わっているため, より活動的な印象が与えられることは理に適っていると言える. 「好意」の増加と「ロボットらしさ」の減少は, 情動表出によりロボットの意図が読み取りやすくなり, その意図と行動の連関により親近感と人間らしさがより感じられるようになったため, と考えられる. また, 「有効性」の増加は, 実験参加者が, 人間-ロボット間のインタラクションにおいて情動表出が大事であると感じたためと考えられる.

特に(1)における分析と合わせて考えると, 条件 C において減少していた「好意」および「有効性」が, 条件 D においては増加している. これは, 情動表出による意図伝達のないロボットの自律的な行動では, 人間に怖さや無意味さを感じさせ, 情動表出による意図伝達があれば, 人間にとっても理解しやすいロボットの行動が実現できる, と考えられる.

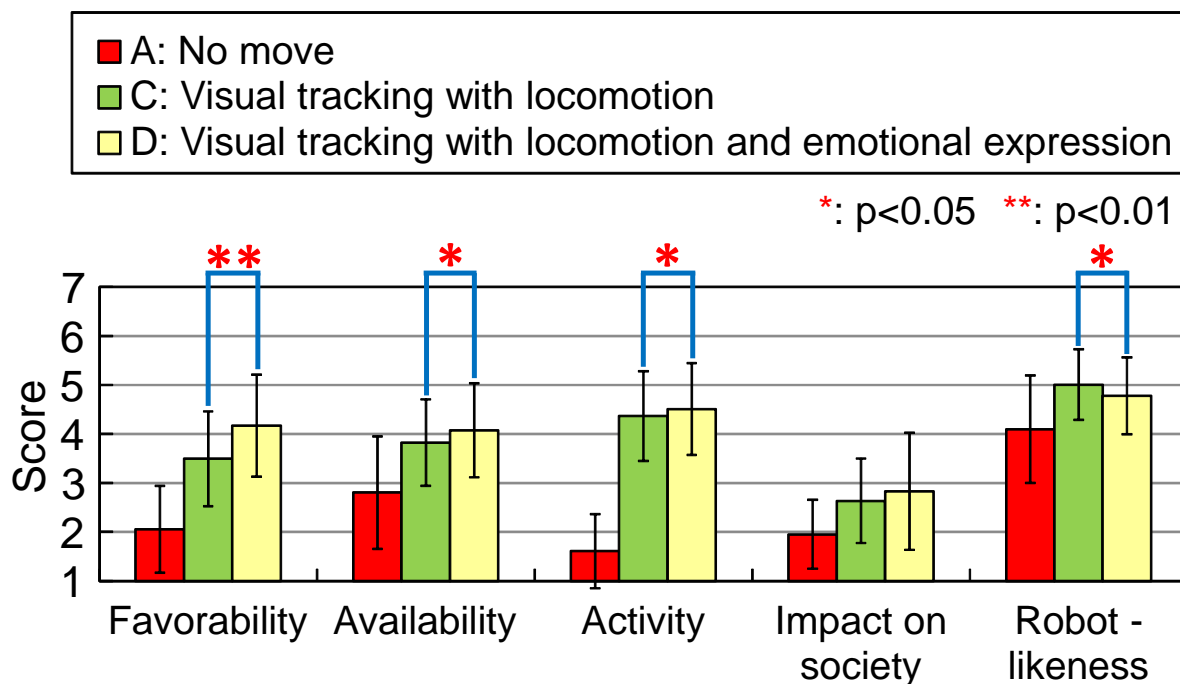


Fig. 4. 37 Comparison of the evaluation scores between conditions A, C, and D

4.5.3 この節のまとめ

この節では、移動と反射・反応的行動および心理モデルによる情動表出がロボットの印象にどのように影響するかについて、評価実験を行った。

ロボットが視標に対して、(A) 何もしない、(B) 上半身のみで追従する、(C) 上半身と歩行で追従する、(D) 心理モデルによる情動表出をしながら上半身と歩行で追従する、といった4条件の動画を作成し、これらを用いてアンケートによる印象評価を行った。

アンケートの結果をSD法により分析した。因子分析により「好意」・「有効性」・「活動性」・「社会への影響力」・「ロボットらしさ」の5因子が抽出された。心理モデルによる情動表出無しの条件Cでは、上半身のみ追従である条件Bに対し、「活動性」および「社会への影響力」について増加したものの、「好意」・「有効性」が減少した。心理モデルによる情動表出有りの条件Dでは、条件Cに対し、「好意」・「有効性」・「活動性」が増加し、「ロボットらしさ」が減少した。

この結果により、ロボットが外界からの刺激に反応し、自律的に行動したとしても、情動表出無しではロボットの意図が理解しづらく、何をしているのかわからない、親近感も湧かないと感じられる、ということが考えられた。自律的な行動において情動表出が実現されることで、ロボットの意図がわかりやすくなり、何をしているのかが

わかる，親近感も湧くことがわかった．また，移動を伴う自律的行動自体が，社会においてロボットがより重要な役割を果たせる，という印象に寄与することがわかった．

4.5 まとめ

本章では，ロボットの自律的行動に着目し，移動および反射・反応的行動，さらには心理モデルによる情動表出が与える印象を評価した．

まず，KOBIAN の視標追従歩行の開発について説明した．本手法では，短期 FFT 型オンライン歩行パターン生成と前庭動眼反射を基にした視標追従動作を統合し，2足歩行ロボットにおける反射・反応的行動生成を実現した．これにより，安定な2足歩行と反射・反応的なオンラインでの行動の両立を果たした．

次に，この行動中の情動表出について評価した．移動有の場合と無しの場合を比較し，移動により意図された情動が読み取りづらくなることが明らかになった．しかし，その情動が読み取れた場合には，移動がその情動の強さを補強することがわかった．

さらに，三輪の心理モデルと統合し，外界からの刺激に対して動的に情動を変化させ，それによる行動の変化を実現した．これらの印象の違いを SD 法によって評価したところ，ロボットが外界からの刺激に反応し，自律的に行動したとしても，情動表出無しではロボットの意図が理解しづらく，何をしているのかわからない，親近感も湧かないと感じられる，ということがわかった．自律的な行動において情動表出が実現されることで，ロボットの意図がわかりやすくなり，何をしているのかわかる，親近感も湧くことがわかった．また，移動を伴う自律的行動自体が，社会においてロボットがより重要な役割を果たせる，という印象に寄与することがわかった．

第5章 脚式ロボットと車輪式ロボットの 印象評価

- 5.1 はじめに
- 5.2 外観の与える印象とその評価手法
- 5.3 KOBIAN と HABIAN の印象評価
- 5.4 まとめ

5.1 はじめに

本章では、ロボットのハードウェア構成が与える印象について評価する。ロボットのハードウェア構成は特に機能要件に束縛されるものであり、また、技術の進展度合いに依存するものである。ここでは、その構成の違いが、人間に与える印象にどのように影響するのかを論ずる。

人間を支援するロボットといっても、一概に1つのプロダクトで全てのニーズを賄えるとは限らない。既存のプロダクトと同様に、汎用用途のプロダクトよりも、特定用途のプロダクトを開発する方が、経済性を満足することもあるだろう。

もし、十分に実用的な2足歩行技術が確立され、人間の生活環境下において安定した2足歩行が可能なロボットをつくることができ、なおかつ、経済性においてさほど劣るものでなければ、将来の支援ロボットの移動形態は2足歩行のみになるだろう。

しかしながら、この実用性と経済性が満たされるのがいつになるかは定かではない。それまでは、ロボットの移動形態は特定目的を満たすのに十分なものに留まるだろう。

車輪移動式の移動形態は一般に、平坦な路面での性能に優れているが、段差や凹凸のある路面においては十分とは言えない。段差・階段の多い一般家庭においては不向きである。一方で、公共空間においては車椅子のためのバリアフリー設計がなされているところもあり、車輪移動式の活動空間は徐々に広がってきている。ロボットも、当面は公共空間における人間支援から導入されていくと考えられる。

当面のプロダクトとしてのロボットにとって、移動形態は機能的要件にあたる。すなわち、どのような場所でどのような活動を行うのかがロボットの機能的要件として

与えられ、ロボットの開発にあたっては、それらの要件を満たすようにハードウェアが設計される。

ハードウェア構成、特に移動形態はロボットの見た目を束縛する。例えば、2足歩行式、4足歩行式、2輪式、4輪式、クローラ式では、その外観は全く異なる。外観が機能的要件に従属するということは、それを見る・利用するユーザに与える印象も機能的要件に従属することになる。

一方で、ロボット、特にヒューマノイドロボットに対して、ユーザは何らかの心理的評価をするだろう。例えば、それが気持ち悪いとか、カッコいいとか、危なっかしいとか。こういった、ユーザにプロダクトをどのように受け取ってほしいのか、についてもロボットのヴェンダは気を付けなければならない。何故ならば、こうした心理的側面もまたユーザによるプロダクトへの評価であるからだ。

ヒューマノイドロボットは特に擬人化されているので、ユーザは、そのロボットの実際のスペック以上の性能・機能を期待するかもしれない。一方で、その力学的安定度合いを直感的に推し量り、危なっかしさを感じ取るかもしれない。

機能的要件がハードウェア構成を決め、ユーザの心理的評価を決めるならば、それはどのように評価すればいいのだろうか。この観点に基づき、本章では、ヒューマノイドロボットの移動形態が、どのように印象に影響するのかを評価した。

5.2 外観の与える印象とその評価手法

ハードウェア構成は外観および動作に多く影響を与えるので、ここでは動画を提示し、それを見る人に印象を答えてもらうことにした。

印象の採取には、Semantic Differential法（SD法）[95]を用いた。SD法とは相反する形容詞対を両極にもつ数個の段階尺度に基づく評価手法である。今回は被験者がほぼ日本人であることを踏まえ、形容詞対が日本語であり、ヒューマノイドのインタラクションの評価[96]に使われたことのある先行研究の28個の形容詞対を用いることにした。実際に用いた形容詞対をTable 5.1に示す。各形容詞対（adjective pairs）についての7段階尺度（非常に・かなり・やや・どちらでもない・やや・かなり・非常に）の評定を、ポジティブな形容詞側（Table 5.1中の左側の形容詞）が高くなるように1から7までの数値化した。

Table 5. 1 Adjective Pairs

やさしい	こわい
感じのよい	感じのわるい
親しみやすい	親しみにくい
安全な	危険な
暖かい	冷たい
かわいらしい	にくらしい
うちとけた	堅苦しい
わかりやすい	わかりにくい
近づきやすい	近づきがたい
明るい	暗い
思いやりのある	わがままな
人間的な	機械的な
充実した	空虚な
面白い	つまらない
愉快的な	不愉快的な
好きな	嫌いな
興味深い	退屈な
良い	悪い
複雑な	単純な
速い	遅い
すばやい	のろい
はげしい	おだやかな
積極的な	消極的な
強気な	弱気な
派手な	地味な
陽気な	陰気な
敏感な	鈍感な
賢い	愚かな

5.3 KOBIAN と HABIAN の印象評価

KOBIAN, HABIAN, 人間の役者の情動表出動画を実験参加者に提示し, 先の形容詞対に対して回答してもらった. 動画の情動表出動作は, 第3章において漫画家・写真家に作成して頂いた情動表出姿勢に5秒間で推移するものであった. また, 一つの情動表出動画について3回繰り返して提示した. 情動表出動画の提示順は実験参加者毎にランダムな順とした. KOBIAN, HABIAN, 人間の役者の情動表出動画を Fig. 5.1 ~5.4 に示す.

実験参加者は早稲田大学の学生・助手の計30名であり, 平均年齢26歳の男性29名, 女性1名であった.

これにより得られた印象評価データの因子分析を行なった. 固有値が1以上である4因子を抽出し, 得られた解の累積説明率は85.5%であった. バイコーティミン基準で斜交回転させた後の各項目の因子負荷量を Table 5.2 に示す.

まず, 因子 I については, 「強気な」, 「陽気な」, 「積極的な」といった項目で負荷が高かったため, 「活動性」因子と名付けた. 因子 II 以降についても負荷が高い形容詞に基づいてそれぞれ「期待性」, 「安心感」, 「性能」因子と名付けた.

因子分析の結果得られた標準因子得点に基づき, KOBIAN, HABIAN, 人間の役者それぞれによる感情表現による印象を比較し (Fig. 5.5), KOBIAN と HABIAN の間で t 検定を行なったところ, 活動性と安心感に関して有意水準1%で, 期待性に関して有意水準5%で有意差が確認された.

活動性に関して HABIAN に対して KOBIAN が高い値を示しているのは, 脚によるダイナミックが動きに起因していると考えられる. 逆に, 安心感に関して KOBIAN が低い値を示しているのは, 人間ほどには洗練されていない脚の動きが, 見る人に転倒に対する不安定性を感じさせていると考えられる. また, 期待性に関しては, 脚式ロボットによる動作の方が新規性を感じさせると考えられる.



(a) 怒り



(b) 喜び



(c) 驚き



(d) 嫌悪



(e) 悲しみ

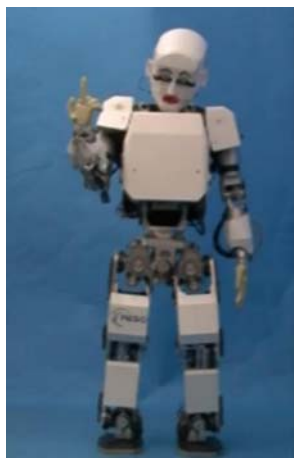


(f) 恐れ



(g) 困惑

Fig. 5. 1 Snapshots of KOBIAN's emotion expressions by cartoonist



(a) 怒り



(b) 喜び



(c) 驚き



(d) 嫌悪



(e) 悲しみ



(f) 恐れ



(g) 困惑

Fig. 5. 2 Snapshots of KOBIAN's emotion expressions by photographer



(a) 怒り



(b) 喜び



(c) 驚き



(d) 嫌悪



(e) 悲しみ



(f) 恐れ



(g) 困惑

Fig. 5. 3 Snapshots of HABIAN's emotion expressions by cartoonist



(a) 怒り



(b) 喜び



(c) 驚き



(d) 嫌悪



(e) 悲しみ



(f) 恐れ



(g) 困惑

Fig. 5. 4 Snapshots of HABIAN's emotion expressions by photographer



(a) 怒り



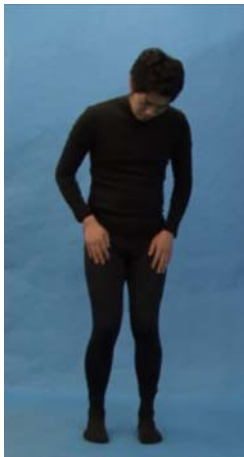
(b) 喜び



(c) 驚き



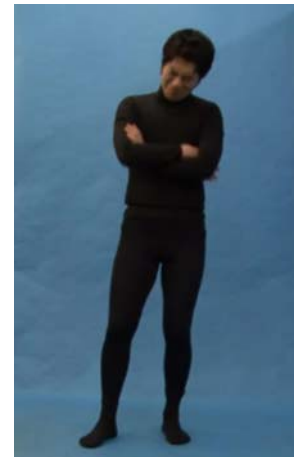
(d) 嫌悪



(e) 悲しみ



(f) 恐れ

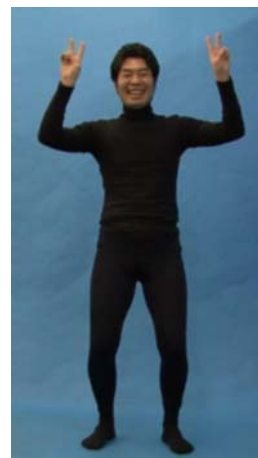


(g) 困惑

Fig. 5. 5 Snapshots of an actor's emotion expressions by cartoonist



(a) 怒り



(b) 喜び



(c) 驚き



(d) 嫌悪



(e) 悲しみ



(f) 恐れ



(g) 困惑

Fig. 5. 5 Snapshots of an actor's emotion expressions by photographer

Table 5.2 各形容詞の因子負荷量

	Factor I	Factor II	Factor III	Factor IV
強気な	0.762	0.15	-0.111	0.167
陽気な	0.746	-0.139	0.075	-0.182
派手な	0.707	-0.037	-0.209	0.014
積極的な	0.644	0	-0.041	0.222
人間的な	0.599	0.216	0.461	0.112
わかりやすい	0.54	0.001	0.284	0.102
充実した	0.531	-0.173	0.067	0.109
はげしい	0.52	0.102	-0.214	0.34
明るい	0.467	-0.302	0.283	-0.139
うちとけた	0.398	-0.171	0.396	-0.153
興味深い	0.016	0.803	-0.244	0.093
好きな	-0.041	0.677	0.146	0.088
面白い	0.296	0.672	-0.01	-0.081
良い	0.079	0.655	0.109	-0.072
かわいらしい	-0.091	0.546	0.308	-0.071
愉快的な	0.391	0.507	0.114	-0.183
安全な	-0.117	0.007	0.788	0.268
近づきやすい	0.021	-0.114	0.658	0.073
暖かい	0.27	-0.083	0.638	0.025
親しみやすい	0.186	-0.268	0.637	-0.076
複雑な	0.082	-0.334	-0.592	0.039
やさしい	0.024	-0.129	0.571	0.09
感じのよい	0.023	-0.355	0.551	-0.177
思いやりのある	-0.204	-0.399	0.413	0.14
速い	0.169	0.126	0.196	0.759
すばやい	0.226	0.171	0.218	0.738
賢い	0.016	-0.397	-0.001	0.529
敏感な	0.264	-0.205	0.015	0.481

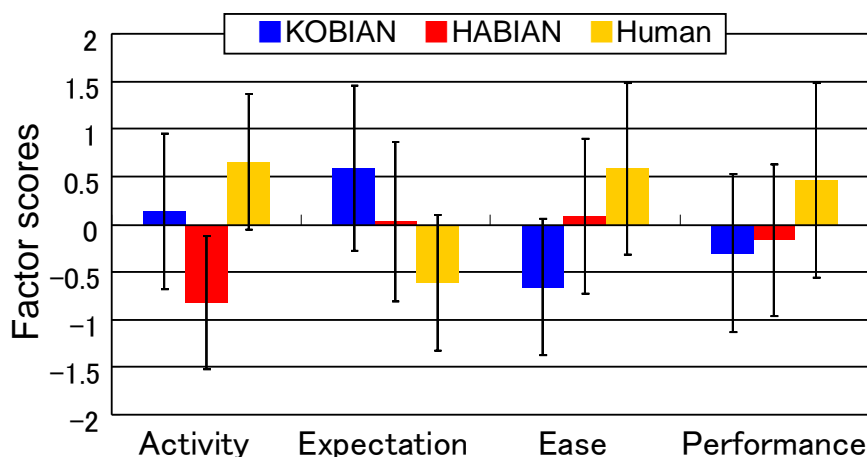


Fig. 5. 6 Comparison of the impressions between KOBIAN, HABIAN, and the actor

5.4 まとめ

本章では、移動形態による外見・動き方の違いが、人間に対しどのような心理的印象を与えるかを調査した。そのために車輪式ヒューマノイド HABIAN を開発した。KOBIAN と HABIAN の全身を用いた感情表現を人間に提示し、それぞれに対する主観的印象について SD 法を用いて評価した結果、KOBIAN のほうが HABIAN に比べてより活動的な印象を与えること、期待させる印象を与えること、また、逆に不安感を与えることが示唆された。

今回の実験では被験者が理工系の学生・助手に限られ、また人数も少ないので、より確かな知見を得るためには、専門によらない一般の人々に対しても同様の調査をする必要がある。

第6章 ハンドの触感の評価

- 6.1 はじめに
- 6.2 接触インタラクションとその評価手法
- 6.3 柔らかさに関する印象評価
- 6.4 形状に関する印象評価
- 6.5 握りの強さに関する印象評価
- 6.6 まとめ

6.1 はじめに

本章では、ロボットハンドの触感について評価する。ハンドは、人間同士のコミュニケーションにおいても頻繁に使われ、人間とロボットのコミュニケーションにおいても同様の役割を果たすと考えられる。また、触感は人間の感覚過程において、より生理的な作用が強い。そこで、ロボットハンドの素材特性、形状、握りの強さが、その触感にどのように影響するのかを評価する。

手は外界とのスムーズなインタラクションをする上で必要なものである。さらに人間とのコミュニケーションにおいてはジェスチャやボディタッチなど、手は最も頻繁に使用される部位の一つであり、人間と共存するサービスロボットを実現する上で重要であると考えられる。本研究では、特に軟素材で製作した人間形ロボットハンドが人間に与える印象を調査することを目的とした。

6.2 接触インタラクションとその評価手法

人間とロボットの接触についての研究は多い。しかしながら、その多くは、接触を伴う作業遂行において、ロボットが達成すべき物理的安全性についての要件を出発点としている。

筆者は物理的安全性のみならず心理的安心感にも着目し、接触インタラクションにおいてロボットの構成がどのような心理的効果を持つのかを明らかにすることにした。

まず、対象とする構成部位については、ハンドとした。これは、人間同士において

手による接触が（挨拶時の握手のように）コミュニケーションの起点となることが多く、人間とロボットのインタラクションにおいても同様になるだろうという見積による。

ロボットハンドの触感といっても次のような様々な要因が挙げられる。

- ・ 柔らかさ
- ・ 形状
- ・ 握りの強さ
- ・ 温度
- ・ 湿度

これらの中から、特に上の3つの要因を選び、各要因がそれぞれどのような影響を触感に与えるの、を評価することにした。

触感評価の指標としては、アンケートによる主観評価を用いることにした。この主観評価は、相反する形容詞対を両極にもつ数個の段階尺度に基づく。各形容詞対 (adjective pairs) についての7段階尺度（非常に・かなり・やや・どちらでもない・やや・かなり・非常に）の評定を、ポジティブな形容詞側が高くなるように1から5もしくは7までの数値とした。

6.3 柔らかさに関する印象評価

6.3.1 評価実験の目的

本節では、ロボットハンドの柔らかさが触感に与える影響を明らかにすることを目的とした。

6.3.2 実験方法

実験に用いたロボットハンドは、第2章で述べた WSH-1 と、掌および指部が硬質樹脂で成形されたハンドの2種であった。

実験手法は前腕部の先に取り付けた2種類の掌に握手してもらい、その直後にアンケートの質問に答えてもらった。アンケートは15の形容詞対に対する5段階の主観的評価を求めた。用いた形容詞対は以下の Table 6.1 の通りであり、最大値を2ポイント、中間の印象を0ポイントとした。

実験参加者は早稲田大学学生 13 名であり，平均年齢は 24 歳だった。

Table 6. 1 Adjective pairs

#	形容詞対	
1	柔らかい	硬い
2	暖かい	冷たい
3	好ましい	好ましくない
4	心地よい	心地よくない
5	安全な	危険な
6	感じの良い	感じの良くない
7	人間的な	機械的な
8	滑らかな	滑らかでない
9	触りやすい	触りにくい
10	優しい	怖い
11	好きな	嫌いな
12	なじむ	なじまない
13	良い	悪い
14	気持ちよい	気持ちよくない
15	親しみやすい	親しみにくい

6.3.3 実験結果と考察

実験の結果を Fig. 6. 1 に示す。

t 検定を行ったところ，No. 1「柔らかい/硬い」，No. 5「安全な/危険な」，No. 7「人間的な/機械的な」，No. 10「優しい/怖い」，No. 12「なじむ/なじまない」，No. 15「親しみやすい/親しみにくい」の6項目に関して $p < 0.05$ の有意差を見出すことができた。この実験では柔らかいハンドに関してポジティブな印象を持ったといえる。

ここで注目すべきなのは，柔らかいロボットハンドが，人間類似性，安全性，親和性についてもポジティブな評価を獲得している点である。人間の手も柔らかい肉に覆われているので，柔らかいロボットハンドが機械的でなく人間らしい触感を持つのは当然であるが，安全性と親和性についても関連するとなれば，柔らかいロボットハンドは心理的により親しみやすく，また安心感を与えることができる，ということが示唆される。

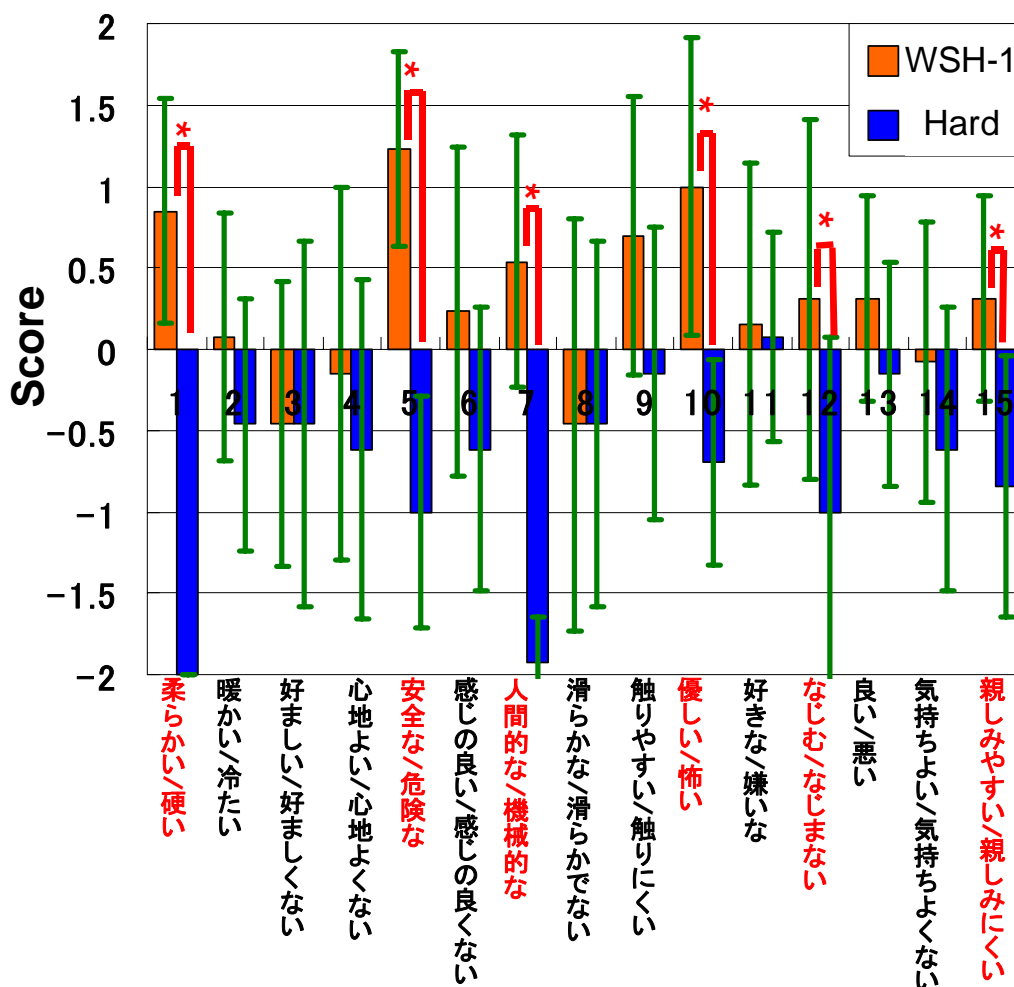


Fig. 6. 1 Comparison of tactile impression between the soft robotic hand WSH-1 and the hard robotic hand

6.3.4 本節のまとめ

本節では、ロボットハンドの柔らかさが触感に与える影響について評価を行なった。柔らかいロボットハンドと硬いロボットハンドの2種をについて、人間に握手してもらい、その印象をアンケートで答えてもらった。

集計した結果について検定を行ったところ、「柔らかい/硬い」、「安全な/危険な」、「人間的な/機械的な」、「優しい/怖い」、「なじむ/なじまない」、「親しみやすい/親しみにくい」の6項目に関して $p < 0.05$ の有意差を見出すことができ、柔らかいロボットハンドがポジティブな評価を獲得した。

柔らかいロボットハンドは心理的により親しみやすく、また安心感を与えることができる、ということが示唆された。

6.4 形状に関する印象評価

6.4.1 評価実験の目的

本節では先述したハンドの触感に影響を与えると考えられるいくつかの要因のうち、形状に焦点を当てる。即ち、どのようなハンド形状が、より好ましい触感をもたらすのかを見つけることが本節の目的である。

ハンドの形状を決めるパラメータには、指の太さや長さ、掌の厚さや丸みなど様々なものが挙げられる (Fig. 6. 2)。そこで、2ステップの実験を行うことで、より好ましいハンド形状を決定することとした。

- (i) ハンドの触感に最も影響を与える形状パラメータの探索
- (ii) その形状パラメータの触感への影響の評価

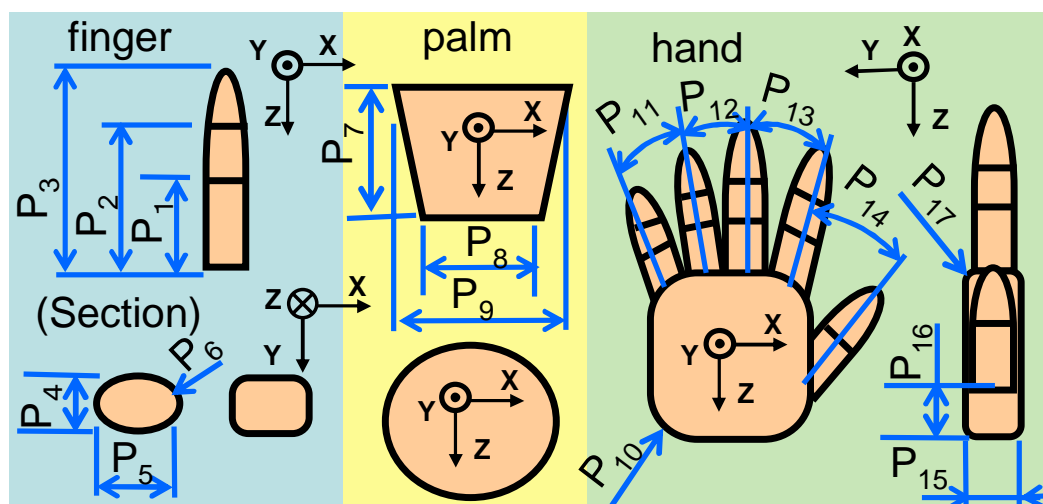


Fig. 6. 2 Parameters of the shape of a hand

6.4.2 ハンドの触感に最も影響を与える形状パラメータの探索

まず、ハンドの触感に最も影響を与える形状パラメータを見つけるために、次の3つの人工ハンドを製作した (Fig. 6. 3~Fig. 6. 5)。これらのハンドは人肌ゲルにて成形された。

- (a) 人間の手と全く同じ形状のハンド (Fig. 6.3)
- (b) 人間の手の形状を単純な幾何形状 (シンボリックな形状) に簡略化し, 掌側部の丸みが大きく, 指が長く, 親指の根元が大きいハンド (Fig. 6.4)
- (c) シンボリックな形状で, 掌側部の丸みが小さく, 指が短く, 親指の根元が小さいハンド (Fig. 6.5)

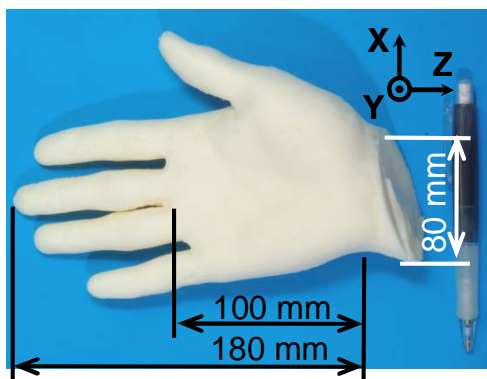


Fig. 6.3 Realistic shape hand (a)

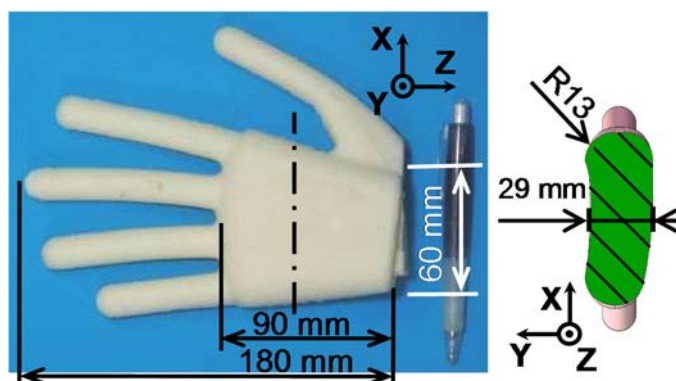


Fig. 6.4 Symbolic shape hand (b)

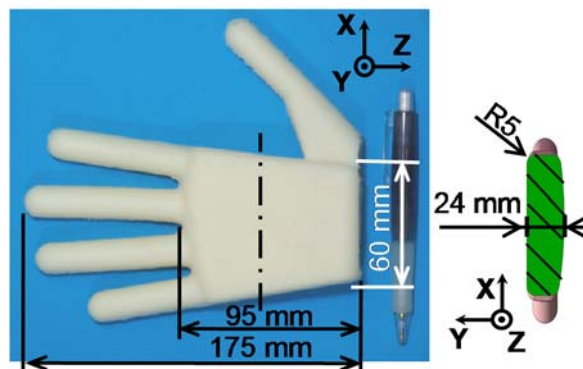


Fig. 6.5 Symbolic shape hand (c)

これらの人工のハンドを用いて、アンケートによる主観的評価を行った。実験協力者は、目隠しをした状態でそれぞれのハンドと握手をし、その触感について Table 6. 2 に示す 15 の形容詞対に対して 5 段階で回答した。各形容詞について左の形容詞の印象が強ければ最大値 2 ポイント、右の形容詞の印象が強ければ最小値-2 ポイント、中間の印象を 0 ポイントとした。さらに、どこの形状が印象に残ったかを自由回答で答えてもらった。実験協力者は平均年齢 25 歳の 30 名（男性 28 名，女性 2 名）であった。

Table 6. 2 Adjective pairs

1	柔らかい	硬い
2	暖かい	冷たい
3	好ましい	好ましくない
4	心地よい	心地よくない
5	安全な	危険な
6	感じの良い	感じの良くない
7	人間的な	機械的な
8	滑らかな	滑らかでない
9	触りやすい	触りにくい
10	優しい	怖い
11	好きな	嫌いな
12	なじむ	なじまない
13	良い	悪い
14	気持ちよい	気持ちよくない
15	親しみやすい	親しみにくい

このアンケートの結果を Fig. 6. 6 に示す。特に、15 の形容詞対のうち、「1-柔らかい／硬い」、「5-安全な／危険な」、「7-人間的な／機械的な」、「12-なじむ／なじまない」、「13-良い／悪い」の 5 対について有意差を確認した (Fig. 6. 7)。したがって、ハンドの形状が違うことによって、触感の印象に差が出ることがわかった。また、人間に近い形状のほうが良い触感が得られることが示唆された。しかし、この実験のアンケート項目では形状に関する形容詞対があまりなかったため、どの形状が印象に影響するかまでは言及できない。項目 No.3 の 3 つのハンドの得点が高いのは、構造部材が軟素材でできているためと考えられる。

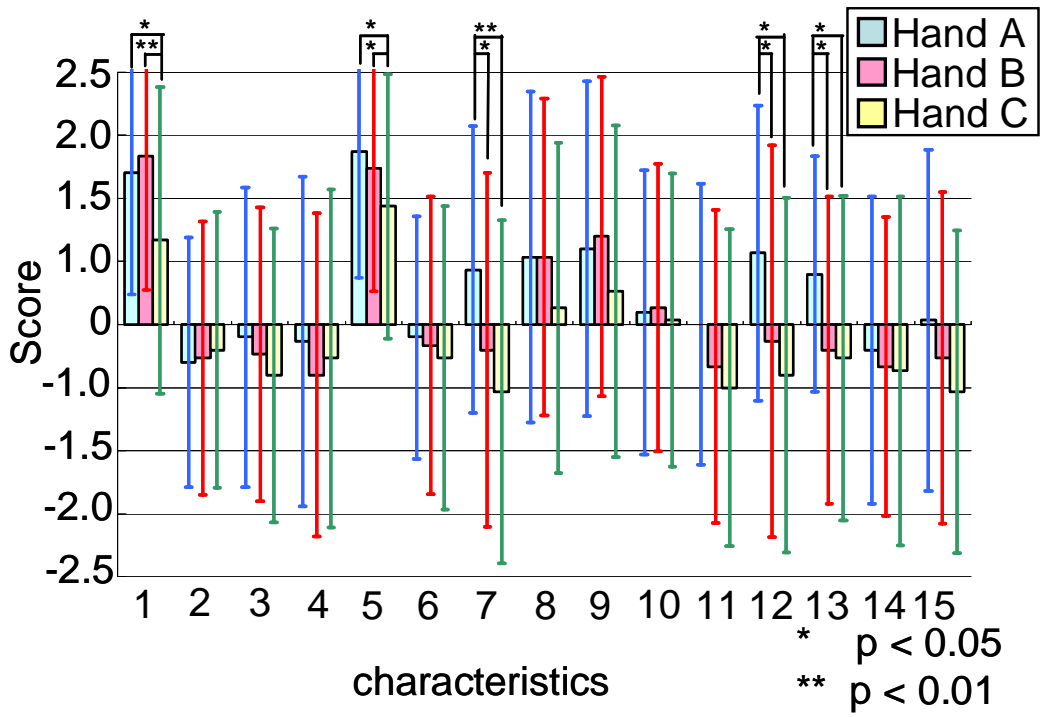


Fig. 6. 6 Comparison of tactile impression between 3 hands in different shape

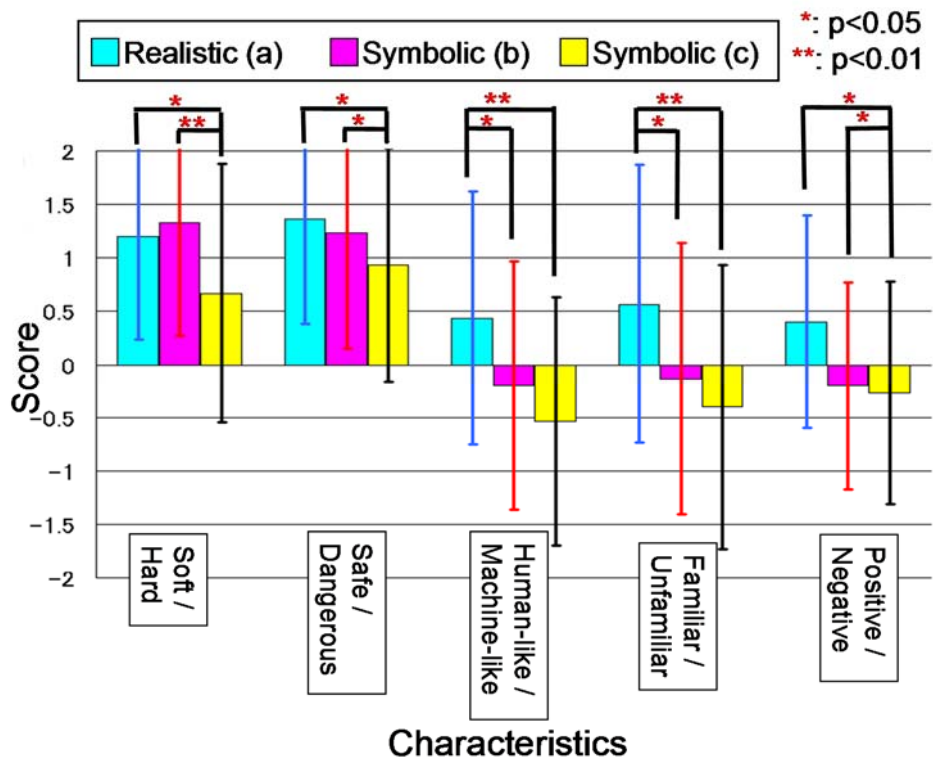


Fig. 6. 7 Comparison of tactile impression between 3 hands in different shape (select significant difference)

どこの形状が印象に残ったかを答える自由回答の結果を Table 6. 3 に示す。掌の側面の丸み、掌と指の結合部（特に親指の根元の位置と形状）、掌の厚さの形状パラメータが触感に影響を与える可能性があることがわかった。また、形状以外に、ハンドの重さと温度について気になったという回答があった。自由回答で回答数が多い掌側面の丸みの形状が、触感に最も影響すると考えられる。重さについてはハンドを固定しなかったため、持つように握手したため違和感があったと考えられる。温度については、ハンドを構成する軟素材が気温と同じ温度で、人肌の温度より冷たいために違和感があったと考えられる。

よって、最も触感に影響すると考えられる掌側面の丸みの形状をパラメータにとり、その値を変えて触感の違いを評価することとした。また、実験方法について、形状と印象の関係がよりわかりやすくするために改善する必要があった。

Table 6. 3 印象に残った形状についての自由回答結果

回答	回答数
掌側部の丸み	19
親指根元の位置と形状	11
厚さ	5
重さ	4
温度	7

6.4.3 掌側部の形状の違いによる触感評価

掌側部の形状の違いによる触感への影響を評価するために、新たに2つの人工ハンドを製作した。掌側部の丸みのパラメータがそれぞれ(B)R = 15 [mm]および(C)R = 5 [mm]で、他のパラメータは等しい値である (Fig. 6. 8, Fig. 6. 9)。

実験協力者は目隠しをしたまま、人間の手と握手した後に、これら人工ハンドと握手をし、その触感について Table 6. 4 に示す16の形容詞対に対して7段階で回答した。形容詞対には、形状と印象の関係が把握できるように、「大きい／小さい」、「厚い／薄い」、「丸い／四角い」、「頑丈な／脆弱な」、「単純／複雑な」、「自然な／人工的な」、「男性的な／女性的な」、「大人な／子供な」、「健康な／病弱な」、「バランスがいい／バランスが悪い」を追加した。

実験協力者は平均年齢24歳の30名（全員男性）であった。実験では握手をする際に、三脚を利用して人間との握手を想定した高さにハンドを固定し、ハンドの重さが

影響しないようにした。

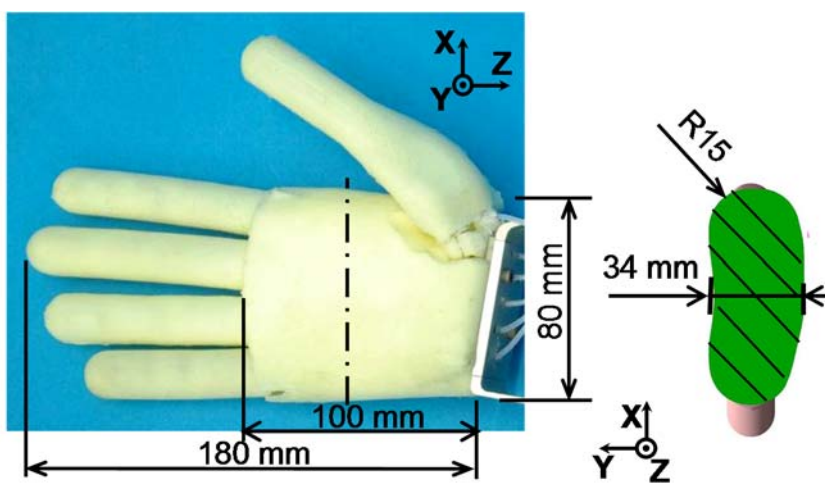


Fig. 6. 8 Symbolic shape hand (B)

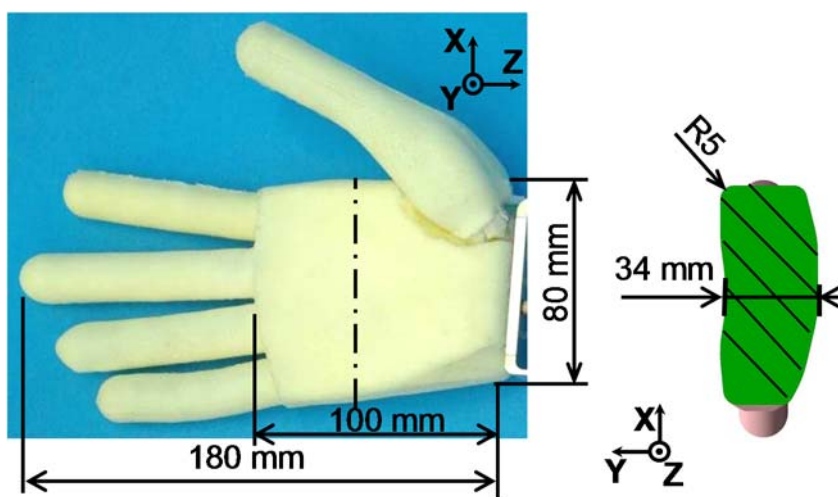


Fig. 6. 9 Symbolic shape hand (C)

Table 6. 4 Adjective pairs

1	大きい	小さい
2	厚い	薄い
3	丸い	四角い
4	柔らかい	硬い
5	頑丈な	脆弱な
6	単純な	複雑な
7	なじむ	なじまない
8	安全な	危険な
9	自然な	人工的な
10	人間的	機械的
11	男性的	女性的
12	大人な	子供な
13	健康な	病弱な
14	バランスがいい	バランスが悪い
15	気持ちよい	気持ちよくない
16	親しみやすい	親しみにくい

結果を Fig. 6. 10 に示す。「2-厚い/薄い」、「3-丸い/四角い」、「4-柔らかい/硬い」、「7-なじむ/なじまない」、「8-安全な/危険な」、「9-自然な/人工的な」、「10-人間的/機械的」、「14-バランスがいい/バランスが悪い」、「15-気持ちよい/気持ちよくない」、「16-親しみやすい/親しみにくい」で有意差を見出すことができた。

項目 No.3 について、両者の形状の違いは、掌側部の丸みだけなので、確かに被験者はその形状の違いを認識していた。また、項目 No. 7, 8, 14, 15, 16 の有意差との関係から、四角い形状 (R=5[mm]) より、丸い形状 (R=15[mm]) のほうが良い触感が得られることが示唆された。よって、「印象に影響を与える形状パラメータは、掌側部の丸みである」という予備実験の仮説が証明された。また、項目 No.10 の有意差から、ハンドの形状は人間の手に近いほうが良い印象が得られることが示唆された。

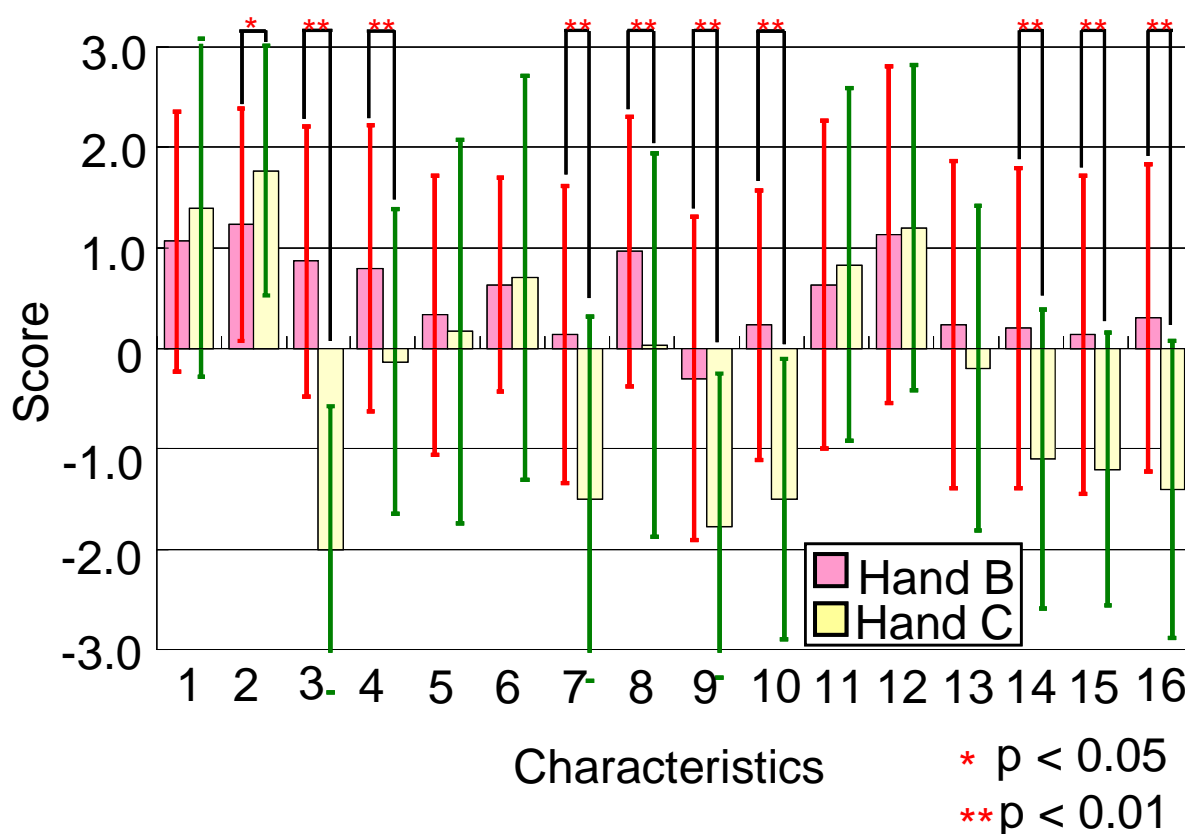


Fig. 6.10 Comparison of tactile impression between rounded hand and squared hand

6.4.5 本節のまとめ

本節では、より好ましいロボットハンド形状を求めるためのプロセスについて説明した。形状パラメータは多岐に渡るので、まずは触感に関して支配的なパラメータを実験によって求め、次にそのパラメータについてのみの評価実験を行なった。このプロセスにより、ロボットハンド形状について掌側部の丸みが重要であり、丸いほうがポジティブな触感を与えられることがわかった。この丸みの変化だけで、柔らかさ、厚さといった実際には変更していない物理パラメータについての印象も変化することがわかった。

6.5 握りの強さに関する印象評価

6.5.1 評価実験の目的

握手における触感の要素として、これまでにハンドの柔らかさや形状といった静的な要素について評価を行なってきた。しかしながら、どのように握手をするのか、といった動的な要素についても無視することはできない。

握手時の握り方は、単に挨拶といった軽いものから、契約締結などにおけるような信頼を示すしっかりした握り方、潜在的な対決姿勢を示す強い握り方などがある。つまり、こうした文脈や好意・敵意を伝達するのに握り方の制御が利用できる。

では、どのような握り方がどのような意図の伝達に適しているのだろうか。そのような定量的研究はこれまでに全く行われていなかった。

そこで本節では、握手時における握りの強さが触感に与える心理的影響について評価を行なった。

6.5.2 実験方法

握力の違いが、握手時に与える印象にどのような差異をもたらすかを調査した。21名の被験者（男性18名、女性3名、平均年齢23歳）はハンドが見えない状態で、人間の手・WSH-1R・WSH-1RIIとそれぞれ握手し、その直後にアンケートの質問に答えた。

人間の手は自身の思う「普通の握手」を、WSH-1Rでは握り返しは行わず、WSH-1RIIでは無負荷も含めた力を5段階に分けて、計7回の握手をランダム順に行った。質問内容は、16の形容詞対に対する7段階の主観的評価であり、Table 6.5の各形容詞について左の形容詞の印象が強ければ最大値3ポイント、右の形容詞の印象が強ければ最小値-3ポイント、中間の印象を0ポイントとした。また、最後に自由回答欄を設け、今後の研究項目になりうる、気になった要因などの意見を募った。

力の制御については、第2章で示したように、指部に搭載された力センサを用いて、力の目標値となるような制御を行なった。

Table 6. 5 Adjective pairs

1	硬い	柔らかい
2	暖かい	冷たい
3	好ましい	好ましくない
4	心地よい	心地よくない
5	安全な	危険な
6	感じの良い	感じの良くない
7	人間的な	機械的な
8	滑らかな	滑らかでない
9	触りやすい	触りにくい
10	優しい	怖い
11	好きな	嫌いな
12	なじむ	なじまない
13	良い	悪い
14	気持ちよい	気持ちよくない
15	親しみやすい	親しみにくい
16	強い	弱い

6.5.3 実験結果と考察

結果を Fig. 6. 11 に示す.

力を加えていった場合, 項目 No.1「硬い／柔らかい」は評価値が比例的に, 項目 No.5「安全な／危険な」は評価値が反比例に増減した. また, それ以外の項目では評価値にピークが存在し, 与えたい印象に対し力の最適値があることが示唆される.

そして, 全体的に WSH-1R に比べ WSH-1RII の方が, 多くの項目で, よりポジティブな印象を与えている. しかし実際の人間のハンドと比べた場合, 力は充分だが, 全体的にまだネガティブな印象を与えていた. また, 全体的に WSH-1R に比べ WSH-1RII の方がよりポジティブな印象を与えたが, 実際の人間のハンドにはまだ印象の面で及ばなかった.

そして, 今回初めてハンドを動かしての実験となったが, アンケートの自由回答より手の握り方・動かし方にも印象を変化させる可能性を示唆する意見が多数あった.

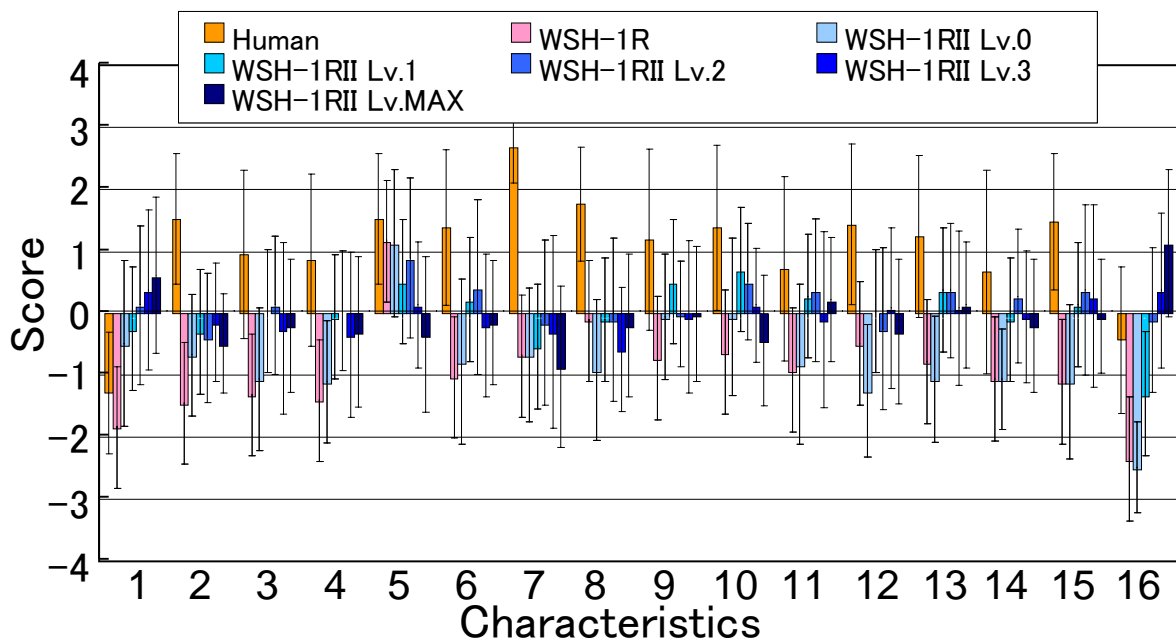


Fig. 6.11 Comparison of tactile impression between 7 hands in different grip

6.5.4 本節のまとめ

本節では、握手時における握りの強さが触感に与える心理的影響について評価を行った。

人間が目隠しした状態でロボットハンドと握手し、握りの強さそれぞれに対して、16対の形容詞対を用いて評価した。

握りの強さを増加させていくと、硬く、危険な印象を与えられることがわかった。一方で、他の評価値については、単純増加の関係にはなくピークが存在し、与えたい印象について適した握りの強さがあることが示唆された。

6.6 まとめ

本章では、ロボットハンドの触感について評価した。

触感について影響を与える因子は様々であるが、ここではハンドの柔らかさ、形状、握りの強さについて評価を行った。アンケートによる主観的評価法を用いることで、人間が感じた主観的印象を採取することができた。

まず、柔らかさについて、触感の評価を行った。「柔らかい/硬い」、「安全な/危険な」、「人間的な/機械的な」、「優しい/怖い」、「なじむ/なじまない」、「親しみやすい/親しみにくい」の6項目に関して有意差を見出すことができ、柔らかいロボットハ

ンドがポジティブな評価を獲得した。柔らかいロボットハンドは心理的により親しみやすく、また安心感を与えることができる、ということが示唆された。

次に、形状について、より好ましいロボットハンド形状を求めるためのプロセスについて説明した。形状パラメータは多岐に渡るので、まずは触感に関して支配的なパラメータを実験によって求め、次にそのパラメータについてのみの評価実験を行なった。このプロセスにより、ロボットハンド形状について掌側部の丸みが重要であり、丸いほうがポジティブな触感を与えられることがわかった。この丸みの変化だけで、柔らかさ、厚さといった実際には変更していない物理パラメータについての印象も変化することがわかった。

最後に、握りの強さについて触感の評価を行なった。握りの強さを増加させていくと、硬く、危険な印象を与えられることがわかった。一方で、他の評価値については、単純増加の関係にはなくピークが存在し、与えたい印象について適した握りの強さがあることが示唆された。

以上により、ロボットハンドの構成および動作が人間に与える心理的影響が評価された。

第7章 結論と今後の展望

7.1 結論

7.2 今後の展望

7.1 結論

本論文では、情動表出ヒューマノイドロボットの構成と表現について論じた。

これは、将来、人間の生活環境下において人間の日常生活支援などを行うようになるであろうロボットについて、その設計論を構築するための基礎研究のひとつであり、主に、ユーザとなる人間とのコミュニケーションの観点から、ロボットの構成および表現が人間に与える心理的影響を評価することを目指した研究である。

本論文では、第1章にて序論として本研究の研究背景と目的、その意義と関連研究の動向について述べた。

第2章では、本研究の実験プラットフォームとしたヒューマノイドロボット KOBIAN シリーズについて説明した。具体的には全身情動表出ヒューマノイド KOBIAN, KOBIAN-R, HABIAN, そして、人間形ソフトロボットハンド Waseda Soft Hand シリーズの開発について述べた。

まず、全身情動表出ヒューマノイドロボット KOBIAN について説明した。これは、表情表出可能な頭部、人間同様の表現が可能な7自由度腕部、人間形ソフトハンド、人間同様の膝伸展2足歩行が可能な脚部を持ち、環境認識のために両眼にカメラを備える等身大のヒューマノイドロボットである。次に、この KOBIAN 頭部を改良し、情動表出能力を向上させた改良機 KOBIAN-R の開発について説明した。

また、KOBIAN の下半身を脚式から車輪式に変更したヒューマノイドロボット HABIAN の開発についても説明した。

さらに、主に軟素材によって構成された人間形ソフトハンド Waseda Soft Hand シリーズの開発についても説明した。

次に第3章では、KOBIAN および KOBIAN-R の情動表出能力の評価について説明した。先に述べたように、ロボットの内部状態の伝達は、人間とロボットのコミュニケーションにおいても有効である。ここでは、その基礎的な表現能力評価を行なった。

KOBIAN の基礎的な情動表出能力の評価について説明した。また、どのようなプロ

セスや要因が、ロボットの情動の伝達にどのように影響するかについて考察を行った。

次に、表情自由度の減少が情動表出に与える影響が評価された。また、表情各部と各感情の表出の関係について解析を行った。意図する感情の表出のための表情作成プロセスのうちの1つの有効なプロセスを示した。

さらに、全身での情動表出の効果について評価した。表情単体では僅かな認識率しか得られなかったものも、特定の情動表出姿勢と組み合わせることで、より高い認識率を得られることが示された。また、情動表出姿勢作成プロセスについて、専門家の意見を取り入れることの有効性が示された。

第4章では、ロボットの物理的存在感と自律的行動に着目し、移動および反射・反応的行動が与える印象を評価した。

ここではまず、KOBIANの視標追従歩行の開発について説明した。本手法では、短期FFT型オンライン歩行パターン生成と前庭動眼反射を基にした視標追従動作を統合し、2足歩行ロボットにおける反射・反応的行動生成を実現した。これにより、安定な2足歩行と反射・反応的なオンラインでの行動の両立を果たした。

次に、この行動中の情動表出について評価した。移動有の場合と無しの場合を比較し、移動により意図された情動が読み取りづらくなることが明らかになった。しかし、その情動が読み取れた場合には、移動がその情動の強さを補強することがわかった。

さらに、心理モデルと統合し、外界からの刺激に対して動的に情動を変化させ、それによる行動の変化を実現している。印象を評価したところ、ロボットが外界からの刺激に反応し、自律的に行動したとしても、情動表出無しではロボットの意図が理解しづらく、何をしているのかわからない、親近感も湧かないと感じられ、情動表出と組み合わせることで、ロボットの意図がわかりやすくなり、何をしているのかわかる、親近感も湧くことが確認された。また、移動を伴う自律的行動自体が、社会においてロボットがより重要な役割を果たせる、という印象に寄与することがわかった。

第5章では、ロボットのハードウェア構成が与える印象について評価した。ロボットのハードウェア構成は特に機能要件に束縛されるものであり、また、技術の進展度合いに依存するものである。ここでは、その構成の違いが、人間に与える印象にどのように影響するのかを論じた。KOBIANとHABIANの全身を用いKOBIANとHABIANの全身を用いた感情表現を人間に提示し、それぞれに対する印象について評価した結果、KOBIANのほうがHABIANに比べてより活動的な印象を与えること、また、逆に不安感を与えることが確認された。

第6章では、ロボットハンドの触感について評価した。ハンドは、人間同士のコミュニケーションにおいても頻繁に使われ、人間とロボットのコミュニケーションにおいても同様の役割を果たすと考えられる。また、触感は人間の感覚過程において、よ

り生理的な作用が強い。そこで、ロボットハンドの素材特性、形状、力の入れ方が、その触感にどのように影響するのかを評価した。

柔らかさについて、触感の評価を行なった。「柔らかい/硬い」、「安全な/危険な」、「人間的な/機械的な」、「優しい/怖い」、「なじむ/なじまない」、「親しみやすい/親しみにくい」の6項目に関して有意差を見出すことができ、柔らかいロボットハンドがポジティブな評価を獲得した。柔らかいロボットハンドは心理的により親しみやすく、また安心感を与えることができる、ということが示唆された。

次に、形状について、より好ましいロボットハンド形状を求めるためのプロセスについて説明した。形状パラメータは多岐に渡るので、まずは触感に関して支配的なパラメータを実験によって求め、次にそのパラメータについてのみの評価実験を行なった。このプロセスにより、ロボットハンド形状について掌側部の丸みが重要であり、丸いほうがポジティブな触感を与えられることがわかった。この丸みの変化だけで、柔らかさ、厚さといった実際には変更していない物理パラメータについての印象も変化することがわかった。

さらに、握りの強さについて触感の評価を行なった。握りの強さを増加させていくと、硬く、危険な印象を与えられることがわかった。一方で、他の評価値については、単純増加の関係にはなくピークが存在し、与えたい印象について適した握りの強さがあることが示唆された。

以上、本論文では、ヒューマノイドロボットの構成と表現が人間に与える心理的影響について報告した。特に、全身情動表出ヒューマノイドロボット **KOBIAN** シリーズおよび人間形ソフトハンド **Waseda Soft Hand** シリーズを開発し、様々な心理実験を通して、ロボットの構成や表現による人間への心理的影響が定量的に明らかになった。

以上、本論文の成果をまとめると次のようになる。

- 「全身情動表出ヒューマノイド」および「ユーザの心理的観点からのヒューマノイドロボットの設計論」を提案（第1章）
- 全身情動表出ヒューマノイド **KOBIAN** を開発（第2章）
- ヒューマノイドロボットのための制御プログラム構築法を提案（第2章）
- 全身情動表出ヒューマノイド **KOBIAN-R** を開発（第2章）
- ヒューマノイドロボットのための集中・分散制御系の混合構成による制御系およびそれにおける制御プログラム構築法を提案（第2章）
- 車輪移動型の情動表出ヒューマノイド **HABIAN** を開発（第2章）
- 人間形ソフトハンド **WSH-1**, **WSH-1R**, **WSH-1RII** を開発（第2章）
- 全身型の2足歩行ロボットに搭載可能なロボット頭部の表情認識率を評価（第

3章)

- 専門家の意見を取り入れたロボット表情作成プロセスの効果を評価 (第2章, 第3章)
- **KOBIAN-R** の頭部が「怒り」, 「喜び」, 「驚き」, 「嫌悪」, 「悲しみ」の感情をわかりやすく表出できることを確認 (第3章)
- 全身情動表出ヒューマノイド **KOBIAN** の全身による情動表出の情動認識率を評価し, 表情と姿勢による効果を検証 (第3章)
- 専門家の意見を取り入れたロボット全身情動表出姿勢作成プロセスの効果を評価 (第3章)
- 上半身と歩行による視標追従を実現 (第4章)
- 情動表出における移動および反射・反応的行動の効果を評価 (第4章)
- 移動や反射・反応的行動, 情動の動的変化によるロボットの印象を評価 (第4章)
- 移動形態の違いによる印象を評価 (第5章)
- ロボットハンドの柔らかさ, 形状, 握り方の違いによる触感を評価 (第6章)

本研究の成果は, ヒューマノイドロボットの開発とその心理学的評価に分けられる. 前者については, そのユーザとのコミュニケーションの観点からの設計プロセスの事例として, 他のヒューマノイドロボット以外のロボットおよびサービスにおいても適用可能だと考えられる. また, 後者により得られた知見は, 今後のヒューマノイドロボット開発においても基礎的知見として有用であると考えられる.

7.2 今後の展望

7.2.1 ロボットの改良

本研究では全身情動表出ヒューマノイド **KOBIAN** およびその頭部と制御系を改良した **KOBIAN-R**, 車輪移動型情動表出ヒューマノイド **HABIAN**, そして人間形ソフトハンド **WSH** シリーズを開発したが, その機能・性能には改良の余地がある.

(1) 頭部

KOBIAN において「喜び」と「驚き」の感情, **KOBIAN-R** において「恐れ」以外の基本6感情 (「怒り」, 「喜び」, 「驚き」, 「嫌悪」, 「悲しみ」) のわかりやすい表情表出

を実現できた。しかし、アマチュア漫画家の意見に基づき青い顔色を再現しても、依然として「恐れ」の表情認識率は十分とはいえない。

ただし、Gabriele らが調査したように[97]、漫画やアニメにおいてよく用いられる記号的表現（漫符）は、文化・国籍による差がみられるものの、感情表現のために有効であると考えられる。そこで、頭部に「怒り」を表す血管マークや「悲しみ」のための涙マーク、「焦り」などのための汗マークといった漫符を表示できる機構を搭載することで、よりわかりやすい感情表現が可能になると考える。

これまでの頭部による感情表現は写真や動画といった視覚的表現が主であったが、音声による表現も併せて使用すべきである。というのは、1.2.2 でみたようにパラ言語もまた人間同士のメッセージの伝達に有効であるからだ。KOBIAN-R の首部にはスペースの余裕があり、首上 Pitch 軸ユニットの下にスピーカを搭載できる。本来であれば、口から発声するように頭部顎ユニット内にスピーカを搭載するべきであるが、首上 Pitch 軸ユニット直下であれば音源位置が口内にあるのと変わらない音響効果が実現できるのではないかと考えられる。

(2) 腕部

KOBIAN/KOBIAN-R の腕は、その基となった WABIAN-2 の腕[38][98]とほぼ同等の機械構成となっている。これは肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度の計7自由度の腕であるが、肩をいからせたり、落としたりする表現ができない。

WE-4RII の腕部はさらに肩の根元に Yaw 軸と Roll 軸を持つ9自由度構成であり、これにより肩をいからせたり、すくめたり、落としたりする表現を実現できていた[99][100]。KOBIAN-R もこれと同様に肩の根元に自由度を追加することで、全身による表現の幅が広がると考えられる。WABIAN-2 においては歩行支援器に肘を置いて、そこで体を支えるという要件があり[101]、そのために肩根元を含む体幹がリジッドな構造となっているが、KOBIAN-R においてはそのような要件がないため、体幹の設計変更は可能である。

KOBIAN-R の手首はモータの出力が不足しており、またジンバル機構のために手首全体のサイズが大きい。ここは、シリアルリンク機構でなくパラレルリンク機構にするなど、抜本的な機構の見直しと、それに伴うモータなどの制御系の見直しが必要である。また、WE-4RII と同様に手首に力覚センサを搭載し、人間とのインタラクションにおける倣い動作などが可能なように再設計すべきである。

(3) ハンド

人間形ソフトハンド WSH-1, WSH-1R, WSH-1RII と開発してきたが、これらは全て片手当たり 4 自由度しか備えていない。最低限のジェスチャは可能であるが、より多様な表現のためにはさらなる自由度の追加が必要である。

人間の手は 22 自由度を持っているが、その全てを自立して移動する 2 足歩行ロボットに再現するのは現時点では困難であると考ええる。追加すべきジェスチャ表現からそれに必要な自由度の組み合わせを導出し、それらの自由度のための機構および制御系がロボット手部および腕部に搭載可能かを注意して見極めなければならない。特に制御システムについて、KOBIAN/KOBIAN-R では特殊電装製の DC モータドライバを集中制御システムにて使用しているが、これはモータに対してオーバースペックであり、また体幹部に搭載されているので配線が煩わしい。KOBIAN-R 頭部のために開発された超小型モータコントローラを応用し、手部・腕部内に制御システムを収めるべきである。さらに、指内の力センサの A/D 変換処理もこのモータコントローラにて行うようにすべきである。これにより、省配線・多自由度のロボットハンドが実現できるだろう。

(4) 体幹

上述したように、肩の自由度追加のためには、体幹部の再設計が必要である。

また、KOBIAN 設計の際には、集中制御の I/O チャンネル数の限界により、WABIAN-2 に比べて、体幹 Roll の自由度を省いているが、KOBIAN-R 頭部にて自由度の一部をシリアル通信による分散制御システムに再配置したので、この体幹 Roll の自由度を再度実現することができる。この際に体幹内に収められたバッテリーをどう配置し直すかが問題となるが、これは背中中の制御 PC のサイズや肩根元自由度の機構サイズなどが絡む問題である。ただ、開発した分散制御システムが応用できることで、どのように全体のシステムを構成するか、についての自由度が大いに高まったので、全体をバランスし満たす解は見つけられると考える。

さらに、ロボットの内部状態の表現のために WE-4RII で実現されていた肺を再現することで、怒りや疲労といった内部状態の動的表現が可能になると考えられる。

(5) 下肢

KOBIAN-R がヒトを模した漫画調の頭部や、ヒト同様の五指を備えるハンドを備え

ているのに比べ、足部は、ヒトの足部より幅が広い平板である。ここは WABIAN-2R [102]と同様にヒトと同サイズの人間形足部が、安定して2足歩行が実現できるのであれば、望ましいと考える。

WABIAN-2でも同様だが、脚部は全体的にモータ出力に余裕が少なく、速い関節速度が出せない。ブラシレス DC モータといった別のモータや、関節トルクを負荷する補助機構、ロボット全体の重量軽減などを検討し、よりヒトに近いダイナミックな動作が実現できれば、と考える。

(6) 制御システム

KOBIAN-R において集中制御システムと分散制御システムによるヘテロジニアスな制御システムを構成した。これにより、制御システム全体に対する変更・拡張が容易になった。

第2章において、現在の分散制御のためのシリアル通信が 115,200[bps]と比較的低速であるとしたが、これは制御 PC で用いている Pentium M のための CPU ボード (Advantech 製 PCI-6881) に搭載されているシリアル通信コントローラの制限によるものである。昨今は Core 2 Duo や Core i7 などを使用可能な PCI スロット CPU ボードが多くメーカーから発売されており、それらに搭載されているシリアル通信コントローラがより高速なボーレートをサポートしているのであれば、I/O 以外の計算処理の高速化も見込まれるので、それらへのアップグレードが望ましい。モータコントローラユニットとの通信時間が低減されれば、2.3.5(7)におけるシステムの応答時間が早くなる。現在のものに比べて 30 倍程度の通信速度が達成できれば、集中制御と同じように使用することも可能だろう。そうなれば、2足歩行安定化制御など現在 1[ms]周期で実行している処理も、分散制御システム上にて実現することができ、また上述した今後のハードウェア改良も、主に分散制御システムによって制御されうると考える。2.3.5 において述べた制御プログラムは、通信速度の増加に対してスケラビリティを持つので、これに対応するための制御プログラムの大きな変更は不要であると考えられる。

ロボット全体が分散制御システムに移行できれば、これまでロボット背部の制御 PC ボックス内において PCI インタフェイスで接続されていた CPU ボード、バックプレーンボード、I/O ボード、6 軸力覚センサ受信ボードによる機械的構成も再検討できる。特に、PCI インタフェイスは本来、2足歩行ロボットのような振動・衝撃のある環境下で使うべきものではない。実際に、実験中のロボットへの予期しない過大な衝撃により制御 PC が停止するということが度々あるので、より堅牢性の高い制御シ

システムへの移行が望ましい。

さらに、分散制御システムの利点の一つとしてその拡張性・変更容易性が挙げられる。ハードウェア構成が変更されても、中枢となる制御 PC とのシリアル通信接続と、電源系の接続が確保されていれば、その変更されたハードウェアを統御できる、ということである。OPEN-R による 4 足ロボットの例[103]にもあるように機械的接続に対する考慮もすれば、任意のタイミングでハードウェアを交換可能なプラグアンドプレイロボットが実現できる。プラグアンドプレイで再構成可能なロボット・システムに関する研究はモジュラロボティクスなどの分野で多く行われているが、等身大の 2 足歩行ロボットに適用可能なプラグアンドプレイ機械・電気・プログラム接続についての事例は皆無である。これが実現できれば、ロボットの可用性を大いに向上させ、パソコンなどのように機械工学の専門家でなくとも容易に、使用形態に合わせたロボット・システムを構成でき、ロボットを用いた実験や応用研究が盛んになるだろう。

(7) 制御プログラム

KOBIAN/KOBIAN-R の制御プログラムは、レイヤーアーキテクチャやオブジェクト指向なプログラムモジュール構成を採用することで、保守・改良・拡張がしやすく、同時に高精度な制御が実現できるような構成として開発された。特に、関節の位置制御と軌道設定が分かれているために、この制御プログラム外のプログラムから、ロボットの関節軌道を設定することができる(2.2.5(7))。このサーバモジュールは Socket 通信による単純な文字列の送受信を解釈するだけなので、ロボットの I/O 設定や関節制御、制御プログラム構成、プログラミング言語といった下層の問題を気にすることなく、ロボットの全体的な運動を自分の慣れ親しんだ言語で指定することができる。本論文においては YARP アプリケーションからロボットを操作する事例を紹介しているが、送受信メッセージのプロトコルさえ守れば、純正な YARP アプリケーションでなくともかまわない。PHP や Ruby といった軽量スクリプト言語のほとんどは Socket 通信をサポートしている。

YARP はロボット用の通信ミドルウェアである。同様のロボット用通信ミドルウェアとして、OpenRTM[104]、ROS[105]、Urbic[106]、Orocos[107]、MONEA[108]などがある。特に ROS や OpenRTM のロボット用プログラムモジュールは多くの開発者によって開発されている。KOBIAN/KOBIAN-R の制御プログラムにこれらのロボット用通信ミドルウェアを組み込むことは、WABIAN-2 までの制御プログラムに同様のことを行うことより遥かに容易であり、それにより、多くの研究者・開発者が、それまでに開発したプログラム資産を有効利用して、全身型の 2 足歩行ヒューマノイドを利用

できるようになると考えられる。

制御プログラム構成として、特にロボットの運動に関わるレイヤは現在のところ **Session** レイヤが最上位となっている。しかしながら、2足歩行安定化制御については2足歩行パターン再生用の **TiaraSession** が行うなど、それぞれの **Session** オブジェクトに任せるしかない。安定化制御のように、全身運動を行う **Session** 共通で使用される機能は、共通の1つの **Session** として動作するほうがプログラムの構成としてはわかりやすくメンテナンスもしやすい。そこで、**Session** をさらに機能・役割に基づいて分化し、**Session** 間の使用・依存関係を明確にプログラミングできる構成が望ましい。それにより、2足歩行パターン再生 **Session** でもオンライン歩行 **Session** でも外部からの指令値に基づく全身運動 **Session** でも共通した安定化制御 **Session** の使用が可能になる。また、各機能のための **Session** モジュールを組み合わせて使用できることにより、プログラミングが積み木遊びのように容易になると考えられる。これらは、**Session** レイヤのさらに上位に、**Session** 間の関係を統括する **MetaSession** レイヤを追加することで実現できると考える。

また、**KOBIAN/KOBIAN-R** の制御プログラムは、特にハードウェア構成の変更に対応できるような構成としたが、プログラム起動時に構成設定ファイルを読み込むだけであり、ハードウェアの変更に対してプログラムの再構築の手間が少なくなった程度のことである。つまり、プログラム起動中の任意のタイミングに、プログラム内の関節オブジェクトといった構成表現が変更可能な完全な動的構成設定が可能というわけではない。(6)で提案したようにプラグアンドプレイなロボット・システムを実現するには、その活線挿抜可能なロボットデバイスから動的にデバイスドライバを読み込み、実行中のメインプログラムから呼び出し可能な仕組みが必要である。これと似たような仕組みは **PC** における **USB** 接続デバイスにて既に実現されている。よって、**USB** 接続デバイスと同様に、ある程度の事前定義されたロボットデバイス用のクラスを規定することで、プラグアンドプレイなロボット・システムは構築できると考える。実際に **RT** ミドルウェアにおいてプラグアンドプレイの実現例[109]はある。この事例において、また **RT** ミドルウェアにおいて、モジュールの粒度は関節単位といったロボット部位よりも幾分か粗いことが多いが、基本的な考え方は同じであるので、全身型の2足歩行ロボットにおいても実現は可能であろう。むしろ問題となるのは、メインプログラム内でどのように各デバイス・モジュールを表現し管理するかであるが、その前者についての表現もしくはプログラムインタフェースについて、**KOBIAN/KOBIAN-R** の制御プログラムにおける構成方法は有用であると考えられる。つまり、この制御プログラム構成を基にして、様々なハードウェア構成に容易に、かつ動的に対応可能な制御プログラム構築フレームワークをつくることができると考え

る.

7.2.2 ロボットの動作や行動, 表現

本論文では全身情動表出ヒューマノイド KOBIAN/KOBIAN-R を用いて, 全身での情動表出, 反射・反応的行動, 心理モデルによる動的情動表出を実現したが, ここではこのロボットが今後どのように動作・行動・表現を行っていくべきか, について述べる.

(1) 表現作成の簡便化とオンラインでの全身運動

第4章で説明した反射・反応的行動としての視標追従歩行および心理モデルによる動的情動変化以外の KOBIAN/KOBIAN-R の全身運動は全て, 事前に作成された全身運動パターンに基づいている. これは, 2足歩行ロボットにおける安定な全身運動生成が困難であり, また情動表出においては考慮すべき関節と運動軌道が膨大であることに起因する.

特に後者の全身情動表出姿勢の作成は, 筆者や漫画家, 写真家といった表現作成者がロボットの各関節を手で動かして, 望む角度でロックする(モータによる位置制御を有効にする)という手順で行っており, 非常に手のかかるものであった.

静的な姿勢については, モーションキャプチャにて人間の情動表出を記録し, その関節角度情報をロボットで出力し, 安定に立てるよう修正する方法や, 関節角度センサを内蔵したフィギュア[110]を用いた作成方法が望ましい.

動的な表現については, モーションキャプチャで計測した運動情報を, ロボットの物理特性を考慮して修正する方法[111]がある. しかし, これではロボットの全ての運動パターンを生成するために人間の運動を逐一計測しなければならない. そこでラバン理論[112]を用いた特徴的な表現動作の自動生成[113]などが有効であると考え. これとオンラインの歩行パターン生成を組み合わせることで, オンラインの全身情動表出が可能になると考えられる.

(2) 他の感覚入力に対する動作や行動

第4章で述べた反射・反応的行動は視覚入力に対するものであった. しかしながら KOBIAN-R は, WE-4RII と同じように, 頭部だけでも他に聴覚・触覚・嗅覚を備えている.

これらの感覚入力に対してどのように反応すべきかは心理モデルにおいては一意に定められるものではなく、ロボットの感受個性と表出個性において設定可能である。そこで、まずはWE-4RIIにて実現された例を基に、叩かれると怒ったり、アルコールを嗅ぐと喜んだりするような個性を実装するのが望ましい。全身での運動については、怒ると緊張した動き、アルコールによって喜んでると弛緩した動きなどが適当ではないかと考える。

人間の動作・行動を基準に作成するのは当然であるが、逆にそれから意図的に外れた動作・行動を出力させるようにすることで、人間からロボットがどのように見えるか、といった印象評価も併せて実施すると、個性設計の妥当性や有効性を検証することができると考えられる。

7.2.3 実験と評価

本論文では、ユーザの心理的観点からのヒューマノイドロボットの設計論を目指し、そのための実験用プラットフォームとして情動表出ヒューマノイド KOBIAN, KOBIAN-R, HABIAN, 人間形ソフトハンド WSH-1, WSH-1R, WSH-1RII を開発し、その表情、姿勢、移動、反射・反応的行動、情動の動的変化、移動形態による外観構成、ハンドの柔らかさ、形状、握り方について心理的評価を行った。

ここでは、今後行っていくべき実験と評価について述べる。

(1) 微妙・繊細な表現と動的表現

本論文におけるロボットの情動表出能力の評価視標には情動認識率を用いた。表情表出も全身情動表出も、基本的には認識率が向上すること、即ち、わかりやすく表出できることを目的とした。

しかしながら、人間の場合、全ての相手に対して理解されやすいようなはっきりした表出を常に行っているわけではなく、またその強さも常に最大を目指して表出しているわけではない。

人間と「うまくやっけていける」ロボットは、顔を持たない（内部状態の適切な表現が難しい）ロボットでも、常におおげさに表現しなければならないロボットでもなく、その場面や内部状態に応じて適切な表現ができるロボットであると筆者は考える。そのためには、微妙な表現や繊細な表現について、どのように出力すべきか、どのような評価視標を用いるべきか、といった研究が必要であると考えられる。

例えば、微笑む際に、0.3[s]程度で素早く微笑むのと、3[s]程度でゆっくり微笑むの

とでは、見る人が受ける印象は異なるだろう。0.3[s]程度で素早く驚くのと、3[s]程度でゆっくり驚くのとでは、後者の反応はわざとらしく感じられるだろう。このように動的な表現は微妙さ・繊細さを達成するのに有効なアプローチであると考えられる。

(2) マルチモーダルなコミュニケーション

第3章において表情と姿勢の組み合わせ、第4章において腕による表現や移動との組み合わせについて評価を行ってきたが、それ以外にも音声や視線、そして触れ合いといったコミュニケーション手段がある。

これらを総合的ないしは部分的にロボットが使用することで、コミュニケーションにおいて各手段がどのような効果にどのように・どの程度寄与するのかが明らかになるのではないかと考える。これは、実験条件の統制や実験時間・実験回数の問題により、人間同士のコミュニケーション実験が困難であると考えられ、まさにロボットならではの実験系である（人間と、各コミュニケーション手段を一部使用しないロボットとのコミュニケーション実験を想定している）。このような実験系により各コミュニケーション手段の効果が明らかになれば、1.2.2で紹介した Mehrabian によるメッセージ全体の印象に関する式[4]をさらに一般化することができるだろう。さらには、将来のコミュニケーションロボット開発において、そのコストや物理的制約とバランスするようなコミュニケーション機能の選別が可能になると考えられる。

(3) 状況・環境・タスク設定など文脈における人間とのインタラクション

第3章や第4章、第5章で述べた評価実験は、ロボットの表現を人間に提示するものであった。しかし、最終的な目標としているロボットは、人間の生活空間の中で人間とうまくコミュニケーションを取りながら、人間を支援するようなロボットであり、ロボットが人間に対し一方的に働きかけるだけのものではなく、また環境・状況なども実験室のような固定化されたものではない。

ロボットが人間と協働する、あるいは人間を支援するといった状況を考えると、そのロボットにはある程度特定のタスク遂行が求められている、ということである。実環境で役に立つロボットは、状況や環境、遂行すべきタスクなどに応じて、適切な行動を取らなければならないし、時々刻々と変化するそれらや内部状態に応じて、人間への適切な情報フィードバックをしなければならない。こうした変化する文脈（コンテキスト）の中では、ロボットの適切な行動も変化すると考えられる。

Breazeal らの研究グループが動物型ロボット Leonald を用いてインタラクション実

験を数多く行っているように、全身情動表出ヒューマノイドを用いて、様々な文脈における人間とのインタラクション実験を行い、文脈に適したロボットの行動の設計論を構築すべきだと考える。これにより、人間支援のための実用的なロボット・システムが実現できるだろう。

(4) 仮想エージェントとの印象比較

本論文では実世界に身体を持つロボットを開発し、またその印象評価を行ってきた。特に心理的な効果について着目しているため、CGによる仮想のロボットでも良いのではないかと訊かれることがある。

実際に第2章のKOBIAN-R頭部の開発で述べたように、その開発過程においてはCGによる表情プロトタイピングを用いているが、筆者は、実世界に物理的に存在し得ないロボットは、「ロボット」とは呼べないと思う。まず、ロボットには実世界におけるタスク遂行が求められるからである。CGを用いる利点としては、その動作や外観などを、現実の物理法則に縛られずに作成できることが第一に挙げられるが、これは逆に、現実の物理法則に則ったものを作成するのが非常に困難である、といえる。また、人間とのインタラクションには視覚と聴覚によるものしかほぼ使えないし、3次元の視覚提示装置や音響提示装置は大がかりなものである。特に触覚によるインタラクションや、人間の指し示す対象を同じように見るといった共同注意は、現実の物理空間内で場を共有しないCGの仮想エージェントでは困難である。

ただし、実世界での人間支援を目的としないような情報支援型のシステムにおいて、人間と同様の構成を持つ仮想エージェントがどのような心理的効果を持つのか、という問題は非常に興味深い。既に、人間が仮想エージェントに対し対人距離をどのように変化させるかという研究事例[114]があるが、KOBIAN-Rとそれの3DCGによる仮想ロボットとを比較することで、身体による存在感の心理的効果を明らかにできるのではないかと考える。

(5) 文化や年齢による差異

本論文において述べた評価実験の参加者は主に日本の若い人たちであった。しかしながら、最終的な目標としている人間支援のためのロボットは、まずは高齢者の生活支援において用いられるだろう。また、世界において少子高齢社会に先駆けて突入している日本において、高齢者生活支援ロボットが実用化されれば、同様に少子高齢社会を迎えつつある欧州[115]においても同様のロボット・サービスが導入されることは

考えられる。このような将来の実用化を考えると、日本の若年者に対する評価実験だけでは不十分である。

実際に筆者らは、KOBIAN の表情表出やソフトハンド WSH-1 の柔らかさについて高齢者を対象とした評価も行っている。表情認識率については、回答の傾向は若年者と似ているものの、全体的に認識率が低くなることがわかった。WSH-1 の触感評価については、若年者の場合では柔らかさや安全性、人間らしさ、優しさ、なじみ具合、親しみやすさについてソフトハンドがポジティブな印象を有意に与えられたことに対して、高齢者の場合では柔らかさについてのみ有意差が検出できた。これらは高齢者の認知能力の低下に因るものだと考えられるが、それがどのようなものであり、どのように効いてくるのかがこれらの評価により明らかになったといえる。また、欧州の高齢者に対する KOBIAN と HABIAN の印象の違いや、文化・国籍による KOBIAN-R 表情の印象の違いについても評価を行っている [118][97]。

これらの文化や年齢によるロボットの印象の違いの評価、さらには継続的に印象評価を行っていくことで、文化や年齢、世代によるロボットに対する受容・感覚の違いや変化といった社会的な意識変化までも観測することができるのではないかと考える。

7.2.4 応用

本論文では全身情動表出ヒューマノイドを開発し、主にその情動表出や印象について評価してきた。これの最終的な目標として人間生活支援を設定しているが、それ以外の応用についてここでは述べる。

(1) コミュニケーション活性因子としてのロボット

KOBIAN と HABIAN は元々 NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト・サービス用ロボット分野・高齢者対応コミュニケーション RT システムの一プロジェクト「快適生活支援 RT システムの開発」の一環として開発された。特に、ロボットの応用先として高齢者施設における運用試験を行っている。

高齢者施設において、職員は介護などの作業に追われ、コミュニケーションといった高齢者の心のケアまでに十分な時間を割くことが難しい、という問題があり、コミュニケーションなどを部分的に代替してくれるロボット・システムに対する需要が少なからず存在する。そこで、筆者らの研究グループは、コミュニケーションの活性因子としてのロボットを提案している。

Fig. 7.1に、2008年11月20日に高齢者福祉施設ケアタウン小平にて行ったHABIANの実験の様子を示す。この実験は、施設の利用者が難読ゲームを楽しむという状況において、HABIANが適宜相槌や解説を入れるというものである。対照実験を行っていないので、ロボットによる場の空気の変化など具体的な指標の変化は示すことができないが、コミュニケーションの活性因子としてのロボットの応用の可能性があると考ええる。

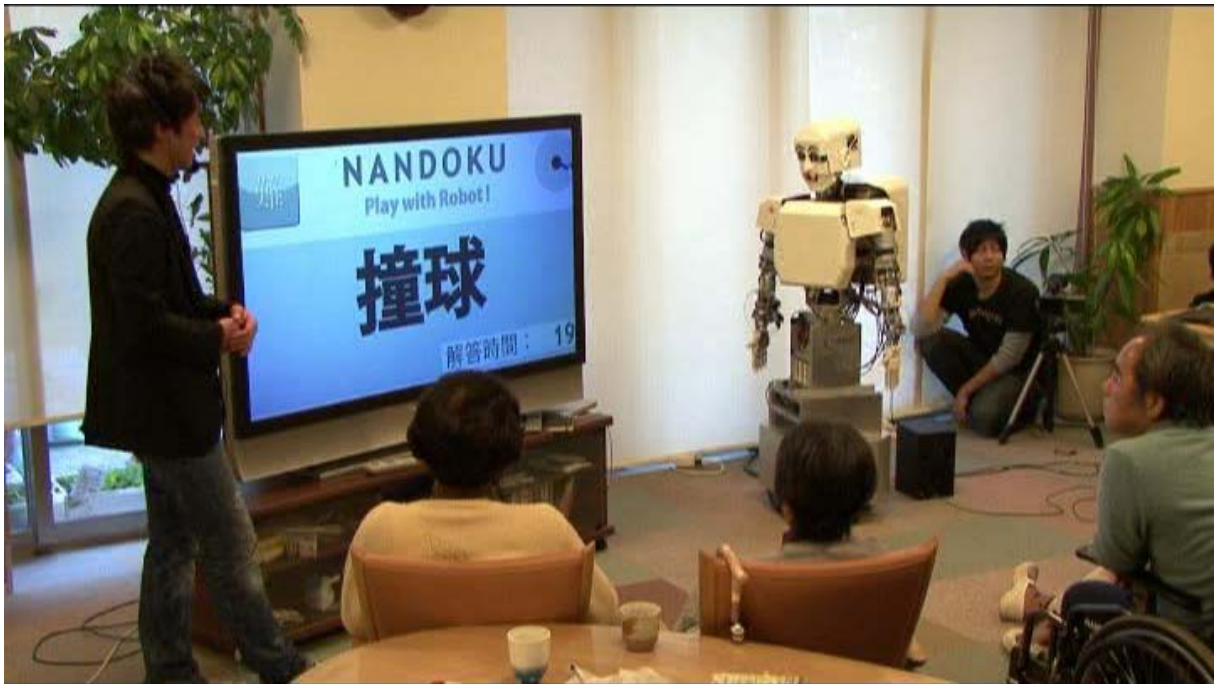


Fig. 7.1 HABIAN in Caretown Kodaira

(2) テレイグジスタンスによる遠隔地医療ロボット

等身大の全身情動表出ヒューマノイドの利点として、人間同様のコミュニケーション手段が可能であることと、人間の生活環境に対する親和性、特に人間の用いる道具をそのまま使用可能なことが挙げられる。ロボットの動作・行動を全て自動化することは現在の技術では困難であるが、ロボットを人間が操作するのであれば、幾分か実現可能なのではないかと考える。

ヒューマノイドは特にテレイグジスタンス技術との親和性が高い。15年近く前に提唱されたアールキューブ構想では、登山や災害救助といった例が挙げられているが[119][120]、他にも外食産業におけるテレイグジスタンスロボットによる調理・サービスなどが考えられるが、筆者は特に、診断も含めた遠隔地医療サービスが、実社会

への応用としてありえると考える。過疎地域・遠隔地における医療サービスの医療体制の確保は現在でも問題となっているが、どこでもドアのような高速な移動手段か、過疎地域を無くして都市部への人口集中でも行わない限り、抜本的な解決は困難なのではないだろうか。テレグジスタンスは、言うなれば肉体以外の瞬時の移動であり、移動先に人間と同様なロボットがあれば、そこで人間がロボットを介して物理的身体を用いた活動が可能である。人間が使う道具をロボットがそのまま使うことができれば、そこで人間が行う仕事をロボットを介して行うことができる。さらに、人間同様の表情などの表出機構をロボットが備えていれば、人間と同様のコミュニケーションも実現できるだろう。このように、全身情動表出ヒューマノイドには、テレグジスタンスによる遠隔地医療への応用の可能性があると考える。

附録 A ソフトウェア

A.1 クロスプラットフォームライブラリ

A.2 Web アンケート

A.1 クロスプラットフォームライブラリ

本研究においては様々なプログラムを開発した。直接的に関わるものとしてはロボットの制御プログラム，視標追従におけるカメラの画像処理プログラム，Web アンケートシステムの3つが挙げられるが，これらの他にもロボットの運動パターンの変換プログラムやプログラム・モジュールのテストプログラム，アンケートのデータベースの解析プログラムなど，多くの補助プログラムを開発した。

特にロボットの動作に関わるプログラムには高速性や時間応答性が求められ，それらはC++によって開発した。ロボットの制御 PC の OS は QNX Neutrino 6.3.0 であり，カメラの画像処理 PC の OS や主な開発 PC は Windows XP/7 である。ロボットの制御プログラム開発においては，他の開発者（研究員や学生）とのロボットの共有問題やテスト時にプログラムをコピーする手間による開発効率の低下を考慮し，主に Windows の開発 PC にてプログラムの動作を確認し，然る後にロボット制御 PC にて動作確認および実験を行う，という方式を採用した。

これを実現するために QNX Neutrino と Windows にて使用可能な C++クロスプラットフォーム C++クラスライブラリ Takalib を開発した。Takalib が提供する主な機能を次に挙げる。

- 時間計測，時刻取得
- CSV ファイル I/O
- 型情報付マーシャリング
- Socket 通信，非同期プロセス間通信
- スレディング，インターバルタイマ
- 文字列変換，基本物理単位，回転ユーティリティ
- 補間，ロギング
- タブ型 TUI (Text User Interface) 構築フレームワーク

Takalib の基本方針を次に挙げる．

- OS 間で異なる API の吸収
- API の C++クラス化
- よく使う処理のクラスライブラリ化

巷間にクラスプラットフォームな C++ライブラリは溢れているが，実は QNX 対応がなされているものは非常に少ない．最もメジャーな Boost ライブラリでさえ，QNX には部分的にしか対応していなかった．特に，GUI 構築ツールキットについては使用できるものが全く無かった．Qt が QNX 対応に比較的意欲を持っているようであるが，それでもまだまだである．また，自分でライブラリを開発することはソフトウェアの勉強と開発能力の向上にとっても寄与する．これらの状況と理由により，Takalib を開発した．

ただし，全てを OS の API や C++の標準ライブラリから構築したわけではない．これまでの偉大な先達の成果を用いている．学外の成果としては，POSIX スレッドの API を Windows で使用するためのライブラリ PThreadsForWin32，端末制御ライブラリ Curses を Windows で使用するためのライブラリ PDCurses，画像処理ライブラリ OpenCV を用いている．学内の成果としては高西研究室 2 足班の 2 足歩行パターンジェネレータ (PG) の基礎的なクラスライブラリを用いている．ここに，偉大なる先達への感謝を表す．

Takalib 開発にあたっては，オブジェクト指向の設計をこころがけた．特に参考にしたのが，Tucker!による『憂鬱なプログラマのためのオブジェクト指向開発講座』（翔泳社）と Gang of Four による 23 のデザインパターンである．オブジェクト指向設計をこころがけることにより，開発したプログラム・モジュールの再利用性や可用性が高まり，複雑な処理を記述しやすくなった．また，Java のライブラリのクラス設計や PHP の標準関数，Ruby の流儀，Node.js のイベント駆動思想などを一部参考にした．

Takalib クラスライブラリの詳細は割愛し，タブ型 TUI 構築フレームワークである Page Framework (F/W) の設計方針についてのみ紹介する．

本研究で開発してきたプログラムには何らかの処理を継続して行うものがある．ロボットの制御プログラムや，視標追従におけるカメラ画像処理プログラムがそれに当たる．こうしたプログラムは，動作中にユーザが操作・介入できることがしばしば求められる．プログラムとユーザをつなぐ架け橋，つまり，プログラムからユーザへの情報提示やユーザからプログラムへの操作を実現するものがユーザインタフェース

である。

ユーザインタフェースにはいくつかの種類がある。CUI (Character User Interface), GUI (Graphical User Interface) が主に用いられるが, 最近では BMI (Brain-Machine Interface) や NUI (Natural User Interface) などがあり, ロボット系, ICT 系, 知能系, 心理学系, 医学系, アート系, エンターテインメント系など分野を超えたホットなトピックである

CUI はターミナル (端末) によって主に実現される。ターミナルは一般的に, コマンドラインによる対話型のインタフェースであり, 文字の入出力によって操作・表示が行われる。ビットマップ画像によるウィジェットの表示やマウスなどのポインティングデバイスによる入力が主となる GUI に比べて直感的理解性は乏しいが, 表示処理が高速であること, 環境依存性が低いこと, プログラミングが容易であること, などいくつかの利点がある。この利点を生かしつつ, ターミナル画面全体を表示領域として用い, さらに文字色や内部矩形領域の使用を可能とすることによって, 操作性・理解性を向上したものが TUI (Text User Interface) である (Table A.1)。

Table A.1 CUI, TUI, GUI の比較

	CUI	TUI	GUI
表示	文字	文字	文字, 画像
入力	キーボード	キーボード	キーボード, マウス
色	単色	8 色程度	フルカラー, 透過色
表示単位	行	行, 列	ピクセル
入力位置	カーソル行	任意	任意
処理時間	高速	高速	普通
環境依存性	小さい	小さい	大きい
開発のしやすさ	しやすい	普通	普通
メンテナンス性	高い	高い	低い
操作性	低い	中程度	高い
理解性	低い	中程度	高い

特に環境依存性の点は重要である。というのは, 制御ソフトウェアのメインプラットフォームは QNX Neutrino であるが, レイヤアーキテクチャを採用しており, また, クロスプラットフォームな Takalib を使用しているために, I/O を伴う運動制御よりも上位のレイヤおよびモジュール開発のテストは, QNX Neutrino 上でなくても行えるか

らだ. このことは, プログラム修正のたびに逐一ロボット制御 PC にコピーしなくて良いため, また, 他の開発者とのロボット使用の衝突を避けられるため, 開発のしやすさを劇的に向上させる.

その他の比較点も考慮して, TUI をデフォルトの UI として選んだ. ベースとして TUI のライブラリ Curses (もしくは NCurses) を用いたが, これだけでは簡単に UI を構築することはできないので, TUI 構築フレームワーク Page F/W を開発した.

Page F/W はタブ型 TUI 構築フレームワークである. 一般的な TUI はターミナル画面を表示領域として用いるが, GUI と比較すると, これは単一のウィンドウのみしか表示領域を持たない, ということである. そこで, タブで表示画面 (ページ) を切り替えるマルチ表示領域の TUI アプリケーションを容易に構築できるフレームワークとして開発した.

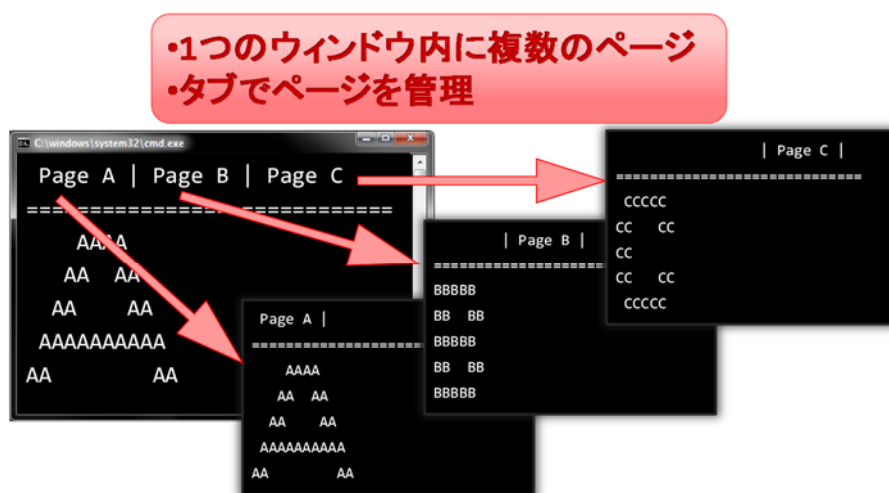


Fig. A.1 Concept of Page Framework

制御ソフトウェア等の中規模以上のプログラムは, その全体のアーキテクチャをうまくモジュール化して設計する必要がある. Model-View-Controller (MVC) アーキテクチャパターンはその際に有用な設計パターンである. Page F/W では Fig. A.2 の青四角で囲まれた部分, 即ち View と Controller の構築フレームワークである. ただし, 厳密には, View と Controller をオブジェクトとして区別してはいないので, MVC の亜種で Doc-View アーキテクチャの方が近い. ここで, Model や Doc はプログラムの本質的処理を記述されたモジュール群を指す.

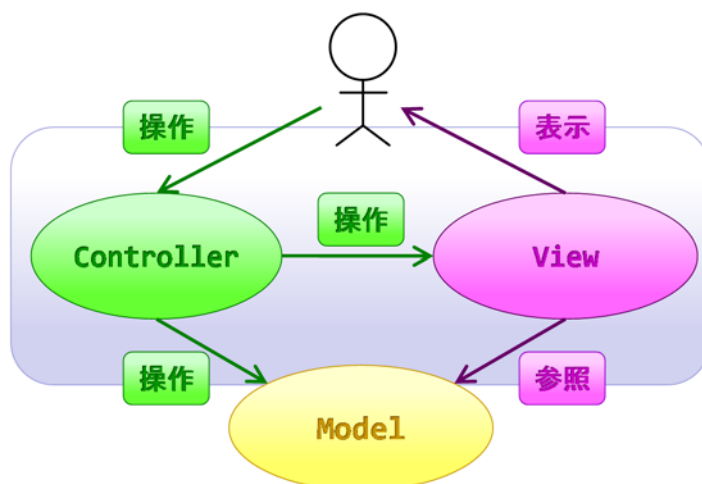


Fig. A.2 Model-View-Controller architecture

Page F/W の内部アーキテクチャを Fig. A.3 に示す. 操作系 (Controller) の処理連鎖を緑色, 表示系 (View) の処理連鎖を紫色で示す. Page F/W がまず提供するものは, ユーザからのキーボード入力を待ち受ける PagesController とターミナル画面への表示を行う PagesViewer である. これらは Singleton として実装されている. また, 個々の論理画面 (ページ) を記述するための雛型となる抽象クラス APage (赤色) も提供される. 開発者は, APage を継承したオリジナルの Page クラスをつくり, onKeyCommand() メソッドにキー入力に対する処理を, onDisplay() メソッドに表示処理を実装すれば, その Page を表示する際に, F/W が自動的に入力処理と表示処理を行ってくれる.

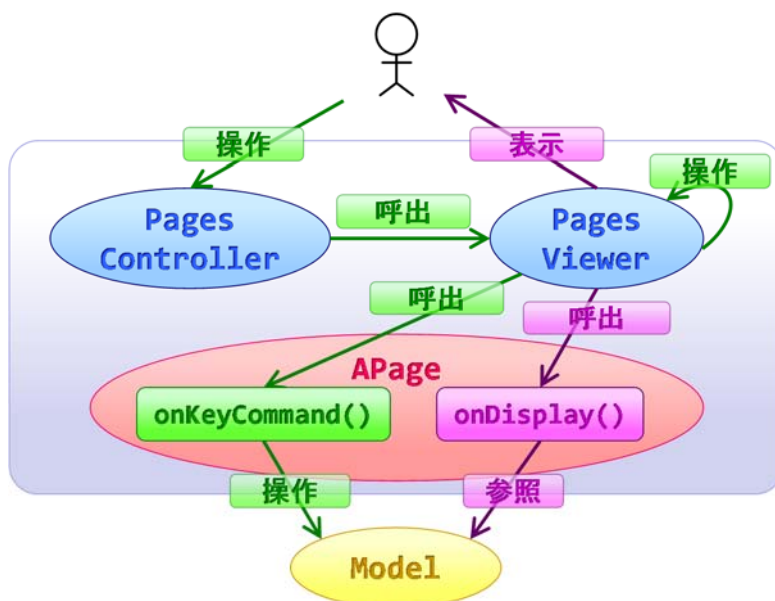


Fig. A.3 Architecture of Page Framework

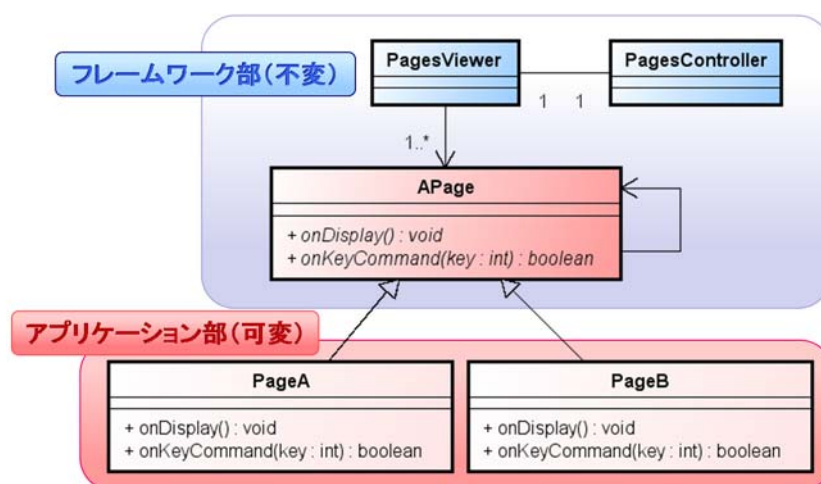


Fig. A.4 Static diagram of Page Framework

静的構成図 (Fig. A.4) に示すように, TUI の共通処理はフレームワークとして提供されるので, アプリケーション開発者はアプリケーション固有の処理に集中することができる.

キー入力受付処理と表示処理は別のスレッドによってそれぞれ実行される. これにより, 入力と表示を別々の周期のインターバルタイムにて実行することができる. キー入力は 10[ms], 表示は 100[ms]の周期がデフォルトである. キー入力受付処理は main スレッドにて行うのが簡単である. Fig. A.5 に並行動作のアクティビティ図を示す.

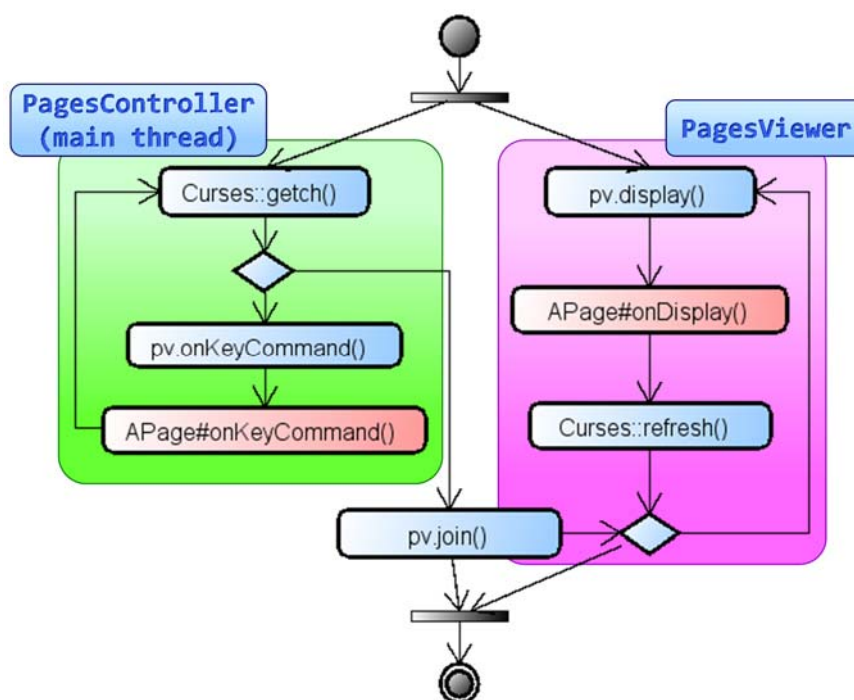


Fig. A.5 Activity diagram of Page Framework

以上の仕組みにより、単一のターミナル画面上で複数の画面を簡単に扱うことが可能になった。これは、GUIにおける「ウィンドウ」を、TUIで一部実現した形になる。GUIでは、1つのアプリケーションが複数のウィンドウを持ち、それを制御することができる。Page F/Wでは、(ターミナル上で実行される)1つのアプリケーションが複数の論理画面(ページ)を持ち、それを制御することができる。

GUIにおけるテキストボックスやボタンなどの「UIコントロール」は、Page F/Wにおいては、フォームと呼ばれる概念で取り扱われる。フォームは、ページ上に配置可能なUIコントロール部品であり、onKeyCommand()からの特定のキー入力受付およびonDisplay()における部分的な表示を担当する。

標準で文字列入力フォーム、整数値入力フォーム、実数値入力フォーム、汎用ボタンフォーム、ON/OFF切替フォームが用意されている。これらを利用するためには、個々のPageクラスにてこれらのインスタンスを登録すればよく、onDisplay()メソッドにおいてそれぞれのインスタンスのdisplay()メソッドを呼び出すだけで、ページ上に配置される。1つのページ内のフォーカスされるフォームの切替はPage F/Wが処理する。Fig. A.6に使用例を示す。

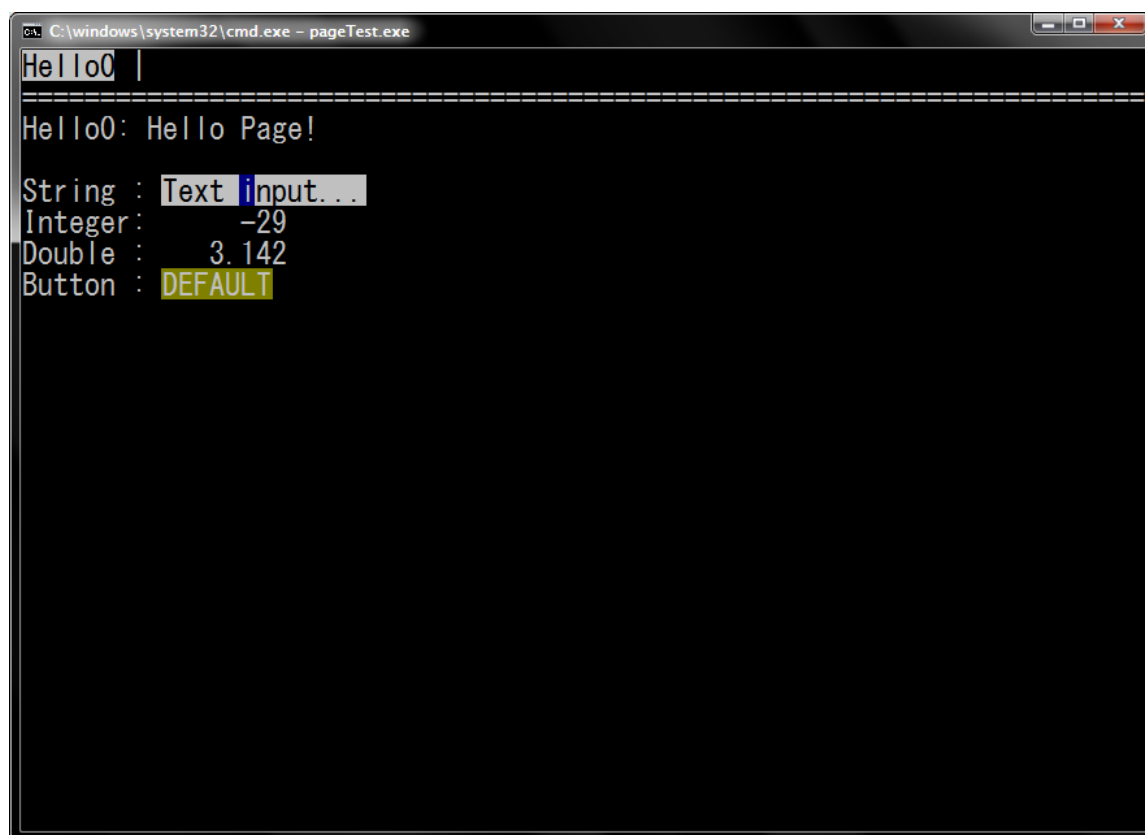


Fig. A.6 Sample of Page Framework

A.2 Web アンケート

開発したロボットの画像による評価については、Web アンケートシステムによって行われている。Web アンケートシステムを導入した理由を次に挙げる。

- 多人数への調査を短期間で行うことができる
- アンケート記入が即座に電子化され、計算機への手動入力の手間が省くことができる
- 回答時間などの客観的指標が容易に計測できる
- アンケート協力者が実験室などに来る必要が無く、自分の都合の良い日時に回答することができる

Web アンケートシステムは、適当なものが無かったため、自分で開発した。以下にその概要を述べる。

Web アンケートシステムの目的は、ロボットの多数の情動表出画像のそれぞれの情動認識率を調査することである。そのために次の機能が求められた。

- 回答者の認証機能
- 回答者の属性採取機能
- 多数の画像を基準画像と選択肢（表出していると思われる感情）とともに提示し、回答者の入力を記録する機能
- 提示画像の順番をランダム化する機能
- 複数の評価に使えるよう提示画像や選択肢、回答者などの構成設定の変更機能
- 外国人でも回答できるよう日本語と英語それぞれで表示する機能

これらを実現するために、PHP によるスクリプト、MySQL データベース、Apache サーバを用いて Web アンケートシステムを開発した (Fig. A.7)。

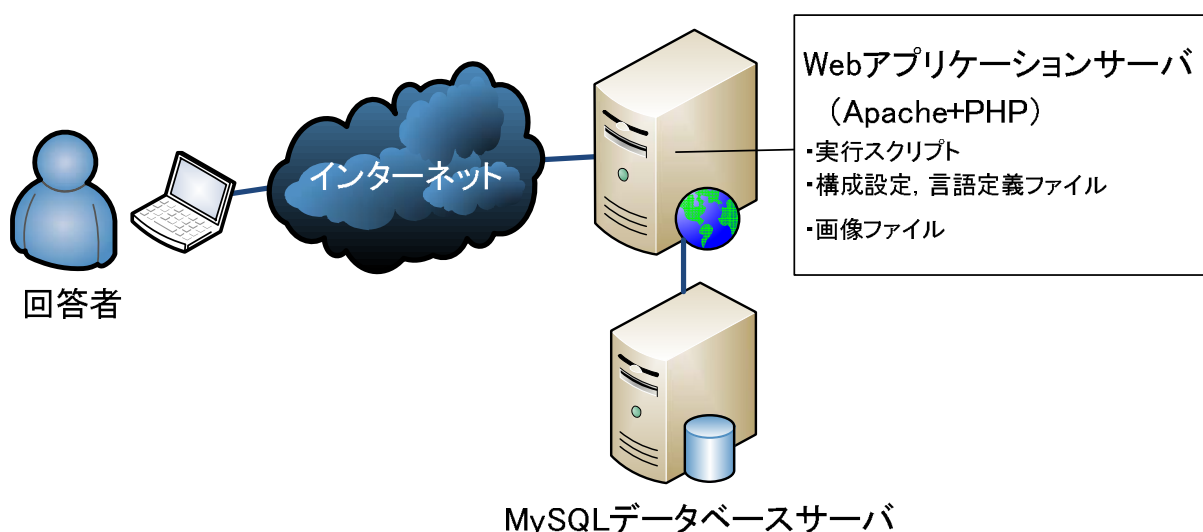


Fig. A.7 Deployment of Web questionnaire system

(1) データベース

データベースには3つテーブルを用意した.

- 回答者認証用テーブル
- 回答者属性用テーブル
- 回答テーブル

回答者認証用テーブルのフィールド定義を Table A.2 に示す. `is_answered` フィールド以外の情報は, アンケート回答期間前にアンケート主催者によって入力され, アンケート回答期間終了後に回答の集計が行われるまで変更されない. `user_id` は「1」から始まる一意な数字であり, データベース操作において使用される主要キーである. `user_name` および `password` は, 各回答者に事前に配付する回答者 ID およびパスワードと同一であり, 回答者認証時の照合に使用される. この Web アンケートシステムにおいて回答者の実名は必要ないので回答者 ID は実名と異なる適当な文字列である. 回答者実名と回答者 ID と結び付ける場合は, このシステムとは別の照応ファイルにて管理することになる. `quest_type` は提示される情動表出画像群を定義する (アンダーバー区切り). 例えば「WE_KOB」とあれば, PHP スクリプトが構成設定ファイルより WE-4RII の画像群と KOBIAN の画像群をランダムイズして提示する. `is_answered` は, 回答者が `quest_type` で定義された全ての画像に対し回答を完了した時点で「1」にセットされる. これにより回答を途中で止めた回答者を特定できる.

Table A.2 回答者認証用テーブルのフィールド定義

フィールド名	説明
user_id	主要キー
user_name	回答者 ID
password	回答者パスワード
quest_type	提示画像群定義
is_answered	回答完了フラグ (初期値「0」)

回答者属性採取用テーブルの定義を Table A.3 に示す。これらは全て、回答者がアンケート説明に同意し認証された後に、回答者が属性記入ページから間接的に記入する。1 回答者につき 1 レコードである。id フィールドは「1」から始まる一意な数字であり、回答者毎に自動的に 1 だけインクリメントされる便宜上のものである。user_id には回答者の回答者認証用テーブルにおける user_id が入る。lang には回答者がアンケート説明・認証ページにて選択した表示言語が入る。age, sex, univ, labo, specialty には回答者が属性記入ページにて記入されたものが入る。このうち、age (年齢) と sex (性別) は必須記入事項である。

Table A.3 回答者属性採取用テーブルのフィールド定義

フィールド名	説明
id	便宜上のも
user_id	回答者認証用テーブルにおける回答者の user_id
lang	表示言語。「ja」(日本語) もしくは「en」(英語)
age	回答者の年齢
sex	回答者の性別
univ	回答者の所属機関
labo	回答者の所属研究室
specialty	回答者の専門分野

回答テーブルの定義を Table A.4 に示す。これらは全て、回答者が、提示画像が表出している感情と思われるものを選択もしくは記入することで回答したタイミングで入力される。1 提示画像につき 1 レコードである。id フィールドは「1」から始まる一意な数字であり、回答毎に自動的に 1 だけインクリメントされる便宜上のものである。

る。user_id には回答者の回答者認証用テーブルにおける user_id が入る。quest_type には提示画像ファイル名が入る。answer には回答された感情名が入る。感情名は表示言語に依らない。例えば日本語表示において「驚き」、英語表示において「Surprise」とあっても、このテーブル上では「surprise」という文字列として入力される。感情名は「anger」(怒り)、「happiness」(喜び)、「surprise」(驚き)、「disgust」(嫌悪)、「sadness」(悲しみ)、「fear」(恐れ)、「annoyance」(困惑)、「other」(その他)がデフォルトで用意されており、アンケートによってどれを有効にするかは構成設定ファイルにて切り替え可能である。free_answer には回答された感情名が「other」であるときに回答者が自ら選択肢に無い感情を記入したものが入る。answer_time には提示画像が表示されてから回答者が感情を回答するまでの経過時間が入る。

Table A.4 回答テーブルのフィールド定義

フィールド名	説明
id	便宜上のもの
user_id	回答者認証用テーブルにおける回答者の user_id
quest_type	提示画像ファイル名
answer	回答された感情名
free_answer	「その他」回答時の自由回答
answer_time	回答に要した時間。マイクロ秒単位

(2) PHP スクリプト

Web アンケートシステムの実行スクリプトは PHP により記述している。各スクリプトの役割を Table A.5 に示す。これらの他に、認証およびデータベース操作の基本ライブラリとして PEAR の Auth モジュールおよび DB モジュールを用いている。また、Web ページの HTML 出力用テンプレートエンジンとして Smarty を用いている。

回答者がアンケートへの回答を行う手順は次の通りである。

- (i) 開始ページ (login.php) においてアンケートの説明を読み、事前に配付された ID およびパスワードを入力する (Fig. A.8)
- (ii) 回答者の属性を記入し、アンケートの詳細な説明を読み、次へ進む (Fig. A.9)
- (iii) 画面左側に表示された基準画像に対して、画面右側に表示された画像におけるロボットが、どのような感情を表出していると思われるか、選択肢から回答す

る (Fig. A.10)

- (iv) (iii)を繰り返す
- (v) 全ての画像に対して(iii)が終わったら, 終了ページが表示される

Table A.5 各 PHP スクリプトの役割

ファイル名	役割
index.php	アンケートのメインスクリプト
login.php	アンケートの説明および認証
logout.php	回答中断処理
config.inc.php	アンケートの構成設定
Auth.inc.php	ページ遷移の際の保持セッションの処理
str.ja.php	表示文字列設定 (日本語)
str.en.php	表示文字列設定 (英語)
post.php	アンケートの各種回答の処理
db_func.php	データベース操作関数の定義

アンケートにご協力ありがとうございます。

下記事項に同意して頂いた上で, IDとパスワードを入力し, ログインしてからご回答ください。

- 当アンケートは, 人型ロボットの表情の認識率を調査することを目的として行われます。
- 当アンケートでは, 2枚の画像が提示され, 一方の画像について, 複数の選択肢の中から該当すると思われるものを選択し, 回答して頂きます。
- 所要時間は5~20分程度です。
- アンケートはできるだけ他の人に影響されず, 他の人と相談しないで回答してください。
- アンケートを途中で止めた場合, それまでに得られたデータは破棄されます。
- アンケート途中で, 前のページに戻って回答をやり直したい場合は, ログアウトして最初からやり直してください。
- 当アンケートによって得た情報は口外しないで下さい。また, 回答内容について, 他人(他の当アンケート回答協力者を含む)に教えたりしないで下さい。
- 当アンケートで採取される個人情報は, 年齢, 性別, 所属大学, 学科・専門領域, 研究室名のみです。
- 当アンケートによって当研究室が得た個人情報は研究上の目的にのみ使用されます。
- 不明な点や質問事項があれば, 早大院理工学研究科生命理工学専攻修士課程2年 遠藤信綱 noble@ruri.waseda.jp までお問い合わせ下さい。

ID

Password

English Japanese

Fig. A.8 Screenshot of the start page of the Web questionnaire system (Japanese)

人間型ロボットの表情に関するアンケート

早稲田大学創造理工学部総合機械工学科高西淳夫研究室
担当者: 遠藤信綱 noble@ruri.waseda.jp

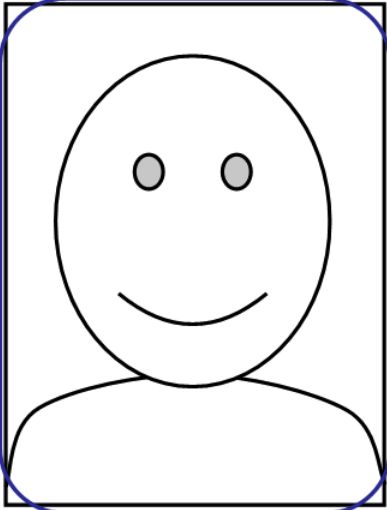
まず下記の項目にご記入下さい。「次へ」を押すと質問ページに行きます。

年齢: ※必須
 男 女 ※必須
 大学:
 専門/学部/学科: ※学生の方は、学部(研究科), 学科(専攻)を記入して下さい
 研究室: ※研究室に所属していない方は記入しないで下さい

次ページから始まる質問は以下の図のようになっております。

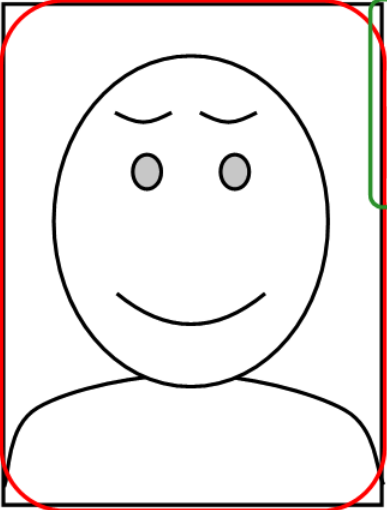
質問 1/22

通常状態と比較して、右の表情はどのような感情を表現していると思いますか？ 選択肢から選んでください。



通常状態

A



B

- 怒り
- 喜び
- 驚き
- 嫌悪
- 悲しみ
- 恐怖
- 困惑
- その他

C

D

[回答を止める\(ログアウト\)](#)

写真Aと比べて、写真Bのロボットがどのような感情の表情をしているか、当てはまるものをC部の選択肢の中から選びチェックし、D部のボタンを押して下さい。

同様の質問が全部で41問あります。

1つの質問につき、目安として10秒以内に、直感で回答してください。

[回答を止める\(ログアウト\)](#)

Fig. A.9 Screenshot of the personal information page of the Web questionnaire system (Japanese)

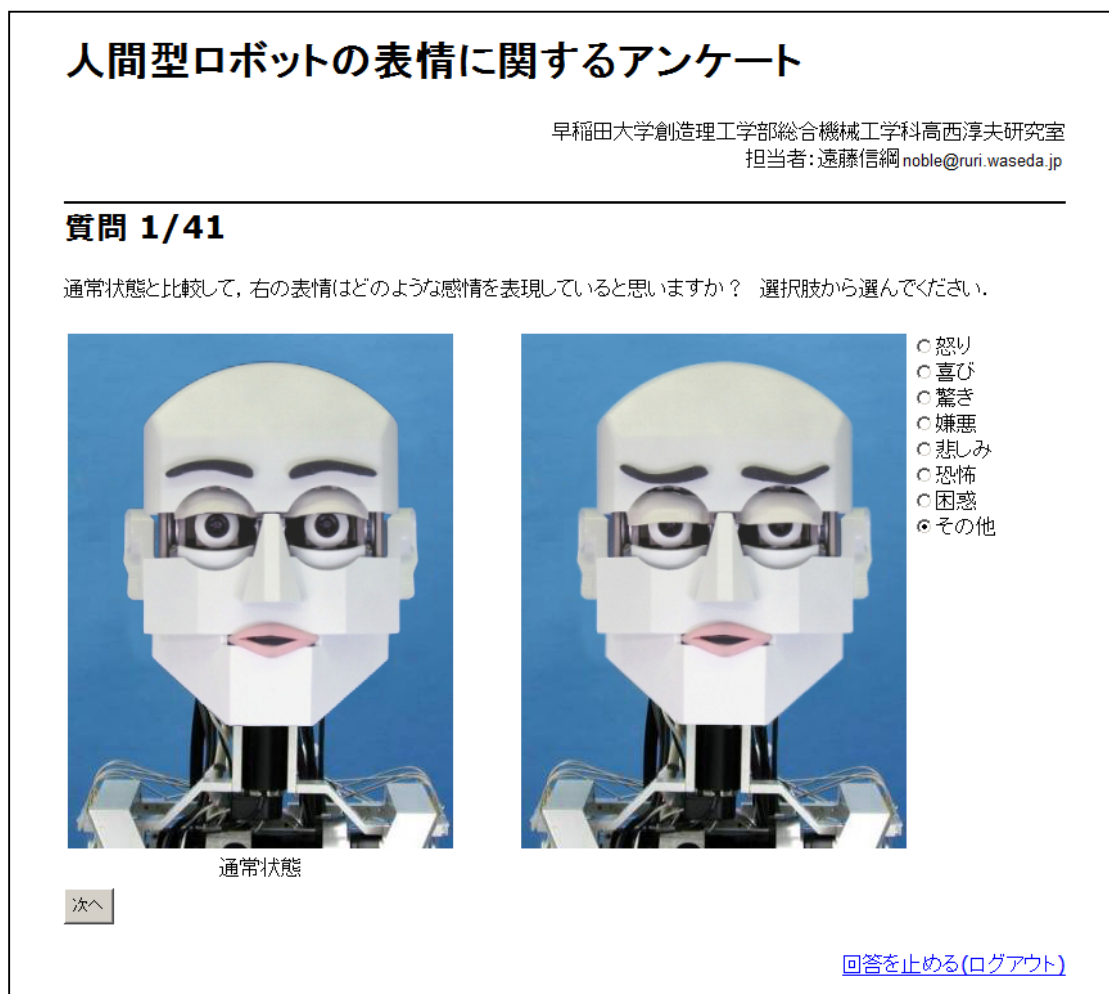


Fig. A.10 Screenshot of the questionnaire page of the Web questionnaire system (Japanese)

メインの処理となる質問の流れの制御および入力画面の表示は `index.php` にて実行される. セッションによりページ遷移間の情報の保持が容易となる. 回答者によるフォーム入力は `POST` メソッドとして `post.php` に渡され, そこでデータベースへ入力される. その後に `post.php` から `index.php` に自動的に遷移される. `index.php` のアクティビティ図を Fig. A.11 に示す.

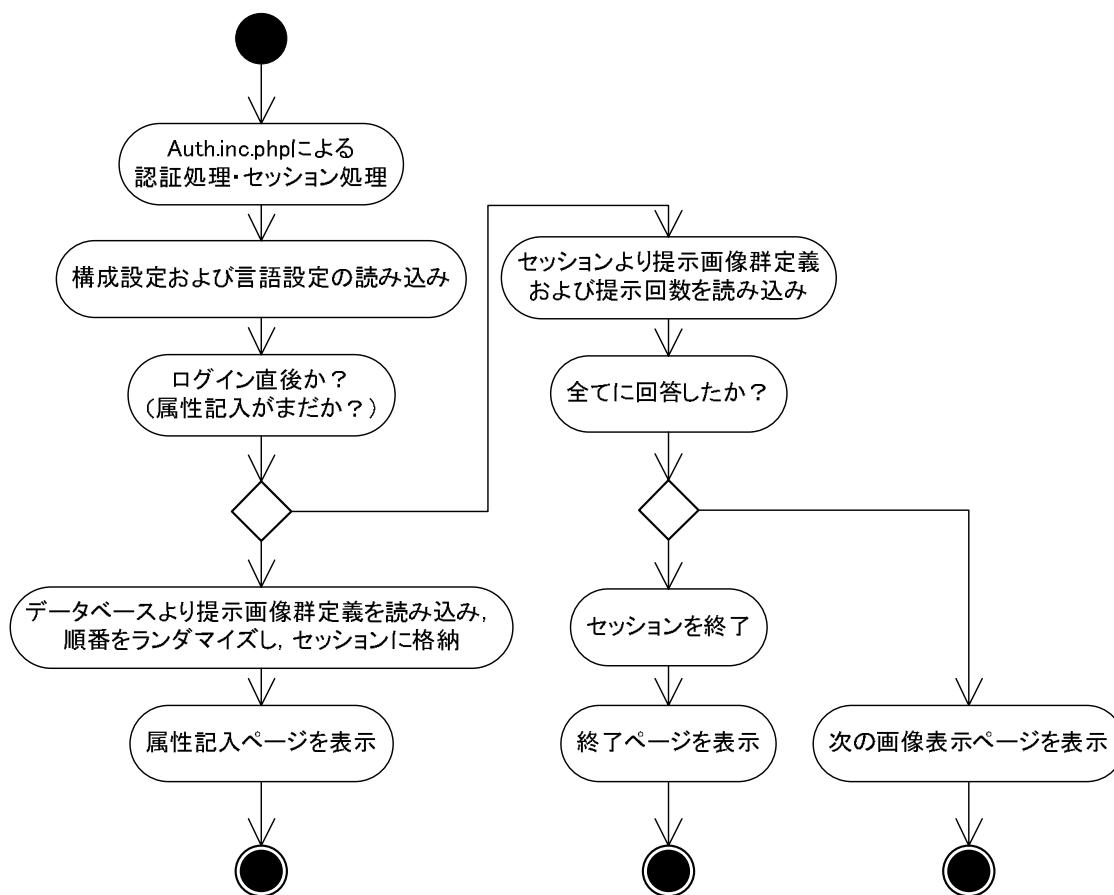


Fig. A.11 Activity diagram of index.php

附録 B 情動認識率評価実験の結果詳細

B.1 全身情動表出の情動認識率評価実験の結果詳細

B.1 全身情動表出の情動認識率評価実験の結果詳細

ここでは 3.5.1 の全身情動表出の情動認識率評価実験の結果詳細を記す。提示写真を Fig. B.1～Fig. B.19 に示す。結果を Table B. 1 に示す。

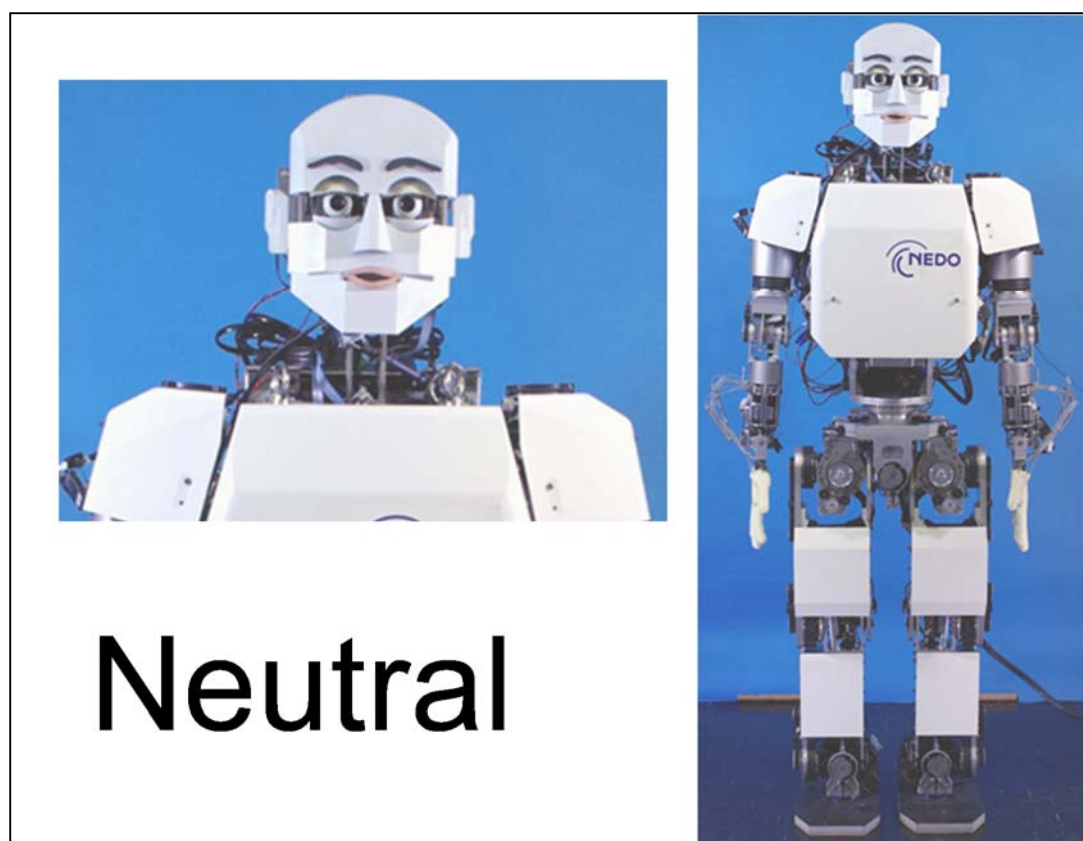


Fig. B. 1 無感情

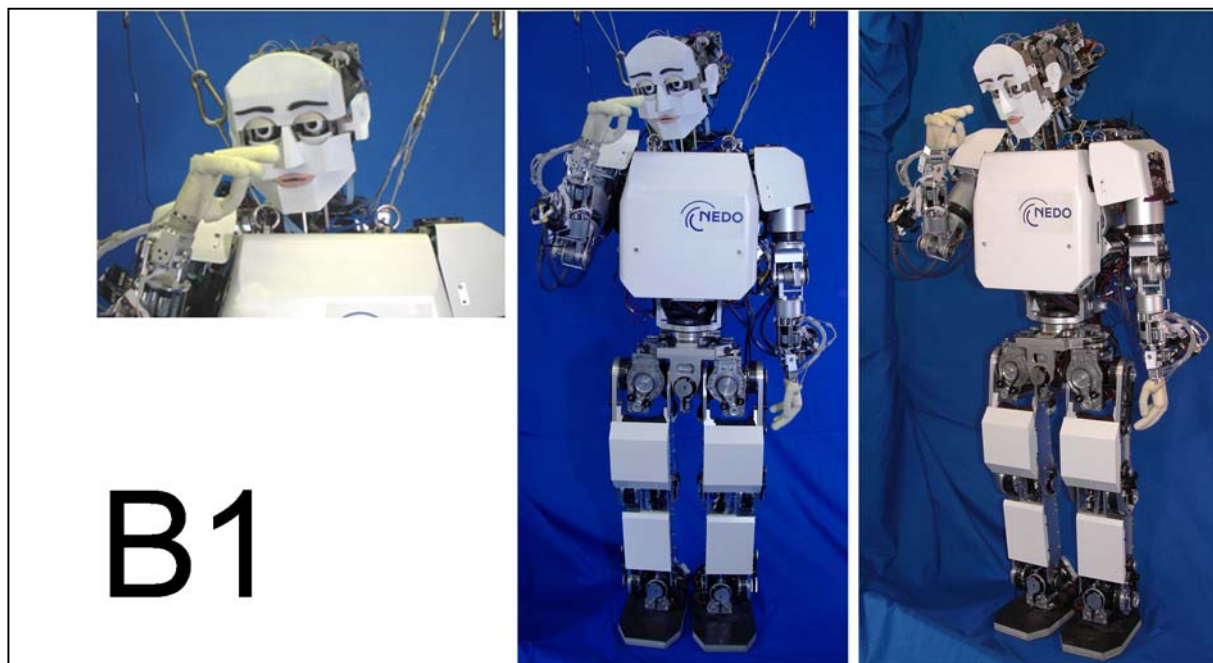


Fig. B. 2 悲しみ（無感情表情）

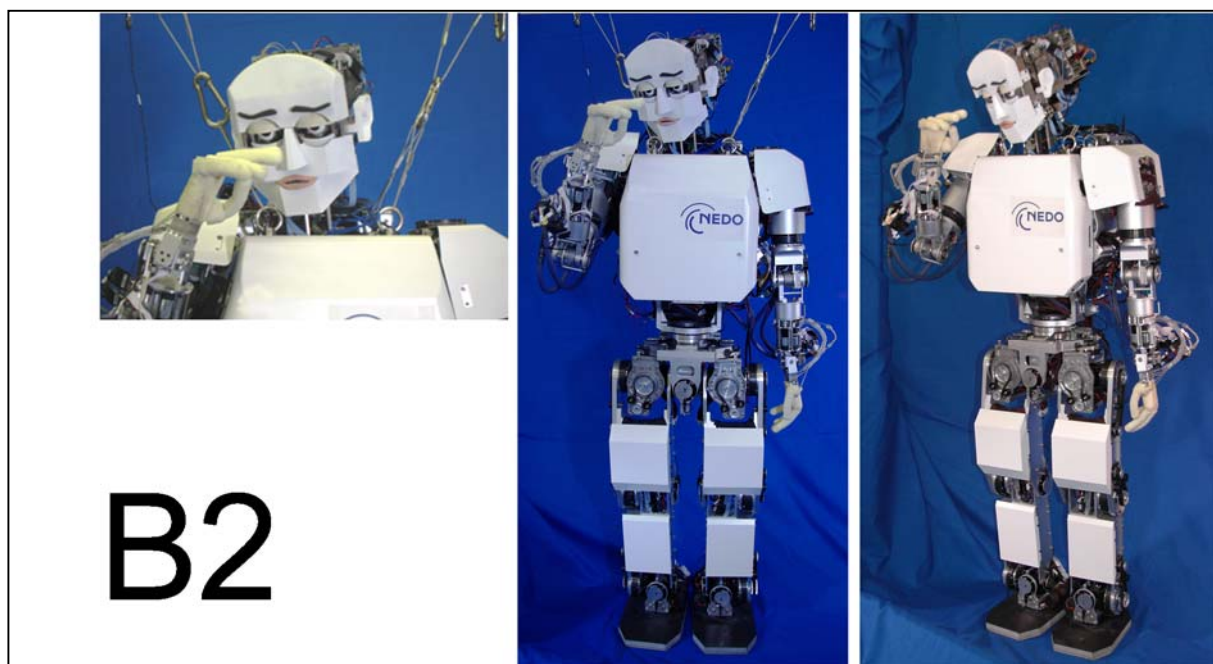


Fig. B. 3 悲しみ（悲しみ表情）

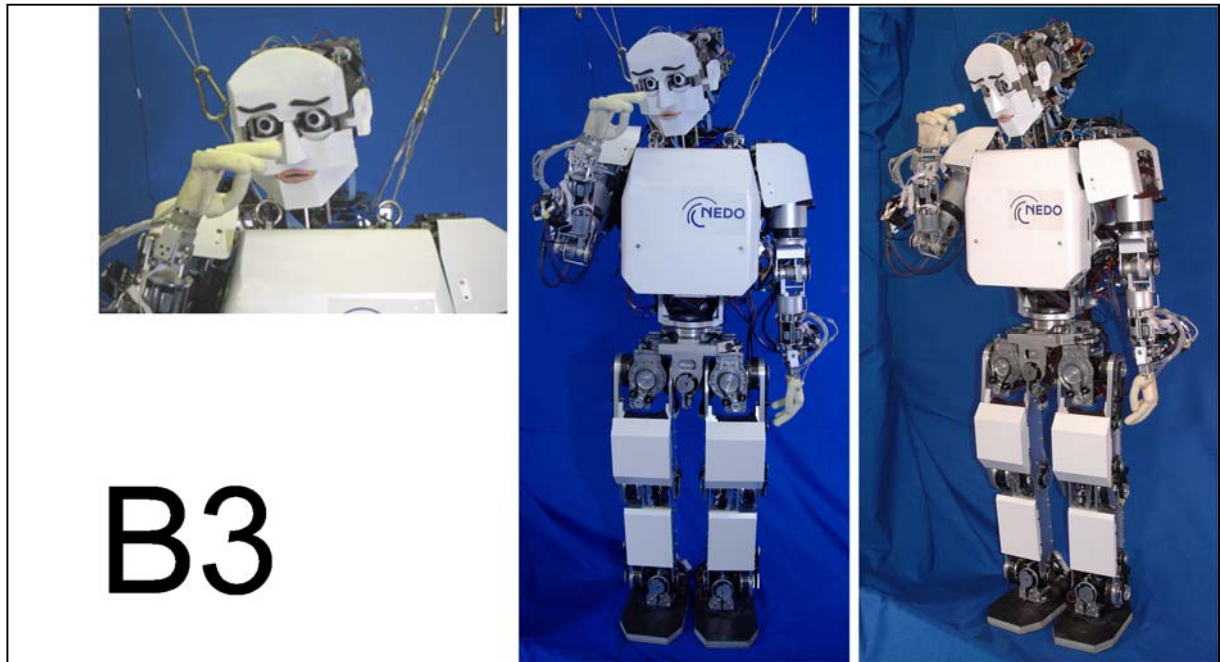


Fig. B. 4 悲しみ (悲しみ表情)

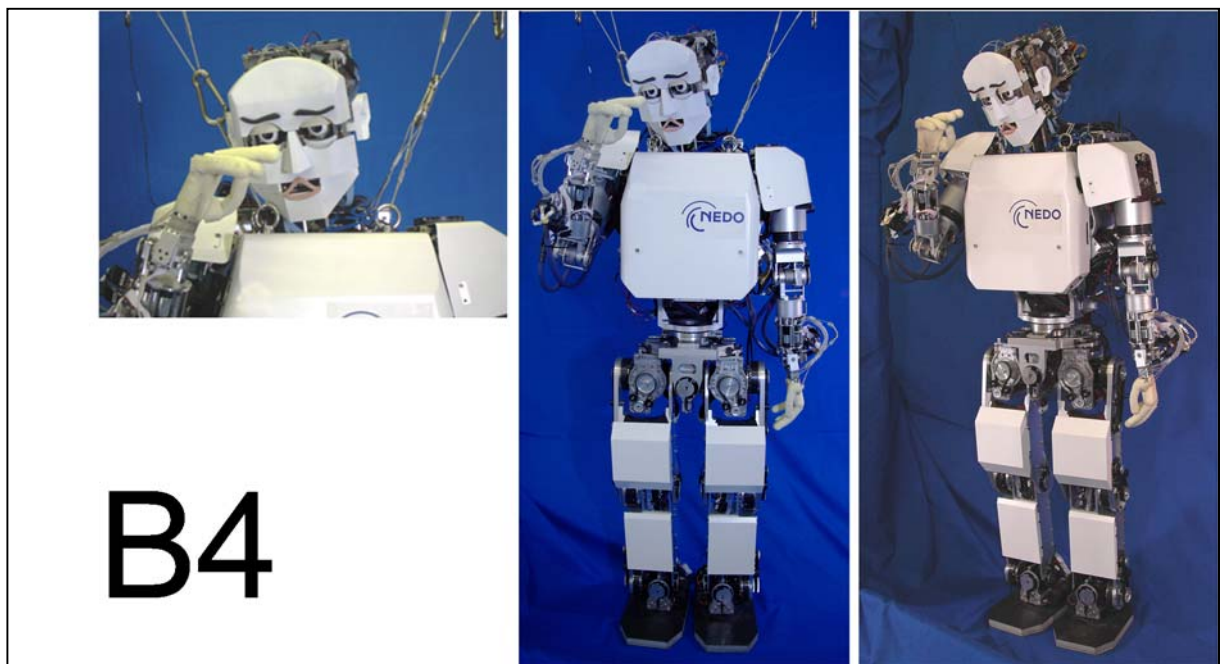


Fig. B. 5 悲しみ (悲しみ表情)

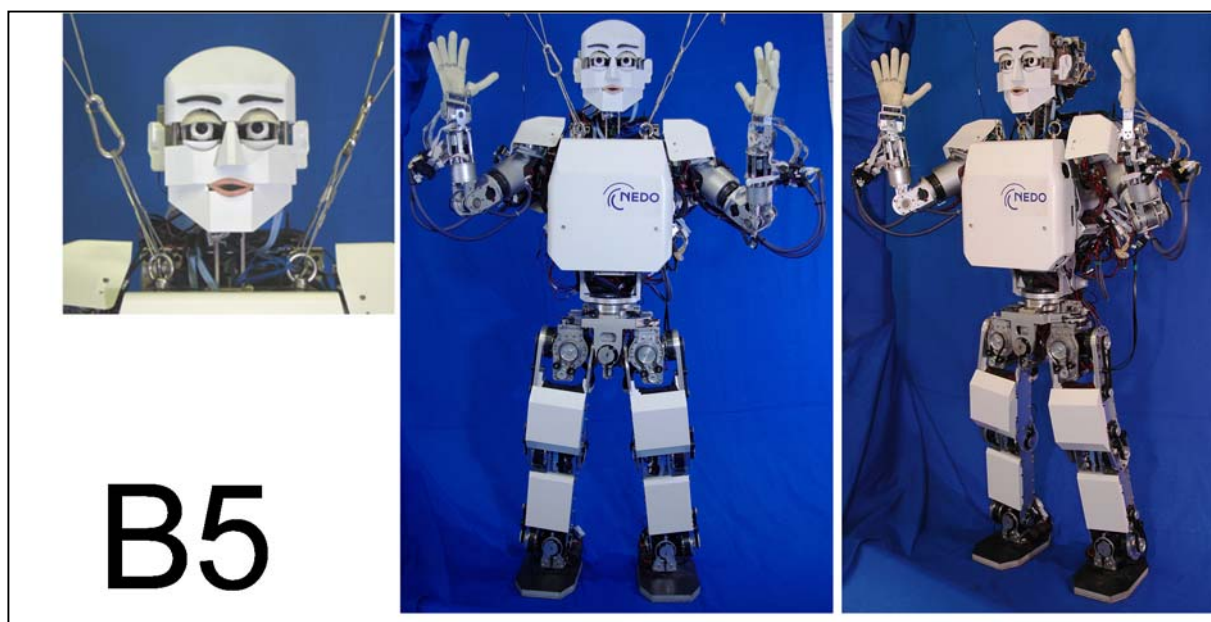


Fig. B. 6 喜び（無感情表情）



Fig. B. 7 喜び（喜び表情）



Fig. B. 8 喜び (喜び表情)

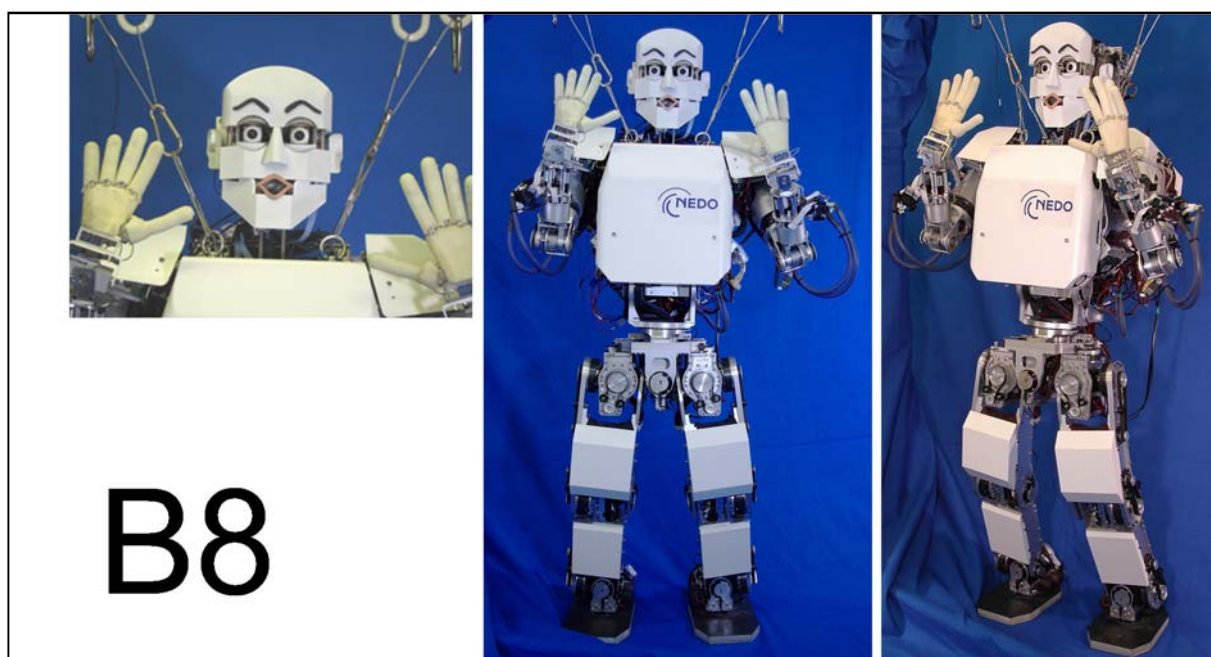


Fig. B. 9 驚き (驚き表情)

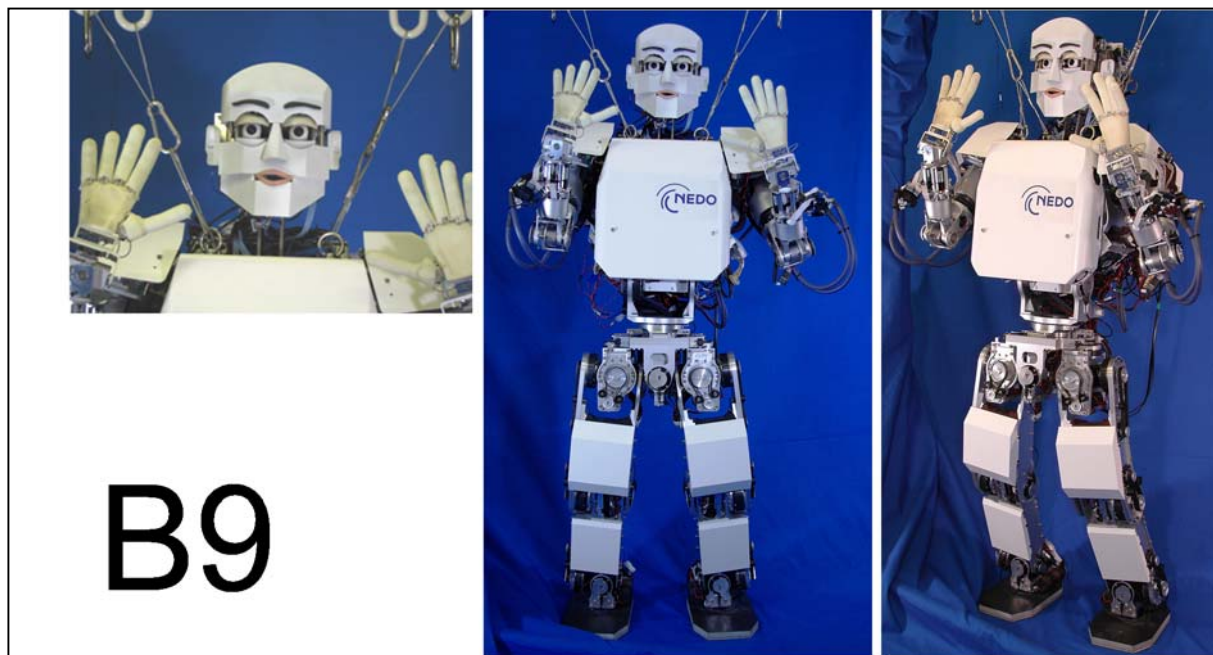


Fig. B. 10 驚き（無感情表情）

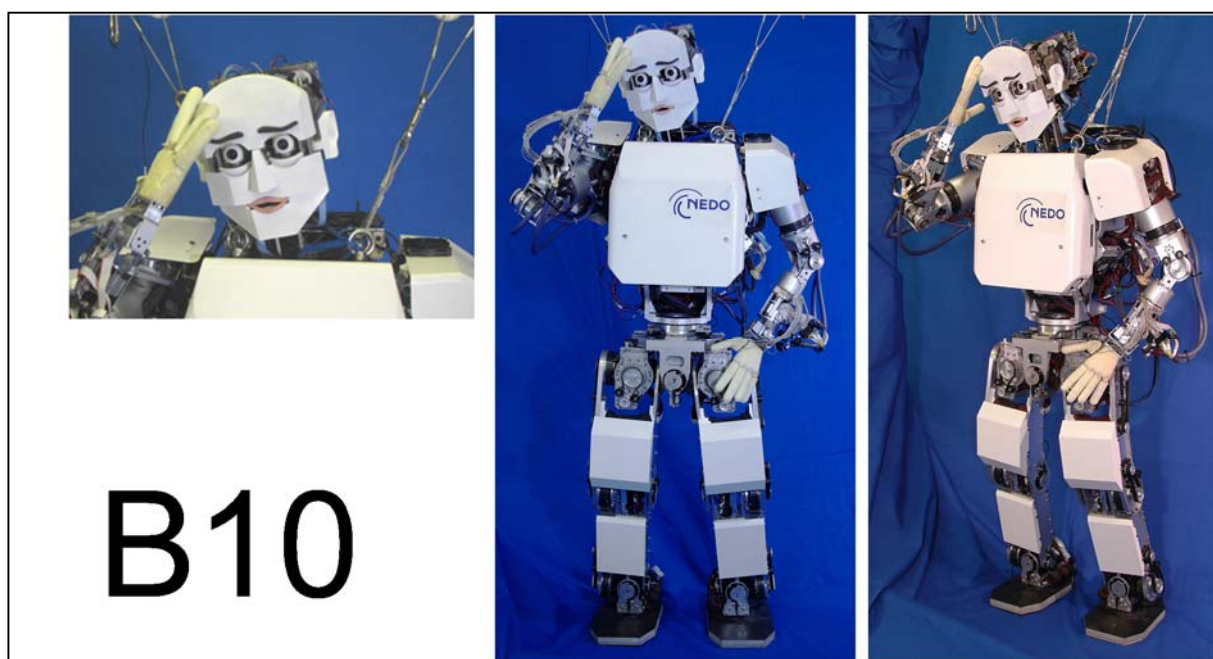


Fig. B. 11 困惑（困惑表情）

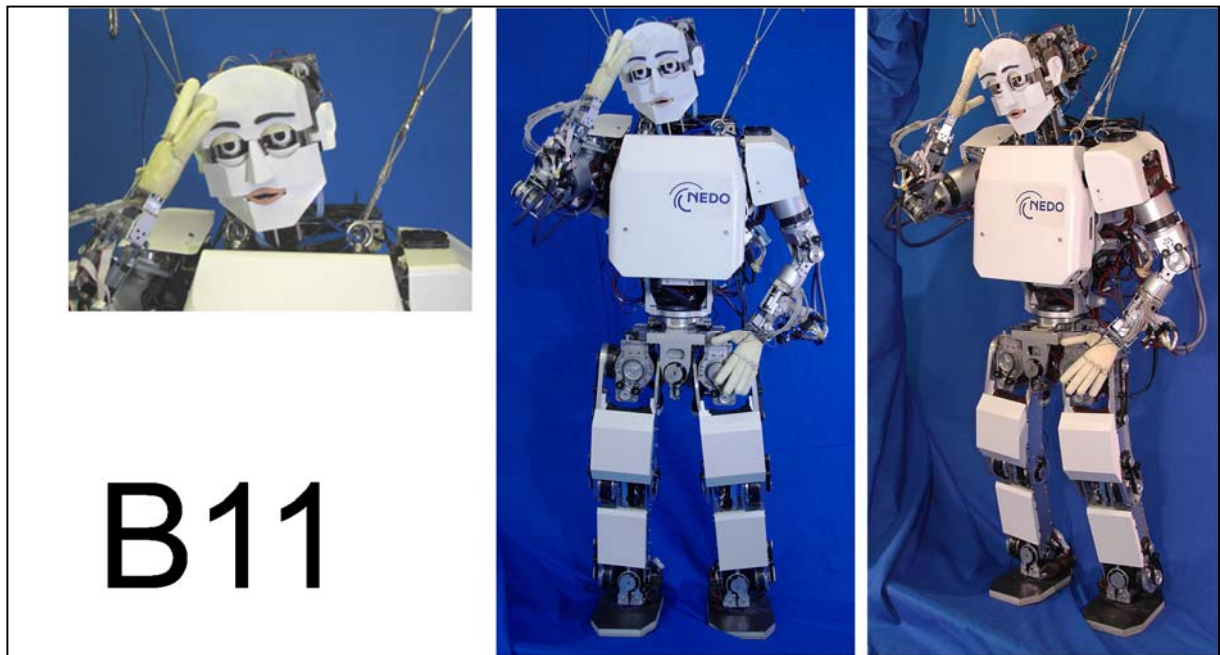


Fig. B. 12 困惑（無感情表情）

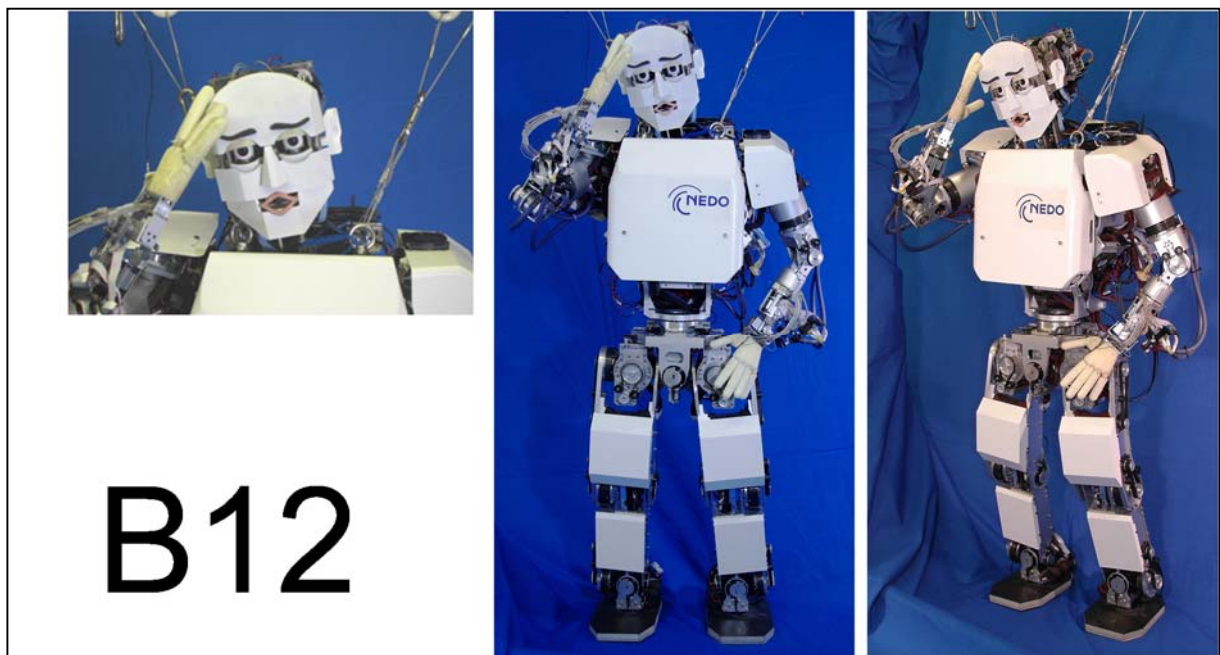


Fig. B. 13 困惑（困惑表情）

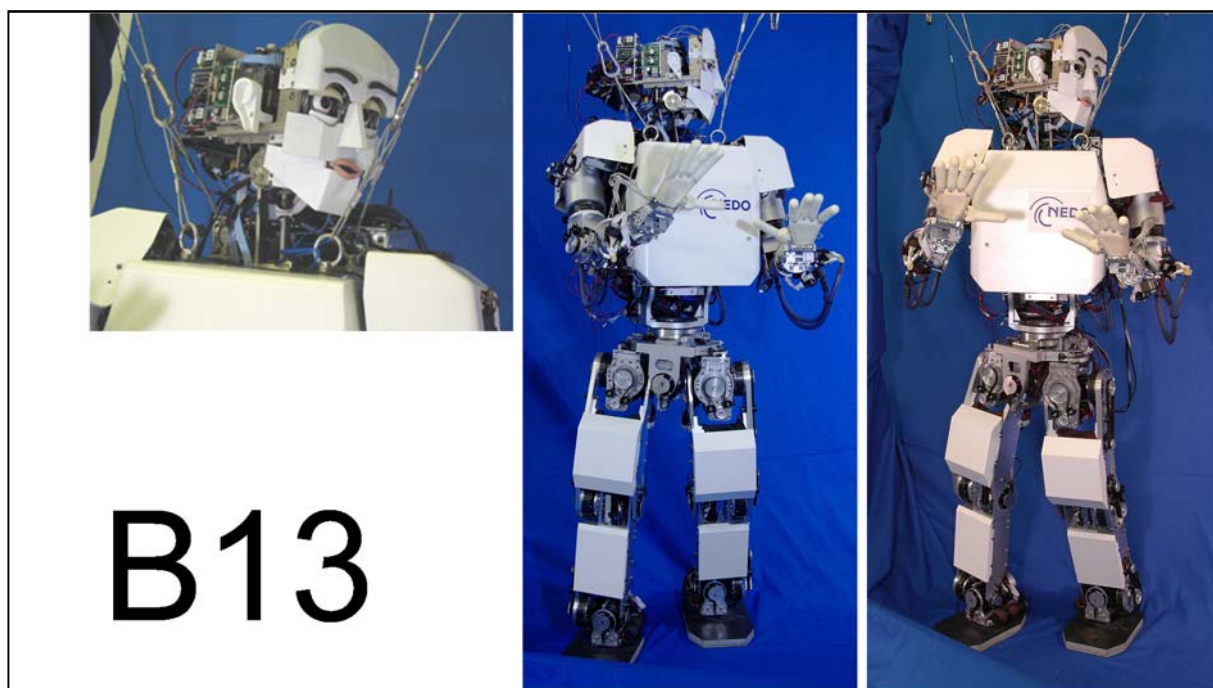


Fig. B. 14 嫌悪（無感情表情）

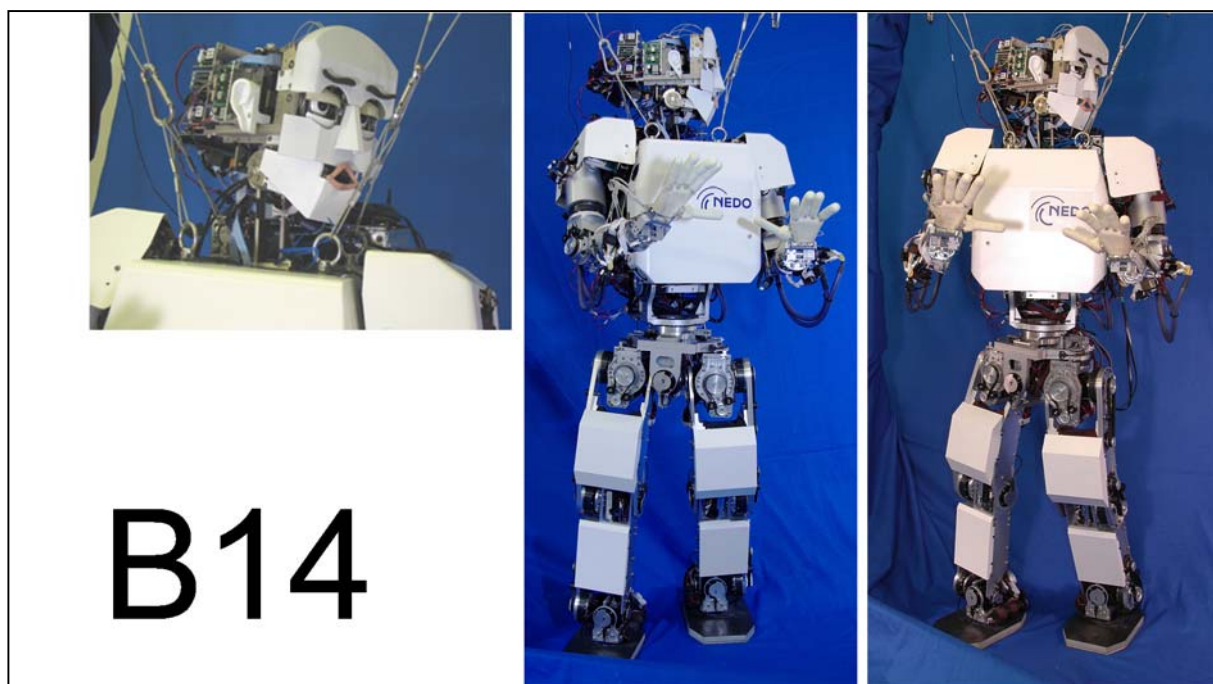
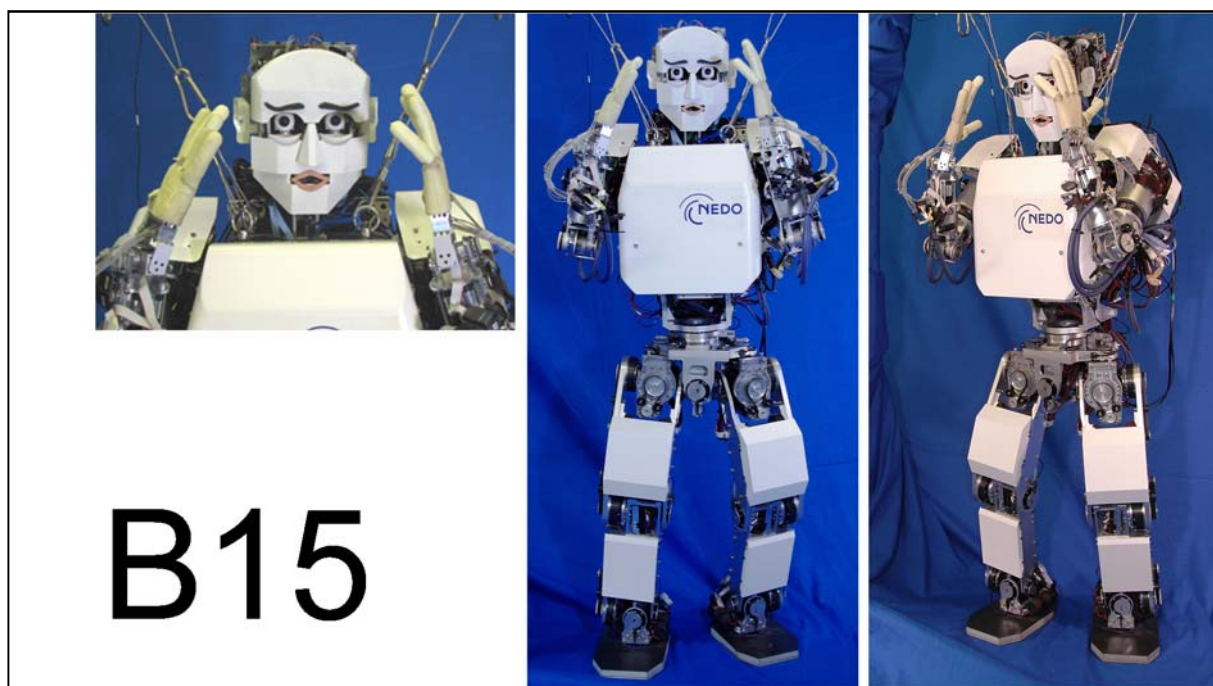
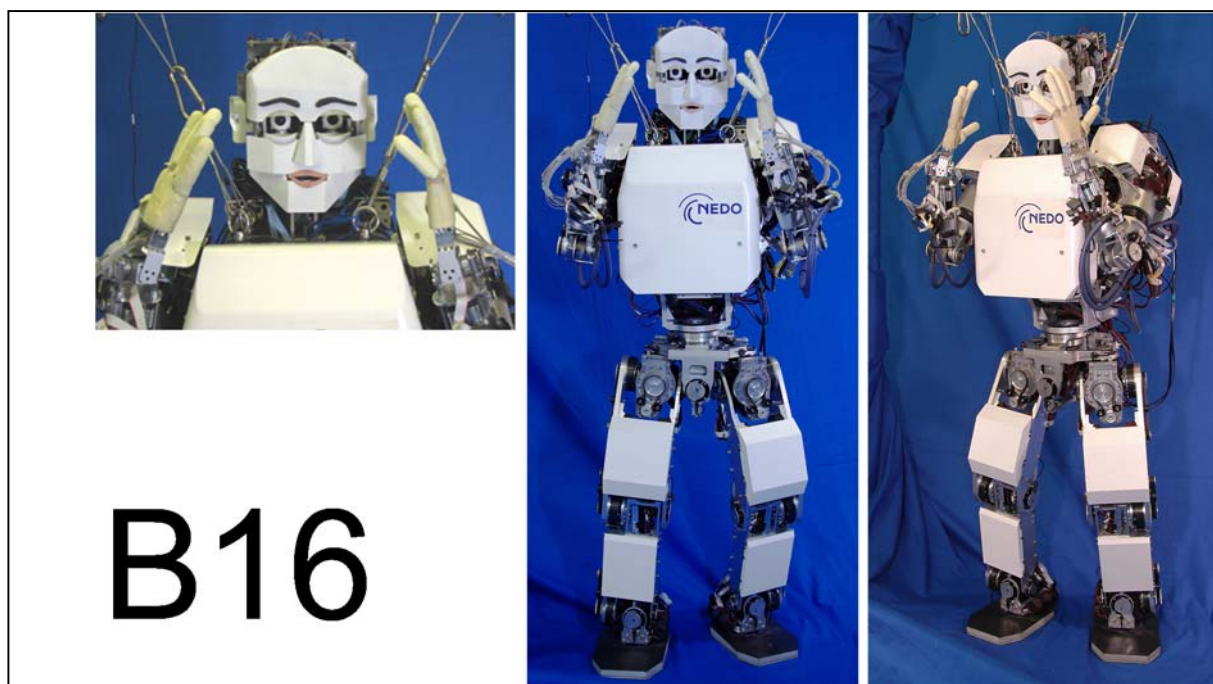


Fig. B. 15 嫌悪（嫌悪表情）



B15

Fig. B. 16 恐れ（恐れ表情）



B16

Fig. B. 17 恐れ（無感情表情）

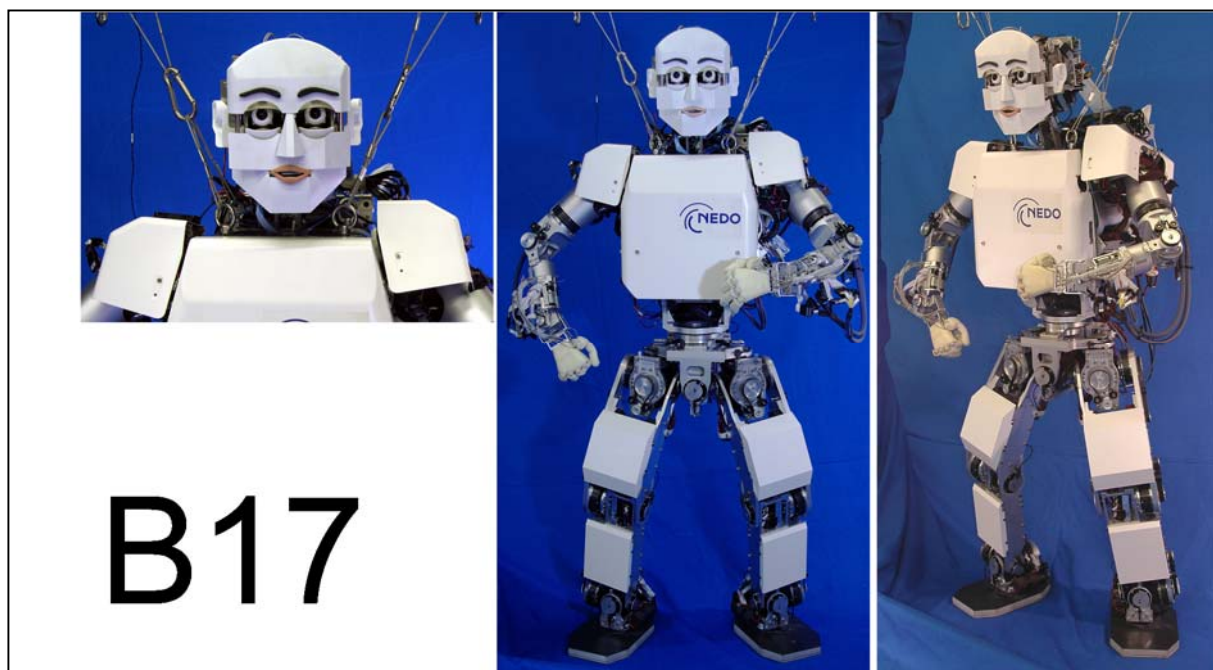


Fig. B. 18 怒り (無感情表情)

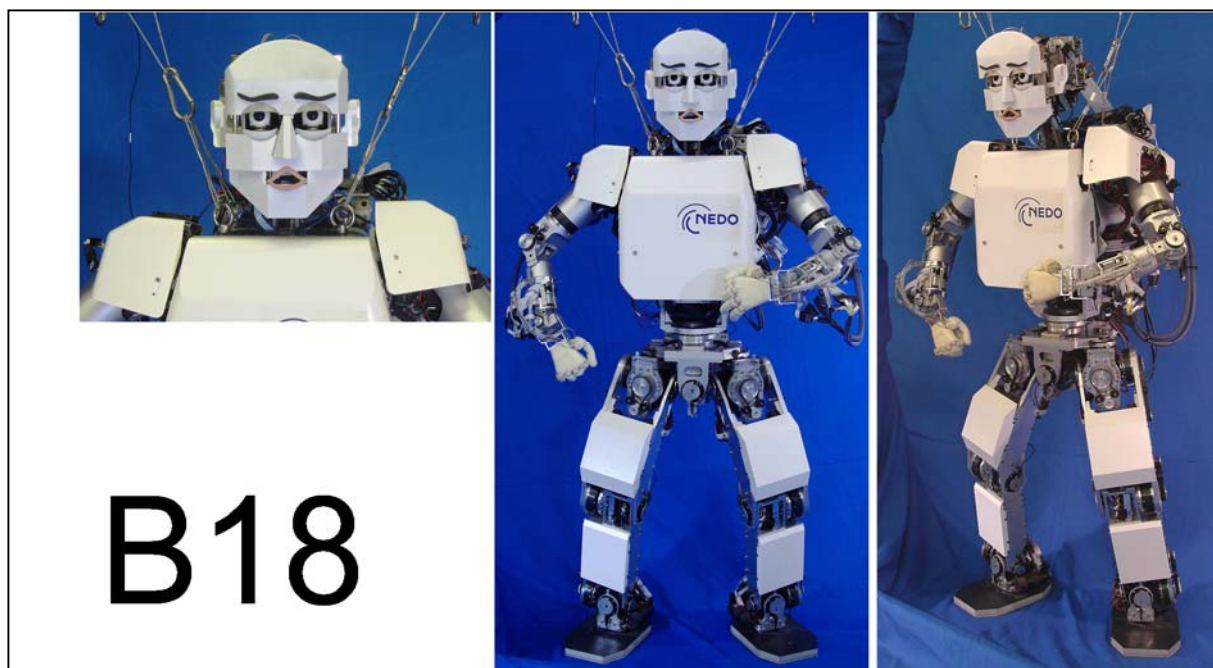


Fig. B. 19 怒り (怒り表情)

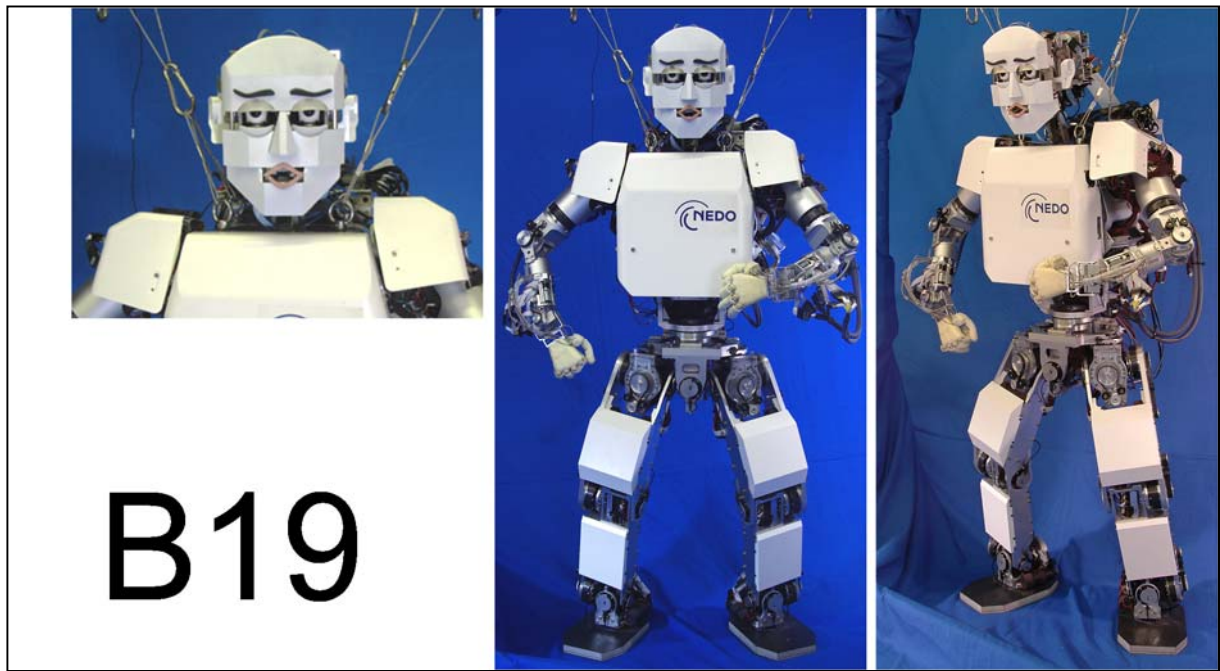


Fig. B. 20 怒り (怒り表情)

Table B. 1 全身情動表出の情動認識率の結果 [%]

	怒り	喜び	驚き	嫌悪	悲しみ	恐れ	困惑
B1 (悲しみ, 無感情表情)	0.0	0.0	0.0	0.0	80.0	0.0	0.0
B2 (悲しみ, 悲しみ表情)	0.0	0.0	0.0	0.0	86.7	0.0	0.0
B3 (悲しみ, 悲しみ表情)	0.0	0.0	0.0	0.0	93.3	0.0	0.0
B4 (悲しみ, 悲しみ表情)	0.0	0.0	0.0	6.7	66.7	0.0	0.0
B5 (喜び, 無感情表情)	0.0	20.0	53.3	0.0	0.0	0.0	6.7
B6 (喜び, 喜び表情)	0.0	40.0	53.3	0.0	0.0	0.0	0.0
B7 (喜び, 喜び表情)	0.0	40.0	53.3	0.0	0.0	0.0	6.7
B8 (驚き, 驚き表情)	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B9 (驚き, 無感情表情)	0.0	14.3	71.4	7.1	0.0	0.0	0.0
B10 (困惑, 困惑表情)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86.7
B11 (困惑, 無感情表情)	0.0	0.0	0.0	6.7	6.7	0.0	53.3
B12 (困惑, 困惑表情)	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	78.6
B13 (嫌悪, 無感情表情)	0.0	0.0	6.7	60.0	0.0	0.0	20.0
B14 (嫌悪, 嫌悪表情)	6.7	0.0	0.0	93.3	0.0	0.0	0.0
B15 (恐れ, 恐れ表情)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	26.7
B16 (恐れ, 無感情表情)	0.0	0.0	6.7	0.0	6.7	20.0	6.7
B17 (怒り, 無感情表情)	40.0	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7
B18 (怒り, 怒り表情)	73.3	0.0	0.0	13.3	0.0	0.0	6.7
B19 (怒り, 怒り表情)	73.3	0.0	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0

参考文献

- [1] 森政弘, “不気味の谷,” *Energy*, vol. 7, pp. 33–35, 1970.
- [2] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” vol. 27, no. July 1928, pp. 379–423, 1948.
- [3] 松尾太加志, コミュニケーションの心理学. ナカニシヤ出版, 1999.
- [4] A. Mehrabian, *Silent messages*. Wadsworth, 1971.
- [5] C. R. Darwin, *The Expression of the Emotions in Man and Animals*. 1872.
- [6] P. Ekman, “Universals and cultural differences in facial expressions of emotion,” *Nebraska Symposium on Motivation*, vol. 19, pp. 207–282, 1971.
- [7] P. Ekman and W. V. Friesen, *Facial action coding system*. Consulting Psychologists Press, 1978.
- [8] 星野喜久三, “表情の感情的理解に関する発達的研究,” *教育心理学研究*, vol. 17, no. 2, pp. 90–101, 1969.
- [9] V. Kostov, H. Yanagisawa, M. Johansson, and S. Fukuda, “Method for Face-Emotion Retrieval Using A Cartoon Emotional Expression Approach,” *JSME International Journal, Mechanical Systems, Mechine Elements and Manufacturing*, vol. 44, no. 2, pp. 515–526, 2001.
- [10] M. Tomasello, “Joint attention as social cognition,” in *Joint attention: Its origins and role in development*, C. Moore and P. J. Dunham, Eds. Lawrence Erlbaum Associates, 1995, pp. 103–130.
- [11] G. Butterworth and N. Jarrett, “What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy,” *British Journal of Developmental Psychology*, vol. 9, no. 1, pp. 55–72, Mar. 1991.

- [12] A. Kendon, "Some functions of gaze-direction in social interaction," *Acta Psychologica*, vol. 26, pp. 22–63, Jan. 1967.
- [13] R. V. Exline, "Explorations in the process of person perception: visual interaction in relation to competition, sex, and need for affiliation," *Journal of Personality*, vol. 31, no. 1, pp. 1–20, Mar. 1963.
- [14] M. Argyle and J. Dean, "Eye-contact, distance and affiliation," *Sociometry*, vol. 28, no. 3, pp. 289–304, 1965.
- [15] J. D. Matarazzo, G. Saslow, A. N. Wiens, M. Weitman, and B. V. Allen, "Interviewer head nodding and interviewee speech durations," *Psychotherapy: Theory, Research & Practice*, vol. 1, no. 2, pp. 54–63, 1964.
- [16] P. Ekman and W. V. Friesen, "The repertoire of nonverbal behavior," *Somiotica*, vol. 1, pp. 49–98, 1969.
- [17] M. Iacoboni, *Mirroring people*. Farrar, Straus and Giroux, 2008.
- [18] A. Mehrabian, "Communication without words," *Psychology Today*, vol. 2, no. 9, pp. 52–55, 1968.
- [19] G. Fairbanks and W. Pronovost, "An experimental study of the pitch characteristics of the voice during the expression of emotion," *Speech Monographs*, vol. 6, pp. 87–104, 1939.
- [20] M. Zuckerman, M. D. Amidon, S. E. Bishop, and S. D. Pomerantz, "Face and tone of voice in the communication of deception," *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 43, no. 2, pp. 347–357, 1982.
- [21] H. D. O'Hair, M. J. Cody, and M. L. McLAUGHLIN, "Prepared Lies, Spontaneous Lies, Machiavellianism, and Nonverbal Communication," *Human Communication Research*, vol. 7, no. 4, pp. 325–339, Jun. 1981.
- [22] E. T. Hall, *The Hidden Dimension*. Doubleday & Company, 1966.

- [23] N. L. Ashton, M. E. Shaw, and A. P. Worsham, "Affective reactions to interpersonal distances by friends and strangers," *Bulletin of the Psychonomic Society*, vol. 15, no. 5, pp. 306–308, 1980.
- [24] G. McBride, M. G. King, and J. W. James, "Social proximity effects on galvanic skin responses in adult humans," *Journal of Psychology*, vol. 61, no. 1, pp. 153–157, 1965.
- [25] P. N. Hamld, "Style of dress as a perceptual cue in impression formation," *Perceptual and Motor Skills*, vol. 26, pp. 904–906, 1968.
- [26] P. N. Hamid, "Changes in person perception as a function of dress," *Perceptual and Motor skills*, vol. 29, pp. 191–194, Aug. 1969.
- [27] M. R. DeLong, C. Salusso-deonier, and K. Larntz, "Use of Perceptions of Female Dress as an Indicator of Role Definition," *Home Economics Research Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 327–336, 1983.
- [28] B. J. Bushman, "The Effects of Apparel on Compliance: A Field Experiment with a Female Authority Figure," *Personality and Social Psychology Bulletin*, vol. 14, no. 3, pp. 459–467, Sep. 1988.
- [29] A. Montagu, *Touching: The Significance of the Human Skin*. Columbia University Press, 1971.
- [30] D. C. Aguilera, "Relationships between physical contact and verbal interaction in nurses and patient," *Journal of Psychiatric Nursing*, vol. 5, pp. 5–21, 1967.
- [31] J. E. Pattison, "Effects of touch on self-exploration and the therapeutic relationship," *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, vol. 40, no. 2, pp. 170–175, 1973.
- [32] J. a Coan, H. S. Schaefer, and R. J. Davidson, "Lending a hand: social regulation of the neural response to threat," *Psychological science*, vol. 17, no. 12, pp. 1032–1039, Dec. 2006.
- [33] T. Nguyen, R. Heslin, and M. L. Nguyen, "The meanings of touch: sex differences," *The Journal of communication*, vol. 25, no. 3, pp. 92–103, Jan. 1975.

- [34] J. D. Fisher, M. Rytting, and R. Heslin, “Hands Touching Hands : Affective and Evaluative Effects of an Interpersonal Touch,” *Sociometry*, vol. 39, no. 4, pp. 416–421, 1976.
- [35] M. J. Hertenstein, D. Keltner, B. App, B. a Bulleit, and A. R. Jaskolka, “Touch communicates distinct emotions,” *Emotion*, vol. 6, no. 3, pp. 528–533, Aug. 2006.
- [36] 加藤一郎, “2足歩行ロボット (WABOT-1) の開発,” in *バイオメカニズム2*, バイオメカニズム学会, Ed. 東京大学出版会, 1973, pp. 173–214.
- [37] 小椋優, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットに関する研究,” 早稲田大学博士論文, 2006.
- [38] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. Lim, and A. Takanishi, “Development of a new humanoid robot WABIAN-2,” in *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, 2006, no. May, pp. 76–81.
- [39] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. Lim, and A. Takanishi, “Development of a New Humanoid Robot to Realize Various Walking Pattern Using Waist Motions,” in *Proceedings of the sixteenth CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (ROMANSY16)*, 2006, pp. 279–286.
- [40] 近藤秀樹, “2足歩行ロボットの動的環境変化への適応歩行に関する研究,” 早稲田大学博士論文, 2010.
- [41] H. Kondo, J. Shimizu, K. Hashimoto, K. Hattori, Y. Takezaki, K. Nishikawa, Y. Hama, Y. Yoshimura, H.-O. Lim, and A. Takanishi, “Realization of Walking by FFT-based Online Pattern Generation,” in *Proceeding of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2009)*, 2009, pp. 615–622.
- [42] H. Kondo, A. Takanishi, and K. Hashimoto, “FFT-based Short Period Walking Pattern Generation for Humanoid Robot having Predictability of Environment,” in *The 2010*

Robotics: Science and Systems Conference: Workshop on Predictive Models in Humanoid Gaze Control and Locomotion, 2010, p. WS4.

- [43] 三輪洋靖, “ヒューマノイドロボットの心理モデルに関する研究,” 早稲田大学博士論文, 2004.
- [44] H. Miwa, T. Okuchi, H. Takanobu, and A. Takanishi, “Development of a New Human-like Head Robot WE-4,” in *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002)*, 2002, no. October, pp. 2443–2448.
- [45] H. Miwa, K. Itoh, M. Matsumoto, M. Zecca, H. Takanobu, S. Rocco, M. C. Carrozza, P. Dario, and A. Takanishi, “Effective emotional expressions with emotion expression humanoid robot WE-4RII,” in *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, 2004, vol. 3, pp. 2203–2208.
- [46] H. Miwa, T. Umetsu, A. Takanishi, and H. Takanobu, “Robot personality based on the equations of emotion defined in the 3D mental space,” in *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001)*, 2001, vol. 3, pp. 2602–2607.
- [47] H. Miwa, T. Okuchi, K. Itoh, H. Takanobu, and A. Takanishi, “A New Mental Model for Humanoid Robots for Human Friendly Communication,” in *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2003)*, 2003, pp. 3588–3593.
- [48] 伊藤加寿子, “ニューラルネットワークを用いた記憶モデルの構築とヒューマノイドロボットへの応用に関する研究,” 早稲田大学博士論文, 2007.
- [49] K. Itoh, H. Miwa, H. Takanobu, and A. Takanishi, “Application of neural network to humanoid robots -development of co-associative memory model,” *Neural Networks*, vol. 18, no. 5–6, pp. 666–673, 2005.
- [50] K. Itoh, H. Miwa, Y. Nukariya, H. Takanobu, and A. Takanishi, “New Memory Model for Humanoid Robots -Introduction of Co Associative Memory Using Mutually

- Coupled Chaotic Neural,” in *Proceedings of the 2005 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN2005)*, 2005.
- [51] S. Fujie, Y. Ejiri, K. Nakajima, Y. Matsusaka, and T. Kobayashi, “A conversation robot using head gesture recognition as para-linguistic information,” in *Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man 2004)*, 2004, pp. 159–164.
- [52] 藤江真也, 坂本直宏, 清水健二, 宗近純一, 福島健太, 瀬戸祐介, 小林哲則, “音声対話ロボット ROBISUKE による相談型対話の実現,” *情報処理学会研究報告 SLP, 音声言語情報処理*, vol. 2004, no. 103, pp. 55–56, 2004.
- [53] 藤江真也, “パラ言語情報を利用した音声対話システムに関する研究,” 早稲田大学博士論文, 2005.
- [54] R. A. Brooks, C. Breazeal, R. Irie, C. C. Kemp, M. Marjanovic, B. Scassellati, and M. Williamson, “Alternative Essences of Intelligence,” in *The Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-98)*, 1998, pp. 961–967.
- [55] C. Breazeal and J. Velasquez, “Toward Teaching a Robot Infant using Emotive Communication Acts,” in *Proceedings of 1998 Simulation of Adaptive Behavior, workshop on Socially Situated Intelligence*, 1998, pp. 25–40.
- [56] C. Breazeal and B. Scassellati, “How to build robots that make friends and influence people,” in *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '99)*, 1999.
- [57] C. Breazeal, “Robot in Society: Friend or Appliance?,” in *Proceedings of the workshop on emotion-based agent architectures (Agents 99)*, 1999, pp. 18–26.
- [58] C. Breazeal and B. Scassellati, “A context-dependent attention system for a social robot,” in *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 99)*, 1999, pp. 1146–1151.

- [59] C. Breazeal and B. Scassellati, “Infant-like Social Interactions Between a Robot and a Human Caretaker,” *Special issue of Adaptive Behavior on Simulation Models of Social Agents*, 2000.
- [60] C. Breazeal, “Regulation and Entrainment in Human-Robot Interaction,” in *Proceedings of the Seventh International Symposium on Experimental Robotics (ISER2000)*, 2000.
- [61] C. Breazeal, “Socially intelligent robots: research, development, and applications,” in *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2001, pp. 2121–2126.
- [62] W. D. Stiehl, L. Lalla, and C. Breazeal, “A ‘somatic alphabet’ approach to ‘sensitive skin’,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004)*, 2004, pp. 2865–2870.
- [63] A. G. Brooks, J. Gray, and G. Hoffman, “Robot’s Play: Interactive Games With Sociable Machines,” *ACM Computers in Entertainment*, vol. 2, no. 3, pp. 1–18, 2004.
- [64] A. L. Thomaz, M. Berlin, and C. Breazeal, “An Embodied Computational Model of Social Referencing Inspiration from Human Infants,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication (ROMAN 2005)*, 2005, pp. 591–598.
- [65] C. Breazeal, M. Berlin, A. Brooks, J. Gray, and A. L. Thomaz, “Using perspective taking to learn from ambiguous demonstrations,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, no. 5, pp. 385–393, May 2006.
- [66] 小林宏, 原文雄, 内田豪, 大野宗久, “アクティブ・ヒューマン・インタフェース (AHI) のための顔ロボットの研究 —顔ロボットの機構と 6 基本表情の表出—,” *日本ロボット学会誌*, vol. 12, no. 1, pp. 155–163, 1994.
- [67] 小林宏, 原文雄, “顔ロボットにおける 6 基本表情の動的実時間表出,” *日本ロボット学会誌*, vol. 14, no. 5, pp. 677–685, 1996.

- [68] T. Hashimoto, S. Hiramatsu, T. Tsuji, and H. Kobayashi, “Development of the Face Robot SAYA for Rich Facial Expressions,” in *Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, 2006, pp. 5423–5428.
- [69] T. Hashimoto, S. Member, S. Hiramatsu, and T. Tsuji, “Realization and Evaluation of Realistic Nod with Receptionist Robot SAYA,” in *Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Robot and Human interactive Communication (Ro-Man 2007)*, 2007, no. 1, pp. 326–331.
- [70] 石黒浩, 宮下敬宏, 神田崇行, 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.
- [71] 上出寛子, 前泰志, 川辺浩司, 重見聡史, 広瀬真人, 新井健生, “ヒューマノイドの一般的心理評価尺度の開発,” in *日本ロボット学会第29回学術講演会予稿集*, 2011, pp. 1J3–4.
- [72] J. Oh, D. Hanson, W.-S. Kim, Y. Han, J.-Y. Kim, and I.-W. Park, “Design of Android type Humanoid Robot Albert HUBO,” in *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, 2006, pp. 1428–1433.
- [73] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, and S. Kajita, “Cybernetic human HRP-4C,” in *Proceedings of the 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2009)*, 2009, pp. 7–14.
- [74] P. Ekman and W. V. Friesen, “Constants across cultures in the face and emotion,” *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 17, pp. 124–129, 1971.
- [75] T. Minato, M. Shimada, H. Ishiguro, and S. Itakura, “Development of an android robot for studying human-robot interaction,” in *Proceedings of the 17th international conference on Innovations in applied artificial intelligence*, 2004, vol. 3029, pp. 424–434.
- [76] “USB2.0 CMOS 超超小型カメラ | 株式会社アートレイ USB2.0 カメラ・USB3.0 カメラ・遠赤外線カメラ.” [Online]. Available: http://www.artray.co.jp/usb2_cmos_mini.html. [Accessed: 06-Feb-2013].

- [77] “アートレイ製品総合案内.” [Online]. Available:
http://www.artray.co.jp/download/catlog/union_cat_ja.pdf. [Accessed: 06-Feb-2013].
- [78] “有限会社 図工 > 製品／サービス > HRP Interface Board 07-0003.” [Online].
Available: http://www.zuco.jp/pdt/ifb_hrp2.html. [Accessed: 06-Feb-2013].
- [79] “ニッタ株式会社.” [Online]. Available:
http://www.nitta.co.jp/?post_type=sensor&p=4378. [Accessed: 06-Feb-2013].
- [80] “TD12770Series ロボット制御用サーボモータドライバ.” [Online]. Available:
<http://www.tokushudenso.co.jp/product/pdf/05/TD12770SERIES200804.pdf>.
[Accessed: 06-Feb-2013].
- [81] “QNX Neutrino RTOS.” [Online]. Available:
<http://www.qnx.co.jp/products/neutrino-rtos/neutrino-rtos.html>. [Accessed:
06-Feb-2013].
- [82] “ソニー製品情報 | VAIO | type G.” [Online]. Available:
<http://www.vaio.sony.co.jp/Products/G1/>. [Accessed: 06-Feb-2013].
- [83] G. Metta, P. Fitzpatrick, and L. Natale, “YARP: Yet Another Robot Platform,”
*International Journal on Advanced Robotics Systems, Special Issue on Software
Development and Integration in Robotics*, vol. 3, no. 1, pp. 43–48, 2006.
- [84] ゲーリー・フェイジン, 表情—顔の微妙な表情を描く. マール社, 2005.
- [85] ポール・エクマン, 表情分析入門. 誠信書房, 1987, pp. 30–47.
- [86] 伊東信之, 浦田順一, 中西雄飛, 岡田慧, 稲葉雅幸, “ヒューマノイドの為の超小
型センサ統合大出力モータドライバの開発,” in *日本機械学会ロボティクス・メ
カトロニクス講演会2010 予稿集*, 2010, pp. 2P1–C17.
- [87] 松井俊浩, 石綿陽一, “DASH-4 プロセッサモジュールと実時間制御系の開発 —
ロボット共通基盤プロジェクト運動制御用デバイス・モジュール—,” *日本ロボ
ット学会誌*, vol. 27, no. 2, pp. 152–155, 2009.
- [88] I. Asimov, *I, Robot*. Gnome Press, 1950.

- [89] A. Takanishi, T. Matsuno, and I. Kato, “Development of a Anthropomorphic Head-Eye Robot with Two Eyes-Coordinated Head-Eye Motion and Pursuing Motion in the Depth Direction-,” in *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS 1997)*, 1997, pp. 277–278.
- [90] J. A. Russell and M. Bullock, “Multidimensional scaling of emotional facial expressions: Similarity from preschoolers to adults,” *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 48, no. 5, pp. 1290–1298, 1985.
- [91] M. L. Walters, K. Dautenhahn, R. te Boekhorst, K. L. Koay, C. Kaouri, S. Woods, C. Nehaniv, D. Lee, and I. Werry, “The influence of subjects’ personality traits on personal spatial zones in a human-robot interaction experiment,” in *Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2005)*, 2005, pp. 347–352.
- [92] 野瀬出, 雨森雅哉, 中尾彩子, 松尾千尋, 山岡淳, “パーソナルスペースへの侵入に対する心理・生理的反応-接近者の印象による影響-,” *文京学院大学研究紀要*, vol. 17, no. 1, pp. 263–273, 2005.
- [93] D. P. Kennedy, J. Gläscher, J. M. Tyszka, and R. Adolphs, “Personal Space Regulation by the Human Amygdala,” *Nature neuroscience*, vol. 12, no. 10, pp. 1226–1227, 2010.
- [94] “ヒューマノイドの一般的心理評価尺度(PHIT)の開発.” [Online]. Available: <http://www-arailab.sys.es.osaka-u.ac.jp/research/safety-and-security/index.html>. [Accessed: 09-Feb-2013].
- [95] 岩下豊彦, *SD 法によるイメージの測定*. 川島書店, 1983.
- [96] 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.
- [97] G. Trovato, T. Kishi, N. Endo, K. Hashimoto, and A. Takanishi, “A Cross-Cultural Study on Generation of Culture Dependent Facial Expressions of Humanoid Social Robot,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Social Robotics (ICSR 2012)*, 2012, pp. 35–44.

- [98] 森島彰俊, 近藤秀樹, 小椋優, 相川弘行, 下村嘉士, 林憲玉, 高西淳夫, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発 (第1報: 体幹2自由度・腕7自由度を持つヒューマノイドロボットの開発),” in *日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集*, 2005, p. 1F31.
- [99] H. Miwa, K. Itoh, D. Ito, H. Takanobu, and A. Takanishi, “Design and control of 9-DOFs emotion expression humanoid arm,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004)*, 2004, no. 4, pp. 128–133.
- [100] 三輪洋靖, 伊藤加寿子, 伊藤大介, 忽滑谷裕子, 池田直人, 松本宗道, 高信英明, 高西淳夫, “ヒューマノイドの心理志向型9自由度ロボットアームの開発と制御,” in *日本ロボット学会第21回学術講演会予稿集*, 2003, vol. 9, p. 1E22.
- [101] A. M. M. Omer, Y. Ogura, H. Kondo, A. Morishima, G. Carbone, M. Ceccarelli, H. Lim, and A. Takanishi, “Development of a humanoid robot having 2-DOF waist and 2-DOF trunk,” in *Proceedings of the 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2005)*, 2005, pp. 333–338.
- [102] 飯塚晃弘, 高本大己, 大谷拓也, 本橋弘光, P. Kryczka, 遠藤信綱, 橋本健二, 高嶋孝倫, 林憲玉, 高西淳夫, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発 (第16報: 水平面と前額面における人間の歩行運動が模擬可能な下腿機構),” in *日本ロボット学会第30回学術講演会予稿集*, 2012, pp. 4K1–6.
- [103] M. Fujita, H. Kitano, and K. Kageyama, “A reconfigurable robot platform,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 29, no. 2–3, pp. 119–132, 1999.
- [104] “OpenRTM-aist official website | OpenRTM-aist.” [Online]. Available: <http://www.openrtm.org/>. [Accessed: 11-Feb-2013].
- [105] “Documentation - ROS Wiki.” [Online]. Available: <http://www.ros.org/wiki/>. [Accessed: 11-Feb-2013].
- [106] “UrbiForge Main/Home Page.” [Online]. Available: <http://www.urbiforge.org/>. [Accessed: 11-Feb-2013].

- [107] “The Orocos Project | Smarter control in robotics & automation!” [Online]. Available: <http://www.orocos.org/>. [Accessed: 11-Feb-2013].
- [108] T. Nakano, S. Fujie, and T. Kobayashi, “MONEA: message-oriented networked-robot architecture,” in *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, 2006, no. May, pp. 194–199.
- [109] 豊田光弘, 伊藤裕一, 荒田耕造, 大和田資, 池添明宏, 中本啓之, “組み込み向け軽量RTミドルウェアによるプラグアンドプレイ機能を有したRTシステムの構築,” in *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010*, 2010, pp. 2A2–C06.
- [110] “QUMARION | 人型入力デバイス.” [Online]. Available: <http://www.clip-studio.com/quma/>. [Accessed: 11-Feb-2013].
- [111] K. Miura, M. Morisawa, S. Nakaoka, F. Kanehiro, K. Harada, K. Kaneko, and S. Kajita, “Robot Motion Remix based on Motion Capture Data - Towards Human-like Locomotion of Humanoid Robots -,” in *Proceedings of the 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2009)*, 2009, pp. 596–603.
- [112] R. Laban (神沢和夫・翻訳), 身体運動の習得. 白水社, 1985.
- [113] 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.
- [114] J. N. Bailenson, J. Blascovich, A. C. Beall, and J. M. Loomis, “Interpersonal Distance in Immersive Virtual Environments,” *Personality and Social Psychology Bulletin*, vol. 29, no. 7, pp. 819–833, 2003.
- [115] “EUROPA - PRESS RELEASES - Press Release - Five ways to defuse the demographic time bomb.” [Online]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-06-1359_en.htm?locale=en. [Accessed: 12-Feb-2013].

- [116] N. Endo, S. Momoki, M. Zecca, K. Itoh, and A. Takanishi, “Design and Evaluation of the new Emotional Expression Head for the ADL assistive Full-body Emotion Expression Humanoid Robot KOBIAN,” in *Proceedings of the 6th International Conference of the International Society for Gerontechnology (ISG 2008)*, 2008.
- [117] M. Zecca, K. Endo, N. Endo, Y. Mizoguchi, T. Kusano, K. Itoh, and A. Takanishi, “Design and evaluation of the soft hand wsh-1 for the emotion expression humanoid robot KOBIAN,” in *Proceedings of the 6th International Conference of the International Society for Gerontechnology (ISG 2008)*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 249–249.
- [118] M. Zecca, G. Macrì, Y. Mizoguchi, V. Monaco, N. Endo, K. Itoh, P. Dario, and A. Takanishi, “Evaluation of the KOBIAN and HABIAN Emotion Expression Humanoid Robots with European Elderly People,” in *ROMANSY 18, Proceedings of the 18th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control*, 2010, vol. 524, pp. 449–456.
- [119] 舘暲, “バーチャルリアリティとロボティクス,” *日本ロボット学会誌*, vol. 15, no. 4, pp. 512–515, 1997.
- [120] 柳田康幸, 舘暲, “VR とロボティクス –アールキューブ構想–,” *バイオメカニズム学会誌*, vol. 25, no. 2, pp. 62–65, 2001.

謝 辞

本研究を進めるにあたり，多大なご指導とご教示を賜りました早稲田大学理工学術院 高西淳夫教授に深く感謝し，心より御礼申し上げます．また，学部 4 年から現在に至るまで 8 年の間，研究活動だけでなく，あらゆる面において，温かく熱心なご指導を賜りましたこと，重ねて深く感謝し，御礼申し上げます．そして，本論文をまとめるにあたり，適切なお指導，ご検討を賜りました早稲田大学理工学術院 藤江正克教授，梅津光生教授，橋本周司教授，神奈川大学 林憲玉教授に，深く感謝致します．

本研究は，筆者の修士課程および博士後期課程における研究成果をまとめたものであり，機械工学・ロボット工学，心理学，情報工学の各分野の先生方から数え切れないほどのご助言を頂きました．とりわけ，機械工学的観点から適切なお助言頂きました機械工学科の諸先生方および生命理工学専攻の諸先生方，早稲田大学ヒューマノイド研究所の諸先生方，グローバル COE「グローバルロボットアカデミア」の諸先生方，小林哲則教授に深い感謝の意を表します．

そして，小椋優氏，伊藤加寿子氏，近藤秀樹氏，Massimiliano Zecca 准教授，斎藤稔氏，森島彰俊氏，桃木新平氏，二宮武司氏，溝口裕氏，山本哲郎氏，清水自由理氏，遠藤圭太氏，草野世大氏，濱雄一郎氏，菊田剛氏，飯田文也氏，佐々木智也氏，川端陽介氏，竹崎裕記氏，西川浩介氏，橋本健二講師，児嶋卓也氏，Matthieu Destephe 氏，大谷拓也氏，岸竜弘氏，高本大己氏，Przemyslaw Kryczka 氏，Lorenzo Jamone 氏，Martim Brandao 氏，Gabriele Trovato 氏，飯塚晃弘氏，中田圭氏，二木元氏，瓜生和寛氏，八原昌亨氏，藤江真也氏，小川哲司氏，松山洋一氏，中野鐵兵氏，谷山輝氏，菊池太郎氏，桑田佳祐氏，Zhangguo Yu 氏，Weimin Zhang 氏の多大な協力により，全身情動表出ヒューマノイドロボットを開発し，実験・研究を遂行することができました．ここに感謝の意を申し上げます．

また，本研究に際し多大なご協力を頂きました独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO 様，聖翔株式会社様，ソリッドワークス・ジャパン株式会社様，株式会社クラレ様，中興化成工業株式会社様，STMicroelectronics 様，大電株式会社様，NiKKi Fron 株式会社様，株式会社テムザック様に深い感謝の意を表します．聖アンナ大学院大学 Paolo Dario 教授，Cecilia Laschi 助教授，College de France Alain Berthoz 教授をはじめ EU FP7「Robotic Sense of Movement」の皆様にも心より感謝致します．評価実験に参加頂いた実験参加者の皆様，ケアタウン小平の皆様にも感謝致します．

さらに，これまで研究生活を支えてくださいました高西研究室秘書の太田久子女史，伊藤輝美女史に厚く御礼申し上げます．本研究に限らず，研究や開発についての多く

のご助言を頂いた工学院大学 高信英明准教授，国士舘大学 菅原雄介講師，三輪洋靖氏，石井裕之講師，福井孝太郎氏，川瀬正幹氏，太田章博氏，田中智明氏に感謝致します。研究生活をともにした早稲田大学高西研究室の諸先輩方，同輩，後輩方に感謝致します。Klaus Petersen 氏，ノヨハン氏，林焯華氏，中楯龍氏，石青氏，Luca Bartolomeo 氏，菅岩泰亮氏，安藤健氏，渡邊峰生氏，星雄陽氏，勝又暢久氏をはじめ，グローバルCOE「グローバルロボットアカデミア」の諸先輩方，同輩，後輩方，そして，本研究に関わったすべての方々に感謝致します。

最後に，筆者の研究活動を常に応援し，支えてくれた，両親と家族に心より感謝致します。

種別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文	Impression Survey of the Emotion Expression Humanoid Robot that Changes Emotion Dynamically based on a Mental Model	2013年5月	Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013) (掲載決定)	岸竜弘 児嶋卓也 遠藤信綱 大谷拓也 Lorenzo Jamone Przemyslaw Kryczka Matthieu Destephe Gabriele Trovato 橋本健二 Sarah Cosentino 高西淳夫
	Towards Natural Emotional Expression and Interaction: Development of Anthropomorphic Emotion Expression and Interaction Robots	2012年11月	International Journal of Synthetic Emotions Vol. 3 (2), pp. 1-30	高西淳夫 遠藤信綱 Klaus Petersen
	Development of Expressive Robotic Head for Bipedal Humanoid Robot	2012年10月	Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012), pp. 4584-4589	岸竜弘 大谷拓也 遠藤信綱 Przemyslaw Kryczka 橋本健二 中田圭 高西淳夫
	Development of Distributed Control System and Modularized Motor Controller for Expressive Robotic Head	2012年6月	Proceedings of the 19th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (ROMANSY 19), pp. 183-190	大谷拓也 岸竜弘 Przemyslaw Kryczka 遠藤信綱 橋本健二 高西淳夫
○	Development of Anthropomorphic Soft Robotic Hand WSH-1RII	2012年6月	Proceedings of the 19th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (ROMANSY 19), pp. 175-182	遠藤信綱 児嶋卓也 遠藤圭太 飯田文也 橋本健二 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Development of Expressive Robotic Head for Bipedal Humanoid Robot with Wide Moveable Range of Facial Parts and Facial Color	2012年6月	Proceedings of the 19th CISM-IFTToMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (ROMANSY 19), pp. 151-158	岸竜弘 大谷拓也 遠藤信綱 Przemyslaw Kryczka 橋本健二 中田圭 高西淳夫
	○ Development of Whole-body Emotional Expression Humanoid Robot for ADL-assistive RT services	2011年12月	Journal of Robotics and Mechatronics Vol.23 No.6, pp. 969-977,	遠藤信綱 高西淳夫
	Development of the Anthropomorphic Soft Robotic Hand WSH-1R	2010年10月	Proceedings of the First IFTToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science (Asian-MMS 2010), 250162	遠藤信綱 飯田文也 遠藤圭太 溝口裕 Massimiliano Zecca 高西淳夫
	○ Integration of Emotion Expression and Visual Tracking Locomotion Based on Vestibulo-Ocular Reflex	2010年9月	Proceedings of the 19th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man 2010), pp. 593-598	遠藤信綱 遠藤圭太 橋本健二 児嶋卓也 飯田文也 高西淳夫
	Modular Design of Emotion Expression Humanoid Robot KOBIAN	2010年7月	Proceedings of the 18th CISM-IFTToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY 18), pp. 465-472	遠藤信綱 遠藤圭太 Massimiliano Zecca 高西淳夫
	Evaluation of the KOBIAN and HABIAN Emotion Expression Humanoid Robots with European Elderly People	2010年7月	Proceedings of the 18th CISM-IFTToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY 18), pp. 465-472	Massimiliano Zecca Giovanna Macri 溝口裕 Vito Monaco 遠藤信綱 伊藤加寿子 Paolo Dario 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Whole body Emotion Expressions for KOBIAN Humanoid Robot - preliminary experiments with different emotional patterns	2009年9月	Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man 2009), pp. 381-386	Massimiliano Zecca 溝口裕 遠藤圭太 飯田文也 川端陽介 遠藤信綱 伊藤加寿子 高西淳夫
	Evaluation of the Effects of the Shape of the Artificial Hand on the Quality of the Interaction - Natural Appearance vs. Symbolic Appearance -	2009年5月	Proceedings of Human Robot Interaction 2009 (HRI2009)	Massimiliano Zecca 遠藤信綱 溝口裕 遠藤圭太 飯田文也 川端陽介 伊藤加寿子 高西淳夫
	Design of the humanoid robot KOBIAN - preliminary analysis of facial and whole body emotion expression capabilities -	2008年12月	Proceedings of the 2008 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2008), pp. 487-492	Massimiliano Zecca 遠藤信綱 桃木新平 伊藤加寿子 高西淳夫
	Design and Evaluation of the New Head for the whole-body Emotional Expression Humanoid Robot KOBIAN	2008年6月	Proceedings of the 6th International Conference of the International Society for Gerontechnology (ISG 2008)	遠藤信綱 桃木新平 Massimiliano Zecca 伊藤加寿子 高西淳夫
	Design and Evaluation of The Soft Hand WSH-1 For The Emotion Expression Humanoid Robot KOBIAN	2008年6月	Proceedings of the 6th International Conference of the International Society for Gerontechnology (ISG 2008)	Massimiliano Zecca 遠藤圭太 遠藤信綱 溝口裕 草野世大 伊藤加寿子 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Development of Whole-body Emotion Expression Humanoid Robot	2008年5月	Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), pp. 2140-2145	<u>遠藤信綱</u> 桃木新平 Massimiliano Zecca 斎藤稔 溝口裕 伊藤加寿子 高西淳夫
	New Shank Mechanism for Humanoid Robot Mimicking Human-like Walking in Horizontal and Frontal Plane	2013年5月	Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013) (掲載決定)	大谷拓也 飯塚晃弘 高本大己 本橋弘光 岸竜弘 Przemyslaw Kryczka <u>遠藤信綱</u> Lorenzo Jamone 橋本健二 高嶋孝倫 林憲玉 高西淳夫
	Evaluation Study on Asymmetrical Facial Expressions Generation for Humanoid Robot	2012年12月	Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Engineering Systems (ICIES 2012)	Gabriele Trovato 岸竜弘 <u>遠藤信綱</u> 橋本健二 高西淳夫
	Development of Facial Expressions Generator for Emotion Expressive Humanoid Robot	2012年11月	Proceedings of the 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)	Gabriele Trovato 岸竜弘 <u>遠藤信綱</u> 橋本健二 高西淳夫
	A Cross-Cultural Study on Generation of Culture Dependent Facial Expressions of Humanoid Social Robot	2012年10月	Proceedings of the 4th International Conference on Social Robotics, pp. 35-44	Gabriele Trovato 岸竜弘 <u>遠藤信綱</u> 橋本健二 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Waseda Bioinstrumentation System WB-2 - the new Inertial Measurement Unit for the new Motion Caption System -	2007年12月	Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007), pp. 139-144	Massimiliano Zecca 斎藤稔 遠藤信綱 溝口裕 伊藤加寿子 高信英明 高西淳夫
	着地軌道修正制御と推 定姿勢補償制御による 人間搭乗型2足歩行ロ ボットの屋外歩行の実 現	2007年9月	日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.851-859	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 林昭宏 田中智明 太田章博 沢戸瑛昌 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	搭乗者の受動的運動を 考慮した人間搭乗型2 足歩行ロボットの歩行 パターン生成	2007年9月	日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.842-850	菅原雄介 橋本健二 川瀬正幹 沢戸瑛昌 太田章博 田中智明 林昭宏 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	New Foot System Adaptable to Convex and Concave Surface	2007年4月	Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1869-1874	橋本健二 菅原雄介 林昭宏 川瀬正幹 沢戸瑛昌 遠藤信綱 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Development of a Biped Locomotor with the Double Stage Linear Actuator	2007 年 4 月	Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1850-1855	菅原雄介 橋本健二 <u>遠藤信綱</u> 沢戸瑛昌 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林昭宏 林憲玉 高西淳夫
	Landing Pattern Modification Method with Predictive Attitude and Compliance Control to Deal with Uneven Terrain	2006 年 10 月	Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1755-1760	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林昭宏 <u>遠藤信綱</u> 沢戸瑛昌 林憲玉 高西淳夫
	Walking Pattern Generation of a Biped Walking Vehicle Using a Dynamic Human Model	2006 年 10 月	Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2497-2502	菅原雄介 橋本健二 川瀬正幹 沢戸瑛昌 林昭宏 <u>遠藤信綱</u> 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
2. 講演	ヒューマノイドのためのモジュール化された多機能小型モータコントローラの開発	2011 年 9 月	日本ロボット学会第 29 回学術講演会予稿集, 3K2-8	大谷拓也 Przemyslaw Kryczka <u>遠藤信綱</u> 岸竜弘 橋本健二 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	高い情動表出能力を有する2足ヒューマノイドロボット頭部の開発	2011年9月	日本ロボット学会第29回学術講演会予稿集, 1J3-7	岸竜弘 遠藤信綱 大谷拓也 Przemyslaw Kryczka 橋本健二 中田圭 高西淳夫
	2足歩行ヒューマノイドの視標追従歩行と情動表出との統合	2010年9月	日本ロボット学会第28回学術講演会予稿集, 2D1-5	遠藤信綱 遠藤圭太 橋本健二 児嶋卓也 飯田文也 高西淳夫
	人間形ソフトロボットハンドの設計と開発ー握力制御機能の搭載と握力による印象の評価ー	2010年9月	日本ロボット学会第28回学術講演会予稿集, 1O2-2	児嶋卓也 遠藤圭太 遠藤信綱 飯田文也 橋本健二 高西淳夫
	前庭動眼反射を基にした2足歩行ヒューマノイドロボットの視標追従行動の実現	2010年6月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2010, 2A2-E02	遠藤信綱 遠藤圭太 橋本健二 児嶋卓也 飯田文也 高西淳夫
	脚式ロボットと車輪式ロボットの印象の比較	2009年9月	日本ロボット学会第27回学術講演会予稿集, 2S1-06	遠藤信綱 溝口裕 遠藤圭太 飯田文也 Massimiliano Zecca 伊藤加寿子 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	人間形ソフトロボット ハンドの設計と開発 －人間形ハンドの形状 の評価－	2009年9月	日本ロボット学会第27 回学術講演会予稿集, 1A1-02	飯田文也 遠藤圭太 溝口裕 <u>遠藤信綱</u> Massimiliano Zecca 伊藤加寿子 高西淳夫
	全身を用いた情動表出 が可能な2足歩行ヒュー マノイドロボットの 開発－情動表出が可能 な頭部の評価－	2008年9月	日本ロボット学会第26 回学術講演会予稿集, 3J1-02	<u>遠藤信綱</u> 桃木新平 遠藤圭太 草野世大 Massimiliano Zecca 伊藤加寿子 高西淳夫
	人間形ソフトロボット ハンド WSH-1 の設計と 開発－高齢者および若 年者とのインタラクシ ョンの評価－	2008年9月	日本ロボット学会第26 回学術講演会予稿集, 1E2-03	遠藤圭太 <u>遠藤信綱</u> Massimiliano Zecca 草野世大 溝口裕 伊藤加寿子 高西淳夫
	人体運動シミュレータ としての2足ヒューマ ノイドロボットの開発 (第16報:水平面と前 額面における人間の歩 行運動が模擬可能な下 腿機構)	2012年9月	日本ロボット学会第30 回学術講演会予稿集, 4K1-6	飯塚晃弘 高本大己 大谷拓也 本橋弘光 Przemyslaw Kryczka <u>遠藤信綱</u> 橋本健二 高嶋孝倫 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	ヒューマノイドロボットと人間とのインタラクションにおける人間計測システムの開発 －小型姿勢センサモジュールを用いた上半身運動計測システム－	2007年9月	日本ロボット学会第25回学術講演会予稿集, 2012	溝口裕 伊藤加寿子 斎藤稔 <u>遠藤信綱</u> Massimiliano Zecca 高信英明 高西淳夫
	Emotional Expression Humanoid Robot WE-4RII –Evaluation of the perception of facial emotional expressions by using fMRI－	2007年5月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集, 2A1-O10	Massimiliano Zecca Thierry Chaminade Maria Alessandra Umilta 伊藤加寿子 斎藤稔 <u>遠藤信綱</u> 溝口裕 Sarah Blakemore Chirs Frith Vittorio Gallese Giacomo Rizzolatti Silvestro Micera Paolo Dario 高信英明 高西淳夫
	On the development of the Waseda Bioinstrumentation WB-2 –Development of the gyro module－	2007年5月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集, 1A1-O09	Massimiliano Zecca 伊藤加寿子 溝口裕 <u>遠藤信綱</u> 斎藤稔 高信英明 高西淳夫

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	ヒューマノイドロボットと人間とのインタラクションにおける生理指標計測システムの開発ー頭部および手部運動計測システムの製作ー	2006年9月	日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 3K35	遠藤信綱 伊藤加寿子 今西一剛 齊藤稔 難波伸広 三輪洋靖 高信英明 高西淳夫
	2足歩行ロボットの不整地適応能力向上を図った足部機構の開発(第3報:新保持機構開発による不整地歩行の実現)	2006年9月	日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 2F15	橋本健二 菅原雄介 林昭宏 川瀬正幹 太田章博 田中智明 遠藤信綱 沢戸瑛昌 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第13報:推定姿勢補償制御と着地軌道修正制御による人間搭乗屋外歩行の実現)	2006年9月	日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 1F33	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 田中智明 太田章博 林昭宏 沢戸瑛昌 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第12報:搭乗者の力学モデルを用いた歩行パターン生成)	2006年9月	日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 1F32	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 太田章博 田中智明 沢戸瑛昌 林昭宏 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発（第11報：高可動範囲化を目的とした2段直動アクチュエータの開発）	2006年9月	日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 1F31	橋本健二 菅原雄介 <u>遠藤信綱</u> 沢戸瑛昌 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林昭宏 林憲玉 高西淳夫
3. 特許	顔表情表出口ロボットの表情可変構造 多点接地型足部支持機構及びそれを備えた2足歩行ロボット並びにその制御構造 歩行パターン作成装置、2足歩行ロボット装置、歩行パターン作成方法、2足歩行ロボット装置の制御方法、プログラムおよび記録媒体		特許出願 2008-128954 特許公開 2009-274184 特願 2007-237309 特開 2008-93822 特願 2006-247375 特開 2008-68339	高西淳夫 伊藤加寿子 近藤秀樹 <u>遠藤信綱</u> 高西淳夫 林昭宏 橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 沢戸瑛昌 <u>遠藤信綱</u> 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋 高西淳夫 川瀬正幹 橋本健二 菅原雄介 沢戸瑛昌 <u>遠藤信綱</u> 林昭宏 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
3. 特許 の続き	<p>歩行パターン作成装置、 2足歩行ロボット装置、 歩行パターン作成方法、 2足歩行ロボット装置 の制御方法、プログラム および記録媒体</p> <p>直動リンク装置及びそ れを用いたロボット並 びに2足歩行ロボット</p>		<p>PCT/JP2006/308590 WO2007/032120</p> <p>特願 2006-119934 特開 2007-290068</p>	<p>高西淳夫 橋本健二 菅原雄介 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 <u>遠藤信綱</u> 沢戸瑛昌 林昭宏 高本陽一 馬場勝之 井野重秋</p> <p>高西淳夫 <u>遠藤信綱</u> 橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 太田章博 田中智明 沢戸瑛昌 林昭宏 高本陽一 馬場勝之 井野重秋</p>