The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	コミュニケーション対象のバランス動作が人に与える印象の解析
Author(s)	垣尾, 政之
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/179
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士論文

コミュニケーション対象のバランス動作が人に与える印象の解析

大阪大学大学院工学研究科
知能・機能創成工学専攻

垣尾 政之

2011 年

概　要

本論文では，コミュニケーション対象となるロボットのバランス動作が人に与える印象について解析した結果を報告する．

人とコミュニケーションを行うロボットは，人が人に対してするように，その動作によって人に意思を伝え，印象を与える必要がある．ここで，人に伝える意思や与える印象を考慮してロボットを動作をさせるためには，人に伝える意思や与える印象を考慮して設計者が動作させる必要がある．そのために，ロボットの動作が人に与える印象を評価する必要がある．ただし，ロボットの動作は様々なロボットに適応できる，汎用性のある手法で構築される必要がある．本研究においては，そのような汎用性を持つ手法としてロボットの姿勢と位置を維持するためのバランス動作に着目し，そのバランス動作の違いが人に与える印象について解析する．

本研究では，ロボットのバランス動作が人に与える印象についての評価対象として，まず，直立時の動揺に着目した．動揺は，人が直立している時に常に生じる動作であり，人は動揺しようという意思を持って動作している訳ではなく，バランスをとるために行う動作である．しかし，人にとって人が動揺していることが自然であるために，人とコミュニケーションするロボットは動揺することで，人に与える印象が変化すると考えられる．また，位置・姿勢のバランスをとる動作であるため，様々なロボットに適応可能であるとも考えられる．本研究では，人に類似した動揺を作りだすために，倒立振子移動機構を用いたヒューマノイドロボットである Robovie-IV を用いることで様々な動揺を作りだした．結果，人に類似させた動揺を持つロボットと人は同調して動作することを明らかにし，同調しないロボットの場合に比べて外向性と協調性の印象評価値が高くなることを明らかにした．

次に，人の動作に対するロボットの反応動作として最も単純である，ロボットに外乱を加えることにより生じる反応動作に着目した．具体的には，Robovie-IV を前から押した時に，元の位置に戻ってくる際の反応動作について評価を行った．反応動作は動揺動作と同様，位置・姿勢のバランスをとる動作であるため，様々なロボットに適応可能であるとも考えられる．このような反応動作によって，人のロボットに対する外向性と情緒安定性の印象が変化することを明らかにした．

最後に本論文では，これらの研究成果を元に，人に与える印象を考慮し，リアルタイムに動作を変化させるロボットを今後の展望として述べ，今後のコミュニケーションロボットの動作生成に貢献する．

目　次

第 1 章　序論 4
1.1　コミュニケーションロボットとは 4
1.2　コミュニケーションロボットが人に使われるために必要なこと 5
1.3　コミュニケーションロボットの動作に必要なこと 6
1.4　本研究におけるロボットの動作生成アプローチ 6
1.5　本論文の構成 8

第 2 章　人及びロボットの動作に関する従来研究と，動作の違いが印象変化に与える影響 10
2.1　人の動作に関する従来研究 10
2.1.1　人が相手に向けて行う動作 11
2.1.2　人が自身のために行う動作 12
2.2　ロボットの動作に関する従来研究 13
2.2.1　ロボットが人に向けて行う動作 13
2.2.2　ロボット自身のために行う動作 15
2.2.3　ロボットの動作が人に与える印象 16
2.3　人の印象を変化させるロボットの動作生成における本研究の位置づけ . . 17
2.4　本研究における低レベル制御系を用いたバランス動作生成 17

第 3 章　ヒューマノイドロボットの揺れ動作が人の動作と印象へ与える影響 19
3.1　人の動揺及びその評価手法 20
3.1.1　軌跡長 21
3.1.2　同調量 21

3.1.3　ビッグファイブ理論を用いた印象評価 23
3.2　ロボットの動揺を評価するための被験者実験 24
3.2.1　実験設定 25
実験環境 25
3.2.2　実験で用いるロボット Robovie-IV の概要 25
Robovie-IV の動揺 26
実験手順及び被験者への指示事項 27
3.2.3　実験 1: 人やロボットの動揺が対面する被験者に与える影響の評価実験 29
実験 1 の設定 29
実験 1 の解析結果 29
3.2.4　実験 2: ロボットの動揺の違いによる被験者の動揺への影響の違い評価実験 31
実験 2 の設定 31
実験 2 の解析結果 32
3.3　考察 35
3.4　本章のまとめ 38

第 4 章　ヒューマノイドロボットの反応動作の違いが人に与える印象の変化 40
4.1　人の動作に反応するロボットの動作 41
4.1.1　人の反応動作 42
4.1.2　Robovie-IV の反応動作 42
4.2　人に押されたときの反応動作を評価する実験 47
4.2.1　実験設定 47
4.2.2　実験結果 49
4.2.3　ロボットの反応動作の定量的評価 50
4.2.4　ロボットの押し方の違いと印象との関係 55
4.3　考察 57
4.4　本章のまとめ 58

第 5 章　結論 60
5.1　本論文での結果とその成果 60

5.2　本研究の今後の展望 62

参考文献 64

謝　辞 69

研究業績リスト 71

第 1 章

序論

1.1　コミュニケーションロボットとは

近年，ロボットの活動範囲は，工場などの非日常的な環境から，より身近な日常生活環境に広がってきた．そのため，人と接するロボットの不可欠な機能として，ロボットの音声対話や身体動作などのコミュニケーション機能に関する研究が盛んになっている．例えば，ATR 知能ロボティクス研究所の研究グループにおいては，見る・聴く・話す・ジェスチャーする，などのコミュニケーションの基本機能を持つロボット（以下，そのような機能を持ち，人とコミュニケーションを行うロボットをコミュニケーションロボットと呼ぶ）として，上半身が人型で移動形態として車輪を持つロボット Robovie を研究開発している（4 号機の外観を Fig. 1.1 に示す）.

コミュニケーションロボットは人間のパートナーとして，我々の日常生活の中で活動するために，環境や人間をセンシングし対話をする機能を持つことが求められる．Ishiguro et al. は，コミュニケーションロボット Robovie-II を用いて，ロボットと人間の対話について研究した[1)]．Ishiguro et. al はロボットのセンシング能力は完全ではなく，どんな状況でも対応できるプログラミングは作成できず，対話を構成する動作の順序を決める明確な基準が無い状況で，特定の状況・動作を想定した状況依存モジュールを多数作成し，そのモジュールとモジュールをあるルールに従わせることで，対話を作りあげた．状況依存モジュールの具体例として，人を見つけて『こんにちわ』と挨拶させ，その後の状況の遷移を記述したエピソードルールに従ってさらに状況を変化させて，『自己紹介や雑談』などを次々に行えるようにした．そうすることで，比較的長時間のコミュニケーショ

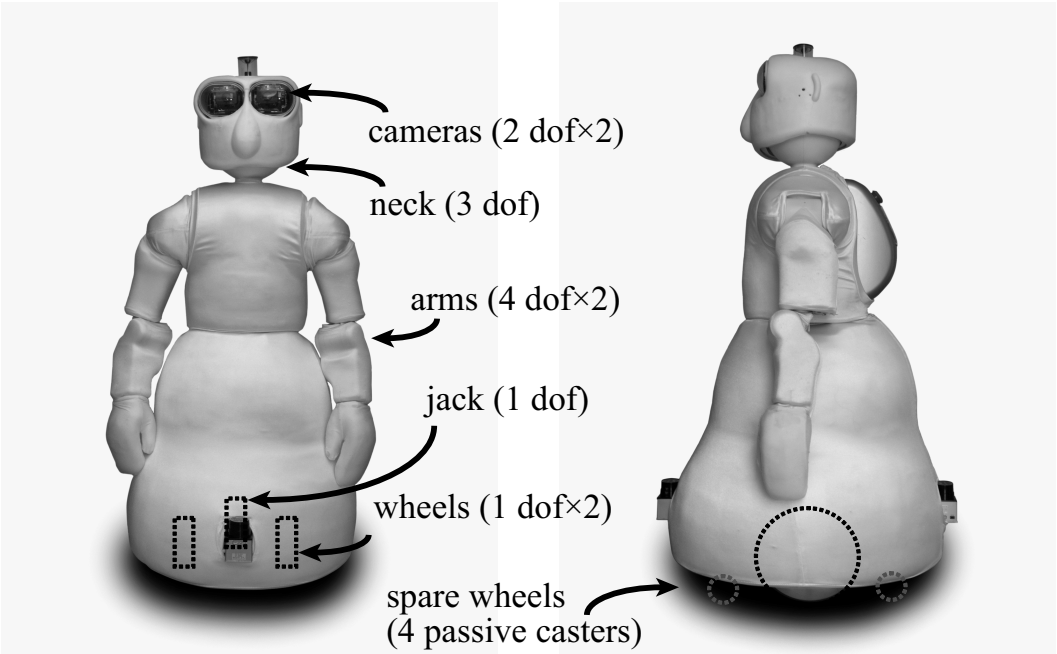


Fig. 1.1 Robovie-IV

ンを実現した.

1.2　コミュニケーションロボットが人に使われるために必要なこと

コミュニケーションロボットの研究開発において，ATR 知能ロボティクス研究所では一般から募集した被験者によるロボットとのコミュニケーション実験や，一般の人々を対象としたイベントでの展示を行ってきた．それらの経験から，コミュニケーション相手となる人々に，ロボット自身がコミュニケーション可能な対象であると認識させることが，人とロボットのコミュニケーションの実現において重要な要素のひとつになり得る可能性を考えてきた．人がロボットをコミュニケーション対象であると認識している場合と，そうでない場合とでは，人のロボットに対する話し方や接し方は異なっており，前者では人が人と接するときに近い接し方となるが，後者では人が物と接するときに近い接し方になる．すなわち，ロボットのコミュニケーション機能を人に近い形で実現するための前提条件は，ロボットのユーザである人が，人と接するときと近い形で利用して

くれることであり，その前提条件を満たすためには，ロボットが人にコミュニケーション対象であると認識され，認識され続けることが大事な要素となる．

コミュニケーションロボットが人に似せて作られることが多いのは，人のサイズが人の住む環境に適応しやすいという理由とともに，ロボットが人に擬人化され，人にとってコミュニケーション対象であるとして認識されることを目的としていること理由として挙げられる．

1.3　コミュニケーションロボットの動作に必要なこと

人は相手が何を感じ，どのように考えているかを，相手の言語的な情報だけではなく，非言語の動作情報を使って推し量っている．心理学の分野では，言語情報に比して非言語の動作の重要さについて報告されてきた．これらの研究では人とのコミュニケーションにおいて，相手が何を感じ，どのように考えているかを，言語的な情報から推し量っているだけではなく，非言語の動作による情報を用いて推し量っており，また，逆に非言語の動作によって自分が感じていることや考えていることを伝えていることが研究されてきた．

人と人の間のコミュニケーションと同様に，人とコミュニケーションをするロボットには，人がロボットをコミュニケーション対象として認識できるようになるために，言語による情報伝達と共に非言語の動作による情報伝達が必要である．例えば，ロボットの（擬似的な）感情や考えていることなどの内部状態を顔表情や動作などの非言語の情報伝達である．そのため，非言語の情報伝達であるロボットの動作が人に与える印象をよく知り，伝えるべき情報に従って制御することが求められる．

1.4　本研究におけるロボットの動作生成アプローチ

コミュニケーションロボット開発の最終目標は，人がロボットと接する際に，あたかも人と接しているかのように違和感なく，コミュニケーションができるようになることである．

このようなコミュニケーションロボットの実現のためには，一般的に大きく分けて 2 種類の階層の研究開発が必要となる．1 つ目の階層は Fig. 1.2 に示すような低レベルのモータ制御技術や視覚・触覚・聴覚などのセンサを用いた認識技術であり，もう 1 つの階

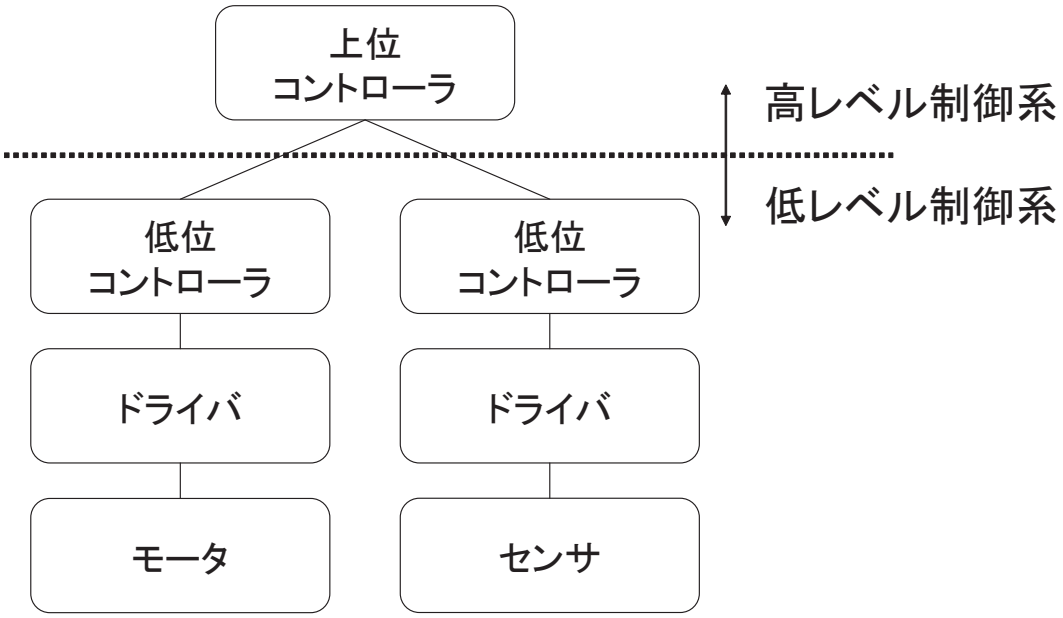


Fig. 1.2 Configuration of common robot

層は人とのコミュニケーションにおける振る舞いや，状況判断などを行う高レベルの対人行動設計に関する研究開発である．

ただし，このように高レベルと低レベルを分離した上での研究開発では，どちらか一方に偏った開発となりがちであり，低レベルの特色を生かした対人行動設計が生まれにくい．従来はロボットの開発において，汎用的な利用が可能である低レベルの開発が主となっており，高レベルの対人行動設計はやや傍系の扱いとなっていた．その後，高レベルの対人行動設計に関する研究が盛んになったが，高レベルの対人行動設計だけを考えても，低レベルが劣って実環境に適応できない実用性に欠けるものであれば，将来的にコミュニケーションロボットの実現はできなくなる．さらに，例え低レベルを重点的に開発し，高度な技術に至ったとしても，その対人行動設計を考えなければコミュニケーションロボットの開発は終了しないため，高レベルと低レベルのバランスをとりながらの開発が重要である．

そこで，本研究においては，低レベル制御系の制御特性を用いた対人行動設計に関する研究を行う．具体的には倒立振子型移動機構を持つヒューマノイドロボット Robovie-IV を用いて，その制御特性であるゲインや指令値と人の動作・印象に与える影響について，その関係性を明らかにする．一般的な人同士で行う心理学実験と異なり，人の印象に影

響を与える因子が，ロボットの低レベル制御系の制御特性の違いのみによって生成された動作に限定されることから，この手法は，ロボットの対人行動設計の発展に貢献することが期待される．

低レベル制御系の制御特性と人の動作・印象に与える影響について，本研究では，まず人がコミュニケーションを行う時にどのような状況でも生じる動作について着目し，その動作をロボットに導入し評価する．具体的には，人が呼吸やバランスを取るためなどの理由により，常に生じさせている体の揺れを，ロボットの低レベルの制御である指令値に適応し，その揺れを見ている人がどのような影響を受けるか，また，どのような印象を持つのか評価する．ここで，人の揺れはどのような状況においても常に生じているため，ロボットの対人行動設計として導入する意義がある．

次に，低レベルの制御の特徴を用いた対人行動設計として，制御ゲインの違いによって生じるロボットの反応動作に着目し，この反応動作の違いが，人の印象変化に与える影響について評価する．具体的には，低レベル制御系の制御ゲインを変えることで，人に前から押されたときのロボットの反応動作を変動させ，その反応動作の違いが人の印象変化に与える影響を評価する．これは，人が動作を行う上で最も低い反射系における動作への印象評価ということができ，会話やジェスチャなどの動作 (高レベルの制御系で生成) と重ね合わせ可能な動作である．

本論文では，これらの低レベル制御系を用いた重ね合わせ可能でバリエーション豊かな動作生成に関して研究することで，ロボットの対人行動設計の発展に貢献する．

1.5　本論文の構成

ロボットのバリエーション豊かな動作制御のために，本論文では低レベルの制御系での制御の違いが人の印象に与える影響を明らかにする．まず，第 2 章では，本研究に関連のある従来研究を以下の 2 つの観点，

- 人の動作に関する従来研究
- ロボットの動作に関する従来研究

についてまとめ，本研究の立場を明らかにする．

第 3 章では，低レベルの指令値を変動させることで生じる，ヒューマノイドロボットの揺れ動作の違いが人の動作と印象へ与える影響について述べる．ここでは，まず，人が直

立時に常に生じさせている動揺について述べ，他者へ与える影響について明らかにする．次いで，ロボットが人のように動揺した場合に他者の動揺及び印象へ与える影響を明らかにすることで，ロボットのバリエーション豊かな動作生成手法について述べる．

第 4 章では，倒立振子移動機構を持つヒューマノイドロボットの反応動作の違いが人に与える印象の変化について述べる．ここでは，第 3 章で述べた動揺を持つヒューマノイドロボットを用いて，低レベル制御系の位置と姿勢の制御ゲインの違いによって異なる反応動作を作りだし，その反応動作の違いによって人に与える印象の違いについて述べる．

最後に，第 5 章で結論を述べ，本研究課題の今後の展望について述べる．

第 2 章

人及びロボットの動作に関する従来研究と，動作の違いが印象変化に与える影響

本章では，本研究に関連のある従来研究を紹介し，それらに対する本研究の位置づけをまとめる．まず，2.1 節では，人の動作に関する従来研究について述べ，相手に向けて行う動作と自身のために行う動作について分類する．次に 2.2 節で，ロボットの動作についての従来研究について述べ，2.2 節と同様，相手に向けて行う動作と自身のために行う動作について分類する．その分類から，2.3 節において本研究の立場を明らかにする．最後に，2.4 節で本研究で行うロボットの動作生成について示す．

2.1　人の動作に関する従来研究

人は動作や言語などを用いて，人とコミュニケーションするのと同様に，人ではない単なる機械に対しても，その対象を擬人化しコミュニケーションを図ろうとする[2)]．そのため，人とコミュニケーションするロボットの研究のためには，人がどのようにコミュニケーション対象を擬人化し，どのようなロボットの動作がどのような印象を与えるのかよく知る必要がある．また一方，その動作は人がどのような意図を持って行った動作であるのか，心理的な要因で生じた動作であるのかなど，人が行う動作についてもよく知る必要がある．

ここで，人の動作に関する従来研究は，心理学的なもの[3),4),5),6)]，生理学的・脳の作りによるもの[7),8),9)]で研究が多く存在する．動作は生きる時に必ず生じるものであり，その動作の分類法は様々な手法が考えられる．本研究ではまず相手に向けて行う動作と自身のために行う動作について分類する．

2.1.1　人が相手に向けて行う動作

人のコミュニケーションの心理学的な研究は，言語によるコミュニケーション (バーバルコミュニケーション) と非言語によるコミュニケーション (ノンバーバルコミュニケーション) に分類されて研究が行われてきた．その中で，主に言語でなく動作で伝えられるコミュニケーションである，ノンバーバルコミュニケーションによって伝えられる情報は言語を用いて伝えられるものより多いと指摘されている[10),11)]．は，ノンバーバルコミュニケーションにはジェスチャや顔表情などが含まれ，通常無自覚的に常に行っている動作が重要であることがわかる．

ノンバーバルコミュニケーションの動作に関して，進化論で著名な Darwin は「人及び動物の表情について」[12)]において，感情を表す顔表情について，人や動物の観察を用いて研究した．以来，Birdwhistell[10)]や Mehrabian[11)]によってノンバーバルコミュニケーションの重要さが指摘され，Vargas[5)]や大坊[4)]や Hall[13)] や Morris[14)]や山口[15)]によって，また，その他にも様々な研究が行われてきた．

ノンバーバルコミュニケーションの重要さについて，Birdwhistell は二者間の対話時において，言葉による情報の伝達は 35% で，言葉以外の情報伝達は 65% であることを述べた．また，Mehrabian は感情や態度が発言した言葉と矛盾した場合，言語情報が 7%，その他が 93% であることを述べた．これらの結果が示す通り，言葉以外の動作で伝わる情報はコミュニケーションにおいて重要であることがわかる．

Vargas[5)]は，ノンバーバルコミュニケーションを以下のように分類した．

1. 人体（コミュニケーション当事者の遺伝要因に関わるもろもろの身体的特徴の中で，なんらかのメッセージを表すもの．たとえば，性別，年齢，体格，皮膚の色など）
2. 動作 (人体の姿勢や動きで表現されるもの)
3. 目 (「視線の交差」と目つき)
4. 周辺言語 (話しことばに付随する音声上の性状と特徴)

5. 沈黙
6. 身体接触 (相手の身体に接触すること，またはその代替行為による表現)
7. 対人的空間 (コミュニケーションのために人間が利用する空間)
8. 時間 (文化形態と生理学の 2 つの次元での時間)
9. 色彩

で分類できるとした.

また同様に大坊[4]によると

1. 近言語的 (発言の形式的属性)
   （a）音響学的・音声学的属性 (声の高さ，速度，アクセントなど)
   （b）発言の時系列的パターン (間の置き方，発言のタイミング)
2. 身体動作
   （a）視線
   （b）ジェスチャー，姿勢，身体接触
   （c）顔面表情
3. プロクセミックス (空間の行動)
   対人距離，着席位置など
4. 人工物 (事物) の使用
   被服，化粧，アクセサリー，道路標識など
5. 物理的環境
   家具，照明，温度など

で，非言語情報が分類できるとした.

ここで，Vargas や大坊の研究において，共通に述べられているジェスチャーは Morris[14] などに，空間の行動に関しては Hall[13]などに，身体接触に関しては山口[15]などに述べられている．また，表情に関しては Ekman[16] などに述べられ，視線に関しては Kendon[17] や福井[6] や Argyle[18]などに述べられており，その研究の多様さがわかる.

2.1.2　人が自身のために行う動作

人が自身のために行う動作に関しては，物をつかむリーチング[19),20),9]や歩行[8]など，多数の研究が行われてきた．また，体の異常を調べる目的で動揺動作に関する研究[7]や動

揺動作自体の研究[21),22)]がある．これらの動作を人は常に行っており，たとえ相手に向けた動作でなくとも，その動作の違いによって人に与える印象が変化する可能性が考えられる．

人とインタラクションを行うロボットの動作生成を研究する際には，人が自身のために行う動作が相手に与える印象が変化する可能性を考慮する必要がある．また，人に与える印象が評価できるのであれば，人に与える印象を考慮してロボットに動作を変動させることが可能となる．その結果，バリエーション豊かなロボットの動作生成ができるようになる．

2.2　ロボットの動作に関する従来研究

コミュニケーションロボットは，人が相手に向けて動作したり，自身のために動作するのと同様に，そのシーンに応じて動作を行う必要がある．ただし，ロボット自身が相手に向けて動作するのではなく，設計者がコミュニケーション相手に与える印象を考慮して，その動作を作りだす必要がある．

2.2.1　ロボットが人に向けて行う動作

人と直接触れ合い，人の動作に対するロボットの反応動作を変えることで，人に与える印象を変化させるとの研究がある．Nakata et. al[23)]は，シャチ型のロボットを用いて，その反応動作の違いによって，ロボットに対する親近感が変わることを示した (Fig. 2.1). また，Shibata et al. はパロと名付けたアザラシ型のロボットの人との触れ合いを研究した．彼らは，人がロボットの頭を触ったときに，腕や足を動かす一連の反応動作が人に楽しみや安らぎを与えることを示した (Fig. 2.2). 彼らの研究は，動物型のロボットを用いた研究であり，それらの反応動作の印象はロボットの形状に大きく依存しており，人が人と接しているときとは異なるコミュニケーションになると考えられる．

次に，ロボットの内部状態を顔表情や視線などの非言語の動作による情報伝達手段を用いて表現する手法が考えられてきた[24),25),26),27),26),28),29),30),31),32)]．顔表情を用いた内部状態の表現[24),25),26),29),30)]，視線を用いた内部状態の表現[27),26),28),31),32)]は人にとってロボットがコミュニケーション相手であると認識されるために必要なものである．

さらに，ロボットの頭や腕を使ってコミュニケーション動作を行う研究も行われている．渡辺と山本[33),34)]は人間の発話に対する，ロボットのうなずき動作のタイミングを

Fig. 2.1 Communication between human and a robot on Nakata’s experiment.

Fig. 2.2 Communication between human and a robot on Shibata’s experiment.

変動させることで円滑なコミュニケーションを実現している．Jindai et. al[35)]や大野と稲葉[36)]，春日ら[37)]は，円滑な握手を実現方法について述べている．また，yamazaki et. al[38)]や山岡ら[39)]は，ロボットの腕の動作を使って，コミュニケーション相手の視線の方向を誘導している．また，言語情報に追加して非言語のジェスチャで情報伝達をする，マルチモーダルなコミュニケーションに関する研究が行われてきた[40),38)]．

また，中川ら[41)]は，僅かな表現の違いでエージェントの態度を伝える Subtle expressions[42),43)]を用いて，ヒューマノイドロボットの感情を表現している．彼女らの研究は，快適度と覚醒度による２次元感情モデルに基づき，ひとつのモーションから，感情が付加されたモーションのバリーエーションを生成することである．そのため，最低限のモー

ションと，感情モデルを組み合わせることで，多様なコンテクストに対応できるモーションが表現できる．

さらに，ロボットではなく CG に関する研究ではあるが，心理状態や性別によってことなる歩き方の違いを示した研究[44]や，動作にゆらぎを導入することで，自然な顔表情を作り出す研究[45]もある．

このように，相手の人に向けて行うロボットの動作生成に関する研究は数多く存在する．次節では，自身のために行うロボットの動作生成に関する研究について示す．

2.2.2　ロボット自身のために行う動作

ロボット自身のために行う動作は，広瀬と横井による 4 足歩行に関する研究[46]や，Sakagami et. al による 2 足歩行の研究[47]など多数の研究が存在する．これらの研究は，動作の印象というよりは，ロボットを歩行させる技術に重点が置かれており，その歩行の違いの印象評価というものは存在しなかった．

ロボット自身のために行う動作の印象に関する研究は，まず，単純な自由度を持つロボットの印象評価を行う研究から始まった．柴田と猪岡[48]による研究では，ロボットの速度パターンの違いが人に与える印象について示している．同様の研究は，笹原ら[49]や Kulic and Croft[50]，池浦ら[51]の研究がある．また，ロボットとは述べていないが，小川ら[52]は機械の運動が人に与える印象について述べた．ただし，これらの研究は単純な装置の運動での評価であり，複雑に動作する人やヒューマノイドロボットには直接適応することはできない．

多自由度を持つロボットの動作の評価に関しては中田らのラバン特徴量を用いた動作生成に関する研究がある[53]．また，多自由度のヒューマノイドロボットの動作の評価に関しては，中岡ら[54]らの HRP を用いた舞踊動作実現に関する研究がある．彼らの研究では，人の全身の動きから取り出した取り出した動作プリミティブをロボットに適応することで，人に類似した舞踊動作を実現している．これらの研究は限られたシチュエーションでの表現に関する研究である．

しかし，ヒューマノイドロボットを用いて，限られたシチュエーションでなくロボット自身のために行う動作の違いが，印象を変化させることを調べた研究は，筆者が調べたところ存在しなかった．それは，印象を評価する前に動作そのものを実現することに力点が置かれていたからであると考えられる．

Table 2.1 Robotic researches for human impressions

ロボットが人に向けて行う動作	Nakata et. al, Shibata et. al, Breazeal et. al, Takanishi et. al, Kozima et. al, Kobayashi et. al, 小林ら，Mutlu et. al, Yonezawa, Yamazaki et. al, 山岡ら，Yamamoto et.al, Jindai et. al, 中川ら，(K. Perlin, N. F. Troje)*
ロボットが自身のために行う動作	中田ら，柴田と猪岡，笹原ら，Kulic and Croft，池浦ら，小川ら，中岡ら

*: CGの研究

2.2.3　ロボットの動作が人に与える印象

ロボットが人に向けて行う動作に関する研究では，印象を評価する研究が行われていた．一方，ロボット自身のために行う動作に関する研究では，印象を評価する研究は，筆者が調べた限り数が少なく，ヒューマノイドロボットでの研究は見つからなかった．

コミュニケーションロボットは人とのコミュニケーションを行うために，多様な動作を行う必要がある．その際に人に向けて行う動作だけではなく，自身のために行う動作で人に対する印象を変化させることができれば，より簡易にバリエーション豊かな動作を作り出せることができると考えられる．

一般的に，ロボットの対人行動の動作生成においては，Fig. 1.2 に示した高レベル制御系で構成されることが多い．また，自身のために行う動作は低レベル制御系で構成されることが多い．ここで，多くの従来研究のように高レベル制御系で数多くの作りバリエーションを持たせ，状況に応じた動作を行うことも可能である．ただし，この手法は姿形と自由度が様々なロボットそれぞれに応じた動作生成が必要であり汎用化できるモデルが適切に構成できなければ，汎用化してバリエーションを持たせることが困難である．

本論文では，そのようにバリエーション豊かな動作を作りだすために，他のロボットにも汎用性が高い，低レベル制御系の制御特性の違いで印象が変化させられると仮説を立て，その動作が与える印象変化を評価する実験を行う．

2.3　人の印象を変化させるロボットの動作生成における本研究の位置づけ

人は動作するときに，常に相手に与える印象を考慮して動作しているわけではない．ましてや，自身のために行う動作であれば，人に与える印象を考慮して動作することは少ないと考えられる．

しかし，ロボットの動作は設計者が全て一連の動作を決めたり，モデルに従った動作となるよう設計したりする必要がある．そのため，人が特に意識して行っていない自身のために行う動作であっても，設計者は意識してロボットの動作生成をする必要がある．このように，設計者が意識してロボットの動作生成を行うのであれば，相手に与える印象を考慮にいれて動作させることも可能であり，人が意識しない点で印象変化させることができるようになる．このような動作は，低レベル制御系を用いることで簡易にバリエーションを増やすことができるため，人とのコミュニケーションがより円滑になると考えられる．

本研究で動作生成に用いる低レベルの制御特性はどのようなロボットにも存在するため，他のロボットへの汎用性も高く，高レベルの制御系では異なる動作を行うこともでき点からも，汎用性が高いと考えられる．

2.4　本研究における低レベル制御系を用いたバランス動作生成

本研究ではロボットが自身のために行う動作として，倒立振子移動機構を持つヒューマノイドロボットの位置・姿勢制御を行い，その低レベル制御系の制御特性を変動させることで，人の動作に影響を与え，変化させる印象を評価する．

まず，第 3 章では倒立振子移動機構を持つヒューマノイドロボットの位置・姿勢制御の指令値を変動させる揺れ動作を利用することで，人の動作に影響を与え，印象を変化させることを示す．

次に，第 4 章では第 3 章と同様のヒューマノイドロボットを用いその位置と姿勢の制御ゲインを変更することで，人の動作に反応するロボットの反応動作を変動させ，その反応動作の違いで印象を変化させることを示す．

第 3 章では，人は視覚のみによってロボットの動作を観測するが，第 4 章ではロボットに接触することでより密にロボットの情報を観測することになる．

第 3 章

ヒューマノイドロボットの揺れ動作が人の動作と印象へ与える影響

本章では，人が自身のために行う動作として，人の直立時の揺れ動作について研究し，その揺れ動作が人に与える影響について評価する．また，ロボットが自身のために行う揺れ動作が人の揺れ動作に影響することを被験者実験により確かめる．さらに，低レベル制御系の制御特性を変動させて作りだした，ロボットの揺れ動作の違いにより，人の揺れ動作と印象がどのように異なるかを実験により明らかにする．

人は音声だけでなく，表情を含めた体全体の動作によりコミュニケーションしていることが知られている[5]．例えば，人はパーソナルスペースを保つことが知られている[13]．このパーソナルスペースに他人が侵入した場合，その相手に対して，威嚇行動や攻撃行動をとることによって嫌悪感を伝えようとすることがある．人とコミュニケーションするロボットも，その表情や体の動作が人に与える印象をよく知り制御することが重要になる．

人に類似したコミュニケーションロボットの表情や体の動作に関する従来研究では，Itoh et al.[25]や C. Breazeal and B. Scassellati[24]，また H. Kozima and H. Yano[26]が異なる状況下で感情を表出するための顔表情生成ロボットを提案している．また Yamamoto and Watanabe[33]はロボットの発声とうなずき動作のタイミングをずらすことによって人のロボットに対する印象が変化することを示している．しかし，これらの研究ではロボットの全身の動作が人に与える印象の違いについては明らかにされていない．また，これらの動作は人に向けて行う動作であり，ロボット毎に人に与える印象が異なると考えられるため，同等な印象を与える表現方法が困難である．

ところで，ロボットの車輪式移動機構の一つとして倒立振子移動機構が提案されている[55]．車輪式であるため，2 足歩行と比べ制御が容易で，3 輪以上の場合と比較してロボットが占有する面積が小さく，駆動輪を大きくできるので段差の乗り越えが容易であるという特徴がある．また倒立振子移動機構では，ロボットは姿勢を静的に安定に保つことはできないため，駆動輪の制御により姿勢を保つ．そのため，ノイズなどの影響により完全に姿勢は静止しない．また人も三半規管など使って姿勢を保っており，体の揺れが見られる．

Miyashita and Ishiguro[56]は車輪型倒立振子移動機構を持つヒューマノイドロボットの全身の揺れ動作が，人のそれに類似していると指摘し，静的に姿勢が安定なロボットとは異なる印象を人に与える可能性を示唆している．

このような揺れ動作は，相手のために行う動作ではなく，自身が直立するという目的を持った動作であり，揺れ動作で印象変化をさせることができれば，より円滑な人とロボットのコミュニケーションが実現できるようになると考えられる．

本章では，ロボット自身のために行うロボットの全身の揺れ動作が人の動作に与える影響と印象を明らかにすることを目的とする．そのために，倒立振子移動機構と通常の移動機構の切り替えが可能なロボットを用いた被験者実験を行う．

3.1　人の動揺及びその評価手法

人は直立時に常に揺れている（動揺している）ことが生理学の分野で良く知られている[7]．人の直立の機構である 2 足の機構の安定性を考えた場合，人が直立しているときには，2 本の足と股関節により身体の左右方向にアーチが形成されているため，左右方向に比べて前後方向は不安定といえる．実際，人の首の後の移動軌跡を床平面上に投影すると，軌跡は楕円で囲むことのできる範囲で移動しており，その楕円の長軸は人の前後方向になる．実際，人の首の後の移動軌跡を床平面上に投影すると，軌跡は楕円で囲むことのできる範囲で移動しており，その楕円の長軸は人の前後方向になる．人の動揺は体の前後方法に並進・回転，両肩を結んだ方向に並進・回転，床平面上に投影した場合，鉛直方向軸回転が存在する．その中で，本論文では体の前後方向の並進・回転運動に着目して実験し考察する．また，両肩を結んだ方向に関しては，人の直立時においては比較的安定であることから本論文においては着目しない．さらに，床平面上に投影した場合の鉛直方向軸回転は本論文では着目しない．ここでは，人やロボットと対面する時の，人の動揺の

傾向を知るため，評価手法として軌跡長，前後方向の同調量を用いる．また，アンケートにより相手の動揺に対する印象の評価を行う．

3.1.1　軌跡長

被験者が相手の動揺に影響を受けるかを示すために，被験者の水平面内の移動軌跡を用い，式（3.1）にて軌跡長 L を定義する[7]．

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}\, dt \cdots\cdots (3.1)$$

視覚や三半規管に外乱が加わった場合，軌跡長は外乱が加わっていない場合に比べて長くなることが知られている．そのため，軌跡長は動揺の解析に用いられている．実験では，計測開始・終了時のばらつきを避けるため計測時間 150[sec] に対し $t_1 = 10[sec], t_2 = 130[sec]$ とした．

3.1.2　同調量

被験者が相手の動揺にどのような影響を受けるかを評価するために，同調を用いて評価する．同調には多くの関連する研究[33),17),57),58),59)]が存在し，状況によって様々な定義及び名称が存在する．例えば，人-ロボットの間の同調に関連した研究として Yamamoto and Watanabe[33)]は引き込みを用いて，人とロボットの間の挨拶における動作と発声タイミングの効果について調べた．また，人- 人の間の同調の研究例として Kendon[17)]は人間に対する同期が相互作用を円滑に進めるために重要な役割を持つと考察している．Charny[57)]はカウンセリング時のクライアントとカウンセラーの姿勢の一致を報告した．Nagaoka et al.[58)]は対話時の間の長さ (交替潜時) の一致は相手への感情によって変化することを示した．武藤，三宅[59)]は周期的な音情報の入力で歩行リズムの改善に効果があることを示した．本論文では，人と人の間でお互いの動作が影響を与えるものとして動揺の同調を示し，また，人のような動揺を行うロボットの動揺が人の動揺に影響を与えることを示す．本論文では，対面する 2 者間の動揺の同調を以下に定義する同調量（Congruence）を用いて評価する．

同調量を計算するための手順について，以下に示す．同調量は，対面した両者の前後方向の位置変化を用いて，式（3.2）の相関係数 r_{ij} から計算を始める．

$$r_{ij} = \sum_{n=0}^{c-1} \frac{\left(a_{i+n} - \sum_{n=0}^{c-1} \frac{a_{i+n}}{c}\right)\left(b_{j+n} - \sum_{n=0}^{c-1} \frac{b_{j+n}}{c}\right)}{\sigma} \cdots\cdots (3.2)$$

ここで

$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=0}^{c-1}\left(a_{i+n} - \sum_{n=0}^{c-1} \frac{a_{i+n}}{c}\right)^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{c-1}\left(b_{j+n} - \sum_{n=0}^{c-1} \frac{b_{j+n}}{c}\right)^2}$$

$$t - \frac{c}{2} \leq \tau < t + \frac{c}{2}$$

$$c = (sampling\ freq.) \times (time\ duration)$$

である．a_n，b_n はそれぞれ時刻 n での被験者，被験者と対面する相手の首の後ろの前後方向の位置である．i，j は自然数であり，a_i，b_j は相関係数 r_{ij} を計算するためにサンプリングする時系列データ $\{a_i, \cdots, a_{i+c-1}\}$，$\{b_j, \cdots, b_{j+c-1}\}$ の初項を示す．Fig. 3.1 は式（3.2）において a_i と b_j を用いて得られた r_{ij} を模式的に表している．サンプリング周波数（sampling freq.）は 60Hz とし，相関を計算する時間（time duration）は 10 秒間とした．r_{ij} を全ての i と j において計算した場合，計算量が大きくなる．そのため，$6i$（0.1 秒）と $60j$（1 秒）ごとに r_{ij} を計算している．実験では，計測開始・終了時のばらつきを避けるため計測時間 150[sec] に対し 10[sec] $\leq t <$ 110[sec] とした．

そのようにして得られた r_{ij} の計算結果を τ 方向を水平方向，t 方向を鉛直方向に配置したものを，同調行列と呼ぶ．この同調行列により，同調する範囲が計算できる．手法は，各実験の解析時に示す．さらに行列の各列の要素を平均することによって，平均同調係数ベクトルを定義する．本論文において，平均同調係数ベクトルは $\tau = -5$ から $\tau = 5$ までの相手の動揺に対する被験者の動揺の遅れ時間ごと（0.1 秒単位）のベクトル量である．ここで，$\tau = 0$ は対面する両者の動揺に時間遅れが無いという意味を持つ．また，各実験条件における被験者間の平均同調係数ベクトルを，遅れ時間ごとに平均したベクトル量を同調量とする．

同調量は以下の 3 点の特徴を持つ．

- 相手の動揺に対する被験者の動揺の遅れ時間ごと（0.1 秒単位，5 秒前から 5 秒後）に得られるベクトル量である．

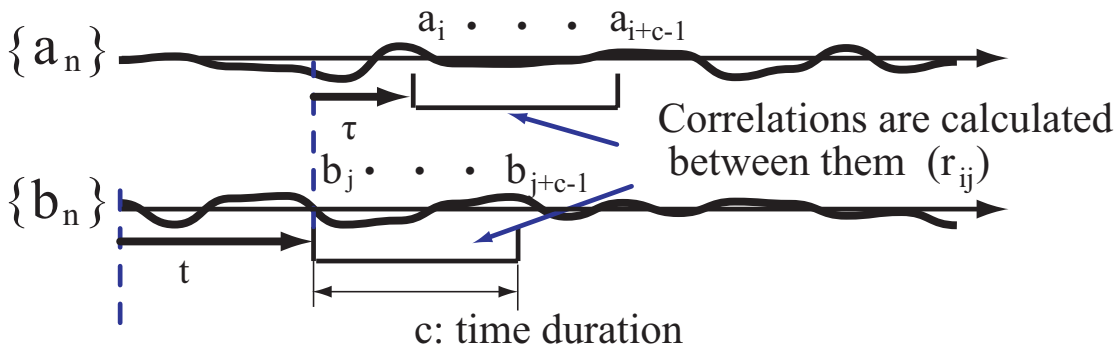


Fig. 3.1 A sketch of cross correlation between two objects movement.

- そのベクトルの要素の値が大きいほど，その遅れ時間で同調している率が高いことを示しており，同調しなければ 0 となる．
  - ベクトルの要素の値が大きい場合とは，その遅れ時間で，被験者の前向き方向の動揺と対面する相手の後ろ向き方向の動揺，もしくは被験者の後ろ向き方向の動揺と対面する相手の前向き方向の動揺が同調する率が高いことを示している．
- 分散を考慮することにより，相手と被験者が同調する時間遅れごとの範囲が計算できる．

また，人同士が対面した場合には，遅れ時間が 0 付近における同調量の要素が大きくなるとの予備実験での結果が得られている．また，人同士が対面した状況でお互いが目を閉じていたり，背中合わせで直立した場合には，同調量の全要素がほぼ 0 となる予備実験での結果が得られている．これは，対面する相手以外の実験環境から被験者の動揺が影響を受けてないことを示している．

3.1.3　ビッグファイブ理論を用いた印象評価

ビッグファイブ理論によると人の性格は外向性，協調性，知性，情緒安定性，勤勉性の直交 5 因子によって表すことができる[60]．ここではロボットの反応動作の違いが人に与える印象の違いをこの直交した 5 因子を用いて評価する．しかし，評価した反応動作が必ずしも直交するとは限らない．

ビッグファイブは，B. Reeves と C. Nass によるメディアの等式[2]でもメディアの振る

Table 3.1 Adjective pairs for each factor in five-factor model

Factor type	Negative meaning	Positive meaning
Extroversion (外向性)	不活発な 消極的な	活発な 積極的な
Agreeableness (協調性)	不親切な 冷たい	親切な 暖かい
Intellect (知性)	好奇心に乏しい 短絡的な	好奇心のある 思慮深い
Neuroticism (情緒安定性)	気分が不安定な 感情的な	気分が安定している 理性的な
Conscientiousness (勤勉性)	怠惰な 無責任な	勤勉な 責任感のある

舞いに対する印象を評価する指標として用いられている．彼らは人がどのようなメディアであっても擬人化するという性質を使って印象の評価をしており，擬人化することから，人の性格の評価であるビッグファイブをメディアの評価ツールとして使えることを示唆した．本論文では，メディアの 1 つとして捉えることができるロボットがどのように振舞えば良いのか評価するために，メディアの等式と同様にビッグファイブの指標を用いている．そのため，ロボットの反応動作の違いを評価するのに最適であると考えた．

各因子について[60),61)]で用いられた形容詞対を参考に 2 つずつ選択し，7 段階評価によるアンケートを実施した．用いた形容詞対を Table 3.1 に示す．アンケート用紙上では，質問意図を隠すため，形容詞対の並びを変えている．各因子について 2 つの形容詞対の評価を平均し，その因子の得点とした．便宜上，肯定的な意味を持つ側の値を 7，否定的な意味を持つ側の値を 1 と表した．

3.2　ロボットの動揺を評価するための被験者実験

ここでは，ロボットの動揺を評価するために 2 種類の実験を行う．実験 1 では，被験者同士で対面したり，被験者がロボットと対面したりする状況を作りだし，被験者やロボットの動揺が対面する被験者に影響を与えることを明らかにする．また，実験 2 では，被験者が様々な動揺の形態を持つロボットと対面する状況を作り出し，ロボットの動揺

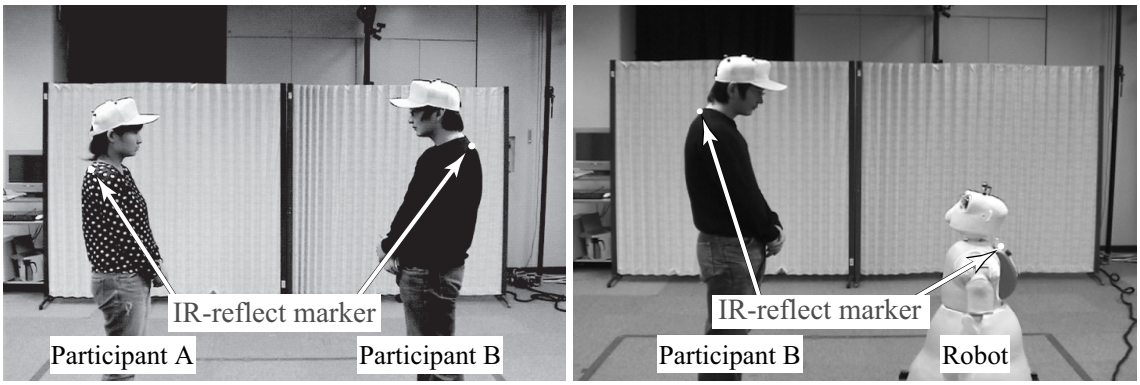


Fig. 3.2 Experimental environments.

による被験者の動揺への影響を明らかにする．

3.2.1　実験設定

実験環境

実験 1 及び 2 を行う実験環境を Fig. 3.2 に示す．被験者に対面させる条件は，実験 1 と実験 2 で異なる．また，対面させる条件及び被験者数は，それぞれの節で説明する．被験者の動揺の計測は，3D モーションキャプチャシステム（Vicon Motion Systems, VICON 612）を用いて各被験者とロボットの首の後ろの位置を計測することにより行う．サンプリング周波数は 60Hz で，空間分解能は 1mm である．各マーカの位置は，実験環境，実験風景と共に Fig. 3.2 に示す．

3.2.2　実験で用いるロボット Robovie-IV の概要

Fig. 1.1 に本研究で用いるロボット Robovie-IV を示す[62]．Robovie-IV は両腕に各 4 自由度，首には 3 自由度，両目に各 2 自由度を持つ．車輪部には，2 つの駆動輪を持ち，キャスターによる 4 つの補助輪がある．また，補助輪状態と倒立振子状態を切り替えるために上体を持ち上げるジャッキを備える（Fig. 3.3）．補助輪状態の身長は 100cm であり，倒立振子状態の身長は 105cm である．倒立振子状態では，体の姿勢と車輪の位置のフィードバック制御を行っており[55]，体の姿勢や車輪に外乱が加わった場合，元の位置へ戻ろうとするトルクが生じる．

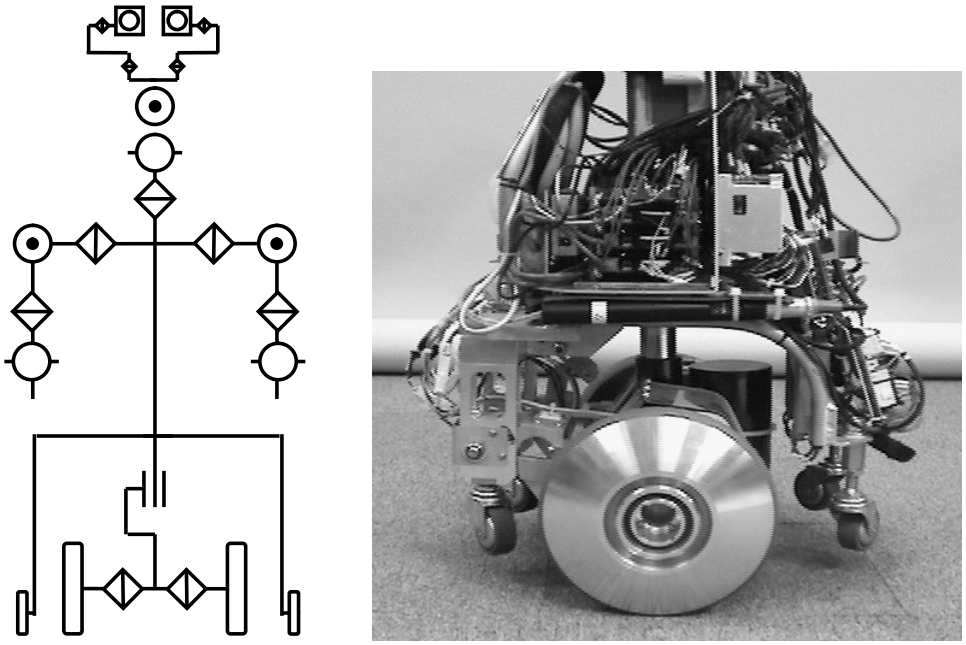


Fig. 3.3 DOFs configuration and wheeled inverted pendulum mechanism of Robovie-IV

Robovie-IV の動揺

Robovie-IV の移動のための車輪は，駆動輪が 2 つ，従輪（補助輪）が 4 つある．人の首の後ろの移動軌跡を床平面上に投影すると，軌跡は前後方向が長軸となる楕円となる．実験で用いたロボットでは，2 つの駆動輪による同軸二輪倒立振子移動機構を採用しており，左右方向には動揺せず，前後方向に動揺する．この動揺は人の場合，左右方向には比較的安定であり，主として前後方向に動揺する現象に近い．また，補助輪状態と倒立振子状態を切り替えるために上体を持ち上げるジャッキを備える（Fig. 3.3）．補助輪状態の身長は 100cm であり，倒立振子状態の身長は 105cm である．倒立振子状態では，体の姿勢と車輪の位置のフィードバック制御を行っており[55]，姿勢角や角速度センサの観測ノイズや床面形状の違いなどによって，常に動揺している．倒立振子移動機構によってつくられる動揺は，人の動揺に類似していることが示唆されている[56]．しかし，単純な倒立振子移動機構での前後方向の動揺は人の動揺に比べて低周波の動揺が少ない．そこで，実験ではこのロボットに以下の 4 条件の動揺を行わせた．

1. 倒立振子静止条件：目標値を一定にした倒立振子状態にあるロボットの動揺であ

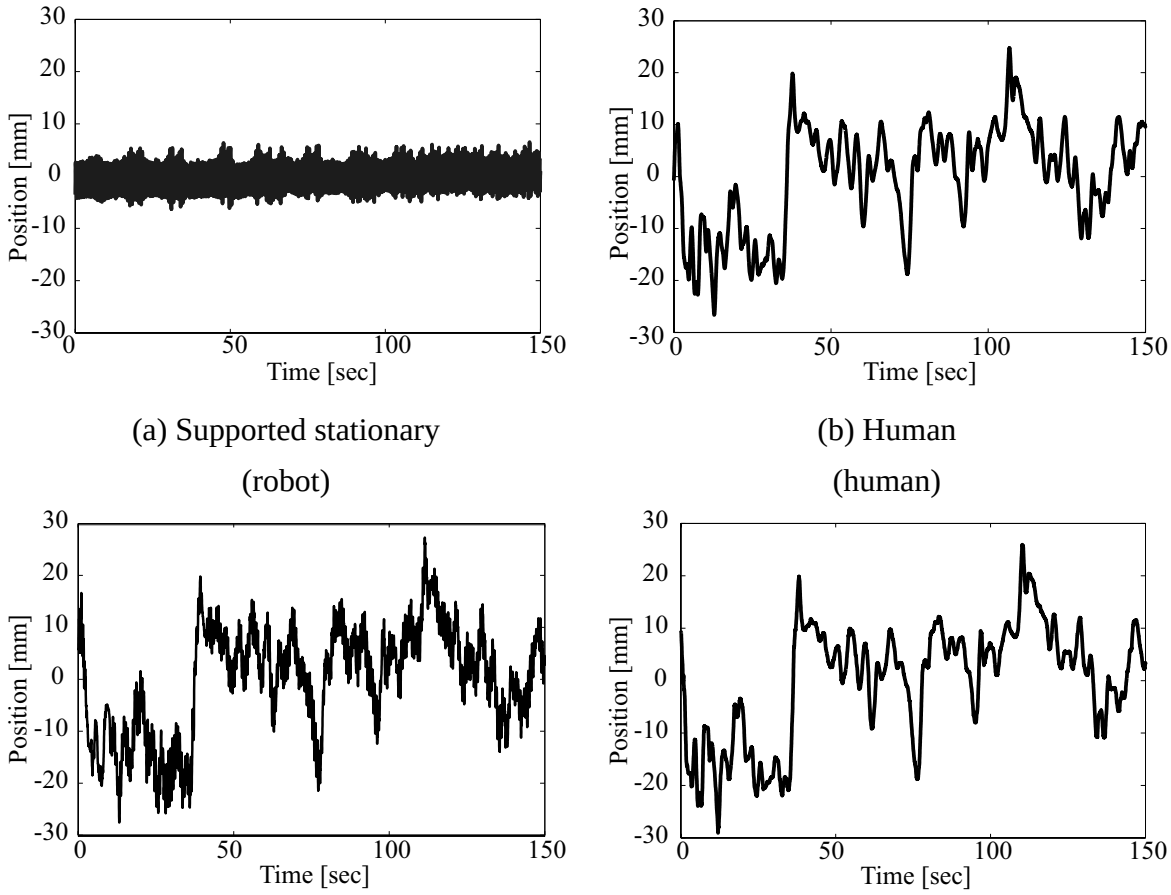
る．このときの動作を Fig. 5 (a) に示す．このグラフは，横軸が時間，縦軸がロボットの前後方向の位置であり，Fig. 2 に示したロボットの計測位置の前後方向の時系列データを表している．

2. 倒立振子人型条件：人同士が会話に適した距離で対面しているときの前後方向の動揺（本論文ではこれを人型の動揺と呼ぶ）から低周波成分 (5Hz 以下) を抽出し，それを目標値とした倒立振子状態にあるロボットの動揺である．動揺している人の計測位置の時系列データを Fig. 5 (b) に示す．このデータに基づく倒立振子人型条件のロボットの動揺を Fig. 5 (c) に示す．
3. 補助輪人型条件：人型の動揺から抽出した低周波成分を目標値とした補助輪状態にあるロボットの動揺である．Fig. 5 (b) のデータに基づく補助輪人型条件のロボットの動揺を Fig. 5 (d) に示す．
4. 補助輪静止条件：目標値を一定にした補助輪状態にあるロボットの動揺である．補助輪状態は安定しているため，この条件ではロボットは動かず，単に直立して静止している．

実験手順及び被験者への指示事項

実験時に被験者の姿勢が異なったり，視点が変化したりすることにより動揺は異なる．以下，実験を行うにあたって，被験者に指示した事項を示す．

1. 計測開始前に，対面する対象から会話に適した距離に離れて立つ
2. かかとを付け，つま先を 60 度程度開く
3. 手と首を動かさない
4. 気楽に立つ
5.
   - 対面相手が人の場合
     アイコンタクトを避けて，対面する人のあごを見る
   - 対面相手がロボットの場合
     ロボットの目と目の間を見る（高さ 約 95（補助輪状態）～100cm（倒立振子状態））
6. 150 秒間姿勢を維持する
7. 不調を感じた場合は，実験を中断してよい
8. 各実験後にアンケートに答える (実験 2 のみ)



(a) Supported stationary (robot)

(b) Human (human)

(c) Pend. hum. (robot)

(d) Supp. hum. (robot)

Fig. 3.4 Time series data of moving in anteroposterior direction.

アンケートには「ロボットがあなたに与える印象について直感的にお答えください.」と記述してあり，実験条件間での違いであるロボットの動揺の違いについて評価させている．実験時間は，被験者の疲れを考慮し 150 秒間としている．

Table 3.2 Conditions on experiment 1.

Name	Explanation	Figure
Human	Between participants	(Fig. 3.4(b))
Pend. hum.	Between a participant and Robovie with pendulum human-type swaying	Fig. 3.4(c)
Supp. sta.	Between a participant and Robovie with supported stationary swaying	-

3.2.3 実験 1: 人やロボットの動揺が対面する被験者に与える影響の評価実験

実験 1 の設定

被験者に Table 3.2 に示す 3 つの条件で対面させ，被験者とロボットの動揺を計測する．

被験者は一般から募集した大学生 26 名（男性 14 名，女性 12 名）とし，全被験者が人条件，補助輪静止条件を経験する．26 名のうちの 11 名（男性 6 名，女性 5 名）の被験者は，これらの条件に加えて，倒立振子人型条件を経験する．残りの 15 名は倒立振子静止条件を経験する．人条件の同調量の解析は 26 名を 2 名ずつ用いて 13 組について行う．軌跡長の解析は，倒立振子人型条件を経験した 11 名を用いて行う．倒立振子静止条件を経験した 15 名の軌跡長解析結果は，実験 2 の解析内容と重複するため，ここでは割愛する．以上の 11 名は次の順に経験した．3 名は補助輪静止条件→倒立振子人型条件→人条件の順，2 名は倒立振子人型条件→補助輪静止条件→人条件の順，3 名は人条件→補助輪静止条件→倒立振子人型条件の順，3 名は人条件→倒立振子人型条件→補助輪静止条件の順である．

実験 1 の解析結果

第 3.1 節に示した解析手法を用いて，軌跡長，同調量を評価し，その結果を示す．

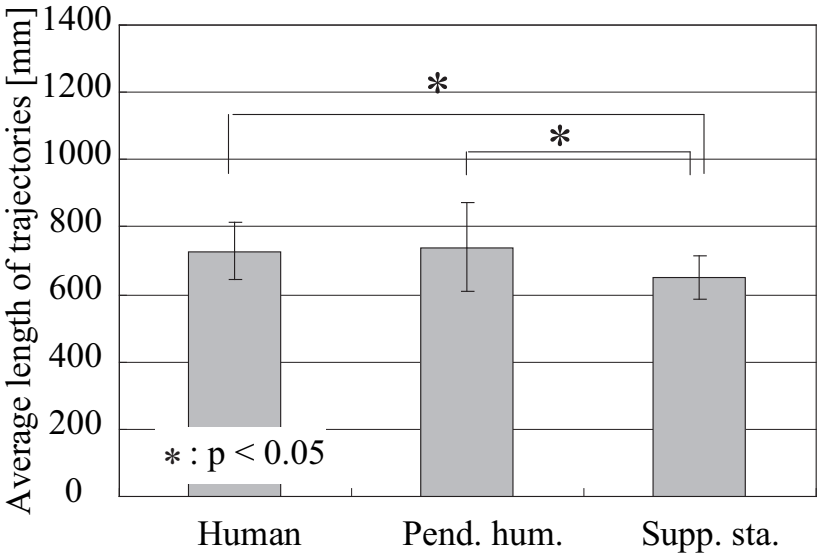


Fig. 3.5 Trajectory length under three different conditions.

- 軌跡長

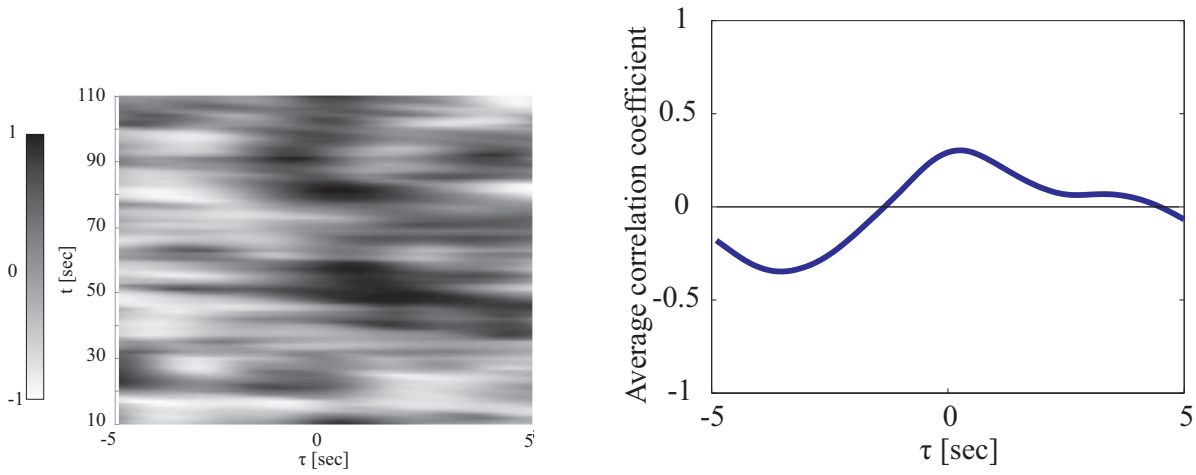
Fig. 3.5 に 3 実験条件の軌跡長の平均値を示す．この図より，補助輪静止条件での被験者の軌跡長が，他の 2 条件に比べて小さいことがわかる．実際，対応あり一要因分散分析により，条件間に有意差があることが示された ($F(2, 20) = 5.284, p = 0.014$)．さらに LSD 法による多重比較を行ったところ，補助輪静止条件は有意に人条件，倒立振子人型条件より小さいことが明らかになった ($p = 0.021, p = 0.020$).

- 同調量

第 3.1.2 節に示した手法を用いて同調量を計算する．結果として，人条件と倒立振子人型条件で同調して動揺したことがわかる．

Fig. 3.6(a) は人条件での，ある 1 組の被験者の同調行列の解析結果であり，Fig. 3.6(b) は Fig. 3.6(a) の平均同調係数ベクトルである．同様の計算を，人条件の他の 12 組に関しても行い，Fig. 3.6(b) に代表される平均同調係数ベクトルを計 13 本得た．それらの 13 本の平均同調係数ベクトルから同調量を計算したものが Fig. 3.7 である．

各被験者の組み合わせの計算結果から得られた同調行列から 10 行ずつランダムサンプリングし，さらに全 13 組のデータを統合して 130 行× 100 列の行列を作成する．各列で 1 サンプルの t 検定を行い，同調範囲（$p < 0.05$ の範囲）を決定する．その計算を 10 回



(a) Correlation matrix　　(b) Average correlation coefficient vector

Fig. 3.6 Correlation matrix and Average correlation coefficient vector.

繰り返すことにより，同調する範囲の左端と右端の平均値と分散値が計算できる．結果，-1.1 秒 ($SD = 0.13$) $\leq \tau \leq 1.9$ 秒 ($SD = 0.83$) の区間で，有意に 0 より大きい（$p < 0.05$）ことが明らかになった（Fig. 3.7）．

続いて，倒立振子人型条件を経験した被験者 11 名の動揺とロボットの動揺の間の同調量を計算した．人条件と同様に同調範囲を導出しようとしたが，被験者数の不足，同調量の要素の値の小ささのために同様の手法では導出できなかった．そのため別の同調範囲の決定方法として，各対面実験で得られた平均同調係数ベクトルを用いて計算を行う．11 被験者の同調量を統合した 11 行× 100 列の行列を用いて 1 サンプルの t 検定にて 0 より大きい範囲を導出したところ，0.2 秒から 1.3 秒の間が有意に大きい（$p < 0.05$）との結果を得た（Fig. 3.8）．

3.2.4　実験 2: ロボットの動揺の違いによる被験者の動揺への影響の違い評価実験

実験 2 の設定

被験者に Table 3.3 に示す 4 つの条件でロボットと対面させ，被験者とロボットの動揺を計測する．

被験者は一般から募集した大学生 23 名（男性 12 名，女性 11 名）とし，全被験者が 4

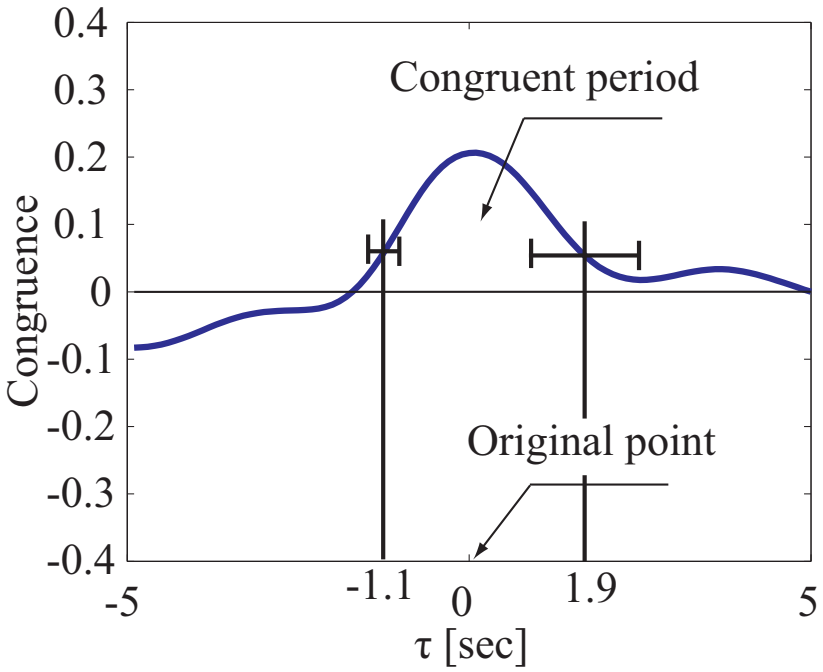


Fig. 3.7 Congruence under Human.

条件を経験する．以上の 23 名は次の順に経験した．実験条件は 4 条件であり，カウンターバランスとなるよう経験順を考えると被験者 24 名が必要となる．ここでは，倒立振子静止条件→補助輪人型条件→倒立振子人型条件→補助輪静止条件の 1 順を除いた 23 順について実験及び解析を行った．

実験 2 の解析結果

第 3.1 節に示した解析手法を用いて，軌跡長，同調量，印象を評価し，その結果を示す．

- 軌跡長

Fig. 3.9 に 4 実験条件における軌跡長の平均値を示す．この図より，補助輪静止条件の被験者の軌跡長が，他の 3 条件に比べて小さいことがわかる．実際，対応ありの一要因分散分析により，条件間に有意差があることが示された（$F(3, 66) = 5.33, p = 0.0024$）．さらに，LSD 法による多重比較を行ったところ，補助輪静止条件が有意に補助輪人型条件，倒立振子静止条件，倒立振子人型条件より小さいことが明らかになった（$p = 0.018, p = 0.0033, p = 9.9 * 10^{-4}$）．

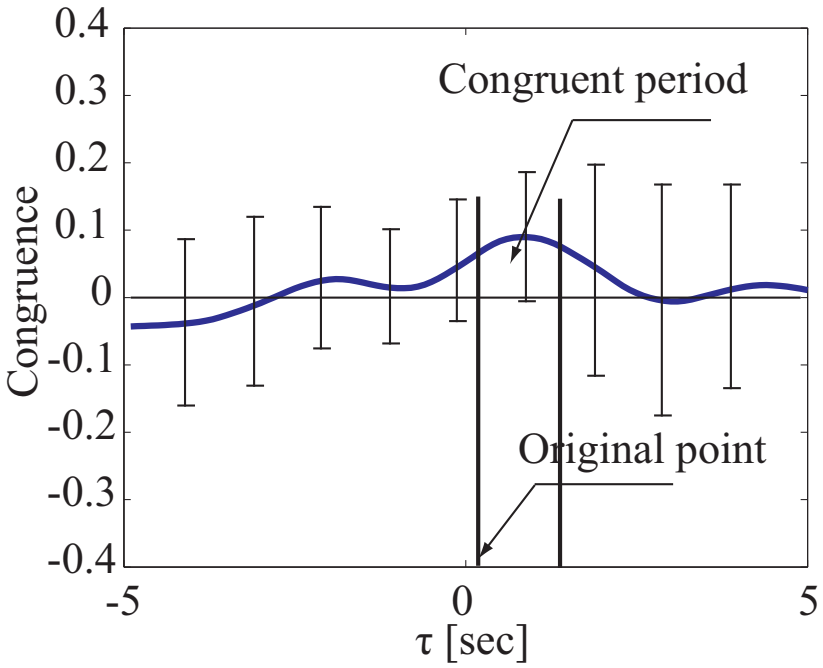


Fig. 3.8 Congruence under Pend. hum..

- 同調量

第 3.1.2 節に示した手法を用いて同調量を計算する．結果として，被験者とロボットは補助輪人型条件，倒立振子人型条件で同調して動揺したことがわかる．

Fig. 3.10 は補助輪人型条件と倒立振子人型条件の同調量を示している．各条件において各被験者の同調行列から 10 行づつランダムサンプリングし，全被験者（23 名）のデータを統合して 230 行× 100 列の行列を作成する．各列で 1 サンプルの t 検定を行い，同調範囲（$p < 0.05$ の範囲）を決定する．その計算を 10 回繰り返すことにより，同調する範囲の左端と右端の平均値と分散値が計算できる．結果，補助輪人型条件では -2.1 秒 ($SD = 1.2$) $\leq \tau \leq$ 1.3 秒 ($SD = 0.26$)，倒立振子人型条件では -0.63 秒 ($SD = 0.45$) $\leq \tau \leq$ 1.8 秒 ($SD = 0.73$) の区間で同調している（$p < 0.05$）ことが明らかになった．同調範囲の左端の計算結果は，補助輪人型条件より倒立振子人型条件の方が $\tau = 0$ に有意に近いことを示している（$t(18) = 3.54, p = 2.3 * 10^{-3}$）．しかしながら，右端の計算結果では有意差は得られなかった（$t(11.2) = 1.94, p = 0.078$）．つまり，補助輪人型条件ではロボットの動揺に影響を受け，また，その動揺を予測して人は動揺していることを示している．一方，倒立振子人型条件ではロボットの動揺に影響は受ける

Table 3.3 Conditions on experiment 2.

Name	Explanation	Figure
Supp. sta.	Between a participant and Robovie with supported stationary swaying	-
Supp. hum.	Between a participant and Robovie with supported human-type swaying	Fig. 3.4(d)
Pend. sta.	Between a participant and Robovie with pendulum stationary swaying	Fig. 3.4(a)
Pend. hum.	Between a participant and Robovie with pendulum human-type swaying	Fig. 3.4(c)

が，補助輪人型条件に比べて被験者の動揺開始が遅れており，つまり，被験者はロボットの動揺を予測しにくかったことを示している．

- 印象

Fig. 3.11 は 4 実験条件の各条件，印象を評価する形容詞の各因子ごとのアンケート評価の平均値を示す．この図より，各条件間の印象の各因子間に様々な有意差があることがわかる．ここでの実験条件間での差はロボットの動揺の差だけであり，条件ごとの印象評価の差は，ロボットの動揺の差の影響を表している．実際，対応ありの一要因分散分析により，外向性，協調性，知性，情緒安定性の実験条件間に有意な印象差があることが示された（$F(1.90, 41.7) = 7.38, p = 0.0021$，$F(1.81, 40.3) = 4.86, p = 0.015$，$F(3, 66) = 5.43, p = 0.0021$，$F(3, 66) = 17.0, p = 1.7 * 10^{-8}$）．さらに，それぞれの条件間において LSD 法を用いた多重比較を行った．また，勤勉性の条件間においては分散分析の結果，有意な印象差なしとなることが示されたため（$F(2.11, 46.5) = 2.01, p = 0.132$），Bonferroni 法による多重比較を行った．それぞれの多重比較の結果，有意差があった条件間を Fig. 3.11 内に示す．

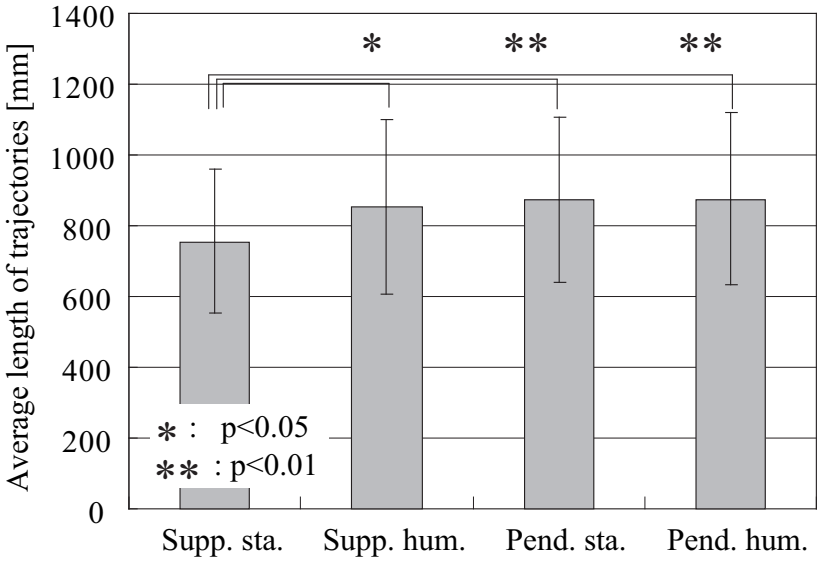
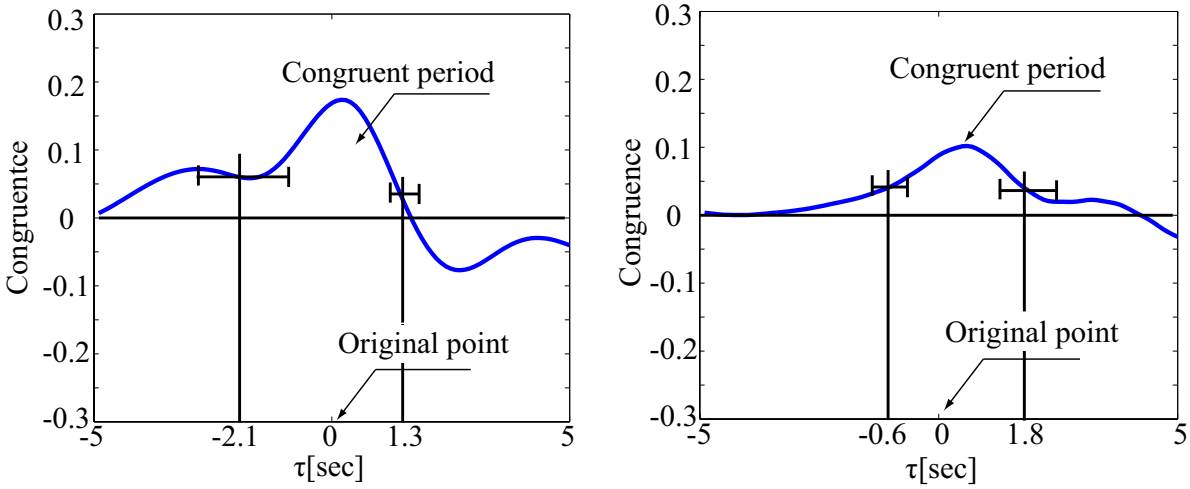


Fig. 3.9 Trajectory length under four different conditions.



(a) Supp. hum.　　(b) Pend. hum.

Fig. 3.10 Congruence under human-like conditions.

3.3　考察

従来研究[17),58)]によると，人同士の同調傾向は好ましい印象をそのコミュニケーションを行う人に与える．そのため，コミュニケーション対象としてのロボットが人と同調す

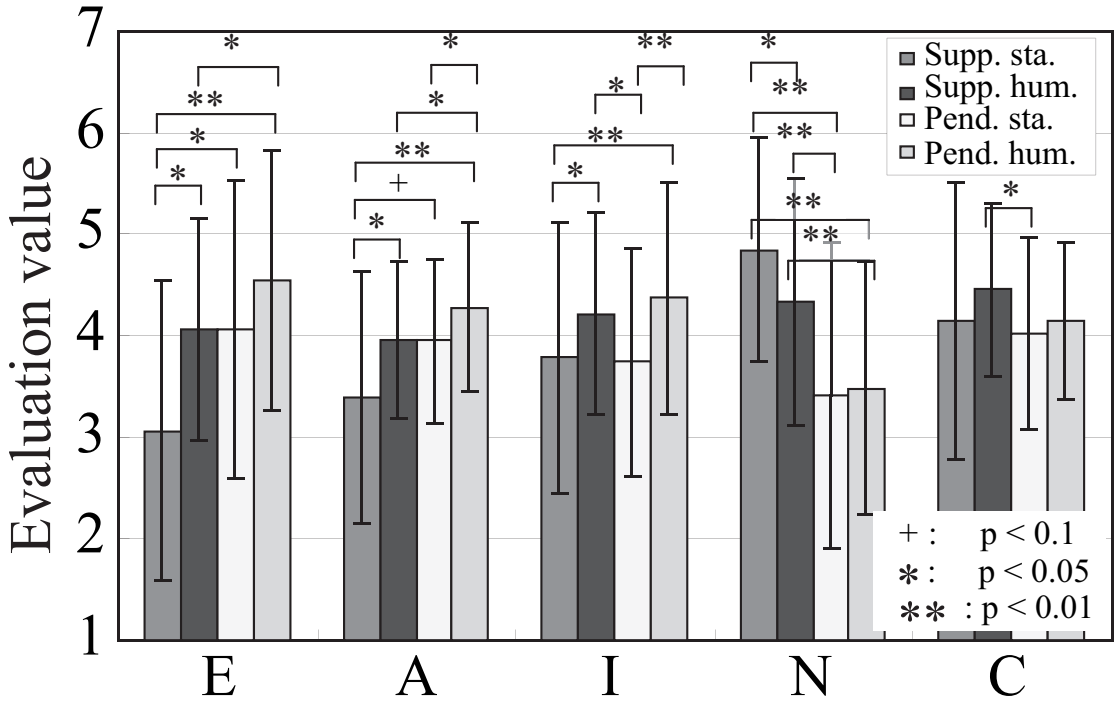


Fig. 3.11 Average score of different impressions. E: Extroversion, A: Agreeableness, I: Intellect, N: Neuroticism, C: Conscientious.

ることは重要であると考えられる．実験 1 において，人条件（Fig. 3.7）と倒立振子人型条件（Fig. 3.8）で同調傾向が確認された．また，実験 2 においては，人型の動揺を持つ補助輪人型条件（Fig. 3.10(a)）と倒立振子人型条件（Fig. 3.10(b)）においても同調傾向が確認された．これらの条件において，同調傾向が確認された理由として，視覚フィードバック[7)]の影響が大きいと考えられる．

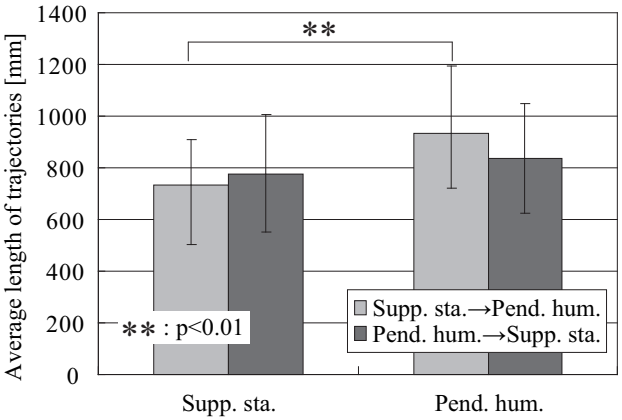
しかしながら，補助輪人型条件と倒立振子人型条件では，Fig. 3.10 に示すように同調範囲が異なる．この理由について，ロボットの動揺を被験者が予測しやすかったか否かという点から考察できる．倒立振子人型条件では回転運動を含む複雑な動きをしているため，被験者は予測しにくく，一方的にロボットから影響を受けたと考えられる．また一方，補助輪人型条件では，ロボットの動揺が単なる前後運動であるため，被験者にとって予測しやすく，あたかも被験者からロボットへの影響も存在するかのような結果になったと考えられる．倒立振子人型条件と補助輪人型条件の印象評価は，外向性，協調性，情緒安定性において有意差が生じており（Fig. 3.11），動揺の予測しやすさはそれらの印象

の因子と関係していると考えられる．

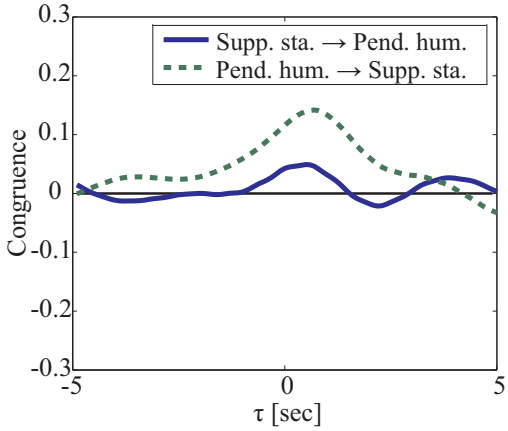
次いで，軌跡長について考察する．実験者は実験開始時に被験者に視点の指示をした．また，対面する対象の他に実験環境中で変化したものはない．そのため，被験者の軌跡長が実験 1 では人条件，倒立振子人型条件，また実験 2 では補助輪人型条件，倒立振子静止条件，倒立振子人型条件に比べて補助輪静止条件が小さくなった（Fig. 3.5，Fig. 3.9）のは，視覚フィードバック[7)]の影響が大きいと考えられる．しかし，軌跡長に影響を与える要因はそれだけではなく，各条件のロボットを見た順によっても影響を受けている．

Fig. 3.12(a) に，補助輪静止条件と倒立振子人型条件のどちらの条件を先に経験したかということでグループに分け，各グループの軌跡長を比較した結果をまとめる．対応あり t 検定により，補助輪静止条件のあとに倒立振子人型条件を経験したグループの軌跡長だけに有意差が生じている（$t(10) = 5.35, p = 3.2 * 10^{-4}$）．同様のグループ分けで，同調量（Fig. 3.12(b)）印象評価の結果（Fig. 3.12(c)）も整理する．同調量において，補助輪静止条件を先に経験したグループは逆のグループに対して，倒立振子人型条件においてロボットの動揺に対して同調しにくいことを示している．また，印象評価において，補助輪静止条件を先に経験したグループでは，外向性の印象評価値に有意差が存在するが（$t(10) = 3.00, p = 0.01$），倒立振子人型条件を先に経験したグループでは外向性の評価値に有意差がない．このことから，軌跡長の変化量は外向性の印象の評価値の変化量と関係があることがわかる．他の印象の 4 つの因子でも同様の解析を行ったが，同様の結果は得られなかった．

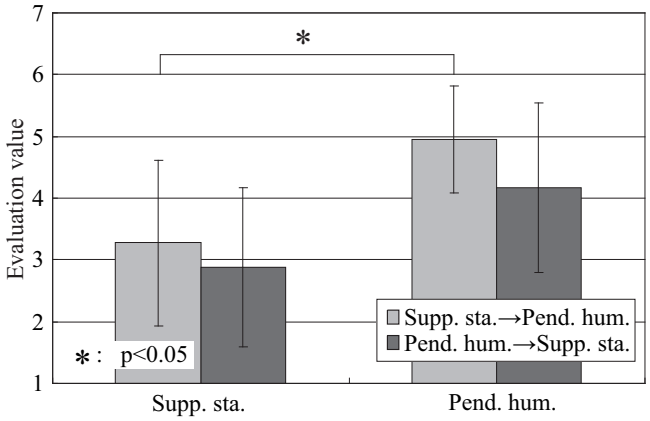
被験者の評価は先に経験した条件を基準として後に経験した条件を評価してしまうと考えられる．そのため，軌跡長の 2 条件の評価値の差が変わったということは，補助輪静止条件を先に経験したグループの被験者が，後に経験したグループに比べて大きな違和感を持ったということを示している．人は動揺しているのが自然な姿であり，ロボットが人のように動揺すれば人と同調もすることから，コミュニケーション対象としてのロボットとしては人のように動揺する方が良いと考えられる．それに反して，補助輪静止条件を先に経験した場合，その条件を基準にして倒立振子人型条件を評価するため，同調しにくく（Fig. 3.12(b)），倒立振子人型条件の軌跡長を増やし（Fig. 3.12(a)），その結果，2 条件間に外向性の印象を変化させた（Fig. 3.12(c)）と考えられる．同様の手法で，補助輪静止条件と補助輪人型条件での経験順に分類し比較を行ったが，両条件の軌跡長間に有意差はなく，経験順によって評価値が変化するような傾向は得られなかった．



(a) Trajectory length under Supp. sta. and Pend. hum.



(b) Congruence under Pend. hum.



(c) Impression of extroversion under Supp. sta. and Pend. hum.

Fig. 3.12 Trajectory length, congruence, and impression of two groups.

3.4　本章のまとめ

本章では，ロボットの位置と姿勢制御の低レベル制御系の制御特性を変動させることによって作りだしたロボットの動揺が，被験者の動揺に影響を与え印象を変化させることが明らかにした．また，被験者同士の動揺の間で同調することが明らかにし，同様の現象が人のような動揺を持つロボットと被験者の動揺の間でも確認できた．さらに，被験者はロボットの動揺の違いによって異なる影響を受け，ロボットに対する印象を変化さ

せたことを明らかにした．

本章での考察から，ロボットの動揺は，ロボットが人とコミュニケーションする際に，以下の 3 つの観点からの利用を期待できる．

1. ロボットが動揺することによって，人をその動揺に同調させることが可能であり，動揺しないロボットに比べて外向性や協調性などの印象を変化させることが可能である．
2. 動揺を持つロボットの外向性・協調性を高めたいときには，回転運動などの人が予測しにくい動揺を行い，ロボットから人に一方的に影響を与えるようにする．逆に外向性・協調性を低くしたいときには，人が予測しやすい動揺を構築し，同調しやすくする．
3. ロボットの動揺は，人に違和感を与えないためには，コミュニケーションの途中で変えない方がよい．変える場合は，はじめに人に近い動揺を見せてから変化させる方が，与える違和感は小さい．

今後は，これらの利用を考慮し，人に向けて行う動作と組み合わせた際の有効性を検証する必要がある．

また，本論文でロボットに導入した人の動揺は 1 パターンであり，人と比べてどの程度一般的であるかは示せていない．そのため，Fig. 3.4(b) で示した動揺のどの部分が人の動揺にどのような影響を与えたのか，印象をどのように変化させたかは断言ができない．しかし，これらの課題は再現性のある動揺を生成可能なロボットを用いて，その前後方向の振幅の大きさや周期を変化させることによって解決可能であると考えられる．

さらに，本章でのロボットの動揺は，位置と姿勢制御の指令値を変動させることのみを用いて構築している．これは，上半身を使った他のロボット自身のために行う動作との共存も可能である．

第 4 章

ヒューマノイドロボットの反応動作の違いが人に与える印象の変化

第 3 章のロボットの動作は，低レベルの制御系の制御特性である位置と姿勢の指令値を変動させることで作りだした．このような動作により，人の動作が影響を受け，人がロボットに対する印象を変化させることが明らかになった．第 3 章の研究では，人はロボットに接触するわけではないため，その影響は視覚によっていると言う事ができる．本章では，ロボットが人から押された時の反応動作について，その反応動作の違いにより人に与える印象の違いについて評価する．人がロボットに接触することで，人はロボットの動作を視覚だけではなく，触覚でも確認することになり，ロボットの動作をより認識すると言う事ができる．

ここで，ロボットの反応動作は低レベルの制御系の制御特性である制御ゲインを変動させて生成する．ロボットの行うことは外乱が入った際に元の位置に留まろうとする単なる外乱応答であり，ロボット自身のために行う動作である．しかしながら，人はその反応動作の違いで，ロボットに対する印象を変化させる可能性がある．人に与える印象を考慮に入れたロボットの反応動作生成ができるようになる．

人は相手がなにを感じ，どのように考えているかを，様々な情報，特にノンバーバル情報を使って推し量っている[5)]．人がもし，このような推量を行えなかったり，行えたとしても間違う場合は，相手がなにを感じ，なにを考えているのか知ることができないため，その人はコミュニケーション対象として認識され続けることは困難になるだろう．人とロボットのコミュニケーションにおいて，そのような困難さを回避するために，人の動作

に対するロボットの（擬似的な）感情や性格，考えていることなどの内部状態を，顔表情や動作などのノンバーバル情報によって表すことができれば，ロボットは人にコミュニケーション対象として認識され続けやすくなると予想できる．

ロボットの内部状態を，ノンバーバルな動作を用いて表現する手法に関する従来研究として，Shibata et al.[63]や Nakata et al.[23]が行った，ロボットの人に対する反応動作の違いが，その人の持つ印象を変化させるとの研究がある．Shibata et al. はパロと名付けたアザラシ型のロボットの人との触れ合いを研究した．彼らは，人がロボットの頭を触ったときに，腕や足を動かす一連の反応動作が人に楽しみや安らぎを与えることを示した．Nakata et al. はシャチ型のロボットを用いて，その反応動作の違いによって，ロボットに対する親近感が変わることを示した．彼らの研究は動物型のロボットを用いた研究であり，それらの反応動作の印象はロボットの形状に大きく依存しており，人が人と接しているときと同様な印象を持っているとは言いがたい．

本章では，ロボットが人のコミュニケーション対象として認識された上で，コミュニケーション相手として認識され続けるために必要なロボットの反応動作の生成を行う．具体的には人に押された時のヒューマノイドロボットの反応動作を構築し，その反応動作の違いによって人が持つ印象が変化することを示す．このような印象をロボットが制御できれば，相手にロボットの内部状態を自然に伝えることができ，より円滑なコミュニケーションの実現が期待できる．人に押されたときには，人の安全性の観点からは，ロボットの移動機構にかかわらず，押された方向に移動するのが代表的な反応動作であろう．本章ではそのような反応動作を作り出すために，Robovie-IV と名付けた倒立振子移動機構を持つヒューマノイドロボットを用い，その反応動作の違いによる人の印象変化を評価する実験を行う．倒立振子移動機構は，人に押されたときのヒューマノイドロボットの様々な反応動作を，移動機構の制御パラメータを変更することによって容易に構築することができるため用いた．実験の結果，ロボットの制御パラメータの違いによって作り出される反応動作の違いによって，人の印象が変化することが明らかになった．

4.1　人の動作に反応するロボットの動作

本節では，人の反応動作が異なると相手に与える印象が異なることを，従来のノンバーバルな動作研究での知見を用いて示す．また，従来の知見を拡張して，対面する状況で前から押されたときの反応動作が異なる場合に，印象が変化することについて考察する．

その考察内容を実現できるような，人に押されたときのロボットの反応動作の構築手法について述べる．

4.1.1　人の反応動作

人の動作に反応して，人が何らかの動作をするときに，同じ意図を持った反応動作であっても，その伝えたい意図の程度によって，その動作が異なり，また，相手に与える印象は大きく異なる．Morris[14] は人の反応動作の 1 つである威嚇動作について述べた．ある人が怒りの表現を他の人に伝えるときに，3 種類の手法がある．1 つ目は握り拳を作るなどの攻撃動作を始める動作である．2 つ目は物理的接触はないものの動作を完了させる動作，例えば握り締めた拳を相手に身体的接触が無いように振り回す動作などである．3 つ目は実際に物理的接触はあるが，相手には接触することはなく他の対象，例えば机などを叩くような動作のことである．それら 3 種類の反応動作の違いによって，相手の印象が異なる事は明らかであり，人は相手にどのような印象を与えたいかによってそれらの動作を適切に使い分けている．

同様の現象は，パーソナルスペースの知見からも読み取れる．Hall[13] はコミュニケーション時の人と人の距離を 4 種類に分類した (密接距離 (0〜450mm)，個体距離 (450〜1200mm)，社会的距離 (1200〜3600mm)，公衆距離 (3600mm 以上))．例えば，密接距離は極親密な関係や怒っている感情を表現する時に観測される距離である．同様に，他の 3 種類の距離でもそれぞれの関係性や伝えたい感情の表現という意味を持っており，パーソナルスペースも一種の反応動作とみなすことができる．威嚇動作やパーソナルスペースと同様に，人が前から押された時の反応動作でも同様にその反応動作の違いによって相手に与える印象が異なる．押されたときに，その場に留まろうと抗うのか，押されるがままに後退し，離れた場所に静止するのかでは，押した相手に対して与える印象は異なるであろう．もし，押された事に抵抗するような様子がみられた場合，押した人は押された人が気が強い人であるかのように感じるかもしれない．このような印象の違いを第 3 章にて述べたコミュニケーションロボット Robovie-IV を用いて示す．

4.1.2　Robovie-IV の反応動作

倒立振子移動機構は常に体の姿勢を保つ制御系が入っており，前から押された時に人のような反応動作をつくりだすことが可能である．この機構においては，車輪制御の PID

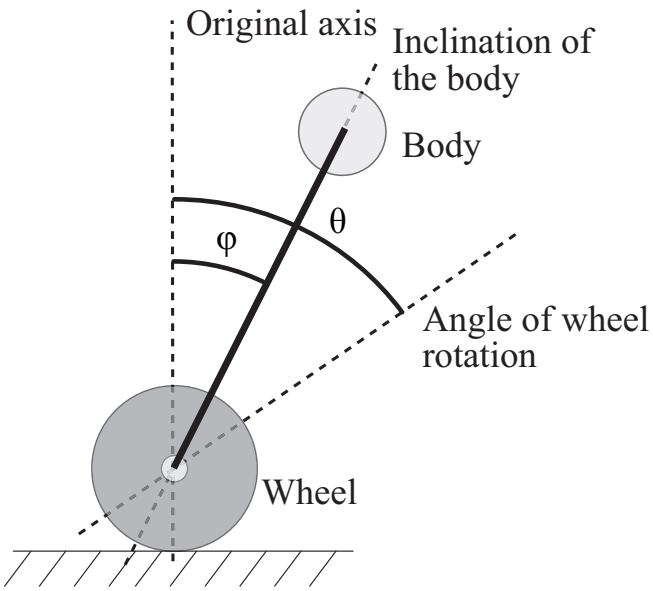


Fig. 4.1 Wheeled-inverted-pendulum model

ゲインの値の設定方法によって，外乱が加わった場合にバネ・ダンパの特性が異なる反応動作を実現できる．また，このような反応動作は倒立振子移動機構でなくとも，車輪にインピーダンス制御などを実装した機構でも実現可能である．

Robovie-IV では，Fig.4.2 に示すように，Ha and Yuta[64] の制御モデルを変更したものを用いる．彼らの研究では最適レギュレータ理論を用いたトルク制御が行われているが，Robovie-IV のモータドライバの入力が角速度であるため，式（4.1），式（4.2）により角速度制御系を構築する．また，Robovie-IV はヒューマノイドロボットであるため，腕や首の動作の影響を考慮に入れる．Fig. 4.1 に一次元倒立振子モデルを示す．また，このモデルで用いられる変数を Table 4.1 に示す．このような変更の結果，我々は以下の式を導いた．

$$
\begin{aligned}
T = & -K_p(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{des.}) - K_i \int (\dot{\theta} - \dot{\theta}_{des.})dt - K_d \frac{d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{des.})}{dt} \\
& - K_a \dot{\phi} - K_b \int (\dot{\phi} + \dot{\phi}_{comp.} + K_l \dot{\theta}_{des.})dt \cdots\cdots (4.1)
\end{aligned}
$$

Table 4.1 Variables of Wheeled-inverted-pendulum model

φ	the inclination angle of the body	K_p	gains for wheel control ($\dot{\theta}$)
θ	the angle of wheel rotation	K_i	gains for wheel control (θ)
T	torque for wheels	K_d	gains for wheel control ($\ddot{\theta}$)
$\varphi_{comp.}$	the compensation angle of the center of gravity	K_l	the gain that correlates to desired velocity with posture control
$\dot{\theta}_{des.}$	the desired velocity of the wheels	M	the mass of the body
K_a	gains for posture control ($\dot{\varphi}$)	$\dot{\alpha}_d$	the reference velocity of the motor as controller output
K_b	gains for posture control (φ)		

$$\dot{\alpha}_d = \dot{\theta} + \frac{1}{M}\int T dt \cdots\cdots (4.2)$$

Fig. 4.2 にこのコントローラのブロック線図を示す．車輪制御パラメータ K_p，K_i は反応動作が実験条件に合わせて多様なものとなるよう調整した．詳細は第 4.2 節に述べる．K_d は，微小な値を入れて応答性能の改善を図った．また，腕や首の角度から重心補正角度 $\phi_{comp.}$ を導き，Fig. 4.2 の姿勢制御パラメータ K_a, K_b，指令角度値が姿勢角度に与える影響に関するゲイン K_l は，予備実験を行い安定なパラメータをそれぞれ調整した．

ここで，Fig.4.2 に示す車輪制御パラメータ K_p と K_i を変化させることによって得られる 4 種類の反応動作について示す．この 4 種類の反応動作は被験者の経験する 4 実験条件となる．Robovie-IV の車輪制御は，目標車輪角速度や目標位置などの指令値，各センサ情報を用いて，第 4.1 節の倒立振子コントローラを用いて制御される．本章で作り出す反応動作は，この K_p と K_i のみを用いて作り出す．ただし，ロボットの動作が機械的な印象を与えないように，車輪の制御以外に，全ての反応動作で首と腕を 4 条件で同様に動かした．

K_p は $\dot{\theta}_{des.}$ と $\dot{\theta}$ の差分にかかるゲインである．式（4.1）より，この倒立振子コントローラは前後方法に外乱を受けた場合，車輪モータの角速度誤差を減少させる方向にトルクが生じる．つまり K_p は，ダンパ定数に類似する．K_i は $\int \dot{\theta} dt$ と $\int \dot{\theta}_{des.} dt$ の収束誤差の積分ゲインである．式（4.1）より，この倒立振子コントローラは前後方向に外乱を受けた場合，車輪モータの角度誤差を減少させる方向にトルクが生じる．つまり K_i は，バネ定数に類似する．

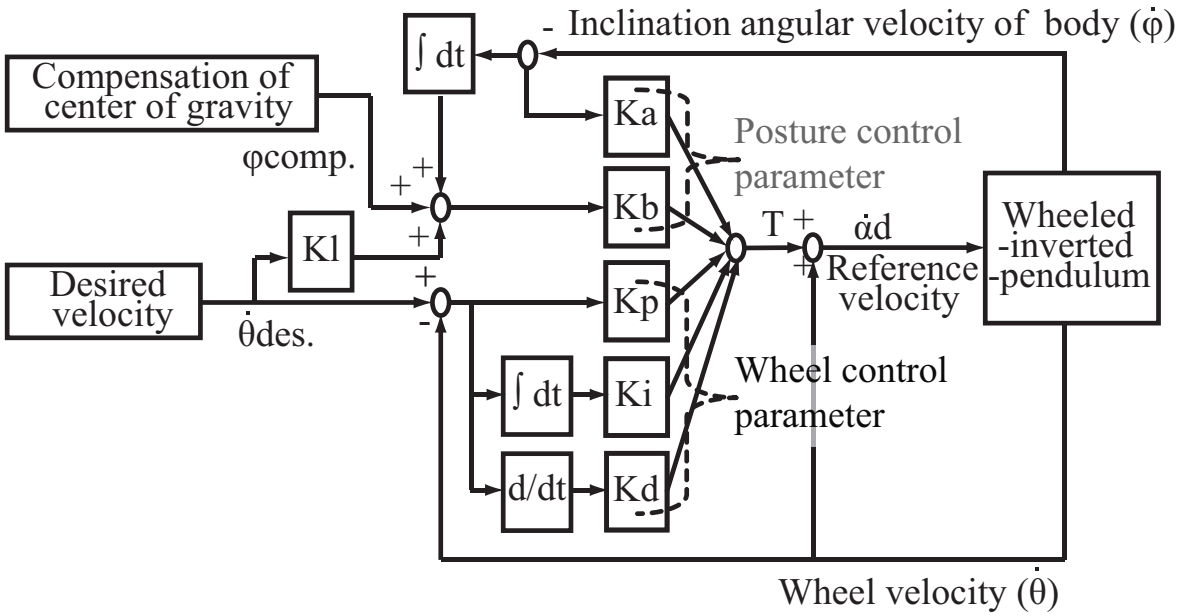


Fig. 4.2 Wheeled-inverted-pendulum block diagram

これらの 2 つのゲインの組み合わせにより，Fig. 4.3 に示すような 4 種類の反応動作を作り出した．グラフは前から押されたときのロボットの反応動作の時系列データを示しており，横軸が時間，縦軸が押された位置からのロボット前後方向の位置を示している．ここで，マイナス方向がロボットにとって前向き方向である．つまり，被験者から押され後退し，動作が収束することを示している．以下，それぞれの実験条件の詳細について示す．

実験条件 $(a)K_p(large), K_i(large)$　(以下，(a) と示す)

PID チューニングにより，K_p と K_i のゲインの組み合わせを構成した．これらのゲインの組み合わせにより得られる反応動作を Fig. 4.3 (a) に示す．ロボットが前から押されたとき，ロボットは後ろに下がり，少しオーバーシュートをしながら前進し，元の位置に戻ってくる．

実験条件 $(b)K_p(large), K_i(small)$　(以下，(b) と示す)

この反応動作のゲインの組み合わせにおいて，K_p は (a) と同様で，K_i は (a) の 3 分の 1 になるように構成した．Fig. 4.3 (b) に示すように，ロボットが前から押されたとき，ロボットは後ろに下がり，ゆっくりと元の位置に戻ってくるように前進

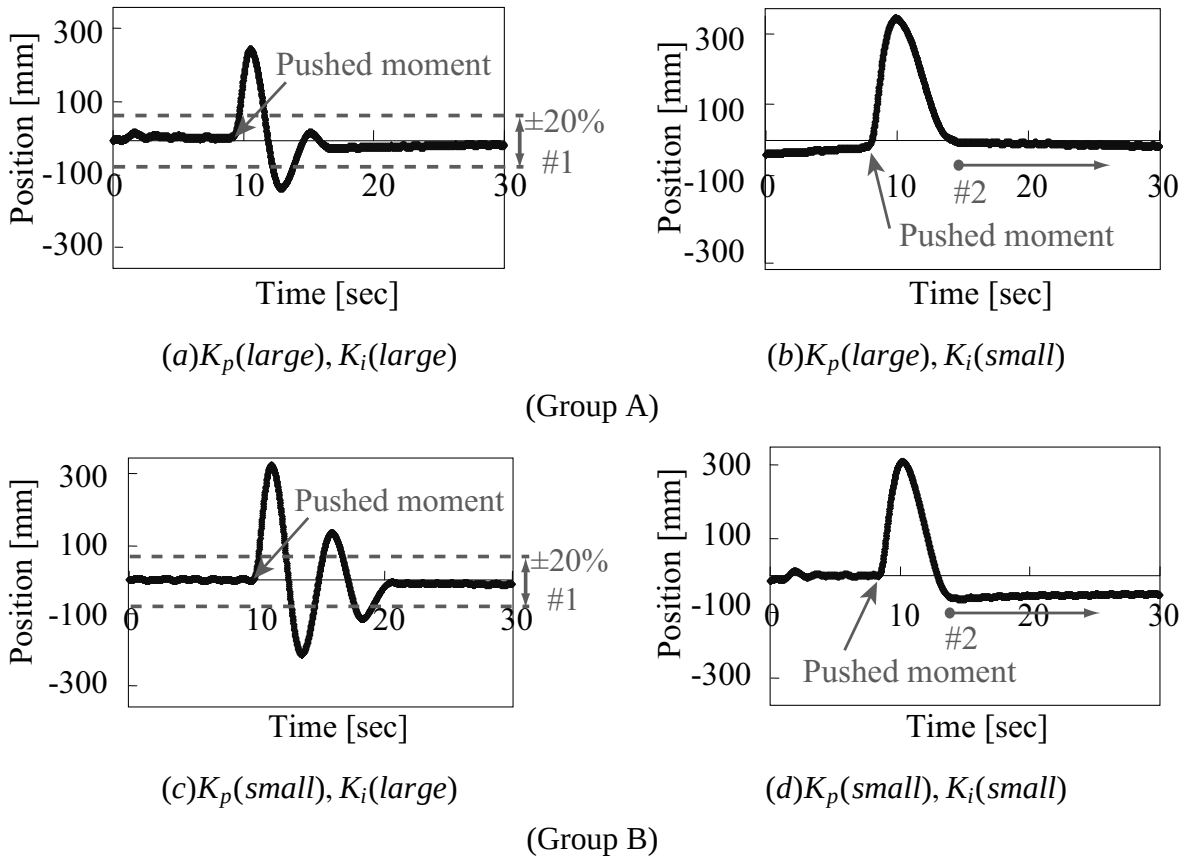


Fig. 4.3 Time series data of robot's position for each reactive behavior when a subject pushes the robot

する．

実験条件 (*c*)K_p(*small*), K_i(*large*)　(以下，(*c*) と示す)

この反応動作は，K_p は (*a*) の 2 分の 1，K_i は (*a*) と同様になるように構成した．Fig. 4.3 (c) に示すように，ロボットが前から押されたとき，ロボットは後ろに下がり，オーバーシュートしながら素早く前進するが，数回振動をした後に元の位置に収束する．

実験条件 (*d*)K_p(*small*), K_i(*small*)　(以下，(*d*) と示す)

この反応動作は，K_p は (*a*) の 2 分の 1，K_i は (*a*) の 3 分の 1 となるように構成した．Fig. 4.3 (d) に示すように，ロボットが前から押されたとき，ロボットは後ろに下がり，少しオーバーシュートをしながら前進し，その先で停止する．

4.2　人に押されたときの反応動作を評価する実験

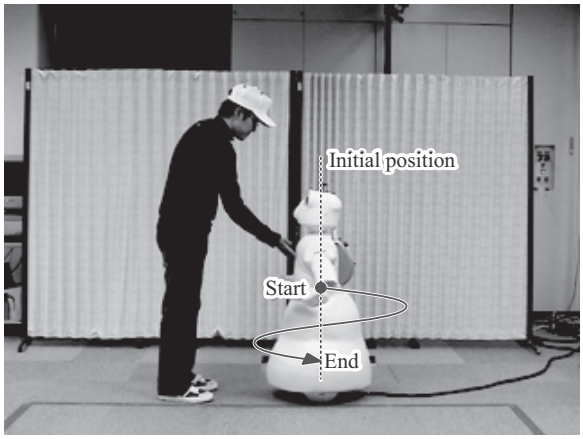
4.2.1　実験設定

前節で述べた 4 つの反応動作を評価するために，アルバイトとして一般の学生に公募をかけ，著者ら，著者らの所属する組織，実験者とは面識のない被験者を採用した上で実験を実施した．被験者は 10 代と 20 代の 26 名（男性 16 名，女性 10 名）の大学生であり，13 名ずつの 2 グループ（Group A，B）に分類した．Group A の被験者に対しては，(a) と (b) の 2 反応動作の評価をさせる．また，Group B の被験者に対しては，(c) と (d) の 2 反応動作の評価をさせる．2 つの反応動作のどちらかが終わる度に，被験者は別室にてアンケートを書く．実験を行った順による効果を取り除くために，2 条件の順序を統制し被験者間でカウンターバランスが取れるように行う．実験を行うに当たって被験者に指示する内容を以下に述べる．

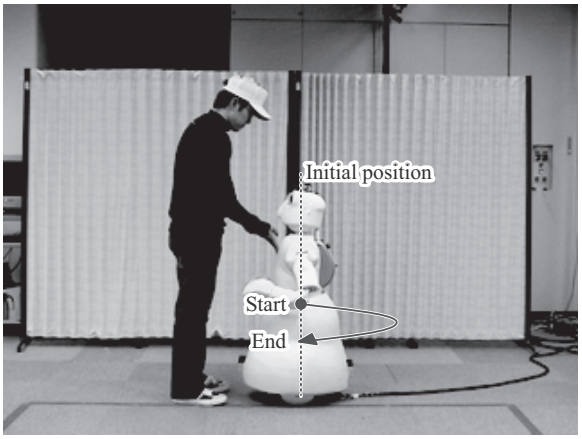
1. ロボットの正面に立つ．
2. 実験者が教示するように，遊んでいるロボットをいじめるように軽く押す．

予備実験で様々な指示をした結果より，これらの指示は最小で適切なものであると考えた．このような指示がなかった場合，押し方が強すぎたり弱すぎたりする被験者が存在し，実験が成り立たなくなる．印象は状況に依存する．予備実験において，ロボットと被験者の状況などを何も指示をせずに実験を行ったところ，被験者がその状況をどう想像するかによって，ロボットに対する印象の評価結果が変化することがわかった．印象評価の結果に対して，なぜこの評価となったかを聞き取り調査したところ，ある被験者は「押した事に怒って，自分に迫ってくることが強気であると感じた」ので外向性が高いようにアンケートに答えたと述べた．またある被験者は「なぜ自分の方に迫ってくるのか分からない」ので全て真ん中 (どちらでもない) につけたと述べた．このように，同じ押されたことに対する反応動作であっても，被験者が思い描く状況によって印象が大きくことなることが明らかとなった．

また，ロボットを人がいじめるという状況は，三菱重工業の wakamaru[65]やトヨタのロビーナ[66]のデモンストレーションにおいても多く見受けられる．例えば，ロボットを叩いたり，ロボットの行き先を妨げたり，ロボットの目を隠したりする行為である．本章では，そのような人がロボットをいじめるという状況を用いて，被験者の持つ設定の統制を

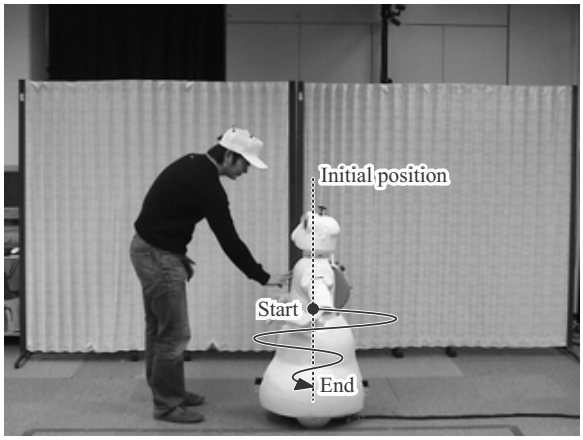


$(a) K_p(large), K_i(large)$

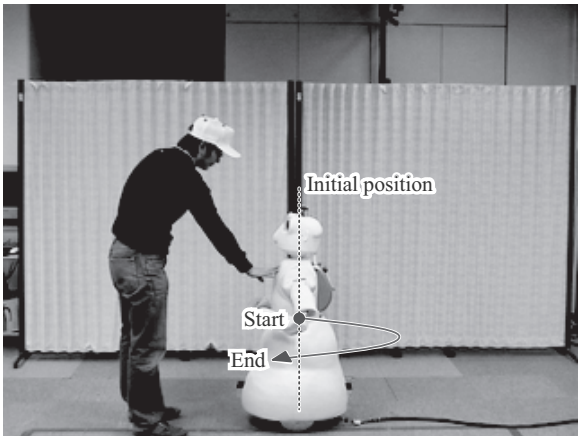


$(b) K_p(large), K_i(small)$

(Group A)



$(c) K_p(small), K_i(large)$



$(d) K_p(small), K_i(small)$

(Group A)

Fig. 4.4 Reactive behaviors (experimental scenes)

取った．被験者は，実験者に教示を受け一回の練習と一回の本番を行う．また，被験者は各動作を経験するたびにロボットの反応動作を評価するためのアンケートを書く．ロボットが遊んでいるということを表現するために，押されるまで腕と首を軽く動かした．4 種類の反応動作を Fig. 4.4 に示す．

また，アンケートは第 3 章と同様のものである，ビッグファイブ理論を用いた印象評価を用いる．

4.2.2　実験結果

K_p の大小と K_i の大小の組み合わせの 4 種類の反応動作ごとに被験者のアンケート結果を分類し，条件によってウィルコクサン符号付順位検定もしくはマン・ホイットニーの U 検定によって有意差が得られた印象評価の結果を Fig. 4.5，4.6 に示す．ここでは，K_p が大きい条件である $(a)K_p(large), K_i(large)$ と $(b)K_p(large), K_i(small)$ をまとめたものを $K_p(large)$，K_p が小さい条件である $(c)K_p(small), K_i(large)$ と $(d)K_p(small), K_i(small)$ をまとめたものを $K_p(small)$ として分類し，そのグループ間の印象評価のアンケート結果をマン・ホイットニーの U 検定によって評価した．また，K_i が大きい条件である $(a)K_p(large), K_i(large)$ と $(c)K_p(small), K_i(large)$ をまとめたものを $K_i(large)$，K_i が小さい条件である $(b)K_p(large), K_i(small)$ と $(d)K_p(small)$, $K_i(small)$ をまとめたものを $K_i(small)$ として分類し，そのグループ間の印象評価のアンケート結果をウィルコクサン符号付順位検定によって評価した．

このように K_p と K_i の大小で整理した場合，印象の有意差は外向性と情緒安定性において得られたが，協調性，知性，勤勉性では有意差は得られなかった．Fig. 4.5，4.6 の上図は，水平軸方向に K_i を並べ，K_p の大小ごとに線でつないだものである．鉛直軸方向は印象評価値の平均値を示す．また下図は，どのゲイン間に有意差があるか示すために，K_i と K_p の大小ごとに整理し 2 条件にまとめなおし，平均値を示したものである．また，標準偏差を細い線分で示し，検定にて有意差の存在する組み合わせについて $*, +$ を用いて示した．これらの結果から，K_i と K_p の大小で反応動作が変化し，ロボットに対する被験者の印象が変化したことが示された．因子ごとの整理結果の詳細を以下に述べる．

外向性

$K_i(large)$ と $K_i(small)$ を比較し，K_i による印象の影響をウィルコクサン符号付順位検定により評価した結果，有意差 ($p < 0.05$) が存在した．つまり K_p を固定して，K_i を大きくすれば外向性の印象評価が高くなることを示している．

情緒安定性

$K_i(large)$ と $K_i(small)$，$K_p(large)$ と $K_p(small)$ を比較し，K_i による印象の影響をウィルコクサン符号付順位検定，K_p による印象の影響をマン・ホイットニーの U 検定により評価した結果, $K_i(large)$, $K_i(small)$ の間に有意差 ($p < 0.01$), $K_p(large)$,

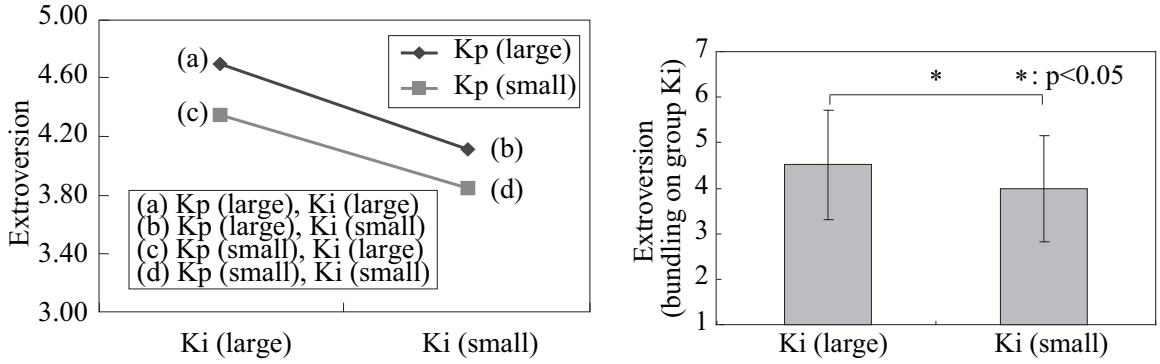


Fig. 4.5 Average score of extroversion. There was a significant difference in the main effect between $K_i(large)$ and $K_i(small)$ (p = 0.030).

$K_p(small)$ の間に有意傾向 ($p < 0.1$) が存在した．つまり K_p を固定して，K_i を大きくするか，もしくは K_i を固定して，K_p を大きくすれば情緒安定性の印象評価が高くなることを示している．

4.2.3　ロボットの反応動作の定量的評価

本節では，実験で用いた 4 種類の反応動作について各条件の定量的評価を行う．まず，制御ゲインを変化させることによって変化するロボットの反応動作の違いについて評価を行い，その時の印象の変化について述べる．次いで，ロボットの押し方の違いによって変化するロボットの反応動作の違いについての評価を行い，印象との相関を計算する．また，$K_p(small)$，$K_p(small)$ に該当するデータで，ロボットの背中に取り付けた 2 点のマーカを用いて ϕ を計算した．また，ϕ とロボットの車輪径 200mm を用いて θ を計算した (Fig. 4.7).

計算の結果，ϕ の値は θ に比べて無視できるほど小さく (最大でも 1% 程度) となり，本研究では人が捕らえる視覚の変化が重要であると考えたので，θ の変化に比べて ϕ の変化が印象に与える影響は小さいと考えたため，ϕ に関しては詳細な解析は行わない．

ロボットの反応動作の定量的評価は多様に行うことができ，例えば時系列を追って評価を行うと，“押す” →「後退した速度の最大値」→「後退した位置」→「人に近づく速度の最小値」→「人に近づいた位置」→「発振回数」という順序で評価を行うことができる．この中で，「後退した位置」「人に近づく速度の最小値」「人に近づいた位置」で $K_i(large)$

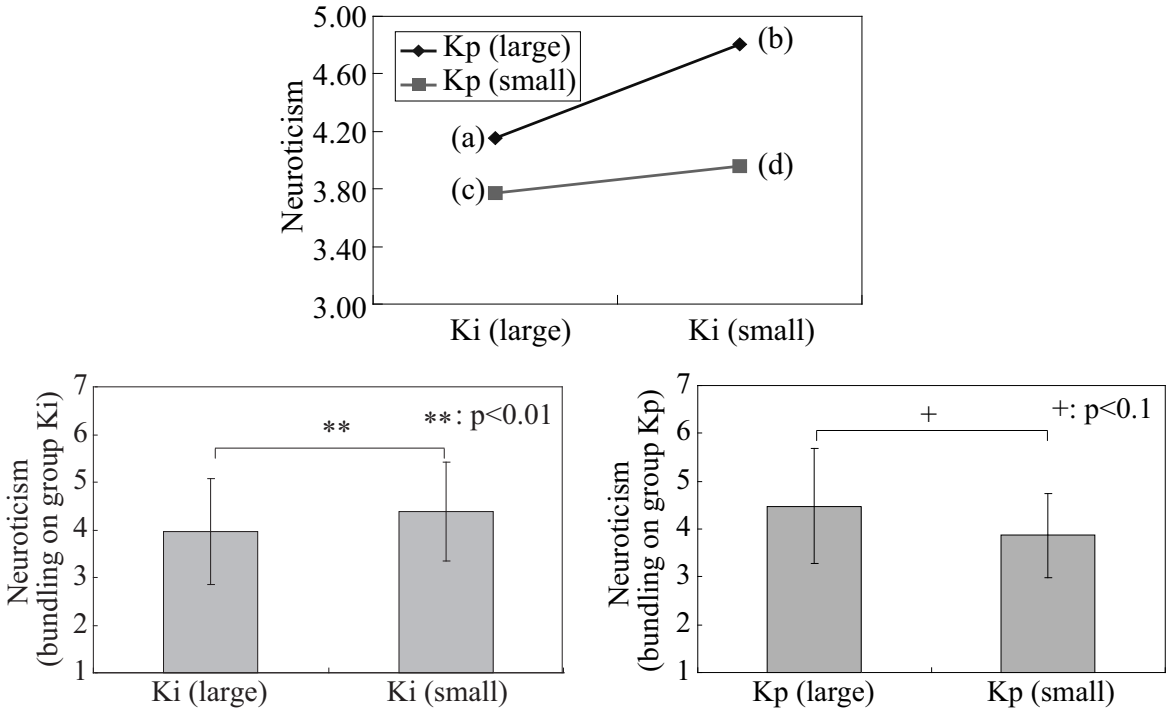


Fig. 4.6 Average score of neuroticism. There are significant differences in the main effect between $K_p(large)$ and $K_p(small)$ (p = 0.091), and $K_i(large)$ and $K_i(small)$ (p = 0.0098).

と $K_i(small)$ の間で有意差が存在する (二要因二水準分散分析の主効果)．これらは予備的な評価であり，本章では「人に近づく速度の最小値」,「人に近づいた位置」について示す．また，人とロボットの動作の関係として，ロボットを押すときの距離についても示す．ここでの位置・速度は 3D モーションキャプチャシステム（Vicon MotionSystems, VICON 612）を用いてロボットの位置を計測することにより行う．サンプリング周波数は 60Hz で，空間分解能は 1mm である．

ここで，第 3.4 節に示したように $K_i(large)$ と $K_i(small)$ の間で印象の有意差があるのは，外向性・情緒安定性であり，これらの印象の形成は評価したロボットの動作の評価値と関係があると考えられる．その中で，外向性の印象の有意差があった理由として被験者に対するパーソナルスペースを侵すという理由でロボットの迫り方の違いが重要であると考えられる．ここでは，迫り方に関する評価指標として重要であると考えられる「人に近づく速度の最小値」,「人に近づいた距離」について解析結果を示す．また，情緒安定性の印象の有意差があった理由として，$K_i(small)$ ではロボットの元の位置付近に発振す

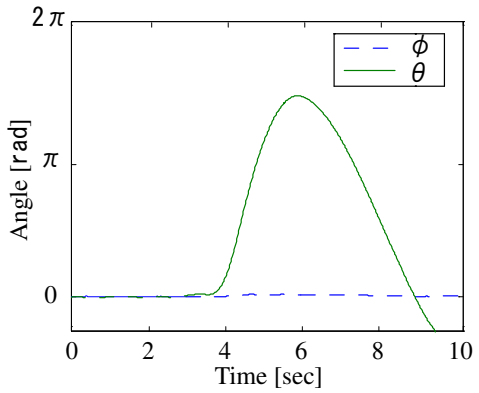


Fig. 4.7 Time series data of angle of θ & ϕ

ることなく動作が収束するような反応動作を行ったことが考えられる．そのため，発振回数についての解析結果を示す．

- ロボットが押された後に人に近づく速度の最小値
  押された後にロボットが人に近づく速度の最小値は，$K_i(large)$ と $K_i(small)$ ，$K_p(large)$ と $K_p(small)$ の間で有意差がある (Fig. 4.8, $p = 2.37 * 10^{-10}$，$p = 0.028$).

- ロボットが押された後に人に近づく距離
  押された後にロボットが近づいてきた時，人とロボットの距離が最短となるのは $K_i(large)$ ではロボットの動作が未収束の時である．ここでの収束の判定について以下に述べる．本研究の $K_i(small)$ では，いくつかの実験で押された時に元の位置に戻ってこず，その前後に静止することが散見され，一般的な制御の考え方の収束では定義ができない．そのため，ロボットの後ずさる最大速度の± 10% 以内でかつ 10 秒間その状態を維持できた時点を収束した時点とみなす (Fig .4.3#2)．ここで，$K_i(large)$ ではロボットが近づいた量は $K_i(small)$ に比べて有意に小さい (Fig. 4.9)．また，$K_p(small)$ では収束の位置でのロボットが近づいた量は $K_p(large)$ に比べて有意に小さい ($p = 2.04 * 10^{-7}$，$p = 4.87 * 10^{-4}$).

- 発振回数
  発振回数の比較を行う．本章では，発振しているとの判断を，先ほど計算したロ

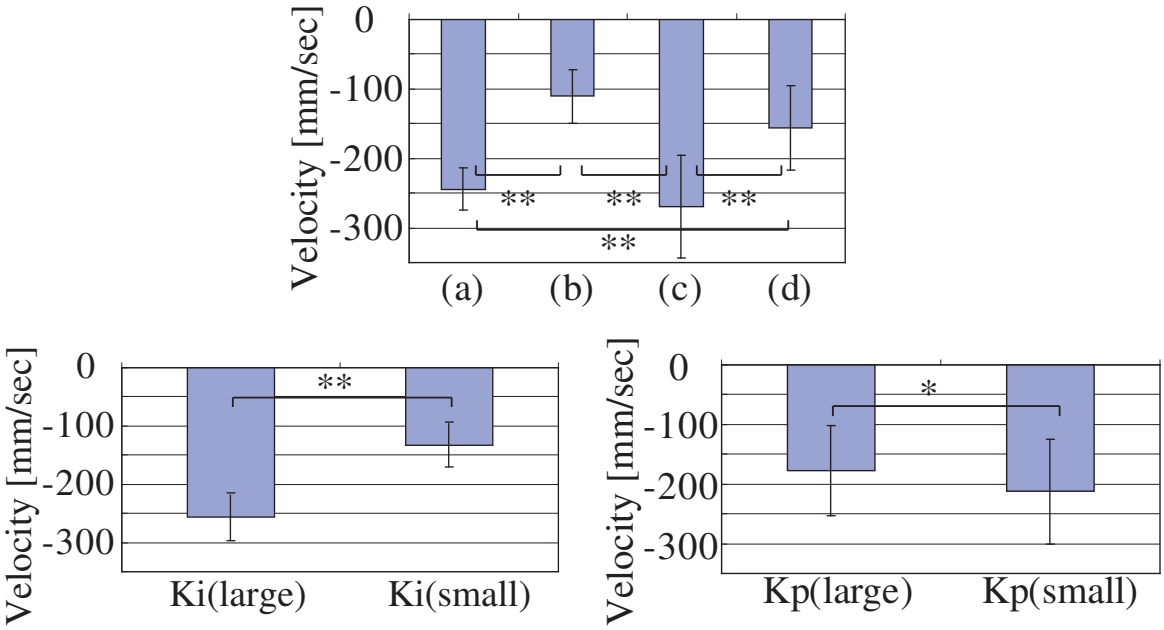


Fig. 4.8 Advancing velocity

ボットの後退する距離から求める．その距離が± 20% 以上であれば発振しているとみなす (Fig. 4.3#1)．なお (b) と (d) では，前節で定義した収束の位置が，後退する距離の± 20% 以上であれば発振しているとみなす．その発振回数の平均値を比較し，対応なし二要因二水準分散分析により，条件間に有意差があることが示された (Fig. 4.10，$F(3,51) = 26.64, p = 2.72 * 10^{-10}$).
さらに，K_i，K_p の主効果を評価したところ，それらの間に有意差があることが示された ($p = 1.76 * 10^{-9}$，$p = 1.28 * 10^{-4}$).

次に，$K_p(large)$ と $K_p(small)$ に分類して行ったロボットの定量的評価を行う．K_i の大小によって変化するロボットの動作は「人に近づく速度」,「人に近づいた距離」,「発振回数」を用いて評価を行った．それらの評価は K_p の大小でも有意差が存在した．また，被験者がロボットを押したときの状況について解析を行う．具体的には，押した時の感触と距離である．

- ロボットを押した時の感触

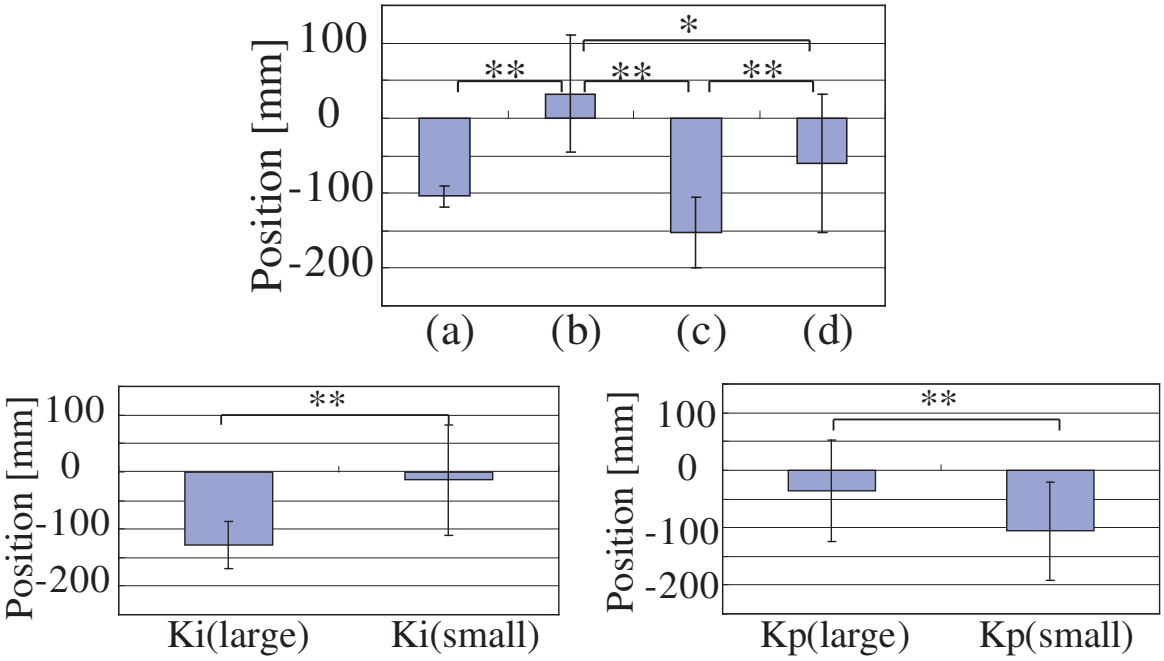


Fig. 4.9 Approach position.

被験者がロボットを押した時の感触は，ロボットの進行方向に対して原点付近で押されていることから，速度変化に関係する K_p のパラメータが位置変化に関係する K_i のパラメータに対して，先んじて影響を与えることが推測される．また，K_p が大きいときには，車輪の目標速度との偏差に対する素早い反応が起こることから，元の速度に収束させるための大きな力，つまり“硬い”感触が得られる．逆に K_p が小さいときには，“柔らかい”感触となることが推測される．

- ロボットを押した時の距離
  押した時の距離 (実験映像から被験者の顔とロボットの車輪間の距離を計測) は Fig. 4.11 に示すように有意に $K_p(large)$ が大きく，$K_p(small)$ より遠くから押したことがわかる (p = 0.0140).

ここで $K_p(large)$ と $K_p(small)$ の組の間に印象差の有意傾向があるのは情緒安定性についてであり，すなわちロボットの近くから押す”柔らかい”感触は情緒安定性の印象を低くすると考えられる．

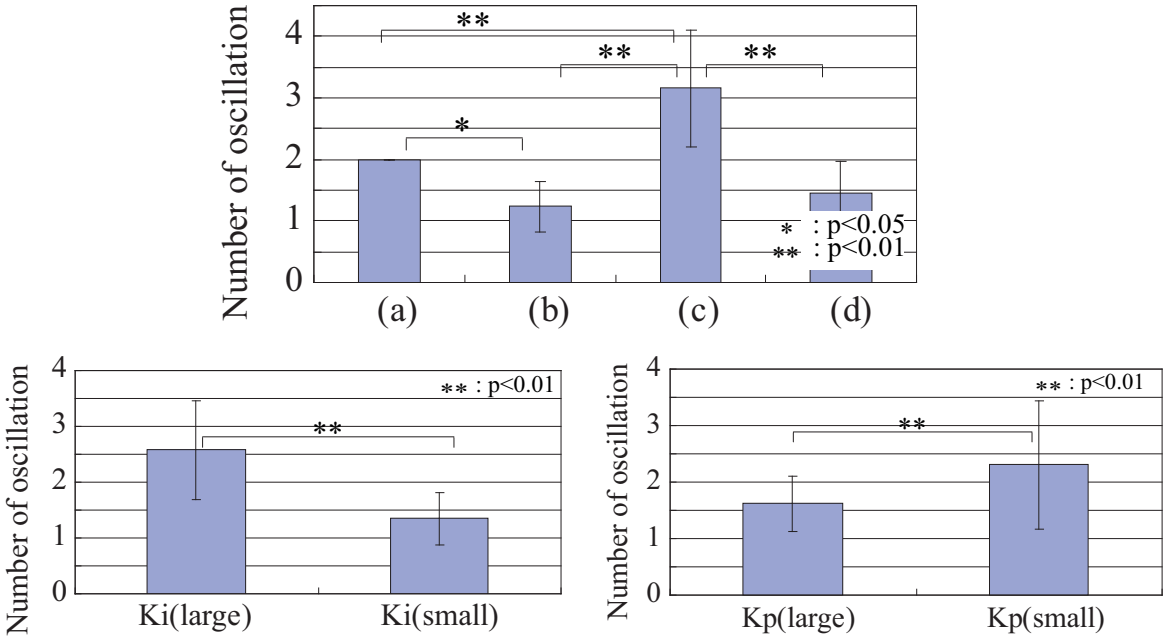


Fig. 4.10 Number of oscillation.

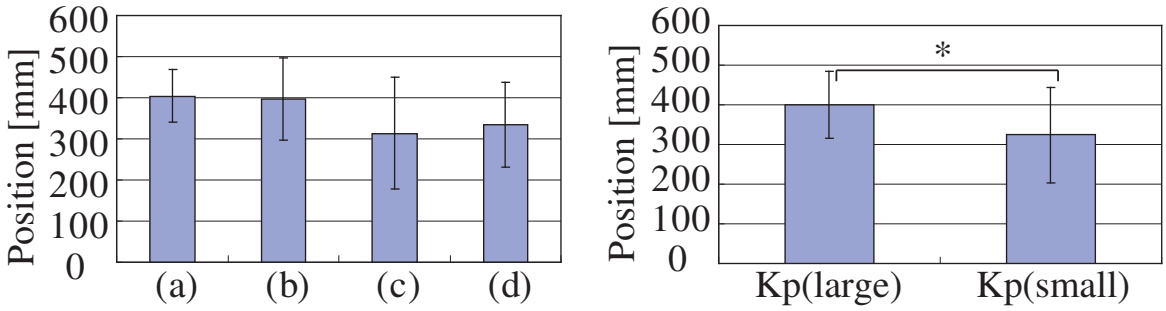


Fig. 4.11 Initial position.

4.2.4　ロボットの押し方の違いと印象との関係

ロボットの反応動作は被験者の押し方の違いによって，後退する距離や近づいてくる距離，後退する速度などが微妙に変化する．以下にはその変化した動作と印象の関係について示す．

先述のロボットの反応動作の評価指標と印象との相関を計算したところ，$K_i(small)$ の (b) と (d) にのみ有意な相関がみつかった．そのような相関は，(b) においては「後退し

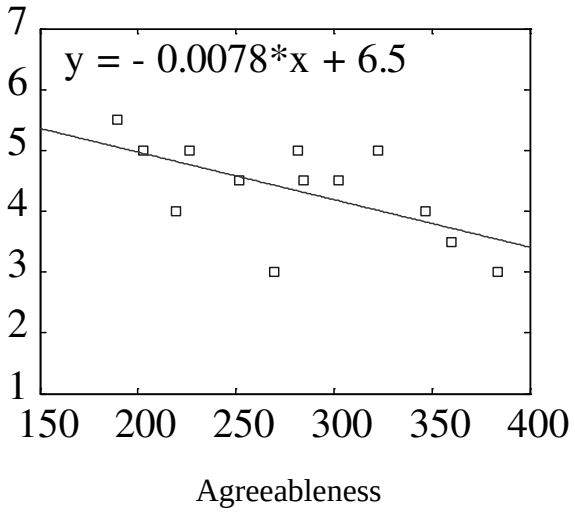


Fig. 4.12 Correlation coefficient between receding velocity of (b) and the impression.

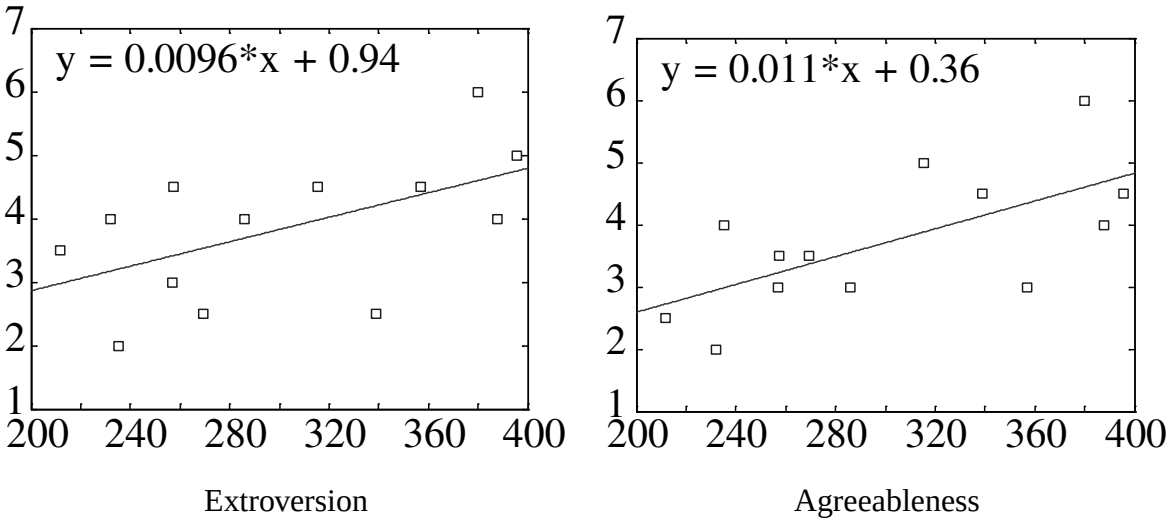


Fig. 4.13 Correlation coefficient between receding velocity of (d) and impressions.

た速度の最大値」-「協調性」(Fig. 4.12, $r = -0.60$, $p = 0.030$), 「後退した位置」- 「協調性」($r = -0.52$, $p = 0.068$). (d) においては「後退した速度の最大値」-「外向性，協調性」(Fig. 4.13, $r = 0.55$, $p = 0.051$, $r = 0.66$, $p = 0.015$), 「後退した距離」-「外向性，協調性」($r = 0.58$, $p = 0.039$, $r = 0.58$, $p = 0.039$), 「人に近づく速度の最小値」- 「協調性」($r = -0.62$, $p = 0.025$), 「人に近づいた位置」-「協調性」($r = -0.56$, $p = 0.047$) の間で有意な相関がみつかった.

4.3　考察

第 4.2 節では，車輪制御パラメータ K_p と K_i を変化させることによって，被験者の動作に対するロボットの反応動作を変化させ，被験者のロボットに対する印象が変化することを示した．状況を限定せずに反応動作の印象を評価することは我々の予備実験からも困難であることが明らかになっているため，このように印象が変化するのはロボットをいじめるという限定された状況において実験された結果ではあるが，これらの印象の変化はロボットの反応動作の違いによって考察することができる．本章でのロボットの反応動作は，K_p と K_i に依存する発振回数と収束位置によって分類できる．以下に，反応動作と外向性・情緒安定性の印象が変化した理由について考察する．

外向性　$K_i(large)$ のように，ロボットが大きなオーバーシュートとともに被験者の方向に戻ってくると (Fig. 4.9)，被験者はロボットが外向的であるとの印象を持つ．この結果を人の動作に当てはめて考察する．人は姿勢のバランスを常に取っているが，平常な感情の時に押された場合，元の位置に戻ってくるような反応動作は通常は存在しない．しかしながら，人がもし押されたことに立腹したのであれば，元の位置に戻ってきて，さらに押した側の人に近づく可能性がある．被験者はこのような人の反応動作をロボットの反応動作に当てはめ，ロボットへの外向性の印象を変化させたと考えられる．

また，パーソナルスペース[13)]の考え方を用いても考察することが可能である．本章では，初めに被験者はロボットの前に立つよう指示されており，初対面で前から押すというシチュエーションから個体距離になっている．しかし，押した後 $K_i(large)$ では，ロボットが被験者の方に近づき，個体距離の近接相や密接距離になっていることが明らかである (Fig. 4.9)．人と人のパーソナルスペースの考え方や距離をそのまま人とロボットの関係に当てはめるなら，初対面という状況を考えると個体距離や社会的距離が適切な距離となる．それに反して，$K_i(large)$ では個体距離の近接相もしくは密接距離になっており，そのために外向性の印象を変化させたと考えられる．

さらに，K_i を大きくすることに従って被験者に迫ってくるロボットの動作速度が速くなることが，外向性の印象を高めた可能性もある．従来研究では，ロボット

アームが被験者に近づいてくる速度の違いによって印象が変化することが示されている[49),48)]．本論文で解析したような，被験者に近づくヒューマノイドロボットの動作速度の変化が外向性の印象を変化させるとの知見に直接関係するような文献は，筆者らが調べた所見つからなかったが，ロボットアームのショルダ・エルボ角の角速度が大きくなり被験者に近づく速度が速くなれば，被験者に対する心的負荷量が多くなることが示されている[49)]．

情緒安定性　ロボットが後ずさる時に，K_p が大きくなるにつれて，その速度が大きくなる．また，近づいてくる距離は，K_p が大きくなるにつれて遠くなる．さらに，ロボットが被験者に近づいてくるときに，K_p を小さくするか，K_i を大きくするのに従って発振回数が多くなる．それらの結果，情緒不安定であるとの印象を変化させたと考えられる．
被験者がロボットを押すときに，K_p を大きくするのに従って，その感触が“硬く”なることが推測される．“硬い”感触は，情緒安定であるとの印象を与えた可能性がある．また，少し大きめの力で押すために $K_p(large)$ では被験者がロボットに比較的遠くから押したことが示されている．これらの複合的な要因により，情緒安定性の印象が変化したと考えられる．

また，ゲインの組み合わせによって変化するロボットの反応動作による印象の違いだけでなく，被験者のロボットの押し方の違いによって生じる微小な反応動作の変化によっても外向性の印象が変化することが示された．Fig. 4.9 に示すように，ロボットが人に近づいてくる距離は，$K_i(small)$ でバラつきが大きくなる．そのようなバラつきの大きさがありロボットの反応動作を被験者が予想しにくい時のみ，押し方の違いによって生じる反応動作の違いによって印象が変化すると考えられる．印象が変化した理由として，強めに押した時に“硬さ”を感じ外向性が高い印象を持ち，期待通りの反応をすることによって協調性が高い印象となったと考えられる．

4.4　本章のまとめ

本章では，低レベル制御系の制御特性を用いたロボットの動作として，ヒューマノイドロボットが前から押されたときの反応動作を構築した．また，この反応動作の違いが，コ

ミュニケーション相手の印象を変化させるとの知見を得た．具体的には，人がロボットをいじめるという状況において，低レベル制御系の制御特性である制御ゲインを変動させることで，被験者へのロボットの近づき方を変化させることができ，その結果外向性・情緒安定性の印象を変化させることができた．また感触を変化させることにより，情緒安定性の印象を変化させることが明らかになった．さらに，$K_i(small)$ ではロボットの動作の分散が大きく，被験者のロボットの押し方の違いによって外向性・協調性の印象が変化することが明らかになった．この実験結果から，ロボットがいじめられるなどの特定の状況においては，ヒューマノイドロボットは，ロボット自身のために行う自らの反応動作で内部状態を表現できることがわかった．

ここでは，ロボットの車輪の制御パラメータを変化させて反応動作を構築したが，他にも目や顔の向き，腕の動きなどを用いた反応動作は多数存在している．今後の課題は，それらの低レベル制御系の制御特性を同様に変化させて，反応動作の違いを作ることにより，内部状態をより的確に表現することである．コミュニケーション相手である人は，これらの情報から内部状態を推し量ることがさらに容易になり，ロボットはコミュニケーション対象として認識されやすくなるため，より円滑なコミュニケーションの実現が可能になると考えられる．

第 5 章

結論

本論文では，ロボット自身のために行う動作の違いが人の動作に影響を与え，印象を変化させることを明らかにした．その結果，相手に与える印象を考慮に入れたロボットの動作生成が可能となった．また，本論文でのロボット自身のために行う動作は，低レベルの制御系の制御パラメータを変動させることのみで構成されているため，他のロボット自身のために行う動作と組み合わせが可能であり，汎用性が高いということができる．これまでの議論を以下にまとめる．

5.1　本論文での結果とその成果

第 3 章では，ロボット自身のために行う動作として，直立時の動揺に着目し，その動揺の違いによって相手の動揺に影響を与え，印象を変化させることを明らかにした．この動揺は，ロボットの位置・姿勢制御の制御特性である指令値の変動のみを用いて構築している．これは，上半身を使った他のコミュニケーション動作との共存も可能である．

また，被験者同士の動揺の間で同調することが明らかになり，同様の現象が人のような動揺を持つロボットと被験者の動揺の間でも確認できた．さらに，被験者はロボットの動揺の違いによって異なる影響を受け，ロボットに対する印象を変化させ，その印象変化の仕組みを明らかにした．

続いて第 4 章では，人がロボットに接触がする時のロボット自身のために行う動作として，人から押された時の反応動作について，その反応動作の違いにより人に与える印象

の違いについて評価した．人がロボットに接触することで，人はロボットの動作を視覚だけではなく，触覚でも確認することになり，ロボットの動作をより認識すると言う事ができる．ロボットの反応動作は低レベルの制御系の位置と姿勢の制御ゲインを変動させて生成した．ロボットの意図としては，外乱が入った際に元の位置に留まろうとする外乱応答である．人はその反応動作の違いで，ロボットに対する印象を変化させたため，制御ゲインを変動させることで，人に与える印象を考慮に入れたロボットの反応動作の生成ができるようになったといえる．

これらの研究の成果として，ロボット自身のために行う動作で人の印象を変化させることができることが明らかになり，また，その印象変化の仕組みが明らかになった．さらに，そのロボット自身のために動作は，低レベル制御系のみで生成した．

コミュニケーションロボットは，人とコミュニケーションしたり，バランスをとったり，移動したりするために数多くの動作を行う必要がある．また，コミュニケーションロボットは同じ姿形及び自由度を持ったものではなく，それぞれのロボットに応じて動作が異なる．それらの動作が人に与える印象を全て評価して，設計者が動作を作成するのは非常に困難な作業である．従来は，コミュニケーションロボットの動作を作成する際には，人のために行う様々な動作に関する研究を元に作成されてきた．また，ロボット自身のために行う動作に関しては，ロボットにとって制御し易い手法が選ばれて動作が作成されてきた．

そのように多くの動作を作成する際に，本研究で述べたロボット自身のために行う動作を用いて，動作のバリエーションを持たせることができれば，最低限作成する必要のある動作生成が減ることに繋がる．また，ロボット自身のために行う動作で印象変化させることができるため，同時に行う人のために行う動作で情報も伝えることができ，人に複雑に情報を伝えることができるよになると考えられる．

ただし，人のために行う動作と組み合わせる際に，どのように組み合わせれば良いかについては，ロボットにとっての制御性 (ロバスト性を維持できるか否か) や，人に違和感を与えないか否かという点での検証を行う必要がある．

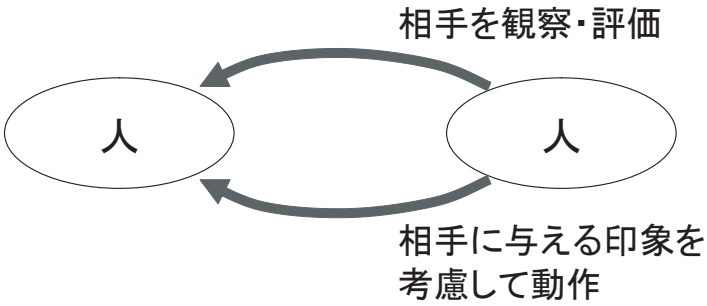


Fig. 5.1 Changing human motion to control human impressions

5.2　本研究の今後の展望

人は，外向的な人であるのか協調的な人であるのかなどという本来持っている性質を，言葉や非言語の情報を使って常に評価している．その特徴を逆に利用し，相手に自分の性質をどう見せたいか意識して，自分の本来の性質から生じる動作を変動させ，相手の印象をコントロールする手法が様々に提案されている[67),68)]．例えば[67)]では，プレゼンテーションにおいて相手を説得するために，自分のタイプを以下の 3 つのタイプに分類して，演じる方法が示されている．

興行主タイプ　独創的なひらめきと，制作ノウハウを兼ね備えたプロフェッショナルという印象を与える．

アーティストタイプ　奇抜だが，洗練された印象はない．また，月並みな現実世界よりもクリエイティブなアイデアの世界を好むという印象を与える．

初心者タイプ　経験が浅く，世間知らずの印象を与える．あるいは，そのように装う．

また[68)]では，議論において自分の主張を有利に進めるために，怒った演技をする手法及びその効果について示されている．

これらの手法では，どちらも相手を観察・評価し，相手に合わせて自分の動作を変える (Fig. 5.1) ことが示されている．

ロボットの動作生成でも同様に，相手を観察・評価し，相手に合わせて自分の動作を変える (Fig. 5.2) ことが考えられる．その際に，本研究で述べた，低レベル制御系で構成した，ロボット自身のために行う動作による人の印象変化に関する研究は利用可能である．

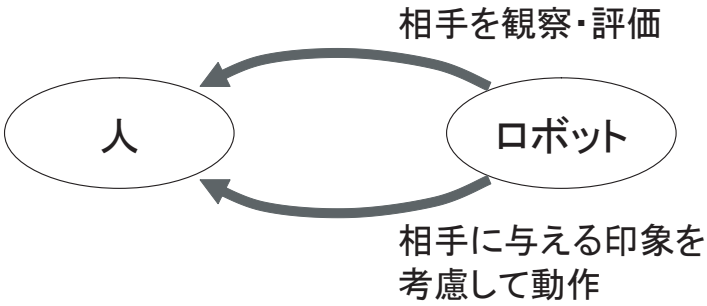


Fig. 5.2 Changing robot’s motion to control human impressions

ただし，本研究では人に与える印象を考慮に入れた動作生成はできるが，人を観察・評価していない．今後はその点を考慮しロボット自体が自動的に人を観察・評価し，ロボットの動作を変化させる手法構築が課題となる．

参考文献

1) H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, T. Maeda, T. Kanda, and R. Nakatsu. Robovie: an interactive humanoid robot. *Int. J. Industrial Robotics*, Vol. 28, No. 6, pp. 498–503, 2001.
2) B. Reeves and C. Nass. 人はなぜコンピュータを人間として扱うか　「メディアの等式」の心理学. 翔泳社, 2001. 細野宏通訳.
3) 安藤清志, 大坊郁夫, 池田謙一. 社会心理学. 岩波書店, 1995.
4) 大坊郁夫. しぐさのコミュニケーション―人は親しみをどう伝えあうか. サイエンス社, 1998.
5) M. F. Vargas. 非言語コミュニケーション. 新潮選書, 1987. 石丸正訳.
6) 福井康之. まなざしの心理学. 創元社, 1984.
7) 時田喬, 鈴木淳一, 曽田豊二（編）. 神経耳科学 II. 金原出版株式会社, 1985.
8) Vladimir M. Zatsiorsky. 身体動作の運動学. ナップ, 1999. 鳥居俊訳.
9) 川人光男. 脳の計算理論. 産業図書, 1996.
10) R.L. Birdwhistell. *Kinesics and Context: Essays on Body Motion Communication*. University of Pennsylvania Press, 1970.
11) A. Mehrabian. *Silent Messages*. Wadsworth Publishing Company, 1971.
12) ダーウィン. 人及び動物の表情について. 岩波文庫, 1931. 濱中濱太郎訳.
13) E. T. Hall. かくれた次元. みすず書房, 2000. 日高敏隆, 佐藤信行訳.
14) D. Morris. *Manwatching*. Jonathan Cape, 1977.
15) 山口創. 皮膚感覚の不思議. 講談社, 2006.
16) P. Ekman and W. V. Friesen. 表情分析入門. 誠信書房, 1987. 工藤力訳.
17) A. Kendon. Movement coordination in social interaction: some examples described. *Acta Psychologica*, Vol. 32, No. 2, pp. 101–125, 1970.
18) M. Argyle and M. Cook. *Gaze and Mutual Gaze*. Cambridge University Press, 1976.

19) 小川鉱一, 森政弘. 物体を持った上肢の直線運動パターンの分析-機械動作美化のための基礎研究. 人間工学, Vol. 13, No. 3, pp. 91–98, 1976.
20) 小川鉱一, 森政弘. 物体を持った上肢の直線運動パターンの解析-機械動作美化のための基礎研究. 人間工学, Vol. 14, No. 6, pp. 335–342, 1977.
21) 斎藤富由起. 直立姿勢における平衡機能と情動との関連性. PhD thesis, 早稲田大学, 2002.
22) 中林稔堯. 児童の平衡機能の発達について：重心動揺検査を通して. 神戸大学発達科学部研究紀要, Vol. 4, No. 2, pp. 1–21, 1997.
23) T. Nakata, T. Sato, and T Mori. Producing animal-like and friendly impressions on artifacts and analyzing their effect on human behavioral attitudes. In *SMC*, 1999.
24) C. Breazeal and B. Scassellati. A context-dependent attention system for a social robot. In *Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 1999.
25) K. Itoh, H. Miwa, M. Matsumoto, M. Zecca, H. Takanobu, S. Roccella, M.C. Carrozza, P. Dari, and A. Takanishi. Various emotional expressions with emotion expression humanoid robot we-4rii. In *TExCRA*, 2004.
26) H. Kozima and H. Yano. A robot that learns to communicate with human caregivers. In *EpiRob*, 2001.
27) 長井志江, 浅田稔, 細田耕. ロボットと養育者の相互作用に基づく発達的学習モデルによる共同注意の獲得. 人工知能学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 122–130, 2003.
28) Y. Yoshikawa, K. Shinozawa, H. Ishiguro, N. Hagita, and T. Miyamoto. Impression conveyance with responsive robot gaze in a conversational situtation. In *RO-MAN*, 2006.
29) 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, Vol. 14, No. 5, pp. 677–685, 1996.
30) T. Tojo, Y. Matsusaka, T. Ishii, and T. Kobayashi. A conversational robot utilizing facial and body expressions. In *SMC*, 2000.
31) B. Mutlu, J. K. Hodgins, and J. Forlizzi. A storytelling robot: Modeling and evaluation of human-like gaze behavior. In *Humanoids*, 2006.
32) T. Yonezawa, H. Yamazoe, A. Utsumi, and S. Abe. Gazeroboard: Gaze-communicative guide system in daily life on stuffed-toy robot with interactive display board. In *IROS*, 2008.
33) M. Yamamoto and T. Watanabe. Relationships between the utterance of emphatic phrase

and the following motions and actions for a speech-driven embodied interaction system. In *HCI*, 2005.

34) M. Yamamoto and T. Watanabe. Time lag effects of utterance to communicative actions on cg character-human greeting interaction. In *RO-MAN*, 2006.

35) M. Jindai, T. Watanabe, S. Shibata, and T. Yamamoto. Development of a handshake robot system for embodied interaction with humans. In *RO-MAN*, 2006.

36) 大野慎吾, 稲葉毅. 人間とロボットの共創動作システムに関する研究－ロボットのインピーダンス調整による握手動作の誘導－. In *Robomec*, 2005.

37) 春日智史, 一藁武史, 橋本稔. 神経振動子を用いた人間とロボットの握手-制御実験と評価-. In *Robomec*, 2005.

38) A. Yamazaki, K. Yamazaki, Y. Kuno, M. Burdelski, M. Kawashima, and H. Kuzuoka. Precision timing in human-robot interaction: coordination of head movement and utterance. In *CHI*, 2008.

39) 山岡史享, 神田崇行, 石黒浩, 萩田紀博. 情報提示ロボットのための立ち位置モデル. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 7, pp. 108–116, 2009.

40) 怡土順一. ヒューマノイドロボットのためのマルチモーダルインタラクションに関する研究. PhD thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 2008.

41) 中川佳弥子, 篠沢一彦, 松村礼央, 石黒浩, 萩田紀博. ヒューマノイドロボットの subtle expressions による感情モーション修飾手法. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 41–50, 2010.

42) 小松孝徳. 視覚的な subtle expressions からのコンピュータの態度推定. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 8, No. 1, pp. 167–175, 2006.

43) C. Breazeal, A. Wang, and R. W. Picard. Expressions with a robotic computer: body, affect and cognition interactions. In *HRI*, 2007.

44) N. F. Troje. *Retrieving information from human movement patterns*. Oxford University Press, 2008.

45) K. Perlin. Layered compositing of facial expression. In *SIGGRAPH*, 1997.

46) 広瀬茂男, 横井一仁. 4 足歩行機械の踏み換え歩容に関する研究. 日本ロボット学会, Vol. 4, No. 4, pp. 26–35, 1986.

47) Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. The intelligent asimo; system overview and integration. In *IROS*, 2002.

48) 柴田諭, 猪岡光. 評価尺度法によるロボット運動の心理的評価. 人間工学, Vol. 31, No. 2, pp. 151–159, 1995.
49) 笹原郁夫, 花島直彦, 疋田弘光, 山下光久. ロボット動作特徴量による心的負担度の式表現について. 第 17 回　計測自動制御学会北海道支部シンポジウム, 2002.
50) D. Kulic and E. Croft. Anxiety detection during human-robot interaction. In *Intelligent Robots and Systems*, 2005.
51) 池浦良淳, 大塚英樹, 猪岡光. 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察. 人間工学, Vol. 31, No. 5, pp. 355–358, 1995.
52) 小川鉱一, 森政弘, 平井明樹夫, 土屋謙一郎, 湯原博光. ものの動きに関する感情分析. 人間工学, Vol. 25, No. 4, pp. 243–251, 1989.
53) 中田亨, 佐藤知正, 森武俊. 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. 104–111, 2001.
54) 中岡慎一郎, 中澤篤志, 横井一仁, 池内克史. シンボリックな動作記述を用いた舞踊動作模倣ロボットの実現. 信学技報, Vol. 103, No. 392, pp. 55–60, 2003.
55) 河潤秀, 油田信一. 屋内環境を自律的にナビゲーションする平行二輪倒立振子型自立移動ロボットの分散機能アーキテクチャによる実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 238–248, 1996.
56) T. Miyashita and H. Ishiguro. Human-like natural behavior generation based on involuntary motions for humanoid robots. *In International Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 48, No. 4, pp. 203–212, 2004.
57) M.D. Charny. Psychosomatic manifestations of rapport in psychotherapy. *Psychosomatic Medicine*, Vol. 28, No. 4, pp. 305–315, 1966.
58) C. Nagaoka, M. Komori, T. Nakamura, and MR. Draguna. Effects of receptive listening on the congruence of speakers' response latencies in dialogues. *Psychological Reports*, Vol. 97, No. 1, pp. 265–274, 2005.
59) 武藤剛, 三宅美博. 人間-人間協調歩行系における共創出プロセスの解析. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 5, pp. 554–562, 2004.
60) 村上宣寛, 村上千恵子. 主要 5 因子性格検査ハンドブック. 学芸図書, 2001.
61) 末永俊郎. 社会心理学研究入門. 東京大学出版会, 1987.
62) 光永法明, 宮下善太, 宮下敬宏, 石黒浩, 萩田紀博. コミュニケーションロボット robovie-iv の開発とオフィス環境での日常対話. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6,

pp. 822–833, 2007.

63) T. Shibata, T. Mitsui, K. Wada, and K. Tanie. Subjective evaluation of seal robot: Paro - tabulation and analysis of questionnaire results. *Jour. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 13–19, 2002.

64) Y. Ha and S. Yuta. Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum. In *IROS*, 1994.

65) 三菱重工業. wakamaru. http://www.mhi.co.jp/kobe/wakamaru/.

66) TOYOTA. トヨタパートナーロボット. http://www2.toyota.co.jp/jp/tech/robot/p_robot/.

67) DIAMOND ハーバード・ビジネスレビュー編集部. 「説得」の戦略. ダイヤモンド社, 2006.

68) M. Kuebnert. 議論に絶対負けない法. イースト・プレス, 2010.

謝　辞

本論文は著者が大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです．本研究を行うにあたって，多くの方々のご指導・ご支援を頂きました．ご指導・ご支援を頂いた皆様に感謝の意を表します．

石黒浩 教授（大阪大学大学院工学研究科，基礎工学研究科）には，指導教官として多大なご指導を頂きました．また，ATR 知能ロボティクス研究にて研究活動の場を与えて頂きました．著者が博士前期・後期課程に在籍中はもちろんのこと，単位修得済み退学後も大変貴重なご指導を頂きました．心から御礼申し上げます．

浅田稔 教授（大阪大学大学院工学研究科），中西英之 准教授（大阪大学大学院工学研究科）には本学位論文の副査を快く引き受けて頂き，また論文に対する的確なご指摘・ご指導を頂きました．深く感謝いたします．

宮下敬宏 室長（ATR 知能ロボティクス研究所）には，ATR 知能ロボティクス研究所での直属の上司として，また本学位論文の副査ととして多大なご指導を頂きました．平日の日中のみに留まらず，夜中まで長時間の議論や，休日に出社頂いての議論・ご指導を頂きました．宮下室長からの厚く的確なご指導は心に残っております．また，ATR での研究プロジェクト，愛地球博や CEATEC や大阪市立科学館やユニバーサルシティウォークや ATC などでも一緒にお仕事をさせて頂き，大変貴重な体験もさせて頂きました．本当にありがとうございます．

当時，ATR 知能ロボティクス研究所で研究員をされていた光永 法明 准教授（大阪教育大学）には，研究の議論と共にロボット開発の様々な知識を与えて頂きました．ここに深く感謝いたします．

著者が博士前期・後期課程の 5 年間に渡り研究活動を行った ATR 知能ロボティクス研究所の皆様には大変お世話になりました．萩田紀博 所長には ATR での研究活動を行うにあたり，自由な活動の場を頂きました．深く感謝いたします．篠沢一彦室長には，ロ

ボットの評価手法に関して多くの有意義なご助言を頂きました．吉川雄一郎 博士（当時，ATR 研究員．現在，大阪大学大学院基礎工学研究科講師），小泉智史 研究員，塩見昌裕 研究員，Dylan F. Glas 研究員，佐竹聡研究員，坂本大介 博士（当時，ATR 研修研究員．現在，東京大学大学院情報理工学系研究科助教）には公私共々多くのことを教えていただきました．ありがとうございました．

また，石黒研究室の皆様には大変お世話になりました．特に，同期の山岡史享氏，田近太一 氏，野田智之 氏，力石武信 氏，嶋田倫博氏とは，同じ道を志すものとして様々な場面で叱咤激励を頂きました．彼らのおかげで，楽しい研究生活が送れました．深く感謝します．

最後に，博士課程での研究及び論文執筆において，常に支援をしてくれた家族に心から感謝いたします．

研究業績リスト

受賞

1) 情報処理学会関西支部 平成 17 年度 学生奨励賞

原著論文

2) 垣尾政之, 宮下敬宏, 光永法明, 石黒浩, 萩田紀博:「ヒューマノイドロボットの揺れ動作が人の動作と印象へ与える影響」, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.485-492, 2008
3) 垣尾政之, 宮下敬宏, 光永法明, 石黒浩, 萩田紀博:「倒立振子移動機構を持つ人型ロボットの反応動作の違いが人に与える印象の変化」, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.9, pp.52-61, 2010

国際会議論文

4) M. Kakio, T. Miyashita, N. Mitsunaga, H. Ishiguro, N. Hagita, Natural Reflexive Behavior for Wheeled Inverted Pendulum Type Humanoid Robots, 15th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2006), pp.451-456 Sep. 2006.
5) M. Kakio, T. Miyashita, N. Mitsunaga, H. Ishiguro, N. Hagita, How does a Balancing Motion of a Humanoid Robots Affect a Human Motion and Impression? 2006 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2006), pp.252-257 Dec. 2006.
6) K. Shinozawa, T. Miyashita, M. Kakio, N. Hagita, User specificatoin method and humanoid confirmation behavior, 2007 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2007), Dec. 2007.

国内会議論文

7) 垣尾 政之, 宮下 敬宏, 石黒 浩, 小暮 潔, 萩田 紀博:「同軸 2 輪倒立振子型ヒューマ

ノイドロボットの人への印象を考慮した反射行動の実現」， ロボティクス・メカトロニクス講演会，2P1-N-041，（2005）

8) 垣尾 政之，宮下 敬宏，石黒 浩，小暮 潔，萩田 紀博：「ヒューマノイドロボットのバランス動作に基づく振動の対人効果の評価」，日本ロボット学会第 23 回学術講演会予稿集， 2H13， （2005）

9) 垣尾 政之，宮下 敬宏，石黒 浩，小暮 潔，萩田 紀博：「ヒューマノイドロボットのバランス動作に基づく振動が人に及ぼす影響」， 情報処理学会関西支部支部大会講演論文集， pp.105-108， （2005）（学生奨励賞）

10) 垣尾政之，宮下敬宏，光永法明，石黒浩，萩田紀博：「人に与える印象及び動作に与える影響を考慮したヒューマノイドロボットの動作生成」，情報処理学会関西支部支部大会講演論文集，pp.135-138，Oct. 2006.

11) 垣尾政之，宮下敬宏，光永法明，石黒浩，萩田紀博：「ヒューマノイドロボットの反応動作に対する人の印象」，電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ ネットワークロボット時限研究会 H18 年度第 2 回研究会，Nov. 2006.

12) 垣尾政之，宮下敬宏，光永法明，石黒浩，萩田紀博，ヒューマノイドロボットを見るときの人の動作変化と印象形成，日本ロボット学会第 25 回学術講演会，予稿集，1E34，Sep. 2007.

特許

13) 垣尾 政之，宮下 敬宏，神田 崇行，石黒 浩「ロボットシステム」特開 2008-80431

招待講演

14) 垣尾 政之,「ヒトと触れ合えるロボットの可能性」，主題：「人にとって自然なコミュニケーション動作の実現」，副題：「倒立振子型ヒューマノイドロボットのバランス動作が人に与える印象及び影響の評価」，オープンディスカッション，奈良女子大学附属中等教育学校 SSH スーパー理系養成プログラム・ロボット研修会，奈良女子大学付属中等教育学校（奈良）， 2006 年 3 月.