

# 卒業論文

自律行動との対話的切り替え機構を備えた  
遠隔操縦ロボットの研究

平成17年2月4日 提出

指導教員 稲葉雅幸 教授  
稲邑哲也 講師

東京大学 工学部 機械情報工学科  
学生証番号 30249 古城直樹



# 目次



第1章	序論	7
1.1	研究の背景	9
1.2	研究の目的	9
1.3	本論文の構成	10
第2章	ヒューマノイドにおける遠隔操縦と自律行動	11
2.1	遠隔操縦型ヒューマノイド	13
2.1.1	遠隔操縦型ヒューマノイドの重要性	13
2.1.2	ヒューマノイドにおける遠隔操縦の課題	13
2.2	自律行動と遠隔操縦	16
2.2.1	自律行動と遠隔操縦の共存	16
2.2.2	遠隔操縦から自律行動へ	18
2.3	本研究の位置付け	20
2.3.1	遠隔操縦型ヒューマノイド研究の流れ	20
2.3.2	対話型ヒューマノイド	21
第3章	遠隔操縦と自律行動の対話的な切り替え	23
3.1	主導権の切り替え機構と対話	25
3.2	操縦の正しさの確信度	27
3.2.1	障害物回避問題	27
3.2.2	統計的行動決定	28
3.3	自律行動の評価	31
3.3.1	達成可能性の評価	32
3.3.2	情報提示による対話的な問題解決	33
第4章	ヒューマノイドシステム HRP-2W	35
4.1	はじめに	37
4.2	HRP-2W システムの構成	37
4.2.1	ハードウェア構成・概観	37
4.2.2	ソフトウェア構成	40
4.2.3	HRP-2W の利点と問題点	41

4.3	HRP-2W 改良部分 . . . . .	43
4.3.1	センサ等細部改良 . . . . .	43
4.3.2	レーザーレンジファインダ取り付け . . . . .	44
<b>第 5 章</b>	<b>自律行動との切り替え機構を備えた遠隔操縦システムの構成</b>	<b>47</b>
5.1	システム全体の構成 . . . . .	49
5.2	遠隔操縦システム . . . . .	51
5.2.1	3次元位置姿勢入力デバイス . . . . .	52
5.2.2	GUIの利用 . . . . .	56
5.2.3	音声認識 . . . . .	57
5.2.4	ゲームパッドによる操縦システム . . . . .	59
5.3	センサモジュール . . . . .	62
5.3.1	レーザーレンジファインダ (LRF) . . . . .	62
5.3.2	ステレオカメラによる視覚 . . . . .	65
<b>第 6 章</b>	<b>自律行動との切り替え機構を備えた遠隔操縦実験</b>	<b>69</b>
6.1	はじめに . . . . .	71
6.2	LRF を用いた対話的な走行実験 . . . . .	71
6.2.1	遠隔操縦の評価機構 . . . . .	72
6.2.2	実験結果・考察 . . . . .	74
6.3	遠隔操縦と自律行動の組み合わせによるタスク実現 . . . . .	78
6.3.1	自律行動の評価機構 . . . . .	78
6.3.2	実験結果・考察 . . . . .	79
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>83</b>
7.1	結論 . . . . .	85
7.2	今後の課題 . . . . .	86
	謝辞	88
	参考文献	92

# 第1章

## 序論





## 1.1 研究の背景

ヒューマノイドロボット（以下、ヒューマノイド）の研究・開発は近年盛んに行われており、特にエンターテインメントの分野において商用化が進み、その活躍は目ざましい[1][2]。また視覚認識機能や音声認識・合成機能、プランニングなどを用いてヒューマノイドの自律行動能力を高める試みも盛んに行われてきている[3]。

しかし、現状の自律行動能力はまだ限定的なものであり、エンターテインメント分野で必要とされる単なるパフォーマンスに留まらず、実社会で本当に使えるヒューマノイドロボットを目指すには、まだまだ多くの課題が存在する。

ワールドモデルの問題はその一つである。ヒューマノイドが自律行動を行うには、環境の情報を内部にワールドモデルとして持っている必要がある。そのため複雑な環境中で動作を行ったり、人や動物など不確定な要素が絡んだりする場合には、正確なモデルを構築するために高度かつ高コストの視覚処理と記憶管理が必要となってしまう。

また、判断の主体をヒューマノイドのみとするには、高度な人工知能が要求されるため、より高度な作業を行わせるためには、判断者としての人の存在も欠かせない。

以上から、非整備環境における非定型的な作業への応用を考えるとヒューマノイドを自在に遠隔操縦できることが欠かせない、ということが言える。

ヒューマノイドにおける遠隔操縦に関しても、すでに多くの研究がなされている[4]。ヒューマノイドは20～30程度の多自由度を有するため、その全てを操縦するには操作コックピットも大規模なものになってしまう。また、多自由度のヒューマノイドを常に人が操縦するのは、操作者の負担が大きい。

## 1.2 研究の目的

上記の背景から本研究では、自律行動と遠隔操縦を巧みに共存させることにより、簡易で汎用的なヒューマノイドシステムの構築を目指す。

遠隔操縦と自律行動を組み合わせることに関しては、すでに様々な研究が行われ、いくつかの理論が提案されている[5][6][7][8]。特に宇宙ロボティクスにおいて、これらの研究は盛んである[9][10]。

一方、自律行動と遠隔操縦の組み合わせをヒューマノイドにおいて実現している研究もいくつか行われている[11][12][13]。これらの研究を踏まえた本研究の位置づけについては、第

2章で述べることにする。

本研究では、遠隔操縦ヒューマノイドが、今後どう発展していくべきかを体系的にまとめあげ、その第一歩として、自律行動と遠隔操縦の対話的切り替え機構を構築することを目的とする。そして、その際に必要となる主導権の切り替えやその評価機構、さらにはそこで生じるべき対話 (interaction) について述べ、ヒューマノイドを用いて実装実験を行い、その有効性を検討していく。

### 1.3 本論文の構成

本論文は7章から成る。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を説明する。

第2章「ヒューマノイドにおける遠隔操縦と自律行動」では、遠隔操縦ロボットの現状と問題点を述べた上で、今後どういった発展をすべきかについて、議論を深める。特に遠隔操縦から如何に自律行動へと発展させていくかを述べる。その後、全体の流れにおける本研究の位置付けを説明する。

第3章「遠隔操縦と自律行動の対話的な切り替え」では、第2章での議論に基づき、本研究で提案する遠隔操縦と自律行動の対話的な切り替え手法について述べる。まず、切り替えに必要となる主導権の所在について議論し、操縦及び自律行動の評価機構を提案する。

第4章「ヒューマノイドシステム HRP-2W」では、実験にあたり利用する車輪型ヒューマノイド HRP-2W のシステムについて、ハードウェア、ソフトウェアの両面から説明する。さらに、行動の範囲を広げるために加えた改良について述べる。

第5章「自律行動との切り替え機構を備えた遠隔操縦システムの構成」では、自律行動と遠隔操縦を切り替えるソフトウェア機構について説明する。まず概要を述べた後、構築した遠隔操縦システム、自律行動システム、そして切り替え機構の実装について、それぞれ詳細に説明する。

第6章「自律行動との切り替え機構を備えた遠隔操縦実験」では、作成したシステムを用いた総合的な実験とその結果を示し、本研究のシステムの有用性を検討する。

第7章「結論」では、本研究を通して明らかになったことをまとめ、本論文の結論を述べる。また、今後の課題と展望について述べる。

## 第2章

### ヒューマノイドにおける遠隔操縦と自律行動



## 2.1 遠隔操縦型ヒューマノイド

### 2.1.1 遠隔操縦型ヒューマノイドの重要性

産業用ロボットはもちろん、ヒューマノイドにおいても、ロボットの自律行動能力を高めようという試みは活発に行われている。視覚情報やレーザセンサ情報により環境マップを作成したり、プランニングにより行動を生成したり、音声認識・発話機能とデータベースを用いて人と自律的に対話を行ったり [14] と、様々な分野で多くの成果が出ている。

しかし一方で、自律行動型ヒューマノイドには大きな問題が残っている。それは、「判断主体としての頭脳が必要」ということである。

どう行動するかの方針を決め、その判断に従って臨機応変に様々な行動・動作を実現していくという、いわゆる「知能」を実現することは非常に難しい。ヒューマノイドは、その形状から考えても、必然的に人の脳と同程度の知能レベルを目指すべきであるし、逆に言えば、ある程度の知能レベルがなければ自律行動ロボットとしての実用性には乏しい、と言わざるを得ない。しかし、現状では幼稚園児並みの知能（外界と活発にインタラクションを行い、学習し、外部状況と自身の心理に従いそれなりの行動を自発的に起こせるレベル）を実現することですら達成できているとは言い難い。

そこで重要となってくるのが、遠隔操縦型ヒューマノイドである。単純に言って遠隔操縦型ヒューマノイドの利点は、「判断主体としての頭脳は人間が担当」できる点である。

遠隔操縦型では、臨機応変で高度な知能を要する作業を、人間が肩代わりするかたちになるため、実用性の高いシステムを作ることができる。ヒューマノイドの運動機能自体は、年々向上されてきているので、社会に役立つシステムが構築される見込みが、完全自律型ヒューマノイドよりも、はるかに高い。Fig.2.1 に、自律行動型ヒューマノイドと遠隔操縦型ヒューマノイドの違いを示す。

### 2.1.2 ヒューマノイドにおける遠隔操縦の課題

アームのみから成るような産業用ロボットとは異なり、ヒューマノイドロボットで遠隔操縦を行う場合には、ヒューマノイドだからこそ考えるべき問題がいくつかある。それを踏まえると、ヒューマノイドを遠隔操縦するシステムを構築するにあたり考慮に入れなければならない問題点として、以下が挙げられる。

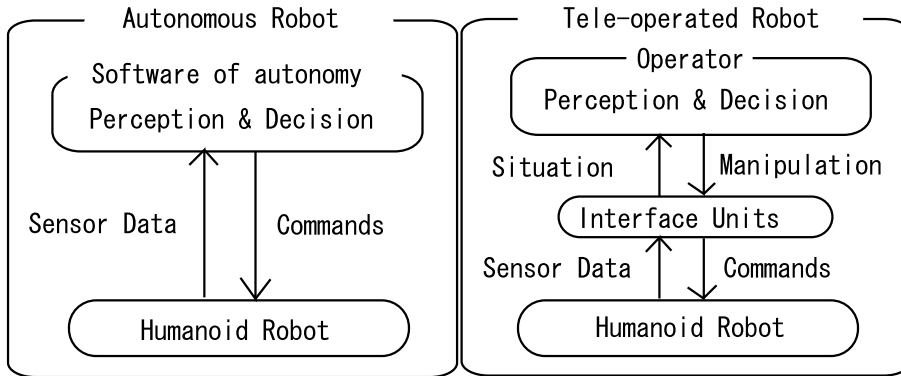


図 2.1: Comparison between Autonomous and Tele-operated Humanoid

#### 1. バランス制御

一般に2足歩行型のヒューマノイドにおいては、重心の高さに比べて接地面積が狭く不安定であるため、操縦時においても、安定性に配慮した動作生成を行わなければならない。

#### 2. 自由度の多さ

少ないものでも20自由度以上、多いものでは30自由度以上の超多自由度を有する。これらの自由度を全て独立に動かすには、人の全身の動きを取得できるモーションキャプチャなどの特殊な操縦システムを構築する必要がある。

#### 3. センサの多さ

カメラ画像、力センサ、距離センサ、触覚センサなど、センサ群が多いのもヒューマノイドの特徴である。これらを全体的確に人に伝える手法をとるならば、VR(Virtual Reality)を駆使した高度な情報提示システムが求められる。

#### 4. 操縦システムの大型化

自由度の多さ、センサの多さとも関係するところだが、単純に全ての情報を人に提示し、全ての関節を人が指示して動かすようなシステムを目指すならば、必然的に、操縦システムの大型化は避けられない。

#### 5. 通信路の狭さ、時間遅れ

一般に遠隔地からの操縦を想定する場合には、通信路の狭さと時間遅れが大きな問題となる。このため、動作レベルでの直接操作や、センサからの生データをそのまま受け取るような手法では、操作性が失われる。したがって、簡単な指示による操縦動作を実現するシステムや、情報を整理して提示するシステムが求められる。この問題に関する研究は、特に宇宙分野で活発に行われている [10]。

これらの問題点のうち、バランス制御については、本研究で利用するヒューマノイドの下半身が車輪型であるため、考慮に入れる必要がない。また本研究では、活動環境として、近くにコックピットシステムが存在し、通信路の狭さと時間遅れが問題にならない状況を想定している。このため、これらの問題解決手法については、宇宙ロボティクス分野に一任し、本研究では考慮に入れられないこととする。

自由度の多さとセンサの多さによる操縦システムの大型化に関しては、2つの方向性がありうると考える。

一つは、システム自体は大型でもよいので、あらゆる自由度を意のままに操ることと、センサからの情報をもれなく操縦者に伝えることを優先する、完全操縦システムを目指す方向である。文献 [12] では、マスタアーム、マスタフット、HMD(Head Mounted Display)、立体音響装置、さらには体制感覚の提示まで含めたスーパーコックピットと呼ばれるシステムを構築している。このシステムでは、装置自体は大きいですが、高い臨場感と操作性を実現しており、この方向性は決して過渡的ではなく、重要な研究分野となるであろう。

もう一つの方向性は、多少操作性と臨場感に欠けてもよいから、可搬性のある簡単な操縦システムを構築することである。文献 [15] では、操作対象を適宜切り替えることで、2本のジョイスティックのみを用いたコンパクトな操縦システムを実現している。このように装置を小型化し、簡易で可搬性の高いシステムを構築することは、一見すると、操作性や作業の高度化とはトレードオフの関係にあるように思われる。しかし、情報を整理して提示するシステムや、自律行動により遠隔操縦をサポートするようなシステムを構築することで、解決が可能となる。

これを踏まえ、次節では、自律行動と遠隔操縦をいかに共存させていくべきか、について述べる。

## 2.2 自律行動と遠隔操縦

### 2.2.1 自律行動と遠隔操縦の共存

前節で述べたように、遠隔操縦システムにおいて、的確に自律行動を組み合わせることで、操作性を拡張することができる。その最大の理由は、ロボット側から操縦者に情報を送る場合、必ず情報の減少が起こるということである。

例えば、ロボットからのカメラ画像は、人が直接目で見たものとは異なるため、よほどの確かな画像提示システムがない限り、3次元的な環境把握は難しく、その意味で情報量が落ちている。したがって、手を伸ばして物を取るなど、タスクによっては自律機能によって実現した方がよい場合が出てくる。

また、バランス制御なども同様で、人が操縦により実現することは熟練を要するため、ロボットが自律的に行った方が圧倒的に便利である。これも、体性感覚のような情報を取得し人に伝えることが難しいことに起因する。

したがって、ロボットが有する様々な情報（センサ値、センサ値をもとに算出した様々なデータ、姿勢など）を、全て人に送って判断させるのではなく、ある程度ロボットの側で自律的に判断させよう、というのはごく自然な発想である。

実際、自律行動と遠隔操縦をいかに組み合わせていくかについては、古くから多くの研究がなされている [5][6][16][17]。これらの研究を見ると自律行動と遠隔操縦を共存させるにあたって、以下のように大きく 2 つの方針があるように思われる。

#### 自律行動と遠隔操縦でタスクを分担

スーパーバイザリ方式のように、作業の計画、判断のような知識レベルの命令は人が行い、動作レベルの作業実行はロボットに任せる、というように人とロボットではそれぞれ得意分野があるのだから、お互い得意な部分を担当すべきである、という考え方である。マスタースレーブ型からヒューマノイドに至るまで、ほとんどの遠隔操縦システムが少なからず、この方針を組み込んでおり、組み合わせ手法としては非常に有効であることがうかがえる。

最近の研究としては、文献 [11][12] が挙げられる。これらはともに、ヒューマノイドにおいて意図した部分の操作を人が担当して、それ以外の無意識の動作（バランス制御など）は自律的に行わせる、というタスク分担型での全身動作生成を行っている。



### 自律行動と遠隔操縦でタスクを共有

もう一つの方針は、自律行動と遠隔操縦でタスクを共有していこう、というものである。これを早くから提唱したのが、文献 [5] の Shared Autonomy である。

文献 [5] によると Shared Autonomy とは、遠隔作業システムにおいて、以下の2つを指すものだという。

1. 人間だけで行っていた作業の一部をロボットの自律的実行機能を用い、人間とロボットが共同するような形で作業を行う形態
2. ロボットだけで自律的に行わせようとしていた作業の一部を人間が負担し、ロボットと人間が共同するような形で作業を行う形態

このように、操縦者とロボットが動的に役割を交代させて、協同作業を行うシステムとしては、文献 [18] で紹介されている MEISTER システムなどがある。

このような手法は、宇宙など本格的に時間遅れが問題となる場合には適用が難しいが、そうでない場合には非常に有効に働く。主な利点を挙げると、以下の通りである。

1. 実行できるタスクの範囲が広がる

人間とロボットがそれぞれ得意な要素を臨機応変に出し合って作業を遂行できるため、人の操縦だけ、もしくはロボットの自律行動機能だけ、ではできないようなタスクを達成することができる。

2. 人の操作ミス及びロボットの誤動作を低減できる

ロボットの誤動作と書いたが、暴走という意味ではなく、プログラム通りに動いていても、認識結果が間違えていたり、環境が変化したりすることで、予期せず衝突が起こる場合を指している。このシステムは、言わば人とロボットで作業を二重管理するようなものであるから、それぞれにミスを低減させる効果を持つことになる。

3. 教示へとつながる

ロボットも操縦者も同じ役割を果たすことができるので、人が操縦して見せたことをロボットにやらせたり、という教示へと発展させることができる。逆に、教示をするためには、タスクを共有する、このようなシステムが必要となる。

タスクを分担するか、共有するか、によるシステム構成の違いを Fig.2.1 に示す。タスクを分担する場合は、人が完全に主導権を握って、自律行動機能に命令を出すかたちだが、タスクを共有する場合には操縦者と自律行動機能がそれぞれに命令を出そうとする、まさに協同作業のシステムである。

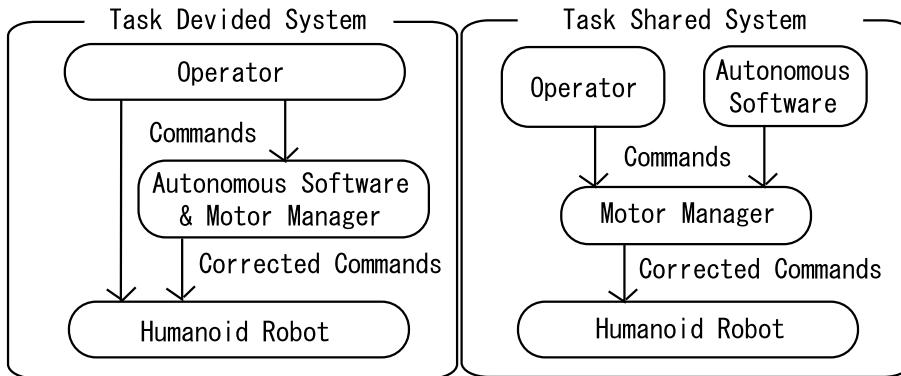


図 2.2: Comparison between task divided and task shared system

タスクの分担と共有は決して排他的なものではなく、作業環境によって、両方の側面を持つのがよい。本研究では本節での考察を踏まえて、特に遠隔操縦と自律行動でタスクを共有する、後者に焦点をあて、操縦者とヒューマノイドが密に関わりながらタスクを達成させる遠隔操縦システムを構築した。

### 2.2.2 遠隔操縦から自律行動へ

次に、遠隔操縦と自律行動を共存させることで可能となってくる教示・学習について考察する。

教示と学習を辞書で調べると、

- 教示：教え示すこと。
- 学習：学び習うこと。過去の経験の上に立って、新しい知識や技術を習得すること。

となっており、教示は教える側の立場からの言葉、学習は教わる側の立場の言葉、と捉えることができる。本論文では、この二つを区別して考える。

文献[19]では、自律行動ロボットにおける学習について「learning as a method of improving its performance」と述べており、強化学習によってロボットの自律行動機能が向上するとし

ている。しかし、この強化学習による手法は、微調整による自律行動機能の修正・改善に関しては非常に有用だが、新しい行動を獲得するような、抜本的な行動機能の拡張は難しい。また、適切な報酬を与えないと学習が思った方向に進まないため、様々な状況に応じて適切な報酬を定めることは容易ではない。

そこで重要となってくるのが、ロボットの学習に人が介入する、教示の考え方である。Fig.2.3 に示すように、ロボットの学習ループに人が介入することで、臨機応変で、かつ人の思い通りの方向へ学習を進めることができる。

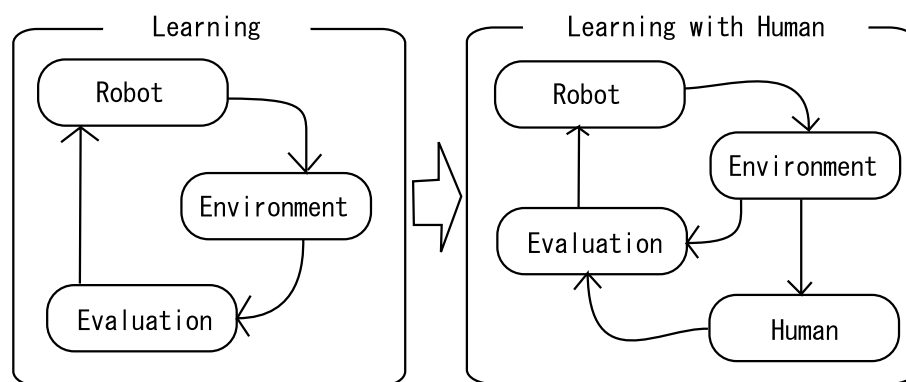


図 2.3: Comparison between the system of Learning and Learning with Human

このような、ロボットの学習に人が介入するシステムの典型が、遠隔操縦による手法であると考えられる。前節で述べたように、操縦者とロボットが同じレベルでタスクを共有するシステムを構築できれば、操縦や音声での対話を通じて教示を行うことが可能となる。

教示による学習には、以下に示すように、いくつかの段階がある。

#### 1. Teach and Play back

姿勢及び一連の動作を記憶し、そのまま再現する。環境が変わった場合に臨機応変な対応は望めない。原始的ではあるが、有用な教示手法。

#### 2. 動作手順の学習

人の操縦から動作手順を学習する。これにより、状況に応じてタスクを完遂できる。例えば、物をつかんで移動させる場合、対象の3次元位置を認識して、そこに手を伸ばし、掴んで持ち上げ、移動させるという一連の流れを、学習する。

### 3. 動作目的の学習

人の操縦から，動作の意図を理解し学習する．動作手順も臨機応変に組み立てる．

これ以外にも，いつどのタイミングで学習するかも，教示の大事な要素の一つである．人が指定したときに学習を行うレベルから，常に学習をするレベルまで考えられる．

本研究では，教示による学習までは扱わないが，最初の段階である，Teach and Play back に関して，姿勢レベル・動作レベルでの実装を行い，先への展望を示すこととした．

## 2.3 本研究の位置付け

### 2.3.1 遠隔操縦型ヒューマノイド研究の流れ

2.1.2 節で述べたように，遠隔操縦型ヒューマノイドにおいては，あらゆる感覚を操縦者に提示し，あらゆる自由度を人が操縦することを目指す，完全遠隔操縦型と，自律行動機能との共存による簡易な操縦システムがある．どちらも重要な方向性ではあるが，汎用性の高さと機能拡張性の高さから，後者の簡易な操縦システムの構築を目指した．

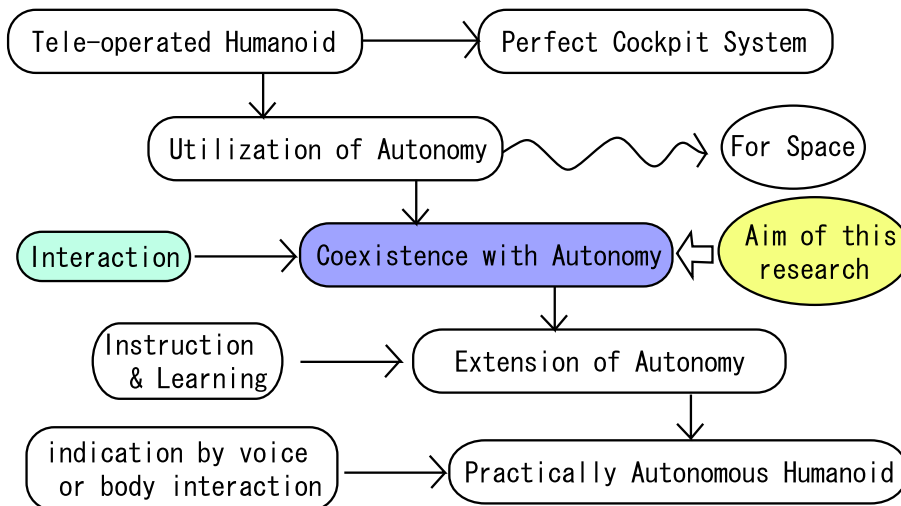


図 2.4: The road map of Tele-operated Humanoid

また，自律行動との組み合わせによる簡易な操縦システムは，教示により自律行動機能のカスタマイズ，拡張が可能となり，最終的には操縦手法を音声や外部からのインタラクショ

ンに置き換えることで、事実上の完全自律行動ロボットへとつながるシステムであると考えられる。これらの流れを Fig.2.4 に示す。

時間遅れが大きな問題となる宇宙ロボティクスなどの分野では、自律行動を利用するまでに留まるが、本研究では時間遅れが問題とならない、近距離にコックピットが存在する場合を想定しており、教示へとつながる基礎として、自律行動との共存に焦点を当てる。

### 2.3.2 対話型ヒューマノイド

本研究で扱う、遠隔操縦と自律行動の共存では、操縦者とヒューマノイドが密接にかかわりあうことが大事である。

体操競技でバク転を教えるときを例にとり、人がどうやって学ぶかを見てみると、以下の手順となる。

1. 指導者がやってみせる
2. 補助してあげて、相手の体を使ってバク転させる
3. どうを改善すべきかを話し合う
4. 補助の比重を少なくしていき、一人でできるようになる

ここで大事なことは、適切に教示を行うには、教わる側もなぜうまくいかなかったか、どういう情報が足りなかったかを考え、評価して教示者に伝えることである。

先に述べた Shared Autonomy の考え方では、確かにバッチ処理的に同じ作業を操縦者とロボットで行わせることはしているが、人の介入ポイント、ロボットの役割分担は、基本的に人の判断によるものである。しかし、先のバク転の例でもわかるように、操縦者が指示を出す立場の場合は、ヒューマノイド側が適切な情報を提示した上で、サポートを求めるべきである。つまり、ヒューマノイドは自身の行動を評価する機構を持つべきであると言える。

また、ヒューマノイドは多くの情報を持っているが、本研究の目指す簡易な操縦システムでは、全ての情報を操縦者に流すのではなく、適切に処理し、整理して提示する必要がある。ヒューマノイドは操縦データと環境情報を照らし合わせて、人の操縦が正しいかどうかを評価する機構を持つべきである。そして、評価結果に応じて、行動修正の提案を行ったり、緊急性が高い場合には、ヒューマノイド側の判断で主導権を奪う（基本的には、緊急停止を想定）べきであると考えられる。

以上のように、遠隔操縦型ヒューマノイドにおいて自律行動を共存させる場合には、遠隔操縦と自律行動をそれぞれ評価する機構と、それを対話的に操縦者に伝えることで相互理解を深めることが重要である。

次章では、自律行動と遠隔操縦の切り替えの際に生じる、主導権の切り替えについてまとめた後、この評価機構について詳述する [20]。

## 第3章

### 遠隔操縦と自律行動の対話的な切り替え





### 3.1 主導権の切り替え機構と対話

自律行動と遠隔操縦が同じレベルで行動命令を出せるシステムを構成する場合、必然的に、自律行動と遠隔操縦で指令したい命令が衝突する可能性を考慮に入れなければならない。

命令が衝突すると、通常は操縦者の判断が優先されるが、常に主導権が操縦者にあったのでは、結局は遠隔操縦に他ならない。適切に遠隔操縦と自律行動を共存させるには、状況によってはヒューマノイドが主導権を握り、ヒューマノイド側の判断で行動が決定されるべきであるとする。

このように、操縦者とヒューマノイドのどちらが主導権を持つかも考慮に入れると、自律行動と遠隔操縦の切り替えの判断基準には、Fig.3.1のように4通り考えられる。

なお、表中の Actor とは、切り替えを行う主体者、つまりは主導権を握っているものを指し、Direction は、自律行動から遠隔操縦なのか、遠隔操縦から自律行動なのか、その切り替えの方向を示している。また、Manual, Certainty Factor, Evaluation が、切り替えを行うにあたっての判断基準である。

Direction \ Actor	Human	Humanoid
Tele-operated to Autonomous	Manual	Certainty Factor
Autonomous to Tele-operated	Manual	Evaluation

図 3.1: Switching of Initiative

以下では、この判断基準について、4つに分けて具体例を挙げて考察する。

#### 操縦者の判断で自律行動へ切り替える

Fig.3.1 中では左上にあたる。

操縦者が、予め組み込んである自律行動機能呼び出すタイプで、ある意味操縦の一種とも言える。切り替えを行う判断の主体が人であるため、表中でも判断基準は Manual とした。

#### ヒューマノイドの判断で自律行動へ切り替える

Fig.3.1 中の右上にあたる部分である。

ヒューマノイドにおいてこの種の切り替えが起こる最も一般的な例としては、Collision Detector と呼ばれる自己干渉チェックによるものである。操縦者の行動命令が自己干渉を起こすかどうかをチェックして、自己干渉を起こす場合には、操縦命令を拒否したり停止したりする。このような場合には、主導権を握っているのはヒューマノイドである。

Collision Detector の例でもわかるように、ヒューマノイドが判断を行う場合には、何かしらの判断基準を持っている必要がある。本論文では、それを操縦の正しさの確信度 (Certainty Factor) と呼ぶ。これについては 3.2 節で詳述する。

#### 操縦者の判断で遠隔操縦へ切り替える

ヒューマノイドが自律行動を行っているときに、操縦者が割り込んで遠隔操縦に切り替えることであり、Fig.3.1 中では左下の部分である。自律行動機能が期待通りに動いていないときなどに生じる。ここでも判断基準は Manual となる。

#### ヒューマノイドの判断で遠隔操縦へ切り替える

Fig.3.1 中では右下にあたる。ヒューマノイドが自律行動を行っているときに、何らかのトラブルによって自律行動の目的であるタスクを達成できない状況で、操縦者にサポートを求める場合である。このとき、何故うまくいかなかったのかを適切に操縦者に伝えることが重要で、それを行うために、自律行動の評価 (Evaluation) 機構が必要となる。これについては 3.3 節で詳述する。

4つの切り替え基準を見てみると、操縦者が主導権を持って切り替える場合には、切り替えの向きにかかわらず特別な評価基準は必要ない。判断が人に委ねられているのだから、当然である。

しかし一方で、ヒューマノイドが主導権を持って切り替えを行う場合には、切り替えの方向によって、それぞれ評価機構が必要となることがわかる。

また、ヒューマノイドが主導権を持って切り替えを行う場合には、操縦者に状況を通知し、緊急でなければ承諾を得るべきである。つまり、ヒューマノイドは適切な情報提示を行い、それに操縦者が応答するという、操縦者とヒューマノイドのインタラクションが重要になってくると考える。

本研究では，特にヒューマノイド側が主導権を持って切り替える場合の2つの評価機構に注目し，次節以降でこれらについて詳述する．

## 3.2 操縦の正しさの確信度

ヒューマノイドが持つ全てのセンサ情報を人に伝えることは困難であるため，ヒューマノイドの方が多くの情報を持っていることが常である．これは特に簡易な操縦システムで顕著である．そこで，人が操縦をしているときに，ヒューマノイドは以下のことを常にすべきであると考えられる．

### 1. 操縦者の操縦コマンドを監視

究極的には人の意図理解を目指す，ここでは，人がどんな動作をさせようとしているかを把握することを指す．

### 2. センサ値からどう行動すべきかを考える

ヒューマノイド自身も，センサ値の状況と過去の経験から，どう行動すべきかを確信度を用いて計算する．

### 3. 行動修正の提案，実行

自身の判断と操縦命令が大きく異なるときは，操縦者に行動をどう修正すべきかを提案し，緊急性が高い場合には，ヒューマノイドの判断で行動（緊急停止や方向転換など）を決定する．

### 3.2.1 障害物回避問題

このような，ヒューマノイド自身も判断を行い，遠隔操縦から自律行動へと切り替わるシステムについては，主として障害物回避において多くの研究がなされてきた．

例えば文献 [21] では，Subsumption 手法により，衝突回避を操縦命令とは無関係に，言わば反射的に行わせている．この手法の利点は，いちいちメインプログラムに問い合わせをしないため，反応が早く，間違いなく緊急停止を行わせることができる点である．

Subsumption 手法により障害物回避を行わせる場合には，固定的に閾値を決めておいて，それを超えたら停止させたりする場合が多い．しかし，実際にヒューマノイドを行動させる

場合を考えると、Fig.3.2のように、状況によって止まるべきかそうでないかが変化するグレーゾーンが必ず存在する。

なお、Fig.3.2のGreen Zoneは障害物がなく、自由に進める状況を指し、Red Zoneは、障害物が近距離にあり、すぐさま止まるべき状況を指す。

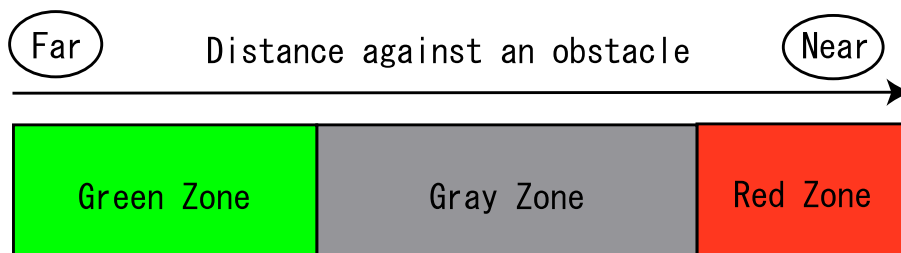


図 3.2: The gray zone exists between red and green zone

例えば、ヒューマノイドがゴミ袋を持って捨てに行くときを考える。このとき、センサの一部がゴミ袋によってふさがれ、非常に近距離に障害物を検知してしまい、閾値によるSubsumption手法では方向転換や緊急停止命令を出してしまう。

逆に、スピードを出して走っているときなどは、通常よりも遠くに障害物を検知しただけでも止まるべきである。

これらの問題を解決するために、状況によって変化するグレーゾーンでの動作は、操縦者との対話を通じて、フレキシブルに変化していくべきものである。

これを実現する手法として、本研究では稲邑らによる文献 [22] で用いられるベイジアンネットワークによる統計的な行動決定手法を利用した。3.2.2節でこの手法について説明する。なお、より詳しくは文献 [22] を参照していただきたい。

### 3.2.2 統計的行動決定

一般的な教示方法では、環境情報とロボットの内部状態に応じて、一対一対応で取るべき行動を規定する。このように形成された行動決定モデルは、環境情報と行動の関係を細かく表現できるため、複雑な環境への対応が容易である。

しかし、使用環境が変化した場合には、一から教示し直す必要があり、一度獲得した経験を再利用することは難しい。また、人間の操縦ミスがそのまま反映されたモデルが形成されてしまうという問題もある。

これらの問題を回避するためには、教示の結果を、環境情報と直接結びつけるのではなく、統計を用いて確率的に表現する手法が有効である。この手法の利点には、以下のようなものがある。

1. ロボットと人間がインタラクションを重ねた経験から、単純な統計計算により、オンラインで行動決定モデルを獲得できる。
2. ロボットが決定した行動の確からしさを確率値で表現でき、その確からしさを利用して、操縦者とロボットの対話を制御できる。
3. 統計処理により、センサノイズやユーザの操縦ミスなどの影響を抑え、未知の環境でもある程度の自律性を確保できる。

このようなモデルを構築するために、稲邑らは Bayesian Network を採用している。

### Bayesian Network

Bayesian Network とは、複数の確率変数の間の定性的な依存関係をグラフ構造によって表し、個々の変数の間の定量的な関係を条件付確率で表した、確率モデルである。

Bayesian Network のモデルでは、事象をノードとして、ノード間の依存関係は、向きを持つ有向リンクであるアークとして表現される。また、ノードには大別して2種類存在し、一つは確率変数が観測される証拠ノード、もう一つは観測された証拠から推論を行う目的の事象を意味する、仮説ノードである。モデル例を Fig.3.3 に示す。

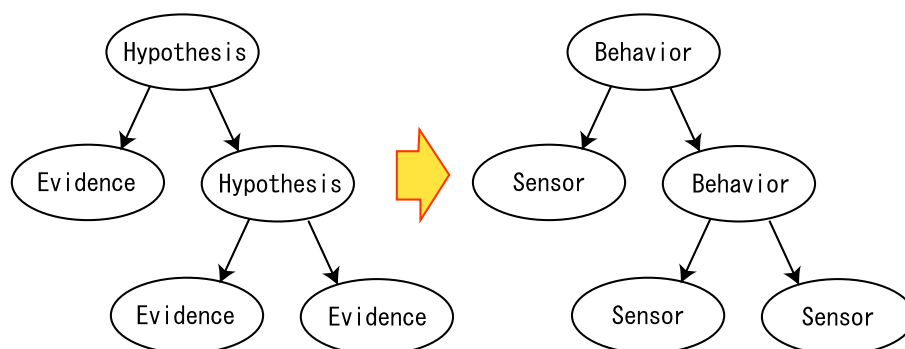


図 3.3: The model of Bayesian Network

証拠ノード  $E$  の確率変数を  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  , 仮説ノード  $H$  の確率変数を  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$  とする。仮説事象  $h_j$  が観測された時に証拠事象が  $e_i$  である事後確率を  $P(e_i|h_j)$  としたとき、証拠ノード  $E$  と仮説ノード  $H$  の因果関係を式 3.1 のように表す。

$$CPT_{E|H} \equiv P(E|H) = \begin{bmatrix} P(e_1|h_1) & \cdots & P(e_n|h_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P(e_1|h_m) & \cdots & P(e_n|h_m) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

この行列を条件付確率テーブル (CPT : Conditional Probabilities Table) と呼ぶ。

証拠事象が観測されている状態で、仮説事象の状態を推論する場合には、式 3.2 に表されるベイズの定理より、未観測事象の状態の確率を得ることができる。

$$BEL(H) \equiv P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)} = \frac{CPT_{E|H}P(H)}{P(E)} \quad (3.2)$$

#### 統計的行動決定モデル

ロボットにおける自律行動の決定モデルに使用する場合は、Fig.3.3 の右側のように、証拠ノード  $E$  をセンサ情報  $S$  と対応させ、仮説ノード  $H$  をヒューマノイドに組み込まれている基本的行動モジュール  $B$  と結びつける。

つまり、操縦者との対話に基づく教示の経験から取るべき行動の事前確率  $P(B)$  と事後確率  $CPT_{S|B}$  を獲得し、自律行動を行う際には、センサ情報の観測  $P(S)$  から、とるべき行動  $P(B|S)$  を求めればよい。

推論された結果であるベクトル  $BEL(B)$  が確信度であり、その名前の通り推論に対する確信の度合を意味し、これを利用して行動選択や対話制御へと結びつけることが可能となる。

本研究でも、この確信度を用いて行動提案などを行わせる。

#### 統計的行動決定モデルの獲得

Bayesian Network による行動決定モデルを獲得するには、以下の3点の操作が必要となる。

- (1) CPT, 事前確率の計算
- (2) 各ノードにおいて連続値を離散的な状態に変換する際の戦略の決定  
(閾値, 状態の数など)

### (3) Bayesian Network の構造の決定

稲邑らの手法では(3)は固定とし、(1)では、操縦者の指示とロボットの確信度の高い行動とが食い違った場合を重要な経験とみなす、重み付けを導入して効果的な学習を図っている。

また(2)では、閾値などを遺伝子で表し、式3.3で表される行動決定モデルのエラー値を適合度とする、遺伝的アルゴリズムによって最適化を行っている。なお、式3.3中の $BEL_i(\mathbf{B})$ は推論された行動の確信度を、 $T_i$ はその時の人間の教示動作を、 $N$ は履歴データの総数を、それぞれ表す。

$$E = \frac{\sum_i^N \|BEL_i(\mathbf{B}) - T_i\|}{N} \quad (3.3)$$

このように(1)(2)の処理を繰り返すことにより、統計的行動決定モデルを段階的に獲得していくことができる。

以上、3.2.2節では、稲邑らによる統計的行動決定モデルについて説明を行ってきた。本研究で、具体的にどのようにこの手法を利用したかについては、6.2.1節で詳述する。

## 3.3 自律行動の評価

次に、ヒューマノイドが自律行動時に遠隔操縦へと切り替えを行うときの評価機構について説明していく。

どんなに優れた自律行動機能を実装しても、以下のような状況では期待通りの動作をしないことが必ずある。

- 作業環境が変化（物体の移動、部屋の明るさの変化など）
- 臨機応変な対応が求められる作業を行う
- 高度な判断が必要な場合（候補が複数あって、どちらを取るかなど）
- 人や動物など、不確定要素を含んだ作業を行う
- センサに異常が発生

このような場合には、操縦者（広い視点で言えば、周囲に存在する人も含める）にタスク完遂のためのサポートを求めるべきである。

### 3.3.1 達成可能性の評価

通常、操縦者がヒューマノイドに自律行動を行わせる場合には、行動を起こした後に、結果としてうまくいったかどうかを人が判断し、そこから原因を究明してプログラムを組み直す。

しかしこの手法では、うまくいったかどうかは一目瞭然だが、

- 作業環境及び自己を破壊する恐れがある
- 失敗の原因がわかりにくい

という問題点がある。

そこで行動を起こす前に、ヒューマノイド自身がタスクの達成可能性を評価することで、これらの問題を解決できると考える。

達成可能性を評価するための要素は、大きく2つある。

#### 1. 対象の特定

ヒューマノイドが自律行動を行う場合には、動作の対象もしくは目標が存在する。例えば、「赤いボールを取る」ならばボールが対象だし、「会議室まで移動する」だったら会議室が目標となる。このように対象や目標が存在する場合には、それを一意に特定できるかどうか、はタスクの達成可能性に大きく影響する。

#### 2. シミュレーションによる動作チェック

ヒューマノイドは内部に自己と環境のモデルを有しており、それを利用して、行動を予めシミュレーションすることができる。それにより、目的の動作が実行可能かどうかを事前に判断できる。

具体例として、「赤いボールを取る」というタスクを考えると、その色、大きさ、形、同じものが複数あるかどうか、などが、対象を特定できているかどうかの評価に利用できる。また、シミュレーションにより、手が届く位置にボールがあるかどうかや、障害物が間にあるかどうか、自己衝突せずに取得姿勢をとれるかどうか、どれくらいの時間がかかるか、などを評価対象とすることができる。これらをまとめたものを Fig.3.4 に示す。



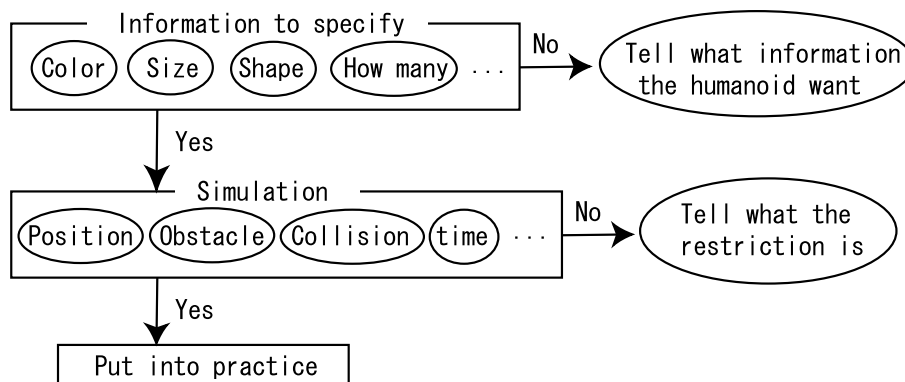


図 3.4: Example for evaluation of Autonomous behavior before action

### 3.3.2 情報提示による対話的な問題解決

Fig.3.4 に示したような評価機構を用いると、事前にタスク達成可能性を評価できるだけでなく、操縦者にサポートを求めるときに適切な情報を提示できる。

対象を特定する段階で問題が生じたのであれば、どのような情報が足りなかったかを操縦者に示すことで、操縦者が対話的に、欠けていた情報を与えてやったり、直接対象を特定したりすることができ、それがタスクの完遂へとつながる。

また、シミュレーションにより失敗したときには、操縦者が情報を与えてもタスクを達成することはできないため、ヒューマノイドの判断で遠隔操縦へと切り替える。この場合でも、操縦者になぜ自律行動機能が失敗したのかの情報を提示することは、有用である。

対話的な問題解決と遠隔操縦への切り替えの流れを Fig.3.5 に示す。

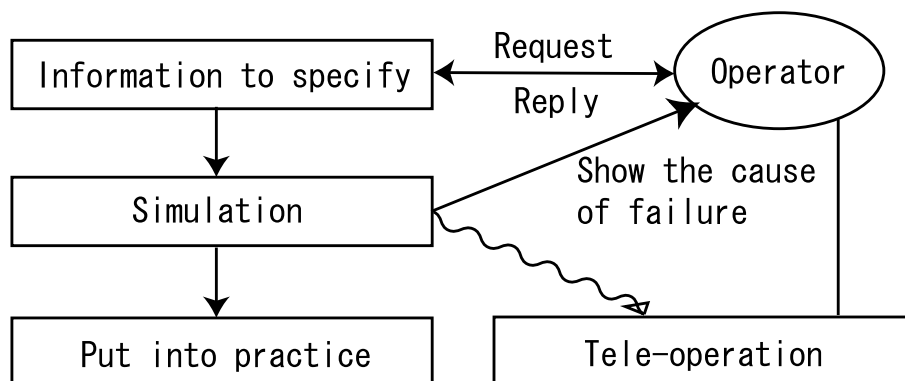


図 3.5: Solve the task interactively and switch to tele-operation

以上に示した自律行動の評価機構については、第 6 章で実機に実装したシステム構成例と実験結果を示す。

## 第4章

### ヒューマノイドシステムHRP-2W



## 4.1 はじめに

本研究では実装実験にあたり，(株)川田工業社製の車輪型等身大ヒューマノイド HRP-2W[23]を利用した．ここでは，この HRP-2W のシステム構成を，ソフトウェア・ハードウェアの両面から説明し，またその利点と問題点について述べる．さらに，本研究を行うにあたって筆者が改良したハードウェア部分について説明する．なお，本研究で用いる HRP-2W の上半身部分である HRP-2[24] や，基盤ソフトウェアである OpenHRP[25][26] は，経済産業省・NEDO の「人間協調・共存型ロボットシステムの開発」(通称 HRP:Humanoid Robot Project) の成果として発表されたものである．

## 4.2 HRP-2W システムの構成

### 4.2.1 ハードウェア構成・概観

本実験で利用した HRP-2W のハードウェア構成図を Fig.4.1 に示す．なお，Fig.4.1 と Fig.4.2 は，共に HRP-2W の仕様書より抜粋した．

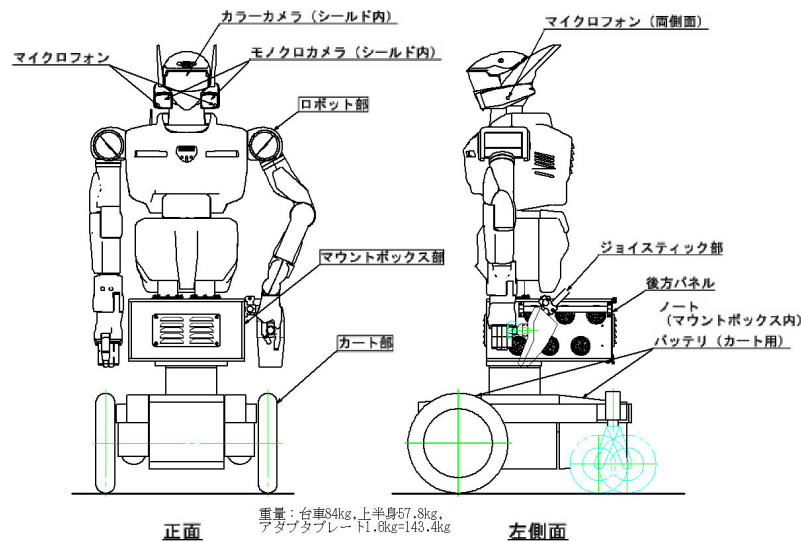


図 4.1: HRP-2W hardware structure 1

HRP-2W の上半身は，(株)川田工業社製の等身大ヒューマノイド HRP-2 を一部改良したものを採用しており，首 2 自由度，片腕 7 自由度，指 1 自由度，腰 2 自由度の合計 20 自由度を有している．

下半身の移動機構はドイツの Inavacare 社製の福祉用電動車椅子を利用している。左右の車輪による2自由度の移動の他、上下にスライドする直動機構が組み込まれており、上半身ヒューマノイドが設置されるベースの高さを変えることにより、身長を最高 171cm、最低 141cm と変動させることが可能である。足によるかがみ込み動作ができない分、このスライド機構で手先のリーチング範囲をカバーすることが可能である。また、車輪は電氣的に駆動させることもできるが、取り付けであるジョイスティックにより速度調整も含めた移動をさせることができる。なお、全重量は 145kg 程度となっている。

コンピュータとしては、モータ制御用 PC と視覚処理用 PC が上半身の胸の部分に格納されており、ともに Pentium-III の 866MHz を用いている。

次にセンサについて述べる。視覚情報としては、カラーステレオカメラを備えているほか、頬の左右にもステレオ視用のモノクロカメラを2つ備えている。音声対話や音響理解用としては、顔の左右に2つ、前方に2つのマイクロフォンが備えてある。また、両手首に6軸力センサが搭載されており、物体を把持したり、外部環境との接触を行うタスクを実現することが可能となっている。

電源及び無線の構成を Fig.4.2 に示す。特徴としては、マウントボックス内にスペースがあるため、最大2台のノート PC を搭載させることができ、内部 PC の能力不足を補うことができる点である。また、バッテリーを内蔵しているため、電源ケーブルを外して活動できる。さらに、無線により外部との通信も行えるようにしたため、完全にケーブルなしで独立的に活動することもできるようになった。

以上述べたように HRP-2W は、本来の HRP-2 といくつかの部分で異なっている。その主な違いをまとめると、以下のとおりである。なお、外観の写真を Fig.4.3 に載せる。

1. 下半身が電動車椅子である
2. 手首の改造により上半身の自由度が2軸増えた
3. 手先構造を任意に作り変えることができる構造になった
4. 本来1眼のカラーカメラを、カラーステレオカメラである SVS カメラに取り替えた

これらの変更点によりどのような利点と問題点が生じたかについては 4.2.3 節で詳述する。

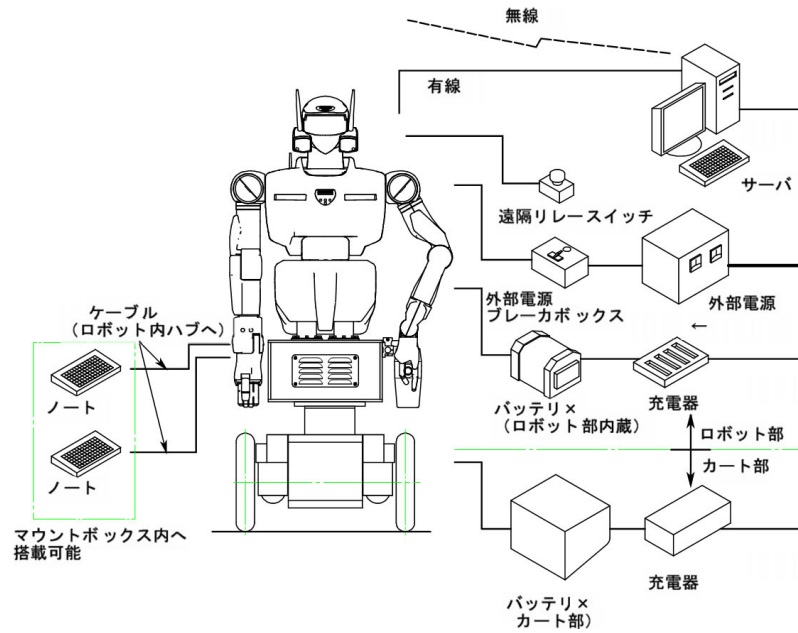


図 4.2: HRP-2W hardware structure 2



図 4.3: HRP-2W hardware outlook

#### 4.2.2 ソフトウェア構成

はじめに述べたように，HRP-2W では基盤ソフトウェアとして OpenHRP を利用している．この OpenHRP では，CORBA と呼ばれる分散コンピューティング環境でのオブジェクト指向型のソフトウェア開発環境を採用している．Dynamics Server，Collision Detector，Model Loader 等，ヒューマノイドに必要なオブジェクトをネットワーク上のサーバとして準備し，それに接続するようなクライアントのプログラムを作成することで，全体を統括するソフトウェアを簡単に構築することが可能である．このソフトウェアシステムの構成を Fig.4.4 に示す．

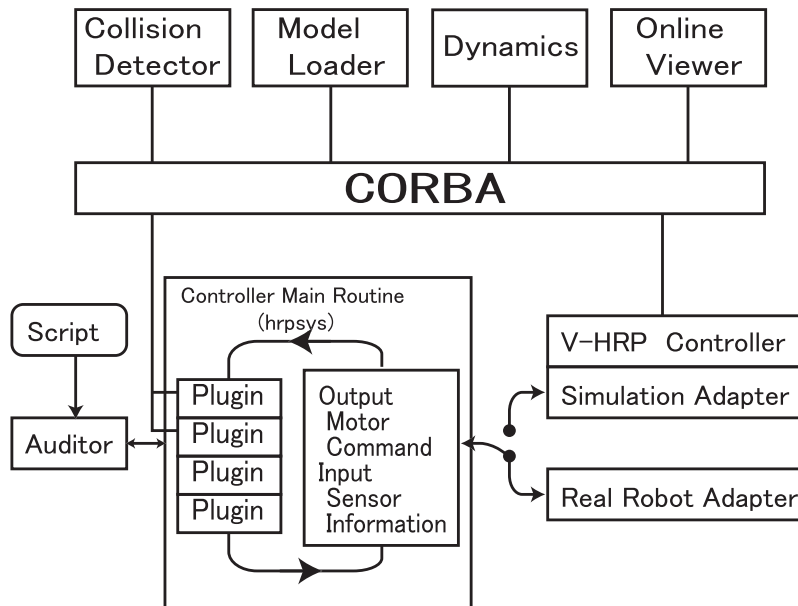


図 4.4: Software Configuration on CORBA system

シミュレーション環境も整備されており，OpenHRP を利用すると，実機と基本的には同じ感覚で動作チェックを行うことができる．シミュレーション環境を Fig.4.5 に示す．

次に，プラグイン実装の一例として，車輪走行プラグインについて述べる．

HRP-2W では本来の HRP-2 と違い，台車機構を持っているため，移動のためのハードウェア構成，電気配線系統，ソフトウェアのインターフェイス等が大きく異なる．しかし，プラグインによる統一的なインターフェイスを用いることで大きな変更をすることなく台車を制御することが可能となっている．具体的には，車輪走行を行うためのプラグインから上半



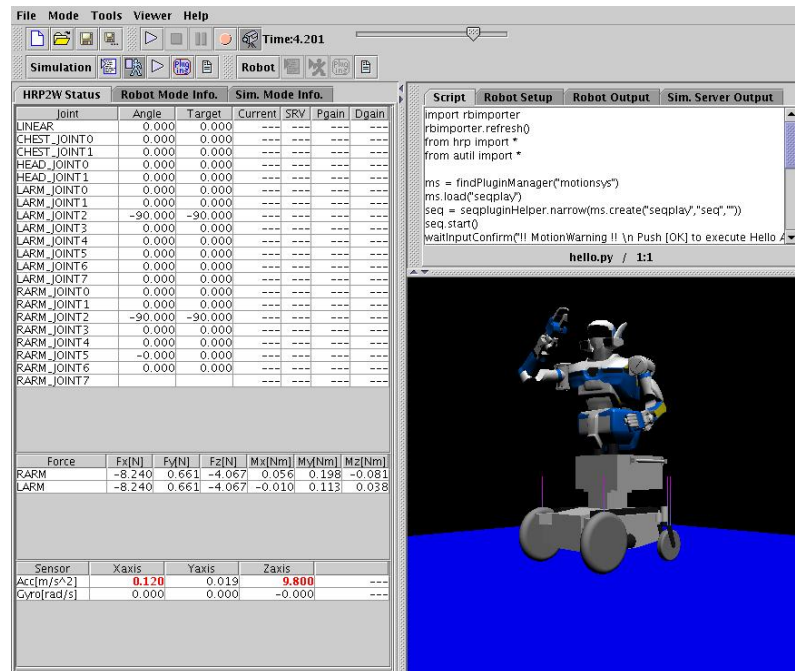


図 4.5: Simulation System for the Humanoid Platform

身口ロボットのデジタル I/O ポートにアクセスを行い、台車へのコマンドを送信する。

このプラグインの導入により、ユーザは上半身の体の一部を動かすのと同じ感覚で台車を動かすことが可能となっている。このような階層的なソフトウェア構成は、複数プロジェクトの融合をスムーズに行うための利点の一つである。

#### 4.2.3 HRP-2W の利点と問題点

ここでは、等身大ヒューマノイド実験プラットフォームとして HRP-2W を利用する利点と問題点について、

1. 下半身の電動車椅子構造
2. 手首及び手先構造の改良
3. カラーステレオカメラの導入

の 3 点に焦点をあて、説明していく。

### 下半身の電動車椅子構造

HRP-2W の下半身が電動車椅子であることによる最大の利点は、転倒の恐れがなく安定なことである。上半身のヒューマノイドによってマニピュレーションなど様々なタスクが可能である上、車輪による移動機構により、転倒の危険性を排除しているため、バランス制御抜きではあるが、ヒューマノイドにおける高度な知能の研究・実験を気軽に行うことができる。

全身版の HRP-2 では、実験時には必ずクレーンで吊るす必要があるため、人手と手間が必要である上、行動範囲にもかなりの制限が生じる。一方で HRP-2W では、人手もクレーンも必要ないうえ、移動が容易であるため研究室外に持ち出すことも簡単に行える。実際、学外で行われたイベントに持ち出して遠隔操縦を運用することも可能であった。これに関しては、5.2.4 節で述べる。

逆に車輪型であるがゆえに失ったものは、ヒューマノイドとして必ず考慮しなければならないバランス制御、全身を使った行動、さらには歩行による視覚の変動、絶対座標での手先のぶれなどの、2足歩行ヒューマノイドならではの問題を考慮に入れることができない点である。ただし、人間とヒューマノイドのインタラクションや、対話を通じた経験、さらには蓄積された経験からの行動知能、等を発展させたりする上では、これらを考慮しないで済む事は、知能の研究に集中できるという意味で、むしろ利点となる。

また、実際に研究を進めていく上で感じた HRP-2W の問題点は、電動車椅子後方のキャスターの存在である。

後方に摩擦の大きいキャスターが2つ存在する4輪構造であるため、キャスターの向きによって、進路が大きく変わってしまい、予定通り進むことが非常に難しい構造になってしまっている。例えば、キャスターが横を向いている時に前に進もうとすると、右旋回に近い動きをしてしまう。このため、後で述べるようなカメラ情報に基づく人の判断に頼らない、衝突検知機構が必要不可欠となる。

### 手首及び手先構造の改良

先に述べたように、改造により手首の自由度が左右で2自由度増えたが、これにより物体把持の姿勢をこれまで以上に無理なく柔軟に決めることができるようになった。これまでは、指示した手先姿勢を保持するために、非常に不自然でモータの負荷の大きい姿勢をとる場合

も多くみられたため、これは大きな利点である。

また本研究では構造の変更は行わなかったが、手先構造が可変になったため、タスクに合わせて最適な手先構造の開発・実験が行えるようになった。

#### カラーステレオカメラの導入

本研究室の HRP-2 では、すでにカラーステレオカメラである SVS カメラに改造しており、ステレオビジョン用に多くのプログラムが作られてきた。そのため、今回 HRP-2W で SVS カメラを取り付けたことは、単にカラーステレオ視ができるようになっただけでなく、本研究室の HRP-2 で作られてきた多くのプログラム資産を利用し、また共有することができるようになった。

今回の改造で HRP-2 と HRP-2W の上半身部分が、視覚も含めて基本的に同じ構造になったため、プログラム資産を共有することができ、研究がより効率よく進むことが期待される。

### 4.3 HRP-2W 改良部分

#### 4.3.1 センサ等細部改良

本研究を進めるにあたって、いくつか HRP-2W の細部構造を改良したので、それらについて軽くここで触れておく。

#### マイク取り付け

HRP-2W に元々取り付けられているマイクロフォンは、本体からの雑音が入ったり、性能の面で問題があったため、一般に販売されているマイクロフォンを改造して取り付けた。具体的には、本体を頭の内部に設置し、配線を延ばして、両眼の横にセンサ部を取り付けた。これも、HRP-2 と構造を同じにするための改良でもある。外観は Fig.4.6 に載せる。

#### 電源まわり改良

実験に当たり、電源まわりを独立させる必要がある。独立に電源が必要となる周辺機器は、後述するレーザーレンジファインダ、ネットワークを独立するために後づけしたワイヤレス LAN のステーションの 2 つがあるが、利用できるバッテリーは電動車椅子の 24V バッ



図 4.6: the outlook of the Microphone

テリーのみで、かつケーブルは1つのみであった。そこで、電源ケーブルを2つに分岐させ、かつ電圧降下素子及びスイッチの取り付けを行った。

#### 4.3.2 レーザーレンジファインダ取り付け

先に述べた HRP-2W 固有の問題として、進行方向が予定通りになりにくい、ということ を挙げた。研究室の外に出て、車輪で動き回る場合には、カメラ画像を通した人の視覚による衝突判断のみでは不十分である。そこで、周囲の正確な距離を測定できるレーザーレンジファインダ（以下、LRF と略す）を取り付けることとした。

#### LRF

レーザーレンジファインダには、国内で生産されているものもあるが、精度の面で評価が高いのは、ドイツの(株)SICK社製のものである。おおまかに言って、国産のものは、小型だが精度に欠け、SICK社製のものは、大きくて重量もあるが、精度は非常によい。これらの比較に関しては、文献 [27] が詳しい。なお近年は国内でも、大きさ・精度ともに優れた製品が開発されつつあることは申し添えておく [28]。

HRP-2W は車輪型であるために、重量・スペースが問題とならない上、研究室に使われていない SICK 社の LRF があったということもあり、今回は SICK 社製の LMS290 という製品を利用することとした。

### LMS システム

今回利用する LMS290 は、タイム・オブ・フライト（伝播時間）の測定原理に基づいている。1個のレーザ・パルスが発射され、センサの測定範囲内にある物体の表面によって反射される。レーザ・パルスの投光から受光までの経過時間によって、物体と LMS の間の距離が算出される仕組みである。内蔵された回転ミラーによって、LMS ユニットの前方の放射状の範囲でレーザ・パルスが弧を描くため、放射状に二次元的な測定フィールドが定義されることとなる。

電源電圧は 24V で、データ通信用インタフェースは、シリアル RS422 である。伝送レートは 9600Baud から、最大で 500kBaud までの高速データ通信が可能である。LMS 自体は 1 秒間に 75 回データを取得しているが、通信速度によって利用できるデータの取得速度が変わってくる。測定範囲は  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$  で、角度分解能は  $0.5^{\circ}$  ( $0^{\circ} \sim 100^{\circ}$  にすれば最大  $0.25^{\circ}$ ) である。また、測定モードは cm と mm があり、環境により精度は異なるが、mm のオーダーで測定することができる。また、測定範囲も cm モードでは 81.91m までである。

### LRF 取り付け

スペースと実用上の観点から、LRF は HRP-2W の電動車椅子の前面上部に取り付けることとした。取り付けにあたっては、基盤となる長方形の板と、ねじ穴付きの円筒形のスペーサーを 4 つ作成し、ネジを利用して LRF 本体を取り付けた。作成した板とスペーサーは、実用性を重視した単純なものであるため、設計図は省略する。外観は Fig.4.7 に載せる。

次に、電源ケーブルと RS422 用のケーブルを、ヒューマノイドの可動域で邪魔にならないよう LRF の後方から配線が出るように作成した。さらに、アクリル板を削って LRF 側面部に取り付け、そこにスイッチとシリアル通信用コネクタを取り付けることで、配線切れが起きにくく、かつ外見上も優れた構造を実現することができた。なお、作成したアクリル板は手動で削ったため、設計図を載せることはできない。完成した状態は Fig.4.8 に載せる。



図 4.7: the outlook of the LRF



図 4.8: The switch and the connector on the acrylic board

## 第5章

# 自律行動との切り替え機構を備えた遠隔操縦システムの構成





## 5.1 システム全体の構成

ここでは、自律行動との対話的切り替え機構を備えた遠隔操縦システムの構成について概要を説明する。システム構成図を Fig.5.1 に示す。

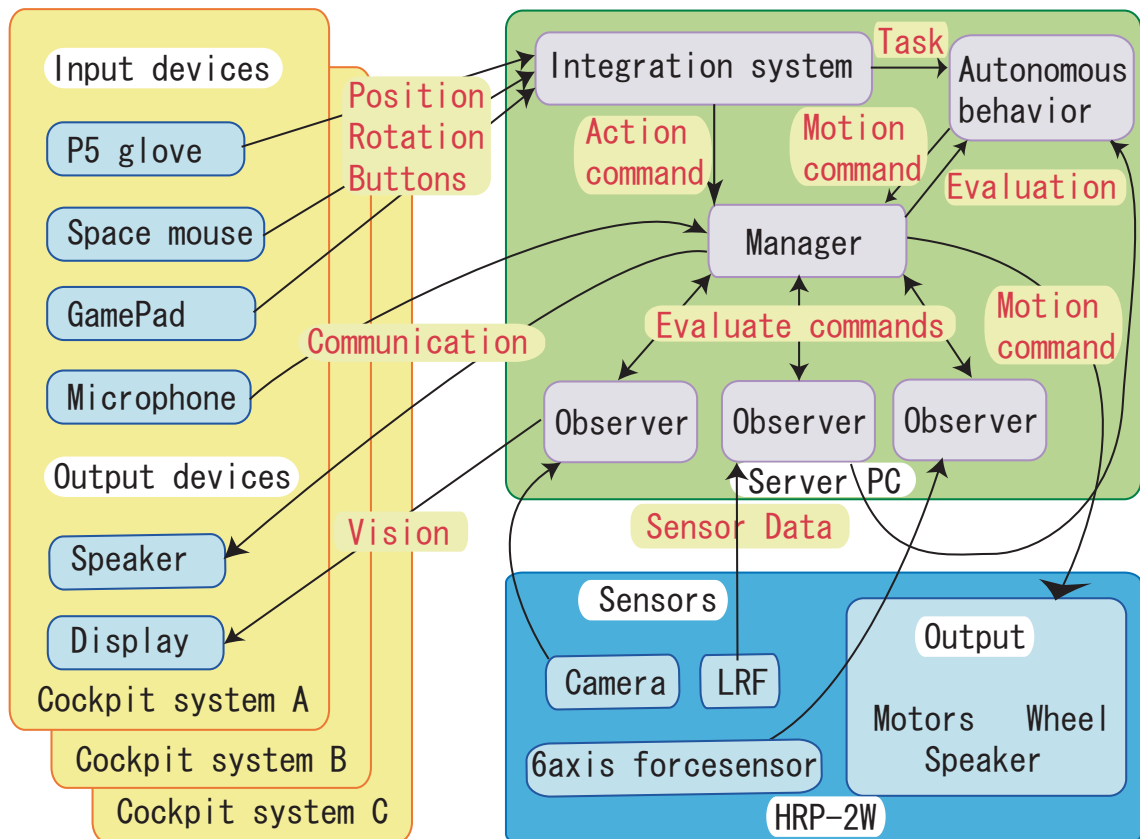


図 5.1: the overall system structure

システムは大きく分けて 3 つからなる。

1. コックピット部 ( Fig.5.1 の左側 , 黄色の部分 )
2. 統合管理部 ( Fig.5.1 の右上部 , 緑の部分 )
3. HRP-2W 実機 ( Fig.5.1 の右下下部 , 青の部分 )

### コックピット部

手元の PC とディスプレイを利用して実行する部分である。

コックピット部では、入力デバイスとして3次元の位置姿勢入力デバイスである P5 や Space mouse, ゲームパッド, マイクを利用した。デバイスの詳細については 5.2 節で述べる。デバイスによって多少手法は異なるが、基本的にはソケット通信によりデバイスからのデータを整理して、統合管理部へ送っている。

また、情報提示装置としては、ディスプレイとスピーカーを用いた。これも実験ごとに利用手法は異なるが、基本的には統合管理部からのメッセージをスピーカーに流し、カメラ画像と OpenHRP を利用した HRP-2W の姿勢表示をディスプレイによって行った。

画像表示はコックピット側で euslisp の別スレッドで走らせる手法をとっているが、画像更新速度は 5.3Hz 程度であった。少しでも更新速度を早めるために、送信画像の圧縮率を高める工夫を行い、5.8Hz 程度まで向上した。

Fig.5.1 中で、コックピットが複数存在するが、これは、本研究段階では実装していないが、本システムを応用すれば、複数人からの入力にも対応できることを示している。

#### 統合管理部

システムが一番のコアとなる部分で、基本的には全て HRP-2W のマウントボックス内の PC で実行させるようにして、通信が例え切れても、独立して安全に自律行動機能を継続できるように工夫した。

遠隔操縦時には、Integration System 部で様々な入力デバイスからのデータを具体的な命令コマンドに解釈させ、自律行動機能呼び出ししたり、行動指令を出したりする。次に Manager 部では、Integration System 部と Autonomous behavior 部からの行動指令がセンサ状況に見合っているかを Observer 部に問い合わせ、問題なければ実機へ指令を出す。Observer の確信度と操縦指令が異なる場合には、情報を提示し、緊急の場合には自律行動へと切り替える。Observer 部は、センサの監視だけでなく、そこからどういう行動をすべきかを常に計算していて、必要なときは Autonomous behavior を呼び出す。

自律行動時には、Observer に問い合わせて自身の行動を常に評価しており、タスクが達成できなさそうなときは Manager 部を通じてコックピットシステムからの入力を促す。

また、Fig.5.1 には載っていないが、HRP-2W の上半身を動かす場合には、一度 Fig.5.2 で示されるような、euslisp 言語で記述された HRP-2W モデルを先に変更して、その後で、その角度情報を実機への角度指令へと変更している。これにより、プログラムが常に HRP-2W の各関節角度の状態を把握することが可能となる。

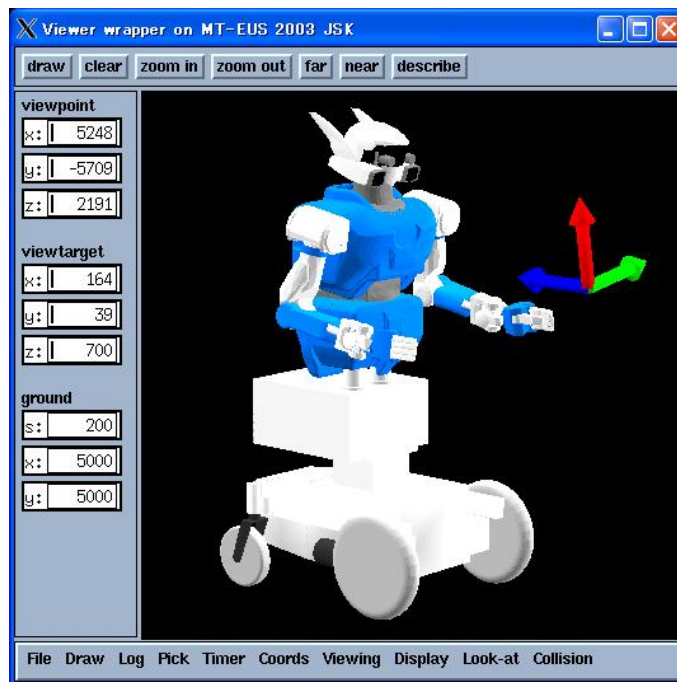


図 5.2: The model of HRP-2W by euslisp

## HRP-2W 実機

HRP-2W 実機では、指令された動作命令を関節角度、さらにはモータ出力に変換して実行する。また、車輪の動きの制御と取り付けであるスピーカーからの発話も必要に応じて行う。

センサとしてはカメラ、LRF、6 軸力センサが存在しており、そこからのデータを統合管理部に送るシステム構成となっている。

このシステム構成のもと、より具体的な実装に関しては 5.2 節以降に詳述する。特に切り替え機構部分に関しては、第 6 章で述べる。

## 5.2 遠隔操縦システム

ここでは、全システム中の操縦システム部の説明を行う。

HRP-2 における操縦システムとしては、文献 [6][29] などで実装実験が行われているが、どちらも非常に大規模なコックピットシステムが必要となっている。

HRP-2W では足がない分，自由度が少ないということと，自律行動により操縦をサポートする方向での研究を目指しているということもあり，文献 [11] のように，簡単な操作モジュールでの操縦システムを目指した．

本節では，3次元位置姿勢入力デバイスであるスペースマウスと P5，ディスプレイ上の GUI(Graphical User Interface)，音声認識，及びゲームパッドを利用した遠隔操縦システムについて，それぞれ述べていく．

### 5.2.1 3次元位置姿勢入力デバイス

ヒューマノイドを操縦する場合，3次元での手先軌道进行操作することが最も直感的で操作性に優れると考えた．そこでまずは，3次元位置姿勢入力デバイスを利用した操縦システムの構築を試みた．

#### SpaceMouse

まずは，3Dconnexion 社製の SpaceMouse を用いた．SpaceMouse は，Fig.5.3 にあるように，中央に位置するつまみを3次元に自由に動かすことができるので，初期位置からの位置のずれ，3軸の回転のずれを値として読み込むことができる．さらに，9つのボタンを備えている．シリアルケーブルにより PC に接続する機構になっている．

スペースマウスから送られてくる  $x,y,z$  の位置情報は全て  $-1 \sim 1$  のアナログデータである．本研究では，この位置情報を定数倍したものを現在のヒューマノイドの手先位置の座標に加え，逆運動学により手先軌道を生成し，実機の角度情報へと変換した．

またボタンを利用して，

1. 左右のどちらの手を操作するかの切り替え
2. 関節角度を動かすモードへの切り替え
3. 車輪を動かすモードへの切り替え
4. 予め用意しておいた姿勢をとらせる

などの操縦プログラムを実装し，実機で動作を確認した．

この操縦プログラムを用いて，カメラ画像のみを元に廊下の外まで出て行動する，遠隔操縦実験の様子を Fig.5.4 に示す．



図 5.3: the space mouse

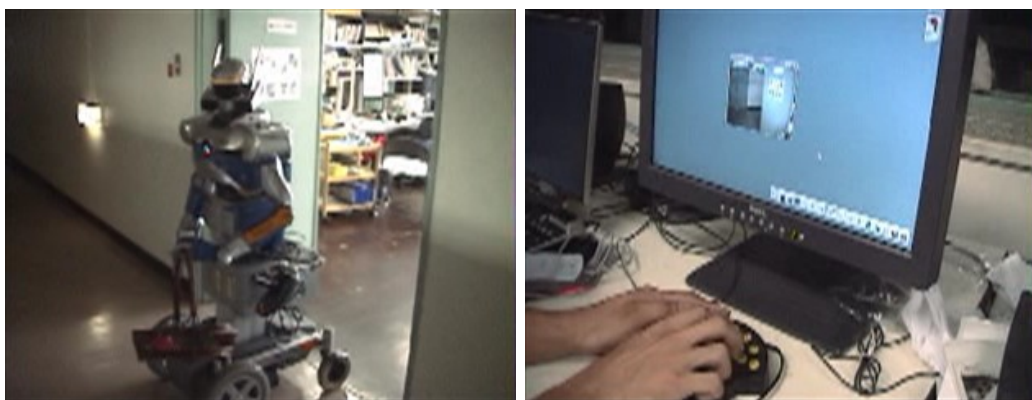


図 5.4: The experiment using space mouse

この実験時には、カメラ画像の圧縮や通信用ネットワークの高速化のための無線 LAN ステーションの変更を行っていなかったため、通信速度の制限による画像の更新速度の遅さと応答速度のにぶさが大きな障害となった。また、操縦のメインプログラムを手元の PC で全行っていたため、通信が切れると何もできなくなってしまった。

この実験から、以下のことを実感した。

- カメラ画像のみをもとに操縦者だけの判断で操縦することの危険性

LRF の設置による障害物回避の必要性

- 通信が切れた場合に備えた自律性の確保

メインの処理をコックピット側ではなく、HRP-2W 本体の側で行うことの重要性

また研究の本題とは異なるが、デバイスドライバのプログラム上の不備と思われるが、データがしばらく残ったり、データを取らなかったりと、入力値が不安定な場合がしばしばあり、改良の余地がある。

スペースマウスは、3次元での動きが直感的であるため、やはり操作性の上では優れていた。本研究では行わなかったが、2つのスペースマウスを用いることで両手を同時に操作すれば、実用性の高い操縦システムを構築できると感じた。

#### グローブ型インターフェイス「P5」

次に、アメリカの Essential Reality 社製の P5 を利用した。P5 は、Fig.5.5 にあるように、センサの信号を受信する受光部と、グローブ型のコントローラの2つで構成されており、受光部を PC の USB ポートに、コントローラを受光部正面のコネクタに接続する。受光部は比較的大型で、高さは 35cm 程度。3次元の位置と姿勢を取得できるのに加え、それぞれの指の曲げを認識できる。また、4つのボタンを備えている。

P5 に関しては、すでにプラグインレベルでの実装が行われており、そのプログラムを改良して操縦システムを構築した。Collision Detector を実装する前であったために、可動範囲を制限した上で、手先の姿勢を変えずに手先位置のみ逆運動学により動かした。ボタンにより左右どちらの手を動かすかを指定できるようにし、また、曲げセンサにより把持操作も可能とした。

このシステムを利用し、左右での棒の持ち替えや、エレベータのボタン押し等の実験を行い、その実用性を確かめた。実験の様子を Fig.5.6 に示す。

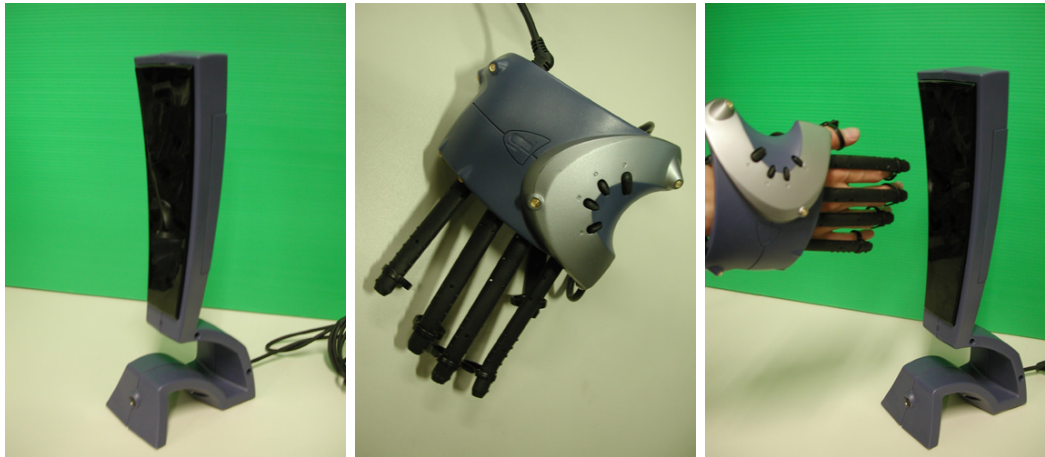


図 5.5: the P5 glove



図 5.6: The experiments using the P5 glove

プラグインでの実装であったため、5msec 周期で命令を伝えることができる。実際は通信によるオーバーヘッドの制約により 40msec 程度に落ちるが、それでもほぼリアルタイムで手先を動かすことができた。

一方で、P5 自体の感度があまりよくないことと、プラグインでの実装であるが故に他のセンサモジュールや操作モジュールとの統合が難しい、という点が問題点として挙げられる。

位置姿勢に曲げセンサ、ボタンの全てを利用すれば、優れた操縦システムを構築できそうではあるが、

1. スペースが必要
2. 取り付けに手間がかかる
3. 装置自体が一般的でない

などの観点から、簡単な操作モジュールでの遠隔操縦を目指す本研究の方針には添わないと思われる。

### 5.2.2 GUIの利用

マウスを利用して、ディスプレイ上の GUI(Graphical User Interface) を操作することでロボットを動かす操縦プログラムを構築した。実装にあたっては、euslisp 言語において、GUI を容易に作成するための高レベル Xwindow インターフェースである XToolkit を利用した。作成した GUI を Fig.5.7 に載せる。GUI と共にカメラ画像、画像処理後のカメラ画像を組み合わせての遠隔操縦システムとした。

基本的には全てボタンで構成され、パネル上部では、車輪の前後左右、及び停止命令を出すことができる。パネル中央はスピーカー用に作られており、explain ボタンでは予め用意した言葉を HRP-2W に発話させ、テキスト入力部に書き込んだ言葉をそのまま発話させる仕組みも導入した。なお発話においては、擬人化音声対話エージェントのツールキットである Galatea Toolkit を euslisp から利用できる形に改良したものを利用した。

また、2次元である GUI により3次元の手先を動かすのは操作性に欠けると考え、パネル下部の動作命令ボタン群では、予め用意した姿勢をとらせるボタンと、SpaceMouse による操作に切り替えるボタンのみとした。



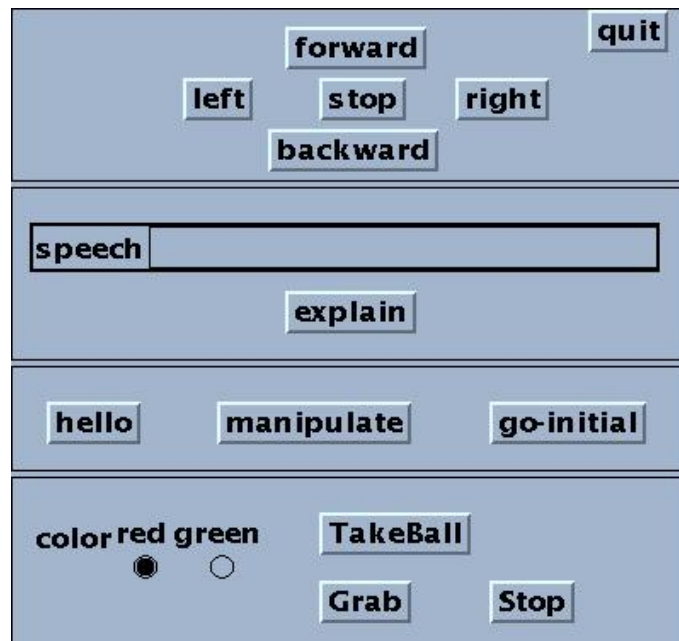


図 5.7: the Graphical User Interface for manipulation

さらに、最下部に画像の色情報からボールに手を伸ばし、ボールをつかむ作業を行わせるためのボタン群を作った。取るべきボールの色も指定でき、単純ではあるが遠隔操縦により作業を行わせる環境を構築できたと考える。

このシステムを用いて HRP-2W 実機を動かすデモンストレーションをいくつか行った。スレッド処理によりパネルを動かすためか、実行時に不意にシステムがダウンすることがしばしば起こり、その意味では実用性に欠けた。しかし、

1. カメラ画像のすぐそばでの操作
2. 操作が直感的
3. 操作器具が一般的かつ使い慣れたマウスである

などの理由から、GUI による操縦システムが有用であることを再認識した。

### 5.2.3 音声認識

音声認識にあたっては、Galatea Toolkit を euslisp から使えるよう一部改良したものを利用している。Galatea ToolKit とは、Galatea Project によりオープンソースかつライセンス

フリーで公開提供されている擬人化音声対話エージェントのツールキットである。

一時，Windows の Viavoice というソフトによる音声認識も利用した．Viavoice では，時間をかけて使用者に合わせたチューニングを行えば認識率が高いが，Galatea ToolKit の方が手軽で拡張性が高く，最終的にはこちらを採用した．

遠隔操縦時には，音声認識は2通り必要となる．一つは，ロボット自身に取り付けたマイクによる現場での指示を聞くためで，もう一つは，操作者側の手元に設置し，操作モジュールの一つとしての役割を果たすためである．本研究では，両方共に実装を行った．とはいえ，音源の位置が違うだけでプログラム自体は基本的には同じである．

学術的ではなく，実用上の観点から手元のマイクは Windows の PC に接続し，音声認識はループで常に Windows 上で走らせ，メインプログラムが必要なときに Socket 通信により認識結果を受け取るシステムにした．システム構成図は Fig.5.8 を参照されたい．

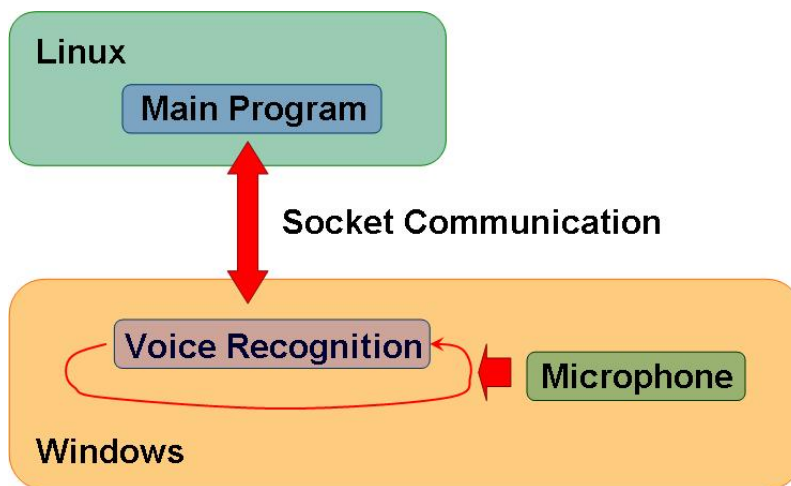


図 5.8: the system structure of voice recognition

認識する言葉は，プログラムにより事前に登録しておく必要がある．また，認識結果を命令に直すのも，単純に1対1対応で予めプログラムする手法を用いた．

この音声認識モジュールは，様々なデモンストレーションを通じて使用を重ねてきた．一例として，ヒューマノイドと対話を行い，ボールの受け渡しを行うデモの様子を Fig.5.9 に示す．

ボールをあげると言うと言手を出してボールを受け取り，色を確認する．そして「赤いボールをください」と言うと言、持っている赤いボールを渡す．このような単純な実験ではあるが，

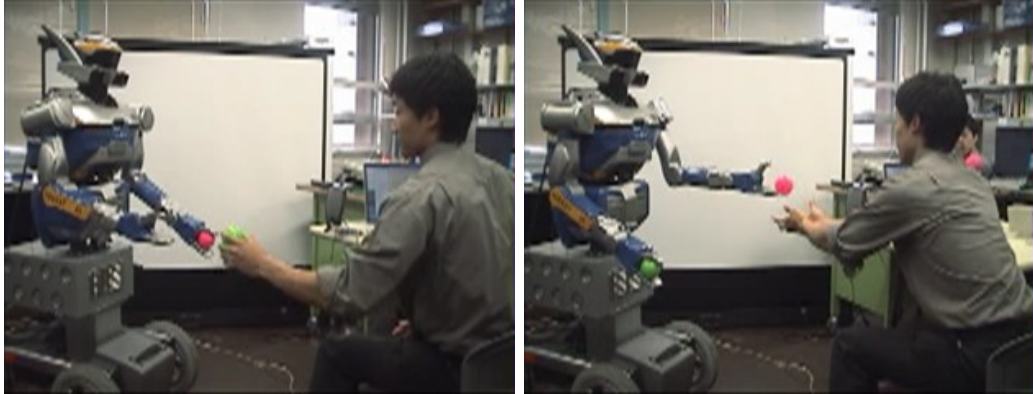


図 5.9: the experiments using voice recognition

音声認識モジュールが十分に機能することを確認できた。また、この実験では、渡したボールの色を認識して、どちらにどのボールを持っているかを把握する、極単純な記憶管理のシステムも導入した。

HRP-2W 本体に取り付けてあるマイクを利用する場合は、HRP-2W の駆動音の影響で、大きめの声で話さないと認識しにくい。しかし、手元のマイクを利用する場合はかなりの高精度で認識が可能であり、十分に実用に耐えるシステムとなった。

#### 5.2.4 ゲームパッドによる操縦システム

ゲームパッドを利用して、簡単に HRP-2W の全身を操縦するシステムを構築した。ここでは ELECOM 社製のゲームパッドを利用した。十字キーに加え、アナログジョイスティックが 2 つ、さらにボタンが全部で 12 個ある。なお、プログラム自体はゲームパッドの特性に依存していないので、本研究で利用したゲームパッドに限るものではない。

HRP-2W の自由度に対して、数少ないボタンとジョイスティック部を駆使して、実用性の高い操縦システムを構築した。説明のために各部に名前をつけた、ゲームパッドの図解を Fig.5.10 に載せる。

#### 実装した操縦システム

まず、HRP-2W では車輪のみを動かしたい場面が多く存在するため、上半身を操作するかしないかをボタンにより選択する手法をとった。ボタン 7 を押すと、車輪のみが動くモー



図 5.10: the game pad

ドになり，ボタン 8 を押すと上半身も動くモードとなる．

車輪による前進・後退・左旋回・右旋回は，ボタン 4 を押しながら，arrow1 と書かれている十字キーを前後左右に動かすことで実現した．そして，安全のためボタン 4 を押していない間は常に車輪に停止命令を出すようにしている．

上半身を動かすモードの時に，どちらの手を操作するかをボタンにより切り替える手法をとった．ボタン 5 を押すと左手に，ボタン 6 を押すと右手に，操作対象を移すことができる．そして，他のボタンを押さずに arrow2 と arrow3 を動かすと，arrow2 により水平平面上に，arrow3 を前後に動かすことにより Z 軸方向に，手先を動かすことができる．これは肩から先のみの逆運動学を解くことにより，各関節角度を割り出している．

各関節を別々に動かすためには，ボタンを押しながら arrow を動かす手法を用いた．具体的にはボタン 1 を押しながら arrow1 と arrow2 を動かすと手首の 3 自由度とグリップの 1 自由度を操ることができる．同様の手法で，ボタン 2 を押しながらでは肩の 3 自由度と肘の 1 自由度を，ボタン 3 を押しながらでは，腰の 2 自由度と首の 2 自由度を，それぞれ独立に動かすことができる．

また、ボタン 11 を押すと初期姿勢に戻り、ボタン 12 を押すとプログラムが終了する。さらに、ボタンを複数同時押しすることで、予めプログラムに記述してあるいくつかの動作を行う。例えば、こんにちは、さようならなどの動作である。

さらに、いわゆる Teach and Playback 機能をつけた。具体的には、ボタン 9 を押すと記憶モードに入り、次に押したボタンに現在の姿勢データを対応づける。ボタンの数だけ姿勢を記憶できるので、最大 12 ポーズ記憶することができる。そして、ボタン 10 を押すことでポーズの再生モードに入り、次に押したボタンに対応付けられた姿勢をとる。何も登録されていない場合には、もとの姿勢のままである。また、ポーズデータはプログラムを終了させても保持される仕組みにした。ポーズデータを収録するファイルが用意されており、プログラム開始時に読み込まれ、実行中に変更されたポーズデータは、プログラム終了時に同じファイルに書き出される。

#### 屋外での操縦実験

安全性の面と通信の問題から遠隔操縦までは至らなかったが、作成した操縦システムを用いて、屋外での操縦実験を行うことができた。具体的には、操縦のみによって、研究室を出てエレベーターに乗らせ、車椅子用スロープを利用し建物外に出て、自動販売機のボタンを押させ、エレベーターで研究室に戻ってくる実験を行った。

また、2004年12月初旬に、子供の餅つき大会にヒューマノイドを出してほしいとの依頼を受けて、実際に餅つきの現場にヒューマノイドを持って行って、操縦によるデモンストラーションを行った。そのときの写真が Fig.5.11 である。



図 5.11: the picture of Mochi-tuki

地域の子供や住人など、普段ロボットに接する機会がない人が大半であったので、操縦し  
かできない状態ではあったが、十分に楽しませることができた。

### キッチンでの日常作業実験

次に同じ操縦システムを用いて、キッチンでの日常的な作業を行わせてみた。やかんのお湯をコップに注いだり、ペットボトルの中身をコップに入れたりした。その時の様子を Fig.5.12 に示す。なお、10～12 は操縦時の HRP-2W からのカメラ画像である。画質が悪いのは転送速度を速めるために画像を圧縮していることに起因する。

これらの実験を通じて、簡易で汎用性の高い操縦システムであることを確認できた。一方で、操縦には比較的時間がかかり、操作性の面でやや劣る点は否めない。

## 5.3 センサモジュール

ここでは、センサとして利用したレーザレンジファインダ (LRF) とステレオカメラについて、それぞれ作成したプログラム等について述べる。

### 5.3.1 レーザレンジファインダ (LRF)

本研究では 4.3.2 節で述べたように、HRP-2W の自律性を高め、走行能力を高めるために、LRF を取り付けた。LRF には Linux 用のソフトウェアが用意されていなかったので、取り寄せたセットアップマニュアルを参考に、一から作成した。

本研究で用いた LRF は型が古く、マニュアルと通信用データが異なっていたため、まず Fig.5.13 に示す Windows 用のフリーのシリアル通信チェックソフトを利用して、通信に必要となるデータセットを調べあげた。

得たデータをもとに、C 言語により以下の機能を持つソフトウェアを作成した。

1. データ通信の開始・終了
2. 通信 baud rate の変更 (9600, 19200)
3. LRF のステータスチェック

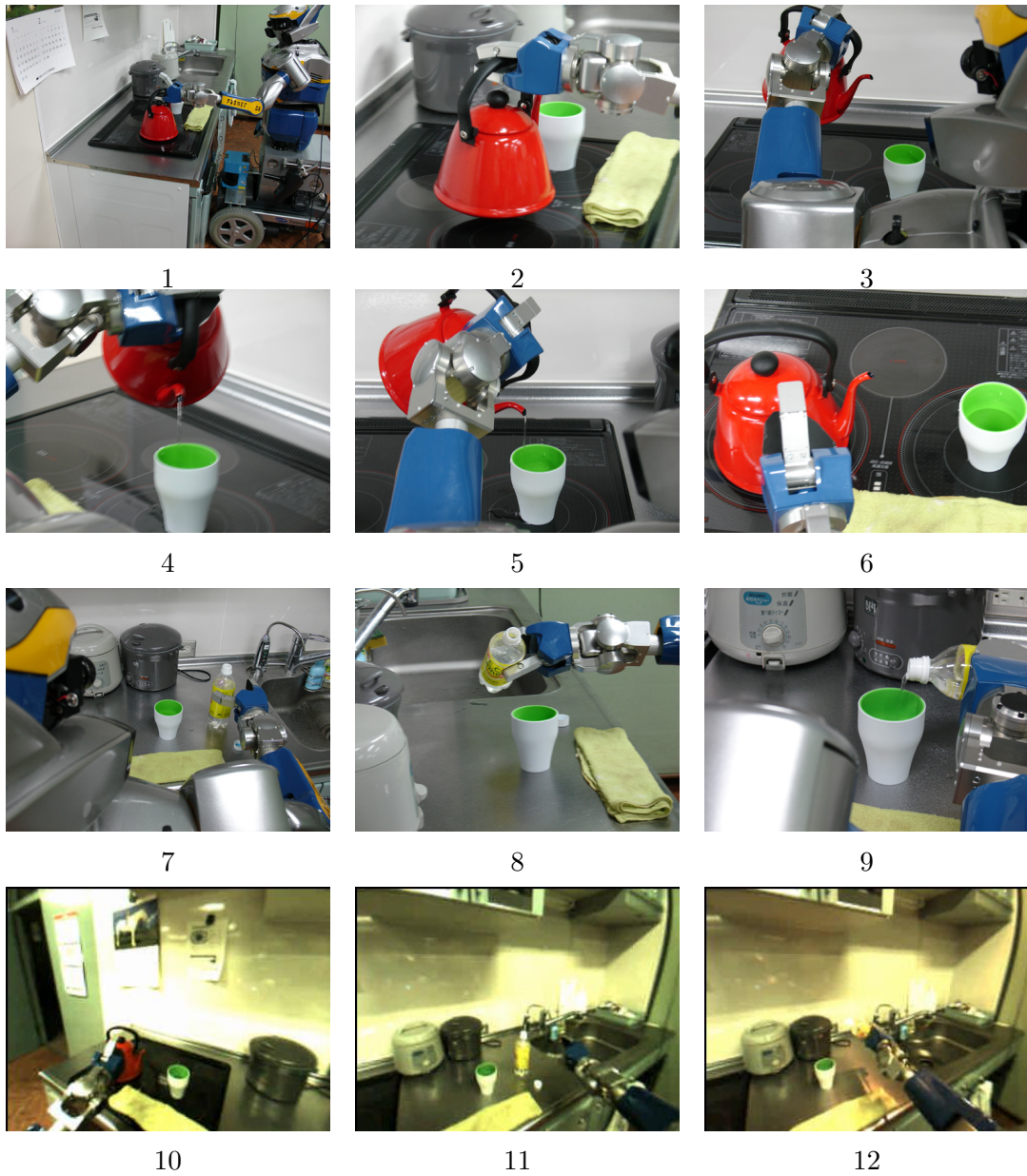


図 5.12: Experiments in the kitchen



図 5.13: the serial checker

4. 取得データモードの変更（角度・分解能）
5. euslisp 用にデータをリスト形式で書き込む
6. 安定した連続データ取得

この中でも、安定したデータ取得が最も難しかった。原因の一つは十分近距離に、長時間障害物が存在すると、LRF が異常を感知して正常動作しなくなる、ということであった。実験用にすぐ前にものを置いていたのがあだとなった。もうひとつの原因は、LRF 自体は 75Hz でデータを取得しているにも関わらず、通信による制限で、データ送信速度が遅れ、連続データの途中で、データの損失が起きていたことであった。これは、データ取得サイクルとデータ処理サイクルを明確に分離し、データ取得を高速化することで解決した。これによりデータ欠損はほとんど皆無になった。

作成したソフトウェアにより、実験では以下の仕様で運用した。

- baud rate : 19200
- 角度範囲 : 0 ° ~ 180 °
- 角度分解能 : 1 °
- CM モード



- データ更新速度 (実測値): 5Hz
- LRF データの常時記録

こうして得た 181 個のデータを 2 次元に配置し、線で結び可視化したものを Fig.5.14 に示す。リアルタイムでの更新が可能のため、操縦時にも利用可能となる。なお、中央青い四角は HRP-2W 本体を示しており、全体のスケールは、縦方向で 5m になっている。Fig.5.14 左の写真に対応するのが右の LRF のデータである。黒い部分では、たまにデータがとんでしまうときもある。



図 5.14: showing the LRF data

また、簡単のためにデータを代表点 8 つに分けた。具体的には、 $180^\circ$  のエリアをおよそ  $23^\circ$  ごとの 8 つに分け、それぞれのエリアで最小の値を各エリアの代表値とした。こうすることで、6.2.1 節で述べる評価機構に利用しやすいデータへと変換した。

### 5.3.2 ステレオカメラによる視覚

HRP-2W に取り付けてあるカラーステレオカメラを用いて、自律行動用にいくつかの画像処理機能を組み込んだ。以下に順に説明していく。なお、画像処理用のプログラムについては全て研究室のライブラリを利用した。

#### 色認識

色認識では、複数の色を同時に認識し、認識結果として特定の色の最大エリア面積、2 次元カメラ画像上の位置などが得られる。どの色を認識するかは予めパラメータを指定する必

要があるが，カメラ画像を見ながら動的にパラメータをチューニングできるプログラムを導入したため，色の指定が容易になった．

このシステムを用いて，扉の開閉を認識し，扉が閉まっていれば人に開けてもらい，開いたら再び動き出す，という実験を行った．実験の様子を Fig.5.15 に示す．



図 5.15: the experiment of waiting the door open using color recognition

また，複数のファイルの色を認識し，対話を用いて指定されたファイルを取って，人に渡すデモンストレーションも行った．これは，2005年に愛知で行われる「愛地球博」で流すムービー用に準備したものである．実験の様子を Fig.5.16 に示す．

#### ステレオ視による画像処理

ステレオ視により画像の3次元位置情報を求めたり，さらには Plane Segment Finder という手法により平面検出を行った．これにより，対象物体の3次元位置に手を伸ばしたり，HRP-2Wの進行方向が平面かどうかをチェックし，LRFと組み合わせてより正確な進行方向の障害物チェックができる．

画像処理したものを Fig.5.17 に載せる．左側が3次元位置を表示した画像で，色の薄い方が近く，濃い方が遠くを示す．右側は，検出された平面である．

また，パターンマッチングのプログラムを利用して，指定した位置の画像と似た部分を，左右のカメラ画像から計算して選び出し，その  $x, y$  座標を返すプログラムを実装した．これにより，対象物体に対する左右の視差をより正確に計算できるようになった．この処理は，6.3.1 節で述べる実験に用いた．

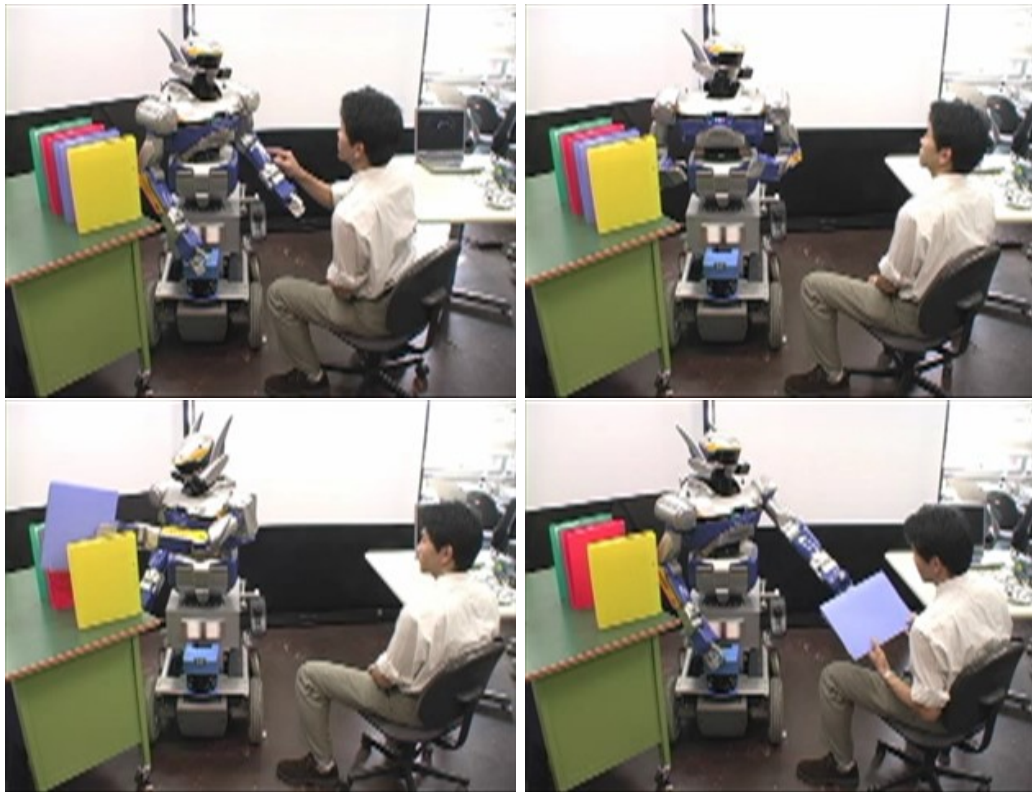


図 5.16: the demonstration for Aichi Expo 2005

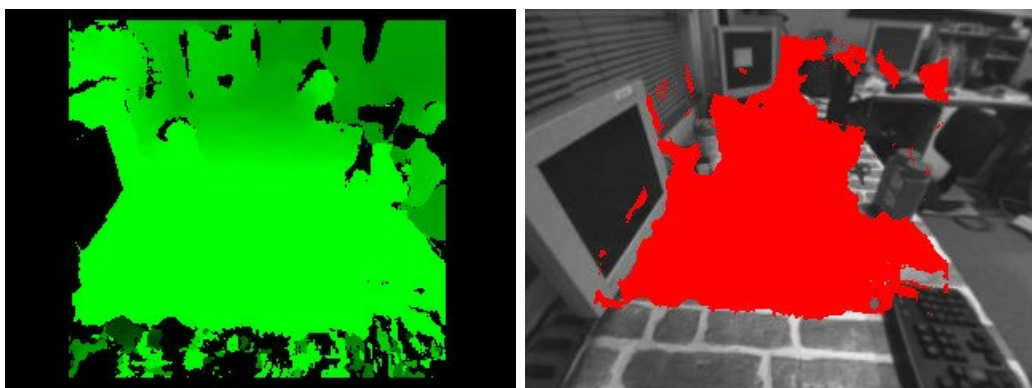


図 5.17: the result of stereo vision and Plane Segment Finder



## 第6章

# 自律行動との切り替え機構を備えた遠隔操縦 実験



## 6.1 はじめに

今回提案する切り替え機構について，定量的な評価を行うことは難しいが，実機に実装することでその有用性を確かめることはできると考える．ここでは，これまで説明してきた自律行動と遠隔操縦の切り替え機構を車輪型ヒューマノイドロボット HRP-2W に実装した 2 つの実験を行う．そしてそれぞれ実験について，用いた評価機構について説明し，実験結果の評価・考察を行う．

## 6.2 LRF を用いた対話的な走行実験

3.2.2 節で説明した手法，LRF，ゲームパッドと音声による遠隔操縦システムを駆使して，障害物を回避しながら，部屋を出て廊下を走り，別の部屋まで移動する実験を行った．実際に構築したシステムの構成図を Fig.6.1 に示す．

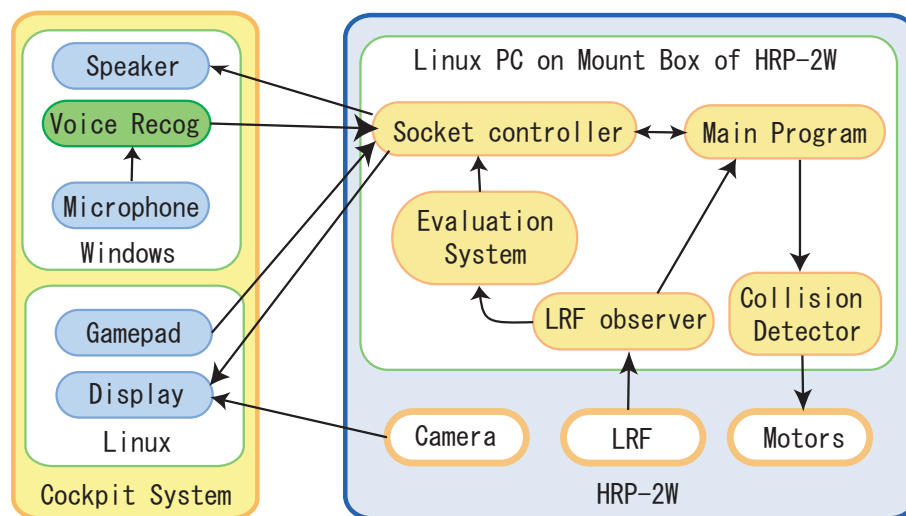


図 6.1: The system structure of the experiment

通信が切れても自律機能により正常に動作できるよう，基本的に全ての処理を，HRP-2W のマウンドボックス内の PC で行わせた．この PC と体内の PC は有線 LAN で結ばれているので，接続が切れる心配はない．

コックピット側では，実用上の問題で音声認識・発話だけはノート PC 上の Windows で行わせ，ソケット通信によって認識結果と発話内容を送受信している．またゲームパッド

の操縦データは、整理して、そのままソケット通信により送り、具体的な命令への解釈は HRP-2W 側で行わせている。ディスプレイでは、6.2.1 節で説明する評価機構からの評価結果、カメラ画像、HRP-2W の現在の姿勢がグラフィカルに表示される。

### ジョイスティックを利用した操縦

ここで、実験に先駆けて電動車椅子に取り付けてあるジョイスティックを利用した操縦システムについて付記する。

これまで構築した車輪機構の操縦システムでは、前後左右、停止の5つの命令しかなく、速度変更はおろか、斜め前方に進むことすら難しかった。しかし、電動車椅子に取り付けてあるジョイスティックを利用すれば、アナログに進行方向、スピードを調整できる。

そこで、HRP-2W に左手でジョイスティックを直接操作させることによる操縦システムを実装した。操縦の様子を Fig.6.2 に示す。

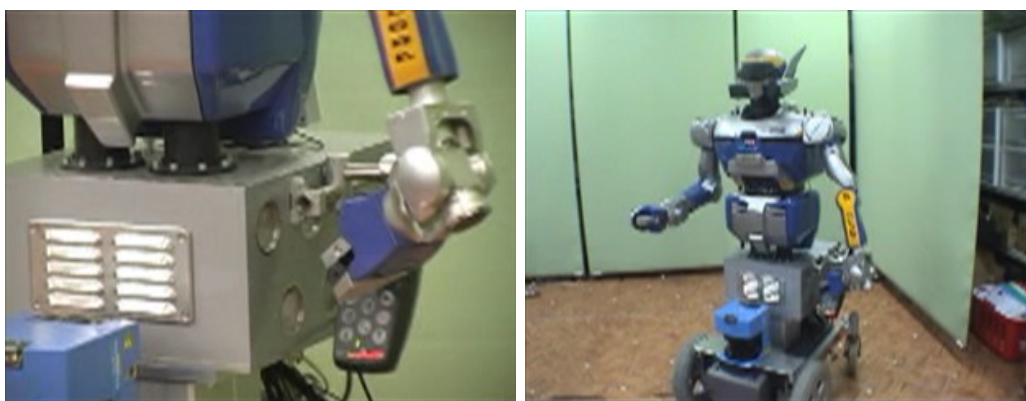


図 6.2: The experiment using the joystick on HRP-2W

これにより、オープンスペースでは速度を上げ、狭いところではゆっくり走ることもでき、移動機能が大幅に向上した。

#### 6.2.1 遠隔操縦の評価機構

次に、本実験で用いた遠隔操縦の評価機構について説明する。

3.2.2 節で説明した統計的行動決定モデルを、今回の評価機構に利用した。センサノードとして、LRF データの8つの代表値を利用。距離の確率変数としては、 $S_i = \{Near, Far\}$



の2つの状態を設け、閾値を定めて距離データを2値に離散化する。また、ヒューマノイドの基本行動である行動ノードについては、確率変数  $B = \{Forward, Stop, Left, Right\}$  の4つを割り振った。使用する Bayesian Network のモデルは Fig.6.3 の通りである。

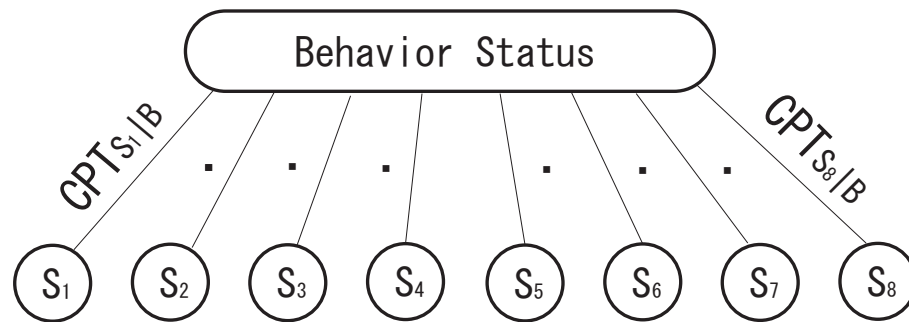


図 6.3: The model of Bayesian Network for the experiment

Fig.6.3 において、センサノードの観測から、未知の状態である行動ノードを推論する際の確信度  $BEL(B)$  は式 6.1 により計算される。ただし、 $\alpha$  は正規化のための係数である。

$$BEL(B) = P(B|S) = \alpha P'(B) \prod_i^8 CPT'_{S_i|B} s_i \quad (6.1)$$

本実験では、類似の移動機構を有する他のロボットでの教示結果を利用することで、学習段階のフェイズを省いた。これは、稲邑らの統計的行動決定モデルが、一度学習を行うと、未知の環境でもある程度の自律性を確保できることにより、可能となる。

このシステムを利用することで、LRF データから抽出した8つの代表データを用いて、およそ 5Hz の更新速度で次々に前進、停止、左旋回、右旋回の確信度が求まる。

8つの代表データと結果の確信度の関係の実行例を Fig.6.4 に示す。なお、8つの代表データの単位は cm で、確信度の単位は%である。

この結果を利用して、確信度が 80 %を超えたら操縦者に警告メッセージを送信し、停止の確信度が 80 %を超えた場合には危険なので、自律行動に切り替え、手を放すことで緊急停止を行わせる。

また、確信度による計算だけではなく、距離 50cm という閾値を設定し、それより近距離に障害物がある場合には緊急停止を行わせる機構を、メインのプログラムとは別に Subsumption 手法により組み込んだ。これにより独立した安全性の確保を狙った。ただし、一度緊急停止した後に二度と動けなくなる事態を避けるため、操縦側に緊急停止を解除する命令を送るこ

The 8 data from LRF data (Right ←————→ left)	The certainty factors (forward, stop, left, right)
(225 189 190 261 258 297 69 57)	(15 0 0 84)
(225 190 188 189 48 48 51 230)	(21 0 0 78)
(223 189 48 45 45 51 237 231)	(59 11 4 25)
( 84 54 48 48 51 345 238 232)	( 0 0 99 0)
(226 39 33 34 36 40 228 233)	( 0 80 19 0)
(230 47 115 32 41 46 234 155)	( 6 38 44 10)
(204 210 205 208 129 318 161 111)	(99 0 0 0)

図 6.4: The relation between the sensor data and certainty factors

とができる機構も組み込んだ。

## 6.2.2 実験結果・考察

### 対話的な廊下走行実験

6.2.1 節に説明した機構を組み込んで行った実験結果を Fig.6.5 に示す。操縦者はヘッドフォンを付け、カメラ画像と、評価機構から送られるメッセージだけを頼りに操縦を行っている。首を動かすことで周囲の状況を知ることができる。

実験では、緊急停止以外は基本的に人間が判断して動かしているために、安全性を確保することを重視するあまり、かなりの時間を要してしまった。しかし、無線 LAN ステーションから離れたり、部屋に入ったりして、通信速度が遅くなったにも関わらず、一度も衝突することなく目的地までたどり着けたことは評価できる。

また、5.2.1 節での操縦時と比べると、LRF による衝突回避 subsumption があることによる安心感と、評価機構によって出される、どう行動すべきかの指示があるために、操作性が向上したと感じた。

一方で、慎重になりすぎた感もあるとはいえ、操縦にかなりの時間がかかっているのは大きな問題である。これは、評価機構による確信度を、情報提示だけでなくそのまま自律行動に反映させたり、LRF を駆使して自己位置推定を行ったりして、自律行動機能を拡張させることにより、解決できると考える。

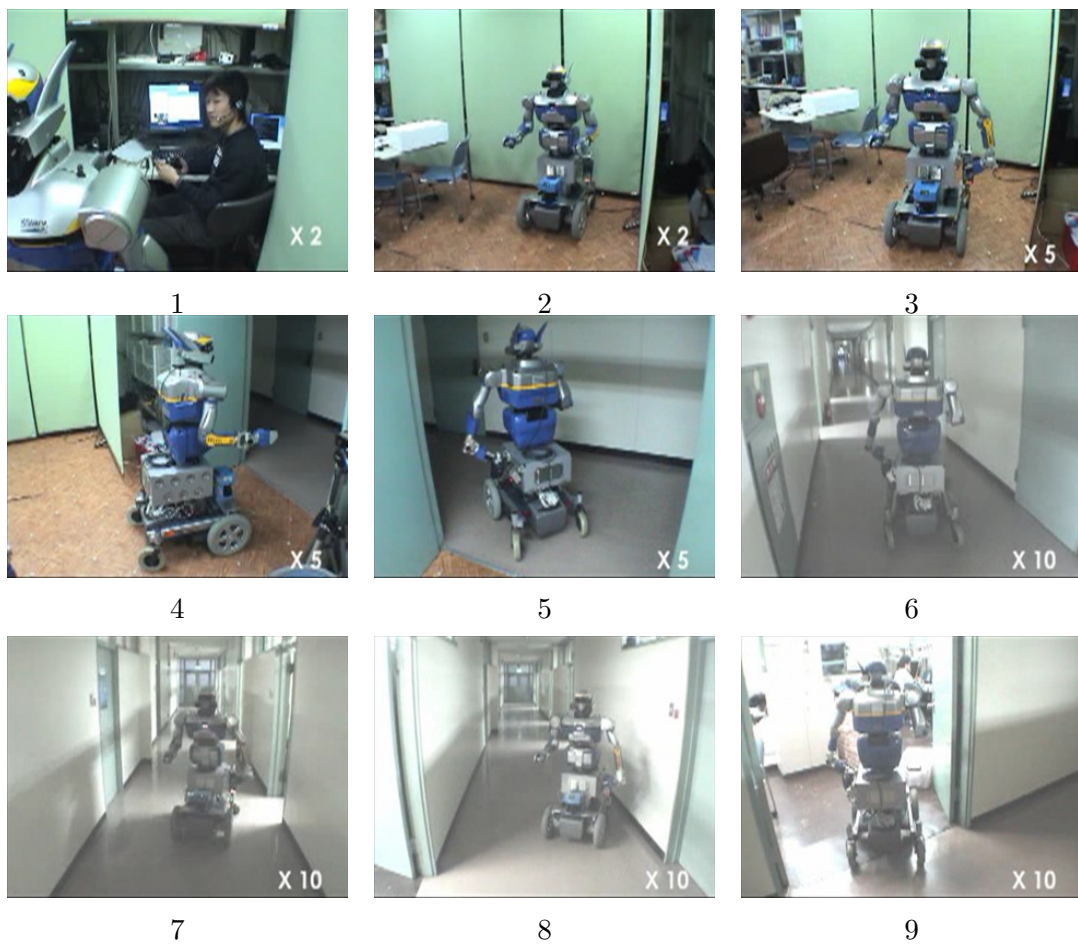


図 6.5: The experiment of tele-operation supported by Autonomous behavior

### GUI を利用した対話的な走行実験

次に、GUI を用いてより自律行動機能を高めた走行実験を行った。作成した GUI を Fig.6.6 に示す。

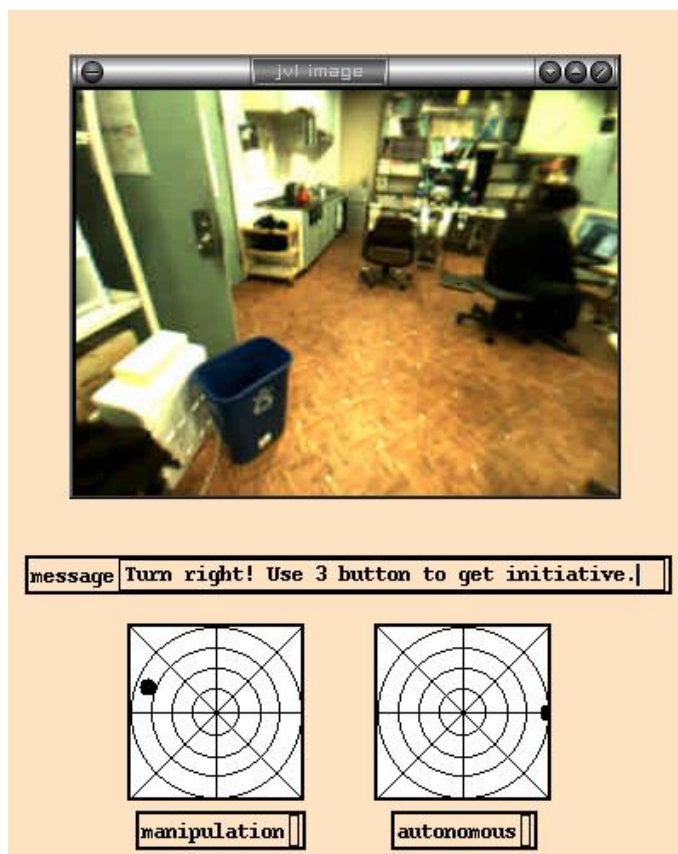


図 6.6: The GUI for the cockpit system

操縦者はカメラ画像を元に操縦を行う。GUI 左下部に操縦者の指令が表示され、その右側に LRF データから算出される確信度に基づく行動指令が表示される。

本実験では、自律行動と遠隔操縦の切り替えをより動的に行うために、操縦者が行動指令を行わないときには自律行動により行動を行わせた。ここで言う自律行動は、確信度に基づき、基本的にオープンスペースに進むというものである。また、自律行動指令と操縦指令が一致する場合には操縦を優先させ、異なる場合には、確信度が 80 % 以上では自律行動指令を優先させる。その際、GUI 上にメッセージを出力することで操縦者に状況通知を行う。

例えば Fig.6.6 では、左側に障害物があるため、自律行動指令は右旋回だが、操縦指令は

左旋回である．しかし，確信度が80%以上であるため自律行動に切り替わり右旋回を行っている．その際，メッセージを表示して状況通知を行っている様子がわかる．

このシステムを用いた実験の様子を Fig.6.7 に示す．

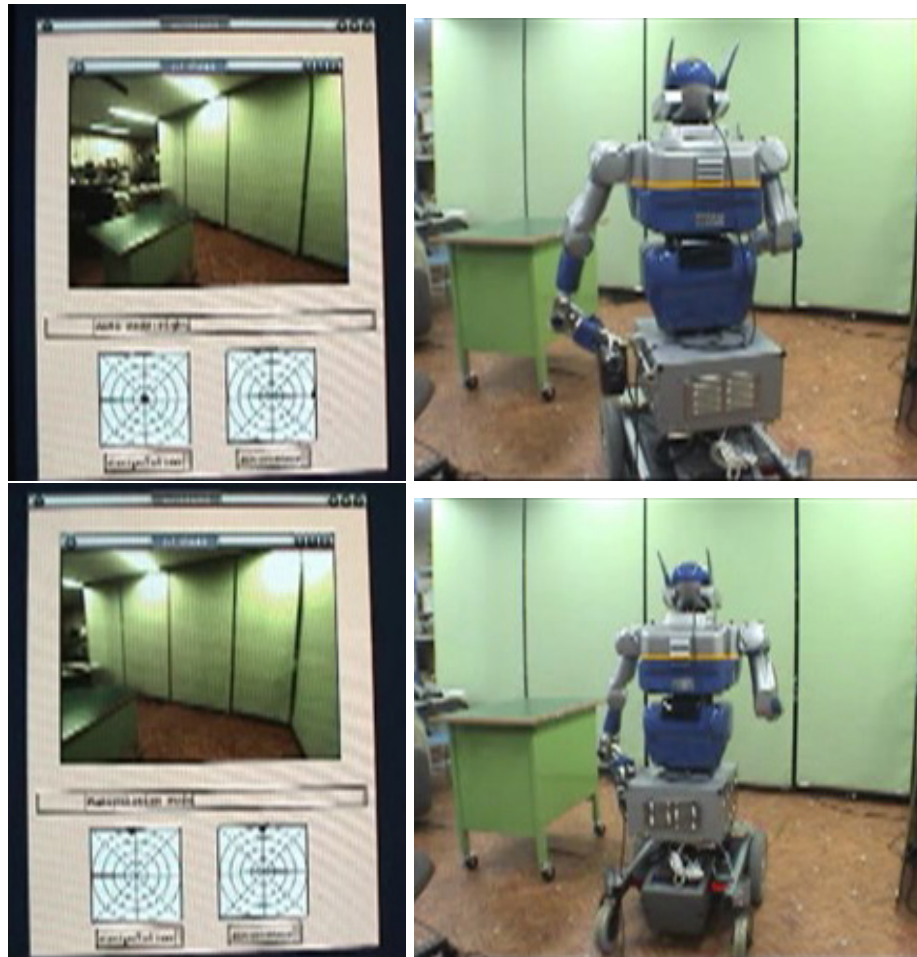


図 6.7: The experiment of manipulation with autonomous behavior using GUI

本実験では，自律行動と遠隔操縦を動的に切り替えながら移動することに成功した．これにより，自律行動を遠隔操縦により補助することと遠隔操縦を自律行動によりサポートすることを同時に行い，安全性の高い走行システムを構築できたと考える．

ただし，自律行動機能自体が，現在はオープンスペースに進むという，事実上の衝突回避機能しか備えていないため，今後は自律行動機能を高める試みも必要となる．

## 6.3 遠隔操縦と自律行動の組み合わせによるタスク実現

自律行動の評価機構を備えたタスク実現例として、視覚情報をもとにヒューマノイドが食卓のケチャップ、マスタード、お皿を取る実験を行った。

### 6.3.1 自律行動の評価機構

3.3節で説明した方針に添って、自律行動の評価機構を組み込んだ。対象の特定には、色と大きさ、ステレオ視による両眼視差を用いており、以下を評価基準として組み込んだ。

- 取るべきものに対応した色が認識できているか。
- 検出エリアの面積は、つかめる程度の大きさか。
- 左右で検出位置が大きく異なっていないか。ただし、 $x$ 方向のずれは視差によるものと考えられるので、特に  $y$  方向のずれに重み付けをした。
- 検出対象の3次元位置は適切な範囲内か。

これらの評価機構により、対象を認識できていないと判断した場合には操縦者に発話によって呼びかけ、情報を求める。本実験では、把持すべき物体の位置を操縦者がゲームパッドにより指示できる Fig.6.8 のインターフェイスを作成した。



図 6.8: The interface to specify the object to take

Fig.6.8 中の赤い囲みで指示した領域のパターンを左右で探索し、両眼視差を計算により求めた後、その中央部分の3次元位置を求めることで対象の位置を特定させる。

こうして対象の認識に成功したら、対象の3次元位置によって左右どちらの手で取りに行くかが決まり、手を伸ばし、対象を把持する。この際、内部に持つ自身のモデルを用いたシミュレーションチェックにより、動作可能かどうかの評価を行う。評価基準は以下の通りである。

- 対象の3次元位置に手を伸ばした場合に、逆運動学が解を持つかどうか。
- 生成した動作は Collision Detector に引っかからないかどうか。

これをクリアできない場合には、一度対象の認識フェイズまで戻って操縦者の指示を仰ぎ、再びシミュレーションに失敗した場合には、遠隔操縦へと切り替えを行う。

最後に、実際に把持が成功したかどうかも評価する。OpenHRP システムでは関節角度命令（理論値もしくは理想値）とは別に、実際の関節角度の値も取得できる。物体を把持している時には、角度命令と実際の値にずれが生じるので、これを利用して把持できたかどうかを判定する。

こうして把持に成功した場合には次の指令を待ち、失敗した場合には、先ほどと同じく、もう一度対象認識からやり直し、それでも失敗したら遠隔操縦へと切り替える。

### 6.3.2 実験結果・考察

ここでは実験の流れを簡単に説明する。実験の様子は Fig.6.9 に示す。

1~3では、操縦者が音声でケチャップを取るよう指示し、自律行動により把持に成功、人に受け渡した。4~8では、同様にマスタードを取るよう指示するが、遠方に存在する同色の箱と誤認識をしてしまい、「手が届かない」と発話し、操縦者に対象位置の特定を依頼。5に示すように対象の位置を指示することで、6に示すように対象の3次元での位置を把握でき、把持に成功した。9~11では青い皿を取るよう指示。10に示すように、対象は問題なく認識できたが、組み込んだ把持手法で把持できる大きさ・形状ではないため、タスク達成可能性がないと判断し、遠隔操縦に切り替えた。12では、遠隔操縦により青い皿を取得し、タスクを完遂した。

本実験では、6.3.1に示す評価機構を用いたことで、以下の点で有用であったと考える。

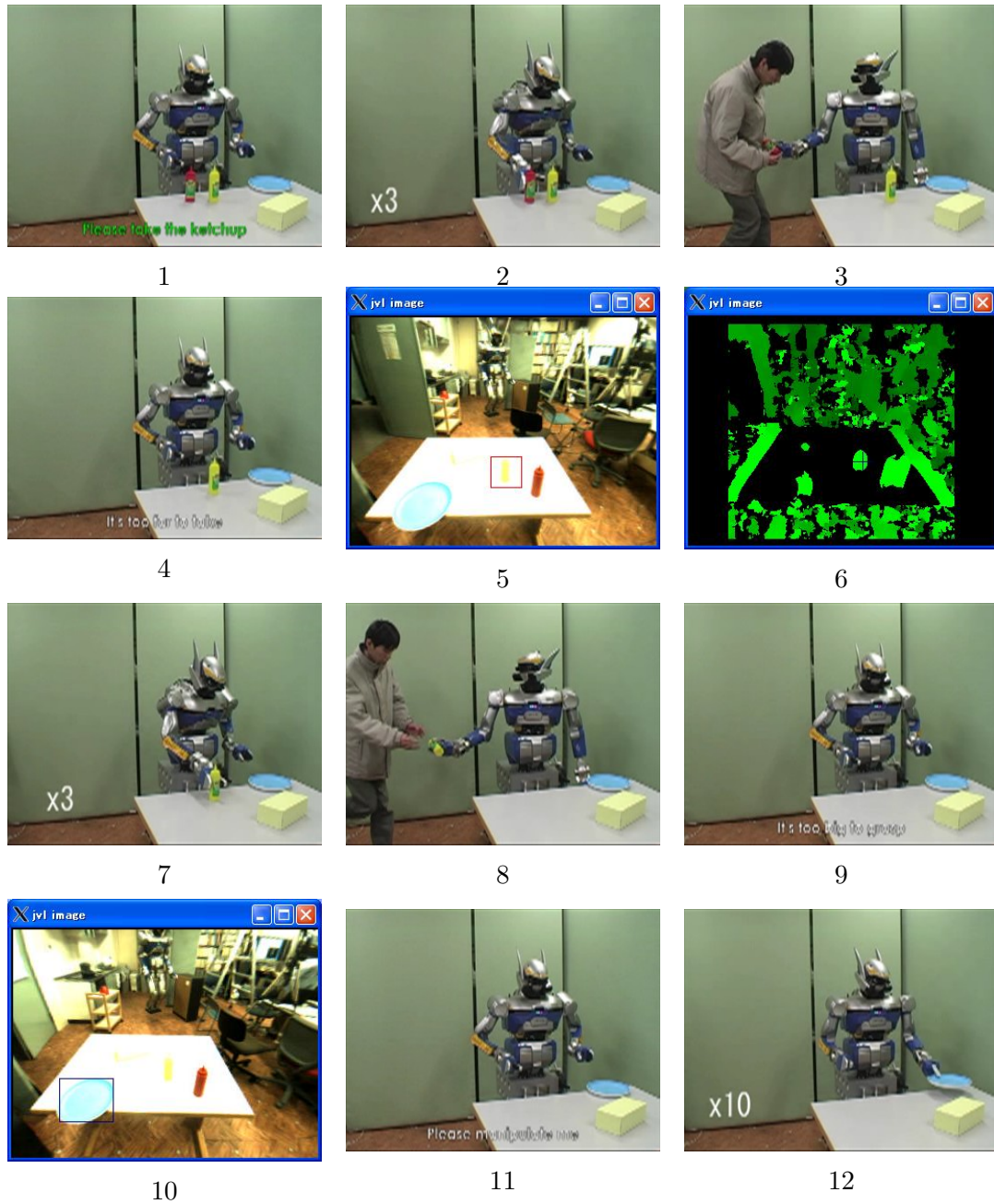


図 6.9: The experiment of Autonomous behavior supported by tele-operation



1. 実際に動作を行う前に評価を行うため，対象の誤認識などの原因で誤った動作をして環境及び自己を破壊してしまう，という危険性を回避できた．
2. 操縦者にサポートを求める際，情報提示を行うことで，適切な指示を仰ぐことができた．
3. どうしてもタスクを達成できない場合に，何度も何度も同じ試行を繰り返す無限ループに陥ることなく，適切に遠隔操縦に切り替えることでタスクを完遂できた．

一方で，評価機構と評価基準をタスクごとに設定しており，もっと統一的に扱えるようにする必要を感じた．



## 第7章

### 結論



## 7.1 結論

本論文では，第2章でヒューマノイドにおける遠隔操縦と自律行動について議論し，簡易な操縦システムにおいて，対話的に自律行動を共存させることの重要性を述べた．それを踏まえ第3章では，ヒューマノイドが自らの判断で，遠隔操縦に切り替えサポートを求めたり，自律行動に切り替え緊急停止させたりすることの意義を述べ，そのための評価機構について説明した．

第2章，第3章での議論・理論を現実のものとして確認するために，本研究ではヒューマノイドロボット HRP-2W を用いて以下のことを行った．

- ゲームパッド，音声入力等，様々な入力デバイスを利用して簡易な遠隔操縦システムを構築し，学外も含め多様なシチュエーションでの実験を行った．
- 移動による衝突回避のため，LRF を取り付け，ソフトウェアを構築した．
- LRF による subsumption 手法を用いた緊急停止機構だけでなく，基本的な処理のほとんどを HRP-2W 側の PC で処理させることで，通信が不安定でも安定した動作のできる，独立性の高い遠隔操縦システムを構築した．
- LRF からのデータを用いて遠隔操縦の評価機構を実装し，ヒューマノイドに行動の提案・緊急時の対応をさせた．また，このシステムを用いて障害物を避けながら別の部屋まで操縦する実験を行い，その有用性を確かめた．
- 自律行動の評価機構を実装し，操縦者に情報提示を行いサポートを要求しながら，対話的に物体取得をさせる実験を行った．

これらのシステムの構築・実験を通じて，遠隔操縦が予想以上に時間や手間がかかり，使いにくいものであるとわかり，自律行動機能を拡張させることが必要不可欠であると痛感した．例えば物体を把持する実験では，操縦だと少しずつ動く上に，手の向きなどを考えていると，十数秒かかってしまう．ところが，画像処理を用いた自律行動機能を用いると，サッと手を伸ばして把持が完了してしまう．一方で自律行動機能も，操縦者が対話的に関わっていくことで，その機能を拡張できることが実験により確認できた．

本研究での議論・実験により、ヒューマノイド自身が評価機構を用いて操縦者に情報提示を行いながら、対話的に自律行動と遠隔操縦を切り替えることの有効性を確かめることができた。

## 7.2 今後の課題

### 遠隔操縦システム

現在は主としてゲームパッドを用いて操縦を行っているが、動きが直感的でなく、操作性に優れるとは言い難い。スペースマウスを左右用に2つ使うなど、他の手法をもう少し検討したい。また、現状では動きが滑らかでなく、時間もかかるので、この点も改善したい。

音声認識による指示は単純なものに限られていたが、ボタンによる指示よりも直感的でわかりやすいので、命令が複雑化してくる場合には、音声による命令を増やしていく必要がある。

無線LANによる遠隔操縦は、現在のところ研究室付近での実験に限られており、今後は建物の外で、無線で自由に様々な操縦実験が行える環境を構築したい。

### LRFによる自律行動機能の拡充

LRFを用いると、文献[30]のようにマップ構築と自己位置推定を同時に行う、いわゆるSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を行うことができる。本研究では、障害物との距離を測ることにしか利用していなかったが、今後はLRFによるSLAMを積極的に導入し、移動機構を用いた自律行動を拡充させたい。

遠隔操縦により移動を行わせた場合には、衝突を恐れるあまり、時間がかかりすぎるが、単純な走行であれば、自律行動により移動させた方が圧倒的に速くなる。本研究でも、2つのLRFデータから相関を求め、移動量と向きの変化を導出するまでは実装してあるので、これを発展させ、走行距離計測の必要ないSLAMを実装していきたい。

### 対話的切り替え機構

本研究で導入した、自律行動の評価機構は、タスクごとに設定する必要があったので、これを統一的に扱えるようにする必要がある。また、遠隔操縦の評価機構で用いた統計的行動

決定モデルでは，学習段階を省いて実験を行っているので，HRP-2W での教示・学習も行う必要がある．

また対話に関しても，現段階では単純な情報提示による発話と，予め登録した命令セットを呼び出すだけの音声認識しか行っていないので，[31] のような対話制御を取り入れていきたい．

#### 今後の発展

本研究で構築した，自律行動と遠隔操縦の対話的切り替え機構によって，教示を行う基礎が確立されたと言える．そこで，今後は Fig.2.4 に示す次の段階である，学習による自律行動機能の拡張を目指して研究を進めていく．





## 謝辭



本論文は筆者が東京大学工学部機械情報工学科4年に在学中、東京大学工学部機械情報工学科 稲葉雅幸教授、稲邑哲也講師の御指導のもとに行った研究をまとめたものです。

稲葉教授には、毎週の研究会だけでなく普段の研究時にも先を見据えた鋭いアドバイスをいただき、研究の方向性を考える上でも大変有難かったです。

稲邑先生には、1年間を通じて大変お世話になりました。様々な場面で丁寧なご指導をいただき、また研究内容に不安を覚えるときなどには、熱く意見を語っていただき、非常に感謝しております。

特任助手の岡田さん、水内さんにはプログラムの書き方や管理の仕方、研究に対する姿勢にいたるまで、色々なことを教えていただきました。特に岡田さんにはプログラムやPCに関する些細な質問にも丁寧に御指導していただき、大変感謝しております。

また、藤田技官、山口技官には研究を進めていくための様々な事務処理をしていただいたおかげで、順調に研究を進めることができました。

研究室の先輩方には、初めて研究生生活に入る不安な時期に、和やかな雰囲気ですぐに研究室に迎え入れていただき、また、研究に必要な様々なノウハウを教えていただき、感謝しています。特に小倉さん、神崎さん、川路さん、林さんには、研究室での些細な疑問から研究の方向性にいたるまで、様々な場面で親切に色々教えていただきました。

同学年の坂本、杉山、園田、畑尾、藤本、宮寺、山本には、1年間にわたり苦勞を共にして、また合宿や打ち上げなどを通じて、様々な思い出を作ることができて、本当に感謝しています。特に園田くんは、ほぼ共同研究者のような形で、プログラムに不慣れな筆者にあきれることなく、共に研究してくれて、本当に感謝しています。

林さんをはじめとして(株)川田工業の方々には、故障時などにすぐに駆けつけていただいたり、HRP-2Wの改良を行っていただいたりと、大変お世話になりました。

また「大島屋」のおじさんのおかげで、餅つき大会にヒューマノイドを出すことができ、非常に貴重な経験をさせていただきました。感謝しております。

そして最後に、筆者を精神的に支えてくれた、家族や友人に心から感謝を述べたいと思います。

ありがとうございます。

2005年2月4日 古城 直樹



## 参考文献



- [1] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明. 人間型ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983–985, 1997.
- [2] 黒木義博, 石田健蔵, 長阪憲一郎, 山口仁一. 高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4X. 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 1C17, 2004.
- [3] 加賀美聡, James Kuffner, 西脇光一, 稲葉雅幸, 井上博允. ヒューマノイド H7 の足接地場所の 2 次元高速計画法. 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 2002.
- [4] 舘すすむ, 小森谷清, 澤田一哉, 井床利之, 井上幸三. HRP 遠隔操作プラットフォーム. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 1, pp. 16–27, 2001.
- [5] 平井成興. Shared Autonomy の理論. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 788–793, 1993.
- [6] 横小路泰義. マスタ・スレーブ制御の理論. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 794–802, 1993.
- [7] 平井成興. 自律遠隔融合方式の教示. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 607–610, 1995.
- [8] 岩瀬和也, 松丸隆文, 伊藤友孝. 人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究 (第 2 1 報) - 手動操作と自律行動の融合制御を用いた全方向移動ロボットの通路走行 -. SICE システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2004), 1G4-5, 2004.
- [9] 若田光一. ETS-VII 搭載ロボット遠隔操作実験と有人宇宙ロボティクス. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8, pp. 1096–1101, 1999.
- [10] 若林靖史. 宇宙ロボットの遠隔操作技術 - 多重ループ構造による遠隔操作 -. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 931–934, 1996.
- [11] Neo Ee Sian, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, and Kazuo Tanie. Whole Body Teleoperation of a Humanoid Robot -Development of a Simple Master Device using Joysticks-. In *IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002.

- [12] 蓮沼仁志, 中嶋勝己, 御舩文里. 自律・遠隔ハイブリッド型ヒューマノイドロボット操作システムの開発 (第二報) 基本制御アルゴリズムの開発. 第22回日本ロボット学会学術講演会, 3L24, 2004.
- [13] 中嶋勝己, 蓮沼仁志, 鷹取正夫, 御舩文里, 森山尚, 家中良太. 自律・遠隔ハイブリッド型ヒューマノイドロボット操作システムの開発 (第三報) 遠隔操作用コックピットの開発と実験確認. 第22回日本ロボット学会学術講演会, 1L32, 2004.
- [14] 神田崇行, 平野貴幸, ダニエルイートン, 石黒浩. 日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット - 語学教育への適用の試み -. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 5, pp. 636-647, 2004.
- [15] Neo Ee Sian, 横井一仁, 梶田秀司, 金広文男, 谷江和雄. 簡易な入力装置を用いたヒューマノイドロボットの全身遠隔操作システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 4, pp. 519-527, 2004.
- [16] 佐藤知正, 松井俊浩, 平井成興. 人間との協同作業を特徴とする遠隔作業ロボットシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 602-613, 1991.
- [17] 森武俊. オブジェクト指向遠隔操作作業システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 467-472, 1999.
- [18] 平井成興, 佐藤知正. ロボットの知的遠隔操縦. 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 6, pp. 679-682, 1986.
- [19] R.A. Brooks. The Role of Learning in Autonomous Robots. In *Proceedings of the Fourth Annual Workshop on Computational Learning Theory*, pp. 5-10, 1991.
- [20] 古城直樹, 園田朋之, 稲邑哲也, 稲葉雅幸. 自律行動と遠隔操作の対話的切替え機構を備えたヒューマノイドシステムの構成法. 第5回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集, 2D2-3, 2004.
- [21] R.A. Brooks. A Robot that Walks; Emergent Behavior from a Carefully Evolved Network. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 292-296, 1989.



- [22] 稲邑哲也, 稲葉雅幸, 井上博允. ユーザとの対話に基づく段階的な行動決定モデルの獲得. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 8, pp. 983–990, 2001.
- [23] 稲邑哲也, 稲葉雅幸, 井上博允. 共通モジュールによるプロジェクト融合を可能とするコンテンツ指向型ヒューマノイドプラットフォーム. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004 講演論文集, 2P1-H-74, 2004.
- [24] 五十棲隆勝. ヒューマノイドロボットプラットフォーム HRP-2 の事業化. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 15–17, 2004.
- [25] 金広文男. ヒューマノイドソフトウェアプラットフォーム OpenHRP とその応用事例. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 6, pp. 609–614, 2003.
- [26] 金広文男, 藤原清司, 梶田秀司, 横井一仁, 金子健二, 比留川博久, 中村仁彦, 山根克. ヒューマノイドロボットソフトウェアプラットフォーム OpenHRP. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 785–793, 2003.
- [27] 大矢晃久, 油田信一. 移動ロボットの環境認識用光学式距離センサとその利用技術. SICE システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2004), 3H3-1, 2004.
- [28] 川田浩彦, 森利宏, 油田信一. 移動ロボットの環境認識用レーザ式レンジセンサ -測域センサ- の開発. SICE システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2004), 3H3-2, 2004.
- [29] 蓮沼仁志, 中嶋勝己, 小林政巳, 御舩文里, 宮原啓造, 鷹取正夫, 森山尚, 家中良太, 横井一仁. 人間型ロボットのための遠隔操縦システムの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 46–54, 2004.
- [30] Longin Jan Latecki, Rolf Lakaemper, Xinyu Sun, and Diedrich Wolter. Building polygonal maps from laser range data. In *ECAI International Cognitive Robotics Workshop*, pp. 56–62, Valencia, Spain, August 2004.
- [31] 川路友博, 岡田慧, 稲邑哲也, 稲葉雅幸. 仮想環境上に人間や実環境の知識を蓄積するロボットの対話行動シミュレーションの実現. 第 22 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1K14, 9 2004.

以上

1p ~ 98p 完

卒業論文

平成17年2月4日提出

機械情報工学科

30249 古城 直樹