NAIST-IS-MR9451014

課題研究

水中ロボットの身振りによる遠隔操作
プロジェクト報告

王 家寧

1997年2月14日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本報告書は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士 (工学) 授与の要件として提出した課題研究の報告書である。

王 家寧

指導教官 ： 千原 国広 教授
横矢 直和 教授
佐藤 宏介 助教授

水中ロボットの身振りによる遠隔操作
プロジェクト報告*

王 家寧

内容梗概

近年、スキューバダイビングを楽しむ人の数が増えつつある。しかし、これには充分な体力や知識が要求されるため、適切な訓練が必要である。一方、近年、バーチャルリアリティの研究が進められ、建築、機械設計、医療など様々な分野で応用されている。

本研究ではバーチャルリアリティ技術を利用し、人間の身振りを入力とする水中ロボットの遠隔操作方法を提案し、水中ロボットを介して、誰でも手軽に擬似潜水体験ができるシステムを構築した。両手の平に取り付けた磁気位置計測センサの位置・方向の情報から、実際に被験者がどの方向へどのぐらいの勢いで進もうとしているかの認識を行なった。認識結果に従い、水中ロボットのモータの駆動電圧を調整し、身振りによる遠隔操作を実現した。本手法では、被験者の泳ぎ方の上手、下手を水中ロボットの動きに反映させた。このシステムによって、被験者は水中ロボットから得られた水中画像を見ながら、進みたい方向へ泳ぐ動作をすることで、疑似潜水体験が可能になった。また、操作実験で、様々な身振りに対する水中ロボットの動きを評価した結果、被験者の思い通りに動作することを確認できた。

キーワード

水中ロボット、身振りインタフェース、認識、遠隔操作、バーチャルリアリティ

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 課題研究, NAIST-IS-MR9451014, 1997年2月14日.

Drive A Submarine with Gesture Information*

Kanei O

Abstract

People who enjoy diving has been increasing recently. However to play this kind of sport, much experience about the sea and diving is necessary. On the other hand, virtual reality technique is recently developed, which is applied to many kinds of field such as building construction, industrial design, and medical care.

This paper describes a newly developed driving submarine system by using virtual reality technique. Through the submarine, everyone can enjoy diving without actual jumping into water. To recognize how fast and where the testee was swimming, the position and direction information of the sensors which were wore on testee's hands was used. The output signal to motors of the submarine was adjusted according to the gesture information. In this method, the motions of the submarine were reflected in the skill of testee's swimming. People who use this system, watch the underwater video image sequence obtained from the camera attached to the submarine, and then behave like swimming. They can use the variation of body gesture to control the submarine where they like to go. This time the proposed system was evaluated. The submarine was controled by swimming gesture as testee had expected.

Keywords:

submarine, body gesture interface, recognition, remote control, virtual reality

*Master's Report, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MR9451014, February 14, 1997.

目 次

1. はじめに **1**

1.1 人間の遊び心 1

1.2 これからのアミューズメント装置 2

1.3 仮想現実感とは 4

1.4 身振りインタフェース 5

1.5 水中ロボットの身振りによる遠隔操作 6

2. 水中ロボットの身振りによる遠隔操作システムの基本構成 **7**

2.1 水中画像の出力 8

2.2 身振りの認識 9

2.3 水中ロボットの操作 14

2.3.1 水中ロボットの仕様 14

2.3.2 人間の静水中での遊泳特性 19

2.3.3 水中ロボットの操作方法 19

3. 実験 **23**

3.1 実験条件 23

3.2 実験内容 23

3.3 実験風景 24

4. 結果 **25**

4.1 方法 1 25

4.1.1 水平方向 26

4.1.2 垂直方向 30

4.2 方法 2 32

4.2.1 水平方向 33

4.2.2 垂直方向 35

5. 考察 **37**

6. おわりに **39**

謝辞 **40**

参考文献 **41**

図 目 次

1 システム基本構成 7
2 頭部搭載型ディスプレイ (HMD) 8
3 磁気位置計測センサ 9
4 発振装置 (トランスミッタ) と受信装置 (レシーバ) 10
5 位置と姿勢角 10
6 身振りの取得 11
7 身振りの解析 12
8 水中ロボット 14
9 水中ロボット操作部分のフローチャート 20
10 水中ロボットの操作:方法 1 21
11 水中ロボットの操作:方法 2 22
12 実験風景 24
13 身振りの仕事量に対する駆動電圧の変化:方法 1 25
14 方法 1:前進 26
15 方法 1:後退 27
16 方法 1:片手で回転 28
17 方法 1:両手で回転 29
18 方法 1:上昇 30
19 方法 1:下降 31
20 身振りの仕事量に対する駆動電圧の変化:方法 2 32
21 方法 2:前進 33
22 方法 2:後退 34
23 方法 2:上昇 35
24 方法 2:下降 36

表 目 次

1　水中ロボットの駆動電圧分布 (水平方向) 16
2　水中ロボットの駆動電圧分布 (垂直方向) 17
3　カメラの回転電圧分布 18

1. はじめに

1.1 人間の遊び心

我々人間が生活をしていく上で、必ずしも必然性・必要性からのみ行動を起こすわけではない。むしろ、なんらかの娯楽が関連した時こそ行動への強い衝動が生じると言えるかも知れない。そして、この傾向は近年になりますます強まっている。順を追って例を挙げてみる。

ヨーロッパで平面のガラスが作られるようになったのは中世のことである。この素材（ハード）のそれまでにない性質を利用し、世界最初のマジックビジョンが演出されたのは教会の祭壇であったと記録されている。現代でも超常現象と称してマジックを利用するケースはよく見られるが、教会の薄暗い祭壇に突如牧師が幽霊のように空中に現れ説教を始めるという演出は当時の人々を驚愕させるのに充分な効果があったと思われる。当時の技術水準は、現代のマジックビジョンのようにハーフミラー加工の技術も無く、光源もローソクを用いる程度であったが、平面ガラスというハードができた途端にこのような装置と演出を考え出す人間の遊び心とそれによる行動力には驚嘆すべきものがある [1]。

エジソンが映画を実用化した時、彼自身はそのハードを記録用のツールとしてしか考えていなかったことはよく知られた事実である。しかし、実際には映画が興行的成功を博し、中でも大きな人気を得た最初の作品が列車の走る様子をレールの間から撮った映像であったことは非常に象徴的なことと言える。日常あり得ない体験、列車に轢かれるという疑似体験を起こさせるこの映画は「見せ物」として全米各地を巡業し、列車が頭上を通過していくシーンでは会場中から悲鳴があがり失神者を続出させたほどである。

近年では、この視覚に訴えるメディアは大きな発展を遂げ、腹を裂いてエイリアンが飛び出てきたとしても失神者が出ないまでに生理的許容限界も拡大している。映画などのソフトの歴史を振り返る時、その歴史は人間の遊び心から発する創造力の豊かな歴史であると再確認できる。

新規技術に目を移しても、レーザービームや光ファイバー等のもともと光通信のために研究開発されてきた。ところがこれらのハードが実用化されるやいなや、

レーザを用いてレーザーショーやレーザーテレビを創り出し、光ファイバーでエスカやトーキングヘッドを創りあげてしまうのが人間の一面である。

遊び心とは人間の最も原始的な文化なのである。

1.2 これからのアミューズメント装置

人の心を動かすコミュニケーションツールは以下に示す三種類あると言われている。

- 記号的ツール ：
  文字や言葉によるコミュニケーション
- 視覚的ツール ：
  写真や映像などの視覚的メディアを利用したコミュニケーション
- 環境的ツール ：
  五感すべてに訴える立体的環境体験によるコミュニケーション

遊園地やテーマパークは環境的ツールにより構成されており、言わば疑似体験を提供する時間消費型施設の集合体である。そのアトラクションは、ライドものと呼ばれる乗物に乗って動くタイプとステージものと呼ばれるタイプに大別することができる。ライドものをさらに区分すると、動き ・構成によりスリルを楽しむスリルタイプ、場面巡りを楽しむツアータイプ、直接的な操作を疑似体験するシミュレータタイプに分けることができる。ステージタイプは映像主体のもの、ライブショー的なものがある。いずれも環境演出型体験装置として半強制的に観客をその世界観へと引きずり込む一方通行のアトラクションであり、いわば映画的装置である。これは処理人員や費用対効果などを考慮すると、本質的に不可避の問題とされているが、そのため、観客の参加性や選択性はどのアトラクションを選ぶのかというところのみに限定して提供されているに過ぎない。したがって、厳密な意味ではコミュニケーションツールとは一線を画する。

ファミコンなどで遊ばれているロールプレイングゲームにおいては、限られた仮想世界のなかという制約はあるが、自らの意志に従って自由に動き回ること

により自己の投影を可能にしている。このようなインタラクティブ性はコミュニケーションの重要な要素であり、インタラクティブ性重視の傾向はこれからのアミューズメント装置開発においてますます高まっていくものと思われる。

その傾向の一例として、カラオケボックスが挙げられる。そこにはミラーボールが回るなどの環境演出された自分だけの空間があり、精神状態に多大な影響を与えうる音楽というメディアとそれに伴う映像があり、観客の自由な参加性が提供されている。歌が好きな人にとっては画期的なアミューズメント施設であると言える。

これらの装置を支える技術発展の根幹となる要素は即応性・参加性などであり、ネットワークによる広がりをもつインタラクティブな電子系メディアの発達というものである。現在、電子系メディアは、コンピュータの発達に支えられ、日々急激な進化をしているところである。その影響は、遊びの文化、アミューズメント機器・施設にとってますます大きくなっていくのである。

1.3 仮想現実感とは

仮想現実感 (VR) とは、人間が今、実際に存在している環境以外の仮想環境 (virtual environment) を、あたかもそれが現実の環境のような感覚を持って体験し、かつその中で行動することを可能とする新しい技術である [2, 3]。

VR 技術は扱う仮想環境によって二つに大別できる [4]。まず、時間・空間を隔てて現実に存在する世界 (real world) を、ロボットや能動立体ディスプレイ (HMD : Head-Mounted Display) などを媒介として体験する技術である。もう一方は、コンピュータ・グラフィクス技術などを用いてコンピュータで創成した、実際には存在しない現実感溢れる仮想世界 (virtual world) を体験する技術である。

近年、この仮想現実感の技術がさまざまな分野に応用されている。例えば、建築分野へ応用すると、実際に家を建築する前にその中を歩き回ったり、部屋の内装を変えたりすることができる [5]。機械設計の分野に応用すると、実際に製品を作らずに、シミュレーションによってあらかじめ綿密なチェックを行なうことができる。例えば、スペースシャトルの周囲を高速で流れる空気の様子を数値計算によってシミュレートし、その結果を実際の風洞実験を行なっているかのごとく観察することができる [6]。医療分野へ応用すると、人体内部に入り込んだような感覚を持って、診断や治療を行なうことができる [7]。

また、通信によって遠方の世界の情報を収集し、再構成された世界を仮想現実感の技術によって高い臨場感のもとで体験することができる。このような通信技術と合体した仮想現実感の技術をテレイグジスタンスと呼ぶ [8, 9, 10, 11, 12]。建設省が中心となって行なっている雲仙普賢岳の火砕流、土石流の土砂取り除き作業が好例であり、この工事には無人のブルドーザやダンプトラックを 2km 離れた安全地帯から立体 TV 画像とディジタル通信によって遠隔操作する技術が使用されている [13]。テレイグジスタンスは医療分野にも応用されており、宇宙船の中に置かれた手術用ロボットの各センサからの情報が、全て地球上の医師に伝えられ、逆に医師の動作がもらさずロボットに伝えられる。このシステム自体は現実性に欠けるものであるが、手術用ロボットの位置に経験の浅い医師を置き、地上側の医師を専門医として適切な指示を与えるようなシステムにすれば、現実性の高いものになるであろう [14]。

1.4 身振りインタフェース

インタフェースという枠組でいえば、最も広く使われ、今後も研究、開発が盛んに行なわれそうなのは身振りによる機械とのコミュニケーションである [15]。これに身体動作に含まれる他のノンバーバル言語を加えると、当面の情報機械とのインタフェースにおけるノンバーバルモードの大部分を占めると思われる。それらは、現今の機械とのインタラクションの方法の延長に自然に現れるメディアだからである。

このうち身振りと姿勢を伝達するインタフェースは身振りインタフェースと呼ばれる。身振りは無意識あるいは非意図的なメッセージも伝えるが、現段階での機械とのコミュニケーションでは、人からの意図的なメッセージ伝達と機械が生成する情報の伝達が主体となる。身振りは極めて効果的なコミュニケーションの要素であり、機械とのコミュニケーションを豊かにするうえで欠かせない。人のノンバーバルコミュニケーションに照らせば、身振りインタフェースの有効な用途としては次のようなものが挙げられる。

- 対象の選択や指示、場所の指示 :指差し動作
- 仮想対象の操作 :仮想タスク空間での対象の移動や装置操作
- 身振りによる対話 :エージェントなどとの対話、身振りコミュニケーションの機械支援、身振りと音声言語間の通訳。

身振りによる操作と従来の機械操作の違いは、身振りでは身体の形や運動パターンが意味をもつのに対して、機械操作で情報を担うのは身体が動かす装置の制御変数の値であり、身体のどこで操作したとかその動きではないという点にあった。例えば、車のハンドル操作で意味をもつのは手の動きではなくハンドルの回転角度であり、手書き文字入力も書かれた文字形状が認識の対象である。身振りによる操作は即応性があり、直感的であるに対し、従来の機械操作はコマンドやボタン、ジョイスティックなどによるものであり、経験や熟練が必要である。

前節で述べたように、インタラクティブな電子系的メディアの発達はこれからのアミューズメント装置を支える技術の主な要素でもある。従って、身振りインタフェースの発展がこれからの遊び文化にも大きな影響を与えると考えられる。

1.5 水中ロボットの身振りによる遠隔操作

移動することのできる無人の水中機械は、有索潜水機、無索潜水機に大別できる。さらに、有索潜水機の中でも自航水中移動型 (軽、重作業用)、自航海底クロール型 (ライン、土木作業用) などがある。このうち、ROV(Remotely Operated Vehicle)[16] と呼ばれる有索遠隔操縦機は海底油田の開発とともに発展してきた。また、次のような航空機関連事故での派手な活躍もある。

- 1966 年:米海軍の「CURV(Cable-controlled Underwater Recovery Vehicle)」がスペイン沖 868m の深度より水素爆弾を回収
- 1986 年:スペースシャトル爆発にともなうフロリダ沖の回収作業に多数の ROV が従事
- 1988 年:南ア航空機のフライトレコーダを 4,500m の深さから回収

このような海底作業の他、水中ロボットは海洋開発・海底油田探査・核廃棄物の処理など人間が行きにくい所での作業には不可欠な存在である。したがって、水中ロボットに関する研究は急速に進めるべきである。

一方、近年、スキューバダイビングを楽しむ人の数が増えつつある。しかし、これには充分な体力や知識などが要求される。また、十分な経験があっても、水深 100m に至る深海潜水を経験した人は非常に少ない。スキューバダイビングでは、水深が深くなるにつれて水圧が高くなるため、潜水用呼吸機材が壊れたり、人間が物理的に水圧に耐えられなかったりする危険が伴う。毎年、シーズンになれば、ダイバーが遭難するニュースが良く見られる。

本研究ではバーチャルリアリティ技術を利用し、人間が身振りを用いて水中ロボットの遠隔操作ができると同時に、水中ロボットを介して、実際に水中に潜らずに誰でも手軽に擬似潜水体験ができるシステムの開発を目指す [17, 18]。

2. 水中ロボットの身振りによる遠隔操作システムの基本構成

本システムの基本構成を図 1 に示す。

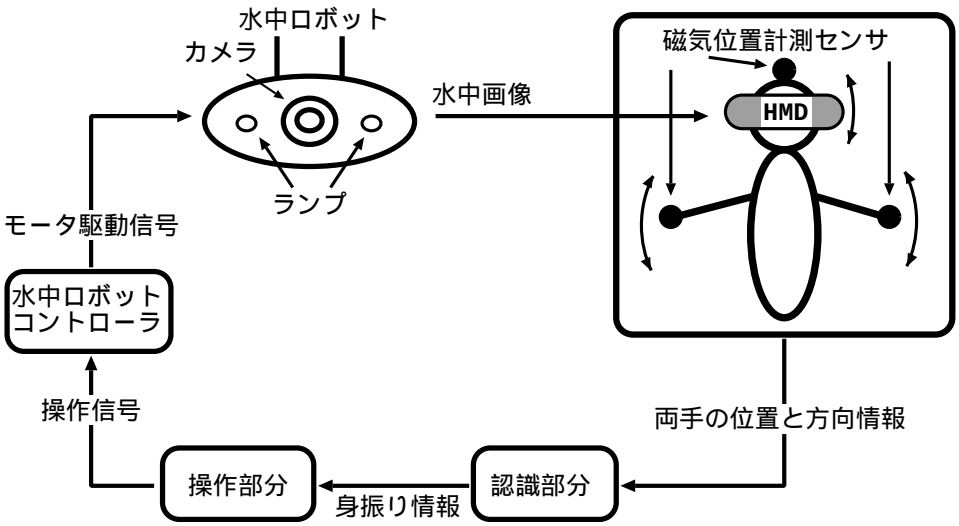

図 1 システム基本構成

本システムは主に水中画像の出力、身振り認識、水中ロボットの操作、の 3 部分から構成される。被験者は HMD を装着し、両手の平と頭部に磁気位置計測センサをつける。カメラから得た水中画像を HMD に表示し、被験者は水中画像を見ながら行きたい方向へと泳ぐ動作をする。頭部及び両手の平の位置、姿勢角を、磁気位置計測センサから獲得する。これらの情報を解析し、実際に被験者がどのぐらいの勢いでどの方向へ進もうとしているか (以下特徴量と呼ぶ) の認識を行なう。求められた両手のそれぞれの特徴量に基づいて水中ロボットの駆動を、また、頭部の姿勢データに基づいて水中ロボットのカメラの向きを遠隔操作する。これらの処理の繰り返しで、人間が水中に潜らずに疑似潜水体験が可能になる。

2.1 水中画像の出力

水中画像の出力部分では、図 2に示す能動立体ディスプレイ (HMD :Head-Mounted Display、島津株式会社製、STV-01) を用いる。HMD 頭頂部には、磁気位置計測センサを取り付けている。センサについては 2.2節で述べる。被験者の位置と姿勢は磁気位置計測センサで計測され、それに応じた画像が HMD の小型液晶ディスプレイに提示される。非接触型の磁気位置検出センサを用いているため、被験者が空間内を歩き回ることができる。また、液晶ディスプレイが両眼に近接しているため、仮想空間への没入感は高い。したがって、HMD には、水中ロボットのカメラから得られた水中画像を表示させる。

図 2 頭部搭載型ディスプレイ (HMD)

2.2 身振りの認識

身振りの認識部分では磁気位置計測センサ (Kaiser Aerospace and Electronics 社製、Polhemus) を用いる。磁気位置計測センサは身体を拘束することなく、非接触で三次元空間内の位置を計測できるセンサである。コイルを通して流れる電流は、磁場を発生させる。逆に磁場の中にコイルが置かれていると、磁場の強さに比例した誘導起電力が生じる。すなわち、磁気位置計測センサは、発振装置 (Transmitter) が生成する磁場によって受信装置 (Receiver) に生じる起電力を用いて、三次元空間の位置と姿勢を計測するセンサである。図 3にトランスミッタ、レシーバを示す。

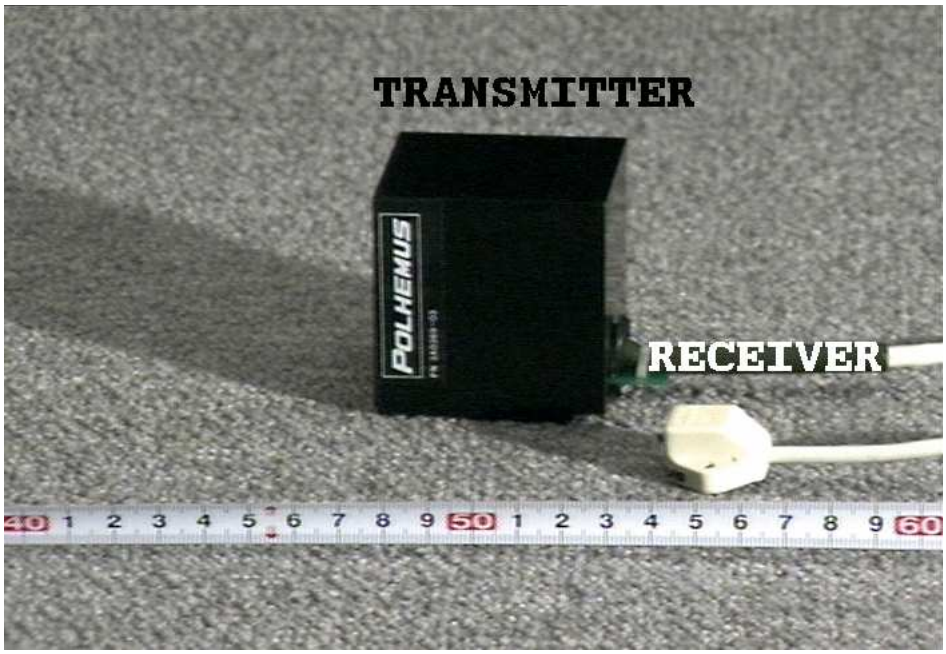

図 3 磁気位置計測センサ

図 4 に示すようにトランスミッタは直交する 3 つのコイル L_1 , L_2 , L_3からなっており、それぞれのコイルに順番に電流を流し、直交する 3 つの磁場を順次に発生させる。

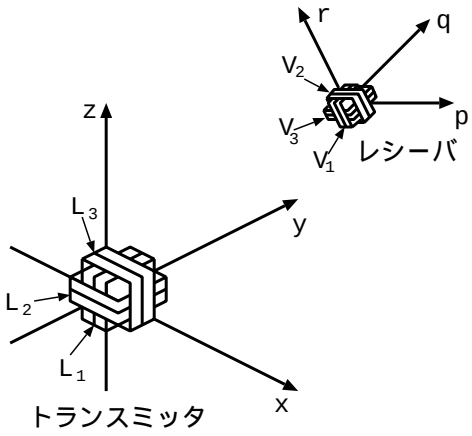

図 4　発振装置 (トランスミッタ) と受信装置 (レシーバ)

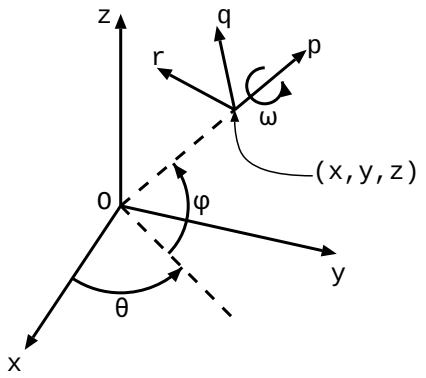

図 5　位置と姿勢角

レシーバも直交する 3 つのコイルからなっている。L_1が磁場を発生させると、レシーバの 3 つのコイルにそれぞれ V_1、V_2、V_3の起電力が生じる。L_2、L_3が発生させた磁場についても同様で、それぞれの磁場について起電力の値が 3 つ得られる。また、未知数は、図 5 に示すように、レシーバの三次元座標 x、y、zと姿勢角θ、ϕ、ωの 6 つである。レシーバの各コイルについて 3 つの起電力の値が得られるので、計測値は $3 \times 3 = 9$ つ得られ、これらの値から x、y、z、θ、ϕ、ωを求めることができる。

本システムでは、実際に、レシーバを HMD 頭頂部と、被験者の両手の平に取り付ける。また、レシーバの位置と向きは図 6 に示すトランスミッタの決定する座標系で求められ、それぞれをベクトル化する。

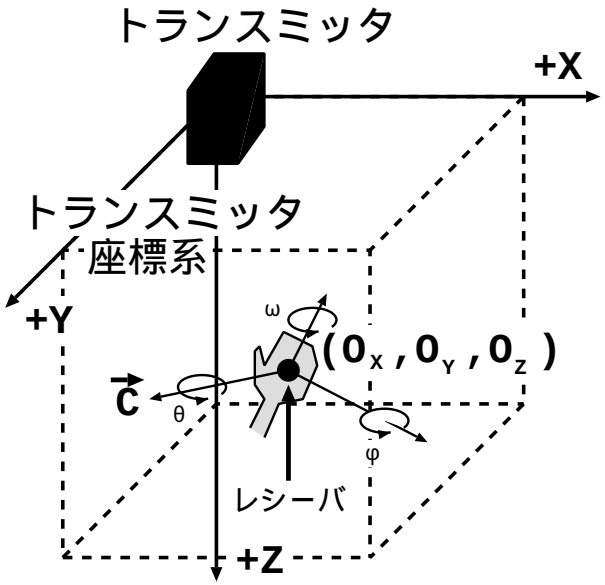

図 6　身振りの取得

ここで、$[O_X, O_Y, O_Z]$ はトランスミッタ座標系におけるレシーバ (手) の座標である。また、レシーバ (手) の姿勢角 θ、ϕ、ω により、手の平の法線ベクトル ($\vec{C}$) は次のように求まる。

$$\begin{aligned} \vec{C} &= [\ C_X, C_Y, C_Z\ ] \\ C_X &= \cos\theta \cdot \sin\phi \cdot \cos\omega + \sin\theta \cdot \sin\omega \\ C_Y &= \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \cos\omega - \cos\theta \cdot \sin\omega \\ C_Z &= \cos\phi \cdot \cos\omega \end{aligned} \tag{1}$$

C_X、C_Y、C_Z はそれぞれ手の平の法線ベクトル ($\vec{C}$) のトランスミッタ座標系の X 軸、Y 軸、Z 軸に対す方向余弦である。これらの情報を基に被験者の身振りを解析し、実際にどのぐらいの勢いでどの方向へ進むかを認識する。

被験者の身振りの内容に対して、水中ロボットに如何にそれに近い動きをさせるかが本研究の課題である。実際に泳ぐように、つまり、泳ぎ方が上手な人は効率良く水中ロボットを操作することができるシステムを構築するため、以下のように身振りの解析を行なった。

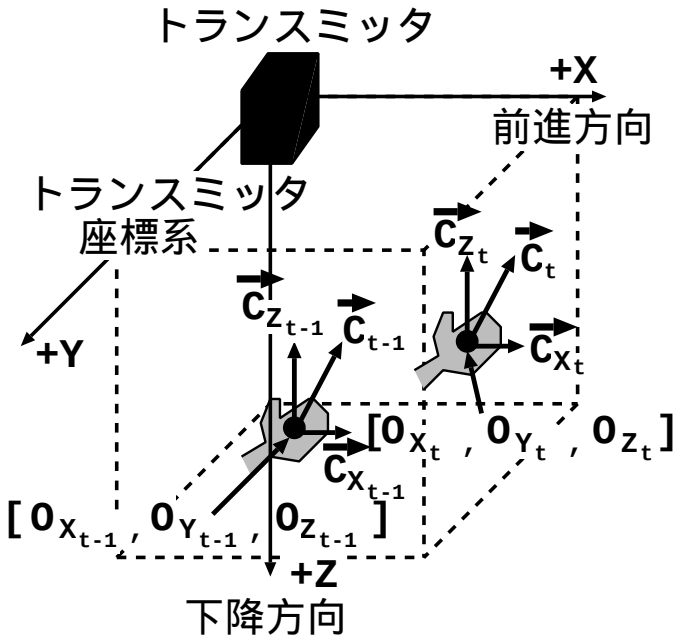

図 7 身振りの解析

図 7 に示すように磁気位置計測センサのトランスミッタ座標系において、手の位置変化量ベクトルを$\vec{\Delta_t}$ とすると

$$\vec{\Delta_t} = [O_{X_t} - O_{X_{t-1}}, O_{Y_t} - O_{Y_{t-1}}, O_{Z_t} - O_{Z_{t-1}}] \tag{2}$$

で表される。また、実際に人間が泳ぐ時は両手の進行方向に対する運動量の差によって左右に旋回する特性がある。したがって、本システムでは、$\vec{\Delta_t}$ の Y 軸方向成分 (Δ_{Y_t}) を利用しない。

人間が泳ぐ時の手の動きの中で、実際に仕事をしている動きを水平方向と垂直方向に分けて考える。水平方向では前進と後退の動作がある。前進の場合は前進方向 $(+X$ 軸$)$ に対して手の平の向きが逆向き $(C_X < 0)$ であり、手の位置が前から後ろへ $(\ O_{X_t} - O_{X_{t-1}}\ < 0)$ 動く。逆に、後退の場合は $+X$ 軸に対して手の平の向きが正であり、手の位置変化も正である。同様に垂直方向では上昇と下降の動作がある。上昇の場合は下降方向 $(+Z$ 軸$)$ に対して手の平の向きが下向き $(C_Z > 0)$ であり、手の位置が上から下へ $(\ O_{Z_t} - O_{Z_{t-1}}\ > 0)$ 動く。下降の場合は $+Z$ 軸に対して手の平の向きが負であり、手の位置変化が負である。本システムでは、この逆の動作で泳ぐ人はいないと仮定する。

また、有効な仕事は $\vec{\Delta_t}$ と $\vec{C_{t-1}}$ とのなす角度にも依存する。つまり、前進・後退の場合を考えると $\vec{\Delta_t} = [\ \Delta_{X_t}\ ,\ 0\ ,\ 0\ ]$ かつ $\vec{C_{t-1}} = [\ C_{X_{t-1}}\ ,\ 0\ ,\ 0\ ]$ となるように泳ぐと効率良く進み、$\vec{\Delta_t}$の X 軸方向成分 (Δ_{X_t}) または$\vec{C_{t-1}}$の X 軸方向成分 $(C_{X_{t-1}})$ が 0 になる時はいくら手を速く振っても、大きく振っても身体は進まないはずである。

上昇・下降の場合についても同様なことが言える。

したがって、身振りの特徴量 (W) は次のように定義した。

$$W \ = \ \vec{\Delta_t} \cdot \vec{C_{t-1}} \qquad \text{但し、} (\vec{\Delta_t} \cdot \vec{C_{t-1}}) \ > \ 0 \tag{3}$$

ここで、

$$\begin{cases} \text{前進} \ \ \Delta_{X_t} < 0 \ \ \text{かつ} \ \ C_{X_{t-1}} < 0 \\ \text{後退} \ \ \Delta_{X_t} > 0 \ \ \text{かつ} \ \ C_{X_{t-1}} > 0 \\ \text{上昇} \ \ \Delta_{Z_t} > 0 \ \ \text{かつ} \ \ C_{Z_{t-1}} > 0 \\ \text{下降} \ \ \Delta_{Z_t} < 0 \ \ \text{かつ} \ \ C_{Z_{t-1}} < 0 \end{cases}$$

また、頭部の動作は頭部のセンサの姿勢角 θ、ϕ、ω で求まる。

頭部の姿勢角を Θ、Φ、Ω とすると

$$\begin{aligned} \Theta \ &= \ \theta \quad (azimuth\ angle) \\ \Phi \ &= \ \phi \quad (elevation\ angle) \\ \Omega \ &= \ \omega \quad (roll\ angle) \end{aligned} \tag{4}$$

で表される。

2.3 水中ロボットの操作

2.3.1 水中ロボットの仕様

水中ロボットの遠隔操作部分では、図 8 に示す水中ロボット (広和株式会社製、KOWA75 Marine Comet) を用いる。この水中ロボットは胴体の先端に上下 180 度回転できる CCD カメラをもち、中央部には垂直方向運動用のプロペラが 2 つある。後部には水平方向運動用のプロペラ 2 つある。後部のプロペラはそれぞれ独立に駆動可能なモータに接続されているため、その出力差によって、水中ロボットを左右に旋回させることが可能である。最高前進速度は約 2knots(約 3.6km/h) で、使用限度水深は 75m である。また、水中ロボットの駆動系はすべてアナログ制御である。カメラの駆動は約 1.5V ~ 4.0V の範囲で制御され、モータの駆動は約 2.0V ~ 3.5V の範囲で制御される。後部のプロペラを制御するモータは、2.84V より低い駆動電圧値の時負回転 (後退)、それ以上の時には正回転 (前進) となる。中央部のプロペラを制御するモータは、2.66V より低い駆動電圧値の時負回転 (上昇)、それ以上の時には正回転 (下降) になる。

図 8 水中ロボット

式 (3)、式 (4) で求められる特徴量をそれぞれ水中ロボットのモータを駆動する入力信号、水中ロボットのカメラを転させる入力信号として用いる。

本来は、身振りの認識部分で求められた特徴量通りに水中ロボットの駆動電圧を調整するべきであるが、磁気位置計測センサの精度に問題があり、レシーバが静止している時でも、周囲の磁場の影響でデータが微妙に変わる場合がある。よって、式 (5) に示す特徴量の蓄積値 $(\sum_t W)$ で水中ロボットの駆動電圧の調整を行なう必要がある。

$$\sum_t W \ = \ \sum_t (\vec{\Delta_t} \cdot \vec{C_{t-1}}) \qquad \text{但し、} (\vec{\Delta_t} \cdot \vec{C_{t-1}}) \ > \ 0 \tag{5}$$

普通に人間が泳ぐ時、一つの動作において、手の進行方向に対する位置変化は大きくても手の長さぐらいである。また、仕事している間、手の平の法線ベクトルが常に進行方向と平行するとは限らない。したがって、本システムでは $\sum_t W \leq$ 手の長さ の間で需要に応じて閾値を決め、$\sum_t W$ に従い水中ロボットの駆動電圧の調整を行なう。

また、人間が水中で手を動かしている間は体が移動し続けるが、手の動きを止めると、移動速度徐々に落ちていくことになる。したがって、本研究では $\sum_t W \geq$ 閾値 の時には水中ロボットに駆動信号を出力し続ける。$\sum_t W$ < 閾値 の時には水中ロボットが徐々に止まるように操作出力するシステムを構築する。

水平方向

図 7での X軸方向における特徴量の蓄積値 $(\sum_t W_X)$ を用いる。

$$\sum_t W_X \ = \ \sum_t (\vec{\Delta_{X_t}} \cdot \vec{C_{X_{t-1}}}) \qquad \text{但し、} (\vec{\Delta_{X_t}} \cdot \vec{C_{X_{t-1}}}) \ > \ 0 \tag{6}$$

ここで、

$$\begin{cases} \text{前進} \ \ \Delta_{X_t} < 0 \ \ \text{かつ} \ \ C_{X_{t-1}} < 0 \\ \text{後退} \ \ \Delta_{X_t} > 0 \ \ \text{かつ} \ \ C_{X_{t-1}} > 0 \end{cases}$$

また、左右のモータは左手と右手のそれぞれの身振りによって駆動される。両手の身振りの特徴量の差によって、水中ロボットを左右に旋回させることができる。

水中ロボットを前進、後退させる際に、モータに与える駆動電圧の分布を表 1 に示す。

表 1　水中ロボットの駆動電圧分布 (水平方向)

正回転 (前進)		負回転 (後退)	
電圧 (V)	出力 (%)	電圧 (V)	出力 (%)
3.49	100	2.84	0
3.20	91	2.82	13
3.16	87	2.78	17
3.14	83	2.76	22
3.12	78	2.74	26
3.10	74	2.72	30
3.08	70	2.70	35
3.06	65	2.68	39
3.04	61	2.66	43
3.02	57	2.64	48
3.00	52	2.62	52
2.98	48	2.60	61
2.96	35	2.56	65
2.94	30	2.52	70
2.92	17	2.50	74
2.90	13	2.48	78
2.86	4	2.46	83
2.84	0	2.44	87
		2.40	91
		2.28	100

垂直方向

図 7での Z軸方向における特徴量の蓄積値 $(\sum_t W_Z)$ を用いる。

$$\sum_t W_Z \;=\; \sum_t (\vec{\Delta_{Z_t}} \cdot \vec{C_{Z_{t-1}}}) \qquad \text{但し、} (\vec{\Delta_{Z_t}} \cdot \vec{C_{Zt-1}}) \;>\; 0 \tag{7}$$

ここで、

$$\begin{cases} \text{上昇} \;\; \Delta_{Z_t} > 0 \;\; \text{かつ} \;\; C_{Z_{t-1}} > 0 \\ \text{下降} \;\; \Delta_{Z_t} < 0 \;\; \text{かつ} \;\; C_{Z_{t-1}} < 0 \end{cases}$$

水中ロボットを上昇、下降させる際に、モータに与える駆動電圧の分布を表 2 に示す。

表 2　水中ロボットの駆動電圧分布 (垂直方向)

正回転 (下降)		負回転 (上昇)	
電圧 (V)	出力 (%)	電圧 (V)	出力 (%)
3.07	100	2.66	0
3.00	96	2.64	13
2.94	91	2.60	22
2.86	87	2.58	26
2.84	83	2.56	35
2.82	78	2.54	39
2.80	70	2.52	52
2.78	61	2.50	61
2.76	52	2.48	70
2.74	43	2.46	78
2.72	30	2.44	87
2.70	17	2.42	96
2.68	9	2.40	96
2.66	0	2.38	100

カメラの操作

本研究で用いられた水中カメラは上下 180 度回転可能なものである。つまり、頭部動作の上下動成分のみに依存する。したがって、図 6 でのφ にしか依存しない。

よって、カメラの回転角度はφ のみで表される。

$$\Phi = \phi \quad (elevation\ angle) \tag{8}$$

ここで、φ が正の時、カメラは上を向いていることになる。

水中ロボットのカメラを上向き、下向きに回転させる際に、モータに与える駆動電圧の分布を表 3 に示す。

表 3 カメラの回転電圧分布

チルト (上向き :+ , 下向き :-)	
電圧 (V)	角度 (°)
3.95	+90
3.55	+45
3.00	0
2.45	-45
1.50	-90

2.3.2 人間の静水中での遊泳特性

人間が静水中にいる場合を考える。身振りに対する体の遊泳特性は以下のようになる。

I. ペースを保ちながら泳ぐ動作すると、体が一定の速度で進行する

II. ペースを上げながら泳ぐ動作すると、体が加速しながら進行する

III. 泳ぐ動作をやめると、体が惰性によってある程度は進行し、次第に止まる

IV. 体が止まる前に再び泳ぐ動作すると、体は再び加速する

- 進行方向へ進むように泳ぐ動作すると体が速度に乗って進行する
- 逆方向へ進むように泳ぐ動作すると無理を感じながら体が急に止まる

また、本研究の目的は如何に被験者の身振り通りに水中ロボットを遠隔操作できるかである。したがって、上述の特性に従い、次節に示す 2 種の操作方法 (1、2) で実験を行なった。

2.3.3 水中ロボットの操作方法

被験者の身振りから、特徴量 (式 (3),(4)) とその蓄積量 (式 (6),(7)) を求める。被験者の体型などによって特徴量蓄積値の閾値を決め、蓄積値が閾値以上であれば人間が泳いでいると認識し、閾値以下であればそうではないと認識する。認識結果に従い、水中ロボットに操作信号を送り、遠隔操作を行なう。身振りによる水中ロボットの操作のフローチャートを図 9 に示す。図に示した TIMER はループ A にかかった時間である。

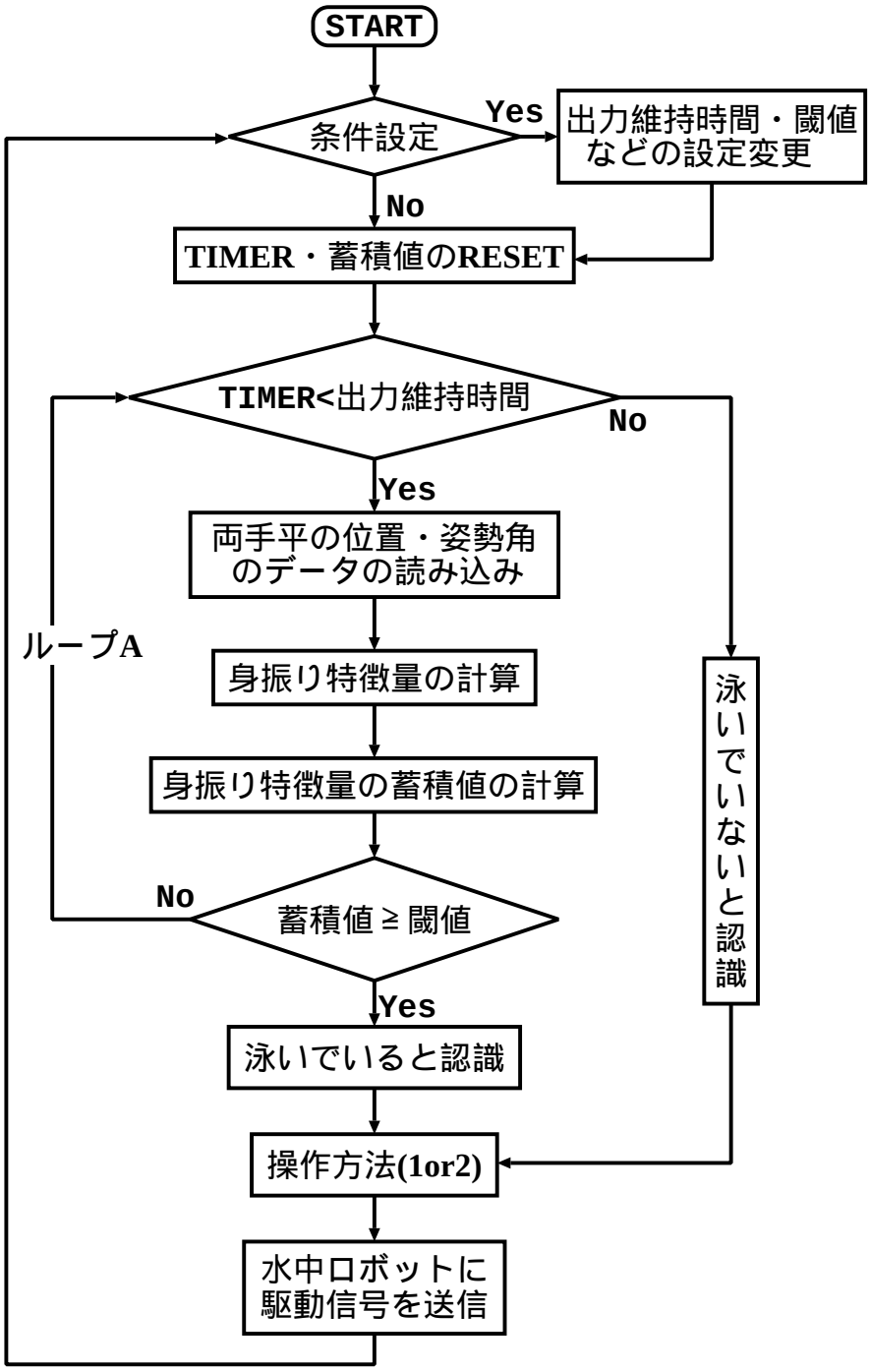

図 9 水中ロボット操作部分のフローチャート

方法 1

これは、惰性の効果を強調した水中ロボットの操作方法である。

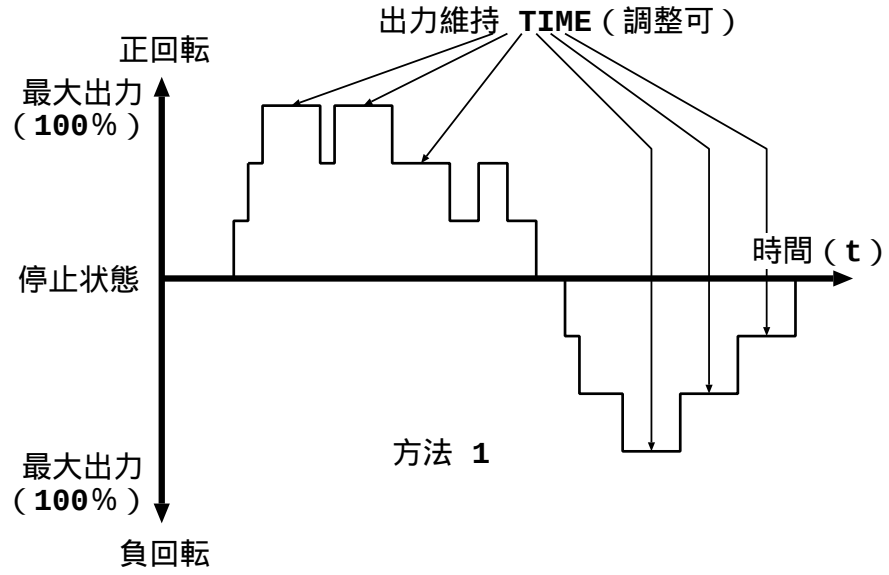

図 10 水中ロボットの操作:方法 1

2.3.2節で述べた特性に従って、水中ロボットの操作方法を次のようにした。図 10 に示すように水中ロボットのモータが停止状態の時に、人間が泳いでいると認識されたら、人間の進行しようとする方向へ動くよう水中ロボットに操作信号を送信する。人間が泳いでいると認識されなかったら、何にもせずに次の身振りが認識されるまで待つ。モータが回転している時に、水中ロボットの推進力発生方向と同方向の身振りが認識されたら、水中ロボットに現出力より一段高い出力の操作信号を送信する。

この方法では、惰性の効果を強調する。したがって、水中ロボットの推進力発生方向と逆方向の身振りが認識されでも、モータ回転を直ちに逆回転にはさせず、現出力より一段低い出力の操作信号を送信する。また、調節可能な出力維持タイムを設け、この時間以内に身振りが認識されなかったら水中ロボットには現出力より一段低い出力の操作信号を送信する。

方法 2

これは身振りの動作を直接反映する水中ロボットの操作方法である。

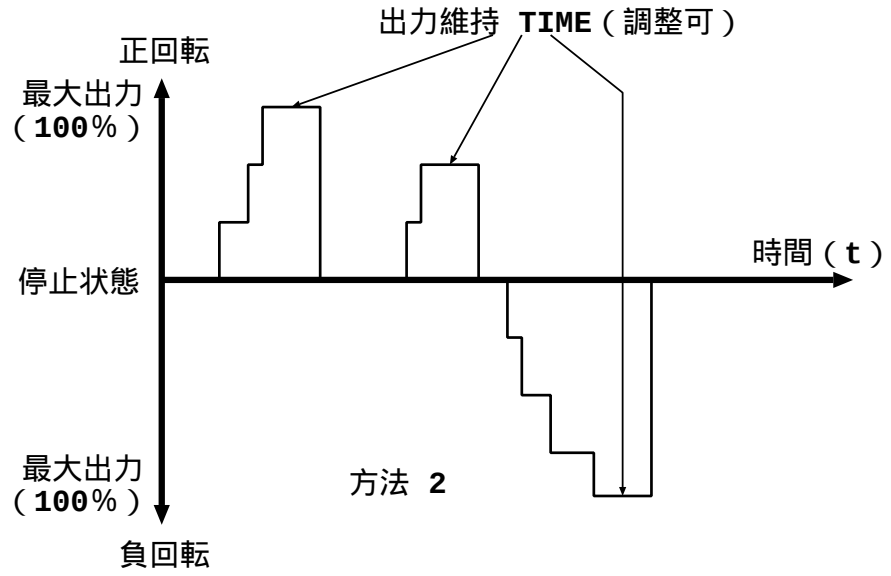

図 11 水中ロボットの操作:方法 2

2.3.2節で述べた特性に従って、水中ロボットの操作方法を次のようにした。図 11 に示すように水中ロボットのモータが停止状態の時に、人間が泳いでいると認識されたら、人間の進行しようとする方向へ動くよう水中ロボットに操作信号を送信する。人間が泳いでいると認識されなかったら、何にもせずに次の身振りが認識されるまで待つ。モータが回転している時に、水中ロボットの推進力発生方向と同方向の身振りが認識されたら、水中ロボットに現出力より一段高い出力の操作信号を送信する。水中ロボットに現出力より一段高い出力の操作信号を送信する。ここまでは方法 1 と同様である。

この方法は身振りの動作を直接反映する。したがって、水中ロボットの推進力発生方向と逆方向の身振りが認識されたら、水中ロボットに停止状態の出力操作信号を送信し、逆方向への出力操作信号を送信する。また、出力維持タイム以内に身振りが認識されなかったら、水中ロボットに停止状態の出力操作信号を送信する。

3. 実験

3.1 実験条件

今回は被験者の手の長さが 70cm であった。しかし、実際に泳ぐ時でも、常に手の平が進行方向と完全に垂直にならないと考えられる。したがって、方法 1、方法 2 において、実際の人間の有効な動作を、それぞれ経験的に 40cm、20cm と仮定した。すなわち、今回は身振りの蓄積量の閾値をそれぞれ 40cm、20cm とした。また、今回、被験者の一回の泳ぐ動作 (陸上で) の平均時間は 0.7 秒であった。したがって、出力維持時間を 0.7 秒とした。つまり、この 0.7 秒以内に次の身振りが認識されなかった場合は、水中ロボットに減速信号を送信するようにした。

3.2 実験内容

被験者は磁気位置計測センサを両手の平に取り付け、磁気位置検出装置の前に立ち、各移動には、次のような動作を使用することにした。実験は前述 2 つの方法を用いて行なった。

水平方向 :動作の定義

- 前進 :被験者は平泳ぎのような泳ぐ動作をする
- 後退 :被験者は背平泳ぎのような泳ぐ動作をする
- 右回転 :左手だけが平泳ぎのような泳ぐ動作をする
  または、左手が平泳ぎ、右手が背平泳ぎのような泳ぐ動作をする
- 左回転 :右手だけが平泳ぎのような泳ぐ動作をする
  または、右手が平泳ぎ、左手が背平泳ぎのような泳ぐ動作をする

垂直方向 :動作の定義

- 上昇 :両手の平を垂直下方向に向け、上下両腕を動かす
- 下降 :両手の平を垂直上方向に向け、上下両腕を動かす

3.3 実験風景

今回は本学 (奈良先端科学技術大学院大学) 構内の人工池で実験を行なった。その時の様子の一部を以下に示す。

図 12 実験風景

4. 結果

4.1 方法 1

2.3.3節で述べたように、方法 1 では惰性の効果を強調した。次は操作方法 1 を用いた前進の場合の実験結果の一部である。

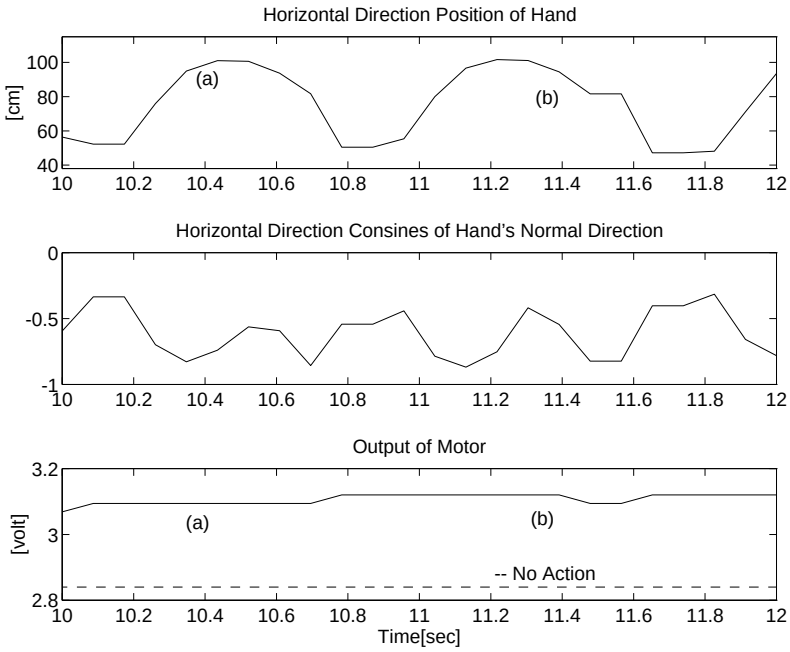

図 13 身振りの仕事量に対する駆動電圧の変化:方法 1

前進方向を正方向とする。図 13区間 (a)、(b) はそれぞれ 2 つ連続した前進の泳ぐ動作であったため、被験者の手の平の向きが負であった。また、区間 (a) の泳ぐ動作は出力維持タイム (0.7 秒) 以内に終了し、区間 (b) の泳ぐ動作は 0.9 秒以上かかった。その結果、区間 (a) では、0.7 秒以内に有効な身振り (2.2節、式 (3) で述べた) が認識され、水中ロボットは現出力より一段高い出力の駆動電圧で駆動された。区間 (b) では、0.7 秒以内に有効な身振りが認識されず、水中ロボットは現出力より一段低い出力の駆動電圧で駆動された。しかし、0.7 秒 ~ 0.9 秒の間有効な身振りが認識されたため、水中ロボットは再び、元の駆動電圧で駆動された。つまり、方法 1 では、0.7 秒以上 1.4 秒未満の時間の間で泳ぐ動作すると、水中ロボットが一定の速度で駆動されることになる。

4.1.1 水平方向

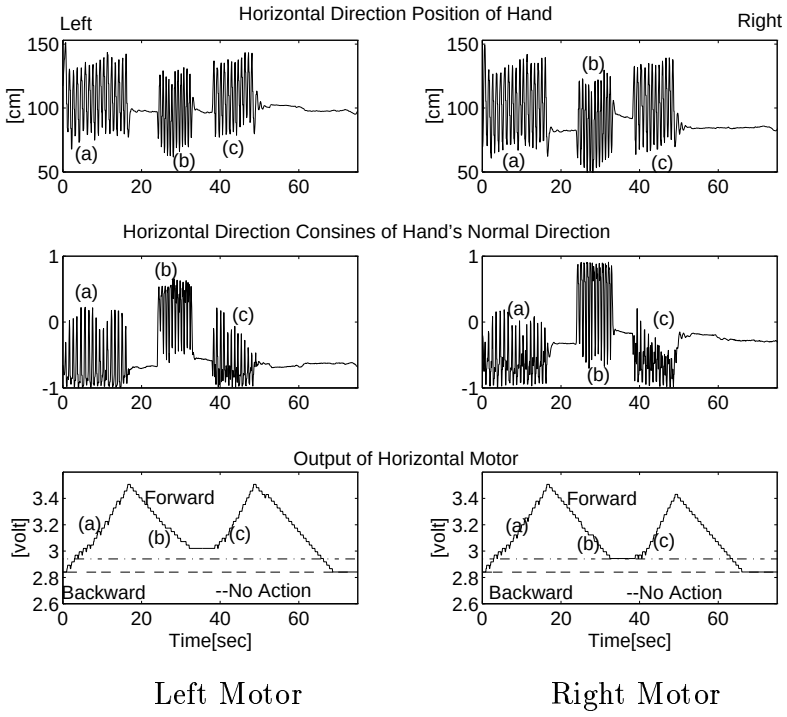

図 14　方法 1:前進

前進　前進方向を正方向とし、次のような 3 の動作を行なった。図 14 区間 (a) では、被験者が手の平を負の方向に向け、かつ泳ぐ動作をし続た。その結果、前進の身振りが認識され、水中ロボットが前進方向へ加速した。手を止めるとロボットが減速した。図 14 区間 (b) では、左手の平を正の方向に向けたり、負の方向に向けたりして、無効な泳ぐ動作をしたが、右手の平をほぼ正の方向に向け、後退の泳ぐ動作をした。その結果、左手は泳ぐ身振りをしていないと認識され、右手は後退の身振りと認識された。したがって、右のモータは左のモータより速く減速した。図 14 区間 (c) では、水中ロボットが惰性によって進んでいる時に前進の身振りを行なった。その結果、水中ロボットが再び加速していった。

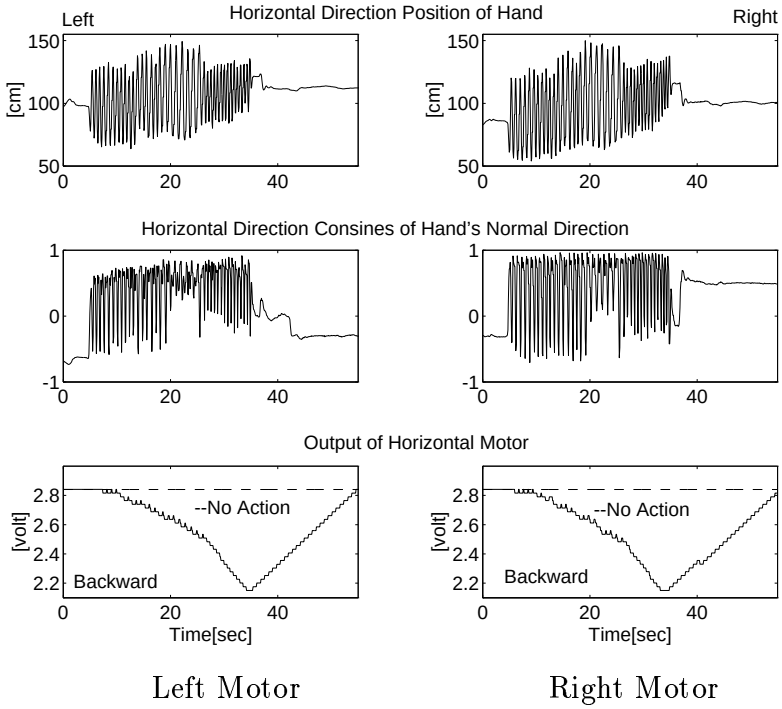

図 15　方法 1:後退

後退　図 15 に示すように被験者の手の平が正の方向に向き、かつ泳ぐ動作をし続けた。その結果、後退の身振りが認識され、水中ロボットのモータが後退方向へ駆動された。手を止めるとロボットが減速し、次第にモータが停止状態に戻った。

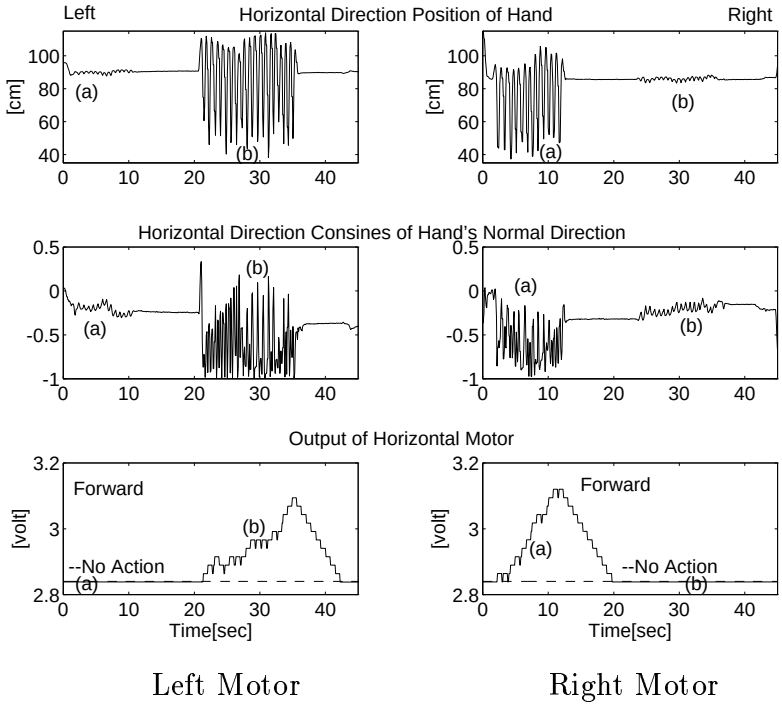

図 16　方法 1:片手で回転

片手で回転　図 16 区間 (a) では右手だけが前進の身振りをした。その結果、水中ロボットは右のモータだけが駆動され、左旋回をした。図 16 区間 (b) では左手だけが前進の身振りをした。その結果、水中ロボットは左のモータだけが駆動され、右旋回をした。

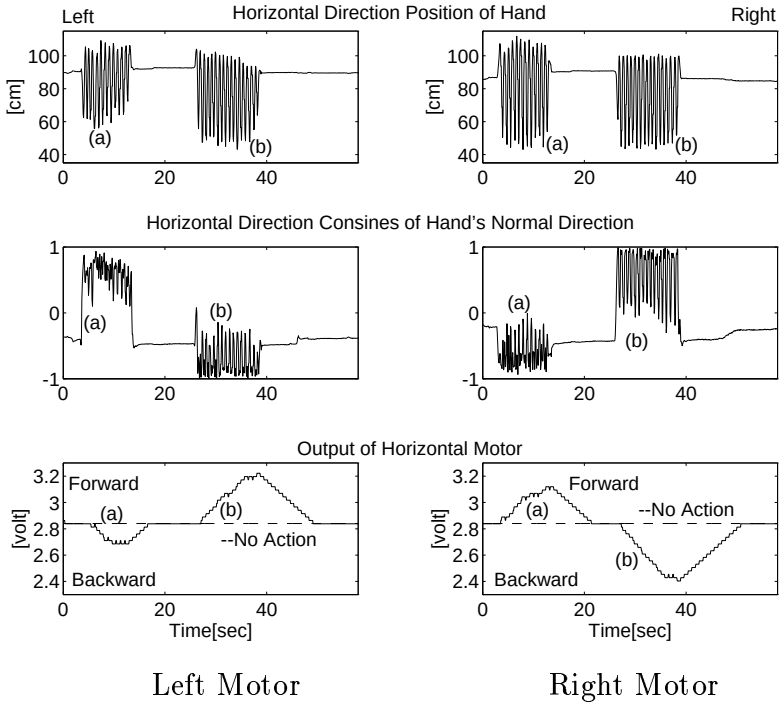

図 17　方法 1:両手で回転

両手で回転　図 17 区間 (a) では、左手が後退の身振りを、右手が前進の身振りをした。その結果、水中ロボットは左のモータが後退方向へ、右のモータが前進方向へ駆動され、左旋回をした。図 17 区間 (b) では、左手が前進の身振りを、右手が後退の身振りをした。その結果、水中ロボットは左のモータが前進方向へ、右のモータが後退方向へ駆動され、右旋回をした。

4.1.2 垂直方向

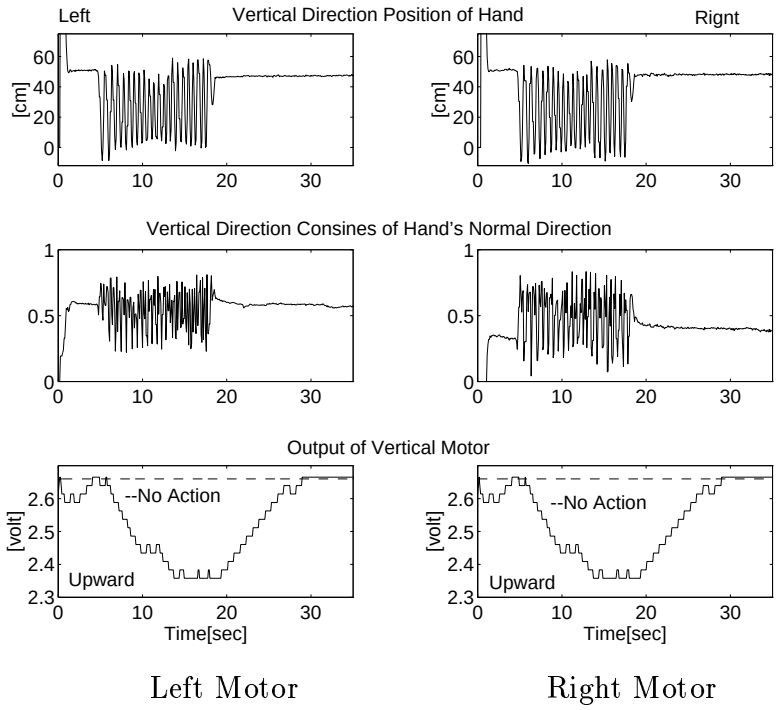

図 18　方法 1:上昇

上昇　地面方向を正方向とする。図 18 では、被験者の両手の平が正の方向に向き、かつ泳ぐ動作をし続けた。その結果、上昇の身振りが認識され、水中ロボットが上昇方向へ加速した。手を止めるとロボットが減速し、次第にモータが停止状態に戻った。また、13 秒 ~ 20 秒の間、一回の泳ぐ動作を 0.7 秒 ~ 1.4 秒のペースで泳ぐ動作をした。その結果、水中ロボットがほぼ一定の速度で駆動された。

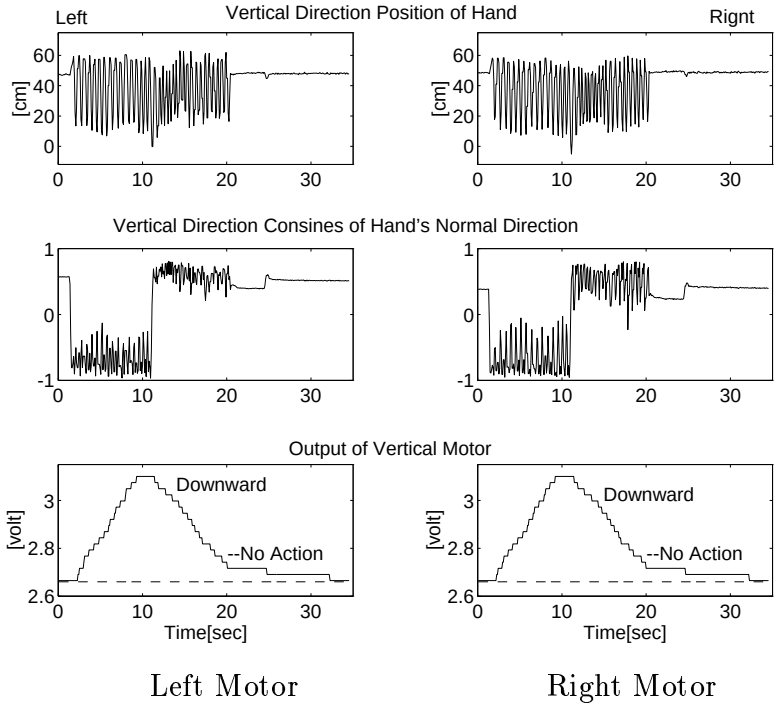

図 19　方法 1:下降

下降　図 19 では、被験者の手の平が負の方向に向き、かつ泳ぐ動作をし続けた。その結果、下降の身振りが認識され、水中ロボットが下降方向へ加速した。手を止めるとロボットが減速し、次第にモータが停止状態に戻った。

4.2 方法 2

2.3.3節で述べたように、方法 2 では身振りの動作を直接反映した。次は操作方法 2 を用いた後退の場合の実験結果の一部である。

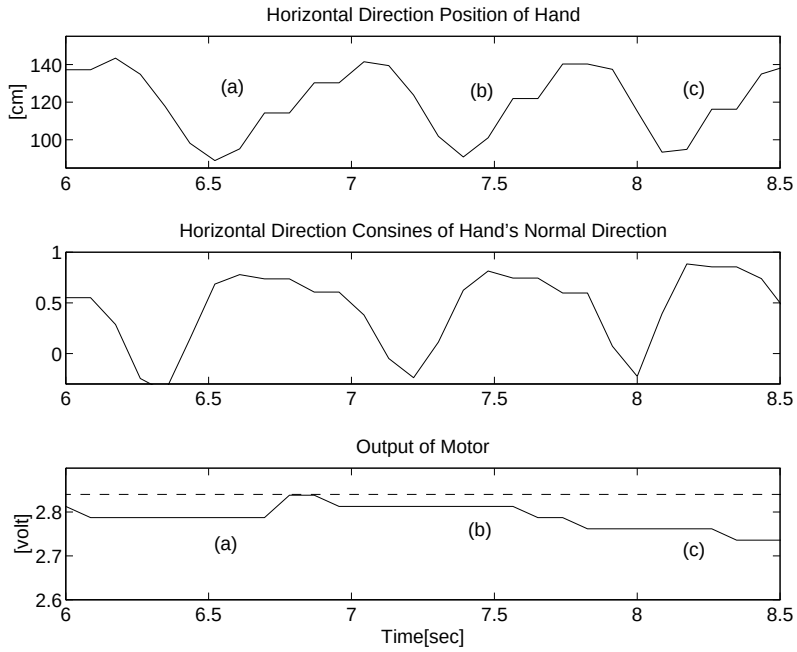

図 20 身振りの仕事量に対する駆動電圧の変化:方法 2

前進方向を正方向とする。図 20区間 (a)、(b)、(c) はそれぞ 3 つ連続した後退の泳ぐ動作であったため、被験者の手の平の向きが正であった。また、区間 (a) の泳ぐ動作は出力維持タイム (0.7 秒) 以上にかかり、区間 (b)、区間 (c) はの泳ぐ動作は出力維持タイム (0.7 秒) 以内に終了した。その結果、区間 (a) では、0.7 秒以内には有効な身振り (2.2節、式 (3) で述べた) が認識されず、水中ロボットのモータが停止状態に戻った。しかし、その後、有効な身振りが認識され、水中ロボットは現出力より一段高い出力の駆動電圧で駆動された。区間 (b) では、0.7 秒以内に有効な身振りが連続して認識されたため、水中ロボットは 2 段階加速した。区間 (c) では、0.7 秒以内に有効な身振りが認識され、水中ロボットはさらに加速していった。

4.2.1 水平方向

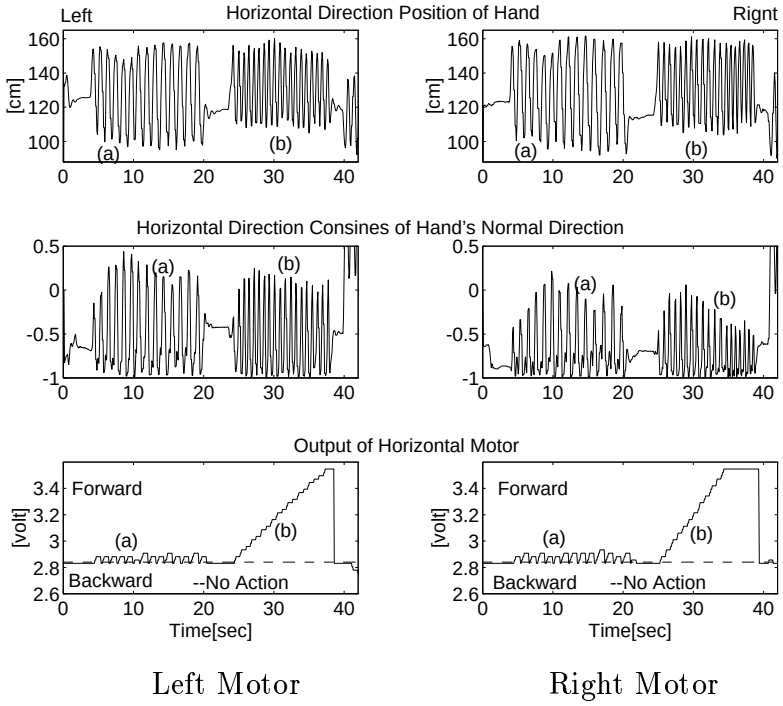

図 21　方法 2:前進

前進　前進方向を正方向とし、次のような 2 つの動作を行なった。図 21 区間 (a) では、両手の平を負の方向に向け、断続的に泳ぐ身振りをした。すなわち、身振りの間には 0.7 秒以上の時間差があった。その結果、前進の身振りが認識され、水中ロボットは断続的に前進した。図 21 区間 (b) では、区間 (a) に比べ、身振りの動作の周期を速くした。すなわち、身振りの間の時間差は 0.7 秒未満であった。その結果、水中ロボットは加速しながら前進した。ただし、右の手の動作が左の手の動作より、効率が良かった (手の平が進行方向に対する方向余限が大きい) ため、右のモータが左のモータより、速く加速していくことが確認できた。

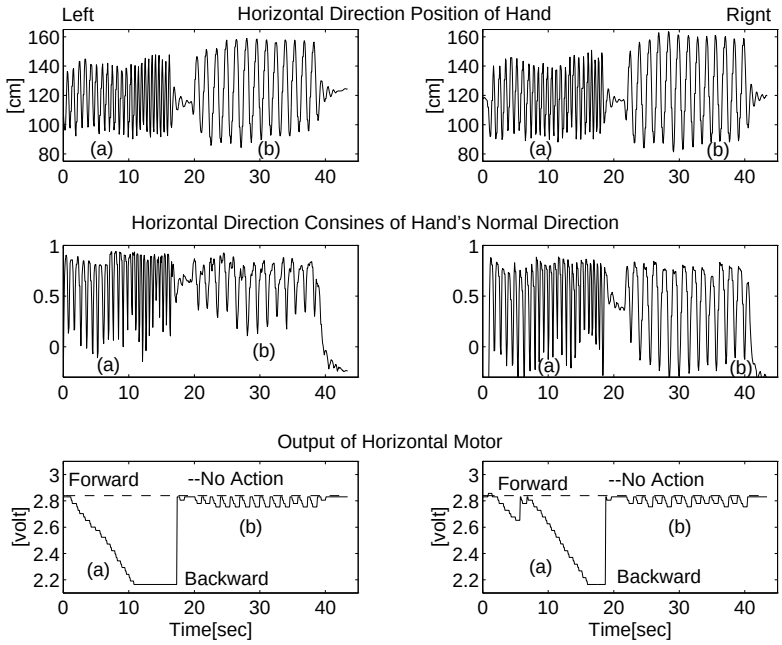

図 22　方法 2:後退

後退　前進の場合と同様に、前進方向を正方向とし、次のような 2 つの動作を行なった。図 22 区間 (a) では、両手の平を正の方向に向け、泳ぐ身振りをした。身振りの間の時間差は 0.7 秒未満であった。その結果、水中ロボットは加速しながら後退した。ただし、5 秒から 7 秒の間、右の手の平を負の方向に向け、泳ぐ身振りをしてしまったため、逆方向の身振りが認識された。その結果、右のモータが一旦停止をし、再び加速していった。左のモータと比べ、加速が遅れていた。図 22 区間 (b) では、区間 (a) に比べ、身振りの動作の周期を遅くした。すなわち、身振りの間には 0.7 秒以上の時間差があった。その結果、水中ロボットは断続的に後退した。

4.2.2 垂直方向

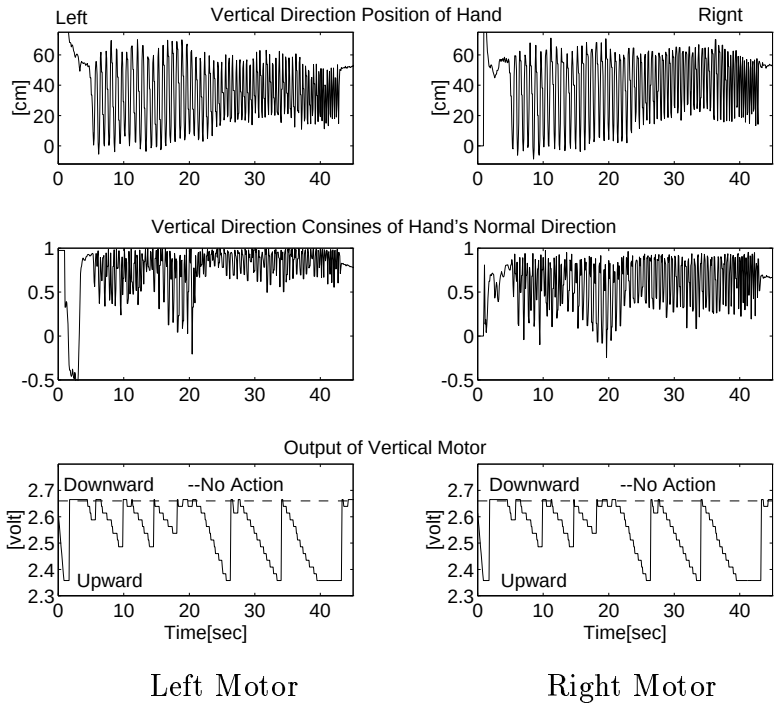

図 23 方法 2:上昇

上昇　地面方向を正方向をする。図 23 では、両手の平を正の方向に向け、断続的に泳ぐ身振りをした。その結果、上昇の身振りが断続的に認識され、水中ロボットは断続的に上昇した。

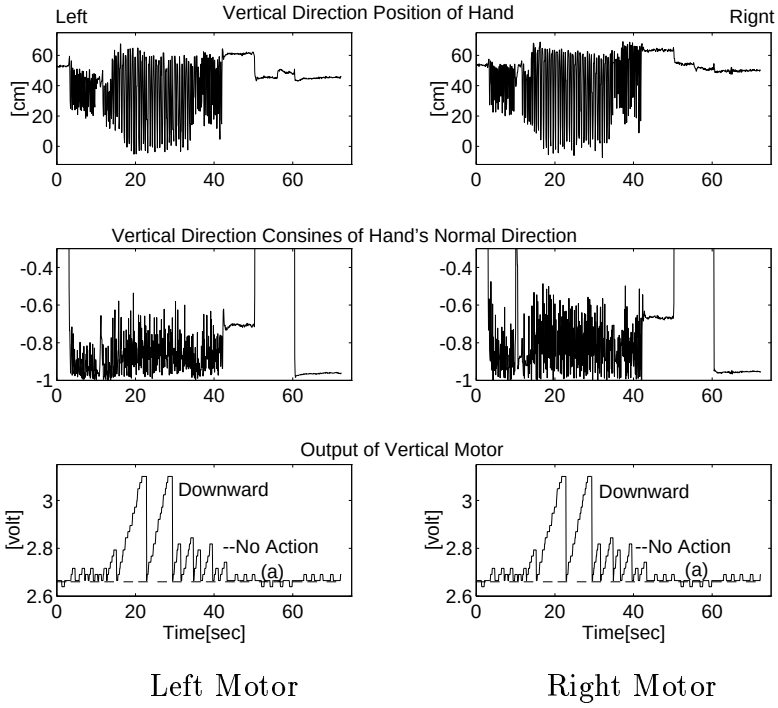

図 24　方法 2:下降

下降　図 24 では、両手の平を負の方向に向け、断続的に泳ぐ身振りをした。その結果、下降の身振りが断続的に認識され、水中ロボットは断続的に下降した。ただし、図 24区間 (a) では、被験者が身振りをしていなくても、モータが回転してしまうことがあった。これについては考察で述べる。

5．考察

2.3.3節で述べたように、身振りによる水中ロボットの遠隔操作として2種の方法を提案した。4章で示したように被験者の身振りに対して、いずれの方法でも、実際に人間が泳ぐ時と同様に両手をバランス良く動作させないと、水中ロボットがまっすぐに駆動されなかった。また、同時に水平方向と垂直方向に泳ぐ動作すると、水中ロボットが同時に各方向に駆動された。このように、身振りによる水中ロボットの遠隔操作をリアルタイムで身振り通りにできた。

身振りの認識部分
本来はあらゆる身振りについて解析し、時間によらず、各身振りを評価するべきである。しかし、磁気位置計測センサの精度に問題があり、被験者の周囲の磁性体による磁場の影響でノイズが生じることがあるため、身振りが誤って認識されることがあった。本研究では誰でも手軽に疑似潜水体験できるシステムを目指すため、瞬間的な誤った身振りが認識されても、水中ロボットが安定した動きをするようにした。すなわち、今回はあらかじめある閾値を決め、人間が実際の泳ぐ動作一回にかかる時間(0.7秒)を出力維持時間として、身振りの認識を行なった。出力維持時間内の身振りの蓄積量がこの閾値以上であれば、その身振りは泳ぐ動作として認識されるが、この閾値以下であれば、泳ぐ動作として認識されない。しかし、人間が実際に泳ぐ時、ずっと同じペースで泳ぐとは限らない。緩やかな速度で泳ぎたいため、手の動きを遅くすることもある。この場合、本システムでは疑似潜水の最中、認識に用いられる出力維持時間をその都度手動で変更しなければならないという不都合な問題点がある。

操作方法部分

方法 1 では、微妙な身振りに対しても、水中ロボットの出力がそれに対応できるシステムを目指したので、水中ロボットの操作信号の出力電圧値の分割数を細かく設定した。最高速度の時の出力を 100%とすると、その状態での減速レートは毎秒 0.91%であった。また、$2.3.1$節で述べたように今回の実験で使用した水中ロボットの最高速度が $1m/s$ であるから、その結果、負加速度は $0.091m/s^2$になる。そのため、水中ロボットのモータが高速で回転している時は、泳ぐ動作をやめても、水中ロボットのモータが停止するまで最高に 5 秒もかかった。実際の潜水経験者にとっては、惰性の効果が出すぎ、違和感を生じさせる結果となった。これを改善するには、減速レートを大きくする必要があることがわかった。しかし、実際の潜水未経験者にとって、この方法での疑似潜水は実際に水中にいる時と比べ、惰性の効果により、体が疲れずに楽に長距離潜水ができる。

方法 2 では、常に泳ぐ動作を続けていても、水中ロボットのモータが停止することがあった。これは出力維持時間を非常に短く $(0.7$ 秒に$)$ 設定したためである。この理由として考えられるのは、泳ぐ動作を 0.7 秒未満で続けていても、手の平の法線角度が微妙に進行方向から外れたり、磁気位置計測センサのレシーバ部分にノイズが入ったりすると進行方向の身振りとして認識されなくなってしまうからである。ただし、泳ぐ動作を止めると直ちにモータの回転が止まるため、細かい移動にはこの方法が有効である。

6. おわりに

本報告書では、水中ロボットの身振りによる遠隔操作システムについて報告した。水中機械は、海底作業・海洋開発などといった作業には不可欠な存在であり、その重要性がますます高まっている。そこで、本研究では、VR 技術を利用して、人間の身振りで水中ロボットの直感的な遠隔操作を実現した。また、本報告書では、身振り情報を獲得するためのデバイスとして、ポヒマスセンサを選択したが、場合によっては、これ以外にも様々なインタフェースを利用することができる。例えば、水中ロボットに作業用アームのようなものが取り付けられているとする。この場合、VR での操作デバイスとして良く知られているデータグローブを使用したシステムの構築が考えられる。すなわち、データグローブを使用することで、水中ロボットの作業用アームを遠隔操作するシステムが考えられる。

一方、近年、スキューバダイビングを楽しむ人の数が増えつつある。しかし、これには充分な体力や知識が要求されるため、適切な訓練が必要である。アミューズメント装置のインタラクティブ性重視の傾向がますます高まっていく中、本研究は電子系メディアとして、水中ロボットを介して、水に潜らずに誰でも気軽に疑似潜水体験が可能なシステムを実現した。本システムを用いることで、人間が行くことが不可能な深海での潜水体験も可能になった。したがって、海洋探査においての活躍が大いに期待できる。また、水族館のようなアミューズメント施設などにおいて、観客に海という大自然を体験してもらうアミューズメント装置として商品化されることを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始暖かい御指導を頂いた情報科学研究科千原 國宏教授に厚くお礼申し上げます。

また、副指導教官として御助言頂きました情報科学研究科横矢直和教授、並びに情報科学研究科佐藤宏介助教授に感謝いたします。

日頃より、御指導、御助言頂いた先端科学技術研究調査センター大城理助教授、並びに陳謙助手に感謝いたします。

また、本論文をまとめるに際し様々な御教授を頂きました情報科学研究科眞溪歩助手、並びに像情報処理学講座卒業生柴田 豊彦氏、藤本 直登志氏に感謝いたします。

日頃より、大変お世話になりました報科学研究科像情報処理学講座宇井 信子秘書に感謝いたします。

最後に本研究のシステムを設計するにあたり，御助言を頂きました像情報処理学講座卒業生藤本 直登志氏、福本 圭司氏、並びに永野 眞己氏、伴 好弘氏、安室 喜弘氏をはじめ、像情報処理学講座の諸氏には、本研究の様々な局面にて多大なる御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

[1] 早田 保博, 人工現実感とアミューズメントシステム, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.7, page 869–871, 1992.

[2] 廣瀬 通孝, 館 日章, バーチャル ・テック ・ラボ, 工業調査会,1992.

[3] 廣瀬 通孝, バーチャル ・リアリティ, 産業図書東京, 1993.

[4] 田村 秀行, 北村 素子, 電脳映像世界の探検, オーム社, 1993.

[5] Steve Aukstakalnis, David Blatner, 安村 通晃，伊賀 聡一郎，織畑 涼子, シリコン ・ミラージュ (仮想現実の科学と技術), 凸版印刷株式会社, 1994.

[6] Bryson,S. and Levit,C., A Virtual Environment for the Exploration of Three Dimensional Steady Flows, Proc. Intl. Conf. on Artificial Reality and Tele-existence, 15–23, 1991.

[7] 鳥脇 純一郎, 医用画像処理とバーチャルリアリティー, 日本 ME 学会雑誌 BME, vol.9, no.11, page 12–20, 1995.

[8] 舘 日章, 人工現実感, 日刊工業新聞社, 1992.

[9] 舘 日章，阿部 稔,, テレイグジスタンスの研究 第 1 報 -視覚ディスプレイの設計, 第 21 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, page 167–168, 1982.

[10] 井野 秀一，泉 隆，伊福部 達，木村 廣文, テレイグジスタンス型ロボットのためのハンドとその操作システム, 第 5 回ヒューマン ・インタフェース ・シンポジウム論文集, page 9–14, 1989.

[11] 舘 日章, テレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.4, page 314–326, 1989.

[12] 舘 日章，前田 太郎, 人工現実感を有するテレイグジスタンスロボットシミュレータ, 電子情報通信学会論文誌, vol.J75-D-II, no.2, page 179–189, 1992.

[13] 廣瀬 通孝, バーチャルリアリティーの現状と将来, 日本 ME 学会雑誌 BME, vol.9, no.11, page 3–11, 1995.

[14] Fisher, S.S., New Interactive Media:Interacting with Three-Dimensional Environments, CHI '90 Tutorial Note, 1990.

[15] 黒川 隆夫, ノンバーバルインタフェース, オーム社, 1994.

[16] 浦 環, 無人潜水艇の現状, 日本造船学会誌, vol.725, page 2-8, 1989.

[17] 王 家寧, 眞溪 歩, 大城 理, 千原 國宏, 水中物体認識用ロボットの遠隔操作に関する研究, 第 40 回システム制御情報学会研究発表講演会, page 93-94, 1996.

[18] 王 家寧, 眞溪 歩, 大城 理, 千原 國宏, 身振り情報による水中ロボットの遠隔操作, 第 39 回自動制御連合講演会, page 361-362, 1996.