

NAIST-IS-DD0161002

博士論文

顔情報と環境計測に基づく搭乗型移動ロボットの  
ユーザ支援システムに関する研究

足立 佳久

2005年 12月 21日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

足立 佳久

審査委員：

小笠原 司 教授 (主指導教員)

木戸出 正繼 教授 (指導教員)

松本 吉央 助教授 (指導教員)

白井 良明 教授 (委員, 立命館大学)

# 顔情報と環境計測に基づく搭乗型移動ロボットの ユーザ支援システムに関する研究\*

足立 佳久

## 内容梗概

近年，人々の日常生活を支援するためのロボットの研究がさかんに行われている．その中に，移動手段として人々を支援する搭乗型移動ロボットの研究がある．この種のロボットが図書館や美術館，あるいはホームセンターなどの場所内において，ジョイスティック等の従来のインタフェースによる操作や，その操作に対する知識の習得や訓練による負担がなく，搭乗者であるユーザの非言語的行動から意図を推測して行動し，目的地まで連れて行ってくれば非常に便利である．そこで，本研究は，新たな操作入力インタフェースとして，ユーザの意図が最も表出する顔の情報を利用し，周囲環境の認識機能と合わせることで，ユーザの意図を走行に反映し，操作に対する負担を軽減する移動支援システムの実現を目的とする．

まず，ユーザの顔の向きを利用した搭乗型移動ロボットの方向制御を行った．曲がりたい方向を見るといふ，ユーザにとって意識的であるが自然で受け入れやすい動作と，曲がっていくと正面を向いていくという無意識的に行っている動作を組み合わせることで，走行方向に対するフィードバックの操作においてユーザの負担を軽減した．実験により，進みたい方向に顔を向けるという意識的な動作とただその方向を見ているときの動作からユーザの意図を識別するために，顔の向きの認識結果のスムージング処理と周囲環境の認識が利用できることを示した．

---

\* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DD0161002, 2005年12月21日.

次に、高分解能で周囲環境の距離を計測できるレーザレンジファインダを用いた、移動ロボットのための高精度な自己位置推定手法を開発し、高い自己位置推定精度で指定目的地までの自律走行が可能であることを示した。そして、このロボットの自己位置推定とユーザの視線計測とを組み合わせることで、目的地までの自律走行中にユーザの注視が周囲環境のどの位置にあるかを推定し、注視位置の時間変化に基づいてユーザの注意の度合をヒストグラムを用いて表現した。実験により、注意の度合を表したヒストグラムと、ロボットの移動方向および対象との位置関係を利用することで、対象へのユーザの注意の有無が推定でき、注意が推定された場合、その対象に近づくよう走行制御を行うことで、ユーザの意図に応じた移動支援が可能であることを示した。

#### キーワード

顔情報計測，視線計測，注意推定，レーザレンジファインダ，ナビゲーション，自己位置推定

# Robotic Wheelchair System Based on User's Facial Information and Environmental Measurements\*

Yoshihisa Adachi

## Abstract

In the near future there is going to be a growing demand for human-friendly robotic wheelchairs as mobility aids. This paper proposes the concept of a robotic wheelchair to meet this need. It can understand human intentions by observing the user's nonverbal facial behavior and can move as the user wishes with minimal human interaction. Human intentions appear mostly on their face. Thus, our experimental system observes the human face, computing the direction of the face and gaze, and the surrounding environment.

The first step, we performed experiments on controlling the system's motion according to the direction of the face. Owing to a smoothing filter on the facial direction measurements, the system does not react to small and/or quick movements of the head. Thus, if the user looks for a while in the direction where they want to go, they can move the wheelchair to meet their requirements. Experimental results have shown the usefulness of this method.

The next step, we designed a control assistance system for the robotic wheelchair, which detects the gaze direction of the user and recognizes its position and the surrounding environment using sensors and a prepared map. Based on the detection of both the gaze direction and its position within the map, the robotic

---

\* Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0161002, December 21, 2005.

wheelchair can estimate the point where the user's gaze is currently focused. We adopted an attention representation based on histograms. The frequency of fixation is represented by an "attention histogram". Experimental results have indicated the validity of the control assistance system to change the route of the autonomous run using estimation of user's attention.

**Keywords:**

face tracking, gaze tracking, attention estimation, laser range finder, navigation and localization

# 目次

第1章 序論	1
1.1. 研究の背景と目的	1
1.2. 本論文の構成	5
第2章 ユーザの顔の向きによるロボットの方向制御	7
2.1. 本章の趣旨	7
2.2. システムの概要	9
2.2.1 システム構成	9
2.2.2 実験システム	11
2.3. 視覚情報処理を用いた顔の向きの認識	11
2.3.1 顔の特徴の追跡	11
2.3.2 アフィン変換を用いた顔の動きの表現	13
2.3.3 アフィンパラメータを用いた顔の向きの認識	14
2.3.4 顔の向きの認識実験	18
2.4. 実験結果	19
2.4.1 実験システムにおける顔の向きの利用法	19
2.4.2 顔の向きによるロボットの操作	19
2.4.3 ロボットに地図情報を与えた場合の顔の向きによる操作	29
2.5. 本章の結論	32
第3章 ユーザの注意推定に基づくロボットの走行制御	33
3.1. 本章の趣旨	33
3.2. 顔・視線計測システム	35
3.2.1 フィールド多重化装置	36

3.2.2	頭部位置・姿勢と視線方向の計測アルゴリズム	38
3.2.3	計測精度	43
3.2.4	顔のジェスチャ認識	45
3.3.	レーザレンジファインダを用いたロボットの自己位置推定	46
3.3.1	スキャンデータのマッチング手法	46
3.3.2	本研究における改良点	53
3.3.3	従来の方法との比較	55
3.3.4	自己位置推定の検証のための自律走行実験	61
3.3.5	環境地図を用いた自己位置推定	86
3.4.	注視量ヒストグラム	88
3.5.	ユーザの注意推定の検証	93
3.6.	ユーザの注意推定を用いた走行制御	107
3.6.1	注意対象が1つの場合	107
3.6.2	注意対象が複数存在する場合	116
3.6.3	走行制御と注視量ヒストグラムの検証	122
3.7.	本章の結論	131
<b>第4章</b>	<b>結論</b>	<b>132</b>
4.1.	本研究の具体的成果	132
4.2.	課題と今後の展開	133
	謝辞	137
	著者研究業績	141
	参考文献	144
	付録	151
A.	電動車いす ハードウェア仕様	151
B.	たけまるくん 設計図	152
C.	レーザレンジファインダ ハードウェア仕様	153
D.	USB-IO & DA 変換回路図	155

# 目次

2.1	実験システムの外観	12
2.2	平面 $P$ 上の円の初期位置と移動後の投影	14
2.3	法線ベクトルの方向	16
2.4	顔の向きを検出	17
2.5	顔の向きを検出結果 (被験者 5 人)	18
2.6	右への移動 . 顔の向きとロボットの動き ( $t = 2557 \sim 2823$ )	25
2.7	左への移動 . 顔の向きとロボットの動き ( $t = 2837 \sim 3020$ )	26
2.8	顔の左右の動き $\psi_F$	27
2.9	顔の左右の動きの 10 フレーム間の平均 $\bar{\psi}_F$	27
2.10	顔の方向 ( time 2557 ~ 2823 )	28
2.11	顔の方向 ( time 2837 ~ 3020 )	28
2.12	あらかじめ地図を持つロボットの動き	30
2.13	顔の左右の動き	31
2.14	左右の車輪の回転数	31
3.1	フィールド多重化装置	37
3.2	ソフトウェア構成	39
3.3	顔全体のテンプレート画像	40
3.4	3次元顔モデル	41
3.5	視線方向のモデリング	43
3.6	トラッキングの様子	44
3.7	2つのスキャンデータ	47
3.8	angle-histogram の角度の計算	48
3.9	2つのスキャンデータの angle-histogram	49

3.10	2つの angle-histogram の相関値 (12[deg.] のとき最大)	49
3.11	2つのスキヤンの平行化 ( $(\Delta\theta, \alpha) = (12[deg.], 57[deg.])$ )	50
3.12	2つのスキヤンの x-histogram	52
3.13	2つの x-histograms の相関 (-9[cm] のとき最大)	52
3.14	2つのスキヤンの y-histogram	52
3.15	2つの y-histograms の相関 (-3[cm] のとき最大)	52
3.16	重ね合わせた2つのスキヤンデータ ( $(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta) = (-2, -9, 12)$ )	53
3.17	点列のセグメント化	55
3.18	E の計算	55
3.19	2つのスキヤンデータ	57
3.20	ケース1での Angle-histogram と相関値	57
3.21	ケース2での Angle-histogram と相関値	58
3.22	ケース3での Angle-histogram と相関値	58
3.23	ケース1でのマッチング結果	59
3.24	ケース2でのマッチング結果	59
3.25	ケース3でのマッチング結果	60
3.26	教示走行	62
3.27	システム構成	65
3.28	実験装置 外観図	65
3.29	LMS 200	65
3.30	実験経路とノードの配置	67
3.31	実験の様子 (1)	68
3.32	実験の様子 (2)	69
3.33	指定経路と実際の走行経路	70
3.34	姿勢と位置の相関値	70
3.35	360[deg.] 分のノードスキヤン自動作成の様子	74
3.36	実験経路	75
3.37	ノード No.0 におけるノードスキヤン	76
3.38	ノード No.1 におけるノードスキヤン	76

3.39	ノード No.4 におけるノードスキャン	77
3.40	指定経路と実際の走行経路	78
3.41	姿勢と位置の相関値	78
3.42	実験の様子 (教示経路を逆走)	81
3.43	指定経路と実際の走行経路	82
3.44	姿勢と位置の相関値	82
3.45	地図からの距離データの抽出	87
3.46	ユーザの注視位置	89
3.47	注視量ヒストグラムに加える正規分布	90
3.48	注視量ヒストグラム	92
3.49	ロボットの走行経路	95
3.50	推定注視量 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1 回目)	96
3.51	走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1 回目)	96
3.52	注視位置 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1 回目)	97
3.53	走行位置 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1 回目)	97
3.54	推定注視量 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 2 回目)	98
3.55	走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 2 回目)	98
3.56	推定注視量 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 3 回目)	99
3.57	走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 3 回目)	99
3.58	走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 B, C)	100
3.59	推定注視量 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1 回目)	102
3.60	走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1 回目)	102
3.61	注視位置 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1 回目)	103
3.62	走行位置 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1 回目)	103
3.63	推定注視量 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 2 回目)	104
3.64	走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 2 回目)	104
3.65	推定注視量 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 3 回目)	105
3.66	走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 3 回目)	105
3.67	走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 B, C)	106

3.68	走行経路上のノード設定	109
3.69	注意の有無による自律走行 (被験者 A)	110
3.70	ポスターに注意がある場合の自律走行の様子	111
3.71	注視位置 (ポスターに注意がある場合: 被験者 A)	112
3.72	走行位置 (ポスターに注意がある場合: 被験者 A)	112
3.73	注視位置 (ポスターに注意がない場合: 被験者 A)	113
3.74	走行位置 (ポスターに注意がない場合: 被験者 A)	113
3.75	注意の有無による自律走行 (被験者 B)	114
3.76	注意の有無による自律走行 (被験者 C)	115
3.77	注意対象が複数存在する環境の自律走行経路	117
3.78	自律走行の結果 (被験者 D)	118
3.79	自律走行の様子	119
3.80	自律走行の結果 (被験者 E)	120
3.81	自律走行の結果 (被験者 F)	121
3.82	2種類の自律走行経路	124
3.83	自律走行の様子 (メールボックスに注意がない場合)	125
3.84	自律走行の軌跡 (メールボックスに注意がない場合)	126
3.85	2つのメールボックスに対する注視量ヒストグラム (注意がない 場合)	127
3.86	自律走行の様子 (メールボックスに注意がある場合)	128
3.87	自律走行の軌跡 (メールボックスに注意がある場合)	129
3.88	2つのメールボックスに対する注視量ヒストグラム (注意がある 場合)	130

# 表 目 次

2.1	ロボットの操作の規則 . . . . .	20
2.2	操作感の評価実験結果：被験者 6 人 (A ~ F) . . . . .	23
2.3	操作に対する無意識動作を想定した評価実験結果 . . . . .	24
3.1	移動ロボットの仕様 . . . . .	64
3.2	レーザレンジファインダの仕様 . . . . .	66
3.3	各ノードでのずれと誤差 . . . . .	72
3.4	全試行に対するずれと誤差の平均値，最大値 . . . . .	72
3.5	各ノードでのずれと誤差 . . . . .	79
3.6	全試行に対するずれと誤差の平均値，最大値 . . . . .	80
3.7	各ノードでのずれと誤差 . . . . .	84
3.8	全試行に対するずれと誤差の平均値，最大値 . . . . .	84

# 第1章 序論

## 1.1. 研究の背景と目的

近年，人々の日常生活の支援に向けたロボット技術への期待が高まっている．その中で，日常生活の基本であり，自立的かつ快適に生活するための手段として必要不可欠である“移動”を支援することは重要である [1][2]．従来の移動支援の手段のひとつに電動車いすがある．電動車いすは主にジョイスティックを用いて操作が行われる．ジョイスティックは，移動の方向と速度を制御することができる優れた操作入力インタフェースといえる．しかしながら，ほんのちょっとした手の動きに敏感に反応するため，搭乗者であるユーザにとって慣れるまでに訓練を必要とする．また，電動車いすと自動車の事故の一因として，電動車いすのユーザが操作に注意を集中しており，周囲に対する十分な注意が行き届いておらず，危険を回避するのが困難であることが挙げられている．つまり，ユーザは絶えず注意して電動車いすの動きを認識し，それを調整するための操作を行うことを要求されている．したがって，操作の負担や，操作のための知識の習得や訓練の負担を軽減する安全で快適な移動手段の実現が望まれる．そこで，移動手段として人々を支援する搭乗型移動ロボットの研究が行われている．この分野の研究は大きく三つに分類される．

まず一つ目は自律移動に関するものである．この分野では，外界センサを用いることにより，ロボットの自己位置推定や，障害物回避，目的地までの経路計画が行われている．Tin Man II[3] は，赤外線センサ，超音波センサ，タッチセンサを用いて周囲環境の情報を得て，障害物回避等の自律的行動を行っている．また，MAid[4][5] は，レーザレンジファインダと超音波センサを用いて未知の環境を認識し，実時間で経路計画を行っている．SENARIO[6][7] は，レーザレンジファイ

ンダが装備されており，目的地を与えるだけでその場所まで走行してくれる全自動モードを備えている．これらの他にも，超音波センサを用いて障害物回避を実現しているものが存在する [8][9]．また，特定の施設内での利用に特化し赤外線 LED を天井に設置することで，それらを順次追跡して目的地まで移動するというアプローチもある [10]．これらのロボットでは，特定の目的地までの走行や障害物回避を自律的に行うことにより，ユーザの操作に対する知識を不要とし，操作自体に対する負担を軽減している．また，この分野では，これまでの移動ロボットの分野で開発された手法を流用することができる．

また，二つ目は簡便な操作のためのインタフェースに関するものである．音声認識を用いて「前へ進め」「右へ曲がれ」等のユーザの声でロボットを操作する機能を持つもの [11] や，EEG (Electroencephalogram) で計測した脳波により左右の方向指示を行うもの [12]，電極による眼球運動検出 [13] を用いて，ノートパソコンの画面に構築したグラフィカルユーザインタフェース上の操作ボタンを視線により選択するもの [14]，舌圧センサにより方向と速度を指示するもの [15]，プロジェクタで机上に投影したバーチャルキーボードに対して指で指示を与えるもの [16]，また，ロボットに搭載されたカメラからの画像から目標対象をグラフィカルユーザインタフェースにより順次指定していくもの [17] などさまざまなものが提案されている．この分野では，マルチモーダルの情報を使用することで，ユーザの操作に対する選択の幅を広げている．

さらに，三つ目として搭乗型ロボットの機構に関するものがある．例えば，全方向への移動 [18][19] や，階段の昇降移動 [20][21] などがある．搭乗型で歩行機能を持つもの [22] [23] も存在する．しかし，一つ目のセンサを用いた自己位置推定および自律移動，二つ目の操作のためのインタフェースはそれぞれ機構を置き換えても利用可能であるため，本研究では特別な機構に関するものは取り扱わない．

ところで，上記の自律移動に関する技術，簡便な操作のためのインタフェースに関する技術は，ユーザが安全で快適な移動を行うためには必要な要素である．これらの技術を用いた搭乗型移動ロボットが図書館や美術館，あるいはホームセンターなどの場所内において，操作の負担や，その操作に対する知識の習得や訓練による負担がなく，ユーザの意図を推測して行動し，目的地まで連れて行って

くれれば非常に便利である。しかしながら，一つ目の自律移動に関する従来技術では，ユーザが当初の目的地として想定していた場所まで走行している間に，当初の目的以外にユーザの興味の移り変わりが生じたとしても，それを無視した状態で走行が行われることになる。つまり，ユーザの走行に対する意図は反映されない。また，二つ目のインタフェースに関する従来技術では，操作の入力によってユーザの走行に対する意図は反映されやすくなるものの，その都度ロボットの動きを認識し，それを調整するための操作を行う負担は軽減されていない。つまり，ロボットの操作の際に必要なフィードバックの操作をできるだけ簡単にするという観点からの検討が欠けている。

そこで，本研究では，新たな操作入力インタフェースを利用してユーザの意図を走行に反映し，操作に対する負担を軽減する搭乗型移動ロボットの実現を目的とする。移動という目的を達成するために人間は絶えず周りの環境に注意を払い，視覚情報を獲得している。つまり，顔情報，特に視線情報には人間の移動の意図が最も表出していると考えられる。したがって，ユーザの意図を走行に反映させるために，ロボットの走行制御にユーザの顔情報を利用する2つの手法を提案する。このとき，動作中の違和感や自由度を考慮した場合，ユーザに検出装置の装着を強制することは好ましくないため，非接触な顔情報の取得方法としてビデオカメラでとらえた画像を利用する。これによって，一般のユーザが利用できるだけでなく，ジョイスティックによる操作が行えない身体の不自由な人や，移動の支援が必要な高齢者にとっても負担の少ない移動が行えるという効果をもたらすことができると考えられる。

まず，ユーザが注意を払って意識的に動作を行う必要性をできるだけ減らすことにより，操作への負担を軽減する方法として，ユーザの顔の向きによるロボットの方向制御を提案する。ユーザがロボットに乗っていて曲がりたければ，曲がりたい方を見るのは当然の動作である。そして，ロボットが曲がってくれば，特に意識しなくても顔の向きを正面に戻していくのが普通である。よって，顔の向きを求めてロボットの方向制御に利用すれば，ロボットの曲がり具合を見てその都度調整を行うといった，走行方向に対するフィードバックの操作という点からは，ユーザはほとんど無意識にその行動を行うことになる。したがって，操作へ

の負担は軽減される。ただし、曲がりたい方向に顔を動かすというのは意識的な動作ではある。現状、ロボットが人間の動作を観察するだけで、真に人間の意図を理解できる段階には至っていないため、人間がロボットに“合わせる”必要がある。だが、その中には受け入れやすさが必要となる。したがって、曲がりたい方を見るといって当然として行っている動作であれば、その動作が意識的であっても負担が少なく受け入れられやすいものになると考えられる。しかし、ユーザは顔をいろいろなときに動かすであろうから、ロボットの方で操作の意図をもって顔を動かしたときと他の場合を識別する必要がある。そこで、顔の向き認識結果のスモーキング処理と外部環境の情報を利用して、曲がる意図で顔を動かしたかどうかの判定を行う。

次に、目的地までの自律走行を行う搭乗型移動ロボットが「当初の目的と異なるユーザの意図」を読み取るために、ユーザの視線計測とロボットの自己位置推定を行うことで、移動中におけるユーザの注意の対象がどこにあるかを認識し、その結果に基づいてユーザの意図に沿った走行支援を行う方法について提案する。建物内などではロボットと周囲環境との間の距離により、進行方向が一意に決定できる場所が存在する。例えば、壁に沿って直進する、一方向のみに曲がれるといった状況である。このような状況では、操作によってロボットの方向制御を行う必要はなく、自律走行を行えばよい。自律走行により、ユーザは操作に対する知識を不要とし、操作自体に対する負担は軽減される。しかし、それだけでは、当初の目的以外にユーザの興味の移り変わりが生じたとしても、それを無視した状態で走行が行われることになる。そこで、ロボットはユーザの興味の移り変わり、つまり、対象に向けたユーザの注意の有無を認識する必要がある。そのために、カメラからの顔情報を利用してユーザの視線方向を高精度に計測できるシステムと、高分解能で周囲環境までの距離が計測できるセンサであるレーザーレンジファインダを用いた高精度な自己位置推定を組み合わせることで、目的地までの自律走行時にユーザが周囲環境のどの位置を注視しているかを推定する。そして、注視位置の時間変化に基づいてユーザの注意の度合をヒストグラムを用いて表現することで、対象へのユーザの注意の有無を推定する。対象へのユーザの注意が推定された場合、その対象をよく見たいというユーザの意図をロボットが推定し、

その意図に沿うように対象に近づくという走行制御により移動支援を行う。

提案した2つの手法について実験システムを構築し、それらによる検証結果から、ユーザの顔情報を利用し、さらに、周囲環境の認識機能を合わせることで、ユーザの意図を走行に反映し、操作に対する負担を軽減することができることを示す。

## 1.2. 本論文の構成

本論文は以下の4章から構成されている。

第1章: 序論 本研究の背景について述べ、搭乗型移動ロボットの従来研究について分類・整理を行い、各分類の課題を明確にし、その上で本研究の目的・位置付けを明確にした。

第2章: ユーザの顔の向きによるロボットの方向制御 ユーザの顔の向きを利用した搭乗型移動ロボットの方向制御を行う。曲がりたい方向を見るという、ユーザにとって意識的であるが自然で受け入れやすい動作と、曲がっていくと正面を向いていくという無意識的に行っている動作を組み合わせることで、走行方向に対するフィードバックの操作においてユーザの負担を軽減する。実験により、進みたい方向に顔を向けるという意識的な動作とただその方向を見ているときの動作からユーザの意図を識別するために、顔の向きの認識結果のスムージング処理と周囲環境の認識を利用することができることを示す。

第3章: ユーザの注意推定に基づくロボットの走行制御 高分解能で周囲環境の距離を計測できるレーザレンジファインダを用いた、移動ロボットのための高精度な自己位置推定手法を開発し、高い自己位置推定精度で指定目的地までの自律走行が可能であることを示す。そして、ロボットの自己位置推定とユーザの視線計測とを組み合わせることで、目的地までの自律走行時にユーザの注意を推定し、その注意に沿った走行制御を行う。走行中のユーザの注視が周囲環境のどの位置にあるかを推定し、注視位置の時間変化に基づいてユーザの注意の度合をヒスト

グラムを用いて表現する．実験により，注意の度合を表したヒストグラムと，ロボットの移動方向および対象との位置関係を利用することで，対象へのユーザの注意の有無が推定でき，注意が推定された場合，その対象に近づくよう走行制御を行うことで，ユーザの意図に応じた移動支援が可能であることを示す．

第4章: 結論 本論文を結ぶ．本研究を通して得られた知見を総括し，今後の展開について述べる．

## 第2章 ユーザの顔の向きによるロボットの方向制御

### 2.1. 本章の趣旨

本章では、移動手段としてユーザを支援する搭乗型移動ロボットのヒューマンインタフェースに問題を絞って検討を行う。ヒューマンインタフェースについては、音声や視線を使うなど、モダリティを広げることが検討されている。しかし、ロボットの操作の際に必要なフィードバックの操作をできるだけ簡単にするという観点からの検討が欠けている。自動車ではハンドルを切って曲がるが、曲がり具合を見ながら、ハンドルを戻していかなければならない。電動車いすのジョイスティックでも同様に、曲がり具合を見てジョイスティックの位置を調整しなければならない。搭乗者はこのようなフィードバックの操作を注意して意識的に行わなければならない。音声入力などでも、適当なところまで曲がったら直進に切り替えたり、曲がり不足であったり曲がり過ぎのときには修正するなどの操作を行わなければならない。つまり、ロボットに乗っているときには常にロボットの動きを認識し、それに対して意識的に調節のための操作を行わなければならない。これは搭乗者には負担である。

そこで、本章では搭乗者が注意を払って意識的に動作を行う必要性をできるだけ減らす方法を検討する。具体的には、その方法としてこれまで検討されていない搭乗者の顔の向きを利用することを提案する（ここではロボットを基準に顔の向きを考えるので、身体ごと向きを変えても顔の向きが変わったことになる）。ロボットに乗っていて曲がりたければ、曲がりたい方を見るのは当然の動作である。そして、ロボットが曲がってくれば、特に意識しなくても顔の向きを正面に戻していくのが普通である。したがって、顔の向きを求めてロボットの制御に利

用すれば、顔を動かすのは意識的な動作ではあるが、ロボットの走行方向に対するフィードバックの操作という点からは、搭乗者はほとんど無意識にその行動を行うことになる。

実際にこの方法を利用する場合には以下のような問題が考えられる。まず、曲がりたい方向を向くという動作がロボットが曲がるという動作より、当然ながら先行しなければならないという点である。これについては、曲がりたい場合には、曲がる前に事前に確認のためにその方向を見るのは自然な動作と考えられるので、搭乗者にロボットの特性を理解しておいてもらえば問題は解決されると考えられる。すなわち、曲がりたいときには、意識的にその方向を向いてもらうということである。もう一つの問題は、「曲がりたいときにその方向を向いて下さい」というのはヒューマンインタフェースとして自然な要求だが、「曲がる時以外には顔を動かさないで下さい」というのは、要求できないということである。搭乗者は顔をいろいろなときに動かすであろうから、ロボットの方で操作の意図をもって顔を動かしたときと他の場合を識別する必要がある。もちろん、曲がろうと思っていないのに曲がり始めた場合に、その方向と逆の方に顔を向けるという意識的なフィードバック操作で問題を解決することはできる。しかし、そのような意識的な行動ができるだけ不要なものを目指す。本章では、顔の向きの認識結果のスムージング処理と、外部環境の情報を利用して、曲がる意図で顔を動かしたかどうかを判定する方法を提案する。このように外部に現われた行動から意図を認識する研究としては、Pentland らの開発したシステムがある [24]。このシステムは、自動車を運転している人間の動作を観察し、隠れマルコフモデルを用いて、その動作に含まれる人間の意図を認識し、人間がこれから行おうとしている動作に対して支援するものである。車が対象ということで、人間の行動認識結果から実際に車を動かすというものではないが、本研究に通じるものがある。

以上のように、提案する搭乗型移動ロボットでは顔の向きの認識が重要な要素になる。顔の向きの認識方法としては、従来、頭部にセンサを装着することにより、三次元空間中での頭部の位置と姿勢を検出するものがあるが、人間に検出装置の装着を強制することは好ましくない。そこで、ここでは非接触な認識方法として、ビデオカメラでとらえた画像を利用する方法を用いる。これにより、人間

の自由度が増し，動作中の違和感を少なくすることができる．人間の顔の向きを認識するために視覚情報処理を用いた研究には顔の3個の特徴点を利用したもの[25][26]が多いが，1個の特徴点のノイズに対して影響を受けやすいと考えられる．そこで，本章ではより多くの特徴点を用いる方法を提案する．目や鼻，口などの顔の特徴の部分に多数の特徴点を取り，それらが三次元空間内で同一平面上にのっていると仮定する．そして，それらを画像上で追跡し，その位置変化を検出することで，平面の運動をアフィン変換を用いて表現し，それにより，平面の法線ベクトルの方向，すなわち，人間の顔の向きを推定する．

本章では，搭乗型移動ロボットのシステム構成を示し，提案するロボットの実現に必要な要素技術として，顔の向きを認識する手法について述べる．そして，実際に開発したシステムによる実験結果を示す．

## 2.2. システムの概要

### 2.2.1 システム構成

序論で述べたように，搭乗型移動ロボットには障害物を避けるなどの自律的行動能力と使いやすいヒューマンインタフェースの二つが必要である．

しかし，自律的行動に関しては，本章の範囲外として，ここではヒューマンインタフェースの部分について述べる．ヒューマンインタフェースとしては，顔の向きという人間の非言語的行動を認識して，それから人間の意図を推測してロボットの行動決定に利用する．提案システムの基本は，顔の向きを認識して，その方向にロボットを動かすということである．この際問題になるのは，前節で述べたように，ロボットの操作を意図した顔の動きとそうでない顔の動きとを識別することである．操作を意図しないで顔が動く場合としては以下の場合があると考えられる．

- (1) ロボットの振動に伴い動く場合
- (2) ちらちらと辺りを見回す場合
- (3) 壁にはってある掲示を見るなどの，特定のものを意識的に見る場合
- (4) その他

以上の場合の顔の動きとロボット操作の場合の動きを識別することが、意図の認識になる。今回は、これを行うために以下のように考えた。

(1)による顔の動きは小さいと考えられる。そこで、顔の向きの認識結果にしきい値を設け、小さい変化は無視するようにする。

(2)については、顔の向きの認識結果を時間軸にそって、スムージングすることで対応する。顔の向きの認識は30フレーム/秒の実時間で行うが、その結果で直接ロボットを動かすのではなく、過去の何枚かのフレームとの平均結果でロボットを動かすことにする。これは(1)の場合に対しても効果がある。

(3)については、外部環境の認識結果の利用を検討する。例えば、超音波センサで障害物があると分かっているならば、その障害物のある方に顔を向けても無視するというようなことである。本章ではセンサによる外界認識がシステムに導入されていないため、走行環境の地図データをロボットに与えて、これを模擬することにした。

(4)については、人間が顔を動かす場合には多くの可能性があるので、それらすべてを考えるのは困難である(1)から(3)までへの対応策により識別できるものもあるだろうが、識別できないものも当然ある。そのような場合に対しては、今回は、意図認識結果が違っていた場合には、人間が思っていなかった方向に動き出すので、それを修正するように顔を向けるということで対応することにする。

「このロボットは行きたい方を見ればそちらに動きます」とユーザに告げておくと、ユーザは車のハンドルを急に切ったり戻したりしないように、曲がりたい方向をゆっくりと安定して向くことが期待できる。これは意識的に動作してもらうことになるが、これに対する負担は小さいと思われる。曲がり出すと顔の向きを正面に戻してくる必要があるが、これは事前に指示しなくても自然に出る動作だと考えられる(2)への対応は、車椅子を操作する場合は「ゆっくりと安定して顔を動かす」という仮定に基づいている。すなわち、細かい動きを無視することによって、操作を意図した動きを識別している。スムージングを長い時間に対して行えば、この識別はより確実になる。しかし、ユーザには曲がりたい方をじっくりと試してみようという意識的な動作への要求が強くなってしまふ。また、顔を向け

てもなかなかそちらに行かないのは使用感が損なわれる。さらに、頻繁に曲がる必要のあるような場所や、突然現われた障害物を避けるような場合には、顔の向きの変化にすぐに反応してもらう必要がある。将来的には、最後の場合については顔の向きによる操作ではなくて、自律的な行動の導入が必要だと考えている。しかし、すばやい反応というのは操作性では重要である。これについては、細かい動きには反応せず、かつ反応時間の遅れも問題にならない程度になるようなスムージング時間を実験により調べることにする。

### 2.2.2 実験システム

以上の機能の実現に向けて、搭乗型移動ロボットの実験システムの開発を行った。本章における実験システムの主な構成要素は、計算機で制御できるように改造した電動車いす (SUZUKI MC-16S)、カメラ (SONY EVI-G20)、動画像を 실시간処理するための高速演算処理装置トラッキングビジョン [27]、これらを制御するための計算機 (IBM/PC, OS: FreeBSD 2.2.5, CPU: MMX Pentium 233MHz) である。システムの外観を図 2.1 に示す。

## 2.3. 視覚情報処理を用いた顔の向きの認識

2.1 節で述べた搭乗型移動ロボットの実現のためには、人間の意図認識が重要な要素となる。そこで、ロボットに乗っている人間の意図の認識に向けて、その基本になるものとして、人間の行きたい方向、注意がどこに向いているかを知るために顔の向きの認識を行う。以下に単眼カメラから入力される動画像を処理することにより、ロボットに乗っている人間の顔の特徴 (目や鼻、口など) を追跡し、顔の向きの情報を獲得する手法について述べる。

### 2.3.1 顔の特徴の追跡

動画像処理の最も基本的な問題は、画像中で変化している部分を検出し、追跡することである。現在の画面のある部分が、次の画面のどこに対応するかを決定

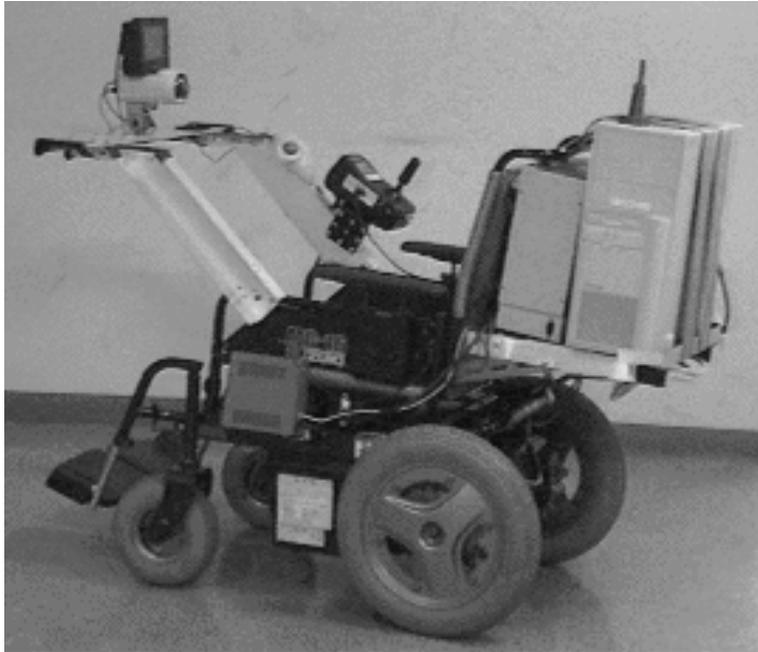


図 2.1 実験システムの外観

することは容易ではない．この対応づけを行う手法の一つとして，相関法がある．相関法とは，注視領域近傍で探索を行い，追跡対象の参照画像と相関度が最も高い領域へ対象が移動したとして，その移動ベクトルを得る手法である．顔の各特徴の追跡には，注視領域を実時間で明度相関演算の処理ができるシステム，トラッキングビジョン [27] を用いる．

相関度を評価する式として，SAD(Sum of Absolute Difference) を用い，

$$Dist(i, j) = \sum_n \sum_m^{ysize \times xsize} |f_r(m, n) - f_c(m + i, n + j)| \quad (2.1)$$

と定義する．ここで， $Dist(i, j)$  は点  $(i, j)$  における相関誤差値を，関数  $f_r(x, y), f_c(x, y)$  はそれぞれ参照画像と候補領域内における点  $(x, y)$  の輝度値を， $xsize \times ysize$  は参照画像のサイズを示す．(2.1) 式の  $Dist(i, j)$  の値が最も小さくなった点  $(i, j)$  に対象が移動したとして追跡を続ける．本論文では，カメラに向かって正面を見ているときの人間の顔の画像を用意し，その画像内で各特徴の位置を与え，その位

置での各特徴の画像を参照画像として用いることにより追跡を行うことにした．なお，各々の特徴の参照画像の大きさは  $64[\text{pixel}] \times 64[\text{pixel}]$  とし，そのうちの  $3[\text{pixel}]$  おきの  $16[\text{pixel}] \times 16[\text{pixel}]$  を追跡に用いる．また，探索領域の大きさは  $128[\text{pixel}] \times 128[\text{pixel}]$  とした．

### 2.3.2 アフィン変換を用いた顔の動きの表現

顔の向きを推定するにあたって，本手法では，目や鼻，口などの顔の各特徴は3次元空間内で同一平面上にのっているという仮定を用いる．この平面を以下，平面  $P$  とする．つまり，平面  $P$  の法線ベクトルの方向を求めることが人間の顔の向きの推定となる．そこで，画像上での顔の各特徴を追跡することで，それらの位置の変化をアフィン変換 [28][29][30] を用いて表現し，それにより平面  $P$  の3次元空間中の運動を求め，法線ベクトルの方向の推定を行う．

平面  $P$  が光軸に垂直なときの顔の各特徴の画像上での座標をそれぞれの初期位置とする．追跡する特徴の数を  $M$  個 (実験システムでは  $M=10$ ) としたとき，その初期位置を  $x_k=[x_k, y_k]^T$  , ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) とおく．人間が顔の向きを変化させるとき，画像平面上で各特徴の位置は移動する．顔の各特徴は同一平面上にのっていて，その位置関係は不変であると仮定する．従って，それらの移動後の位置  $x'_k=[x'_k, y'_k]^T$  と初期位置  $x_k$  の関係は (2.2) 式のように回転，拡大・縮小，せん断を表すアフィン変換行列と並進ベクトルで表現することができる．

$$\begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

平面  $P$  の初期位置を与えているため，(2.2) 式のパラメータから平面  $P$  の3次元空間中の運動を求めることができる．

(2.2) 式のパラメータは最小自乗法により推定する．このとき，画像上のノイズの影響を受けたり，他の物体に隠されたりして，正しく追跡されていない特徴の影響を取り除く必要がある．

まず，追跡で得られた  $x'_k$  と初期位置  $x_k$  より，最小自乗法で (2.2) 式のパラメー

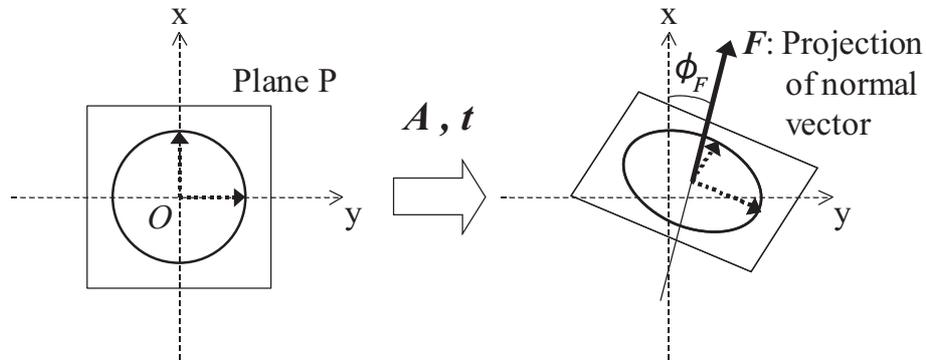


図 2.2 平面  $P$  上の円の初期位置と移動後の投影

タの推定を行い，残差の自乗

$$\|e_k\|^2 = \|\mathbf{x}'_k - (\hat{\mathbf{A}}\mathbf{x}_k + \hat{\mathbf{t}})\|^2 \quad (2.3)$$

を求める．ここで， $\|e_k\|^2$  が閾値より大きい特徴  $k$  は正しく追跡されなかったものとみなし，それ以外の特徴を用いて，パラメータの再推定を行う．これにより，正しく追跡されなかった特徴の影響を減らすことができる．推定されたパラメータをもとに各特徴の探索領域の位置を決定することで，各特徴の位置関係に拘束を与え，追跡を続ける．通常，特徴が 3 個あれば (2.2) 式のパラメータを求めることができるが，追跡を行った顔の特徴 10 個のうち 6 個以上が取り除かれた場合は，推定されたパラメータの信頼性が低いものとし，前フレームでの探索領域を用いて追跡を行う．

### 2.3.3 アフィンパラメータを用いた顔の向き認識

以下に，推定された (2.2) 式のアフィンパラメータを用いた顔の向き認識について述べる．

平面  $P$  上に円を考える．平面  $P$  が三次元空間中で傾きを変化させるとき，平面  $P$  上の円を画像平面に直交投影すると楕円になる (図 2.2) ．

顔の各特徴を追跡することで得られた (2.2) 式のパラメータにより，平面  $P$  上の円は楕円へ写像される．この楕円の短軸の方向を  $\alpha$  とすると， $\alpha$  は (2.2) 式のパラメータを用いて，次のように表すことができる．

$$\tan 2\alpha = 2 \frac{a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22}}{a_{11}^2 + a_{12}^2 - a_{21}^2 - a_{22}^2} \quad (2.4)$$

平面  $P$  の法線ベクトルは画像平面上の楕円の短軸の方向に投影されるため，法線ベクトルの投影  $F$  の方向角  $\phi_F$  は  $\alpha$  となる．(2.4) 式からこれを求めると， $\phi_F$  としては 180 度異なる正反対の 2 方向の解が得られる．これはアフィンパラメータのみでは顔の上下運動の区別，左右運動の区別ができないからである．ここでは，この 2 つの解から以下のようにして 1 つを選択する．本実験システムでは，ロボットに乗っている人間の顔をとらえるカメラは顔の位置より少し低い位置にとりつけられている．従って，人間が正面を向いているとき，カメラからは顔が 15 度上を向いている画像が得られる．そこで，ロボットに乗っている人間は，だいたい走行中は正面付近を向いているため，2 つ求まる  $\phi_F$  のうち上向きの方を選択することにする．ただし，人間が少し下を向いた場合にも対応できるように，前フレームとの  $\phi_F$  の連続性も考慮する．すなわち，顔が上向きから次第に下がってきた場合には，2 つ求まる  $\phi_F$  のうち下向きの解でもこれまでの値と連続する方を選択する．

以上より，法線ベクトルの画像への投影  $F$  の方向が得られた．次に，3 次元中の法線ベクトルの方向を求める．得られた楕円の長径を  $a$ ，短径を  $b$  とすると，この楕円は平面  $P$  上の円を画像平面に直交投影したものであるため，平面  $P$  の法線ベクトルと光軸のなす角  $\theta_F$  は次のようになる．

$$\theta_F = \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.5)$$

以上のようにして得られた平面  $P$  の法線ベクトルの角度  $\phi_F$ ， $\theta_F$  を用い，顔の向きを表現することができる (図 2.3)．図 2.4 に顔の各特徴の位置と平面  $P$  の画像の変形，法線ベクトルの方向を示す．

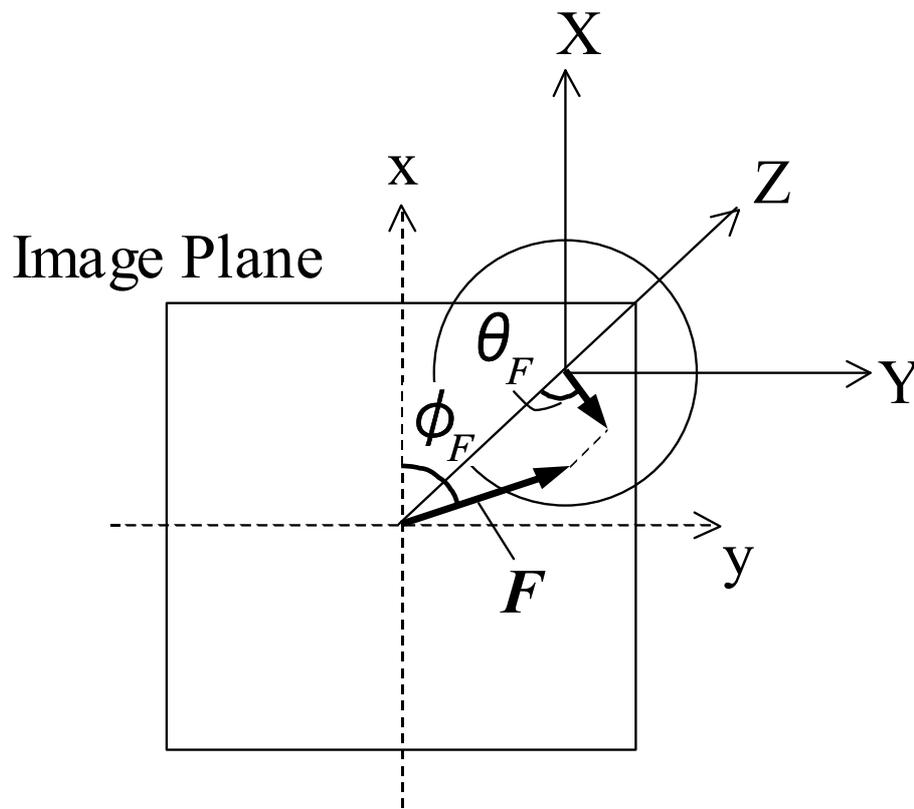
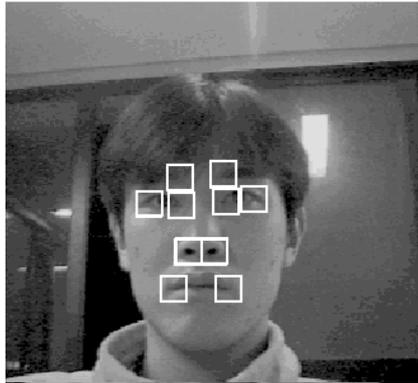
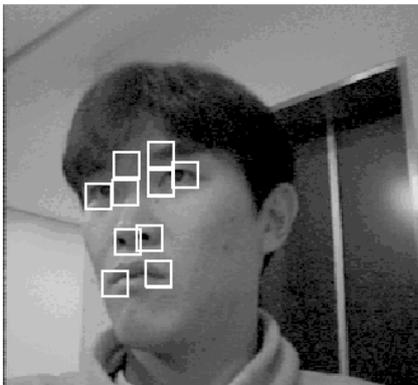
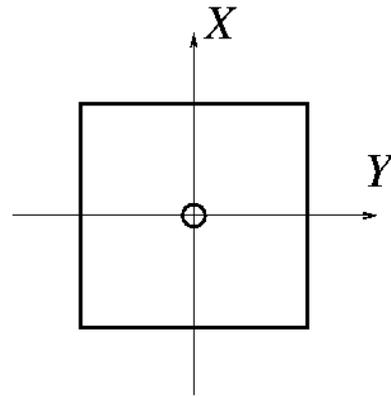


図 2.3 法線ベクトルの方向



Initial position



Turning the face

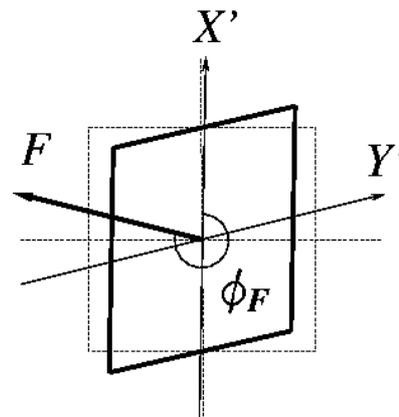


図 2.4 顔の向きを検出

### 2.3.4 顔の向き認識実験

上記の方法で顔の向きが正しく求められているか実験で確認した。男性5人について、正面、および左右15, 30, 45度を向いてもらい、一人一つの方角あたり100フレームのデータを集め、顔の向きを求めた。5人の結果(各方向500データ)の平均を図2.5に示す。この図では標準偏差を縦線で示してある。提案システムでは、顔の向きに正確にロボットの方向を合わせるというのではなく、顔の向いている方向にロボットを動かしていけばよいので、その目的に対しては十分な情報がフレームレートで得られることが確認できた。

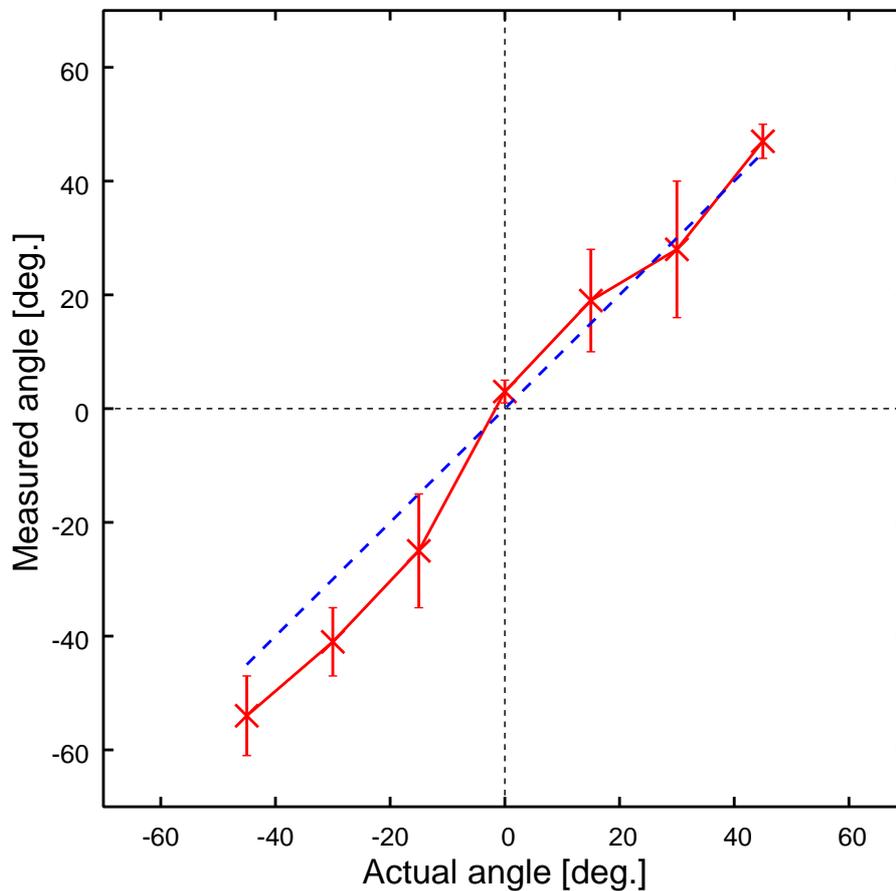


図 2.5 顔の向き検出結果 (被験者 5 人)

## 2.4. 実験結果

2.3 節で述べた手法によって得られる顔の向きの情報を用いてロボットを操作する実験を行った．その実験結果を以下に示す．

### 2.4.1 実験システムにおける顔の向きの利用法

実験システムでは，以下の規則を用いて，ロボットの操作を行った．まず，人間の顔が左右をどれだけ向いているかを判断するのに，2.3 節の手法で得られた顔の向きを水平面に投影した角度を用いることにする．顔の左右方向への向きは，カメラは水平面より 15 度上を向いていることを考慮に入れ，次のように表すことができる．

$$\psi_F = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta_F \cos \phi_F}{-\sin \theta_F \sin \phi_F \sin \frac{\pi}{12} - \cos \theta_F \cos \frac{\pi}{12}}\right) \quad (2.6)$$

この角度  $\psi_F$  を毎フレーム (30 フレーム / 秒) の画像に対して計算する．そして，その時点を含め過去  $n$  フレームについてのこの角度データを平均したものを  $\bar{\psi}_F$  をロボットの行動決定に利用する． $\bar{\psi}_F$  の大きさが 30 度以上になったときに，人間が左または右を向いているとし，ロボットを顔の向いている方向へ走行させる．また， $\bar{\psi}_F$  の大きさが 30 度未満の場合はほぼ正面を向いているものとみなし，ロボットを前進させる．ただし， $\theta_F$  の  $n$  フレーム間の平均  $\bar{\theta}_F$  が 15 度より小さいとき，つまり，顔をやや下向きにし，カメラの方向を向いたときはロボットを停止させる．

以上の規則を表 2.1 にまとめる．この規則に従って，顔の向きによりロボットの操作を行った．

### 2.4.2 顔の向きによるロボットの操作

2.2.1 節で述べた (1) (2) の場合とロボットの操作を意図して顔を動かしたかを識別するのは，ロボット操作の場合はゆっくりと大きく顔を動かすだろうという仮定である．処理の中でこれにかかわるのは左右へ動かすかどうかの判定のし

表 2.1 ロボットの操作の規則

If  $\bar{\psi}_F > \pi/6$ ,  
then turn right proportional to  $\bar{\psi}_F$ .  
else if  $\bar{\psi}_F < -\pi/6$ ,  
then turn left proportional to  $\bar{\psi}_F$ .  
else if  $\bar{\theta}_F < \pi/12$ ,  
then stop.  
else  
then go straight.

きい値とスムージングのフレーム数  $n$  である。前者は、実験システムということでやや大きく 30 度に設定した。後者に対して適当な値があるかどうかシステムの有効性を決めることになる。

この  $n$  を大きくしておけば、ロボットは顔の小さな動きや一瞬の素早い動きにつられて左右に動くことはない。したがって、意図認識の点では確実になる。しかし、その分、人間の顔の動きに対するロボットの反応が遅くなっているため、突発的に現われた障害物を回避するような早い反応は難しい。システム全体としてはこのような障害物回避は超音波センサ等による自律的な行動で支援する予定であるが、やはりあまり応答が遅くては自分の意思が伝わっているかはっきりしないし、実際に思ったように動き出すまで顔をそちらに向けていなくてはならず、操作性が良くない。そこで、 $n$  を変えて、方向転換を意図しない顔の動きへの対処の正確さと、反応の遅さに対する操作感の良否について、実際に走行実験を行って検討した。

始めに反応の遅さに対する操作感の良否の実験について述べる。実験は 6 人の被験者に  $n$  を 1 から 20 まで変化させたそれぞれの状態でロボットに乗って室内を自由に走行してもらい、操作感の良否を 3 段階 (1. 悪い, 2. 普通, 3. 良い) で判定してもらった。実験結果は、まず 6 人とも顔の向きの方に動くロボットだという指示だけで自由に移動できたので、顔の認識およびそれによる操作の可能

性は示されたと考えられる。操作感の良否についての結果を表 2.2 に示す。表中の数値は 3 段階評価の点数で、Total の欄の数値は 6 人の被験者 (Subjects A ~ F) の点数の合計点である。n が小さい方が顔の動きに素早く反応するので、評価が高くなっている。ただし、n があまりにも小さい場合はちょっとした顔の動きにも反応してしまい評価が少し悪くなる。実験では  $n = 5$  が最高点を得ている。

次に操作に対する顔の無意識の動作に対する誤作動を防ぐための評価実験を行った。前回と同じように n を変化させてロボットの挙動がどうであったかを判断する。無意識動作を想定するため、顔の動きを次の三つのレベルで考えることにした。

- (1) レベル 1: ほんの一瞬のよそ見を想定したもの (動作時間 ~ 0.5 秒)。
- (2) レベル 2: 周囲を軽く見渡す程度 (動作時間 0.5 秒 ~ 1.0 秒)。
- (3) レベル 3: 周囲を確認する。書いてある文字をはっきり読めるくらい (動作時間 1.0 秒 ~ 1.5 秒)。

評価方法としては、ロボットが直進している状態で無意識動作を想定して顔を動かしても、ロボットがほぼ直進状態を保っているかどうかを検討する。ロボットが直進状態を保つことができれば可 (○)、直進状態から完全に外れてしまい不安定であるならば不可 (×) とする。一人の被験者に上記の 3 レベルと考えられる動作を 5 回ずつ行ってもらい、その際のロボットの反応を調べた。結果を表 2.3 に示す。

当然のことであるが、n が大きくなれば、顔の無意識な動きに反応しなくなる。レベル 1 の動きに反応しなくなるようにするには  $n = 10$  以上、レベル 2 に対しては  $n = 15$  以上、レベル 3 に対しては  $n = 20$  以上にすることが必要がある。ただし、この表では少しでも動き出したら不可 (×) としているが、実際には一瞬ある方向に動いても、その後正面を向いていれば、全体の走行としては問題にならない。したがって、n を 10 から 15 ぐらいに設定すれば無意識に顔を動かしたものに反応して困るという問題はかなり避けられる。

以上の二つの実験結果から、方向転換を意図しない顔の動きへの対処の正確さと、反応の遅さに対する操作感の良否の両者を満足するために n として一つの数値を選ぶなら、10 にするのがよいことが分かった。

しかし，上記の実験に参加した被験者の意見から次のようなことが分かった．反応速度に対する実験では  $n = 5$  が最高点を得たが，これはロボットが右折や左折した場合，曲がっていくのに伴い，自然に搭乗者は前を向くようになるが，この際に早く反応してくれるからだということである．ロボットを右や左に動かす場合は意図的にその方向を見るので，これに対しては反応は若干遅くてもそれほど気にならない．しかし，希望の方向に曲がっていくとほとんど無意識的に正面を見るので，その際にまだ前に顔を向けていた方向にロボットが少しでも動くときロボットが思ったとおりに動いてくれているのか不安に感じるというのである．そこで，顔の向きを計測結果が右や左になる場合には  $n = 15$ ，左右から正面に戻る計測結果のときは  $n = 5$  の値を用いて動くようにするとよいのではないかとこの考えを得た．実際にこのように動くようにロボットのプログラムを変更し，前述の実験の 6 人の被験者に乗ってもらったところ，反応速度に対しては  $n = 5$  と同じ評価点を得た．また，この設定では顔の無意識な動きに対しても反応しにくくなっているため，ロボットの評価の 2 項目をどちらも良好に満たすことが分かった．

最後に，実際の走行の 1 例として，人間が右を向いたときにロボットが右へ，左を向いたときにはロボットが左へ移動した様子を図 2.6 と図 2.7 に示しておく．左の列の画像は，ロボットに乗っている人間の顔の画像で，白いウィンドウは追跡された顔の各特徴の位置を示している．右の列の画像は，ロボットの動きを表している．このときの顔の左右の動きを図 2.8 に，顔の左右の動きの 10 フレーム間の平均を図 2.9 に示す．ただし，図 2.8，2.9 では，右方向を +，左方向を - で表している．また，顔の向きを表す平面  $P$  の法線方向の単位ベクトルの投影  $F$  の先端を図 2.10，2.11 に示す．これらは，顔が正面を向いているときは原点に，顔が右を向いているときは左側に，左を向いているときは右側に点が集まるようになっている．

表 2.2 操作感の評価実験結果：被験者 6 人 (A ~ F)

Frames(n)	A	B	C	D	E	F	Total
1	1	2	3	3	2	3	14
3	2	2	3	3	3	2	15
5	3	3	2	3	3	3	17
6	1	3	2	2	2	2	12
7	1	3	2	2	2	2	12
8	1	3	2	2	1	2	12
9	1	2	2	1	2	1	9
10	1	2	2	1	2	2	10
12	1	1	2	1	2	2	9
14	1	1	1	1	1	2	7
16	1	1	1	1	1	2	7
18	1	1	1	1	1	1	6
20	1	1	1	1	1	1	6

表 2.3 操作に対する無意識動作を想定した評価実験結果

Frames(n)	5	10	15	20	30
Level 1	×				
	×	×			
	×	×	×		
	×				
	×				
Level 2	×	×			
	×	×	×		
	×	×			
	×	×			
	×	×			
Level 3	×	×	×		
	×	×			
	×	×	×	×	
	×	×	×		
	×	×	×		



図 2.6 右への移動．顔の向きとロボットの動き ( t = 2557 ~ 2823 )



図 2.7 左への移動 . 顔の向きとロボットの動き ( t = 2837 ~ 3020 )

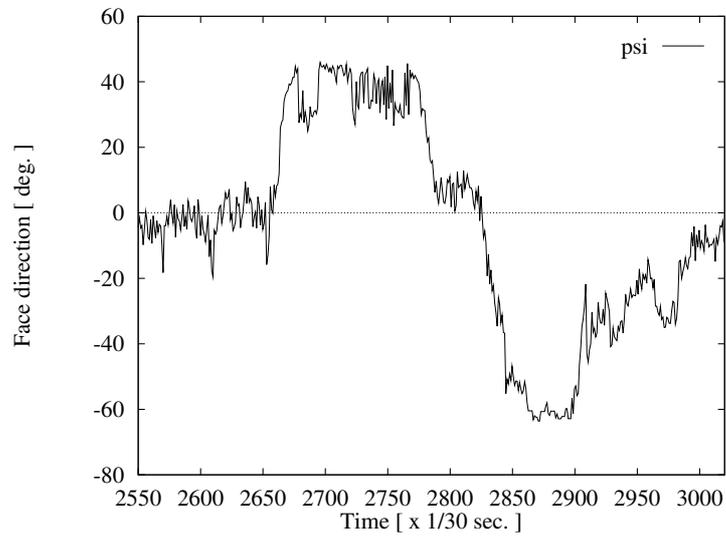


図 2.8 顔の左右の動き  $\psi_F$

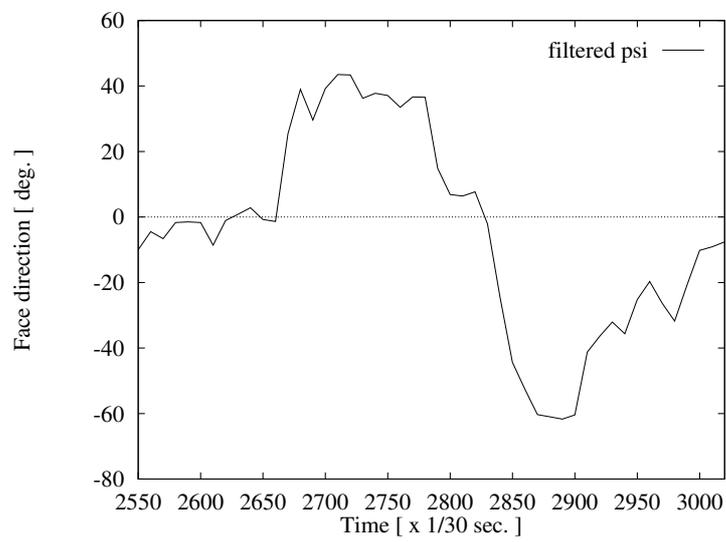


図 2.9 顔の左右の動きの 10 フレーム間の平均  $\bar{\psi}_F$

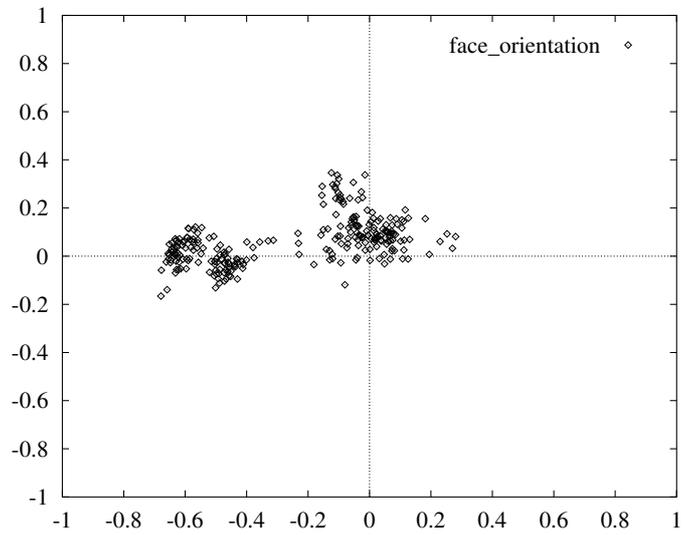


図 2.10 顔の方向 ( time 2557 ~ 2823 )

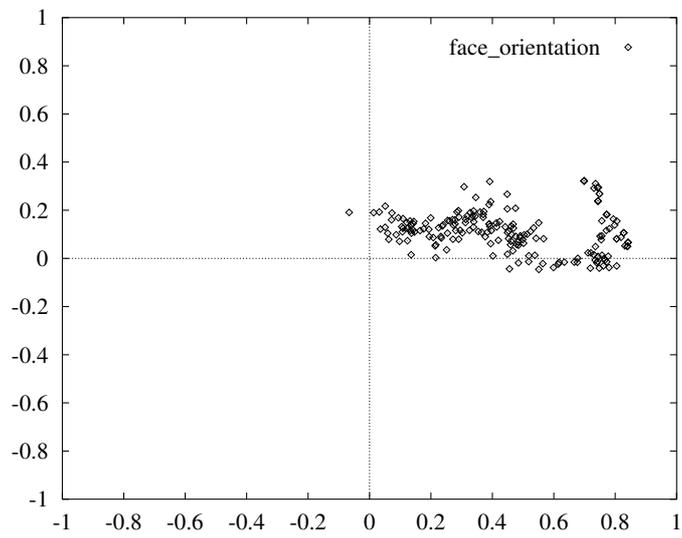


図 2.11 顔の方向 ( time 2837 ~ 3020 )

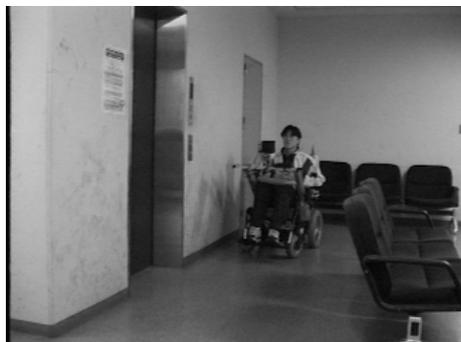
### 2.4.3 ロボットに地図情報を与えた場合の顔の向きによる操作

前節では、人間が進みたい方向を向くことによりロボットを操作する実験について述べた。しかし、このままでは、よそ見などといった、その方向への移動を意図していない顔の動きに対してでも、ロボットがその方向へと進んでしまうおそれがある。この場合、もしロボットに周囲環境の認識機能があれば、人間が壁や障害物の方向を向いたとしても、その方向へは進まないようにできる。本実験システムには周囲環境の認識を行うセンサが未搭載であるため、その代わりとしてロボットにあらかじめ地図情報を与えることにより、上述の機能の実証実験を行った。なお、この実験では、ロボットは左右の後輪の総回転数に基づき、デッドレコニングで自己の地図上での位置を認識できるようにした。

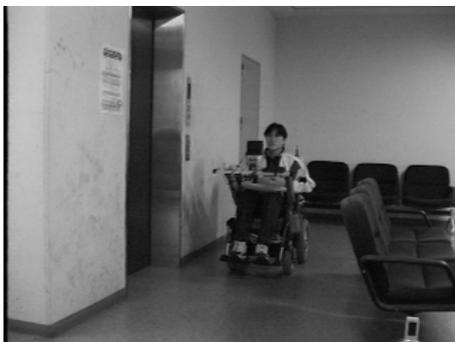
実際には、ロボットの両側に壁と長椅子が存在しており、その先は左右の分岐点になっているという地図情報を与え、顔の向きによる操作実験を行った。このとき、ロボットに乗っている人間は途中で壁に張っている掲示物の方向を見る。当然その方向には壁があるため、ロボットはその方向へは進まない。そして、分岐点に到着するとロボットはそれを認識し、前節のように人間の顔の向きに従った走行を行う。図 2.12 に一連のロボットの動作の画像を示す。図 2.12 の中段の 2 つより、人間が壁の掲示物を見ている時には、ロボットはその方向へ進むことなく停止していることがわかる。そして、図 2.12 の下段の 2 つより、分岐点に到着してはじめて、ロボットが曲がっていることがわかる。

図 2.13 に顔の左右の動きを、図 2.14 にロボットの左右の後輪の総回転数にある係数をかけたものを示す。これを見ると、約 600 フレームから約 700 フレームまでの間、人間が右を向いていても、左右の後輪の総回転量が一定値になっている、つまり、ロボットが停止していることを示している。また、約 900 フレームから人間が再び右を向き、そのとき左の後輪の総回転量が、右の後輪の総回転量より大きくなっていることより、ロボットが右へ進んでいったことを表している。

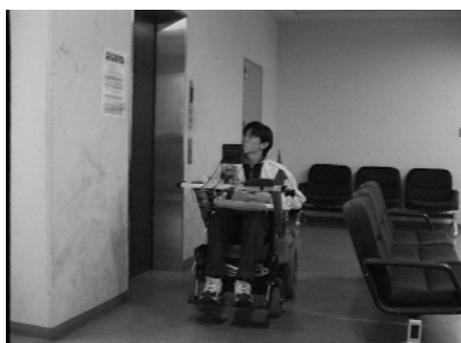
以上より、人間が進みたい方向へ顔を向けるという意識的な動作と人間がただその方向を見ているときの動作から、ユーザの意図を識別するために周囲環境の認識が有効な場合があることが確認された。



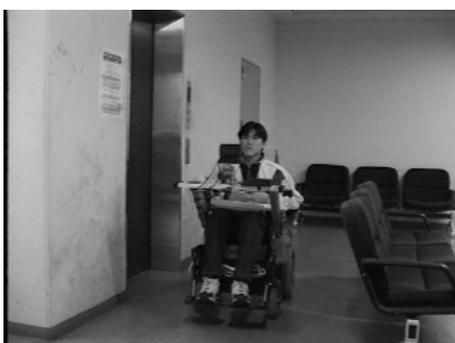
(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

図 2.12 あらかじめ地図を持つロボットの動き

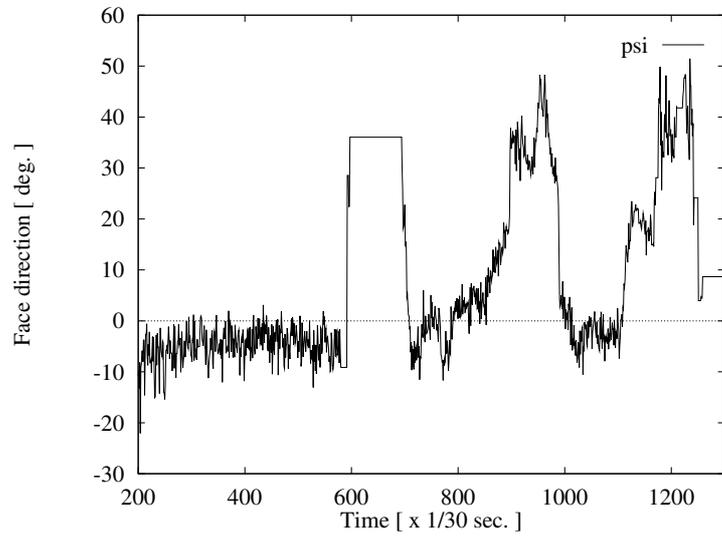


図 2.13 顔の左右の動き

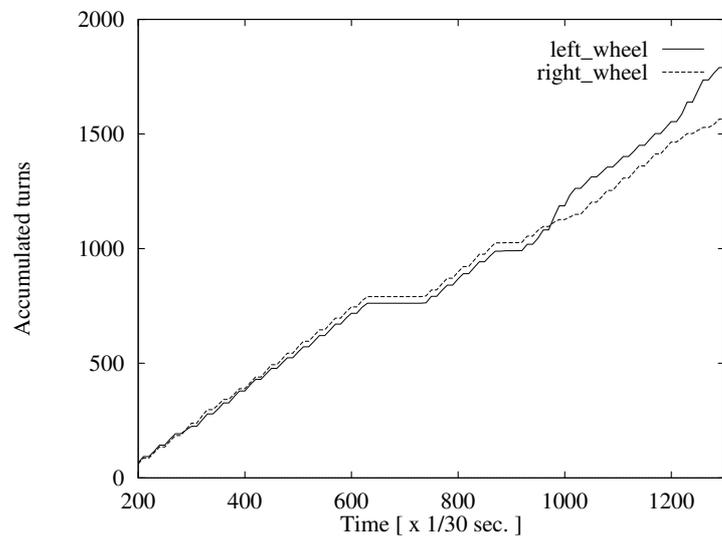


図 2.14 左右の車輪の回転数

## 2.5. 本章の結論

人間を観察することにより，その人間の非言語的行動から意図を理解し，その要求に基づき行動する搭乗型移動ロボットの実現に向けて，顔の向きを認識することにより，行きたい方向を人間が見るという行動で操作のできるシステムを実現した．提案システムではロボットを右左折させたい場合には意識的に曲がる方向を見てもらう必要がある．しかし，曲がりたい方向を見るというのは，ヒューマンインタフェースとしては操作感覚の良い動作であると考えられる．そして，この方式で重要なのは，搭乗者は曲がっていくと正面を向いていくのが自然な動作だが，このほとんど無意識的な動作がロボットの走行の制御に利用できることである．実際にシステムを製作して走行実験を行い，進みたい方向に顔を向けるという意識的な動作と，ただその方向を見ているときの動作からユーザの意図を識別するために，顔の向きの認識結果のスムージング処理と，周囲環境の認識が有効であることを示した．

更に進んだユーザの意図認識機能に向けて，方向制御を意図した顔の動作であるか，そうでないかを識別するためには，ユーザがどの対象をどれくらいの時間見ているかという情報も重要な要素となる．つまり，ユーザの顔の向きだけでなく視線情報の獲得，周囲環境の認識結果との組合せが必要となると考えられる．

# 第3章 ユーザの注意推定に基づくロボットの走行制御

## 3.1. 本章の趣旨

本章では、ユーザの視線計測と移動ロボットの自己位置推定を組み合わせることで、目的地までのロボットの自律走行時に、搭乗しているユーザの注意を推定し、その注意に沿った走行制御を行う。

ユーザの操作に対する負担を軽減するための搭乗型移動ロボットに関する研究は主なものとして二つに分類される。一つ目は自律移動に関するものであり、エンコーダや超音波センサなどのセンサを用いることにより、自己位置の推定や、障害物の検出を行っている。これらのロボットは、特定のゴールまでのナビゲーションや障害物回避を自律的に行うことにより、ユーザの操作に対する負担を軽減している。しかし、図書館や美術館、あるいはホームセンターなどの場所内においては、当初の目的地までの走行中に、当初の目的以外に魅力的なもの、興味をそそられるものが多く存在している。例えば、図書館では探し物以外の別ジャンルの本、美術館では別の展示物などがある。このときに、目的地までの自律移動機能だけでは、ユーザの興味の移り変わりを無視した状態で走行が行われることになる。一方、二つ目は簡便な操作のためのインタフェースに関するものであり、マルチモーダルな情報が使用されている。例えば、操作コマンドを与えるために、音声情報や脳波を使用しているものがある。また、2章で述べた方法が提案された後、ユーザは曲がりたい場合、曲がりたい方を向くという自然な動作を利用し、カメラからの画像により検出された顔の向きを直接ロボットの動く方向に利用するものが提案されている [31][32][33]。さらに、顔の向きに加え、視線方向の情報を利用し、ユーザが顔の向きによる操作に集中しているときには顔と視

線の方向がほぼ一致することから，ユーザが周りを見渡しているときにロボットは速度を減少する走行制御を行っているものもある [34]．しかし，これらの顔や視線情報を操作に利用した方法では，ユーザの意図は反映されやすくなるものの，ユーザが曲りたい場所において，移動したい方向へ自分の顔をその都度向けなければならぬという負担は軽減されていない．

建物内などではロボットと周囲環境との間の距離により，進行方向が一意に決定できる場所が存在する．例えば，壁に沿って直進する，一方向のみに曲がれるといった状況である．このような状況では，操作によって方向制御が行われる必要はなく，自律走行を行えばよい．自律走行により，ユーザは操作に対する知識を不要とし，操作自体に対する負担は軽減される．しかし，それだけでは，当初の目的以外にユーザの興味の移り変わりが生じたとしても，それを無視した状態で走行が行われることになる．そこで，本章では，目的地までの自律走行を行う状況を想定し，ロボットが「当初の目的と異なるユーザの意図」を読み取り，その結果に基づいてユーザの意図に沿った走行支援を行うことを目的とする．移動という目的を達成するためにユーザは絶えず周りの環境に注意を払い，視覚情報を獲得している．したがって，顔情報，特に視線情報にはユーザの移動の意図を最も表出していると考えられる．そのため，ロボットの走行制御のために，ユーザの顔情報の中でも視線方向の計測結果を利用する．さらに，ユーザが移動中に何を見ているのか，何に注意を向けているのかを知るために周囲の環境情報の認識，および，ロボットの自己位置推定も利用する．

本章では，まず，ステレオカメラにより顔・視線方向をリアルタイムに検出できるシステムについて述べ，次に距離を計測するセンサであるレーザレンジファインダを用いた自己位置推定手法とその検証結果について述べる．そして，視線計測と自己位置推定とを組み合わせることで，ユーザが見ている位置を推定し，それらの情報をもとにユーザの注意の有無を推定する手法について述べる．実験結果より，本システムによるユーザの注意の推定が有効であり，推定結果に基づいたロボットの走行制御によるユーザへの移動支援が可能であることを示す．

## 3.2. 顔・視線計測システム

本章で用いる搭乗型移動ロボットの入力インタフェースとなるユーザの顔と視線の向きの計測するシステム [35][36] について述べる。

ユーザが何を見ているのか、何に注意を向けているのかをロボットが知るためには、高精度な視線方向の計測が必要となる。ここで、視線の方向を検出するには、まず、目尻の3次元位置を検出し、それらを基準として用いる。そのため、顔の各特徴の検出精度の高さが視線方向の検出精度の高さにつながる。2章で用いた単眼カメラによる顔の向きの認識方法では、顔の各特徴点が同一平面上にのっているというラフな仮定を用いることにより、顔の向きの認識を簡単化していた。その結果、10度前後の検出誤差がのっており、顔の向きによるロボットの方向制御には利用できるレベルであったとしても、視線方向の検出の基準として必要となる厳密な精度は得られなかった。また、単眼カメラを用いた他の手法であっても、顔・視線の厳密な3次元位置・姿勢の精度を得ようとした場合、精巧な3次元の顔モデルを作る必要がある。

それに対して、このシステムは、2台のカメラを用いることで3次元の顔の位置・姿勢と視線の計測を行う。2台のカメラの位置関係を予め求めておけば、それぞれから得られる画像上の顔の各特徴点の位置を検出することにより、3次元位置がわかる。したがって、単眼カメラを用いたシステムに対して、容易に顔向き・視線方向の検出精度を向上させることができる。また、非接触受動型であるので被験者に大きな拘束感や違和感を与えず、自然な状態での計測が可能である。

ユーザの顔周辺の画像を得るためのカメラ2台は、ロボットのテーブルに取り付けられたクランプによって固定されている。ユーザは、カメラ越しに進行方向を見るため視界の一部を遮られることになるが、ロボットを制御するのに支障はない程度である。そして、2台のカメラからのビデオ出力はフィールド多重化装置によって1つのビデオ信号に多重化された後、画像処理が行われ、ユーザの頭の位置・姿勢と視線の方向が計測される。

### 3.2.1 フィールド多重化装置

フィールド多重化とは、アナログレベルで2つのビデオ信号を多重化し、1つのビデオ信号にする技術である。図 3.1 にそれを用いた多重化デバイスのブロック図を示す。このデバイスには、外部同期のかかった2台のカメラからのビデオ信号が入力され、その2つの信号はアナログスイッチ IC を用いてフィールド毎に交互に出力される。この切替えは60[Hz]という比較的低速で行われるため、実際のデバイスの実装は容易でかつ安価な汎用部品だけを用いて実現できる。実際に作成したデバイスの写真を図 3.1 に示す。このデバイスでは汎用部品だけを用いて片面に実装しているが、サイズは5[cm]四方に収まっている。本デバイスからの出力ビデオ信号の各フレームには、垂直方向の解像度が半分になったステレオ画像が含まれている。このようなアナログレベルでのビデオ信号の多重化の利点は、多重化された映像信号も通常の NTSC ビデオ信号であるために、通常の NTSC ビデオ信号を扱うどんな画像処理装置でも利用可能であることである。多重化されたステレオ画像は、画像処理システム上の1枚のフレームメモリに格納され、その画像内でステレオ処理が可能となるのでステレオマッチングのための無駄な画像の転送を行う必要がない分、2台の画像処理装置を用いたステレオシステムよりも高い処理性能を出すことが可能となる。

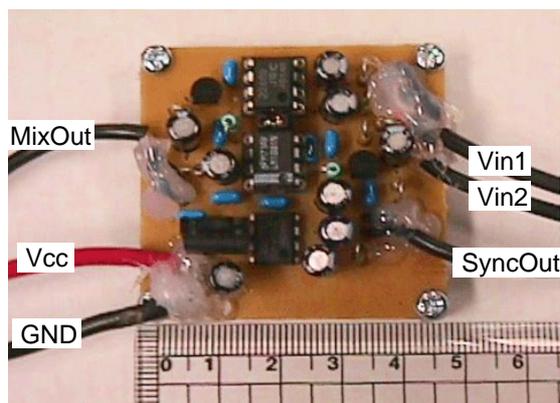
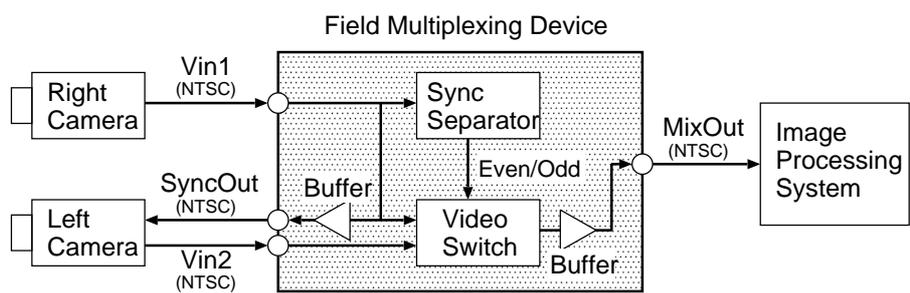


図 3.1 フィールド多重化装置

### 3.2.2 頭部位置・姿勢と視線方向の計測アルゴリズム

図 3.2 に、顔のトラッキングと視線方向の計測システムのソフトウェア構成の概要を示す。システム全体は大きく分けて、1) 初期化部、2) 顔トラッキング部、3) 視線検出部、の 3 つから成っている。

初期化部では、2次元の顔全体のテンプレート画像を用いて、画像全体から顔を探索する。ここで顔が見つかった場合、顔トラッキング部において3次元顔モデルを用いて顔の3次元トラッキングが開始され、頭部の位置・姿勢が認識される。顔トラッキング部でトラッキングが失敗すると、初期化部へ戻り、再び画像中から顔を探索する。顔のトラッキングが成功している場合は、次に視線検出部において、視線の方向が検出される。ここでの計算には、頭の位置・姿勢と眼球の3次元モデルが用いられ、視線の3次元ベクトルが推定される。このようにして、頭部位置・姿勢と視線方向が計測され、次のフレームのはじめには再び顔トラッキング部へ実行が移る。

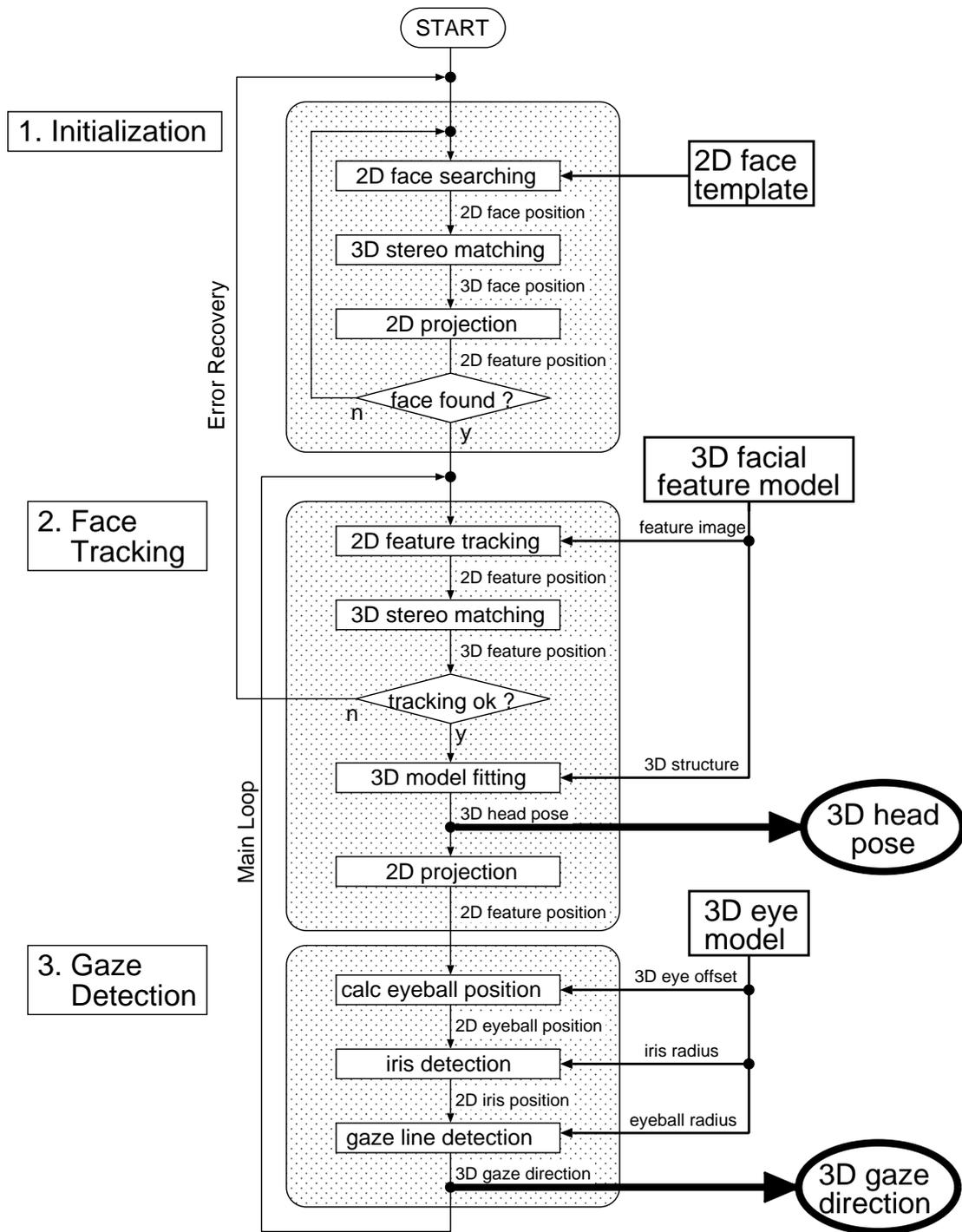


図 3.2 ソフトウェア構成

## 1) 初期化部

次節で述べる通り，顔トラッキング部で用いられるテンプレートマッチングにおけるテンプレートは局所的な画像特徴であり，探索範囲も狭い．そのため，連続的に特徴をトラッキングするには適しているが，画像全体から顔を探すには適しておらず，トラッキングの失敗からの復帰(エラーリカバリー)には用いることができない．そこで，これを補うための手法として，顔全体をテンプレートとして，画像中からおおまかな顔の位置を探すテンプレートマッチングを用いる．この手法は，トラッキングを開始する前の，システムの初期化にも用いられる．

顔全体のテンプレート画像の例を図3.3に示す．処理時間を短縮するために，このテンプレートマッチングに用いられる画像は低解像度であり，また照明変動の影響を押えるために微分画像にしてある．このテンプレートを用いて，まず右カメラからの画像中に顔があるかどうか調べられる．ここで顔の候補が見つかった場合，右画像中のマッチした領域をテンプレートとして左画像で同様の探索を行い，その結果から顔領域の3次元位置が求まる．ただし，低解像度の画像を用いているため，3次元位置の分解能も低い．ここで求めた位置は，顔トラッキングの初期位置として用いられる．なお，顔全体のテンプレート画像は60 [pixel] × 30 [pixel] である．



図 3.3 顔全体のテンプレート画像

## 2) 顔トラッキング部

### 3次元顔モデル

顔のトラッキングに用いられる3次元顔モデルは、以下の2種類のデータから構成されている。

- 顔の特徴領域の画像
- 顔の特徴領域の3次元座標

図3.4に示すように、顔の特徴領域は両目と口のそれぞれの両端と眉毛の内側の計8つから成る。これらの領域は、顔の画像中で特徴的でトラッキングに適したパターンを持っているという理由で選出している。

顔モデルは各個人によって微妙に異なる。このため、計測を行う前に各自モデルを作成する必要があるが、人間が行う作業は単にマウスで右画像中の目と口の両端をクリックして選択するだけであるので、極めて容易である。8つの領域を選択した後、対応する左画像中の領域は自動的に探索され、ステレオ視の結果、各領域の3次元座標が求められる。

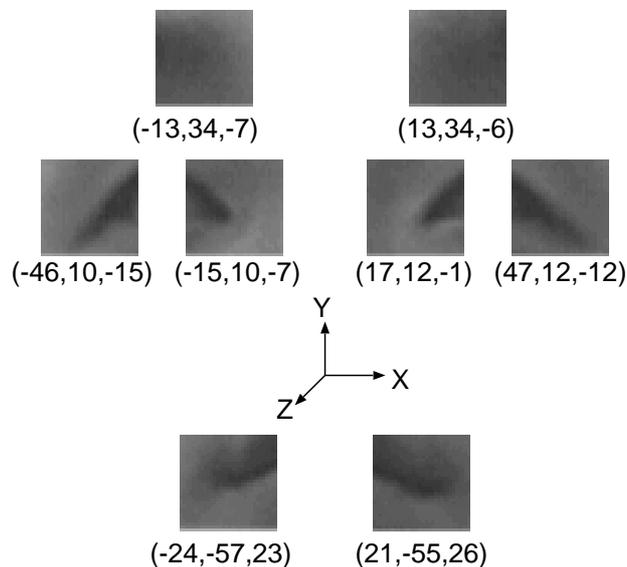


図 3.4 3次元顔モデル

### 3次元の特徴点トラッキング

顔トラッキング部においては、前のフレームにおける各特徴領域の2次元位置が、現フレームでのテンプレートマッチングの探索領域の基準として用いられる。まず、顔モデル中の特徴領域の画像はテンプレート画像として、また右画像が探索画像として用いられ、各特徴領域のトラッキングが行われる。次に、マッチした右画像中の領域をテンプレート画像、左画像を探索領域としたステレオ探索が行われ、各特徴領域の3次元位置が求められる。

#### 3) 視線検出部

視線のモデリングにおいて、眼球は「球」として扱われ、またその中心が回転中心と一致するとみなされている。視線方向は、頭部の位置・姿勢と、目の虹彩(iris)の位置との関係により決定される。その過程で用いられる3次元眼球モデルは、以下のパラメータから成る。

- 顔モデルに対する眼球の中心の相対位置
- 眼球の半径
- 虹彩の半径

顔モデルに対する眼球の中心の相対位置は、左右の目でトラッキングに用いられている両端の特徴の midpoint から眼球へ向かう3次元ベクトルとして与えられ、“オフセットベクトル”と呼ばれる。また、眼球の半径は、およそ 13[mm]、虹彩の半径は 7[mm] 程度となっている。これらの定数は、現状では既知の物体を見た時の視線の動きを用いて、人手によって調整されている。

次に、3次元の視線方向を計測する手順を図 3.5 に示す。まず図 3.5(1) に示すように、眼球中心の3次元位置(実際には当然見えていない)は、頭部の位置・姿勢の計測結果とオフセットベクトルを用いて決定される。眼球の位置が決まると、カメラ画像上での眼球の大きさ(これも実際には当然見えていない)は、眼球の形状を透視変換することで得られる(図 3.5(2))。また、虹彩の中心はハフ変換により求められる(図 3.5(3))。

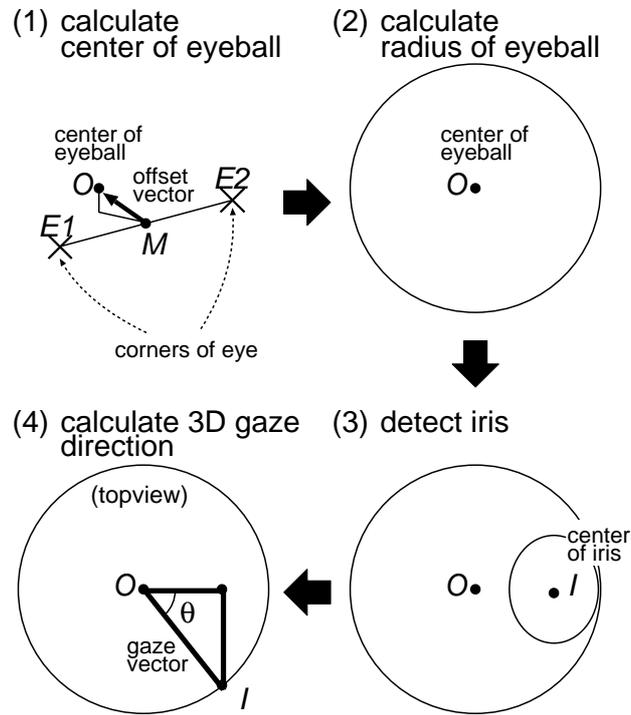


図 3.5 視線方向のモデリング

こうして求めた画像上での眼球の中心と半径，それに虹彩の中心の位置関係のみにより，視線の3次元方向が決まる．図 3.5(4) は，この考え方に基いて視線の水平面上の方向  $\theta$  が決められる様子を示す．同様にして視線の垂直面上の方向も決められ，その2つのパラメータにより視線の3次元空間中での方向が表現される．

### 3.2.3 計測精度

トラッキング処理は約 65[ms] かかっており，その精度は頭部の位置について約 1[mm]，姿勢については約 1[deg.]，視線については約 3[deg.] であった [36]．そして，照明条件が大きく変化する場合でもトラッキングが可能である．図 3.6 に，実際にロボットの搭乗者のトラッキングをしている様子を示す．

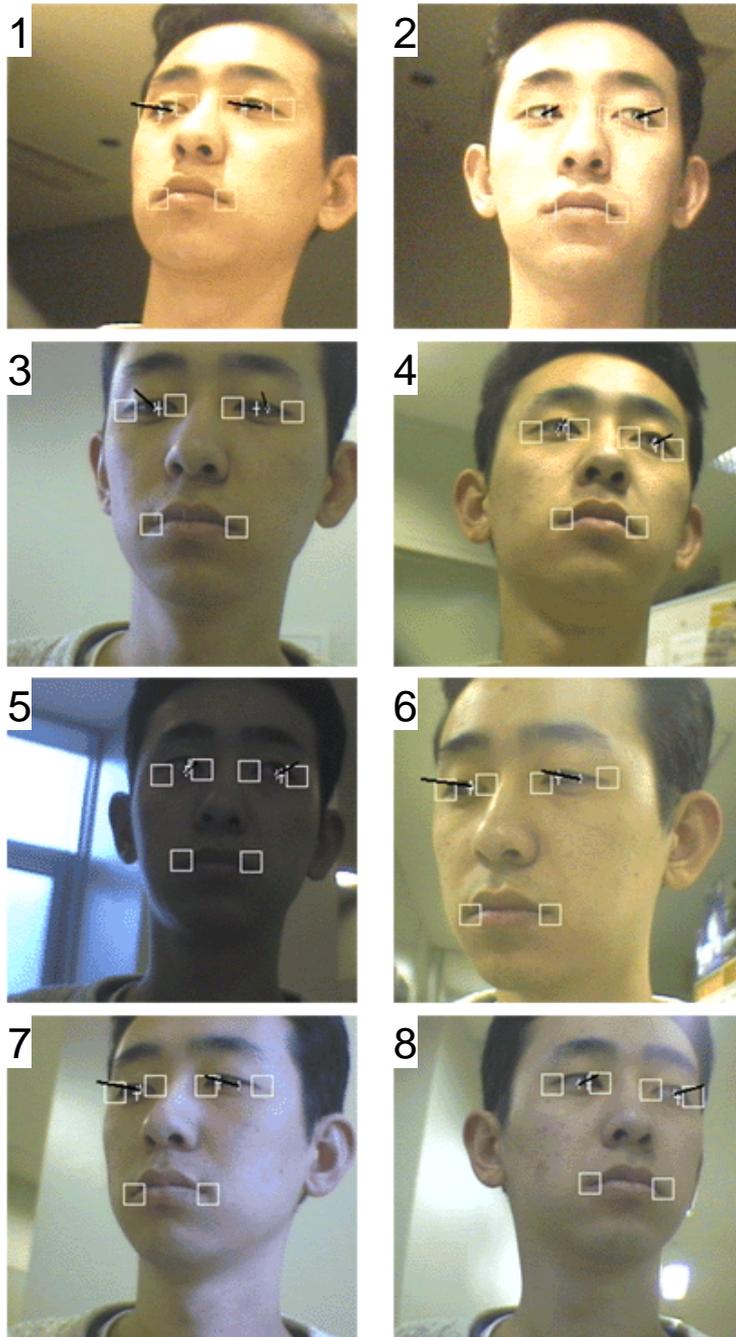


図 3.6 トラッキングの様子

### 3.2.4 顔のジェスチャ認識

本システムの頭部の位置・姿勢の検出結果を用いて顔のジェスチャ認識を行い、ロボットの走行制御に利用する。ここでは、うなずきでロボットの移動を開始し、首振りで停止できるようにした。

### 3.3. レーザレンジファインダを用いたロボットの自己位置推定

2章において，ユーザの操作に対する意図をロボットが推定するには周囲環境の認識が必要であることがわかった．また，移動手段として考えた場合にも環境内での自己位置推定，自律走行は重要な要素である．そこで，ここでは高い分解能で周囲環境までの距離が計測できるセンサであるレーザレンジファインダを用いた，移動ロボットのための高精度な自己位置推定手法について述べる．

自己位置推定としては，計算量が少なく済み，従来手法よりも高精度なマッチング手法を利用する．そして，移動ロボットを用いた走行実験により，提案したマッチング手法において高い自己位置推定精度で，指定した目的地までの自律走行が可能であることを示す．

#### 3.3.1 スキャンデータのマッチング手法

レーザレンジファインダから得られるスキャンデータのマッチング手法には，壁(線分)や角を検出し各線分ごとのマッチングをする方法が提案されている [37][38]．また，あらかじめ用意した線分の地図とレーザレンジファインダを最小二乗法し，誤差ベクトルが許容範囲内になる場所を探す方法も提案されている [39]．しかし，これらの方法では計算量が多く，また曲面の壁が存在するなどの複雑な環境には対応できない．そこで，本研究では，そのような環境にも対応可能なヒストグラムを用いた Weiss らのマッチング手法 [40][41] をベースにした手法を利用する．

Weiss らのマッチング手法は，2つのスキャンデータの位置と姿勢の差を計算する．このアルゴリズムの大まかな流れを示す．

1. 2つのスキャンデータの回転方向の差  $\Delta\theta$  を求める．
2.  $\Delta\theta$  を用いて，両スキャンデータの姿勢を揃える．
3. 姿勢を揃えた両スキャンデータの並進方向の差  $(\Delta x, \Delta y)$  を求める．

以下，図 3.7 の2つのスキャンデータを例にそれぞれの段階について説明する．

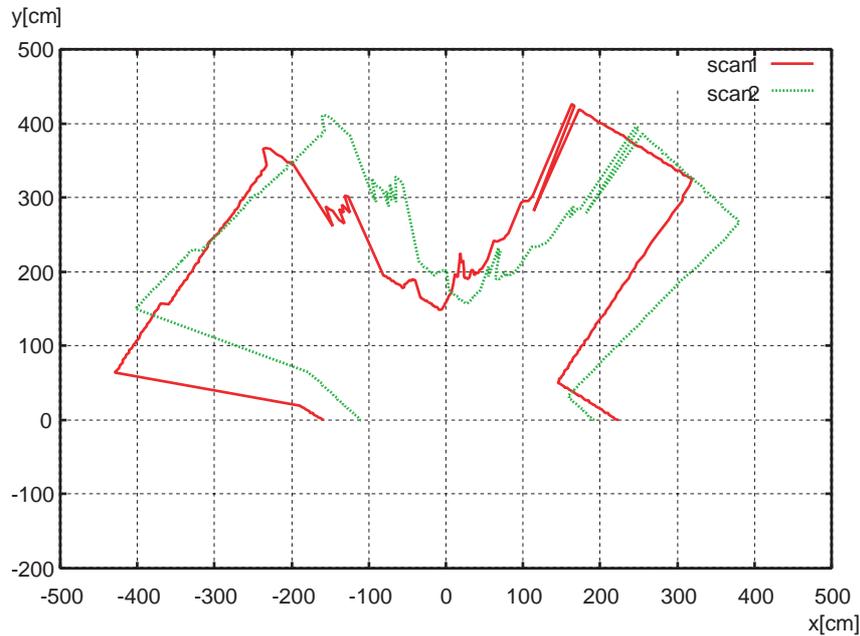


図 3.7 2つのスキャンデータ

### 1) 回転方向の差の計算

スキャンデータはレーザレンジファインダから得られる各方向の障害物までの距離の連続値により構成される。そこで、各スキャンから図 3.8 のように隣り合う 2 点を結ぶ直線の傾きのヒストグラム、angle-histogram を求める (図 3.9)。angle-histogram 内の山 (度数) はその角度方向に伸びる壁の存在を示す。人間の脳皮質には、似た働きをする神経細胞が集まったコラムと呼ぶ構造単位がある。そのうち、同じ傾きの線分にだけ反応する神経細胞が一つのコラムに集まっている [42]。つまり、スキャンデータ間の角度に応じてヒストグラムを生成する本手法は、人間の脳のコラム構造において特定の傾きに反応する、いわゆる“反応選択性”とほぼ同様の処理といえる。angle-histogram は互いのスキャンの位置が異なっても姿勢が一致していれば、同一の壁に対して両 angle-histogram の同じ角度に山が出現する。そして、2つのスキャンの互いの姿勢が異なれば、angle-histogram の起伏はその姿勢の差の分だけ左右にずれることになる。そこで、互いの angle-histogram の相関を求め、相関値が最大になる角度を探すことによ

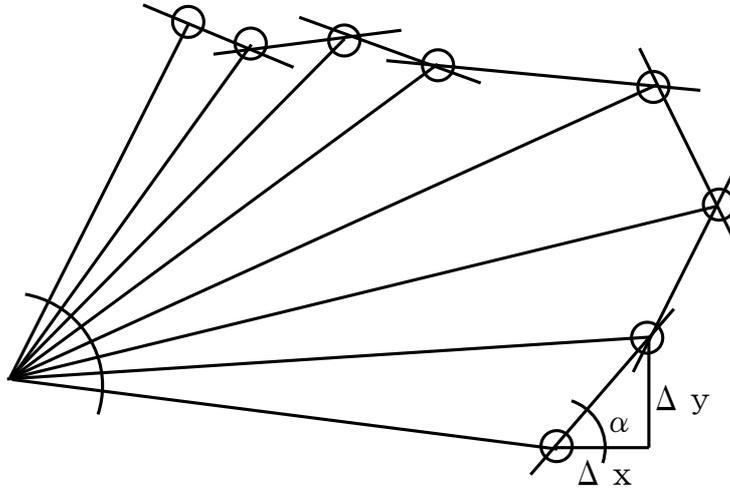


図 3.8 angle-histogram の角度の計算

て、2つのスキヤンの中の回転方向の差を求める．相関値を求める関数を以下に示す．

$$c(j) = \lim_{I \rightarrow \infty} \frac{1}{2I} \int_{-I}^I f(i)g(i+j)di \quad (3.1)$$

この式(3.1)は、2つの関数  $f(i)$  と  $+j$  ずらした  $g(i)$  との相関の程度を求める．つまり、 $f(i)$  と  $g(i+s)$  が等しいならば、関数  $c(j)$  は  $s$  で最大となる．ただし、angle-histogram は離散値グラフであるため、式(3.1)を離散型へと変える必要がある．すると式は以下のようなになる．

$$c(j) = \sum_{i=1}^n f(i)g(i+j) \quad (3.2)$$

図 3.9 の 2 つの angle-histogram ,  $h_1, h_2$  の相関値を求める関数は

$$k(j) = \sum_{i=1}^{N+1} h_1(i)h_2(i+j) \quad (3.3)$$

であり、 $k(j)$  が最大となる角度  $j$  が求める 2 つのスキヤンの回転方向の差  $\Delta\theta$  となる(図 3.10)．

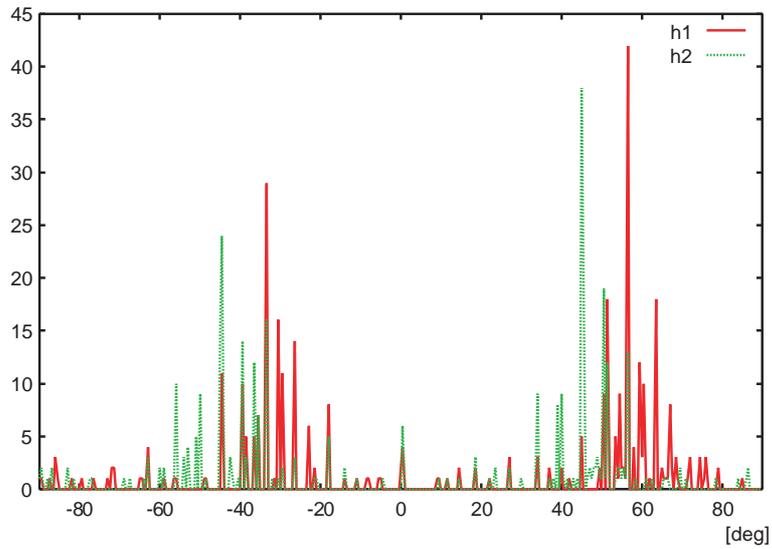


図 3.9 2つのスキャンデータの angle-histogram

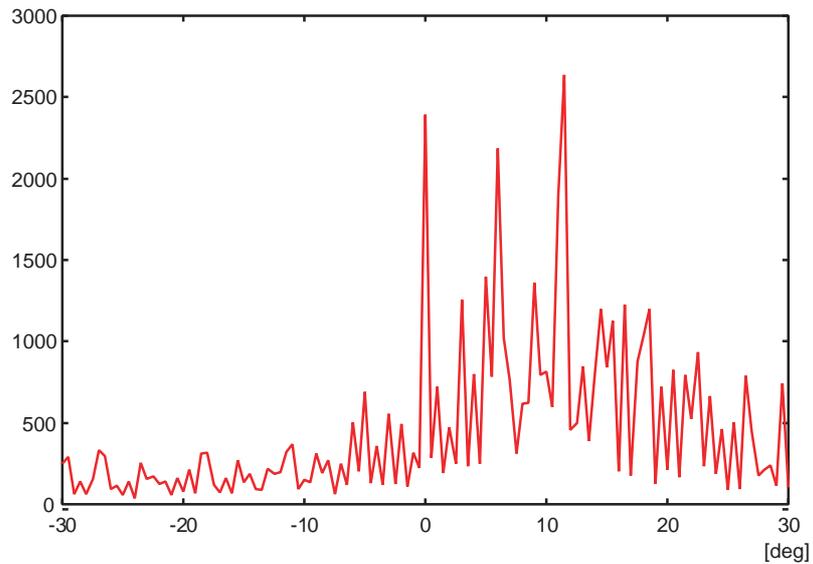


図 3.10 2つの angle-histogram の相関値 (12[deg.] のとき最大)

## 2) 両スキャンの平行化

1) で求めた  $\Delta\theta$  を用いて, 両スキャンを点 (0,0) を中心に回転し揃える. ただし, この後の並進方向の差の計算の精度を向上させるため, できるだけ  $x, y$  軸に壁

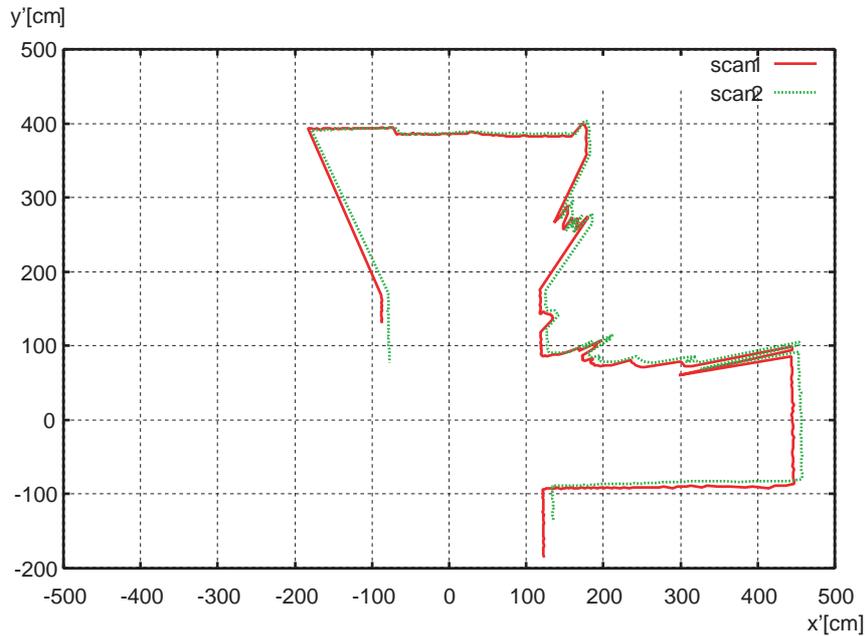


図 3.11 2つのスキヤンの平行化 ( $(\Delta\theta, \alpha) = (12[deg.], 57[deg.])$ )

が平行になるように揃える．つまり，どちらか一方のスキヤンの angle-histogram に注目し，その angle-histogram の最大度数となる角度の方向を x 軸（または y 軸）に揃うように回転させる．例えば，スキヤン 1 の angle-histogram の最大度数の角度が  $\alpha$  の場合，スキヤン 1 を  $-\alpha$ ，スキヤン 2 を  $-\alpha + \Delta\theta$  回転させて揃える（図 3.11）．

### 3) 並進方向の差の計算

回転して揃えた両スキヤンに対し，x 方向，y 方向のヒストグラム，x-histogram，y-histogram を求める．そして，回転方向の計算と同様に x，y のそれぞれの方向において，それらのヒストグラムの相関が最大になる点  $(\Delta x', \Delta y')$  を求める．しかしながら，この場合は angle-histogram とは異なり，各ヒストグラムの投票空間が大きくなる．本システムで用いたレーザーレンジファインダで考えると測定可能範囲が 800[cm] であるので， $800 \times 2 = 1600$  以上の大きさの投票空間を扱う必要がある．そこで，各方向のヒストグラム  $x_h, y_h$  をある大きさを折り畳み，

投票空間を小さくすることで計算量を軽減する .

$$x\_h'(i) = \sum_{k=0}^{\infty} x\_h(\text{size} \times k + i)$$
$$y\_h'(i) = \sum_{k=0}^{\infty} y\_h(\text{size} \times k + i)$$

この size の値についてであるが , 値が大きいほど計算量は小さくなるが , それに対して求める  $(\Delta x', \Delta y')$  の精度は落ちる . そのため , 2 つのスキンの位置の差  $(\Delta x, \Delta y)$  が取り得る値の範囲を考慮し , 適当な値にするべきである . また , x,y-histogram により求める  $(\Delta x', \Delta y')$  は元々の xy 空間を  $-\alpha$  回転させた  $x'y'$  空間における並進の差であるため , xy 空間での並進の差  $(\Delta x, \Delta y)$  は

$$\Delta x = \Delta x' \cos(\alpha) - \Delta y' \sin(\alpha)$$
$$\Delta y = \Delta x' \sin(\alpha) + \Delta y' \cos(\alpha)$$

として得る .

図 3.11 から求めた x-histogram と y-histogram を図 3.12 と図 3.14 に , さらにそれぞれの相関のグラフを図 3.13 と図 3.15 に示す . そして , 求めた回転と並進の差  $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$  によりスキン 1 をスキン 2 に重ね合わせた結果を図 3.16 に示す .

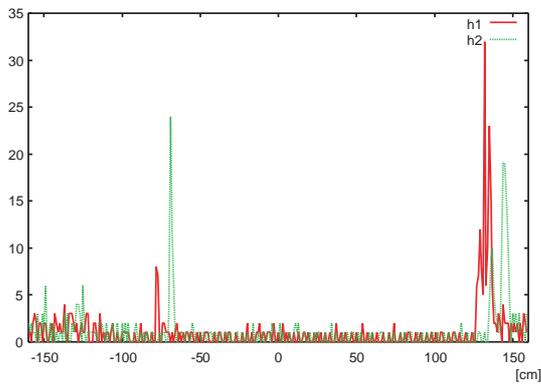


図 3.12 2つのスキャンの x-histogram

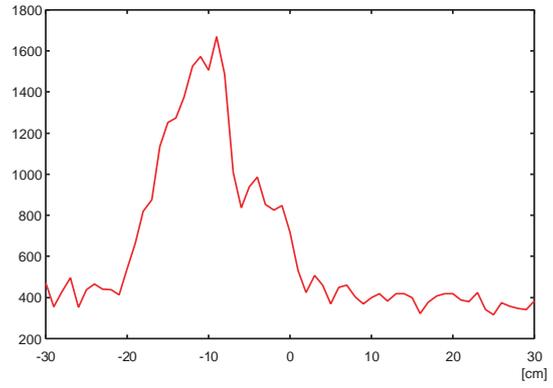


図 3.13 2つの x-histograms の相関 (-9[cm] のとき最大)

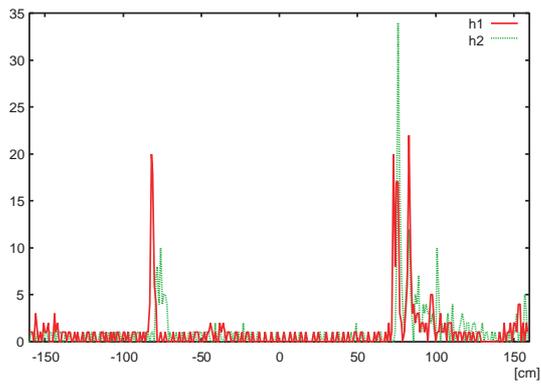


図 3.14 2つのスキャンの y-histogram

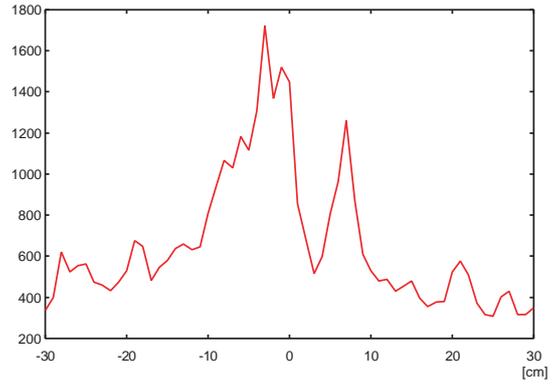


図 3.15 2つの y-histograms の相関 (-3[cm] のとき最大)

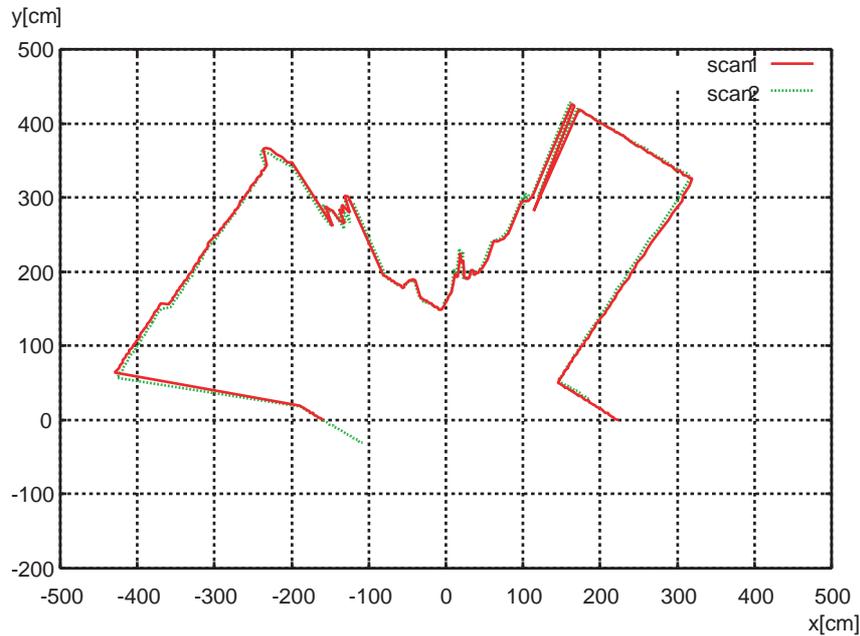


図 3.16 重ね合わせた2つのスキャンデータ  $((\Delta x, \Delta y, \Delta\theta) = (-2, -9, 12))$

### 3.3.2 本研究における改良点

本研究では，angle-histogram の計算において以下の2点の改良を加えた．

1. 点列のセグメント化
2. グラフの平滑化

以下，2つの改良点についての説明と，さらに従来の方法との比較からその改良点の有効性を確認する．

#### 1) 点列のセグメント化

Weiss らのマッチング手法での angle-histogram の計算法では図 3.8 に示すように隣り合う2点を結んだ直線の傾きを求めていくが，各2点間を細かく計算するため，その2点が近接する場合に求める角度に大きな誤差が生じる．Weiss らは，

隣り合う2点ではなく1つ飛ばしなど離れた2点を結ぶ直線の傾きを用いることでこの誤差の減少を試みている。しかし、後の実験で示すように、この方法でも十分ではない。そこで本研究では、点列を同直線上にあるもの毎に分類しその線分の傾きを求める。

図 3.17 の  $E$  の値について注目する。図 3.18 の Line l の式は、

$$y(a \cos n\theta - b) = (a \sin n\theta)(x - b)$$

である。Line l は  $(c \cos \theta, c \sin \theta)$  を通るので、

$$c \sin \theta (a \cos n\theta - b) = (a \sin n\theta)(c \cos \theta - b)$$

$$c = \frac{ab \sin n\theta}{a \sin(n-1)\theta + b \sin \theta}$$

よって

$$E = d_{start+n-1} - \frac{d_{start} d_{start+n} \sin n\theta}{d_{start} \sin(n-1)\theta + d_{start+n} \sin \theta} \quad (3.4)$$

この  $E$  の大きさがあるしきい値と比較することで点  $start$  から点  $start + n$  までが同一直線上に位置するかを確認し、点列を線分ごとに分類する。そして、各線分の角度を求め、その角度を [その線分に分類される点の数-1] 回 angle-histogram に投票していく。

## 2) グラフの平滑化

angle-histogram のグラフをぼかすことにより、それによって得られる correlation のグラフを滑らかにする。つまり、一度求めた angle-histogram  $h(x)$  を

$$h'(x) = \frac{1}{2k+1} \sum_{i=x-k}^{x+k} h(i) \quad (3.5)$$

なる  $h'(x)$  へと修正する(本システムでは  $k=10$  としている。また、ここでは angle-histogram についてのみ述べているが、 $x,y$ -histogram の計算においても  $k=5$  とし てグラフの平滑化を行う)。

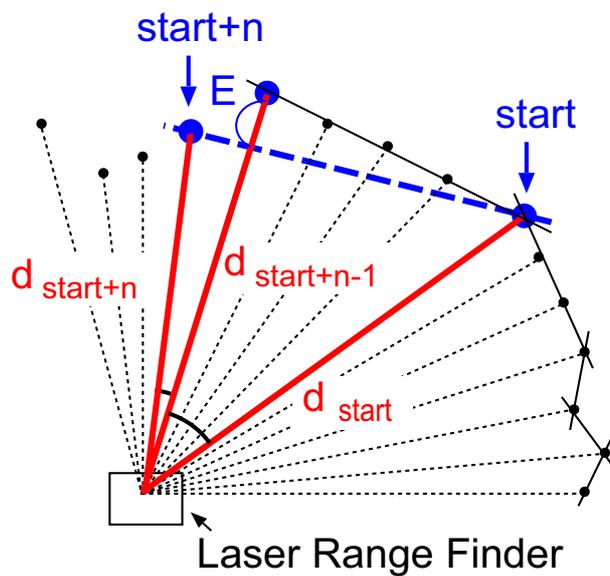


図 3.17 点列のセグメント化

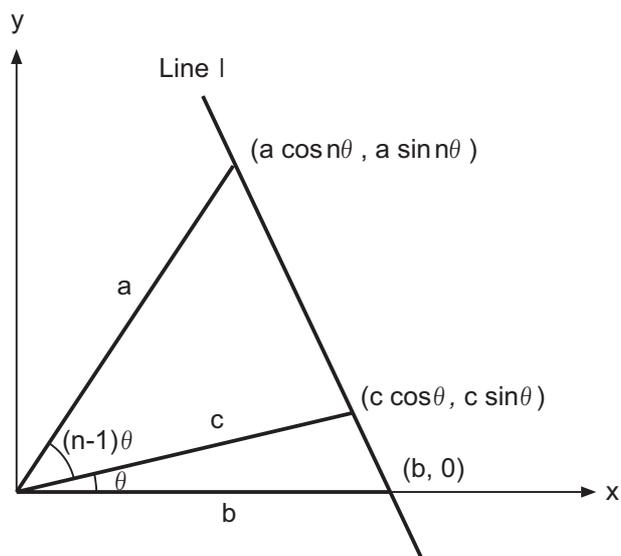


図 3.18 E の計算

### 3.3.3 従来の方法との比較

図 3.19 のスキャン 1, スキャン 2 を例に, 本研究で提案する方法と従来の方法の比較を行う. 本研究で行った改良点は, angle-histogram の計算における 2 点 (点

列のセグメント化，グラフの平滑化)であるが，それぞれの改良点の有効性を確認するため，

1. 従来の方法を用いた場合 (ケース 1)
2. 従来の方法に改良点 2(グラフの平滑化)を加えた場合 (ケース 2)
3. 従来の方法に改良点 1(点列のセグメント化)と改良点 2を加えた場合 (ケース 3)

の 3 つの場合について比較する．ただし，ここでいう従来の方法とは，Weiss の論文で述べられている「隣り合う 2 点ではなく 1 つ飛ばしなど離れた 2 点を結ぶ直線の傾きを用いることで誤差の減少を試みる方法」のことである．本比較実験では，間 2 つ飛ばしで直線の傾きを計算した．

以下，それぞれの場合の angle-histogram と相関のグラフ (図 3.20 , 3.21 , 3.22) ，さらに，それぞれの方法におけるスキヤンの重ね合わせの結果 (図 3.23 , 3.24 , 3.25) を示す．ケース 1 とケース 2 を比較すると，改良点 2(グラフの平滑化)によりケース 2 の相関のグラフが滑らかになり，特にケース 1 の相関のグラフ内の 0[deg.] 付近のノイズを除去できていることが確認できる．ケース 2 とケース 3 を比較すると，相関のグラフにおいてケース 3 の方がより山の頂点を明確にさせており，その結果，ケース 3 の方が精度よくスキヤンデータを重ね合わせていることが分かる．

以上の実験結果から，本研究の 2 点の改良点 (点列のセグメント化，グラフの平滑化) の有効性が確認された．また，角度だけでなく x および y 方向についても同様の手法により効果を得ることができた．

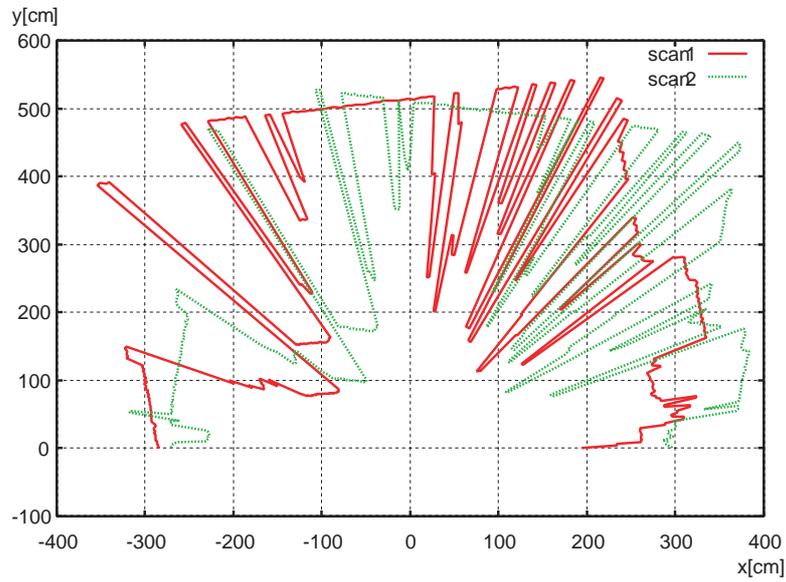
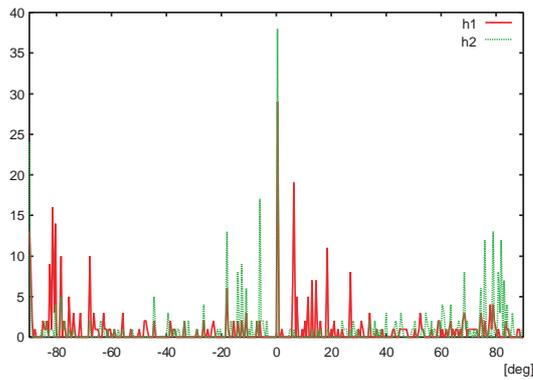
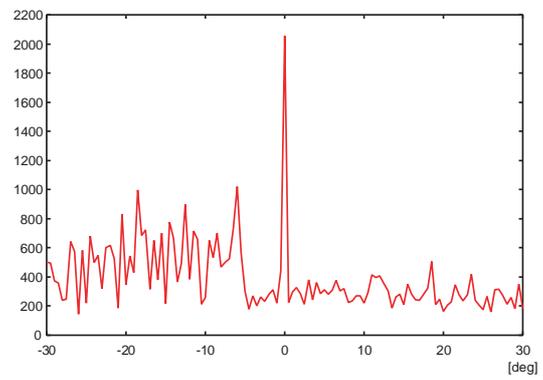


図 3.19 2つのスキャンデータ

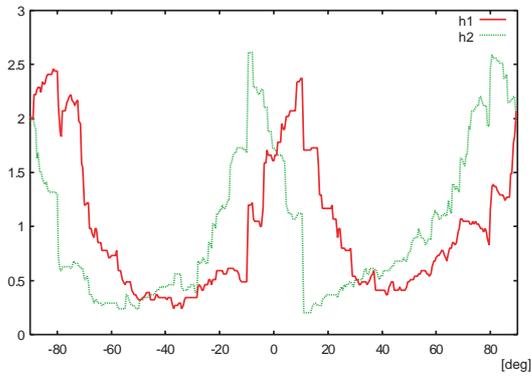


(a) 2つの angle-histogram

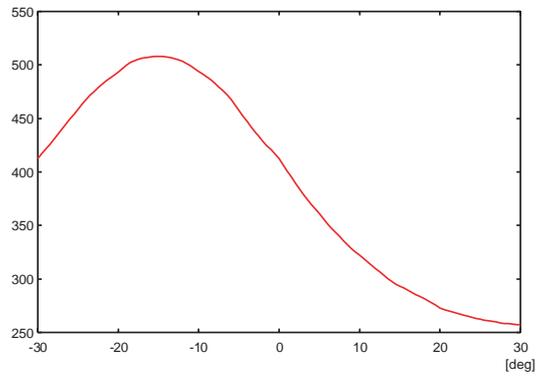


(b) 相関値

図 3.20 ケース1での Angle-histogram と相関値

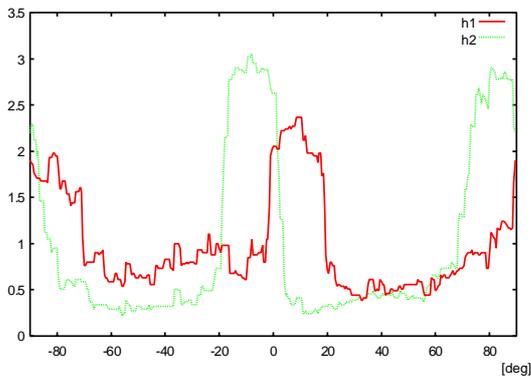


(a) 2つのangle-histogram

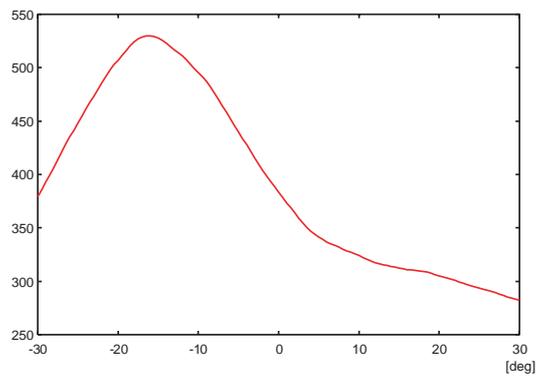


(b) 相関値

図 3.21 ケース 2 での Angle-histogram と相関値



(a) 2つのangle-histogram



(b) 相関値

図 3.22 ケース 3 での Angle-histogram と相関値

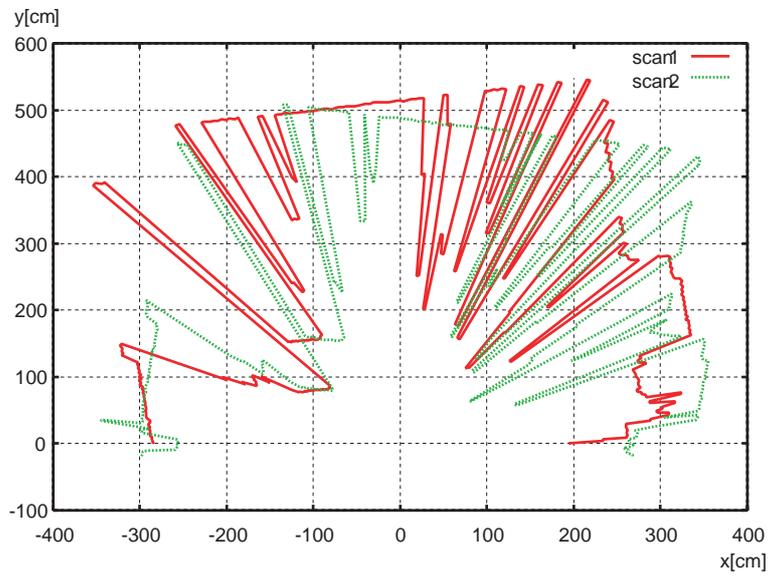


図 3.23 ケース 1 でのマッチング結果

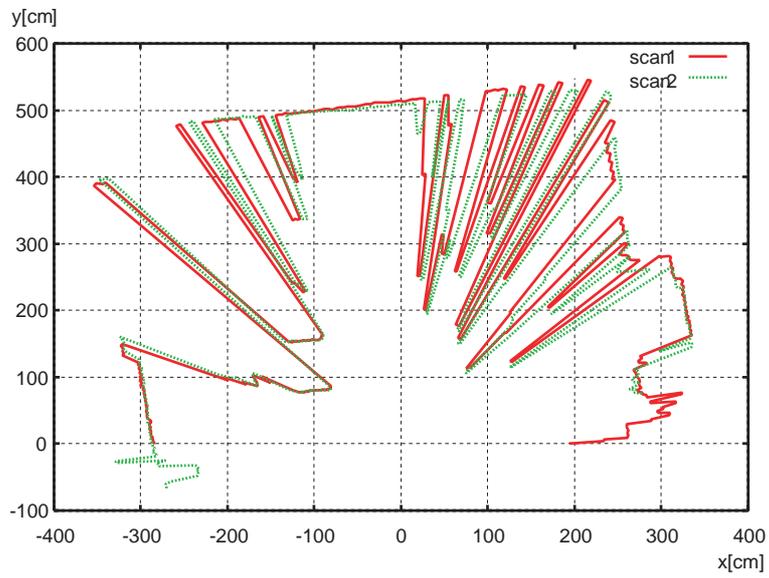


図 3.24 ケース 2 でのマッチング結果

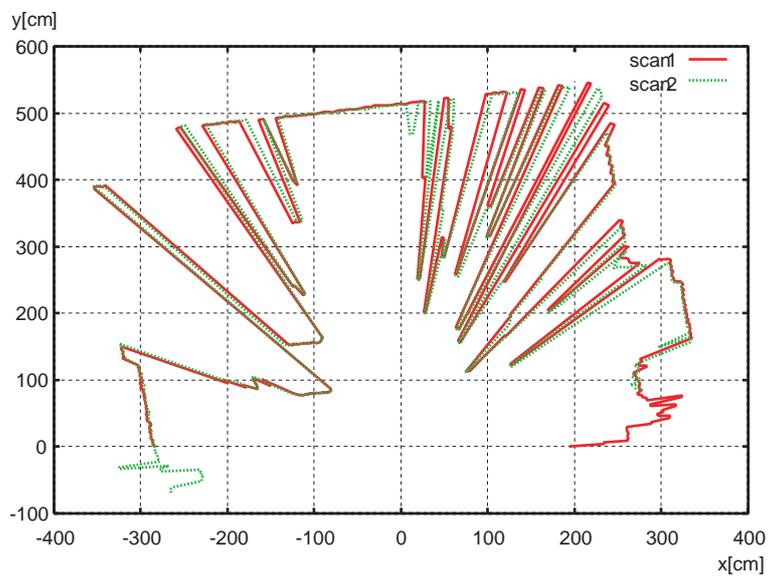


図 3.25 ケース 3 でのマッチング結果

### 3.3.4 自己位置推定の検証のための自律走行実験

3.3.2節のレーザレンジファインダからのスキャンデータによるマッチング手法を用いることで、参照するスキャンデータと入力データ間の位置、姿勢の差を検出することができる。したがって、参照するスキャンデータの位置を基準としたロボットの自己位置を推定できることになる。本節では、この自己位置推定の有効性を検証するために実施したロボットの自律走行実験について述べる。

#### 1) データ列の記憶を用いた自律走行

検証に用いた自律走行手法を以下に説明する。人工知能の分野において、メモリベースアプローチ [43] がある。これは、膨大な記憶と単純なマッチング手法を用いることで、実世界の複雑な問題を解くことを目的としている。このアプローチをパターン認識に応用したものは、“ビューベースアプローチ”や“見え方に基づくアプローチ（アピアランスベースアプローチ）”と呼ばれる。画像を用いた移動ロボットの分野にビューベースアプローチによる研究がある。これらの移動ロボットには、環境の見え方を記憶するための教示が必要となる。一般的に、取り扱う見え方のデータ量が大きくなるため、このアプローチでは（1）見え方の記憶方法（2）見え方のマッチング、の2つが重要な鍵となる。これまでの研究として、まず“ビューシーケンス”と呼ばれる経路モデルに基づくナビゲーションがある [44][45][46]。この経路モデルは、教示走行中に経路に沿って取得された環境の画像列から成る。そして、ロボットは現在の入力画像と記憶したビューシーケンスの間のマッチングを取ることで、自己位置を推定し、目的地までの適切な行動を取り、自律走行を行う。その他の研究としては、三台のカメラを用い、環境中の垂直エッジをランドマークとして利用したもの [47] や、全方位画像の垂直エッジを用いた経路表現を利用したもの [48] もある。しかし、これらの画像を用いた手法では、厳密な距離の推定が困難となる。また、マッチングにおいて照明条件の変化が影響する。

一方、レーザレンジファインダは距離に対する精度が高いセンサである。したがって、メモリベースアプローチにレーザレンジファインダを利用し、得られ

るスキャンデータ列を教示により記憶し、観測されるスキャンデータとのマッチングを行うことで、距離精度の高いロボットの自律走行が可能となる。本自律走行手法は2つの段階“ 教示走行 ”と“ 自律走行 ”から成る。以下に手順を示す。

### 教示走行手順

ロボットは手動による操作で教示走行を行う。走行中、目的地までの経路に沿って所定の間隔ごとにレーザレンジファインダからのスキャンデータを記憶していく。このスキャンデータ列のことを“ スキャンシーケンス ”と呼ぶことにする。また、スキャンが記憶された場所を“ ノード ”と呼び、その位置で得られたスキャンデータを“ ノードスキャン ”と呼ぶことにする。ノードスキャンは、ロボットの前方180度のデータで構成される。ノードスキャンは、前のノードからの行動（例えば、“ 前進 ”や“ 右旋回 ”など）とともに記憶される。図 3.26 に教示走行の例を示す。

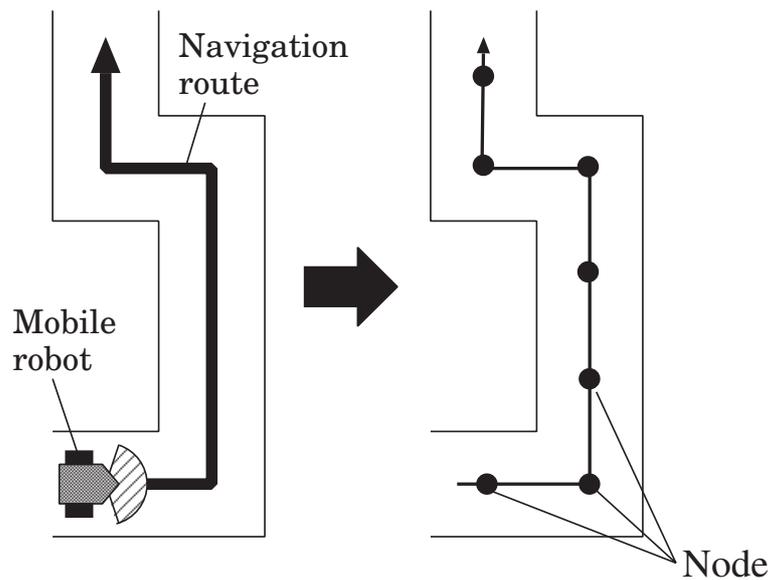


図 3.26 教示走行

## 自律走行手順

ロボットが目的地までの自律走行を行うとき、記憶されたスキャンシーケンス内のノードスキャンを参照する。まず、開始位置で、ロボットはレーザレンジファインダから現在入力されるスキャンデータと、スキャンシーケンス内の最初のノードスキャンとの間のマッチングを取る。そして、自律走行中は、これら2つのスキャン間の相対位置  $dx, dy$  と相対角度  $d\theta$  が計算される。ここでは、経路に沿った進行方向を  $y$  軸の正の向き、 $y$  軸の正の向きから時計回りに  $90[\text{deg.}]$  回転した向きを  $x$  軸の正の向きとする。ロボットの行動は、ノードスキャンとともに記憶された“前進”や“右旋回”といった行動によって決められる。このとき、次式の  $\Delta\phi$  により、走行制御が行われる。

$$\Delta\phi = d\theta - \tan\left(\frac{dx}{dy}\right). \quad (3.6)$$

記憶された行動が“前進”の場合、参照するノードスキャンの位置に向かってロボットは前進する。そして、ロボットが参照するノードスキャンの位置に到達したとき、参照するノードスキャンをスキャンシーケンス内の次のノードスキャンに変更する。記憶された行動が“右旋回”の場合は、参照するノードスキャンと入力されるスキャンデータの相対角度が十分小さくなったときに、参照するノードスキャンを次に変更する。この処理を繰り返すことにより、ロボットは目的地までの自律走行を行うことができる。

## 2) 実験結果

前節で述べた自律走行手法による実験として、レーザレンジファインダから得られる前方 180[deg.] 分のスキャンデータを用いた自律走行に加え、180[deg.] のノードスキャンを利用した 360[deg.] のノードスキャンの自動作成、作成した 360[deg.] のノードスキャンを用いた自律走行を行った。

### システム構成

本実験で使用した実験システムの仕様を表 3.1 に示す。また、システム構成を図 3.27 に示す。実験システムとしては奈良県生駒市北コミュニティセンターに設置している移動ロボット“ たけまるくん ”を使用した。このロボットは我々が製作したものであり、表 3.1 にある市販の電動車いす (M-Smart) を PC による制御ができるように改造したものである。つまり、“ たけまるくん ”による自律走行実験の結果を搭乗型移動ロボットの自律走行に反映させることができる。“ たけまるくん ”の外観図を図 3.28 に、設計図を付録 B に示す。

M-Smart は、その場での旋回が可能 (車椅子の中心と回転半径の中心がほぼ一致) な電動車いすである。付録 A に M-Smart のハードウェア仕様を示す。M-Smart の最小回転半径は 40[cm] である。レーザレンジファインダを取り付けた本移動ロボットの最小回転半径も同様に 40[cm] である。

レーザレンジファインダ LMS 200 は、前方 180[deg.] を 2 次元的にスキャンする非接触の距離測定システムである (図 3.29)。付録 C に LMS 200 のハードウェア

移動ロボットの仕様	
直径 (突起部分も含む)	130[cm]
高さ	130[cm]
電動車いす	M-Smart (MISAWA)
組込み PC	Celeron 1GHz
レーザレンジファインダ	LMS 200 (SICK)

表 3.1 移動ロボットの仕様

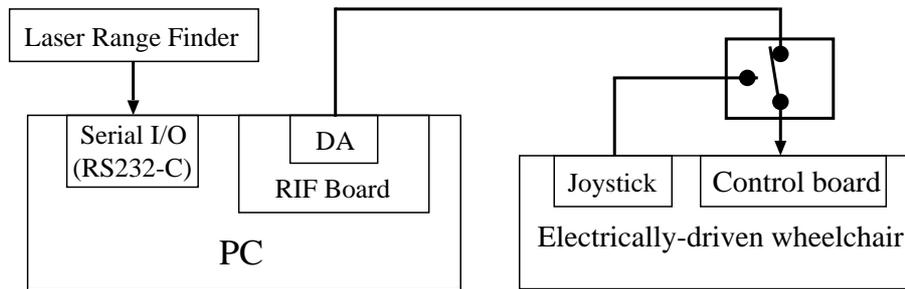


図 3.27 システム構成



図 3.28 実験装置 外観図



図 3.29 LMS 200

ア仕様を示す．このレーザレンジファインダにはいくつかのモードが用意されており，角度分解能や距離測定範囲などを設定できるようになっている．本実験では表 3.2 に示すように設定した．

#### 180[deg.] 分のノードスキャンを用いた自律走行

手動による教示走行で得られた 180[deg.] 分のノードスキャンを用いた走行実験について述べる．実験環境としては奈良県生駒市北コミュニティセンター 1 階を使用した．教示走行の際には移動経路上に 165[cm] 間隔で 24 個，また曲がり角に各 3 個ずつ，計 33 個のノードを配置した．また，ロボットの現在位置とノードとの進行方向の相対位置が 10cm 以内になったらノードスキャンを切替えるように設定している．実験の試行回数は 3 回である．図 3.30 に実験経路と経路上の

レーザレンジファインダのモード設定値	
距離測定範囲	最大 80[m] ([cm] 単位)
角度分解能	0.5[deg.]
角度範囲	0 ~ 180[deg.]
距離データ値の個数	361
応答時間	26[ms]
測定分解能	1.0[cm]
システム誤差	±4.0[cm] (距離範囲 1 ~ 20m)
伝送速度	38400[bps]
送信モード	連続データ・ストリーム送信モード

表 3.2 レーザレンジファインダの仕様

ノードの配置を、そして、図 3.31、図 3.32 に実験の様子を示す。図 3.31、3.32 中に現在のスキャン（黒色）と、参照しているノードスキャン（赤色）を示している。この 2 つのスキャンデータが重なるように自律走行を行う。

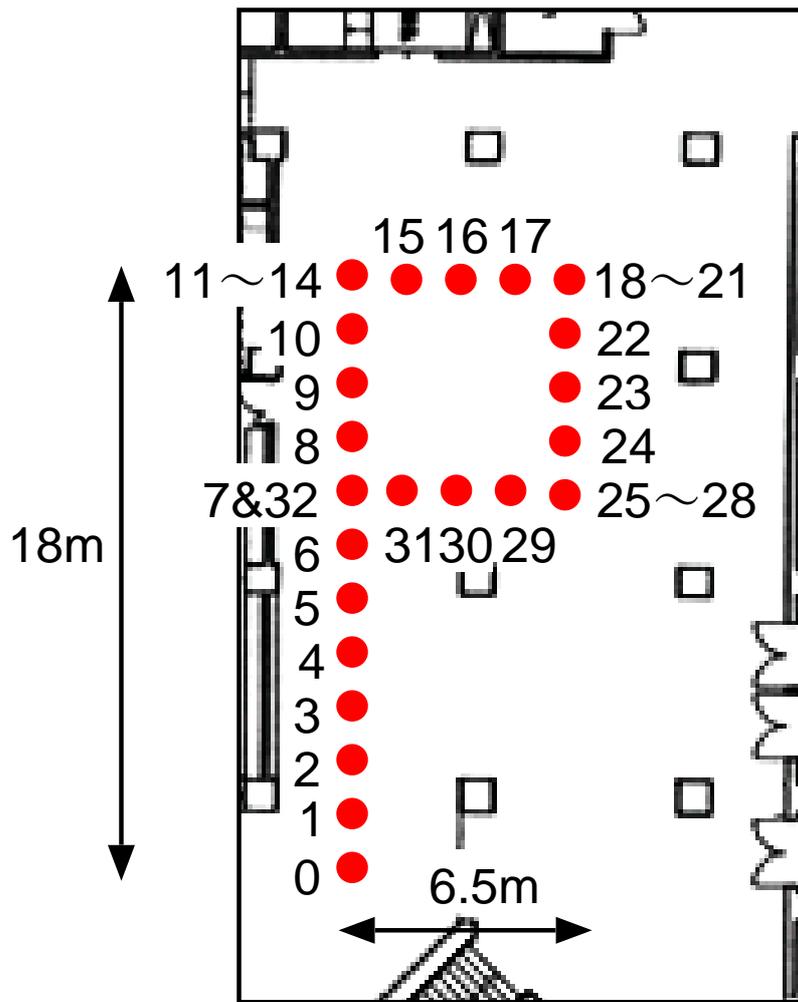


図 3.30 実験経路とノードの配置

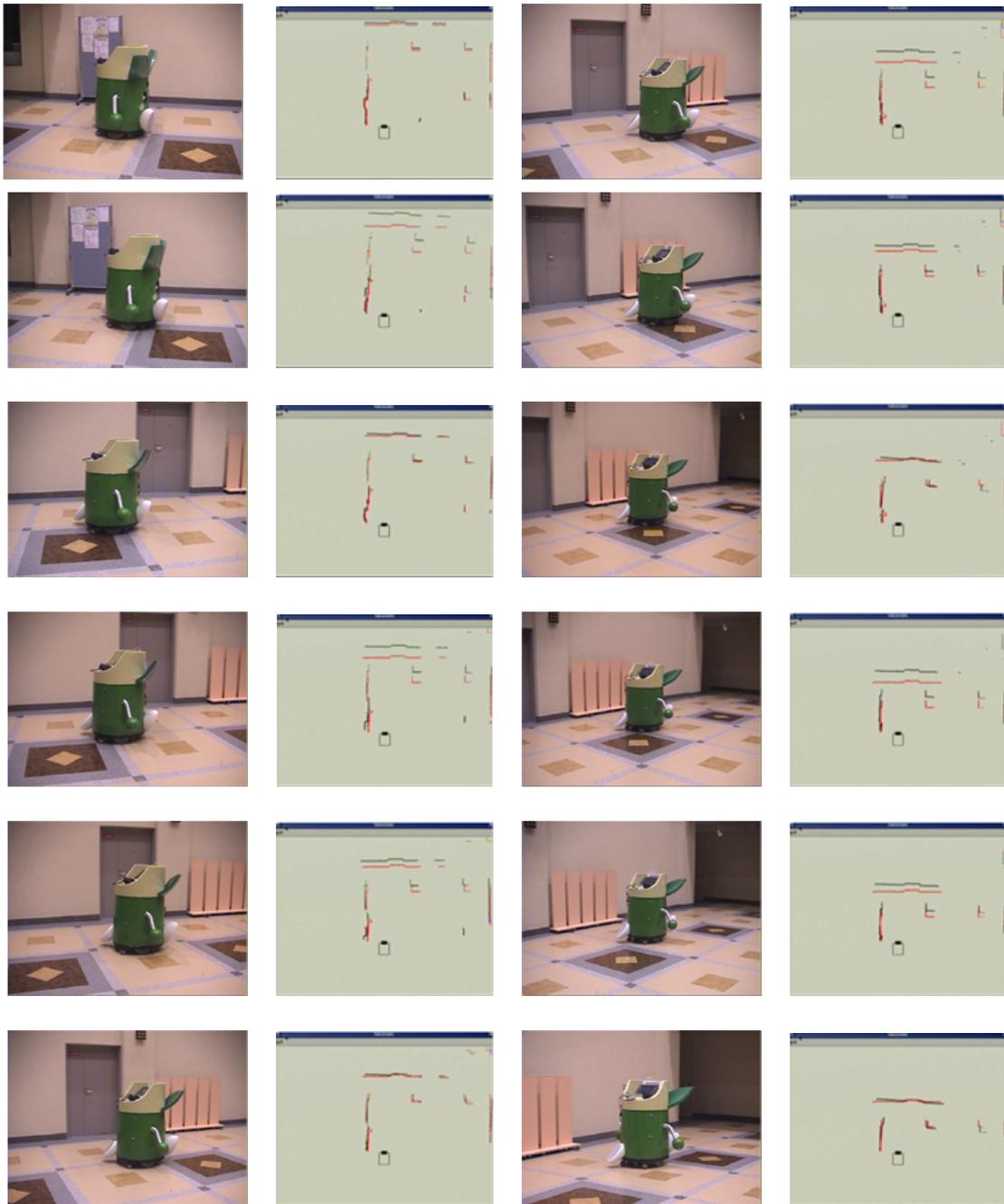


図 3.31 実験の様子 (1)

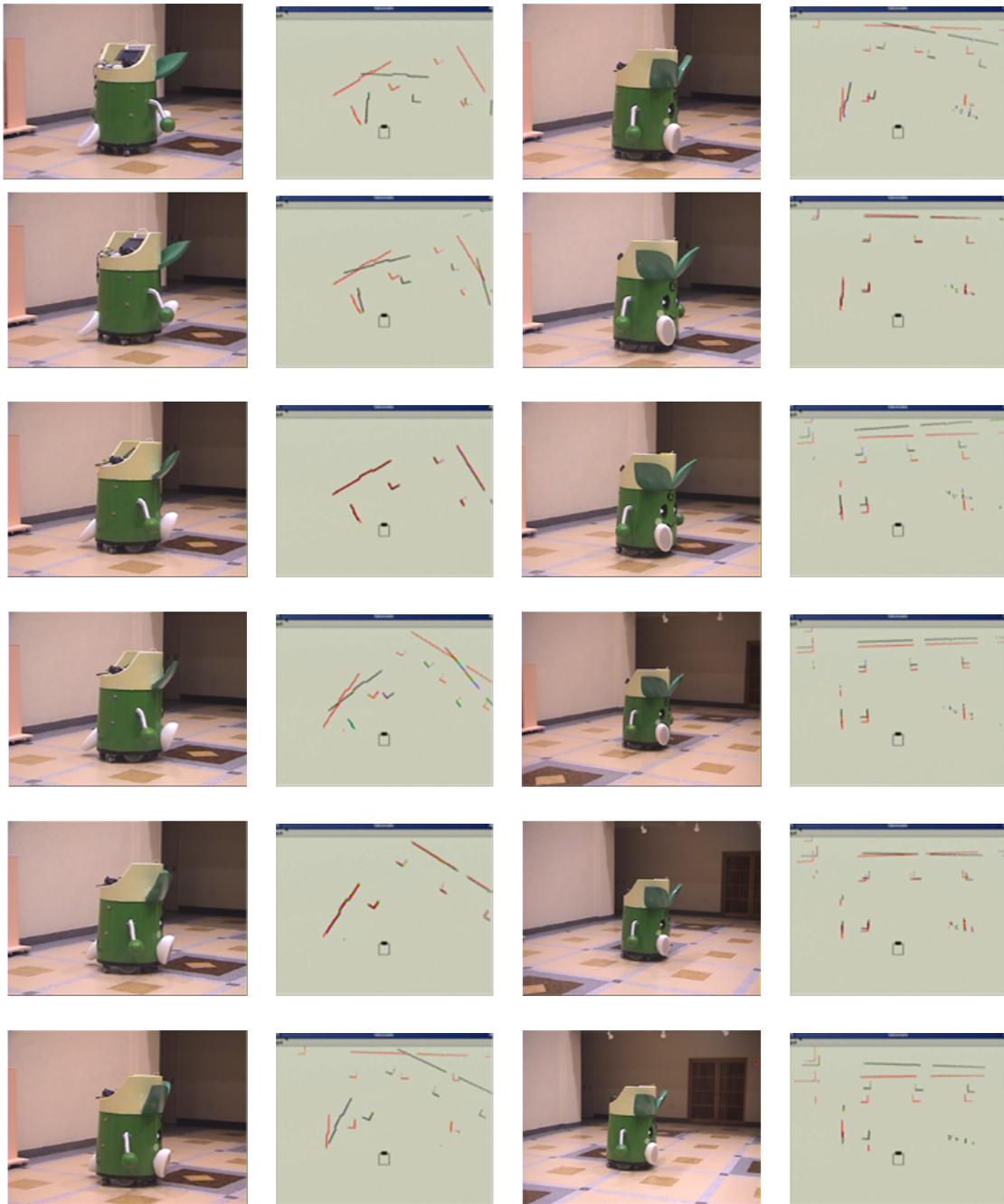


図 3.32 実験の様子 (2)

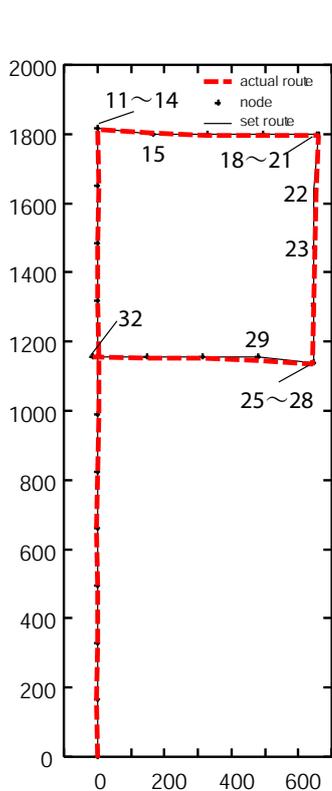


図 3.33 指定経路と実際の走行経路

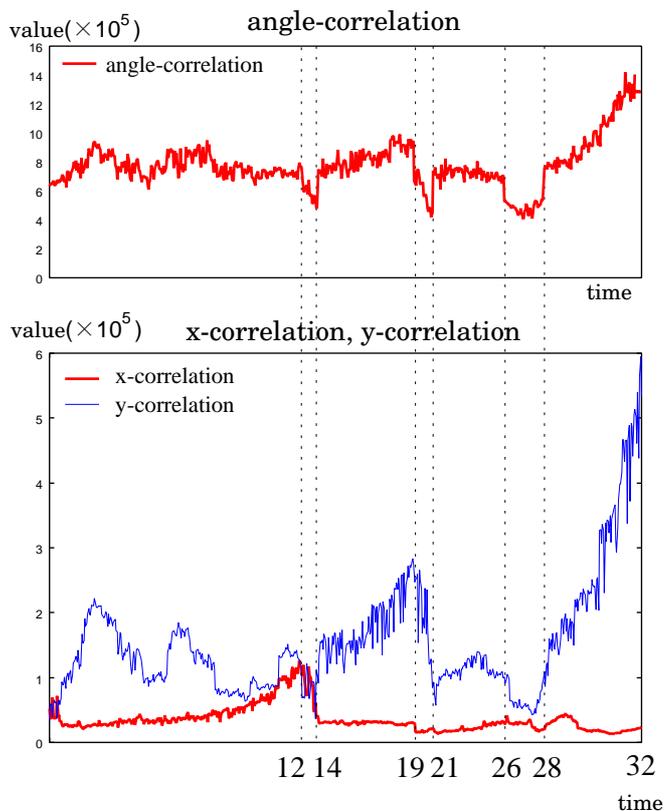


図 3.34 姿勢と位置の相関値

実験の結果を示す．図 3.33 に指定経路と実際の走行経路を，図 3.34 に走行中の姿勢と位置  $(\theta, x, y)$  の相関値を示す．ここで，経路に沿った進行方向を  $y$  軸の正の向き， $y$  軸の正の向きから時計回りに  $90[\text{deg.}]$  回転した向きを  $x$  軸の正の向きと定めている．さらに表 3.3 に各ノードにおける指定経路と実際の走行経路とのずれと誤差を示す．ここで言う“ずれ”とは経路の順方向と直角方向 ( $x$  軸方向) に関する位置ずれのことを表し，“誤差”とはマッチングの計算結果と実測との差，つまり，ロボットの“ずれ”の認識に対する誤差を表している．図 3.33，表 3.3 は 1 回目の試行の際のデータである．

結果としては，図 3.33 に示すように，ロボットはノード No.0 から経路から外れることなくノード No.32 まで移動した．図 3.34 について各相関値を見ていくと，ノード No.12～14，19～21，26～28 において姿勢の相関値が低下しているの

が分かる。これは、ノード間の移動が並進のみの場合よりも回転を行う場合の方がスキャンの特徴が大きく変わるためと考えられる。また、ノード No.14~18, 28~32 にかけて y 軸方向の相関値が徐々に増加しているのが分かる。これは、図 3.33 の左右に長い直線の壁が存在しており、これらに近づくにつれて y 軸方向の相関値が増加しているものと考えられる。さらに、ノード No.29~32 を移動する際に、表 3.3 から分かるようにノード No.15, 22, 23, 29 付近で経路から多少ずれた位置を走行している。これらに関してはノードの配置に理由があり、ノード No.15 を例にとってみると、ノード No.14 から見るとノード No.15 は x 軸方向に 15cm にずれた位置に存在しているので、この 15cm を修正しきれずにずれが生じてしまったと考えられる。ノード No.22, 29 付近でも同様にしてずれが生じている。しかし、これはロボットの速度と制御方法の兼ね合いを突き詰めることによって解消できる問題である。また、表 3.4 に、全 3 回の試行における、回転のためのノードを除いた 24 箇所のノードでのずれと誤差の平均値、最大値を示す。実験環境の広さと移動ロボットの大きさを考慮に入れるとこの程度のずれ、誤差で自律走行が行えたのは十分な結果であると言える。

### 360[deg.] 分のノードスキャンの自動作成

360[deg.] 分のノードスキャンを自動作成し、そのノードスキャンを用いた自己位置推定の有用性を検証するための実験を行った。手動による教示走行によって前の実験と同じ経路で 180[deg.] のノードスキャン列を記憶し、各ノードにおいて、ロボットは自律的に回転を行い、マッチングをとりながら 360[deg.] 分のノードスキャンを作成していく。以下に作成手順を示す。

1. 教示走行で記憶した 180[deg.] 分のノードスキャンを参照スキャンとして指定し、ロボットの向きを参照スキャンと一致させる。
2. ロボットを自動でその場回転させ、ノードスキャンと現在の入力スキャンとの間でマッチングを行って、ノードスキャンに対する現在の相対角度・位置を計算する。

表 3.3 各ノードでのずれと誤差

node No.	ずれ [cm]	誤差 [cm]	node No.	ずれ [cm]	誤差 [cm]
0	0	0	15	-5	1
1	-2	2	16	0	1
2	0	4	17	0	1
3	0	0	18	1	1
4	-2	2	22	-8	3
5	2	0	23	-6	6
6	3	1	24	-1	2
7	3	0	25	4	3
8	2	1	29	-6	6
9	1	1	30	-1	0
10	3	1	31	1	1
11	2	2	32	3	3

表 3.4 全試行に対するずれと誤差の平均値，最大値

3 × 24 ノードでの平均値・最大値	
	[cm]
平均ずれ	2.8
平均誤差	2.2
最大ずれ	-13(ノード No.29)
最大誤差	12(ノード No.29)

3. 求めた相対角度が閾値を超えたら，重なっていない部分のスキャンを最初の180[deg.]分のスキャンに追加する．
4. スキャンの追加を行ったときの入力スキャンを次の参照スキャンとして用い，2.～4.と同様の処理を行う．
5. スキャンが360[deg.]分作成できたら，次のノードスキャンの位置に移動する．

図 3.35 に 360[deg.]分のノードスキャン自動作成の様子を示す．

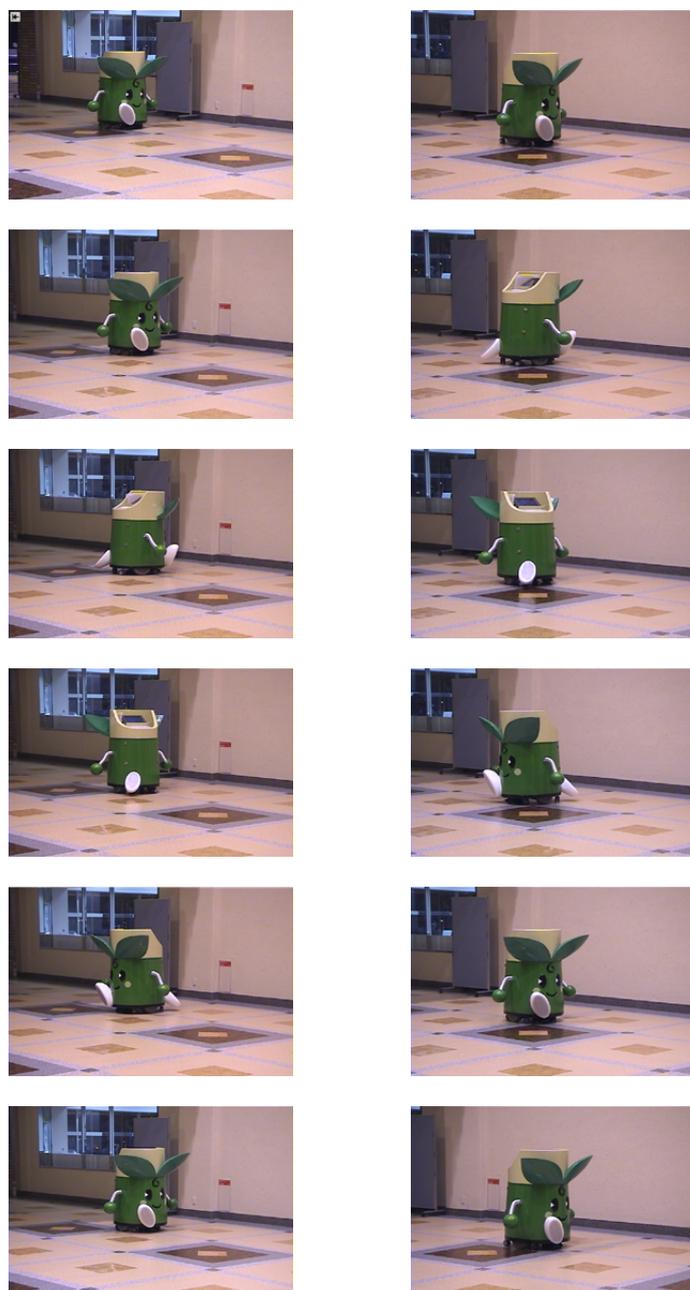


図 3.35 360[deg.] 分のノードスキャン自動作成の様子

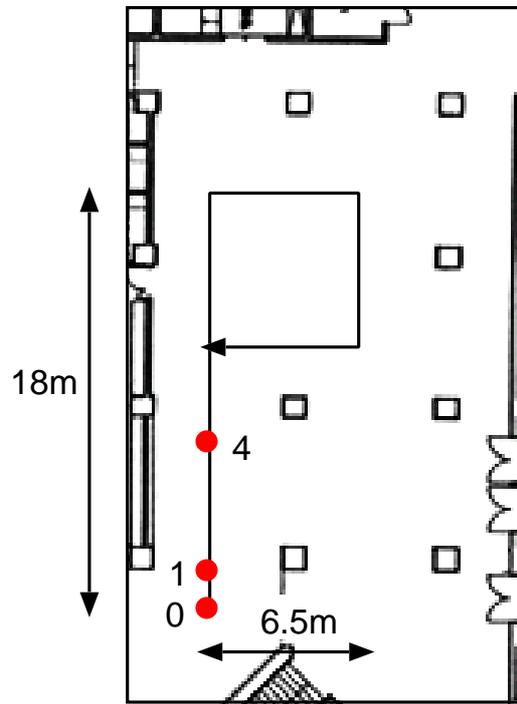
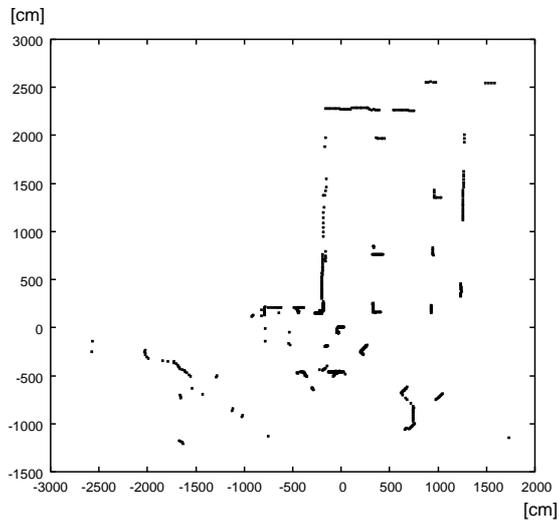
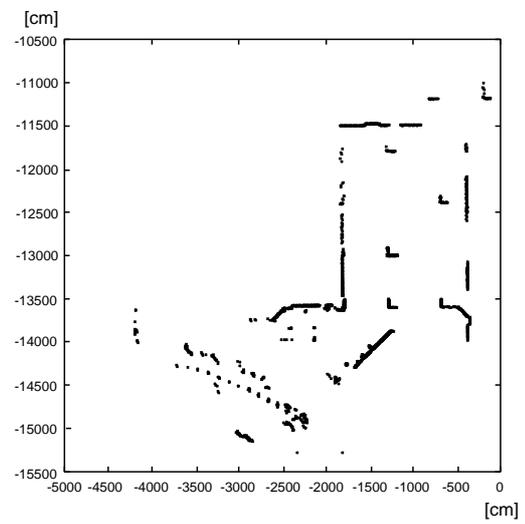


図 3.36 実験経路

結果としては、指定した経路を正確に走行し、各ノードでの 360[deg.] 分のノードスキャンを自動作成することができた。しかし、図 3.36 中のノード No.0, No.1 においてはノードスキャンを精度良く作成することができなかった。原因としては、これらのノードにおいて 180[deg.] 回転したときに、周囲環境の正面方向が一面ガラス張りになっていてレーザが透過してしまったこと、またその方向においては周囲環境に特徴が余りなかったことが考えられる。その他のノードに関しては、手動で貼り合わせて作成したノードスキャンに遜色ないものが自動で作成できた。図 3.36 中の各ノードにおける自動・手動作成によるノードスキャンを図 3.37, 図 3.38, 図 3.39 に示す。図 3.37, 図 3.38 においては、ノード No.0, No.1 の下の部分の形状が自動作成したものと手動作成したもので大きく変わっているのが分かる。しかし、図 3.39 においては形状が精度よく表現できているのが分かる。

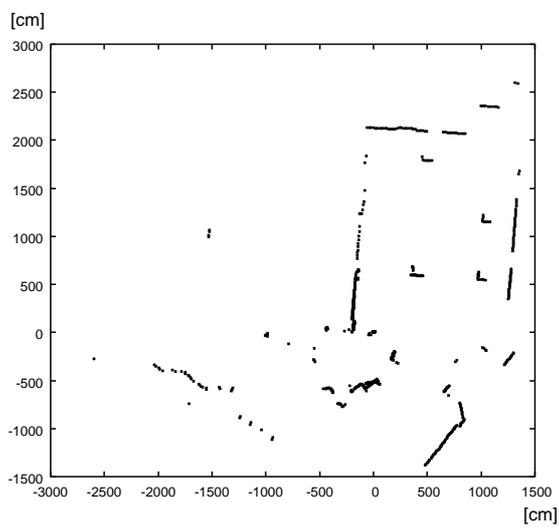


(a) 自動作成

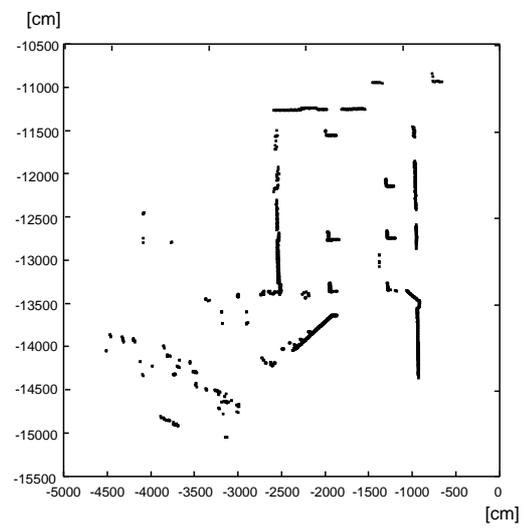


(b) 手動作成

図 3.37 ノード No.0 におけるノードスキャン

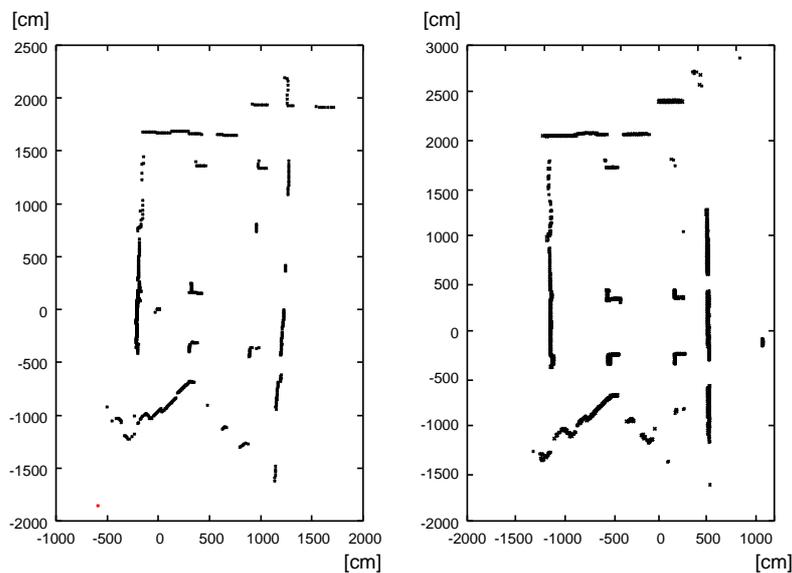


(a) 自動作成



(b) 手動作成

図 3.38 ノード No.1 におけるノードスキャン



(a) 自動作成

(b) 手動作成

図 3.39 ノード No.4 におけるノードスキャン

### 360[deg.] 分のノードスキャンを用いた自律走行

前節の実験において 360[deg.] に拡張したノードスキャンを用いた走行実験について述べる．本節では，180[deg.] 分のノードスキャンを用いた自律走行と同じ経路を (1) 教示走行時と同じ向きに走行，(2) 逆向きに走行，の 2 つに関して実験を行った．

#### (1) 教示方向と同じ向きの走行実験

教示経路の順方向への走行実験について述べる．180[deg.] 分のノードスキャンを用いた自律走行と同様に経路上に 33 個のノードを配置し，各ノードにおけるノードスキャンを 360[deg.] に拡張した．実験の試行回数は 3 回である．

実験の結果を示す．図 3.40 に指定経路と実際の走行経路を，表 3.5 に各ノードにおける指定経路と実際の走行経路とのずれ，および誤差を示す．また表 3.6 に

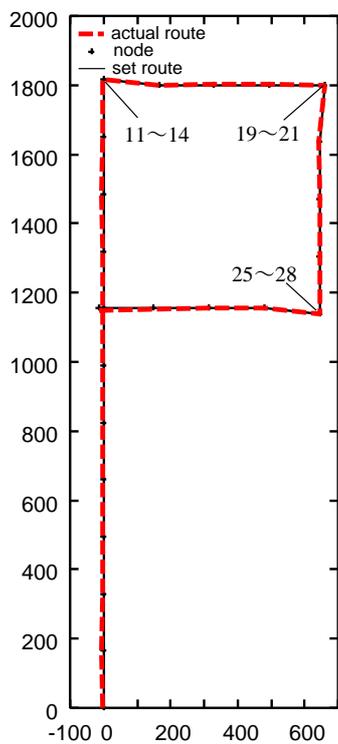


図 3.40 指定経路と実際の  
走行経路

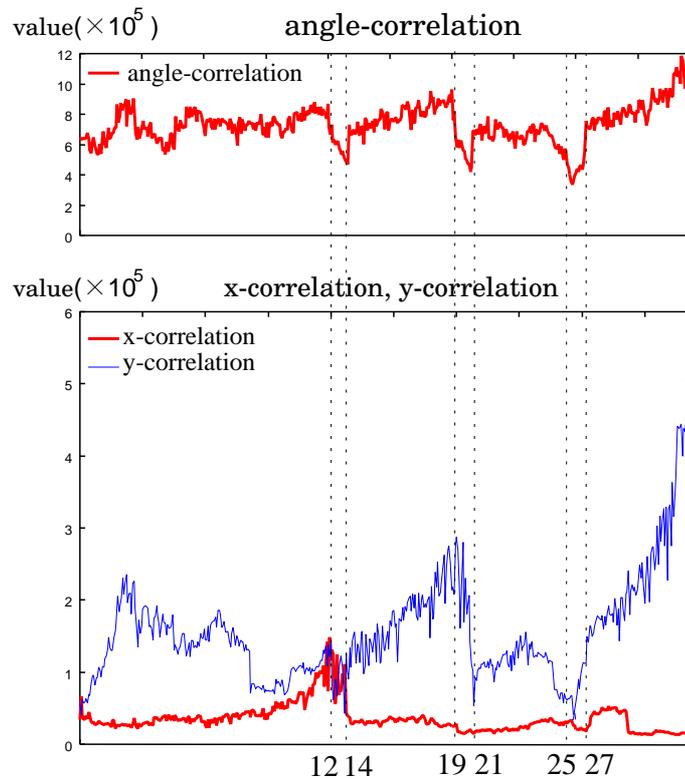


図 3.41 姿勢と位置の相関値

ずれと誤差の平均値，最大値を示す．

結果としては，図 3.40 に示すように，ロボットはノード No.0 から経路から外れることなくノード No.32 まで移動した．図 3.41 について各相関値を見ていくと，ノード No.12～14，19～21，25～27 において姿勢の相関値が低下しているのが分かる．これは，180[deg.] 分のノードスキャンを用いた自律走行と同様の理由からと考えられる．また，ノード No.14～19，27～32 にかけて y 軸方向の相関値が徐々に増加しているのが分かる．これは，図 3.40 の左右に長い直線の壁が存在しており，これらに近づくにつれて y 軸方向の相関値が増加しているものと考えられる．また，表 3.6 に，全 3 回の試行に対して，回転のためのノードを除いた 24 箇所のノードにおけるずれと誤差の平均値，最大値を示す．これらのデータより，180[deg.] 分のノードスキャンを用いた自律走行の実験結果と良く似た結果が

表 3.5 各ノードでのずれと誤差

node No.	ずれ [cm]	誤差 [cm]	node No.	ずれ [cm]	誤差 [cm]
0	-2	3	15	-1	1
1	-5	2	16	-3	1
2	-1	1	17	-3	2
3	-4	2	18	1	1
4	-3	1	22	2	2
5	-3	2	23	0	0
6	-4	3	24	-2	5
7	-3	0	25	-1	1
8	-4	1	29	-1	1
9	-7	2	30	1	1
10	-1	1	31	-2	1
11	-2	2	32	-7	7

得られていることが分かる．これは，本実験においては 360[deg.] 分のノードスキャンから進行方向 180[deg.] 分の点を切り出してマッチングに用いているため当然の結果といえるが，360[deg.] 分のノードスキャン自動作成時に悪影響が出ていないことが伺える．

## (2) 教示方向と逆向きの走行実験

教示経路の逆方向への走行実験について述べる．360[deg.] に拡張したノードスキャンを用いることにより，教示走行の逆の方向の経路をたどり，自律走行を行うことができる．つまり，順方向のみの教示走行だけで済むことになり，手動による処理を減らせることになる．実験条件は前の実験と同じであり，実験の試行回数は 3 回である．図 3.42 に実験の様子を示す．図 3.42 中には現在のスキャン

表 3.6 全試行に対するずれと誤差の平均値，最大値

3 × 24 ノードでの平均値・最大値	
	[cm]
平均ずれ	2.8
平均誤差	2.2
最大ずれ	-12
最大誤差	14

(黒色)，参照しているノードスキャン(赤色)，そして，参照ノードスキャンをマッチング結果に合わせて現在のスキャンに一致させたもの(緑色)を示している。

実験の結果を示す。図 3.43 に指定経路と実際の走行経路を，図 3.44 に走行中の姿勢と位置  $(\theta, x, y)$  の相関値を示す。また，表 3.7 に各ノードにおける指定経路と実際の走行経路とのずれ，および誤差を示す。図 3.43，表 3.7 は 1 回目の試行の際のデータである。さらに表 3.8 にずれと誤差の平均値，最大値を示す。

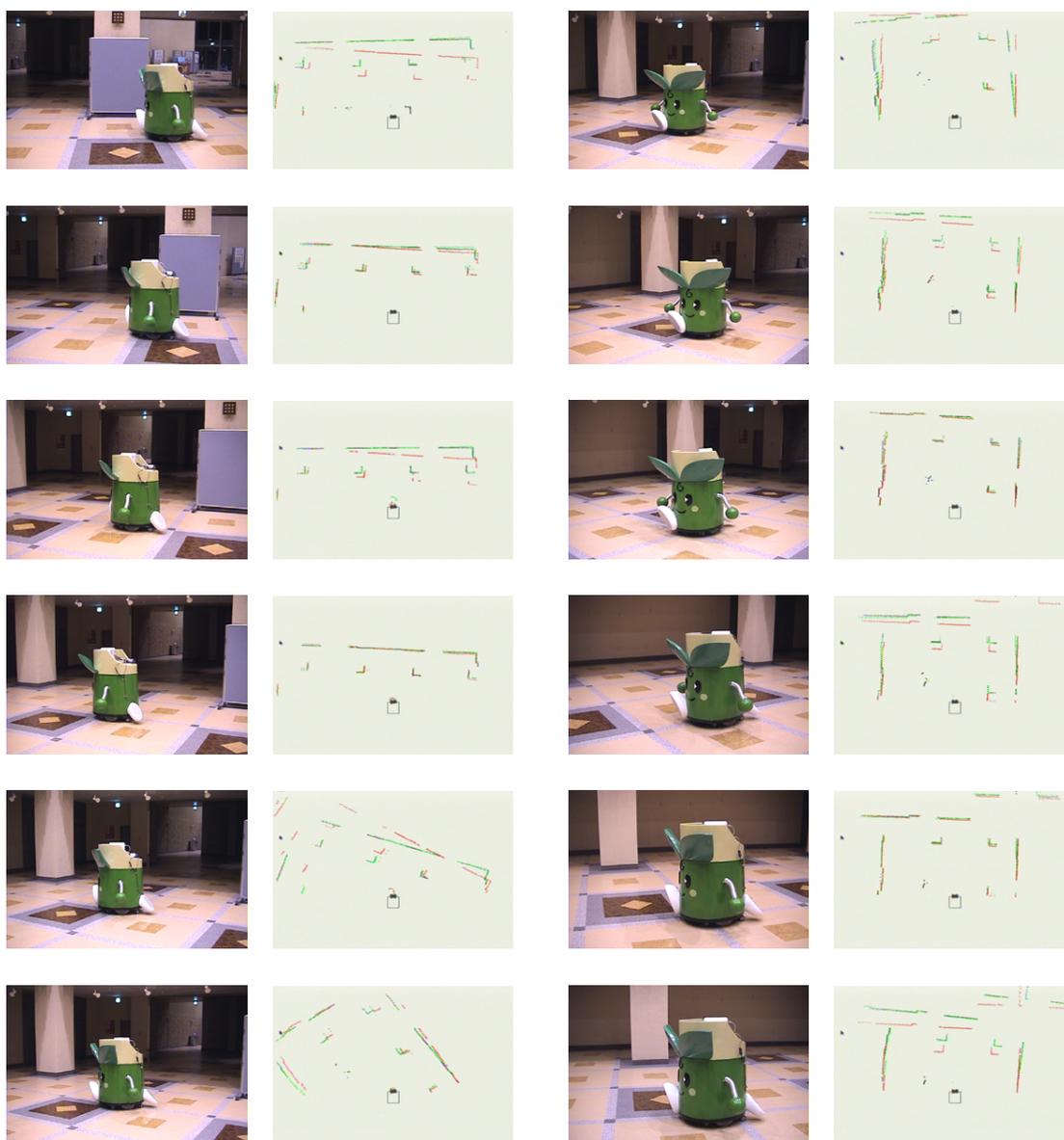


図 3.42 実験の様子 (教示経路を逆走)

結果としては、図 3.43 に示すように、ロボットはノード No.32 から No.2 までは自己位置を失わずに移動したが、ノード No.1 を参照する段階で自己位置を失った。これは、ノードスキャンの自動作成でも述べたように、ノード No.1, No.0

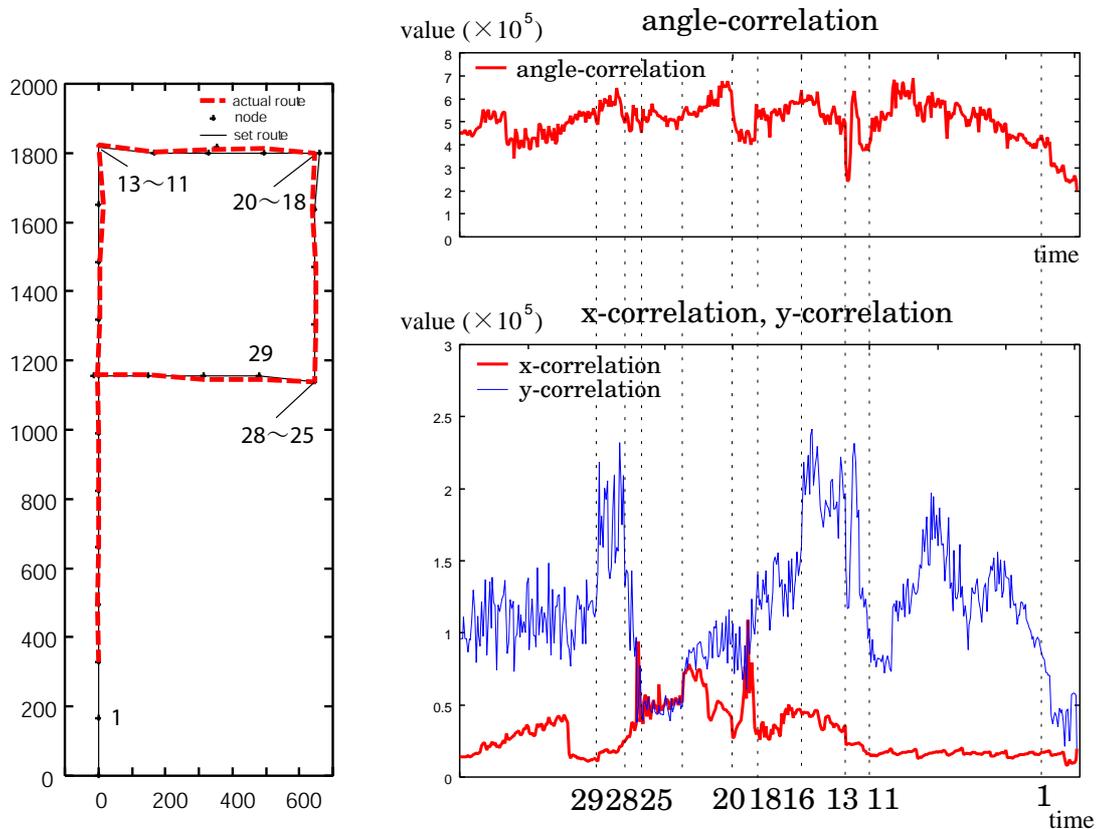


図 3.43 指定経路と実際の  
走行経路

図 3.44 姿勢と位置の相関値

における  $360[\text{deg.}]$  のノードスキャンの作成精度がかなり低く、環境を正確に表現できていないのが原因として考えられる。姿勢、位置  $(x, y)$  に関する相関値を見ても、ノード No.1 以降の値が低くなっているのが分かる。図 3.44 の各相関値を見ていくと、 $180[\text{deg.}]$  分のノードスキャンを用いた自律走行実験の際とは異なり、回転時（ノード No.28 ~ 25, 20 ~ 18, 13 ~ 11）付近では相関値の大きな変化は見られなかった。その代わりに、ノード No.29 ~ 28, 16 ~ 13 付近において  $y$  軸方向の相関値が高いのが分かる。これは、 $360[\text{deg.}]$  のノードスキャンを自動で作成する際に、ロボットの進行方向にはっきりとした特徴が存在し  $(x, y)$  軸方向のどちらにも直線の長い壁が存在する)、ノードスキャンを精度良く作成できたことが原因として考えられる。逆に、ノード No.28 ~ 23 付近においては  $y$  軸方向の相関

値が低くなっている。これは、自動作成の際に、ロボットの進行方向に向かって左側(実験時には進行方向に向かって右側)の方向にマッチングに利用できるような直線の壁が少なく、作成精度が低くなったのが原因として考えられる。このように、教示経路を逆走する場合(教示方向と異なる向きに移動する場合)においては、ノードスキャンの作成精度が自己位置推定精度に影響を与えるものと考えられる。

次に、表 3.8 を見てみると、各ノードでのずれ・誤差が平均値、最大値ともに増加しているのが分かる。さらに、表 3.7 を見るとこれまでの実験と比較しても全体的にずれ、誤差ともに値が増加しているのが分かる。これもやはり 360[deg.] のノードスキャンの作成精度に依存していると考えられる。しかしながら、ノードスキャンを自動作成したことを考慮に入れるとこの程度のずれ、誤差で自律走行を行えたのは十分な結果であるといえる。

表 3.7 各ノードでのずれと誤差

node No.	ずれ [cm]	誤差 [cm]	node No.	ずれ [cm]	誤差 [cm]
32	-3	6	14	7	9
31	-4	1	10	-14	10
30	8	14	9	-6	1
29	9	11	8	-3	1
28	3	4	7	3	3
24	4	4	6	-1	1
23	3	6	5	-2	0
22	-8	13	4	-1	1
21	-13	14	3	2	2
17	13	12	2	0	2
16	8	6	1	計測不能	計測不能
15	2	1	0	計測不能	計測不能

表 3.8 全試行に対するずれと誤差の平均値，最大値

3 × 22 ノードでの平均値・最大値	
	[cm]
平均ずれ	5.5
平均誤差	5.8
最大ずれ	15
最大誤差	17

### 3) 自律走行実験のまとめ

高分解能で周囲環境の距離を計測できるレーザレンジファインダを用いた高精度な自己位置推定手法を提案し，手法を検証するために行った自律走行実験について述べた．

レーザレンジファインダから得られるスキャンデータのマッチング手法を改良し，自己位置推定の精度を向上させた．そして，スキャンデータ列の記憶に基づく自律走行手法を提案し，実験により，提案マッチング手法を用いた自律走行が精度良く行えることを示した．さらに，記憶してあるスキャンを 360[deg.] に自動で拡張し，経路を教示方向と逆向きに移動することを可能にすることによって，自律走行の適用範囲を拡大できることを示した．以上より，本章の自己位置推定手法，および，自律走行の有用性を確認できた．

課題としては，複雑な環境や特徴に乏しい環境においてはマッチングの精度が落ちることが挙げられる．これは本手法に限った課題ではなく，レーザレンジファインダを用いた自己位置推定手法全体の課題である．したがって，これを回避するためには，カメラやエンコーダなど距離情報以外の他の情報を獲得できるセンサと組み合わせることでマッチングの補助を行うことが考えられる．

### 3.3.5 環境地図を用いた自己位置推定

ロボットが環境地図を持っていれば，レーザレンジファインダから入力されたデータとその環境地図を用いることで，地図内の自己位置を認識することができる．さらに，周囲環境の情報を既知とすることができる．ここでは，環境地図として，レーザレンジファインダから得られた距離データを重ね合わせて手動により作成し，線分によって構成したものをを用いる．

環境地図を用いた自己位置推定手順を示す．まず，ロボットには地図内の初期位置を予め与えておく．ロボットは前方 180 度の範囲をレーザレンジファインダにより観測する．そして，地図における各角度に対する距離データを抽出する．距離データの抽出の様子を図 3.45 に表す．この 2 つのデータのマッチングを行い，得られた  $dx, dy, d\theta$  を  $x, y$ , 角度の移動量として，ロボットは環境地図内での現在の自己位置の推定を行う．なお，本自己位置推定手法は，ヘッドマウントディスプレイを用いたアノテーション [49] の実験に利用され，位置の誤差 5.1[cm]，角度の誤差 0.4[deg.] と高精度な推定結果が確認された．

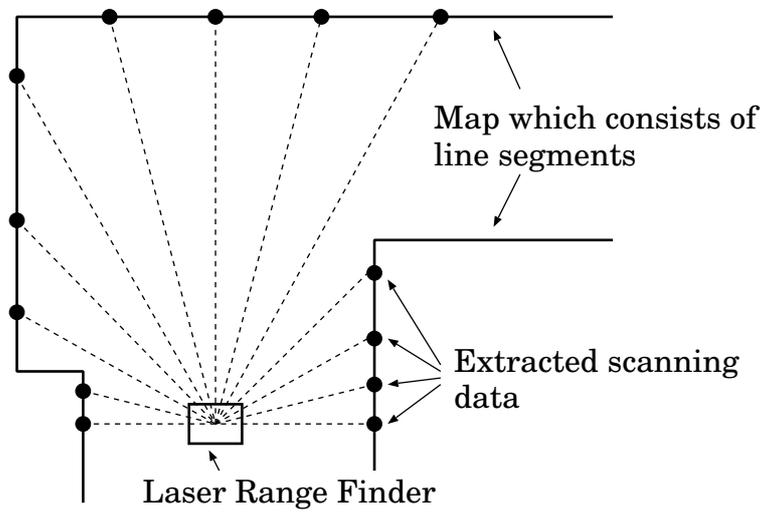


図 3.45 地図からの距離データの抽出

## 3.4. 注視量ヒストグラム

3.2節のシステムで計測したユーザの視線方向と、3.3節で述べたロボットの自己位置推定の結果に基づいて、図3.46のようにロボットは地図中におけるユーザの注視位置を計測することができる。つまり、ユーザが地図中のどの位置を注視しているか、そして、その位置をどれくらいの時間見ているかを知ることができる。なお、ここでは地図はレーザレンジファインダからの観測データと同様、ある高さにおける2次元データで構成されている。したがって、地図中の線分からの鉛直方向への平面を仮定し、ユーザの3次元の視線方向との交点を求め、その交点を3次元中の注視位置とした。

ある位置に目を動かすことで、明確な注意の方向付け（方向定位）がなされることは知られている [50]。そこで、計測された注視位置の時間変化に基づいて、ユーザの対象への注意の移り変わりを推定する。このとき、注視の度合（注視量）をヒストグラムを用いて表現する。このヒストグラムを“注視量ヒストグラム”と呼ぶことにする。注視量ヒストグラムの度数が高い位置ほど、ここでは、ユーザの“注意”がその位置に向けられているとする。ここで、注意とは、不要な情報を捨て去り、有用な情報を獲得する「情報選択」機能をさし、注視とは、何らかの視覚対象に視点を向け続けることをさす [51]。

注視量ヒストグラムのパラメータは、以下の知識により定義する。

人間の視覚において高精度の範囲は中心窩の約2度である [52]。図3.47の実線に、視角と視力の関係を示す。これは、眼球内で光を受ける網膜に、錐体と桿体（かんたい）という性質の違う細胞が並んでいるためである [53]。桿体は光が少なくても働くが細かな映像を神経に伝達できない。錐体は光が十分ないと機能しないが、細かい映像を伝達できる。細かな情報を担当する錐体細胞は網膜の中心に多く、桿体細胞は周辺に分布している。これに従い、ユーザの視線方向中心に近いほど、ユーザはその位置に対する注視の度合が高いとする。したがって、地図上の各位置に対する注視量の大きさは、ユーザの視線方向にピークを持つ分布を考える。そして、同じ位置を見続けることで、その位置に対する注視の度合が高まるよう、注視量ヒストグラムに対して時刻毎にこの分布を追加していく。ここでは注視量ヒストグラムに加える分布として、視線計測と自己位置推定のノイズ

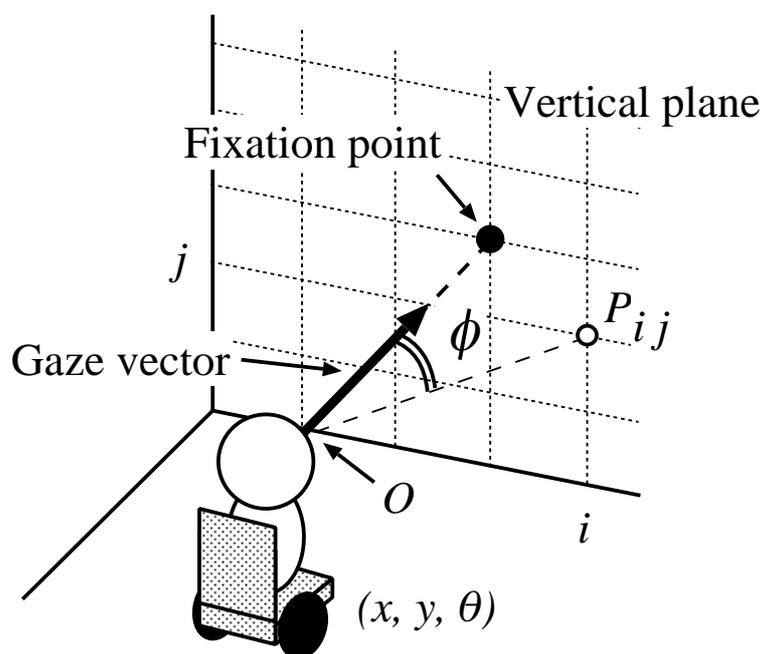


図 3.46 ユーザの注視位置

を考慮し，ピークを持つ分布として正規分布を用いることにする．図 3.47 の点線に正規分布を示す．ここでは，視線計測精度と自己位置推定精度より，標準偏差  $\sigma$  を 5 度と設定した．

また，ユーザが注視していない位置，つまり，ユーザの視線方向から離れた位置に対する注意は低下していく．これを減衰率  $\alpha$  を用いて表現し，注視ヒストグラム全体の度数を時間的に減衰させていく．

各位置における注視量ヒストグラムの度数を式にまとめると以下のようなになる．

$$w_i(t) = \alpha \cdot w_i(t - \Delta t) + g_i(t) \quad (3.7)$$

$$g_i(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{\phi_m^2 + \phi_n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

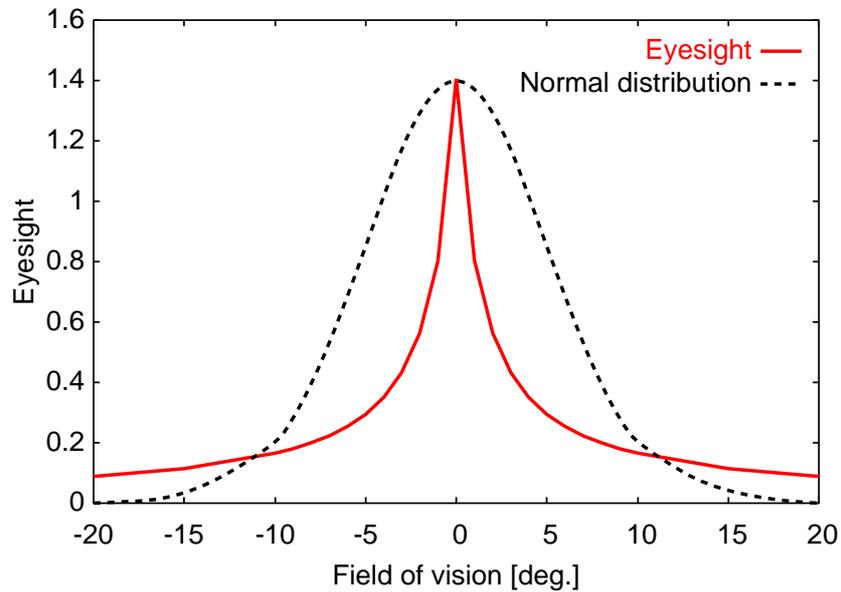


図 3.47 注視量ヒストグラムに加える正規分布

- $w_i(t)$  : 位置  $i$  での時刻  $t$  のヒストグラムの度数
- $\alpha$  : 注視量ヒストグラムの度数の減衰率
- $\phi_m$  : 位置  $i$  と視線方向の角度差 (水平方向)
- $\phi_n$  : 位置  $i$  と視線方向の角度差 (垂直方向)
- $\sigma$  : 注視量として加える正規分布の標準偏差
- $A$  : 定数

上記の式において，ユーザが同じ位置を注視し続けた場合を考えると，

$$\begin{aligned}
 w_i(t) &= \alpha \cdot w_i(t - \Delta t) + A \\
 &= \alpha \cdot (\alpha \cdot w_i(t - 2\Delta t) + A) + A \\
 &= (1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^n + \dots) \cdot A \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - \alpha^{n+1}}{1 - \alpha} \cdot A = \frac{A}{1 - \alpha} \\
 & \text{(ただし, } \alpha < 1)
 \end{aligned}$$

つまり、注視量ヒストグラムの度数は、 $A/(1 - \alpha)$  に収束する。この収束値を 100% とし、ある位置に対する度数が収束値の 90% 以上である場合に十分に注視の度合が高まった状態であり、度数が収束値の 10% 以下である場合に十分にその位置への注視の度合が低くなった状態であるとみなす。そこで、いったん度数が 90% 以上になったときに、ユーザはその位置に対して“ 注意が向いている ”と定義し、度数が 10% 以下に減衰した場合に、その位置に対する“ 注意がなくなった ”と定義する。ここで、注意を人間の脳のある領域におけるニューロンの発火であると考えてみる。人間の脳では、脳幹網様体賦活系が大脳皮質のニューロンの発火のレベルを調節している。そして、睡眠時（意識のない状態）には低いレベルの自発的な活動状態に留まっているが、覚醒時（意識がある状態）には発火の閾値が下げられ、その結果、より多くのニューロンが活動する。つまり、ニューロンの発火頻度が閾値よりも高ければ、覚醒している状態であるといえる [54]。ここでの意識を注意、ニューロンの発火を注視量ヒストグラムの度数と置き換えてみると、注意はある閾値以上で生じ、そして閾値が下げられ、その閾値よりも高ければ、“ 注意がある ”といえることになる。また、ニューロンの数理モデルのひとつとして、Integrate-and-fire モデルと呼ばれるものがある [55]。これは、入力を時定数での減衰付きで積分するというものであり、注視量ヒストグラムの度数の追加、減衰におおまかな部分では近いと考えられる。以上より、上記の定義は、近似としては妥当なものであると思われる。

ここで使用する減衰率について述べる。人間の記憶において、感覚モダリティからの情報を短時間保持する記憶として、感覚記憶がある。視覚刺激に対する感覚記憶はアイコニック・メモリと呼ばれ、その持続時間は約 500ms 以内である [56]。本実験システムにおける処理時間は 1 フレーム約 210ms である。したがって、アイコニック・メモリの持続時間 500ms が経過した 3 フレーム (約 630ms) 後に、注視量ヒストグラムの度数が収束値の 10% 以下に減衰するとした場合、 $\alpha \leq 0.5$  となる。よって、ここでは、 $\alpha=0.5$  に設定した。また、 $\alpha=0.5$  のとき、度数が収束値の 90% に到達するには、同じ位置を約 0.7s 注視し続けていることになる。一方、眼球運動の特性として、視線の急激な変化 (サッカード) の後には約 150 ~ 400ms の停留時間があり、この間に視線の周辺の詳しい情報を得ている [57]。したがっ

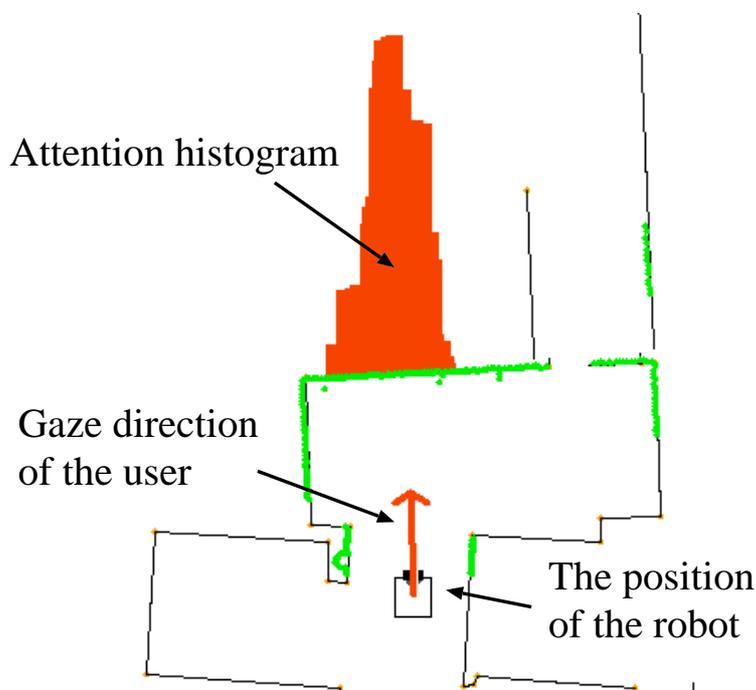


図 3.48 注視量ヒストグラム

て、0.7s 経過時にはサッカード後の停留時間を経過しており、その位置に対する注視が開始されているといえる。

視線を用いたインタフェースの観点から考えると、視線で何かしらの操作をすることは、視線に視覚情報の取得と選択の 2 種類の働きを持たせることになる [58][59]。したがって、どのようにして両者を区別するかが難しい問題となる。この問題は、触れたものが片端から金に変わってしまったギリシャ神話の Midas 王になぞらえて、Midas Touch Problem と呼ばれている。Midas Touch Problem を回避する方法としては、一定時間以上領域を見たときに初めて選択される手法、選択に瞬きを利用する手法、マウスやボタンなど他のデバイスを併用する手法などがある。ここで、注視量ヒストグラムによって推定された注意をロボットの操作に用いる場合、一定時間以上領域を見たときに初めて選択される手法を取ることになる。

図 3.48 に、注視量ヒストグラムの一例を示す。四角は地図中におけるロボットの位置を、矢印はユーザの視線方向を表している。注視量ヒストグラムは、地図の線分上の 5cm 間隔の各位置から、鉛直方向に 5cm 間隔で設定された 3 次元空間中の位置に対して度数を与えることにする。なお、地図の線分上の各位置において、その鉛直方向内の最大度数を抽出することにより、3 次元位置での度数の情報を 2 次元の地図上に表している。

### 3.5. ユーザの注意推定の検証

前節の注視量ヒストグラムを用いたユーザの注意推定について検証実験を行った。ここでは、ユーザはロボットに乗り、ジョイスティックによって操作して走行することにする。図 3.49 に、実験環境内におけるスタート、ゴール、壁に貼られているポスターの位置、および走行経路を示している。ユーザとして被験者 3 人 (A,B,C: 本研究に関係していない学生、すべて男子) に対して、スタートからゴールまでの大まかなルートを指定し、その中で以下の 2 通りの条件で走行してもらった。

(1) スタートからゴールまでの途中に、壁に貼られているポスターに近付いて、それに注目した後にゴールへ向かうように走行してもらう。

(2) 何かに対して注目するという指示を特に与えず、スタートからゴールへ向かって走行してもらう。

これら (1)(2) の 2 通りの走行を 1 セットとし、一人につき 3 セットずつ実施してデータを取得した。

まず、走行 (1) : ユーザがポスターに注意を払っている場合の結果 (被験者 A の結果) 3 セットを示す。図 3.50, 3.54, 3.56 に、ポスターの座標範囲内における注視量ヒストグラムの最大度数 (収束値を 100% として換算) をプロットし、注意が推定された時間帯 (最大度数が一度 90% 以上になってから次に 10% 以下となるまでの時間帯) にフラグを立てた。なお、被験者が変わると顔の高さ方向の位置が変化するため、その都度、視線計測のために使用するカメラ 2 台の高さ方向に対する取り付け角度を変更する必要が生じた。そのため、カメラ 2 台の取り付

け角度とユーザの顔の高さ方向の位置を固定値とすることで、検出のための設定を簡略化できるよう、ポスターの座標範囲のうち高さ方向に余裕を持たせた。実際のポスターの大きさは縦 60cm × 横 110cm である。ここでは、5m 先の注視位置に対するカメラの取り付け精度  $\pm 5[\text{deg.}]$  の影響を考慮し、ポスターの上下に 50cm ずつの余裕を与えた。つまり、ポスターとして認識される領域は縦 160cm × 横 110cm とした。また、視線計測精度と自己位置推定精度より設定した視線方向の精度が  $\pm 5[\text{deg.}]$  であるため、注意を向ける対象として、5m 先において識別できる大きさ（約 90cm）であるという基準からポスターを選択している。

3 セットの試行におけるロボットの走行した軌跡と、フラグが立っている時間帯でのロボットの位置を図 3.51, 3.55, 3.57 に示す。これらより、ロボットがポスターに近付いていく段階で、ポスターに対する注視量が高くなり、ユーザの注意が検出されていることがわかる。また、1 回目の試行において計測された 3 次元の注視位置の変化を図 3.52 に、ロボットの走行位置・姿勢を図 3.53 に示す。図 3.52 において、ポスターの座標範囲は  $x=-365\text{cm}$ ,  $y=50 \sim 160\text{cm}$ ,  $z=70 \sim 230\text{cm}$  である。ロボットがポスターに近い位置（図 3.53 における  $x=-500\text{cm}$ ,  $y=100\text{cm}$  付近）に来たときに、図 3.52 の注視位置の変化の幅が小さく、ポスターの座標範囲内にほぼ収まっていることがわかる。そして、図 3.52 の  $y$  が大きく変化した後、つまり、注視位置がポスターの座標範囲外に出た後、図 3.53 の angle が変化しており、ロボットがポスターから離れるように動き出したことがわかる。

また、走行 (1) における被験者 B の一結果と被験者 C の一結果として、図 3.58 (a)(b) にロボットの走行した軌跡とフラグが立っている時間帯の位置を示す。いずれも、ロボットがポスターに近付いた段階で、ポスターに対する注視量が高くなったためフラグが立ち、ユーザの注意が検出されていることがわかる。この傾向は走行 (1) のいずれの試行にも表れた。

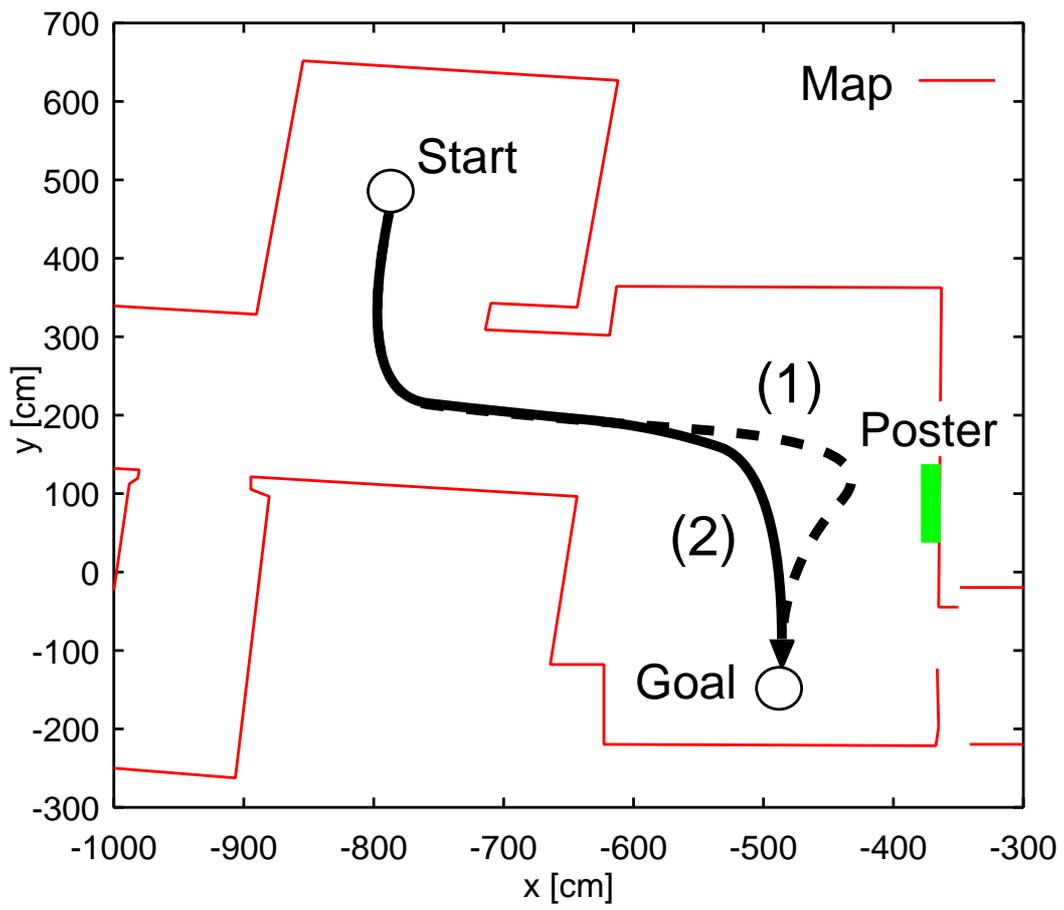


図 3.49 ロボットの走行経路

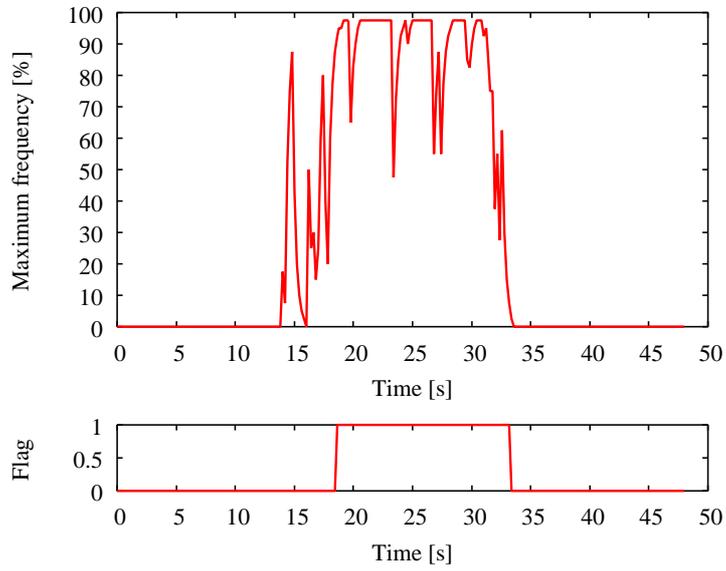


図 3.50 推定注視量 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1回目)

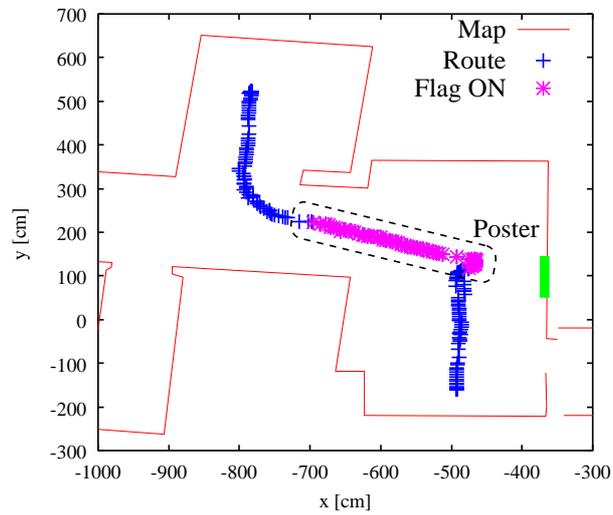


図 3.51 走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1回目)

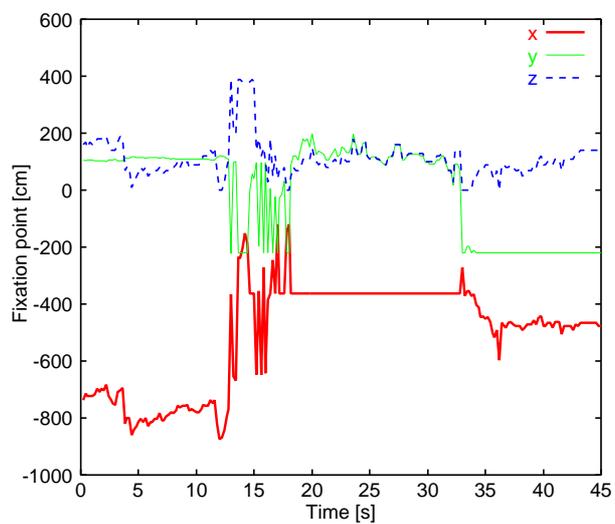


図 3.52 注視位置 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1 回目)

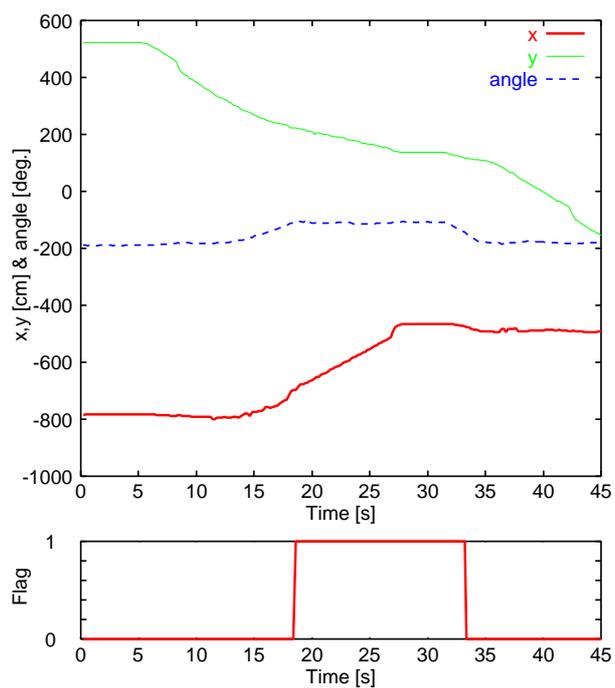


図 3.53 走行位置 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 1 回目)

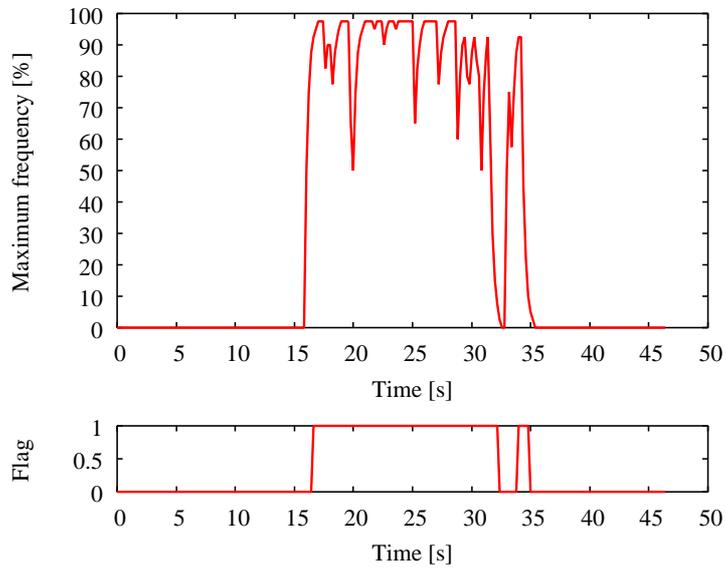


図 3.54 推定注視量 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 2 回目)

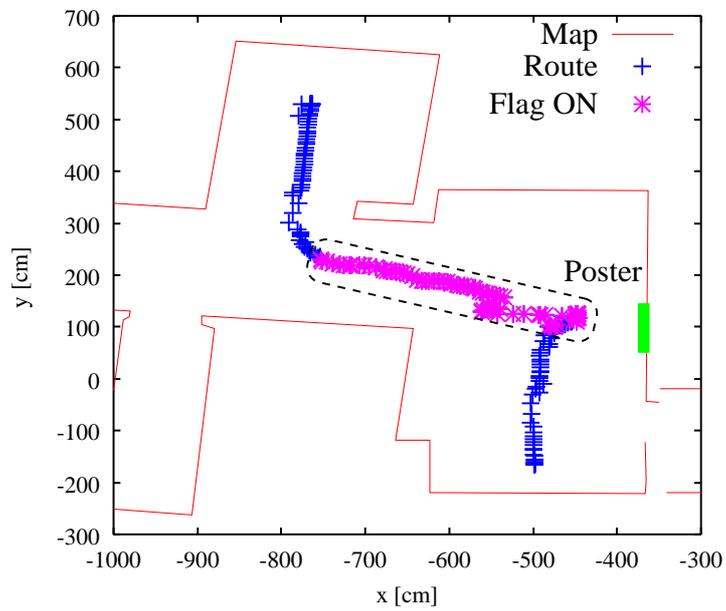


図 3.55 走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 2 回目)

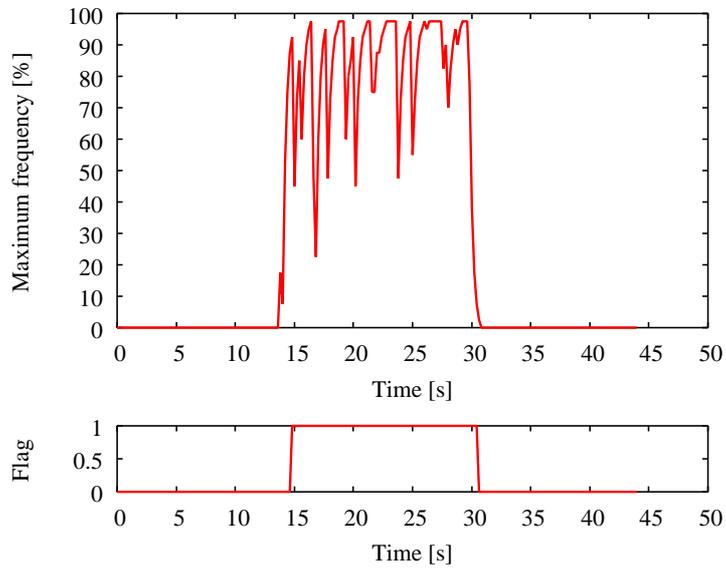


図 3.56 推定注視量 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 3 回目)

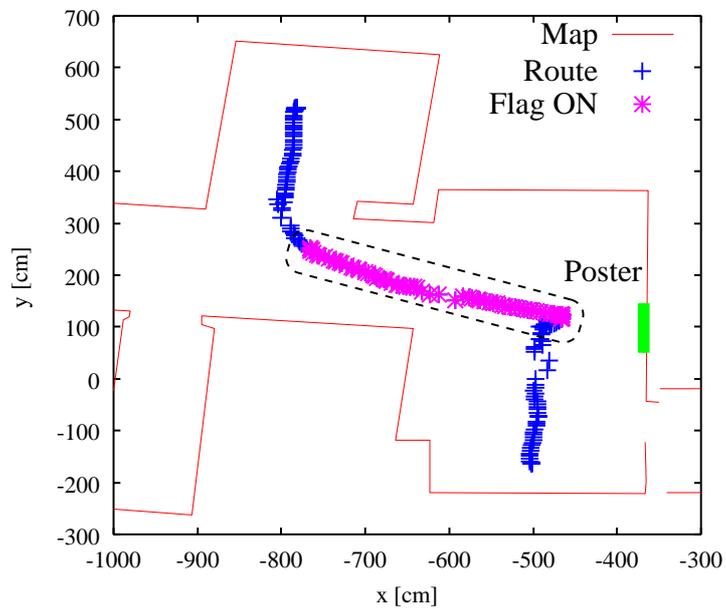
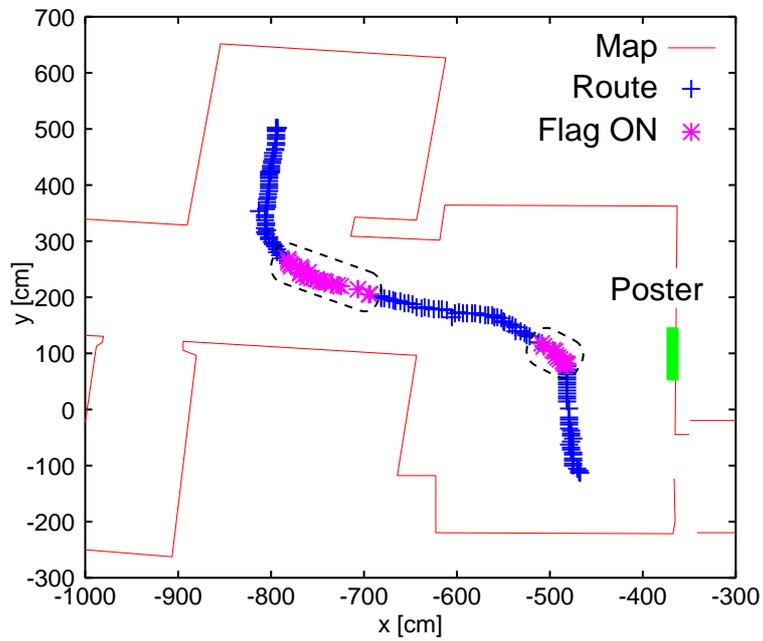
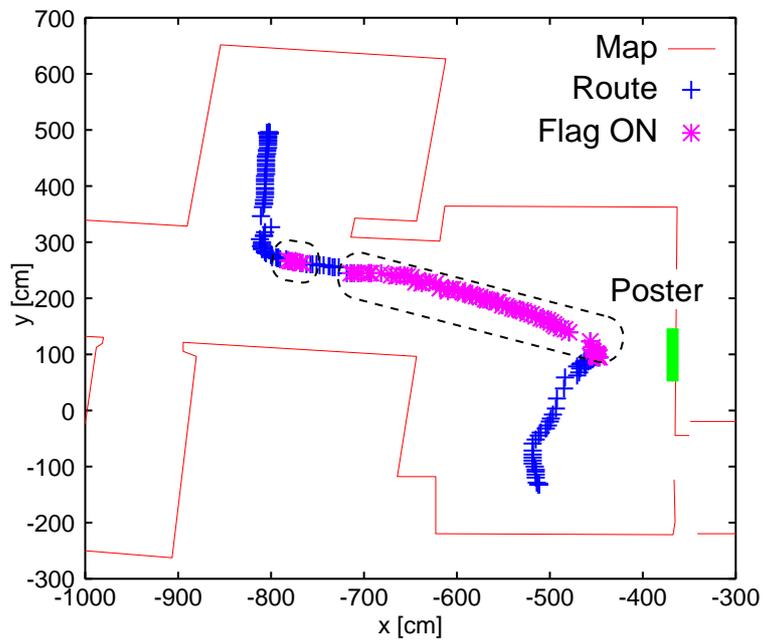


図 3.57 走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 A 3 回目)



(a) 被験者 B



(b) 被験者 C

図 3.58 走行の軌跡 (ポスターを注視している場合: 被験者 B, C)

次に、走行(2)：ユーザが特にポスターに対して注意を払っていない場合の結果(被験者 A の結果) 3 セットを示す。図 3.59, 3.63, 3.65 に、ポスターの座標範囲内における注視量ヒストグラムの最大度数(収束値を 100%として換算)をプロットし、注意が推定された時間帯にフラグを立てた。このときのロボットの走行した軌跡と、フラグが立っている時間帯でのロボットの位置を図 3.60, 3.64, 3.66 に示す。ユーザは特にポスターに対して注意を払っていないにもかかわらず、注意が推定されている時間帯が存在していることがわかる。これは、ポスターがロボットの進行方向に存在するために、ポスターに対する注視量が高く検出されたためと考えられる。また、1 回目の試行において計測された 3 次元の注視位置の変化を図 3.61 に、ロボットの走行位置・姿勢を図 3.62 に示す。ロボットがポスターに近い位置(図 3.62 における  $x=-500\text{cm}$ ,  $y=100\text{cm}$  付近)に来たときには、図 3.61 の注視位置はポスターの座標範囲の外であることがわかる。

走行(2)における被験者 B の一結果：図 3.67(a)においても同じ傾向が見られる。また、走行(2)における被験者 C の一結果：図 3.67(b)においては、ロボットが曲がり角を曲がる際に回転方向にポスターが存在するために、ポスターに対する注視量が高く検出されたと考えられる。しかし、いずれの結果もポスターの前を通過するときには、ユーザの注意が検出されていないことがわかる。この傾向は走行(2)のいずれの試行にも表れた。これらの実験結果より、以下のことが分かった。

- ユーザがある対象に注意を払っている場合、ロボットがその対象に近付いた段階でそれに対する注視量が高く検出され、その対象に対するユーザの注意を推定することができる。
- ユーザが特に何かに対して注意を払っていない場合でも、ロボットの進行方向や回転方向に存在するものに対して注視量が高く検出されてしまうことがあるが、その対象の近くを通過するときには、ユーザの注意が推定されていない。よって、ロボットの移動方向および位置と、対象の位置との関係を利用することで、その対象に対するユーザの注意の有無を推定することができる。

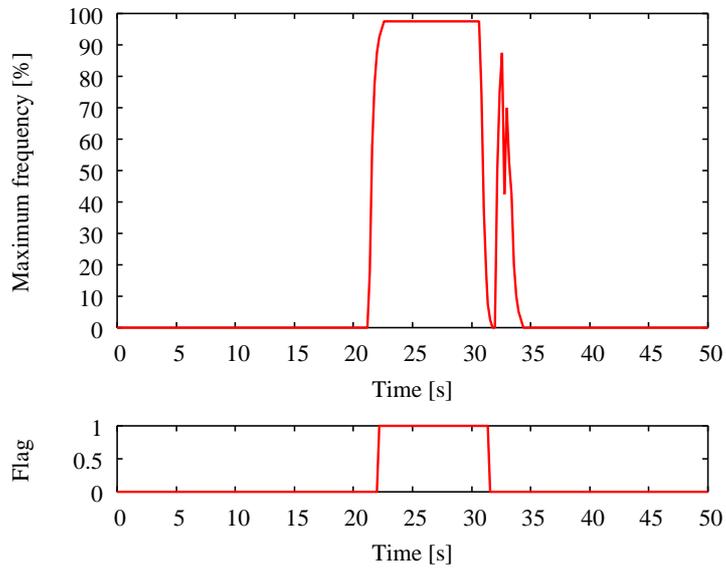


図 3.59 推定注視量 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1 回目)

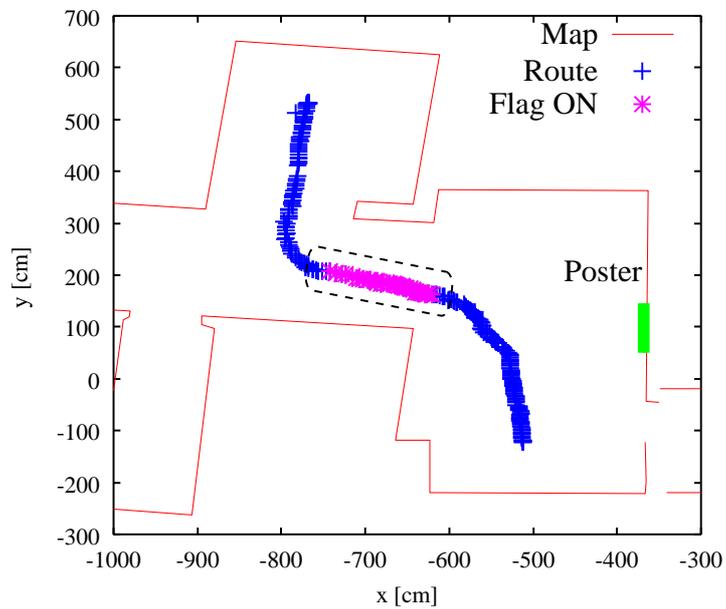


図 3.60 走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1 回目)

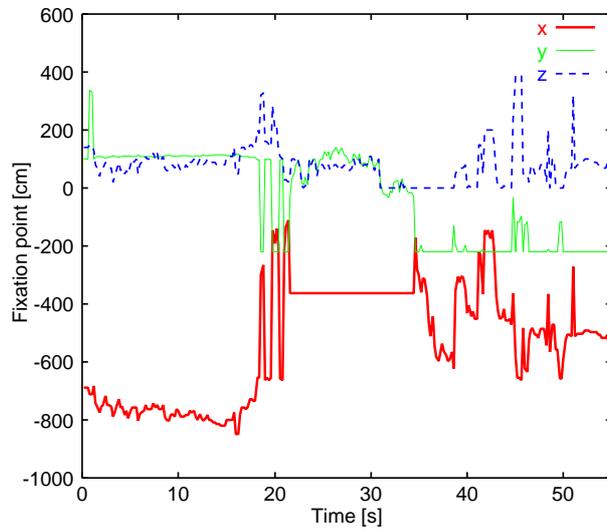


図 3.61 注視位置 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1回目)

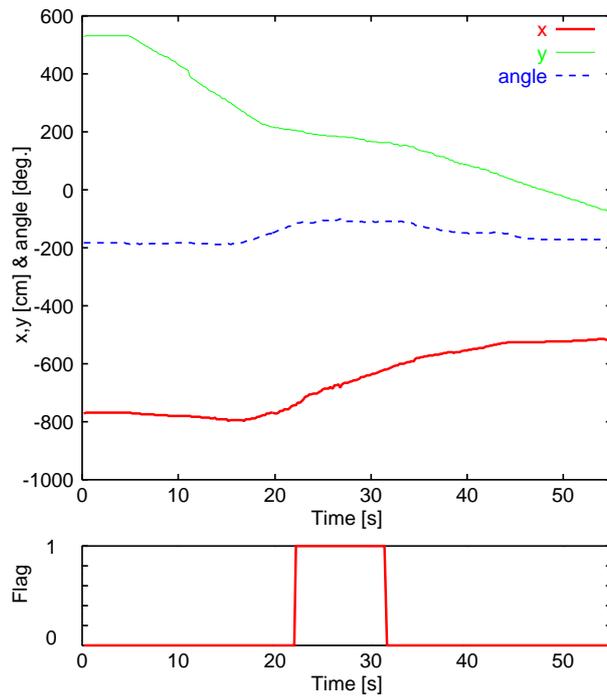


図 3.62 走行位置 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 1回目)

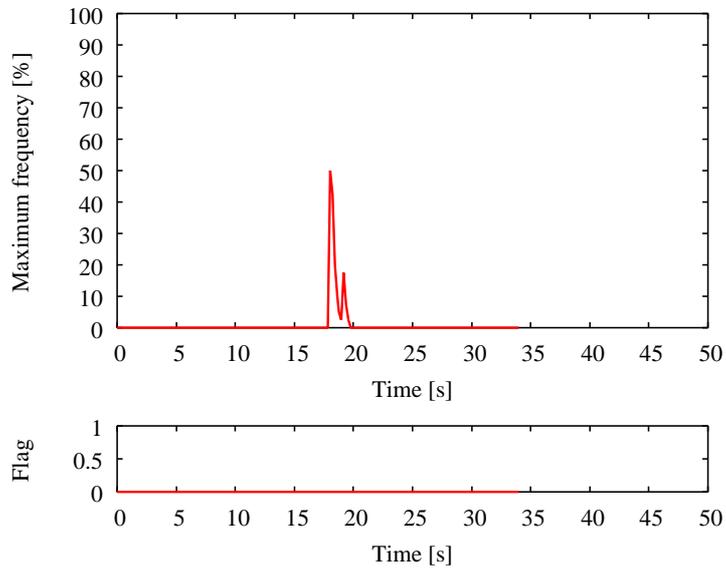


図 3.63 推定注視量 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 2 回目)

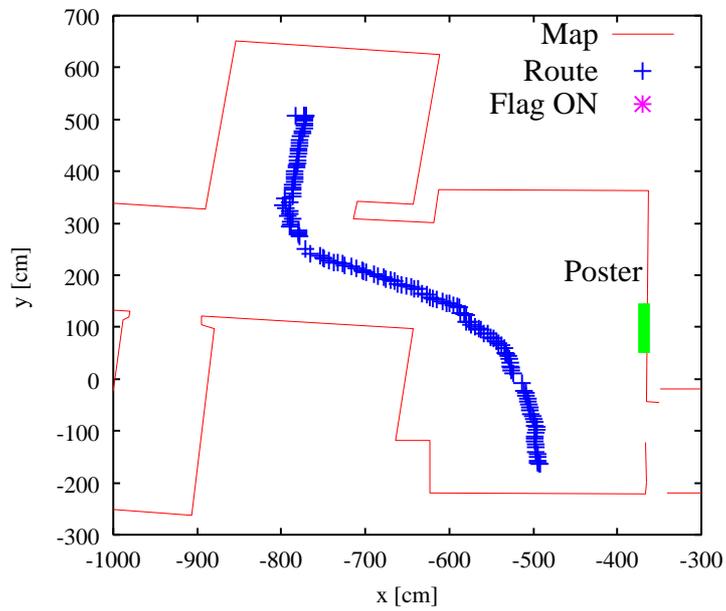


図 3.64 走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 2 回目)

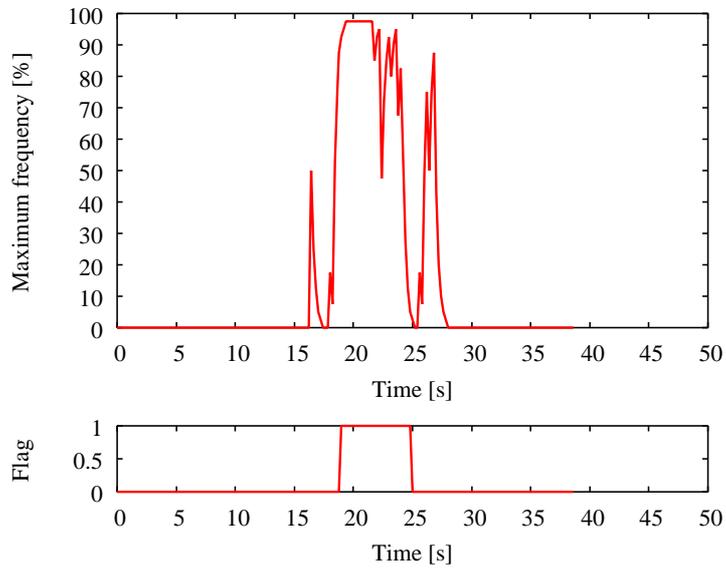


図 3.65 推定注視量 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 3 回目)

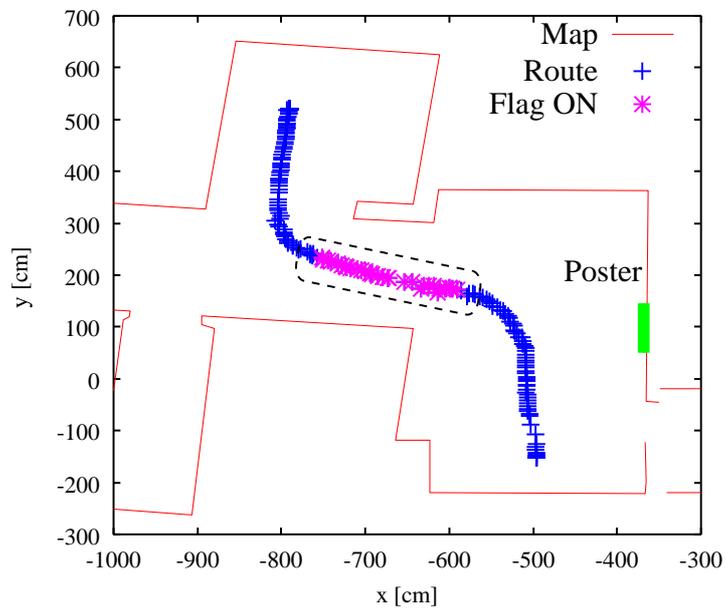
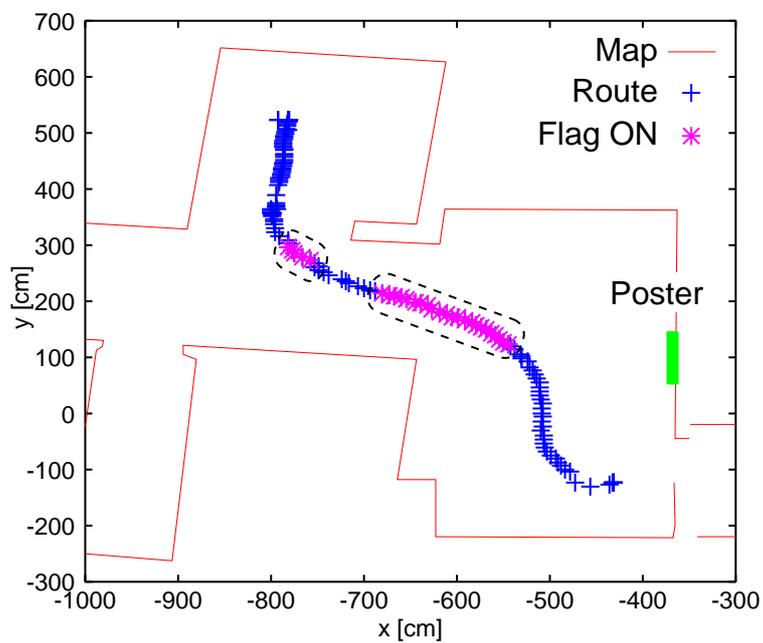
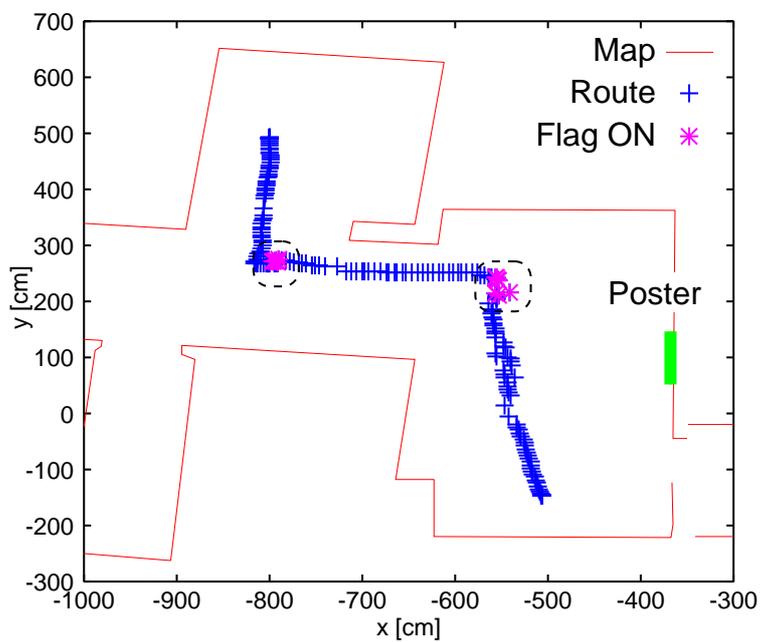


図 3.66 走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 A 3 回目)



(a) 被験者 B



(b) 被験者 C

図 3.67 走行の軌跡 (ポスターを注視していない場合: 被験者 B, C)

## 3.6. ユーザの注意推定を用いた走行制御

### 3.6.1 注意対象が1つの場合

検証実験の結果に基づいて、ユーザの注意推定を用いた走行支援システムを構築した。ここでは、ロボットが定められた経路を自律走行している途中に、搭乗しているユーザの注意を検出した場合、走行経路を変更し、注意の対象に近付き停止するという支援を行う。図 3.68 のように、検証実験と同じ環境内にノードを設定し、スタート ノード1 ノード2 ゴールの順番にロボットは自律走行を行う。したがって、ユーザは手動による操作を全く行わない。しかし、ノード2 からゴールへの移動時、つまり、ロボットの進行方向がポスターの方向と異なり、かつ、ポスターに近い位置を走行しているときに、注視量に基づいてポスターに対する注意が推定された(最大度数が一度収束値の90%以上になった)場合は、ロボットはユーザが自律走行の経路に沿った移動ではなく、ポスターをよく見たいという意図を持っていると推定し、ノード3 への移動を行う。ノード3 に到達したら、ユーザが注視をやめるまでその場で停止する。そして、ユーザがポスターへ注意を向けるのをやめたことが推定された(度数が収束値の10%以下になった)場合、再びゴールに向かって移動を行うようにした。なお、ノード3 への移動中、ユーザがポスターへ注意を向けるのをやめた場合、ノード3 に到達していなくてもゴールに向かうようにした。

被験者3人(前述のA,B,C)に対して、検証実験と同様、(1) 走行途中にポスターに注目してもらう場合と、(2) 何かに注目するという指示を特に与えていない場合の2通りの自律走行をそれぞれ3セットずつ実施した。なお、被験者には「ポスターに注目した場合、ロボットは自律的にそれを検出し、ポスターに近づく動作を行う」という知識を与えることで、走行経路が途中で変更されることに対する不安を取り除いておく。図 3.69(a)(b) に、ポスターへの注視の有無による自律走行結果の一例として、被験者Aの場合のロボットの走行の軌跡と注意推定のフラグが立っている時間帯の位置を示す。図 3.69(a) では、ノード2 を通過後にポスターへの注意が検出され、ノード3 への走行ルートの変更が行われたことを示している。このときの自律走行の様子を図 3.70 の左列に示し、検出されたユーザの

視線方向，ロボットの自己位置，および注視量ヒストグラムを図 3.70 の右列に示す．図 3.69(a) 内の位置 (A) ~ (D) が図 3.70 の (A) ~ (D) に対応している．一方，図 3.69(b) では，ノード 1 からノード 2 の間で，フラグが立っている時間帯があるものの，これはロボットの進行方向にポスターが存在するために検出されたものであり走行には影響せず，ノード 2 を通過後には注意が検出されなかったため，ノード 3 への走行経路の変更は行われず，そのままゴールまで走行したことを示している．また，(1) の走行で計測された 3 次元の注視位置の変化を図 3.71，ロボットの走行位置・姿勢を図 3.72 に，そして，(2) の走行で計測された 3 次元の注視位置の変化を図 3.73，ロボットの走行位置・姿勢を図 3.74 に示す．(1) の走行では，図 3.71 の注視位置がポスターの座標範囲内にあるときにロボットがポスターに近い位置（図 3.72 における  $x=-500\text{cm}$ ， $y=100\text{cm}$  付近）へ移動し，注視位置がポスターの座標範囲から外れると，ロボットが動き出したことがわかる．また，(2) の走行では，ロボットがポスターに近い位置（図 3.74 における  $x=-500\text{cm}$ ， $y=100\text{cm}$  付近）に来たときに，図 3.73 の注視位置はポスターの座標範囲から外れているため，ポスターに近い位置への移動が行われなかったことがわかる．

他の被験者 B，C の試行においても同様の結果が得られた．図 3.75(a)(b)，および図 3.76(a)(b) にロボットの走行の軌跡と注意推定のフラグが立っている時間帯の位置を示す．

以上の結果より，ユーザはポスターをよく見たいと思って注目することで，本システムがその意図を推定し，それに沿った走行制御を行えることを示すことができた．

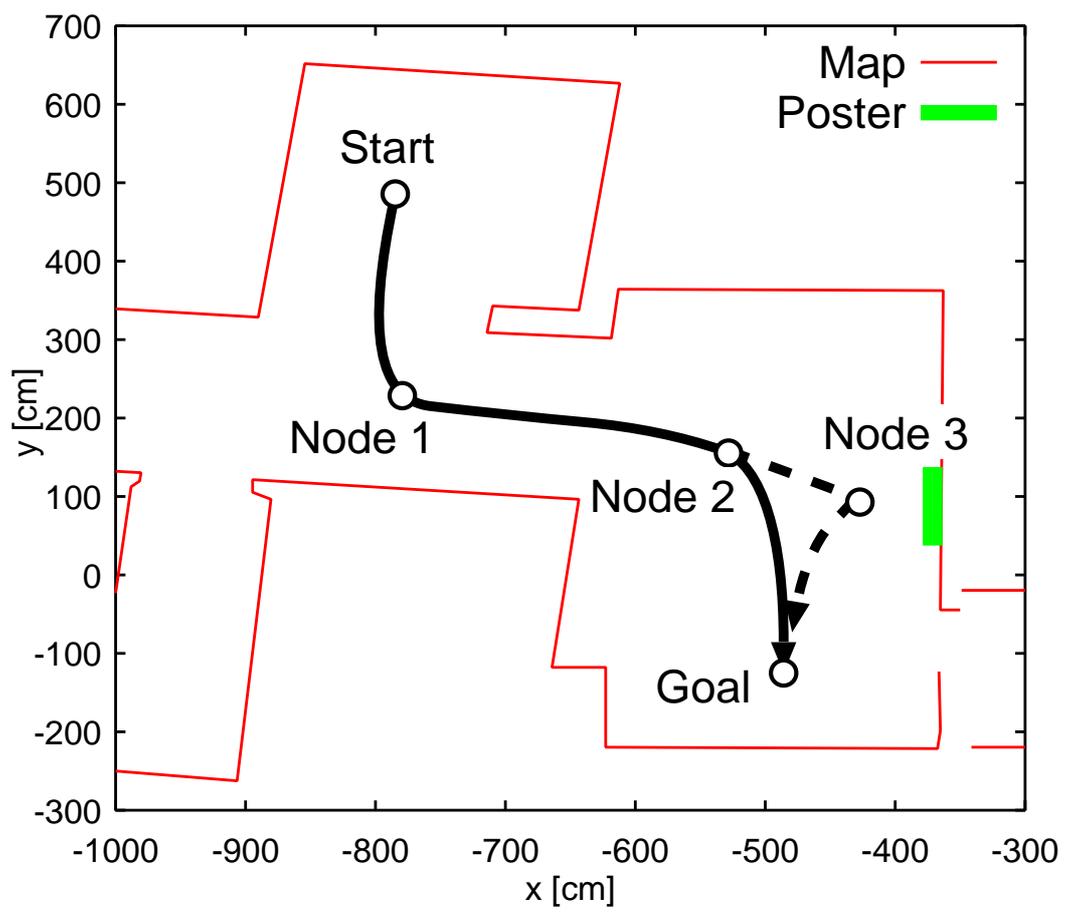
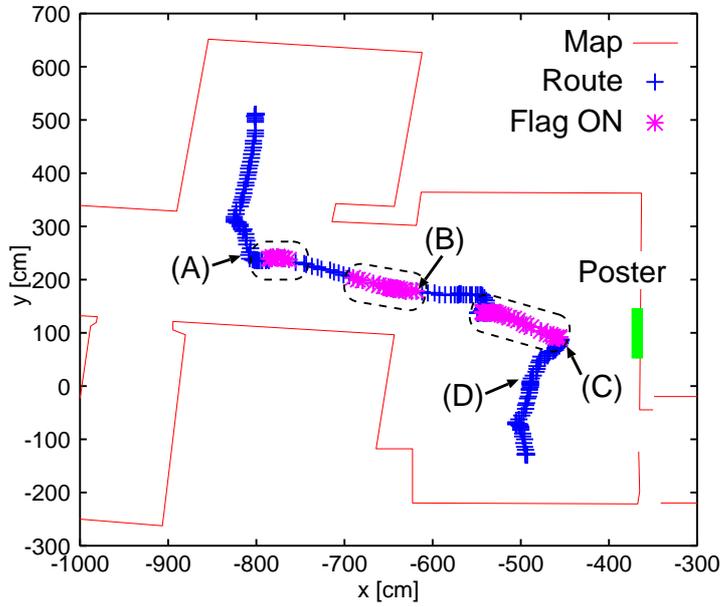
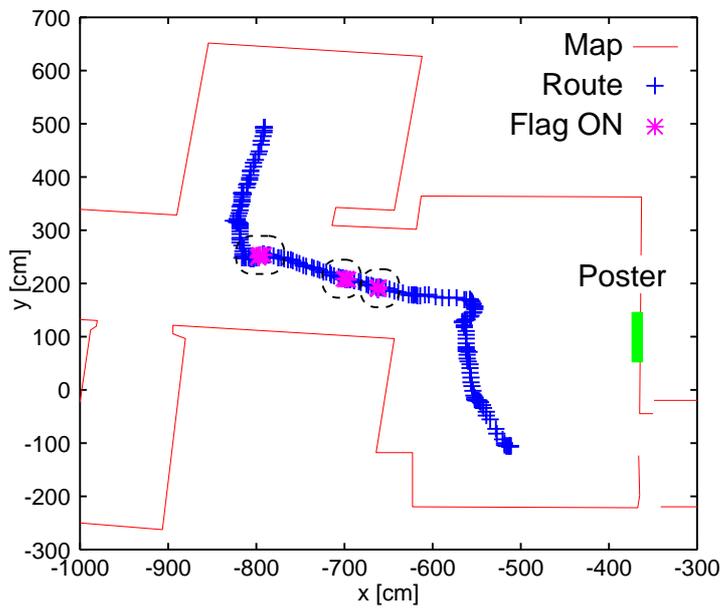


図 3.68 走行経路上のノード設定

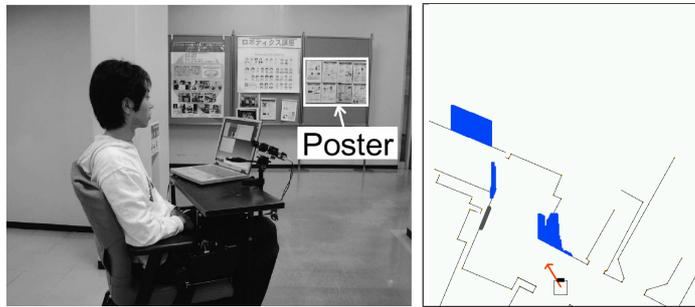


(a) ポスターに注意がある場合

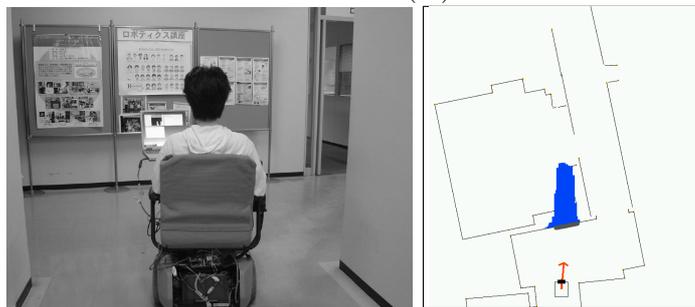


(b) ポスターに注意がない場合

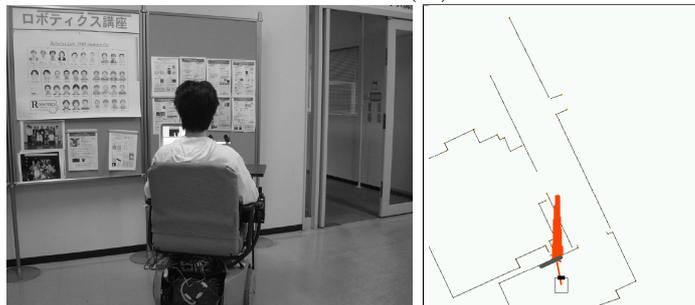
図 3.69 注意の有無による自律走行 (被験者 A)



Position (A)



Position (B)



Position (C)



Position (D)

図 3.70 ポスターに注意がある場合の自律走行の様子

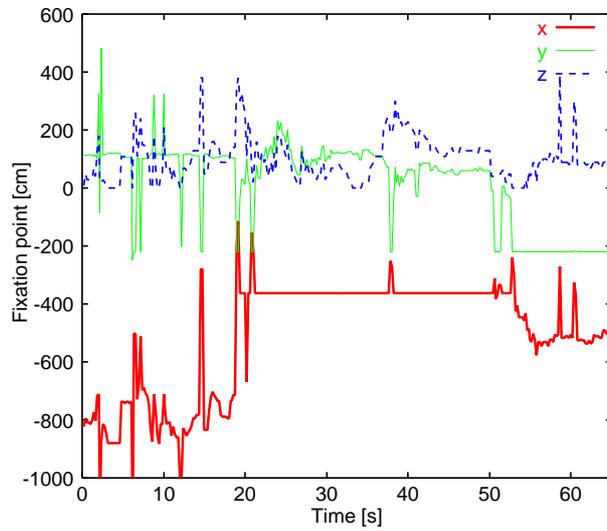


図 3.71 注視位置 (ポスターに注意がある場合: 被験者 A)

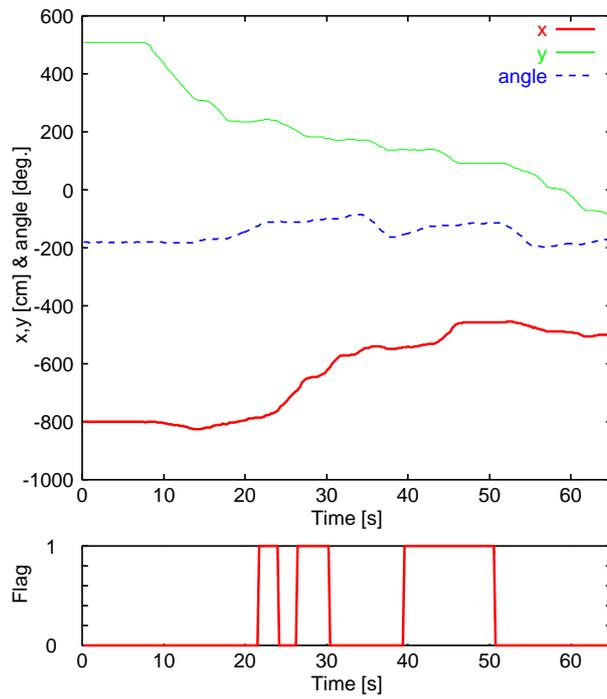


図 3.72 走行位置 (ポスターに注意がある場合: 被験者 A)

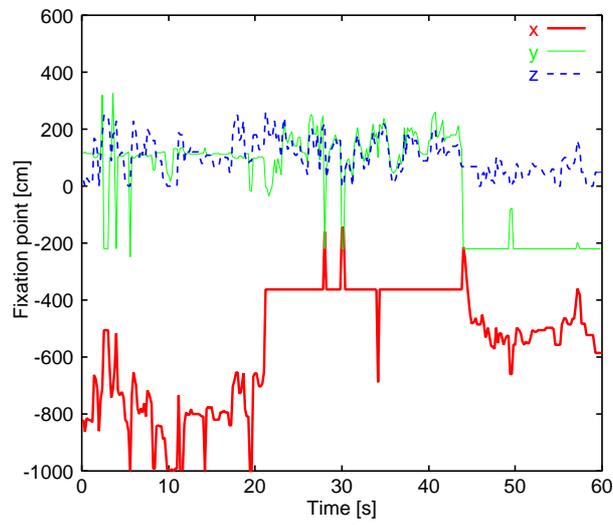


図 3.73 注視位置 (ポスターに注意がない場合: 被験者 A)

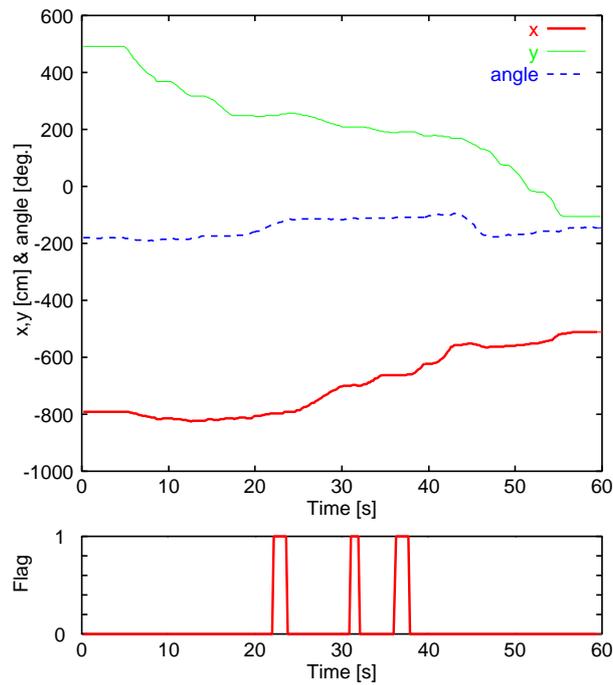
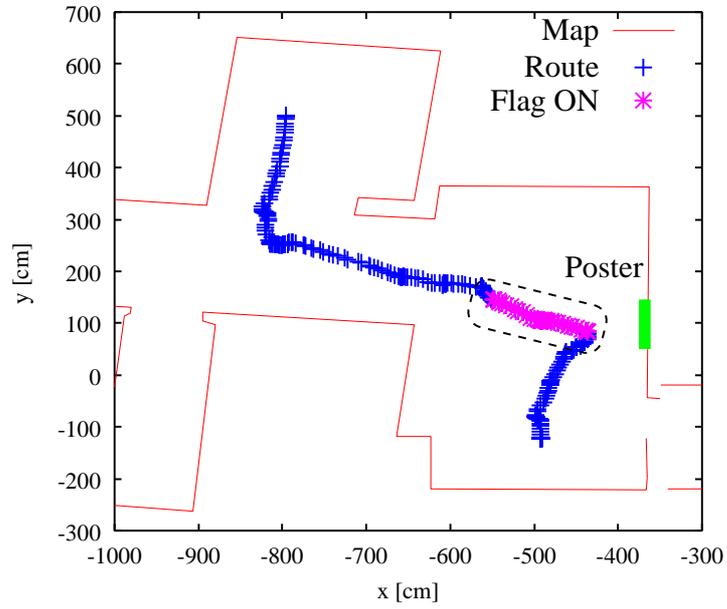
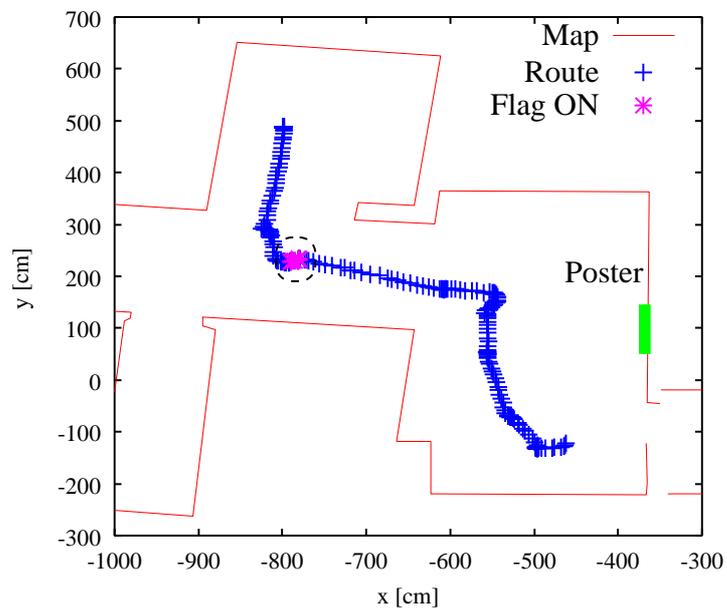


図 3.74 走行位置 (ポスターに注意がない場合: 被験者 A)

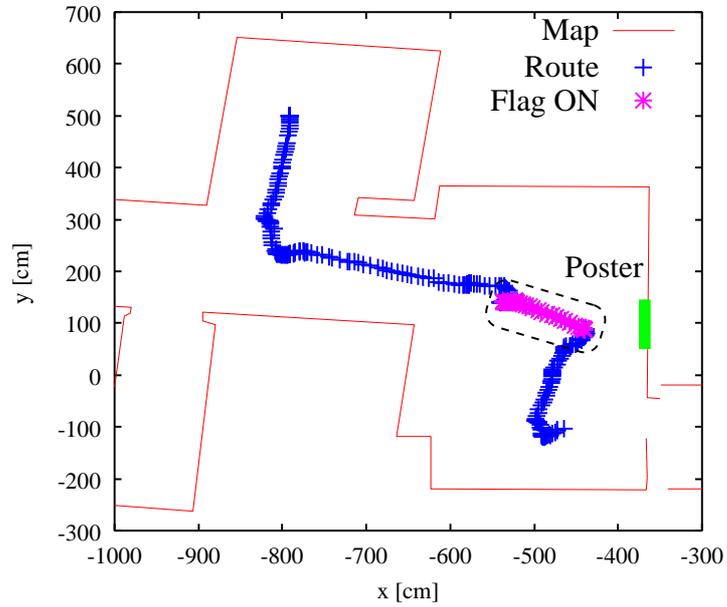


(a) ポスターに注意がある場合

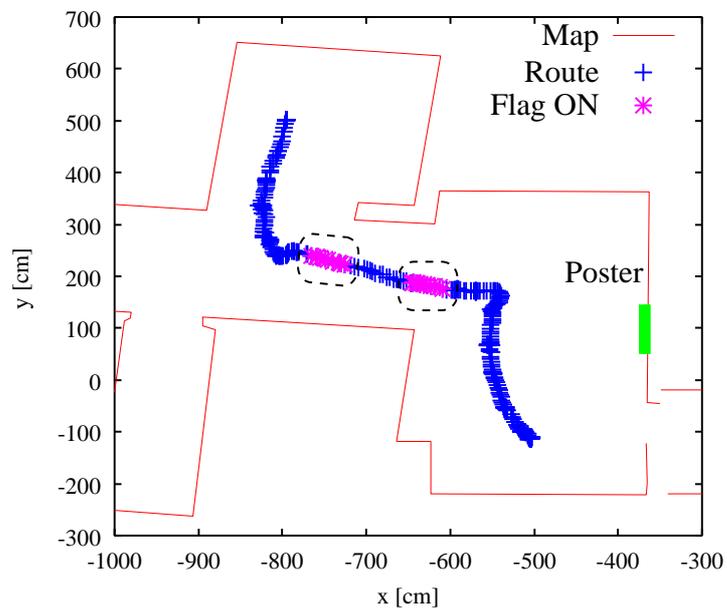


(b) ポスターに注意がない場合

図 3.75 注意の有無による自律走行 (被験者 B)



(a) ポスターに注意がある場合



(b) ポスターに注意がない場合

図 3.76 注意の有無による自律走行 (被験者 C)

### 3.6.2 注意対象が複数存在する場合

より一般に近い環境で本システムの有効性を確認するため、注意対象を複数設定した環境において自律走行実験を行った。実験環境内に図 3.77 のようにノードを設定して、ロボットはスタート ノード1 ノード2 ノード3 ゴールの順番に自律走行を行う。このとき、ノード1 からノード2 へ走行する間、2つのメールボックスのいずれかに、また、ノード2 からノード3 へ走行する間、2つの掲示板のいずれかにユーザが注意を払っていることが推定された場合、その対象を近くで見るために、対象の近くに設定されたノードに向けて走行経路を変更できるようにした。なお、ユーザが対象に注意を向けるのをやめた場合、既定の経路に向かって走行する。

ユーザとして被験者3人(D,E,F: 本研究に関係していない学生、すべて男子)に対して、自律走行実験を実施した。なお、被験者には、スタートからゴールまでの走行経路と、走行経路中に存在する4つの対象(2つのメールボックスと2つ掲示板)に注目した場合、ロボットは注意を推定し、その対象に近付いていくことを知識として与えておき、走行中に4つの中から注目する対象を任意に選択するように指示を与えた。それぞれの自律走行の軌跡を図 3.78, 3.80, 3.81 に示す。図 3.78 での自律走行の様子を図 3.79 の左列に示し、検出されたユーザの視線方向、ロボットの自己位置、および注視量ヒストグラムを図 3.79 の右列に示す。図 3.78 内の位置(A)~(D)が図 3.79 の(A)~(D)に対応している。走行実験後、被験者Dはメールボックス1のみに、被験者Eはメールボックス1と掲示板2に、被験者Fはメールボックス2と掲示板2に注目していたことを確認し、本システムの有効性を確認することができた。

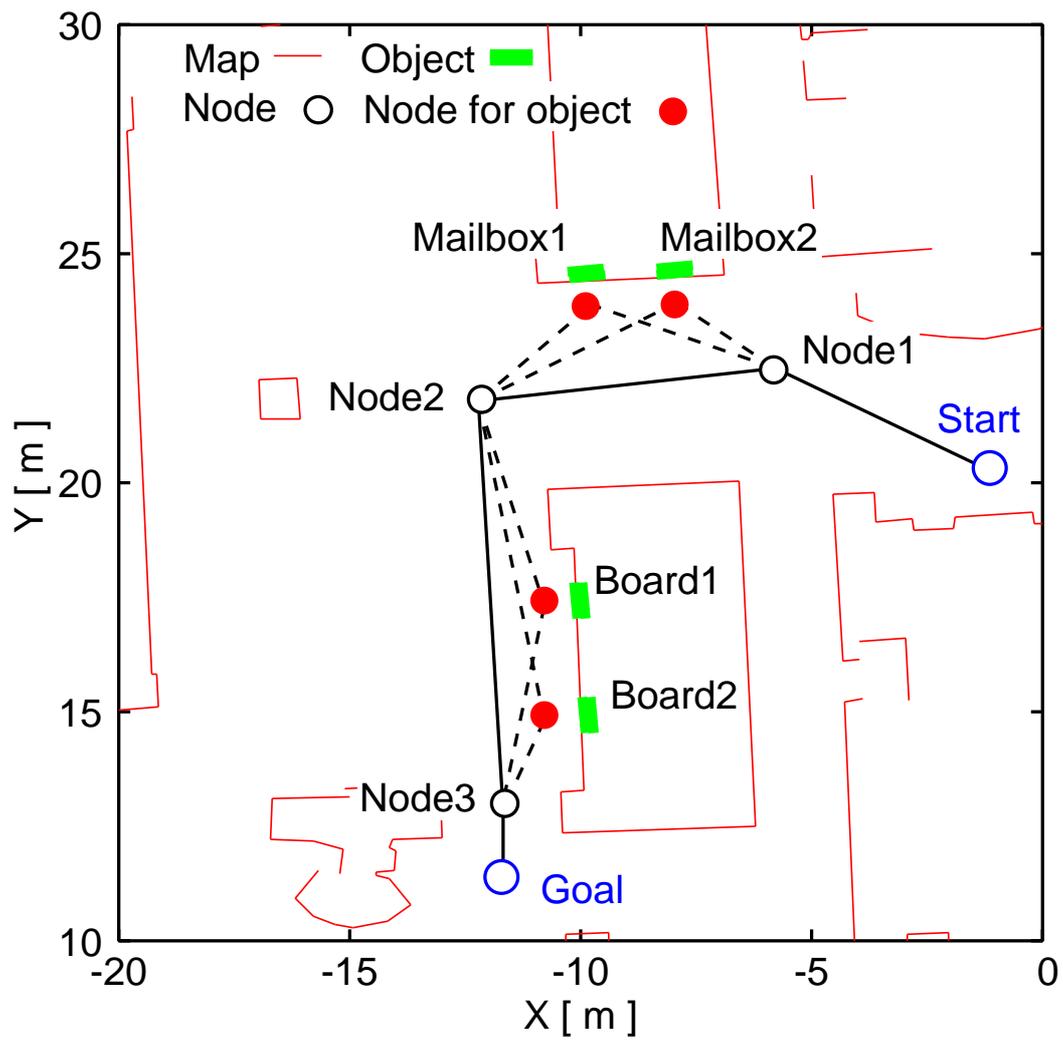


図 3.77 注意対象が複数存在する環境の自律走行経路

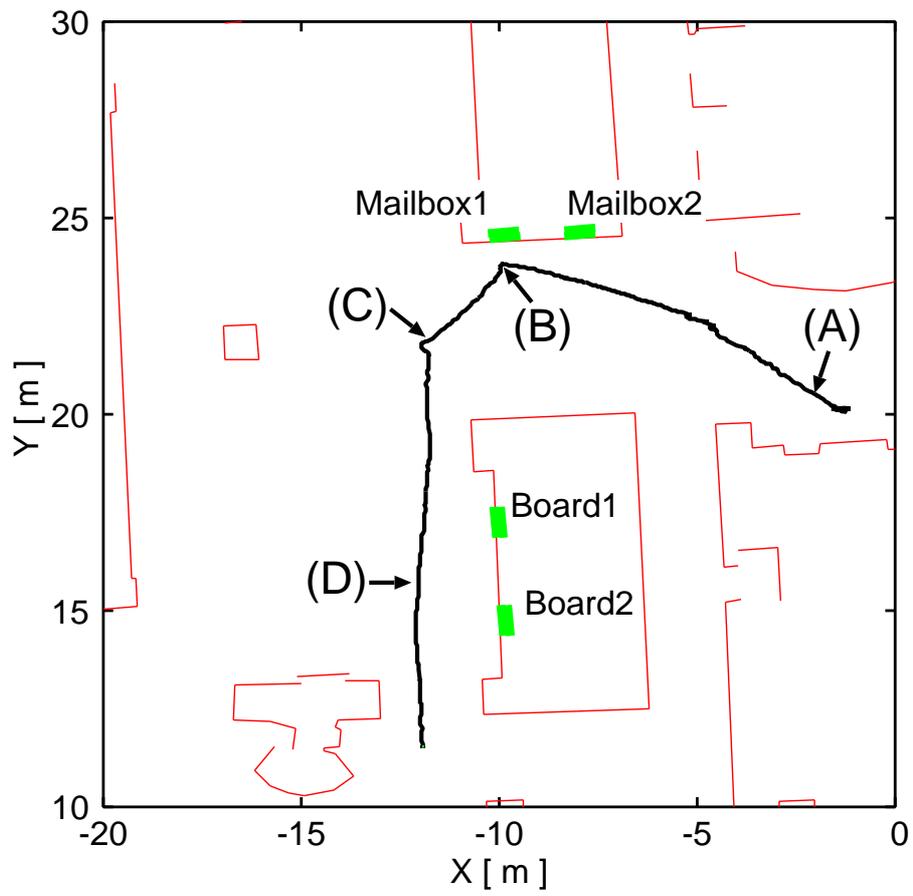
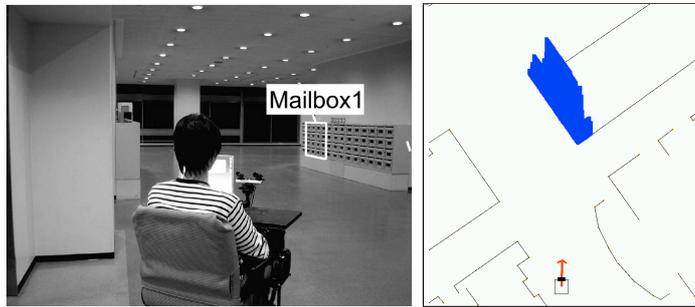


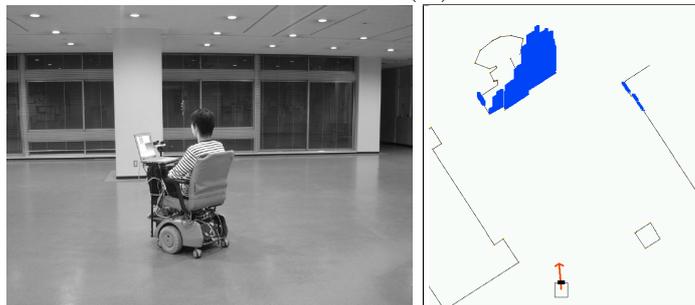
図 3.78 自律走行の結果 (被験者 D)



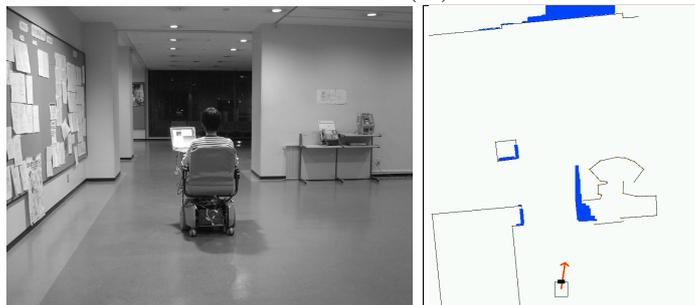
Position (A)



Position (B)



Position (C)



Position (D)

図 3.79 自律走行の様子

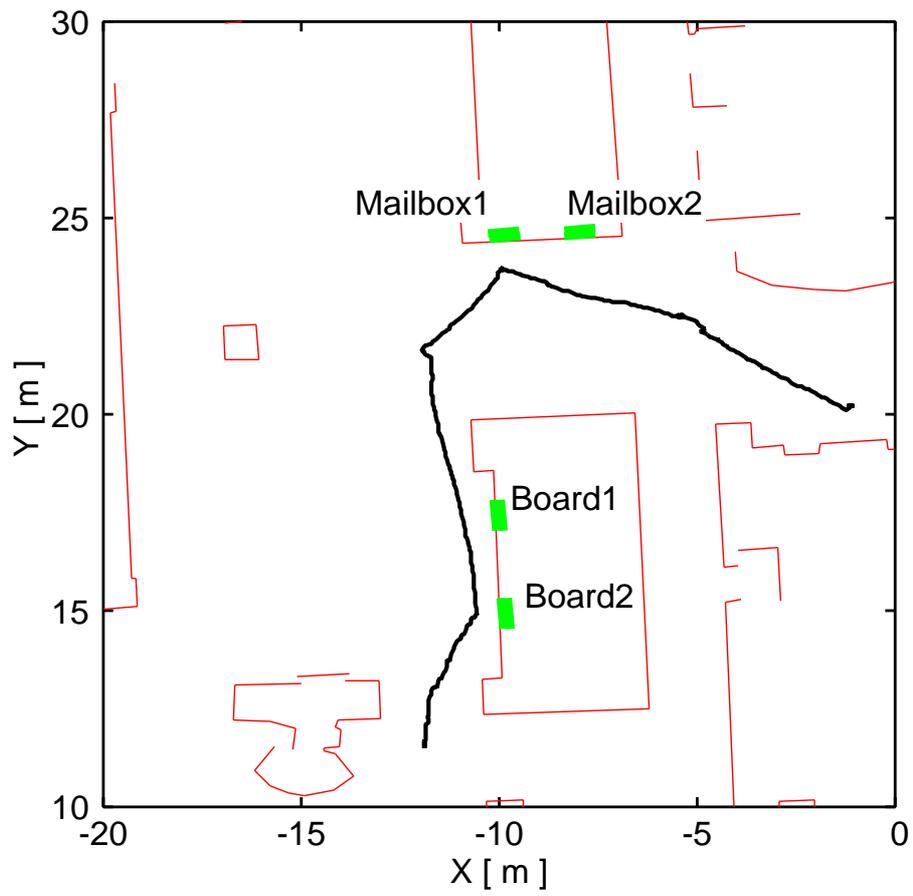


図 3.80 自律走行の結果 (被験者 E)

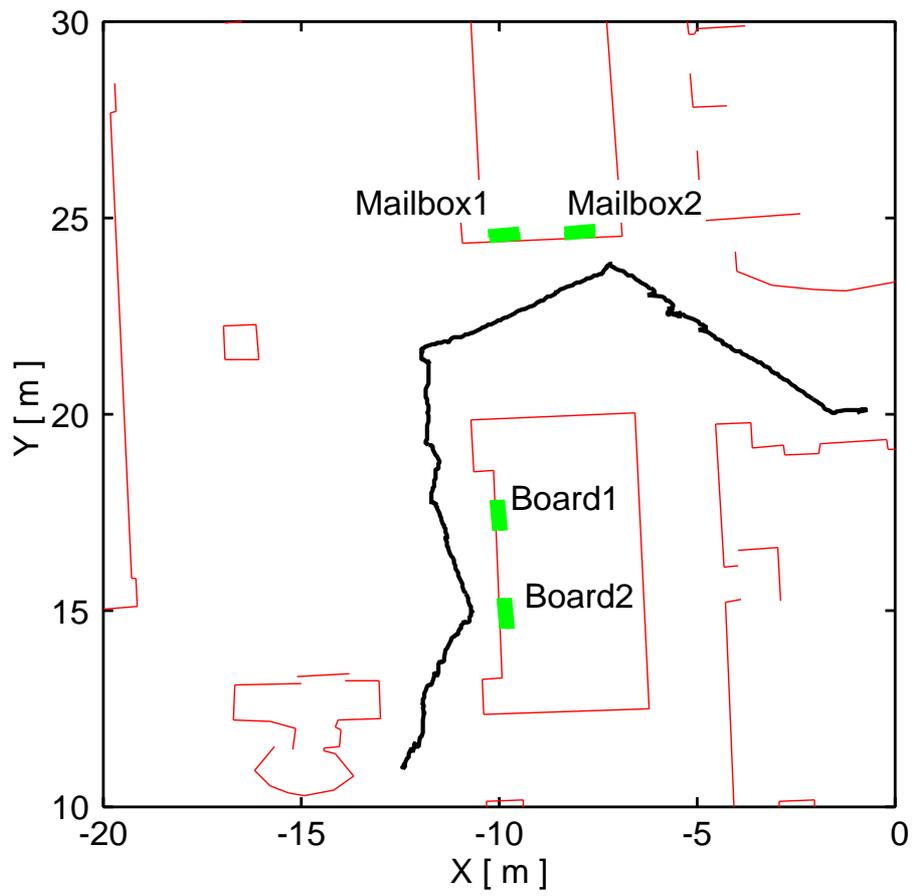


図 3.81 自律走行の結果 (被験者 F)

### 3.6.3 走行制御と注視量ヒストグラムの検証

注意推定による走行制御に用いられる注視量ヒストグラムをより詳細に示すために、注意対象を複数設定した環境において自律走行実験を行った結果を示す。ここでは、実験環境内に図 3.82 のようにノードを設定した。ゴールまでには2つの経路が存在する。ロボットは通常はスタート ノード1 ノード3 ノード4 ゴールの順番に自律走行を行う。しかし、ノード1に到達したあとに2つのメールボックスのいずれかに対して注意が推定された場合、メールボックスの近くに設定されたノードに向けて走行経路を変更する。なお、ユーザがメールボックスに注意を向けるのをやめた場合、ロボットはノード2を経由して、ゴールへ向かうように設定した。これにより、メールボックスに対する注意の推定結果が走行経路の変更に反映されるため、注意推定と行われた走行制御の関係がわかりやすくなる。

まず、ユーザがメールボックスに注意を向けていなかった場合の結果を示す。自律走行の様子を図 3.83 の左列に示し、検出されたユーザの視線方向、ロボットの自己位置、および注視量ヒストグラムを図 3.83 の右列に示す。このときの自律走行の軌跡を図 3.84 に示す。図 3.84 内の位置 (a) ~ (d) での自律走行の様子が図 3.83 の (a) ~ (d) に対応している。また、図 3.85 に、注視量ヒストグラムを等高線で表したものを示す。横軸はメールボックスの水平方向の位置を、縦軸に時間をとっている。“Mailbox1”と“Mailbox2”で指定された領域は、各メールボックスに対する注意を判定するための領域である。ヒストグラムの度数がいったん収束値の90%以上になり、10%以下に減衰するまで、その対象にユーザの注意があると推定する。等高線は点線が注視量ヒストグラムの収束値10%以上、細かい実線が50%以上、太い実線が90%以上を示している。この場合、ユーザがメールボックス1と2のいずれにも注意を払っていなかった。各判定領域においてヒストグラムの度数が収束値の90%以上になっていないことから、ロボットもユーザのメールボックスに対する注意を推定していないことがわかる。したがって、ノード1に到達したとき(図 3.83, 図 3.84 の (b) に相当)、ロボットはノード3への経路選択を行っていることが示している。

次に、ユーザがメールボックスの一つに注意を向けた場合の結果を示す。自律

走行の様子を図 3.86 の左列に示し，検出されたユーザの視線方向，ロボットの自己位置，および注視量ヒストグラムを図 3.86 の右列に示す．このときの自律走行の軌跡を図 3.87 に示す．図 3.87 内の位置 (e) ~ (h) での自律走行の様子が図 3.86 の (e) ~ (h) に対応している．また，図 3.88 に，注視量ヒストグラムを等高線で表したものを示す．この場合，ユーザがメールボックス 1 に対して注意を向けていた．ノード 1 に到達したとき（図 3.86，図 3.87 の (f) に相当）からそれ以降，メールボックス 2 の判定領域においてヒストグラムの度数が収束値の 90%以上になっておらず，メールボックス 1 の判定領域においてヒストグラムの度数が収束値の 90%以上になっている．この結果を受けて，ロボットはメールボックス 1 の前に設定されたノード（図 3.86，図 3.87 の (g) に相当）への経路選択を行っていることから，複数の注意対象の識別ができていることがわかる．そして，ユーザがメールボックス 1 に対して注意を向けるのをやめたとき，ノード 2（図 3.86，図 3.87 の (h) に相当）に向けた経路選択を行っていることが示されている．

以上の結果より，注意対象が複数設定された環境においても，本システムは，注視量ヒストグラムに基づき，ユーザが注目している対象を他の対象から識別し，ユーザの注意に沿った走行制御を行えることを示すことができた．

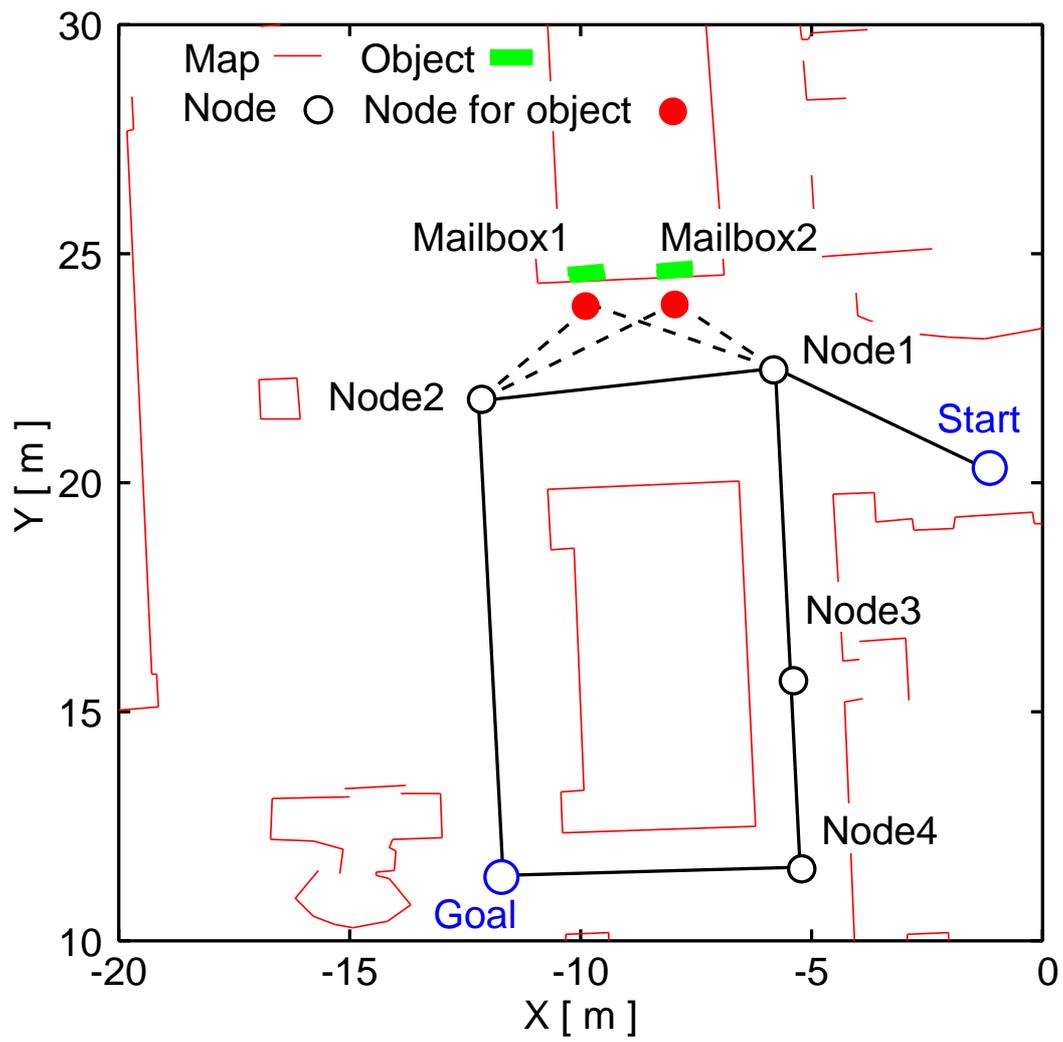
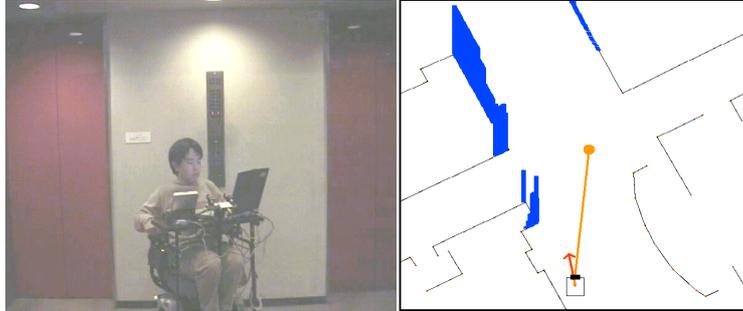
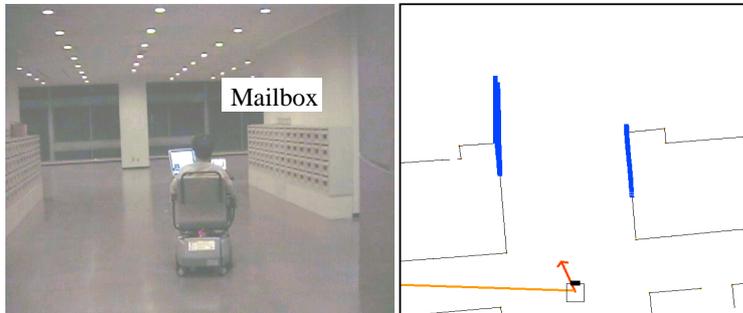


図 3.82 2 種類の自律走行経路

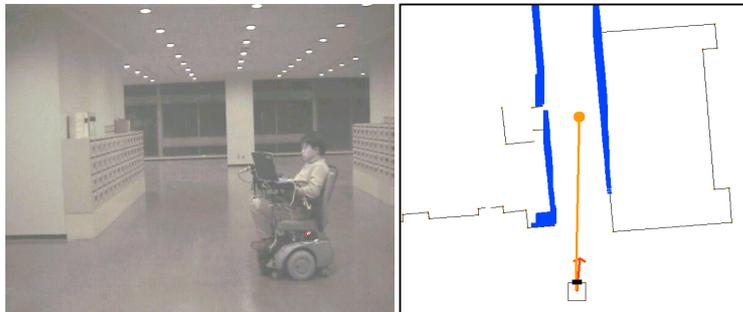
(a)



(b)



(c)



(d)



図 3.83 自律走行の様子 (メールボックスに注意がない場合)

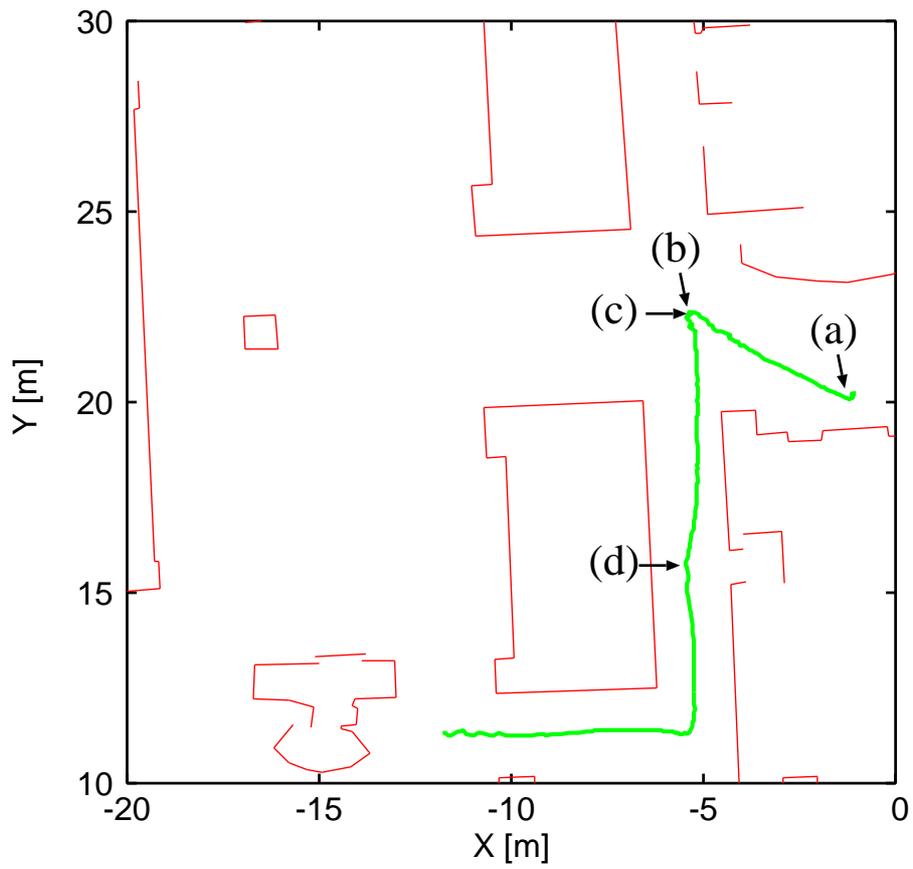


図 3.84 自律走行の軌跡（メールボックスに注意がない場合）

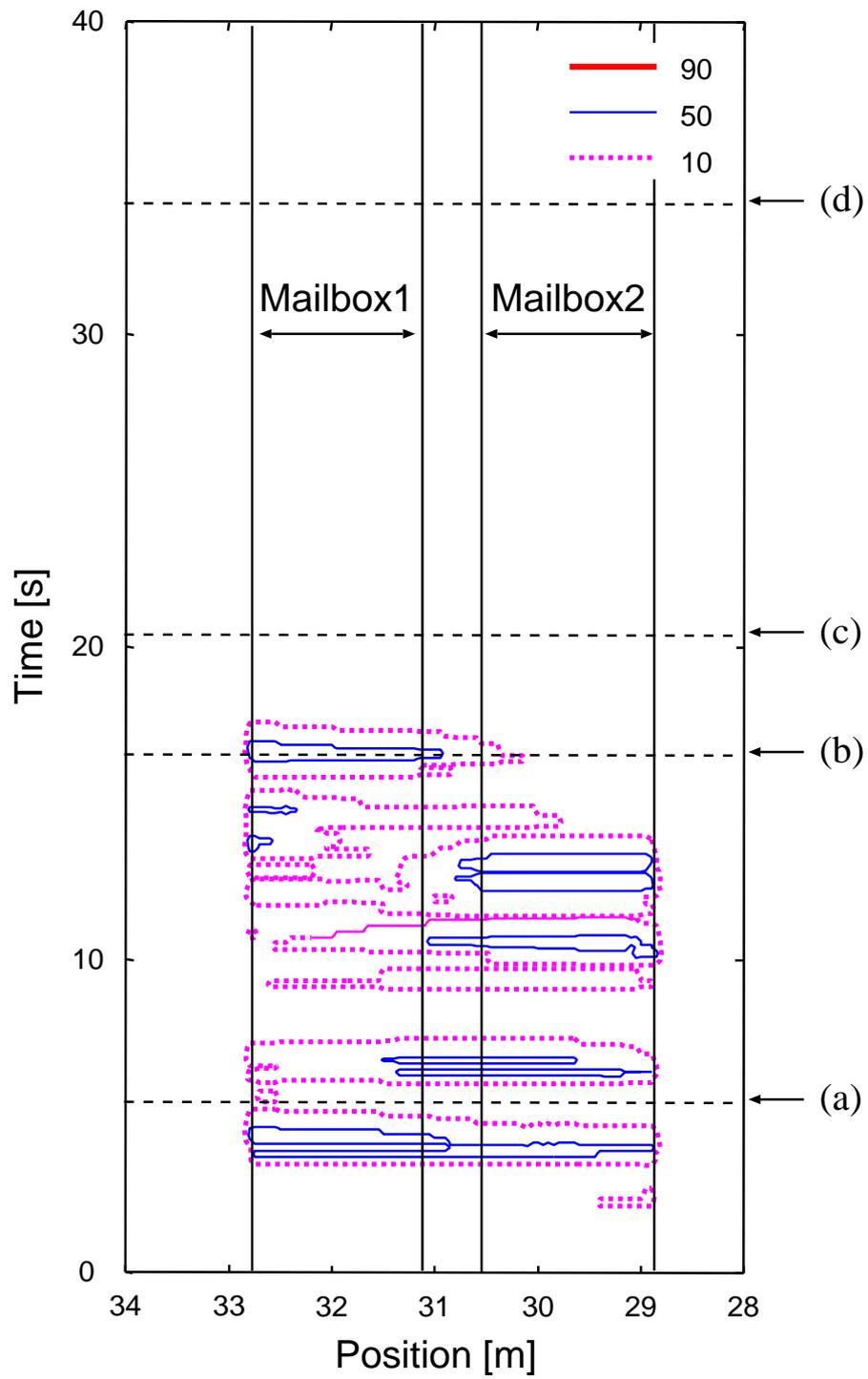
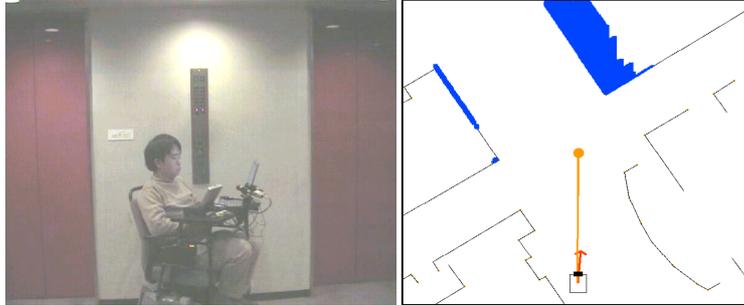


図 3.85 2つのメールボックスに対する注視量ヒストグラム（注意がない場合）

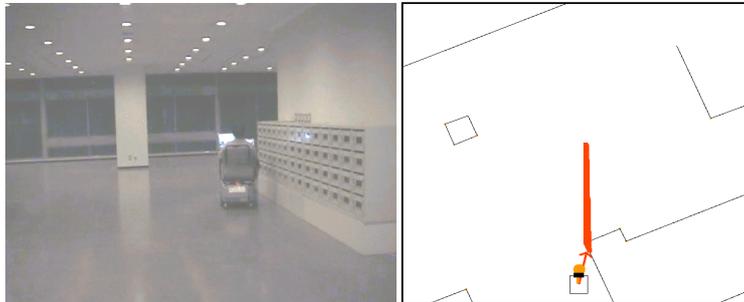
(e)



(f)



(g)



(h)



図 3.86 自律走行の様子 (メールボックスに注意がある場合)

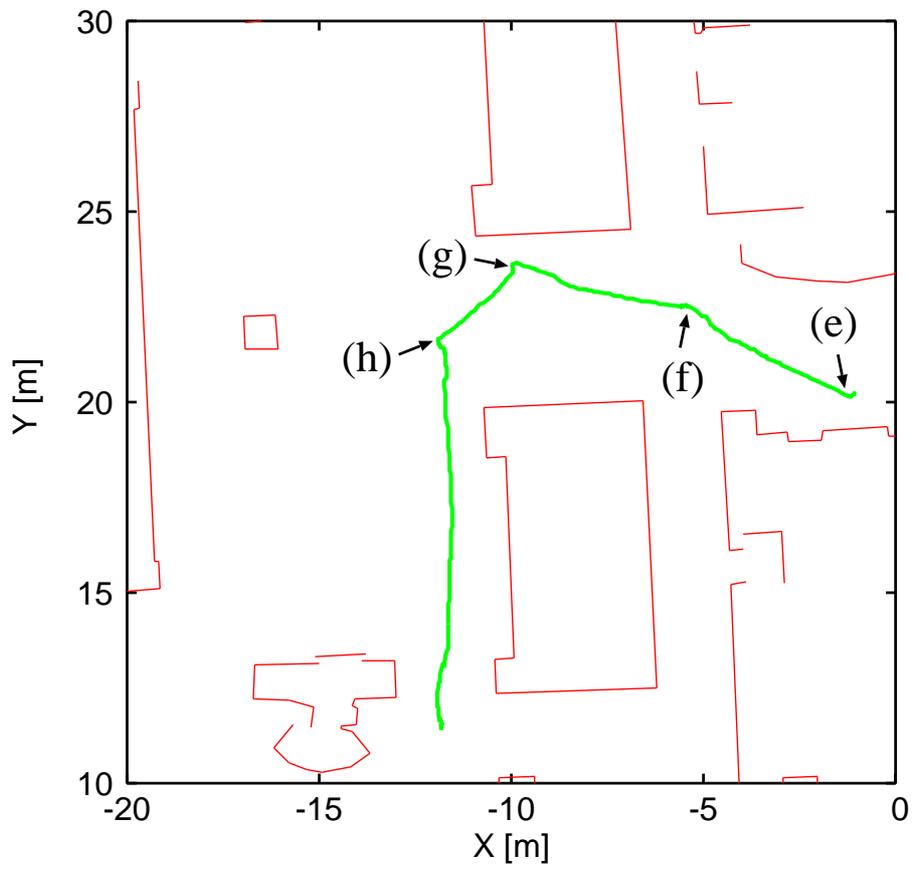


図 3.87 自律走行の軌跡 (メールボックスに注意がある場合)

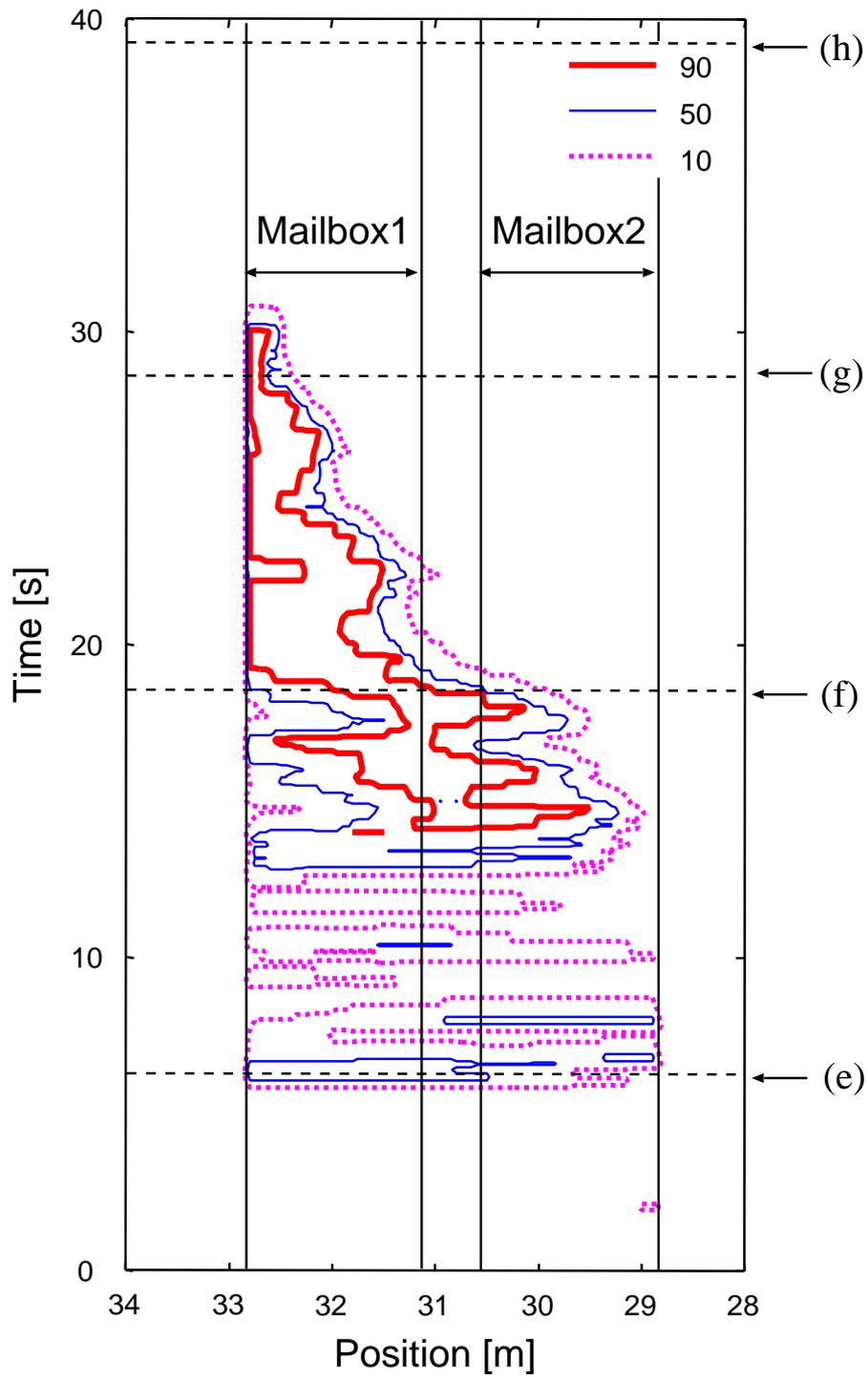


図 3.88 2つのメールボックスに対する注視量ヒストグラム（注意がある場合）

### 3.7. 本章の結論

本章では、ステレオカメラにより視線方向をリアルタイムに検出でき、距離センサと地図を用いて外部環境内における自己位置を検出できる搭乗型移動ロボットの走行支援システムについて述べた。

ユーザの視線計測とロボットの自己位置推定を組み合わせることで、目的地までの自律走行時にユーザの注意を推定し、その注意に沿った走行制御を行った。走行中のユーザの注視が周囲環境のどの位置にあるかを推定し、注視位置の時間変化に基づいてユーザの注意の度合をヒストグラムを用いて表現した。実験により、注意の度合を表したヒストグラムと、ロボットの移動方向および対象との位置関係を利用することで、対象へのユーザの注意の有無が推定でき、注意が推定された場合、その対象に近づくよう走行制御を行うことで、ユーザの意図に応じた移動支援が可能であることを示した。

## 第4章 結論

### 4.1. 本研究の具体的成果

電動車いすのような従来の移動手段では、ユーザは絶えず注意して移動手段の動きを認識し、それを調整するための操作が必要となり、また、操作のための知識の習得や訓練もユーザにとって負担となっていた。そこで、安全で快適な移動を行うための支援である搭乗型移動ロボットにおいて、ユーザの顔情報を利用し、さらに、周囲環境の認識機能を合わせることにより、ユーザの意図を走行に反映し、操作に対する負担を軽減する移動支援システムとして2つの手法を提案した。

まず、第2章において、ユーザが注意を払って意識的に動作を行う必要性をできるだけ減らすことにより、操作への負担を軽減する方法として、ユーザの顔の向きによるロボットの方向制御を提案した。提案システムではロボットを右左折させたい場合には意識的に曲がる方向を見てもらう必要がある。しかし、曲がりたい方向を見るというのは、ヒューマンインタフェースとしては操作感覚の良い動作であると考えられる。そして、この方式で重要なのは、ユーザは曲がっていくと正面を向いていくのが自然な動作だが、このほとんど無意識的な動作がロボットの走行の制御に利用できることである。実際に実験システムを製作して走行実験を行い、進みたい方向に顔を向けるという意識的な動作と、ただその方向を見ているときの動作からユーザの意図を識別するのに、顔の向きの認識結果のスモーキング処理と周囲環境の認識が有効であることを示した。

また、第3章では、目的地までの自律走行を行う搭乗型移動ロボットが「当初の目的と異なるユーザの意図」を読み取るために、ユーザの視線計測とロボットの自己位置推定を行うことで、移動中におけるユーザの注意の対象がどこにあるかを認識し、その結果に基づいてユーザの意図に沿った走行支援を行う方法につ

いて提案した．走行中のユーザの注視が周囲環境のどの位置にあるかを推定し，注視位置の時間変化に基づいてユーザの注意の度合をヒストグラムを用いて表現した．実験により，注意の度合を表したヒストグラムと，ロボットの移動方向および対象との位置関係を利用することで，対象へのユーザの注意の有無が推定でき，注意が推定された場合，その対象に近づくよう走行制御を行うことで，ユーザの意図に応じた移動支援が可能であることを示した．

以上より，提案する2つの方法が，ユーザの顔情報を利用し，さらに，周囲環境の認識機能を合わせることで，ユーザの意図を走行に反映し，操作に対する負担を軽減することができることを示すことができた．

## 4.2. 課題と今後の展開

第2章の検討より，進みたい方向に顔を向けるという意識的な動作と，ただその方向を見ているときの動作からユーザの意図を識別するのに，周囲環境の認識が重要な要素であることが確認された．人間は顔を動かす前に，まず視線を動かすことで周囲の環境を認識している．したがって，方向制御を意図した顔の動作であるか，そうでないかを識別するためにも，ユーザがどの対象をどれくらいの時間見ているかという視線の情報が重要な要素であると考えられる．また，顔の向きの認識結果のスムージング処理について評価を行ったが，当然万能なわけではない．頻繁に曲がる必要のあるような場所や，突然現われた障害物を避けるような場合には，顔の向きの変化にすぐに反応してもらう必要がある．そのためには，周囲環境を認識することによって，自律的な行動の中で，顔の向きによる方向制御への自由度を変化させる判断を行う機能が必要となると考えられる．

第3章では，まず，自己位置推定手法に対して，複雑な環境や特徴に乏しい環境で精度が落ちることが課題として挙げられる．これは本手法に限った課題ではなく，レーザレンジファインダを用いた自己位置推定手法全体の課題である．したがって，これを回避するためには，カメラやエンコーダなど距離情報以外の他の情報を獲得できるセンサと組み合わせることでマッチングの補助を行うことが考えられる．次に，ユーザの注意推定に対しては，注意対象の位置を地図内に予め

与えていた．これは逆に，注意の対象とならないようなもの，例えば近づいたら危険なものに対しては，注意が推定されて近づくことはないということもいえる．今後は，ユーザの注意の対象になりそうなさまざまなものに対してセンサを取り付け，環境内のセンサ群の位置検出と，それらに対するユーザの注意の検出を組み合わせることで，注意対象の設定が容易になると考えられる．あるいは，地図内で注視量ヒストグラムの度数が頻繁に高くなる位置とロボットの走行を関連付けて記憶していき，そこから自動的に注意対象を設定していくという方法も考えられる．また，注意を定義するためのパラメータとして固定値を用いているが，周囲の環境，注意を向ける対象，ユーザの心理状態等によって，注視時間は変化する．例えば，走行場面の混雑度が高い場合は注視時間は短くなる．したがって，状況に応じたパラメータ値の最適化が可能であるかどうか検討していく必要がある．さらに，今回はユーザの注意の対象に対して近付くという走行支援を行ったが，例えば，障害物にユーザの注意が向いている場合はロボットはそれを回避し，人が注意の対象である場合は協調した動作を行うというように，ユーザの注意の対象に応じた走行制御についても検討項目として挙げられる．また，本研究では，注意として視覚に対する注意のみを取り扱っているが，聴覚に対する注意との組合せも考慮していく必要がある．

なお，本研究では，第2章の顔の向きによる方向制御と，第3章の注意推定による走行制御の統合までは至っていない．これらを統合したシステムの実現に向けて以下のことが考えられる．まず，ロボットと周囲環境との間の距離のデータに基づいて，自律走行中での，顔の向きによる方向制御に対する自由度をロボットが自律的に判断するようにすればよい．例えば，T字路や十字路等の分岐までは自律走行を行い，分岐に差し掛かると，顔の向きによる方向制御によりユーザが進む方向を示すという方法が挙げられる．ロボットの判断がユーザに視覚や聴覚に訴える方法で提示されれば，ユーザに安心感を与えることができる．この判断に対して，ユーザは顔を用いたジェスチャ（うなづき、首振り等）により受け入れるかどうかを示すことで，ユーザの明示的な意図をロボットの動作に反映させることができる．したがって，自律走行中における顔の向きによる方向制御の自由度を判断する機能，ロボットの判断をユーザに提示する機能がシステムに必

要になる。また、顔の向きによる方向制御は大局的なものであるため、衝突回避や壁沿いに走行するといった自律走行機能も備える必要がある。

また、第2章、第3章を通じて、20～30歳代の健常者により評価実験を行っている。したがって、ジョイスティックをうまく使えない身体の不自由な人にとっても有効なシステムであるかどうか、健常者と身体の不自由な人の操作に表れる差異について今後検証していく必要がある。また、対象となるユーザとして高齢者を考えた場合、注意移動特性のひとつに若年者と比較して「行動に不必要な情報の無視が困難である」との指摘がある。第2章の顔の向きによる方向制御においては、走行と関係のない方向を向いてしまい、意図しない走行制御が行われてしまう可能性があるのかどうか、また、第3章の注意推定による走行制御においても、対象に対する注視時間など推定に使用するパラメータへの影響があるのかどうか検証していく必要があると考えられる。

さらに、搭乗型移動ロボットの移動性能について、ジョイスティックを自由に使えた場合の制御と、本研究で提案する顔情報による走行制御との比較を考えた場合、以下のことが挙げられる。ジョイスティックでは方向と速度を制御することができる。更に、手を離せば停止できる、つまり、ニュートラル状態が存在することが有用な点といえる。それに対して、本研究での顔の向きや視線による走行制御では、後ろ方向への移動は考慮されていない。その場回転により対応することは可能ではあるが、狭い場所によってはその場回転が行えない場合もある。また、切り返しが必要な状況も考えられる。したがって、そのような状況を判断し、後ろ方向へ移動を行う自律移動機能を付加する必要がある。次に、スタートおよびストップについては、本研究では、推定された注意の有無に加えて、顔のジェスチャによる明示を利用することで対応している。しかしながら、注意推定による走行制御では停止する位置をあらかじめ設定しており、とっさの停止には対応していない。また、顔のジェスチャの利用においても、すぐにニュートラル状態に戻ることで、つまり緊急停止が行えるとはいえない。これについては、障害物判定などの周囲環境認識による自律的判断に加えて、ユーザからの情報で利用できるものはないか検討していく必要がある。さらに、速度の制御についても、本研究では対応していない。これに対しても周囲環境認識、ユーザの動作等から

利用できる情報について今後検討していく余地がある。

また、現在はロボットの行動については、設計者の物理理解による明示的な埋め込みであり、設計者の経験に負うところが多い[60]。そのため、ロボットにはユーザや環境との相互作用結果を記憶し、それを利用する学習能力が必要になると考えられる。すなわち、知能を備えた機械[61]を実現していく必要がある。ロボットとの相互作用において、人間を理解してもらうには、人間の脳を包含する脳[62]をロボットに与える必要があるのかもしれない。人間を支援する理想的なロボットの実現には、まだ検討すべき課題は多く残されている。

つまり、機械を学ばせるためには、わたしたちこそ学ばなければならないのである[63]。

# 謝辞

本論文に書き記した一連の研究は，奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻のロボティクス講座（小笠原研究室）において執り行われたものです．この研究は多くの方々のお力添えにより実現することができました．ここでお礼を申し上げたいと思います．

本学情報科学研究科 小笠原 司 教授は，会社の業務と研究の両立を図る筆者を博士後期課程の学生として快く受け入れて下さいました．そして，本研究のテーマ設定，論文執筆，学会発表資料作成において，貴重かつ適切なる御助言，御指導をいただきました．何とか本論文を執筆することができたのも，ひとえに小笠原教授の忍耐強いお力添えがあったからだと思います．ありがとうございました．

本学情報科学研究科 木戸出 正繼 教授には，論文執筆において本研究の位置付けを明確にするにあたり，貴重かつ適切なる御助言，御指導をいただきました．ありがとうございました．

本学情報科学研究科 松本 吉央 助教授には，本研究のテーマ設定，論文執筆，学会発表資料作成において，貴重かつ適切なる御指導，御助言をいただきました．ありがとうございました．

立命館大学 情報理工学部 知能情報学科 白井 良明 教授には，大阪大学大学院工学研究科博士前期課程，そして本学博士後期課程を通じて，本研究のテーマ設定，論文執筆にあたり貴重かつ適切なる御助言，御指導をいただきました．ありがとうございました．

本学情報科学研究科 上田 淳 助手には，本研究および特許出願を進めるにあたり，貴重な御助言をいただきました．ありがとうございました．

本学情報科学研究科 上田 悦子 助手には，本研究をまとめるにあたり，貴重な御助言をいただきました．ありがとうございました．

和歌山大学 中村 恭之 助教授には、大阪大学工学部時代から本学博士後期課程を通じて、本研究を遂行するに当たって様々な知識や手法を御教授いただきました。ありがとうございました。

埼玉大学 久野 義徳 教授には、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程から本学博士後期課程を通じて、本研究のテーマ設定、本研究の基盤となる様々な知識や手法について御教授いただき、貴重かつ適切なる御指導、御助言をいただきました。ありがとうございました。

大阪大学 三浦 純 助教授には、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程において、本研究を遂行するに当たって貴重な御指導、御助言をいただきました。ありがとうございました。

立命館大学 島田 伸敬 助教授には、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程において、本研究を遂行するに当たって貴重な御指導、御助言をいただきました。ありがとうございました。

大阪大学 浅田 稔 教授には、大阪大学工学部時代から本学博士後期課程を通じて、本研究を遂行するに当たって貴重な御指導、御助言をいただきました。ありがとうございました。

本学 先端科学技術研究調査センター 萩原 史朗 氏、および、三協国際特許事務所 西谷 浩治 氏には、特許出願のために多大なご尽力をいただきました。ありがとうございました。

大阪大学大学院工学研究科 中西 知 氏（現 東芝）には、顔の向きによる方向制御の操作感の評価実験において、多大なご尽力をいただきました。ありがとうございました。

本学情報科学研究科 後藤 健志 氏（現 ソニー）には、レーザレンジファインダを用いたロボットの自己位置推定手法の確立、実験システムの構築において、多大なご尽力をいただきました。ありがとうございました。

本学情報科学研究科 齋藤 裕昭 氏（現 住友電気工業）には、自己位置推定の検証のための自律走行実験、実験システムの構築において、多大なご尽力をいただきました。ありがとうございました。

本学情報科学研究科 恒成 裕行 氏（現 トキメック）には、ユーザの注意推定

に基づく走行制御の検証実験，実験システムの構築において，多大なご尽力をいただきました．ありがとうございました．

本学情報科学研究科 池山 智之 氏（現 横河電機）には，実験システムの構築において，多大なご尽力をいただきました．ありがとうございました．

立命館大学 小枝 正直 氏，および，本学情報科学研究科 博士後期課程 怡土 順一 氏，竹村 憲太郎 氏，Abdelaziz Khiat 氏，近藤 誠宏 氏，末永 剛 氏には，本研究を進める上での活発な議論を通じて，さまざまな御助言をいただきました．ありがとうございました．

研究活動が滞り無く行えるよう御配慮下さいました秘書の金岡 恵さん，田中 舞さんに心より御礼申し上げます．

シャープ株式会社 技術本部 基盤技術研究所 高橋 明 所長には，筆者が研究活動を行うにあたりお力添えをいただき，そして，論文執筆において，貴重かつ適切な御助言，御指導をいただきました．ありがとうございました．

シャープ株式会社 技術本部 総合技術企画室 企画グループ 小嶋 邦男 チーフには，会社の業務と研究活動の両立に対して多大なる御配慮をいただきました．ありがとうございました．

シャープ株式会社 技術本部 基盤技術研究所 第3研究室 村上 善照 室長には，会社の業務と研究活動の両立に対して多大なる御配慮をいただきました．ありがとうございました．

シャープ株式会社 技術本部 基盤技術研究所 第3研究室 前田 茂己 主任研究員には，筆者が研究活動を行うにあたりお力添えをいただき，そして，会社の業務と研究活動の両立に対して多大なる御配慮をいただきました．ありがとうございました．

研究活動を送る上で，様々な形で御支援，御協力を頂きましたロボティクス講座の卒業生，在学生の皆様，シャープ株式会社 技術本部 基盤技術研究所の関係者の皆様に深く感謝いたします．

論文執筆，学会発表資料作成において，懇切丁寧に英語の添削をしていただきました Graeme Murdoch 氏に深く感謝いたします．

研究活動を行うにあたり，常に励まし，温かく見守ってくれた父母，義父母に

深く感謝いたします。

最後に、私の研究活動開始の決断を後押しし、常に理解し支え続けてくれた妻・香に深く感謝し、論文の結びとしたいと思います。

# 著者研究業績

## 学術論文

1. 足立佳久, 中西知, 久野義徳, 島田伸敬, 白井良明: ”顔の視覚情報処理を用いた知的車椅子”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, pp.423-431, 1999.
2. 足立佳久, 恒成裕行, 松本吉央, 小笠原司: ”ユーザの注意推定に基づく搭乗型移動ロボットの走行支援システム”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.9-18, 2004.

## 国際会議発表

1. Y. Adachi, M. Asada and T. Nakamura : ”Correlation-based visual tracking enhanced by affine motion description”, Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications '96, pp. 75-78, 1996.
2. Y. Adachi, Y. Kuno, N. Shimada and Y. Shirai : ”Intelligent wheelchair using visual information on human faces”, Proceedings of 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.354-359, 1998.
3. Y. Kuno, T. Ishiyama, Y. Adachi and Y. Shirai : ”Human interface systems using intentional and unintentional behaviors”, Proceedings of 1998 Workshop on Perceptual User Interfaces, pp.55-58, 1998.
4. Y. Kuno, Y. Adachi, T. Murashima and Y. Shirai : ”Intelligent wheelchair looking at its user”, Proceedings of Second International Conference on

- Audio- and Video-based Biometric Person Authentication, pp.84-89, 1999.
5. Y. Adachi, K. Goto, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: "Development of Control Assistant System for Robotic Wheelchair - Estimation of User's Behavior based on Measurements of Gaze and Environment -", Proceedings of 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, FA1-III-1, 2003
  6. Y. Adachi, H. Saito, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: "Memory-Based Navigation using Data Sequence of Laser Range Finder", Proceedings of 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, TP3-V-3, 2003
  7. Y. Adachi, K. Goto, A. Khiat, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: "Estimation of User's Attention based on Gaze and Environment Measurements for Robotic Wheelchair", Proceedings of 12th IEEE Workshop Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2003), 2A7, 2003.
  8. Y. Adachi, H. Tsunenari, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: "Guide Robot's Navigation Based on Attention Estimation Using Gaze Information", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), pp.540-545, 2004.

## 国内発表

1. 足立佳久, 中村恭之, 浅田稔: "アフィン運動記述を利用した明度相関による視覚追跡", コンピュータとイメージメディア 研究報告 No.100, pp.121-124, 1996.
2. 足立佳久, 村嶋照久, 山根英紀, 久野義徳, 島田伸敬, 白井良明: "人間の意図を認識し支援する知的車椅子の実験システム", インタラクション'98 論文集, pp.117-118, 1998

3. 足立佳久, 後藤健志, 松本吉央, 小笠原司: ”搭乗型ガイドロボットの走行支援システムの開発- 視線と環境計測に基づくユーザの行動推定 -”, SICE システムインテグレーション部門講演会, Vol.2, pp.111-112, 2002
4. 齋藤裕昭, 足立佳久, 松本吉央, 小笠原司: ”センサデータ列の記憶とマッチングに基づくナビゲーション- レーザレンジファインダを用いた実装 -”, SICE システムインテグレーション部門講演会, Vol.1, pp.299-300, 2002
5. 齋藤裕昭, 池山智之, 足立佳久, 松本吉央, 小笠原司: ”館内案内ロボット「たけまる」の開発- 開発の概要と距離センサを用いたナビゲーション機能の実装 -”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'03, 1P1-1F-C8, 2003
6. 恒成裕行, 足立佳久, 松本吉央, 小笠原司: ”搭乗型ガイドロボットの走行支援システムの開発- 注視情報に基づく意図推定とナビゲーションへの利用 -”, SICE システムインテグレーション部門講演会, 1F3-6, 2003
7. 池山智之, 足立佳久, 松本吉央, 小笠原司: ”搭乗型ガイドロボットにおける走行支援システムの開発- 着席面の圧力分布によるユーザの行動推定 -”, 日本機械学会 [No.03-38] 第 16 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.103-104, 2004

## 特許出願

1. 足立佳久, 松本吉央, 小笠原司: ”関心度推定装置”, 特願 2003-174479

## 参考文献

- [1] 竹内郁雄, 柄川索. 歩行支援機器の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 4, pp. 385–389, 2003.
- [2] 矢入(江口)郁子, 猪木誠二. 高齢者・障害者の自立的移動を支援する robotic communication terminals (2). 人工知能学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 170–176, 2002.
- [3] D. P. Miller and M. G. Slack. Design and testing of a low-cost robotic wheelchair prototype. In *Autonomous Robotics*, Vol. 2, pp. 77–88, 1995.
- [4] E. Prassler, J. Scholz, and P. Fiorini. Maid: A robotic wheelchair roaming in a railway station. In *International Conference on Field and Service Robotics*, pp. 31–36, 1999.
- [5] Matthias Strobel. Navigation in partially unknown, narrow, cluttered space. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 29–34, 1999.
- [6] P.D. Beattie and J.M. Bishop. Self-localisation in the 'senario' autonomous wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 22, pp. 255–267, 1998.
- [7] A. C. Balcells and J. A. Gonzalez. Tetranauta: A wheelchair controller for users with very severe mobility restrictions. In *3rd Annual TIDE (Technology for Inclusive Design and Equality) Congress*, pp. 336–340, 1998.

- [8] T.Gomi and A.Griffith. Developing intelligent wheelchairs for the handicapped. In *Assistive Technology and Artificial Intelligence*, pp. 150–178, 1998.
- [9] K. Schilling, H. Roth, R. Lieb, and H. Stutzle. Sensors to improve the safety for wheelchair users. In *3rd Annual TIDE (Technology for Inclusive Design and Equality) Congress*, pp. 331–335, 1998.
- [10] 鈴木真, 土肥健純. 高齢者の移動支援のロボティクス. BME(日本エム・イー学会), Vol. 10, No. 5, pp. 18–23, 1996.
- [11] R. C. Simpson and S. P. Levine. Adaptive shared control of a smart wheelchair operated by voice control. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 622–626, 1997.
- [12] K.Tanaka, K.Matsunaga, N.Kanamori, S.Hori, and H.O.Wang. Electroencephalogram-based control of a mobile robot. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 688–693, 2003.
- [13] J. Gips. On building intelligence into eagleeyes. In *Lectuer notes in computer science*, Vol. 1458, pp. 50–58, 1998.
- [14] H. A. Yanco. Wheelseley: A robotic wheelchair system: Indoor navigation and user interface. In *Lectuer notes in computer science*, Vol. 1458, pp. 256–268, 1998.
- [15] 一ノ瀬裕, 和久本雅彦, 本多清志, 東輝明, 佐藤隼二. ワイヤレス式舌圧センサを用いたヒューマンインタフェースと電動車椅子への応用. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J86-D-II, No. 2, pp. 364–367, 2 2003.
- [16] R. S. Rao, K. Conn, S. H. Jung, J. Katupitiya, and T. Kientz. Human robot interaction: Application to smart wheelchairs. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3583–3588, 2002.

- [17] 柴田智広, 松本吉央, 稲葉雅幸, 井上博允. 人が搭乗しその場その場で行動を指示できるパーソナル視覚移動ロボット hyper scooter の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 8, pp. 1138–1144, 1996.
- [18] 北川秀夫, 別府達哉, 大野義則, 三好孝典, 寺嶋一彦. 全方向移動車椅子の乗り心地向上のための走行制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 7, pp. 933–939, 2004.
- [19] 和田正義, 浅田春比古. 車両幅可変機構を有する全方向移動車の設計とその車椅子への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 82–89, 1998.
- [20] 米田隆志, 舟久保熙康. 車椅子・歩行介助装置の現状と課題. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 44–48, 1993.
- [21] 米田完, 太田祐介, 広瀬茂男. 粉体の変形特性を利用したハイグリップクロウの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 8, pp. 1188–1193, 1997.
- [22] Y. Sugahara, T. Hosobata, Y. Mikuriya, H. Sunazuka, H. Lim, and A. Takashi. Realization of dynamic human-carrying walking by a biped locomotor. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3055–3060, 2004.
- [23] トヨタ自動車株式会社 搭乗歩行型ロボット i-foot.  
[http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/dec/nt04\\_1201c.html](http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/dec/nt04_1201c.html).
- [24] A. Pentland and F. Liu. Towards augmented control systems. *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles '95*, pp. 350–355, 1995.
- [25] 大村和典, 伴野明, 小林幸雄. 単眼視画像による顔の向きを検出法の指示入力への応用. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-D-II, No. 9, pp. 1441–1447, 1991.
- [26] 本郷仁志, 村田彰, 山本和彦. 目, 口領域の抽出による顔の向きの推定. 第2回パターン計測シンポジウム, pp. 37–42, 1997.

- [27] H. Inoue, M. Inaba, T. Mori, and T. Tachikawa. Real-time robot vision system based on correlation technology. *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Robots*, pp. 675–680, 1993.
- [28] R. Cipolla, Y. Okamoto, and K. Kuno. Robust structure from motion using motion parallax. *Proceedings of Fourth International Conference on Computer Vision*, pp. 374–382, 1993.
- [29] 岡本, Cipolla, 風間, 久野. 定性的運動認識を用いたヒューマンインタフェースシステム. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1813–1821, 1993.
- [30] R. Cipolla. Active visual inference of surface shape. *Springer*, 1992.
- [31] S. Nakanishi, Y. Kuno, N. Shimada, and Y. Shirai. Robotic wheelchair based on observations of both user and environment. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 912–917, 1999.
- [32] L. M. Bergasa, M. Mazo, A. Gradel, M. A. Sotelo, and J. C. Garcia. Guidance of a wheelchair for handicapped people by head movements. In *International Conference on Field and Service Robotics*, pp. 150–155, 1999.
- [33] I. Moon, S. Joung, and Y. Kum. Safe and reliable intelligent wheelchair robot with human robot interaction. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3595–3600, 2002.
- [34] Y. Matsumoto, T. Ino, and T. Ogasawara. Development of intelligent wheelchair system with face and gaze based interface. In *Proceedings of 10th IEEE/RSJ International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN2001)*, pp. 262–267, 2001.
- [35] 松本吉央, 小笠原司, A.Zelinsky. リアルタイム視線検出・動作認識システムの開発. 信学技報, Vol. 99, No. 151, pp. 9–15, 1999.

- [36] Y. Matsumoto, T. Ogasawara, and A. Zelinsky. Behavior recognition based on head pose and gaze direction measurement. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2127–2132, 2000.
- [37] G. K. Shaffer, A. Stenz, W. L. Whittaker, and K. W. Fitzpatrick. Position estimator for underground mine equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 5, pp. 193–204, 1992.
- [38] J. Gutmann, T. Weigel, and B. Nevel. Fast, accurate, and robust self-localization in polygonal environments. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1412–1419, 1999.
- [39] I. J. Cox. Blanche - an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 2, pp. 193–204, 1991.
- [40] G. Weiss, C. Wetzler, and E. V. Puttkamer. Keeping track of position and orientation of moving indoor systems by correlation of range-finder scans. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 595–601, 1994.
- [41] G. Weiss and E. V. Puttkamer. A map based on laserscans without geometric interpretation. In *Intelligent autonomous systems*, pp. 403–407, 1995.
- [42] 日経サイエンス編. 養老孟司 ガクモンの壁. 日本経済新聞社, 2003.
- [43] C. Stanfill and D. Waltz. Toward memory-based reasoning. *Communications of the ACM*, Vol. 29, No. 12, pp. 224–262, 1986.
- [44] Y. Matsumoto, M. Inaba, and H. Inoue. View-based approach to robot navigation. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1702–1708, 2000.

- [45] Y. Matsumoto, K. Ikeda, M. Inaba, and H. Inoue. Visual navigation using omnidirectional view sequence. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 317–322, 1999.
- [46] Y. Matsumoto, M. Inaba, and H. Inoue. Visual navigation using view-sequenced route representation. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 83–88, 1996.
- [47] A. Ohya, Y. Miyazaki, and S. Yuta. Autonomous navigation of mobile robot based on teaching and playback using trinocular vision. In *IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 398–403, 2001.
- [48] Y. Yagi, S. Fujimura, and M. Yachida. Route representation for mobile robot navigation by omnidirectional route panorama fourier transformation. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1250–1255, 1998.
- [49] 小枝正直, 鈴木征一郎, 松本吉央, 小笠原司. ステレオカメラを用いた頭部位置・姿勢計測とレーザレンジファインダを用いた自己位置・姿勢計測の拡張現実感への応用. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 7, pp. 755–761, 2004.
- [50] M.I. ポスナー, M.E. レイクル, 養老孟司, 加藤雅子, 笠井清登訳. 脳を観る 認知神経科学が明かす心の謎. 日経サイエンス社, 1997.
- [51] 乾敏郎編. 認知心理学 1 知覚と運動. 東京大学出版会, 1995.
- [52] 三浦利章. 行動と視覚的注意. 風間書房, 1996.
- [53] 山口真美. 赤ちゃんは顔をよむ. 紀伊国屋書店, 2003.
- [54] 茂木健一郎. 脳とクオリア - なぜ脳に心が生まれるのか. 日経サイエンス社, 1997.

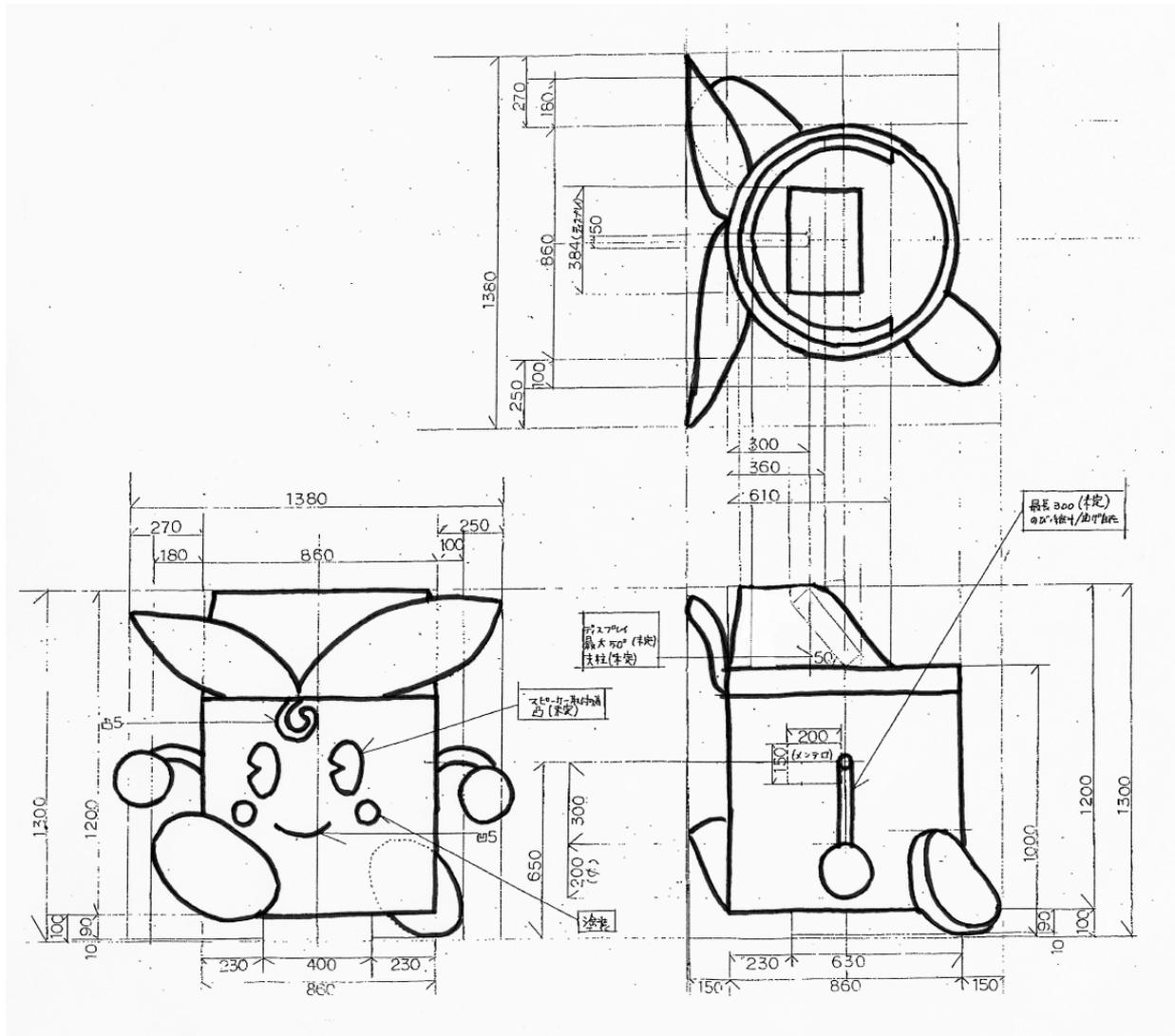
- [55] 銅谷賢治. 脳の情報表現：発火周波数，時間パターンと細胞モデル. 神経情報科学サマースクール, 1999.
- [56] 高野陽太郎編. 認知心理学 2 記憶. 東京大学出版会, 1995.
- [57] 甘利俊一, 外山敬介編集. 脳科学大事典. 朝倉書店, 2000.
- [58] 大野健彦. 視線から何がわかるか -視線測定に基づく高次認知処理の解明. 認知科学, Vol. 9, No. 4, pp. 565-579, 2002.
- [59] 大野健彦. 視線を用いたインタフェース. 情報処理, Vol. 44, No. 7, pp. 726-732, 2003.
- [60] 浅田稔. 運動学習から行動学習・認知発達へ. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 150-155, 2004.
- [61] ジェフ・ホーキンス, サンドラ・ブレイクスリー. 考える脳 考えるコンピューター. ランダムハウス講談社, 2005.
- [62] 養老孟司. 唯脳論. ちくま学芸文庫, 1998.
- [63] ニール・ガーシェンフェルド, 中俣真知子訳. 考える「もの」たち MIT メディア・ラボが描く未来. 毎日新聞社, 2000.

# 付録

## A. 電動車いす ハードウェア仕様

項目	内容
製造業者の形式	M-Smart
寸法 (全長 × 全幅 × 全高)	730mm×590mm×840mm
重量 (バッテリー含む)	62kg
駆動モータ (30 分定格出力)	24V40W×2
バッテリー	小型シールドバッテリー HC24-12, 12V, 22Ah, 2 個
充電器	直流 24V 自動充電方式
駆動輪	φ260mm
補助輪	φ75mm
駆動方式	駆動輪直接駆動方式
制動方式	モーター発電および電磁ブレーキによる方式
操舵方式	駆動輪の左右回転差による操舵およびキャスター方式
制御方式	コントローラー制御による方式
シート構造および寸法	モールドウレタン, 座奥行き 400mm, 背もたれ高さ 405mm, 座高 435mm
最高速度	前進 3.5km/h 以下
実用登降坂角度	7.1 度
連続走行距離	約 2.5 時間 (10km)
最小回転半径	388mm
段差乗越高さ	35mm
溝乗越幅	80mm
使用者最大体重 (積載物も含む)	90kg
適正タイヤ空気圧	19.6 ~ 24.5×10 <sup>4</sup> pa

## B. たけまるくん 設計図



## C. レーザレンジファインダ ハードウェア仕様

距離測定範囲 mm 単位	最大 8m/16m/32m
距離測定範囲 cm 単位	最大 80m
角度分解能	0.25 °(範囲 100 °)/0.5 °(180 °)/ 1 °(180 °) (選択可能)
応答時間	10mm
測定分解能	代表値 ±15mm
システム誤差 (環境条件: 視界良好, Ta=23 , 反射率 10% ~ 10,000%)	(mm モード), 距離範囲 1 ~ 8m 代表値 ±4cm (cm モード), 距離範囲 1 ~ 20m
統計的誤差	代表値 ±5mm
標準誤差 (1 シグマ)	(距離範囲 ≤8m/ ≥10% 反射率/≤5kLux)
電気的仕様	
データ・インタフェース	RS232/RS422 (設定可能)
伝送速度	9.6/19.2/38.4/500kbps
スイッチング出力, 標準仕様	3xPNP; 代表値 24V DC
スイッチング出力, リレー仕様	OUT A, OUT B max, 250mA, OUT C max, 100mA
電源電圧 (スキャナ, 電子回路用)	24V DC ±15% (最大リップル 500mV) 最大消費電流 1.8A (出力負荷を含む)
消費電力	約 20W(出力負荷を除く) ヒータ用は, +約 140W
電氣的保護クラス	安全絶縁, 保護クラス 2
レーザ保護クラス	1(本質的に安全)
電磁適合性	IEC 801, part 2-4; EN 50081-1/50082-2
使用周囲温度	0 ~ +50
保管周囲温度	-30 ~ +70

機械的仕様

保護構造	IP 65
重量	約 4.5kg
外形寸法 (全長 × 全幅 × 全高)	156mm×155mm×210mm
振動疲労限界	IEC 68 part 2-6 , table 2c , 周波数範囲 10 ~ 150Hz , 振幅 0.35mm または 5g , 単一衝撃 IEC 68 part 2-27 , table 2,15g/11ms 連続振動 IEC 68 part 2-29 , 10g/16ms

## D. USB-IO & DA 変換回路図

ノート PC からの信号を電動車いすを伝達するための USB-IO および DA 変換の回路図を示す。

