

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科情報ネットワークシステム学専攻博士前期課程		
氏 名	芝 星帆	学籍番号	1152018
論 文 題 目	飛行型ロボットと携帯情報端末を利用した 「浮遊ノート」システムの提案		
<p>要 旨</p> <p>従来の携帯情報端末は、片手もしくは両手で操作することを前提としており、実生活において、荷物を持つなどして片手がふさがった状態での複雑な操作や、料理中など両手が使えない状況での使用は難しい。そこで、本論文では場所や時間を選ばず、両手が満足に使えない状況下であっても端末を自在に操作することが可能な「浮遊ノート」システムについて提案する。浮遊ノートとは、携帯情報端末を飛行ロボットに搭載し浮遊させることで端末の利便性を高めるシステムである。</p> <p>リアルタイムに画像を取得しサーバを介し制御が可能な小型飛行ロボットと、軽量の携帯情報端末を用いて提案システムの実装を行った。ロボット制御の課題である、マスターの識別、ロボットとマスター間の距離の取得はマーカによって実現した。画像処理による相対距離を利用した制御により、提案システムは場所や状況を問わず利用可能である。</p> <p>浮遊ノートの行動パターンとして、ロボットの動きにより実現するペットロボットとしての行動、携帯端末の操作を補助するための行動、それら 2 つを組み合わせた行動を提案する。その中から、プロトタイプとして以下の行動パターンを実装し、評価検証を行った。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● マスターを追いかける追跡モード ● まわりこみ写真を撮影する自撮りモード ● 端末の情報をマスターに読ませる浮遊表示モード ● 端末に手書きメモを書き込む浮遊入力モード ● マスターのメモを特定の他人に伝える移動伝言板モード <p>各モードの検証から、提案システムを利用することによる利点を述べ、問題点がある場合は原因と解決方法を提示する。結論として、提案システムによりペットロボットと携帯情報端末の利便性が高められ、ロボット技術の発展により多くの生活支援に役立つことを確かめた。</p>			



電気通信大学大学院情報システム学研究科

2013 Jan.

修 士 論 文

飛行型ロボットと携帯情報端末を利用した 「浮遊ノート」システムの提案

指導教員 入江 英嗣 准教授

副指導教員 吉永 努 教授

副指導教員 笠井 裕之 准教授

平成 25 年 1 月 24 日

提 出 者

所 属	大学院情報システム学研究科 情報ネットワークシステム学専攻
学籍番号	1152018
氏 名	芝 星帆

(表紙裏)

目次

第1章	序論	1
第2章	基礎技術	3
2.1	ロボットのための画像認識技術	3
2.2	色の認識	3
2.2.1	色の決定	3
2.2.2	表色系の決定	4
2.3	エッジ抽出	4
2.3.1	閾値決定によるエッジ抽出法	4
2.3.2	テンプレートマッチングによるエッジ抽出法	6
2.4	オブティカルフローの検出	6
2.4.1	オブティカルフロー検出法の分類	6
2.4.2	マッチング法とグラディエント法の基本式導出	6
2.5	オブジェクト検出	8
2.5.1	学習器による検出	8
2.6	座標変換	10
第3章	関連研究	12
3.1	生活支援ロボットに利用されるセンサデバイス	12
3.2	画像処理を利用した走行ロボットの制御	12
3.3	画像処理を利用した飛行ロボットの制御	14
第4章	「浮遊ノート」システム	16
4.1	「浮遊ノート」システムの提案	16
4.2	基本動作となる追跡モードの実装	18
第5章	自撮りモードの提案	21
5.1	自撮り支援システム	21
5.2	提案手法の実装	21
5.3	浮遊ノートへの実装	22
第6章	浮遊伝言板モードの提案	25
6.1	システム概要	25
6.2	提案手法と浮遊ノートへの実装	25
6.3	浮遊伝言板プロトタイプ	25

第 7 章	提案システムの評価実験	29
7.1	追跡モードの評価	29
7.2	自撮りモードの評価	32
7.2.1	自撮り支援システムの評価実験	32
7.2.2	浮遊ノートでの評価実験	32
7.3	浮遊表示モードの評価	36
7.4	浮遊入力モードの評価	36
7.5	浮遊伝言板モードの評価	37
第 8 章	応用例	40
第 9 章	結論	42
9.1	本研究の成果	42
9.2	今後の展望	43
謝辞		44
参考文献		46
発表文献		46

目 次

1.0.1 耐久性を重視した携帯端末 (カシオ計算機 G-SHOCK PHONE)(文献 [2] より引用)	2
1.0.2 端末不携帯防止機能を持つプレスレット型アイテム (Princeton ぶるっトウース) (文献 [3] より引用)	2
2.2.1 色三角形 (文献 [4] より引用)	5
2.3.1 中心画素とその 3×3 近傍 (文献 [4] より引用)	5
2.3.2 Prewitt のエッジ検出器 (文献 [4] より引用)	7
2.4.1 濃淡パターン追跡によるオプティカルフローの定義 (文献 [10] より引用)	7
2.5.1 AdaBoost 法の概要 (文献 [11] より引用)	9
2.5.2 オブジェクト検出特徴の例 (文献 [11] より引用)	9
2.5.3 検出特徴を顔に適用した例 (文献 [11] より引用)	9
2.6.1 座標系の概略図 (文献 [14] より引用)	11
2.6.2 座標変換行列 (文献 [15] より引用)	11
3.1.1 2 足歩行ロボット (HONDA ASIMO)(文献 [16] より引用)	13
3.1.2 生活支援ロボット (TOYATA Human Support Robot)(文献 [17] より引用)	13
3.2.1 ユーザが装着したマーカ (文献 [20] より引用)	15
3.2.2 マーカ発見モジュールと追跡モジュールのアルゴリズム図 (文献 [20] より引用)	15
3.3.1 色抽出とパーティクルフィルタによる追跡の様子 (文献 [23] より引用)	15
4.1.1 「浮遊ノート」の使用イメージ図	17
4.1.2 AR.Drone	17
4.1.3 iPod touch	17
4.1.4 AR.Drone の制御軸	19
4.2.1 追跡モードの制御アルゴリズム図	19
4.2.2 相対位置の取得による命令の打消し	20
4.2.3 意図しない動きへのフィードバック制御	20
5.1.1 自撮り支援システムのアルゴリズム図	23
5.3.1 ロボットの動き	23
5.3.2 ロボット制御のアルゴリズム	24
6.1.1 浮遊表示・入力の使用イメージ図	26
6.2.1 浮遊表示・入力のアルゴリズム図	26
6.3.1 浮遊伝言板のロボット制御アルゴリズム	28
6.3.2 浮遊伝言板モードでのロボットの動き	28

7.1.1 ロボットから見た被験者の様子	30
7.1.2 実験に使用したマーカ	30
7.1.3 マーカを装着した様子	31
7.1.4 測定箇所	31
7.2.1 手持ちカメラで得られたベストショット	33
7.2.2 顔位置の取得，鮮明度の遷移	34
7.2.3 成功率の変化	34
7.2.4 目視判断の例	35
7.2.5 平地で撮影したベストショットの例	35
7.2.6 階段上で撮影した様子と取得したベストショット	35
7.3.1 表示したメニューの例	38
7.4.1 浮遊ノートへの入力（左）と片手のみで操作した場合の入力（右）	38
7.5.1 実験の流れ	39
7.5.2 失敗した実験時の入力	39

表 目 次

2.1	代表的なオプティカルフロー検出法の分類（文献 [10] より引用）	7
4.1	行動パターンの例	16
7.1	追跡モードの成功率（左：1 回目，右：2 回目）	29
7.2	フォントサイズの例	36
7.3	成功回数	37

第1章 序論

携帯情報端末の小型化・軽量化が進み、スマートフォンは最も普及しているデバイスとなった。現代社会では、携帯情報端末は電話やメール、メモ、カレンダーに留まらず、リソース管理や情報収集のツールとして我々の生活に不可欠なものである。

しかし従来の携帯情報端末は、片手もしくは両手で操作することを前提としているため、実生活において片手に荷物を持ってふさがった状態での複雑な操作や、料理中など両手がふさがった状況での使用は難しい。手を使わずに操作を行うソフト側の機能として、顔の動きでページをめくるアプリ [1] が公開されているが、端末本体を支える手もしくはスタンドが必要となる。更に、上記のとおり情報端末として常に携帯しなければならないデバイスと化しているが、操作中に誤って手を滑らせ端末を落下させてしまう事故や、そもそも携帯することを忘れてしまうという失敗も少なくない。これらの状況を回避するために、様々な技術が開発されている。落下による破壊を防ぐため、図 1.0.1 (文献 [2] より引用) のように本体の衝撃耐久性を高めた端末もあるが、本体が重厚化し携帯型として目指す軽薄短小化に反している。端末の不携帯防止のアイデアとして、Bluetooth を利用し端末から一定距離になると振動で知らせる機能を有するプレスレット型のアイテムも販売されているが [3]、図 1.0.2 (文献 [3] より引用) のようにアイテム自体の装着忘れのため防止策が必要となり、本末転倒になりかねない。このように、付加機能が増えるにつれ携帯情報端末は様々なシーンでの利用が求められるが、携帯し、支えなければ使用できないという点で、利用シーンの幅を狭めてしまっている。

そこで、課題解決の手段として小型飛行ロボットに注目した。ロボット技術の発展により、掃除用ロボットやセキュリティロボットなど家庭用ロボットの利用が一般的となった。更に、小型飛行ロボットが安価で手に入るようになり、エンターテインメントとして個人で航空写真を撮影することも可能となった。

本論文では軽量の携帯情報端末を飛行ロボットに搭載し浮遊させることで、生活支援ロボットとして携帯情報端末の利便性をより高めるインターフェース「浮遊ノート」システムを提案する。携帯情報端末をセットした飛行ロボットが使用者(マスター)の目的に合わせ、浮遊した状態で携帯端末を利用できるよう自律して行動パターンを決定する。このシステムを利用することで、場所や時間を選ばず端末を操作でき、両手が使えない状況下であっても容易な操作の実現を目指す。

現在の飛行ロボットは、小型化も進み、飛行性能も向上しつつあるがまだ完全とは言いがたい。しかし、携帯情報端末と同様にロボット技術も日々躍進を続け、更なる小型化、安定した自律飛行が見込まれる。将来、一人一台自律行動型飛行ロボットをペットロボットとして所有する時代が訪れた際に、本論文で提案するシステムが大いに真価を発揮する。

以下、本論文は次のように構成される。2 章ではロボット制御で使われる基礎技術について説明し、3 章では生活支援ロボットに使われる関連技術について論じ課題を明確にする。4 章で「浮遊ノート」システムについて提案し、5、6 章で行動パターンから自撮りモード、移動伝言板モードについて提案する。それぞれの機能について、7 章で検証と評価を行う。8 章で既存技術や新しいアイデアと組み合わせた応用例を論じ、9 章で結論を述べる。



図 1.0.1: 耐久性を重視した携帯端末 (カシオ計算機 G-SHOCK PHONE)(文献 [2] より引用)



図 1.0.2: 端末不携帯防止機能を持つブレスレット型アイテム (Princeton ぶるっとゥース)(文献 [3] より引用)

第2章 基礎技術

2.1 ロボットのための画像認識技術

生活支援ロボットには，追跡するといった人間に協調した動作や，物を届けるといった人間をサポートする動作が求められる．このような基本的な動作を実現するために，ロボットの行動制御にはたくさんのセンサデバイスが利用されている．しかし，赤外線や加速度センサのような精度の高いセンサは単体で10万円以上する物もあり，積載したロボットの値段も高価となり家庭での利用は難しくなる．そこで，安価で汎用性の高いデバイスとしてカメラからの入力画像が利用できる．カメラからの入力画像を解析する技術はコンピュータビジョンと呼ばれ，人間の視覚を近似し，周囲の情報を取得することでロボット制御へも応用されている．

コンピュータビジョンによるロボットの制御には，色の認識やエッジの抽出，オプティカルフローの算出，オブジェクトを検出する技術が多く使われてきた．色の認識を行うことでオブジェクト間の境界を明らかにし，エッジ抽出により形状を明確にすることでオブジェクトの外観を取得する．また，学習器を利用することであらかじめ得た情報から，オブジェクトを特定する．特定したオブジェクトのオプティカルフローを算出すると，オブジェクトの動作を予測できる．更に，実際にロボット行動を制御するためには，絶対位置，相対位置の座標取得が必要である．

このように，画像処理によりロボットの行動を制御するために多くの技術が利用されている．2章では，これらの基礎技術について説明する．

2.2 色の認識

2.2.1 色の決定

コンピュータビジョンの分野において色や明るさの知覚は，背景とオブジェクトの分離やシーン分割，オブジェクトの同定と多岐に渡り利用されている．しかし，人間が持つ知覚は非常に複雑な処理によって行われている．

文献 [4] によると，人間は異なった色の領域を区別する際，輝度，色相，彩度の3つの属性によって判断している．輝度とは，無彩色や無色の濃淡画像に使われる属性である．色相とは，日常的な用語としての色の意味を持つ属性である．彩度とは，無彩色と純色の混合量の測度である．

人間が識別する全ての色は，3原色の混合によって合成できる．3原色の公称は赤，緑，青であるため，3つの輝度測定値は R, G, B とされる．輝度，色相，彩度のそれぞれの属性がどのように決定されるかを以下に述べる．輝度 I は，3成分に重みをかけた合計として式 (2.2.1) により求められる．

$$I = c_1 R + c_2 G + c_3 B \quad (2.2.1)$$

定数 c_1, c_2, c_3 は 3 原色の選択と白色についての測定値によって決定される．色相および彩度の成分の計算には，以下 T_1, T_2 2 つの属性を導入する．

$$T_1 = \frac{R}{R + G + B} \quad (2.2.2)$$

$$T_2 = \frac{G}{R + G + B} \quad (2.2.3)$$

3 原色 R, G, B は図 2.2.1 (文献 [4] より引用) に示した $T_1 - T_2$ 平面中の 3 点にあり，これらの点をつないだ三角形を色三角形と呼ぶ．測定されるすべての色はこの三角形の中に収まる．色三角形内の点 P で表された色について，白色である点 $W(1/3, 1/3)$ からの距離 r が彩度を， T_1 軸と P と W を結ぶ線との角度 θ が色相を決定する．

2.2.2 表色系の決定

コンピュータビジョンの分野において，色を識別し表現するにあたり，光源条件や識別する物体に合わせて適切な表色系を用いる必要がある [5]．国際照明委員会 (CIE) が定めた CIE 標準表色系の中でも，XYZ 表色系はコンピュータビジョンにおいてはもっとも幅広い領域の色を表現できるといわれる．人間の知覚を近似する表色系としては，RGB 表色系が一般的である．これらは人間の知覚をコンピュータによって表現する表色系として適しており，多くのコンピュータ画面表示に利用されている．対して，HSV 表色系や HLS 表色系は前節でも述べたとおり，色の認識を行う表色系に適している．入力画像から色の抽出を実行するためには，正確な認識が必要である．よって，カメラ画像から色を抽出する技術には，HSV 表色系や HLS 表色系が多く用いられる．

2.3 エッジ抽出

2.3.1 閾値決定によるエッジ抽出法

コンピュータビジョンの分野において，オブジェクト間の境界線を発見し，オブジェクトの形状解析を行うためにエッジ抽出が必要である．本節では閾値処理によって決定されるエッジ抽出法について説明する．代表的なエッジ抽出法の一つでもある Canny 法 [6] は，提案されてから 30 年近くもの間，最先端の手法として利用されている．あるオペレータにより求めるエッジの点が他の点よりも高い値を出力すると仮定すると，エッジ検出は閾値処理によって容易に行うことができる．画像全体に一樣に働く Wiener フィルタ [7] のような線形フィルタも提案されているが，全体フィルタ手法では画像によってオブジェクトの大きさや分布範囲が異なる場合，適した強調関数を選択することは難しい．

そこで，Roberts の勾配オペレータ [8] に基づき，図 2.3.1(文献 [4] より引用) に示したような濃度値を持つ 3×3 近傍について，一般的な閾値決定によるエッジ強度とエッジ方向を導出する．このとき，勾配の大きさは式 2.3.1 で定義される．

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (2.3.1)$$

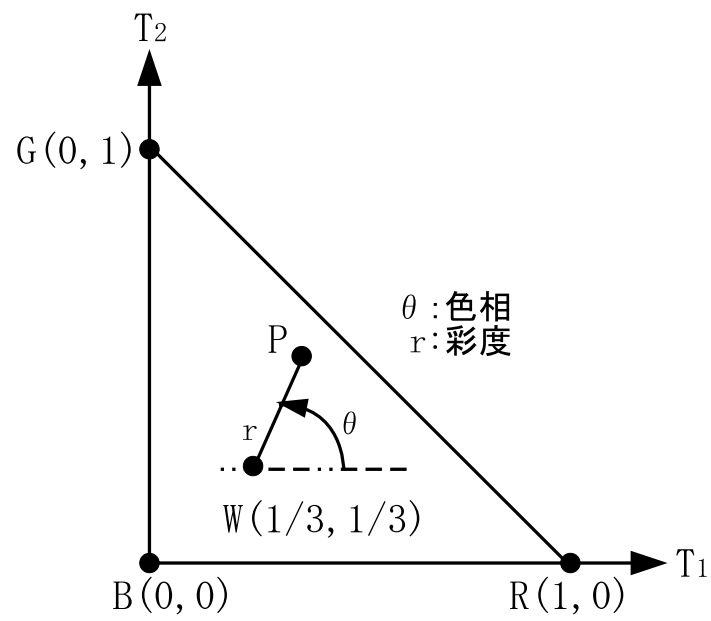


図 2.2.1: 色三角形 (文献 [4] より引用)

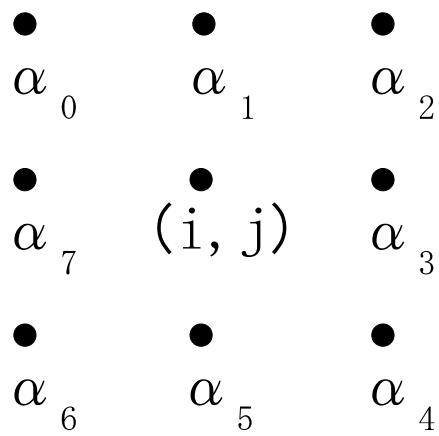


図 2.3.1: 中心画素とその 3×3 近傍 (文献 [4] より引用)

ここで，定数 c を用いて，

$$S_x = (a_2 + ca_3 + a_4) - (a_0 + ca_7 + a_6) \quad (2.3.2)$$

$$S_y = (a_6 + ca_5 + a_4) - (a_0 + ca_1 + a_6) \quad (2.3.3)$$

と表される．定数 c は検出法によって変化する．例として Prewitt の検出器では $c = 2$ が，Canny 法の基となった Sobel 法では $c = 1$ が採用されている．これらの演算において，エッジ方向 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \frac{S_x}{S_y} \quad (2.3.4)$$

で与えられる．これにより，中心画素におけるエッジ強度とエッジ方向が取得できる．これらのオペレータでは，同じ濃度を持ちエッジ方向が異なる場合には，異なるエッジ強度が得られる．

2.3.2 テンプレートマッチングによるエッジ抽出法

理想エッジのテンプレート（エッジマスク）を用いてエッジを検出する直接的手法がある [9]．垂直方向と対角方向のエッジに対応する 2 つの 3×3 のエッジマスクを図 2.3.2(文献 [4] より引用) に示す．Prewitt のエッジ検出器では 8 つのマスクに対し，各々のマスクを用いた整合を行う．すなわち，最高値を示したマスクがその画素におけるエッジ強度を決定し，マスクの方向がエッジ方向を表す．エッジマスクは 3×3 に限定されず，理想エッジの両側にある画素の割合によって決定された値を用いて近似して決定される．

2.4 オプティカルフローの検出

2.4.1 オプティカルフロー検出法の分類

オプティカルフローとは動画像内の見かけの速度場である．コンピュータビジョンの分野においてオプティカルフローの検出は，オブジェクトの運動，静止したオブジェクトを撮影したカメラの運動，またはその両方を解析する手段として多く用いられている．

代表的なオプティカルフロー検出法は，マッチング法，グラディエント法，その他の手法に大別される．また，信頼できるオプティカルフローの情報は，画像の濃淡の強度分布から得られるとする手法，輪郭や点などの画像の特徴から得られるとする手法の 2 通りがある．表 2.1(文献 [10] より引用) に示した各手法について，現在までに様々な改良が加えられている．

2.4.2 マッチング法とグラディエント法の基本式導出

連続する画像フレーム間において，濃淡パターンなど特徴量の対応付けを実行し，得られる変位ベクトルからオプティカルフローを決定する手法はマッチング法と呼ばれる．通常は適当なサイズのテンプレートを参照し，空間相互相関等の解析法により対応付けを行い，オプティカルフローを決定する．

動画像の濃淡分布の空間勾配および時間勾配によってある点におけるオプティカルフローを求める手法はグラディエント法と呼ばれる．以下にオプティカルフローを求める基本式を導出する．動画像の画像関数（濃淡値）を $\rho(x, y, t)$ で表す． x, y は空間座標， t は時間関数である．時刻 t にお

1	1	-1	1	-1	-1
1	-2	-1	1	-2	-1
1	1	-1	1	1	1
(a)垂直方向			(b)対角方向		

図 2.3.2: Prewitt のエッジ検出器 (文献 [4] より引用)

表 2.1: 代表的なオプティカルフロー検出法の分類 (文献 [10] より引用)

	濃淡に基づく手法	特徴に基づく手法
マッチング法	J.A.Leese, C.S.Novak, V.R.Taylor(1970)	S.T.Barnard, W.B.Thompson(1980)
	E.A.Smith, D.R.Phillips(1972)	D.T.Lawton(1983)
グラディエント法	B.K.P.Horn, B.G.Schunck(1981)	L.S.Davis, Z.Wu, H.Sun(1983)
	J.K.Kearney, W.B.Thompson, D.L.Boley(1987)	E.C.Hildreth(1984)

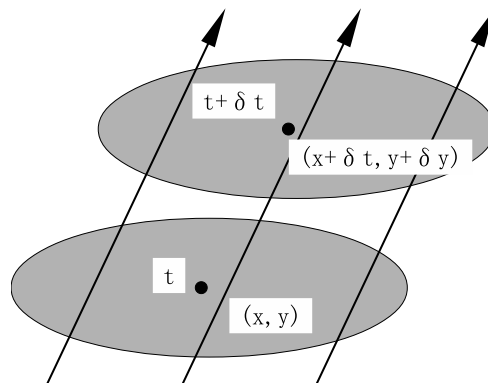


図 2.4.1: 濃淡パターン追跡によるオプティカルフローの定義 (文献 [10] より引用)

いて座標 (x, y) にある濃淡パターンが t 後に座標 $(x + \delta x, y + \delta y)$ に、濃度分布を一定に保ったまま移動したとする (図 2.4.1(文献 [10] より引用)) . そのとき、次式が成り立つ .

$$\rho(x, y, t) = \rho(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (2.4.1)$$

右辺を (x, y, t) についてテイラー展開する .

$$\rho = \rho + \left(\frac{\delta \rho}{\delta x}\right)\delta x + \left(\frac{\delta \rho}{\delta y}\right)\delta y + \left(\frac{\delta \rho}{\delta t}\right)\delta t + O(\delta x, \delta y, \delta t) \quad (2.4.2)$$

$O(\delta x, \delta y, \delta t)$ は $\delta x, \delta y, \delta t$ の 2 次以上の項である . ここでは、 $O(\delta x, \delta y, \delta t)$ は微小であると近似する .

$$\left(\frac{\delta \rho}{\delta x}\right)\delta x + \left(\frac{\delta \rho}{\delta y}\right)\delta y + \left(\frac{\delta \rho}{\delta t}\right)\delta t = 0 \quad (2.4.3)$$

を両辺 δt で割り、次式を得る .

$$\frac{\delta \rho}{\delta x} \frac{\delta x}{\delta t} + \frac{\delta \rho}{\delta y} \frac{\delta y}{\delta t} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad (2.4.4)$$

マッチング法は式 2.4.1 によって動画像中の濃淡パターンの時間的な対応付けを行い、単位時間当たりの見かけの移動量を求めている . マッチング法では δt が有限の値であるが、グラディエント法では δt は無限小とされている . そこで、 $\delta t \rightarrow 0$ として、グラディエント法の基礎式を得る .

$$\frac{\delta \rho}{\delta x} \frac{dx}{dt} + \frac{\delta \rho}{\delta y} \frac{dy}{dt} + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad (2.4.5)$$

2.5 オブジェクト検出

2.5.1 学習器による検出

ロボットを制御するにあたり、人物や物体など対象となるオブジェクトを特定する必要がある . 入力画像から特定のオブジェクトを検出する手法は数多く提案されているが、その多くはある特徴量を用いて作成される学習器による検出である . 学習器の学習方法として、文献 [11] に基づいて、AdaBoost 法を例に説明する . AdaBoost 法とは、それぞれの弱い識別器をつなぎ合わせて強い識別器を作るという学習方法である . AdaBoost 法の概要を図 2.5.1(文献 [11] より引用) に示す . 正解画像が入力された場合、教師信号が重要な識別器に重みを付加する . 非正解画像が入力された場合、教師信号によりその時反応した識別器の重みを小さくする . これらを繰り返すことで、複数の識別器を合わせた大きな学習器を作る .

識別器として、前節で述べたようなエッジや色といった情報を特徴量として用いる場合も多い . しかし、今節では画像の濃淡差に注目し特徴量とした手法を紹介する . 入力画像上の任意の場所に、図 2.5.2(文献 [11] より引用) のような検出窓を設定した場合、検出窓における画像の特徴量は次式により求まる .

$$\text{特徴量} = \text{矩形特徴における黒領域の合計画素値} - \text{矩形特徴における白領域の合計画素値} \quad (2.5.1)$$

この矩形は Haar-Like 特徴 [12] と呼ばれ、約 12 万通りの白黒パターンが組み合わせて用いられる . 組み合わせによって 2.3 節で示したマッチング法として、エッジ特徴や線特徴も抽出できる . 人物の顔を Haar-Like 特徴によって検出する例を図 2.5.3(文献 [11] より引用) で示す . 顔の濃淡画像を見ると、目の領域の画素は周辺よりも濃く、頬の領域、鼻筋の領域の間にそれぞれ濃淡差が生じている . よって、図 2.5.3 で示した検出特徴の特徴量が大きくなる . このような特徴に対し、AdaBoost 法によって強い重みが付加される . その結果、作られた学習器は高速処理が可能であり、精巧な検出が可能である .

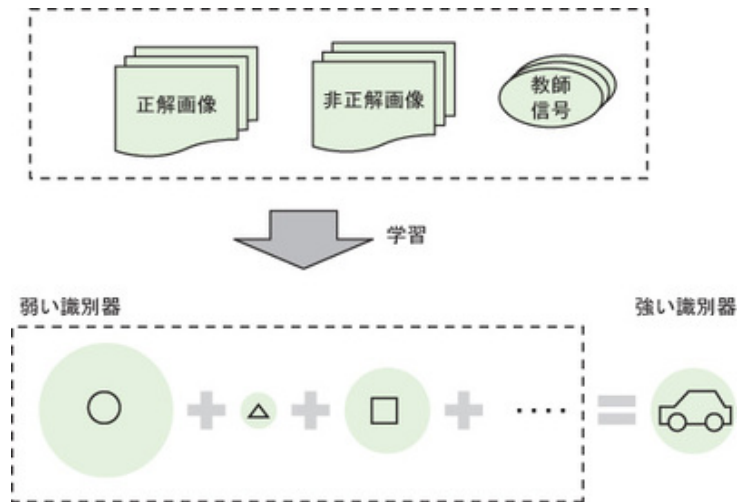


図 2.5.1: AdaBoost 法の概要 (文献 [11] より引用)



図 2.5.2: オブジェクト検出特徴の例 (文献 [11] より引用)

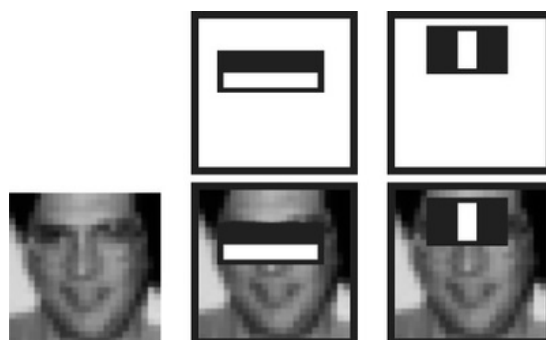


図 2.5.3: 検出特徴を顔に適用した例 (文献 [11] より引用)

2.6 座標変換

ロボットを制御するためには，自己位置を推定する必要がある．自己位置の決定には GPS などのセンサを用いる手法と，前述した特徴量やマーカなどを利用した画像処理による手法がある [13]．画像処理による手法では，ロボットが持つ座標系とオブジェクトの座標系を変換する必要がある．その手法として ARToolKit[14] では，変換行列による座標変換が行われている．図 2.6.1(文献 [14] より引用) に，座標変換の概略図を示す．オブジェクトにあたるマーカとカメラが持つ座標系は別である．そこで，カメラ座標系におけるマーカの位置を与える．図 2.6.2(文献 [15] より引用) に示した変換行列をマーカ座標にかけ合わせることで，マーカの持つ座標系がカメラ座標系に変換される．従って，逆行列をカメラ座標にかけるとマーカ座標系に変換でき，相互的に座標系を変換可能である．

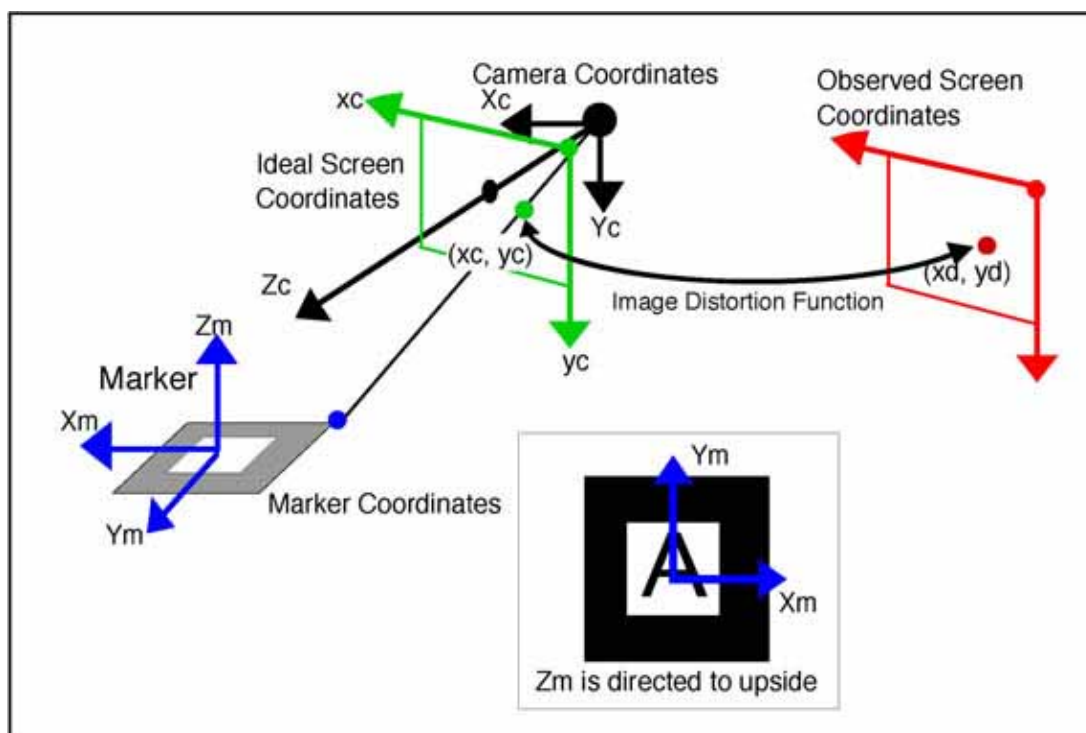


図 2.6.1: 座標系の概略図 (文献 [14] より引用)

$$\begin{array}{c} \text{カメラ座標系} \end{array} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \text{変換行列} \end{array} \begin{array}{cc} \text{回転成分} & \text{並進成分} \\ \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \text{マーカ座標系} \end{array} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix}$$

図 2.6.2: 座標変換行列 (文献 [15] より引用)

第3章 関連研究

3.1 生活支援ロボットに利用されるセンサデバイス

人間の生活支援にロボットを役立てる技術は多く研究されている。それらのロボットには、より正確で、より充実した動作を実現するため多くのセンサデバイスが搭載されている。例として、HONDAが開発しているASIMO(図3.1.1(文献[16]から引用))は、ジャイロセンサ、加速度センサ、力覚センサ、光センサ、超音波センサなど、人間の動作に協調するために10を超えるセンサデバイスを搭載している[16]。それらのセンサデバイスを組み合わせることで、二足歩行を行い、物を運び、楽器を演奏し、人間と会話を行う。また、TOYOTAが開発している生活支援に特化したHSR(Human Support Robot)(図3.1.2(文献[17]から引用))は、ステレオカメラによる三次元情報と距離センサを合わせて用いることで正確な位置の推定を行い、指示されたものを拾い、ユーザの下へ運ぶという動作を実現している[17]。HSRには、オブジェクトの管理、認識のための技術としてインタラクティブマーカが採用されている[18]。従来の技術では様々なセンサデバイスを組み合わせ、補完することで充実した動作を実現するため、ロボットは大型で高価となり、一般家庭での実用は困難である。そこで、安価で単純なセンサデバイスのみを少数組み合わせることで、ロボットの簡略化、低価格化が実現する。その最たるデバイスがカメラ画像である。解像度によって差はあるが、安価な単眼カメラであれば今では数百円で手に入る。

文献[19]は、カメラ画像と赤外線センサ、音声センサを組み合わせることで、人間の動作に協調する小型ロボットを提案している。文献[19]では、画像処理ベースの制御による問題は、背景との特定オブジェクトの分離にあると指摘している。そこで、課題解決としてカメラ画像と赤外線センサを組み合わせることで、モーションをキャプチャし、更に音声による入力を行うことでユーザに負担をかけず、犬や猫などのペットを真似たロボットの行動制御を実現している。

しかし、画像処理の手法によっては、カメラ画像だけを利用してオブジェクトの特定、位置関係の把握、動きの検出が可能である。

3.2 画像処理を利用した走行ロボットの制御

従来の技術では、外部デバイスを利用して作成した三次元位置マップや、内部デバイスであるステレオカメラと距離センサ、赤外線センサなどを組み合わせることで三次元位置の推定を実現してきた。そのため、機器は大掛かりなものとなり、搭載できるハードも限られていた。しかし、場所によらない利用を実現するためには、マーカレス化を目指し多くの人間に対応した制御を行うよりも、ユーザがマーカを着用し、より精密な個人の動きに協調した動作を行うことが必要となる。文献[20]はマーカを利用し、人の後を追跡する医療用ロボットを提案している。図3.2.1(文献[20]より引用)に示したマーカをユーザが腰に装着し、既知長から相対的に距離の推定を行う。追跡のアルゴリズムは図3.2.2(文献[20]より引用)で示されている。アルゴリズム図によると取得画像中のマーカを色と形状から認識し、左右位置と距離の調整を行っている。文献[20]は医療用



図 3.1.1: 2 足歩行ロボット (HONDA ASIMO)(文献 [16] より引用)



図 3.1.2: 生活支援ロボット (TOYOTA Human Support Robot)(文献 [17] より引用)

ロボットとして物を載せて運ぶことを想定しているため、高さや角度は取得せずこれらの動作だけを実現している。

しかし、本論文ではユーザが場所や状況によらず携帯情報端末を使用できるよう支援する動きをロボットに求める。平面だけを移動する走行ロボットでは実現できなかった課題が、飛行ロボットを用いることで解決され、屋内外の差異や段差といった場所による影響をなくすることが可能である。そのためには、画像処理により飛行ロボットを制御する技術が重要となる。

3.3 画像処理を利用した飛行ロボットの制御

画像処理による飛行ロボットの制御には、距離、角度、高さを正確に取得するという課題がある。従来の解決法としては、外部デバイスを利用した三次元マップの作成が一般的であった。文献 [21] では、人間の動きに協調させる手法として、人間が装着した HMD(Head Mounted Display) とロボットの位置を、外部カメラを利用しマーカの三次元絶対座標を取得している。マーカの位置、角度、高さを三次元座標により取得し、ロボットのカメラから得た画像を HMD に投影し視点を共有することで、ロボットと人間の動きを協調させている。しかし、この手法では絶対座標を取得するため、外部デバイスを利用しており、限られた環境でなければ利用できない。

そこで、単一のカメラ画像を利用し、絶対座標を取得せず三次元位置を推定する手法が提案されている。文献 [22] では、単一のカメラで入力した画像にエッジ抽出を行い、画角を計算し消失点を求めることで三次元距離を推定している。階段では連続した段差の画像と踊り場の画像を組み合わせることで、踊り場で U ターンしながら階段を昇降するという動作も実現している。消失点を求める手法は三次元マップを作成する手法に近く、絶対位置に似た座標を取得できる反面、場所の形状をあらかじめ特定する必要がある。また、障害物が多い場所では推定が困難であるという問題点があげられる。

絶対位置ではなく相対位置から三次元方向の制御を実現する研究もなされている。文献 [23] では色の抽出とパーティクルフィルタを組み合わせ、走行ロボットよりも不安定な飛行ロボットを制御している。図 3.3.1(文献 [23] より引用) によると、取得画像からユーザが着用している赤色を抽出し、抽出した領域にパーティクルフィルタをかけ分散を求め、ロボットとユーザの位置を相対的に推定している。単一のカメラ画像だけでは取得が難しい対象物との距離が大まかに算出可能となり、距離が小さければ後退し、距離が大きければ前進するよう閾値を定め、制御を行っている。同文献によれば、この手法でユーザと一定の距離を保つ程度の簡単な動作は実現できるが、角度の取得はできず、また室内利用を想定した正確で精密な動作の実現には外部センサデバイスを利用した三次元位置の取得が必要である。

これまでの既存研究により、画像処理のみによるロボット制御は実現可能といえるが、正確な距離、角度の取得は実現できていない。飛行ロボットを生活支援ロボットとして利用するためには、より充実した動作のため精度の高い制御を行う必要がある。高精度な制御の実現のため、正確な距離、角度を取得することが課題となる。

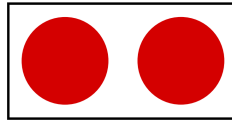


図 3.2.1: ユーザが装着したマーカ（文献 [20] より引用）

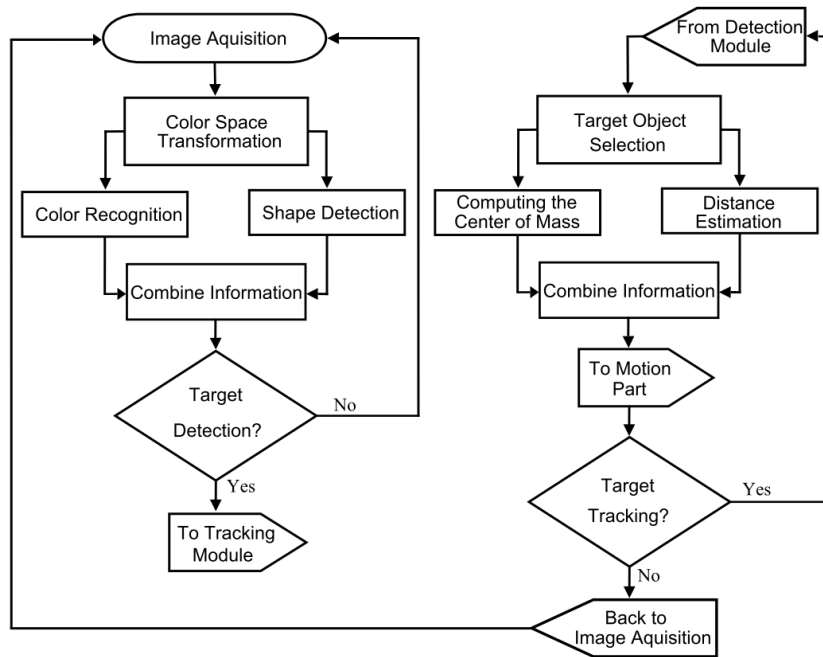


図 3.2.2: マーカ発見モジュールと追跡モジュールのアルゴリズム図（文献 [20] より引用）

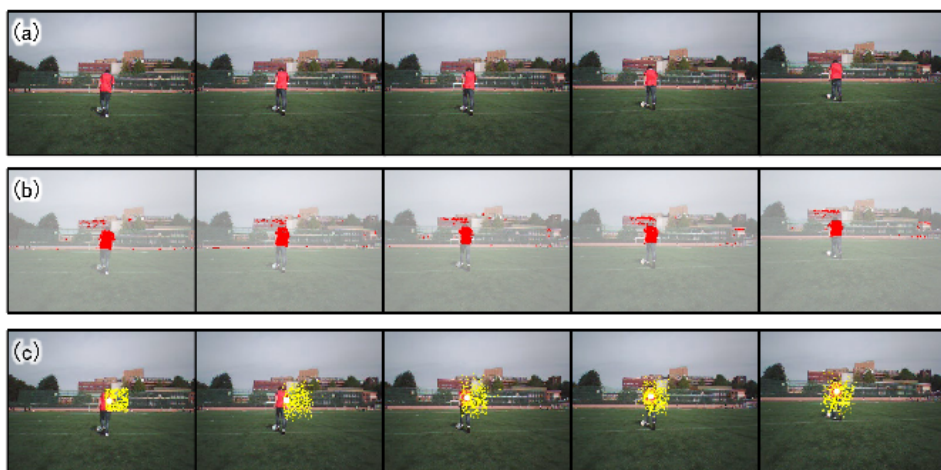


図 3.3.1: 色抽出とパーティクルフィルタによる追跡の様子（文献 [23] より引用）

第4章 「浮遊ノート」システム

4.1 「浮遊ノート」システムの提案

場所や時間を選ばず携帯情報端末を操作でき、両手が使えない状況下でも容易な操作を実現するため、飛行ロボットに携帯端末を括り付けた「浮遊ノート」を提案する。図 4.1.1 のようにロボットが浮遊することで、端末を片手で支える必要がなくなり、指一本での操作や両手を使わずに表示を確認することが可能となる。浮遊ノートとして提案する行動パターンの例を表 4.1 に示す。

表 4.1: 行動パターンの例

モード	行動制御
追跡 (通常)	マスターの背後を一定距離で追跡する
浮遊表示・入力	マスターの命令により携帯端末を操作しやすい位置へ移動させる
探索	マスターに代わり遠方や高所を探索し記録する
自撮り撮影	マスターの正面顔を背景とともに撮影する
浮遊伝言板	特定人物を搜索し、追いかけて伝言を表示する
見回り	マスターの周辺にいる不審人物を報告する
ストーカー警告	探索の結果、発見した不審人物へ警告する

提案する行動パターンは、ロボットの動きにより実現するペットロボットとしての行動、携帯端末の操作を補助するための行動、それら 2 つを組み合わせた行動に大別される。表 4.1 で示した行動パターンの例において、追跡、探索はペットロボットとしての行動であり、浮遊表示・入力、自撮りモードは携帯端末操作の補助のための行動である。浮遊伝言板、見回り、ストーカー警告は、それら 2 つを組み合わせた提案システムならではの行動である。このように提案手法では、端末操作の補助、端末の代替操作、端末のみでは実現できなかった操作の全てを、単一の浮遊ノートシステムにより実現している。ペットロボットとしての基本動作である追跡モードについては本章にて、携帯端末操作を補助する自撮りモードについては 5 章にて、組み合わせにより実現する浮遊伝言板モードについては 6 章にて提案を行う。

浮遊ノートシステムの有効性を評価するために、プロトタイプの実装を行った。飛行ロボットには AR.Drone (図 4.1.2) [24] を、携帯端末には iPod touch (図 4.1.3) [25] を用いて実装を行った。AR.Drone には次世代型として AR.Drone2.0 も発売されており、それぞれ正面に持つ単眼カメラのサイズが異なる。初期型では 640 × 480、AR.Drone2.0 では 1280 × 720 の単眼カメラを有する。本体が Wi-Fi 親機となり、取得した画像をサーバに送り、サーバからリアルタイムに行動制御を行うことが可能である。制御方向は図 4.1.4 に示した pitch, roll, yaw, gaz の 4 軸方向である。iPod touch は重さが 88g と軽量であることから実装に適していると判断した。



図 4.1.1: 「浮遊ノート」の使用イメージ図



図 4.1.2: AR.Drone



図 4.1.3: iPod touch

4.2 基本動作となる追跡モードの実装

前節で述べたプロトタイプの実装が本研究の評価に適しているか判断するために、ロボットの基本動作である追跡モードについて行動制御を行う。ロボットの行動制御には自己位置の推定とマスターの識別が重要となる。自己位置の推定には、2章で論じた通り対象物の形状とカメラとの相対関係が既知である必要がある。プロトタイプの実装ではARマーカを利用し、ARToolKitのライブラリを用いた。文献[14]にあるとおり、ARマーカの検出、一致度の比較による認識、マーカ位置の取得、マーカとカメラの座標変換がARToolKitにより実現可能である。そこで、マーカとカメラの座標を逆変換することで、マーカの位置からカメラの位置を推定できる。提案システムでは、ARToolKitにより相対位置の推定と、マスターの識別を行う。

追跡モードの制御アルゴリズムを図4.2.1に示す。ロボットは自己位置を推定することで、マスターの背中にあるマーカを追跡する。まず、ARToolKitにより、マーカからマスターの識別を行い、座標変換により相対位置を取得する。ロボットが持つカメラからの入力画像は、x軸がroll、y軸がgaz、z軸がpitch、angleがyawにそれぞれ対応している。取得した相対位置からz軸方向にあたる距離、y軸方向の高さを調整し、マーカに対し平行となるよう角度を調整する。左右位置の調整によりマーカが中心に来るように制御することで、マーカとロボットの持つカメラの相対位置を一定に保つ。提案システムでは、リアルタイムでマーカから自己位置を推定し、それぞれの軸に対して閾値を定め、閾値を超過した場合フィードバック制御を行うことで追跡を実現する。

更に飛行ロボットの性質上、ロボットが外的要因によって意図しない方向に流れてしまい制御が命令に追いつかない場合が想定される。そこで、図4.2.2に示した通り、1フレーム前とマーカの位置を比較することで、実際に機体が動いている方向を算出し、想定外の方向に流れることを防止する。現時点での命令と実際に動いている方向が一致しているかの判定は図4.2.3のように、その時の入力画像上に投影する。処理により送られるはずの命令方向を軸上に長線で表し、前フレームとの比較により命令通りの方向へ機体が動いている場合は薄色短線で、命令に反している場合は黄短線で表している。つまり、黄短線は意図したとおりに機体が動作していないことを示す。よって、黄短線で表された方向への命令を一度打消し、意図しない動きが止まり次第、行動命令を再開する。

既存手法では画像処理により飛行ロボットを制御する場合、内部カメラだけではなく屋外ならGPS、屋内なら外部カメラと赤外線センサを組み合わせることで三次元位置を推定している[26]。このように、ハードウェアに予めセンデバイスを積んだロボットであっても、設備を整えた限られた状況でしか制御できない。しかし、提案手法ではロボットの持つ単眼カメラのみを利用して制御を行う。三次元の絶対位置を取得しないため、従来の手法に比べて不安定となることが予想される。その状況下で、マスターの意図したとおりにロボットの動作を制御する必要がある。

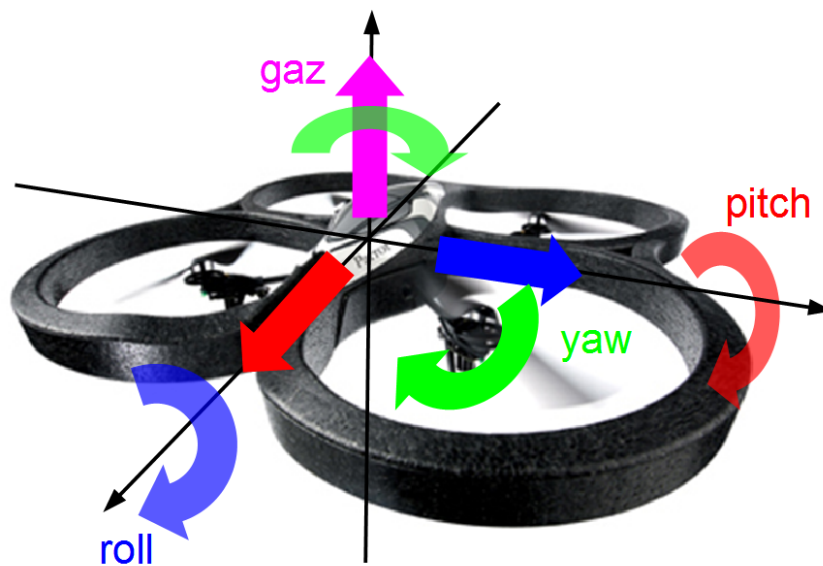


図 4.1.4: AR.Drone の制御軸

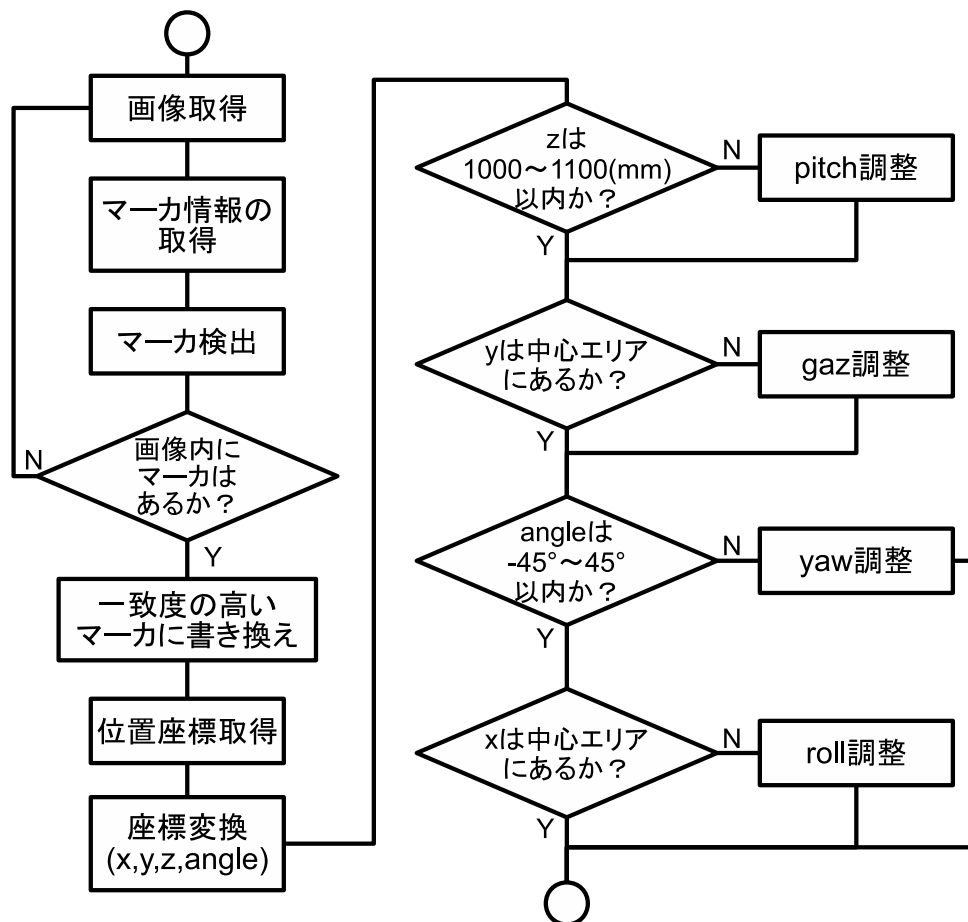


図 4.2.1: 追跡モードの制御アルゴリズム図

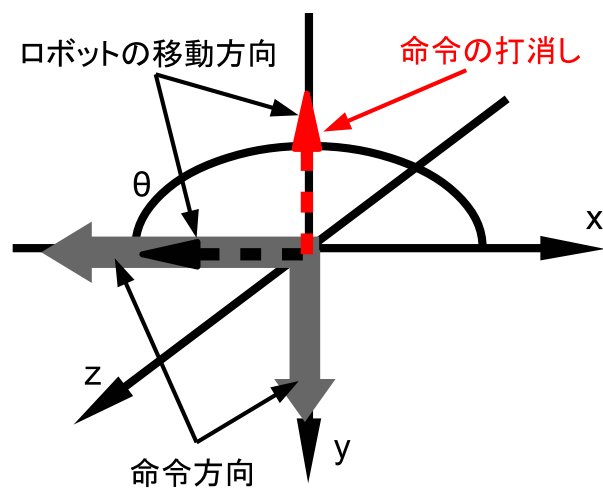


図 4.2.2: 相対位置の取得による命令の打消し

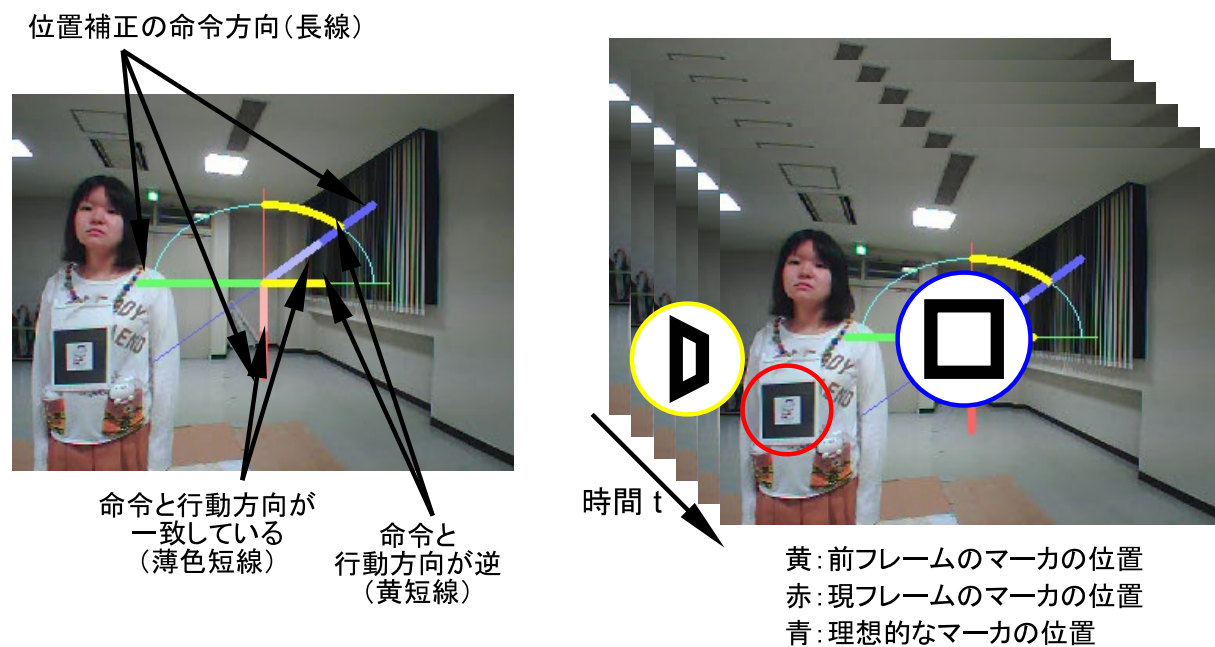


図 4.2.3: 意図しない動きへのフィードバック制御

第5章 自撮りモードの提案

4.1 節で示した浮遊ノートの基本機能の一つ、自撮りモードについて実装を行う。まず不安定な機体上でも鮮明な画像を取得できる自撮り支援システムを提案する。そのシステムを浮遊ノートへ実装し、自律飛行によって自撮り写真を撮影するシステムを提案する。

5.1 自撮り支援システム

飛行ロボットで自撮り写真の撮影を行う場合と、手持ちカメラで画面を確認せずに自撮りする場合に想定される問題は類似している。フレームアウトや、顔の位置が中心でない問題、手振れや被写体の動きによる問題である。そこで、顔検出とエッジ抽出を利用して誰でも簡単に鮮明な自撮り写真を撮影できるシステムを提案する。

顔が中心に配置され、顔部分が鮮明である写真をベストショットと定義する。このベストショットを手軽で確実に得られるシステムの実現を目指す。鮮明さの評価としてエッジの抽出量を用い、顔領域のエッジ画素数を鮮明度と定義する。提案システムのアルゴリズムを図 5.1.1 に示す。まず、数フレーム間隔で複数の画像を取得する (i)。取得した画像群から顔が中心領域にない画像、正面を向いていない画像を除外する (ii)。顔領域を切り出し (iii)、エッジを抽出する (iv)。抽出したエッジを二値化し、エッジ部分の画素をカウントして鮮明度を算出する (v)。最も鮮明度が高い画像をベストショットとして選出する。ROI (関心領域) を顔部分に限定して適用することで、カメラ側のぶれだけでなく、被写体の動きによるぶれを防ぐことが可能となる。このシステムを利用することで、手持ちカメラであれば顔の前でカメラを 2~3 秒左右に振るだけでベストショットが取得できる。飛行ロボットへの実装であれば、顔が画面内にある画像が取得できればベストショットを取得可能である。つまり、ユーザが行うべきは画像を取得するための行動のみであり、本システムを利用することで容易にベストショットを撮影できる。

5.2 提案手法の実装

本システムは、2 章で説明した手法を利用している。顔検出には Haar-Like 特徴を、エッジ抽出には Canny 法を用いて開発した。Haar-Like 特徴を用いた顔検出は、白と黒から成る単純な検出器を利用するため、他の顔検出法に比べ計算速度が速く、光源条件にも堅牢である。外出先では屋内外により光源条件が大きく変化するため、本システムの手法に適している。閾値によるエッジ抽出法の一つである Canny 法は、画像の細線化とヒステリシス閾値によって、細かく弱いエッジを誤検出や未検出も少なく抽出できる。本システムにおいてエッジ抽出は複雑な顔領域に行うため、角度やエッジ強度に左右されない Canny 法が適している。

5.3 浮遊ノートへの実装

自撮り支援システムを浮遊ノートへ実装し，自律飛行により両手でポージングした自撮り写真の撮影を可能にした．ロボットの動きを図 5.3.1 に，ロボット制御のアルゴリズムを図 5.3.2 に示す．自撮りモードに移行した後，ロボットは横方向に水平移動し，マスターを避けるように前進する．水平距離と前進距離は，経験により固定値を与えているが，外的要因により到達位置は毎回同じであるとは限らない．そこで，マスターより前方で旋回し，まず前面に装着した前面マーカを探索する．前面マーカを発見するとマスターから常に一定な相対位置を取得できるため，マーカに合わせ距離，角度，左右位置の調整が可能である．マーカが中心になると，ロボットは上昇し顔の位置に合わせ高度を調整する．上半身が画面内に入り，顔位置が中心であるという判断により，自撮り支援システムへ移行する．

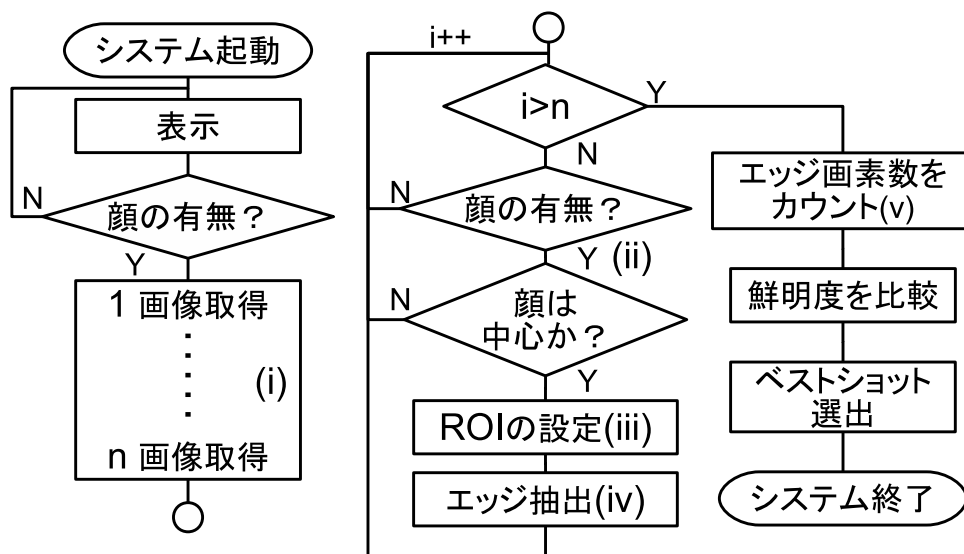


図 5.1.1: 自撮り支援システムのアルゴリズム図

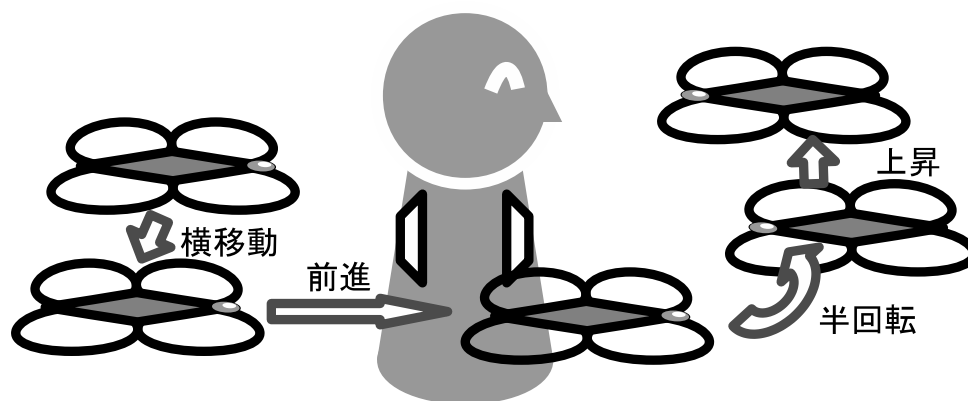


図 5.3.1: ロボットの動き

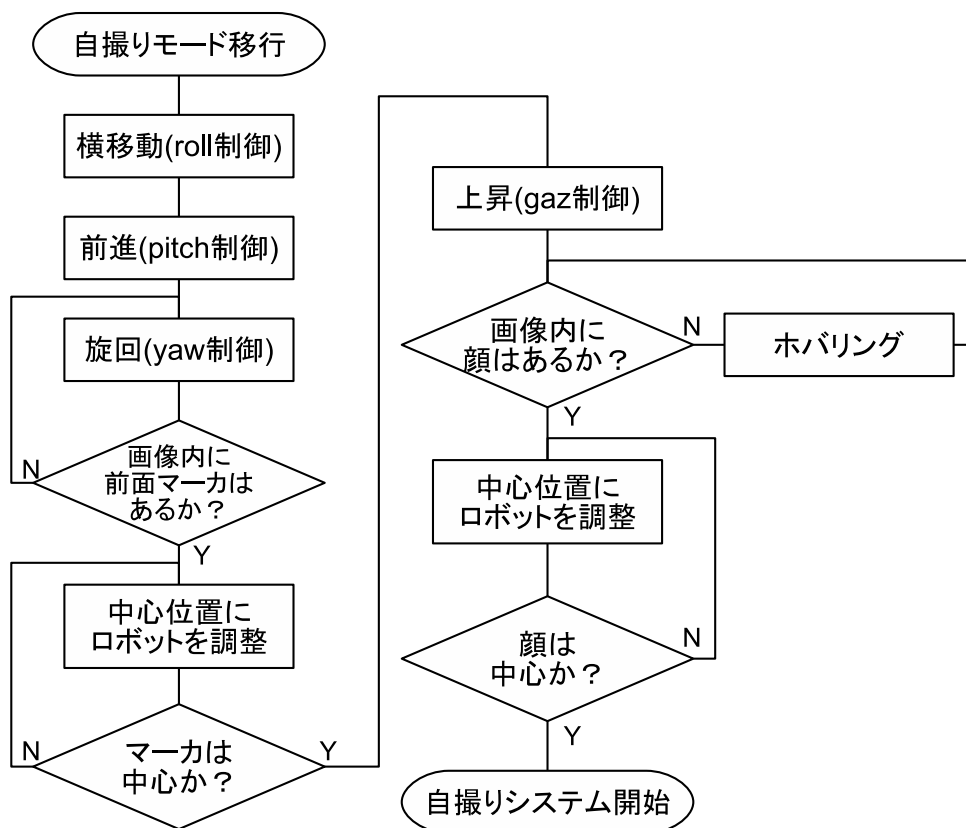


図 5.3.2: ロボット制御のアルゴリズム

第6章 浮遊伝言板モードの提案

4.1 節で示した浮遊ノートの基本機能の一つ、浮遊伝言板について実装を行う。情報端末での操作を安定して行えるよう、飛行ロボットをマスターに合わせて浮遊させる。浮遊した状態で読み書きできるシステムと、入力した文字を特定の他者へ伝達するシステムを提案する。

6.1 システム概要

浮遊した状態で端末を利用するために、ロボットをマスターの腰の高さで浮遊させ続ける。図 6.1.1 のように腰の高さであれば、マスターは机で読み書きするときと同様の体勢で操作が可能となる。浮遊表示・入力モードのプロトタイプでは、端末の操作は表示された情報の読み取りと手書きメモの二種類の機能に限定する。これらの機能では、スマートフォンでの基本操作、タップ（指で一度軽く触れる）、フリック（画面を軽くなでる）、ドラッグ（タッチしたままなぞって指を離す）、マルチタップ（2本の指を使った操作）が必要となる。浮遊した状況下で、これらの基本操作の安定した実現を目指す。

6.2 提案手法と浮遊ノートへの実装

操作しやすい腰の高さはユーザによって大きく変化する。そのため、ロボットはユーザに合わせて自動で高さを調節する必要がある。ロボット制御のアルゴリズムを図 6.2.1 に示す。マスターの腰の高さでロボット浮遊させるために、上昇し前面マーカを探索する。マーカが見つからない場合は、旋回により探索を行う。マーカに合わせ位置調整を行い、マーカを中心とした状態でモードが終了するまでホバリングを続ける。端末を上面に載せることで、その重さによりロボットは非常に不安定な状態となる。その状態で通常使用する場合と同様に端末が利用できるかを 7.3 節と 7.4 節で確認する。

6.3 浮遊伝言板プロトタイプ

マスターが書いたメモを特定の他者へ伝言するシステムを浮遊伝言板と名付ける。他者まで伝言し、元の位置に戻る動作についてロボット制御のアルゴリズムを図 6.3.1 に、ロボットの動きを図 6.3.2 に示す。マスターのマーカを A、もう一人のマーカを B とする。マスターから伝言を送る場合を往路、マスターが伝言を受ける場合を復路とする。まず、浮遊表示・入力モードと同様に、上昇しマスターの腰の位置にあるマーカ A に合わせ、位置調整を行いホバリングする。マスターがメモを書き次第、復路に移行する。復路では 180°旋回し、前進する。往路と同様に、今度はマーカ B を探索し、見つからない場合旋回を行う。発見したマーカ B に合わせ位置調整を行いホバリングする。メモが入力され次第、往路に移行し同様の行動を行う。マスターと伝言を受ける



図 6.1.1: 浮遊表示・入力の使用イメージ図

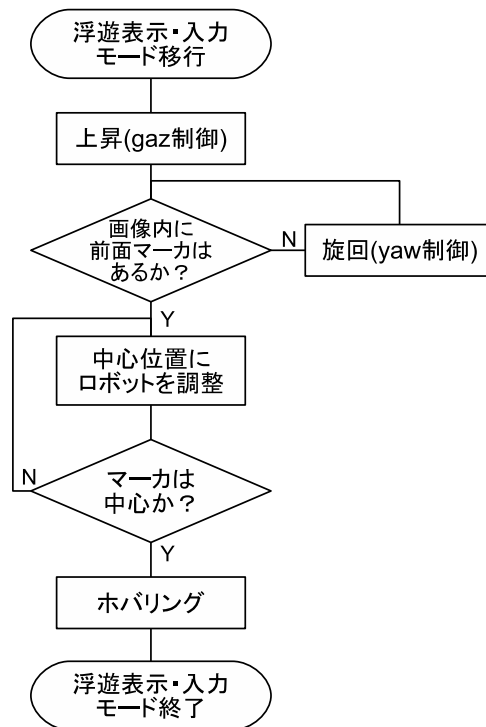


図 6.2.1: 浮遊表示・入力のアルゴリズム図

相手のマーカをそれぞれ変え，個人識別を行うことで，マスター以外の人間を特定し，往路と復路で行動を区別している．提案手法により自律飛行によって情報を伝達することで，離れた距離での伝言が容易となり段差や高さなどユーザ間の障害に影響せず利用できる．しかし，端末は不安定となるため，その状況で情報の正確な伝達が可能かを 7.5 節で確認する．

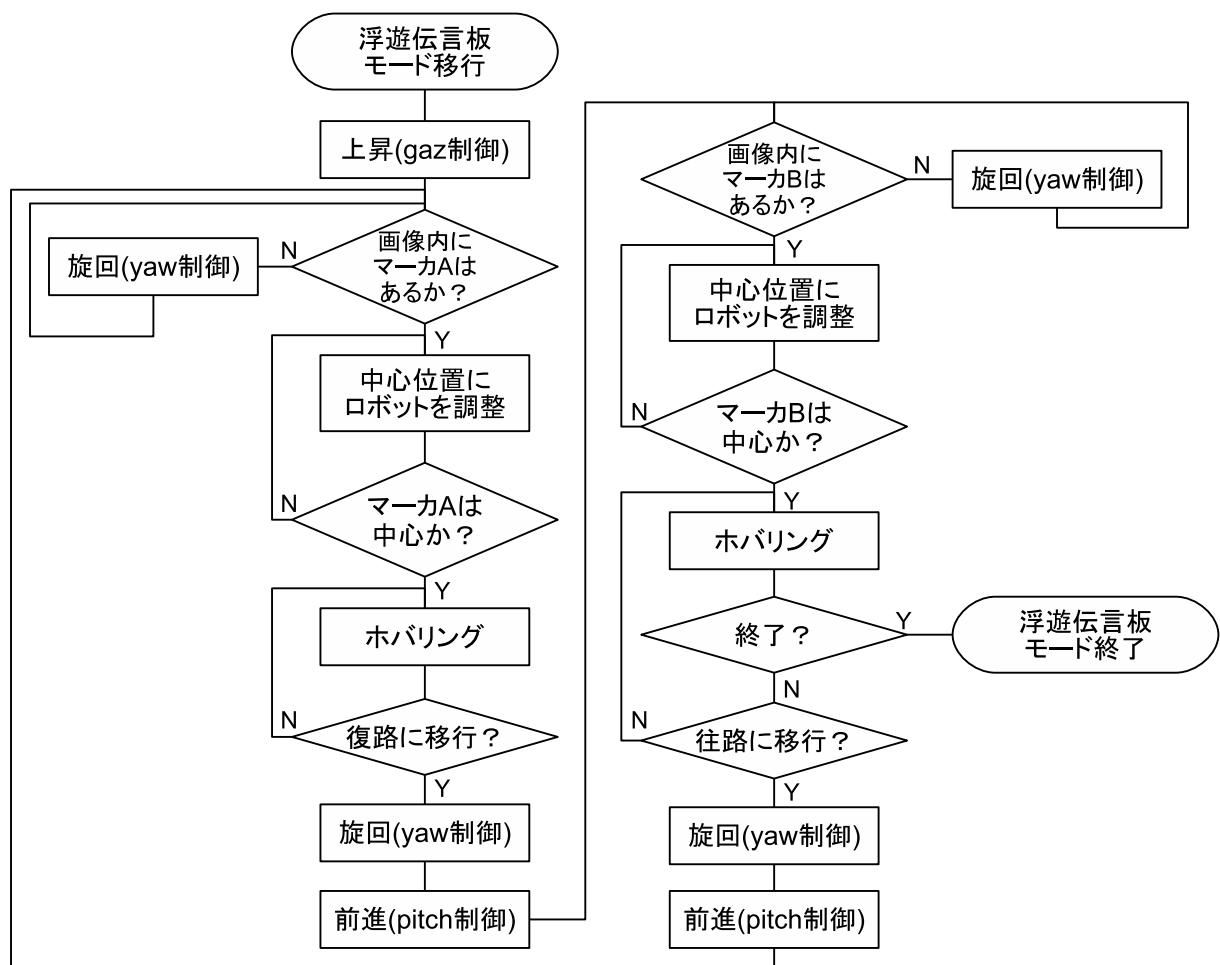


図 6.3.1: 浮遊伝言板のロボット制御アルゴリズム

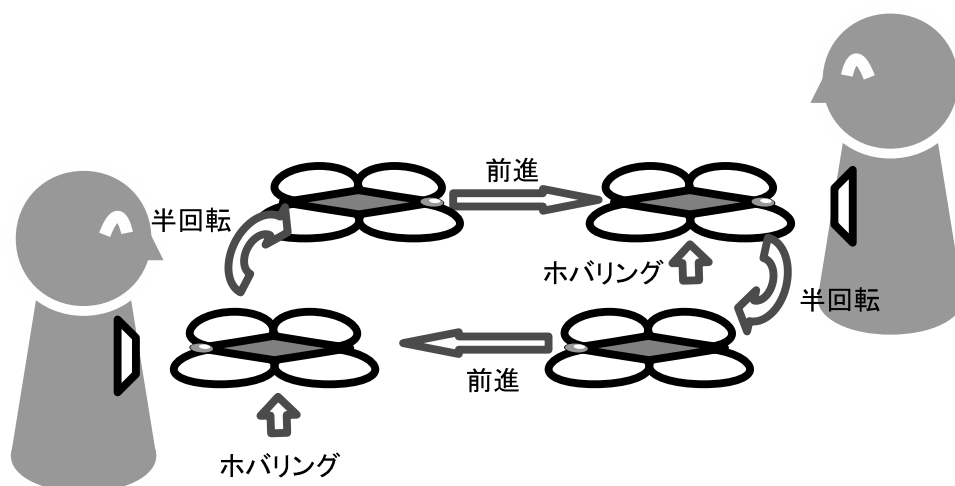


図 6.3.2: 浮遊伝言板モードでのロボットの動き

第7章 提案システムの評価実験

7.1 追跡モードの評価

浮遊ノートの基本動作の一つであり、通常時の動作でもある追跡モードについて検証を行った。飛行中のロボットから見た被験者の様子を図 7.1.1 に示す。マーカから相対的に自己位置を推定していることがわかる。実験では図 7.1.2 に示した 2 つのマーカを用いた。被験者は前後で異なったマーカを図 7.1.3 のように装着し、ロボットの前方を歩行する。歩行距離は 3m (曲がり角の試験では 1.5m+1.5m) として、図 7.1.4 に示した直線、曲がり角、段差の 3 か所について検証を行った。成功の可否は歩き終わりのフレームでマーカが検出できているかの判定を行った。被験者数は 5 人、試行回数は 2 回ずつで計 10 回検証を行った。それぞれの場所での成功率を表 7.1 に示す。

表 7.1: 追跡モードの成功率 (左：1 回目，右：2 回目)

被験者	直線		曲がり角		段差	
A	×		×		×	
B			×	×		
C	×				×	
D						×
E				×		×
平均 (%)	80		60		60	

直線に注目すると、1 回目の試験では失敗だった被験者 A と被験者 C が 2 回目では成功している。これは、人間側がわずかに歩くスピードを遅くし、ロボットに合わせ調整を行ったためである。曲がり角と段差では、直線に比べ成功率が低下している。これは、被験者とロボットが十分な距離を取れず見失ったまま動作を停止してしまうためである。しかし見失ってから何秒後であっても、被験者を再び発見した場合は追跡を再開する。そのため、歩行距離 3m を超えて歩くことで被験者を再発見する例も見られた。つまり、屋内外や部屋の広さといった使用状況に合わせ、マスターとロボット間の的確な距離、速度を設定することにより更なる成功率の向上が見込まれる。検証の結果、直線での試験では 80 % が成功し、その他の箇所においても 60 % 以上の成功率が得られたため、提案システムによって追跡動作が可能であることを確認した。

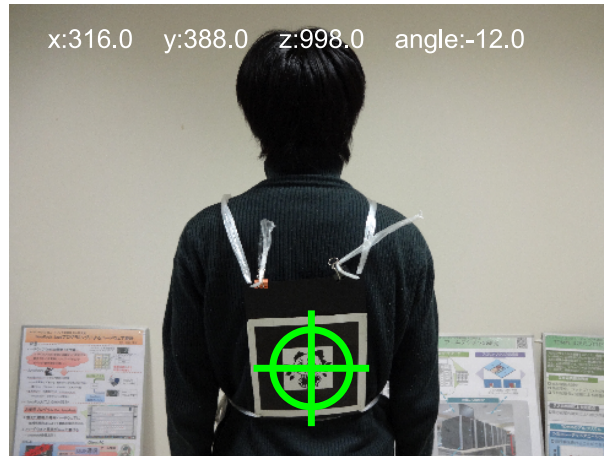


図 7.1.1: ロボットから見た被験者の様子

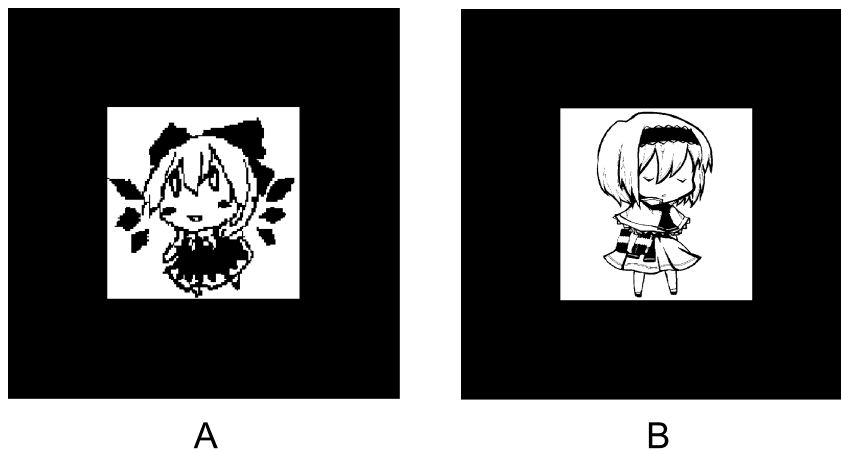


図 7.1.2: 実験に使用したマーカ



正面

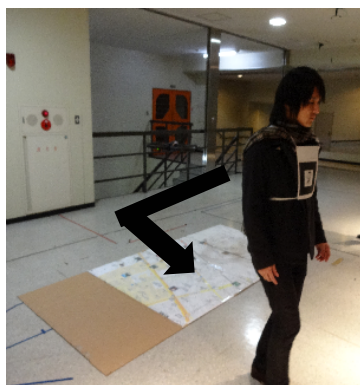


背面

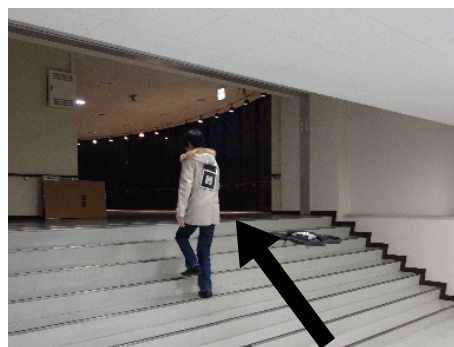
図 7.1.3: マーカを装着した様子



直線



曲がり角



階段

図 7.1.4: 測定箇所

7.2 自撮りモードの評価

7.2.1 自撮り支援システムの評価実験

浮遊ノートの機能の一つである、自撮りモードについて検証を行った。初めに、手持ちカメラを用いて自撮り支援システムについて検証した。被験者はカメラを手に持ち顔の前に構え、自由に自分の顔の前で左右に振る。ただし、極端に早く振る、顔を故意に逸らすという行為は、実際の使用方法と異なるため事前に禁止している。被験者 10 人で合計 25 回の試験を行った。被験者が操作を開始してから 200 フレームの間に、40 枚の画像を取得した。本システムを用いることで、全ての試験において、顔が中心にあり且つ鮮明な画像がベストショットに選ばれた。図 7.2.1 に示したベストショットの例より、ROI を設定したことで背景がぶれていても顔部分は鮮明なベストショットが取得できたことがわかる。よって、本システムを利用すると、特別な練習や操作の必要なく、ただ顔の前でカメラを数秒左右に振るだけで鮮明な自撮り写真が取得できる。

次に、本システムにおいて、顔位置の取得と鮮明度の遷移、また、そのときの取得画像とエッジ画像の様子を図 7.2.2 に示す。丸で示した画像がベストショットである。顔が中心位置になく正面を向いていない場合は、鮮明度は取得していない。取得した鮮明度もカメラの動きにより大きく変化しており、鮮明度が低い画像では顔部分がベストショットに比べ不鮮明であることがわかる。よって、例として示した 4 枚の画像の内、得られたベストショットが最も顔部分において鮮明で、中心であることが確認できた。

次に、取得間隔は変えず、システムを適用するフレーム数を 5～200 に変化させた。そのときの成功率の変化を図 7.2.3 に示す。試行回数はいずれも 10 回ずつで、成功か否かの判定は、顔が中心にあるか、顔領域が鮮明であるかを目視で判断した(図 7.2.4)。所要時間は、実験に使用したカメラが 60fps であることから、被験者が操作を開始し撮影を終えるまでのフレーム数により算出した。所要時間が 1 秒を切ると成功率が極端に下がり、2 秒程度の撮影で 8 割以上の成功率を得られることがわかる。以上より、本システムを利用することで、顔の前でカメラを振るだけで鮮明な自撮り写真を取得でき、撮影にかかる所要時間も 2 秒程度と手軽であることが確かめられた。

7.2.2 浮遊ノートでの評価実験

提案した自撮り支援システムが有効であることが証明されたため、浮遊ノートとして自撮りモードにシステムを組み込み検証した。被験者は追跡モードと同様に前後で異なったマーカを身に着け直立し、その様子をロボットから撮影した。被験者 3 人で合計 5 回の試験を行った。撮影が開始されてから 100 フレームの間に 20 枚の画像を取得した。その結果、自律飛行による不安定な機体上から取得した画像であっても、本システムを使えば鮮明な写真が取得でき、両手でポーズングした自撮り写真も撮影も可能であった(図 7.2.5)。

次に、普段人間が撮影できない地点からの撮影を行う。被験者は階段の手前に直立し、その様子を飛行ロボットから撮影する。飛行ロボットはマーカに合わせて上昇し、被験者の顔を探索して自撮りモードへ移行する。実装に利用した AR.Drone が持つ、自動高度調整機能は解除することが不可能なため、提案手法による上下位置の調整が働かず不安定な動きとなる。しかし、不安定な機体上からでも、人間が撮影できない場所からの自撮り写真も撮影可能であった(図 7.2.6)。



図 7.2.1: 手持ちカメラで得られたベストショット

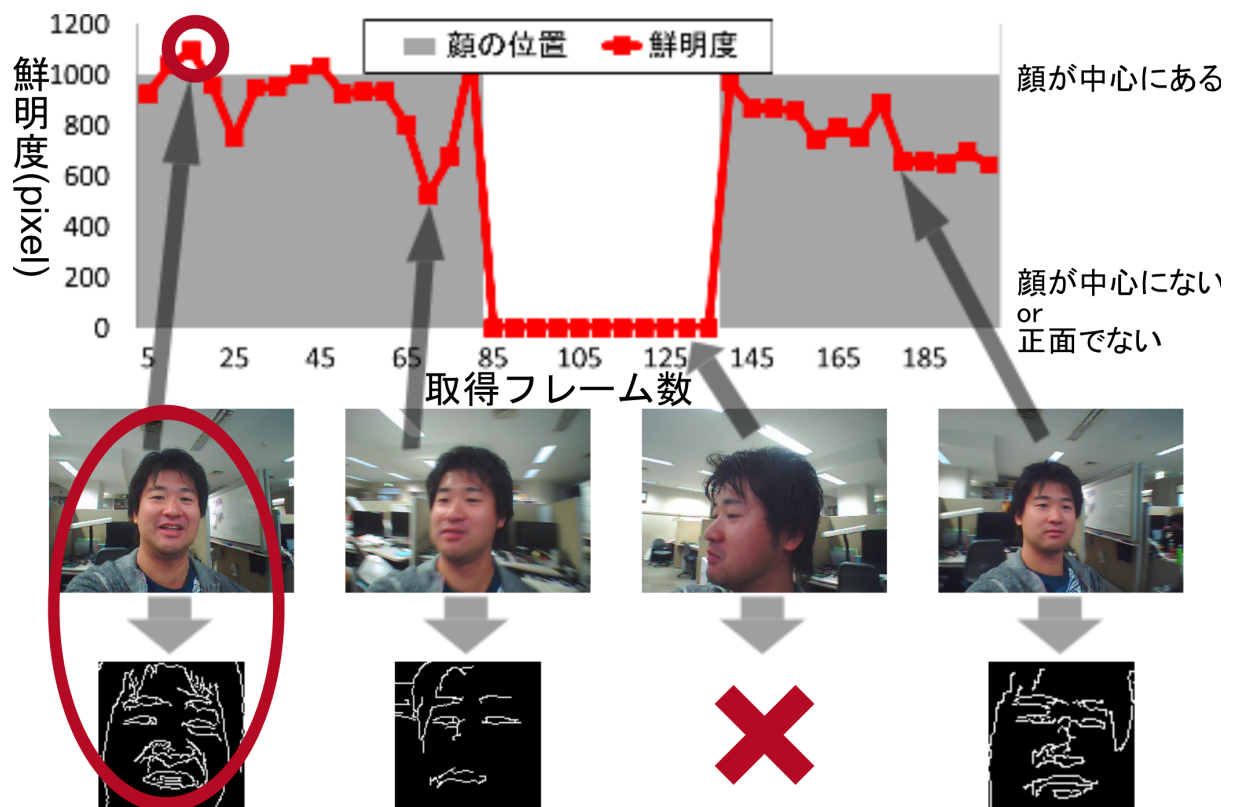


図 7.2.2: 顔位置の取得，鮮明度の遷移

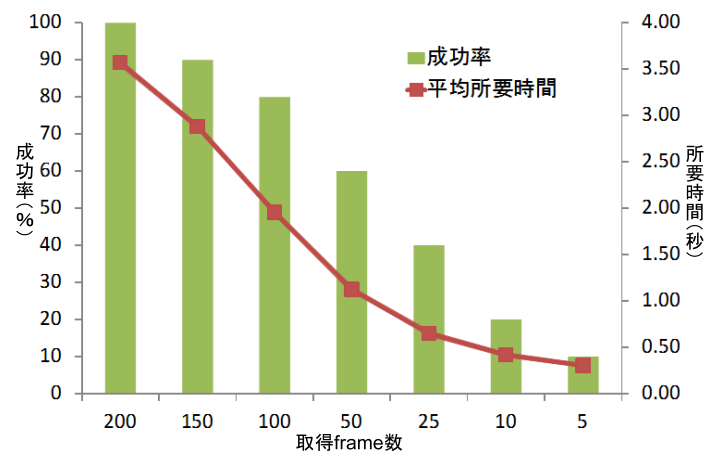


図 7.2.3: 成功率の変化



NG

OK

図 7.2.4: 目視判断の例



図 7.2.5: 平地で撮影したベストショットの例



実験の流れ



取得したベストショット

図 7.2.6: 階段上で撮影した様子と取得したベストショット

7.3 浮遊表示モードの評価

浮遊ノートの機能の一つである浮遊表示モードについて、不安定な機体上の文字を読むことができるかの検証を行った。被験者は前面にマーカを装着し直立し、提案手法によりそのマーカが中心となるようロボットをホバリングさせる。ホバリングしているロボットの上部に端末を載せ、ランダムな文字列を表示する。文字列のフォントサイズを 9px から 160px の間で変化させ、少しずつ大きくしていく。被験者は文字の判読可能なサイズを申告し、文字列を音読する。その文字列が正解であれば、判読可能であると判断する。表 7.2 にフォントサイズの例を示す。

表 7.2: フォントサイズの例

フォントサイズ (px)	表示例
8	ABCDEFGG
9	ABCDEFGG
10	ABCDEFGG
15	ABCDEFGG
20	ABCDEFGG

被験者数 6 人で試行した結果、全員が最初に表示した 9px(9px = 6.75pt) から判読可能であった。我々が普段目にする新聞の文字サイズは 9.5pt, px で表すと 12px である。つまり 9px は新聞の文字サイズよりも小さく、端末に表示できる最大文字数も 5000 以上である。ユーザが端末から情報を読み取るために必要なフォントサイズは明らかに 9px よりも大きいため、提案手法により情報の読み取りが十分可能であることが確認できた。

次に、操作性の検証のため、料理サイト [27] のメニューを端末に表示し、被験者がメニュー名を解答できるかを実験した。メニューはカレーライス、ハンバーグ、餃子、肉じゃが、オムライスの中からランダムで表示した。表示したメニューの一例を図 7.3.1 に示す。1 ページ目にメニュー名と材料、2~3 ページ目に作り方、4 ページ目にはトップページのリンクや著作といったページ情報が書かれている。全試験で 4 ページ目を表示した状態で試験を開始した。被験者は通常の端末操作と同様に、フリックしてページを変え、マルチタップによって拡大表示し、メニュー名を表示する。被験者数は 6 人で、そのうち正解者は 5 人であり 83 % が正解することができた。失敗した 1 人は浮遊中の操作によりロボットのホバリングが乱れ、機体が大幅に左右に流れ緊急停止を行ったためである。実験の結果、安定して浮遊した状態での端末の簡単な操作と情報の読み取りは支障なく行うことができることを確認した。

7.4 浮遊入力モードの評価

浮遊ノートの機能の一つである浮遊入力モードについて、浮遊している機体上の端末に手書き文字を書くことができるか検証を行った。被験者は前面にマーカを装着し直立し、提案手法によりそのマーカが中心となるようロボットをホバリングさせた。ロボットの上部に載せた端末にはペイントソフトのキャンパスを表示させた。被験者はロボットが浮遊した状態と、片手のみで端末を支えた状態で同じ 3~5 文字の英単語をキャンパスに手書きで入力する。被験者数 6 人で 2 回ずつ試行した。浮遊ノートへの入力と、片手のみで操作した場合の入力を図 7.4.1 で比較する。片

手のみで操作した場合では指の長さや手の大きさによってディスプレイ全体を利用することは難しいことがわかる．対して，提案手法ではディスプレイ全体を利用できている．ただし，端末の重さにより機体が不安定となるため，曲線を書くという繊細な操作は困難である．これは飛行ロボットの重量制限とディスプレイサイズに原因があり，今後ロボットの安定性が向上し，更に大きなディスプレイサイズの端末を搭載できるようになれば解決する課題である．

7.5 浮遊伝言板モードの評価

浮遊表示モードと浮遊入力モードの機能を足し合わせた浮遊伝言板モードについて，正確な情報伝達が可能か検証を行った．被験者Aと被験者Bはそれぞれ異なったマーカを前面に装着し，3m離れて向かい合って直立する．実験の流れを図7.5.1に示す．最初に被験者Aの正面にロボットを浮遊させ，Aが3～5文字の英単語を手書きで入力する(i)．Aが書き終わったことを確認し，ロボットはBの正面へ自律飛行を行う(ii)．BはAが書いた単語が何かを答え(iii)，キャンパスをクリアし自らも英単語を入力する(iv)．Bが書き終わったことを確認し，ロボットはAの正面へと戻る(v)．AがBの書いた単語が何かを答える(vi)．これを1セットとし，被験者6人の組み合わせをローテーションし，6セットの実験を行った．各セットでの成功の可否を表7.3で示す．往路，復路を合わせて12回試行したところ11回が成功し，92%の成功率が得られた．唯一失敗した試験である，4セット目復路での入力を図7.5.2に示す．7.4節で得られた結果と同様に，小文字の『n』や『e』のような曲線の多い文字は入力が困難であるため，文字が潰れてしまっていることがわかる．しかし，他人では判読は困難な文字もあるが書いた本人であれば判読可能な文字であった．

表 7.3: 成功回数

セット	往路	復路
1		
2		
3		
4		×
5		
6		
正解率 (%)	92	

実験の結果，浮遊した状態でもメモを書くことができ，他人に伝言することも可能であることを確認した．



図 7.3.1: 表示したメニューの例



box	egg
ipod	get
fly	kiss



box	egg
ipod	get
fly	kiss

図 7.4.1: 浮遊ノートへの入力（左）と片手のみで操作した場合の入力（右）

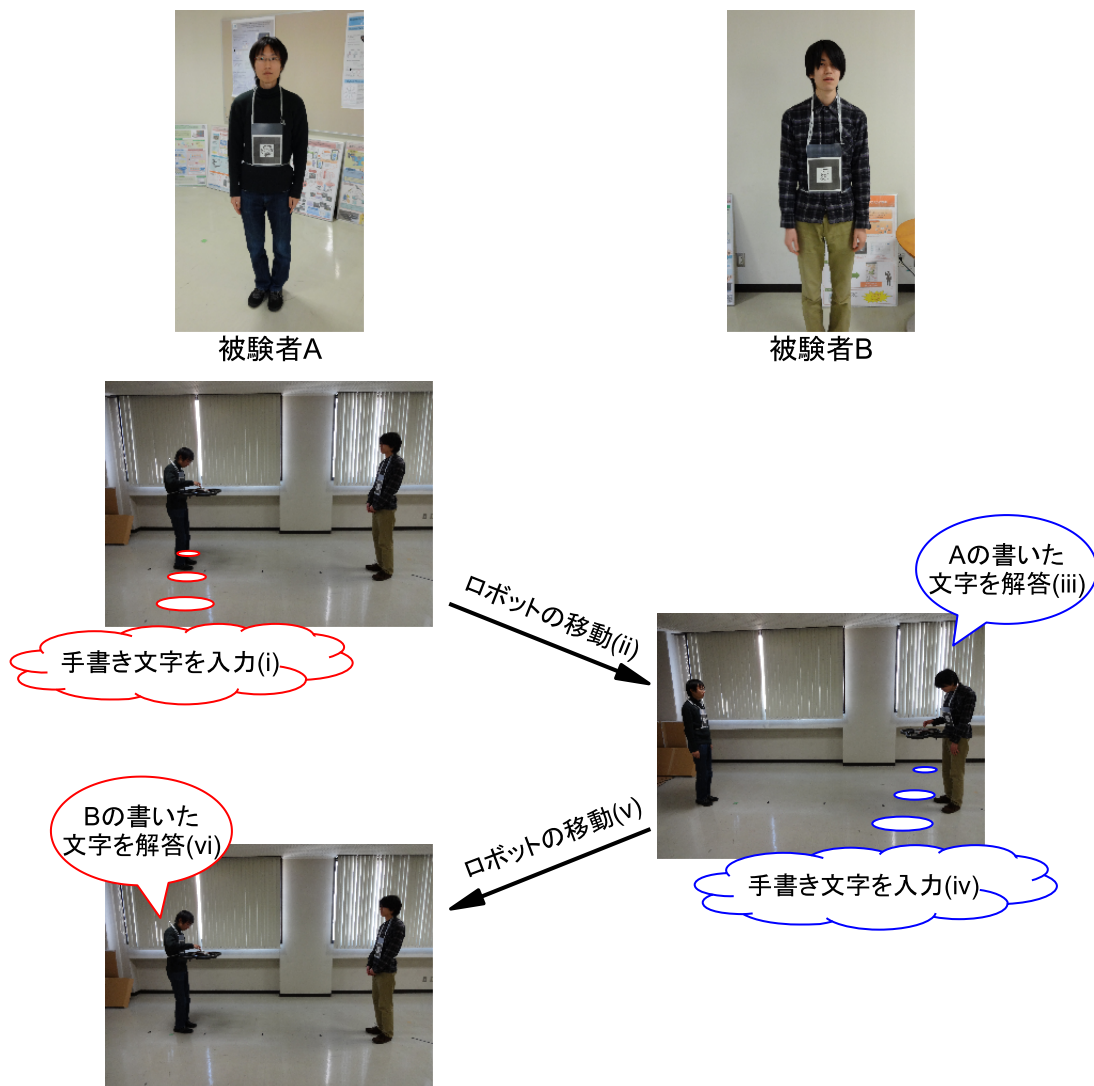


図 7.5.1: 実験の流れ



図 7.5.2: 失敗した実験時の入力

第8章 応用例

提案システムを利用するメリットは、大きく以下の3つに大別される。

- 片手での支えが不要となり制限なく端末を利用できる
- 飛行ロボットの自律飛行によってカメラ画像を利用する自由度が高まる
- 飛行ペットロボットならではの生活支援が可能となる

そこで、それぞれの項目について、システムの応用例の考察を行う。

提案システムを利用すると端末の支えが不要となり、入力や読み取りといった簡単な操作が指一本で可能となる。そこで、文献 [1] のように顔の動きで操作を行う機能や、音声入力操作によりロボットを制御する技術 [28] と組み合わせることで、両手が全く使えない状況での操作が可能となる。よって、荷物で両手がふさがった状況で端末に買い物リストを表示する、両手で料理を行っている間にレシピのページを変更する、といった日常生活での利用の幅が大きく広がる。更に、両手の動きに障害を持つ利用者であっても、場所や状況によらず自由に端末を操作することが可能となる。即ち、両手での操作が不要となるため介護ロボットシステムとしても適用できる。また、提案システムであれば徐々に端末を指操作に切り替えることが可能なため、リハビリに組み込むことで身体障害者補助犬 [29] と療法士の両方の役割を担うことが可能である。本システムを利用すると身体障害者補助犬のような訓練の必要なく、利用者に情報を提示し、利用者を導くといった行動が実現するため、現在社会で問題となっている補助犬の実働頭数不足が緩和できる。更に、飛行ロボットの性質上、左右高度が自在に変化できるため、リハビリ時に手を添える役割とともに療法士からのアドバイスを伝達することが可能である。画像により療法士が遠方から障害者を視認できるため、通院の頻度も減少できる。このように、ペットロボットとしてだけではなく医療分野においても実用が期待される。

本システムでは入力画像からマーカを利用した個人識別を行っているが、小型ロボットを想定した顔認識手法 [30] と合わせることで、初対面の人物を端末に登録することが可能となる。すると、マーカレス化によりユーザがシステムに対し、能動的に働く必要がなくなることで使用状況の幅を広げられる。顔認識により登録された情報を端末に保存することで、名刺代わりとなり顔や名前を失念するという事態を防ぐことができる。さらに、本論文にて実装を行った自撮りモードに組み込むことで、友人をあらかじめ登録し複数人で鮮明な自撮り写真撮影を行うことも可能である。また、必要な顔情報を全て登録することで、反対に登録されていない人物の発見も容易となる。生活エリアに属する人物を登録することで、ストーカーなどの不審者の発見に役立つパトロールロボットとして利用できる。このように、自在に行動できる飛行ロボットがカメラを持つことで、カメラ画像を利用したシステムの拡張が期待される。

端末が予め内蔵している機能を実用することで、ペットロボットして利便性の向上が期待できる。内蔵機能の一例として、現在の携帯情報端末には一般的に GPS 機能が内蔵されている。GPS を利用すると大掛かりな機材を必要とせず絶対座標が取得できる。しかし、GPS には小型飛行

ロボットを精密に制御するだけの精度はない．そこで，本システムで提案した相対位置と組み合わせることで，マスター周辺に留まらず，より広い範囲で利用することが可能となる．本論文によって実装を行った浮遊伝言板モードに組み込むことで，マップ上で指示された場所とマスターの居場所を往復飛行し伝書鳩のように遠方への伝言が可能となる．携帯端末の操作から実際に手紙を配達するサービスがあるが [31]，本システムを使うことでメールのように手書きメモや写真，音，映像を添付するだけでなく，モノを添付した伝言も実現する．このように，端末が持つセンサデバイスを有効に利用することで，ロボットと一体化したメリットをより活かした機能が期待される．

第9章 結論

9.1 本研究の成果

本論文では、場所や時間を選ばず、両手が満足に使えない状況下であっても端末を自在に操作することが可能な「浮遊ノート」システムについて提案した。自律飛行性能が年々向上している小型飛行ロボットに注目し、軽量の情報端末を飛行ロボットに搭載し浮遊させる提案システムにより端末の利便性を高める。小型飛行ロボットには AR.Drone を、携帯情報端末には iPod touch を用いて実装を行った。実装では ARToolKit を利用し AR マーカによって、マスターの識別を行い、ロボットとマスター間の距離を取得した。相対距離を用いることで、大掛かりな設備や高価な機器が不要となり、場所や状況を問わず利用可能となる。更に、屋内など狭い場所での利用のため、飛行ロボットが意図しない方向へ流れてしまう課題をフィードバック制御により解決した。提案システムのプロトタイプに、以下の行動パターンを実装した。

- マスターを追いかける追跡モード
- まわりこみ写真を撮影する自撮りモード
- 端末の情報をマスターに読ませる浮遊表示モード
- 端末に手書きメモを書き込む浮遊入力モード
- マスターのメモを特定の他人に伝える移動伝言板モード

追跡モードについて、直線、曲がり角、段差の3か所について、提案手法による追跡動作が60%以上の成功率が得られることを確認した。また、活動範囲の広狭や曲がり角、段差の有無にあわせ、追跡距離や速度の設定を変更する必要があるという課題を発見した。しかし、検証の結果、屋内での利用については相対距離での追跡が可能であることを確認した。よって、提案システムにより、マスターが携帯端末を持ち運ぶ必要がなくなり、端末不携帯を防ぐことが可能である。

自撮りモードについて、不安定な機体上から鮮明な自撮り写真を撮影するため、自撮り支援システムを提案した。顔検出とエッジ抽出を利用し、複数枚取得した画像の中から一枚を選出する手法により、短時間で容易にベストショットを取得することに成功した。これを浮遊ノートへ実装し、自律飛行によってマスターの前へまわりこみ撮影を行ったところ、両手でポージングした写真や、階段の上や2階といった普段人が撮影できない視点からの写真が取得できた。よって、提案システムを利用すると、屋上や崖の上など自力での撮影が難しい地点からも、手軽に臨場感ある撮影が可能となる。

浮遊表示モードについて、浮遊中の端末に表示された文字が9pxまで判読可能であることを確認した。また、表示内容を正確に解読できることを確認した。つまり表示を読むだけでなく、タップ、フリック、ドラッグ、マルチタップの基本的な操作が可能である。

浮遊入力モードについて、浮遊中の端末にペイントソフトに手書き文字が入力できることを確認した。端末の重さに耐えられず不安定となるため、曲線の描写や繊細な操作の実現には飛行ロボットの性能向上が必要である。しかし、指の長さや手の大きさに影響を受けず、ディスプレイ全体を利用できることを確認した。

移動伝言板モードについて、浮遊中に他人が書いた文字であっても判読可能であることを確認した。入力時の問題は浮遊入力モードと相違ないが、特定の人物からの伝言を読み取るレベルであれば描写可能であることを確認した。よって、少し離れた人物にメモを伝言する機能として、提案システムは有効である。

飛行ロボットの性能により飛行の安定性が大きく変化するため、提案システムの利用にはロボットの進化が不可欠である。しかし、本論文で行った検証により、提案システムを利用することで生活支援ロボットの汎用性が高められ、多くの生活支援に役立つことを確かめた。

9.2 今後の展望

本論文では、ロボットの動きにより実現するペットロボットとしての行動、携帯端末の操作を補助するための行動、それら2つを組み合わせた行動から、それぞれ追跡モード、自撮りモード、移動伝言板モードの実装を行った。しかし、提案した行動パターンはこれに限らず、提案システムの利便性を高めるために、その他の機能について実装することが今後の展望として挙げられる。更に、提案システムを安定して利用するためには、飛行ロボットの性能向上が不可欠である。飛行ロボットが外的要因に影響を受けず安定した飛行が可能となることで、提案システムがいつでも安全に利用でき、ユーザの使用感も向上する。また、端末と一体化したロボットが開発されることで、8章で論じた通り端末の持つ機能を最大限に活かしたシステム拡張が可能となる。ロボット技術の発達により、よりフレキシブルなシステムへ進化することが展望として期待される。

謝辞

本論文は電気通信大学大学院情報システム学研究科情報ネットワークシステム学専攻博士前期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

情報システム学研究科情報ネットワークシステム学専攻入江英嗣准教授には指導教官として本研究の実施の機会と多大なご助言を与えて戴き，終始，ご指導を戴いた．ここに深謝の意を表する．同専攻吉永努教授，笠井裕之准教授，吉見真聡助教には，ご助言とご指導を戴いた．ここに感謝の意を表する．

東京大学大学院学際情報学府暦本研究室の樋口啓太さんには，研究室を見学させて戴き AR.Drone の制御システムについてご助言を戴いた．同ゼミの後輩である小野澤清人さんには，評価アプリの制作にご助力戴いた．黒田修平さん，稲場朋大さんには，本論文で使用する写真の撮影にご協力戴いた．講座後輩の皆様には，極寒の中，何時間も実験に付き合って戴いた．更に，全被験者の方々に対して，ここに感謝の意を表する．

最後に，本研究の遂行に関与戴いた全ての方々に，この場を借りて多謝を表する．

参考文献

- [1] GimmiQ. MagicReader. <http://gimmiq.net/>.
- [2] 小山安博, ITmedia. カシオ計算機が「G-SHOCK PHONE」を参考出展. <http://www.itmedia.co.jp/mobile/articles/1201/13/news064.html>.
- [3] プリンストンテクノロジー株式会社. ぶるっトウス PTM-ICN. <http://www.princeton.co.jp/product/mobile/ptmicn.html>.
- [4] Ramakant Nevatia. 人工知能・コンピュータビジョンのための画像認識と画像理解 - 視覚的マシン知覚. 啓学出版, 7 1986.
- [5] 日置隆一. 表色系 (色彩心理と測色 (第 2 回)). テレビジョン, Vol. 23, No. 12, pp. 975–985, dec 1969.
- [6] J. Canny. A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, No. 6, pp. 679–698, 1986.
- [7] H. Chen and G.E. Ford. Perceptual wiener filtering for image restoration. In *Signals, Systems and Computers, 1994. 1994 Conference Record of the Twenty-Eighth Asilomar Conference on*, Vol. 1, pp. 218–222. IEEE, 1994.
- [8] L.G. Roberts. Machine perception of three-dimensional solids. Technical report, DTIC Document, 1963.
- [9] デジタル画像処理. 画像情報教育振興協会, 2006.
- [10] 橋本基, 野村厚志, 古賀和利, 百田正広, 三池秀敏. パソコンによる動画像処理. 森北出版, 7 1993.
- [11] 皆川卓也, 技術評論社. OpenCV で学ぶ画像認識. <http://gihyo.jp/dev/feature/01/opencv>.
- [12] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, Vol. 1, pp. I–511. IEEE, 2001.
- [13] 橋本直. AR プログラミング-Processing でつくる拡張現実感のレシピ-. オーム社, 3 2012.
- [14] ARToolKit. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>.
- [15] 工学ナビ. ARToolKit を使った拡張現実感プログラミング. <http://kougaku-navi.net/ARToolKit/index.html>.

- [16] 本田技研工業株式会社. Honda | ASIMO. <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>.
- [17] トヨタ自動車株式会社. トヨタ企業サイト | パートナーロボット. http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/.
- [18] 日刊工業新聞社. トヨタ、生活支援ロボの試作機を公開、ミドルウェアに ros モジュール採用. <http://www.robonable.jp/news/2012/09/toyota-0927.html>.
- [19] 功雄三原, 康晋山内, 美和子土井. 実時間ビジョン型インタフェースとペットロボットへの応用. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol. 84, No. 9, pp. 2070–2078, sep 2001.
- [20] M.N.A. Bakar, R. Nagarajan, and A.R.M. Saad. Development of a doctor following mobile robot with mono-vision based marker detection. In *Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), 2011 IEEE*, pp. 86–91. IEEE, 2011.
- [21] K. Higuchi and J. Rekimoto. Flying head: head-synchronized unmanned aerial vehicle control for flying telepresence. In *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, p. 12. ACM, 2012.
- [22] C. Bills, J. Chen, and A. Saxena. Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues. In *Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE international conference on*, pp. 5776–5783. IEEE, 2011.
- [23] K. Higuchi, Y. Ishiguro, and J. Rekimoto. Flying eyes: free-space content creation using autonomous aerial vehicles. In *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 561–570. ACM, 2011.
- [24] Parrot. AR.Drone 2.0. Parrot new wi-fi quadricopter- AR.Drone.com - HD Camera - Parrot. <http://ardrone2.parrot.com/>.
- [25] Apple. iPod touch. <http://www.apple.com/ipod-touch/>.
- [26] V. Ghadiok, J. Goldin, and W. Ren. Autonomous indoor aerial gripping using a quadrotor. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4645–4651. IEEE, 2011.
- [27] クックパッド株式会社. クックパッド. <http://cookpad.com/>.
- [28] 高欣然, 服部峻, 久保村千明, 亀田弘之. 音声入力による人型エージェントの操作感の実験的検討. 全国大会講演論文集, Vol. 2011, No. 1, pp. 217–219, mar 2011.
- [29] 厚生労働省. 身体障害者補助犬. http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/hukushi_kaigo/shougaishahukushi/hojoken/index.html.
- [30] P. Rivas-Perea, J.G. Rosiles, O.V. Anaya, L.V. Olvera, L. Chavira, M. Chacon, et al. Mobile robot for face recognition: A collaborative environment. In *High Performance Computing & Simulation, 2009. HPCS'09. International Conference on*, pp. 223–229. IEEE, 2009.
- [31] デジタルポスト株式会社. Digital POST. <http://www.digitalpost.jp/>.

発表文献

- [1] 芝 星帆, 入江 英嗣, 吉永 努, 「顔検出とエッジ抽出を利用した自撮り支援システムの提案」, 第 20 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2012), pp.229-230 , 2012 年 12 月 7 日 , 青森県古牧温泉
- [2] 入江 英嗣, 放地 宏佳, 小木 真人, 樫原 裕大, 芝 星帆, 眞島 一貴: 「AirTarget: 光学シースルー方式 HMD とマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インターフェース」, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp.1295-1304, Jul. 2012.