視覚情報に基づく小型無人ヘリコプタの誘導制御

森 亮 介* 平 田 健 一* 玉 置 健* 米 澤 直 晃*

Vision-Based Guidance Control of a Small-Scale Unmanned Helicopter

Ryosuke Mori*, Kenichi Hirata*, Takeshi Tamaki* and Naoaki Yonezawa*

This paper describes vision-based guidance control of a small-scale unmanned helicopter. In previous research, helicopters were usually controlled by sensors such as GPSs and gyros. However, it is difficult to mount those sensors on small-scale helicopters that have little payload. Accordingly, small lightweight cameras were used to control the helicopter in this research. The applications of the cameras are for observation of the environment and the measurement of the position and attitude of the helicopter. The system of mounted cameras on the helicopter is useful for an indoor surveillance system using the helicopter as a mobile camera. The efficacy of the constructed system was verified through experimentations of automatic hovering control and guidance control.

Key Words: Visual Feedback, Small-Scale Unmanned Helicopter, Guidance Control

1. は じ め に

ヘリコプタは垂直離着陸、空中停止（ホバリング）、低速飛行といった優れた飛行特性を有しており、その小型無人化、自動操縦化による飛行作業への有用性に大きな関心がよせられ、国内外で数多くの研究が行われている。すでに農業散布や送電線の巡視のような実用的な作業に応用可能な小型無人ヘリコプタの研究成果も報告されている[1]。従来の研究では、搭載カメラを主として観測用に用い、機体の位置、姿勢、誘導制御にはGPSやジャイロを用いることが一般的であった。このため、多数のセンサとその情報を処理する装置を搭載するための積載重量の問題から、我々の生活環境に適用しても安全と考えられるサイズまで小型化することは非常に困難である。そのようななかで、屋内に適用可能なサイズの小型電動RCヘリコプタを用い、機体に取り付けたマーカーを外部カメラで観測し三次元位置・姿勢を求め、ホバリング、誘導制御を行う研究[2][3]や、機体に小型軽量カメラを搭載し、床に設置したマーカーの画像情報をもとに三次元位置・姿勢を求め、ホバリング制御を行う研究が行われている[4][5]。これらの研究では、画像情報から得られる三次元位置・姿勢をもとに、チューニングで求めたPID制御器や、システム同定で得られたモデルに基づく H_∞ 制御器を用いて制御を行うことによって、精度の高いホバリングが実現できている。一方で、三次元位置・姿勢を求めるため、計算コス

トが高く、画像処理用と制御用に2台のPCを必要とし、さらに、三次元位置・姿勢の検出用に特別なマーカーを配置する必要がある。

本研究においても、搭載カメラの画像情報をもとに小型電動RCヘリコプタの誘導制御を行うことを目的としているが、機体の三次元位置を求めることなく、二次元画像上の特徴量の変化に基づき制御を行う、いわゆる特徴ベースビジュアルフィードバックの手法を用いることを考える。この方法は、機体の制御に正確な三次元位置を用いないという点で、ホバリングの精度をあげるのが難しい面もあるが、計算コストが低く、さらに、特徴量としてラインの位置や傾きといったエッジの情報を用いることで、実環境からそのようなエッジ情報を得られれば、特別なマーカーがなくても、機体の制御を行うことが可能となる。この利点は、画像情報から得られた動的な環境の変化に基づき、移動対象を追跡するというような高度なタスクへの拡張が可能であることも挙げられる。搭載カメラで得られる画像情報をヘリコプタの誘導制御に用いることは、実用的なタスクの実現に向けて非常に有益であると考えられている[6]。

本研究では、小型無人ヘリコプタの屋内への適用を考え、固定カメラや警備員の巡回に代わって、移動式カメラによる屋内監視システムとして小型無人ヘリコプタを用いることを目的とする。移動カメラによる監視システムは、外部環境を整える必要性がないため、監視範囲の変更等にもフレキシブルに対応できるメリットをもつ。最終的には床や壁の模様、窓やドア、柱など実環境から制御に必要な画像情報を取得することを目標とするが、研究の初期段階として、屋内を走行する移動ロボットの誘導に用いられるようなガイドラインを床や壁に設置し、画

原稿受付 2008年1月7日

*信州大学工学部

*Shinshu University

■ 本論文は有用性で評価されました。

像上の特徴量をもとに制御を行うことにより、基礎的な手法を確立する。

本稿では、視覚情報に基づく小型無人ヘリコプタの誘導制御を行うことを目的として、基礎となる制御システムを構築し、実験的検証により、目標となるマーカーを搭載カメラの画像中心で捉える位置でのホバリング制御と目標のマーカー間を移動する誘導制御を実現した結果について述べる。

2. 小型無人ヘリコプタの制御システム

本研究で用いる小型無人ヘリコプタの制御システムを **Fig. 1** に示し、制御対象である小型無人ヘリコプタの写真と座標系、動作の仕組みの概略図を **Fig. 2** に示す。本研究では、ヒロボー社製同軸 2 重反転式ロータヘリコプタ X.R.B [7] を改造し、2 台の小型軽量な無線カメラ (RF SYSTEM Lab 製 TC-9) とその電源となるリチウムポリマーバッテリーを搭載したものを、小型無人ヘリコプタの実機システムとして用いた。Table 1 にヘリコプタの仕様を示す。この機体はホビー用屋内向けのヘリコプタとして市販されており、床に落下したり、壁に衝突したりといった場合でも重大な被害がないという点からも、屋内用小型無人ヘリコプタのベース機として広く使用されている。2 台の無線カメラは、それぞれ機首の前方向とこれに直交する鉛直下方向にカメラの光軸を合わせるように取り付けられた。さらに、それぞれのカメラの光軸方向に、ラインマーカー (ライン 1, ライン 2) を Fig. 1 のような位置関係で設置する。この二つのマーカーを、それぞれのカメラの画像中心で捉えるような位置で、ヘリコプタをホバリングさせることを目的として、画像情報に基づく制御を行う。全体の制御の流れは次のようになる。

- (1) 搭載カメラからの画像を PC 側で受信
- (2) 画像から制御入力を計算し、DA 変換カードを介して接続したプロポ (送信機) に出力
- (3) プロポにおいて、制御入力 (電圧) をパルス信号としてヘリコプタに送信
- (4) カメラの画像の中心にマーカーを捉えるように、ヘリコプタの位置を制御

上記の (1)~(4) を繰り返し、目標となるホバリング制御を行った。

Fig. 2(c) をもとに、本研究で使用するヘリコプタの動作の仕組みについて述べる。ヘリコプタは同軸反転方式で、同軸上にロータを上下に配置し、回転を逆転させて、反転トルクを打ち消しあって飛行する [7]。この方式は、構造が複雑になり、メンテナンス性や運動性能が他の方式よりも劣るが、水平に近い状態でホバリングができ、安定性が高い機体となっている。スロットル (Z 軸に関する上下方向の移動) は上下ロータの回転数を変化させることによって揚力を得る。エルロン (Y 軸に関する左右方向の移動)、エレベータ (X 軸に関する前後方向の移動) は下ロータの回転面を傾けることによって動く。ラダー (Z 軸回りの回転) は上下ロータの回転数差によって生じるトルクによって動く。

ヘリコプタに搭載したカメラから得られる画像とその情報に基づいて制御されるヘリコプタの挙動について **Fig. 3** をもとに述べる。スロットルについては、カメラ 1 の画像面上のライ

Fig. 1 Control system of the small-scale unmanned helicopter

Fig. 2 Schematic of a co-axial contra-rotating rotor helicopter

Table 1 Specifications of the helicopter

Length	125 [mm]
Width	90 [mm]
Height	185 [mm]
Diameter of rotor	350 [mm]
Weight of body	168 [g]
Weight of camera system	21 [g]

ン 1 の y 座標 y_{c1} から制御入力求められる。エルロン、エレベータ、およびラダーについては、それぞれカメラ 2 の画像面上のライン 2 の交点の x 座標 x_{c2} と y 座標 y_{c2} , さらにライ

Fig. 3 Motion of the helicopter based on visual information

ンの傾きから制御入力求められる。また、本研究で使用した機体は安定性が高く水平に近い状態で飛行することができるため、得られた座標値は機体の正確な位置を表しているものとして扱った。

3. ヘリコプタの制御系の設計

本研究で制御対象として用いる同軸2重反転式ロータヘリコプタについては、その動力学から数理モデルを導出することは困難であり、従来の研究ではPIDパラメータのチューニングやシステム同定実験をもとに制御系を設計している[2]~[5]。本研究においても、システム同定実験を行うことにより、適切なモデルを導出することは可能と考えられるが、実際には機体の振動や無線カメラのノイズの影響などから、システム同定に必要な適当な入出力データを得ることが困難であったため、手動操縦時の機体の挙動をもとに、制御器のPIDゲインをチューニングし、適切な値を求めた。

3.1 手動操縦実験の入出力データ

手動操縦実験の入出力データを得るための手順を以下に述べる。Fig. 1のシステムを用い、手動操縦により搭載した二つの無線カメラの画像面上の中心付近にラインマーカーを維持するような位置で、ヘリコプタをホバリングさせる。操縦者は画像を見ることなく、床と壁に配置されたラインマーカーの位置にあわせてホバリングするように操縦を行う。このとき、床と壁からの距離が150[cm]の位置を、ラインマーカーを画像の中心に維持する目標のホバリング位置とし、320×240[pixel]のカメラの画像上で、200×150[cm]の領域が得られる位置関係に設定した。

手動操縦時に得られたプロポのスロットル、エルロン、エレベータ、ラダーの四つの入力の電圧値の変化を計測し、同時に、搭載カメラの画像面上のラインマーカーの位置 (L.M.P.: Line

(a) Time variation of throttle

(b) Time variation of aileron

(c) Time variation of elevator

(d) Time variation of rudder

(e) Time variation of throttle

(f) Time variation of aileron

(g) Time variation of elevator

(h) Time variation of rudder

Fig. 4 Time variations of input-output data

Marker Position[pixel])と傾き (Theta[deg]) の変化を求める。以上の方法で得られた手動操縦実験の入出力データを Fig. 4 に示す。エルロンとエレベータについては変動が激しいが、ス

ロットルについては、入力を大きく変化させることなく安定していた。ラダーについては、 -5 度程度偏差がある状態で、姿勢角が 5 度あるいは -15 度に近づいたときに、制御入力を与えられていた。これらの結果から、手動操縦時のヘリコプタの制御入力（電圧値）の最大値、最小値や、ヘリコプタの挙動に対する画像面上のマーカーの変化率などの情報が得られたので、これらの値を参考に視覚情報から自動制御を行うための PID コントローラのゲインのチューニングを行った。

3.2 スロットル、エルロン、エレベータの制御系

スロットル、エルロン、エレベータについては、搭載カメラで得られる画像面上のマーカーの位置座標に基づいて制御系を設計した。当初は、位置制御系を構成し、実験を行ったが、位相遅れが大きく安定しなかった。そこで、制御系を速度制御系として構成した。これにより、安定に制御することができた。以下では、エルロンに関する制御系の設計について述べる。Fig. 5 (a) に示すように、 320×240 [pixel] の画像サイズに対して、四つの領域に分割し、各領域内にマーカーの位置座標が含まれる場合に、適切な目標速度 v_r [pixel/s] を与えた。エルロンの目標速度設定の計算式を以下に示す。

$0 \leq x_c \leq 80$ のとき

$$v_r = 121.2 \quad (1)$$

(b) Block diagram of control system (aileron, elevator)

(c) Block diagram of control system (throttle)

Fig. 5 Schematic of control system design

$80 < x_c \leq 160$ のとき

$$v_r = -(121.2/80) \times (x_c - 80) + 121.2 \quad (2)$$

$160 < x_c \leq 240$ のとき

$$v_r = -(121.2/80) \times (x_c - 240) - 121.2 \quad (3)$$

$240 \leq x_c \leq 320$ のとき

$$v_r = -121.2 \quad (4)$$

目標速度 $|v_r|$ の最大値である 121.2 [pixel/s] は、前述の手動操縦実験で得られたヘリコプタの挙動をもとに設定した。ここで、目標速度は画像面上のマーカーの位置座標の移動速度として与えるため、ヘリコプタの制御には画像面上の特徴量の変化のみを用い、三次元位置情報を必要としない特徴ベースビジュアルフィードバックの手法を用いた。本手法において、カメラの視野にマーカーを維持することは非常に重要であり [8]、マーカーの位置が画像中心から大きく外れている範囲内にある場合は、中心に戻すために一定の目標速度を与え、中心に近い範囲内では比例的に目標速度が 0 に収束するように設定した。このようにして与えられた目標速度 v_r に対して、PD 制御器により、目標値追従制御を行った。エルロンとエレベータに関する制御系のブロック線図を Fig. 5 (b) に示す。ここで、 K_p 、 K_d はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲインであり、目標速度 v_r は上記の方法で与えられる。

スロットルについては、飛行時間の経過に伴い、バッテリーの電圧が低下し、目標位置に対して偏差を生じたため、位置に対する積分要素を追加し、PID 制御器により、目標値追従制御を行った。スロットルに関する制御系のブロック線図を Fig. 5 (c) に示す。ここで、 K_i は積分ゲインである。

3.3 ラダーの制御系

機体の Z 軸回りの回転を制御するラダー入力については、下

(b) Block diagram of control system (rudder)

Fig. 6 Schematic of control system design

Table 2 Gain parameters of the controllers

	K_p	K_i	K_d
Throttle	4.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}	2.0×10^{-2}
Aileron	2.0×10^{-3}	0.0	1.6×10^{-4}
Elevator	2.0×10^{-3}	0.0	1.6×10^{-4}
Rudder	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-3}	0.0

向きのカメラで得られるラインマーカーの直線の傾きから、姿勢角の制御を行った。Fig. 6 (a) に示すように、ラインマーカーの傾き θ に対して、機首が一定の方向に維持できるように、目標角度 θ_r に追従するよう PI 制御器により制御した。ブロック線図を Fig. 6 (b) に示す。

3.4 制御系のゲインについて

前述の方法で設定した制御系のゲインの数値を Table 2 に示す。スロットル、エルロン、エレベータの速度制御系の比例ゲインについては、目標速度に対してオーバーシュートしない程度に値を大きく設定している。微分ゲインについては、値を大きくすることで目標速度に対して追従が速くなるが、振動が出やすくなるため、振動を抑えた適切な値に設定している。また、スロットルの積分ゲインについては、バッテリーの電圧の低下分をラインマーカーの目標位置からの偏差の値をもとに補えるような適切な値に設定している。ラダーの角度制御系については、目標角度に対してオーバーシュートしない程度に比例ゲインを大きく設定し、目標角度との偏差をなくすために、適切な積分ゲインを与えている。

4. 視覚情報に基づくホバリング自動制御実験

前章で得られた制御系を用いて、スロットル、エルロン、エレベータ、ラダーの4軸自動ホバリング制御の実験を行った。まず、手動操縦により搭載カメラの二つの画像面上にラインマーカーが捉えられる位置まで操縦し、その後自動操縦に切り替えた。

Fig. 7 にスロットル、エルロン、エレベータ、ラダーの四つの入力の電圧値の時間変化と、搭載カメラの画像面上のラインマーカーの位置と傾きの時間変化を示す。図において、●印でノイズが発生した時間を示す。これは、カメラから得られた画像にノイズが発生し画像情報が利用できないため、ラインマーカーの状態が計算できないことを表す。ノイズが発生している間は、ノイズが発生した直前のデータに基づいて求められた制御入力を与えることで対応している。詳細は付録 B に示す。実験結果で矢印で示しているように、4[s]~69[s] までの約 65 秒間の自動制御のホバリングを行った後、再び手動操縦に切り替えた。手動操縦の実験結果と比較して、カメラで得られたマーカーの情報をもとに短いサンプリング周期で制御入力が与えられており、エルロンやエレベータについては、手動操縦と同等に、スロットルやラダーについては手動操縦以上に精度よく制御されていることが分かる。

Fig. 8 に下向きのカメラで得られたマーカーの位置の画像平面上の変化を示す。縦軸（左側）と横軸（下側）に画像上のピクセル値を表し、二つの点線が直交する点が画像の中心位置を示す。さらに、縦軸（右側）と横軸（上側）がそれぞれ機体軸の X, Y 軸方向の動きを表しており、マーカーの位置の画像面

(a) Time variation of throttle

(b) Time variation of aileron

(c) Time variation of elevator

(d) Time variation of rudder

(e) Time variation of elevator

(f) Time variation of rudder

(g) Time variation of rudder

(h) Time variation of rudder

Fig. 7 Time variations of input-output data

上の軌跡が、相対的に自動制御中のヘリコプタの軌跡を示している。破線で約 65 秒間の自動操縦中の全時間における機体の軌跡を示し、実線で 30[s]~60[s] までの 30 秒間を抽出し、重

Fig. 8 Experimental result of hovering control

ねて表示している。図において、●印でノイズが発生した時間における位置を示す。本実験では、壁から 150 [cm] の位置をホバリングの原点（画像の中心）としており、実験結果ではノイズの影響などから、原点から壁に向かって最大で 50 [cm] 程度外れているところがあるが、壁に衝突することなく安全に飛行できていると考えられる。また、30 [s]～60 [s] までの 30 秒間はノイズの影響も少なく、安定して飛行しており、この間はヘリコプタのロータ直径 35 [cm] に対して、± 35 [cm] の範囲内でホバリングすることができている [9]。この範囲内でホバリングを行うことを、小型無人ヘリコプタによる屋内監視システムの実現に向けての初期の目標に設定している。

5. 視覚情報に基づく誘導制御実験

前章の結果から、ほぼ目標に近いホバリングが実現できたので、同様の制御器を用いて誘導制御を行った。ここでは、屋内監視システムのための基礎実験として、目標のラインマーカー間を移動する誘導制御について述べる。

5.1 誘導制御のアルゴリズム

Fig. 9 に示すように、ヘリコプタの前向きと下向きの方向に、ラインを配置し、A 点から B 点に移動するように誘導制御を行った。Fig. 10 の下向きのカメラで得られる画像を用い、誘導制御のアルゴリズムについて述べる。

はじめに、Fig. 10 (a) に示すように、A 点が画像中心（目標 A）となるようにホバリングする（状態 1）。続いて、Fig. 10 (b) に示すように、目標をステップ状に A 点から A 点と B 点の中間に位置する A' 点に切り替え、A' 点が画像中心（目標 A'）になるように制御して、ヘリコプタを A 点と B 点の間に移動させる（状態 2）。その後、Fig. 10 (c) に示すように、目標をステップ状に A' 点から B 点に切り替え、B 点を画像中心（目標 B）に捉えるように制御して（状態 3）、最終的には、Fig. 10 (d) に示すように、B 点を画像中心（目標 B）で捉えられながらホバリングすることによって（状態 4）、ヘリコプタが A 点と B 点の間を移動する誘導制御を行う。さらに、このアルゴリズムを拡張し、複数のラインマーカーを配置することにより、飛行範囲を拡大することも可能であるため、屋内監視システムの基礎となると考えられる。

Fig. 9 Schematic of guidance control

Fig. 10 Schematic of guidance control algorithm

5.2 誘導実験結果

Fig. 9 に示すように、1 [m] 離れた A 点と B 点を設置した環境において、誘導実験を行った。はじめに手動操縦により、ヘリコプタが A 点をカメラの画像面上に捉えられる位置まで移動し、自動操縦に切り替え、A 点から B 点まで誘導した。今回の実験結果では 35 秒間、自動操縦を行い、その後、自動操縦から手動操縦に切り替えて着陸させた。

Fig. 11 に下向きのカメラで得られたマーカーの位置の画像面上の変化を示すことにより、ヘリコプタの XY 平面内の動きを示す。図において、状態 1 から状態 4 における画像面を重ねることにより、ヘリコプタの状態 1（細い実線）から状態 2（太い実線）までの動作と、状態 3 から状態 4 までの動作（破線）を表している。この結果より、ヘリコプタは、はじめに A 点が画像中心（目標 A）になるようにホバリングした後（状態 1）、目標を A' 点に切り替え、A' 点を画像中心（目標 A'）に移動させることによって、ヘリコプタが A 点と B 点の間に移動している（状態 2）。さらに、A' 点が画像中心付近に移動した後、目標を B 点に切り替え、B 点が画像中心（目標 B）で捉えられる

Fig. 11 Experimental result of guidance control from Point A to B

位置に移動し（状態3）、最終的に、B点を画像中心（目標B）で捉えられる位置でホバリングしており（状態4）、A点からB点への誘導制御が実現できたと考えられる[9]。ここでもホバリングの精度を向上することは今後の課題である。

6. おわりに

本稿では、視覚情報に基づく小型無人ヘリコプタの誘導制御を行うことを目的として、安定性の高い同軸2重反転式ロータヘリコプタを用いて、4軸自動操縦のホバリング制御と誘導制御が可能であることを実験的に検証した。屋内に適用可能なサイズのヘリコプタを、機体に搭載可能な小型軽量の無線カメラで得られる画像情報のみで制御を行う場合、無線のノイズや機体の振動などにより、適切な画像情報が得られないことがある。しかしながら、本研究では、速度制御系で適切な制御入力を与えるアルゴリズムを提案し、安定したホバリング飛行を実現した。

今後の課題としては、ホバリングの精度を向上するために、システム同定の方法を検討し、機体の特性をより忠実に再現できるモデルに基づく制御系の設計が必要と考えられる。この点については、搭載カメラで得られる画像情報では、ノイズや振動の影響でシステム同定に適した入出力データを得ることが困難であるという問題があるが、ヘリコプタにマーカを取り付け、床面に固定したカメラで得られる画像情報を仮想的に搭載カメラの画像情報に置き換える方法を検討する。また、機体が水平に近い状態で飛行するものとして、座標値をそのままフィードバックして制御入力を決定したが、大きい入力や外乱が加わった場合、機体が大きく傾き正確な値が計測できないことを確認している。そのため、姿勢角を求めるアルゴリズムを構築し、座標値を補正することを考えている。

ホバリングの精度の向上と並行して、小型無人ヘリコプタを用いた屋内監視システムの構築を目指し、現状の実験環境に依存した誘導制御システムから、実環境に適用可能な制御システムの開発を行う。ここでは、床や壁の模様や、床と壁との境界といった実環境に含まれる画像上のエッジ情報から、ヘリコプタの誘導制御に必要な情報を適切に取得するための画像処理アルゴリズムについて検討する。

引き続き、本研究で得られた知見をもとに小型無人ヘリコプタの実用化に向けた研究開発を進めていく予定である。

参考文献

- [1] K. Nonami: "Fully Autonomous Unmanned Small-Scale Helicopter and Micro Air Vehicle Control," Proc. of 8th Int. Conf. on Motion and Vibration Control, pp.434-442, 2006.
- [2] W. Wang et al.: "Autonomous Control for Micro-Flying Robot and Small Wireless Helicopter X.R.B.," Proc. of 2006 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2906-2911, 2006.
- [3] 王, 平田, 野波, 宮澤: "超小型・超軽量マイクロフライングロボットのモデリングと自律制御", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.1, pp.121-129, 2007.
- [4] 廣瀬, 伊藤, 平田: "機体に搭載されたカメラによる小型ラジコンヘリコプタのビジュアルフィードバック制御", 第49回自動制御連合講演会論文集, SU3-3-2, 2006.
- [5] 廣瀬, 平田: "機体に搭載されたカメラによる小型ラジコンヘリコプタの H_∞ 制御", 第24回誘導制御シンポジウム資料, pp.115-118, 2007.
- [6] L. Mejias et al.: "A Visual Servoing Approach for Tracking Features in Urban Areas Using an Autonomous Helicopter," Proc. of 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2503-2508, 2006.
- [7] HIROBO X.R.B HP: <http://model.hirobo.co.jp/>
- [8] G. Chesi et al.: "Keeping Features in the Field of View in Eye-In-Hand Visual Servoing: A Switching Approach," IEEE Transactions on Robotics, vol.20, no.5, pp.908-913, 2004.
- [9] 実験動画 <http://chida-lab.shinshu-u.ac.jp/VBRC/exp.html>
- [10] R. Mori et al.: "Vision-Based Guidance Control of a Small-Scale Unmanned Helicopter," Proc. of 2007 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2648-2653, 2007.

付録 A. ラインマーカの画像処理

ここでは、視覚情報をもとにヘリコプタの制御を行ううえで重要なラインマーカの画像処理について述べる。前向きのカメラで得られた画像からは、単純に画像上のラインマーカの上下方向の位置を求めることによって、スロットルの制御を行っている。下向きのカメラで得られた画像から、エルロン、エレベータ、ラダーの3軸の制御を行うための画像処理については、Fig. 12を用いて説明する。

下向きのカメラでラインマーカが得られたとき、1回目の画像取得時には 320×240 の全画素を走査し、輝度値の変化からラインを抽出する。その後、ラインの四つの端点（図ではラインと画像の端の四つの交点）を求め、この4点から直線の式の計算に基づきラインの交差点と傾きを求める。2回目以降の画像取得時には処理を高速化するために、前回のラインの交差点の周りに破線で示すような 80×80 のフレームを作成し、この領域内のみ走査し、上記と同様の処理でラインとフレームの四つの交点から、ラインの交差点と傾きを求める。以上の処理は、画像のサンプリング周期である 33 [ms] 以内に十分収まっており、取得した画像情報から制御入力を求め、目標のホバリング制御を行うことが可能である。本稿では、研究の初期段階として、ガイドラインを壁と床に配置し、ヘリコプタの制御に必要な画像情報を得るための画像処理を行ったが、今後の課題として、実環境においても、壁と床の境界線や床の模様など、実環境に含まれるエッジ情報を適切に活用することを考えたい。

付録 B. 画像のノイズの影響

機体に搭載した無線カメラで画像を取得することから、無線

Fig. 12 Schematic of image processing

通信のノイズや機体の振動の影響により、画像のノイズが発生するという問題がある。機体の振動は画像ノイズの発生とともに

に、ラインマーカーの画像上の移動速度に影響するため、ローパスフィルターを用いて機体の振動の影響を除去している。Fig. 7に示す実験結果では、ラインマーカーの位置と傾きのグラフに●印で示している点が、画像のノイズが発生した時間を表している。発生する画像のノイズとしては、(1) 真っ黒な画像、(2) スノーノイズ（俗にいう砂嵐の状態）、(3) 画像のずれ（ある領域にわたって、画素の配置がずれる）など挙げられる。これらのノイズは、通常の実験中にかなりの頻度で発生するものの、1秒以上連続して発生するというのではなく、Fig. 7の実験結果でも最大で約 0.3 [s] 間であった。このノイズの対策としては、ノイズが発生している間は、ノイズが発生した直前のデータに基づいて求められた制御入力を与えることで対応した。

無線カメラを機体に搭載しているため、画像のノイズは避けることが難しい問題であり、引き続き改善するための方法を検討していく必要があるものの、現状の対応策でも、画像ノイズの影響で機体が制御不能になるということではなく、安定して制御できている。

森 亮介 (Ryosuke Mori)

1996 年大阪府立大学工学部機械工学科卒業。1998 年大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2003 年大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻博士後期課程修了。2003 年 4 月東京大学大学院情報理工学系研究科学術研究支援員。2004 年 4 月東北大学大学院情報科学研究科助手。2005 年 4 月信州大学工学部機械システム工学科助手。2007 年 4 月同大学工学部機械システム工学科助教。博士（工学）。知能ロボットの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)

玉置 健 (Takeshi Tamaki)

2007 年信州大学工学部機械システム工学科卒業。2008 年 4 月奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程に進学。現在に至る。画像情報に基づくロボットの制御に興味をもつ。

(日本ロボット学会学生会員)

平田健一 (Kenichi Hirata)

2007 年信州大学工学部機械システム工学科卒業。2007 年 4 月同大学大学院工学系研究科博士前期課程に進学。現在に至る。画像情報に基づくロボットの制御に興味をもつ。(日本ロボット学会学生会員)

米澤直晃 (Naoaki Yonezawa)

2007 年信州大学工学部機械システム工学科卒業。2008 年 4 月東北大学大学院工学研究科博士前期課程に進学。現在に至る。画像情報に基づくロボットの制御に興味をもつ。(日本ロボット学会学生会員)