

# 屋内用小型航空ロボットの開発

辻田哲平 石原聡之 近野敦 内山勝 (東北大学)

## Development of an Indoor Small Aerial Robot

\*T. Tsujita, T. Ishihara, A. Konno and M. Uchiyama (Tohoku University)

**Abstract**— In order to inspect the obstructed indoor hazardous areas such as disaster-stricken areas, we developed a small aerial robot. A remote control system is developed for the small indoor aerial robot which mounts a CCD camera. The aerial robot has four rotors. The body diameter is 250 [mm]. In the remote control system, Space Mouse, which is a three dimensional pointing device, is used for controlling the aerial robot in place of traditional stick type controller. This paper describes the detail of the aerial robot and the control system.

**Key Words:** Aerial robot, Unmanned aerial vehicle

### 1 はじめに

現在, ロボットが必要とされる作業の一つとして, 極限環境作業があげられる。人間が行うにはリスクの高い地雷除去や原子力関連施設での災害への対応, 細菌やウイルス, 化学物質などの汚染調査などといった作業を想定した, 様々なロボットが研究開発されている。

国内では, 1999 年 9 月に東海村で発生した JCO 臨界事故での教訓より, 原子力施設における事故対応ロボットが開発されている。原子力施設での事故発生時, 事故原因の究明や収束・復旧方法の検討に必要な情報を収集し, 安全な場所に待機する人間に情報を伝達するロボットの開発が行われている [1]。また, 実際にロボットが極限環境作業を行った例として, 2001 年 9 月, ニューヨーク世界貿易センタビルで都市捜索救助活動を行ったレスキューロボットがあげられる。この活動において, がれきの奥で生存者が存在する可能性の高い隙間を見つけること, または, 生存者が存在する可能性の高い下層階に到達するための道を探すためにロボットが使用された [2]。

上述のように, 様々な災害においてロボットに要求される重要な作業の一つとして, 災害発生後早い段階での情報収集がある。現在, 屋内での災害対応のように閉塞空間で情報収集活動を行うロボットの多くは, 日本原子力研究所の RESQ シリーズ [1] や倒壊後の世界貿易センタビルで使用された Inuktun 社製 micro-VGTV [3] のように, 車輪もしくはクローラを有するロボットである。しかし, その構造上, 汚染されたビルや倒壊の恐れのある高層ビルなどの内部を高速に移動する, もしくはビル上部より侵入し情報収集を俊敏に行うといった用途には適さない。

そこで, 本研究では地形の制限を受けることなく移動し, 情報収集などの目的を達成可能な, 屋内用小型航空ロボット開発する。

### 2 屋内用小型航空ロボットについて

#### 2.1 情報収集用ロボットについて

都市捜索救助活動や屋内での警備などにおいて必要とされる情報の多くは, 映像による情報である。本研究にて開発するロボットは, ビデオカメラを搭載し, 遠隔地より操縦することにより, 人間の近づけない場所の映像情報を取得することを目的とする。

例えば, 都市捜索救助活動における生存者の救出までの情報収集活動は次のように行われる [4]。

1. 2 次災害を防ぐため, 生存者を捜索する人員に危険が及ばないか調査する。
2. 安全が確認され次第, 生存者の捜索。
3. 生存者が発見されたら, 生存者の救出ルート・手段の検討をする。

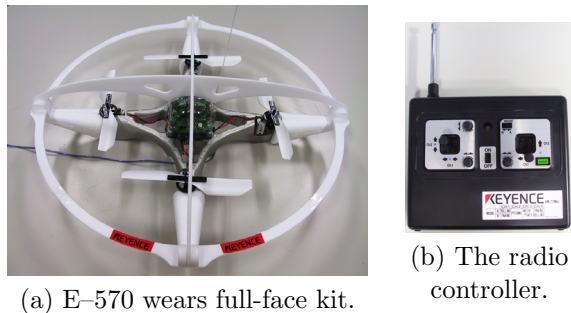
この中では, 1. が最も危険性の高い作業である。倒壊した建物は, 少しの振動により 2 次崩壊をおこす可能性が高い。現在開発されているロボットの多くは, クローラや車輪などの移動機構を有し, 倒壊の恐れのあるがれきや床の上を走行するものである。従って, ロボットの重量により 2 次崩壊をおこす可能性がある。本作業を小型航空ロボットに行わせることにより, がれきや床への影響を劇的に低減することが可能となる。次に 2. や 3. の作業であるが, 崩壊した建物内をくまなく捜索する場合, その内部の空間は狭く, 3 次元である。そのため, 人間が侵入するには困難が伴い, 目的地に到達するために垂直に上昇する必要性もあると考えられる。従って, 垂直に上昇下降が可能な小型航空ロボットを用いることにより, 作業効率を上げ, また生存者の捜索をくまなく行うことが可能となる。

また, 近年頻発しているテロ事件の警備など, 不審物探索の必要性が高まっている。人間が入り込みにくい空調ダクトの内部などを, 複数の小型航空ロボットによってくまなく探すことにより, 爆発物等の不審物の発見につながると考える。

#### 2.2 本研究にて用いる小型航空機について

現在, 屋外用航空ロボットは, 各国で軍用用途, 民間用途問わず広く研究されている [5, 6]。例えば, 屋外用航空ロボットの General Atomics 社製 Predator A [7] などは実用化が進んでいる。一方, 屋内用航空ロボットも, 様々な形で研究が進められているが, まだ実用化に至っていない段階ではない。

3 次元空間をくまなく高速に移動可能な航空機としてヘリコプタがある。障害物や人間との衝突を回避し, ヘリコプタを屋内飛行させる場合, ヘリコプタは小型である必要である。そこで, 本研究ではキーエンス社製ヘリコプタ E-570 [8] を使用することとした。本ヘリコプタは, 4 個のロータを有する小型ヘリコプタで



(a) E-570 wears full-face kit.

(b) The radio controller.

Fig. 1: The E-570 system.

Table 1: Specifications for E-570

Body diameter	250	[mm]
Rotor diameter	135	[mm]
Weight	90	[g]
Radio control range	10	[m]

ある．Fig. 1(a) に、フルフェイスキットと呼ばれるプロペラ保護カバーを装着した状態の E-570 の外観を示す．E-570 のロータおよびボディ部は発泡スチロール製であるため、人間を傷付ける可能性が低く、屋内での使用に適している．Table 1 に E-570 の仕様を示す．

E-570 は、Fig. 1(b) に示す 4 チャンネルのスティック型無線コントローラによって操縦する．その操縦モードは二通り存在する．一般的なラジコンヘリコプタと同じ操縦モードでは、右スティックを上下することにより、上昇下降、左右することにより左右移動、左スティックを上下することにより、前後移動、左右することにより左右回転の指令が送られる．この指令により、E-570 に搭載されたコントローラによって各ロータの推力バランスが調整され、機体が移動する．スティック型コントローラの上下、左右、回転方向にはトリマと呼ばれるつまみがついており、各方向の移動力もしくは回転力バランスを調整する．このトリマを調整し、上昇下降のスティック以外の各スティックが初期位置にある場合、機体が移動せずホバリングできるようにする．また、本体にはジャイロが搭載されており、姿勢を安定化する事が可能である．

本研究では、この E-570 を用い小型ヘリコプタ型航空ロボットの遠隔操縦システムを開発し、航空ロボットによる屋内での情報収集を可能とする．

### 3 小型航空ロボット用遠隔操縦システム

本研究では、2.2 節で述べた E-570 にコンピュータから指令を与え、遠隔操縦することを可能とするシステムを構築している．以下に、本システムの概要および操縦試験について述べる．

#### 3.1 遠隔操縦システムの構築

4 チャンネル送信機のスティック移動量に相当する指令を、コンピュータから送信機に与え、E-570 を操縦するシステムを構築した．Fig. 2 に遠隔操縦システムの概略を、Fig. 3 に、遠隔操縦システムの外観を示す．

本システムは、大きく分けて無線コントローラ、制御用コンピュータ、小型航空ロボットの三つから構成される．本システムの詳細について、以下に述べる．

##### 3.1.1 無線コントローラ

E-570 用送信機には、沖電気工業社製デジタルプロポーショナル・ラジオコントロールシステムの送信用

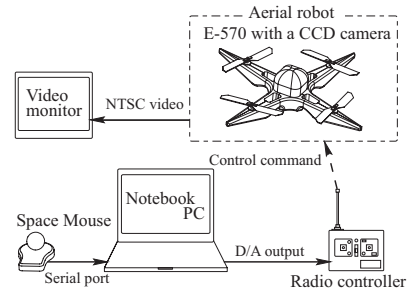


Fig. 2: The remote control system for an indoor small aerial robot.

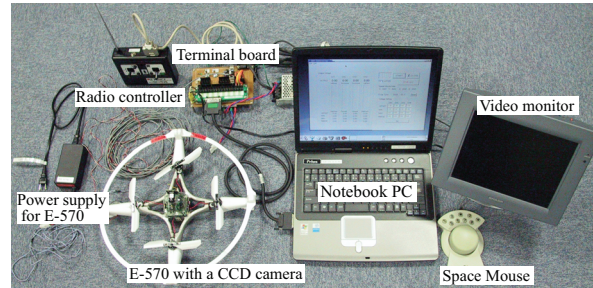


Fig. 3: An overview of the remote control system.

IC MSL9362-1RS [9] が使用されている．本 IC は、スティックに接続された可変抵抗により指定された電圧値を、その電圧値に比例したパルス間隔の信号に変換する．その後、パルス信号は変調回路にて、27 [MHz] 帯 AM 変調され E-570 本体へ無線送信される．本システムでは、この MSL9362-1RS にインタフェース社製 D/A 変換カード CBI-340312 より 0~3.8 [V] の指令電圧を印加する．これにより、E-570 に無線コントローラのスティックを操作する場合と同様の信号を与え、コンピュータより操縦することを可能とした．また、無線コントローラ内部に切替スイッチを設け、スティックによる操縦およびコンピュータによる操縦の二通りの切替が可能である．

##### 3.1.2 制御用コンピュータ

従来から用いられてきたスティック型の操縦インタフェースは、2.2 節で述べたように、各スティックの方向に対応する移動方向を覚える必要がある．また複雑な両手の連係動作が必要であるため、その操縦は直感的ではない．そこで、本研究では Logitech 社製 3 次元入力インタフェース Space Mouse を使用し、直感的かつ片手による操縦を可能とした．Fig. 4 に Space Mouse による操縦方法を示す．Space Mouse の有する 6 自由度のうち、並進の 3 自由度および垂直軸回りの回転の自由度の計 4 自由度を使用し、小型航空ロボットを操縦する．図に示したように、ロボットを移動させたい方向に Space Mouse を動かせばよいため、非常に直感的に操縦できる．また、片手で操縦できることにより、もう一方の手で操縦以外の操作ができ、今後航空ロボットに様々な機能を付加しやすい．この Space Mouse はノート型 PC に接続され、Space Mouse の移動量が D/A 変換カード CBI-340312 により電圧出力に変換され、MSL9362-1RS へ入力される．前後方向、左右方向、回転方向の電圧出力  $V_{out}$  [V] は、それぞれ下記の通り計算される．

$$V_{out} = -V_{range} \times \frac{S_{data}}{2 \cdot S_{max}} + V_{offset} \quad (1)$$

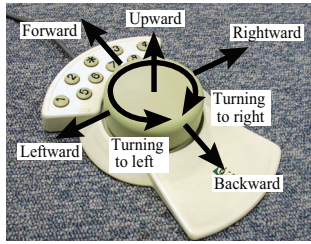
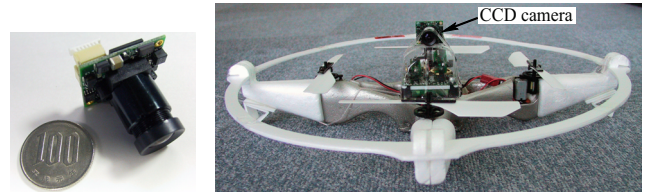


Fig. 4: Space Mouse.



(a) MTV-C0N (b) An overview of the aerial robot.

Fig. 6: The aerial robot for gathering information.



Fig. 5: The control panel.

ここで、 $V_{range}$  [V] は、Space Mouse の移動量に対して、電圧指令値をどれだけ変化させるかを決定する係数である。 $V_{offset}$  [V] は、スティック型コントローラのトリマの値に相当する。 $S_{data}$ ,  $S_{max}$  は、それぞれ Space Mouse から得られる移動量値および移動量値の最大値である。 $S_{data}$  はおおよそ  $-370 \sim 370$  で得られる各軸の移動量値である。(1) 式で得られた指令値に対して、最大指令電圧  $V_{MAX}$  [V] および最小指令電圧  $V_{MIN}$  [V] と比較し、MSL9362-1RS の入力電圧の範囲内に収まるようにしている。また同様に、上昇下降方向の出力電圧  $V_{out}$  [V] は、下記の通り計算される。

$$V_{out} = -V_{range} \times \frac{S_{data}}{2 \cdot S_{max}} + V_{MIN} \quad (2)$$

$V_{range}$ ,  $V_{offset}$ ,  $V_{MAX}$ ,  $V_{MIN}$  の各値の設定を容易に行えるようにするため、Borland 社製ビジュアル開発ツール Kylix 3 を使用し、Fig. 5 に示すコントロールパネルを作成した。図中、A 部で上述の各値を設定する。これら値は、動作中も変更可能である。B 部では、現在出力されている指令電圧を表示する。C 部のスタートボタンを押すことにより、E-570 に内蔵されている機械式ジャイロが回転を始め飛行が始まる。E-570 の連続飛行可能時間は 3 分間であるため、この時間を越えないよう D 部にはスタートボタンを押してから残り時間が表示されている。

システム全体を軽量小型とし、持ち運び可能とするため、制御用 PC に日立製作所製ノート型 PC Prius 200H を用いた。本 PC は、Intel 社製 CPU Pentium M 1.6 [GHz], RAM 容量として 512 [MB] を有する。OS として、リアルタイム OS である RTLinux を採用している。Linux カーネル 2.4.24 に RTLinux パッケージ Ver. 3.2 のパッチを導入したものを使用。上述の CBI-340312 は、本 PC に Card Bus 経由で、Space Mouse はシリアルポート経由で接続されている。

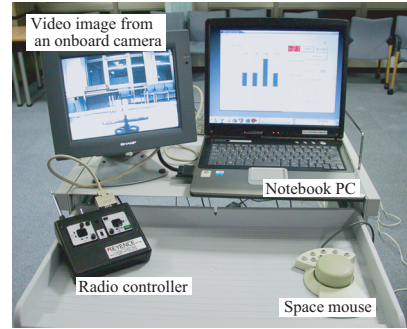


Fig. 8: The cockpit.

### 3.1.3 カメラ搭載小型航空ロボット

映像による遠隔地の情報を収集するため、また、操縦者が映像を見ながら航空ロボットを遠隔操縦するため、E-570 に CCD カメラを搭載した。

ヘリコプタは、ロータを上向きにし、その推力で機体の全重量を支えて飛行する。これに対し飛行機では、プロペラやジェット・エンジンの推力をほぼ水平方向に働かせ、翼により発生した揚力によって全重量を支える。飛行機では、プロペラは重量の約 1/10 程度の推力を発生させているに過ぎない [10]。従って、ヘリコプタの可搬重量は飛行機に比較し、非常に小さい。そのため、ヘリコプタに搭載するセンサは、小型軽量でなくてはならない。E-570 には、オプションで 7.2 [V], 300 [mAh] の Ni-Cd バッテリーが用意されており、このバッテリーの重量が 40 [g] である。このバッテリーを搭載せず、その分の可搬重量でカメラ等のセンサを搭載することとした。本研究では、まず CCD カメラを 1 個搭載し、操縦試験を行う。Fig. 6(a) に示す MINTRON 社製 1/4 インチ 25 万画素 CCD カメラ MTV-C0N を、Fig. 6(b) に示すように、E-570 の上部に搭載した。MTV-C0N は、12 [g] と軽量でありつつ、CCD 方式であるため高画質である。本カメラの映像は、有線で地上に送る。このカメラ映像をもとに、操縦および情報収集を行う。また、現段階では、E-570 への 7.2 [V] および MTV-C0N への 12 [V] 電源は地上より有線で給電している。

### 3.2 操縦試験

3.1 節で述べた遠隔操縦システムを用い、操縦試験を行った。Fig. 7 に一例を示す。操縦者から見たコックピットの様子を Fig. 8 に示す。操縦は、Space Mouse のみを用いて行い、スティック型コントローラは使用していない。また、本実験では、カメラ映像は録画のみに使用され、操縦者は小型航空ロボットを目視して操縦を行った。本操縦システムにより、約 20 ~ 30 [s] の飛行が可能であった。30 [s] 以上の飛行が困難な原因として、一度機体が大きく回転を始めると回転を止めることが困難であった点があげられる。4 ロータヘリコプタの機構上、ロータの回転力の差によって機体の

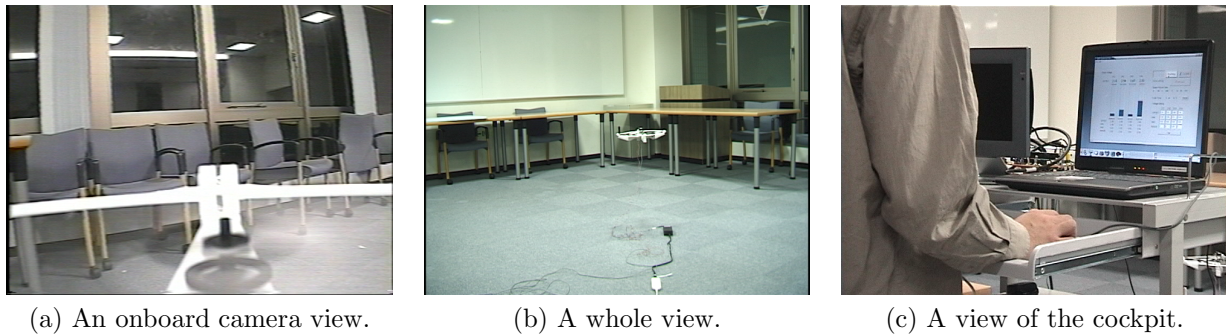


Fig. 7: An operation of the aerial robot using Space Mouse.

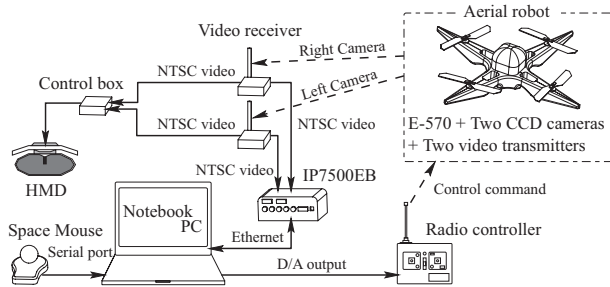


Fig. 9: The control system which is under development.

回転を制御している．そのため，一般的な2ロータヘリコプタのようにテイルロータで直接機体の回転を制御する方式に比較し，回転方向のバランスをとることが難しい．従って，E-570にカメラを搭載したことにより機体のバランスが崩れ，機体の回転が生じてしまう事が考えられる．今後，カメラの取り付け方法を複数試し，最適なバランスとなる位置を設定する．

#### 4 今後の課題

航空ロボットを指定個所にホバリングさせる場合，现阶段では操縦者が目視により直接機体を確認し Space Mouse を小刻に動かすことにより，機体の位置を制御している．カメラ映像は，操縦に用いなかった．今後，遠隔地で航空ロボットを飛行させるため，カメラ映像による操縦システムを構築する．遠隔地で飛行する際，飛行している空間を3次的に把握することが必要となる．そこで，航空ロボット上にステレオカメラを搭載し，頭部搭載型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を用いて，操縦者に奥行き情報を提示できるようにする．また，操縦システムに指定個所で自律的にホバリングする機能や障害物との衝突回避機能，マップ作成機能などを付加し，より操縦を簡易にする．そのため，ステレオカメラを使用し，視覚情報をもとに航空ロボットを制御するシステムを現在構築中である．構築中のシステムの概要を Fig. 9 に示す．図中，IP7500EB は，日立ハイコス社製ビジョンセンサであり，カメラから得られる画像に対して処理を行う．また，航空機の高速度を生かすことのできる可能な高速画像処理システムとして，人間の網膜を模擬した3次元ビジョンチップ [11] を搭載する予定である．現在，このビジョンチップを用い，脳型情報処理システムを歩行ロボットの制御に応用する研究を平行して行っている [12]．今後，ビジョンチップを用いた軽量なカメラを開発し，脳型情報処理システムを航空ロボットの制御にも応用する．

屋内で無線による制御を行う場合，電波を遮蔽するものが多く，航空ロボットと基地との間の通信が頻繁にとぎれる可能性が考えられる．そのためにも，上述の自立制御が必要不可欠となると考える．また，遮蔽物を越えて通信を行うために，複数台の航空ロボットを飛行させ，航空ロボット間でアドホックネットワークを構成する予定である．直接すべての航空ロボットと基地が通信する必要をなくし，遮蔽物に強いネットワークを構築する必要がある．さらには，複数航空ロボットに物体を把持させ，災害現場などで初期救助活動を行えるようにすることも研究課題である．

#### 5 おわりに

本論文では，開発した屋内用小型航空ロボットの操縦システムについて述べた．本システムにより，屋内用小型航空ロボットを用いた実験の基礎環境が整い，様々な応用研究が可能となった．今後，様々な状況を想定した遠隔操縦を行い，屋内用の遠隔操縦システムに必要な機能を付加していく．また，遠隔操縦のみならず，航空ロボットの自律的制御システムの開発も行う．

#### 参考文献

- [1] 小林忠義，原研における事故対応ロボットの開発 (その1) 情報遠隔収集ロボットの開発，日本ロボット学会誌，vol. 19, no. 6, pp. 706-709, 2001.
- [2] R. R. Murphy 著，牧田忍 訳，ニューヨーク世界貿易センター (WTC) でのレスキューロボット，日本機械学会誌，vol. 106, no. 1019, pp. 36-44, 2003.
- [3] <http://www.inuktun.com/micro-vgtv.htm>
- [4] R. R. Murphy, et al., Mobility and Sensing Demands in USAR, *Proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 138-142, 2000.
- [5] AEROSPACE AMERICA, the American Institute of Aeronautic and Astronautics, pp. 30-35, June 2003.
- [6] 菅野道夫，実用化を目指す空中ロボット—無人ヘリコプター—，日本ロボット学会誌，vol. 18, no. 7, pp. 937-940, 2000.
- [7] AVIATION WEEK & SPACE TECHNOLOGY, McGraw-Hill, pp. 48-54, March 2003.
- [8] <http://www.keyence.co.jp/hobby/saucer/index.html>
- [9] MSL9362-1RS/MSL9362RS ラジオコントロール送信機/受信機用 IC，沖電気電子デバイス DATA SHEET.
- [10] 加藤寛一郎 他，ヘリコプタ入門，東京大学出版会，1985.
- [11] Mitsumasa Koyanagi, et al., Neuromorphic Vision Chip Fabricated Using Three-Dimensional Integration Technology, *Proc. of the 2001 IEEE Int. Solid State Circuits Conf.*, pp. 270-271, 2001.
- [12] 辻田哲平，近野敦，内山勝，パラレルリンク機構を用いた両眼視覚システムの開発，計測自動制御学会東北支部第206研究集会，資料番号206-2，2002.