

マルチロボットヘリコプタによるビーコン探索手法に関する研究

梅本雅之^{†1} 川村秀憲^{†1} 鈴木恵二^{†1}

無人ヘリコプタはホバリング飛行や垂直離着陸といったヘリコプタ特有の飛行特性を有し、農薬散布や火山での観測といった用途に実用化され、開発が進められている。しかし、広域な作業範囲や複雑なタスクに対処する為には、単一機体での作業では限界があり、複数機体で作業する事で作業の効率化や耐障害性の向上が期待される。本研究では、自律制御された小型無人ヘリコプタが相互に通信し、取得したデータを共有・統合するシステムをマルチロボットヘリコプタシステムと定義し、その適用例として、広域を並列的に撮影する航空写真撮影や遭難者救助といった例が考えられる。ここでは遭難者救助、特に時間的制約が厳しい雪崩遭難者救助に着目し、雪崩遭難者救助に要する時間を短縮する事を目的とする。雪崩遭難者の携帯したビーコンをマルチロボットヘリコプタシステムを用いる事で、効率的に探索するフライトプランを検討した。

Beacon search flight planning with Multi Robot Helicopter

MASAYUKI UMEMOTO,^{†1} HIDENORI KAWAMURA^{†1}
and KEIJI SUZUKI^{†1}

This paper describes beacon search algorithm using multi robot helicopter. Multi robot helicopter is defined as multiple autonomous unmanned Helicopters using ad-hoc network. Unmanned helicopter has several abilities such as hovering and vertical takeoff and landing, Unmanned helicopter is becoming popular in actual applications such as search, rescue and photographing. Avalanche rescue is hard time constrained in particular. The time to find and extricate victims is most crucial: once buried by an avalanche, survival chances drop dramatically after the first 15 min. So We apply Multi robot helicopter system to Avalanche rescue. We investigate system configuration, and design hardware configuration. Approach to autonomous unmanned helicopter, develop flight simulator, design a flight controller. investigate beacon search algorithm in simulator, The experimental results show the effectiveness of algorithm using Multi Robot Helicopter.

1. はじめに

近年、UAV: (Unmanned Aerial Vehicle) の研究が盛んに行われており、中でも無人ヘリコプタはホバリング飛行や垂直離着陸といったヘリコプタ特有の飛行特性を有し、農薬散布や火山での観測といった用途に実用化され、開発が進められている¹⁾²⁾ 更に複数機体で作業する事で広域な作業範囲や複雑なタスクに対処し、加えて作業の効率化や耐障害性の向上も期待出来る。本研究では、自律制御された小型無人ヘリコプタが相互に通信し、取得したデータを共有・統合するシステムをマルチロボットヘリコプタシステムと定義し、その適用例として、広域を並列的に撮影する航空写真撮影や遭難者救助といった例が挙げられる。ここでは遭難者救助、特に時間的制約が厳しい雪崩遭難者救助に着目し、雪崩遭難者救助に要する時間を短縮する事を目的とする。

1.1 雪崩遭難者救助

Markus らの研究³⁾ による雪崩遭難者の生存率と時間推移の調査では、雪崩発生後、15分以内の生存率は約92%であるが、以後時間の経過と共に急激に低下し、窒息による死因の場合は45分、怪我や低体温症の場合は2時間経過後、生存率は約0%となる。また、雪崩による死因の中で、最も多い死因は窒息死の為、迅速な救助が必要不可欠であり、雪崩による遭難者救助は非常に時間的制約が厳しい。

現在、雪崩遭難者救助は、一般的に雪崩遭難者が携帯したビーコンの電波を基に探索するが、雪崩発生後、ヘリコプタの救助隊が到着するまで1時間以上要する為、時間的制約が厳しい雪崩遭難者救助では、救助隊は遺体捜索となってしまう事が多いのが現状である。その為、雪崩遭難者救助は遭難パーティによるセルフレスキューが基本であるが、セルフレスキューは二次災害の危険性を有し、また、周波数が457Hz、電波距離数10m~100m程度のビーコンを迅速かつ広範囲に探索する必要がある。コスト的な観点からも、民間による探索は費用が高額に上る事が多い。

従って、本論文ではマルチロボットヘリコプタシステムを用いて、雪崩遭難者が携帯しているビーコンを効率的に探索するシステム及びアルゴリズムを検討する。また、市販のラジコンヘリコプタにセンサ類を搭載したハードウェア構成を検討・実装し、ヘリコプタをモデル化・シミュレータを作成した。作成したシミュレータ上で雪崩が発生する環境を想定し、

^{†1} 北海道大学
Hokkaido University

雪崩遭難者を探索するアルゴリズムを検討した。

2. マルチロボットヘリコプタシステム

ここでは、コストが安く比較的扱いやすい小型無人ヘリコプタをベースとする。自律制御された小型無人ヘリコプタが相互に通信し、取得したデータを共有・統合するシステムをマルチロボットヘリコプタシステムと定義し、マルチロボットヘリコプタシステムを構成する小型無人ヘリコプタ1台のハードウェア構成と想定するシステム概要を以下に示す。

2.1 ハードウェア構成

制御対象となるマルチロボットヘリコプタシステムを構成する小型無人ヘリコプタ Innovator の全体像を図1に、主な仕様を表1に示す。

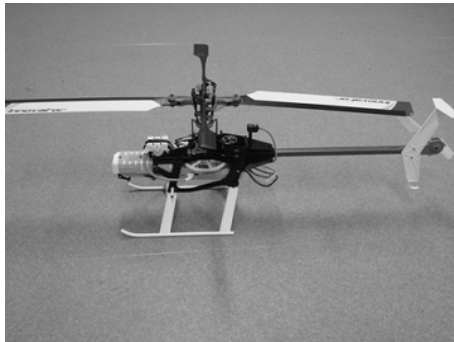


図1 Innovator

表1 Innovator の仕様

モデル	Innovator MD530
全長	650 [mm]
全幅	135 [mm]
メインロータ長	712 [mm]
テールロータ長	150 [mm]
重量	700 [g]
メインロータ回転数	1500 [rpm]

Innovator は市販のラジコンヘリコプタであり、これにセンサ類やマイコンを搭載する事

で、自律制御を行う。Innovator の仕様として、メインロータの回転数を一定に保つガバナシステムとテールを安定させるジャイロシステム及び、アクチュエータとして4つのサーボモータを搭載し、電子回路内のCPUが統合制御を行っている。以上に加えて、無線LAN搭載のマイコンやセンサ類(ジャイロセンサ・GPS・加速度センサ)を搭載する。搭載したハードウェアの詳細な仕様を以下に示す。

- マイコン

機種: Armadillo-300

特性: CPU クロック周波数:200[MHz]

RAM:64[MByte], ROM:8[MByte]

重量: 105[g]

- GPS

機種: BU-353

特性: 位置精度:10[m](単独測位), 5[m](WAAS)

応答周波数:1[Hz]

重量: 69[g]

- 加速度センサ

機種: AS-3ACC

特性: 検出範囲: ± 90 [deg]

感度:1.5G:800[mV/G], 3G:600[mV/G], 4G:400[mV/G], 6G:200[mV/G]

応答周波数:xy:350[Hz], z:150[Hz]

重量: 4[g]

- ジャイロセンサ

機種: ENC-03R

特性: 検出範囲: ± 300 [deg/sec]

感度:0.67[mV/deg/sec]

応答周波数:50[Hz]

重量: 5[g]

今回用いた Innovator のペイロードは約 370[g] であり、マイコンやセンサ類を含めた合計重量は 340[g] となった。Innovator にマイコンやセンサ類を搭載した制御ユニットを図2に示す。また、Innovator はペイロードが非常に小さく、搭載可能なマイコンやセンサ類は限られている為、本研究では、ホストコンピュータベースの制御を行う、GPS や加速度セ

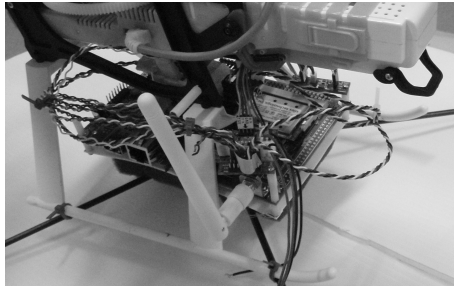


図 2 コントロールユニット

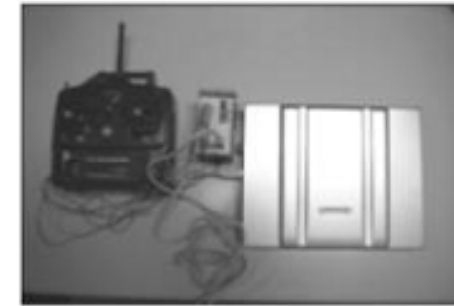


図 3 PC とロボの接続

ンサ・ジャイロセンサにより、計測されたデータは A/D コンバータで変換され、ヘリコプタに搭載されたマイコンに集約、無線 LAN 通信により、地上のホストコンピュータに送信される。ホストコンピュータで受信したデータは制御器により制御指令値を算出し、D/A コンバータを介してプロボに送信され、受信した制御指令値よりヘリコプタは制御される。D/A コンバータを介して PC とプロボの接続を図 3 に示す。用いる制御器としては、先行研究⁴⁾より 3 つの制御器を直列に接続したものを使用する。具体的には、位置制御器、速度制御器、姿勢制御器を直列につなげた制御系を適用する。位置制御器は GPS での観測値と位置目標値から P 制御により速度目標値を計算し、次に速度制御器は速度目標値を用いて、姿勢角目標値を計算する。最後に姿勢制御器は姿勢角目標値からサーボモータへの入力値を算出する。また、速度制御器の出力である姿勢角目標値にリミッタを加えることで、姿勢角を制限する事が可能となる。

2.2 システム概要

雪崩遭難者救助の一連のフローは「遭難現場へ飛行」「ビーコン探索」「救助作業」と大きく分割出来るが、本研究では、救助時間を短縮する為に、「遭難現場へ飛行」及び「ビーコン探索」に要する時間の短縮を図る。まず、「遭難現場へ飛行」に要する時間を短縮する為に、少数機体を多拠点に配置するシステム構成とする。15 分経過後から生存率は急激に低下する為、雪崩が発生する可能性がある雪山まで 5 分以内で飛行可能な拠点を初期配置拠点とする。本研究で使用する RC ヘリコプタは最大速度約 100km/時で飛行する事が可能な為、5 分で飛行可能な距離約 8.3km より、外乱の影響や配備時間を考慮して本研究では 5km 四方の雪山を想定する。また、指向性を持たせた通信により、配置地点と通信を行い続ける親機と親機とアドホックに接続して探索する子機というシステム構成とする。続い

て「ビーコン探索」に要する時間短縮の為、雪山のデータ（標高や気温）を基に探索範囲を絞り込み、雪崩の流路を推定する。また、探索範囲をグリッドで区切り、ビーコンの埋没し易さを確率分布で表現する。確率分布は以下の埋没し易い個所といった経験則を反映する。

- 消失点の近く
- 雪崩の流路沿い・縁や下端
- 障害物の周辺・低い場所

本研究では、探索時間の短縮とは、探索済みのグリッドのビーコン埋没確率の和を最大化する事と考える。加えて、雪崩遭難者の生存率の時間推移も考慮すると、本探索の目的関数は、グリッド (x, y) のビーコン埋没確率 $P(x, y)$ に、ある時刻 t での生存率 $r(t)$ の積の和の最大化である。目的関数を f とした式で表すと以下の様に表せる。

$$f = \int P(x, y) \times r(t) \quad (1)$$

2.3 シミュレーションモデル

ヘリコプタの制御器のパラメータチューニングや雪山遭難者探索アルゴリズムの検証の為、ヘリコプタの動特性をモデリング⁵⁾し、生じる力及びモーメントを機体座標系による運動方程式で表現し、シミュレータを作成した。本論文で用いるヘリコプタである Innovator はシングル・ロータ・ヘリコプタであり、機体中央のメインロータと呼ばれる回転翼が揚力を発生させ、メインロータで発生するトルクを打ち消し、方向制御を行うテールロータが後方の回転翼として存在する。ヘリコプタに生じる力やモーメントを図 4 に示す。

6 軸の運動方程式を算出する事で、ヘリコプタの動特性をシミュレートする。また、雪山モデルは雪崩が発生し易い標高差や斜面勾配を考慮し、雪山のモデル化を行った。国土交通

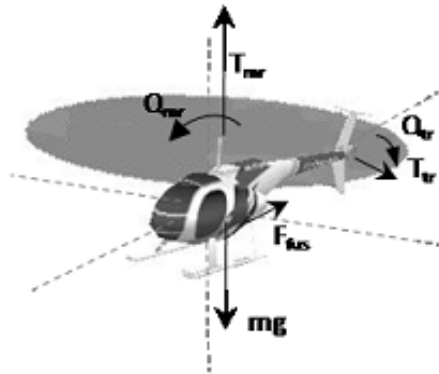


図 4 ヘリコプタのモデル

省の調査結果より、主に斜面勾配が 35 度～45 度の間で特に雪崩が発生し易い。以上のデータや、配置拠点から遭難現場までの飛行時間より 5km 四方の雪山を想定している為、これらを考慮して、図 5 のような雪山モデルを構築した。本雪山モデルは 4 方向に谷を配置し、雪崩が発生し易い箇所をモデル化してある。

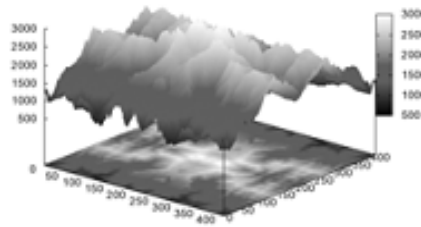


図 5 雪山モデル

3. 実験

センサの観測誤差やメインロータの振動によるノイズは誤差を含んだ観測値から現在の

状態を推定する手法である Kalman Filter を用いて状態を推定する。制御指令値と回転角との関係性を調査し、シミュレータとシステム同定を行う。

3.1 シミュレーション実験

雪山モデルとヘリコプタモデルを用いて、シミュレータ上で雪崩遭難者の携帯しているビーコン探索を行う。

3.2 実験設定

実験設定として以下の表 2 の設定で実験を行った。

雪山範囲	5000[m ²]
ヘリコプタ通信範囲	200[m]
遭難者数	1[人]
遭難パーティ者数	1[人]
ビーコン通信範囲	20[m]
機体間通信範囲	200[m]
ヘリコプタ機体数	親機 1[機]・子機 1-10[機]
探索時間	120[min]

標高差や斜面勾配は先述のとおりである。消失点の座標はランダムに決定し、探索範囲は標高から流路を推定し、半径 1000m 中心角 60[deg] の扇状とする。また、埋没地点は埋没確率分布にノイズを乗せた分布に従う。式 (1) の目的関数 f つまり、埋没確率 $P(x,y)$ と生存率 $r(t)$ の積を最大化するルートプランニングを行う。ただし、 t には遭難地点まで飛行する時間 t_i が含まれているものとする。雪崩発生後からルートプランニングまでの時間が限られている事や障害物や遺留物により動的に確率分布が変動する可能性より、ここでは、ヘリコプタの動特性をヒューリスティックとして導入したタブーサーチにより M 回試行後、決定したルートに従い探索を行う。また、ビーコンを発見した場合、子機は親機と通信を行う必要がある為、制約条件として、全てのヘリコプタは常に通信可能でなければならないという制約条件を加えた場合と制約条件無く飛行し、ビーコン発見後、親機の通信範囲内まで飛行する場合の 2 パターンについて実験する。通信に制約がある場合、山岳という地形や広範囲を迅速に探索する必要性からアドホックネットワークによる通信が適していると考えられる。この場合、評価関数は目的関数に加えて、通信範囲からはみ出した分のペナルティ p_i を減算したものを評価関数とし、制約がない場合は、生存率は親機の通信範囲内まで戻る時間 t_b を加えた $r(t + t_b)$ で算出する。

3.3 実験結果

まず、制約条件無く飛行する場合の、グリッド探索した結果を図6に、軌跡の一例を図7に示す。図6は、横軸を機体数縦軸に評価関数をとり、棒グラフはグリッドの確率分布の和、線グラフは親機の通信範囲内まで戻の時間を考慮する場合としない場合を表す。

以上より、時間内での探索範囲内のグリッド探索は機体数による明確な差異は無いが、機

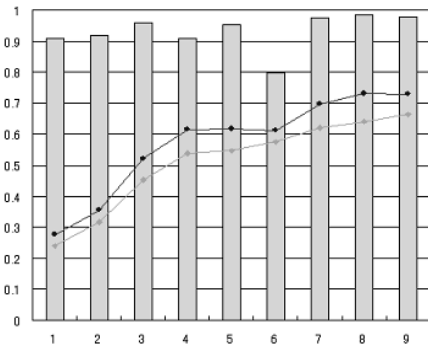


図6 機体数と評価関数

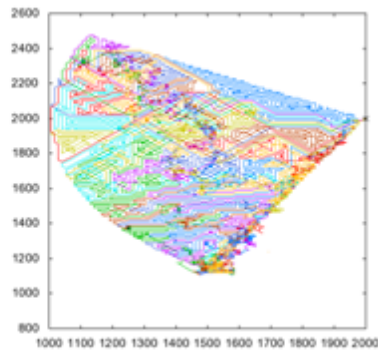


図7 10機体でのグリッド探索の一例

体数が少ないときは、時間経過による生存率の減衰が大きく、評価関数に大きな差異が見られる。親機の通信範囲内まで戻の時間を考慮する場合としない場合とを比較すると、大きな差異は見られず、親機に戻るコストは小さいと考えられる。また、図7より、軌跡に直線性が強く表れており、探索範囲内を広く探索出来ている事が分かる。次に、アドホック通信の制約条件がある場合の結果を図8に示す。制約条件がある場合は、制約条件が無い場合と

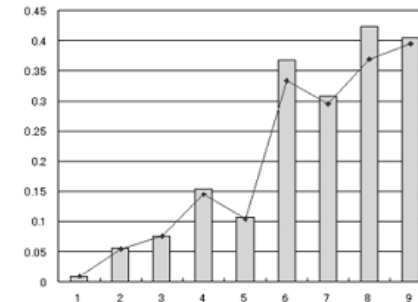


図8 機体数と評価関数

比較し、評価関数もグリッドの確率分布の和も小さい。制約条件が厳しい為、局所解に陥る為だと考えられ、制約条件が無い場合、親機の通信範囲に戻るコストが小さい為、探索時間という軸で評価した場合、アドホックで通信を行う利得は小さい。ネットワークのロバスト性などを考慮した場合は、アドホックで通信を行う利点はあると考えられる。

4. 結論

本研究ではマルチロボットヘリコプタシステムを用いて、雪崩遭難者が携帯しているビーコンを効率的に探索するシステム及びアルゴリズムを検討した。市販のラジコンヘリコプタにセンサ類を搭載したハードウェア構成を検討・実装し、本論文で用いたヘリコプタをモデル化・シミュレータを作成した。シミュレータ上で制御器を設計・チューニングし、実機とパラメータ同定を行った。最後に、作成したシミュレータ上で雪崩が発生する環境を想定し、雪崩遭難者を探索するアルゴリズムを検討した。

参 考 文 献

- 1) Buskey G.,Roberts J.,Corke P., Ridley P.and Wyeth G.: "Sensing and Control for a Small-size Helicopter", Experimental Robotics,B.Siciliano and P.Dario,Editors, :pp.476-487(2003)
- 2) A.Winfield,L. E. Parker, G. W. Berkey, and J. Barhen, : Distributed Sensing and Data Collection Via Broken Ad Hoc Wireless Connected Networks of Mobile Robots, Distributed Autonomous Robotics Systems ,pp.273-282,(2000)
- 3) Markus Falk Hermann Brugger Liselotte Adler-Kastner; Avalanche survival chances,Nature 368, 21 (1994)
- 4) 羽沢健作, 辛振玉, 藤原大悟, 五十嵐一弘,Dilshan FERNANDO, 野波健蔵ホビー用小型無人ヘリコプタの自律制御(実験的同定に基づくモデリングと自律制御実験); 日本機械学会論文集 70 卷 691 号,pp112-119(2004)
- 5) 加藤寛一郎, 今永勇生ヘリコプタ入門; 東京大学出版会 (1985)