

平成 2 8 年 5 月 2 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870046

研究課題名(和文) エッグシェルヘリコプター：全方向回転球殻を持つ飛行と車輪移動可能な飛行体の開発

研究課題名(英文) UAV with Passive Rotating Spherical Shell

研究代表者

岡田 佳都 (Okada, Yoshito)

東北大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：10713000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円

研究成果の概要(和文)：錯雑環境中で、複雑な制御を用いることなく、マルチコプターを構造物の近傍で安定して飛行させることに成功した。錯雑環境での飛行は既存のマルチコプターの一般的な問題であり、これを解決した本研究は、国内外の招待講演、雑誌論文、査読付き学会、TV取材等で広く注目された。開発したマルチコプターは、球殻、受動ジンバル、マルチコプター本体から構成される。球殻は本体およびジンバルを保護する。本体と球殻は受動ジンバルを介して接続されているため独立に受動回転できる。これにより、天井や壁面に球殻を接触させ、球殻をタイヤのように使いながら構造物にそって転がることができる。本体は一般的なクワッドローター機である。

研究成果の概要(英文)：As an outcome of this research, an UAV (unmanned aerial vehicle) that can stably fly near an obstacle without any complex control in a cluttered environment. The stable flight in the cluttered environment is a known and general issue of existing UAVs, which has been solved by this research. This successful result was presented in domestic and international invited talks, journal and reviewed papers, and interviews for TV. The developed UAV consists of a spherical shell, a passive gimbal, and an internal UAV. The spherical shell protects the gimbal and the UAV. The shell and the UAV are connected via the gimbal so that they can independently rotate. This mechanism allows the UAV to contact its shell to a ceiling or a wall and rotate on the surface by using its shell like a tire. The internal UAV is a general quadrotor-type aerial vehicle.

研究分野：飛行ロボット

キーワード：飛行ロボット 災害対応ロボット

1. 研究開始当初の背景

過去 10 年で米国において 10,000 機以上生産されるなど、無人航空機が急速に広がっており、現在では 50 カ国以上で利用されている。中でも、細やかな飛行制御や空中静止が可能なプロペラ間 1m 未満の小型マルチコプター（ドローン）が近年盛んに研究されている。

これまで研究代表者は、小型マルチコプターであれば足場を必要とせず高所を安定に観察できること、あるいは、小回りがきき陸上の瓦礫と無関係に飛行できることから、ビルや配管、橋梁の保守点検や被災建造物の探査のための機構と制御の開発に取り組んできた。しかしその中で、プロペラやセンサと環境の接触により自他損の危険がある、電力消費が大きく活動時間が 10 分程度と短い、水平な路面に対してしか離着陸できない、といった問題がわかってきた。これらはマルチコプターのよく知られた一般的な課題であり、解決することでマルチコプターの応用が一気に広がることが期待できる。

2. 研究の目的

背景で述べた課題を根本から解決するために、本体と独立して全方向に受動回転できる球殻で覆われたマルチコプターを多角的かつ学際的な研究により開発することを目的とした。

まず、マルチコプター本体を保護し安全に移動するために、軽量かつ頑強な球殻構造を考案する必要がある。具体的構想として、頑強なジオデシックドームを発展させた球殻構造を軽量のカーボンパイプを用いて構築する。耐衝撃性を考慮してパイプの継ぎ手に柔軟な材料を用いることも想定しており、材料力学やソフトロボティクスの立場からの構造研究が必要である。安全性と頑強性はロボットが道具として活用されるための必須条件であり、特に飛行ロボットについては、国内でもプロペラとの接触による死亡事故が起きるなど危険性が指摘されている。

その上で、球殻を車輪のように使用する転がり走行を可能とする機構を考案し、飛行と転がり走行を併用することで、活動時間を大幅に延長する。車輪で乗り越え可能な高さ（＝車輪径）を最大化できる球殻で本体を覆う構造が最適である。また球殻と本体をジンバルで受動接続することで、走行中に本体の傾き（＝プロペラ推力の向き）を自在に変更し全方向に舵取りができる。転がり走行は消費電力の少なさから最近注目されはじめており、円筒殻での前後方向への走行により飛行の 6 倍の活動時間と 4 倍の移動距離を実現した先行研究がある。本研究では追加のアクチュエータなしで全方向走行を実現し、飛行体設計や省アクチュエータ設計に広く寄与する。

さらに、球殻とジンバル、本体を含む運動学を解明し、運動学モデルに基づいて提案す

るマルチコプターの挙動を制御する。これにより、従来は着陸不可能であった凹凸路面に対して、球殻内で本体を水平に制御したまま着陸できる。また、球殻を接地させたまま、進行したい方向に本体の傾きを制御し舵を切ることで、任意の経路上を転がり走行できる。さらには、路面形状と無関係に本体の姿勢を制御し離陸できる。受動ジンバルを含む機構を実用的に扱う制御手法を考案するために、パッシブロボティクスや制御工学の立場からの多角的な研究が必要である。

殻を持つ飛行体の先行研究として、一方方向に回転する円筒殻を持つマルチコプターや球殻内に固定された飛行機があるが、いずれも殻と本体の姿勢に拘束関係がある。本研究で取り組む全方向への転がり走行や路面形状を問わない離着陸の実現方法は、機構的にも制御的にも明らかでない。

以上のように、本研究は近年注目されている小型マルチコプターの活動時間と安全性、離着陸の問題に対し、斬新な機構により根本的な解決を与えるものである。また、受動回転球殻を持つ陸空両用ロボットの制御に取り組むことで、移動ロボティクスや飛行ロボティクス、パッシブロボティクス、省アクチュエータ設計の分野に広く学術的知見を追加できると考えた。

3. 研究の方法

（１）軽量かつ頑強で転がり抵抗の少ない全方向回転球殻構造の開発

全方向回転球殻は、高い走行効率を達成するために転がり抵抗が少なく、飛行時に負担とならないよう軽量で、環境と接触しても内部のマルチコプターを保護できるよう頑強である必要がある。

これらの条件を満たしうる構造として、研究代表者は軽量かつ頑強なジオデシックドームを利用した球殻とマルチコプターをジンバルにより受動接続する構造を構想している。ジオデシックドームは球形状を正三角形と二等辺三角形により近似した構造で、三角形の辺に当たる部分に配置した棒材を頂点に当たる部分で連結することにより構築できる。辺と節のみで構築され面を持たないため軽量で、三角形のみで構成されたトラス構造の一種であるため頑強である。

解決すべき課題として、ジオデシックドームは直線状の部材により球形状を近似するため転がり抵抗が大きいことが懸念されるが、研究代表者はこの構造を発展させ、曲線の部材で置換することで転がり抵抗を低減できると考えている。具体的には、直線の部材の一部または全てを、曲率を球殻の半径と一致させた部材に置き換える。曲線と直線の部材の割合は、CAD 上でのシミュレーションと試作を併用したアプローチにより、転がり抵抗や剛性、重量を勘案して判断する。

また、単に球殻の剛性を高めるだけでは、墜落など急激な衝撃が加わった際に破断す

ることも想定できる．耐衝撃性を考慮して棒材の継ぎ手を柔軟な材料とするなど，多方面から構造を工夫する．

(2) 球殻のダイナミクスを考慮した転がり移動と姿勢の制御

全方向回転球殻マルチコプターの移動原理を実用的に扱う方法論を確立するために，球殻のダイナミクスを考慮した転がり移動の制御ならびに球殻内での本体の姿勢の制御を実現する．

(A) マルチコプターとジンバル，球殻を含む運動学モデルの構築

全方向回転球殻マルチコプターの挙動を制御するために，プロペラの推力とロボットの挙動の関係を記述する運動学モデルが必要である．提案するマルチコプターは全体としては新しい機構であるが，マルチコプターやジンバル，球殻といった構成要素のモデル[2]は既に知られているため，全体の運動学モデルの構築に支障はないと考えている．構成要素間の摩擦や転がり抵抗も個別に計測可能である．

(B) 運動学モデルに基づいた転がり移動と姿勢の制御

(A) で構築した運動学モデルを取り込んだ制御を考案する．全方向回転球殻マルチコプターでは，プロペラの推力を単純な飛行だけでなく，飛行よりも効率のよい転がり走行や，壁面をなぞるように飛行する転がり飛行，離着陸に際して球殻内で本体の姿勢を水平に保つために用いることが想定される．これらの挙動を使い分けるために，プロペラの推力を運動学モデルに基づいて調整し，転がりの軌跡や球殻内での姿勢を制御する．運動学モデルならびに制御の精度評価に関しては，モーションキャプチャーによる位置姿勢の真値を参考とする．

(3) 球殻内部からのセンシング

本体から球殻越しに環境を計測したデータを解析して球殻を計測したデータを選び分けることにより，環境を計測したデータを取り出す，あるいは球殻の回転状態と環境の情報を並行して認識する手法を研究する．例えば，地面からの高度を計測する超音波センサや視認による保守点検のためのカメラ，構造物内部の地図を作るための二次元レーザー距離センサの搭載を考えると，これらの計測データには球殻を計測した部分と環境を計測した部分が含まれるはずである．このような計測データから有意な情報を抽出するために，センサの計測原理モデルに基づいた分析やしきい値によるフィルタリング，直前のデータとの相関分析などの手法を選択あるいは考案する．

4. 研究成果

(1) については，研究方法に記載の通り，ジオデシックドームを発展させた構造の軽

量かつ頑強な球殻構造を考案した．また，ジンバル構造やマルチコプターも合わせて製作し，これらを合わせて受動回転球殻マルチコプターを完成させた．さらに，対象環境に合わせた設計方法を体系化し，論文等で発表した．

(2) については一般的な飛行ロボットの姿勢制御を適用し，狭隘部での飛行および転がり移動を実現した．この制御を用いた実環境での動作性能の評価を行い，論文等で発表した．

(3) については球殻内部から撮影した映像から写り込んだ球殻を除去する画像処理手法を考案し，論文で発表した．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 岡田佳都, 岡谷貴之, “ 橋梁点検を代替するための受動回転球殻を有するマルチコプターの開発と実橋梁における点検性能評価,” 日本ロボット学会誌 Vol.34 No.2, 2016 (査読有)

〔学会発表〕(計 6 件)

1. S. Mizutani, Y. Okada, C. J. Salaan, T. Ishii, K. Ohno, S. Tadokoro, “Proposal and Experimental Validation of a Design Strategy for a UAV with a Passive Rotating Spherical Shell,” IROS2015, 2015 年 9 月, Congress Center Hamburg, ドイツ

2. Y. Okada, “ Search-and-Rescue Robots before and after Robotic Surveillance by Quince in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,” IEEE HTC Workshop, 2015 年 12 月, Waterfront Hotel, フィリピン

3. 岡田佳都, 石井拓麻, C.J. Salaan, 大野和則, 田所諭, “ 飛行ロボットによる橋梁近接目視点検のためのカメラシステムの開発と実用性能の定量評価,” SI2015, 2015 年 12 月, 名古屋国際会議場

4. 石井拓麻, 岡田佳都, 大野和則, 田所諭, “ 飛行体の機上カメラを用いた受動回転球殻の状態推定に関する研究,” ROBOMECH2015, 2015 年 5 月, 京都市勧業館

5. 水谷将馬, 岡田佳都, 柳村一成, 矢野浩史, 大野和則, 田所諭, “ 汎用的な設計法に基づく受動回転球殻 UAV の開発,” SI2014, 2014 年 12 月, 東京ビッグサイト

6. 水谷将馬, 大野和則, 柳村一成, 岡田佳都, 竹内栄二郎, 田所諭, “ 錯雑した構造体中での飛行が可能な回転球殻を有するクアッドロータ,” ROBOMECH2014, 2014 年 5 月,

富山国際会議場

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rm.is.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 佳都 (OKADA, Yoshito)

東北大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：10713000

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：