

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05905

研究課題名(和文) 遠隔操縦で検査できるコンクリート壁面検査ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of Wall Inspection Robot which Inspects by Remote Control

研究代表者

高田 洋吾 (Takada, Yogo)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70295682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、社会インフラや建築物の壁面を撮影しながら走行可能なコンクリート壁面検査ロボットを開発することを目的として、ロボットの構造やモータ制御の方法を確立している。さらに壁面接触およびローター形状が消費電力に及ぼす影響を明確化している。また、操縦安定性を確保するため、モデリングとそのモデルに基づく制御系設計を行い、シミュレーションおよび実験で耐横風能力を有する簡素な制御系を示している。その制御の実験は屋外建屋でも実施されている。また、遠隔操縦を行うために、HORNETにカメラを取り付け、その映像転送を操縦者の元へ送っている。以上のようにHORNETの安定化と遠隔操縦技術を確立している。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have established a robot structure and a method of motor control with the aim of developing a concrete wall inspection robot that can travel while photographing walls of social infrastructure and buildings. Furthermore, the effect of wall contact and rotor shape on power consumption has been clarified. Moreover, we have designed the control system to ensure the stability based on that model, and proposed simple control system with lateral wind resistance capability in simulation and experiment. The experiments on that control were carried out in outdoor buildings. In order to perform remote control, a camera was attached to HORNET, and the video transfer was sent to the operator. As described above, HORNET can be stabilized and remote control for HORNET has been established.

研究分野：ロボット工学

キーワード：移動ロボット 壁面走行 遠隔操縦 操縦安定性 消費電力 耐横風性能 制御系設計 ローター形状設計

1. 研究開始当初の背景

橋梁やトンネルなどの社会インフラや、ビル、マンションなどの建築物について、老朽化が問題視されている。定期的点検と要補修として判断された損傷に対する大規模補修に比べ、頻繁点検と軽度補修の方が、社会インフラや建築物を長寿命化させることができる。しかし、労働人口減少の影響で点検員は減る方向にあるにもかかわらず、点検対象は益々増える方向にあるため、ロボットによる点検に強い要望が寄せられている。

2. 研究の目的

社会インフラや建築物の壁面を撮影しながら走行可能なコンクリート壁面検査ロボット HORNET を開発する。壁面を検査するという目的において、マルチローターラジコンヘリコプタ（ドローン）と比較して、HORNET は、操縦安定性、消費電力、耐外風性能などの面で著しく優れている。ただし、研究開始当初の HORNET では、一切のフィードバック制御を行っていないため、建物の壁面検査中に横からの突風に煽られていた。また、ロボットをいつでも直視して操縦できるわけではないため、ロボットが撮影した画像を遅延なく映し出すモニターを見ながら遠隔操縦することも必要になってくる。

本研究では、壁面に接触した状態で走行する HORNET の操縦安定性を確保するため、モデリングとそのモデルに基づく制御系設計を行う必要がある。また、遠隔操縦を行うためには、HORNET に取り付けられる小型軽量の映像転送装置が必要である。この装置は、広角レンズ付きの CMOS カメラと Wi-Fi モジュール、FPGA によって構成されており、カメラが捉える映像をロボットの遠隔操縦者のすぐ手元のモニターに表示する。HORNET の安定化と、遠隔操縦技術が確立の後、現場で検査用ロボットとして有用かどうかを確認する。

申請時における研究の目的に関して、各項目をまとめて次に列記する。

- ①安全性を高める機体構造や制御の方法について確立する。
- ②点検のためにカメラを搭載し、得られた映像を外部に送る。
- ③ロボットの傍に操縦者がいなくても、送られてきた画像に基づき遠隔操縦できる技術を確認する。
- ④ロボット運動のシミュレーションモデルを作成する。
- ⑤局所自律化を取り入れ、遠隔操縦時のレバー操作を安全かつ簡素なものにする。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するため、以下のように計画し、実施することとした。

(1) 申請時時点で既に試作が完了していたロボット HORNET 1号機の性能測定を実施する。そして、2号機設計製作の道筋を得る。[研究目的①に対応]

(2) 上記の性能測定の結果に基づき、更に安全性の高い機構、各モータ制御の方法につい

て考察する。その考察結果に基づいて HORNET 2号機を完成させる。[研究目的①②③に対応]

(3) HORNET において、安全性とは短時間にバッテリーが切れて操縦不能に陥ることも含まれる。消費電力を低減するためには、後述する(4)以外にも、壁との関係も重要である。[研究目的①に対応]

(4) プロペラの揚力、抗力を考慮して、ロボット全体を常微分方程式で表現する。また、数値解析によってその常微分方程式を解き、コンピュータシミュレーションを可能とする。得られたモデルを用いて、制御系を構築し、遠隔操縦をより安全なものにする。[研究目的①④⑤に対応]

(5) プロペラの性能の向上のため、数値流体力学(CFD)で空気の流れを解析する。さらにそのプロペラを 3D プリンタで作成して、HORNET の性能向上を試みる。[研究目的①④に対応]

(6) ロボットで得たカメラ撮像を FPGA と無線モジュールで外部送信できるようにする。その結果、ロボットを遠隔操縦する者の傍にあるディスプレイに、撮像をリアルタイムで映し出す。ロボットの現在位置を明確化し操縦者に知らせる。実施したい全ての事項を一つの制御用 IC に詰め込む。[研究目的①②③④⑤に対応]

4. 研究成果

(1) 図1に申請時当初から存在していたロボット HORNET の1号機を示す。ロボットは2個のローター、それらローターを回転させるための直流モータ、ローター面の傾き角を変化させるための直流モータ、2つの外周面に複数の爪を有する車輪、車輪の回転の向きを一方にしか回転させないようにするためのワンウェイクラッチ、制御基板 (PIC)、バッテリー、ボディで構成される。無人ヘリなどの飛行ロボットの操縦、または自律制御は容易ではなく、例えば、空中静止状態で検査を行うには、高度なホバリング制御を行う必要があり、外乱（風）を含む環境下において、一座標点で姿勢を崩さずに空中静止した状態のまま維持することは極めて困難である。また、壁面付近において、壁と一定距離を保ち続けることも困難である。これらの問題を解決できるように、HORNET では壁面に沿って移動可能な当接部（本ロボットが壁と接触する箇所）を取り付けることで、検査対象の壁面に接触して移動可能としている。この当接部は壁をガイドとして扱えるため、風を受けても当接部が離れなければロボットが風に押し流されなくなる。HORNET が横風を受けた時、壁面と車輪の接触点を回転中心とする力のモーメントが掛かるため、ロボットは壁を離れず、横風に押し流されにくい。

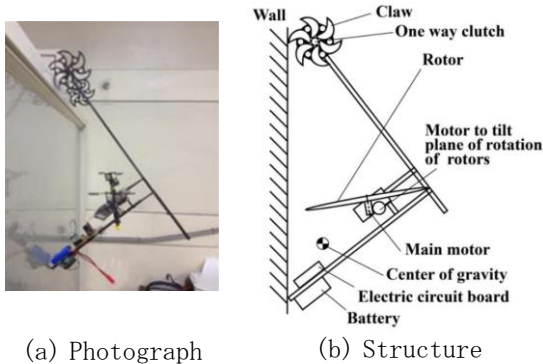


図1 HORNET 1号機

さらに、HORNET では壁から離れず安定して移動出来るように、壁から重心までの距離が短く、左右の爪付車輪間距離が長くなるように製作されており、横からの風には元々強い構造をしている。また、上下方向の風については、上から風が吹いたときはローターの回転数を上げることで対応出来る。下からの風が弱いときは、ローターの回転数を下げることで対応出来るが、下からの突き上げるような風を受けると、当接部が壁から離れてしまう可能性がある。また、車輪部にワンウェイクラッチを取り付けているので、上昇移動時に爪付車輪は滑らかに回転する。しかし、揚力より強く重力を受けたとき、爪付車輪の回転が止まり、爪が壁面の凹凸に引っ掛かる仕組みとなっている。結果として、爪が自重を支えるので、静止時の消費電力は低減される。また、車輪の外周に最適な爪を取り付けることで、車輪と壁面の間に働く摩擦力はより大きくなり、消費電力低減率はさらに上昇する。車輪は壁面との間に働く摩擦力を増大できるものであれば良いので、凸凹を設けたもの、粘着剤を塗布したもの、あるいは壁面が金属である場合は磁石を搭載したものなど、種々の態様が可能である。また、2つのローターの回転数を個別に制御することが出来るようにして、左右横方向の移動を可能にしている。

この HORNET 1号機において、様々な実験を行い、壁面との距離と姿勢を一定に保ちつつ、容易に操縦できることは確認できたが、質量 66 g ということもあり、軽すぎて横風の影響をあまりにも強く受けることが分かった。

(2) HORNET 1号機に続いて、2号機を作成した。図2にその写真を、図3にその構造を示す。耐外風性能と積載性を向上させるため、1号機の約5倍の質量である310gで設計製作した。また、制御用ICをPICからFPGAに変更した。FPGAによってカメラからの画像取得、画像処理、画像転送、また、マイクロホンで得られる音情報取得とその識別を行うことができる。この HORNET 2号機は、2つのローター、そのローター駆動用ブラシレスDCモータ、ローター面角度を変化させるためのサーボモータ、爪付車輪2枚、その車輪の回転を制御するオン・オフ式クラッチ、制御基板 (FPGA)、バッテリー、打診検査用金属球で構成される。

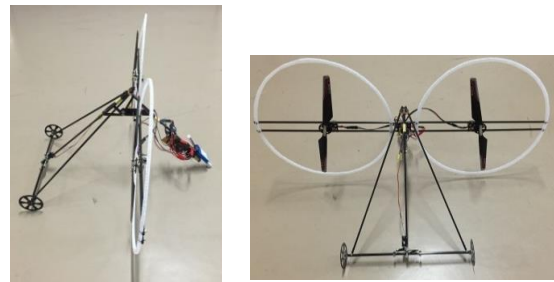


図2 HORNET 2号機

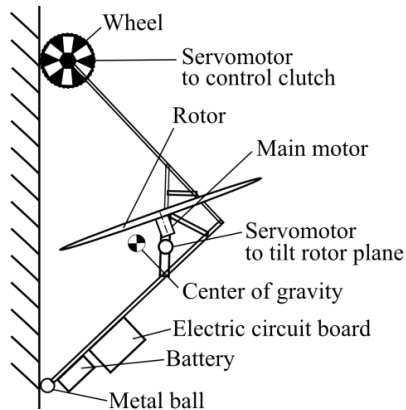


図3 HORNET 2号機の構造

(3) 壁面懸吊時の消費電力について、実験によって確かめた。まず、HORNET 1号機、2号機共に、壁面が粗いとき消費電力が低減した。1号機の例を図4に示す。#40のエメリーペーパー(紙やすり)を壁面としたとき、消費電力の低減が著しい。また、2号機では、引っかかり易く、また、重さで変形しやすいブラインドに引っ掛けて実験して、クラッチをオンにして車輪の回転を拘束したとき、消費電力を大きく低減できることを確認した。なお、ローター面についてはあまり傾けない方が、消費電力低減が良い傾向にある。しかし、懸吊し易い箇所ロボットを用いる場合に関しては、20°程度傾けると消費電力を大きく低減できることも確認できた。

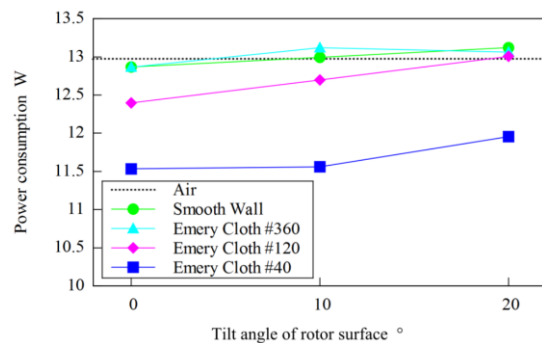


図4 壁の粗さの影響 (HORNET 1号機)

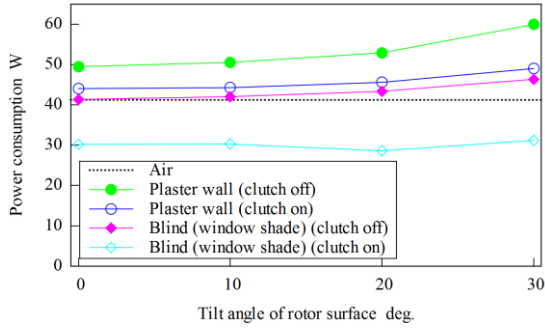


図5 ブラインド使用時 (HORNET 2号機)

(4) HORNET 2号機の制御系設計を行った。微風であれば、機体を壁に押し付けて耐えることができるが、比較的強めの横風がロボットに当たるとその風に押し流されてしまうため、遠隔操縦時のレバー操作を安全かつ簡素なものにするためにも、フィードバック制御系を設計し構築する必要がある。HORNETは軽量機体であるため、制御用ICとしてFPGAを用いている。このFPGA用VHDLプログラムは簡素であることが望まれるため、制御系設計も極力簡素なものになるよう工夫した。様々な検討の末、図6に示すように、ロボットの進行方向角度 γ (ヨー角)を制御量としてフィードバックし、左右のブラシレスDCモータのPWM制御のデューティに関わる時間 T_R と T_L を操作量としてPD制御するのが有効であると分かった。なお、 γ_r は目標値、 K_P は比例ゲイン、 K_D は微分ゲインである。

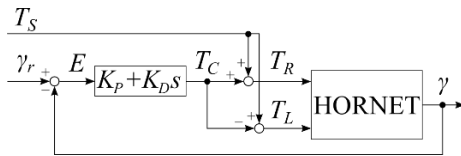


図6 HORNET 耐横風用PD制御系

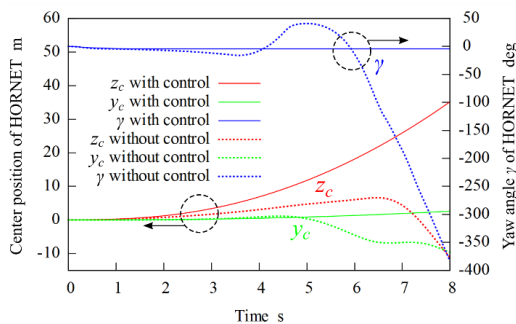


図7 シミュレーションによる制御結果

図7にHORNETの運動のシミュレーションモデルを用いて得た制御結果を示す。 y_c は進行に対して横方向座標を、 z_c は進行方向座標を示しており、実験が制御系あり、点線が制御系なしの場合を示している。制御系ありの場合にヨー角 γ が一定に保たれ、 y_c があまり変化していないことが分かる。シミュレーションモデルで良い結果が得られたため、続いて、実機を用いて耐横風の実験を行った。

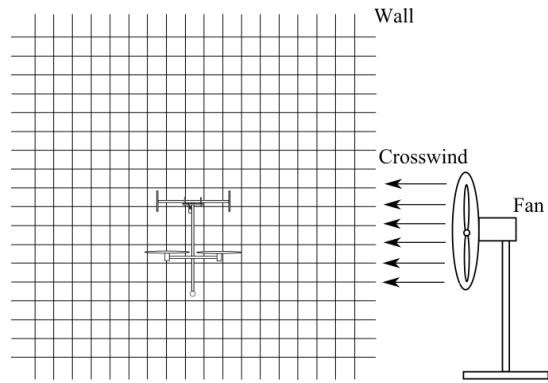
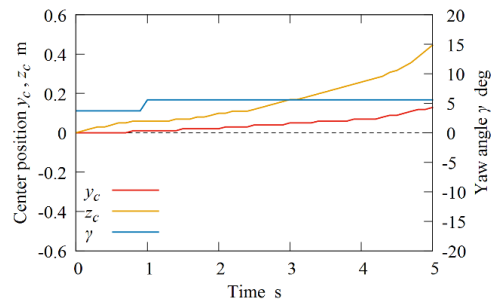
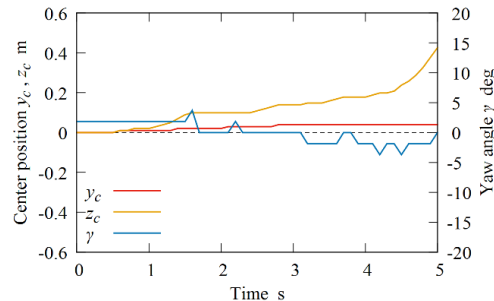


図8 扇風機を用いた横風の再現 (風速 4.2 m/s)

実験結果を図9に示す。図(a)が制御なし、図(b)が制御ありを示しており、青色が注目すべきヨー角 γ である。ヨー角が 0° 付近になるように適切に制御されており、赤色で示す横方向移動も抑えられている。



(a) Without PD control



(b) With PD control

図9 扇風機で実験した場合の制御結果

実験室内でも良い結果が得られたので、続いて屋外でも実験した。実験場所として選んだのは図10に示す大阪市立大学工学部G棟であり、安全に対して細心の注意を払って実験を実施した。HORNETが上昇する途中で明らかに横風に煽られる機会があったが、図11に示すように、左右に揺動する程度で済み、その後も上昇を続けた。

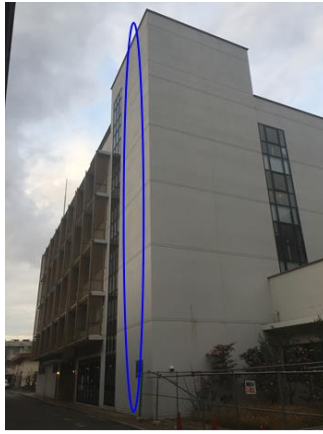


図 10 耐横風制御の屋外実験場所

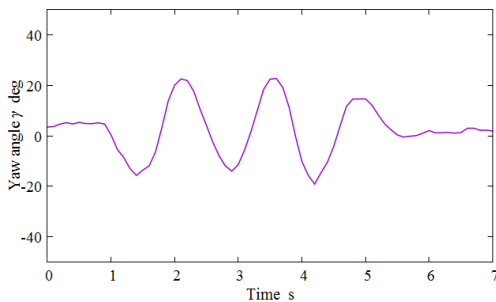


図 11 屋外実験で横風を受けたときのヨー角変化

(5) HORNET は壁面に沿って移動するため、消費電力の低減に適しているが、それでも活動可能時間は数分間しか持たない。極力、活動可能時間を延ばすために、ローター形状について検討した。まず断面形状について、遺伝的アルゴリズムを加えた数値流体力学で最適形状を特定し、また平面形状については、HORNET と同程度のレイノルズ数で飛行している小鳥の翼を模倣した。図 12 の左側の一番下がその形状である。図 12 左の一番上の形状は元々 HORNET 2 号機で用いていた形状である。ローター形状の検討により、約 24% 活動可能時間を延ばすことができた。なお、この結果は、主な発表論文等に含んでおらず、2018 年 8 月末に開催される国際会議 ISABMEC (International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms) 2018 で講演発表予定である。

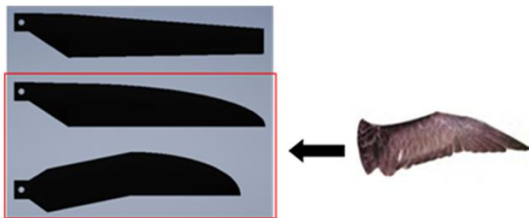


図 12 小鳥を模倣したローター形状

(6) 最後に HORNET 3 号機について述べる。この 3 号機は、1 号機と 2 号機を参考にして 2017 年度 4 回生の一人が卒業研究として設計製作したロボットである。そして、3 号機の見たと構造は 2 号機とほとんど変わら

ない。しかし、制御用 IC と内部プログラムが強化されている。1 号機の制御用 IC は PIC マイコン、2 号機の制御用 IC は FPGA (Xilinx Spartan 6 XC6SLX45) であるのに対して、3 号機では、FPGA (Xilinx Zynq XC7Z020) を用いている。実のところ、Spartan 6 では、画像処理、Wi-Fi 転送、モータ制御、ロボットの位置推定の VHDL プログラムが実装できなかった。しかし、Zynq では、その全てが実装可能で、申請時に研究目的とした全ての課題を達成している。図 13 に HORNET 3 号機の実験の様子を示す。この実験では、HORNET に取り付けられているカメラの映像とロボットの自己位置を Wi-Fi で操縦者の手元に転送しつつ、表示している。図 13 の左下の TFT にロボットが取得した映像が、その右側に位置座標が表示されている。なお、位置推定については、ロボットに取り付けられたマイクロホンが周囲 3 箇所に取り付けられたスピーカーの音を聞いて、位置を特定している。

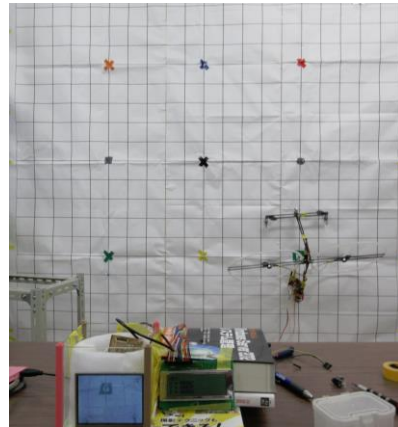


図 13 画像転送と位置推定実験の様子 (HORNET 3号機を使用)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① Y. Takada, Y. Tokura, Y. Matsumura, T. Tanaka, T. Kanada, Wall Inspection Robot with Maneuvering Assist Control System against Crosswind, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 30, No. 3 (2018), DOI:10.20965/jrm.issn.1883-8049.
- ② Y. Tokura, K. Toba, Y. Takada, Practical Applications of HORNET to Inspect Walls of Structures, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 28, No. 3 (2016), pp. 320-327, DOI:10.20965/jrm.issn.1883-8049.
- ③ 都倉 悠平, 高田 洋吾, 垂直壁面検査ロボット HORNET における消費電力低減策, 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, Vol. 82, No. 835, (2016-1), DOI:10.1299/transjsme.

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① 金田樹, 高田洋吾, 構造物壁面検査ロボットに搭載できる打診検査システムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演

- 会 2017 in Fukushima、2017
- ② 都倉悠平、松村洋大、高田洋吾、構造物壁面検査ロボット HORNET のモデリングと登壁走行制御、日本機械学会関西支部 第 92 期定時総会講演会、2017
 - ③ 都倉悠平、高田洋吾、澤村健、構造物壁面検査ロボット HORNET における目視検査実現へ向けた検討、日本機械学会関西支部 第 91 期定時総会講演会、2015
 - ④ 都倉悠平、高田洋吾、構造物壁面検査ロボット HORNET の消費電力低減に向けた検討、第 15 回建設ロボットシンポジウム、2015
 - ⑤ 都倉悠平、高田洋吾、構造物壁面検査ロボット HORNET の開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 in Kyoto、2015

[その他]

ホームページ等

<http://www.robotics.mech.eng.osaka-cu.ac.jp/study/HORNET/HORNET.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 洋吾 (TAKADA, Yogo)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70295682