

橋梁インフラ検査に向けたマルチコプタの利用検討

小竹 正人^{*1} 深谷 朗善^{*2}
Kotake Masato Fukaya Akiyoshi

老朽化した社会インフラの点検、災害の調査において、人が容易に近づけない危険な場所での作業におけるロボットの利用が期待されている。例えば橋梁検査では、現状、橋梁下部に足場を組み、作業員が目視点検を行っているが、ロボットを利用して足場を組むことなく、安全に検査するといったことが期待されている。

近年、技術の進歩でマルチコプタ型の無人航空機を低コストで製作、飛行させることが可能になった。橋梁等の目視検査への利用に向けた研究が進められている一方、課題も残っており、まだ実用化段階にあるとは言えない。

本稿ではマルチコプタの基本型であるクワッドコプタについて解説した後、自動検査の実現に向けた取り組み（クワッドコプタの飛行シミュレーション、ステレオカメラの利用検討）を紹介する。

キーワード：マルチコプタ、橋梁、制御、シミュレーション、MATLAB/Simulink、ステレオカメラ

1. はじめに

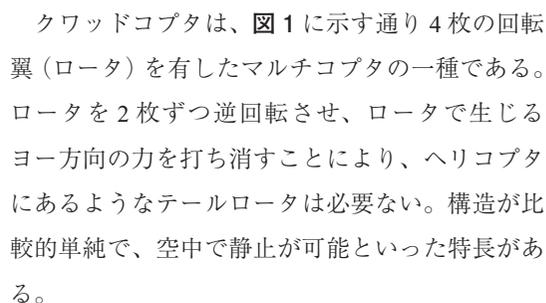
複数の回転翼（ロータ）を使い空中に浮上する航空機はマルチコプタと呼ばれ、特に2010年以降、撮影用、ホビー用として急速に普及した。なお低コストが要求されるホビー用では、マルチコプタの中でも、少ないロータでバランスが良い4枚翼であるクワッドコプタが主流となっている。

クワッドコプタの原理は古くから知られていたが、近年、高容量バッテリー、小型大出力のモータ、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサ、制御装置が進歩し、低コストでかつ容易に製造できるようになった。結果、無線操縦式のもの、撮影、ホビー用として広く普及することとなった。

クワッドコプタは空中で静止できるといった特長により、老朽化した社会インフラの点検、災害の調査といった、人が容易に近づけない危険な場所での活用が期待されている。

2. クワッドコプタ

ここではマルチコプタの基本形であるクワッドコプタについて解説する。

クワッドコプタは、に示す通り4枚の回転翼（ロータ）を有したマルチコプタの一種である。ロータを2枚ずつ逆回転させ、ロータで生じるヨー方向の力を打ち消すことにより、ヘリコプタにあるようなテールロータは必要ない。構造が比較的単純で、空中で静止が可能といった特長がある。

*1：制御システム事業部 エンジニアリング部
*2：制御システム事業部 エンジニアリング部 次長

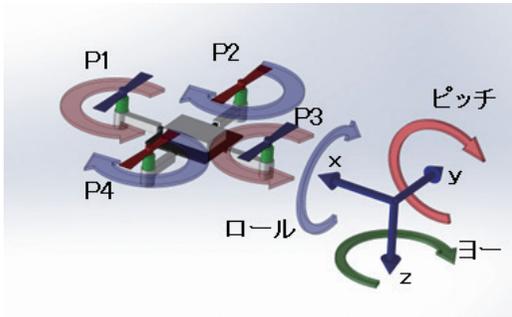


図1 クワッドコプタ

水平方向の移動はロータの出力を変え、機体を傾けて行う。例えば P4 の出力を上げ、P2 の出力を下げると機体が傾き P2 方向に移動する。この時ヨー方向に回転しないようロータの出力バランスを取りながら推力を変化させる。

ヨー方向に回転させる時は、例えば P1 から P2 方向に回転する場合は P1、P3 の出力を上げると同時に P2、P4 の出力を下げ、合計推力は一定のままプロペラ反トルクのバランスを崩して向きを変える。上記を整理すると、姿勢および上昇力を制御するにはロータ P1 ~ P4 を駆動するモータ出力を式 (1) に示すように変化させれば良い。

$$\begin{cases}
 P1 = thrust + pitch + yaw \\
 P2 = thrust - roll - yaw \\
 P3 = thrust - pitch + yaw \\
 P4 = thrust + roll - yaw
 \end{cases} \quad (1)$$

thrust : スラスト制御量

pitch : ピッチ制御量

roll : ロール制御量

yaw : ヨー制御量

P1 ~ P4: ロータ P1 ~ P4 を駆動するモータ出力制御量

一般的な無線操縦型クワッドコプタの制御系の例を図2に示す。クワッドコプタの制御装置は、無線操縦機から機体の姿勢、高度の指令値を受け、各ロータの出力を制御する。GPS で自動的に目標場所へ移動する場合は、図2の制御系の外側に専用の制御ループを設ける。

クワッドコプタの制御によく使用されるセンサを表1に示す。自動で位置制御を行う場合は、位置センサにGPS (単独測位) を使うが、精度が CEP (確率 50% 平均誤差半径) 3m 程度とあまり正確では無く、高い精度が必要な場合は、人によ

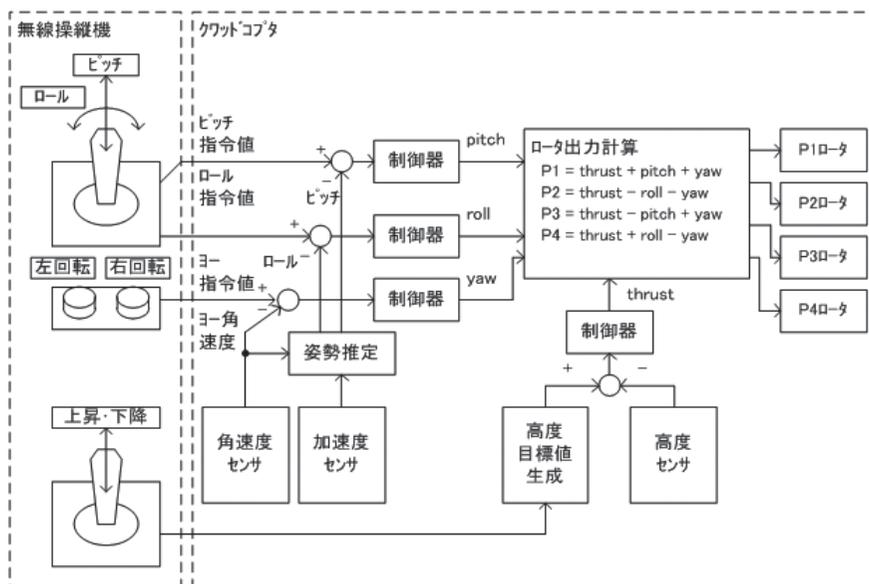


図2 無線操縦型クワッドコプタ制御系の例

表1 クワッドコプタで使用されるセンサ

センサ種別	用途	補足説明
MEMS 加速度センサ	姿勢制御	重力方向を基準に姿勢角(ピッチ、ロール)を推定
MEMS 角速度センサ (ジャイロ)	姿勢制御	角速度を計測、姿勢角推定に使用
超音波距離センサ	高度制御	長距離計測不可、高さ数 m 程度まで
気圧計	高度制御	分解能 15cm 程度が限界、天候変化の影響を受ける
レーザ距離計	高度制御	
オプティカル フローセンサ	位置制御	位置制御にはカメラの他、撮像対象までの距離、姿勢を計測するセンサが別途必要
GPS	位置制御	単独測位の場合、CEP 3m 程度。衛星電波を受信できない環境(ビルの谷間、建物の影、室内など)では利用不可

る無線操縦に頼らざるを得ない。また GPS は、衛星電波を安定して受信できる環境でないと使用できない。このような、GPS の欠点をカバーする高精度かつ安定したセンサの実現が望まれる。

3. 橋梁インフラ検査に向けたマルチコプタの利用検討

3.1 橋梁インフラ検査へのマルチコプタの利用

橋梁では、桁の腐食・亀裂・破断・ゆるみ・ひび割れ・鉄筋露出、ボルト・リベットの脱落、床板のうき、といった検査を点検者が目視で行っている。これらを空中静止のできるマルチコプタで行うことができれば、足場を築く必要がなくなり、十分なコストメリットを見込める他、危険な作業を削減することもできる。

橋梁検査のニーズは国内だけでなく海外にもあり、トータルでの市場規模は大きい。

3.2 マルチコプタを使った橋梁検査における課題

既に各社で、マルチコプタ型を中心に開発が進められており、国土交通省が 2014 年に橋梁維持管理用ロボットの实用化に向けて現場検証を行っている⁽¹⁾。この中でマルチコプタによる近接目視検査の検証を行い、次の 2 つの課題を指摘している。

① 飛行安定性 (風の影響など)

② 画像の鮮明度、画像からの判読技術

現在はマルチコプタを人が遠隔操縦し、対象物を撮影する方法が主流である。しかし、飛行安定性という面で限界があり、衝突の危険があるために狭いところに入れない、橋梁に十分近づくことができないという課題がある。衝突してもマルチコプタが損壊しないよう、マルチコプタにガードを取り付ける方法もあるが、風の影響を受けやすくなる。

このような状況のため、多少の風では橋梁に衝突しないような高精度の自動位置制御が開発され、導入されることが期待されている。今後は自動制御技術、位置検出技術をさらに改善させる必要がある。

3.3 クワッドコプタの飛行シミュレーション

将来、クワッドコプタにおいて高精度の位置制御を実現するにあたり、最適な制御則の検討、設計を行えるよう、MATH Works 社の MATLAB/Simulink でクワッドコプタの動力学解析用モデルを構築した。

3.3.1 クワッドコプタに作用する力

動力学解析用モデル構築にあたり考慮した力とゼロに近似した力を表 2 に示す。

(1) プロペラの推力と反トルク

プロペラ推力、プロペラ反トルクの算出式を式

表2 動力学モデルにおいて考慮した力およびゼロに近似した力

考慮した力	ゼロに近似した力
<ul style="list-style-type: none"> ・プロペラの推力、反トルク ・重力 ・プロペラのジャイロモーメント ・並進運動時の空気抵抗 	<ul style="list-style-type: none"> ・回転運動時の空気抵抗 ・揚力

(2)、式 (3) に示す。プロペラ反トルクはプロペラ効率 50%一定として近似計算する。

$$T_n = G(a) \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^3 \cdot \left(\frac{P}{10}\right) \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^2 \cdot K \cdot \frac{1}{1000} \cdot g \quad (2)$$

- T_n : プロペラ静止推力 (N)
- D : プロペラ直径 (インチ)
- $G(a)$: 地面効果の係数 (地面に近い時推力がアップする効果: a はプロペラ高さをプロペラ直径で割った値)
- P : プロペラピッチ (インチ)
- N : プロペラ回転速度 (rpm)
- K : プロペラ係数 = 22
- g : 重力加速度 (m/s²)

$$Q_n = \frac{T_n \cdot \Delta w_n}{2\omega_{Rn}} \quad (3)$$

$$\Delta w_n = \sqrt{\frac{2T_n}{\rho A} + \frac{1}{4} \cdot (-w)^2} - \frac{3}{2} \cdot (-w)$$

- Q_n : プロペラ反トルク (N・m)
- T_n : プロペラ静止推力 (N)
- ω_{Rn} : プロペラ角速度 (rad/s)
- Δw_n : プロペラ前後での流速増加分 (m/s)
- ρ : 空気密度 (kg/m³)
- A : プロペラ回転面面積 (m²)
- w : 飛行速度 (m/s)

(2) 重力

機体の運動方程式を解くため、機体座標系に変換した重力を式 (4) に示す。

$${}^B F_g = \begin{bmatrix} -mg \sin \theta \\ mg \cos \theta \sin \phi \\ mg \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

${}^B F_g$: 重力 (F)

- m : 機体質量 (kg)
- g : 重力加速度 9.8m/s²
- θ : ピッチ角 (rad)
- ϕ : ロール角 (rad)

(3) ジャイロモーメント

プロペラ等回転部によるジャイロモーメントを式 (5) に示す。

$$\tau_G = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{Rx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{Ry} & 0 \\ 0 & 0 & I_{Rz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{Rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q I_{Rz} \omega_{Rn} \\ -p I_{Rz} \omega_{Rn} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

- τ_G : プロペラ等回転部によるジャイロモーメント (N・m)
- p, q, r : ロール、ピッチ、ヨー方向の機体角速度 (rad/s)

I_{Rx}, I_{Ry}, I_{Rz} : 回転部 (プロペラ、モータコア、シャフト) のモーメント (kg・m²)

ω_{Rn} : プロペラの角速度 (rad/s)

(4) 空気抵抗による抗力

空気抵抗による抗力を式 (6) に示す。

$$F_D = \begin{bmatrix} -(k_{xd} \cdot u + k2_{xd} \cdot u^2) \\ -(k_{yd} \cdot v + k2_{yd} \cdot v^2) \\ -(k_{zd} \cdot w + k2_{zd} \cdot w^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

F_D : 抗力 (N)

u, v, w : x, y, z 軸方向の速度 (m/s)

$k_{xd}, k_{yd}, k_{zd}, k2_{xd}, k2_{yd}, k2_{zd}$: 抗力算出用の係数

3.3.2 クワッドコプタの運動方程式

機体座標系におけるクワッドコプタの並進系の運動方程式を式 (7)、回転系の運動方程式を式 (8) に示す。

$$m \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = -m \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + {}^B F_g + F_D - \sum_{n=1}^4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

p, q, r : ロール、ピッチ、ヨー方向の機体角速度 (rad/s)

u, v, w : x, y, z 軸方向の速度 (m/s)

${}^B F_g$: 重力 (N)

F_D : 抗力 (N)

T_n : プロペラ静止推力 (N)

m : 機体質量 (kg)

$$I \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times I \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \sum_{n=1}^4 \tau_{Gn} + \begin{bmatrix} l(T_4 - T_2) \\ l(T_1 - T_3) \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{n=1}^4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

p, q, r : ロール、ピッチ、ヨー方向の機体角速度 (rad/s)

τ_G : プロペラ等回転部によるジャイロモーメント (N·m)

Q_n : プロペラ反トルク (N·m)

I : 機体の慣性モーメント (kg·m²)

$T_1 \sim T_4$: 図1のP1～P4のプロペラ静止推力(N)

l : 機体重心からプロペラ中心までの距離 (m)

3.3.3 モデル

機体の動特性モデルを図3、制御器モデルを図4に示す。

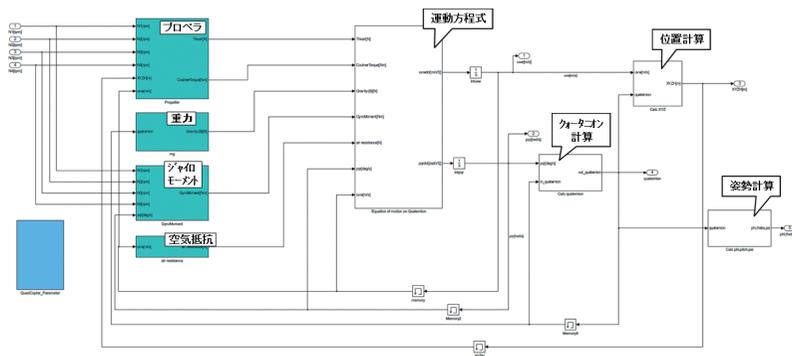


図3 機体の動特性モデル

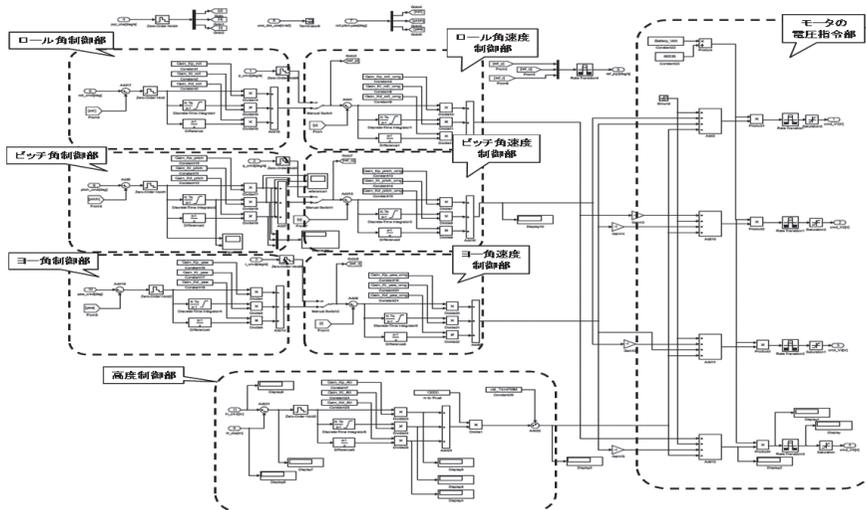


図4 制御器モデル

3.3.4 解析事例

ホビー用クワッドコプタをモデル化し、実機とシミュレーションの宙返りを比較した例を次に示す。

実機の宙返りの様子を図5、シミュレーションした宙返り時の位置を図6、ロール姿勢の比較を図7に示す。なお、実機のロール姿勢は機体内蔵の加速度、角速度センサから求めている。シミュレーションの挙動は概ね実機と合致している。

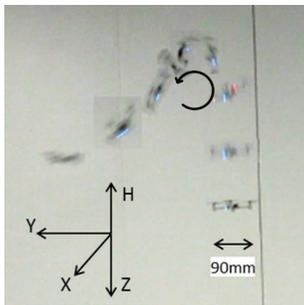


図5 実機の宙返り

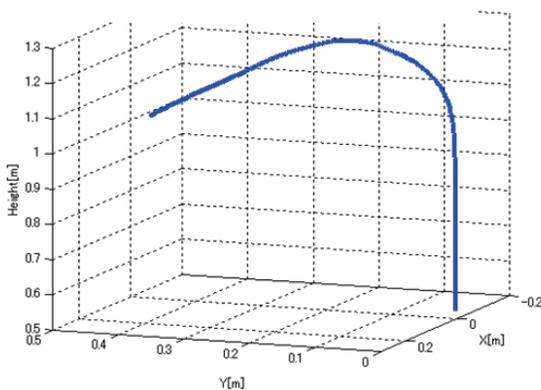


図6 宙返り時の位置 (シミュレーション)

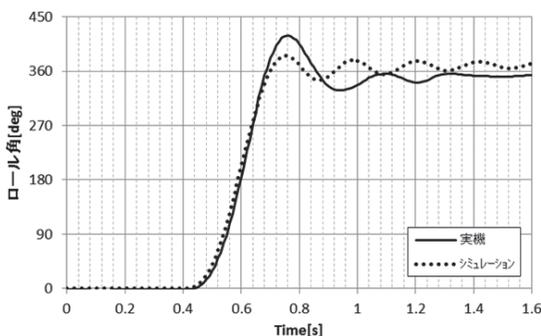


図7 ロール姿勢の比較

3.4 ステレオカメラの利用検討

マルチコプタの位置検出センサ改善の案として、ステレオカメラが考えられる。橋梁などの撮影対象物との相対位置がリアルタイムかつ正確にわかれば、飛行安定性の改善に使える可能性がある。カメラの低コスト・小型化で、ステレオカメラの構築自体は容易になった。しかし、計算量が膨大となりマルチコプタに乗せられる小型でかつリアルタイム動作するものを作るのは難しかった。しかし、現在ではFPGA (Field Programmable Gate Array) を使ったリアルタイム処理可能なステレオカメラの事例が発表されている⁽²⁾。FPGAで十分な機能を実現できればマルチコプタに搭載可能な小型・軽量なものを作ることも可能である。

3.4.1 ステレオカメラによる距離計測

ステレオカメラによる距離計測の仕組みを図8に示す。ステレオカメラは左右の画像を比較、撮像面における視差 d を計測し式 (9) によって距離を算出する。

$$Z = f \frac{B}{d} \quad (9)$$

- Z : 距離 (m)
- f : レンズ焦点距離 (m)
- B : カメラ間距離 (m)
- d : 撮像面上での視差 (m)

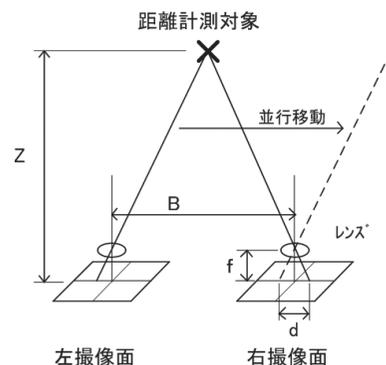


図8 ステレオカメラによる距離計測

計測精度は距離に比例して悪化するため、遠距離の計測には向かない。また夜間は使いづらいといったデメリットがある反面、低コストで実現可能であり、画像認識を行う際にカメラを追加する必要がないといったメリットが大きい。

3.4.2 アルゴリズム

(1) レンズ樽型歪補正、エピポーラ線の一致化

レンズ特性のため撮像面での画像は樽型に歪んでおり、後に説明するステレオマッチングで撮像面上での視差を正しく測定できない。またどうしても左右カメラ間に傾き、方向の微妙な違いが残るため、ステレオマッチング時の探索線(エピポーラ線)が左右で一致せず誤差が発生する。

レンズ樽型歪補正のイメージを **図9** に、補正式を式(10)に示す。エピポーラ線を一致させるには傾き変換、並行移動を行う。

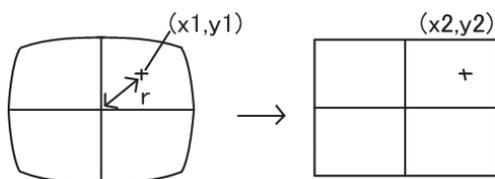


図9 樽型歪補正

$$x2 = x1 \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \quad (10)$$

$$y2 = y1 \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4)$$

$x1, y1$: 補正前の座標 (m)

$x2, y2$: 補正後の座標 (m)

r : レンズ中心点から $(x1, y1)$ までの距離

k_1, k_2 : 補正用定数

(2) ステレオマッチング

SAD (Sum of Absolute Distance) を評価関数にして、ブロックマッチングを行う。評価関数を式(11)に示す。

7×5 など一定サイズのブロック領域 S について、左右画像の輝度差の絶対値を積算したものを評価値とする。視差 d を 0pixel から 128pixel の間で変化させながら、評価値が最も小さくなる d を視差とする。

$$C(x, y, d) = \sum_S (|R_R(x, y) - R_L(x + d, y)| + |G_R(x, y) - G_L(x + d, y)| + |B_R(x, y) - B_L(x + d, y)|) \quad (11)$$

$C(x, y, d)$: 評価値

R_R, R_L : 赤の右画像、左画像の輝度
(画像センサ出力値: digit)

G_R, G_L : 青の右画像、左画像の輝度
(画像センサ出力値: digit)

B_R, B_L : 緑の右画像、左画像の輝度
(画像センサ出力値: digit)

3.4.3 ステレオカメラの試作

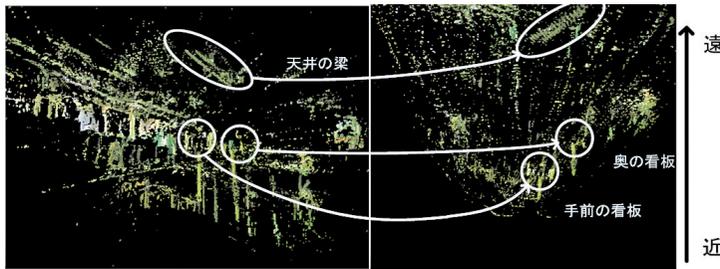
マルチコプタ位置制御への可能性を検討するため、実際に前述したアルゴリズムを FPGA に実装した、ステレオカメラを試作した。ステレオカメラの仕様を表3、全体像を図10に示す。

表3 試作したステレオカメラの主要目

No	項目	仕様
1	カメラ仕様	センサ画素数 1.2Mピクセル クォーパノミヤッタ 焦点距離 4mm 水平画角 約45度
2	フレームレート	約30fps
3	ステレオマッチング方式	SADブロックマッチング
4	ステレオマッチング最大探索距離	128画素
5	使用FPGA	CYCLONE5E 5CEA7
6	FPGA内部クロック	150MHz



図 10 試作したステレオカメラ



正面

斜め上視点

図 11 パソコン上で 3D 表示した結果

並列処理を駆使し、視差 128pixel 分の比較を 1 Clock で行い、Clock 周波数 150MHz で約 30fps の処理を行っている。

試作したステレオカメラで得られた視差付画像を、パソコン上で 3D 表示させた一例を、図 11 に示す。ステレオカメラでリアルタイムに視差を計測し、距離に変換できていることがわかる。一方、動画で見るとミスマッチングに起因すると思われるちらつきが多数確認され、実アプリケーションに適用するにはカメラ補正の精度向上や、フィルタを適用するなどの改良が必要である。

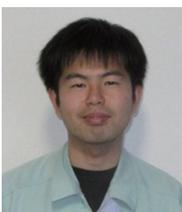
4. まとめ

マルチコプタの利用検討の一環としてクラウドコプタの飛行シミュレーション、ステレオカメラの試作事例について紹介した。

マルチコプタに関連する技術は興味深いものが多く、進歩も非常に早いため継続して注視していきたい。

参考文献

- (1) 国土交通省建設施工・建設機械ホームページ：
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/index.html>
- (2) 東京工業大学実吉研究室ホームページ：<http://www.ric.titech.ac.jp/saneken/>



制御システム事業部
エンジニアリング部
小竹 正人
TEL. 042-523-8313
FAX. 042-523-8320



制御システム事業部
エンジニアリング部
次長
深谷 朗善
TEL. 042-523-8313
FAX. 042-523-8320