

## 論文・報告

# 小型無人飛行体用制御ボードの開発

～ さまざまな自律飛行制御開発に対応できるプラットフォームの開発 ～

Development of Autonomous Flight System for Small Unmanned Air Vehicle

金平 徳之\*1  
Noriyuki KANEHIRA

戸塚 千晴\*2  
Chiharu TOTSUKA

池田 俊雄\*3  
Toshio IKEDA

本稿では、次世代自律飛行制御システムの開発を目的として設計・製作した自律飛行制御用コンピュータボードについて説明を行う。このコンピュータボードは、離陸重量 5kg 程度の SUAV への搭載を想定し、ミッションに応じてシステム構成を柔軟に変更できるように開発された。開発したボードは、2種類の CPU を搭載し、サイズが 150mm×30mm×40mm、電源システムを含む重量が 295g である。

本文ではまず SUAV 搭載用の自律飛行制御ボードに求められる要求仕様を説明する。次いで、今回開発したボードのスペックを紹介する。最後に自社の機体に搭載してデータ取得試験まで行った結果を述べる。

キーワード：UAV 自律飛行制御 CPU

## 1. はじめに

小型無人飛行体は、小型の加速度センサや角速度センサを利用して機体内部で自身の姿勢や航路の演算を行い、自律でミッションを遂行する小型の飛行体である。一般に機体総重量 30kg 以下、飛行時間 2 時間程度の機体を Small Unmanned Air Vehicle (以下 SUAV) と呼ぶ。

SUAV の実用化は米国が先行しており、軍事用としては既に多くの運用実績がある。代表的な機種である、Raven (スパン 1.3m, 離陸重量 1.9kg) を例に挙げると、2006 年 5 月には既に 3000 機目を製造し、2007 年には実際のオペレーションでの 15 万時間飛行を達成したとの報告がある<sup>1)</sup>。

また、SUAV を含めた無人航空機の民間利用も始まっている。以下に民間利用としての主な用途と事例を示す。

### i) 科学研究用

- ・大西洋の海洋調査 (2005)<sup>2)</sup>
- ・ハリケーンの情報収集 (2010)<sup>2)</sup>

### ii) 災害対応

- ・被災状況確認 (2010, ハイチ, Skylark)<sup>3)</sup>
- ・原子力発電所被災状況確認 (2011, 福島, T-hawk)<sup>3)</sup>

### iii) 通信中継用<sup>2)</sup>

### iv) 治安維持等

- ・国境警備 (米国では 4 機が運用中)<sup>2)</sup>
- ・群衆の誘導 (2008 欧州サッカー選手権, スイス, Ranger)<sup>4)</sup>

用途別の市場規模は図 1 のようになっている<sup>5)</sup>。このように防衛用途は民間用途の 4~5 倍の規模で使用されて

いるのが現状である。しかしながら、民間用途としての運用は確実に増えてきている。文献 6) では、米国では 50 社近くのメーカーが約 150 種類の無人機を開発しており、現在約 300 機が稼働しているとの報告がある。また文献 4) では、米連邦航空局が無人機を既存の航空法に組み入れる 2015 年を境に大きな市場が形成されると予測している。

文献 7) では具体的な市場規模が試算されており、2016 年のヨーロッパでの民間無人航空機の市場は 1000 億円、そのうち、小型無人飛行体 (SUAV) は 150 億円程度になると予測している。

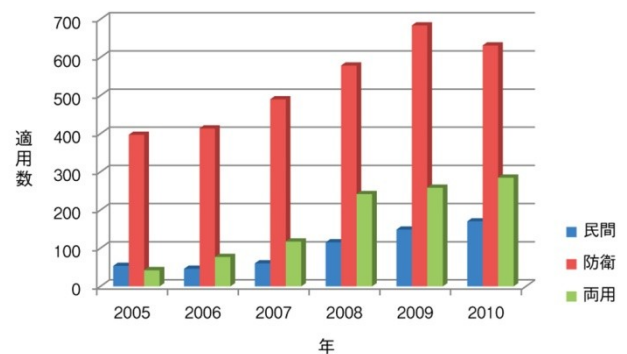


図 1 UAV の適用数

次に SUAV の現状の技術レベルを図 2 にて説明する<sup>2)</sup>。この図は、防衛、民間両面にて SUAV 技術の現在の位置づけを S 字カーブ上にプロットしたものである。文献 2) によると、SUAV は、防衛用途としてまさに急速に発展する

\*1 川田工業㈱技術研究所情報機械研究室 室長

\*2 川田工業㈱ロボティクス事業部生産管理部製造グループ

\*3 川田工業㈱ロボティクス事業部技術部設計課 課長

段階にある一方で、民間用途としては、大きな成長のためにはしばらくの技術開発が必要になると説明されている。

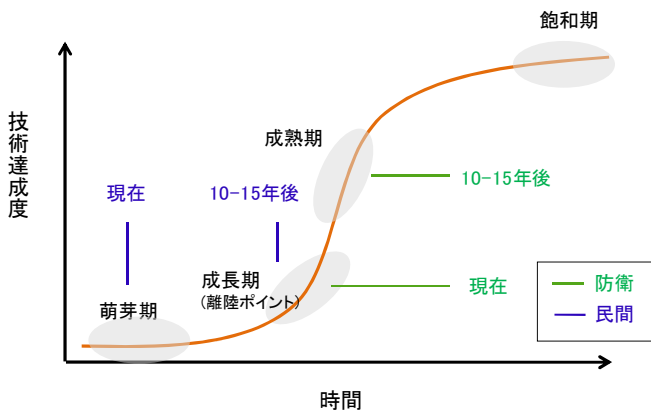


図2 現状の技術達成度の位置づけ

さて、当社でも 60cm 級、150cm 級の機体を開発してきており、大学や防衛省での運用実績を積んでいる(写真1)<sup>8),9)</sup>。防衛用途としては、運用からフィードバックされる情報を元に機体の改良を逐次実施しており、短時間のうちに技術達成度が大きく向上するであろうと考えている(図2の成長期)。一方、民間用途においては研究用仕様としての納入実績にとどまっているのが現状である。これは、不特定多数の人々によって居住区の上空を飛行させるにはまだクリアすべき技術的課題が残っていること、SUAV を用いたキラーアプリケーションが国内に見つかっていないことの2点に要因があると考えている。



写真1 川田工業製 1.5m 級 SUAV

軍需、民需双方において、今後の SUAV 市場形成に必要な技術テーマは、飛行の自律性向上と安全性の確保の2点であると考えている。用途を問わず SUAV の主なミッションは監視や観測である。そのためには、所望の飛行経路を風等に影響されずに正確に飛行し自律で目標を補足、追従しなければならない。また、SUAV は市街地での飛行が多く想定されることから、障害物回避や飛行体

としての信頼性確保など、安全性を保证する技術が必須となる。これらのテーマは飛行制御の高精度化や知能化等のソフトウェア開発によって解決されていく課題であり、防衛用途の拡大、民間用途の市場創出を図るため、当社でも開発を継続して行っている。

本稿では、次世代自律飛行制御システムの開発を目的として設計・製作した自律飛行制御用コンピュータボードについて説明を行う。このコンピュータボードは、離陸重量 5kg 程度の SUAV への搭載を想定し、ミッションに応じてシステム構成を柔軟に変更できるように開発された。本文ではまず SUAV 搭載用の自律飛行制御ボードに求められる要求仕様を説明する。次いで、今回開発したボードのスペックを紹介し、最後に自社の機体に搭載してデータ取得試験まで行った結果を述べる。

## 2. 要求仕様

図3に、一般的な SUAV のシステム全体図を示す。SUAV のシステムは大きく分けて自律飛行システムとグランドステーションから構成される。両者は飛行中、無線によって通信する。機体制御に関しては、システムに障害が発生したときなどに対応するため、自律制御機能の他に、ラジコンで操縦する系統も備えている。ラジコン操縦への切り替えは、ラジコンプロポからの指令により行うことができる。

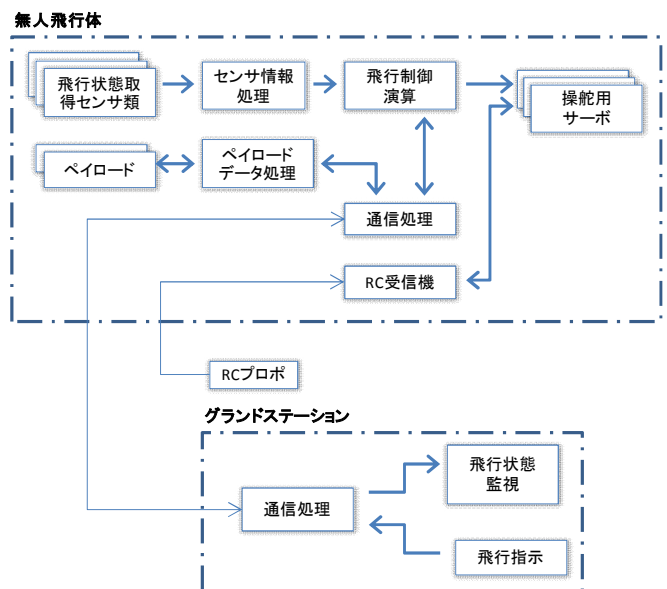


図3 一般的な自律飛行システム

自律飛行は、一般にウェイポイント誘導方式により行われる。この方式ではあらかじめ登録されたウェイポイントを目標にして機体は飛行する。機体はウェイポイン

トを通過したことを自分で判別し、通過した場合は、次のウェイポイントへ向かって飛行を継続する。飛行状態はグランドステーションによってモニタする。飛行中のウェイポイントの変更、機体に搭載したセンサ機器の制御もグランドステーションから行うことができる。

今回開発したのは、図 3 における無人飛行体上の自律飛行制御ユニットである。このユニットに必要な機能は大きく分けて 4 つある。

- i. 自律飛行制御機能：飛行に必要な状態をセンサで CPU に取り込み、目標地点に向けて飛行を継続するために必要な操舵制御量を算出し、操舵用サーボに指令を出す。
- ii. ミッション管理機能：ミッションを遂行するためペイロードを制御し、情報を収集、処理する。
- iii. 通信機能：地上システムとの交信を行う。高出力の無線は総務省の許可を必要とするため、今回の仕様では無線 LAN を利用する。
- iv. オーバーライド機能：有視界飛行時において自律制御システムに異常が発生した際、地上からの手動操縦で飛行が継続できる機能。

上記の機能のうち、i, ii, iii は CPU による演算処理が必要な機能である。特に i に関してはリアルタイム性が求められる。iv に関しては CPU のフリーズ等に影響を受けないような回路構成が要求仕様となる。

今回のシステムでは i, ii, iii の機能実現のために、姿勢制御用 CPU と飛行管理用 CPU の 2 種類の CPU ボードを搭載することとした。またオーバーライド機能に関してはマルチプレクサを使用しディスクリットに回路を構成することで、信頼性を確保することとした。

まず 2 種類の CPU に対する要求仕様は以下の通りである。

① 姿勢制御用 CPU

飛行制御に必要なセンサ信号を処理し、姿勢制御を行う姿勢制御用 CPU。この CPU では姿勢角の推定を拡張カルマンフィルタアルゴリズムを利用して行う。従って、10×10 程度のマトリクス逆行列計算を一定の時間内で計算できる計算能力を備えていることが条件である。しかしながら、マルチタスクを要求するものではないので、姿勢制御用 CPU には OS は搭載しない仕様とする。

② 飛行管理用 CPU

飛行経路の計算、ミッション管理、通信、データ保存を行う飛行管理 CPU。多くのタスクを一つの CPU で実行するため、OS を搭載し、タスクの処理を OS に任せる。地上との通信は無線 LAN を使用するものとする。また、Ethernet, USB 入力に対応できる仕様とし、さまざまな種類のミッション

の対応を可能とする。

オーバーライド機能に関しては、前述のフェイルセーフとしてのオーバーライド機能に加え、手動操縦補助機能を盛り込むこととした。この機能は、操縦者の操縦信号を一旦機上の CPU に取り込み、補正をかけて出力するもので、容易に機体を手動操縦できる機能の実現を想定に入れている。オーバーライドに関する機能を以下にまとめる。

表 1 オーバーライド機能の説明

トリガー	モード	トリガー	モード
ラジコンの1チャンネル	自律飛行モード	地上システムからの通信による指令	完全自律飛行モード
	手動操縦モード		手動操縦補助モード

3. 開発した自律飛行制御ユニット

(1) 自律制御ユニット全体構成

図 4 に開発した自律飛行制御ユニット全体のブロック図を示す。センサボードには飛行制御に必要なセンサがすべて組み込まれている。飛行管理ボードはセンサボードの信号を受けて飛行制御の演算を行う他、地上との無線通信、ミッション用ペイロードの制御、データの保存までを行う。

表 2 はユニット全体としてのハードウェア仕様を示したものである。各コンポーネントの小型化、軽量化を図ることで、全体重量を 300g 以下におさえることができた。また、電源電圧は、さまざまなバッテリーに対応できるように 5~25V 入力となっている。

写真 2 にユニット全体の外観図を示す。

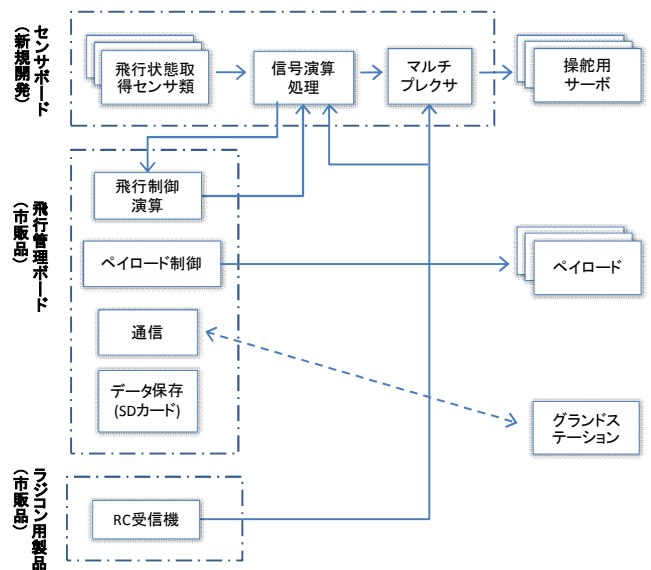


図 4 自律制御ユニット全体ブロック図

表 2 自律制御ユニットのハードウェア仕様

項目	仕様
サイズ	150mm×30mm×40mm
重量	295g
電源電圧	5V～25V
消費電力	typ. 3W (サーボ操舵除く)
PWM制御チャンネル数	7
オーバーライド信号入力チャンネル数	1



写真 2 製作した自律制御ユニット

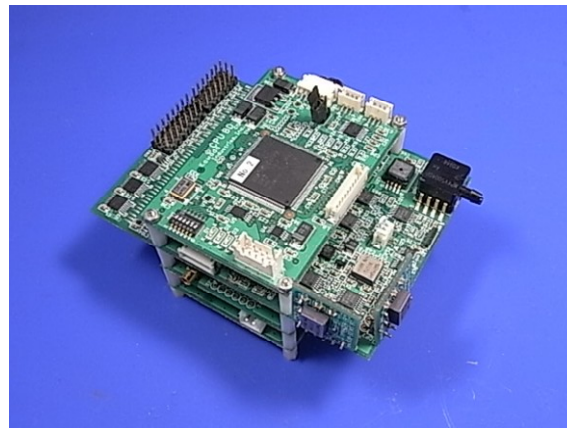


写真 3 センサボードの外観

図 5 にセンサボードのブロック図を示す。CPU にはルネサスエレクトロニクス製 32 ビットマイコン SH2 シリーズの SH7085 を使用した。本 CPU には自律飛行制御に必要なセンサ情報がすべて取り込まれる。演算された結果は、Programmable Logic Device (以下 CPLD) を通じて操舵サーボやモータに PWM として出力される。CPLD はプログラム書き換えが可能なロジックデバイスである。また、ミッション管理ボードとは RS232C により通信を行う。

(2) センサボード

センサボードには飛行状態を取得するための専用のセンサをすべて搭載する。また、操舵翼，モータを制御するため，Pulse Width Modulation (以下 PWM) 制御信号を出力する。更に，オーバーライド機能を持たせるため，地上からの操舵指令信号と機上での自律制御指令信号を切り分ける機能をハードウェア上で実現する。

これらの機能を小型のボード上で実現する必要があるため，センサボードは新規開発を行った。表 3 にセンサボードの基本仕様，写真 3 に外観を示す。

表 3 センサボードの基本仕様

項目	仕様
サイズ	150mm×30mm×40mm
重量	105g
電源電圧	10V～18V
CPU	SH7085
	動作周波数40MHz
	加速度センサ:3軸
搭載センサ	角速度センサ:3軸
	磁気方位センサ:3軸
	温度センサ×1
	差圧センサ×1
	絶対圧センサ×1
	GPS×1
PWM出力	7ch
RS232C	3ch
汎用DIO	8ch
汎用ADC	16bit, 4ch

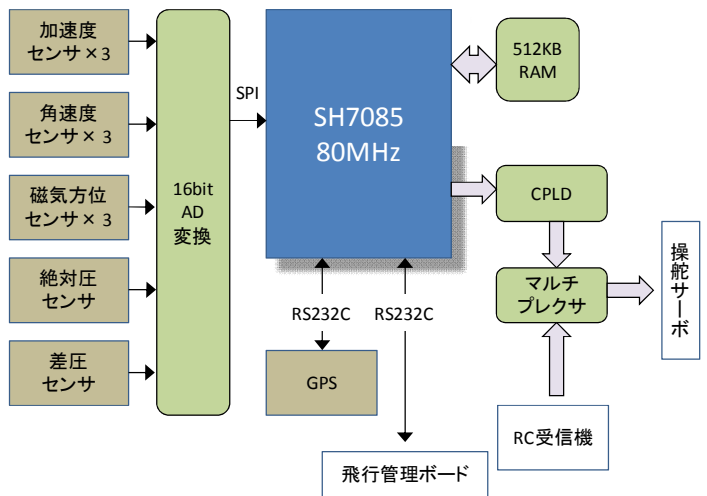


図 5 センサボードのブロック図

(3) 飛行管理ボード

飛行管理ボードの仕様を表 4 に示す。飛行管理ボードには市販の小型 CPU ボードを採用した。このボードでは、飛行制御演算の他、グランドステーションとの通信や、ミッション遂行用の監視センサの処理も行う。従って、ミッションに応じてソフトウェアを柔軟に組み替えることができる必要があるため、Linux を実装し、マルチスレッドで且つリアルタイムで演算ができる環境を構築した。写真 4 は飛行管理ボードの外観である。



表 4 飛行管理ボードの基本仕様

項目	仕様
ボード名	Armadillo-420
サイズ	75mm×50mm
重量	62g
電源電圧	3.1V~5.25V
CPU	Freescale i.NX257 動作周波数400MHz
LAN	10BASE-T/100BASE-TX
無線LAN	802.11b, 802.11g
シリアル	3ch
USB	2ch

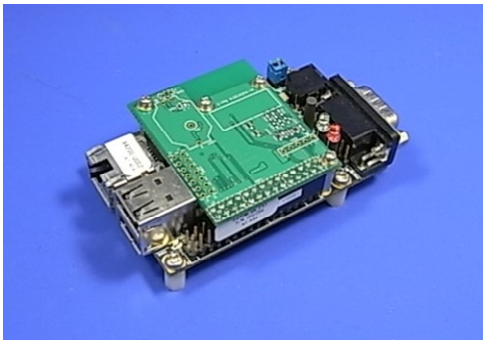


写真 4 飛行管理ボードの外観

#### 4. センサ校正

開発したユニットを川田工業が所有する小型 UAV に搭載し、センサ値の校正試験を実施した。下記に各センサの校正方法を示す。

- ・加速度センサ：機体を既知の角度に傾け、センサ出力データと比較する。3軸実施する。
- ・角速度センサ：既知の角速度で回転するターンテーブル上に機体を載せ、データを取得する。3軸実施する。
- ・磁気方位センサ：東西南北に機体を向けて、センサ出力データを比較する。
- ・差圧センサ：一定の圧力を加え、マノメータの値と比較する。
- ・絶対圧センサ：気圧計との値を比較する。

写真 5 は、角速度センサと磁気方位センサをそれぞれ校正している様子である。



角速度センサ校正

磁気方位センサ校正

写真 5 センサボードの校正の様子

#### 5. テスト

自律制御ユニットを搭載した自社機をラジコンによる手動操縦にて飛行させ、センサデータを機上で記録し、得られたデータを解析することでシステムの正常性を確認した。写真 6 は飛行試験時の様子である。



写真 6 飛行試験準備の様子

図 6 に得られた試験データの一部を示す。データ取得は 25ms ごとに行い、飛行制御ボード上の SD カードに記録した。図で経過時間が 200 秒からとなっているのは、記録開始から離陸までに 200 秒程度の時間があつたため、その部分のプロットを省略したためである。また、図は飛行の一部の区間を切り取ってプロットしたものである。飛行軌跡に関しては、離陸地点を 0 として、緯度、経度を距離に換算してプロットした。

この結果は目視で確認した飛行状況とよく一致しており、システムが正常に動作していることが確認できた。ただし、データ精度に関しては参照するデータがないため確認できていない。今後、参照できるセンサを機体に搭載することを計画しており、その比較によって検証を行う予定である。

#### 6. おわりに

本稿では、次世代自律飛行制御システムの開発を目的として設計・製作した自律飛行制御用コンピュータボードの説明を行った。ハードウェアに関してはほぼ予定通りの機能・性能を満足することが確認できており、プラットフォームとしての要求には答えられるものと思われる。

今後は、本ボードに姿勢推定ソフトウェアを組み込み、参照できるセンサを機体に搭載して飛行試験を実施し、ボードから得られるデータの精度を検証する。また、自律制御ソフトウェアをボードへ実装し、開発中の地上ステーションソフトと通信させて、自律飛行を実施する予定である。

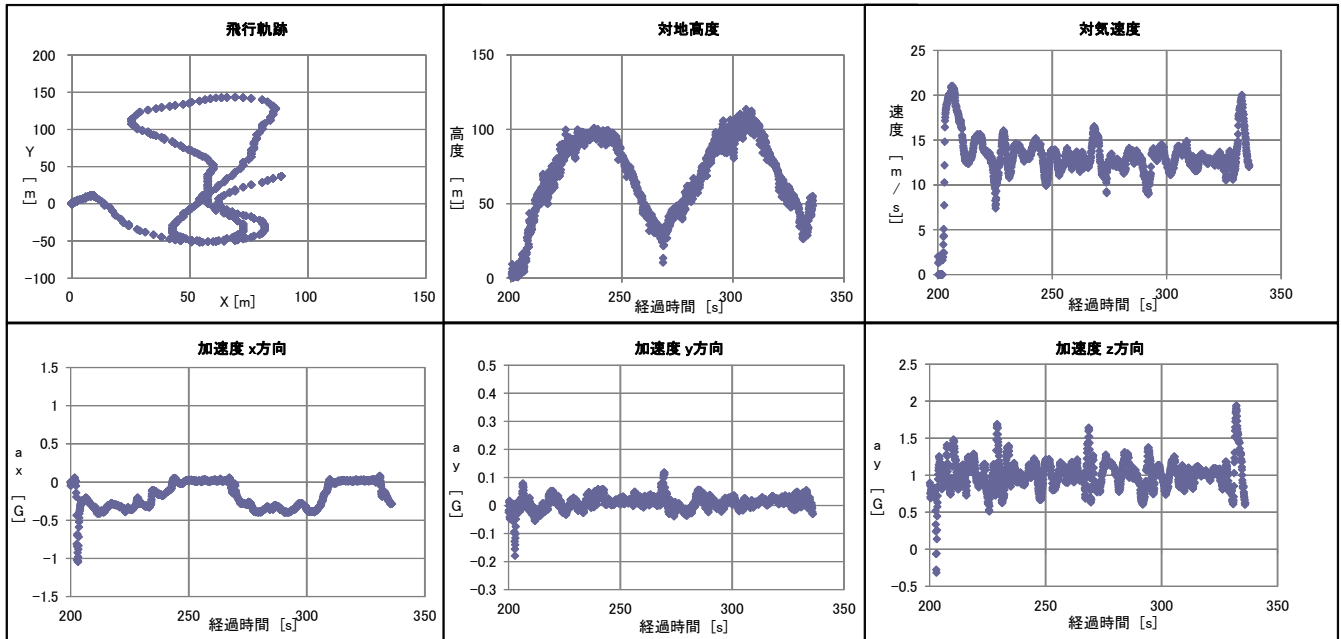


図 6 飛行試験で得られたデータの例

## 参考文献

- 1) <http://www.defenseindustrydaily.com/raven-uavs-winning-gold-in-afghanistans-commando-olympics-01432/>
- 2) Kevin Gu, J. Leet, A. Alon, M. Singh: E/ME 103 Final Report, <http://www.pickar.caltech.edu/e103/papers/Micro%20UAVs.pdf>, 2012.
- 3) 防衛技術ジャーナル 373号, (財) 防衛技術協会, 2012年4月
- 4) BIGS Policy Paper, [http://www.microdrones.com/references/case-study/BIGS\\_PolicyPaper-No\\_1\\_Civil-Use-of-UAS\\_Bildschirmversion\\_sec.pdf](http://www.microdrones.com/references/case-study/BIGS_PolicyPaper-No_1_Civil-Use-of-UAS_Bildschirmversion_sec.pdf), 2012.
- 5) 2010-2011 UAS Yearbook - UAS: The Global Perspective, <http://uas.usgs.gov/UAS-Yearbook2010/index.htm>, 2010
- 6) Andy Pasztor, John Emshwiller: Drone Use Takes Off on the Home Front, the Wall Street Journal, [http://jp.wsj.com/US/node\\_431215?mod=KW\\_Relevant](http://jp.wsj.com/US/node_431215?mod=KW_Relevant), 2012.
- 7) <http://www.frost.com/sublib/display-market-insight-top.do?id=236443867>
- 8) 金平, 池田, 赤坂, 川角: 小型自律飛行機のための飛行制御検証ツールの開発, 川田技報Vol. 30, 2011.
- 9) 金平, 池田, 中村: 小型自律無人機の製品化について, 川田技報Vol. 31, 2012.