

産業応用型電動マルチロータヘリコプタ ミニサーバイヤーの紹介および飛行デモンストレーション

千葉大学大学院工学研究科

教授 野波健蔵

1. はじめに

近年、電動型マルチヘリコプタの研究開発⁽¹⁾やベンチャー企業によるビジネス展開が活発に行われている。この背景にはシングルロータヘリのメカニズムの複雑さに対して、マルチロータヘリはモータの回転数制御のみで飛行が可能なこと、さらに、小型の高出力モータや超小型軽量センサ、高性能プロセッサが開発されマルチロータヘリの実用化に大きな貢献をしていることがある。このため、スワッシュプレートを有するシングルロータヘリはサーボ機構も含めて容易に製作できないが、モータの回転数制御のみで飛行可能なマルチロータヘリは容易に製作可能で、とりわけ、電子回路やマイコンソフトウェア、さらには制御工学に通じている若手研究者や技術者には魅力的な研究対象となっていることも、この分野が活況を呈している理由と考えられる。

こうした飛行ロボットは災害時の情報収集、犯罪捜査・救助・交通監視・コンビナート等の警備レスキュー活動、遺跡調査・植生生育・海洋汚染・火口付近などの科学的観測、トンネルや橋梁・ダム・高層ビル・送電線等の大型構造物点検、映画ロケやニュース報道等の空撮等多くの応用があり、今後広く普及することが期待されている。著者らも研究開発中のマルチロータヘリを乗用車に搭載して、東日本大震災の巨大津波で被災した三陸沿岸を岩手県宮古市から宮城県山元町まで南下しながら被害状況を空撮調査した。千葉からの全走行距離は 2,000km に及び、取得した空撮映像は You Tube ⁽²⁾ にアップしている。本稿ではマルチロータヘコプタの開発動向および著者らが開発中の小型マルチロータヘコプタのテレオペレーション技術について概要を紹介する。

テレオペレーション技術には大きく分けて 3 種類ある。①完全マニュアルモード：ラジコンヘリと同様にすべてオペレータが送信機等を用いて操縦するモードのこと、②姿勢制御アシスト型マニュアルモード：姿勢安定化制御は自動制御で行われており、それ以外はマニュアルで操縦するモードのこと、③ウェイポイント飛行モード（自律モード）：無線で地上の基地局 PC 等から転送された複数のウェイポイントに沿って飛行するモードのこと、一般には自律制御モードとも呼ばれるが、基地局から飛行ルートの指令を受けて飛行する観点からオペレータの負担が最も少ないテレオペレーション技術でもある。

2. マルチロータヘコプタの研究開発およびビジネス動向

マルチロータヘリの研究開発は、欧州で機体の製作から自律飛行まで極めて盛んである。米国はそれらを用いた曲芸飛行などの飛行技術の研究が活発である。一方、アジアでも中国を中心にベンチャー企業が生まれているが、詳細な性能は発表されていない。ここでは

表1 海外で販売されているマルチロータヘリコプタ^{(3)~(10)}

モデル型	メーカー名	プロペラ数	機体サイズ・重量	標準ペイロード	国名
AR-Dron	Parrot	4	幅 54cm ・ 380g	搭載不可	仏
500X-S Quadflyer	Gau	4	幅 64cm ・ 670g	280g	台湾
Pelican	Ascending Technologies	4	幅 54cm	500g	独
Falcon 8	Ascending Technologies	8	幅 84cm ・ 1.3kg	500g	独
Draganflyer X8	Draganflyer Innovations	8	幅 106cm ・ 1.7kg	800g	カナダ
SD 2.5 Eagle	Service Drone	8	幅 95cm	1.0kg	独
MK-4	MK-Kopter	4	幅 48cm ・ 640g	0.5kg	独
MK-6	MK-Kopter	6	幅 56cm ・ 1kg	1.0kg	独
MK-8	MK-Kopter	8	幅 77cm ・ 1.3kg	1.5kg	独
MD4-200	Microdrones	4	幅 70cm ・ 800g	200g	独
MD4-1000	Microdrones	4	幅 100cm ・ 2.7kg	800g	独
S800	DJI	6	幅 100cm	記載なし	中国
MS-06	千葉大野波研	6	幅 77cm ・ 1.7kg	1.1kg	日本
MS-12	千葉大野波研	12	幅 77cm ・ 2.3kg	1.5kg	日本
MS-06L	千葉大野波研 自律制御研究開始	6	幅 83cm ・ 2.1kg エンルート社協力	約 4 ~ 5kg (予定)	日本

海外の代表的なものを表1に示す。表1から明らかのように、マルチロータヘリのベンチャー企業はドイツを中心として欧州に集中しており、少なくとも4社の有力メーカーが機体の製造販売を行っている。自律モード型マルチロータヘリコプタにおけるキーテクノロジーは、①軽量で高出力な電動モータ、②3軸姿勢角速度と3軸姿勢角度算出、③高精度な位置情報算出、④高性能な制御装置、⑤信頼性の高い無線通信技術、⑥GUIをベースとした汎用的な基地局PCなどであるが、欧州では①の電動モータのメーカーが存在することが、多くのベンチャーを生んでいる背景と思われる。

フランスのParrot社のAR-DronはiPhoneやiPadで操縦できるゲーム感覚の機体で、飛行時間12分、Wi-Fiコントロールで機体操作範囲は約50mで、オートパイロット機能を搭載しており、自動離着陸と自動ホバリング機能を有している。また、Gau社製の500X-S Quadflyerはフライト時間は12分程度で、空力特性や安定性に優れ折り畳み可能な機体となっているのが特徴である。

Ascending Technologies社のPelicanとFalcon 8はともに良く設計された機体で、前者は大学の研究用に、後者は空撮など実用として提供されている。ともにペイロードが約

0.5kg 程度で、Pelican は高速プロセッサを搭載している。このためレーザーセンサを搭載して 3D-SLAM などの研究プラットフォームとなっている。

カナダの Draganflyer Innovations 社は 800g のペイロードを搭載可能な本格的な UAV を提供している。また、静音化についても配慮がなされており、機体から 1 m 離れた距離で 72dB の騒音レベルである。カタログによれば最大水平飛行速度は時速 50km で最大風速 8.3m/秒まで飛行可能となっており、対空時間 20 分で飛行機体はコンパクトに折り畳みできる構造である。

Service Drone 社の SD-Video-copter と呼ばれる一連のテレオペレーション型 SD 2.5 Eagle は主にリモコンによる空撮用として開発され、350m の高度からの空撮やフライヤーから 500m 離れた場所での空撮映像を基地局に鮮明な画像として送信可能としている。飛行時間は 15 分で価格は約 2,200€ である。

MK-Kopter 社による MK-4~MK-8 は、表 1 のようにサイズ、機体重量、ペイロードは異なるがともに連続飛行時間 10 分から 20 分程度である。カタログによれば風速 12m/秒に耐える飛行が可能とある。MK-6, MK-8 はカメラ搭載時に自動バランスマウント機能がついている。

Microdrones 社の MD4-200 と MD4-1000 は推奨ペイロードは 200g、800g であるが、最大ペイロード 300g、1.2kg で最大飛行時間は負荷・風外乱・バッテリー容量に依存するが、最大で 30 分あるいは 70 分となっている。飛行速度は最大 15m/秒 (54km/時) で多少の雨や雪という悪天候でも飛行可能としている。なお、空撮時は 6m/秒の風速まで許容できるようである。耐環境性も優れており気温 -10℃ から 50℃ までテレオペレーションで半径 500m 以内、自律オペレーションで最大 40km 以内、また最大 1,000m の高度まで飛行可能で離陸可能な最大高度は 4,000m とのことである。

3. 著者らのマルチロータ電動ヘリのシステム構成

我が国におけるマルチロータヘリの研究は海外と比べて劇的に少ないが、著者らも最もニーズの高い空撮や監視などの情報収集、農薬散布、軽量物の搬送などのミッションが遂行できる産業応用型マルチロータ電動ヘリの研究開発を行っている。著者らの機体仕様は以下の要件を満たしている。

- ◆ マニュアル操縦による遠隔操縦 (マニュアルモード) および自律制御に基づく自動操縦 (自律モード) によって飛行を行う飛行ロボット
- ◆ 飛行ロボットはカメラを有し、特定のタイミングで空撮を実行
- ◆ 飛行ロボットは双方向の無線通信を行うことができ、ナビゲータは地上で飛行ロボットの状態を監視しながら特定の指示を与える
- ◆ 飛行ロボットは自律モード中、ナビゲータの遠隔指示によって任意の地点へ移動可能
- ◆ 飛行経路は事前に設計可能である
- ◆ 飛行ロボットは少なくとも 1 kg のペイロードを有する

3.1 システム構成のブロック図

飛行ロボット、空撮用カメラ、オペレータ、ナビゲータの関係を図1に示す。

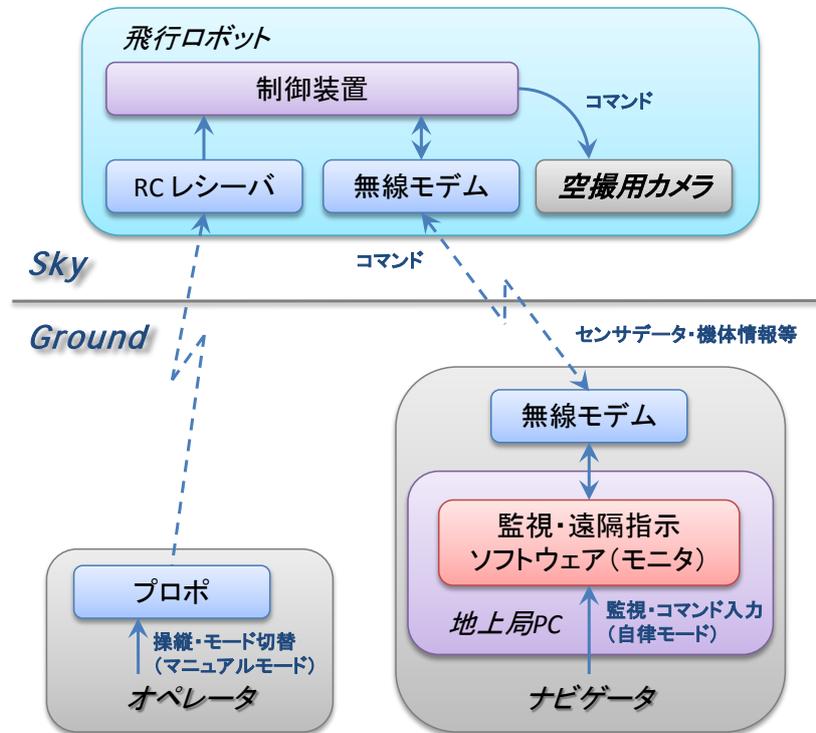


図1 システム全体のブロック図

3.2 ハードウェア構成

システムの主要な構成要素を下記に列挙する。

- ◆ 飛行ロボット (図2)
総重量はカメラやバッテリーなどを含めないで1.7kgの6発ロータ型マルチロータヘリコプタである。機体は6個のロータを有し、回転数の制御のみによって全軸(ロール、ピッチ、ヨー、上昇下降)の制御が行われるタイプのヘリコプタである。フレーム部、ハードウェアはロータ等の駆動部、制御装置、通信装置に大別できる。
- ◆ 空撮用カメラ (図3)
地上にある構造物や瓦礫を撮影するためのカメラ。制御用マイコンからの信号によって撮影を行う。
- ◆ 地上局PC (図4)
飛行ロボットの状態を監視し、飛行ロボットに遠隔指示を与えるためのソフトウェア(モニタ)が動作するPC。USB接続の通信装置を有する。
- ◆ プロポ (図5)

オペレータがマニュアル操縦を行うためのコントローラ。自律モード中において異常を感知したとき、オペレータはいつでもマニュアルモードに切り替えることができる。



図2 飛行ロボット

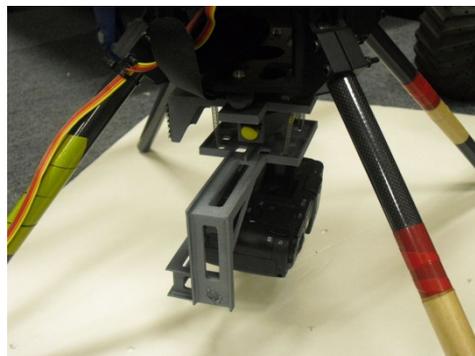


図3 空撮用カメラ



図4 地上局 PC



図5 プロポ

3.3 システムの運用手順

開発したシステムは下記の手順によって運用される。

1. 経路設計

Windows上で動作する飛行計画ソフトウェアを用いて飛行経路を設計し、データファイルとして保存する。

2. 電源投入

飛行ロボット、カメラ、モニタの立ち上げを行う。

3. 動作確認

マニュアル操縦、自律制御が正しく行われるかどうかモニタを見ながら確認を行う。ハードウェア構成の変更や実験場所の変更があった場合は、飛行エリア内で無線通信が可能かどうか地上で確認を行う。

4. データ転送

モニタで飛行経路データをロードし、飛行ロボットに無線で転送する。

5. 飛行

以下の3つのステップがあるが、自動離着陸の場合はi,ii,iiiの区別は不要となる。

i. 離陸 / 自動離陸

オペレータがマニュアルモードで機体を離陸させ、自律モードの開始地点でホバリングさせる。機体の挙動が安定しているのを確認し、自律モードに切替える。

ii. 自律飛行

機体は飛行経路に沿って自律飛行する。経路上にはカメラの撮影地点が設定されており、地点を通過するたびに空撮が行われる。ナビゲータはモニターで各種データを監視する。機体は最終地点に到達するとその地点でホバリングを行う。

iii. 着陸 / 自動着陸

オペレータが任意のタイミングでマニュアルモードに切替えて着陸を行う。

3.4 飛行ロボットのハードウェア構成

ハードウェア構成を図6に示す。上位制御用マイコンユニット（MCU）と下位制御用MCUに分離した構成となっている。

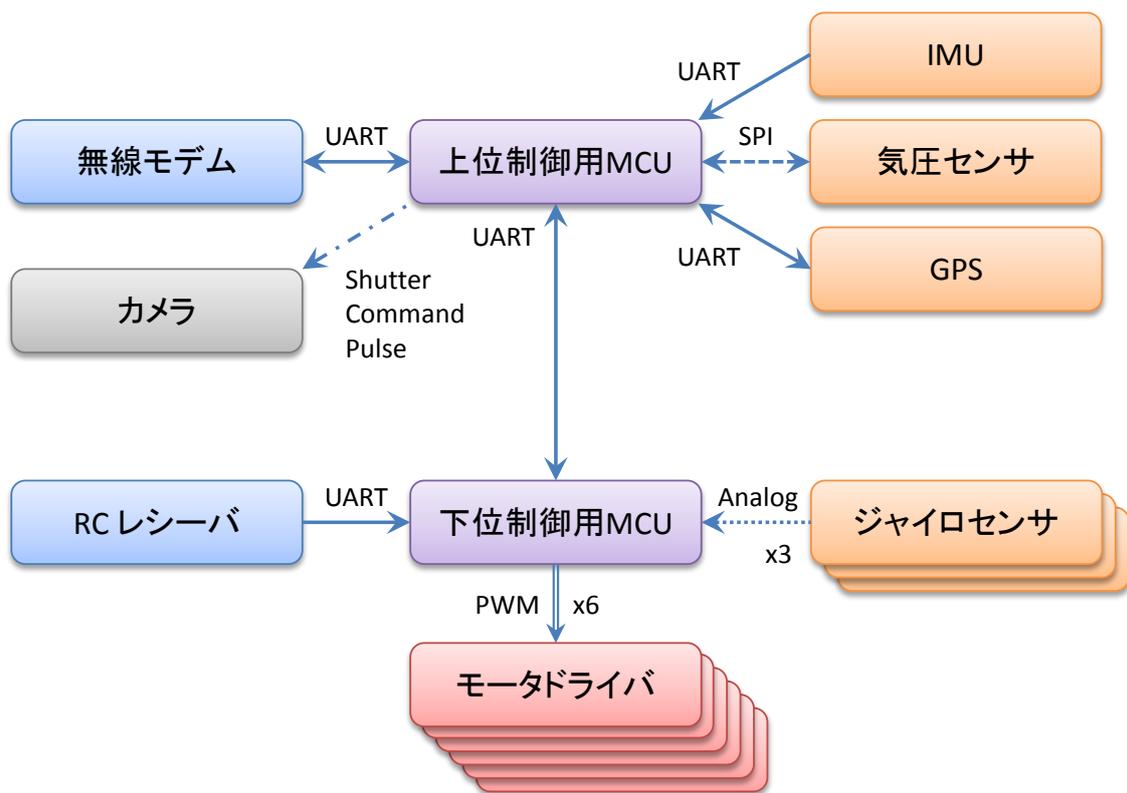


図6 6発ロータのハードウェア構成

3.5 マルチロータヘリコプタの飛行原理

一般にヘリコプタは任意の方角で任意の3次元座標へ移動させるためにロール・ピッチ・ヨー・上昇下降の操舵を行わなければならない。マルチロータ型ヘリコプタではこれらの操舵を図7が示すように回転数の調整のみで行っている。

シングルロータヘリコプタでは角速度の安定化はスタビライザバーによる機械的機構によって行われており、人間が操縦可能な操縦特性が実現されている。マルチロータヘリも同様に、ジャイロセンサによる角速度フィードバックによって所望の操縦特性が実現されている。本システムでは、下位制御用MCUがこれを担当している。

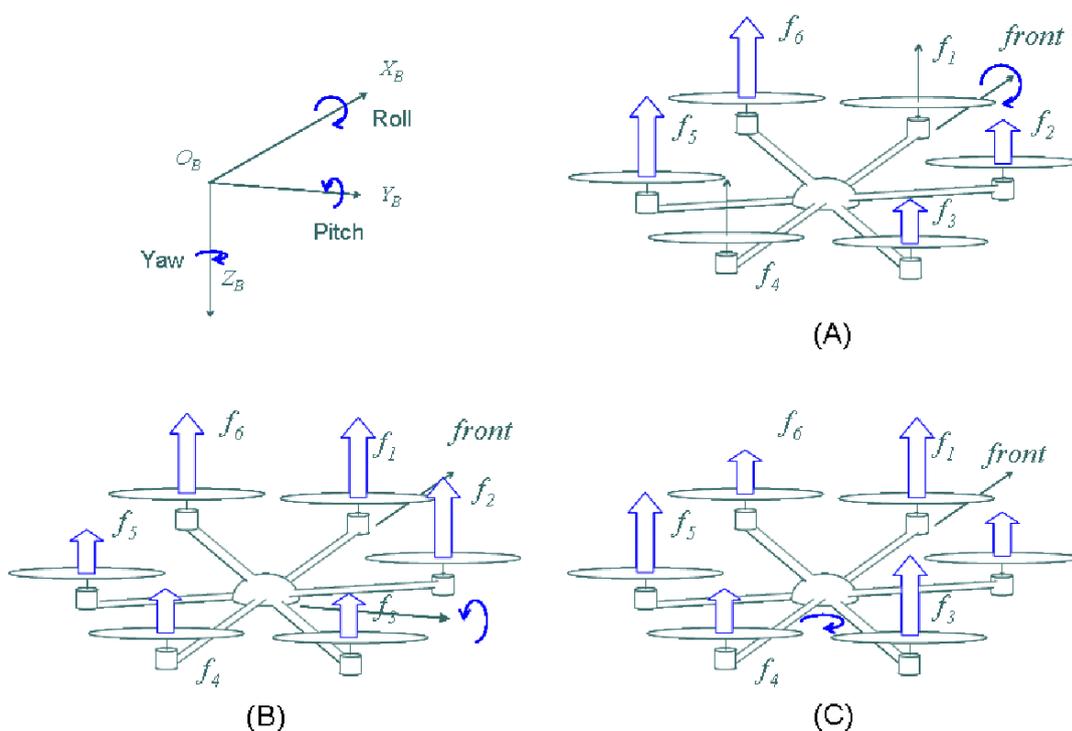


図7 マルチロータヘリコプタの飛行原理

4. 組込みソフトウェアと地上局用ソフトウェア

4.1 組込み制御系について

本稿では「マニュアルモード」と「自律モード」の2つの用語を用いて説明を行っているが、内部的にはより多くの動作モードが実装されている。動作未検証のモードと制御器検証用のモードを除くと以下の3つのモードがある。

- ◆ マニュアルモード
ラジコンヘリと同様に操縦できるモード。下位制御用MCUのみで動作する。
- ◆ 姿勢アシスト型マニュアルモード

姿勢制御を行った状態でラジコンヘリのように操縦できるモード。

◆ ウェイポイント飛行モード（自律モード）

無線で転送された複数のウェイポイントに沿って飛行するモード。

制御ループの構成を図8に示す。ただし、オブザーバやフィルタは省略している。姿勢アシスト型マニュアルモード、完全マニュアルモードにおいて、必要な目標値はプロポによる入力値から生成している。また、全ての制御器は機体に合わせてチューニングされている。

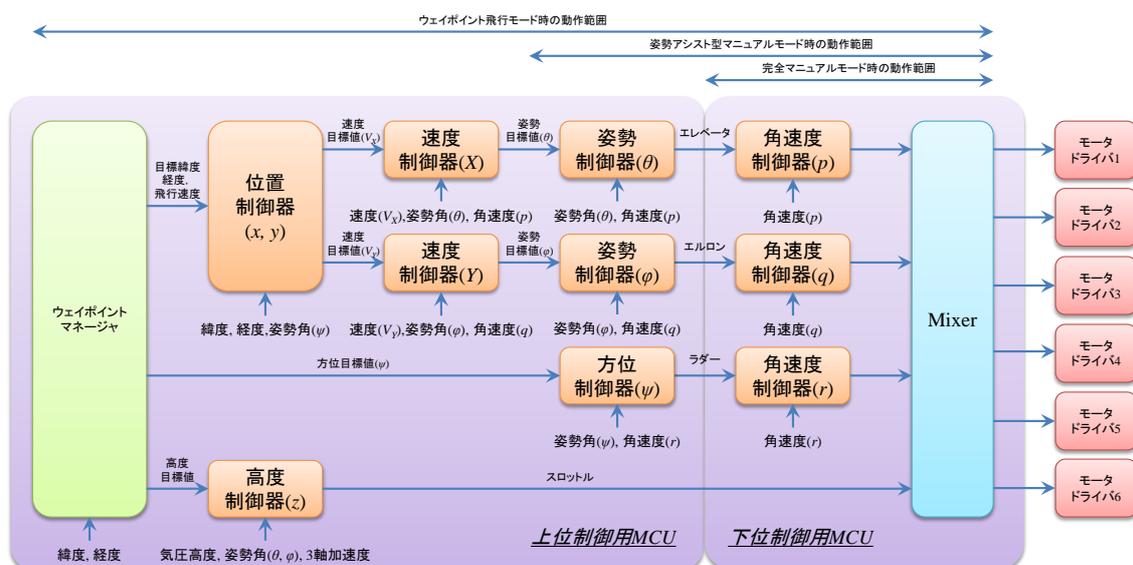


図8 制御ループのブロック図

4.2 モニタ (X-Monitor)

モニタは基地局に置いて飛行ロボットが飛行中に使用するソフトウェアであり、機体情報の監視と機体への遠隔指示を主な機能としている。主に、メインウィンドウとウェイポイント飛行専用ウィンドウを監視しながら運用する。以下、モニタに実装されている具体的な機能を列挙する。

- ◆ 飛行データの記録・再生
- ◆ 通信状況の表示（送信 bps, 受信 bps など）
- ◆ 上位制御用 MCU の状態の表示（負荷率, ヒープ使用量, スタック使用量）
- ◆ GPS 衛星補足数の表示
- ◆ 制御入力の表示
- ◆ 機体のバッテリー電圧の表示・アラート
- ◆ 機体の現在位置・飛行経路の表示
- ◆ 飛行経路の転送
- ◆ TCP/IP 通信による外部プロセスとの連携

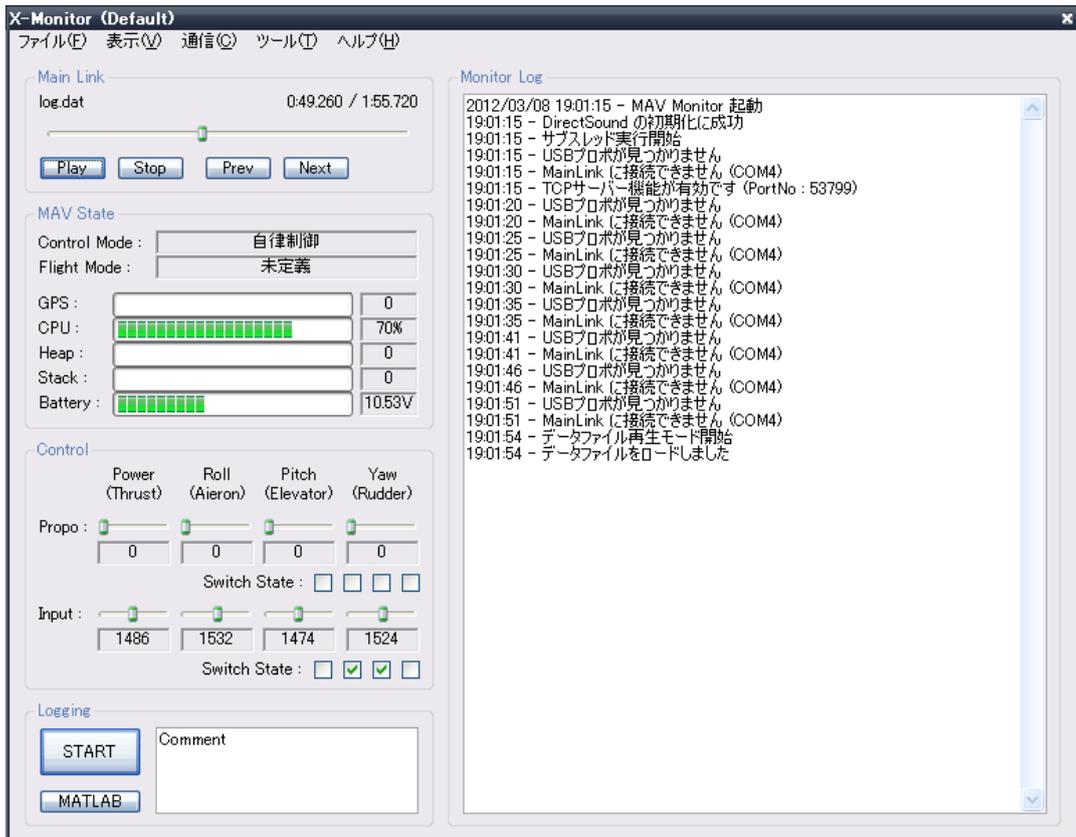


図9 モニタのメインウィンドウ



図10 ウェイポイント飛行専用ウィンドウ

4.3 飛行計画ソフトウェア (Mission Planner)

飛行経路は図 11 に示すソフトウェアを用いて設計する。

- ◆ ファイルの入出力 (XML 形式)
- ◆ 地図の表示および拡大縮小, ドラッグ操作によるスクロール
- ◆ ウェイポイントの作成と削除, ドラッグ操作による移動と回転
- ◆ ウェイポイントのパラメータ手動入力
- ◆ アンドゥ・リドゥ



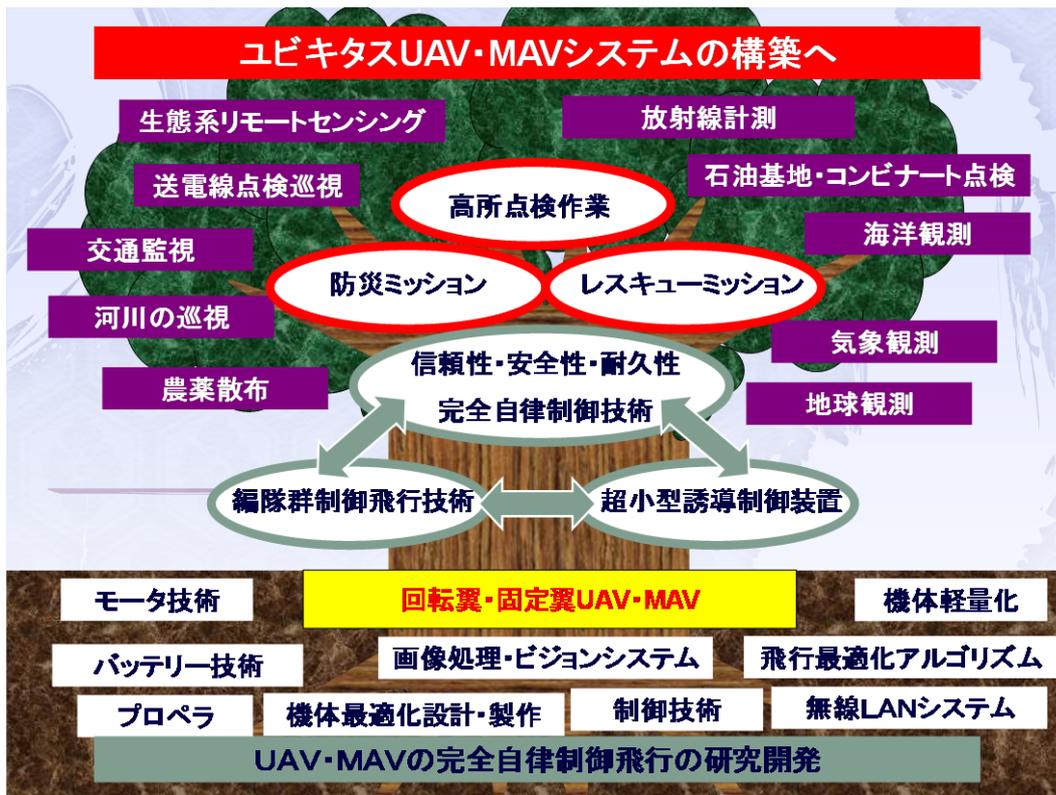
図 11 飛行計画ソフトウェア

5. まとめ

本稿では、産業応用型電動マルチロータヘリコプタのミニサーベイヤーMS-06を中心として、ハードウェアの構成、ソフトウェアの構成について紹介した。さらに、マルチロータヘリコプタの海外でのビジネス動向と著者らのシステムの比較を紹介した。小型軽量で持ち運びが容易な完全自律型電動マルチロータヘリコプタの用途は無限の可能性を秘めているため、安全性や信頼性に関する十分な技術開発を行って実装し、安全性に対する社会インフラの仕組みを構築すれば、近い将来産業応用として活況を呈するものと思われる。

文献

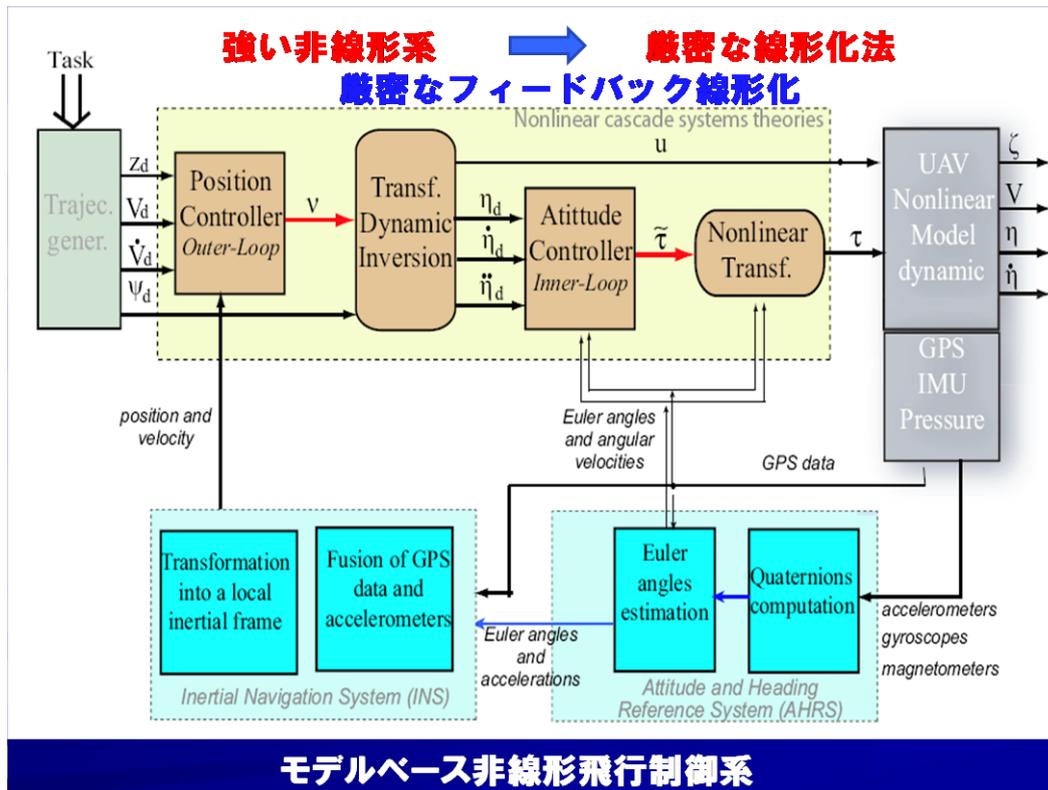
- (1) K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, D. Nakazawa, *Autonomous Flying Robots - Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*(2010), Springer
- (2) <http://www.youtube.com/user/mec2chiba>
- (3) <http://ardrone.tv/ardrone.html>
- (4) <http://www.asctec.de/asctec-pelican-5/>
- (5) <http://www.asctec.de/falcon-aerial-photography/>
- (6) <http://www.draganfly.com/uav-helicopter/draganflier-x8/features/>
- (7) <http://www.service-drone.com/shop>
- (8) <http://www.microdrones.com>
- (9) <https://www.mikrocontroller.com/>
- (10) <http://www.gauai.com.tw/html/index.asp>
- (11) P. Castillo, A. Dzul, and R. Lozano, "Real-time stabilization and tracking of a four-rotor mini rotorcraft", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 4 (2004), pp. 510-516.
- (12) McKerrow, P., "Modelling the Draganflyer four-rotor helicopter", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA(2004)*, pp. 3596-3601.
- (13) 岩倉大輔, 王偉, 野波健蔵, HALEY Mark, "4 発ロータ式MAV の可動式外界センサシステムによる高精度着陸", *日本機械学会論文集C 編*, Vol. 76, No. 761 (2010), pp. 61-68.
- (14) Salazar, S. and Romero, H. and Lozano, R. and Castillo, P., "Modeling and real-time stabilization of an aircraft having eight rotors", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 54(2009), pp. 455-470.
- (15) 田原誠, 野波健蔵, "マルチロータ型ヘリコプタの汎用的な機体設計手法と低コストによる実現", *日本機械学論文集C編*, Vol. 78, No.787 (2012), pp. 872-888.
- (16) F. Kendoul, Z. Yu and K. Nonami "Guidance and Nonlinear Control System for Autonomous Flight of Minirotorcraft Unmanned Aerial Vehicles", *Journal of Field Robotics* : 10.1002/rob.20327, 2009.
- (17) F. Kendoul, K. Nonami, I. Fantoni and R. Lozano "An adaptive vision-based autopilot for mini flying machines guidance, navigation and control", *Autonomous Robots*, Vol. 27, pp. 165-188, 2009.
- (18) F. Kendoul, I. Fantoni and K. Nonami "Optical Flow-Based Vision System for Autonomous 3D Localization and Control of Small Aerial Vehicles", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, Issue 6, pp. 591-602, 2009.
- (19) F. Kendoul and K. Nonami, "A Visual Navigation System for Autonomous Flight of Micro Air Vehicles", *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3888-3893, St. Louis, MO, USA, Oct. 2009.
- (20) F. Kendoul, Z. Yu and K. Nonami, "Embedded Autopilot for Accurate Waypoint Navigation and Trajectory Tracking: Application to Miniature Rotorcraft UAVs", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2884-2890, Sendai, Japan, May 2009.



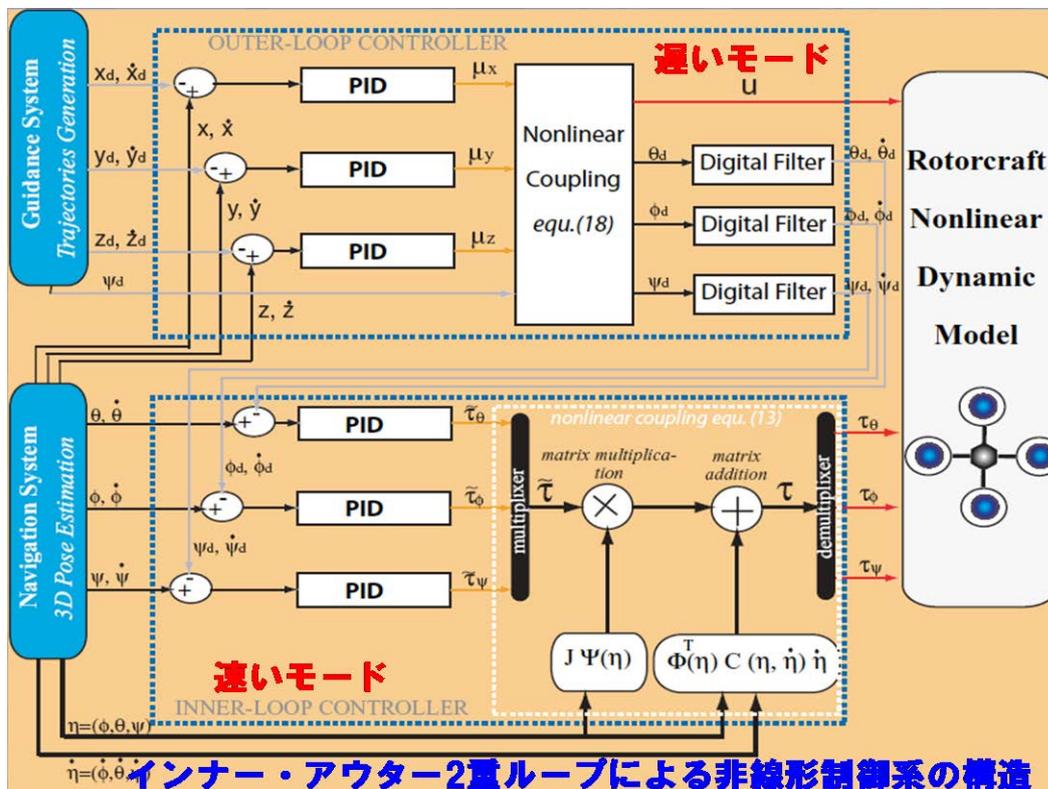
付図1 UAVの要素技術と無限の可能性



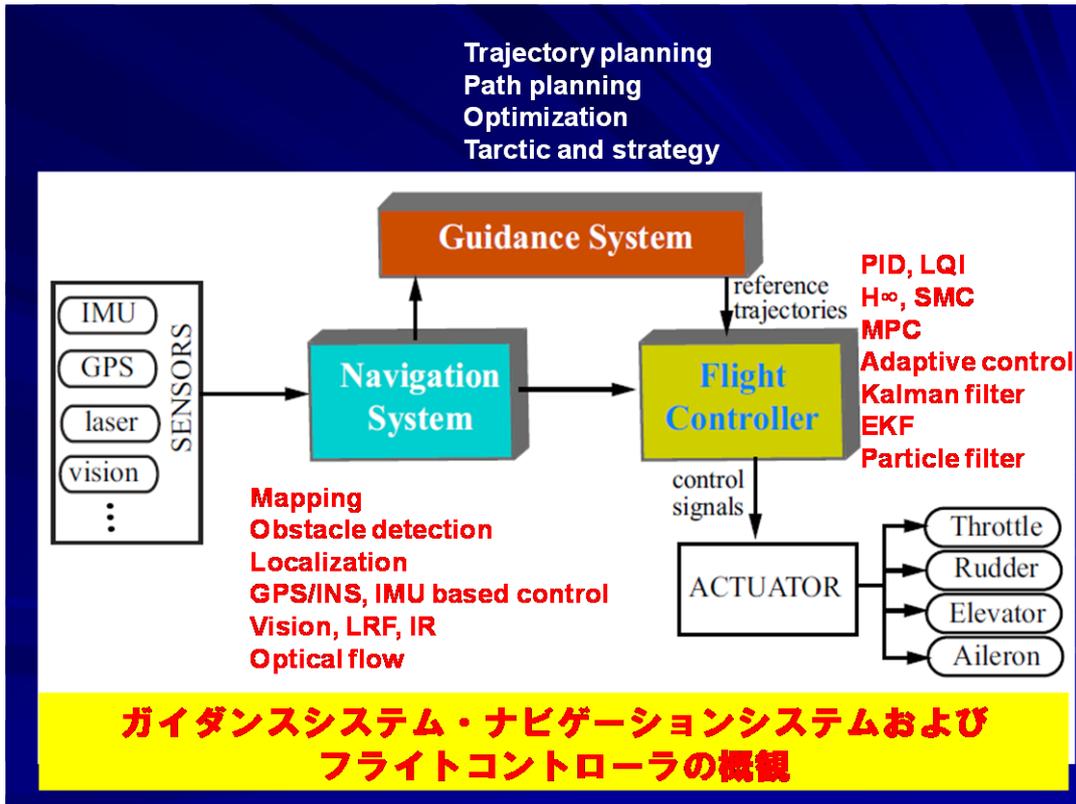
付図2 自律型無人ヘリコプタの研究開発過程



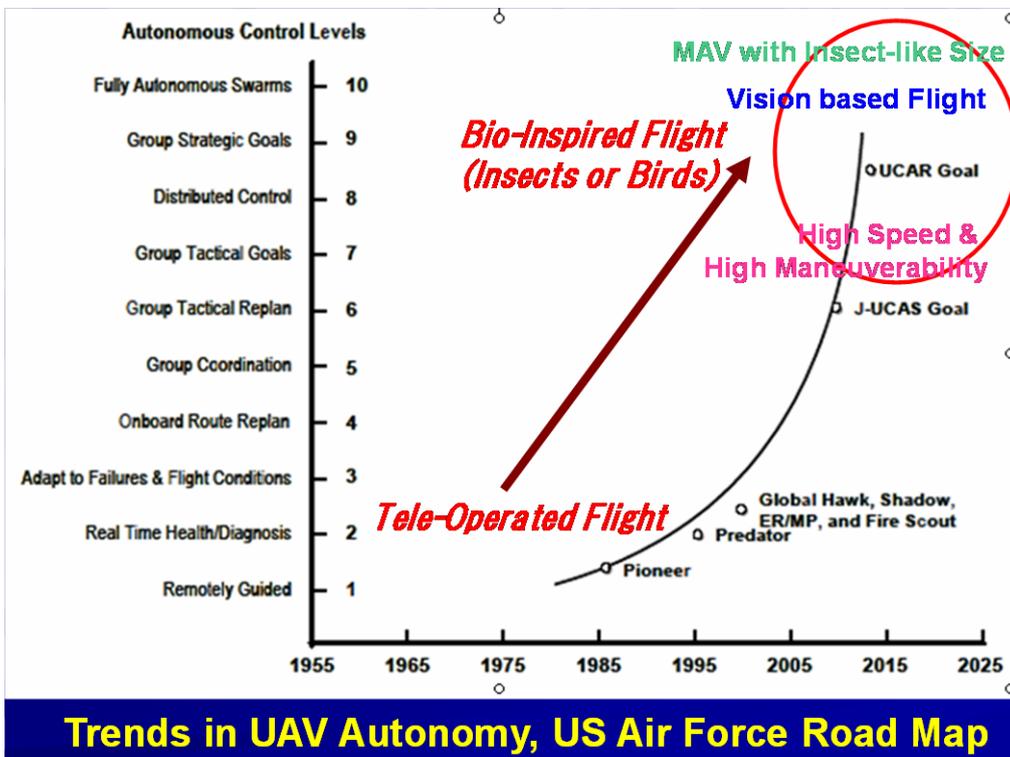
付図3 モデルベース非線形制御系



付図4 2重ループによる非線形制御系

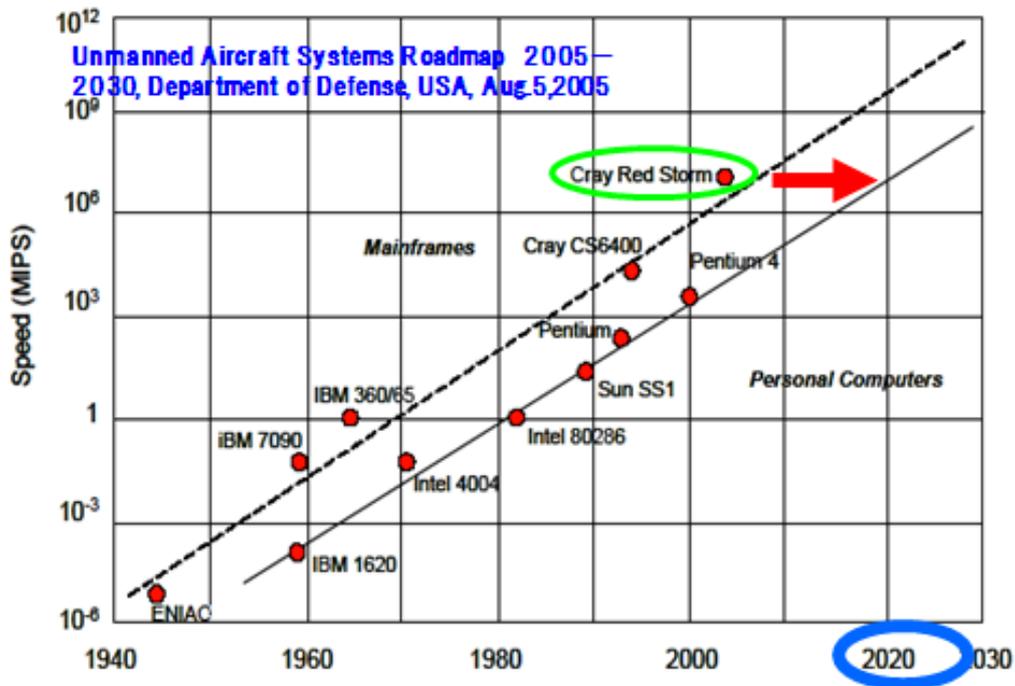


付図5 下位の飛行制御系から上位のナビゲーション制御・ガイダンス制御へ



付図6 UAVの自律飛行の未来の姿

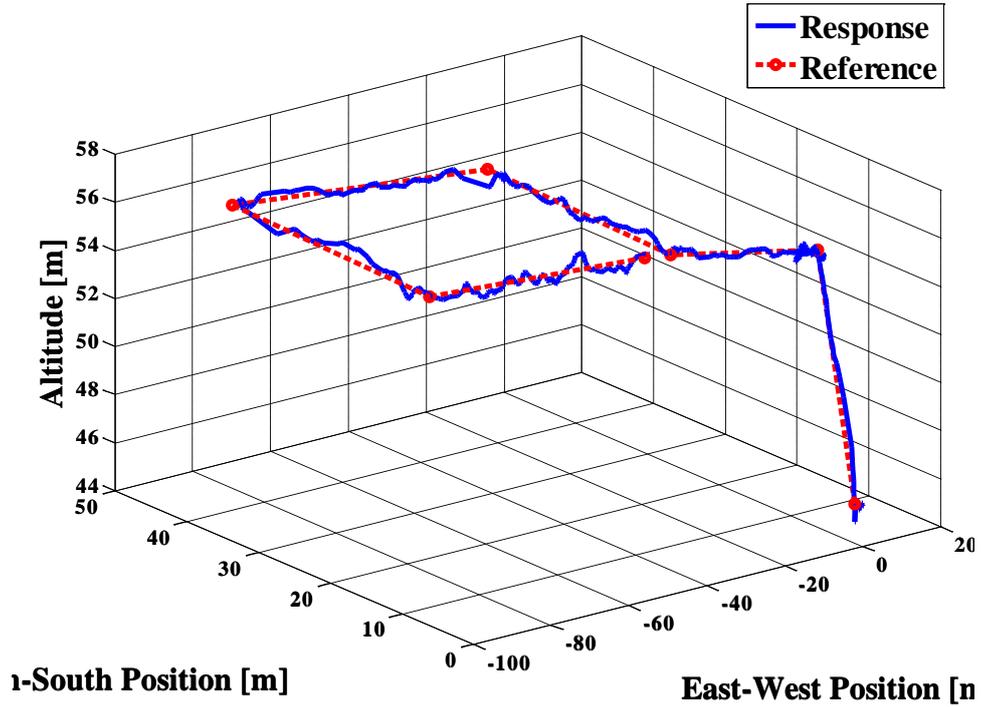
プロセッサ演算速度とムーアの法則



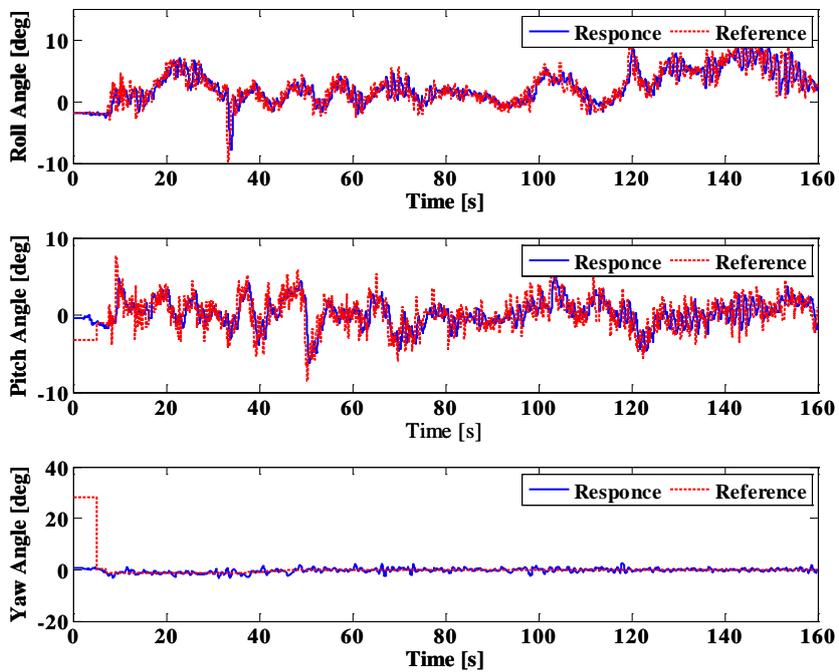
付図7 ムーアの法則、1.5年で演算速度2倍となり12年256倍に

- ▶ UAV, MAV, UGV および UTM の協調制御
- ▶ モータ・ドライバーや高性能バッテリーの国産化 IMU センサ等の国産化によるコスト低減化
- ▶ 飛行制御からナビゲーション制御そしてガイダンス制御へ
- ▶ バッテリー瞬時自動交換 とミッション継続
- ▶ 高度な信頼性と安全性、耐久性の実現
- ▶ 全天候型仕様の実現
- ▶ 生物のようなビジョンシステムによる自律化
- ▶ 超低空飛行や超高度飛行の実現
- ▶ 屋内外での自律飛行の実現と自在な出入り
- ▶ 実運用のための安全運用システム構築

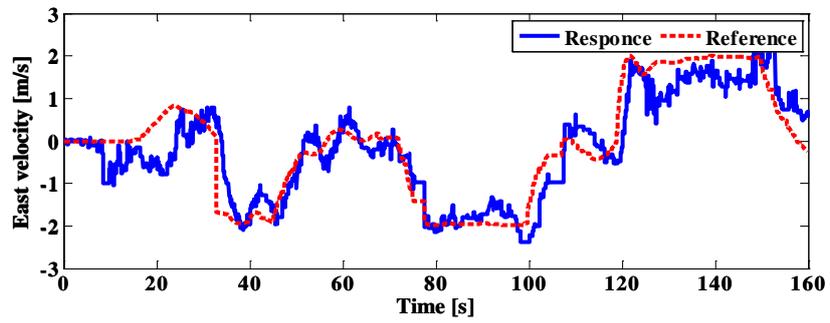
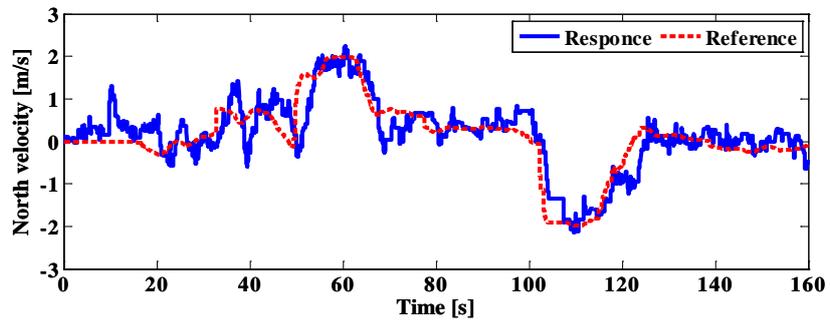
付図8 ミニサーバイヤーの研究開発課題



付図9 ミニサーベイヤーの飛行軌道



付図10 ロール、ピッチ、ヨー角の目標値と実測値



付図 1 1 南北方向速度と東西方向速度の目標値と実測値