

EverCopter: 着脱可能な有線給電式 空中センシングプラットフォーム

興野 悠太郎^{†1,a)} 米澤 拓郎^{†1} 野崎 大幹^{†2} 小川 正幹^{†1} 伊藤 友隆^{†1} 中澤 仁^{†2} 高汐 一紀^{†2}
徳田 英幸^{†1}

概要: 本論文では, 着脱可能な電線によって充電, 給電しながら上空をセンシングするプラットフォームである EverCopter を提案する. バッテリー駆動による UAV(Unmanned Aerial Vehicle) は, 地上の障害物を気にする事無く, 広大な範囲をセンシングできる事が最大のメリットであるが, バッテリー容量による制限を受けてしまう. EverCopter は以下の2つの特徴により, 長時間かつ広範囲なセンシングを可能とする. まず, 複数に接続された EverCopter の一方は, 地上の電源装置に接続され, 給電されている. このことで, それぞれの EverCopter はバッテリー無しで飛行する事ができるため, 半永久的な飛行が可能となる. また, 末端の EverCopter はバッテリーを備えており, 任意のタイミングで着脱が可能である. よって, UAV 本来の自由なセンシングも可能である.

キーワード: センシングプラットフォーム, 飛行機械

Abstract: The paper proposes EverCopter, which provides continuous and adaptive over-the-air sensing with detachable wired flying objects. While a major advantage of sensing systems with battery-operated flying objects is a wide sensing coverage, sensing time is limited due to its limited amount of energy. We propose dynamically rechargeable flying objects, called EverCopter. EverCopter achieves both long sensing time and wide sensing coverage by the following two characteristics. First, multiple EverCopters can be tied in a row by power supply cables. Since the root EverCopter in a row is connected to DC power supply on the ground, each EverCopter can fly without battery. This makes their sensing time forever, unless the power supply on the ground fails. Second, the leaf EverCopter can detach itself from the row in order to enjoy wider sensing coverage. An EverCopter, while it is detached, runs with its own battery-supplied energy. When the remaining energy becomes low, it flies back to the row to recharge the battery.

Keywords: Field sensing, Flying objects.

1. はじめに

最近, マルチコプターを用いて配達を行う Amazon プライム Air [1] など, UAV(Unmanned Aerial Vehicle) を利用したアプリケーションが盛んである. ネットワークに接続された AR.Drone を始めとするマルチコプターは, 地上のセンシングデバイスと比べ, より広域で正確なセンシングが可能である. GPS やカメラ, 気圧計など様々なセンサーを搭載したマルチコプターを用いる事で, 地上の障害物による影響を受ける事無く, 上空から周辺環境のモニタリン

グが可能となる. 現在, Flying eye [2] など, マルチコプターをプラットフォームとして利用する多くのチャレンジが行われている. また ETH における Flying Machine Arena プロジェクト [3] では, マルチコプター単体だけでなく, 複数の機体の制御も行っている. このように, 上空でのセンシングプラットフォームの構築が容易だが, 1つの大きな問題を抱えている. それは, 制限された飛行時間である. マルチコプターはバッテリーで動作しているため, 飛行時間はバッテリー残量に依存してしまう. 例えば, AR.Drone [4] においては, 約 10 分の飛行が限界である. 安定した空中センシングプラットフォームの実現のためには, バッテリー制限の課題を解決する必要がある. ここで本研究では, 有線による電力供給によって, マルチコプターを駆動させ, 空中での安定したセンシングを実現する. また, 有線による自由度の低下を防ぐため, マルチコプター本来のバッテ

^{†1} 現在, 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
Presently with Graduate School of Media and Governance,
Keio University

^{†2} 現在, 慶應義塾大学 環境情報学部
Presently with Faculty of Environment and Information
Studies, Keio University

a) kyopan@ht.sfc.keio.ac.jp



図 1 ETH によるクアッドコプター



図 2 Flying Eye プロジェクト

りによる駆動も実現する。このように、マルチコプターのバッテリー問題を解決する事で、常に上空のセンシングが可能となり、UAV の持つ可能性を最大限に発揮することができる。

本稿では、空中センシングプラットフォームである EverCopter について述べる。構成は以下の通りである。第 2 章で関連研究について説明し、第 3 章では本研究である EverCopter のシステムについて述べる。第 4 章では EverCopter の可能性や課題点について議論し、考察を述べる。最後に第 5 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

本研究に関連する研究として、自身の手や視点を遠隔に拡張している事例を挙げる。近年、UAV を利用した研究が盛んになっており、それらを用いることにより従来のセンサにはできない 3 次元的に移動性の高い環境情報センシングが可能になっている。その際に、UAV をどのように操作するのかについて課題となっている。Bills らは、屋内環境においてどのように UAV を自律的に飛行可能にするかについて取り組んでいる [5]。UAV の先端にカメラを取り付けることにより取得した画像を処理することで、自律飛行を可能にしている。また、Lupashin [7] らは複数の UAV をコントロールするデモンストレーションをおこなっている。彼らは実際に公共空間にて UAV を飛行するプラットフォームの開発をおこなっている。Muller らは、クアッドコプタにラケットを取り付け、ボールジャグリングのシス

テムを発表している [6]。これらは、クアッドコプタは、計算したボールの落下位置まで飛行移動することで、ジャグリングを持続可能にしている。本研究のコンセプトである UAV を用いた環境情報センシングは様々な分野にて応用が可能であると考えられる。樋口らは、UAV に取り付けられたカメラを用いたプラットフォーム Flying Eyes を提案している。これは移動する対象を近距離から映像中に捉え続けることは難しいという問題点を解決するために、UAV は自律的にカメラワークを実現することで映像コンテンツを撮影可能である。吉田らは、ジェスチャによって UAV を操作するシステムを提案している。これは、UAV に取り付けられているカメラから情報を取得し、それらをユーザにフィードバックすることで、ユーザはその身体性を拡張しているように感じさせる。しかしながら、これらの既存研究では UAV におけるバッテリー問題にアプローチしていない。そのため、そのシステムは約 10 分程度の短時間のみで動くことになり、毎回バッテリーを交換するため UAV は着陸する必要があり継続的にシステムを持続させることが難しい。Swieringa らは、このバッテリー問題について取り組んでいる。彼らは小型ヘリコプターにおいてバッテリー交換システムを提案している。Suzuki らは、地上にバッテリーを交換するための基地局を設置することでこの問題にアプローチしている。彼らの開発したプロトタイプは高い精度でバッテリーの交換を可能にしており、屋外においても UAV の持続可能性を示している。

3. 本研究の目的と新規性

本研究の目的は、安定した空中センシングプラットフォーム構築のための有線給電手法の提案である。現在 UAV において、電力問題を解決する手段として、基地に設置された予備バッテリーをスワップすることで電力を確保する研究がある。しかし、交換するたびに定位置から外れる必要があるため、安定したセンシングが難しくなっている。本研究の新規性として、UAV を有線で給電することが挙げられる。また、UAV が複数直列に接続できることにより、センシング範囲が大幅に拡大可能である。さらに、専用の着脱ケーブルを設ける事により、本来のバッテリー飛行モードにシームレスに切り替えることができるため、有線による自由度の低下問題を解決している。

4. EverCopter

本研究では、空中センシングプラットフォーム構築のための UAV 集合体、EverCopter を提案する。EverCopter は直線上に複数台連結された UAV の総称であり、一方は電源装置に接続されている。

4.1 2つのセンシングモード

電源装置の容量により、最大 8 台の AR.Drone2.0 を 20

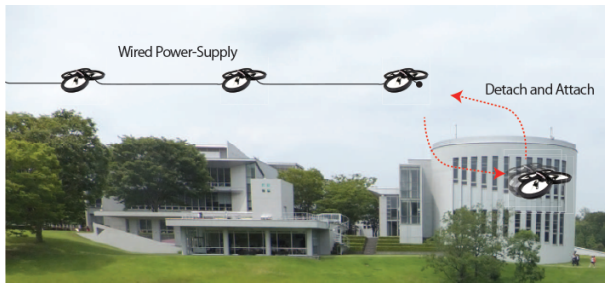


図 3 EverCopter システム

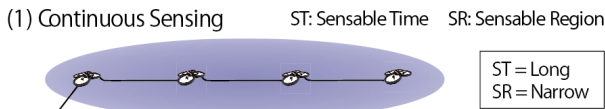


図 4 連続センシングモード

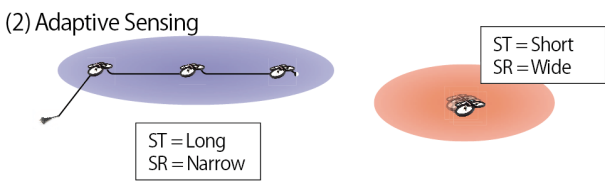


図 5 自律モード

メートル程度のケーブルを介して、直列に接続されている。EverCopter は以下の 2つの機能を有している。

連続センシングモード

電源装置から AR.Drone が直列に接続され、上空からセンシングする。

自律モード

電源と反対側の末端の AR.Drone はケーブル着脱装置を備えており、任意のタイミングで切り離すことでバッテリーによる自律飛行が可能となる。

EverCopter はこれらの飛行モードを状況によって手動で切り替える事が可能である。このため、有線状態では入り込めないような場所への飛行では、バッテリーモードによって切り離す事で、センシング範囲を飛躍的に広げることが可能となる。また、それぞれの EverCopter は Wifi にインフラストラクチャ・モードで接続する。このため、1台の PC により、それぞれの AR.Drone を制御する事が可能となっている。これにより、マップ上で EverCopter の位置を把握でき、任意の場所で EverCopter を切り離す事が可能となる。

4.2 再接続プロセス

また、再度 EverCopter に接続する際は、次の手法で実現



図 6 マップ上に表示された EverCopter

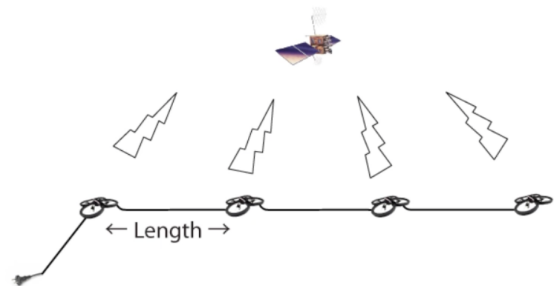


図 7 GPS による自機検出

する。

- (1) GPS により接続場所まで自動移動
- (2) 電源側の EverCopter が電源ケーブルを垂らす
- (3) バッテリー EverCopter に取り付けられたマーカーによって画像認識、位置推定
- (4) 電源側の EverCopter がマーカー情報を元にケーブルの接続を行う

これにより、PC 上で複雑な操作をする事無く、EverCopter が再接続されると同時に、バッテリーへの充電が行われる。

4.3 飛行テクニック

EverCopter では、また複数の機体の位置決めやフォーメーションが重要である。ここで、我々は 2つの飛行テクニックをデザインする必要があった。以下に 2つを示す。

- (1) 有線飛行テクニック

最初に、EverCopter を E とおく。直列に複数台接続された EverCopter は $E=[E1, E2, E3, \dots, En]$ と表される。ここで、E1 は電源に接続されている EverCopter で

あり、En は末端のバッテリーを搭載した EverCopter のことである。

有線飛行テクニックでは、それぞれの E は GPS による自機の位置を把握している。飛行開始では、最初に En が飛び立つ。En はマニュアル操作可能であり、PC 上から自由にコントロール可能である。この状態では、En-1 以下の E はケーブルが弛んでいる。En がさらに飛行を続け、En-1 との距離がケーブル長に到達した事を検知すると、En-1 が飛び立つ。これが繰り返され、E1 まで飛行が行われる。E1 は電源に繋がっているため、ケーブルの半径内で移動可能である。このようにしてケーブル長×E の長さの EverCopter によって、上空からセンシングする事が可能となる。

(2) 再接続テクニック

また、再接続テクニックでは、En-1 と En の機体に対して行われる。PC 上にて、任意のタイミングで En-1 と En を切り離されると、En はバッテリーを用いて任意の場所に飛行が可能となる。この場合、本来の無線飛行による UAV の性能が発揮される。En によるセンシングが完了すると、再度 En-1 に接続する必要がある。この場合、GPS 情報により、En-1 と En 同士が接近し、En-1 に搭載されたボトムカメラにより、En のマーカーを検知し、En-1 のみに取り付けられた伸張可能なケーブルが下に垂れていくことにより、接続スタンバイ状態になる。ここで、En-1 の真下に入り込む形で En が飛行し、マグネットによってケーブルが En に接続される。これにより、給電が開始され、同時に充電される事で、元のフォーメーションに戻る事が可能となる。

5. 実装

本章では、EverCopter の実装について述べる。EverCopter は Parrot 社の AR.Drone2.0 を使用しているため、あらかじめ HD 画質のフロントカメラと SD 画質のボトムカメラ、機体下部に取り付けられた超音波センサと機体内部の気圧センサの情報にアクセス可能である。また、それぞれの機体に GPS センサ、電圧・電流センサ、温度センサを取り付けた。これにより、自機の位置推定が可能となり、温度計や気圧計により、詳細な環境モニタリングが可能となった。また En-1 の機体にも、ケーブル着脱用巻き取り装置が装着されている。これにより、2つの飛行モードを実現している。

5.1 ハードウェア

EverCopter では、AR.Drone を用いているが、本研究ではさらに GPS と温度センサユニットを製作し、機体に搭



図 8 En-1 に取り付けられたケーブル巻き取り装置

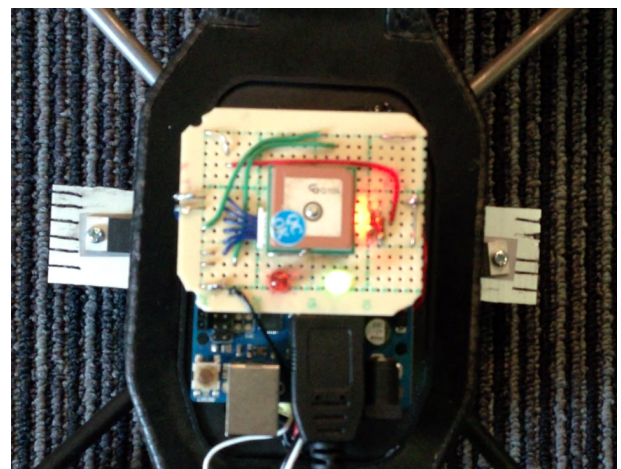


図 9 それぞれの E に取り付けられた GPS、温度センサ

載した。これらの情報は SPI 通信を介して AR.Drone のマザーボードへアクセスする。本節では各モジュールの詳細について述べる。

EverCopter

それぞれの EverCopter はレギュレーターが搭載されている。電源から供給される電圧は直流 24 ボルト前後で供給されるのに対し、各 EverCopter の耐圧は 12 ボルト前後である。ここで、24 ボルトを 12 ボルトに降圧させる必要がある。電源電圧が高めに供給される理由として、ケーブルによる電圧降下問題を解決する必要性が挙げられる。ケーブル自体には一台当たり 5 アンペアが流れるため、ケーブル自体の電気抵抗が発生してしまうためである。本来、5 アンペアクラスのレギュレーターでは、100 ワットクラスのヒートシンクが必要だが、本研究では AR.Drone の羽から出される風によって強制空冷をする事で、ヒートシンクのサイズと重さを 1/20 程度まで小型化する事に成功した。

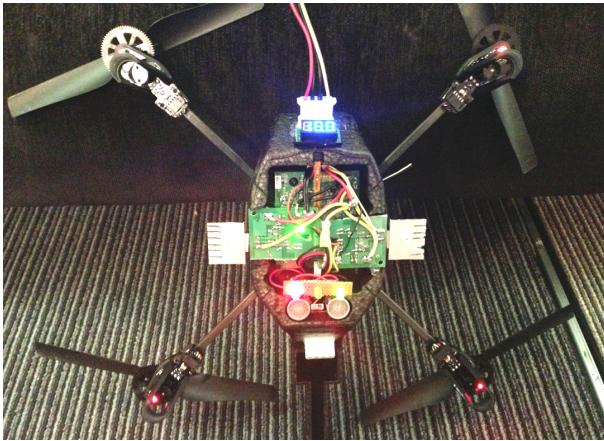


図 10 それぞれの E に取り付けられたレギュレーター

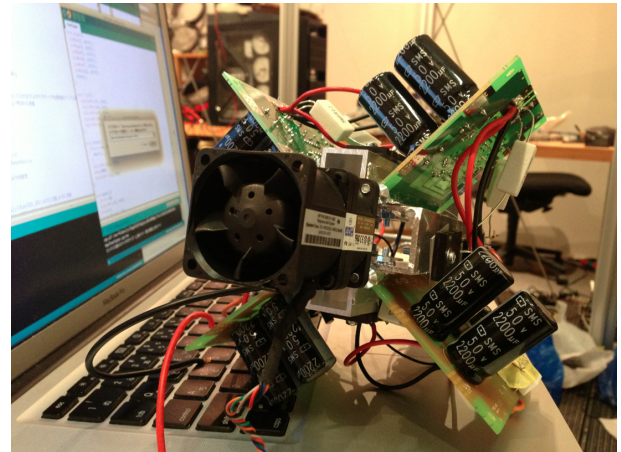


図 12 自作電源装置のコア部分

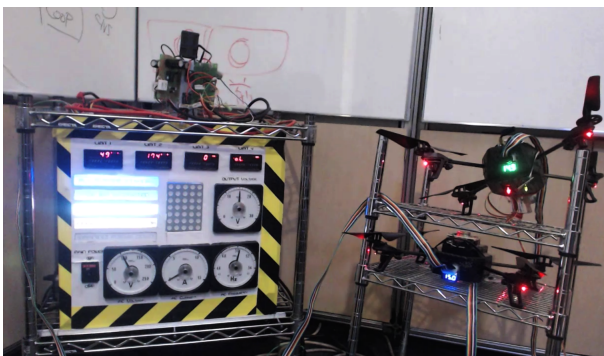


図 11 E に電源を供給する自作電源装置

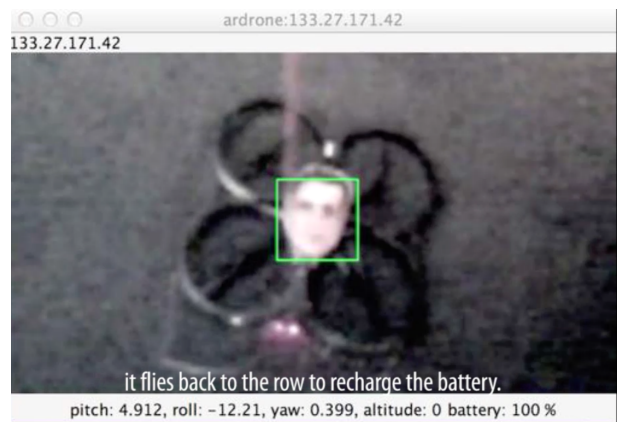


図 13 機体 En-1 から俯瞰カメラで取得したマーカー情報

また、自機の位置情報把握のため、GPS モジュールを各々に搭載している。同時に、En-1 の機体にも搭載している巻き取り装置は、AR.Drone 上部に搭載された Arduino により制御され、GPS 情報とともにネットワークで送信され、PC にて取得・制御する。

電源装置

最大 8 台程度の EverCopter に対して電力を供給するため、専用の直流電源装置を製作した。この装置では、それぞれの EverCopter から集められた電圧・電流情報を収集し、ケーブルにかかる電圧降下を計算する事で、最適な電圧を供給する。このため最大 50 アンペアを流す事ができる巨大なレギュレーターを製作した。これにより、100 μ 秒単位で負荷変動情報をフィードバックし、EverCopter に搭載されたレギュレーターへの負荷を軽減する事ができる。例えば、En が En-1 に接続した際、5 アンペア以上が突入電流として流れる。この情報を即座に検知し修正することで、系全体の電圧を最適に維持する事が可能となる。

5.2 ソフトウェア

本研究では、Processing 用 AR.Drone ライブラリである ARDroneForP5 [9] を用いて AR.Drone を制御している。また、AR.Drone に搭載された GPS と温度センサー情報を元に、地図上に自機の位置をマッピングし、それぞれの機体にフォーカスを合わせる事で、カメラ情報を始め、温度情報や気圧情報を表示する事が可能である。本節では、画像認識を用いた En-1 と En における再接続手法について述べる。

マーカーとしての顔

EverCopter は一度切り離れた後、再度接続する際、GPS 情報とマーカー情報を取得・使用する。今回の実験では、マーカーを搭載した静止状態の En に対して、En-1 が接続のアプローチを行うこととする。この際、マーカーには人間の顔を利用した。これは、En-1 のボトムカメラから取得された映像は SD 画質であるため、実際の AR.Drone 自体の識別が困難であった事が挙げられる。ここで、顔認識ライブラリを用いる事で比較的画質が荒くても、トレースする事に成功した。

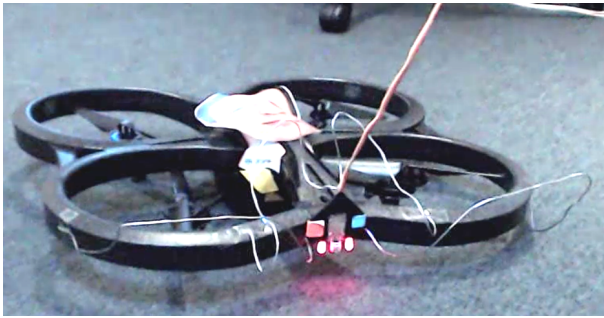


図 14 マグネットによる接続装置

再接続手法

En-1 に搭載されているボトムカメラの範囲内に En が認識されると、接続モードに移行する。接続モードでは、En-1 に搭載されている巻き取り装置を起動し、接続ケーブルを2メートル程度下方に垂らす。これにより、En と En-1 の超音波センサと気圧センサ情報によって、高度の差分が2メートルになるように制御される。これによって、En-1 のケーブル先端に接続されている端子が末端の En に接続するように試行する。この試行は接続されるまで行われる。一旦接続されると、接続モードは解除され、給電・充電されると同時に連続センシングモードに移行する。

6. 議論

本研究では、上空から安定的にセンシングするため UAV を用いたセンシングプラットフォームの構築を提案・実装した。しかし、実際に運用する際は、解決しなければならない様々な問題が存在する。本章では、特に解決すべき問題を以下に挙げ、議論する。

(1) 複数台接続時における給電問題

本実験では、理論上8台の EverCopter を接続した際に耐えられる電源設計を行った。しかし、実際3台以上接続すると AR.Drone 上のバッテリーパラメータが誤認識し、電圧は十分供給されているにも関わらず、バッテリー残量ゼロによる強制着陸モードに入ってしまうといった問題が生じてしまった。これにより、EverCopter の電源をリセットするまで離陸ができない事態になってしまった。このプログラムは、AR.Drone 内で動いているため、直接制御できないといった制限条件が存在する。この課題をクリアするためには、さらに安定した電力を供給する必要がある、レギュレーターや電圧フィードバック機構を改良する必要がある。今後の研究課題として残った。

(2) 接続時のマーカー問題

En-1 の機体で En を検知する際、ライブラリの扱いや

すさから、En に顔を貼付けることで、顔認識による位置決めを適用したが、実際は En 自体を検知する事が効率的である。これについては、独自のライブラリを構築する必要がある、今後の課題として残った。

(3) ケーブル接続時の精度問題

また、実際に顔認識された後、En-1 ケーブル先端の端子が En に接続する際、AR.Drone が移動してしまった場合等接続できなかった場合、再度接続を試みる。この接続では、現段階の精度は10回に1回程度である。このため、接続に時間がかかってしまう。これにより、バッテリーが尽きてしまう問題も起こってしまう。端子の形状を改良する等、改善の余地がまだまだ存在する。

(4) 今後解決すべき課題点とアプローチ

有線給電により、安定したセンシングプラットフォームを構築するため、さらに課題点を解決する必要がある。例えば、有線給電する際のケーブルの絡みをほぐす手法や、EverCopter 同士のフォーメーションをケーブルによる束縛条件を維持したまま自由に変えられる手法の実現も必要である。

7. まとめ

本論文では、UAV を利用した上空にて移動可能なセンシングプラットフォーム、EverCopter を提案した。EverCopter は複数の UAV に様々なセンサを搭載して飛行移動を行うため、広範囲においてセンシングを可能にしている。また、UAV を用いる際に生じるバッテリー容量による制限の問題点に対して、UAV を電源装置から直接有線によって接続することにより解決した。本プラットフォームでは、地上に設置した電源装置に複数台の UAV を直列に接続することで、半永久的な飛行を実現した。EverCopter は連続センシングモードと自律モードの2つの飛行モードを切り替えながら飛行センシングをおこなう。連続センシングモードでは、電源装置から UAV が直列に接続され、上空からセンシングする。自律モードでは、先頭の UAV を切り離すことで1台の UAV として自律飛行しながら任意のセンシングをおこなう。切り離された先頭の UAV はマーカーによる画像認識と着脱式可能なケーブルにより、再度 EverCopter に接続される。また、EverCopter の持つ課題点に言及し、議論した。EverCopter が実現するプラットフォームは安定的にセンシングできる一方、改良すべき課題点も多いが、これらを今後の研究課題とする。

参考文献

- [1] Amazon Prime Air
<http://www.amazon.com/b?node=8037720011>

- (2014.02.13).
- [2] Flying eye. <http://flyingeye.fr>.
 - [3] Flying Machine Arena
<http://www.flyingmachinearena.org> (2014.02.13).
 - [4] Ar.drone 2.0 parrot new wi-fi quadri-
copter.<http://ardrone2.parrot.com>.
 - [5] Bills, C., Chen, J., and Saxena, A. Autonomous mav
flight in indoor environments using single image per-
spective cues. In 2011 IEEE International Conference
on Robotics and Automation (ICRA), IEEE (2011),
5776?5783.
 - [6] Suzuki, Koji AO, Paulo Kemper Filho, and James R.
Morrison. "Automatic battery replacement system for
UAVs: Analysis and design." *Journal of Intelligent &
Robotic Systems* 65.1-4 (2012): 563-586.
 - [7] Mark Muller, Sergei Lupashin, and Raffaello D' An-
drea, "Quadrocopter Ball Juggling" , IEEE/RSJ Inter-
national Conference on Intelligent Robots and Systems,
pp.5113?5120, 2011.
 - [8] Sergei Lupashin, Markus Hehn, Mark W. Mueller, An-
gela P. Schoellig, Michael Sherback, and Raffaello D'
Andrea, "A platform for aerial robotics research a
 - [9] ARDroneForP5
<https://github.com/shigeodayo/ARDroneForP5>
(2014.02.13).
 - [10] Keita, H., Yoshio, I., and Jun, R. Flying eyes: free-
space content creation using autonomous aerial vehicles.
In CHI1' 11 Extended Abstracts on Human Factors in
Computing Systems, ACM (2011), 561?570.
 - [11] Morten, B., and Anders L. C. Jan, D. B. Adaptive
control system for autonomous helicopter slung load
operations. *Control Engineering Practise* 18, 7 (2009),
800?811.
 - [12] Palunko, I., and Fierro, R. Cruz, P. Trajectory genera-
tion for swing-free maneuvers of a quadrotor with sus-
pended payload: A dynamic programming approach. In
2012 IEEE International Conference on Robotics and
Automation (ICRA), IEEE (2012).
 - [13] Takeo, I., and Mike, S. Homotopic path planning on
manifolds for cabled mobile robots. In *Algorithmic
Foundations of Robotics IX*, Springer Berlin Heidelberg
(2011), 1?18.
 - [14] Tugrel, O., and Comel, S. Modeling and control of a he-
licopter slung-load system. *Aerospace Science and Tech-
nology* (2013).
 - [15] Jeff, M., Ashutosh, S., and Andrew, Y. N. High speed
obstacle avoidance using monocular vision and rein-
forcement learning. In *ICML ' 05 Proceedings of the
22nd international conference on Machine learning*, ACM
(2005), 593?600.