

組み込み型ArUco：高精度UAV着陸のための新しいアプローチ

アルトゥール・カゼトディノフ
知能ロボティクス研究室 (LIRS)
知能ロボティクス研究部
情報工学・知能システム研究所
カザン、ロシア
ark@it.kfu.ru

。しかし、全地球測位システム（屋内など）を使わずに正確な着陸を行うには、多くの場合、人の手を借りて着陸を成功させる必要があります。このことは、特に重要な

Tatyana Tsoy
知能ロボティクス研究室 (LIRS)
知能ロボティクス研究部
情報工学・知能システム研究所
カザン、ロシア
ア tt@it.kfu.ru

エフゲニ・マギド
知能ロボティクス研究室 (LIRS)
知能ロボティクス研究部
情報工学・知能システム研究所
カザン、ロシア
ア magid@it.kfu.ru

要旨

本論文では、視覚的な感覚データを用いてUAVを正確に着陸させるための新しいアプローチを紹介する。本論文では、新しいタイプのフィデューシャルマーカである*embedded ArUco* (e-

ArUco)を開発し、広い距離範囲においてロバストなマーカ検出を実現した。E-

ArUcoマーカはオリジナルのArUcoマーカのアプローチに基づいており、ArUco検出アルゴリズムのみを必要とします。開発したマーカの適用性は、仮想環境下でのUAV着陸実験により検証した。開発したマーカと着陸アルゴリズムの両方をROSフレームワーク内に実装し、Gazeboシミュレータでテストしました。仮想実験によると、平均着陸精度は2.03cm、標準偏差は1.53cmであった。

索引用語

フィデューシャルマーカ、ArUco、ROS、Gazebo、UAV、PX4

I. はじめに

現代の無人航空機（UAV）は、軍事・民間のさまざまな分野で活発に利用されている。代表的なタスクとしては、広域での様々な物体の探索[1]、環境の監視と制御[2]、構造物の検査と監視[3]、物品の配送[4]、その他[5]があります。これらのタスクでは、作業開始時にUAVを離陸させ、タスク終了後に着陸させる必要があります

Aufar Zakiev

知能ロボティクス研究室 (LIRS)

知能ロボティクス研究部

情報工学・知能システム研究所

カザン、ロシア

zaufar@it.kfu.ru

ミハイル・スヴィーニン

立命館大学情報理工学部情報理工学科

京都、日本

svinin@fc.ritsumei.ac.jp

UAVの墜落の多くは着陸時に発生し、予期せぬ強硬着陸によって引き起こされるため[6]、UAVが高価な機

器を搭載している場合、またミッションに参加する場合などには、着陸支援システムが必要となります。そのため、着陸支援システムは、多くの事故を減らすための重要な手段である。また、UAVの姿勢推定精度を向上させることで、正確な着陸の問題を解決できる可能性があります。

視覚情報に基づくロボットの姿勢推定は、ローカライゼーション[7]、ロボットナビゲーション[8]、SLAM[9]など、多くのロボットアプリケーションにおいて重要な機能である[10]。このプロセスは、実環境の特徴点とその2次元画像への投影（光学カメラなど）の対応関係を見つけることに基づいている。この処理は、任意の画像に対して計算量が多くなる。そのため、適切な特徴点の抽出には、合成フィデューシャルマーカを用いるのが一般的である[11]。フィデューシャルマーカは、あらかじめ大きさと比率が定義されているため、相対的なカメラの回転を抽出し、カメラまでの距離を推定することができる。最も一般的なアプローチの1つは、2値化された四角形のフィデューシャルマーカを使用することです[12]（ArUcoマーカの例を図1に示す）。内部で2値化することで、自動的な誤り検出・訂正技術により検出の信頼性を向上させることができる。本研究では、拡張現実感プロジェクトで非常によく使われているArUcoマーカ[13]を用いて、カメラと人物の位置関係を評価した。

978-1-7281-8504-0/21/\$31.00 ©2021 IEEE



図1：IDが0、1、2、3であるオリジナルのArUcoマーカー（左から順に）

基準点として機能しました。マーカーが見えない場合、必要なナビゲーションの信頼性を達成するために、カルマンフィルタと一緒に慣性測定値を使用してドローンを制御しました。

の位置に配置されます[14]。ArUco

マーカーは合成された正方形のマーカーで、幅広の黒い境界線と、固有の識別子（ID）を符号化した内部のバイナリ・マトリックスで構成されています。黒い境界線は環境内でのマーカー検出を高速化し、マーカーのIDはマーカー群内の異なるマーカーを区別することを可能にする。内部2値行列は $N \times N$ 個のセル（エン트리）からなり、各セルは白または黒の色を持っています。

着陸地点にフィデューシャルマーカーを設置する。次に、UAVは着陸時にマーカーを連続的に検出し、それに応じて移動する必要があります。このため、着陸の全行程でマーカーを検出する必要があります。カメラの画角内に常にマーカーがある必要があります。一方では、大きなマーカーは遠距離から検出やすく、他方、近距離では、UAVが十分に近づくと、大きなマーカー領域はカメラの視野を超え（部分的に視野から離れることも）、マーカーはもはやカメラのビデオストリームフレームで完全に捉えられないことを意味します[15]。

本論文では、フィデューシャルマーカーを用いたUAVの正確な着陸の問題を解決することを目的とした新しいアプローチを紹介する。ArUcoマーカーを改良し、**E-m-bedded ArUco (e-ArUco)**マーカーと呼ぶ。E-ArUcoマーカーは、着陸の全過程において、遠距離からでも近距離からでも検出可能であり、検出にはオリジナルのArUco検出アルゴリズムが必要なだけです。提案したe-

ArUcoマーカーは、Gazeboシミュレータを用いたPX4ベースのドローンによる仮想UAV着陸実験により検証されました。

本論文の残りの部分は以下のように構成されている。セクション2では、UAVの精密着陸に関する関連研究を紹介する。セクション3では提案システムについて説明する。セクション4では、e-ArUcoマーカーとUAV精密着陸アルゴリズムについて述べる。セクション5では仮想実験のデモンストレーションを行う。最後のセクションで結論を述べる。

II. 関連作品

過去数十年の研究文献には、様々なUAV着陸ソリューションが発表されている。16]では、著者は2つのカメラを搭載したAR Drone 2.0 UAVを使用して、屋内ナビゲーションと着陸を行いました。ArUcoマーカーは、正確な位置特定を行うための

17]の著者は2つのアルゴリズムを提示した。最初のアルゴリズムは、UAVカメラ画像内のArUcoマーカを検出し、マーカに対するUAVカメラの位置とアライメントを決定することに集中しています。2つ目のアルゴリズムは、UAVをマーカ表面に直接着陸させるもので、着陸精度を向上させるためにマーカに対するUAVの位置を調整するソフトウェアモジュールが含まれています。開発したアルゴリズムは、Gazeboシミュレータ環境 [18]でテストされました。

19]では、著者らは高精度なUAV着陸のためにArUcoマーカも使用しました。提案した静的・動的アプローチソリューションでは、UAVに安価なRaspberry Piカメラを搭載し、20m（静的）～30m（動的）の高さから56×56cmのサイズのArUcoマーカを検出することができました。この方法は、ArduSimシミュレーションプラットフォーム[20]と実際のUAVを使った実験により検証されました。著者らは、目標位置からの平均オフセットが11cmであることを報告し、他のいくつかの方法と比較し、1～3mのオフセットを持つ従来のGPSベースの着陸の精度がかなり低いことを強調しました。

前述の著者の多くは、人工環境や実環境でのアプローチを確認していますが、彼らのアプローチでは、ドローンの着陸プロセス全体を通してArUcoマーカを検出することはできず、着陸精度を向上させることが可能です。着陸精度を向上させるもう一つの方法は、搭載されたセンサーシステムの精度と信頼性を向上させることです[21]。しかし、この方法は、追加のハードウェアを必要とし、UAVのコストを増加させ、ソリューションの多様性と汎用性を低下させる。しかし、ほとんどのUAVは光学カメラを搭載しているため、ビジュアルナビゲーションをUAVの制御系に統合することが可能である。ループを、ハードウェアを変更することなく実現しました。

WynnとMcLainは[22]で、入れ子になった一対のArUcoマーカを用いて、UAVの昼間の着陸と夜間の着陸の両方を実行しています。外側のマーカは 70 × 70 cm の大きさで、8 × 8 のバイナリセル、すなわち内部の 6 × 6 のマトリックス（ID を形成）と外部の 1 セル幅の黒色の境界を含んでいた。外側のマーカは白い背景の上に置かれ、約17mの距離から検出することができる。外側のマーカの中央には、12×12cmの小さな内側のマーカ（6×6セルの内部マトリックスと1セル幅の黒い境界からなる8×8セルのマーカ）を置き、約5mの距離から検出することができ、大きな外側のマーカがカメラの視野の外に出たときに着陸プロセスを導くことができたようにした。なお、1～2.5mの距離では、両方のマーカを同時に検出することに成功しています。著者らは、4セットの同軸モーターを搭載した3DRobotics X8マルチローター、Pixhawk 2.1パイロットシステム[23]、PX4ファームウェアを用いた一連の実験により、このアプローチの有効性を検証

しています[24]。また、FLIR Chameleon3 グローバルシャッターカメラ（解像度 1288 × 964, 視野角 78 度, 3.6 mm M12 レンズ）を下向きに設置し、マーカ検出と目視による着陸誘導を行いました。リアルタイムでの画像処理と制御は、搭載された NVIDIA Jetson TX2が行い、MAVROSはJetsonとPixhawkの橋渡しに使用されました。この手法は、私たちのものと似ていますが

は、いくつかの欠点がありましたが、我々はそれを解消することに成功しました。22]の解決策の主な欠点は、外側マーカと内側マーカの相関がないため、さらにマルチスケール化できるスマートな埋め込みができないことである。また、内側マーカは外側マーカの4つのセルに重なるため、前景（内側マーカ）が背景（外側マーカ）の4つのセルと明確に区別できる必要があり、外側と内側の両方のマーカのID選択可能数が減少する。

III. システムセットアップ

PX4-LIRS UAVは、知能ロボットシステム研究室¹ (LIRS)

の研究目的で設計・構築された4組のモーターを搭載したマルチローターで、ソフトウェアと制御のバックボーンとしてRobot Operating System (ROS) [25]が使用されています。UAVの制御には、Pixhawk [23] with PX4 [24] firmwareとRaspberry Pi 3を使用しています。Raspberry Pi 3はPX4-LIRS UAVのメインコンピューティングユニットとして採用され、MAVROSパッケージ[26]を用いてUAVのフライトコントローラーに制御コマンドを送信し、光学カメラからのデータを受信してキャプチャフレームを処理するといういくつかの機能を有していた。ROSパッケージの*aruco*

*detect*は、カメラ画像内のArUcoマーカを検出します。検出結果はさらに、フライトコントローラーがUAVの移動方向を決定するために使用されます。Ubuntu Mate 18.04とROS Melodic[27]を使用しています。

e-

ArUcoの提案するアプローチと開発したソフトウェアを仮想環境で検証するために、ROSベースの3DダイナミックGazeboシミュレータ[28]を使用しました。PixhawkフライトコントローラとPX4ソフトウェアを用いて、Gazeboシミュレータ用にPX4-LIRS

UAVのUAVモデルを作成した（図2）。UAVモデルには下向きの単眼カメラを搭載し、UAV下部の着陸面上のArUcoマーカを検出するようにしました。また、将来的にGazeboから実機のUAVへのソフトウェアの移植を容易にするために、UAVのソフトウェアも模倣しました。Gazeboの内蔵エディタでは、プログラミングなしで3Dシーンを作成でき、すぐに使える3Dモデルのライブラリも豊富に用意されています（図3に例を示します）。標準的なツールに加え、ユーザから提案された最先端のツールやパッケージが多数存在し、迅速かつ容易にGazeboの世界を作成することができる[29]。

IV. ソリューションアーキテクチャ

A. 組み込み型ArUcoの設計

新規のe-

ArUcoマーカ（図4）は、オリジナルの（外側の）ArUcoマーカの中央に、さらに内側のマーカを持つArUcoマーカである。2つのマーカ（外側と内側）は異なるIDを持つ。提案するソリューションの主な特徴は、ドローンの着陸プロセス全体を通してマーカをロバ



図2：PX4-LIRS

UAVの実機（上）とGazeboシミュレータでのモデル（下）。



図3：Gazeboシミュレータで作成された典型的な仮想環境。ステージの中央には3DR IRIS+[30]とHector[31]のクアドローターモデルが配置されている。



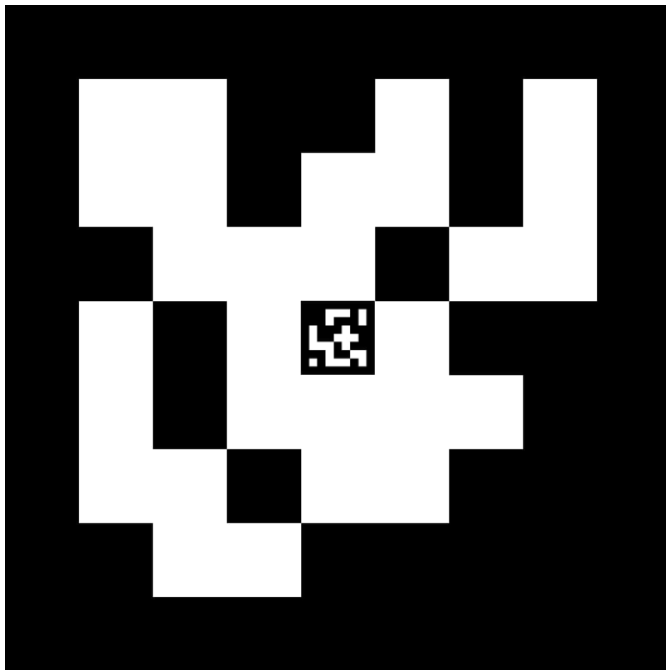


図4: 7x7サイズのArUcoマーカーをベースにしたe-ArUcoマーカーの例。インナーマーカーはアウターマーカーの中央に位置し、1つの黒いエンコードスクエアと入れ替わるように配置されている。インナーマーカー自体は、7x7サイズのArUcoマーカーである。

と、その領域の一部が枠外になることが判明しました)。この特徴により、e-

ArUcoマーカーがずっと検出できるようになり、着陸の精度が向上します。外側のArUcoマーカーのID[32]を選択する際、内側のArUcoマーカーはその中心が1つの黒い「画素」(ビルディングブロック)に置き換わることに注意する必要があります。したがって、外側のArUcoマーカーのIDは中央に黒いブロックを持つものに限定され、内側のArUcoマーカーはその黒い画素の数が白い画素の数を圧倒するように選択することが推奨される。この論文で使用された実験セットアップは、外側マーカーが45x45cm、内側マーカーが5x5cmの2つのArUcoマーカーで構成されています。表Iは内側ArUco、外側ArUco、e-ArUcoマーカーでマーカーを検出できる最小距離と最大距離を示している。e-

ArUcoマーカーは0.2mから30mの距離で検出することができ、最も優れた性能を示した。

表1:オリジナルのArUcoとe-ArUcoマーカーの最小、最大検出範囲。

名称	サイズ、cm x cm	検出距離、m	
		最小	最大
インナーArUco	5 x 5	0.2	1.3
アウターArUco	45 x 45	0.8	30
イーアルコ	45 x 45	0.2	30

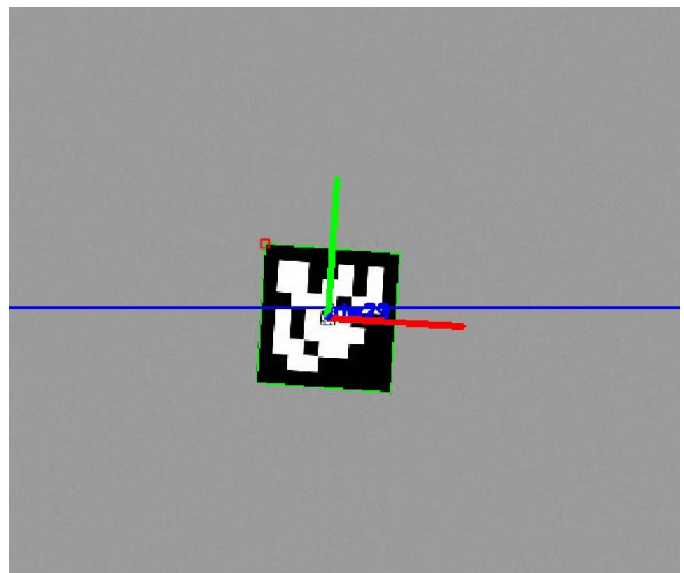
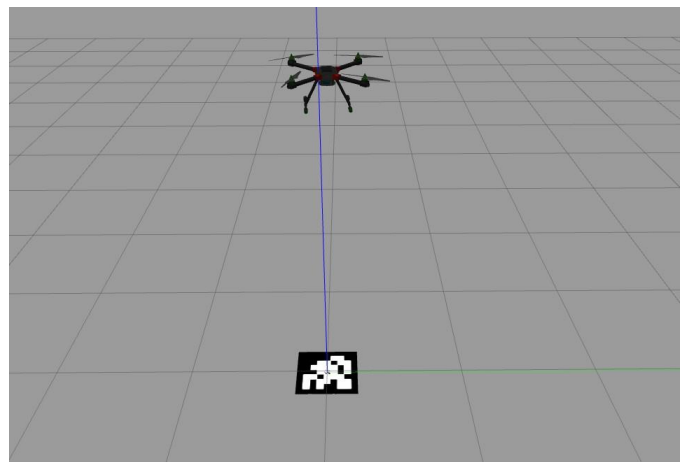


図5: 2mの高さから検出されたe-ArUcoマーカーの外周マーカー。検出は、オリジナルのArUcoマーカー検出によく使われるaruco detect ROSパッケージの非修正版で行っています。

B. 着陸の手順

カメラフレームを処理し、e-ArUcoマーカーを抽出するためにaruco detect [33] ROSパッケージが使用されています。このパッケージは画像ストリームからArUcoマーカーを見つけ、その頂点(4つの角の点)座標を公開し、マーカーに対するカメラ位置を計算します。このパッケージは異なるエンコーディングビット数(4x4から7x7まで)のディクショナリをサポートしています。E-ArUcoマーカーは7x7タイプのArUcoマーカーをベースにしており、この選択により内側マーカーを外側マーカーの中心に直接配置することができ、外側マーカーの認識には影響を与えません。

マーカーに対するカメラの相対位置を知ることで、開発した制御ソフトはUAVを正確にナビゲートし、e-ArUcoマーカーに着陸させることができます。着陸のアルゴリズムは以下のように動作します。UAVは

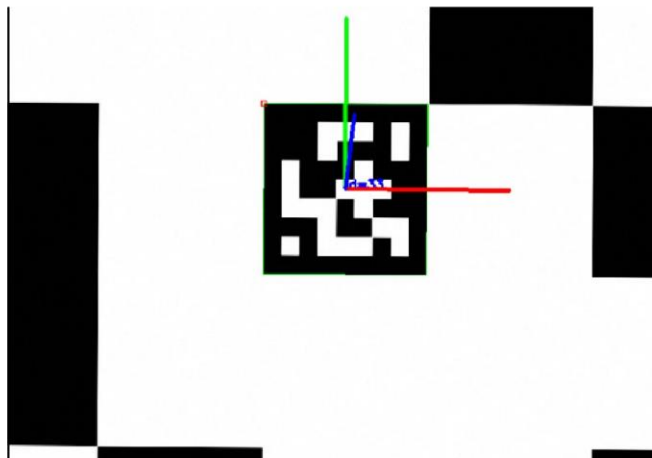
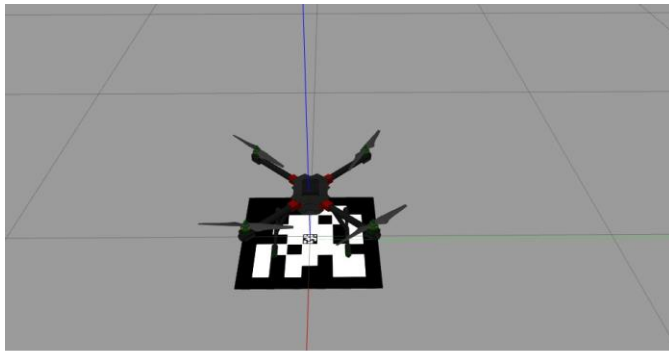


図6：着陸終盤に検出されたe-ArUcoマーカの内側マーカ。外側のマーカはフレームから外れているため、検出できなかった。

コマンドで飛行中の着陸を指示する。UAVはe-ArUcoマーカの探索を開始する。検出成功後、UAVは外側のArUcoの中心に合わせ、下降を開始する。下降中、UAVは検出したマーカがカメラフレームの中心に来るように位置を調整し続ける。マーカがカメラに近づくにつれて、検出アルゴリズムはe-ArUcoの外側マーカを検出できなくなります。そこで、内側マーカの検出に切り替え、内側マーカを頼りに正確な位置決めを継続します。そして、UAVが着陸地点の地表に接触すると、着陸プロセスが完了します。

V. 実験的検証

開発したe-ArUcoマーカシステムの有効性を評価するために、複数回の着地実験を実施した。Gazeboシミュレータで合計20回の実験が行われた。実験では、UAVを2mの高さまで離陸させ、e-ArUcoマーカへの着地コマンドを待つ(図5、図6参照)。コマンドを受信したUAVは、前述の着陸手順で着陸を行った。着陸完了後、UAVのカメラ中心とe-ArUcoマーカの中心との距離を測定した。図7はその様子を示したものである。

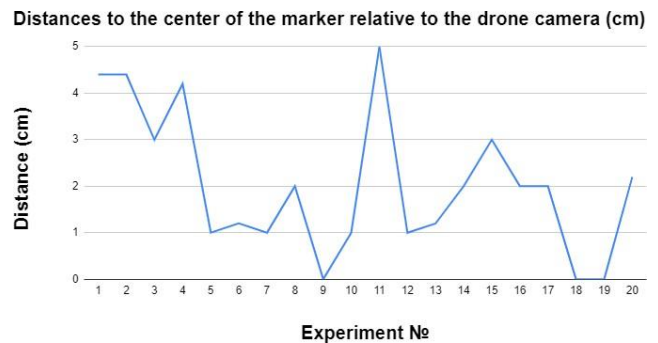


図7 e-ArUcoマーカ中心からUAVカメラ中心までの距離(cm)

は、すべての試行で距離を取得した。平均精度は2.03cm、標準偏差は1.53cm。

VI. 結論

本論文では、視覚的な感覚データを用いたUAVの精密着陸のための新しいアプローチを紹介した。新しいタイプのフィデューシャルマーカである埋め込み型ArUco (e-ArUco) は、広い距離範囲に対して頑健なマーカ検出を行うために特別に開発されたものである。E-ArUcoマーカはオリジナルのArUcoマーカのアプローチに基づいており、ArUco検出アルゴリズムのみを必要とする。開発したマーカの適用性は、仮想環境下でのUAV着陸実験により検証した。開発したマーカと着陸アルゴリズムの両方をROSフレームワーク内に実装し、Gazeboシミュレータでテストしました。仮想実験によると、平均着陸精度は2.03cm、標準偏差は1.53cmであった。

謝辞

この研究は、ロシア基礎研究財団 (RFBR) , プロジェクトID 19-58-70002の支援を受けている。第四著者は、科学技術振興機構、JST戦略的国際共同研究プログラム、プロジェクト番号18065977の支援に感謝します。

参考文献

- [1] D.Kingston, S. Rasmussen, and L. Humphrey, "Automated uav tasks for search and surveillance," in *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*.IEEE, 2016, pp.1-8.
- [2] A.Danilov, U. D. Smirnov, and M. Pashkevich, "The system of ecological monitoring of environment which is based on usage of uav," *Russian journal of ecology*, vol. 46, no. 1, pp.14-19, 2015.
- [3] S.Sankarasrinivasan, E. Balasubramanian, K. Karthik, U. Chandrasekar, and R. Gupta, "Health monitoring of civil structures with integrated uav and image processing system," *Procedia Computer Science*, vol.54, pp.508-515, 2015.
- [4] H.Shakhatreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, and M. Guizani, "Unmanned aerial vehicles (uavs):A survey on civil applications and key research challenges," *Ieee Access*, vol.7, pp.48 572-48 634, 2019.
- [5] D.Levonevskiy, I. Vatamaniuk, and A. Saveliev, "Providing availability of smart space services by means of incoming data control methods," in *International Conference on Interactive Collaborative*

Robotics. Springer, 2018, pp.170-180.

- [6] S.Emel'yanov, D. Makarov, A. I. Panov, and K. Yakovlev, "Multilayer cognitive architecture for uav control," *Cognitive Systems Research*, vol.39, pp. 58-72, 2016.
- [7] A.このような状況下において, 「移動ロボット」の「視覚的」な位置決めを行うためには, 「人工的」なマーカーを用いる必要がある. pp.1-9, 2014.
- [8] M.Irfan, S. Dalai, K. Kishore, S. Singh, and S. Akbar, "Vision-based guidance and navigation for autonomous mav in indoor environment," in *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*.IEEE, 2020年, pp.1-5。
- [9] E.ミンガチョフ、ラヴレノフ、ツォイ、松野文、スヴィニン J.Suthakorn, and E. Magid, "Comparison of ros-based monocular visual slam methods:Dso, ldso, orb-slam2 and dynaslam," in *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*.Springer, 2020, pp.222-233.
- [10] S.S. Tordal and G. Hovland, "Relative vessel motion tracking using sensor fusion, aruco markers, and mru sensors," *MODELING IDENTIFICATION AND CONTROL*, vol. 38, no. 2, pp. 79-93, 2017.
- [11] "Detection of ArUco Markers", https://docs.opencv.org/master/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html.
- [12] A.Zakiev, K. Shabalina, T. Tsoy, and E. Magid, "Pilot virtual experiments on aruco and artag systems comparison for fiducial marker rotation resistance," in *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*.Springer, 2020, pp.455-464.
- [13] S.また, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion", *Pattern Recognition*, vol.47, no.6 によれば, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion" は, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion", "Automatic "は, "Automatic "は, "Automatic "を意味する. pp.2280-2292, 2014.
- [14] P.Os'c'a'dal, D. Heczko, A. Vysocky', J. Mlotek, P. Nova'k, I. Virgala, M.Sukop, and Z. Bobovsky', "Improved pose estimation of aruco tags using a novel 3d placement strategy," *Sensors*, vol. 20, no. 17, p. 4825, 2020.
- [15] R.Safin, E. Garipova, R. Lavrenov, H. Li, M. Svinin, and E. Magid, "Hardware and Software video encoding comparison," in *2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*.IEEE, 2020, pp.924-929.
- [16] M.F. Sani and G. Karimian, "Automatic navigation and landing of an indoor ar. drone quadrotor using aruco marker and inertial sensors," in *2017 International Conference on Computer and Drone Applications (IConDA)*.IEEE, 2017, pp.102-107.
- [17] I.Lebedev, A. Erashov, and A. Shabanova, "Accurate autonomous uav landing using vision-based detection of aruco-marker," *INTERNATIONAL CONFERENCE ON Interactive Collaborative Robotics*.Springer, 2020, pp.179-188.
- [18] A.Sagitov, K. Shabalina, L. Sabirova, H. Li, and E. Magid, "Artag, apriltag and caltag fiducial marker systems:Comparison in a presence of partial marker occlusion and rotation." in *ICINCO (2)* 、2017、pp.182-191.
- [19] J.Wubben, F. Fabra, C. T. Calafate, T. Krzeszowski, J. M. Marquez-Barja, J.-C. Cano, and P. Manzoni, "Accurate landing of unmanned aerial vehicles using ground pattern recognition" *Electronics*, vol. 8, no.12, pp.Cano, and P. Manzoni, "Accurate landing of unmanned aerial vehicles using ground pattern recognition," *Electronics*, vol. 8, no.12, p.1532, 2019.
- [20] F.Fabra, C. T. Calafate, J. C. Cano, and P. Manzoni, "Ardusim: Accurate and real-time multicopter simulation," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol.87, pp.170-190, 2018.
- [21] C.Pan, T. Hu, and L. Shen, "Brisk based target localization for fixed-wing uav's vision-based autonomous landing," in *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*.IEEE, 2015, pp.2499-2503.
- [22] J.S. Wynn and T. W. McLain, "Visual servoing for multirotor precision landing in daylight and after-dark conditions," in *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*.IEEE, 2019, pp.1242-1248.
- [23] L.Meier, P. Tanskanen, L. Heng, G. H. Lee, F. Fraundorfer, and M.Pollefeys, "Pixhawk:また, "A micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision", *Autonomous Robots*, vol. 33, no. 1-2, pp.21-39, 2012.
- [24] L.Meier, D. Honegger, and M. Pollefeys, "Px4:A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms," in *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*.IEEE, 2015, pp.6235-6240.
- [25] R.Mittler, "Ros are good," *Trends in plant science*, vol.22, no.1, pp.11-

- [26] "MAVROS" (マブロス) <https://github.com/mavlink/mavros>.
- [27] R.ピーターセン、*Ubuntu Desktop。アプリケーションと管理*。サーフィントータル・プレス, 2019. 19.04
- [28] N.
- [29] B.アッピーアソフ、ラブレノフ、ザキエフ、ヤコブレフ、スヴィニン、そして
E.Magid, "Automatic tool for gazebo world construction: from a grayscale image to a 3d solid model," in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.IEEE, 2020, pp.7226-7232.
- [30] W.Z. Fum, "Implementation of simulink controller design on iris+quadrotor," Naval Postgraduate School Monterey United States, Tech.Rep., 2015年。
- [31] 「ヘクター クワッドローター パッケージ 概要," http://wiki.ros.org/hector_quadrotor.
- [32] A.Sagitov, K. Shabalina, R. Lavrenov, and E. Magid, "Comparing fiducial marker systems in presence of occlusion," in *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*.IEEE, 2017, pp.377-382.
- [33] "aruco detect ROS package," http://wiki.ros.org/aruco_detect.