

小型クアッドコプターの低品質映像に適した SLAM の比較検討

石見 和也 山崎 俊彦 相澤 清晴
 東京大学

1 はじめに

自己位置を推定し正確に飛行することは小型クアッドコプターの基礎技術として不可欠である。100 g 以下の小型クアッドコプターでは、そのペイロードの制限からレーザーレンジファインダーや RGB-D カメラを搭載することが出来ないため、小型の RGB カメラの映像による自己位置推定に注目する。本研究では、Phenox [1] (Fig. 1) という小型クアッドコプターを用いて、映像の品質が十分に確保できない小型クアッドコプターを外部制御で飛行させるための SLAM (自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術) を比較検討する。適切な SLAM を用いることで RMSE 8.0 cm (x 軸), 3.1 cm (y 軸) のホバリングを実現できることが分かった。

2 関連研究

近年の SLAM は、自己位置推定をするために対応する特徴点を用いるものと、画像の全画素の再投影誤差最小化を用いるものに大別される。前者はその特性から、動的な環境や視点の大きな移動に対して頑健である一方、特徴点の取得しづらい平坦な環境やモーションブラーに弱いとされており、後者はその長所と短所を入れ替えた特性を持つ。今回はコードが公開されている SLAM の内、両者の中から有名で精度が良く最新の物を一つずつ比較対象に含めた。(前者: ORB-SLAM [2], 後者: LSD-SLAM [3]) また、近年の小型クアッドコプターの研究で主に使用されている特徴点ベースの SLAM である PTAM [4] も比較対象に含めた。

3 実験

小型のクアッドコプターには Phenox を利用した。54 g の機体には解像度が QVGA の 2 つのカメラ (正面と下面)



Fig. 1: 使用したクアッドコプターの外観

や IMU (加速度センサ, ジャイロセンサ, コンパスセンサ) が搭載されている。映像は Phenox 上で圧縮して配信され、外部の PC で処理された後、操作コマンドが再度 Phenox に送信される。映像の圧縮方式は重要なパラメータであるが、今回は問題の簡略化のため、既存のシステムで提供されていた Motion JPEG で圧縮された QVGA の映像を取り扱うことにする。外部 PC には Intel Core i7-3630QM (4core 2.4 GHz) と 16 GB のメモリを積んだ PC を用いた。開発プラットフォームとしては ROS を採用した。

3.1 実験 1: 各 SLAM の精度比較

VGA, 30 fps, 非圧縮の元映像から、解像度を QVGA, QQVGA と変化させ、3 種類の SLAM (PTAM・ORB-SLAM・LSD-SLAM) の出力の精度を比較した。LSD-SLAM は VGA の映像に最適化してあるため、他の解像度の映像は VGA に拡大した後入力した。元の入力映像には TUM RGB-D benchmark [5] の fr2/desk の前半約 6m (Loop を含まない映像にするため) を用いた。参考のため fr2/desk に対して ORB-SLAM を適応して得られた特徴点と経路を Fig. 2 に示す。また、結果を Table 1 に示す。本実験では毎回途中でトラッキングに失敗する条件と、常に成功する条件に二分した。

PTAM は、FAST 特徴点周囲のパッチに対して輝度差の 2 乗和でマッチングを行っているため、今回用いた映像では、カメラが大きく動く際にトラッキングに失敗した。ORB-SLAM では ORB 特徴量と呼ばれる回転普遍性を持つバイナリ特徴量を扱う等の改良がなされたことで、精度やトラッキング復帰率の向上に成功しており、今回の実験

Table 1: 解像度の変化に対する SLAM の RMSE (cm)^{*1}

	VGA	QVGA	QQVGA
PTAM	-	-	-
ORB-SLAM	6.82 ± 0.86	7.46 ± 1.90	-
LSD-SLAM	3.09 ± 1.03	-	-

Table 2: QVGA 映像において圧縮品質とフレームレートが変化した際の ORB-SLAM の RMSE (cm)^{*1}

	Motion JPEG の Quality		
	100	50	30
30 fps	(7.46 ± 1.90)	(8.59 ± 1.93)	9.31 ± 2.30
20 fps	(8.54 ± 1.51)	6.60 ± 1.54	8.15 ± 1.83
10 fps	7.65 ± 1.54	8.14 ± 1.10	9.48 ± 1.29
5 fps	8.35 ± 1.18	7.28 ± 1.06	11.1 ± 3.06

では QVGA 映像以外のトラッキングに成功した。LSD-SLAM は分散で正規化した全画素の再投影誤差を最小化する姿勢を求める等の手法により、トラッキングに成功している際の精度は最も高い値となっている。しかし、QVGA 以下の解像度ではトラッキングに失敗した。

これらの結果から Phenox で用いられる QVGA の映像に対応しうるものは ORB-SLAM のみと判断した。そこで、QVGA 映像の Motion JPEG の Quality とフレームレートを変化させ ORB-SLAM での精度を比較した。結果を Table 2 に示す。今回は通信遅延が制御に影響しない条件として、伝送速度が 5.0 Mbps 未満となるよう制約を付け、Table 2 中の 5.0 Mbps 以上になる条件の値は括弧で囲った。本実験では常にトラッキングに成功した。

上記の結果より、飛行時の RMSE 平均が 10.0cm 以下の条件の中から最もフレームレートの高い、30 fps、Motion JPEG 圧縮 (Quality:30) の QVGA 映像を用い、ORB-SLAM で飛行させることとした。

3.2 実験 2:ORB-SLAM を用いた際のホバリング精度

ORB-SLAM を利用した場合の飛行精度をモーションキャプチャームで測定した。制御には PID 制御を用いている。ホバリングは 30 秒間 1 点に留まるよう飛行させた。今回の実験では z 軸方向 (上下) の飛行に Phenox 内蔵の制御を用いている。飛行時の xy 平面上の軌道を Fig. 3 に示す。RMSE は ORB-SLAM 使用時が 8.0 cm (x 軸)、3.1

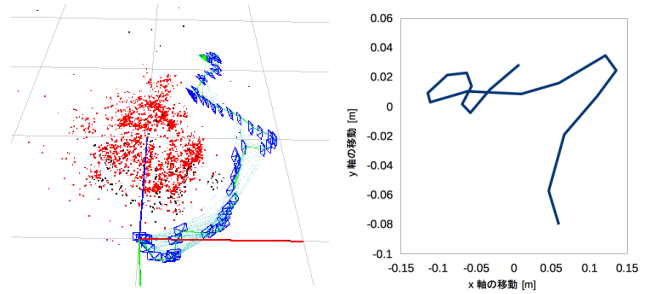


Fig. 2: データセットの特徴 Fig. 3: ORB-SLAM 使用時点 (赤) と経路 (青) の軌道

cm (y 軸) であった。

4 結論

比較対象とした PTAM, ORB-SLAM, LSD-SLAM の中で、ORB-SLAM が最も解像度の低下にロバストであることが判明した。QVGA での飛行に対応できる ORB-SLAM に注目し、SLAM の精度を維持しつつも低伝送レートで通信可能な圧縮品質とフレームレートを求めた。そしてそれらの値を用いることで、小型クアッドコプターを RMSE 8.0 cm (x 軸)、3.1 cm (y 軸) の精度でホバリングさせることが可能であることが分かった。今後は SLAM と IMU の情報を拡張カルマンフィルタで統合することで、更に高精度な飛行が実現可能と考えられる。

5 謝辞

本研究にあたり、ハード面で協力して頂いた Phenox Lab の此村領さんに感謝致します。

参考文献

- [1] <http://phenoxlab.com/>.
- [2] R. Mur-Artal, et al. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, Feb 2015.
- [3] J. Engel, et al. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. *ECCV*, 2014.
- [4] G. Klein and D. Murray. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2007.
- [5] <http://vision.in.tum.de/data/datasets/rgbd-dataset>.

^{*1} 数値は 10 回の試行の平均と標準偏差である
- は途中でトラッキングに失敗したことを表す