小型無人航空機を利用した人流動の可視化に関する研究

A research to visualize the flow of moving objects using a small UAV

木村 元紀*1 Motoki Kimura 柴崎 亮介*² Ryosuke Shibasaki

*1東京大学大学院新領域創成科学研究科 Graduate School of Frontier Science, University of Tokyo *²東京大学空間情報科学研究センター Center for Spatial Information Science, University of Tokyo

長井 正彦*2

Masahiko Nagai

We are trying to develop a system to visualize the flow of moving objects on the ground using a flying platform equipped with a camera.Especially in this paper, we propose a method to detect moving points on the images acquired by UAVs.We use multi-view geometric constraints to classify a pixel as static or dynamic.The first constraint we use is the epipolar constraint which requires static points on the images to lie on the corresponding epipolar lines in subsequent images.The second constrant is the flow-vector constrant which restricts the motion of static points along the epipolar lines.The camera motion required for the use of these constraints is estimated by a monocular SLAM.To account for the error in estimation of camera motion, a probabilistic model is used.The algorithms was tested with a small quadrotor platform in a real environment.

1. 研究の背景と目的

近年,電子機器の小型化,高性能化に伴い,オートパイロッ ト機能を備えた小型の無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle)が市場に出回るようになった.これらの UAV は,空 撮のための安価かつ手軽なプラットフォームとして利用され, 上空からの広範囲にわたる情報収集を可能としている.本研究 では,低高度を飛行する小型の UAV に搭載した単眼のカメラ によって地表を撮影し,人や自動車などの移動体の流動を可視 化することを試みる.空中を移動しながら撮影を行うことに よって,より広い範囲を選択的に観測することが可能となり, イベント会場などにおける雑踏の流動の把握および異常行動 の監視や,災害時における避難経路の最適化などへの応用が期 待できる.特に本稿では,UAV によって撮影された画像から, 環境中を移動している点を検出する手法を提案する.

移動体検出に関する既存手法の多くは,移動体によって画 面内に現れる変化を識別することにより,移動体を検出してい る.しかしながら,これらの手法の大部分は,監視カメラなど 環境に固定されたカメラを対象としており,カメラ自身が動く 場合には移動体を画像から正しく検出することができない.特 に,UAV は地上を走るロボットなどに比べて位置・姿勢の自 由度が高く,また突風などの環境外乱によって姿勢が大きく変 化することもある.そのため,カメラの視野内に移動体が存在 しない場合にも,画面内に大きな変化が現れることがありう る.このようなUAV 自身の動きに起因する画面の変化が,画 像から移動体を検出することを難しくしている.

2. 既存研究と提案手法の比較

2.1 既存研究

Jung らは、動的環境下におけるロボットナビゲーションを 目的として、ロボットによって撮影された画像列から移動体を 認識・追跡する手法を提案した [Jung 04]. Jung らの手法で は、カメラの動きに起因する、各画素の画面内での移動をバ イリニア変換によってモデル化する.モデルの各パラメーター

連絡先:木村元紀,東京大学大学院新領域創成科学研究科,社会 文化環境学専攻,修士課程1年,motoki@iis.u-tokyo.ac.jp は、画像間で追跡した特徴点を利用して推定される. その後, バイリニア変換によって補償された画像間の背景差分を観測量 としたパーティクルフィルターを適用することにより,移動体 の存在領域を識別する. Jung らの手法は, 無人の小型ヘリコ プターで実験がなされ, 8割以上という高い割合で移動体(人) を認識・追跡できているが, 同時に複数の移動体を追跡する場 合,処理に時間がかかるという欠点がある.

Rodrguez らの研究では、防犯用途での利用を目的とし て、UAV による移動体の認識・追跡手法を提案している [Rodrguez 12]. この手法では、PTAM[Klein 07] によって推 定されたカメラの外部パラメーターと、画像から抽出された特 徴点を利用することによって、疑似的なオプティカルフローを 作成する.この疑似的なオプティカルフローと、特徴点追跡に よって得られた実際のオプティカルフローと、特徴点追跡に よって得られた実際のオプティカルフローを比較することによ り、移動体を検出する.この手法の最大の利点は計算効率の高 さである.本手法は、回転翼型の小型 UAV 搭載のコンピュー ターで実験がなされ、視野内に存在する人を3人までリアル タイムに認識・追跡できている.しかし、疑似的なオプティカ ルフローの計算時に、地表面を完全な平面と仮定したホモグラ フィーを利用するため、建物などによって急激な高低差が現れ るような場面には適用できないという問題がある.

2.2 提案手法

先に述べた Jung らの提案手法と, Rodrguez らの提案手法 では, 観測された画面の変化から, UAV 自身の動きの効果に よる画面の変化を分離することによって,移動体の存在を検出 するという点では似通っている.すなわち,これらの2つの 手法は,UAV 自身の動きによってもたらされる画面の変化を いかにして分離するかに重きを置いており,UAV 自身の"動 き"を,移動体検出における不利な点としてとらえている.

これに対して本研究では、UAV 自身の"動き"を生かした、 移動体の検出方法を提案する.提案手法では、移動しながら 撮影した2枚の画像における幾何的な拘束条件を考慮するこ とによって、環境中を移動している点(移動点)を検出する. UAV のような飛行型プラットフォームから撮影した多視点の 画像に対して、幾何的な拘束条件を利用した移動体検出の手法 を適用するのは初めての試みであり、これは本研究の寄与の一 つである. 幾何的な拘束条件を利用するためには,画像を撮影した2地 点におけるカメラの外部パラメーターが必要である.節3.で は,外部パラメーターの算出手法について述べる.

3. 外部パラメーターの算出

節 4. で説明するが、幾何を利用した移動体検出には、時刻 (k-d) におけるカメラ座標系 { C_{k-d} } と時刻 k におけるカ メラ座標系 { C_k } とを関係づけるカメラの外部パラメーター $t_{k-d:k}$ および $R_{k-d:k}$ が必要となる. $t_{k-d:k}$ は、座標系 { C_k } で測った座標系 { C_{k-d} } の原点の位置である. $R_{k-d:k}$ は、座 標系 { C_{k-d} } に対する座標系 { C_k } の方向余弦行列である.

ここで、外部パラメーター行列 $M_{k-d:k}$ を式 (1) のように 定義する.

$$\boldsymbol{M}_{k-d:k} = [\boldsymbol{R}_{k-d:k} | \boldsymbol{t}_{k-d:k}] \tag{1}$$

本研究では、Klein らによって開発された PTAM (Parallel Trackign And Mapping)[Klein 07] によって外部パラメーター を算出する.PTAM は、キーフレームベースの monocular SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 手法の 1 つであり、もともとはマーカーレス AR (拡張現実) への利用 を目的として開発された.しかし、その頑強さと位置推定精度 の高さから、飛行ロボットのナビゲーションへの応用も複数報 告されている [Weiss 11], [Weiss 12], [Engel 12].また、計算 リソースが十分であれば、EKF SLAM に代表されるフィルタ リングベースの monocular SLAM に比べて、位置推定の精度 が高いという研究結果が報告されている [Strasdat 10].

時刻kに撮影した画像を PTAM に入力すると,基準座標系 $\{W\}$ から測った,カメラ座標系 $\{C_k\}$ の位置・姿勢が出力される.

$$\boldsymbol{z}_{k} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{k} \\ \boldsymbol{q}_{k} \end{bmatrix}$$
(2)

なお,本稿においては,rは位置を表し,qはクォータニオン を表すものとする.

PTAM から出力された観測値を用いると,外部パラメーター は式 (3),式 (4) のように計算できる.

$$\boldsymbol{t}_{k-d:k} = -\boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}_k) \times (\boldsymbol{r}_k - \boldsymbol{r}_{k-d})$$
(3)

$$\boldsymbol{R}_{k-d:k} = \boldsymbol{R} \left(\boldsymbol{q}_{k-d}^* \otimes \boldsymbol{q}_k \right) \tag{4}$$

なお, R(q)はクォータニオン qによって定義される方向余弦 行列であり, q^* は, qの共役クォータニオンである.また, 記 号 \otimes は, クォータニオン積を表す.

4. 移動点の検出手法

本節では、時刻 (k-d),時刻 k に撮影された画像 I_{k-d} , I_k から、幾何的な拘束条件を利用して移動点を検出する方法について、その詳細を述べる.

4.1 特徵点追跡

画像 I_{k-d} から特徴点を抽出し,画像 I_k において現れる同一の特徴点を追跡する.本研究では,KLTトラッカー [Lucas 81] による特徴点の抽出およびその追跡を行った.

以降では、これらの特徴点のそれぞれに関して適用される2 つの幾何学的な拘束条件について述べたあと、これら2つの 拘束条件を利用した、移動点検出のための確率モデルを構築 する.

4.2 エピポーラ拘束

環境に固定されたある同一の点 p^i を,2つの視点から見る とき,各視点の画面上における点の位置座標に,ある種の対応 関係が存在する.この対応関係は2つの視点の幾何学的な関 係によって現れ,エピポーラ幾何と呼ばれる [奥富 04].

画像 I_k の画像平面上において, 点 p^i に対応する特徴点の位置座標の同次座標表現を, p_k と表記する. 同様に, 画像 I_{k-d} 上の対応する点の位置を, p_{k-d} と表記する. このとき, エピポーラ幾何により, p_k , p_{k-d} に関して式 (5) のような拘束条件が付与される.

$$\boldsymbol{p}_k^T \boldsymbol{l}_k = 0 \tag{5}$$

ただし、 l_k は、画像 I_k 平面上において定義されるエピポーラ 線であり、画像 I_k に対する画像 I_{k-d} との基礎行列 $F_{k-d:k}$ と、 カメラの内部パラメーター行列 Kによって計算できる.

$$\boldsymbol{l}_k = \boldsymbol{F}_{k-d:k} \boldsymbol{p}_{k-d} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{F}_{k-d:k} = \boldsymbol{K}^{-T} \boldsymbol{E}_{k-d:k} \boldsymbol{K}^{-1}$$
(7)

なお, $E_{k-d:k}$ は基本行列であり,節3. で定義されたカメラの並進量 $t_{k-d:k}$ および方向余弦行列 $R_{k-d:k}$ によって計算できる.

$$\boldsymbol{E}_{k-d:k} = [\boldsymbol{t}_{k-d:k}]_{\times} \boldsymbol{R}_{k-d:k}$$
(8)

式 (5) の左辺は、画像 I_k 平面上におけるエピポーラ線 l_k と 特徴点 p_k との距離を表している.つまり、式 (5) は、特徴点 が環境中に固定された点から抽出されたものであれば、その 特徴点は必ずエピポーラ線の上に存在するということを示し ている.それに対して、移動体から検出された特徴点は、エピ ポーラ線の上に存在するとは限らない.したがって、画像 I_k 、 I_{k-d} の各画像平面上における特徴点と、対応するエピポーラ 線との距離 h_k , h_{k-d} は、移動点検出の1つの基準として利用 することができる.

$$h_k = \boldsymbol{p}_k^T \boldsymbol{l}_k \tag{9}$$

$$h_{k-d} = \boldsymbol{p}_{k-d}^T \boldsymbol{l}_{k-d} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{l}_{k-d} = \boldsymbol{F}_{k-d:k}^T \boldsymbol{p}_k \tag{11}$$

4.3 特徴点の移動量に関する拘束

エピポーラ幾何を利用した移動点の抽出は、UAV と移動点 が、環境中を同じ方向に動いている場合には利用することが できない.このような場合、画像上に投影された移動体の動き は、エピポーラ線に沿ったものとなるからである.また、UAV が並進していない場合にはエピポーラ線が定義できないため、 この場合もエピポーラ幾何を利用することができない.このよ うな状況下においても移動体を正しく検出するために、特徴点 の移動量に関する拘束条件を導入する.

座標系 { C_{k-d} } で測った,環境中に固定された点 p^i の位置 座標を X とおく.また,点 p^i までの深度を z とおく.この とき,画像 I_{k-d} および画像 I_k の画像平面上において,点 p^i に対応する特徴点の位置座標を同次座標表現で記述すると,式 (12),式 (13) のようになる [奥富 04].

$$z\boldsymbol{p}_{k-d} = \boldsymbol{K}[\boldsymbol{I}|\boldsymbol{0}]\boldsymbol{X}$$
(12)

$$z\boldsymbol{p}_{k} = \boldsymbol{K} \left[\boldsymbol{R}_{k-d:k} | \boldsymbol{t}_{k-d:k} \right] \boldsymbol{X}$$
(13)

なお,時刻 (*k* − *d*), *k* 間において,深度 *z* は一定であるとの 仮定をおいた.式 (12),式 (13) より, *X* を消去する.

$$\boldsymbol{p}_{k} - \boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{k-d:k}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{p}_{k-d} = \frac{1}{z}\boldsymbol{K}\boldsymbol{t}_{k-d:k}$$
(14)

式 (14) の左辺は、カメラの回転の効果を補正した、特徴点の エピポーラ線に沿った移動量を表す.この量を以降ではフロー ベクターと呼ぶ.

ここで,深度 z がとりうる最小値 z_{min} と最大値 z_{max} を設 定することにより,フローベクターの絶対値に関する拘束条件 を得る.

$$d_{min} < d_{k-d:k} < d_{max} \tag{15}$$

ただし,

$$d_{k-d:k} = \left| \boldsymbol{p}_k - \boldsymbol{K} \boldsymbol{R}_{k-d:k} \boldsymbol{K}^{-1} \boldsymbol{p}_{k-d} \right|$$
(16)

$$d_{min} = \frac{1}{z_{max}} |\mathbf{K} \mathbf{t}_{k-d:k}| \tag{17}$$

$$d_{max} = \frac{1}{z_{min}} |\mathbf{K} \mathbf{t}_{k-d:k}| \tag{18}$$

以上より,環境中に固定された点から抽出された特徴点は,フローベクターの絶対値に関する拘束条件である式 (15) を満たす.よって,フローベクター絶対値 $d_{k-d:k}$ と,その最大値 d_{max} との差,および最小値 d_{min} との差を,移動点検出のもう一つの基準とすることができる.

4.4 移動点検出ための確率モデル

節3. で述べたとおり,移動点検出に必要な外部パラメーター 行列 $M_{k-d:k}$ は,PTAM によって出力された観測値から計算 されるが,観測値には計測誤差が存在する.このような計測誤 差の影響を考慮しない場合,外部パラメーターの誤差により, 動体検出の精度が低下する恐れがある.本研究では,点 p^i が 環境中に固定された点である確率を,与えられた観測値に対す る条件付き確率 $P(p^i = static|z_{k-d}, z_k)$ として定義すること により,このような問題に対処する.この条件付き確率を計算 可能とするため,以下のような変形を行う.

$$P\left(p^{i} = static | \boldsymbol{z}_{k-d}, \boldsymbol{z}_{k}\right)$$
$$= \sum_{\boldsymbol{M}_{k-d:k}} P\left(p^{i} = static | \boldsymbol{M}_{k-d:k}\right) P\left(\boldsymbol{M}_{k-d:k} | \boldsymbol{z}_{k-d}, \boldsymbol{z}_{k}\right)$$
(19)

条件付き確率 $P(M_{k-d:k}|z_{k-d}, z_k)$ は,計測モデルから計 算することができる.なお,本研究では PTAM の出力を使用 しているが, IMU やその他のセンサの出力から外部パラメー ターを求めることも可能である.

条件付き確率 $P(p^i = static | M_{k-d:k})$ は、エピポーラ幾何 による拘束条件および、フローベクターに関する拘束条件に よってモデル化する.

$$P\left(p^{i} = static | \boldsymbol{M}_{k-d:k}\right) = f_{EP} \times f_{FV}$$
(20)

ここで、 f_{EP} はエピポーラ拘束を条件付き確率に反映する関数であり、 f_{FV} はフローベクターに関する拘束を条件付き確率に反映する関数である。幾何的な条件から条件付き確率を モデル化する類似の試みは、Kundu らによってなされている [Kundu 09]. Kundu らによって考案されたモデルを参考にし て、関数 f_{EP} および関数 f_{FV} を、以下のように定義する。

$$f_{EP} = e^{-\alpha \left(h_{k-d} + h_k\right)} \tag{21}$$

$$f_{FV} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{k-d:k} - d_{mean}}{d_{range}}\right)^{2\beta}}$$
(22)

ただし,

$$d_{mean} = \frac{d_{min} + d_{max}}{2} \tag{23}$$

$$d_{range} = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} \tag{24}$$

なお, α , β はスムージングファクターである.

条件付き確率 $P(p^i = static | \mathbf{z}_{k-d}, \mathbf{z}_k)$ が, あらかじめ定め た閾値を下回った点 p^i を,環境中を移動している点として識 別する.

5. 実験

提案手法の性能評価実験を行った.プラットフォームとして は、重量 450 グラムほどの小型クアッドローター型 UAV を使 用した.UAV の外観を図 1 に示す. この UAV を地表から 8 メートルほどの高さで飛行させ,搭載した小型カメラにより, 複数の歩行者が存在する交差点を斜め上から撮影した.



図 1: 実験に用いたプラットフォーム (AR.Drone 2.0)

実験の結果を図2に示した.図2の一番目の画像には,抽 出された特徴点が赤色の点で示されている.二番目の画像に は,一番目の画像に続いて撮影された画像が示されている.一 番目の画像と同じく,抽出された特徴点は赤色の点で示されて おり,KLTトラッカーによる特徴点追跡の結果が緑色の直線 で表されている.三番目の画像には,各特徴点に対応するエピ ポーラ線が白色の直線で描画されている.また,青色の直線は 特徴点からエピポーラ線に降ろした垂線である.この青色の 直線に着目すると,移動体領域から抽出された特徴点はエピ ポーラ拘束にしたがっていないことがよくわかる.四番目の画 像では,提案手法によって移動点と認識された特徴点だけが赤 色の点で表されている.一番目の画像と四番目の画像を比較す ると,提案手法により,移動体領域から抽出された特徴点だけ を,移動点として正しく識別できていることがわかる.

6. まとめと今後の課題

本稿では、多視点画像に関する幾何学的な拘束条件を利用 した移動点検出の手法を提案した.多視点の画像を利用する 提案手法は、空間を容易に動き回ることができるという UAV の特性をいかした、UAV と非常に相性の良い手法であると考 えている.また、小型クアッドローターを実環境で飛行させ、 提案手法の性能評価実験を行った.複数の歩行者が存在する実 環境下での実験では、抽出された特徴点から移動点だけを正し く識別することができ、提案手法の有用性が示された. 本研究の最終的な目標は,識別したそれぞれの移動体に関 して UAV に対する相対位置を算出し,移動体の流動を可視化 することである.そのための課題として,移動点のクラスタリ ング手法や,移動体のトラッキング手法,立体視などによる移 動体の3次元位置の推定手法の開発が挙げられる.



図 2:1番目:抽出された特徴点(赤),2番目:続く画像において抽出された特徴点(赤)および特徴点追跡の結果(緑), 3番目:各特徴点に対応するエピポーラ線(白)および特徴点からエピポーラ線に下ろした垂線(青),4番目:移動点として検出された特徴点(赤)

謝辞

本研究の遂行にあたって,GESTISSの教育プログラムの一 環である G-SPASE の援助を頂きました.ここに深く感謝の 意を表します.

参考文献

- [Jung 04] Jung, B. and Sukhatme, G. S.: Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment, The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems, pp. 980-987, (2004)
- [Rodrguez 12] Rodrguez-Canosa, G. R., Thomas, S., del Cerro, J., Barrientos, A., and MacDonald, B.: A realtime method to Detect and Track Moving Objects (DATMO) from Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) using a single camera, Remote Sensing, Vol. 4, No. 4, pp. 1090-1111, (2012)
- [Klein 07] Klein, G., Murray, D.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, Proceedings of 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007), pp. 225-234, (2007)
- [Weiss 11] Weiss, S., Scaramuzza, D., and Siegwart, R.: Monocular-SLAM-based navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments, Journal of Field Robotics, Vol. 28, No. 6, pp. 854-874, (2011)
- [Weiss 12] Weiss, S., Achtelik, M., Lynen, S., Chli, M., and Siegwart, R.: Real-time Onboard Visual-Inertial State Estimation and Self-Calibration of MAVs in Unknown Environments, Robotics and Automation (ICRA 2012), IEEE International Conference on, pp. 957-964, (2012)
- [Engel 12] Engel, J., Sturm, J., and Cremers, D.: Camerabased navigation of a low-cost quadrocopter, Intelligent Robots and Systems (IROS 2012), IEEE/RSJ International Conference on, pp. 2815-2821, (2012)
- [Strasdat 10] Strasdat, H., Montiel, J. M. M., and Davison, A. J.: Real-time monocular slam: Why filter?, Robotics and Automation (ICRA 2010), IEEE International Conference on, pp. 2657-2664, (2010)
- [Lucas 81] Lucas, D. B. and Kanade. T.: An iterative image registration technique with an application to stereo vision, In Proceedings of the 7th International Joint Conference on Articial Intelligence, pp. 674-697, (1981)
- [奥富 04] 奥富正敏, 清水雅夫: ディジタル画像処理, 財団法人 画像情報教育振興協会 (CG-ARTS 協会), (2004)
- [Kundu 09] Kundu, A., Krishna, K., and Sivaswamy, J.: Moving object detection by multi-view geometric techniques from a single camera mounted robot, In Intelligent Robots and Systems(IROS 2009), IEEE/RSJ International Conference on, pp. 4306-4312, (2009)