

## 照明とイメージセンサを用いたドローンの 3 次元自己位置推定手法の検討 3D self-position estimation for drone using illumination and image sensors

井下 竜之介<sup>†</sup>      大柴 小枝子<sup>†</sup>  
Ryunosuke Inoshita      Saeko Oshiba

### 1. はじめに

近年、不審者発見や犯人追跡といった防犯の手段の一つとしてドローンカメラに注目が集まっている。従来では、固定された防犯カメラを用いた映像解析による防犯が広く取り入れられてきた。しかし、防犯カメラには遠くのもの鮮明に映らない、死角が存在するなどの欠点がある。一方、ドローンは自由に移動することが可能であるため、遠くものを撮影することや防犯カメラの死角を撮影することができる。

ドローンの自律飛行として、ウェイポイントと呼ばれる目標位置をあらかじめ所望の飛行ルート上に指定し、ドローンに搭載された GPS(Global Positioning System)から取得した自己位置情報に基づいて、次々とウェイポイントを通していくウェイポイント飛行が広く用いられている[1]。しかし、建物内や地下などの屋内では電波が遮断されてしまい、正確な位置推定が行えない。

建築物による遮蔽で GPS の信号が十分に取得できない屋内では、単眼カメラやステレオカメラ、RGB 画像と深度 (Depth) 画像同時に取得可能な RGB-D カメラなどで得られた画像中の特徴点をベースとした SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)を用いた自己位置推定が主流となっている[2]。しかし、小型ドローンの場合には、オンボードの組み込みコンピュータによる限られた計算パワーで、十分に高速かつ信頼性の高い結果を得ることは、いまだチャレンジングな課題である。

そこで我々は、GPS に代わる位置情報取得として、急速に普及している LED(Light Emitting Diode)照明に着目し、LED 照明からの光 ID とイメージセンサを用いた屋内での位置推定手法を検討する。LED 照明を基準点とし受信機にイメージセンサを用いることで、2 つの基準点だけで位置推定を行うことが可能になることを示す。さらに、2 つの基準点だけで 3 次元の位置推定の高精度化ができることを明らかにし、誤差 10 cm 程度の位置推定が可能となることを実験の結果より示す。

### 2. 位置推定における従来手法

従来の屋内位置推定では、無線 LAN(Local Area Network)、無線 PAN(Personal Area Network)、IMES (Indoor MESSaging System)、超音波、照明とフォトダイオード(Photodiode : PD)を用いた可視光を用いる測位手法が挙げられる。これらを用いた位置推定の大まかな特徴の比較を表 2.1 で示す。

まず、精度の点では、超音波と可視光で誤差数十 cm 前後の高い精度が得られるが、超音波を用いた位置推定では

既存のインフラとの互換性が無く、新しく設置しなければならないためコストが高くなる[3]。可視光を用いた位置推定では、屋内であれば照明を送信機として用いることができるため既存のインフラとの互換性は良いが、カバレッジが狭いため位置推定ができる範囲が制限される。次に既存のインフラとの互換性の点では、Wi-Fi (Wireless Fidelity)を送信機とする無線 LAN と照明を送信機とする可視光が優れているが、無線 LAN では精度が数 m ~ 数十 m となっている[4]。Wi-Fi とは、米国 Wi-Fi Alliance の登録商標であり、国際標準規格である IEEE 802.11 規格を使用したデバイス間の相互接続が認められたことを示す名称のことである[5]。また、ビーコンの最小数の点で比較すると、IMES を除き 3 つ必要となっている。さらに認識距離では、無線 LAN と無線 PAN が数十 m であり、広い範囲で位置推定が行える[6]。省電力性においては、BLE(Bluetooth Low Energy)を送信機とする無線 PAN と LED 照明を送信機とする可視光が優れている。IMES は宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) によって開発されたシステムであり、送信機からそれ自身の位置情報を送信し、受信機で受信された位置情報を受信点位置とみなす手法である。すなわち、受信機が送信機に近いほど位置精度は高く、離れるほど劣化するので、ビーコンの数によって精度が決まる[7]。

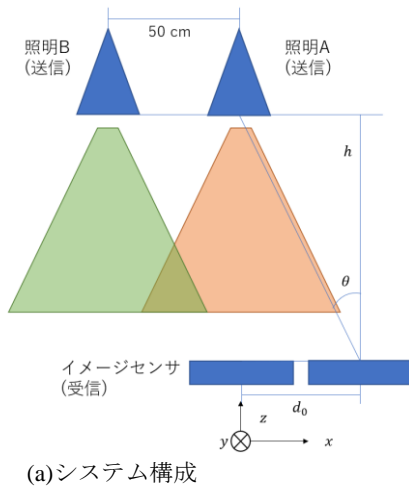
表 2.1 各従来手法の特徴比較

	無線LAN	無線PAN	IMES	超音波	可視光(PD)
精度	数m~数十m	数m	ビーコンの数に依存	数十cm	数十cm
既存のインフラとの互換性	○	△	△	△	○
ビーコンの最小数	3	3	所望する精度に依存	3	3
認識距離	数十m	数十m	数m	数m	数m
省電力性	△	○	△	△	○

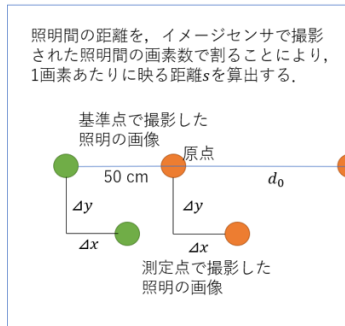
以上の位置推定における各従来手法と提案手法の大まかな特徴の比較をまとめると、可視光では既存のインフラとの互換性については、送信機として用いる照明が屋内の至る所に設置されておりこれをそのまま位置推定に活用することができる点がメリットとして挙げられる。認識距離が短いというデメリットもあるが、近年急速に普及している LED 照明を用いれば、省電力性が期待できる。また、次章で示すように、受信機にイメージセンサを用いることによって、ビーコンの最小数を 2 つで位置推定を可能にする。

次章からは、照明とイメージセンサを用いた可視光測位の具体的な手法を提案し、その精度を検討していく。

<sup>†</sup> 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Kyoto  
Institute of Technology



(a)システム構成



(b)イメージセンサで撮影された画像

図 3.1 照明 2 つとイメージセンサを用いた実験系

### 3. 位置推定手法の提案

本研究で提案する位置推定の手法について説明する. 今回提案する手法は, 照明の位置は可視光 ID (Identification)[8]により受信側が既知とし, 照明 2 つとイメージセンサを用いて画像処理によって位置推定を行う. システム構成を図 3.1 (a)に, イメージセンサで撮影された画像のイメージを図 3.1 (b)に示す. 二つの LED 照明 A と B の間隔は 50 cm であり, 照明からイメージセンサまでの高さ (z 軸方向の距離) を  $h$  とする. はじめに, 高さ  $h$  を固定し, 照明 A の光の強度が最大値になるイメージセンサの画素がイメージセンサ画像の中心になる位置にイメージセンサを置く. この位置を基準点 (原点) とする. 照明の光の強度は, イメージセンサから出力される RGB 値とする. 次に, イメージセンサ画像の端に照明 A が映る位置にイメージセンサを移動させる. このときの移動距離を  $d_0$  とする.  $d_0$  を原点から端までの画素数で等分したものから 1 画素あたりの距離  $s$  を求める. 実空間内の別の位置  $(x, y)$  に移動した場合, 撮影した照明のイメージセンサ画像の位置と原点との差から求めた画素数  $\Delta x, \Delta y$  と 1 画素あたりの距離  $s$  より, 式 (3.1), 式 (3.2) を用いて, 実空間での  $x, y$  方向それぞれの移動距離  $d_x, d_y$  を推定する. 一方, 高さ  $h$  については, 実空間でイメージセンサを基準点からイメージセンサの端に照明が映る位置へ移動させたときの距離  $d_0$  と視野角  $\theta$  から, 式 (3.3) を用いて推定する.

$$d_x = s\Delta x \tag{3.1}$$

$$d_y = s\Delta y \tag{3.2}$$

$$h = \frac{d_0}{\tan\theta} \tag{3.3}$$

## 4. 実験系のシステム構成

提案する照明とイメージセンサを用いた位置推定手法に基づき, 図 3.1 (a)に示した実験系を構築して位置推定の実験を行う. 実験のシステム構成は, 送信機である照明と, イメージセンサによる受信機で構成される. 次節から送受信機について説明する.

### 4.1 送信機

本実験で使用した照明はスマートライト (PHILIPS hue 社, フルカラーシングルランプ E26) であり, RGB3 色の LED の混色で色および明るさが可変される. このスマートライトは, 電源 (AC 100 V, 60 Hz) に接続されており, PHILIPS hue のアプリから, 照明の光強度および色の制御を行う.

表 4.1 イメージセンサの感度設定

#ISO 感度(0~1600,0 は自動)	camera.ISO = 100
#シャッター速度(単位はマイクロ秒,0 は自動)	camera.shutter_speed = 50000
#露出補正(-25~25)	camera.exposure_compensation = 0
#測光モード	camera.meter_mode = 'average'
#ホワイトバランスモード	camera.awb_mode = 'off'
#手動ホワイトバランス調整(0.0~8.0)	camera.awb_gains = (1.6,1.6)

### 4.2 受信機

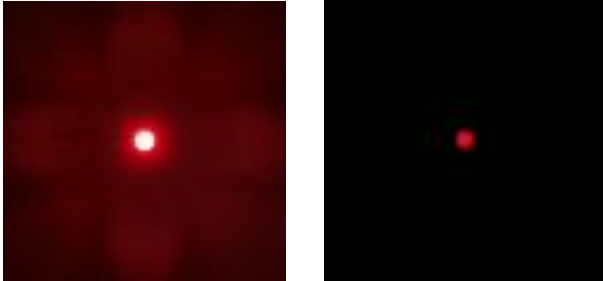
受信機に用いたイメージセンサは, RS 社の Raspberry Pi カメラモジュール (Raspberry Pi Camera Module V2.1) を使用し, その出力信号を SWITCH SCIENCE 社の Raspberry Pi 4 Model B / 8GB に接続して画像信号処理を行う. 画像信号処理でのプログラミング環境は Python を用いており, OpenCV のライブラリを用いて RGB 値を取得する.

#### 4.2.1 イメージセンサの感度設定

スマートライトを赤色で出力を 100%, イメージセンサの感度設定を自動にすると, 図 4.1 (a)に示すように撮影したライトの中心部が白色になる. この場合の受信 RGB 値は (R=255, G=255, B=255) となった. つまり, イメージセンサの受信感度が飽和しており, 発光していない G 値や B 値も高くなっている. そこでスマートライトの出力 ISO 感度やシャッター速度などのカメラの設定を変えて, R 値だけを正しく受信できる条件を探した. その結果得られたイメージセンサの感度を表 4.1 に示す.

この設定で撮影した時の RGB 値は (R=241, G=11, B=37) であり, R 値が高く, ほかの B, G の値の 2 倍であった.

撮影された写真を図 4.1(b)に示す. B, G の値が 0 とならない理由はイメージセンサの内蔵フィルタによるものと推測されるが, 十分に B, G の値を抑圧しており R 値が飽和せず提案した方式での色識別が可能であるためこの条件で実験を行う.



(a)感度調整前の画像 (R=255, G=255, B=255) (b) 感度調整後の画像 (R=241, G=11, B=37)  
図 4.1 イメージセンサで撮影したときの画像

### 5. 計測実験

図 3.1(a)に示した実験系で, 高さ $h$ は 153 cm と固定で $xy$ 方向の 70 cm 平方の測定範囲を 10 cm ごとに区切り 64 測定点で位置推定の実験を行う.  $xy$ 方向における位置推定結果を図 5.1 に示す. 横軸が実測位置であり縦軸が推定誤差である. 図に示したようにすべての測定点において, 推定値と実測値の誤差が目標値の $\pm 10$  cm 以下となった. また, 推定値と実測値の誤差や位置関係で優位性は見られなかった. また式(3.3)を用いて高さ推定も行った結果, 推定値と実測値の誤差が目標値の $\pm 10$  cm 以下となった.

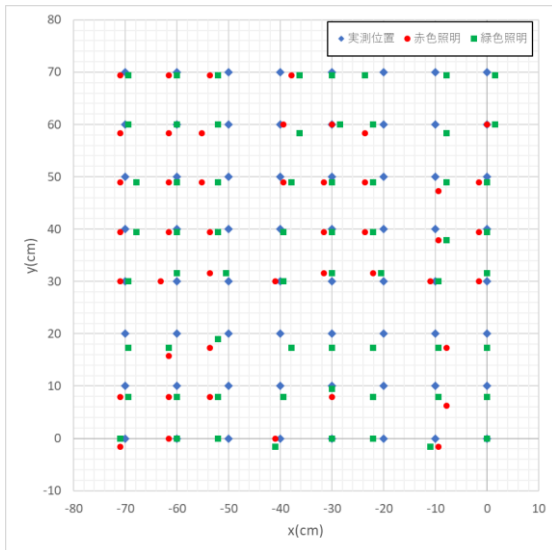


図 5.1 平面の推定結果の一例

次に, 高さ $h$ を変えて高さ推定を行った結果を図 5.2 に示す. 高さ $h$ を変えたときの高さの推定値と推定誤差を示す.

図 5.2 から分かるように, すべての測定点において, 推定値と実測値の誤差が目標値の $\pm 10$  cm 以下となっていることがわかる. また, すべての測定点において推定値と実測値の誤差や位置関係で優位性は見られなかった.

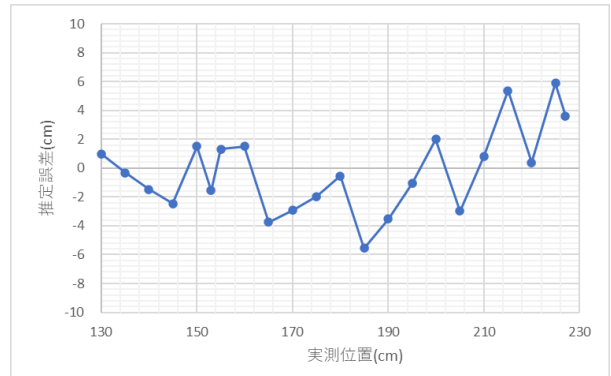


図 5.2 高さ推定結果

### 6. 提案手法の精度についての考察

5 節で示した実験結果より, 提案手法の精度について評価する.

測定した結果を標本とし, これらから母集団の平均 $\mu$ の区間推定を行い誤差 10 cm 以上になる確率 $P$ を求める. このとき, 標本の誤差に優位性がないため, 標本と母集団は正規分布であると仮定する.

与えられた確率 $1 - \alpha$ に対して, 2 つの統計量 $T_1, T_2$ が式(6.1)を満たすとき, 区間 $[T_1, T_2]$ を信頼度 $100(1 - \alpha)$  %の信頼区間という. また, 端点 $T_1, T_2$ を信頼限界という[9]. ここで,  $X_1, X_2, \dots, X_n$ は無作為標本,  $\theta$ は未知母数である.

$$T_1 = T_1(X_1, X_2, \dots, X_n) < T_2 = T_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6.1)$$

$$P(T_1 \leq \theta \leq T_2) = 1 - \alpha$$

母集団の分散 $\sigma^2$ が未知のとき, 分散の推定量である不偏分散 $U^2$ を用いた $t$ -変換を行う.  $t$ -変換は式(6.2)に示す.

$$T = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{U} \sim t_{n-1} \quad (6.2)$$

したがって, 自由度が $n - 1$ の  $t$ (ティー)分布 $t_{n-1}$ の上側 $\alpha/2$ 点を $t_{n-1}(\alpha/2)$ とすると式(6.3)が成立する.

$$P\left\{\left|\frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{U}\right| \leq t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right\} = 1 - \alpha \quad (6.3)$$

これを $\mu$ について解くと式(6.4)となる.

$$P\left\{\bar{X} - t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{U}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{U}{\sqrt{n}}\right\} = 1 - \alpha \quad (6.4)$$

ゆえに,  $\mu$ の信頼度 $1 - \alpha$ の信頼区間は式(6.5)である.

$$\left[\bar{X} - t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{U}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{U}{\sqrt{n}}\right] \quad (6.5)$$

したがって, 実際に標本値に対して平均値 $\bar{x}$ と不偏分散値 $u^2$ を得たときには,  $\mu$ の信頼度 $1 - \alpha$ の信頼区間は式(6.6)である.

$$\left[\bar{x} - t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{u}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{n-1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{u}{\sqrt{n}}\right] \quad (6.6)$$

この母集団の平均 $\mu$ の区間推定から, 誤差 10 cm 以上になる確率が最大となる平均値 $\mu_m$ を用いて誤差 10 cm 以上になる確率 $P$ を計算する. この時の計算方法は式(6.7)を用いて計算する.

$$P = 1 - \int_{-10}^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi}u} e^{-\frac{(x-\mu_m)^2}{2u^2}} dx \quad (6.7)$$

図 5.1 の推定値と実測値から求めた誤差平均と標準偏差を表 6.1 に示す. また, 図 5.2 の推定値と実測値から求めた誤差平均と標準偏差を表 6.2 に示す.

表 6.1 平面の位置推定の誤差平均と標準偏差

	平面
平均誤差(cm)	2.06
標準偏差(cm)	1.16

表 6.2 高さ推定の誤差平均と標準偏差

	高さ
誤差平均(cm)	-0.22
標準偏差(cm)	2.85

式(6.7)を用い、信頼度 95 % の場合での表 6.1, 6.2 の誤差平均と標準偏差から、誤差 10 cm 以上になる確率が最大となる平均値 $\mu_m$ 、不偏分散値 $u^2$ を表 6.3, 6.4 に示す。また、自由度(測定点の数)  $n$ と誤差 10 cm 以上になる確率 $P$ も示す。

表 6.3, 6.4 より、平面方向の位置推定では信頼度 95 % の場合で誤差 10 cm 以上になる確率 $P$ は 1 % 未満であることが示された。本研究では、ドローンの自律飛行を目標としており、60fps のカメラで推定を行うとすれば、平面方向の推定の場合、最も確率が高い高さ推定において 9.2 秒に 1 回誤差 10 cm 以上となり、ナビゲーションを行うことに関しては十分に目標を達成できると言える。

表 6.3 平面の位置推定の精度

	平面
自由度 $n$	128
平均値 $\mu_m$ (cm)	2.26
不偏分散値 $u^2$ (cm <sup>2</sup> )	1.36
確率 $P$	$1 \times 10^{-11}$

表 6.4 高さ推定の精度

	高さ
自由度 $n$	22
平均値 $\mu_m$ (cm)	-1.50
不偏分散値 $u^2$ (cm <sup>2</sup> )	8.49
確率 $P$	$1.8 \times 10^{-3}$

以上より照明 2 つとイメージセンサを用いた位置推定手法では、高精度な三次元位置推定が行えることが示された。

しかし、今回提案した手法は、イメージセンサを地面と水平としており傾きを考慮されていないため、今後の課題としてイメージセンサの傾きを考慮した位置推定手法の検討が挙げられる。

## 7. まとめ

本研究では GPS が利用できない屋内位置情報取得として、LED 照明に着目し、LED 照明からの光 ID とイメージセンサを用いた屋内での位置推定手法を提案し、その位置推定精度について議論した。特に、LED 照明を基準点とし受信機にイメージセンサを用いることで、2 つの基準点だけで 3 次元の位置推定を行い、誤差 10 cm の高精度な位置推定が可能であることを実験的に明らかにした。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、有意義な助言を頂いたライフラボラトリ株式会社の岩松隆則氏に深く感謝申し上げます。また、本研究は JSPS 科研費 JP 19K04375 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 下ノ村 和弘, “ドローンの技術側面—現状および課題と展望—”, 国際交通安全学会誌, Vol.44, No.2, pp.16-23, 2019.
- [2] R. Mur-Artal, J.M.M. Montiel, and J.D. Tardos, “ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System,” IEEE Trans. Robotics, Vol.31, No.5, pp.1147-1163, 2015.
- [3] 秋山征己, 須永光, 五百蔵重典, 田中博, “超音波センサを用いた広域屋内測位システムの構成と検証実験,” 測位航法学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.1-8, 2012.
- [4] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems,” IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C, vol.37, no.6, pp.1067-1080, Nov. 2007. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [5] 高木映児, 高島由彰, “無線規格の動向と今後,” 東芝レビュー, vol.58, no.4, pp.31-35, Apr. 2003.
- [6] 中尾浩一, “屋内測位技術の動向について,” 応用技術株式会社, OGI Technical Reports vol.22, pp.47-52, Dec. 2014.
- [7] 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸, “IMES の技術動向: シームレス三次元測位・航法の新技術,” 電子情報通信学会誌, vol.95, no.2, pp.119-124, Feb. 2012.
- [8] 鈴木修司, “可視光通信実用技術および可視光 ID とその標準化,” 可視光通信協会, <http://j-photonics.org/vlca/wp-content/uploads/2016/11/suzuki.pdf>, 参照 Feb.1, 2022.
- [9] 栗栖忠, 濱田年男, 稲垣宣生, 統計学の基礎, 裳華房, 東京, 2001.