

傾きを考慮した 3 次元可視光測位手法の検討 3D Visible Light Positioning Method with Tilt Consideration

井下 竜之介[†] 大柴 小枝子[‡]
Ryunosuke Inoshita Saeko Oshiba

1. はじめに

近年, 防犯[1]や屋内の設備点検[2]を行う目的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って行くウェイポイント飛行が広く用いられている[3]. 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.

建築物による遮断で 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) 画像が同時に取得可能な 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[4]. 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, GPS に代わる位置情報取得として, 急速に普及している LED 照明に着目し, LED 照明からの光とイメージセンサを用いた屋内での可視光測位手法を検討する. 我々は, イメージセンサを地面と水平に設置した場合で誤差 10 cm 程度の 3 次元可視光測位が可能であることを示した[5]. しかし, イメージセンサを地面と水平に設置する制約の下で検討・検証を行ったため, イメージセンサが傾いた場合に誤差が生じた. そこで, 角度センサの情報を用いることにより, イメージセンサが傾いた状態でも 2 つの基準点だけで水平に設置した場合と同程度の精度がある 3 次元可視光測位が可能であるかを検証する.

2. 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)[6]により受信側が既知とし, 2 つ以上の照明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 1 に, イメージセンサで撮影された画像のイメージを図 2 に示す. 位置推定対象であるイメージセンサを配置した平面から z 方向に高さ 1450 mm の位

置に 3 つの照明を設置する. イメージセンサには各照明の像が照射される. ある照明の座標を (x, y, z) とし, その照明の中心を表すイメージセンサの画素を (u, v) とする. この位置は照明の光の強度が最大値を示す. 照明の光の強度は, イメージセンサから出力される RGB 値を用いて, 赤色照明 R では R 値, 緑色照明 G では G 値, 青色照明 B では B 値とする. これらの位置関係は, 透視投影変換を用いて式 (1)~式(6)であらわされる[7].

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} P_{11}P_{12}P_{13}P_{14} \\ P_{21}P_{22}P_{23}P_{24} \\ P_{31}P_{32}P_{33}P_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで, s は任意の定数, $P_{11} \sim P_{34}$ は透視カメラ行列, f_x, f_y は焦点距離, c_x, c_y はイメージセンサの中心画素, t_x, t_y, t_z はイメージセンサの座標, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ は x, y, z 軸の回転角とする.

次に, 式(1)を展開し整理すると式(7), 式(8)となり, イメージセンサの座標を含む P_{14}, P_{24}, P_{34} を求めることにより, イメージセンサの位置推定を行う.

$$u = \frac{P_{11}x + P_{12}y + P_{13}z + P_{14}}{P_{31}x + P_{32}y + P_{33}z + P_{34}} \quad (7)$$

$$v = \frac{P_{21}x + P_{22}y + P_{23}z + P_{24}}{P_{31}x + P_{32}y + P_{33}z + P_{34}} \quad (8)$$

P_{14}, P_{24}, P_{34} を求めるためには座標が既知である少なくとも 2 つの照明が必要となる. 本研究では照明 $\mathbf{R}(x, y, z) = (0, 0, 0)$, 照明 $\mathbf{G}(x, y, z) = (0, 500, 0)$, 照明 $\mathbf{B}(x, y, z) = (460, -190, 0)$ (単位は全て mm) を使用し, 照明 R と照明 B, 照明 R と照明 G, 照明 B と照明 G の 3 組で位置推定を行う.

[†] 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

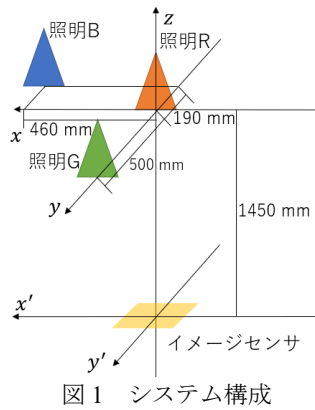


図 1 システム構成

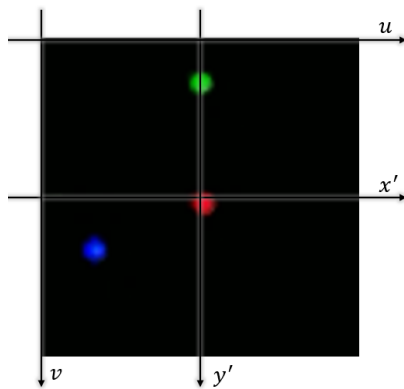


図 2 イメージセンサで撮影された画像

3. 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 1 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。

3.1 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。

3.2 受信機

受信機に用いたイメージセンサは、アールエスコンポーネンツ社の 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。

3.2.1 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 3 (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やイメージセンサの ISO 感度、シャッター速度などの設定を変えて、イメージセンサが受光する光量を減少させることにより R 値だけを正しく受信できる条件を表 1 に示す。

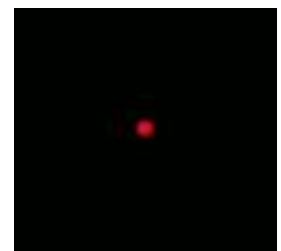
この設定で撮影した時の RGB 値は (R=241, G=11, B=37) であり、R 値が高く、ほかの B, G の値の 2 倍であった。撮影された写真を図 3 (b) に示す。B, G の値が 0 とならない理由はイメージセンサの内蔵フィルタによるものと推測されるが、十分に B, G の値を抑圧しており R 値が飽和せず提案した方式での色識別が可能であるためこの条件で実験を行う。

表 1 照明とイメージセンサの感度設定

#スマートライトの出力	照明 R : 3%, 照明 G : 8%, 照明 B : 1%
#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)



(a) 感度調整前の画像



(b) 感度調整後の画像

(R=255, G=255, B=255)

(R=241, G=11, B=37)

図 3 イメージセンサで撮影したときの画像

4. 計測実験

図 1 に示した実験系で、イメージセンサと照明の高さ z を -1450 mm で固定し、 $x'y'$ 平面上 $(x, y) = (0, 0), (0, 150), (0, 300), (150, 0), (150, 150), (150, 300), (300, 0), (300, 150), (300, 300)$ (単位は全て mm) の 9 点にイメージセンサを移動させ位置推定の実験を行う。本研究では、イメージセンサを傾けて設置した場合の位置推定精度を検証するため、

それぞれの位置で図 4 に示すように x, y 軸を中心に θ_x, θ_y を 5° ずつ 4 段階回転させる。角度を変化させる場合、必ず照明 R, 照明 G, 照明 B の 3 つがイメージセンサに映るように変化させる。 $x'y'$ 平面における位置推定結果を図 5 に示す。縦軸と横軸は $x'y'$ 平面の実測位置である。bg は照明 B と照明 G で位置推定した結果, rb は照明 R と照明 B で位置推定した結果, rg は照明 R と照明 G で位置推定した結果である。しかし、ほとんどの推定点で正確な位置推定が行われていない。特に、照明 R と照明 G で位置推定した場合、解が一意に決まらない点があった。これは、照明 R と照明 G が y 軸と平行に設置されていたことが原因として考えられる。

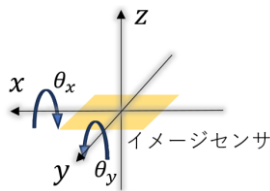


図 4 イメージセンサの角度変化の一例

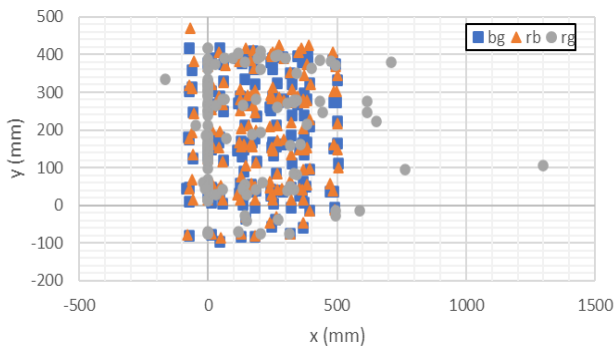


図 5 $x'y'$ 平面の推定結果

図 5 で示した実験結果において、 $x'y'$ 平面における位置推定結果の補正を検討する。照明 R と照明 G で位置推定した場合は位置推定が行えないので、照明 B と照明 G で位置推定した結果と、照明 R と照明 B で位置推定した結果のみで考える。

x 軸を中心とした回転角 θ_x を変化させず y 軸を中心に回転させた場合における x 方向の位置推定誤差の一例を図 6 に、 y 軸を中心とした回転角 θ_y を変化させず x 軸を中心に回転させた場合における y 方向の位置推定誤差の一例を図 7 に示す。 x 方向の位置推定は y 軸回転の角度相関性、 y 方向の位置推定は x 軸回転の角度相関性が見られる。この相関性を分析すると、誤差量は高さ z と $\tan \theta$ 積に近似できることが判明したため、式(9)、(10)の補正式を用いて、図 5 で示した推定結果を補正する。補正した結果 (x_c, y_c) を図 8 に示す。

$$x_c = x - z \tan \theta_y \quad (9)$$

$$y_c = y + z \tan \theta_x \quad (10)$$

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 ± 10 cm 以下となった。このときの誤差平均と標準偏差を表 2 に示す。

表 2 $x'y'$ 平面における位置推定結果

bg	誤差平均 (mm)	標準偏差 (mm)
x	-4.9	13.5
y	-13.5	17.3
rb	誤差平均 (mm)	標準偏差 (mm)
x	-6.8	13.8
y	-23.0	21.7

表 3 高さ推定の結果

bg	誤差平均 (mm)	標準偏差 (mm)
z	63.7	69.3
rb	誤差平均 (mm)	標準偏差 (mm)
z	42.4	81.9

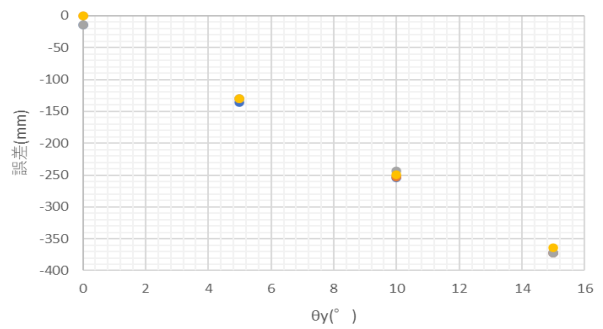


図 6 x 方向の位置推定誤差の一例

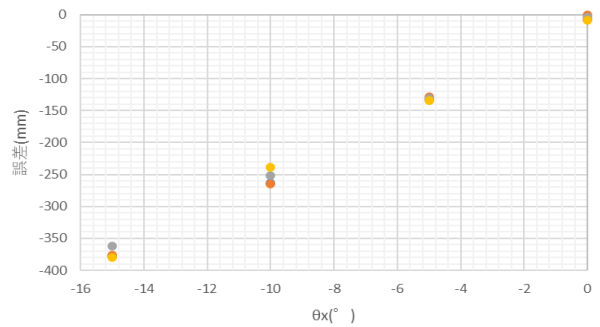


図 7 y 方向の位置推定誤差の一例

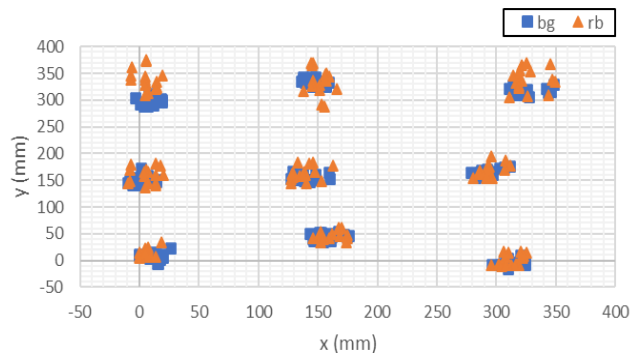


図 8 補正後の $x'y'$ 平面の位置推定誤差

また照明 B と照明 G で位置推定した場合での高さ推定の誤差平均と標準偏差, 照明 R と照明 B で位置推定した場合での高さ推定の誤差平均と標準偏差を表 3 に示す.

5. 精度評価

4 章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 μ 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無いため, 標本と母集団は正規分布であると仮定する.

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, 母集団の平均 μ の信頼度 $1 - \alpha$ における信頼区間は式(11)で表される[8]. ここで, n は自由度(測定点の数)である.

$$\left[\bar{x} - t_{n-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \frac{u}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{n-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \frac{u}{\sqrt{n}} \right] \quad (11)$$

この母集団の平均 μ 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 μ_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(12)を用いて計算する.

$$P = 1 - \int_{-10}^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi}u} e^{-\frac{(x-\mu_m)^2}{2u^2}} dx \quad (12)$$

式(12)を用い, 信頼度 95 % の場合での表 2, 表 3 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 μ_m , 不偏分散値 u^2 を表 4, 表 5 に示す. また, 自由度 n と誤差 10 cm 以上になる確率 P も示す.

表 4 $x'y'$ 平面における位置推定の精度

bg	x	y
自由度 n	144	144
平均値 μ_m (cm)	-7.16	-16.40
不偏分散値 u^2 (cm ²)	13.57	17.45
確率 P	3.9×10^{-12}	8.3×10^{-7}

rb	x	y
自由度 n	144	144
平均値 μ_m (cm)	-9.04	-26.56
不偏分散値 u^2 (cm ²)	13.90	21.84
確率 P	3.0×10^{-11}	3.9×10^{-4}

表 5 高さ推定の精度

	bg	rb
自由度 n	144	144
平均値 μ_m (cm)	75.17	56.01
不偏分散値 u^2 (cm ²)	69.78	82.44
確率 P	3.6×10^{-1}	3.2×10^{-1}

表 4 より, $x'y'$ 平面における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 42.7 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 $x'y'$ 平面で十分に目標を達成できると言える.

しかし, 表 5 より高さ推定では信頼度 95 % の場合で誤差 10 cm 以上になる確率 P は 30 % を超える. 誤差 25 cm 以上になる確率の場合 1 % 未満であり, 高さ方向の精度は 25 cm 程度であると考えられる.

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, $x'y'$ 平面では 10 cm, 高さ方向では 25 cm の精度で三次元位置推定が行えることが示された.

今後の課題として高さ方向の位置推定における精度向上が挙げられる.

6. 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, $x'y'$ 平面では 10 cm, 高さ方向では 25 cm の精度で三次元位置推定が行え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] セコム株式会社, “「セコムドローン」のサービス提供を開始,” https://www.secom.co.jp/corporate/release/2015/nr_20151210.html, 参照 Jun.12, 2023.
- [2] 総務省消防庁, 厚生労働省, 経済産業省, “プラントにおけるドローン活用事例集 (ver. 3) (2021 年 3 月改訂),” https://www.fdma.go.jp/relocation/neuter/topics/fieldList4_16/jisyuhoan_shiryo.html, 参照 Jun.12, 2023.
- [3] 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, Oct. 2019.
- [4] 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, Sep. 2015.
- [5] Ryunosuke Inoshita, Saeko Oshiba, “3D Self-position Estimation Using Illumination and Image Sensors,” Proceedings of the 13th Asia Lighting Conference, pp. 37-44, China, 2022.
- [6] 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.
- [7] 佐藤淳, “投影とカメラモデル,” コンピュータビジョン—視覚の幾何学—, pp.10-41, コロナ社, 東京, 1999.
- [8] 栗栖忠, 濱田年男, 稲垣宣生, “区間推定,” 統計学の基礎, pp.101-112, 裳華房, 東京, 2001.