

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

機体搭載赤外LED光源と地上カメラによる機体位置と姿勢の検出

五味 広美, 山口 功

2010年12月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要.....	1
1. まえがき.....	1
2. 方式の検討.....	2
(1) カメラ位置.....	2
(2) 画像処理アルゴリズムと対象物.....	2
(3) データリンク.....	2
3. 方式の構成要素の検討.....	3
(1) 太陽光スペクトル.....	3
(2) カメラ CCD の分光感度特性.....	3
(3) LED 光源.....	3
(4) 光学フィルター.....	3
(5) 画像上での明るさの計算.....	4
(6) カメラ光学系.....	5
(7) 光源の設計と製作.....	5
(8) カメラと画像処理ソフト.....	5
4. 地上視認性試験.....	6
(1) 距離特性.....	6
(2) 方位特性.....	7
(3) リアルタイム追跡処理.....	7
5. 飛行試験.....	7
5.1. 飛行試験用光源.....	7
(1) 高密度化.....	7
(2) 方位特性.....	7
(3) バッテリ駆動.....	8
(4) 小型模型飛行機の選定.....	8
(5) 光源の機体への取付.....	8
5.2. 試験方法と試験場所.....	9
5.3. 計測結果.....	10
(1) 地上での視認性確認.....	10
(2) 画像上での光源の軌跡.....	10
(3) カメラに対する機体の相対的位置.....	10
(4) 模型飛行機のロール角.....	11
6. まとめ.....	11
6.1. 考察.....	11
(1) 光源からカメラに到達する光量総和.....	11
(2) 光源の画像上での明るさ.....	11
6.2. 今後の課題.....	12
(1) LED の曲面実装.....	12
(2) LED の取付調整.....	12
(3) 光源輝度の向上.....	12

(4) 追跡アルゴリズム	13
(5) 複数カメラ	13
謝辞	13
参考文献.....	13
付録. 画像情報から機体の位置と姿勢の計算.....	14

機体搭載赤外LED光源と地上カメラによる機体位置と姿勢の検出*

五味 広美^{*1}, 山口 功^{*2}

An optical measurement of a small UAV location and orientation using onboard LED and a video camera on the ground*

Hiromi GOMI^{*1} and Isao YAMAGUCHI^{*2}

Abstract

Vision-based methods are reviewed in order to steer a small UAV towards a narrow landing space. An LED light of 890 nm is visible by a monochrome video camera (1/2 inch CCD, 640 x 480 picture element) with lens of 12 mm focal length and IR filter at a distance of 100 m on a sunny day. Two LED light sources on the wings are extracted as the highest brightness areas from the image captured by the camera on the ground, and the flight path and the roll of the UAV are calculated. The one unit of LED light source consumes 10 W and weighs 20 g.

Keywords: UAV, unmanned aircraft, precise landing, image processing.

概要

小型無人機を狭い地点に誘導して回収する高精度な位置計測方法として、画像情報を使う方法を調査した。本稿では光学的方法を検討し、1/2 インチ CCD (640×480 画素) のモノクロ・ビデオカメラに焦点距離 12 mm のレンズを使い、赤外 (890 nm) LED 光源の視認性を晴天下の距離 100 m で確認した。飛行試験では、左右の主翼の下にそれぞれ LED 光源を搭載し、それらを地上のビデオカメラ 1 台で撮影した。明るい部分を光源として切り出すアルゴリズムを使い、画像上での光源の位置を求め、機体の位置と姿勢 (ロール) を計算した。飛行試験用に制作した LED 光源 1 組の消費電力は約 10 W、質量は約 20 g であった。

1. まえがき

小型無人機でも GPS 測位、GPS/INS 複合航法が使われるようになってきているが、それらの測位誤差は大きく、高度で 10 m 程度の誤差がある。これらを使って、小型無人機を自動着陸させる時、10 m の高度誤差があると、進入角 6 度の場合、接地点が進入方向に 100 m のずれが生じる。これでは小型無人機の利用が制限されるので、接地直前の機体の位置を高精度に計測する方法として光学的方法を検討した。

大型機の場合と同様に [1]、カメラの小型化、計算機の小型化と高性能化により、小型無人機でもビデオ画像を使った航法が研究されている [2],[3],[4]。大型機に比べて小型無人機への画像航法の応用が容易な点は、着陸進入の最終段階での接地点までの距離が 100 m 程度なので、現在のカメラ解像度で十分な精度で位置計測が可能になることである。

想定している進入・着陸の手順は次の通り：

Step 1：GPS によって得られた接地点と機上の位置情報

を使い、接地点から 100 m の位置まで、高度、左右の位置誤差 ±10 m で機体を誘導する。

Step 2：接地点から 100 m の位置で機体をカメラで捉え、光学的方法に切り替える。

Step 3：カメラ画像から機体の位置 (誤差 ±1 m) と GPS から求めた機体・カメラ間距離を使い、接地点へ誘導する。

初めに、光学的方法に関して理論的な検討を行ない、構成要素の調査と視認性の計算をした。現在の技術レベルで充分明るい光源を無人機に搭載可能な質量で実現可能なことを示す為に、光源の予備試験、地上視認性試験、飛行試験を行なった。

得られた光学的な位置情報に基づく正確な誘導の課題はこの報告では扱わない。また、今回の飛行試験では、試験を簡単にする為に、2 つの光源の画像位置情報から機体・カメラ間距離を求めた。併せて、2 つの光源の画像情報から姿勢 (ロール角) も求めた。

* 平成 22 年 8 月 17 日受付 (Received 17 August, 2010)

*1 航空プログラムグループ 無人機・未来型航空機チーム (Unmanned and Innovative Aircraft Team, Aviation Program Group)

*2 研究開発本部 機体構造グループ (Airframes and Structures Group, Aerospace Research and Development Directorate)

2. 方式の検討

接地直前の機体の位置を高精度に計測する方法として光学的方法は(1)カメラで対象物を捉え、(2)得られた画像から対象物を抽出し、相対的な位置、距離を求め、(3)処理結果を機上の誘導制御で利用出来る様にする必要がある。したがって、光学的方法は(1)カメラ位置、(2)画像処理アルゴリズムと対象物、(3)データリンクにより幾つかの方式が考えられる。

(1) カメラ位置

①カメラを無人機に搭載し、接地点の画像的特徴を捉える方式と、②カメラを接地点に設置して、航空機の画像的特徴を捉える方式の2つが考えられる。カメラを使った光学的方法ではカメラと対象物の相対的な位置を求めるので、①と②の方式には原理的な差は無いが、実施する上では次の様な課題がある。

①カメラ機上搭載の場合

i) カメラ姿勢の安定性

カメラを搭載した場合、機体の位置と姿勢によりカメラの位置と姿勢が変化する。カメラの位置と姿勢が変化することにより、得られる画像も変化する。カメラの位置(上下、左右)と姿勢(ピッチ、ヨー)の変化は画像上で似た変化を生じるが、その分離は非常に困難である。

ii) 対象物

カメラが機上にあるので、対象物は接地点に置かれた画像的に特徴のある物になる。画像処理が簡単で信頼性が高い結果が得られる対象物が接地点に偶然ある可能性は低いので、災害監視無人機の回収までに画像的に特徴のある対象物を接地点に置かなければならない。

接地点に水平に置かれた対象物を機上カメラから見ると、例えば、大型旅客機の進入角3度では進入方向に1/20に圧縮された形状に見えるので、浅い進入角では重要な画像的特徴である形状情報を使って画像から対象物を抽出することが非常に困難になる。

iii) 画像処理用計算機

搭載計算機で画像処理をする場合、専用のハードとソフトの開発が必要になるので、初期投資が大きくなり、その後の改修にも費用がかかる。

②カメラ地上設置の場合

i) カメラ姿勢の安定性

カメラ姿勢が安定しているので、画像処理が楽になる。

ii) 対象物

画像的に特徴のある対象物を機体に搭載するか、機体自体を画像的に特徴のあるものにする必要がある。前者の方式では、対象物は軽く、飛行特性への影響が小さい

ことが重要になる。後者では、背景が空である場合、災害監視無人機は画像的な特徴があるが、着陸地点が建物の谷間にある場合には災害監視無人機の画像的な特徴を抽出することが困難になる場合も考えられる。

iii) 画像処理用計算機

カメラが地上設置の場合、画像処理用の計算機は地上に置かれるので、汎用のパソコンと汎用の処理ソフトを使用することが可能になり、開発コストの削減が可能である。

(2) 画像処理アルゴリズムと対象物

画像処理アルゴリズムに要求されるものは処理結果の信頼性とリアルタイム処理である。画像処理アルゴリズムで画像から対象物を抽出する(その後、対象物の位置を求める)方式としては幾何形状情報と色(単色の場合は輝度)情報を使う方式があるが、前者は後者に比べて計算機負荷が大きく、信頼性が低い。

以上のことから、今回の評価試験では、対象物として、背景に比べて充分明るい光源を無人機に搭載して、画像の中で明るい部分を光源と見なし、閾値以上の部分の重心を光源位置とするアルゴリズムを採用した。

(3) データリンク

カメラと画像処理用計算機を機上搭載することにより、画像処理の為のデータリンクは不要になり、自律飛行が可能になる。

機上搭載のカメラにより得られた画像を地上に伝送し、地上のコンピュータで画像処理を行ない、処理結果を機上に伝送する方式が考えられる。この方式では機上に画像処理用の計算機を搭載する必要は無いが、画像の伝送系が必要になる。地上の計算機は汎用の計算機を使うことが出来るので、汎用の処理ソフトを使用することも可能になる。災害監視無人機は災害情報(画像)を地上に伝送する系を搭載しているので、この方式でも新たな伝送系を必要としないことが考えられる。

地上にカメラと画像処理用計算機を設置する場合、処理結果を機上に伝送する必要があるが、処理結果は機体の位置情報なので、方位(画像上で上下、左右)と距離の3つ程度の数値情報になる。それらを機上に伝送するだけなので、地上から機体を制御する系に情報を載せることが可能になる。

以上の比較検討から、カメラと画像処理用計算機を地上に設置する方式を採用した。したがって、背景に比べて充分明るい光源を無人機に搭載可能な質量で実現することが最重要課題になる。画像処理により得られた機体の位置情報を使って機体を誘導制御しないので、今回は

伝送試験以降は省略した。

3. 方式の構成要素の検討

ここでは、2.の方式を構成する要素に関して検討し、方式を実現する上での課題を明らかにする。構成要素の選択はそれに関与する者の専門性と嗜好に大きく影響を受け、要素が構成する方式決定にも影響を与えることに注意しながら、検討を進める。

(1) 太陽光スペクトル

図1に示す様に、太陽光のスペクトルは波長 500 nm 付近のピークの両側でエネルギーが減少している。地上付近での太陽光のスペクトルには、大気吸収によりエネルギーが少ない波長帯がある[5],[6]。採用した方式では太陽光が外乱となるので、太陽光エネルギーの少ない波長帯の光源を採用すれば、太陽光に対する相対的な発光エネルギー (SN比) が大きくなり、視認性が高くなる。

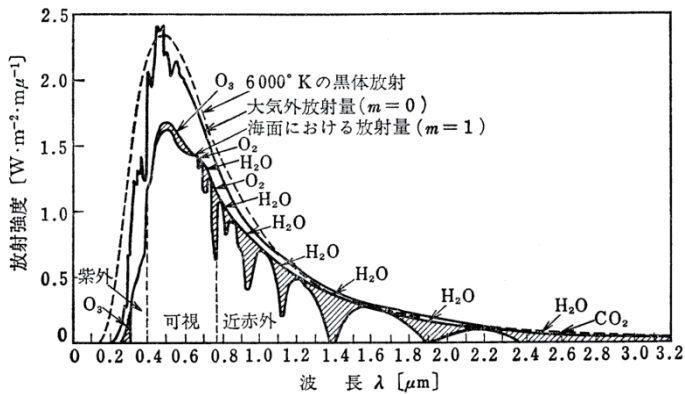


図1 太陽光スペクトル[5]

(2) カメラ CCD の分光感度特性

一般のビデオカメラに使われる CCD の分光感度特性は、図2に示す様に、波長 500 nm 付近に感度のピークがあり、波長 1100 nm を超えるあたりで感度がなくなる[7]。

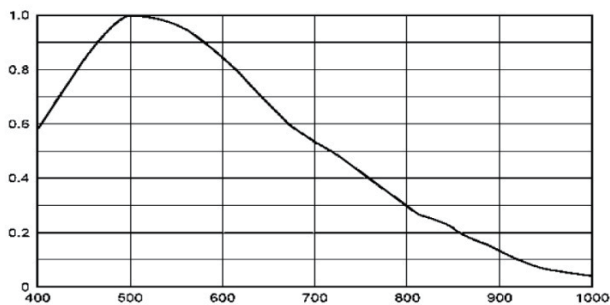
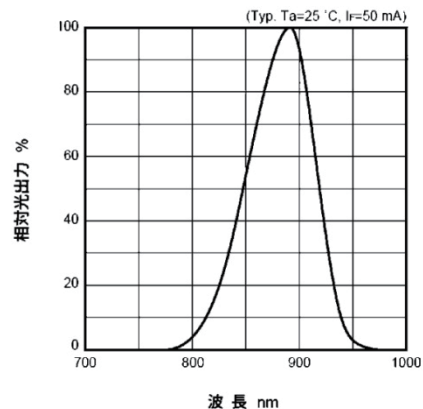


図2 CCD の分光感度特性[7]

(3) LED 光源

光源としては電源が簡単で発光効率の良い LED を選んだ。水分検出用の LED として 1450 nm にピークのある HAMAMATSU LED 10660 があるが、それに対応したカメラは高価と予想される。一般のビデオカメラが使えるピーク波長が 890 nm の HAMAMATSU LED 1915 を選んだ。この LED にはオンチップのレンズを付け放射光を前方に集中し、放射照度が 1915 の約 3 倍の 1915-01 がある[8]。



■ 外形寸法図 (単位: mm)

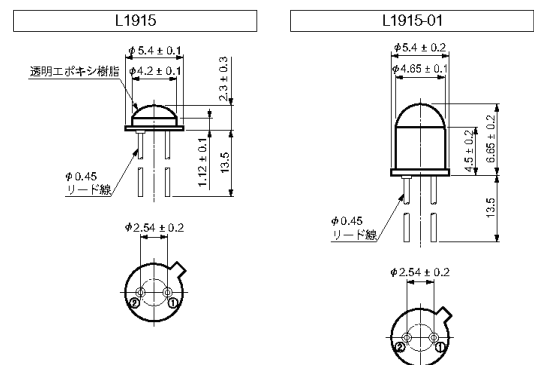


図3 赤外 LED 1915[8]

(4) 光学フィルター

可視光域の太陽光のエネルギーが強く、カメラも可視光域で感度が良いので、赤外透過光学フィルターにより可視光を遮断し、赤外 LED 光源の視認性を上げるのが合理的である。入手が容易な富士フィルムの光学フィルターの中から、赤外 LED からの光をほぼ (90%以上) 透過するシャープカットフィルター IR-80*3 を選定した[9]。

*3 波長 300 nm から 1100 nm の間で、ある波長以下の光をできるだけ完全に吸収し、これより長波長の光をできるだけ完全に透過するように設計製作したフィルターをシャープカットフィルターと呼ぶ。フィルター番号には SC または IR の次に透過限界波長の 1/10 の値を付けている[9]。

- ・ 透過限界波長：波長傾斜幅の中央の波長
- ・ 波長傾斜幅：透過率 72%の波長と透過率 5%の波長の幅

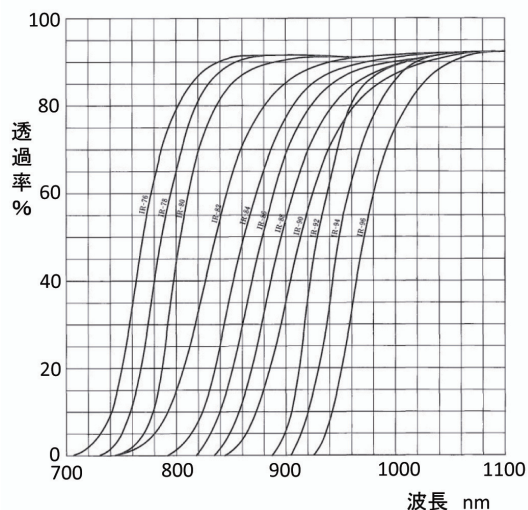


図4 赤外透過特性[9]

(5) 画像上での明るさの計算

以上に示したグラフから数値を読み取り、波長 700 nm から 1000 nm までを以下の式(1)で数値積分をして、光源と光源以外の物体（機体、地物、雲、空など）の画像上での明るさを計算した[10],[11]。

デジタル画像の画素の明るさ（以下、「画像の明るさ」という。）は撮像素子の画素に入射する光量に比例する。撮像素子の画素に入射する光量は画素に対応する外界に存在する物体が放射（反射を含む）する光量に比例する。

①太陽光を反射する物体

太陽光を反射する物体が放射する光量は太陽光の放射照度と物体の反射率との積となる。物体表面での反射が完全拡散面（明るさが太陽光の入射角、放射角依存しない）である場合、太陽光を反射するの物体の画像の明るさは

$$\text{画像の明るさ} = \text{Const.} \times \int \text{放射照度} \times \text{反射率} \times \text{フィルタ透過率} \times \text{CCD 感度 } d\lambda \quad (1)$$

となる。ここで、Const. はレンズの明るさ、ビデオカメラの映像信号増幅率によって決まる定数、 λ は波長である。

反射率を最大値 1、放射照度[6]、フィルター透過率：図 4[9]、CCD 感度：図 2 [7]から波長ごとのデータを読み取り、積分して画像上での明るさを計算すると Const. $\times 23 \text{ W/m}^2$ となる。画像の明るさはこの値を超えることはない。

②光源

赤外 LED 1915 のデータシート[8]及び LED の技術資料[12]より、発光部から距離 20 mm の前方の 10 mm \times 10 mm に放射される光量は 1 mW（放射照度 10 W/m²）である。距離 20 mm で幅 10 mm を見る角度は ± 15 度程度で、その放射角度範囲では放射強度は 10%程度低下するだけなので、充分離れた距離で LED を見た場合、LED は放射照度 10 W/m² で照らされた反射率 1 の完全拡散面の様に見える。

図 3[8]の赤外 LED 1915 の発光スペクトルから波長ごとの照度を求め、(1)式で計算すると、LED 1 個当たりの画像上で明るさは Const. $\times 1.5 \text{ W/m}^2$ となる。

10 mm \times 10 mm に LED を 15 個配列すれば太陽光と同程度の照度を実現出来るが、LED 1915 を平面的に並べることが出来るのは 4 個である。データシート上で放射照度が 3 倍近いレンズ付きの LED 1915-1 を使えば、太陽光と同程度の照度が実現出来るが、明るく見える範囲は ± 5 度程度である。

10 mm \times 10 mm に LED を 4 個配列した場合、物体表面での入射角と放射角の影響を含めた反射率が 0.25 以下であれば、物体表面より光源は明るく見える。

光源の画像上での明るさはカメラ・光源間の距離の 2 乗に逆比例して減衰する。それに対して太陽光が表面で鏡面反射する場合や、直接カメラに入射する場合は距離減衰がなくなるので、LED 光源より遙かに明るくなる。

空（空気）の反射（散乱）率は小さいと予想されるが、空と雲の明るさを含めて、以上の計算が正しいかを検証する為に予備試験を行なった。

LED 1 個を 1.5 V の乾電池で点灯して家庭用ビデオカメラ SONY DCR-PC100 に赤外フィルタ IR-80 を付けて、予備試験をした。カメラレンズには周辺減光があるので、光源像の CCD 撮像面上の位置が同じになる様にして試験を行なった結果を図 5 に○で示す。図の縦軸の明るさはビデオ画像の明るさを 8 ビットで量子化しているので、明るさの最大値は 255 である。

一般のビデオカメラの出力は γ 補正値がされているので、 γ 補正を取り除き、最大値を 255 とした結果を●で示す。LED の明るさは距離の 2 乗に逆比例しなければならないが、逆二乗則からのずれは大きい。その原因としては、 γ 補正を正確に取り除けていないこと、CCD の画素とデジタル画像の画素とが 1 対 1 に対応していないこと、1 枚の CCD でカラー情報を取り出していること等が考えられる。

この試験結果から、雲の明るさよりも LED が明るく見えるのは 5 m 程度の距離であることが解かる。したがって、LED を 100 個程度使えば 50 m 程度の距離で明るく

見えることが期待される。

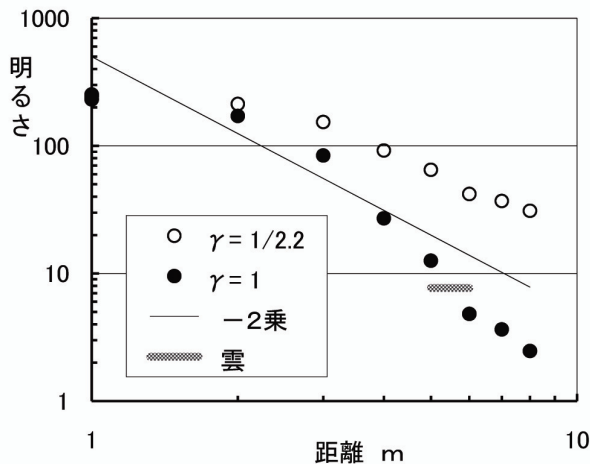


図5 予備試験結果

(6) カメラ光学系

カメラを使った幾何光学的な位置測定精度は、カメラ撮像素子の解像度とカメラレンズの焦点距離によって決まる。しかし、解像度を上げる為に焦点距離の長いレンズを使用すると、カメラ視野が狭くなり、着陸進入する機体を捉えることに失敗する確率が高くなる。

カメラの解像度を 640 画素×480 画素とし、100 m の位置でカメラ視野が 32 m×24 m (18 度×14 度) となるレンズを使用した場合、1 画素が見る範囲は 0.05 m×0.05 m となる。画像上の位置は 1 画素の誤差で決めることが可能であるので、機体の上下、左右の相対的な位置誤差は 0.05 m となる。カメラ・機体間の距離が 10 m になれば位置誤差は 100 m の 1/10 の 0.005 m となる。この程度の焦点距離のレンズを使用すれば、着陸進入時の機体の位置を十分な精度で決めることが可能である。

(7) 光源の設計と製作

背景の中から光源を検出する為には、背景に較べて光源は明るく写る様にしなければならない。6.1.で考察する様に、光源が 1 画素以上の大きさで写る距離では光源の画像上での明るさは距離によらない。光源が 1 画素の大きさに写る距離では、光源から出た光が特定の 1 画素に入射する場合、光源は最も明るく写る。光源の移動に伴い光源の像が撮像面上を移動し、複数の画素に分かれて入射する場合、光源の画像上での明るさは低下する。さらに、光源の像の大きさが CCD 1 画素よりも小さくなると光源の像の画像上の明るさは距離の 2 乗に逆比例して暗くなるので、光源の像は 1 画素以上であることが望ましい。100 m の距離で 1 画素の光源の大きさは(6)の条件では 50 mm×50 mm である。

LED を以下の条件を満足する様に配列した光源を考えた：

- ①光源の大きさは 50 mm×50 mm 以上とする。
- ②LED 1915 から 2 本出ているリード線間隔は 2.54 mm なので、2.54 mm ピッチで穴の開いているユニバーサル基板に LED を配列する。
- ③電源としては普通の安定化電源を使い電流を連続して (デューティ比 100%) 流す。
- ④LED の光出力は電流に比例するので、最大許容電流 (LED 1915 の場合 0.1 A) を流す。
- ⑤消費電力は搭載時に供給可能な 10 W 程度とする。
- ⑥手元にある直流安定化電源は最大電圧 18 V、最大電流 1.0 A である。

その結果、図 6 に示す様に、LED を 12 個直列に繋いだものを 6 系列並列にした。この時の光源の大きさは 65 mm×65 mm で、LED の配置密度は 10 mm×10 mm 当たり 1.94 個になる。この光源を LED 光源 I (地上試験用) と呼ぶことにする。

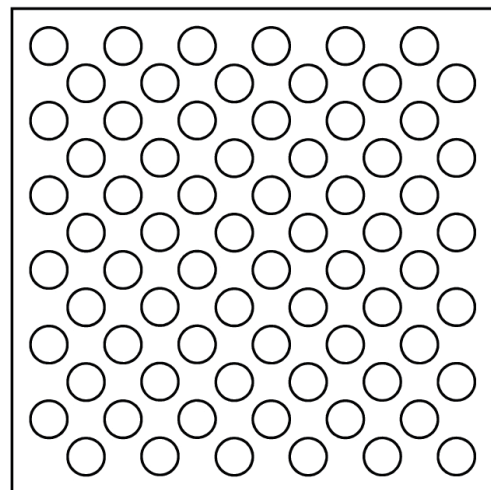


図6 LED 光源 I (地上試験用、65 mm×65 mm)

(8) カメラと画像処理ソフト

一般的なビデオカメラは以下の 2 点で使いにくいので、画像計測用のモノクロビデオカメラを購入した。

理由 1： 家庭用ビデオカメラは 1 枚の CCD を使いカラー撮影をしている。CCD を駆動するクロック周波数とデジタル画像を得るビデオ信号サンプリング周波数が同期していない等の理由から解像度が悪い。

理由 2： 家庭用ビデオカメラによって得られる画像は、補正がされているので、対象物の明るさと画像上での明るさとに比例関係がない。

カメラの選定では、リアルタイム処理をするので、画

像処理ソフトとの相性が重要である。2(2)の画像処理ソフトは単純なのでインハウスでの開発も可能であるが、画像の取り込み、処理結果の外部への転送等を非リアルタイム OS である Windows 上で高速 (リアルタイム) 処理をする部分の新規開発には時間がかかる。入手可能なソフトを調査し、(株)ライブラリーのソフト (リアルタイムトラック Radish[13] と 2 次元動画計測 Move-tr2D[14]) とソフトに対応したイーサネットカメラ GE60 (モノクロ) を購入した。

GE60 は 640 画素×480 画素の画像を Ethernet/1000Base 経由で 60 フレーム/秒で出力する。受光素子の画素は正方形 (9.9 μm×9.9 μm) で、明るさは 256 階調 (8 ビット) である [15]。レンズの焦点距離は 12 mm とした。この時、(7) の LED 光源 I が距離 100 m にある時、画像上での長さで 0.8 画素 (面積で 0.6 画素) 程度になる。

今回使用した画像処理ソフトは処理結果をイーサネット経由、または RS-232C 経由で出力が可能である。RS-232C のポートがある小型ラジコン機用のコントローラを使えば、機上へのデータ転送が可能になる。

4. 地上視認性試験

光源の見え方 (視認性) は光源とカメラ間の距離と光源の向きによって決まり、光源の支持の影響は無い。距離と向きを変える試験であれば、飛行試験よりも地上試験の方が正確に簡単に実行可能で、地上試験でも光源と背景を同時に写すことが出来るので、地上試験を行なった。

12 個直列×6 並列の光源 I (地上試験用) の個々の LED に最大定格電流 0.1 A が流れる様に (供給電流が 0.6 A になる様に) 定電圧電源の電圧を調整しながら試験を行なった。

カメラは GE60、赤外フィルターは IR80、距離 8 m で画像上の最大明るさがフルスケール (255) 以下になる様にカメラの絞りと電子シャッターを調整した。

(1) 距離特性

カメラと光源との距離を 8~57 m まで変化させた時の画像上での光源の明るさの変化を図 7 に示す。この時見えた雲の明るさの最大値は 32 であったので、50 m 程度の距離までであれば、光源は背景に対して明るい。この図で最大値○は光源像の中で最も明るい画素の明るさである。平均値●は最大値の画素の 4 近傍と最大値の画素の明るさ平均である。

室内での試験では 57 m 以上の距離の試験が出来なかったため、レンズ付きの LED 光源の試験は屋外で行なった。光源・カメラ間距離が 100 m の場合の画像を図 8 に、写っている物の明るさを表 1、2 に示す。

晴れている時、画像上の座標 (上左端 (0, 0)、下右端 (639, 479)) で、光源は (235, 170) にあり、その明るさは 130 であった。光源の左側の明るい点 (152, 170) は自

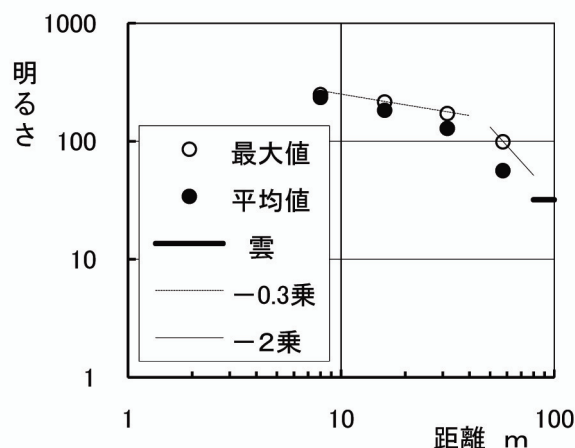


図 7 LED 光源 I (レンズ無し) の距離特性



図 8 LED 光源 I (レンズ付き) の視認性 (距離 100 m)

表 1 明るさの比較

	光源	ガラス	ドーム	建物
晴れ	130	227	80	55
曇り	106	29	29	25

表 2 雲の明るさ

雲		
前方	側方	後方
255	30	31

動車のフロントガラスの曲面で太陽光が鏡面的に反射しカメラに入射したもので、227 の明るさがあった。建物の屋上のドーム表面の反射率は他と較べて少し高いが、拡散面的であった。

曇っている時、曲面からの強い反射がなくなり、他の地物との明るさの差が小さくなったと考えられる。また、光源の明るさも暗くなっている。

表 2 に示す様に、太陽付近にある雲（前方散乱、太陽光が雲を通過）はとても明るい、側方散乱と後方散乱（雲に入射した太陽光が太陽側に反射される）では雲はそれ程明るくなかった。

(2) 方位特性

図 9 は光源面とカメラ光軸との交点を通る光源面上の直線を回転軸として、光源面垂線とカメラ光軸とが成す角度（方位角）を変えた場合の、光源像の明るさの変化を示す。レンズ無し光源 I では±40 度程度の光源面の傾きの変化であれば光源は明るく見えるが、レンズ付きの LED 光源 I は±10 度以上で見え方が暗くなる。

この試験では、光源面をカメラ三脚に垂直に取り付け、光源を 5 度ずつ回転させた。

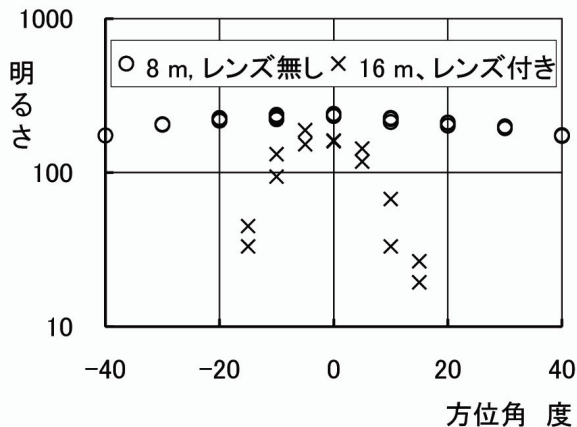


図 9 LED 光源 I の方位特性

(3) リアルタイム追跡処理

(株)ライブラリーのソフト Radish には画像の中で明るさが閾値以上の領域を切り出し、その領域の面積重心を計算し、LAN ポートから重心座標を出力する機能がある。リアルタイム追跡処理の機能確認試験では、単二乾電池で点灯した LED 1 個を棒の先に付け、それを人が振り回し、追跡出来ることを確認した。

5. 飛行試験

以上の地上視認性試験から LED 光源を使った高精度な光学的位置計測の実現性は高いと判断出来、光は飛行機に較べて充分速いので光源の移動による原理的、理論的な困難さは考えられない。そこで光源を小型模型飛行機に搭載した飛行試験を実施した。

5.1. 飛行試験用光源

飛行試験での課題は光源を小型模型飛行機に搭載する実装技術である。

(1) 高密度化

光源は接地点から見える飛行機の主翼または機体に搭載するので、光源搭載により飛行特性が変化する。光源の表面が機体の曲面に沿うか、機体表面を透明なフードに変更し、機体内部に光源を設置するのが理想的であるが、前者は光源製作に費用と時間がかかり、後者は機体の大幅な改造が必要になる。

ここでは、地上試験用に製作した光源 I に較べて、LED の密度を倍にし、高さを半分にした光源を作り、飛行特性に与える影響を小さくし、主翼下面に垂直に取り付けることとした。

初めに、電動小型飛行機の推進系電源に利用している、手元に予備もあるリチウムポリマー電池 (2 セル: 7.4 V) を使用することとして検討を始めた。電池の電圧から LED を 5 個直列とした。電池の容量から 5 個直列を 15 並列にした 75 個の LED をユニバーサルプリント基板に配列し、図 10 に示す 28 mm×79 mm の飛行試験用光源 II を製作した。

飛行試験用光源 II の質量は LED 1915 (レンズ無し) 75 個: 14 g、基盤: 5g、LED 1915-01 (レンズ付き) 75 個: 26 g、基盤: 5g であった。

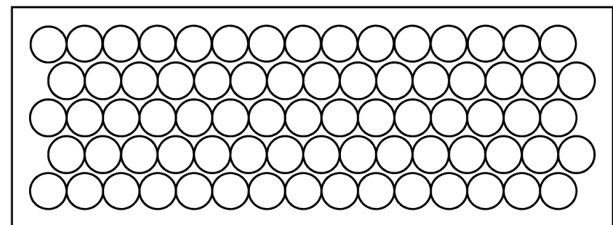


図 10 LED 光源 II (飛行試験用、28 mm×79 mm)

光源 I の倍近い密度を実現する為に LED 本体の金属製の鏢 (外径 5.4 mm、リード線+と導通) が隣の LED と接触するので、鏢を切り取った。

また、密度を上げたことにより LED がさわれない程度的高温になった。自動車を使い 10 m/s 程度の対気速度で飛行時を模擬した冷却試験を行なったが、この程度の対気速度では光源の冷却による電流の低下は見られなかった。抵抗を挟んで電流を下げることにした。

(2) 方位特性

地上試験用光源 I も飛行試験用光源 II も平板上に LED を配列したので方位特性は同じであることが予想される。光源 I の 4.(2) の測定ではビデオカメラを使っ

て光源の明るさを測定した。画素の感度のばらつきもあったので、図 9 では 5 画素の明るさの平均を取った。

4.(2)の測定方法を検証を兼ねて、LED 光源の方位放射強度を飛行試験用の光源 II、フォト・ダイオード、傾斜台を使って測定した。

ビデオカメラの CCD の感光部（フォト・ダイオード）から電荷を読み出す過程が複雑なので、波長 1000 nm 付近に感度のピークがある HAMAMATSU のシリコン・フォト・ダイオード S1087-01[16] 単体を使い、その出力を 1 k Ω の抵抗で短絡し、抵抗両端の電圧を測定した[17]。LED 1 個当たり 0.1 A（最大定格順電流）と 0.05 A を流した時の放射強度が測定可能な、0.4 m と 1.1 m の距離で試験を行なった。

中央精機(株)の傾斜台 TD-411 は傾斜台上面より 50 mm の高さで直交する 2 軸を回転中心として ± 20 度/ ± 15 度までの傾斜が可能で、1 度の目盛りと副尺が付いている。

距離 1.1m で 0.05 A を流した時の測定結果を図 11 に示す。図 9 と図 11 の方位特性が同じことから、図 9 の測定方法は正しく、ビデオカメラで得られた画像の明るさは、対象物が放射または反射する光の強度を正しく捉えていることが確認出来た。

レンズ無し LED では、点灯直後の 0.05 A の正面への放射強度を基準として、

- ・0.1 A では点灯直後の放射強度は 170%程度であったが、LED の温度上昇に伴い放射強度は 145%程度に低下した。
- ・LED の温度上昇に伴い 0.05 A の放射強度は 105%程度に上昇した。

レンズ付き LED では、

- ・正面への放射強度はレンズ無し LED に較べて 4 倍程度強かった。

(3) バッテリ駆動

初めは機体の電源を使うことを考えたが、試験で利用する小型模型飛行機が決まっていなかったため、光源専用のバッテリーを搭載することにした。

着陸時の 10 秒間だけ光源を点灯する方法にすれば、電池の軽量化と LED の温度上昇を避けられるが、電源を ON/OFF する回路の重量と回路製作の手間を考えると、離陸直前に電源 ON にし、光源を 30 分程度連続点灯することが可能な電池を選ぶことにした。

LED を 15 並列した光源 II（飛行試験用）の最大電流は 1.5 A であったが、リチウムポリマー電池

(HP-LG325-1100-2S) : 7.4 V、1.1 A、61 g を選んだ。LED 4 個と電流制限抵抗を直列に繋いだものを必要数並列に

するのが普通的设计であるが、軽くする為に、電流制限抵抗を使わないで LED 5 個を直列に接続した。

使用したリチウムポリマー電池の出力電圧はフル充電で使用開始時は 8.2 V であるが、30 分程で 7.5 V に低下

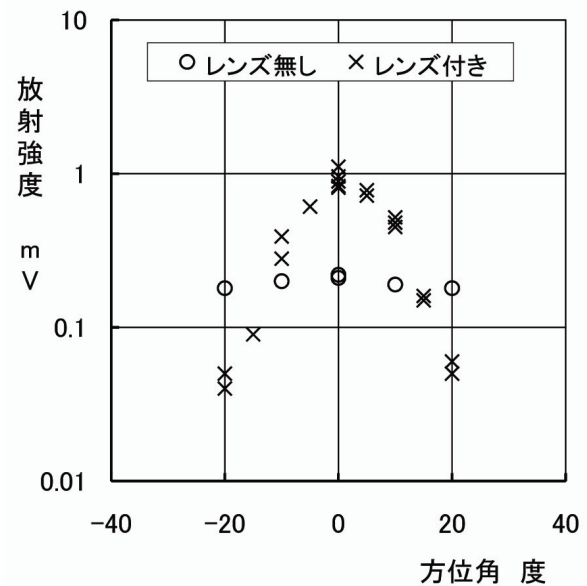


図 11 LED 光源 II（飛行試験用）の方位特性

する。視認性を上げる為に、LED の定格以上の明るさとなる様に制限抵抗無しで接続したところ、LED の多くが劣化し発光しなくなったので、最終的に 1 Ω (36 g) の電流制限抵抗を追加することにした。この時の静止状態での全ての LED が均等と仮定し計算した LED 1 個当たりの電圧、電流の変化を図 12、13 に示す。電流の値は制限抵抗両端の電圧から計算した。

(4) 小型模型飛行機の選定

高精度な光学的位置計測では飛行機・接地点間距離を GPS で ± 10 m 程度の誤差で測定し、画像上での飛行機の位置から進入経路の偏差を求める。

初めは GPS 搭載の模型飛行機を使い、GPS により飛行機・接地点間距離を求め、アルゴリズム全体の検証を考えたが、GPS 受信機搭載の模型飛行機の利用は高価であった。そこで、飛行試験を光源の視認性に限定し、機体に光源を 2 つ搭載して画像情報から航空機までの距離を得ることにより試験準備とデータ処理を簡単にし、手配の容易な普通 (GPS 受信機非搭載) のラジコン機を採用することにした。

(5) 光源の機体への取付

光源を小型化した為、光源 II（飛行試験用）は取付部分が無い構造になっていた。光源は高温になるので接着剤、テープ等での固定は不可能であり、金属ワイヤー等

で主翼に縛る必要があった。しかし、金属ワイヤーは電気を伝えるので LED 間を短絡しない注意が必要であった。また、レンズ付きの LED は±5 度以内の方向に赤外光を出すので、着陸進入時に接地点のカメラに向く様に光源の向きを調整する必要があった。

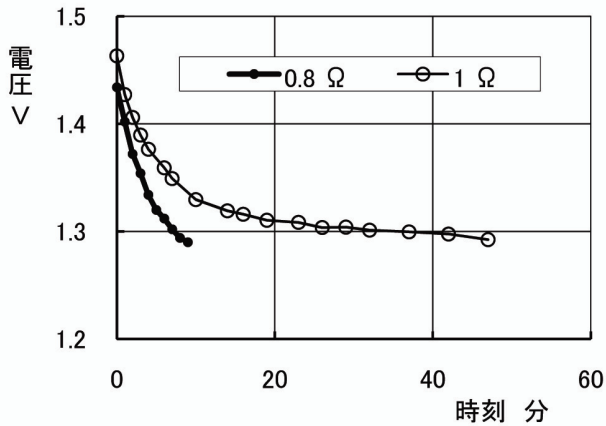


図 12 LED 電圧の時間変化

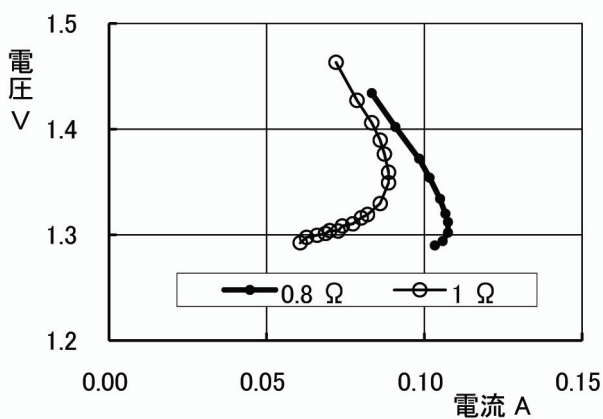


図 13 LED 電流電圧の変化

表 3 ラジコン機仕様

機 体	名称 : ZLIN50 (K&S社)
	全長 : 1.4 m
	全幅 : 1.6 m
	質量 : 3.3 kg
	燃料タンク : 400 cc
エンジン	O.S. FS-91 Surpas 15 cc
プロペラ	直径 : 0.38 m
プロポ	JR PCM11X
受信機	2.4 GHz 10CH
サーボ	5×DS589

光源を主翼にスポイラーの様に取り付けることにより飛行機の特性が変化し、安定した飛行が困難になる可能

性もあった。機体構造と飛行特性は機体製作者と操縦者が一番良く理解していると考え、以下の条件で光源の機体取付けることを含めて飛行試験を委託した。

- 光源を左右の翼に 1 組ずつ取付ける。
最初の計画では 1 組の光源を飛行機胴体に付ける予定であったが、一方のみに取り付けることによるアンバランスを避ける為に、左右主翼の対称な位置に 2 つの光源（特徴点）を取り付けた（図 14、15）。合わせて 2 つの特徴点から航空機・カメラ間距離を求めることにした。
- 飛行経路に垂直±10 度（レンズ付き LED 光源は±5 度）
- 個々の LED の金属部分間を短絡しない。

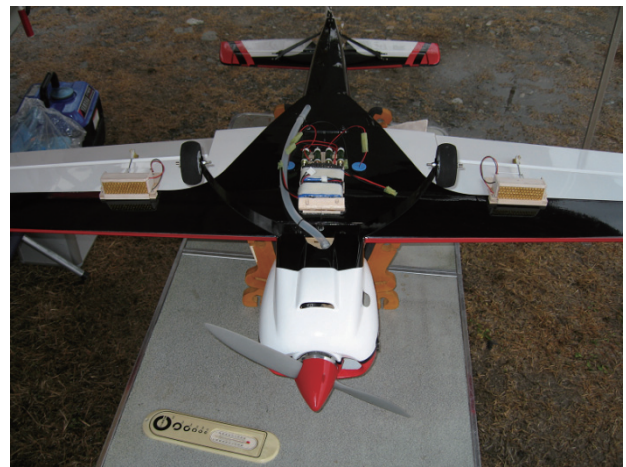


図 14 機体裏面（左右主翼に光源Ⅱ（レンズ無し）、胴体にバッテリー、抵抗）



図 15 機体正面（LED 光源Ⅱ：向かって左にレンズ付き、右にレンズ無し）

5.2. 試験方法と試験場所

飛行試験の分担は次の様にした：

- ①JAXA が光源を提供する。

- ②飛行試験を受託した業者が所有している模型飛行機に光源を取付け、飛行させる。
- ③JAXA が地上に設置したカメラで模型飛行機（光源）を撮影・記録する。

リアルタイム処理が可能であることは地上試験で確認済みで、飛行試験では処理結果を利用しないので伝送試験は省略し、得られたビデオ画像をオフライン処理することにした。

飛行試験は図 16 に示す宇都宮市郊外の鬼怒川河川敷にあるラジコン飛行機滑空場（飛行空域 300 m×800 m）で行なった。関東地方の冬場の北風が強まる 11 月末までに飛行試験を行なう予定で準備を進めたが、実際には 12 月 3 日、4 日の試験となった。



図 16 ラジコン飛行機滑空場

5.3. 計測結果

(1) 地上での視認性確認

飛行機を地上に置き主翼下面の光源を点灯させて、50 m の距離から GE60 で撮影した画像を図 17 に示す。

光源の明るさを 255 とした場合、太陽光を反射する光沢性の防寒服で同等の明るさであったが、遠方の雲の明るさは最大 90 程度であった。この時、太陽は画像の左側にあった。0.683 m 離れた左右光源の画像上での距離は 16.96 画素であった。

(2) 画像上での光源の軌跡

着陸進入を模擬した飛行試験 10 秒間（301 フレーム）のビデオ画像上で目視により位置決めした左光源の軌跡を実線（目視）、右光源を破線（目視）で図 18 に示す。また、明るさが閾値以上を光源とするアルゴリズムで自動的に追跡した左光源の軌跡を黒丸●（自動）、右光源を白丸○（自動）で図 18 に示す。目視と自動の位置は一致しているので、自動追跡アルゴリズムは機能していることが解かる。機体は画像中心（320, 240）付近からカメラ

ラに向かって進入していることから、カメラはほぼ機体進入開始地点に向いていたことになる。

この飛行試験で得られた 10 秒間の全ての画像で目視により光源の位置を特定することが出来たが、光源が背景よりも明るくなり、自動で光源の位置を追跡可能となったのは 131 フレーム以降であった。



図 17 LED 光源 II（レンズ無し）の視認性（距離 50 m）

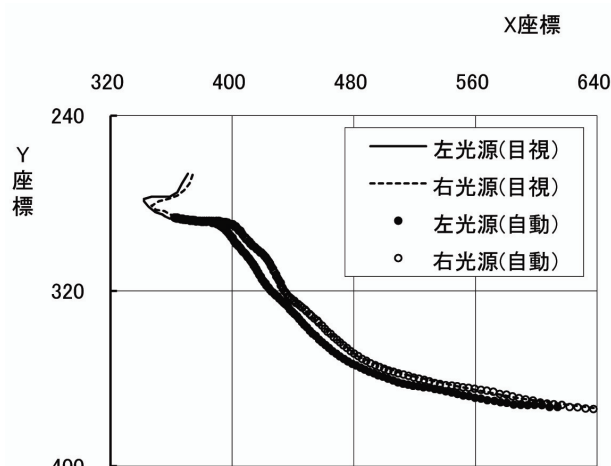


図 18 光源 II の飛行軌跡

注) 目視：目視により位置決め

自動：アルゴリズムで位置決め

(3) カメラに対する機体の相対的位置

画像から機体の位置を計算した結果を、カメラ位置を原点、フレーム No.を横軸、水平方向と上下方向のカメラ光軸からの偏差を縦軸に取ってプロットしたものを図 19 に示す。ただし、この計算では 2 光源間を結ぶ線はカメラ光軸に直交している（機体のヨー角を 0 度）と仮定し、カメラ・機体間距離を求める計算を簡略化している。また、画像中心（カメラ光軸と撮像面との交点）の座標を（320, 240）とし、機体の位置は左右 2 つの光源の midpoint として求めた。計算の詳細は付録に示す。

さらに、横軸をフレーム No. から光軸方向の距離に換算した結果を図 20 に示す。ただし、画像から地平線の高さを画像座標で $V=390$ と推定して、カメラ光軸の地表面から傾きを求め、カメラ光軸からの上下偏差を地表面からの高度に換算した。水平偏差は図 19 と同じ。

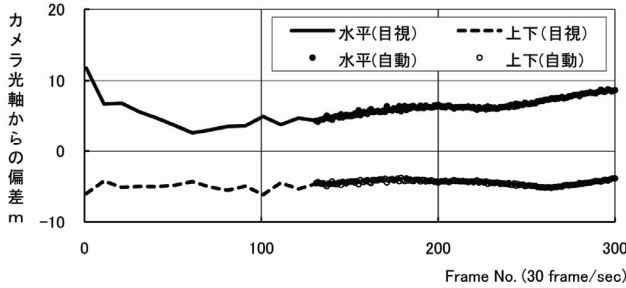


図 19 機体のカメラ光軸からの偏差

注) 目視：目視により位置決め
自動：アルゴリズムで位置決め

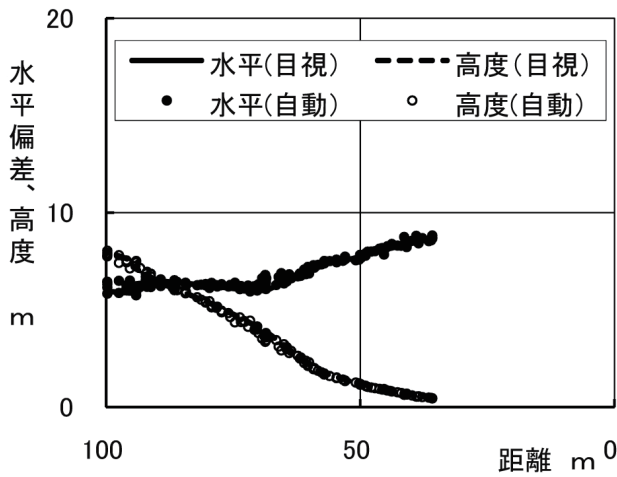


図 20 機体の水平偏差と高度

注) 目視：目視により位置決め
自動：アルゴリズムで位置決め

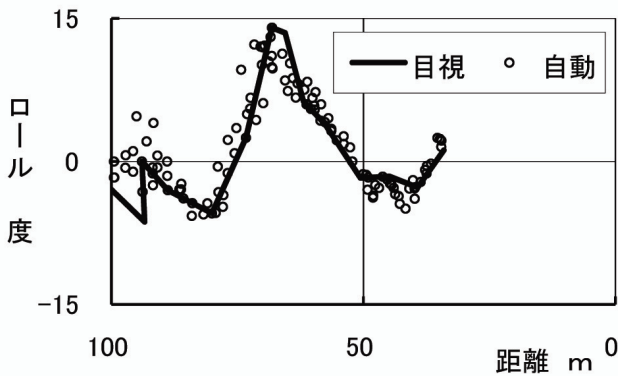


図 21 機体のロール角

注) 目視：目視により位置決め
自動：アルゴリズムで位置決め

この図から 100 m 位の距離から機体は降下角 7 度前後で進入し、カメラ光軸と進入経路を地表面に投影したものは約 3 度で交差していることが解かる。

(4) 模型飛行機のロール角

(3) では機体のヨー角を 0 度と仮定して飛行軌跡を求めていることになるが、同じ条件を用いて機体のロール角を求めた結果を図 21 に示す。

6. まとめ

6.1. 考察

(1) 光源からカメラに到達する光量総和

理論的には光源カメラ間距離に較べて光源の大きさが充分小さければ、光源からカメラ撮像面に到達する光量の総和は距離の 2 乗に逆比例して減少する。

図 7 に示す地上での距離特性試験では光源からの光は複数の CCD 画素に入射している。光源からカメラに到達する光量総和は光源の像の画素の明るさからバックグラウンド（像の周辺）の明るさを引き算したものの総和として求めることが出来る。計算した光量総和は、図 22 に示す様に、距離の逆 2 乗則が成立しているの、試験結果は妥当である。

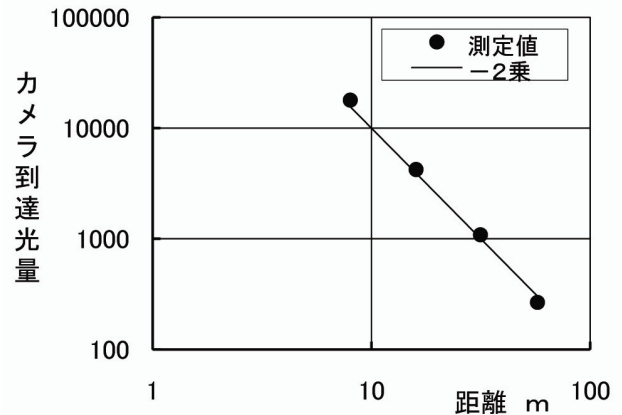


図 22 LED 光源 I (レンズ無し) からのカメラ到達光量

(2) 光源の画像上での明るさ

明るさが均一な面光源上の微小部分からその部分が結像する CCD 画素に入射する光量は上の (1) から距離の 2 乗に逆比例して減少するが、CCD 1 画素が見る光源の面積は距離の 2 乗に比例して増加するので、理論的には光源の画像上の明るさは距離によらず一定であることが予想される。

図 7 の試験では距離によらずほぼ一定 (0.3 乗で逆比例) である。この試験では光源全体が CCD 1 画素の大きさになる距離は 59 m であるが、光量が 4 画素に分散す

る場合、1画素に集中する場合の明るさの1/4になる。図7で距離32mの明るさに比べ距離57mの明度が半分近くまで低下しているのは、光源からの光量が複数の画素に分散した為と考えられる。

距離が6mの時、LED1個の像が1画素の大きさになり、個々のLEDが識別可能になった。さらに光源がカメラに近づくと1個のLEDが面光源的に見えてきた。

入手可能なLEDを使って光源を作った結果、LEDを多数配列し面光源を作る必要があったが、上述の様に、面光源はカメラに近づいても画像上の明るさがそれ程明るくならないので、CCD撮像素子の電荷のオーバーフローによる画像劣化が生じにくくなるメリットがある。

画像の中で明るい部分を光源と見なすアルゴリズムでは画像の明るさが重要である。閾値以上の明るさの画素が複数あればノイズに強くなるが、閾値以上の明るさの画素が1個あればアルゴリズムは機能する。

6.2. 今後の課題

(1) LEDの曲面実装

今回はユニバーサルプリント基板にLEDを配置し、接地点から光源面が見える様にプリント基板を主翼下面にはほぼ垂直に取り付けた。基板が気流を乱し、飛行機の空力特性が変化することに対しては操縦者の熟練でカバーしたが、機体表面に沿ってLEDを配列し、あるいは透明なカバーを掛け、飛行機の空力特性への影響を小さくすることが望ましい。

(2) LEDの取付調整

今回は半田付けに伴う熱によるLED不良、不良になったLEDの交換やLED配列の変更を容易にする為に、LEDをプリント基板に半田付けしないで、LEDを直列に繋ぐ為にリード線を絡め、LEDをプリント基板に固定した。その結果、LEDがプリント基板に密着せずLED光軸のアライメントのずれが生じた。また、個々のLEDの特性試験をしないで、LEDを配列した。

また、機体とLED光源の取付は目視で行なった。レンズ無しのLEDは前方±20度位に均一に赤外光を放射するので、この様な取付でも良好な試験結果が得られたが、レンズ付き光源はレンズ無しに比べて4倍明るい結果は得られなかった。また、レンズ付きLED光源では機体の方向により明るさが大きく変化するので(図23)、次の(3)の②の対策が必要である。

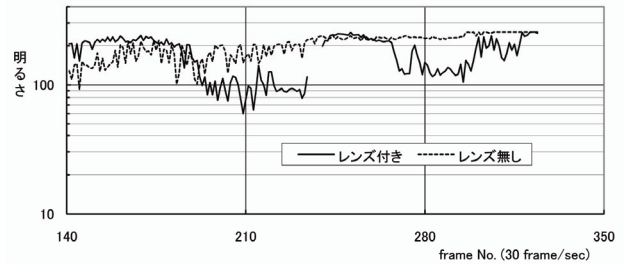


図23 レンズ付き光源II

(3) 光源輝度の向上

LED75個(レンズ無し19g、レンズ付き31g、消費電力10W)で実用的な光源を作ることが出来たが、さらに光源の輝度を高くする方法としては次の方法が考えられる。

①LED点灯のタイミング

接地点から100mの距離になった時にLEDを点灯し、接地後、LEDを消灯すれば、LEDの点灯時間は10秒間程度なので、LEDの温度上昇は少ない。30分以上の点灯した今回以上の電流を流すことが可能で、明るくなることが期待される。

②レンズ付きLED

レンズ付きは前方に集中して赤外光を出すので、レンズ無しに比べて、前方では4倍程度明るい。レンズ付きLEDの光軸を調整することにより、任意の放射光方位分布の光源を作ることが可能になる。

③市場調査と技術革新

今回使用したLEDは入手性が良い汎用の赤外LEDを使用した。LEDの数に比例して光源の光量が増加する。広範な市場調査と技術革新により明るい光源が期待される。

④光学フィルター

画像上の明るさの計算式(1)を使い、太陽光に照らされた反射率1の表面の明るさ、赤外LED1個の明るさ、明るさの比を計算した結果を図24に示す。光学フィルターの透過限界波長が840nm(フィルター番号84)から880nm(フィルター番号88)付近で相対的にLEDは明るく見えることが期待出来る。最適に設計されたバンドパスフィルターを使うことが可能であれば、さらにSN比は改善される。

しかし、カメラの設置などの運用を考えると、カメラ画像に光源以外も写り、カメラが機能していること、どちらに向いているか、何が写っているのか解かることも重要である。

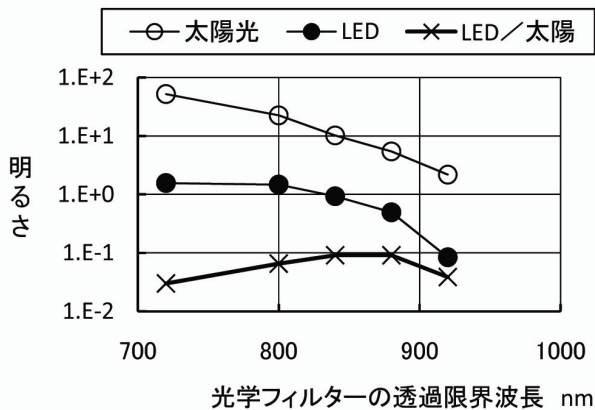


図 24 太陽と LED の明るさ比較

⑤赤外 LED 10660

地表に到達する太陽光には大気中の水により吸収減衰され 1400 nm 付近の波長成分はほとんど無いので、SN 比の大幅な改善が見込める 1450 nm 付近にピークのある LED 10660 の利用は検討に値する。

しかし、Si フォトダイオードのバンドギャップエネルギーは常温で 1.12 eV(感度の限界波長は 1100 nm)なので [17]、LED 10660 光源を検出する為には InGaAs 等の近赤外用カメラを使用しなければならない。

(4) 追跡アルゴリズム

今回の使用した追跡アルゴリズムは画像の中にあらかじめ設定した枠(全画面も可)の中に、設定値よりも明るい部分が現れた時、その部分を光源と判断し、追跡しながら、その部分の重心座標を出力する。「オートポイント処理」[18]を実行することにより、複数の光源を発見し、追跡することは可能だが、微調整が必要である。

(5) 複数カメラ

機体に複数の光源を搭載して地上に 1 台のカメラを設置することと、機体に 1 つの光源を搭載して地上に複数のカメラを設置することは、機体位置を検出する光学的アルゴリズムとしては等価である。

機体に搭載した光源間距離は翼長の制限があるが、カメラを地上に設置する場合、カメラ間距離を翼長より大きくしたり、カメラの配置と数を工夫することにより位置、距離測定精度を向上することが可能である。

謝辞

(株)ヒルテイクの蛭田氏が機体へ光源とバッテリーを取付けし、柿元氏が飛行特性が変化した機体を風の強い中で操縦した。短期間で予定通り飛行試験データが取得出来たことに感謝する。

参考文献

- [1] 佐々修一他：滑走路画像を用いた航空機の姿勢・位置の推定と飛行実験結果、航空宇宙技術研究所報告 TR-1411(2000)。
- [2] Roberts, P.J. & Walker, R.A. : Fixed Wing UAV Navigation and Control through Integrated GNSS and Vision, AIAA 2005-5867 (2005).
- [3] Miller, A., Shah, M. and Harper, D. : Landing a UAV on a Runway Using Image Registration, IEEE Conference on Robotics and Automation, Pasadena (2008).
- [4] Huh, S. & Shim, D.H. : A Vision-Based Automatic Landing Method for Fixed-Wing UAVs, J Intell Robot Syst 57, 217-231 (2010).
- [5] 日本太陽エネルギー学会編 太陽エネルギー読本、オーム社(1975)。
または、
http://www.sankometal.co.jp/prod/technology/pdf/03_1_1.pdf
- [6] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>
- [7] (株)ライブラリー：資料 GE60 Monochrome Camera Specifications.
- [8] 浜松ホトニクス(株)：データシート 赤外 LED L1915 シリーズ。
- [9] 富士フイルム(株)：ハンドブック 富士フイルム光学フィルター。
- [10] 久保田広：光学、岩波書店(1964)。
- [11] <http://www.nmij.jp/~photo-rad/opt-rad/outline/main.htm>
- [12] 浜松ホトニクス(株) 技術資料 LED。
- [13] (株)ライブラリー：Radish リアルタイムトラッカー。
<http://www.library-inc.co.jp/products/nanohana/01.htm>
- [14] (株)ライブラリー：Move-tr/2D 2次元動画計測ソフトウェア。
<http://www.library-inc.co.jp/products/cosmos/01.htm>
- [15] (株)ライブラリー：GE60/W ギガネット画像入力システム。
<http://www.library-inc.co.jp/products/himawari/09.htm>
- [16] 浜松ホトニクス(株)：データシート Si フォトダイオード S1087/S1133 シリーズ。
- [17] 浜松ホトニクス(株)：技術資料 Si フォトダイオード 特性と使い方。
- [18] (株)ライブラリー：Move-tr/2D 2次元動画計測ソフト User's manual.

付録. 画像情報から機体の位置と姿勢の計算

1. レンズの焦点距離

5.3.(1)の地上視認性確認で、左右光源（光源間距離 0.683 m）がカメラから 50 m の距離にある時、画像上での光源間距離は 16.96 画素であった。カメラレンズの焦点距離を f 画素とすると、

$$0.683 : 16.96 = 50 : f \quad (\text{付 1})$$

(付 1)式より、レンズの焦点距離 f は 1242 画素となる。焦点距離のカタログ値 12 mm と、CCD 画素の大きさ $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ から計算したレンズの焦点距離：

$$1212 \text{ 画素} = 12 \text{ mm} / 0.0099 \text{ mm}$$

と、ほぼ同じ値になっている。

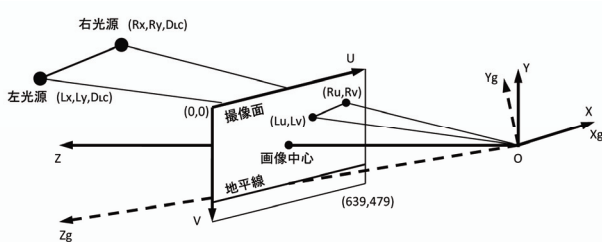
2. 光源・カメラ間距離の計算

1の左右光源とカメラを使って、左右光源がカメラから DLC m の距離にある時の画像上での光源間距離を ILC 画素とすると、

$$0.683 : ILC = DLC : f \quad (\text{付 2})$$

(付 1)、(付 2)式より、

$$DLC = 848 / ILC \quad (\text{付 3})$$



付図 座標系

横軸を U 軸、縦軸を V 軸、左上端を原点 $(0, 0)$ 、右下端を $(639, 479)$ 、座標軸目盛りを画素となる様に画像座標を決める。使用したカメラの CCD 画素は正方形なので、得られるデジタル画像の画素も正方形画素になる。

画像上の左右光源の位置をそれぞれ (Lu, Lv) 、 (Ru, Rv) とする、画像上での光源間距離を ILC 画素は

$$ILC = \text{SQRT}((Lu - Ru)^2 + (Lv - Rv)^2) \quad (\text{付 4})$$

したがって、(付 3)、(付 4)式より、画像上の左右光源の位置情報より、光源・カメラ間距離を計算することが出来る。

ただし、この計算では 2 光源間を結ぶ線はカメラ光軸に直交している（機体のヨー角を 0 度）と仮定し、カメラ・機体間距離を求める計算を簡略化している。カメラ光軸に対する機体軸の傾きは画像からも求めることが可能であるが、誤差が大きく、機体のヨー角は 10 度程度なので、機体のヨー角を 0 度と仮定しても距離計算に与える影響は少ない。

3. カメラ光軸に対する機体の位置

カメラ光軸が画像を垂直に貫く位置（画像中心）の画像座標を $(320, 240)$ とする。機体の画像上の位置 (Bx, By) は左右 2 つの光源の中点とする。カメラレンズの焦点距離を 1242 画素とすると、水平方向と上下方向のカメラ光軸からの機体の偏差 B_H と B_V は、

$$B_H = DLC * (Bx - 320) / 1242$$

$$B_V = DLC * (-By + 240) / 1242$$

画像から機体の位置を求めた結果を、カメラ位置を原点、フレーム No. を横軸、水平方向と上下方向のカメラ光軸からの偏差 B_H と B_V を縦軸に取ったものを図 19 に示す。

さらに、水平線の高さを画像から画像座標 V を 390 と推定し、画像中心の V 座標を 240 から、カメラ光軸は地表面から上向きに 7 度傾いていることを推定することと、カメラ光軸からの上下偏差を地表面からの高度に換算することが可能になる。カメラは地表面上にあるので、カメラ座標の X 軸周りに回転することになるので、水平偏差は変わらない。結果を図 20 に示す。

より正確な機体の位置をカメラ画像から求めるには、カメラ較正が必要になるが、今回の様な場合は、機体がカメラに近づくにつれて機体の像が大きくなるので、カメラ較正無しでも十分な精度が期待出来る。

4. 機体の姿勢

2 光源間を結ぶ線はカメラ光軸にほぼ直交しているので、機体のヨー角とを 0 度とすれば、画像からロール角を求めることは容易である。この条件を用いて機体のロール角を求めた結果を図 21 に示す。

接地点横方向にカメラを設置することが出来れば、画像からピッチ角を求めることが可能だが、接地点上方にカメラを設置することは難しいので、画像からヨー角を求めることは難しい。

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-10-011

発行 平成 22 年 12 月 28 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (有)ノースアイランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 050-3362-6224 FAX : 029-868-2956

© 2010 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

