

モーションフローセンサを用いた 対地速度計測システムの開発

Development of ground speed measurement system using motion flow sensor

○野平 暁彦, 佐藤 淳

○NOHIRA Akihiko, SATOH Atsushi

岩手大学

Iwate University

キーワード： 対地速度計測 (ground speed measurement), UAV(Unmanned Aerial Vehicle),
Prop-hanging, オプティカルフロー (optical flow)

連絡先： 〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻
佐藤 淳, Tel: 019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) とは自律的に飛行可能な無人航空機のことである。そのため、人間が介入し難い危険な場所での調査などへの利用が期待され、その用途をさらに広げるための開発が進められている。

固定翼 UAV の安全な回収方法の 1 つとして、図 1 に示す Prop-hanging, すなわち機首を鉛直上向きにした姿勢でロール角速度を 0 にした飛行方法を利用することが試みられている¹⁾²⁾。



図 1 Prop-hanging 状態での飛行の様子

藤田ら²⁾は、UAV の屋外での飛行において

Prop-hanging 状態での姿勢安定化を達成したが、安全回収技術の実現に向けて、水平方向の対地速度制御の実現が課題として残されている。

そこで、本研究では、将来的に Prop-hanging 飛行時の水平方向速度の制御への応用を目指して、モーションフローセンサを用いた対地速度計測システムの開発を行い、その有効性を確認する。

2. モーションフローセンサ

モーションフローセンサとは、別名コンピュータマウスセンサとも呼ばれ、光学マウスに使用する目的で開発されたセンサである。モーションフローセンサは連続的に取得した画像情報からオプティカルフローの値を計算し、マウスの移動速度を推定する。図 2, 図 3 はマウスを左下に移動させた際のキャプチャー画像である。2

つのフレームに共通する特徴を持つ部分の移動量を計測することで、マウスの移動量と移動方向を推定する⁴⁾。

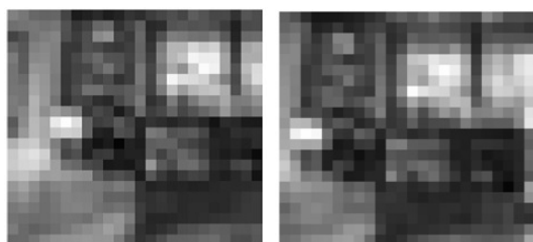


図2 $t = 0ms$ 図3 $t = 0.67ms$

本研究で使用したセンサ基板は3DRobotics社製の製品で、Avago社製の光学式マウスセンサ(ADNS-3080, 図4, 表1)と焦点距離8mmのレンズを搭載している(図5, 表2)。キャプチャした面の平均移動量, Surface Quality (SQUAL)をSPI通信によって出力する。



図4 ADNS-3080 センサ

表1 ADNS-3080 諸元

| | |
|-----------|---------------|
| 解像度 | 30 × 30 |
| 最大加速度 | 40inch/s, 15g |
| 最大フレームレート | 6469frames/s |
| 電圧・電力 | 3.3V |

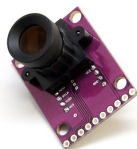


図5 3DRobotics社製 Optical Flow Sensor

表2 Optical Flow Sensor 諸元

| | |
|-------|--------|
| 重量 | 8.8g |
| 画角 | 20.08° |
| 電圧・電力 | 3V~5V |

2.1 モーションフローセンサの仕組み

オプティカルフロー³⁾とは、輝度に基づいて計算される画像上の各点の移動ベクトルの推定値である。連続した画像の各フレームでの対応する点を検索し、対応する点の位置の差を移動ベクトルとすることで推定される。図7は図6のようにモーションフローセンサで撮影している物体が移動することで画像の流れが発生した時の撮影面の一部の様子である。モーションフローセンサはセンサが撮影するx軸方向とy軸方向の画素の平均移動量を出力する。図7の例では、センサから返される値はx軸方向は $(3+4+4)/3 = 3.7$ 、y軸方向は0となる。

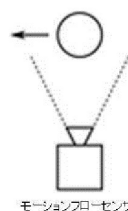


図6 撮影の様子

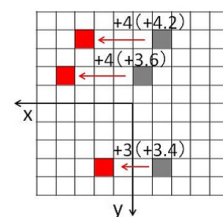


図7 撮影面

2.2 SQUAL(Surface Quality)

ADNS-3080はSurface Quality (SQUAL)と呼ばれる指標を出力する。この値が10以上になるように計測することが推奨されている⁵⁾。また、暗い環境(図8)や単一色の面(図9)など輝度の変化に乏しい場合、SQUALの値が0に近くなりオプティカルフローを正常に検知できない。



図 8 暗い環境 図 9 単一色の面

2.3 検知できないモーション

基本的には、検知可能なモーションは並進運動に限られ、センサ自身の自転(図 10)や拡大、縮小方向の移動(図 11)は、オプティカルフローの総和をとったとき 0 となってしまうためモーションを検知できない。

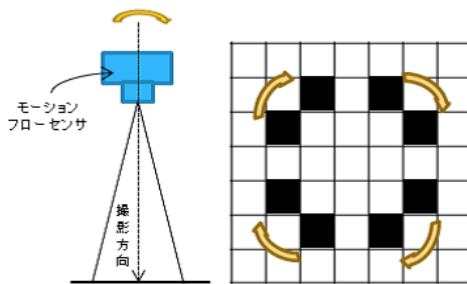


図 10 自転

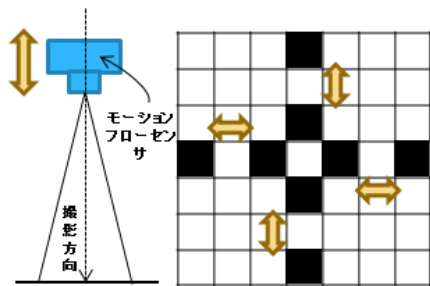


図 11 拡大縮小

2.4 屋外での計測

約 17m の屋上から地表を撮影した時の SQUAL 値を計測することで屋外環境での有効性を検証する。オプティックフローセンサーは常に円を描くように計測中動かし計測を行う。サンプル回数を 1000 回とする。なお、撮影時の天候は曇りで、図 12 に撮影風景を示す。



図 12 撮影風景

実験を 3 回行い、サンプル回数 1000 回の実験結果の平均と SQUAL 値が 10 未満の回数を表 3 に示す。

表 3 実験値(サンプル回数 1000 回)

| | SQUAL 平均値 | SQUAL 値 10 未満 [回数] |
|------|-----------|--------------------|
| 1 回目 | 42.174 | 4 |
| 2 回目 | 36.831 | 29 |
| 3 回目 | 44.552 | 2 |

17m の距離がある地表を面として認識できることが分かる。また、屋外の明るさで使用可能であることが分かる。

3. モーションフローを利用した対地速度計測

モーションフローセンサーの座標軸を図 13 に示す。撮影方向が計測対象に対し鉛直かつ、センサから計測対象までの距離が既知であるとき、 x 軸方向にモーションフローセンサーが移動した時の x 軸方向の移動量は図 14 の幾何学的関係より、式 (1) のように求められる。また、モーションフロー計測に要した時間から x 軸方向の速度は式 (2) より求められる。

$$l_x = \frac{2a\delta_x}{kp_x} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

$$v_x = \frac{l_x}{\delta_t} \quad (2)$$

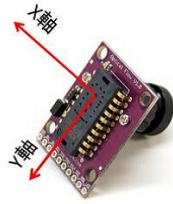


図 13 モーションフローセンサの座標軸

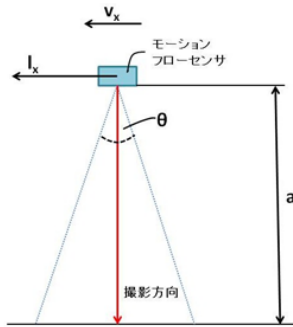


図 14 移動するモーションフローセンサ

表 4 式 (1), 式 (2) 中の記号

| 記号 | 内容 |
|------------|---------------------------|
| l_x | x 軸方向の移動距離 |
| v_x | x 軸方向の速度 |
| a | モーションフローセンサのレンズから撮影面までの距離 |
| δ_x | x 軸センサー出力値 |
| δ_t | 1 サンプル周期の時間 |
| p_x | モーションフローセンサの x 軸の解像度 |
| θ | 画角 |
| k | 調整係数 |

4. 超音波センサ

超音波センサは、センサヘッドから超音波を発信し、対象物で反射してくる超音波を再度センサヘッドで受信する。音波の発信から受信までの時間を計測することで対象物との距離を計測する。

音波であるため一定の広がりのある検出範囲があり、対象物との最短距離を計測する。また、音波は空気を媒介として伝播するため、温度や風の影響を受けやすい。

計測対象までの距離情報を得るために超音波センサ (MaxBotix 社製 LV-MaxSonar-EZ0) を用いる MaxBotix 社製の LV-MaxSonar-EZ0 を図 15、諸元を表 5 に示す。

また、距離計測実験を行い、性能通りの距離が計測可能であること確認した。

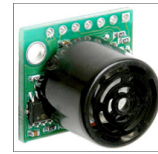


図 15 LV-MaxSonar-EZ0

表 5 LV-MaxSonar-EZ0 諸元

| | |
|--------|---------|
| 重量 | 4.3g |
| 検出範囲 | 0~6.45m |
| 分解能 | 2.54cm |
| 読み取り周期 | 最大 50ms |

5. 対地速度計測システム

開発した対地速度計測システム (図 17) の配線図を図 16 に示す。なお、PC と Xbee マイコン間、mbed マイコンと Xbee 間ではシリアル通信、mbed とモーションフローセンサ間では SPI 通信、Xbee 間同士では無線通信が行われる。

計測の流れは以下のように行う。オプティカルフローの計測が完了後、対象物までの距離を計測し、オプティカルフローの値を計測。その後、1 サンプル周期前の距離の計測値とこの周期での距離の計測値の平均を求め、対地速度を求める。

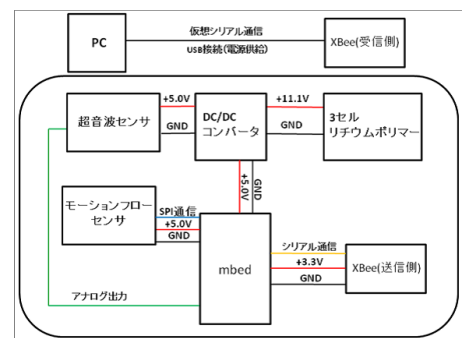


図 16 配線図

6. 対地速度計測実験

振り子に取り付けたモーションフローセンサで計測される対地速度と位置エネルギーによって求められる振り子の最下点の速度を比較し、有

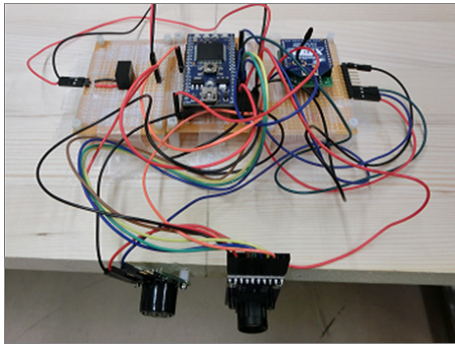


図 17 対地速度計測システム

効性を確認する。図 18 は、土台となる板に開発した対地速度計測システムを取り付けた 2 支点の振り子実験装置を示す。また、実験装置でキャプチャする物体は、屋内で十分に明るく、図 18 のように SQUAL 値が 10 以上になるとあらかじめ確認した特徴のある画像を床に敷く。本実験は図 19 で示される初期位置から振り子を静かに離すことで速度計測を行う。また最下点の高さ $a = 0.42m$ 、初期位置 $h = 0.56m$ 、糸の長さ $l = 2.0m$ である。実験は 5 回行う。

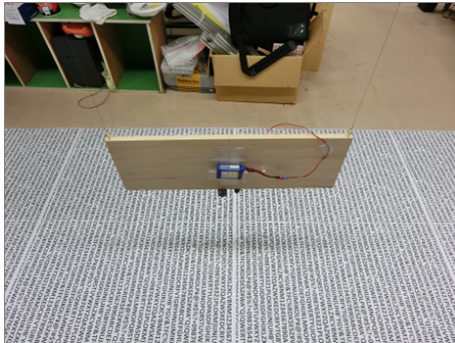


図 18 実験装置

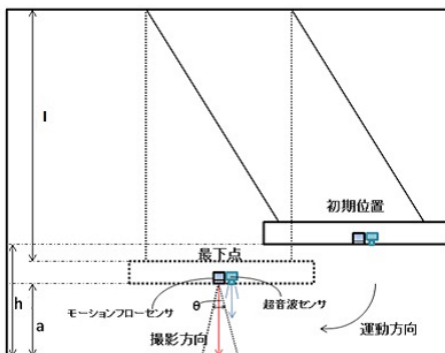


図 19 振り子見取り図

7. 実験結果

7.1 実験結果

図 20, 図 21, 図 22 は、それぞれ実験 1 回分の超音波センサによる計測距離 a 、モーションフローセンサによる計測値 δ_x 、計測された速度 v_x をプロットしたものである。また、他の 4 回の実験結果をプロットしたのも同様の変化を示した。

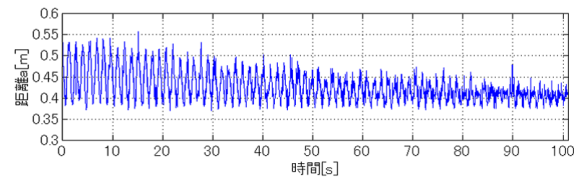


図 20 計測距離 a

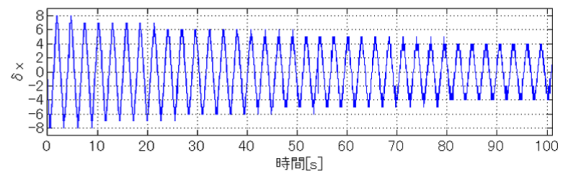


図 21 計測値 δ_x

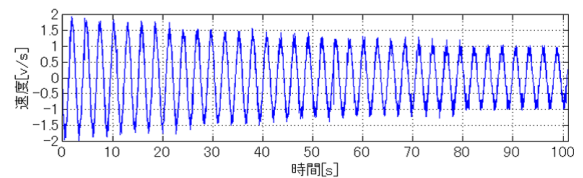


図 22 速度 v_x

7.2 最下点の選択

図 23 は実験 1 回分の計測値 δ_x でセンサから出力された振り子運動 4 周期分（サンプル周期 $20ms$ ）をプロットしたものである。図 23 の区間 1 は初期位置から手を離し、1 周期分の振り子運動した区間である。この区間では、手を離れた際の影響により測定値は非定常であると考えられる。そのため、区間 2 以降を定常であるとし、比較的減衰の少ない 2 周期目の振り子運動でセンサより出力される値について考える。

図 23 での D_1 , D_2 , D_3 のサンプルの時刻では、センサから 0 の値が出力されている。この時、振り子の速度は 0 であると考えられ、振り子は初期位置の高さにあると考えられる。一方、図 23 で D_1 と D_2 , D_2 と D_3 それぞれの間にある B と C の部分は、振り子の最下点付近であると考えられる。モーションが発生してからモーションがない状態の直前までの計測時間の半分の時間に近い計測点 2 つの計測値を、振り子が最下点にある時の計測値とする。

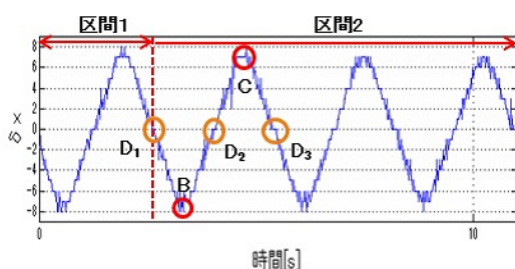


図 23 最下点の値の選択方法

B 点, C 点で計測された 2 点分のモーションフローセンサの計測値の平均をとり, 式 (2) に代入し, 最下点での平均速度 v_{x_δ} を算出する。また同様に, 速度 v_x から最下点での平均速度 v_{x_a} を求める。その結果を表 6 に示す。

表 6 実験 5 回の平均値

| | v_{x_δ} 平均値 [m/s] | v_{x_a} 平均値 [m/s] |
|-----|--------------------------|---------------------|
| B,C | 1.84 | 1.71 |

7.3 相対誤差

速度と位置エネルギーの関係から分かる最下点での理論速度は約 1.88m/s である。また, 表 6 の結果から B, C 点での平均速度 v_{x_δ} と理論速度の相対誤差は 2.1%, 平均速度 v_{x_a} と理論速度の相対誤差は 9.0% である。対地速度計測システムの有効性を確認できる。

8. 結言

本研究では, モーションフローセンサを用いた対地速度計測システムの開発を行い, 屋内で十分な明るさのある環境での 2[m/s] 以下での対地速度計測を確認した。

今後の発展とし, 屋外での対地速度計測を実現性を確認し, 慣性測定装置 (IMU) を用いることで, モーションフローセンサが計測対象に対して鉛直でない場合の対地速度計測可能なシステムの開発を行っていきたい。

参考文献

- 1) Scherer.S, Singh.S, Chamberlain.L, Elgersma.M, "Flying fast and low among obstacles: methodology and experiments", The International Journal of Robotics Research, 27(5), 549-574, (2008)
- 2) 藤田芳大, 佐藤淳, "固定翼 UAV の Prop-hanging 飛行状態での姿勢安定化に関する研究", 日本航空宇宙学会, (2012)
- 3) 谷内田正彦, "ロボットビジョン", 8 章, 昭晃堂, (1990)
- 4) ADNS-3080DataSheet,AvagoTechnologies, May, 24, (2012)
- 5) Optical Mice and How They Work, AvagoTechnologies, November, 6, (2008)