

## 複眼視覚航法を用いた航空機・宇宙機の運動推定システム

HOKAMOTO, Shinji  
Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

<https://hdl.handle.net/2324/4479732>

---

出版情報 : Journal of The Society of Instrument and Control Engineers. 57 (4), pp.266-271, 2018-04-10. The Society of Instrument and Control Engineers

バージョン :

権利関係 : (c) 2018 The Society of Instrument and Control Engineers

# 複眼視覚航法を用いた航空機・宇宙機の運動推定システム

外 本 伸 治\*

\*九州大学 大学院工学研究院 福岡県福岡市西区元岡 744  
 \*Faculty of Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, Japan  
 \*E-mail: hokamoto@aero.kyushu-u.ac.jp

キーワード：自律航法 (autonomous navigation), オプティックフロー (optic flow), 運動推定 (motion estimation), 広域統合 (wide field integration), 感度関数 (sensitivity function).  
 JL 0004/18/5704-0266 ©2018 SICE

## 1. はじめに

本解説では、ハエやトンボなどの飛翔する昆虫がもつ複眼認識システムを、工学的にどのように構成するかについて説明する。このシステムを航空機・宇宙機に適用すれば、未知環境においても自律航行にとって有用な航法システムとなる。航空機・宇宙機に搭載されるシステムには、まず小型・軽量であることが要求される。つぎに自律システムでは、搭載計算機ですべての処理がなされる必要があるため、計算負荷が小さいことが重要な要素となる。さらに探査・探索ミッションでは環境が未知であることも多く、環境に対するロバスト性も要求される。これらの要求に対し、たとえばハエは複眼で得られた画像イメージを砂粒よりも小さいと言われる脳で処理し、未知環境はもちろん、ハエ叩きが高速で近づく状況においても回避運動を実現している。

近年、小型無人航空機を用いた空撮や空中配送などのミッションが注目され、自律化の研究も盛んに行われている。その多くの研究において、GPS から得られる位置情報が大きな役割を担っている。これに対し室内や深宇宙のように GPS 信号が得られない環境では、別のセンサにより位置・姿勢および速度・角速度を推定しなければならない。レーザーセンサは、対象までの距離を高精度・低計算量で得ることができるが、レーザーから僅かでもずれた方向にある物体を検知することはできない。また、重量や消費エネルギー（バッテリー）なども大きな問題になる。一方、画像センサ（カメラ）は小型・軽量であるが、画像からステレオ法などで距離情報を得ようとするれば搭載計算機に大きな負荷がかかる。そのため、ある程度以上の速さで移動するシステムへの適用は難しい。

ここでは画像データを直接用いるのではなく、画像センサから一旦オプティックフローを求め、その情報を広範囲に統合する“複眼視覚航法”について説明する。これは、昆虫の複眼における視神経回路網で行われていると考えられている情報処理を工学システムで模擬しようとするものである。（工学分野の研究ではオプティカルフロー (optical flow) とも呼ばれたが、生物学の分野ではオプティックフロー (optic flow) という表現がよく用いられてきた。本解説の手法は、生物学的な研究をベースとし

ているため、後者の表現を用いることにする。）

実は、オプティックフローを用いた移動体の運動推定や環境認識の研究は、50年以上も前から行われている<sup>1)</sup>。しかし、移動体の運動と周囲環境の両方に未知変数が含まれるため、精度よく推定することは困難であった。そのため、あらかじめ指定された画像上の対象をトラッキングすることに適用された例や、既知（もしくは想定した）環境下での速度推定に利用された例はあるが、未知環境における一般的な自律ミッションへの適用は難しかった。これに対し Humbert<sup>2)</sup> は、広範囲のオプティックフローを統合することで、移動体の運動変数を精度良く推定する手法を提案した。これがオプティックフローの広域統合法 (Wide-Field-Integration of optic flow) であり、ここでは WFI of optic flow と表記する。大ざっぱに言えば、この手法は広範囲にわたるオプティックフローを統合することで、未知環境の凹凸を平均化した仮想的な平面に対する相対的な運動変数を推定する手法である。

以下では、その基礎となる関係式を紹介する。

## 2. 昆虫の複眼とその神経回路網

複眼は、個眼と呼ばれる多数の小さな目の集合体である。個眼は、単眼と異なり、一つだけでは図形（環境）を認識することはできない。しかし、個眼には数個の視細胞があり、視細胞からの信号を視小葉 (lobula) と呼ばれる視神経回路網に入力すると、lobula plate tangential cells (LPTCs) と呼ばれる場所で視細胞空間の時間変化を捉えることができる<sup>3), 4)</sup>。これより、運動変数を得ていると考えられている。

個眼の数は、昆虫やその種類ごとに異なり、たとえばハエであれば 2,500~6,000 個、トンボは 20,000~30,000 個である。これらの数は多いようにも思われるが、通常のカメラ画像がもつ数百万画素や、人間の目の画素数 (5 億以上) に比べれば、圧倒的に少ないことに注意されたい。一方で、カメラの画角に相当する視野角はきわめて大きく、トンボの視野角は 360 度をカバーしていると言われる。すなわち昆虫の複眼は、解像度は低い広い視野角をもつシステムであると言える。

### 3. WFI of optic flow の原理

#### 3.1 Optic flow の基礎式

地表面付近を飛行している移動体を考えよう (図1を参照). 地表に固定した慣性座標系を  $F_t(x_t, y_t, z_t)$ , 移動体の質量中心に原点をもち移動体に固定された座標系を  $F_b(x_b, y_b, z_b)$  とする.  $F_b$  の原点にある画像センサがもつ画像面を球面と考え, 画像面上の光受容体が地表面上の特徴点を捉えたとする. このとき, 地表面上の特徴点までのベクトル  $Q$  はつぎのようになる.

$$Q = [\sin \beta \cos \gamma \quad \sin \beta \sin \gamma \quad \cos \beta]^T \quad (1)$$

ここに,  $\gamma$  と  $\beta$  は球状画像面上の光受容体の位置を表わす方位角と俯角であり, それぞれ  $x_b$  軸と  $z_b$  軸からの角度である. 座標系  $F_b$  における移動体の速度ベクトルを  $v = [u \ v \ w]^T$ , 角速度ベクトルを  $\omega = [p \ q \ r]^T$  とし, 周囲には移動体以外に運動しているものがないとすると, 相対速度場であるオプティックフロー  $\dot{Q}$  はつぎのように表現できる<sup>5)</sup>.

$$\dot{Q} = -\omega \times Q - \mu[v - (v^T Q)Q] \quad (2)$$

ここに  $\mu$  は移動体から特徴点までの距離の逆数であり, 接近度関数 (nearness function) と呼ばれる. 図1に示すように, オプティックフローは画像面上に方位角方向と俯角方向の成分をもち, それらは以下のように表わされる (画像面に垂直方向の成分は0である).

$$\begin{aligned} \dot{Q}^\gamma &= pc\beta c\gamma + qc\beta s\gamma - rs\beta + \mu(us\gamma - vc\gamma) \\ \dot{Q}^\beta &= ps\gamma - qc\gamma - \mu(uc\beta c\gamma + vc\beta s\gamma - ws\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに,  $c(*) = \cos(*)$  および  $s(*) = \sin(*)$  を表わす.

#### 3.2 WFI of optic flow における基本的考え

WFI of optic flow では, 文字どおり, 広領域におけるオプティックフローを統合する. このとき, 離散点で得

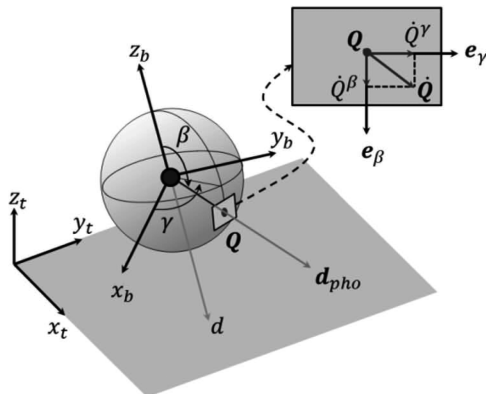


図1 画像面のモデル化とオプティックフロー

られるオプティックフローを統合するために, 離散データをつなぐ“感度関数 (sensitivity function)”を球状画像面上に設定する. (3) 式の二つの成分に応じて,  $j$  次の感度関数を  $F_j (= [F_j^\gamma \ F_j^\beta]^T)$  とすれば, オプティックフローを統合した出力は以下のように表現できる<sup>6),7)</sup>.

$$y_j = \int_{S^2} \dot{Q}^T F_j d\Omega = \int_{S^2} (\dot{Q}^\gamma F_j^\gamma + \dot{Q}^\beta F_j^\beta) d\Omega \quad (4)$$

ここに,  $S^2$  は球状画像面全体を表わし,  $d\Omega = \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma$  は球面の立体角である.  $M$  次までの感度関数を用いれば, 出力もつぎのように  $M$  の次元をもつベクトルとなる.

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_M]^T \quad (5)$$

ここで, 地表面を無限に続く水平面と仮定すると, 接近度関数は, つぎのように表現できる.

$$\mu = \frac{-s\beta c\gamma s\theta + s\beta s\gamma s\phi c\theta + c\beta c\phi c\theta}{z} \quad (6)$$

ここに,  $\phi$  と  $\theta$  は3-2-1オイラー角表現における移動体のロール角とピッチ角であり,  $z$  は移動体の高度である. 上式にヨー角が含まれない理由は, 無限に続く水平面ではヨー角による違いがオプティックフローに影響を及ぼさないためである. したがって, 無限に続く水平面を仮定すると, 移動体の運動変数 (位置・姿勢とその時間微分) に対する出力  $y$  を (3)~(6) 式から表現できる.

一方で, オプティックフロー  $\dot{Q}$  をセンサから得ることができれば, (4), (5) 式から出力  $y$  を求めることができる. その結果, 移動体の運動変数を

$$x = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (7)$$

とすれば, 二つの方法で求めた出力  $y$  は, つぎの関係式で表現できる. ((3) 式が (7) 式の運動変数に対して線形な関係式であるため, (8) 式も  $x$  に対して線形となる.)

$$y = Cx \quad (8)$$

ここに  $C$  は  $M \times 6$  の行列であり,  $M$  が6より大きく  $C$  がフルランクであるとするれば, 運動変数ベクトル  $x$  は次式により推定できる.

$$x = C^\dagger y \quad (9)$$

ここに  $C^\dagger$  は行列  $C$  の擬似逆行列である. 行列  $C$  の要素は移動体の姿勢角・高度および光受容体の配置に依存する非線形関数であるが, それらを定めると, 各要素は数値的に定まる. したがって擬似逆行列  $C^\dagger$  を用いれば, (9) 式より運動変数ベクトル  $x$  は, 収束計算を必要とせず高速に求められる.

では、WFI of optic flow において無限に続く水平面を仮定するとはどういうことであろうか？まず、以前より行われているオプティックフローの研究では、一つもしくは少数のオプティックフローから移動体の運動や環境を推定しようとしたことに注意されたい。この場合、接近度関数  $\mu$  が地表面の凹凸に強く影響されるために、精度よく推定値を得ることは難しくなる。これに対し、WFI of optic flow における無限に続く水平面とは、凹凸を平均化した仮想的な平面を意味する。すなわち、凹凸表面に対してのオプティックフローの一つ一つは、凹凸に依存する距離の違いにより影響を受けるが、広い領域で統合処理すれば凹凸表面による影響が相殺され、平面を仮定して得られる運動推定量で近似できることを意味する。

### 3.3 WFI of optic flow の問題点と対処

3.2 節で説明した WFI of optic flow の理論を実際のシステムに適用する際には、いくつかの問題がある。その中の一つは、積分領域  $S^2$  である。理論では球面全体にわたってオプティックフローを統合するが、実際のシステムにおいて全方向のオプティックフローを求めることは難しい。通常オプティックフローは、微小時間間隔で撮影された画像間にマッチング手法を適用して対応点を求め、そこから速度ベクトルとして求められる。しかし、広角レンズを用いても全方向に渡る画像を取得することは難しく、また得られてもそのような画像には大きな歪みが生じるため、精度よくオプティックフローを広範囲に求めることは難しい。したがって、視野角がさほど大きくない複数の画像センサを組み合わせることで広範囲のオプティックフローを得ることが現実的である。しかしその場合は、(i) 画像センサをいくつ用いるか、(ii) 画像センサをどの方向に取り付けるか、などが推定精度に影響を及ぼす。さらに画像面の形状も、理論では球状画像面を想定しているが、通常の画像センサでは平面であるため、両者を関連づける変換式が必要となる。

もう一つの問題は感度関数である。感度関数は、個眼において離散的に得られるオプティックフローを統合するために導入された概念である。しかし、「実際の複眼システムにおいて信号がどのように処理されているか完全には解明されておらず、どのような関数を用いるべきなのかははっきりしない」という本質的な問題がある。また感度関数を定めても、(4) 式の積分計算の負荷がきわめて大きいことも問題となる。そこでわれわれは、積分演算を Riemann 和で置き換えることを提案し、そのような置き換えをしたとしても推定精度が低下しないことを示した<sup>9)</sup>。これは、つぎの二つを意味する。一つは、積分計算が不要になるので、計算負荷の低減・計算速度の大幅向上が可能になる。もう一つは、実際の複眼システムとの対応にこだわる必要はなく、感度関数はオプティックフローをつなぐための単なる関数と見なしてもよいことになる。(その結果、感度関数として、オプティックフ

ローが一次的に分布する場合にはフーリエ級数が、二次元的に分布する場合であれば球面調和関数が、よく用いられる。)

なお、(図 1 のモデルのように) 三次元運動する移動体に Riemann 和を用いて WFI of optic flow を適用する場合、以下にも注意されたい。積分を Riemann 和に置き換える操作では、感度関数は光受容体の位置におけるスカラー値となる。そのためオプティックフローの二方向成分を (4) 式のように単純に足し合わせると、両成分の独立性が失われてしまう。そこで、成分ごとの独立性を維持するために、感度関数  $F_j$  をつぎの形とする<sup>9)</sup>。

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^\gamma & 0 \\ 0 & F_j^\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

その結果、 $M$  次までの球面調和関数に対して、出力ベクトル  $y$  はつぎのように  $2M$  の成分をもつベクトルとなる。

$$y = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \dot{Q}^\gamma(\gamma_k, \beta_k) F_1^\gamma(\gamma_k, \beta_k) \Delta\Omega \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N \dot{Q}^\gamma(\gamma_k, \beta_k) F_M^\gamma(\gamma_k, \beta_k) \Delta\Omega \\ \sum_{k=1}^N \dot{Q}^\beta(\gamma_k, \beta_k) F_1^\beta(\gamma_k, \beta_k) \Delta\Omega \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N \dot{Q}^\beta(\gamma_k, \beta_k) F_M^\beta(\gamma_k, \beta_k) \Delta\Omega \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここに  $N$  は、光受容体の数 (オプティックフローの数) である。これを (8) 式の形式で表現すれば、 $C$  は  $2M \times 6$  の行列となる。なお行列  $C$  の正則性は、大きな  $M$  と十分な数の光受容体を用いることで保証できる。

## 4. WFI of optic flow 特性の検証

複眼視覚を適用した運動推定手法の特性とその有効性を示すために、計算機シミュレーションおよび検証実験において検討した結果の一例を以下に示す。

### 4.1 数値計算による WFI of optic flow の特性検証

WFI of optic flow においてデータがどのように処理されていくのかを具体的に理解してもらうために、つぎのような条件で飛行する移動体を考えよう。

〈飛行条件〉

高度：1 [m]

姿勢角： $\phi = \theta = 10$  [deg],  $\psi = 0$  [deg]

速度： $u_t = 2$  [m/s],  $v_t = w_t = 0$  [m/s]

角速度： $p = q = r = 0$  [rad/s]

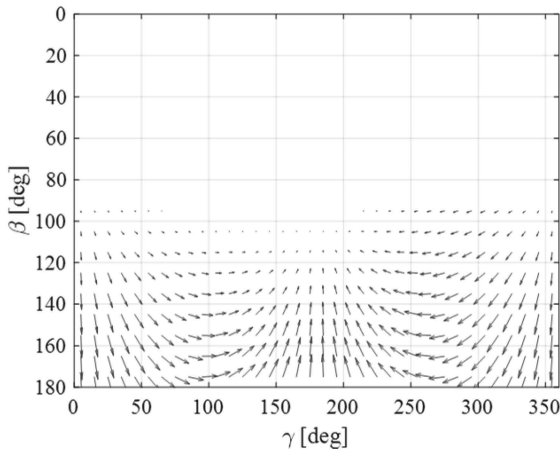


図2 オプティックフロー

これは一定高度を飛行するレベルフライトであり、飛行速度は慣性座標系  $F_t$  で定義している。オプティックフローは、この移動体に搭載した画像センサから得られるとし、画像センサは光軸中心が座標系  $F_b$  の  $-z_b$  方向に一致するように取り付けられているとする。

まず、このような飛行状態で得られるオプティックフローの全体図を示そう。地表面を平坦な水平面と仮定し、センサにより計測されるオプティックフローには全くノイズがないとした場合、図2のようなフローが得られる。横軸が方位角、縦軸が俯角であり、視認性をよくするために、図には各方向に対して10度ごとに配置された光受容体を得るオプティックフローだけを描いている。

前章までに述べたように、WFI of optic flow は、未知環境においても移動体の運動状態を推定できる。そこでここでは、未知の地表面凹凸の代わりとして、オプティックフローにノイズを加えることにする。一様乱数を用いて平均値0で標準偏差が0.3 rad/sとなる誤差を、平坦な水平面に対するオプティックフローの方位角・俯角方向の各成分に付加する（実際には、オプティックフローを得る過程においても誤差が生じるので、その分を含めたノイズに相当する）。

実際の画像センサを用いると、得られるオプティックフローの領域は図2の一部に制限される。そこで簡単な例として、 $-z_b$  方向に向けた画像センサの計測領域を、俯角  $\beta$  の範囲だけを変えた3パターン ( $90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ,  $140^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ,  $160^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ) を考えてみよう。各領域に対して(7)式の運動変数を推定した結果を図3に示す。黒実線が  $90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ 、灰色実線が  $140^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ 、黒一点鎖線が  $160^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  の領域におけるオプティックフローから推定した各運動変数の時間履歴である。オプティックフローの総数はいずれも  $N = 3,600$  としており、方位角・俯角方向に対して等間隔に配置された光受容体を想定している。図より、統合する領域が広がると、推定値の振幅が小さくなる

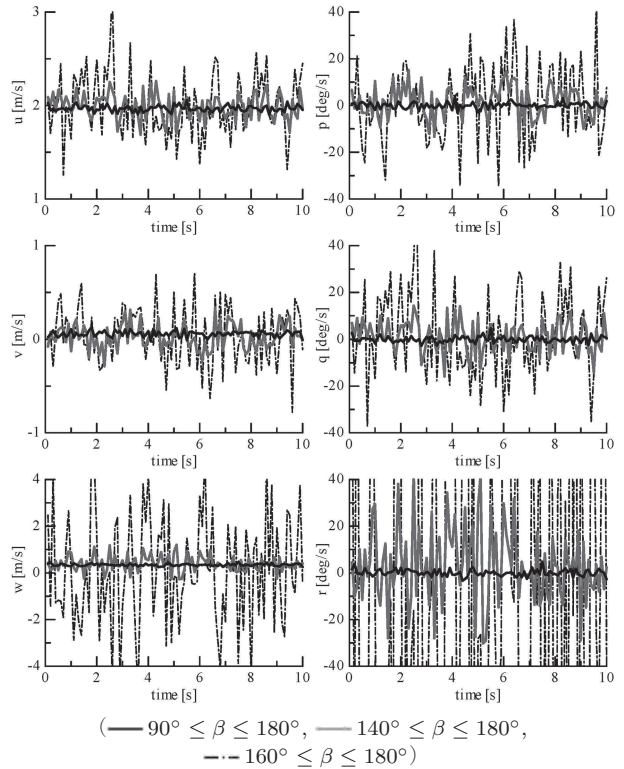


図3 統合領域が運動推定精度に及ぼす影響

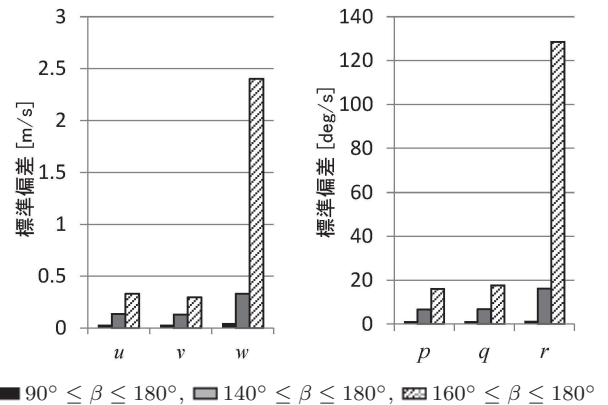


図4 積分領域の違いに対する標準偏差

ことが明らかである。なお、推定された速度 ( $u, v, w$ ) は座標系  $F_b$  での変数であるため、慣性座標系で定義した飛行速度 ( $u_t, v_t, w_t$ ) ではないことに注意されたい。いずれの場合も推定値の平均はほぼ真値に一致しているため、以降では推定値の標準偏差を推定精度と考えよう。図4は標準偏差を比べたもので、積分領域が広がると推定精度が向上していることがわかる。この結果は、昆虫の複眼が広い視野角をもつように進化してきたことに対応していると考えられる。

つぎに感度関数として、(4)式のような足し合わせではなく、(10)式の感度関数を用いることの効果を検証する。飛行条件は上の場合と同じとし、オプティックフローは  $140^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  の領域に等間隔に配置された

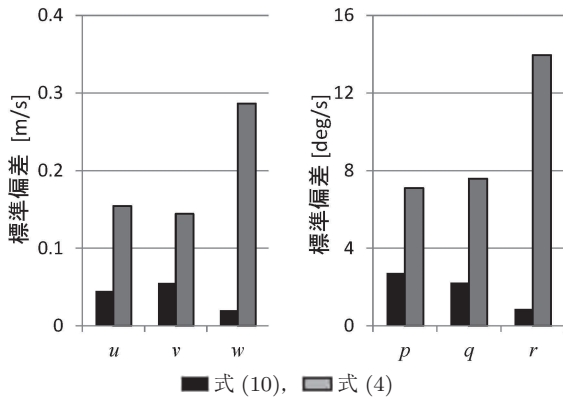


図5 感度関数式(10)による標準偏差の改善

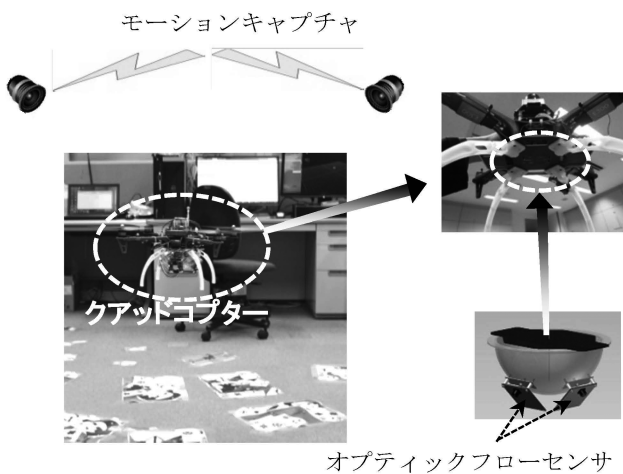
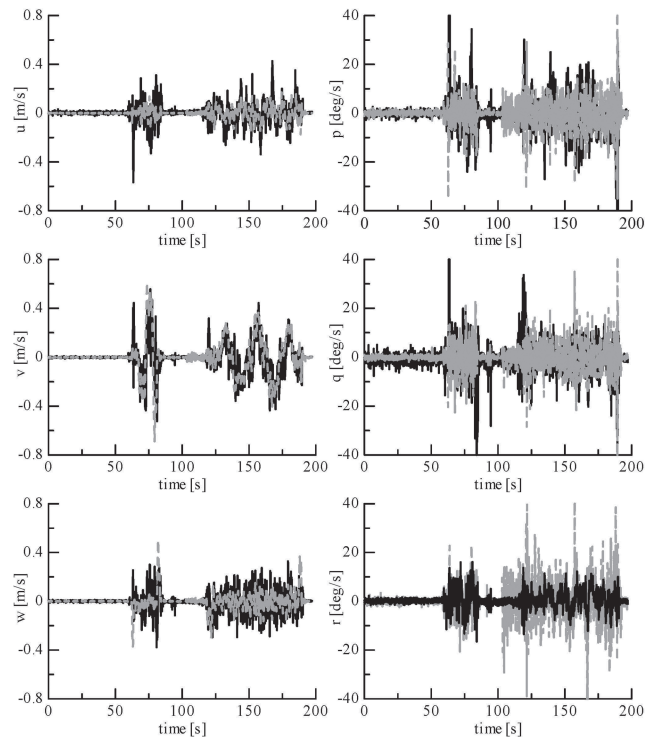


図6 飛行実験のようす

$N = 3,600$  の光受容体で得られるとする。結果の標準偏差を図5に示す。灰色は従来の感度関数  $F_j = [F_j^\gamma \ F_j^\beta]^T$  を用いる場合であり(図4の灰色と同じ)、黒色が(10)式を用いた場合の結果である。いずれの運動変数に対しても、推定精度が2倍以上に改善されていることがわかる。

#### 4.2 実験による WFI of optic flow の特性検証例

WFI of optic flow の実用性を示すために、クアッドコプターにオプティックフローセンサを搭載した検証実験を行った。図6は、飛行実験のようすを示す。オプティックフローはZMP製のOpticalFlow-Zにより得た。このセンサは、 $45.1 \text{ deg} \times 34.6 \text{ deg}$  の視野角のレンズをもち、 $79 \times 59$  個のオプティックフローを10 Hzで出力できるように改良している。このように、実際のシステムでオプティックフローを得ようとする、統合できる領域がかなり制限されることになる。その結果、一つのセンサだけではその領域では同じようなフローパターンを生じる別の運動と間違える可能性がある<sup>10)</sup>。そこで二つのオプティックフローセンサを用い、その適切な取り付け位置は数値シミュレーションを用いた検討により定めた。また、WFI of optic flow による推定精度を検証するために、クアッドコプターの位置と姿勢を高精度のモーシ



(— WFI of optic flow による推定, — モーションキャプチャによるデータ)

図7 飛行実験における運動変数推定の一例

ンキャプチャを用いて測定し、そこから得られた速度・角速度の時間履歴と比較した結果の一例を図7に示す。黒色がWFI of optic flow による推定値であり、灰色がモーションキャプチャから求めた値である。図より、両者の傾向はほぼ一致していると言えるが、まだ差があることもわかる。この差は、複眼航法システムの開発において、さらに検討すべき項目が残っていることを意味する。すなわち、理論と実システムにおいて、画像面が球面か/平面か、画像センサの位置が移動体の質量中心に一致するか/しないか、などである。

## 5. おわりに

ここでは、昆虫の複眼における認識システムを利用した移動体の運動変数推定法について説明した。このシステムは、航空機・宇宙機の自律化にとって重要な特徴(小型・軽量, 低計算量, 環境へのロバスト性)を備えている。前章で述べたように複眼認識システムを工学システムで実現しようとする解決しなければならない課題もあるが、その一方でこのシステムにはさらなる可能性が広がっている。たとえばここでは、移動体の速度・角速度だけの推定に焦点を当てたが、オプティックフローには姿勢角や高度の情報も含まれている。したがって、(現状では繰り返し計算による収束が必要になるが、)オプティックフローセンサだけを用いて、それらの変数も同時に推定することもできるはずである。また、移動体の運動変

数が推定できれば逆に距離を求めることができる。したがって、未知環境における移動障害物を検知・回避できるかもしれない。読者の中でこのシステムの可能性に魅力を持ち、取り組んでみようという人が出ることを期待する。

(2017年12月25日受付)

#### 参 考 文 献

- 1) J. Gibson: The Perception of the Visual World, Houghton Mifflin, Oxford, England, U.K., 117/144 (1950)
- 2) J. S. Humbert: Bio-Inspired Visuomotor Convergence in Navigation and Flight Control Systems, Ph.D. Dissertation, California Inst. of Technology (2006)
- 3) [http://www.scholarpedia.org/article/Function\\_of\\_compound\\_eye](http://www.scholarpedia.org/article/Function_of_compound_eye)
- 4) N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes: From insect vision to robot vision, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **337**, 283/294 (1992)
- 5) 出口：ロボットビジョンの基礎, コロナ社 (2000)
- 6) J. Conroy, G. Gremillion, B. Ranganathan, and J. S. Humbert: Implementation of Wide-Field Integration of Optic Flow for Autonomous Quadrotor Navigation, *Autonomous Robots*, **27**, 189/198 (2009)
- 7) A. M. Hyslop, H. G. Krapp, and J. S. Humbert: Control theoretic interpretation of directional motion preferences in optic flow processing interneurons, *Journal of Biological Cyber-*

*netics*, **103**, 353/364 (2010)

- 8) M. A. Shoemaker and S. Hokamoto: Comparison of Integrated and Nonintegrated Wide-Field Optic Flow for Vehicle Navigation, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **36**, 710/720 (2013)
- 9) N. Kobayashi, M. Bando, and S. Hokamoto: Improvement of Wide-Field-Integration of Optic Flow Considering Practical Sensor Restrictions, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, **7**, 53/62 (2017)
- 10) N. Kobayashi, M. Oishi, Y. Kinjo, and S. Hokamoto: Experimental verification of wide-field-integration of optic flow for state estimation, *Trans. of the JSASS, Aerospace Technology Japan*, **14**, Pd.63/Pd.68 (2016)

#### [著 者 紹 介]

ほかもと しんじ 外本伸治君 (正会員)



1986年九州大学大学院工学研究科応用力学専攻修了, 博士(工学)。佐賀大学助手/助教授, 九州大学助教授/准教授を経て, 現在, 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門教授。非ホロミックシステムの制御, 自律探査システムについての研究などに従事。日本航空宇宙学会, 米国航空宇宙学会などの会員。