

ISSN 0389-4010

UDC 582.7

629.7

629.7.05

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1411

## 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

佐々修一，五味広美，二宮哲次郎，稲垣敏治，濱田吉郎

2000年8月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目次

1. 緒言 .....	2
2. 滑走路画像を用いた位置・姿勢の推定 .....	3
2.1 座標変換 .....	4
2.2 水平線画像によるバンク角の推定 .....	5
2.3 水平線画像によるピッチ角の推定 .....	6
2.4 方位角の推定 .....	6
2.5 横方向変位・高度の推定 .....	7
2.6 前後方向位置の推定 .....	8
3. 精度解析 .....	9
3.1 バンク角の推定精度 .....	9
3.2 ピッチ角の推定精度 .....	10
3.3 方位角の推定精度 .....	10
3.4 高度の推定精度 .....	11
3.5 横方向位置の推定精度 .....	12
4. 画像処理 .....	13
5. 実験システム .....	14
6. 飛行実験 .....	15
6.1 飛行実験 .....	15
6.2 カメラ設置法および位置誤差の補正 .....	16
6.3 飛行実験データ解析結果 .....	16
7. 結言 .....	19
参考文献 .....	20
付録A ハフ変換 .....	21
付録B 計算機視覚による航法 .....	22
付録C 赤外画像, ミリ波画像 .....	29



# 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\*

佐々修一\*\*, 五味広美\*\*, 二宮哲次郎\*\*, 稲垣敏治\*\*, 濱田吉郎\*\*

## Position and Attitude Estimation of An Aircraft Using Image Processing of Runway

Shuichi Sasa\*\*, Hiromi Gomi\*\*, Tetsujiro Ninomiya\*\*,  
Toshiharu Inagaki\*\*, Yoshiro Hamada\*\*

### Abstract

An image of an object provides information regarding the relative position and attitude to the object, and is useful for navigation of autonomous systems. In this paper, a method is proposed for measuring relative attitude and position of an airplane to an airport using the horizon and two parallel sidelines of the runway including the results of flight tests.

**Keywords** : Image processing, attitude and position estimation,  
Hough Transformation

### 概 要

対象物体の画像はその物体までの相対的な位置や姿勢の情報を与えるため、自律システムにおける航法に有用である。ここでは水平線の画像と、矩形滑走路の両側平行2直線の画像を使って、空港に対する相対的な姿勢と位置を推定する一手法を提案し、飛行実験による評価結果とともに示す。

---

\*平成12年5月11日 受付 (received May 2000)

\*\*飛行システム総合研究グループ

## 1. 諸言

本報告は、95年から5年間にわたり実施された画像情報の航空分野への応用に関する1つの試みについて、研究の終了に当たりまとめたものである。本文は主として機首部に取り付けられた画像センサ情報から航空機運動を推定する手法について記述している。また付録として筆者の一人が研究途上で実施した国内外の関連研究の包括的サーベイを示し、当該分野の研究を進める上での参考に供することにする。

近年 CCD に代表される光学センサが安価になり、また画素数による分解能で示される性能が向上している。また画像処理アルゴリズムも、各種文献<sup>1)</sup>や汎用ソフトウェアの普及<sup>2)</sup>により、かなり扱いやすい物になっている。

ロボットの分野では、画像センサを用いた外界認識の研究が進んでいる<sup>3)・5)</sup>。

自動車の世界では、運輸省のもとに先進安全自動車(ASV)のプロジェクトが行われ、将来型の安全自動車の研究開発<sup>6) - 8)</sup>が進み、その中で画像認識を用いた運転者支援システムが開発され走行実験などが行われているほか、欧米では高速道路の数百キロにおよぶ高速自動走行実験<sup>9)</sup>が行われている。

ところで、航空機では着陸時に自機の周りの環境を認識することは、飛行安全や運行の自動化、着陸の快適性の向上などに有用である。

このとき、従来型の機上センサや地上航法援助システムが存在するが、自動車での例のように画像センサ情報の有効利用も考えられ、いくつかの研究報告も見られる<sup>10) - 15)</sup>。

しかし画像情報処理は、CCD ピクセルサイズなどに対応する画素数の多さに起因してデータ処理量が多いため、一般にリアルタイム処理には不向きである。また画像情報を用いるという受動性のため、画像情報にノイズが多いなどの問題があり精度の問題がある。また画像による外界認識はAI技術の一つであり、実用化には至っていない困難な課題といえる。

このような状況を考慮した上でも、画像という情報の宝庫に未開発な部分が多く、いずれその有効利用が開始されると考え、その航空機の着陸時の運動計測に適用したときどのような問題点があるかを評価する事は重要である。

しかし航空機の場合、自動車とは違い3次元運動をするという特徴があり、また運動速度もはやく高速処理が要求されるなど、自動車よりも運動計測は困難になっている。

すなわち当研究の目的は航空機に搭載されたカメラ画像より、着陸時の滑走路画像を抽出し、自機の相対位置及び姿勢を推定する技術について、手法の提案・実システムの構築を行い、飛行実験等による検証により航法精度を定量的に評価し、着陸時の航法技術への適用可能性を評価することである。

当該研究を実施するに当たって考えられた技術的課題は

- 1) 滑走路画像を用いた位置・姿勢推定アルゴリズムの開発
- 2) 達成精度の評価
- 3) 演算速度の評価

である。

最終的に得られた成果としては

- 1) 滑走路画像処理による位置・姿勢推定アルゴリズムの有効性の検証
- 2) 0.5Hzで動作するシステムを実現
- 3) 飛行実験を行い、そこで用いられている複合航法データとの比較

であり、精度としては

- 1) 姿勢角については0.2度程度
- 2) 位置については1.5m程度

の差となった。

以下、アルゴリズムの導出，ソフトウェア・ハードウェアの説明，実滑走路画像を用いた計測精度評価について順次説明を行ってゆく。

## 2. 滑走路画像を用いた位置・姿勢の推定

ここでは機首部に取り付けられたカメラ画像から，機体運動を推定する方式について検討する。

画像を用いた位置・姿勢の検出問題では，システム構成法，画像処理手法など多様な選択肢が考えられる。本研究ではリアルタイム処理が可能な，ある程度実現可能なシステムや手法を探索する事にする。

光学系は単眼のカメラを用いることにする。複数のカメラによるステレオ画像を用いて，対応点の抽出による立体視を用いることも考えられるが，対応点の抽出そのものがリアルタイム性などの観点から困難と考えられるため，単眼方式を考えることにする。

位置・姿勢の計測には写真測量で使われるように，地形データベースを用いて特徴点とのマッチングをとる手法がある。その場合の計測精度解析などを当初検討を行ったが，前記と同様，対応点の抽出法そのものだけで研究課題となる様な困難な課題と考えられるため，同手法の採用はやめることにする。

また各種画像処理を試み，実際の滑走路画像の特徴をなるべく使い，ノイズなどの影響を受けにくい手法について検討する。

その結果，滑走路では滑走路両側の平行2直線が認識し易いこと，直線抽出にはハフ変換 (Hough transform) <sup>3)</sup> というノイズに強いといわれる手法があること，平行2直線の無限遠点での交点 (消失点という) の位置や，平行2直線の傾きなどが，位置・姿勢と解析的に単純な関係を持つことが分かったため，これらを画像処理により抽出し，位置・姿勢情報を求めることにする。

機首部に取り付けられたカメラによる滑走路画像の一例を図1に示す。同図は大樹町航空公園上空を，太平洋方向に飛行中のドルニエ実験機から撮影した物である。前記のように滑走路両側の平行2直線のほか水平線がよく捕らえられていることが分かる。

コックピット内で機体軸に平行に取り付けられたカメラからの滑走路画像の概念図を図2に示す。同図に現れた直線やその交点は機体の位置や姿勢に関する情報を含んでいるので，以下それらについて順次説明する。



図1. コックピットからの滑走路画像例

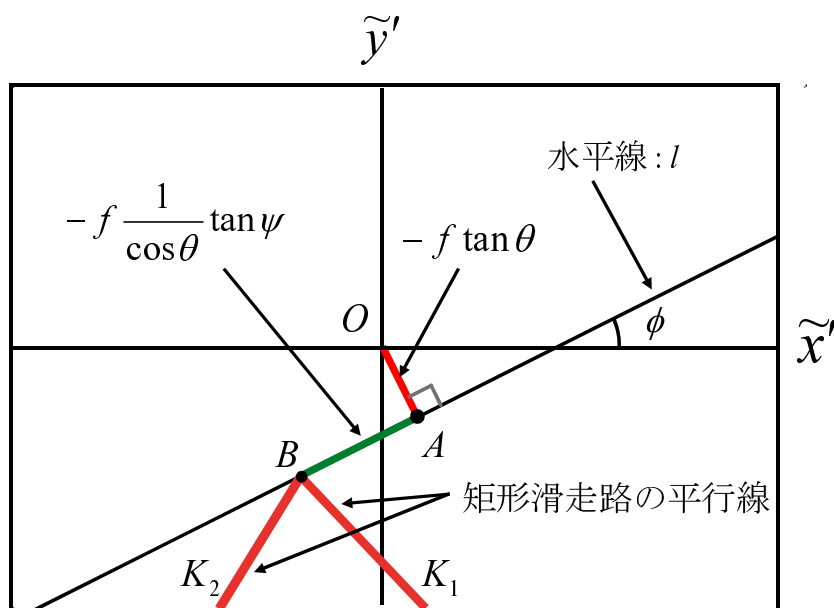


図2 滑走路概念図

### 2.1 座標変換

航空機の機首部に取り付けられたカメラによる滑走路画像情報を用いて、画面上での滑走路両端境界線の交点（消失点という）の座標、直線の傾きを求め、滑走路着陸時の航空機の位置および姿勢情報を得る計算方法を示す。

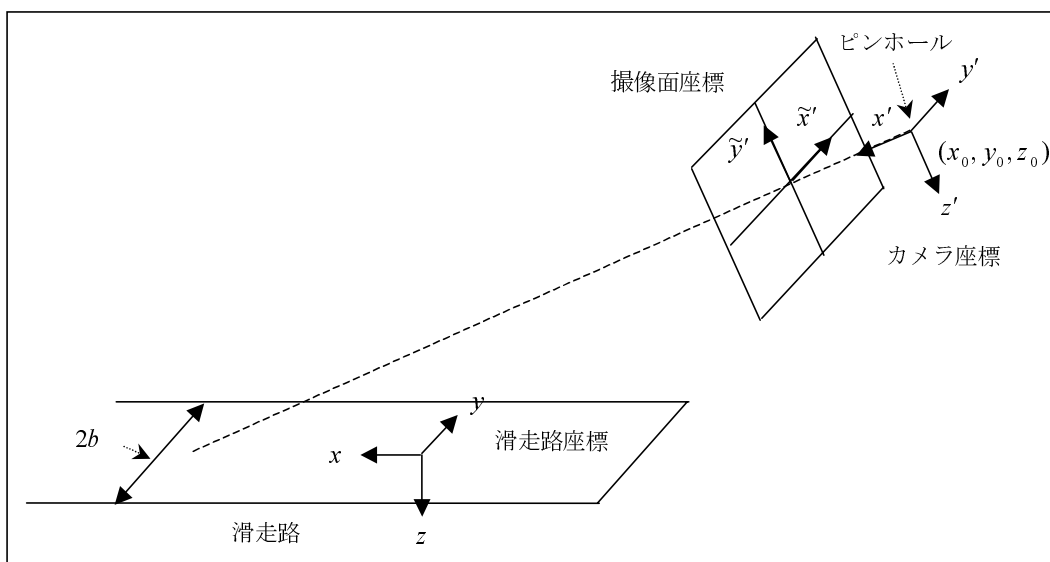


図3 座標系

図3のように地球固定座標を $(x, y, z)$ ，機体固定座標を $(x', y', z')$ ，カメラ画面座標を $(\tilde{x}', \tilde{y}')$ ，地球固定座標で見たカメラ設置位置を $(x_0, y_0, z_0)$ とすると，通常のアイラー角

$(\psi, \theta, \phi)$ による座標変換を用いると、以下の関係が成り立つ。

ただし機体固定座標の原点はカメラレンズの中心にあるものとし、カメラ画像にはピンホールモデルを使用する。 $f$ はカメラの焦点距離を表す。実際の機体座標原点がレンズ中心からズレている場合の変換は容易であり、以下の記述は一般性を失うことはない。即ち

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos\psi & \cos\theta \sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\theta \\ \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi & \cos\phi \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

カメラ画像座標としては、通常の2次元座標 ( $\tilde{x}'$  : 右方向正) ( $\tilde{y}'$  : 上方向正) を用い  
ればよい。

$$\begin{aligned} \tilde{x}' &= \frac{fy'}{x'} \\ &= f \frac{(\sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi)(x - x_0) + (\sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi)(y - y_0) + \sin\phi \cos\theta(z - z_0)}{\cos\theta \cos\psi(x - x_0) + \cos\theta \sin\psi(y - y_0) - \sin\theta(z - z_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}' &= -\frac{fz'}{x'} \\ &= -f \frac{(\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)(x - x_0) + (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi)(y - y_0) + \cos\phi \cos\theta(z - z_0)}{\cos\theta \cos\psi(x - x_0) + \cos\theta \sin\psi(y - y_0) - \sin\theta(z - z_0)} \end{aligned} \quad (3)$$

## 2.2 水平線画像によるバンク角の推定

次に水平線画像について検討する。この時、 $x, y \gg z$ とするので $y = kx$ として $x \rightarrow \infty$

を考える。(2), (3)式において $y = kx$ とし、 $z, x_0, y_0, z_0$ は無視する。

前項と同様の座標変換とピンホールカメラモデルを用いると、水平線画像に対応する直線の方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \tilde{x}' &= f \frac{x(\sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi) + kx(\sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi)}{x \cos\theta \cos\psi + kx \cos\theta \sin\psi} \\ &= f \frac{\sin\phi \sin\theta}{\cos\theta} - f \frac{\cos\phi(\sin\psi - k \cos\psi)}{\cos\theta(\cos\psi + k \sin\psi)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}' &= -f \frac{x(\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) + kx(\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi)}{x \cos\theta \cos\psi + kx \cos\theta \sin\psi} \\ &= -f \frac{\cos\phi \sin\theta}{\cos\theta} - f \frac{\sin\phi(\sin\psi - k \cos\psi)}{\cos\theta(\cos\psi + k \sin\psi)} \end{aligned} \quad (5)$$

(4), (5)をまとめると次式となる。



$$\begin{aligned}
\tilde{y}' &= -f \frac{\cos \phi \sin \theta}{\cos \theta} + \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \left( \tilde{x}' - f \frac{\sin \phi \sin \theta}{\cos \theta} \right) \\
&= -\frac{f}{\cos \theta} \left( \cos \phi \sin \theta + \frac{\sin^2 \phi \sin \theta}{\cos \phi} \right) + \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \tilde{x}' \\
&= -\frac{f}{\cos \phi} \tan \theta + \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \tilde{x}'
\end{aligned} \tag{6}$$

これより、水平線の画像の傾きがバンク角  $\phi$  に一致しており、同画像の傾きを  $k_0$  とするとバンク角  $\phi$  が次式のように推定できることが分かる。

$$\hat{\phi} = \tan^{-1}(k_0) \tag{7}$$

### 2.3 水平線画像によるピッチ角の推定

図 2 ように、画像原点から水平線に相当する直線画像への垂線の交点を  $A$  とすると、原点  $O$  と  $A$  の長さは、(6) 式の切片やバンク角  $\phi$  の幾何学的関係を用いて、次式のようになる。

$$\overline{OA} = -f \tan \theta \tag{8}$$

ここで  $A$  点が横軸より下にあるとき  $\overline{OA}$  は負とする。

これより、 $OA$  の長さから  $\theta$  を次式のように求めることができる事が分かる。

$$\hat{\theta} = -\tan\left(\frac{\overline{OA}}{f}\right) \tag{9}$$

### 2.4 方位角の推定

消失点  $B$  の座標  $(\tilde{x}'_b, \tilde{y}'_b)$  は、 $x \gg y, z$  とすると次式となる。

$$\tilde{x}'_b = f \frac{\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi}{\cos \theta \cos \psi} \tag{10}$$

$$\tilde{y}'_b = -f \frac{\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi}{\cos \theta \cos \psi} \tag{11}$$

バンク角  $\phi$  を補正した座標系で考えると、水平線画像を  $x$  軸とする座標系になる。この時、ピッチ角  $\theta$ 、方位角  $\psi$  の変換はかかったままなので、

バンク角  $\phi = 0$  時の

$$\tilde{x}' = -f \frac{1}{\cos \theta} \tan \psi \quad (12)$$

$$\tilde{y}' = -f \tan \theta \quad (13)$$

に相当する画像になっていることが分かる。また、(8) 式が (13) 式と一致している事も分かる。よって、 $\overline{AB}$  の長さは (12) 式と同じである。

$$\overline{AB} = -f \frac{1}{\cos \theta} \tan \psi \quad (14)$$

(9) 式で求めたピッチ角  $\theta$  と上式の  $\overline{AB}$  を用いると、 $\psi$  が次式のように求まること分かる。

$$\hat{\psi} = -\tan^{-1} \left( \frac{\overline{AB}}{f} \cos \hat{\theta} \right) \quad (15)$$

なお、(14) 式は、(10)、(11) 式と A 点の座標を求めて確認する事もできる。

## 2.5 横方向変位・高度の推定

滑走路の両側の平行 2 直線の画像の傾きより、機体の位置情報を抽出する問題について検討する。

滑走路の右端の直線について考える。これは

$$\begin{aligned} y &= b \\ z &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

と表される。以下バンク角  $\phi = 0$  とする。 $\phi \neq 0$  の場合への変換は容易である。(4)

(5) 式に(16)式を代入すれば、簡単な計算により、同直線のカメラ座標での傾き  $k_1$  は

$$k_1 = \frac{\cos \psi z_0}{\cos \theta (b - y_0) + \sin \theta \sin \psi z_0} \quad (17)$$

となり、同様に滑走路左端の直線の傾き  $k_2$  は

$$k_2 = \frac{\cos \psi z_0}{\cos \theta (-b - y_0) + \sin \theta \sin \psi z_0} \quad (18)$$

となる。(17)(18)式を、 $z_0$ 、 $y_0$  について解けば、位置座標が次式のように求まる。

$$z_0 = \frac{2k_1k_2 \cos \hat{\theta}}{k_2 - k_1 \cos \hat{\psi}} b \quad (19)$$

$$y_0 = -b \left\{ \frac{k_1 + k_2}{k_2 - k_1} - \frac{2k_1k_2 \sin \hat{\theta} \sin \hat{\psi}}{k_2 - k_1 \cos \hat{\psi}} \right\} \quad (20)$$

ここで、 $\hat{\theta}$ ,  $\hat{\psi}$  は前述までの手法で求まっているそれぞれの変数の推定値である。バンク角  $\phi \neq 0$  の場合は、カメラ画像から求まった滑走路両端の傾き  $\tilde{k}_1, \tilde{k}_2$  (バンク角を補正する前のカメラ画像そのものから得られる直線の傾きであることを示すため記号  $\sim$  を使う。) と  $\hat{\phi}$  を用いて、改めてバンク角を補正した 2 直線の傾きを次式のようにすればよい。

$$\begin{aligned} k_1 &= \tan \left\{ \tan^{-1} \tilde{k}_1 - \hat{\phi} \right\} \\ k_2 &= \tan \left\{ \tan^{-1} \tilde{k}_2 - \hat{\phi} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

## 2.6 前後方向位置の推定

滑走路面上の点(特徴点)の画像から、その点と自機との相対的前後方向位置  $(x - x_0)$  が、(2)式または(3)式より求まる。

これより航空機の滑走路に対する相対的姿勢及び位置が、滑走路画像のみより求まることが分かる。

以上より、機体の 3 次元位置を求める手法を整理すると表 1 のようになる。ここで滑走路幅を  $2b$  とする。

(ステップ1) 水平線の傾き  $k_0$ , や図1の  $\overline{OA}$   $\overline{AB}$  を計算する。

(ステップ2) 次式に従い、姿勢角を計算する。

$$\hat{\phi} = \tan^{-1}(k_0) \quad (7)$$

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1}\left(\frac{\overline{OA}}{f}\right) \quad (9)$$

$$\hat{\psi} = -\tan^{-1}\left(\frac{\overline{AB}}{f} \cos \hat{\theta}\right) \quad (15)$$

(ステップ3) 矩形滑走路の長手方向の境界線の傾き  $k_1, k_2$  を求める。

(ステップ4) バンク角を補正した傾き  $\tilde{k}_1, \tilde{k}_2$  を求める。

$$\begin{aligned} \tilde{k}_1 &= \tan\{\tan^{-1} k_1 - \hat{\phi}\} \\ \tilde{k}_2 &= \tan\{\tan^{-1} k_2 - \hat{\phi}\} \end{aligned} \quad (21)$$

(ステップ5) 補正した傾きを用いて、航空機の位置を求める。

$$z_0 = \frac{2\tilde{k}_1\tilde{k}_2 \cos \hat{\theta}}{\tilde{k}_2 - \tilde{k}_1 \cos \hat{\psi}} b \quad (19)$$

$$y_0 = -b \left\{ \frac{\tilde{k}_1 + \tilde{k}_2}{\tilde{k}_2 - \tilde{k}_1} - \frac{2\tilde{k}_1\tilde{k}_2 \sin \hat{\theta} \sin \hat{\psi}}{\tilde{k}_2 - \tilde{k}_1 \cos \hat{\psi}} \right\} \quad (20)$$

表1 アルゴリズムのまとめ

### 3. 精度解析

ここでは提案手法に基づく姿勢・位置推定の精度について検討を行う。

誤差要因としては各種のものが考えられるが、ここではハフ変換での量子化誤差など一部の誤差要因のみを取り上げ、参考に供する事にする。

#### 3.1 バンク角の推定精度

バンク角は水平線の傾きより求める。直線の傾きは前章で説明したように、ハフ変換を用いて求める。即ちバンク角（または以後出てくる直線の傾き角）の精度はハフ変換を用いた角度計測精度で決まることになる。

角度計測誤差は、ハフ変換での角度の量子化誤差、画像処理による直線検出精度、検出された線の太さの有限性に基づく誤差、画像に含まれるノイズによる誤差等がある。

ここで用いるハフ変換では、角度180度を900等分して量子化しているため、角度の量子化の幅  $\Delta\phi$  は  $0.2^\circ$  となる。この区間で誤差が一様分布していると考えれば、量子化に伴

う角度誤差の標準偏差  $\sigma_{\Delta\theta}$  はその  $\frac{1}{\sqrt{12}}$  倍となることが分かる。

### 3.2 ピッチ角の推定精度

ピッチ角は(9)式より求める。ここで  $\phi = 0$  とし、ピッチ角が小さい場合

$$\theta = \tan^{-1}\left(-\frac{\overline{OA}}{f}\right) \cong -\frac{\overline{OA}}{f} \quad (22)$$

となり、ピッチ角の誤差は  $\overline{OA}$  の精度で決まることが分かる。 $\overline{OA}$  は画像原点から水平線までの距離であり、ハフ変換における  $\rho$  (付録 A 参照) に等しい。誤差要因としてはハフ変換の  $\rho$  の量子化誤差の他、線の幅の有限性やノイズなどに基づく水平線の検出誤差などがある。

ハフ変換の  $\rho$  の誤差の原因としては、ハフ変換での  $\rho$  の刻みや、画像を 2 次元配列 (512(H)×480(V)) に入れることによる量子化誤差があるが、本システムの場合後者と比べ、前者は小さく設定したので、後者のみ考えることにする。

バンク角  $\phi = 0$  の場合を考えれば、消失点は上下方向に動くことになる。後に実験システムの説明でも示すように、レンズの焦点距離  $f$  は 5.9mm であり、CCD 画素のサイズは本来横  $6.35\mu\text{m}$ 、縦  $7.4\mu\text{m}$  であるが、ビデオ映像信号の AD 変換のサンプリング周波数の設定により、デジタル画像の画素サイズは横  $9.01\mu\text{m}$ 、縦  $7.4\mu\text{m}$  である。その場合、縦方向の量子化誤差  $\Delta\overline{OA}$  は

$$\Delta\overline{OA} = 7.4 \times 10^{-3} (\text{mm}) \quad (23)$$

となる。よって上記量子化によるピッチ姿勢角の誤差は

$$\Delta\theta \cong -\frac{\Delta\overline{OA}}{f} = -\frac{7.4 \times 10^{-3}}{5.9} = 1.25 \times 10^{-3} (\text{rad}) = 0.072 (\text{deg}) \quad (24)$$

となることが分かる。

一様分布を仮定した標準偏差の扱いは、前述と同じである。

### 3.3 方位角の推定精度

前節と同様、(12)式より、 $\theta = 0$  で方位角  $\psi$  が小さいとき

$$\psi \cong -\frac{\overline{AB}}{f} \quad (25)$$

となる。前節と同様、画像を配列要素に取り込む事による量子化誤差は

$$\overline{\Delta AB} = 9.01 \times 10^{-3} (mm) \quad (26)$$

$$\Delta \psi = \frac{\overline{\Delta AB}}{5.9} = \frac{9.01 \times 10^{-3}}{5.9} = 1.52 \times 10^{-3} (rad) = 0.087 (deg) \quad (27)$$

一様分布を仮定した標準偏差の扱いは、前述と同じである。

### 3.4 高度の推定精度

高度は(19)式より求められ

$$z_0 = \frac{2k_1 k_2 \cos \hat{\theta}}{k_2 - k_1 \cos \hat{\psi}} b$$

$\hat{\theta} = \hat{\phi} = 0$  とすれば簡単化され、式変形により次式となる。

$$\frac{z_0}{b} = \frac{2k_1 k_2}{k_2 - k_1} \quad (28)$$

ここで  $b$  は滑走路幅の半分であり、左辺は滑走路幅で正規化された高度を示す。これに対する滑走路両側境界の平行2直線の画像の傾き  $k_1, k_2$  に対する感度を計算する。即ち

$$\frac{\partial \left( \frac{z_0}{b} \right)}{\partial k_1} = \frac{2k_2^2}{(k_2 - k_1)^2} \quad (29)$$

滑走路中心線の延長上を飛行しており ( $y_0 = 0$ )、さらに  $z_0 = -b$  (滑走路幅の半分の高  
度) のとき(17),(18)式より  $k_1 = -1$ ,  $k_2 = 1$  となる。このとき(29)式は

$$\frac{\partial \left( \frac{z_0}{b} \right)}{\partial k_1} = \frac{1}{2} \quad (30)$$

となる。

$$k_1 = \tan \tilde{\theta}_1 \quad (31)$$

であり、 $\tilde{\theta}_1$  はハフ変換における直線の傾き角であり、上記の場合

$$\frac{3\pi}{4} (rad) \quad (32)$$

となる。

$k_1$  の誤差要因としてはこれまでと同様、ハフ変換による傾きの検出誤差の他、線幅の有限性の影響、画像ノイズの影響などがあるが、ここではハフ変換による傾きの検出誤差についてのみ検討する。

(31)式より

$$\Delta k_1 = \sec^2 \tilde{\theta}_1 \Delta \tilde{\theta}_1 \quad (33)$$

であり、(24)式を考慮し、さらに 3.1 に記述したように、ハフ変換による角度検出精度を

$$\Delta \tilde{\theta} = 0.2(\text{deg}) \quad (3.49 \times 10^{-3}(\text{rad})) \quad (34)$$

とすれば、(33)式より

$$\Delta k_1 = 7.0 \times 10^{-3} \quad (35)$$

となる。

(30)式を考慮すれば

$$\Delta \left( \frac{z_0}{b} \right) = \frac{1}{2} \times 7.0 \times 10^{-3} = 3.5 \times 10^{-3} \quad (36)$$

即ち高度方向の誤差は、滑走路幅の半分に対して 0.349%となる。 $b = 15(m)$ とすれば

$$\Delta z_0 = 0.052(m) \quad (37)$$

となる。

$k_2$ の影響を考えると、通常之感度解析と同様、上記の $\sqrt{2}$ 倍が誤差の目安を与える。

### 3.5 横方向位置の推定精度

同様の考え方により、(20)式より

$$\frac{y_0}{b} = -\frac{k_1 + k_2}{k_2 - k_1} \quad (38)$$

$$\frac{\partial \left( \frac{y_0}{b} \right)}{\partial k_1} = -\frac{2k_2}{(k_2 - k_1)^2} \quad (39)$$

前述と同様にして実際の値を代入すると

$$\frac{\partial \left( \frac{y_0}{b} \right)}{\partial k_1} = -\frac{1}{2} \quad (40)$$

となり、前記と同じ滑走路幅を考えれば、横方向の誤差の目安として

$$\Delta y_0 = 0.052(m) \quad (41)$$

またはその $\sqrt{2}$ 倍を得る。

#### 4. 画像処理

カメラ画像から所望の直線を抽出するため、画像処理を行う。

画像処理のフローチャートを図4に示す。

まず全画像の中から、滑走路部と海面部を色情報を用いて抽出する。具体的には代表点のRGBベクトルと対象点のRGBベクトルの内積をとり、その値の大きさにより、色の近さを判断する。

次にエッジ抽出のため、Sobelフィルタを用いて画像の空間微分を行う。ここでは平滑化処理も併用している。

続いて後の処理対象画素数を減らすため、孤立点除去を膨張・収縮オペレータにより行う。

さらに直線の傾き検出の精度を上げるため、線状図形の線幅方向の画素を取り除く、細線化処理を行う。

さらに直線のパラメータ(傾きや画像原点からの距離)をハフ変換により検出する。ハフ変換は通常最小2乗法とは違い、複数の直線パラメータを求めることができる手法であり、ノイズに強いロバストな直線抽出アルゴリズムとして知られている。ハフ変換の詳細は参考文献1)に示す。

本手法では、直線の傾きが多用される。またピッチ角の検出では水平線と画像原点との距離が直接ピッチ角の情報を与える。これらはハフ変換で直接出力されるものであり、ハフ変換の適用は本手法による姿勢・位置計測に当たり、合理的なものであることが分かる。

最後に求めた直線のパラメータを用いて、表1に示す計算により、姿勢や位置の計算を行う。

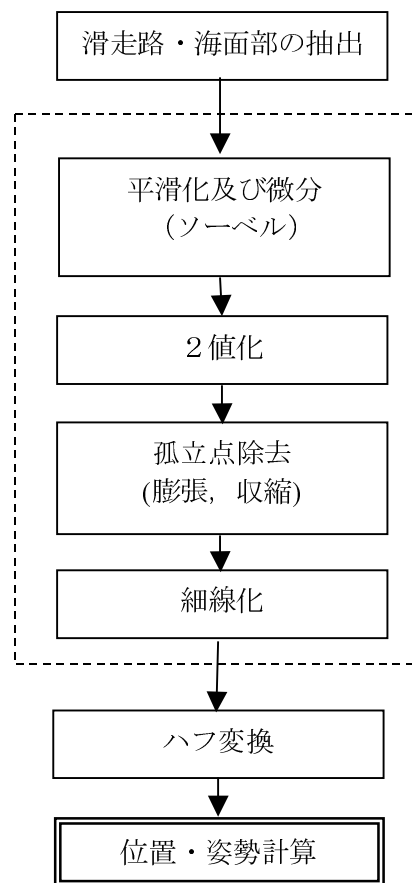


図4 画像処理のフロー



## 5. 実験システム

実験システムの構成を図5に示す。実験システム（画像処理部）の写真を図6に示す。

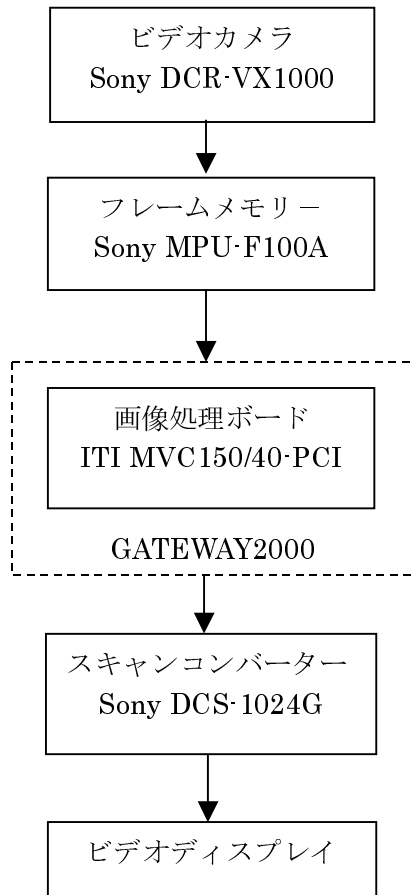


図5 実験システムの構成

画像処理システムは Pentium MMX 200MHz の Windows マシンとイメージングテクノロジー社の拡張ボード MVC150/40 からなる。MVC150/40 は NTSC のビデオ信号を AD 変換し、DSP(Digital Signal Processor)によりフィルタリングなどの基本画像演算を高速処理する。MVC150/40 上での処理結果はパソコン上のユーザープログラムで利用が可能である。ハフ変換処理はパソコン上で開発し実行した。

実験では  $512 \times 480$  画素のデジタル画像を得て画像処理をした。その時の演算周期は 2 秒 (0.5Hz) で、その内の約 50%がハフ変換に使われている。



図6 実験システム（画像処理部）

画像センサとしては民生用の1/3インチの3CCDビデオカメラ (Sony Digital Handycam DCR-VX1000) を用いた。焦点距離は5.9mmであり、CCD画素のサイズは横 $6.35 \mu\text{m}$ 、縦 $7.40 \mu\text{m}$ であり、有効画素数は768(横)  $\times$  494(縦)である。DCT方式 (Discrete Cosine Transformの略。フーリエ変換により画像情報の圧縮を行う一手法。)により1/5にフレーム圧縮した画像をテープに記録し、それを再生して画像処理を行った。

## 6. 飛行実験

### 6.1 飛行実験

実際の滑走路画像を用いた飛行体の姿勢・位置推定のための滑走路画像データの取得を、北海道大樹町航空公園において、1998年11月の航空宇宙技術研究所第3回D<sub>o</sub>-228(図7)を用いた航法系飛行実験<sup>16)</sup>の中の実験項目の1つとして行った。

コックピットの副操縦士席に、4章で説明したビデオカメラを、三脚やひもを用いて固定し(図8)、合わせて搬送波位相を用いたDGPSとINSの複合航法<sup>17)</sup>による位置・姿勢データを取得した。

飛行実験は午後2時から3時まで約1時間かけて行われた。天気は快晴で、太平洋方向にアプローチする場合は、水平線をくっきり見る事ができた。

また滑走路はアスファルト舗装したばかりであり、滑走路面と周辺部との境界は非常にくっきり分かれており(図9)、本手法の検証用データの取得には最適な飛行実験となった。

視界画像信号と航法系の時刻同期は、デジタルビデオカセットレコーダ(Sony GV-D900)の時刻設定を、電話の時報に合わせるにより手動で行った。これにより0.1秒程度の精度で時刻同期がとれたと考えられる。なお事後のデータ解析の結果、航法系の姿勢変動と、視界画像処理による姿勢推定結果は非常によい対応がとれており、本手法による時刻同期は問題なく達成されたと考えられる。

陸から海方向に、滑走路25m程度の高さでローパスする飛行を数回行った。(図10)それぞれの場合に滑走路に対する横方向位置や、飛行中の姿勢変動の方法などを変えた。

以上のように、コックピットからの視界画像データをビデオレコーダに記録し、飛行実験後に地上計算機において処理し、合わせて取得された航法系



図7 実験用航空機 Do228



図8 コックピット内のカメラの設置



図9 滑走路端の状況

のデータとの比較を行った。

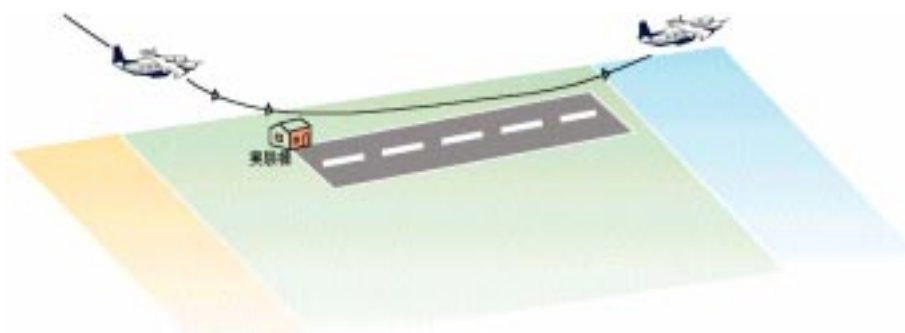


図10 飛行プロファイル

### 6.2 カメラの設置法および位置誤差の補正

機体に対しカメラは3脚およびポールを用いて設置した。機体に対するカメラ位置は事前に測定した。カメラは傾斜計を用いて機体の床に対して平行に設置した。方位角は基本的には機体x軸方向に向けたが、機上では完全には合わせられなかったため、画像中のピトー管の映像から補正角を逆算した。

航法系の位置基準がGPSアンテナの位置であるため、視界画像処理で求めた位置をカメラ基準点との位置誤差及び姿勢角を用いて補正し、計測位置を航法系のデータに合わせるようにした。

### 6.3 飛行実験データ解析結果

着陸時のコックピットからの滑走路画像を用いて本方式により位置・姿勢の推定を行い、同時に取得された、搬送波位相を用いたDGPSとINSの複合航法(CDGPS/INS複合航法、位置精度50cm(3 $\sigma$ 値)程度<sup>17)</sup>データとの比較を行った。

コックピット視界画像および画像処理による水平線と滑走路両側直線の抽出結果を図11に示す。図11(b)は原画に画像処理結果を重ね書きしたものである。ここで白い直線がハフ変換により求めた直線であり、水平線および滑走路両端をうまくとらえていることが分る。



(a) 上空約25mからの滑走路



(b) 2値化, エッジ抽出, 細線化, 直線当てはめ結果。

図11 画像処理例

位置・姿勢の推定結果を、上記複合航法データと比較して図 12 に示す。

同図では CDGPS/INS で計測された滑走路端（手前）からの距離計測値に対して、本方式での位置と姿勢推定値（実線）を、CDGPS/INS での計測値（破線）と重ねて表示している。

滑走路の全長は 1000m であり、滑走路前方約 200m から滑走路終端の手前約 200m までで位置・姿勢の計測が可能であった。姿勢は 0.2 度、位置は 1.5m 程度の精度で測定できた（表 2）。

演算周期は約 2 秒であり、これについてはハードウェアの変更・ソフトウェアの改修により 10 倍程度の高速化は容易と考えている。カメラレンズの歪曲収差の補正、画像原点の求めるビデオカメラのカメラ校正を含めて、精度の向上の可能性についての検討などを今後進め、応用性、成立性について評価を行う必要がある。

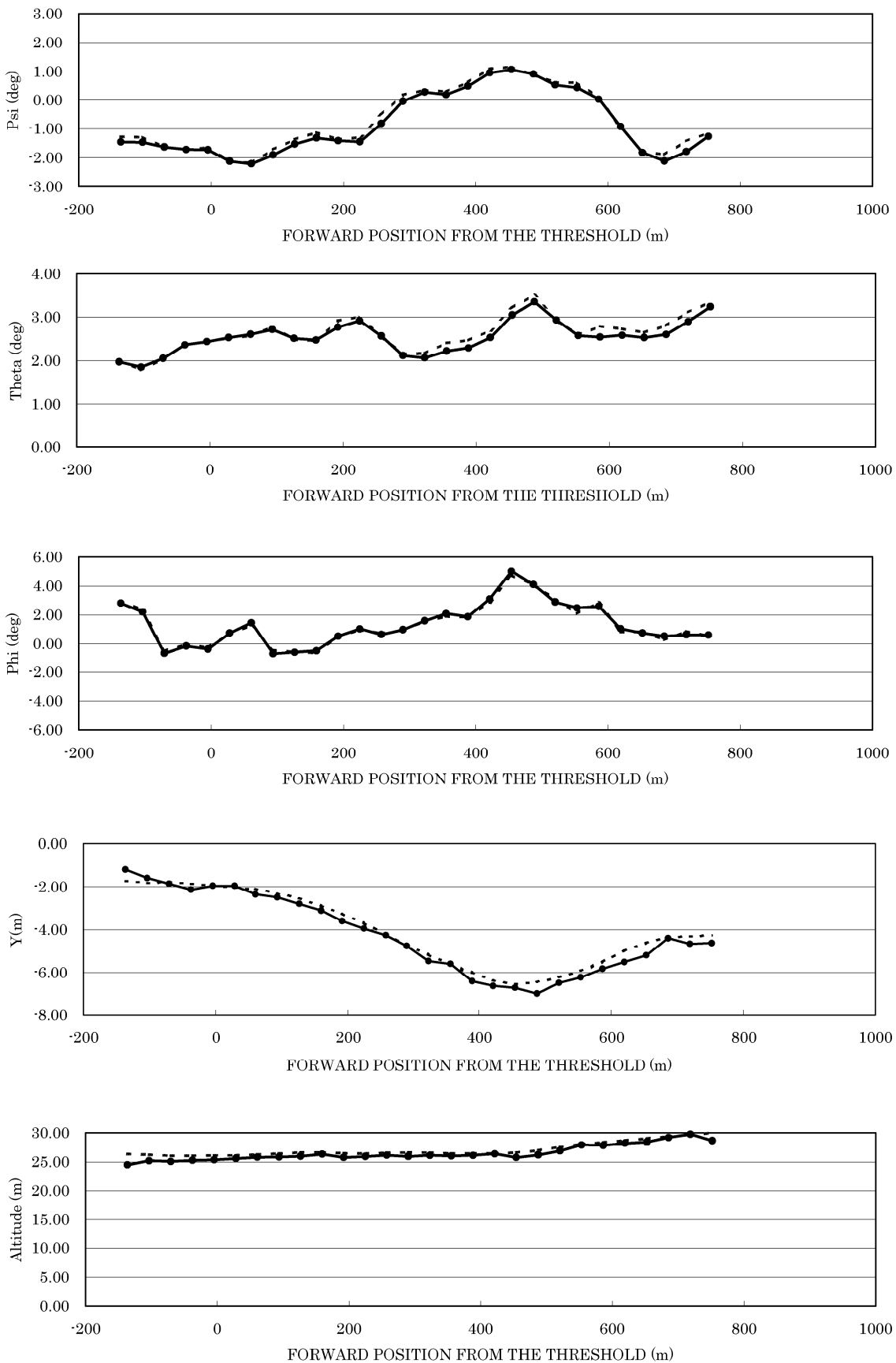


図 12 画像計測と CDGPS/INS 複合航法データの比較  
(実線：画像計測， 破線：CDGPS/INS 複合航法)

変数		誤差平均	標準偏差
方位角	$\psi$ (deg)	-0.12	0.10
ピッチ角	$\theta$ (deg)	-0.08	0.10
バンク角	$\phi$ (deg)	0.02	0.18
横変位	Y(m)	-0.20	0.23
高度	-Z(m)	-0.61	0.40

表 2 計測精度 (CDGPS/INS 複合航法基準)

## 7. 結言

航空機の着陸時のコックピットからの視界画像から、矩形滑走路両側の 2 直線と水平線を抽出し、機体の滑走路に対する相対的な位置・姿勢を推定するシステムについて検討を行った。その結果をまとめると以下ようになる。

- ・上記 3 直線の情報を用いると、機体の滑走路に対する相対的な位置・姿勢（横変位、高度、オイラー角）の 5 自由度、および滑走路上の特徴点の画像から、その点までの前後方向位置の 1 自由度の計測が可能であり、その解析的關係を導出した。
- ・滑走路および海面の、色情報による抽出・空間微分・細線化処理などの画像処理により、必要な情報が抽出できることが確認できた。
- ・ハフ変換が本アルゴリズムに有効に利用できることが分かった。
- ・パーソナルコンピュータと高速画像処理ボードの利用により、2 秒程度の周期でビデオ画像の取り込みから位置・姿勢推定までが行われた。
- ・推定精度は姿勢で 0.2 度、位置で 1.5m 程度となった。
- ・計算機の性能向上、処理アルゴリズムのさらなる最適化により、さらに 10 倍程度の処理スピードの向上は可能と考えられる。
- ・姿勢情報の抽出に当たっては水平線画像が必須だが、それが得られない場合は他の特徴線（地平線、滑走路中心線、横風滑走路の側線、その他）の利用が必要である。

## 参考文献

- 1) 長谷川, 輿水, 中山, 横井: “画像処理の基本技法”, 技術評論社(1993)
- 2) The MATH WORKS: “Image Processing Toolbox”,(1997)
- 3) 谷内田正彦: “ロボットビジョン”, 昭晃堂(1994)
- 4) 恩田邦夫, 松島緑朗, 青木由直: “移動ロボットのための廊下の3次元環境認識”, 電子情報通信学会論文誌, D Vol.J70-D No.12 pp.2510-2516 1987.12
- 5) 八木康史 他: “動画像処理を用いた移動ロボットの環境認識”, 電子通信学会論文誌, 86/6 Vol.J69-D No.6,1986
- 6) 計測自動制御学会: “ミニ特集: 先進安全自動車(ASV)における計測・制御技術”, 計測と制御 Vol.36 1997, (1997)
- 7) 根岸慎治, 千葉昌孝, 小沢慎治: “高速道路における車両姿勢角推定に基づく道路エッジの自動追跡”, 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J77-D-II No.5 pp.931-939 1994.5
- 8) <http://www.moc.go.jp/road/ITS/index.html>  
<http://www.path.berkeley.edu/>  
<http://www2.echo.lu/telematics/>
- 9) Dickman: ”PERFORMANCE IMPROVEMENTS FOR AUTONOMOUS ROAD VEHICLES”,Int. Conference on Intelligent Auto- nomous Systems (IAS-4), (1995)
- 10) Simon Furst,Stefan Werner, Dick Dickmanns, Ernst-Dieter Dickmanns: “Landmark navigation and autonomous landing approach with obstacle detection for aircraft” ,AeroSense '97, Orland FL,1997,SPIE Paper Number:3088-04
- 11) Yuan-Liang Tang, Rangachar Kasturi: “Runway Detection in an Image Sequence”, SPIE Vol.2421,181-190
- 12) P.K.Menon: ”Machine-Vision Aids for Improved Flight Operations”, NASA-CR-202564
- 13) Yakali,Huseyin et al: ”A vision-based method for autonomous landing”, Mobile robots VI,Proc.of the meeting 205/216 (1991)
- 14) P.K.Menon et al.: “Vision-based stereo ranging as an optimal control problem”, AIAA-92- 4418(1992)
- 15) S.Sasa et al.: ”Position And Attitude Estimation Using Image Processing of Runway”,AIAA-2000-0301(2000)
- 16) 小野孝次: “第3回DO-228航法系飛行実験 飛行実施要領”, 1998.11
- 17) M.Harigae et al: “Flight Evaluation of Carrier DGPS/INS Hybrid Navigation for Automatic Landing”, Proceeding of ION GPS-98 (1998)

### 付録A. ハフ変換<sup>3)</sup>

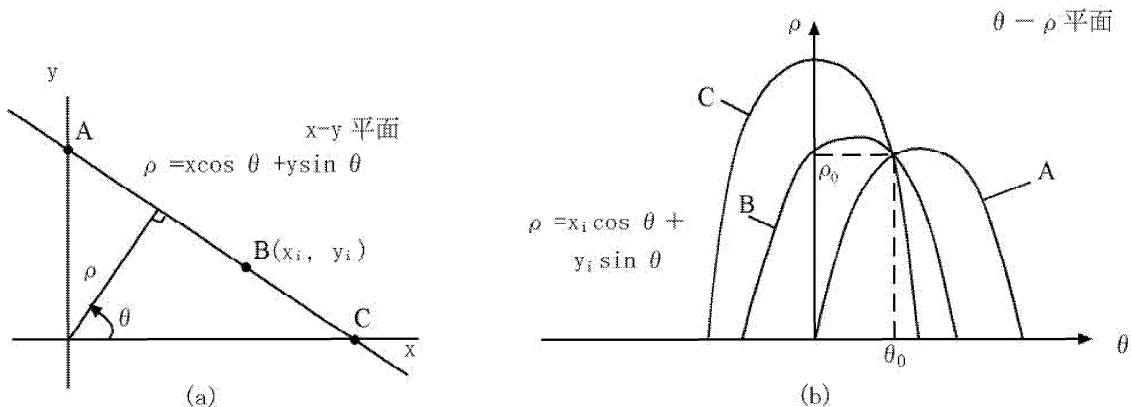
人工の物体は直線や円などの幾何学的に規則的な形状をしたものから構成されていることが多い。ハフ変換 (Hough transform) はこの幾何学的形状の規則性を利用して線を発見する手法で、直線、円、楕円、一般曲線を検出する手法が提案されている。

付図 1 に示すように、直線はそれに直交する線と  $x$  軸のなす角度  $\theta$  と原点からの距離  $\rho$  によって表現できる。今、この  $\theta$  と  $\rho$  をパラメータとする  $\theta$ - $\rho$  平面を考えると、 $x$ - $y$  平面状の直線は平面上で点に対応する。反対に、 $x$ - $y$  平面上の点  $(x_i, y_i)$  は  $\theta$ - $\rho$  平面上では

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta$$

という正弦曲線に変換される。この  $\theta$ - $\rho$  平面への変換の興味ある性質は、 $x$ - $y$  平面上で同一直線上にある点を  $\theta$ - $\rho$  平面に変換すると、すべて同一の共有点をもつ正弦曲線になるという点である。したがって、 $\theta$ - $\rho$  平面を分割して、多数の正弦曲線の通る点  $(\theta_0, \rho_0)$  を知れば、 $x$ - $y$  平面状の

直線、 $\rho_0 = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0$  の存在を知ることになる。この方法では、線が途切れていても、ある程度同一直線上に乗った点があれば、 $\theta$ - $\rho$  平面上でピークを形成するので検出できるという利点がある。



付図 1 ハフ変換による直線の検出



## 付録B. 計算機視覚による航法

画像処理、計算機視覚の研究は多数行なわれているが、ここでは研究の応用対象が航空である文献のみに調査を限定し、どのレベルに計算機視覚の研究があるのかが解かるようにした。

### 概念検討

航技研の堀川は 15 年以上前から計算機による視覚情報処理に注目し、概念的な検討を幅広く行ない「飛行機シンポジウム」等に発表した(堀川 1984~1988)。

- 1) 堀川勇壮:“着陸時におけるパイロットの視覚情報処理能力と新航法システムへの応用 (1) 基本的検討”, 第 22 回飛行機シンポジウム, 162-165(1984)
- 2) 堀川勇壮:“着陸時におけるパイロットの視覚情報処理能力と新航法システムへの応用 (2) 基礎的検討”, 第 23 回飛行機シンポジウム, 218-221(1985)
- 3) 堀川勇壮:“着陸時におけるパイロットの視覚情報処理能力と新航法システムへの応用 (3) 人間の航法能力について”, 第 24 回飛行機シンポジウム, 476-479(1986)
- 4) 堀川勇壮:“壮着陸時におけるパイロットの視覚情報処理能力と新航法システムへの応用 (4) ヘリコプター用航法システムへの応用の為の基本的な検討”, 第 25 回飛行機シンポジウム, 334-337(1987)
- 5) 堀川勇壮:“着陸時のパイロットの視覚情報処理能力とその応用”, 第 1 回 Advanty symposium, 73-76 (1988)

### 障害物検出

小型ヘリコプターによる低空域での農薬散布や監視業務などでは有視界飛行をすることが多い。天候や地形状況によっては前方の送電線等の視認が困難な障害物に衝突して多くの事故が発生している。これらの危険度の高い障害物についての情報を操縦者に対して表示し、警報できる衝突警報システムに関する基礎研究として、電子航法研ではビデオカメラを使った送電線の障害物検出を試みている(山田&山本 1997)。

ビデオ画像を人の眼で見て、可視光より赤外のビデオカメラの方が送電線検出の成績が良かったが、天候や背景によっては検出が困難な場合があった。

その他の障害物検出では動き情報を使っている。はじめに簡単に画像から動きを求めるアルゴリズムの説明を行なう。時間的に連続した画像から動き(オプティカルフロー)を検出するアルゴリズムは 1980 年前後から発表されるようになった。代表的なアルゴリズムは勾配法とテンプレート・マッチング法であるが、初めは、計算量の少ない勾配法が優勢であった。勾配法は画像の空間的、時間的微分操作を伴うので、ノイズに弱い欠点があり、それを克服する方法が研究されている。計算機の処理能力の向上に伴いテンプレート・マッチング法が優勢になり、アルゴリズムをハード化した動画像圧縮専用の LSI が 1990 年頃に開発された。最近では汎用 CPU の高速化、画像処理対応化により実時間の動き検出が可能になりつつある。

画像から動きを検出する為には画像に特徴がなければならない。色と明度が一方向にだけ変化する場合、変化する方向と直交する方向に移動しても動きは検出されない(窓問題)、ある領域の動きが求まる為にはその領域内に 2 つ以上の方向に色または明度の変化がなければならない。

ペンシルバニア州立大学の Kasturi et al. (1996) は NASA Ames Research Center との共同研究「航法における視覚による障害物検出」(1995.8~1997.7) の中間報告をまとめた。この研究の目的は滑走路上の障害物(移動と静止)を検出することであり、基本的手順は次の通りである。

- ・滑走路は平面とする。
- ・カメラ(航空機)の運動を INS で求める。
- ・時間的に連続した画像をカメラ運動情報により座標変換し重ね合わせ、画像間の差(動き)を求める。
- ・画像間の差の大きい部分を障害物とする。この方法により滑走路面上の車輪跡やマーキングを障害物として認識することなく、高さのある静止物体や移動物体を検出する

ことが可能になる。

彼らは、計算量を減らす為に、Sull らがした様に画像全体に対してではなく、画像上の特徴ある領域だけを座標変換した。オプティカルフローを計算する方法としては、Lucas & Kanade の方法を修正した Simoncell らの方法を採用した。報告にはデジタル画像の解像度などのデータ記述がなく、また、複写の質が悪く、写真に何が写っているかがほとんど解からないが、これらの方法により滑走路上のトラック（大きな物）を障害物として検出したと報告している。ただし、トラックの移動方向によっては検出に失敗したり、静止したトラックを移動物体と認識したりしている。これらの原因はオプティカルフローの誤差やカメラ運動パラメータの測定誤差などである。

NASA Ames Research Center の McCandless (1999) はオプティカルフローを使って、航空機前方を横切る航空機を検出することを試みた。動き情報により航空機を画像中から切り出（検出）する為には、ノイズを含んだ動き情報を分離することが重要である。この研究ではノイズを分離するアルゴリズムが提案されている。

- ・機体の回転情報を使い、カメラ（機体）回転により生じた動きを取り除く。

- （カメラ並進の影響は小さいので無視）

- ・ガウスフィルターにより画像の空間的・時間的高周波成分を取り除く。

- ・勾配法（Lucas & Kanade）によりオプティカルフローを計算する。

- ・小さなオプティカルフローを取り除く。

- ・オプティカルフローの空間的なめらからをチェックする。

- ・オプティカルフローの時間的なめらかさをチェックする。

この様な条件を満足するオプティカルフローは移動体（領域）を表わす。

実験は前方約 2 km の Beech King Air 200 を、Boeing 737 機首下に取り付けたビデオカメラで撮像した。この時の King Air は画像上で 9×3 画素の大きさで、この画像に対して上に述べたアルゴリズムで前方の航空機をフォールスアラーム無しで、約 80% の

確率で検出した。

1) 山田公男, 山本憲夫: “小型機の前方障害物の画像センサを用いた観測”, 第 29 回電子航法研究所研究発表会講演概要, 5-8 (1997)。

2) Kasturi, R., Camps, O., Gandhi, T. and Devadiga, S. : “Detection of obstacles on runway using ego-motion compensation and tracking of significant features”, NASA-CR-201531, 40p. (1996)

3) ang, Y.-L. and Kasturi, R. : “Tracking moving objects during low altitude flight”, Machine Vision and Applications 9, 20-31. (1996)

4) McCandless, J. W. : “Detection of aircraft in video sequences using a predictive optical flow algorithm”, Optical Engineering 38, 523-530. (1999)

### 立体視による距離測定

異なる位置に置かれた 2 台のカメラで対象を撮影して、三角測量の原理で対象までの距離を測定する方法は、ヒトの視覚で外界が立体的に見える理由でもあるので、立体視と呼ばれる。カメラ間の距離（基線長と呼ぶ）とレンズの焦点距離を適当に選べば、どの様な距離でも原理的には測定が可能になるが、CCD の空間分解能、熱変形、機械的振動とがた、視野の確保等を考えると長距離の測定には向かない。ヒトの視覚では輻輳が奥行き手がかりとして働く距離は 20 m 位と言われている。

立体視には 1 台のカメラを移動し、異なる位置で撮影することによっても、三角測量の原理で対象までの距離を測定することが出来る。この方法は運動立体視と呼ばれる。基線長を大きく取ることが出来るので長距離の測定が可能になるが、移動距離を正確に測定することが必要になり、また、撮影時刻が異なるので、対象が移動する場合は問題が複雑になる。

スバル研究所の実吉らは道路の形状と障害物の検出に立体視を使った自動車運転手支援 Active Drive Assist System (ADA) の開発を 1989 年より進め、専用のハードを開

発し、テンプレート・マッチング法により 7500 点の距離を 0.1 秒以内で計算することに成功している。

その応用として、基線長 1 m の立体視による距離測定システム (1/2 インチ CCD ビデオカメラ, 焦点距離 16 m) を模型ヘリコプターに搭載し、実験を行なった。最大測定距離は 2 km であるが、機械的ながたを無くす為にレンズを接着剤で固定している (実吉, 喜瀬 1999)。

さらに、模型ヘリコプター用の立体視による重量 2.9 kg の高度計で 1 秒間に 5 回の割合で結果を出力するものを 1998 年に製品化している (喜瀬他 1998)。基線長 100 mm, 焦点距離 4 mm で、高度測定精度は

10 m で誤差  $\pm 0.6$  m

5 m で誤差  $\pm 0.15$  m

0.5 m で誤差  $\pm 0.0015$  m

である。この高度計は、機体が傾いても地面までの垂直高度を出力する。滑走路上に画像的な特徴があれば、航空機の着陸にも利用出来る。

Ames Research Center の Sridhar らはヘリコプター低空飛行で対地距離のパッシブな (測定時に電波等を出さない) 計測方法として立体視の研究を行なった。はじめに、静的な (普通の) 立体視と運動 (動的な) 立体視の距離測定誤差を解析し、運動立体視が機体の進行方向 (拡大焦点) の精度が悪いことを示した。静的な立体視で長距離の測定精度を上げる為に、運動 (移動距離) 情報を使い、異なる位置の測定値を統合する方法 (Recursive Stereo Method) を提案している。1/400 の模型実験の結果も、理論解析から予想される結果と同じで、静的な立体視の方が距離測定精度が良かった。 (Sridhar & Suorsa, 1991)

運動立体視の基線長 (移動距離) は画像からは求めないで、INS のデータを使うことを前提にしている。実験は上と同じ 1/400 の模型実験で、テンプレート・マッチング法に補間法を併用して画像間の対応点をサブ画素の精度で求め、カルマンフィルターを使い、対象までの距離 (模型上で 0.4~1.4 m) を 5 % 程度の誤差で推定して

いる。 (Sridhar et al. 1993)

1) 実吉敬二, 喜瀬勝之: “ステレオ法を用いた三次元自己位置認識”, 画像ラボ 1999.1, 1-6 (1999)

2) 喜瀬勝之, 実吉敬二, 土屋英明, 関口薫二 “無人ヘリコプター用ステレオカメラ画像高度計の開発”, 第 4 回画像センシングシンポジウム (1998)。

3) Sridhar, B. and Suorsa, R.: “Comparison of motion and stereo methods in passive ranging systems”, IEEE Trans. AES 27, 741-746. (1991)

4) Sridhar, B., Suorsa, R. and Hussien, B.: “Passive range estimation for rotorcraft low-altitude flight”, Machine Vision and Applications 6, 10-24. (1993)

### 進入着陸時の位置・姿勢推定

計算機視覚により自動車の自動走行の研究を進めている UniBwM の Dickmanns は、その方法を航空機の自動着陸に応用している (Schell & Dickmanns 1994)。カメラ光軸が滑走路消失点に向く様にビデオカメラの向きを機械的な方法で制御し、滑走路を撮影する。この方法により滑走路上の点とその像との対応が簡単になる。滑走路端上の 8 点, 水平線上の 2 点の特徴点をテンプレート・マッチング法で位置を求め、滑走路モデルと対応を取ることで、航空機の位置と姿勢を実時間で求めた。グランドシミュレータを使った Hardware-in-the-loop simulation 実験では 16 Hz 周期で画像処理により位置と姿勢を求め、それらを入力して自動操縦を行ない、横風がある場合を含めて着陸に成功した。Do-128 を使った飛行実験では DGPS, 電波高度計と画像処理の結果との比較を行なった。

結論の中で彼らは次の様に書いている。

- ・構造化された (モデル化が可能な) 環境で計算機視覚は有望である。

- ・ビデオ画像に対する方法は赤外, 低照度ビデオカメラ, レーダー画像に適応可能である。

- ・像がぼける原因の高速の運動や回転は加

速度計や角速度計により容易に測定可能で、これらの長時間にわたるドリフトは画像処理により補正することが出来るので、視覚と加速度計と角速度計とを組み合わせることでより低価格で総合性能の良いシステムを作ることが出来る。

・GPSにより粗い位置決めを行ない、視覚により精密な位置決めを行なうことにより、同様な効果が期待出来る。

DLRのDoehler (1995)は滑走路をビデオカメラで撮影し、得られた画像を解析することにより滑走路に対する機体の姿勢を求める搭載型の自律航法システムを実現することを目指している。その精度は ILS や D-GPSを較正することが可能としている。

A:滑走路両側上の各1点とINSの姿勢角, B:INS情報の代わりに滑走路両側(直線)の交点(消失点)の計3点,を使った場合の理論誤差解析を行ない,画像の位置決め誤差は距離に比例する結果を得ている。点の画像上の位置をどの様な方法で決めたかの記述は無い。飛行実験ではDo-228胴体下部,脚の後ろにカメラを取り付けた為,3度進入では滑走路画像を撮像出来なかったため,10度進入を行なった。飛行実験の結果は画像から求めた8点の高度(340 m ~ 190 m)と水平位置がDLR Avionic Evaluation Systemの測定値とを比較している。

NASA Ames Research Centerの委託研究(Jan. 1994 ~ Oct. 1996)として, Santa Clara大学のMenonの指導の下にChatterjiが夜間の進入着陸事故を減少させる方法として,空港照明の配置から航空機の位置と姿勢を計算機視覚により求める研究を行なった。(Sridhar et al. 1996, Sridhar et al. 1994 ~ 1997)

はじめに視覚のパイロット支援が必要な理由,特に幻覚について調査を行ない,夜間は昼間の8倍の事故率(Bennett & Schwirzke 1992)に注目し,空港照明施設の配置画像を画像処理して航空機の位置と姿勢を求める7つのアルゴリズムの研究を行なった。最初のアルゴリズムIでは機体の姿勢と高度は既知として,照明配置の四

隅の座標から機体の位置を求める簡単なもので,順次,画像以外の情報を使わない難しいアルゴリズムを開発した。アルゴリズムVIでは姿勢角が与えられるものとして, GPSの粗い位置情報と画像処理の結果をカルマンフィルターにより統合することにより,FAの着陸カテゴリI,II,IIIの位置決め精度を満足する結果を得た。アルゴリズムVIIではロール角のみが与えられるものとしてカルマンフィルターを用いて位置と姿勢を求めたが,位置と姿勢が干渉してカテゴリIを満足する精度しか得られなかった。

これらのシミュレーションは照明の配置モデルから計算され画像に対して行なった。アルゴリズムV,VI,VIIでは,滑走路と画像上との照明の対応を取らずに,画像上で照明の6つの統計量(モーメント)が等しくなるように位置と姿勢を推定した。

1)Schell, F.-R. & Dickmanns, E. D. :

“Autonomous landing of airplanes by dynamic machine vision”, Machine Vision and Applications 7, 127-134. (1994)

2)Doehler, H.-U. : “Image processing for automatic navigation and approach”, SPIE Proc. 2464, 138-148. (1995)

3)Sridhar, B., Smith, P., Menon, P. K. and Chatterji, G. B. : “Machine-vision aids for improved flight operations”, NASA-CR-202564, 225p. (1996)

4)Chatterji, G. B., Menon, P. K. A. and Sridhar : “Machine-vision based pilot guidance for night operations”, AIAA Paper 94-3691, 8p. (Algorithm I, II) (1994)

5)Chatterji, G. B., Menon, P. K. and Sridhar, B. : “GPS/machine vision navigation system for aircraft”, IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems 33, 1012-1025. (Algorithm VI) (1997)

6)Chatterji, G. B., Menon, P. K. and Sridhar, B. : “Integrated GPS/machine vision navigation system for aircraft night operation”, AIAA Paper 95-3196, 11p. (Algorithm VI) (1995)

7)Chatterji, G. B., Menon, P. K. and

Sridhar, B. : “Vision-based position and attitude determination for aircraft night landing”, AIAA Paper 96-3821, 11p. (Algorithm VII) (1996)

8) Bennett, C. T. and Schwirzke, M. : “ Analysis of Accidents during instrument approaches”, Aviation, Space, and Environmental Medicine, April, 1992, 253-261. (1992)

### 対象の認識

視覚機能を画像処理により工学的に実現する為には、注目している／探している対象が画像のどの位置に写っているのかを見つけないければならない。これはパターン認識（注：認識は正確には再認 recognition）そのもので、一般的なパターン認識の技術は確立していない。今まで、この問題を明確に表現してこなかったが、整理すると次のようになる。

動きを画像から求める為には、ある時刻  $t$  に写っていたモノが次の時刻  $t + \Delta t$  にどの位置に写っているのかを探がす、いわゆる「対応点問題」を解かなければならない。 $\Delta t$  がそれ程大きく無ければ、モノの移動距離も小さく、その見え方もあまり変わらないので、対応点問題を解くことは可能である。

距離を画像から求める為には、立体視では空間的に異なる位置のカメラで撮影した画像間で対応点問題を解かなければならない。この場合も、カメラ位置はそれ程大きくは異なるので、それぞれの画像に写っているモノはほぼ同じ位置に似た形で写っているので、対応点問題を解くことが可能である。

あるモノの動きや距離（立体視により）を求める場合には、そのモノに画像的な特徴（見て区別できること）があれば良く、そのモノの形状情報（モデル）は必要ではない。

位置・姿勢を求める方法としても動き情報や距離情報を使い、対象のモデルを仮定しないアルゴリズムもあるが、実際的でない為か、文献調査でヒットしたものは全て

対象のモデルを仮定していた。位置・姿勢推定の節ではどのようなモデルを用いられているかを書いた。

対象の認識は画像処理により情報を抽出する為の基礎で、認識そのものの研究が行なわれている。ルールベースを使った人工知能的な研究もあるが、Tang & Kasturi (1995) は画像処理として実行している。

滑走路画像からエッジ処理により線分を抽出し、滑走路モデルの線分との対応を取ることで滑走路を認識している。カメラのおよその位置と姿勢情報として INS 情報を利用し、カメラ画像上の予想線分位置を求め、INS 情報の位置誤差に対応した予想線分位置範囲で、画像から求めた線分との対応を求めた。これを個々の線分間で対応を取ると共に、線分グループ間での対応を取ることで誤対応を取り除いた。

1) Tang, Y.-L. & Kasturi, R. : “Runway detection in an image sequence”, SPIE Proc. 2421, 181-190. Model-based recognition. (1995)

### 管制

ビデオカメラを航空機に搭載した場合は航法支援になり、ビデオカメラを地上に置いて航空機を監視した場合は管制支援になる。画像処理としては同じなので、航法の 1 項目として管制を含めた。

### 空港面管制

空港面の管制は通常目視と無線による確認を行なっている。霧など気象条件の悪い場合空港面探知レーダ (ASDE) を使用しているが、ASDE は建物による遮蔽区域やアンテナ近傍での不感区域などのブラインドエリアが発生する。この問題を解決する方法として、このブラインドエリアをビデオカメラで監視することが考えられている。電子航法研の加来、北館 (1997) はビデオ画像のフレーム間差分を取ることでよりスポットから誘導路に出て行く小型航空機の検出追跡を行ない、ビデオカメラ監視区域と ASD 監視区域での情報移管が可能になった。

最近の航空機はどのような天候でも高い精

度で自動的に飛行することが出来る様になっているが、空港の地上走行は依然パイロットの外界認識による移動が行なわれている。この様な事態を解消する為に DLR では TARMAC (Taxi And Ramp Management And Control) プロジェクトを推進している。その中の1つの研究として、Doehler et al. (1996) は航空機機体に書かれた登録番号を文字認識する研究を行なっている。

1)加来信之, 北館勝彦 “TV画像よる航空機の追尾”, 第29回電子航法研究所研究発表会講演概要, 37-40 (1997)

2)Doehler, H. -U., Groll, E. and Hecher, P. : “Automatic recognition of aircraft registration marks”, DLR-Mitt.96-02, 53-64. (1996)

### 進入着陸の監視

名古屋大学の Sugiura (1985) は羽田空港と小牧空港で滑走路に沿ってスチールカメラを10台並べて、滑走路に着陸する航空機約90機を写真に撮り、航空機の高度、姿勢角、降下速度、接地点のばらつきを観察、計測した。

経年機体の評価方法として着陸パラメータをパッシブに測定する FAA の要求に対して、Micklos & DeFiore (1993) は NAALDAS (the Naval Aircraft Approach and Landing Data Acquisition System) を提案した。この方法は滑走路に沿って並べられた高解像度のビデオ画像をデジタル処理するだけなので、航空機に機器を搭載したり運航手順を変更する必要がない特徴がある。

航空機の着陸パラメータを決定する NAALDAS では30年以上に渡り70mmフィルムが使われてきたが、それが高解像度ビデオ画像に置き換えるられ使い易くなった。これを民間機の着陸パラメータの決定への応用する可能性が出てきたので、ビデオカメラ画像から民間機の着陸パラメータ(水平速度、降下率、姿勢角とその変化率)を決定する実験を1992年にFAAの技術センターで行なった。

初め特徴点にマニュアルで Window を設定し、特徴点を自動追跡し位置計測をする

ことにより航空機の着陸パラメータを計算することが出来る。パイロットに気づかれることなく、1000以上の着陸が記録された。1台のビデオカメラでは視野が狭いので、4台のカメラを使ったシステムを計画している。

Bricton et al. (1980) は空母夜間着陸用の視覚援助装置の評価として、事故率以外に客観的な評価基準は無いとの初期の結論を得た。その後、15年に渡る研究を行ない、レーダーにより求めた航空機の進入パラメータと理想的なグライドスロープとのずれを回帰分析し、進入評価点と着陸評価点を開発し、訓練に適応し、訓練の効率を向上した。

Corrall et al. (1993) は駐機場の航空機をビデオカメラで撮像し、作業の状態を自動監視する人工知能の手法を提案している。Hogg et al. (1997) は飛行中の姿勢を高速に推定する為に実画像からニューラルネットの手法で特徴抽出したパラメータ空間で姿勢推定をする方法を提案している。

1)Sugiura, I. : “Airplane landing behaviors controlled by man-pilots”, *Memoirs of the Faculty of Engineering (Nagoya University)* 37, 173-202. (1985)

2)Micklos, R. P. & DeFiore T. : “Methods for experimentally determining commercial jet aircraft landing parameters from video image data”, *DOT/FAA/CT-93/7*, 58p. (1993)

3)Bricton, C. A., Breidenbach, S. T., and Stoffer, G. R. : “Operational performance measures for carrier landing: Development and application”, *Proc. Human Factors Society - 24th annual meeting*, 565-567. (1980)

4)Corrall, D. R., Clark, A. N. and Hill, A. G. : “Airside ground movements surveillance”, *AGARD Conf. Proc.* 538, 29.1-29.13. (1993)

5)Hogg, T., Talhami, H., Rees, D. and Johnson, R. : “A practical approach to view-based synergetic pose estimation”, *IEEE TENCON*, 663-666. (1997)

## 付録C. 赤外画像, ミリ波画像

### プロジェクト

可視光線を利用するパイロットの視覚は霧などの悪天候に弱いので、低視程下でのセンサープロジェクトが米国では1960年から行なわれている。1989年から1993年までFAA, DOD, 工業界はSynthetic Vision Technology Demonstration プロジェクトを実施した。このプロジェクトは赤外センサー, ミリ波センサー, ディスプレー技術の現状を地上及び飛行試験で評価するものであり, 搭載型製品の開発を目指すものではない。これと並行して, 1990年から1992年までATA, エアライン, 工業界はEnhanced Vision プロジェクトを実施した(野田1992)。

1)野田文夫 “将来の航空機コックピット表示装置について”, 第30回飛行機シンポジウム, 354-357, (1992)

### 赤外画像

前方監視赤外線 FLIR (Forward Looking InfraRed) センサーは夜間や低視程の時に有効と言われていて, 軍事的だけでなく, 民間でも多数使われている。FLIRの中には晴れた気象条件では夜間でも昼間に近い画像を得ることが出来るものがあると言われてるが, 霧に対してどの程度の透視能力があるのかの報告がほとんど見当たらない。

Maryland大学の研究所MADLは1992年4月から9月までに115人の民間パイロットを招待して, セスナ402を使いIRセンサーの着陸, 地上走行試験を行ない, その有効性を確認したとGreenwood (1992)は報告しているが, 詳細は不明である。

米空軍Wright研究所のAbsi (1993)らは海霧の発生を待ち, 中波長赤外のCCDカメラ(コダックと三菱電機)でアスファルト舗装の疑似滑走路を撮影し, 評価を行なった。3回霧が発生したが, その中で最も霧が深い視程約200mの時, 赤外カメラでは300m以上まで見る事が出来た。

各種のFLIRを製造しているFlir Systems Inc. は2波長(1.5, 8~12 $\mu$ m)

の赤外画像を融合することにより, 夜間と大体の霧の条件下でパイロットに視覚キューを与えることに成功した。民間航空への認定の試験飛行を計画し, 2000年に約10万ドルで発売を予定している(AW&ST 1999)。Lear Astronicsが開発した94GHzミリ波レーダーの画像とも融合して, 最終的には全天候下で安全な離着陸と地上走行が出来る外視界情報を搭乗員に与えることを目指している(AW&ST 1997)。

1)Greenwood, S. W. : “The application of imaging sensors to aircraft landings in adverse weather”, Microwave J. 35, 9, 80, 83, 87-89. (1992)

2)Absi, A. E. : “Evaluation of infrared sensors for autonomous landing guidance”, AD-A266450, 25p. (1993)

3)AW&ST : “Flir nears debut of civil EVS”, May 17, 76. (1999)

4)AW&ST : “Enhanced vision goal: Fly anywhere, anytime”, Apr. 21, 53. (1997)

### ミリ波画像

Honeywellでは35GHzのミリ波レーダを異なる天候で200回以上の進入を行なった。滑走路を進入角3度前後で見ても, その結果を高いフレームレイトで表示しなければならないので, レーダー技術としては難しいが, 10 frames/secを実現し, 滑走路と滑走路上の障害物の検出が可能であり, レーダー画像を使った着陸に成功している(Ferguson & Radke 1993)。

滑走路面では電波がほとんど鏡面反射し戻って来ないのに対して, 滑走路の周辺は草地などで表面が荒れているので電波の反射がかなりあるので, レーダー画像として滑走路を識別することが可能になる。パルス方式のレーダーなので, 可視範囲が近距離側でないことが問題になっている(Horne & Hudson 1993)。日本の空港面監視レーダーASDEでは24GHzの電波を使っているため, 同様な問題点が指摘されている(北館, 加来1995, 1996)。

TRWは対象から放射されるミリ波を検出するカメラを開発した。感度の良いミリ波

センサーのある 94 GHz が選ばれた。赤外センサーと同じ、対象の温度に依存した画像が得られるが、材質、表面の状態、放射角などに対する放射のデータベースから作成しなければならなかった。パッシブなので距離情報は得られないが、可視画像、赤外画像と同様な画像が得られるので、画像を見ることの負担が少なく、3つの画像を合成してコントラストの高い画像を作ることが容易である。可視範囲は近距離側でも良好である。飛行試験を行っていないが、シミュレーターに組み込んだ評価を行なっている (Shoucri et al. 1993)。

Westinghouse は低視程下での運行を改善する為に、コストの面から新たな機器を開発しないで既に航空機に搭載されている X バンド気象レーダーの解像度の改良を提案している (Patterson 1993)。

その後も、パッシブなミリ波センサーの性能とコストの評価が行なわれている (Nordwall 1998)。また Marconi 社はミリ波レーダーを使った自律着陸誘導システムの開発を進め、4年間に500回近い進入試験を行なっている。高度 150 m では滑走路端の識別が、高度 100~135 m では滑走路にアラメントが取れているかが解かると報道されている (Proctor 1999)。

DLR では各種前方監視センサー、地形データ、データリンクを介した地上および他機からの情報を統合することにより搭乗員の状況認識向上を目指した Integrated EVS の研究開発が 1996 年から 1999 年かけて国の予算で行なわれた。地上シミュレーターで Integrated EVS の評価を行ない、可視、赤外、35 GHz ミリ波レーダーを搭載した飛行実験を行なった (Hecker et al., 1999)。

ミリ波レーダーの開発が自動車の分野でも行なわれているが、日本では 60 GHz の周波数帯が割り当てられている (藤村 1996)。

1) Ferguson, D. & Radke, J. : “System for adverse weather landing”, AIAA Paper 93-3980, 5p. (1993)

2) Horne, W. F. & Hudson, B. H. : “Evaluation of candidate millimeter wave radars for synthetic vision”, IEEE

National Telesystems Conference, 83-89. (1993)

3) 加来信之, 北館勝彦: “レーダによる空港面監視システムの試作・実験”, 電子情報通信学会総合大会, 212. (1995)

4) 北館勝彦, 加来信之: “空港面航空機自動識別表示システムの開発”, 電子航法研究所報告 No. 86, 17-34. (1996)

5) Shoucri, M., Davidheiser, R., Hauss, B., Lee, P., Mussetto, M., Young, S., and Yujiri, L. : “A passive millimeter wave camera for landing under low visibility conditions”, IEEE National Telesystems Conference, 109-115. (1993)

6) Patterson, W. W. : “An incremental approach to improved low visibility operation”, IAA Paper 93-3983, 5p. (1993)

7) Nordwall, B. D. : “Millimeter wave challenges IR for low-visibility landing role”, AW&ST, Sep. 14, 78-80. (1998)

8) Proctor, P. : “Marconi to offer enhanced vision sensor”, AW&ST June 7, 42. (1999)

Hecker, P. et al. “Enhanced vision meets pilot assistance”, SPIE Proc. 3691, 125-136. (1999)

9) 藤村契二: “自動車用ミリ波レーダの開発動向”, 電子情報通信学会誌 79, 977-981, (1996)



---

## 航空宇宙技術研究所報告1411号

平成12年8月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7-44-1  
電話(0422)40-3075 ㊦182-8522  
印刷所 株式会社廣濟堂  
東京都港区芝2-23-13

---

### C 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写, 転載を希望される場合は, 管理部  
研究支援課資料係にご連絡ください。

Printed in Japan