

·信号与信息处理·

## 无人机视觉导航中的图像处理及位姿解算

沈 宁,唐大全,李 飞

(海军航空工程学院,山东 烟台 264001)

**摘 要:**在无人机自主着陆过程中,无人机视觉导航系统利用跑道图像解算出无人机的位置姿态信息,为飞行控制系统进行自主着陆控制奠定基础。对视觉导航系统中图像处理及位置姿态解算进行了分析和研究。基于模板匹配进行跑道识别;利用Hough变换提取跑道图像特征;采用最小二乘法对检测出的跑道边缘直线进行拟合并得出其在图像坐标系中的直线方程;基于空间的坐标关系变换,利用推导出的算法对无人机位置姿态进行了解算,并利用实际图像对所用算法进行了实验验证。

**关键词:**视觉导航;模板匹配;Hough变换;边缘检测;位置姿态解算

中图分类号:V249.31;TP391.7

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)06-0060-05

## Image Processing, Position and Attitude Estimating of Visual Navigation on UAV

SHEN Ning,TANG Da-quan,LI Fei

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001,China)

**Abstract:** The information of position and attitude of unmanned aerial vehicle (UAV) during autonomous landing is calculated based on runway images by UAV visual navigation system, which provides a basis for flight control systems to perform the function of autonomous landing control. The calculations of image processing, position and attitude estimating in visual navigation system are analyzed and researched. Template matching mode is used to recognize the runway. Image characteristics of runway are extracted by Hough transform. The least square method is used to merger the detected edge lines of runway and their equations in the image coordinate system are achieved. Based on coordination relations in space, the algorithm is derived to calculate the position and attitude of UAV. Real images are used to verify all the algorithms in experiments.

**Key words:** visual navigation; template matching; Hough transform; edge detection; position and attitude estimating

视觉导航(vision based navigation)是基于计算机视觉(也称为机器视觉 machine vision)的一种导航技术<sup>[1]</sup>。由于具有完全自主性、抗电磁干扰、接近目标时导航精度高等优点,视觉导航在国内外受到了广泛重视和研究,成为具有广阔前景的导航方式,一些学者探讨采用视觉导航实现飞行器的自主着陆或着舰<sup>[2]</sup>。视觉导航是根据载体上相机实时拍摄的图像来计算载体的运动参数,从而进行载体的导航和控

制<sup>[3]</sup>。利用目标图像信息进行导航解算的前提是准确地获取目标图像的特征(如目标点在图像平面的坐标,线状目标在图像平面中的方程描述等),然后再快速地利用所获得的特征解算出无人机的位置姿态。针对无人机自主着陆中的视觉导航,提出了对所获得的跑道图像进行识别、特征提取、方程化及根据跑道直线方程解算无人机位置、姿态信息的方法,并用实验对所提算法进行了验证。

收稿日期:2012-10-08

作者简介:沈宁(1987-),男,山东莱阳人,工学硕士,主要从事视觉导航及惯性导航研究;唐大全(1965-),男,贵州都匀人,教授,硕士生导师,主要从事惯性导航、视觉导航、自动测试及故障诊断研究。

## 1 跑道图像处理

跑道的图像处理过程主要包括对图像的滤波、特征检测与直线提取以及在图像坐标系中建立直线方程这几个过程。

### 1.1 高斯(Gauss)滤波

高斯(Gauss)滤波,就是为了得到较好的图像边缘、信噪比(SNR)较高的图像(反应真实信号)而设计的一种很好的滤波方式<sup>[4]</sup>。取在  $x$  轴方向和  $y$  轴方向具有不同大小的标准差的高斯滤波器作为平滑滤波器,各向异性的高斯滤波器的一般二维形式如下

$$g_{\theta}(u, v, \delta_u, \delta_v, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_u} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{u^2}{\delta_u^2}\right\} * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_v} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{v^2}{\delta_v^2}\right\} \quad (1)$$

其中,\*代表卷积,并且

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

摄像机所获得的图像及其经过高斯滤波后的图像如图1所示,经过滤波之后较好地除去了图像中的噪声像素点。

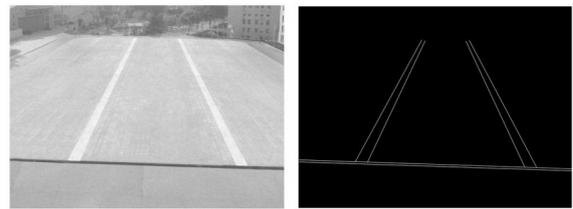


(a) 实际图像 (b) 高斯滤波后的图像  
图1 摄像机所获得的图像与高斯滤波处理结果

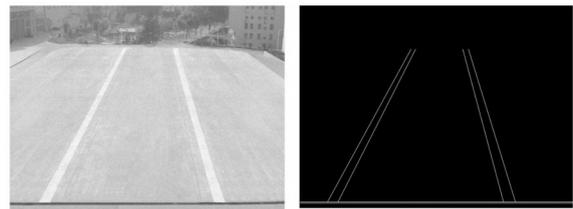
### 1.2 Hough 变换提取跑道直线

Hough 变换的基本思想是:将图像空间  $X-Y$  变换到参数空间  $P-Q$ , 然后利用图像空间  $X-Y$  与参数空间  $P-Q$  的点-线对偶性,通过利用图像空间  $X-Y$  中的边缘数据点去计算参数空间的  $P-Q$  中的参考点的轨迹,从而将不连续的边缘像素点连接起来,实现对图像中直线的检测,或将边缘像素点连接起来组成封闭边界的区域<sup>[5]</sup>。

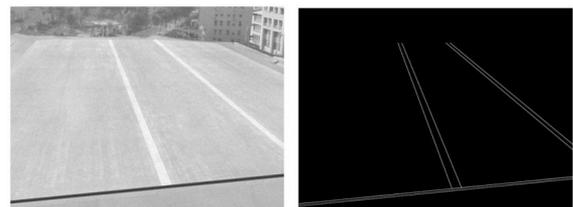
对在4个不同位置及姿态下采集到的着陆场实际图像经过 Hough 变换,直线特征提取后的图像,如图2所示。由图2中可以看出,跑道的特征直线已经



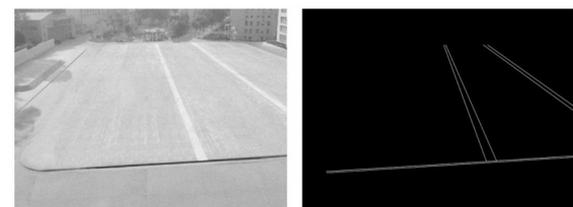
(a) 实际图像1及其经过 Hough 变换检测后的图像



(b) 实际图像2及其经过 Hough 变换检测后的图像



(c) 实际图像3及其经过 Hough 变换检测后的图像



(d) 实际图像4及其经过 Hough 变换检测后的图像

图2 实际图像及经过 Hough 变换后的图像

比较顺利地提取出来。

### 1.3 建立跑道直线方程

得到跑道边缘直线之后,需要利用最小二乘法对检测到的直线进行方程化,拟合出其在图像坐标系下的直线方程。

设定跑道模型的几何线性方程为:  $\hat{y} = a + bx$ , 设已提取的特征点为  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ , 则要使这些特征点满足上述方程,就要使均方误差

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (3)$$

最后,要使  $Q(\hat{a}, \hat{b}) = \min Q(a, b)$ , 可求出  $a, b$  的最小二乘估计量<sup>[6]</sup>。

解得

$$\begin{cases} \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ;  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  分别为直线的截距和斜率的最小二乘估计量。

从图2中可知,由于Hough变换检测的精确性,每条跑道边缘各提取出两条直线,共三组成对的直线。在实际处理时,对每组的两条直线上相同  $y$  坐标的点取其  $x$  坐标中间值,然后拟合成直线,即可得到位于每组两条直线正中间的直线的方程

(1)  $I_1: y = -2.0048x + 687.8784$

$I_2: y = 2.0379x - 744.8218$

$I_3: y = 0.0355x + 374.9195$

(2)  $I_1: y = -1.9065x + 630.5542$

$I_2: y = 3.900x - 1445.9$

$I_3: y = 0.0035x + 472.8980$

(3)  $I_1: y = 2.7084x - 571.8952$

$I_2: y = 0.8443x - 212.4135$

$I_3: y = -0.1017x + 477.1324$

(4)  $I_1: y = 2.6302x - 815.8237$

$I_2: y = 0.7469x - 239.0397$

$I_3: y = -0.0555x + 400.7441$

## 2 着陆过程坐标系及相互转换

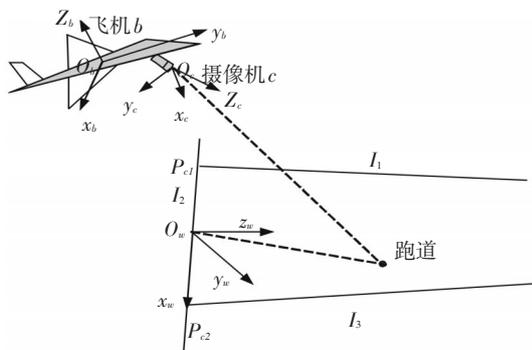


图3 无人机飞行过程各坐标系之间的关系

图3是无人机飞行状态下,建立的各个坐标系的关系。跑道坐标系中一点  $p$  的齐次点坐标  $[p_w^T, 1]^T = [x_w, y_w, z_w, 1]^T$ , 其在摄像机坐标系中的齐

次点坐标为  $[p_c^T, 1]^T = [x_c, y_c, z_c, 1]^T$ , 则

$$p_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} p_w \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{R}$  是跑道坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, 旋转所形成的摄像机坐标系相对于跑道坐标系的三个欧拉角为:(1)俯仰角  $\theta_c$ : 摄像机主光轴  $o_c z_c$  相对于地平面的夹角,以抬头为正;(2)偏航角  $\psi_c$ : 摄像机主光轴在地面上的投影与跑道中线  $o_w z_w$  之间的夹角,摄像机向右偏为正。(3)滚转角  $\gamma_c$ : 摄像机主光轴与包含摄像机主光轴的铅垂面的夹角,摄像机头右倾斜为正。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(\gamma_c) \mathbf{R}(\theta_c) \mathbf{R}(\psi_c) \quad (6)$$

设  $T$  为跑道坐标系原点在摄像机坐标系中的位置,则有

$$T = (t_x, t_y, t_z)^T = (x_b^w, y_b^w, z_b^w)^T \quad (7)$$

摄像机成像几何关系如图4所示。其中,  $o_i - x_i y_i$  为成像平面的物理坐标系,  $o_c o_i$  为摄像机主光轴焦距,用  $f$  表示。

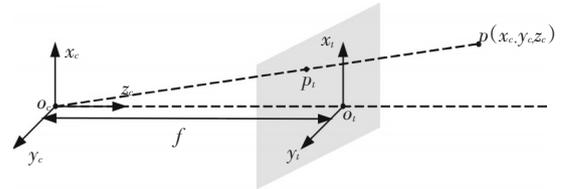


图4 摄像机坐标系与图像物理坐标系

摄像机采集的图像需要变换为数字图像,像素坐标系具体定义为  $o - uv$ , 如图5所示。

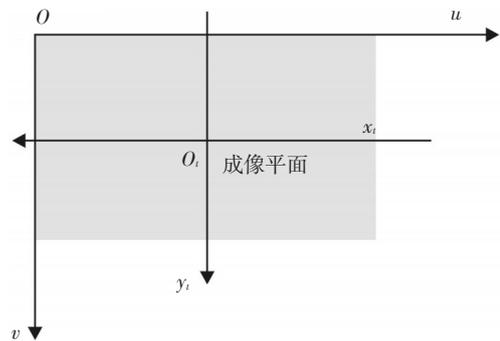


图5 图像物理坐标系与图像像素坐标系

跑道坐标系上的点  $p_w$  与其在图像像素坐标上的投影点坐标  $(u, v)$  的关系

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} p_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\alpha_u = \frac{f}{dx}$ ,  $\alpha_v = \frac{f}{dy}$ ,  $M_1$  由摄像机内部参数  $\alpha_u$ 、 $\alpha_v$ 、 $u_0$ 、 $v_0$  组成;  $M_2$  由旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $T$  组成。

### 3 位姿解算算法

对于位姿估计在无人机视觉着陆中的应用,国内外也有很多的研究,但大多数都只是基于理论上的推导,并且由于无人机在飞行过程中对位姿估计的实时性要求是比较高的,因此需要建立一种准确而快速解算无人机位置姿态信息的算法。

跑道上检测到的三条直线上向量  $I_1$ 、 $I_3$  与  $I_2$  之间满足以下三个固定约束条件:

(1) 边  $I_1$  垂直于边  $I_2$ , 即  $I_1 \perp I_2$ ;

(2) 跑道坐标系到摄像机坐标系的变化是刚体变换,长度并不会改变,设两条跑道边缘直线之间的距离为  $\lambda$ , 则  $|p_{w1} p_{w2}| = |p_{c1} p_{c2}| = \lambda$ ;

(3) 边  $I_1$  平行于  $I_3$ , 即  $I_1 // I_3$ 。

跑道的两条纵向直线与横向入口直线的交点设为起始点  $p_{c1}$ 、 $p_{c2}$ 。光心  $o_c$  和跑道上一点  $p_i$  之间的距离设为  $\chi_i$ , 称之为光心深度, 则  $p_i$  在摄像机坐标系中的坐标可以表示为

$$p_{ci} = \left( \frac{\chi_i x_{ii}}{\eta_i}, \frac{\chi_i y_{ii}}{\eta_i}, \frac{\chi_i f}{\eta_i} \right) \quad (9)$$

式中  $\eta_i = \sqrt{f^2 + x_{ii}^2 + y_{ii}^2}$ ;  $p_{c1}$ 、 $p_{c2}$  在摄像机坐标系中的坐标可以由已获得的直线方程求解得到, 根据固定约束条件, 在已知光心深度的前提下, 计算向量  $I_2$  在摄像机坐标系中的表达式为

$$I_{c2} = \left( \frac{\chi_1 x_{i1}}{\eta_1} - \frac{\chi_2 x_{i2}}{\eta_2}, \frac{\chi_1 y_{i1}}{\eta_1} - \frac{\chi_2 y_{i2}}{\eta_2}, \frac{\chi_1 f}{\eta_1} - \frac{\chi_2 f}{\eta_2} \right) \quad (10)$$

边缘线向量  $l_{c1}$  可以借助成像几何学中的消失点  $p_{rv}$ <sup>[7]</sup> 用向量  $\overrightarrow{o_c p_{rv}}$  表示。

将这两个向量单位化, 组成单位正交化矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} l_{c1} & l_{c2} \\ |l_{c1}| & |l_{c2}| \end{bmatrix}, \text{ 其对应的跑道坐标系的单位正交化}$$

矩阵  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} l_{w1} & l_{w2} \\ |l_{w1}| & |l_{w2}| \end{bmatrix}$ , 那么跑道坐标系向摄像机坐标

系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  由  $\mathbf{RB} = \mathbf{A}$  决定, 由于旋转矩阵的正交性特性, 该线性方程组问题可以转化为以下最小二乘问题

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{A} - \mathbf{RB}\|^2 \\ \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_3 \end{cases} \quad (11)$$

根据 Umeyama 定理<sup>[8]</sup>, 对两个单位正交化矩阵进行变换, 可以求解出旋转矩阵的大小。由下式可以得到三个姿态角

$$\begin{cases} \theta_c = -\arcsin(\mathbf{R}(3,2)) \\ \psi_c = \arctan \frac{\mathbf{R}(3,1)}{\mathbf{R}(3,3)} \\ \gamma_c = \arctan \frac{\mathbf{R}(1,2)}{\mathbf{R}(2,2)} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)是摄像机坐标系相对于跑道坐标系的旋转角度, 经过式 13 可转化为无人机相对于跑道的姿态角所组成的旋转矩阵, 其中  $\mathbf{R}_w^c$  是摄像机相对于无人机的旋转矩阵。

$$\mathbf{R}_w^b = \mathbf{R}_w^c \mathbf{R} \quad (13)$$

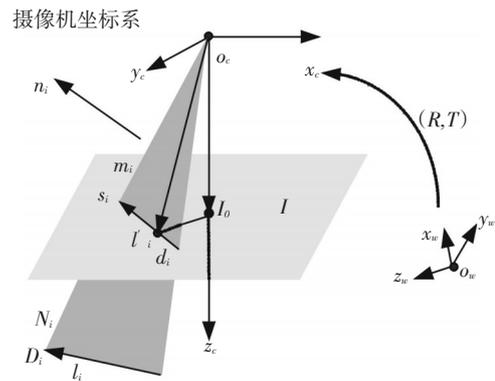


图6 直线的空间成像原理

如图6所示, 直线  $l_i$  在跑道坐标系中的表达式为  $p'_{wi} = p_{wi} + \lambda D_{wi}$ ,  $D_{wi}$  为方向向量,  $\lambda$  为任何实数。根据成像原理,  $l_i$ 、 $l'_i$ 、 $o_c$  处于同一个平面  $N_i$ , 此平面称为解析平面, 表达式为

$$a_i x_{ii} + b_i y_{ii} + c_i z_{ii} = 0 \quad (14)$$

其中,  $n_i = (a_i, b_i, c_i)^T$ ,  $n_i$  为平面  $N_i$  在相机坐标系下的单位法向量。成像平面  $I$  在摄像机坐标系下的表达式为  $z_{ii} = f$ 。  $l'_i$  在图像物理坐标系上的表达式为

$$a_i x_{ii} + b_i y_{ii} + c_i f = 0 \quad (15)$$

过  $o_c$  作像平面  $I$  的垂线, 并交像平面于  $I_0$ , 过  $I_0$  作  $l'_i$  的垂线, 并交  $l'_i$  于  $d_i$ , 显然,  $o_c d_i \perp l'_i$ 。假设  $l'_i$  在摄像机坐标系下的单位向量为  $s_i$ ,  $\overrightarrow{o_c d_i}$  的单位向

量为  $m_i$

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}(b_i, -a_i, 0)^T \quad (16)$$

$$m_i = \frac{(-a_i c_i, -b_i c_i, a_i^2 + b_i^2)^T}{|(-a_i c_i, -b_i c_i, a_i^2 + b_i^2)|} \quad (17)$$

自此,得到了解析平面  $N_i$  上的一组标准正交基  $[s_i, m_i]$ 。设向量  $\epsilon$  为该平面上的任意向量,可表示为

$$\epsilon = (\epsilon \cdot s_i)s_i + (\epsilon \cdot m_i)m_i = [s_i s_i^T + m_i m_i^T]\epsilon \quad (18)$$

令共面性参数<sup>[9]</sup>  $K_i = s_i s_i^T + m_i m_i^T$ ,把解析平面  $N_i$  上直线  $l_i$  的一点  $R p_{wi} + T$  表示为

$$R p_{wi} + T = K_i(R p_{wi} + T) \quad (19)$$

任意取直线上一点,共面性误差之和为

$$E(R, T) = \sum_{i=1}^3 \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(I_3 - K_i)(R p_{wi} + T)\|^2 \quad (20)$$

对式(17)进行关于  $T$  的求导

$$\begin{aligned} \frac{dE(R, T)}{dT} &= \sum_{i=1}^n (I_3 - K_i)^T (I_3 - K_i)(R p_{wi} + T) = \\ &= \sum_{i=1}^3 [I_3 - 2(s_i s_i^T + m_i m_i^T) + (s_i s_i^T + m_i m_i^T) \\ &\quad (s_i s_i^T + m_i m_i^T)](R p_{wi} + T) \end{aligned} \quad (21)$$

由于  $s_i^T s_i = m_i^T m_i = 1, s_i^T m_i = m_i^T s_i = 0$ , 最终得到关于  $T$  的导数为

$$\frac{dE(R, T)}{dT} = \sum_{i=1}^3 (I_3 - K_i)(R p_{wi} + T) \quad (22)$$

给定旋转矩阵  $R$ , 并令导数为0, 平移向量的最优解为

表1 不同跑道图像对应的位置、姿态求解

图 2 序 号	解算所得 姿态(°) ( $\theta', \psi', \gamma'$ )	解算所得位 置坐标(m) ( $x', y', z'$ )	真实姿态 (°) ( $\theta, \psi, \gamma$ )	真实位置 (m) ( $x_r, y_r, z_r$ )
(a)	(-14.826 3, 0.133 2, -5.090 1)	(0.020 1, -12.479 4, -35.708 3)	(-15, 0, -5)	(0, -12.5, -36)
(b)	(-19.893 7, 4.191 6, -6.883 8)	(1.922 9, -13.019 8, -35.602 5)	(-20, 4, -7)	(2, -13, -35.5)
(c)	(-25.284 7, 4.932 7, 16.136 4)	(-9.880 2, -16.003 7, -35.800 2)	(-25, 5, 16)	(-10, -16, -36)
(d)	(-20.102 1, 8.303 2, 7.912)	(-7.119 2, -15.729 4, -35.610 1)	(-20, 8, 8)	(-7, -16, -35.5)

$$T = \left( \sum_{i=1}^3 (I_3 - K_i) \right)^{-1} \sum_{i=1}^3 (K_i - I_3) R p_{wi} \quad (23)$$

在上面图2中已经得到了4幅不同位置的图像中的直线特征方程,利用所推导出的算法解算其位置姿态,并与真实值相对比,如表1所示。

从表1中可以看出,解算结果与真实值的误差是比较小的。为得到较为准确的比较结果,继续对摄像机所获得的30幅图像利用该算法进行解算,对算法的误差结果进行总结,如表2所示。

表2 解算结果误差分析

算法	姿态信息/(°)			位置信息/(m)		
	$\theta$	$\psi$	$\gamma$	$x$	$y$	$z$
最大 误差	-0.372	0.303	0.136	0.119	0.270 6	0.292
均值	-0.043	0.073	0.035	-0.011	-0.029	0.078
方差	0.052	0.028	0.010	0.021	0.033	0.041

## 4 结 论

视觉导航在未来的应用将会十分广泛,例如飞机的自主着陆、汽车的自主导航等方面,准确快速地获取目标图像特征是视觉导航进行导航解算的前提。文中针对无人机着陆中的视觉导航,提出了对所获得的跑道图像进行识别、特征提取和方程化的方法,并利用实际图像对位置、姿态信息进行了解算。实验表明,所提的方法准确、快速有效。

## 参考文献

- [1] Chatterji G B, Menon P K. Machine-vision based pilot aids for night landing and take off[C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Scottsdale: AZ, 1994: 1332-1333.
- [2] Paul A Ghyzel. Vision-based navigation for autonomous landing of unmanned aerial vehicles (Master thesis) [D]. Monterey, California: Naval postgraduate school, 2000: 13-14.
- [3] Tang Daquan, Zhang Hongyue. Vision based navigation algorithm for autonomic landing of UAV without heading & attitude sensors[C]// Proceedings of the second IEEE International Conference On Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS'07). Shanghai, China, 2007: 910-912.

(下转第87页)

$$\eta_{\Delta\varphi} = \exp\left(-\left(\frac{\pi n_2 \omega \Delta\varphi}{\lambda}\right)^2\right)$$

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{a_4 \cdot Z_4}{a_2 \cdot Z_2}\right) & x\text{向倾斜} \\ \arctan\left(\frac{a_4 \cdot Z_4}{a_3 \cdot Z_3}\right) & y\text{向倾斜} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\omega$ 为激光束腰半径,  $n_2$ 为包层折射率。端面倾斜 $\Delta\varphi$ 对耦合效率的影响见图5。

### 3 结 论

分析了大气湍流对空间光影响的曲线和大气湍流对光纤耦合效率影响的曲线,得出结论为:大气湍流对空间光到光纤耦合效率的影响主要表现在3个方面:端面倾斜、聚焦光斑横向偏移、聚焦光斑纵向偏移。要想提高光纤耦合效率,可以选择在折射率结构常数较小(高空10 km以上)的情况下发射激光。在分析的同时运用Zernike多项式法对光纤耦合效率进行模拟,该模拟结果可以作为自适应光学成像系统仿真实验的校正对象。

### 参考文献

- [1] ROGEMANN M C, WELSH B M. Image through Turbulence[M]. New York: CRC Press, 1995.
- [2] FAN E S, HOOKER R B. Tapered polymer single mode waveguides for mode transformation[J]. IEEE journal of Light-wave Technology, 1999, 17(3): 466-474.
- [3] Carbonneau T H, Wisely D R. Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunication links in today's crowded marketplace [C]//Proc. SPIE, 1998, 3232: 119-128.
- [4] Adisorn Tuantranont, Victor M Bright. Introduction to Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) with Emphasis on Optical Applications[J]. Technical Journal, 2000, 1(6): 227-236.
- [5] Hemmati H. Overview of laser communications research at JPL[C]//Proc. SPIE, 2001, 4273: 190-193.
- [6] Pribil K. Laser communication terminals: a key building block for the new broadband satellite networks[C]//Proc. SPIE, 1998, 34: 172-177.
- [7] Nielsen T T, Oppenhauser G.. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]//Proc. SPIE, 2002, 4638: 1-15.
- [8] 李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. 应用激光, 2004, 24(5): 276-278.
- [9] 段锦, 王曦泽, 景文博, 等. 基于Zernike多项式的大气湍流相位屏的数值模拟[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(1): 132-135.
- [10] 胡谋法. 受大气湍流影响的光学波前模拟方法[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(5): 10-12.
- [11] 马惠军, 朱小磊. 自由空间激光通信最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 7-10.
- [12] 周炳琨, 高以智, 陈家骅. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [13] 向劲松, 陈彦, 胡渝. 大气湍流对空间光耦合至单模光纤的影响[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 377-380.
- [14] 谢木军, 付承毓, 马佳光. 自由空间激光通信及其关键技术[J]. 光电工程, 1999, 26(12): 23-28.

(上接第64页)

- [4] 李弼程, 彭天强, 彭波. 智能图像处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 149-155, 322-324.
- [5] 李俊山, 李旭辉. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 173-176.
- [6] 夏德深, 傅德胜. 现代图像处理技术与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1997: 35-38, 40-44.
- [7] Duminda I, B Randeniya. Automatic Geo-Referencing by Integrating Camera Vision and Inertial Measurements[D]. South Florida: University of South Florida. 2007: 47-50.
- [8] Shinji Umeyama. Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 13(4): 376-380.
- [9] Chien-Ping Lu, Gregory D Hager, Eric Mjolsness. Fast and Globally Convergent Pose Estimation from Video Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 22(6): 610-621.