

文章编号: 1001- 2486(2008) 01- 0019- 06

# 一种基于单幅跑道图像的无人机降落位姿测量新方法\*

张小苗, 尚 洋, 雷志辉, 于起峰

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 提出了一种在无人机降落并接近跑道的过程中, 在已知跑道宽度的前提下, 基于单幅跑道图像测量其位姿参数的新方法。通过分析跑道消影点与无人机位姿的关系, 得到消影点的图像坐标与姿态角的关系。依据摄像机共线方程, 推导出了无人机位姿与跑道的世界坐标方程系数及像直线方程系数的关系。通过合理假设, 对位姿参数进行了简化, 求解出无人机降落过程中的位姿状态。仿真实验结果证明, 方法易于实现, 可满足无人机自主降落导航的应用需求。

**关键词:** 无人机; 跑道; 消影点; 共线方程; 自主降落

**中图分类号:**      **文献标识码:** A

## Landing Position and Attitude Measurement of UAV Using Runway Image

ZHANG Xiao-miao, SHANG Yang, LEI Zhi-hui, YU Qi-feng

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A new method of landing position and attitude measurement of UAV using only one runway image, which is proved applicable to such circumstance as UAV approaching to the ground while the runway width is known, is proposed in this paper. Firstly, the relation between the attitude and the vanishing point of runway was analyzed. Then, the collinearity equation was transformed by the runway line and the image line equations coefficients. Furthermore, the position along runway and the bank angle was simplified on the basis of the reasonable assumption. In so doing, the landing position and attitude of UAV was calculated by previous relations. Simulate experiment results show that the new way is easy to realize and can satisfy the application requirement of autonomous landing.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; runway; vanishing point; collinearity equation; autonomous landing

基于视觉的无人机自主降落相关理论和方法是近年来的研究热点之一, 其关键技术之一就是通过分析机载摄像机系统对着陆区域的成像, 获取无人机降落过程中的位置和姿态参数。Sasa 等<sup>[1]</sup>提出了一种利用单目摄像机拍摄的跑道边缘线 and 海平线计算得到无人机降落过程中的位姿参数的方法, 并指出如果图像中无法拍摄到海平线等此类关键边缘线, 也可以通过惯性测量装置获得姿态信息, 进而利用跑道获得位置信息。Liu 等<sup>[2]</sup>介绍了使用双目摄像机拍摄机场中设置的合作标志, 利用双目交会原理求解无人机的位姿参数的方法。张广军等<sup>[3]</sup>提出了一种基于双圆特征的无人机自主着陆位置姿态的单目视觉测量方法。邱力为等<sup>[4]</sup>研究了一种应用于无人直升机自主着舰的双目立体计算机视觉系统及相关计算机视觉技术。文献[5~ 8]也分别就基于点匹配、跑道和消影线等基于视觉的无人机自助着陆方法进行了研究。

本文主要研究的问题是当无人机已经位于降落下滑道内并下降至较低高度时, 由于无法继续在图像中同时获得跑道和其他参考标志的情况下, 如何仅利用单幅跑道图像计算得到无人机降落的位姿参数。

\* 收稿日期: 2007- 05- 21

作者简介: 张小苗(1979—), 女, 博士生。

## 1 算法原理

### 1.1 摄像机成像模型和坐标系定义

在本文中,摄像机成像模型选择中心透视投影模型,即针孔模型。假设摄像机与无人机之间没有相对运动,并且在无人机飞行前,已经对摄像机的内参数和镜头像差系数进行过离线标定。

图1即为本文研究所设定的坐标系。跑道坐标系的原点  $O_R$  位于跑道中心线上,  $O_R X_R$  轴沿跑道中心线指向无穷远处,  $O_R Y_R$  轴垂直于跑道,进而根据右手定则确定  $O_R Z_R$  轴方向。摄像机坐标系  $O_C - X_C Y_C Z_C$  固连于无人机上,所以摄像机坐标系相对于跑道坐标系的位姿可直接用于表征无人机相对于跑道的位姿,两者之间只相差一个固定的坐标变换,其中,  $O_C Z_C$  轴是光轴的指向并穿过图像中心。在本文中,摄像机坐标系等同于无人机的质心坐标系。

地面点的跑道坐标系坐标  $(x_R, y_R, z_R)$ 、摄像机坐标系坐标  $(x_C, y_C, z_C)$  与其对应的图像点坐标  $(x_I, y_I)$  满足

$$\lambda \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R - x_R^C \\ y_R - y_R^C \\ z_R - z_R^C \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $(x_R^C, y_R^C, z_R^C)$  为摄像机坐标系原点在跑道坐标系内的坐标,是摄像机(即无人机)的位置参数;  $R_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 是摄像机光轴的旁向倾角  $\omega$ 、航向倾角  $\varphi$  和图像旋角  $\kappa$  的正余弦的组合,而这三个角也分别对应于无人机的俯仰角、滚转角和偏航角,即无人机的姿态参数。

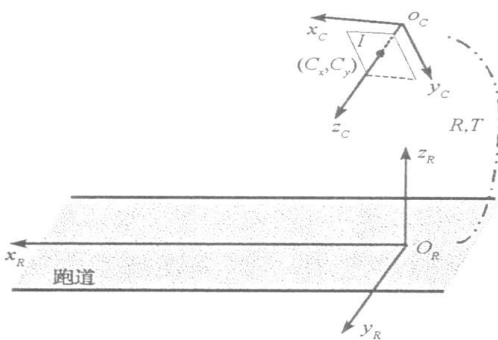


图1 跑道坐标系和摄像机坐标系

Fig. 1 The runway and the camera coordinate systems

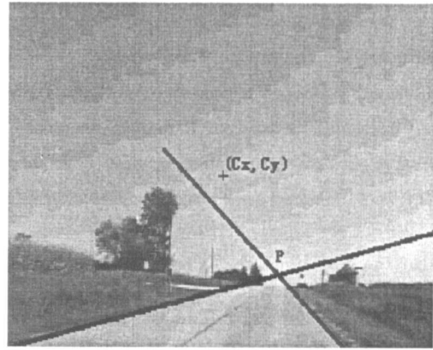


图2 跑道和消影点

Fig. 2 Runway and vanishing point

### 1.2 跑道消影点随摄像机外参数的变化关系

透视投影的一个显著特征是延伸至无穷远的物体的图像可能出现在有限范围内<sup>[9]</sup>。从几何上讲,世界直线的消影点由平行于该直线并过摄像机中心的射线与图像平面的交点得到,如果世界直线平行于图像平面,那么消影点在图像的无穷远处。无人机降落跑道的两条边缘线是平行的,而它们在图像上的像的交点就是跑道方向的消影点。图2为一幅从机载摄像机拍摄的降落跑道图像,点P就是跑道方向的消影点,点  $(C_x, C_y)$  是图像中心。

设摄像机的内参数为  $f_x = 500, f_y = 500, c_x = 320, c_y = 240$ 。当前时刻,摄像机外参数为  $x_R^C = 0, y_R^C = 0, z_R^C = 60, \omega = 25^\circ, \varphi = 0^\circ, \kappa = -20^\circ$ 。在对跑道的成像仿真实验中,依次对每个外参数进行变化并保持其余5个参数不变,得到的跑道和消影点的位置如图3所示,(a)至(f)为依次改变  $x_R^C, y_R^C, z_R^C, \omega, \varphi, \kappa$  的实验结果,其中,虚线方框为图像范围,实线、点线和点划线依次为第1、2、3次变化时对应的跑道图像。

根据得到的当各摄像机外参数独立发生变化时消影点在图像中位置的变化情况,可以定性地得出以下结论:

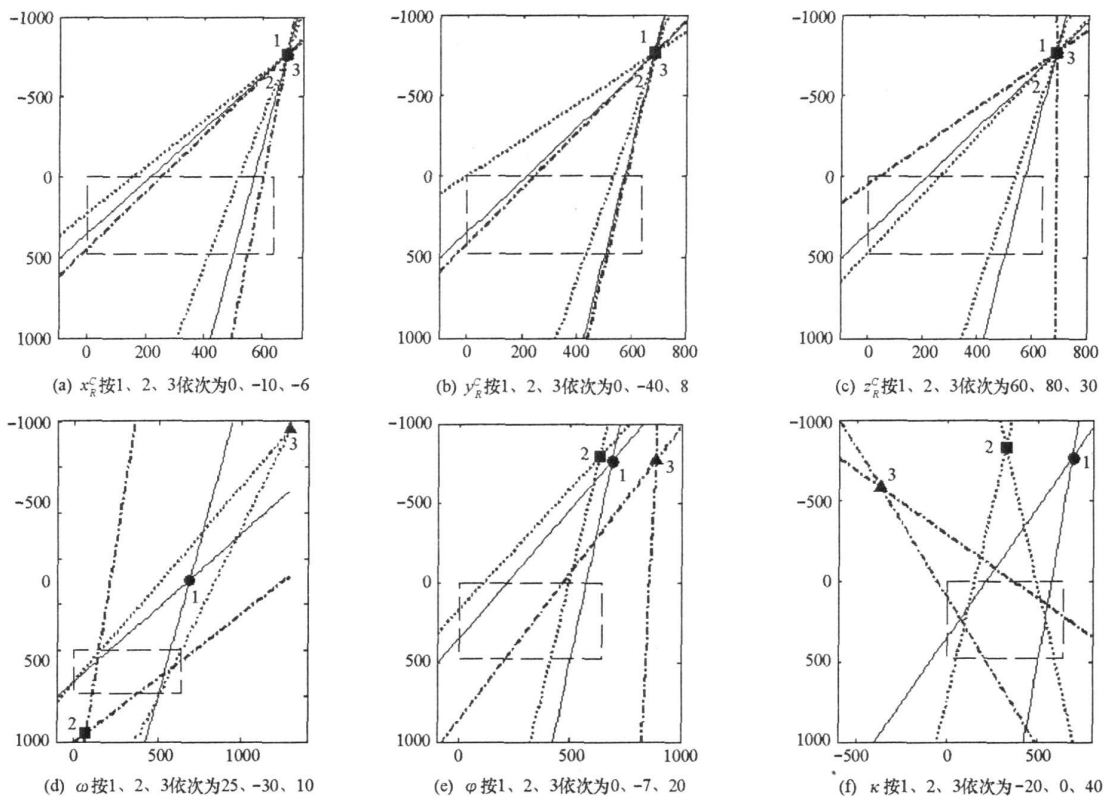


图3 消影点位置随摄像机外参数变化的变化情况(横轴为  $x$ , 纵轴为  $y$ )

Fig. 3 Image coordinates of vanishing points with the variation of camera extrinsic parameters

- 摄像机坐标系相对于跑道坐标系的位置变化不会引起消影点的位置变化;
- 摄像机坐标系相对于跑道坐标系的姿态变化引起消影点的位置变化。

### 1.3 基于单幅跑道图像求解无人机降落的位姿参数

理论上,消影点可以提供摄像机的姿态信息。而代数上,因为消影点是无穷远点的图像,故可将其作为极限点而求得。

式(1)可变换为

$$\begin{cases} \frac{x_I - c_x}{f_x} = \frac{R_{11} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{12} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{13} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)}{R_{31} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{32} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{33} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)} \\ \frac{y_I - c_y}{f_y} = \frac{R_{21} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{22} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{23} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)}{R_{31} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{32} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{33} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)} \end{cases} \quad (2)$$

对于消影点  $P \left( x_{VP}, y_{VP} \right)$  而言,有

$$\begin{cases} \frac{x_{VP} - c_x}{f_x} = \lim_{x_R \rightarrow \infty} \frac{x_I - c_x}{f_x} = \lim_{x_R \rightarrow \infty} \frac{R_{11} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{12} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{13} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)}{R_{31} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{32} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{33} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)} = \frac{R_{11}}{R_{31}} \\ \frac{y_{VP} - c_y}{f_y} = \lim_{y_R \rightarrow \infty} \frac{y_I - c_y}{f_y} = \lim_{y_R \rightarrow \infty} \frac{R_{21} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{22} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{23} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)}{R_{31} \left( x_R - \frac{c_x}{R_{11}} \right) + R_{32} \left( y_R - \frac{c_y}{R_{12}} \right) + R_{33} \left( z_R - \frac{c_z}{R_{13}} \right)} = \frac{R_{21}}{R_{31}} \end{cases} \quad (3)$$

即有

$$\frac{y_{VP} - c_y}{x_{VP} - c_x} = \frac{R_{21}}{R_{11}} \cdot \frac{f_y}{f_x} \quad (4)$$

式(2)又可写成

$$\begin{cases} \frac{x_I - c_x}{f_x} = \frac{R_{11}x_R + R_{12}y_R + R_{13}z_R + x_C^R}{R_{31}x_R + R_{32}y_R + R_{33}z_R + z_C^R} \\ \frac{y_I - c_y}{f_y} = \frac{R_{21}x_R + R_{22}y_R + R_{23}z_R + y_C^R}{R_{31}x_R + R_{32}y_R + R_{33}z_R + z_C^R} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $(x_C^R, y_C^R, z_C^R)$  为跑道坐标系原点在摄像机坐标系内的坐标。由于  $z_C^R > 0$ , 可令  $t_{ij} = R_{ij}^R / z_C^R$ ,  $t_{41} = x_C^R / z_C^R$ ,  $t_{42} = y_C^R / z_C^R$ , 式(5)可化为关于  $t_{ij}$  的线性方程组

$$\begin{cases} x_R t_{11} + y_R t_{12} + z_R t_{13} + t_{41} - \frac{x_I - c_x}{f_x} (x_R t_{31} + y_R t_{32} + z_R t_{33}) = \frac{x_I - c_x}{f_x} \\ x_R t_{21} + y_R t_{22} + z_R t_{23} + t_{42} - \frac{y_I - c_y}{f_y} (x_R t_{31} + y_R t_{32} + z_R t_{33}) = \frac{y_I - c_y}{f_y} \end{cases} \quad (6)$$

跑道边缘线的跑道坐标系方程分别为  $y_R = A_k x_R + B_k$ ,  $z_R = 0$ , 对应的像直线的方程分别为  $y_I = a_k x_I + b_k$ ,  $k = 1, 2$ , 将它们代入式(6)可得

$$\begin{cases} \left\{ \begin{matrix} a_k c_x + b_k - c_y \\ a_k c_x + b_k - c_y \end{matrix} \right\} \begin{matrix} t_{31} + A_k t_{32} \\ B_k t_{32} + 1 \end{matrix} + a_k f_x \begin{matrix} t_{11} + A_k t_{12} \\ B_k t_{12} + t_{41} \end{matrix} - f_y \begin{matrix} t_{21} + A_k t_{22} \\ B_k t_{22} + t_{42} \end{matrix} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

至此, 根据单幅跑道图像可以得到以下关系: (1) 根据两条跑道边缘线的跑道坐标系方程及其像直线的图像方程, 式(7)可提供4个方程。(2) 根据1.1中的定义, 可知  $A_1 = A_2 = 0$ ,  $B_1 = w/2$  和  $B_2 = -w/2$ 。(3) 只要跑道足够长, 就不必关心无人机沿跑道方向的位移  $x_C^R$ , 故令  $x_C^R = 0$ , 即跑道坐标系的原点随着无人机的飞行在跑道中心线上随之移动。(4) 在本文的研究背景下, 当无人机进入降落下滑道后, 经过一段时间的姿态调整, 在接近跑道的高度较低的范围时, 假设无人机的滚转角为0不会给其他参数的计算结果带来很大的影响<sup>[1]</sup>, 故有  $\varphi = 0$ 。(5)  $R_{ij}^R$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 与姿态角之间存在固有的正余弦关系<sup>[10]</sup>。(6) 式(4)中根据消影点的性质得到它与  $R_{ij}$  的关系。求解根据以上关系列出的方程组即可求解得到无人机在跑道坐标系内的位姿参数。

## 2 实验与分析

### 2.1 数字仿真实验

首先生成一幅跑道的仿真图像。仿真条件如表1所示, 并令像差系数为0。

表1 数字仿真实验条件

Tab.1 Digital simulation experiment condition

摄像机内参数				摄像机外参数				已知跑道信息			跑道像直线方程
$f_x$	$f_y$	$c_x$	$c_y$	$x_C^R$	$y_C^R$	$z_C^R$	$\omega$	$\varphi$	$\kappa$	$w$	
1000	1000	500	500	0	6.5	40	5°	0°	-3°	60	$\begin{cases} y_R = 30 & y_I = -9.6383x_I - 329.5450 \\ z_R = 0 & y_I = 37.3854x_I - 51971.1106 \\ y_R = -30 & \text{消影点:} \\ z_R = 0 & (1098.2027, -10914.3878) \end{cases}$

本文方法的误差来源主要包括: (1) 假设消影点所对应的空间点位于无穷远处带来的误差; (2) 摄像机内参数的标定误差; (3) 图像中跑道边缘的提取误差; (4) 假设无人机的滚转角为0带来的误差。

误差(1)方法本身所固有的, 根据其物理含义, 当消影点所对应的空间点越接近无穷远处, 则该项误差越小。相应地, 由图3(d)可知, 当无人机的俯仰角越小时, 该项误差越小。

误差(2)系统误差, 降低此类误差关键在于选择合适的标定算法, 因不是本文研究重点, 此处不赘述。

误差(3)随机误差, 与跑道提取算法的性能有直接联系, 本文通过对消影点图像坐标添加不同均值

水平的高斯误差,通过各参数计算结果的相对误差对此类误差进行分析。如图4所示,4幅曲线图的横轴均为向消影点图像坐标添加的高斯误差的均值水平,从左至右依次纵轴为  $y_R^C$ 、 $z_R^C$ 、 $\omega$  和  $\kappa$  的相对误差。从中可以看出,随着消影点位置误差的增加,各测量值的误差呈增加趋势。

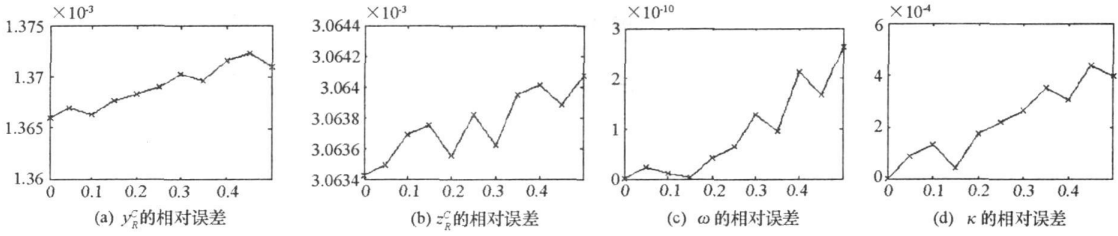


图4 各测量值的相对误差随随机误差水平增加呈增加趋势(横轴为随机误差的方差,纵轴为测量值的相对误差)

Fig. 4 Relative error of measurement results increase with the upgrade of random noise level

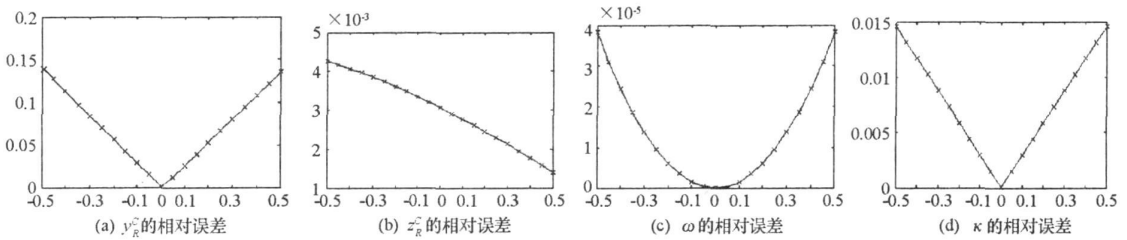


图5 随无人机滚转角误差的增加,各测量值的相对误差的变化趋势(横轴为滚转角的弧度值,纵轴为测量值的相对误差)

Fig. 5 The variance of relative error of measurement results with the error increase of bank angle

误差(4)根据实际应用对算法做出的简化,如果  $\varphi$  事实上不为 0,对其他测量值带来的相对误差如图4所示,此时仿真条件除  $\varphi$  和跑道的图像方程之外同表1。如图5所示,4幅曲线图的横轴均为滚转角的真值,从左至右依次纵轴则是将滚转角当作 0 而计算得到的  $y_R^C$ 、 $z_R^C$ 、 $\omega$  和  $\kappa$  的相对误差。从中可以看出,这一简化对无人机沿  $O_R Y_R$  轴的位移的测量结果影响较大,这是因为  $\varphi$  和  $y_R^C$  对跑道成像位置的影响是耦合的,仅利用跑道信息无法将它们分离,因而要根据适用环境进行简化假设。

### 2.2 实物仿真实验

手持摄像机对实验室的仿真机场跑道进行连续拍摄(如图6(a)所示)。摄像机进行离线标定,其内参数为  $c_x = 320, c_y = 240, f_x = 722.659074, f_y = 616.452330$ , 像差系数  $k[5] = [0.653769 \quad 0.168419 - 0.051729 \quad 0.124765 \quad 0.389564]$ 。

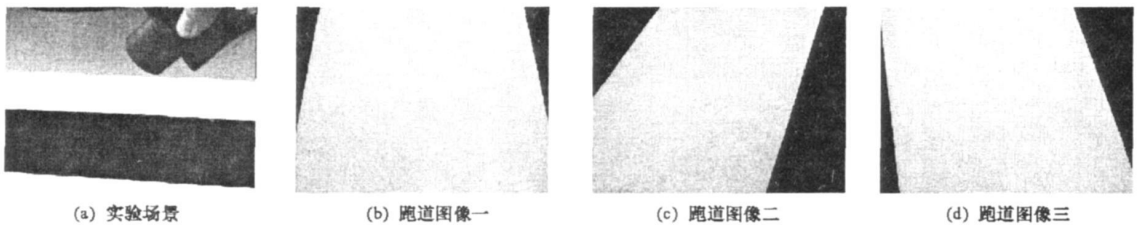


图6 实物仿真实验

Fig. 6 Physical simulation experiment

采用本文方法依次拍摄图6(b)、(c)和(d)时对摄像机的外参数进行测量,结果见表2,测量结果所反映的摄像机状态与实际状态吻合。

表2 对应于图6的实物仿真实验结果

Tab.2 Practical simulation experiment result related to Fig. 6

	跑道像直线方程	消影点	$y_R^c$	$z_R^c$	$\omega$	$\kappa$
图6(b)	$y_l = -5.4737x_l + 325.7895$ $y_l = 4.6809x_l - 2694.617$	$(297.4441, -1302.3255)$	-0.0202	3.6908	25.1606°	0.8379°
图6(c)	$y_l = -1.3784x_l + 235.3514$ $y_l = -3.3158x_l + 1938.4737$	$(879.0712, -976.3414)$	0.3264	4.4609	26.6450°	-24.6851°
图6(d)	$y_l = 8.5200x_l + 59.1200$ $y_l = 2.6977x_l - 1308.9070$	$(-234.9623, -1942.7587)$	-0.6823	4.3155	18.4012°	14.2651°

### 3 结论

当无人机进入降落下滑道后,机载摄像机能够拍摄到的可用于传统无人机位姿参数测量的目标物会随着高度降低而逐渐减少。当下降到一定高度后,机载摄像机的视场中只能看到跑道,针对此类情况,本文提出了在已知跑道宽度的前提下基于单幅跑道图像测量其位姿参数的新方法。该方法需要机载摄像机进行离线标定,并已知预降落跑道的实际宽度;通过提取图像上的跑道边缘线,计算出跑道的消影点;根据跑道边缘线与其像直线的方程对共线方程进行化简;进而通过合理设置跑道坐标系的原点位置,使得无人机沿跑道方向的位移始终为0;无人机在接近跑道的高度范围内,滚转角也近乎为0。由以上关系即可计算得到无人机位姿参数。该方法易于实现,无需人为在机场附近布置合作标志物,并通过合理简化有效降低了测量复杂度,能够满足无人机自主降落导航的应用需求。

### 参考文献:

- [1] Sasa S, Gami H, Ninomiya T, et al. Position and Attitude Estimation Using Image Processing of Runway[C]//AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 2000.
- [2] Liu T, Fleming G. Videogrammetric Determination of Aircraft Position and Attitude for Vision-based Autonomous Landing[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit; Reno, NV, 2006.
- [3] 张广军,周富强.基于双圆特征的无人机着陆位置姿态视觉测量方法[J].航空学报,2005,26(3):344-348.
- [4] 邱力为,宋子善,沈为群.用于无人直升机着舰控制的计算机视觉技术研究[J].航空学报,2003,24(4):351-354.
- [5] 刘新华.基于视觉的无人机着陆姿态检测和跑道识别[D].南京航空航天大学,2004.
- [6] 刘兴华.基于视觉的无人机自主着陆参数提取方法研究[D].南京航空航天大学,2005.
- [7] 李绍燕.基于视觉的无人战斗机自主着陆研究[D].北京航空航天大学,2004.
- [8] 刘士清.基于视觉的无人直升机自主着陆方法的研究与实现[D].中国科学院软件研究所,2005.
- [9] Hartley R I, Zisserman Z. 计算机视觉中的多视图几何[M]. 韦穗,杨尚骏,章权兵,等译.合肥:安徽大学出版社,2002.
- [10] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳.基于图像的精密测量与运动测量[M].北京:科学技术出版社,2002.