

基于视觉的飞机自主着陆导航

赵昊昱¹, 李红¹, 彭嘉雄²

(1. 华中科技大学数学系, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种基于视觉的飞机自主着陆导航信息提取新方法。它克服了国外方法中利用点对应关系而难于提取特征点的问题, 只需对两条跑道边线和一条着陆阈值线进行检测, 这些线具有明显的可视性和直线性。由此可直接算出飞机的姿态向量, 若跑道的宽度已知, 还可以算出飞机的位置矢量。依据成像的几何原理, 文中对算法进行了完整的推导, 通过对飞机着陆过程中实际采集的跑道图像序列进行处理和实验, 表明基于视觉的飞机自主着陆导航信息提取与转换是可行的。

关键词: 机器视觉; 着陆导航; 射影几何; 消失点; 直线检测

中图分类号: V249

文献标志码: A

Vision-based aircraft autonomous landing navigation

ZHAO Hao-yu¹, LI Hong¹, PENG Jia-xiong²

(1. Dept. of Mathematics, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China;

2. Inst. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new extraction method of vision-based navigation information for aircraft autonomous landing is proposed. It avoids the difficulty of feature points extraction in oversea method using points correspondence relation. It extracts the two edge lines and the threshold line on the runway only. These lines are obviously visual and straight. Then the attitude vector of aircraft is directly calculated. And the position vector of aircraft is computed too if the runway width is known. A complete drive of the algorithm is given based on imaging geometry. The processing and experience on a runway image sequence acquired in a real aircraft landing are performed. It shows that the extraction and conversion of vision-based navigation information for aircraft autonomous landing are feasible.

Keywords: machine vision; landing navigation; projective geometry; vanishing point; line detection

0 引言

无人机自主着陆是指无人机可以依靠机载的导航设备和飞行控制系统来进行定位导航并最终控制无人机降落在着陆场地的过程。

视觉导航技术是通过对视觉传感器获得的图像进行几何参数和其他参数的测量, 从而得到无人机导航定位参数的一种技术。它具有设备简单便宜、信息量大、完全自主和无源性的特点, 因此视觉导航越来越受到研究人员的关注, 也取得了一定的成果。

本文提出了一种飞机夜晚着陆导航的新方法。该方法基于跑道照明灯光在像平面上的成像, 利用两条跑道边线的交点和两条跑道边线与着陆阈值线的两个交点, 借助于跑道是矩形这一特征以及跑道的宽度, 最终求得飞机的位置参数和姿态参数。该方法具有以下优点: 首先, 不需要求解非线性方程组(无论是解析法或数值解法), 只需直接进

行简单的计算; 其次, 检测直线比检测顶点容易而且稳定, 因此该方法可以很好地控制误差。最后, 这种方法的应用范围较广, 它只需要事先知道跑道的宽度并且检测出三条线, 没有其他限制, 而且它不是一种估计方法, 在不考虑各种误差的情况下可以得到精确解。

1 算法

如图1所示, l 是着陆阈值线, P_1P_2 和 P_3P_4 是两条跑道边线, $P_1P_2P_4P_3$ 是矩形, 跑道宽度为 d 。建立地面坐标系 $Oxyz$ 如下: 取线段 P_1P_3 的中点为原点, 跑道中线为 x 轴, OP_3 为 y 轴, 垂直向下为 z 轴。图像坐标系原点为光轴与像平面的交点, 横向坐标用 u 表示, 纵向坐标用 v 表示。 $Ox'y'z'$ 为摄像机坐标系, 光轴为 x' 轴, y' 轴与图像坐标系 u 方向一致, z' 轴与图像坐标系 v 方向一致。 Π 为像平面, p_1 和 p_3 分别是跑道上 P_1 和点 P_3 的像点, p 为线段 P_1P_2

收稿日期: 2006-07-03; 修回日期: 2006-09-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助课题(10477007)

作者简介: 赵昊昱(1979-), 男, 硕士, 主要研究方向为计算机视觉。E-mail: zhy_dut@126.com

和 P_3P_4 在图像上对应直线的交点。摄像机的焦距为 f , 图像中心为成像平面的坐标原点^[5]。

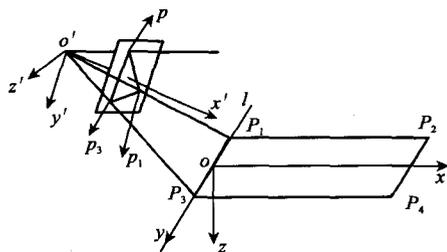


图 1 成像原理

通过对跑道图像的处理, 在图像上可以检测到跑道中三条线的图像, 从而可以获得它们的三个交点, 即 P_1, P_3 在图像上的像点 $p_1(u_1, v_1), p_3(u_3, v_3)$ 和 $p(u_0, v_0)$ 。

1.1 姿态角参数的计算

利用三点在图像中的坐标, 就可以计算飞机的姿态角参数。任取一点 X , 设它在摄像机坐标系中的坐标为 (x', y', z') , 在图像坐标系中的坐标为 (u, v) , 由成像原理有

$$\frac{u}{f} = \frac{y'}{x'}, \frac{v}{f} = \frac{z'}{x'} \quad (1)$$

所以 P_1, P_3 在摄像机坐标系中的坐标可以分别表示为

$$P_1(x'_1, y'_1, z'_1) = \left(\lambda_1, \frac{u_1}{f}\lambda_1, \frac{v_1}{f}\lambda_1 \right) \quad (2)$$

$$P_3(x'_3, y'_3, z'_3) = \left(\lambda_3, \frac{u_3}{f}\lambda_3, \frac{v_3}{f}\lambda_3 \right)$$

式中, λ_1, λ_3 为比例因子。则向量 P_1P_3 为

$$\left(\lambda_3 - \lambda_1, \frac{u_3}{f}\lambda_3 - \frac{u_1}{f}\lambda_1, \frac{v_3}{f}\lambda_3 - \frac{v_1}{f}\lambda_1 \right)^T \quad (3)$$

根据成像原理, P_1P_2 方向上的消失点 p , 是过光心且平行于 P_1P_2 的直线与像平面的交点, 于是 $O'p$ 平行于 P_1P_2 和 P_3P_4 , 也即向量 $O'p$ 与向量 P_1P_2 的方向一致^[6]。因

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

而从飞机坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵 R_2 , 可以通过摄像机的已知安装角度类似表示, 它是一个已知矩阵。则 $R = R_1R_2$, 所以 $R_1 = R_2^{-1}R = R_2^T R$ 。设 $R_1 = (r'_{ij})$, 由式(8)

$$\begin{aligned} \psi &= \arctan(r'_{12}/r'_{11}) \\ \phi &= \arctan(r'_{23}/r'_{33}) \\ \theta &= -\arcsin(r'_{13}) \end{aligned} \quad (10)$$

从而求得飞机的姿态角参数。

1.2 位置参数的计算

已知跑道宽度 d , 则根据 $|P_1P_3| = d$ 得

$$(\lambda_3 - \lambda_1)^2 + \left(\frac{u_3}{f}\lambda_3 - \frac{u_1}{f}\lambda_1 \right)^2 + \left(\frac{v_3}{f}\lambda_3 - \frac{v_1}{f}\lambda_1 \right)^2 = d^2$$

由式(4), 上式可化简为

$$\lambda_3^2 (f^2(1-k)^2 + (u_3 - ku_1)^2 + (v_3 - kv_1)^2) = (fd)^2$$

从而可以计算出 λ_3 的值为

$P_1P_2P_4P_3$ 是矩形, 故向量 P_1P_2 与 P_1P_3 正交, 也与 $O'p$ 正交, 而 $O'p = (f, u_0, v_0)^T$, 由正交性 $P_1P_2 \cdot P_1P_3 = 0$ 得

$$f(\lambda_3 - \lambda_1) + \frac{1}{f}u_0(u_3\lambda_3 - u_1\lambda_1) + \frac{1}{f}v_0(v_3\lambda_3 - v_1\lambda_1) = 0$$

解得 $\lambda_1 = k\lambda_3$, 其中

$$k = \frac{f^2 + u_0u_3 + v_0v_3}{f^2 + u_0u_1 + v_0v_1} \quad (4)$$

对于地面坐标系中 Ox 方向的单位向量 e_1 , 根据坐标轴的选取方法可以知道 $Ox \parallel P_1P_2 \parallel O'p$, 所以 e_1 可以表示为^[7]

$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{f^2 + u_0^2 + v_0^2}}(f, u_0, v_0)^T \quad (5)$$

而 Oy 方向的单位向量 e_2 与 P_1P_3 的方向一致, 故 e_2 可以通过 P_1P_3 的单位化得到为

$$e_2 = \frac{(f(1-k), u_3 - ku_1, v_3 - kv_1)^T}{\sqrt{f^2(1-k)^2 + (u_3 - ku_1)^2 + (v_3 - kv_1)^2}} \quad (6)$$

则 Oz 方向的单位向量 e_3 按右手法则得到为

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (7)$$

这些是地面坐标系的单位基向量 e_1, e_2, e_3 在摄像机坐标系中的表示。设摄像机坐标系中 $O'x', O'y', O'z'$ 三个方向的单位基向量分别为 e'_1, e'_2, e'_3 , 假设从地面坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵为 $R = (r_{ij})$, 则应该有

$$(e_1, e_2, e_3) = (e'_1, e'_2, e'_3) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(5)、(6)和式(7)可以计算出 R 各个分量的值, 其中 $e_j = (r_{1j}, r_{2j}, r_{3j})^T (j=1, 2, 3)$ 。因为旋转矩阵是正交矩阵, 所以从摄像机坐标系到地面坐标系的旋转矩阵即为 R^T 。设从地面坐标系到飞机坐标系的旋转矩阵为 R_1 , 它可以用飞机的偏航角 ψ 、俯仰角 θ 以及滚动角 ϕ 表示为式(9)

$$\lambda_3 = \pm \frac{fd}{\sqrt{f^2(1-k)^2 + (u_3 - ku_1)^2 + (v_3 - kv_1)^2}}$$

由于 P_3 在摄像机的前方, 因此 P_3 的 x' 分量必为正, 所以只取 λ_3 的正值。将 λ_3 代入式(4)就可以计算出 λ_1 的值。这样就得到了 P_1, P_3 在摄像机坐标系中的坐标。地面坐标系的原点是线段 P_1P_3 的中点 O , 该点在摄像机坐标系中的坐标就是

$$\left(\frac{x'_1 + x'_3}{2}, \frac{y'_1 + y'_3}{2}, \frac{z'_1 + z'_3}{2} \right)^T \quad (11)$$

根据文献[2], 有 $X_p = RX_p + t$, 其中 X_p 是跑道上任一点 P 在地面坐标系中的位置矢量, X_p 为 P 点在摄像机坐标系中的位置矢量, R 为前面提到的从地面坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵。根据矢量的加减运算关系, 可知 t 为地面坐标系原点在摄像机坐标系中的位置矢量。所以式(11)表示的就是矢量 t , 文献[5]给出 $t = -R(X'_0 + R_1^T X'_0)$, 由此得 $X'_0 = R'(R_0 X'_0 -$

t),其中 X_c^0 表示摄像机在飞机坐标系中的安装位置,是已知的恒定矢量, X_s^0 即为飞机在地面坐标系中的位置矢量。

2 实验与结论

为了验证该方法的可行性,已对飞机着陆过程采集的一段序列图像进行试验。如图 2,先对原始图像(a)做阈值分割后得到二值图像(b),分割依据跑道边线的灰度高于周围背景的灰度。再用区域滤波方法去掉成块的背景区,消除天空部分的干扰。接着去除孤立黑点,进一步削弱干扰因素,得到图像(c),最后用 Hough 变换检测出三条特征线^[8],如图(d)。将这三条线的参数带入上面的算法,即可获得飞机在地面坐标系中的位置和姿态参数。这里摄像机焦距为 600 像素,各种畸变假设均为 0,图像大小已知为像素。该机场跑道宽度为 60 m,长度不需要知道。

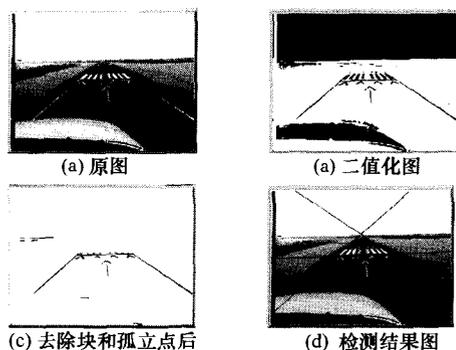


图 2 跑道检测实验

在实验图像序列中对连续 50 帧进行处理和计算,得到飞机在地面坐标系中位置矢量的 x 分量和姿态参数中的滚动角、偏航角的变化过程曲线,以及计算得到的飞机参数与真实参数间的误差曲线如图 3。

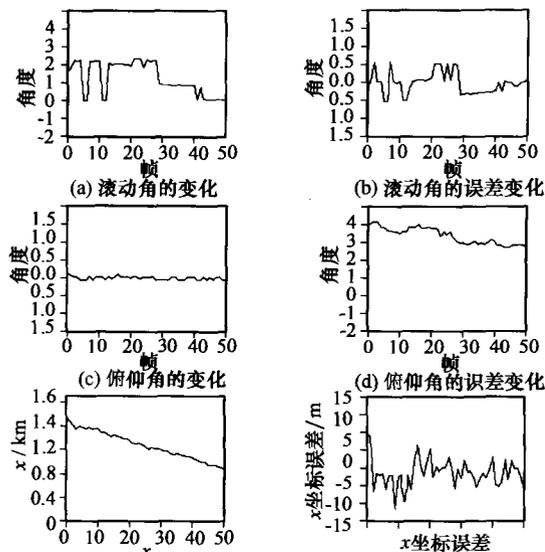


图 3 飞机参数及相应误差变化过程

通过实验可以看出,滚动角的误差随滚动角的大小的变化而变化,滚动角较大时误差也较大,滚动角接近 0° 时,误差也接近 0,但基本都可以控制在 0.5° 之内。俯仰角的

计算误差一直都较小,可以达到 0.2° 左右,飞机距离机场的距离的误差基本可以控制在 5 m 之内,可见该方法的精度较高。处理 50 帧图像大约用去 28 s,其中主要消耗在图像处理的过程中,而当获得了三条特征线的参数之后去计算飞机的 6 个飞行参数时消耗不到 0.01 s,可见该方法的计算速度也比较快。算法的实验、计算结果符合飞机着陆降落过程对于导航信息的需求。该方法直观易懂,概念清晰,简单实用,便于应用,易工程化研究。

3 推广

该方法可以进一步推广到当地平线和两条跑道边线可见情况下对飞机姿态角的计算。如图 4,设跑道边线在图像上的消失点仍为 $p(u_0, v_0)$, p_1 和 p_2 是地平线在图像上的像线与图像边缘的交点,则仍然可以通过式(5)得到向量 e_1 。和第二部分不同的是这里先求向量 e_3 再求向量 e_2 ,这是由图像提供的信息决定的。由于图像中的地平线就是地面在图像上的消失线,由图 1 可知, O, p_1, p_2 三点所决定的平面与地面平行。由地面坐标系的定义知, $n = O p_1 \times O p_2$ 就是地面的向下法线,因此 $e_3 = \frac{n}{\|n\|}$ 。再由 e_2 与 e_3 及 e_1 的正交性得 $e_2 = e_3 \times e_1$ 。根据式(8)同样可以得到地面坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵 R ,由式(10)就可以得到飞机的三个姿态角。可以看出,该算法的原理简单明了,计算也非常简便。

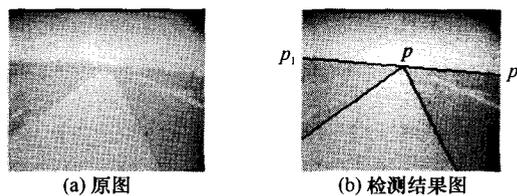


图 4 地平线及跑道边线的检测

参考文献:

- [1] Yakimenko O A, Kammer I I, Lentz W J, et al. Unmanned aircraft navigation for shipboard landing using infrared vision[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38 (4): 1181 - 1200.
- [2] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Graphics and Image Processing*, 1981, 24(6): 381 - 395.
- [3] Haralick R M. Determining camera parameters from the perspective projection of a rectangle[J]. *Pattern Recognition*, 1989, 22 (3): 225 - 230.
- [4] D H-Ullrich, Korn B. Autonomous infrared-based guidance system for approach and landing[C]// *Proceedings of SPIE*, 2002, 5424: 140 - 147.
- [5] Chatterji G B, Menon P K, Sridhar B. GPS/Machine vision navigation system for aircraft[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33 (3): 1012 - 1025.
- [6] 方德植,陈奕培编.射影几何[M].北京:高等教育出版社,1983.
- [7] Yang Zhifang, Tsai Wenhsiang. Using parallel line information for vision-based landmark location estimation and an application to automatic helicopter landing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1998(14): 297 - 306.
- [8] 何斌. Visual C++ 数字图像处理[M].北京:人民邮电出版社,2001.