

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.01.004

基于跑道灯光的计算机视觉辅助无人机组着陆

李飞¹, 谭乐祖², 唐亮³

(1. 海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001;
3. 海军航空兵第 92514 部队, 山东 烟台, 264001)

摘要: 针对夜间无人机组着陆时标准跑道的灯光会加重图像处理的难度问题, 提出一种利用跑道灯光辅助着陆的机器视觉方法。该方法参考标准跑道灯光设置, 提取跑道灯光直线特征, 对 EPnP 方法进行扩展, 将直线特征表示成跑道平面上 3 个控制点的加权形式, 利用奇异值分解的方法求出控制点在相机坐标系中的坐标, 最后使用正交化方法解算出无人机组相对于跑道的位置和姿态, 为无人机组着陆提供了引导信息。仿真结果表明: 在距机场距离较远时, 该方法能有效地引导其自主着陆。

关键词: 视觉; 着陆; 位姿估计; EPnP 方法

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Computer Vision Assisted UAV Landing Based on Runway Lights

Li Fei¹, Tan Lezu², Tang Liang³

(1. Dept. of Control Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
3. No. 92514 Unit of Naval Air Force, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to assist landing of unmanned aircraft vehicle (UAV), a vision-based method is proposed, which makes use of runway lights. Simple configure of runway lights is set up refer to standard runway lighting. EPnP method is extended to line based pose estimation after the lines made up of runway lights are extracted. Each line is expressed as a weighted sum of three control points, and the camera coordinates of the control points can be estimated through singular value decomposition (SVD). Then, with the orthogonalization method, the position and attitudes of UAV are calculated, to provide the navigation information for UAV landing. Simulation results show that the algorithm proposed is accurate in the earlier stage of landing.

Key word: vision; landing; pose estimation; EPnP method

0 引言

计算机视觉理论中的视觉测量技术问题已得到了广泛的研究。位姿估计就是根据相机拍摄目标图像, 求出相机坐标系和目标坐标系之间的相对旋转和平移。此技术在无人机组自主着陆中得到了一定的发展, 主要研究内容就是利用机载视觉传感器拍摄机场及其附近目标, 并根据所拍摄图像判断出无人机组相对跑道的位姿信息, 进而和其它机载传感器的信息进行融合, 引导无人机组自主着陆。

机场辅助着陆目标的选取对算法的成功实现有着重要的影响, 跑道的 2 条边缘线在机场区域是较为明显的目标, 并且对求取无人机组相对跑道的位置至关重要^[1-3], 通过地平线能够提取出无人机组的滚转角并参与计算俯仰角^[4-5], 但是地平线的提取容易受到远处高山、建筑物的影响, 此时可以提取横向着陆阈值线参与位姿解算^[4,6]。在跑道上设置特殊形状图案也得到了一定的研究^[7], 把图像传感器安置

在地面上跟踪飞机的方法也得到了研究^[8]。以上着陆都是假设在白天跑道或者无人机组可见的情况下, 在夜间跑道不可见时, 一般都是通过布置跑道灯光引导着陆^[9-10], 但是仅仅利用了跑道边缘灯光和横向跑道入口灯光, 这些信息在无人机组离跑道较远时, 由于噪声干扰, 会产生较大的误差。同时, 标准跑道灯光过于复杂, 应用在无人机组视觉着陆中会加重图像处理的难度。因此, 笔者除了考虑布置跑道边缘灯光和横向入口灯光外, 还布置了简易的进近灯光系统, 在不增加图像处理复杂性的基础上, 提高着陆前期阶段远距离位姿估计的精度。

1 跑道灯光布置

参考标准灯光系统的布置, 笔者拟在入口灯光前每隔 150 m 设置 1 条与入口灯光平行的进近横排灯, 共设置 5 条, 并且设置 1 条与横排灯垂直的中线灯, 这样跑道上共可提取 9 条灯光线, 但是随着无人机组接近跑道, 距离跑道较远的横排灯会跑出相

收稿日期: 2011-08-26; 修回日期: 2011-09-05

作者简介: 李飞(1987—), 男, 安徽人, 硕士, 从事视觉导航、惯性导航研究。

机的像平面之外。跑道灯光布置如图 1。

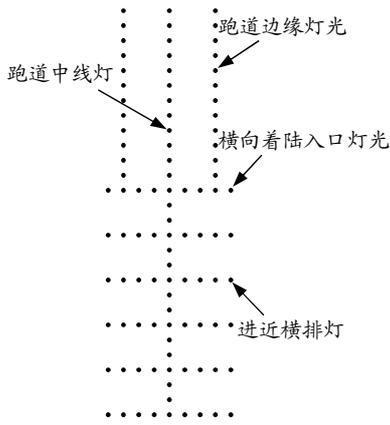


图 1 跑道灯光布置

2 位姿估计

基于直线对应的位姿估计算法可分为解析算法和数值算法^[11]。解析算法适合直线条数较少的情形，计算量少、速度快，但是精度不高；数值算法利用了足够多的直线信息，计算结果可靠精度高，但是运算量大。EPnP 方法^[12]将特征点表示成 4 个控制点的加权和，然后将特征点对应关系转化为控制点对应关系，是一种高实时性高精度的算法。笔者借鉴了 EPnP 中控制点的思想。每条直线由 2 点唯一表示，将每个特征线上的 2 个点表示成 3 个共面但不共线控制点的加权和，其次利用像平面上的直线方程，构造超定齐次线性方程组，利用奇异值分解，求出 3 个控制点在相机坐标系中的坐标，进而可以得到旋转和平移。

2.1 控制点表示的特征线

假设提取出跑道平面上 n 条灯光直线，每条直线可以由 2 个参考点唯一表示。这 $2n$ 个参考点在目标坐标系中的坐标为

$$P_{ik}^w, \quad (i=1, \dots, n; \quad k=1, 2)$$

3 个控制点在目标坐标系中的坐标为

$$C_j^w, \quad (j=1, 2, 3)$$

那么参考点可以由控制点唯一表示

$$P_{ik}^w = \sum_{j=1}^3 W_{ijk} C_j^w, \quad \sum_{j=1}^3 W_{ijk} = 1 \quad (1)$$

相应的，在相机坐标系上，参考点和控制点也存在相同的对应关系

$$P_{ik}^c = \sum_{j=1}^3 W_{ijk} C_j^c \quad (2)$$

2.2 控制点的加权形式

假设相机的内参数 K 已知，根据相机的透视投影模型^[13]得到参考点在像平面上的投影 $\{U_{ik}\}_{i=1, \dots, n; k=1, 2}$ 的表达如下：

$$w_{ik} \begin{bmatrix} U_i \\ 1 \end{bmatrix} = K P_{ik}^c = K \sum_{j=1}^3 W_{ijk} C_j^c \quad (3)$$

式中： w_{ik} 是投影尺度参数； K 由焦距 f_u, f_v 以及图像中心在像平面上的坐标 (u_c, v_c) 组成。假设已经得到的 n 条已经匹配的像平面直线为 (a_i, b_i, c_i) ，那么有

$$w_{ik} (a_i, b_i, c_i) \begin{bmatrix} U_i \\ 1 \end{bmatrix} = (a_i, b_i, c_i) K \sum_{j=1}^3 W_{ijk} C_j^c = (a_i, b_i, c_i) \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_c \\ 0 & f_v & v_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^3 W_{ijk} \begin{bmatrix} x_j^c \\ y_j^c \\ z_j^c \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

将上式展开，得到

$$Mx = 0 \quad (5)$$

其中： $x = [C_1^{cT}, C_2^{cT}, C_3^{cT}]^T$ 是待求的 9 维向量。 M 是 $2n \times 9$ 矩阵，由式 (4) 左侧表达式得到。利用奇异值分解的方法求该式， x 属于 M 的零空间，并且表示成零特征值对应的右奇异向量的线性组合：

$$x = \sum_{i=1}^N \beta_i v_i \quad (6)$$

2.3 控制点坐标求解

Vincent^[12]对零奇异值的个数 N 进行了讨论，在提供足够多的方程前提下，当焦距较小时，零特征值的个数是 1；当焦距增加到足够大，摄像机模型由透视模型转化为正交投影模型，控制点深度的改变不能影响其在像平面上的投影，这时 N 就增加到 4。Vincent 通过对零特征值个数由 1 到 4 的情况进行对比找到最合适解，这无疑增加了算法实现的时间。笔者通过分析得出，当焦距较大时，增大控制点之间的距离，并且让控制点尽量靠近相机，那么控制点深度的改变就能够较为明显地反映在像平面上，摄像机模型依然可以使用透视模型，此时仅考虑 N 为 1 的情况即可，所以有 $x = \beta v$ ，通过 3 个控制点之间的距离关系可以解求得该解。

令 $v^{[i]}$ 为 v 的子向量，对应于第 i 个控制点 C_i^c ，那么根据控制点之间的距离关系可以得到

$$\|\beta v^{[i]} - \beta v^{[j]}\|^2 = \|C_i^w - C_j^w\|^2 \quad (7)$$

式 (7) 的右侧是已知的, 故 β 的最小二乘解为

$$|\beta| = \frac{\sum_{\{i,j \in \{1,3\}\}} \|v^{[i]} - v^{[j]}\| \cdot \|C_i^w - C_j^w\|}{\sum_{\{i,j \in \{1,3\}\}} \|v^{[i]} - v^{[j]}\|^2} \quad (8)$$

笔者选取的控制点始终位于相机的前面, β 的符号可以由此得出。将 β 带入式 (6), 就可以得到控制点在相机坐标系中的坐标。

2.4 位姿估计

得到了 3 个控制点在相机坐标系中的坐标, 可以根据正交化的方法^[14]求出相机坐标系相对于跑道坐标系的旋转矩阵和平移向量。为了简化起见, 令跑道所取的 3 个控制点组成两条垂直的向量, 假设 $\overrightarrow{C_1^w C_2^w} \perp \overrightarrow{C_1^w C_3^w}$, 同样有 $\overrightarrow{C_1^c C_2^c} \perp \overrightarrow{C_1^c C_3^c}$ 。那么相机坐标系相对于跑道坐标系的旋转矩阵

$$R = \left(\frac{\overrightarrow{C_1^c C_2^c}}{\|C_1^c C_2^c\|}, \frac{\overrightarrow{C_1^c C_3^c}}{\|C_1^c C_3^c\|}, \frac{\overrightarrow{C_1^c C_2^c}}{\|C_1^c C_2^c\|} \times \frac{\overrightarrow{C_1^c C_3^c}}{\|C_1^c C_3^c\|} \right) \cdot \left(\frac{\overrightarrow{C_1^w C_2^w}}{\|C_1^w C_2^w\|}, \frac{\overrightarrow{C_1^w C_3^w}}{\|C_1^w C_3^w\|}, \frac{\overrightarrow{C_1^w C_2^w}}{\|C_1^w C_2^w\|} \times \frac{\overrightarrow{C_1^w C_3^w}}{\|C_1^w C_3^w\|} \right)^T \quad (9)$$

$$\text{令 } \overline{C^w} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 C_i^w, \quad \overline{C^c} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 C_i^c \quad (10)$$

则相机坐标系相对跑道坐标系的平移向量

$$T = \overline{C^w} - R^{-1} \overline{C^c} \quad (11)$$

3 算法验证

无人机自动着陆轨迹线分为直线下滑段、末端

拉平段和地面滑跑段^[15], 以下仅对无人机着陆前期阶段, 即直线下滑段进行仿真验证。假设无人机在距离着陆点 3 000 m, 高度 180 m 的位置上进入直线下滑段, 下滑轨迹角设定为 4.5°, 飞机下滑姿态角为 3°, 下滑速度为 47 m/s, 当下滑到高度 15 m 时进入末端拉平段。设定摄像机在无人机上的安装角为 6°, 即相机坐标系纵轴和机体纵轴之间的角度为 6°, 其它角度保持为 0°, 相机坐标系的原点和机体坐标系的原点一致。仿真过程到距离机场纵向距离 420 m, 高度 34 m 结束。

在以上仿真条件的基础上, 和文献[7]中仅利用跑道边缘线和着陆阈值线的算法(暂称为三线方法)进行了对比, 将笔者所提算法称为扩展 EPnP 算法(KEPnP)。图像点的噪声为 5 个像素。对比图如图 2。

从图 2 可知, 着陆过程中姿态角误差都保持在 1°之内, 并且随着距机场的距离的减小, 姿态角误差趋于 0。横向位置误差始终保持在 0.5 m 的范围, 高度误差也保持在 5 m 的范围, 纵向距离误差虽然在 50 m 以内, 但是随着距机场距离的减小, 误差趋于 0, 并且相对于很长的跑道, 纵向距离的较大误差是可以接受的。笔者所提的 KEPnP 算法在着陆前期阶段, 比三线方法精度高, 但是随着距离的靠近, 2 种方法的精度趋于相同。但是根据统计, KEPnP 算法平均处理 1 帧图像需要 4 ms, 三线算法处理 1 帧图像只需要 0.77 ms。因此, 在着陆过程中, 前期使用 KEPnP 算法, 提高精度, 后期在 2 种算法精度等级相同时使用实时性更好的三线算法。

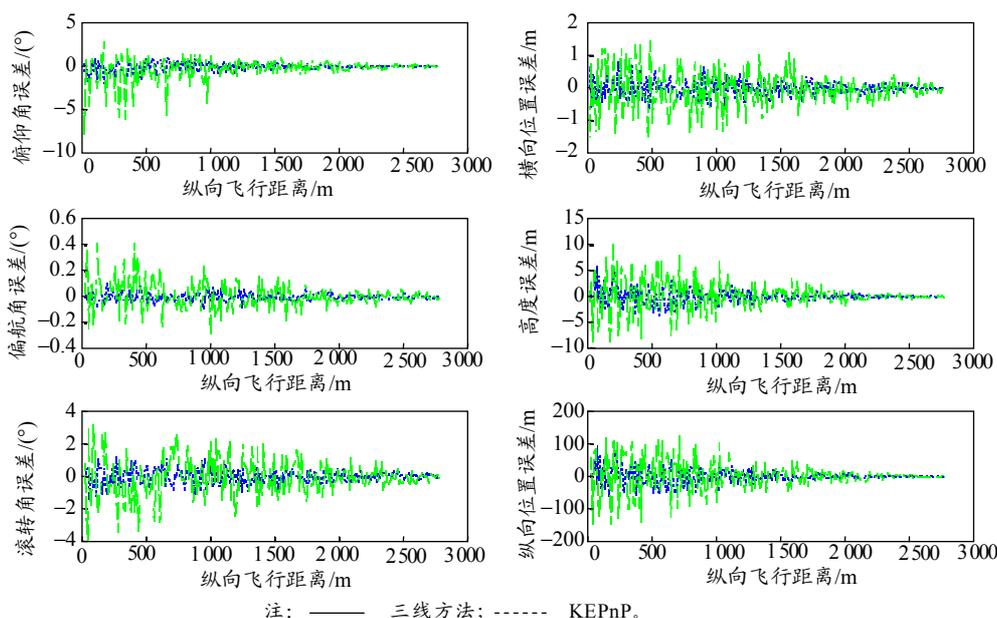


图 2 三线方法和 KEPnP 对比