

三次样条在飞机着陆导航中的应用

李红^a 赵昊昱^a 彭嘉雄^b

(华中科技大学 a 数学系; b 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过对机载相机获取的跑道图像进行处理, 估计飞机姿态和位置信息, 然后根据这些信息对飞机的飞行过程进行控制. 在估计过程中, 仅利用跑道照明的透视图像, 通过 Hough 变换提取三条跑道线, 然后对该图形状和位置特征进行分析, 借助计算机视觉的知识来估计飞机的姿态及位置. 控制调整过程分三个阶段进行, 利用三次样条插值方法, 使各阶段平滑衔接, 最终使得飞机准确着陆. 试验证实上述方法计算简单, 避免了传统反求飞行状态参数方法的繁琐过程, 而且该调整方法也行之有效, 适于对飞机着陆进行实时导航.

关键词: 导航; 飞机着陆; 透视图像; 三次样条; 实时控制

中图分类号: V249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4512(2006)06-0022-03

Application of cubic spline in navigation for aircraft landing

Li Hong Zhao Haoyu Peng Jiaxiong

Abstract: By processing the image of the runway which is gotten from an onboard camera, the attitude and position of the aircraft can be estimated. Then using the information obtained the aircraft will be controlled. In the estimation, the three character lines of the runway can be detected from the perspective image of it by Hough transformation. In virtue of the computer vision knowledge, the attitudes and position of the aircraft could be evaluated. In the adjustment, it comprises three phases; the cubic spline interpolation is utilized so that the adjustment is smooth. The trial proves this method very simple and effective. It is suitable to a real-time navigation for aircraft landing in the night.

Key words: navigation; aircraft landing; perspective image; cubic spline; real-time control

Li Hong Prof.; Dept. of Mathematics, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.

飞机导航是飞机安全着陆的重要保障, 现在主要的飞机着陆导航系统有 GPS 全球定位系统、机场辅助着陆系统等. 但由于其技术的复杂性, 造价昂贵, 甚至部分技术存在的安全隐患, 使得在实际应用中并不顺利. 如果能从摄像机拍摄到的跑道图像中直接获得飞机的飞行信息, 引导飞机降落, 那将十分便利而且造价低廉.

夜晚机场图像的主要部分是为飞机降落提供信息的跑道照明, 在比较好的气象条件下, 可以获得清晰的照明图像. 一般情况下, 跑道照明主要由三条线组成: 两侧的落地区线和跑道中心线, 飞机正常降落时, 只能降落在中跑道中线附近, 而不能超出跑道两侧的落地区线, 否则就会发生意外. 由

于机载相机可以获得跑道的透视图像, 而图像的形状变化又能反映飞机角度和位置的变化, 因此利用这些信息, 就可以帮助飞机调整各个参数, 从而以合理的角度, 在合理的高度, 降落在跑道的合理位置上, 实现安全着陆.

1 坐标系变换与透视成像

本文涉及到三个坐标系: 跑道坐标系、飞机坐标系和相机坐标系, 见图 1. 图中 i 是跑道坐标系的原点, b 为飞机坐标系原点, 跑道坐标系用向量表示为 $X_b^i = (x_b, y_b, z_b)^T$. c 为相机坐标系原点.

设 p 是跑道上的盏灯, 相对于跑道坐标系

收稿日期: 2005-06-30.

作者简介: 李红(1957-), 女, 教授; 武汉, 华中科技大学数学系(430074).

E-mail: lhh0125@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10477007).

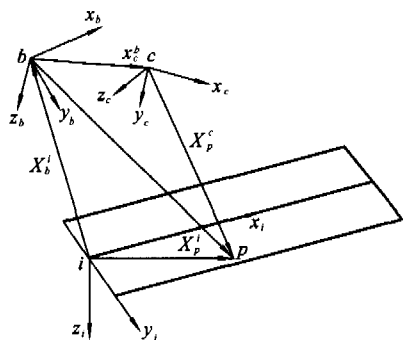


图 1 坐标系变换图

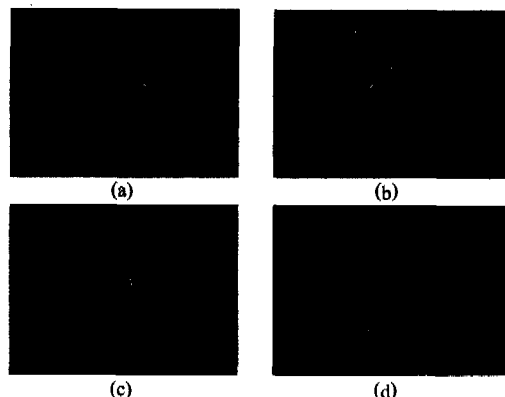


图 2 相机拍摄的跑道照明图

的位置是 $X_p^i = (x_p, y_p, z_p)^T$ 。从跑道坐标系到飞机坐标系的变换矩阵 $T_{b/i}$ 可通过偏航角 ψ ，俯仰角 θ 和滚动角 ϕ 表示^[1]。 $T_{c/b}$ 是飞机坐标系到相机坐标系的变换矩阵。由文献[1]，得出 p 相对于摄像机坐标系的坐标可表示为 $x_{c_p} = r_1(x_p - x_b) + r_2(y_p - y_b) + r_3(z_p - z_b) + k_x$ ； $y_{c_p} = r_4(x_p - x_b) + r_5(y_p - y_b) + r_6(z_p - z_b) + k_y$ ； $z_{c_p} = r_7(x_p - x_b) + r_8(y_p - y_b) + r_9(z_p - z_b) + k_z$ ，式中： r_1 到 r_9 是 $T_{c/b}T_{b/i}$ 的矩阵分量； $k = (k_x, k_y, k_z)^T$ 是一个已知向量。

说明飞机有上仰的姿态^[2]。

在一般情况下，从相机获取的跑道照明图如图 3 所示。通过 Hough 变换，可以从图像中提取出跑道的三条线，得到跑道左、右两条跑道线各自的两个端点： A, B 和 C, D ，以及其相对于图像水平方向的角度 α, β 。可求得两条交叉线 AD 和 BC

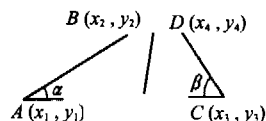


图 3 一般成像下的跑道照明图

根据透视成像原理，可以在图像中获得跑道照明灯的透视像点 (u_p, v_p) ， $(u_p - u_c)/f = y_{c_p}/x_{c_p}$ ； $(v_p - v_c)/f = z_{c_p}/x_{c_p}$ ，式中： f 是相机的焦距； u_c 和 v_c 为图像中心相对于图像左上角的位置。当 u_p, v_p, x_p, y_p, z_p 已知时，可得上述两个方程。而飞机参数有 6 个： $x_b, y_b, z_b, \psi, \theta$ 和 ϕ ，因此要将其求出，至少需 3 组对应点。但由于此时方程为非线性方程，计算相当复杂，这对于飞机实时调整是不可取的。再则，由于飞机是实时调整的，对每一步都精确计算没有必要。因此可以直接利用透视图像所反映出的飞行信息来调整飞机位置。

的交点 (x_0, y_0) ，它即为跑道中心的像点。根据上面的分析，可按如下准则判断，并对飞机位置作相应的调整^[3]：**a.** 如果 $\alpha < \beta$ 或者 $\tan\alpha < \tan\beta$ ，即 $|(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)| < |(y_4 - y_3)/(x_4 - x_3)|$ 时，跑道方向水平向右，那么就需要摆动飞机向左飞行；否则就需要摆动飞机向右飞行。控制飞机向左或向右飞行，也就是要调整 ψ 。**b.** 若 $y_3 < y_1$ ，则跑道法向垂直向左，需要将飞机做逆时针滚动；否则，飞机要做顺时针滚动。通过调整 ϕ 可以控制飞机的滚动。**c.** 设跑道宽度为 l ，相机的焦距为 f ，目前飞机到跑道坐标系原点的距离为 d 。则根据透视成像原理有 $d = lf/(x_3 - x_1)$ 。如果飞机以 3° 的俯角下降，那么此时它的位置约为 $(d\cos 3^\circ, 0, d\sin 3^\circ)$ 。同时假设此时 $\psi = 0, \phi = 0$ ，并且 $\theta = 3^\circ$ ，根据前述分析，可计算此时跑道中心在图像上的位置 (x^*, y^*) ，若 $y^* > y_0$ ，即中心偏下，则说明飞机当前相对于 3° 俯角偏小；若 $y^* < y_0$ ，则说明飞机当前相对于 3° 俯角偏大。改变 θ 可以调整飞机俯仰程度。

2 利用投影图像估计飞机状态

飞机正常降落时应该沿 3° 俯角的斜线下降，并且对准跑道中线。此时在一定高度上拍摄的跑道照明图如图 2(a) 所示。定义三个量：跑道方向，跑道法向及跑道中心。跑道方向就是跑道中线的指向，跑道法向就是跑道平面的法向，跑道中心就是跑道对角线交点。图 2(a) 显示跑道方向水平向前，跑道法向垂直向上，中心在一个适当的位置。若拍摄的跑道照明图像为图 2(b)，则显然跑道方向向前偏左，说明飞机在水平方向是向右偏。若图像为图 2(c)，则可以得出跑道法向垂直向上偏左，说明飞机机身顺着飞机飞行的方向有逆时针的滚动。若图像为图 2(d)，则跑道中心向下移动，

3 基于样条的调整策略

这里采用三次样条进行调整^[4]。以水平偏移的调整为例，上面已经介绍，水平偏移在图像上的

主要体现,是两条落地区域线与图像水平轴夹角的差值 ϵ 。那么,只需调整 ϵ 就可以间接调整飞机的水平偏移。设初始状态下 $\epsilon = \delta, \epsilon'(t) = \xi$ 。当飞机最终调整到水平偏移量为 0, 并且偏航角也为 0° 时, 应该有 $\epsilon = 0$, 且 $\epsilon'(t) = 0$ 。在此将调整分为三个阶段, 见图 4。

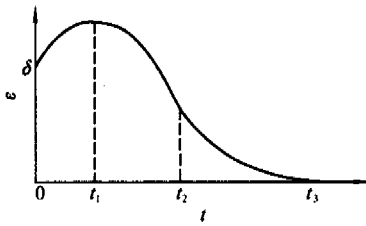


图 4 调整阶段图

段, 见图 4。第一阶段. 时间段 $[0, t_1]$, 该阶段 $\epsilon'(t)$ 从正值变化到 0, 即 ϵ 从增大幅度不断减小直至停止增大。设该区间内三次函数为 $f_1(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$, 则 $f_1(t)$ 应满足 $f_1(t_0) = a_3 t_0^3 + a_2 t_0^2 + a_1 t_0 + a_0 = \delta$; $f_1'(t_0) = 3a_3 t_0^2 + 2a_2 t_0 + a_1 = \xi$; $f_1'(t_1) = 3a_3 t_1^2 + 2a_2 t_1 + a_1 = 0$ 。

第二阶段. 时间段 $[t_1, t_2]$, $\epsilon(t)$ 开始减小, 并且在 t_2 时刻 $\epsilon(t)$ 出现拐点。设该区间内的三次函数为 $f_2(t) = b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0$, 则 $f_2(x)$ 应满足 $f_2(t_1) = f_1(t_1)$; $f_2'(t_1) = f_1'(t_1)$; $f_2''(t_1) = f_1''(t_1)$; $f_2'(t_2) = 6b_3 t_2 + 2b_2 = 0$ 。

第三阶段. 时间段 $[t_2, t_3]$, $\epsilon(t)$ 仍然在不断减小, 当到达 t_3 时刻时 $\epsilon(t)$ 减为 0 且 $\epsilon'(t)$ 也变成 0。设该区间内的三次函数为 $f_3(t) = c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0$, 则 $f_3(x)$ 应满足 $f_3(t_2) = f_2(t_2)$; $f_3'(t_2) = f_2'(t_2)$; $f_3''(t_2) = f_2''(t_2)$; $f_3'(t_3) = 3c_3 t_3^2 + 2c_2 t_3 + c_1 = 0$; $f_3(t_3) = c_3 t_3^3 + c_2 t_3^2 + c_1 t_3 + c_0 = 0$ 。

以上方程组共有 12 个方程和 12 个未知数, 可以惟一解出 $f_1(x)$, $f_2(x)$ 和 $f_3(x)$, 从而得出三次样条函数^[5]。在调整过程中, 可以按照该三次样条进行。当从图像上获得某时刻 ϵ 的值时, 可根据其大小解出相应的 t 值。然后计算相应的 $\epsilon'(t)$, 得到此时 ϵ 的理论变化率, 从连续几帧图像中获得当前 ϵ 的实际值和其实际变化率, 当与理论值相差不大时, 不进行干预, 只有该差值较大时再作调整。其他各个角度也可以类似处理。

4 模拟试验

通过模拟实验来验证算法的有效性^[6]。为了

研究简便, 仅对飞机有水平偏移和偏航角的情况进行试验。跑道宽 60 m, 长 1 000 m。飞机的初始状态为: 高度为 100 m, 到跑道上着陆点的距离为 1 000 m, 水平偏移为 50 m, 偏航角为 3° , 俯仰角为 3° , 滚动角为 0° , 飞机飞行速度为 65 m/s。相机参数: 焦距 600 像素, 像片大小为 200×150 像素, 照

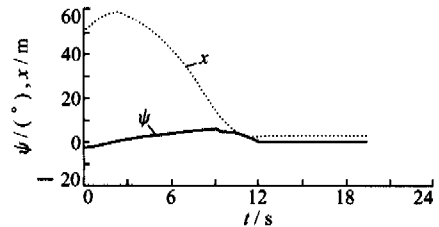


图 5 调整结果图

相频率每秒为 10 帧, 图 5 是调整结果。由试验可以看出, 飞机的水平偏移从最初的 50 m 调整到 3 m 左右, 由于机场跑道较宽, 因此 3 m 的水平偏移是允许的。偏航角最初为 3° , 经过调整基本达到 0° 。

当然在具体的调整策略上还需要进一步改善, 因为在实际控制中, 要使飞机依照图像中的信息按给定的路线飞行是很困难的, 在调整中只做近似处理, 因此有较大波动。另外, 对复杂情况如何进行有效处理, 也将是下一步要解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 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): 1 012-1 025.
- [2] 王润生. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
- [3] Alton L G, Michael K G, Gerald M F. A real-time video tracking system[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(1): 47-56.
- [4] Juang Jih-Gau, Chio Jern-Zuin. Aircraft landing control based on fuzzy modeling networks[J]. Proceedings of the 2002 IEEE International Conferences on Control Applications, 2002, 1(18-20): 144-149.
- [5] 周蕴时, 苏志勋, 奚涌江, 等. CAGD 中的曲线和曲面[J]. 长春: 吉林大学出版社, 1993.
- [6] 何 斌. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.