

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.01.011

一种着陆视觉导航 P3P 问题的解法

刘崇亮, 刘 垒, 扈光锋, 徐兴华

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: P3P 问题是机器视觉领域的经典问题, 其多解的排除与唯一解的确定是研究热点。针对飞行器着陆过程中机载视觉设备跑道成像的特点, 提出了一种着陆视觉导航 P3P 问题唯一解的求解方法。该方法首先通过机场跑道的 3 条边线计算相对姿态, 再根据直线方程求解相对位置, 最终完成飞行器与跑道之间 6 个自由度参数的唯一确定。

关键词: 飞行器; 视觉导航; 着陆; P3P; PnP

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)01-0064-04

A P3P Problem Solving Algorithm for Landing Vision Navigation

LIU Chong-liang, LIU Lei, HU Guang-feng, XU Xing-hua

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: P3P problem is a classic issue of machine vision, the focus is on excluding multiple solutions and determining unique solution. In this paper, a P3P problem unique solution algorithm for landing vision navigation is proposed, based on the imaging features of aircraft camera. The relative attitude is acquired according to the 3 lines of the airport runway at first, then the relative position is determined by the runway line equations. Finally, the 6 DOF parameters between the aircraft and the runway are obtained.

Key words: Aircraft; Vision navigation; Landing; P3P; PnP

0 引言

PnP(Perspective-n-Point)问题是 1981 年首先由 Fischler 和 Bolles^[1]提出的, 即给定 n 个空间点与图像点之间的对应关系, 确定物体坐标系与摄像机坐标系的刚体变换关系^[2]。该问题主要被用来决定摄像机与目标物体之间的相对距离和姿态。近年来又在图像分析和自动制图学、计算机视觉、机器视觉与机器人学及摄影测量学等领域中广受关注的摄像机定位问题中重新提出^[3-5]。

Fishler 和 Bolles 在文献[1]中指出, 要获得一个封闭形式的解, 最少需要 3 个控制点, 因而提出了 P3P(Perspective-3-Point)问题, 并指出 P3P 问题最多有 4 个解, 且解的上界是可以达到的。周鑫等证明了当 3 个特征点为等腰三角形, 且特征点与摄像机间满足某些约束条件时, P3P 问题具有唯一解^[3,6]。

无人机等飞行器着陆过程中, 机场跑道左边线、右边线、起始线在机载成像装置中将成像为一个三角形, 在跑道标定信息、成像设备焦距等参数

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(41527803); 装备预研重点实验室基金项目(61425060206)

作者简介: 刘崇亮(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事机器视觉、相对导航等方面的研究。

E-mail: bridge968@sina.com

已知的情况下,由该三角形可唯一确定机场跑道与摄像机之间的相对位置与相对姿态,即确定该具体应用中 P3P 问题的唯一解。本文从物像共轭关系出发,提出了一种确定着陆导航 P3P 问题唯一解的方法。与传统求解方法不同,该方法没有直接根据点与点之间的对应关系,而是间接从线与线之间的共轭关系入手确定摄像机运动参数。

1 坐标系及其转换

1.1 坐标系及其旋转变换

1.1.1 坐标系定义

本文主要涉及世界坐标系、摄像机坐标系、图像坐标系^[7,8],如图 1 所示,其中跑道的半长为 L ,跑道的半宽为 l 。

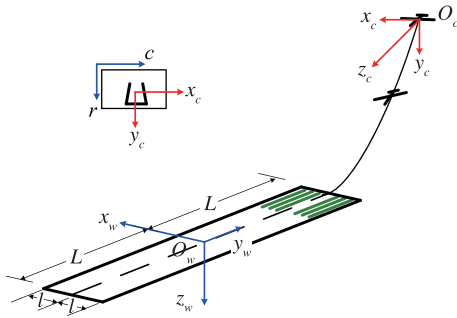


图 1 着陆导航坐标系

Fig. 1 Landing navigation coordinates

世界坐标系(w 系):以跑道中心线的中心为原点 o_w ; x_w 轴平行于跑道起始线,右向为正; y_w 轴沿跑道中心线,向后为正; z_w 轴垂直于跑道平面,向下为正; $o_w x_w y_w z_w$ 构成右手坐标系。

摄像机坐标系(c 系):以光学系统的像方主点为原点 o_c ;当正对光学系统观察时, x_c 轴平行于成像平面坐标系的横轴,左向为正; y_c 轴平行于成像平面坐标系的纵轴,下向为正; z_c 轴指向观察者,并与 x_c 轴和 y_c 轴构成右手坐标系。

图像坐标系(i 系):建立在摄像机光敏面所在平面内的一个二维平面坐标系,以图像左上角为原点,沿图像水平方向向右为图像坐标系的 c 轴,沿图像垂直方向向下为图像坐标系的 r 轴,图像坐标系的单位是像素。

1.1.2 坐标系旋转变换原理

本文涉及坐标系旋转变换,为了便于后文描述,简要介绍坐标系旋转变换的基本方法如下。

设 (x, y, z) 为原坐标系下的坐标, (x', y', z') 为坐标系绕某轴旋转 θ 角之后的坐标^[9-10],则

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,坐标系分别绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴旋转的坐标变换基为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_X(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_Y(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_Z(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 视觉相对姿态角定义

视觉相对姿态角(简称相对姿态角)由相对滚动角 γ_r , 相对航向角 ϕ_r , 相对俯仰角 θ_r 组成,描述了世界坐标系 w 与摄像机坐标系 c 之间的转换关系。相对姿态角 $(\gamma_r, \phi_r, \theta_r)$ 的定义如下:

相对航向角 ϕ_r :以 y_c 轴射向观察者,绕该轴逆时针旋转为正方向,范围 $(-180^\circ, +180^\circ]$;

相对俯仰角 θ_r :以 x_c 轴射向观察者,绕该轴逆时针旋转为正方向,范围 $[-90^\circ, +90^\circ]$;

相对滚动角 γ_r :以 z_c 轴射向观察者,绕该轴逆时针旋转为正方向,范围 $(-180^\circ, +180^\circ]$ 。

则世界坐标系 w 可由摄像机坐标系 c 按 $Z \Rightarrow Y \Rightarrow X$ 的旋转顺序,分别旋转 $-\gamma_r \Rightarrow -\phi_r \Rightarrow (-\pi/2 - \theta_r)$ 而得,由此可得 c 系到 w 系的转换关系为^[11]

$$\mathbf{C}_c^w = \mathbf{R}_X(-\pi/2 - \theta_r) \mathbf{R}_Y(-\phi_r) \mathbf{R}_Z(-\gamma_r) \quad (3)$$

2 成像特性分析

当飞行器降落过程中,跑道在前下视成像设备中将成像为一个三角形,如图 2 所示。其中跑道起始线 l_s 与左边线 l_l 相交于点 A ,跑道起始线 l_s 与右边线 l_r 相交于点 B ,左右边线的延长线相交于点 C 。在世界坐标系中, AB 两点的地理定位是显而易见的,而 C 点位于跑道中心线上无穷远处,因此可将 P3P 问题由点对点转化成线对线,下面分别从图像坐标系与世界坐标系中对三条特征边线进行描述。

2.1 图像坐标系下的跑道边线

跑道左边线 l_l 、跑道右边线 l_r 、跑道起始线 l_s ,

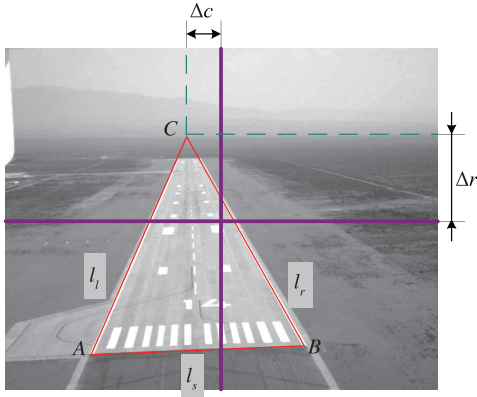


图2 跑道成像特性分析

Fig. 2 Characteristics of the runway imaging

在图像坐标系中的方程可描述为

$$r + k_i c + q_i = 0 \quad (i = l, r, s) \quad (4)$$

其中, r 与 c 分别为像素点在图像坐标系中行与列坐标值, k_i 与 q_i 分别为直线方程的斜率与截距, (l, r, s) 分别代表跑道左边线、右边线、起始线, 写成矩阵的形式即

$$[1 \quad k_i \quad q_i] \tilde{\mathbf{P}}_i = 0 \quad (i = l, r, s) \quad (5)$$

其中, $\tilde{\mathbf{P}}_i$ 是像素点在图像坐标系中的齐次坐标。

2.2 世界坐标系下的跑道边线

空间点 P 从世界坐标系中的齐次坐标 $\tilde{\mathbf{P}}_w$ 投影到图像坐标系中的齐次坐标 $\tilde{\mathbf{P}}_i$ 的过程可以描述为

$$\tilde{\mathbf{P}}_i = s \tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{C}}_w^c \tilde{\mathbf{T}}' \tilde{\mathbf{P}}_w \quad (6)$$

其中:

$$\tilde{\mathbf{P}}_i = \begin{bmatrix} r \\ c \\ 1 \end{bmatrix}, s = \frac{1}{z_c}, \tilde{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} 0 & f/d & c_r & 0 \\ f/d & 0 & c_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_w^c = \begin{bmatrix} C_{w11}^c & C_{w12}^c & C_{w13}^c & 0 \\ C_{w21}^c & C_{w22}^c & C_{w23}^c & 0 \\ C_{w31}^c & C_{w32}^c & C_{w33}^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{T}}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t'_x \\ 0 & 1 & 0 & t'_y \\ 0 & 0 & 1 & t'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{P}}_w = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, z_c 为空间点 P 在摄像机坐标系中坐标的 z 分量, s 为距离系数, f 为光学系统主距, d 是图像传感器的像元尺寸, $[c_r, c_c]^T$ 是图像的主点。 \mathbf{C}_w^c 是一个旋转矩阵, 描述了从世界坐标系向摄像机坐标系的旋转过程, $\tilde{\mathbf{C}}_w^c$ 是 \mathbf{C}_w^c 的扩展形式。

$\tilde{\mathbf{T}}'$ 中的元素 $[t'_x, t'_y, t'_z]$, 满足

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} t'_x \\ t'_y \\ t'_z \end{bmatrix}, \mathbf{T}_w^c = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \mathbf{T}_w^c = \mathbf{C}_w^c \mathbf{T}' \quad (8)$$

其中, \mathbf{T}_w^c 是从世界坐标系向摄像机坐标系转换的平移向量。

在式(4)两边同时左乘 1×3 矩阵 $[1 \quad k_i \quad q_i]$, 并令

$$[1 \quad k_i \quad q_i] \tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{C}}_w^c = \mathbf{A}^i \quad (i = l, r, s) \quad (9)$$

可得

$$\mathbf{A}^i \tilde{\mathbf{T}}' \tilde{\mathbf{P}}_w = 0 \quad (i = l, r, s) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{A}^i = [a_1^i \quad a_2^i \quad a_3^i \quad a_4^i]$, 为 1×4 矩阵。

由于 $\tilde{\mathbf{K}}$ 矩阵的第4列以及 $\tilde{\mathbf{C}}_w^c$ 矩阵第4列的前三行都为0, 因此 a_4^i 。展开得

$$a_1^i x_w + a_2^i y_w + a_3^i z_w = -(a_1^i t'_x + a_2^i t'_y + a_3^i t'_z + a_4^i) \quad (i = l, r, s) \quad (11)$$

根据世界坐标系定义, 跑道分布在 $x_w o_w y_w$ 平面内, 跑道左边线 l_l 与右边线方程分别为 $x_w = l$ 与 $x_w = -l$, 且满足 $z_w = 0$, 因此 y_w 的系数 $a_2^i = 0$, 这样方程才能变为 $x_w = l$ 或 $x_w = -l$ 的形式。

即

$$\begin{cases} a_2^i = 0 \\ a_4^i = 0 \\ z_w = 0 \end{cases} \quad (i = l, r) \quad (12)$$

代入式(9), 可得

$$-t'_x - \frac{a_3^i}{a_1^i} t'_z = x_w \quad (i = l, r) \quad (13)$$

同理, 跑道起始线方程为 $y_w = L$, 且满足 $z_w = 0$, 因此, x_w 的系数 $a_1^i = 0$, 这样方程才能变为 $y_w = L$ 的形式, 即

$$\begin{cases} a_1^i = 0 \\ a_4^i = 0 \\ z_w = 0 \end{cases} \quad (i = s) \quad (14)$$

代入式(9), 可得

$$y_w = -(t'_y + \frac{a_3^i}{a_2^i} t'_z) \quad (i = s) \quad (15)$$

3 相对姿态求解

通过机场跑道特征提取, 得到跑道左边线 l_l 、跑道右边线 l_r 、跑道起始线 l_s 三条直线, 世界坐标系与摄像机坐标系之间的3个相对姿态角的求解以此三条直线为依据, 其求解方法如下。

相对滚动角 γ_r : 机场与飞行器之间的相对滚动

在成像时将反映在跑道起始线 l_s 的斜率上,因此可通过对该直线的斜率求反正切的方式求得。

$$\gamma_r = \arctan(k_s) \quad (16)$$

相对航向角 ψ_r : 两条跑道线的交点为 C , 机场与飞行器之间的相对航向在成像时将反映在 C 点与图像中心点的水平偏差 Δc (单位: 像素) 上。在相对姿态角定义时, 是右航为正的, 右航时 C 点偏左, Δc 为负值。因此

$$\psi_r = -\arctan\left(\frac{d\Delta c}{f}\right) \quad (17)$$

相对俯仰角 θ_r : 机场与飞行器之间的相对俯仰在成像时将反映在 C 点与图像中心点的垂直偏差 Δr (单位: 像素) 上, 因此

$$\theta_r = -\arctan\left(\frac{d\Delta r}{f}\right) \quad (18)$$

由 $(\gamma_r, \psi_r, \theta_r)$ 的值, 根据式(1), 可求得姿态转换矩阵 C_c^w 。

4 相对位置求解

将左跑道边线方程 $x_w = -l$ 与右跑道边线方程 $x_w = l$ 代入式(13), 整理得

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{a_3^l}{a_1^l} \\ 1 & \frac{a_3^r}{a_1^r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t'_x \\ t'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ -l \end{bmatrix} \quad (19)$$

由此可求解得 t'_x 与 t'_z 的值。

将跑道起始线的方程 $y_w = L$ 代入式(15), 整理得

$$t'_y = -L - \frac{a_3^s}{a_2^s} t'_z \quad (20)$$

根据式(6), 可以获得飞行器与机场之间的相对位置

$$\mathbf{T}_w^c = C_w^c \mathbf{T}' = [C_w^c]^T \begin{bmatrix} t'_x \\ t'_y \\ t'_z \end{bmatrix} \quad (21)$$

在此过程中用到了相对姿态求解过程获得的姿态转换矩阵 C_w^c 。

5 结论

本文对飞行器着陆过程中机载成像设备的成

像特性进行了分析, 将此过程中飞行器与跑道之间相对位置姿态的求解问题抽象为 P3P 问题, 并结合着陆过程特点提出了一种 P3P 问题唯一解的求解方法。该方法从物像的共轭关系出发, 提出了先进行相对姿态求解再进行相对位置求解的策略。可以看出, 在相对姿态明确的基础上, 通过跑道左右边线可以唯一确定飞行器与跑道之间的侧向、垂向偏移, 通过跑道的起始线可唯一确定飞行器与跑道之间的径向偏移。由于飞行器一般都配备有惯性导航设备, 因此可将其与机载成像设备组成惯性/视觉组合导航系统, 在跑道事先标定的基础上, 由惯性导航设备提供相对姿态辅助视觉导航; 与此同时视觉导航提供相对位置修正惯导误差, 形成相互修正的惯性/视觉深度组合机制。

参考文献

- [1] Fishler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [2] 孙凤梅, 王卫宁. 基于单个平行四边形单幅图像的物体定位[J]. 自动化学报, 2006, 32(5): 746-747.
- [3] 周鑫, 朱枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1696-1701.
- [4] 郝颖明, 朱枫, 欧锦军, 等. P3P 位姿测量方法的误差分析[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(18): 239-242.
- [5] Dosse M B, Kiers H A, Berge J M. Anisotropic generalized procrustes analysis[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2011, 55(5): 1961-1968.
- [6] 张珍. 无人机自主着陆的视觉识别与定位算法设计及仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 杨少荣, 吴迪靖, 段德山. 机器视觉算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [8] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] 孙婷, 刑飞, 尤政. 一种基于天体运动学的星敏感器精度测量方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 430-435.
- [10] 李广宇. 天球参考系变换及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.