

共面条件约束的无人机视觉导航姿态测量

肖晖¹, 柳建锋², 田思净¹, 何亮¹

(1. 南京晓庄学院环境科学学院, 南京 211171; 2. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016)

摘要: 利用立体视觉进行相对姿态估计是无人机自主导航系统重要的组成部分, 提出了基于共面条件约束的无人机视觉导航姿态测量方法。利用单台摄像机在不同时刻拍摄的图像建立立体视觉, 根据不同时刻摄像机对同一目标成像光线的几何约束关系, 建立共面条件姿态测量模型, 解算出精确相对姿态参数。无人机实际图像数据的实验结果表明, 该方法测量精度较高, 具有较强的抗噪声能力, 避免了利用2台摄像机进行无人机姿态测定的摄影同步问题, 具有更大的灵活性和实用性。

关键词: 无人机; 视觉导航; 姿态测量; 立体视觉; 单台摄像机; 最小二乘法

中图分类号: V241.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0019-04

Coplanarity Constraint Based Attitude Measurement for Visual Navigation of UAVs

XIAO Hui¹, LIU Jian-feng², TIAN Si-jing¹, HE Liang¹

(1. School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;

2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Relative attitude estimation with the stereo vision method is an important part of the autonomous navigation system for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). An attitude measurement method for visual navigation of UAVs based on coplanarity constraint is proposed. Stereo vision is built for images taken by a single camera at different time, the attitude measurement model based on coplanarity condition is established in accordance with the geometric constraint relations of imaging lights of the camera to the same target at different time, and the precise relative attitude parameters are calculated out. Experimental results of the real UAV image data show that the proposed method has higher measurement accuracy and stronger anti-noise ability. Without the synchronization problem of photography in UAV attitude measurement with two cameras, it is of greater flexibility and practicality.

Key words: UAV; vision navigation; attitude measurement; stereo vision; single camera; least square method

0 引言

立体视觉导航具有自主性强、精度高、隐蔽性好和功耗低的优点, 已应用于低空无人机导航^[1-3]。低空无人机立体视觉导航技术的关键是通过精确测量采集图像间的相对位置和姿态, 获得空间相同场景在不同图像上成像之间的约束关系, 从而恢复侦察目标、安全着陆点和障碍物的三维深度信息^[4-6], 因此测量采集

图像姿态是需要首先解决的问题。传统的基于立体视觉的空间运动目标导航方法需要2台或多台摄像机获取同一时刻立体图像, 然后经过特征点匹配和跟踪处理, 测定出空间运动目标的相对位置和姿态^[7-9]。但由于无人机速度快, 利用2台摄像机难以在同一时刻获取立体图像, 灵活性和实用性差。本文利用单摄像机立体图像对无人机进行姿态跟踪监测, 通过摄像机在不同时刻摄影时成像光线的几何关系, 建立姿态测量模型, 提供高精度的无人机立体视觉导航保障。

1 共面条件姿态测量模型

1.1 坐标系定义

如图1所示, S_1 和 S_2 为无人机上的单台摄像机在

收稿日期: 2014-11-15

修回日期: 2015-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(41471381, 41101441, 41301512); 南京航空航天大学研究生创新基地开放基金(kfj130133)

作者简介: 肖晖(1978—), 男, 贵州六盘水人, 博士, 讲师, 研究方向为遥感影像几何定位。

两个不同时刻摄影时的摄影中心,以2个不同时刻拍摄的序列图像建立立体视觉模型,为便于描述相对姿态,建立以下3个坐标系。

1) 图像坐标系 $o-xy$:原点 o 位于摄像机主光轴与图像的交点, x 和 y 轴分别平行于图像的边框。 $o_l-x_l y_l$ 和 $o_r-x_r y_r$ 分别为左右图像的图像坐标系。

2) 摄像机坐标系 $S-xyz$:以摄影中心 S 为坐标原点,摄像机的主光轴 S_o 为坐标系的 z 轴, x 轴、 y 轴分别平行于 $o-xy$ 的 x 轴、 y 轴。 $S_l-x_l y_l z_l$ 和 $S_r-x_r y_r z_r$ 分别为左右图像的摄像机坐标系。

3) 参考坐标系 $S-XYZ$:左图像参考坐标系 $S_l-X_l Y_l Z_l$ 原点为 S_l , S_l 和 S_r 的连线 $S_l S_r$ 为 X 轴,以 $S_l S_r$ 及 $S_l o_l$ 组成的面作为 $X_l Z_l$ 平面,构成右手直角坐标系。右图像参考坐标系 $S_r-X_r Y_r Z_r$ 原点为 S_r ,各坐标轴与 $S_l-X_l Y_l Z_l$ 相互平行。

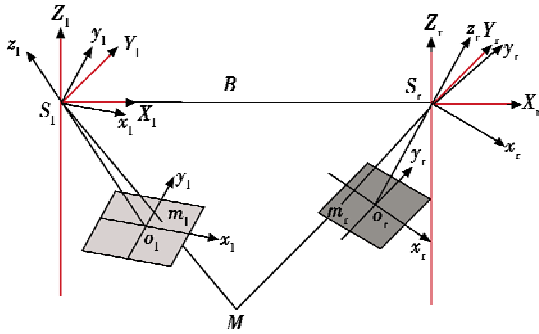


图1 共面条件相对姿态测量模型

Fig. 1 The relative attitude measurement model under coplanarity condition

1.2 姿态角定义

将 $S_l-x_l y_l z_l$ 相对于 $S_l-X_l Y_l Z_l$ 的姿态角定义为 ω_1, φ_1 和 κ_1 , $S_r-x_r y_r z_r$ 相对于 $S_r-X_r Y_r Z_r$ (或 $S_l-X_l Y_l Z_l$) 的姿态角定义为 ω_2, φ_2 和 κ_2 , 其中: ω_1, φ_1 和 κ_1 的旋转轴分别为 X_l, Y_l 和 Z_l ; ω_2, φ_2 和 κ_2 的旋转轴分别为 X_r, Y_r 和 Z_r 。由于参考坐标系的 X 轴为 $S_l S_r$, Z_l 轴、 z_l 轴与 X_l 轴共面,因此 Y_l 垂直 z_l 轴, Z_l 轴旋转 φ_1 后达到 z_l 轴的位置,再旋转 κ_1 后, $S_l-x_l y_l z_l$ 与 $S_l-X_l Y_l Z_l$ 重合,因此 $\omega_1 = 0$, 即姿态角为5个,分别是 $\varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2$ 和 κ_2 。传统的相对姿态角描述方法是同一时刻目标之间的3个相对方位角关系,通常先以其中一个目标作为参考,再描述另一个目标相对该参考目标的姿态。而本文将相邻图像看成一个整体,使其统一为立体模型,更有利于建立三维空间中相同场景在立体图像上成像之间的几何约束关系。此外,由于姿态角与旋转轴旋转顺序有关,不同旋转顺序得到的姿态角不一致,而姿态的四元数描述具有唯一性,为此本文采用四元数作为姿态的状态量^[10-11]。

1.3 共面条件约束

相邻无人机图像成像光线的几何关系如图1所

示。 M 为目标点, m_l 和 m_r 为 M 在相邻图像上的同名像点,即 $S_l m_l, S_r m_r$ 为一对同名光线,因此 $S_l m_l, S_r m_r$ 和 $S_l S_r$ 共面,根据共面性,可列出基于共面条件约束的相对姿态测量模型。

$$F = B \cdot (R_l \times R_r) = \begin{pmatrix} B_x & 0 & 0 \\ X_l & Y_l & Z_l \\ X_r & Y_r & Z_r \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\text{式中: } \begin{pmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{pmatrix} = R(q_l) \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ -f \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = R(q_r) \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ -f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

B 为 S_l 和 S_r 的距离; (X_l, Y_l, Z_l) 和 (X_r, Y_r, Z_r) 分别为 m_l 和 m_r 在各自参考坐标系中的坐标; $(x_l, y_l, -f)$ 和 $(x_r, y_r, -f)$ 分别为 m_l 和 m_r 在各自相机坐标系中的坐标, f 为相机焦距; q_l 和 q_r 为单位四元数, $q_l = (q_{l0} q_{l1} q_{l2} q_{l3})$, $q_r = (q_{r0} q_{r1} q_{r2} q_{r3})$, 用于描述左右图像的相对姿态, $R(q_l)$ 和 $R(q_r)$ 为对应单位四元数表示的旋转矩阵^[12-15]。根据公式可知相对姿态是 q_l 和 q_r 。

2 模型解算

2.1 模型的线性化

将式(1)等式两边对 B 归一化处理,然后进行线性化,按照泰勒公式对变量 $q_{l0}, q_{l1}, q_{l2}, q_{l3}, q_{r0}, q_{r1}, q_{r2}, q_{r3}$ 展开至一次项,得到误差方程式为

$$v = a_1 dq_{l0} + a_2 dq_{l1} + a_3 dq_{l2} + a_4 dq_{l3} + a_5 dq_{r0} + a_6 dq_{r1} + a_7 dq_{r2} + a_8 dq_{r3} + F_0 \quad (2)$$

式中: $dq_{l0}, dq_{l1}, dq_{l2}, dq_{l3}, dq_{r0}, dq_{r1}, dq_{r2}, dq_{r3}$ 为各未知数的改正数,且 $F_0 = Y_l Z_r - Y_r Z_l$,

$$\begin{aligned} a_1 &= Z_r (-2x_l q_{l3} + 2q_{l0} y_l - 2f q_{l1}) - Y_r (2x_l q_{l2} + 2q_{l1} y_l - 2f q_{l0}), \\ a_2 &= Z_r (2x_l q_{l2} + 2q_{l1} y_l - 2f q_{l0}) - Y_r (2x_l q_{l3} + 2q_{l0} y_l + 2f q_{l1}), \\ a_3 &= Z_r (2x_l q_{l1} + 2q_{l2} y_l - 2f q_{l3}) - Y_r (2x_l q_{l0} + 2q_{l3} y_l + 2f q_{l2}), \\ a_4 &= Z_r (-2x_l q_{l0} - 2q_{l3} y_l - 2f q_{l2}) - Y_r (2x_l q_{l1} + 2q_{l2} y_l - 2f q_{l3}), \\ a_5 &= Y_l (2x_r q_{r2} - 2q_{r0} y_r - 2f q_{r0}) - Z_l (-2x_r q_{r3} + 2q_{r0} y_r - 2f q_{r1}), \\ a_6 &= Y_l (2x_r q_{r3} - 2q_{r0} y_r + 2f q_{r1}) - Z_l (2x_r q_{r2} - 2q_{r0} y_r - 2f q_{r0}), \\ a_7 &= Y_l (2x_r q_{r0} + 2q_{r3} y_r + 2f q_{r2}) - Z_l (2x_r q_{r1} + 2q_{r2} y_r - 2f q_{r3}), \\ a_8 &= Y_l (2x_r q_{r1} + 2q_{r2} y_r - 2f q_{r3}) - Z_l (-2x_r q_{r0} - 2q_{r3} y_r - 2f q_{r2}). \end{aligned}$$

2.2 最小二乘法平差解算

将误差方程式 V 写成矩阵形式为

$$V = AX + F_0 \quad (3)$$

式中: $A = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8)$; $X = (dq_{l0} \ dq_{l1} \ dq_{l2} \ dq_{l3} \ dq_{r0} \ dq_{r1} \ dq_{r2} \ dq_{r3})^T$; q_l 和 q_r 是单位四元数, V 存在两个约束条件

$$\begin{cases} q_{l0}^2 + q_{l1}^2 + q_{l2}^2 + q_{l3}^2 - 1 = 0 \\ q_{r0}^2 + q_{r1}^2 + q_{r2}^2 + q_{r3}^2 - 1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由于左图像的偏航角 $\omega_l = 0$, 根据式(3), 则 V 还存在一个约束条件, 即

$$q_{12}q_{13} + q_{10}q_{11} = 0 \quad (5)$$

对式(4)和式(5)进行线性化,可得到约束条件方程为

$$\begin{cases} q_{10}dq_{10} + q_{11}dq_{11} + q_{12}dq_{12} + q_{13}dq_{13} + w_1 = 0 \\ q_{r,0}dq_{r,0} + q_{r,1}dq_{r,1} + q_{r,2}dq_{r,2} + q_{r,3}dq_{r,3} + w_2 = 0 \\ q_{11}dq_{10} + q_{10}dq_{11} + q_{13}dq_{12} + q_{12}dq_{13} + w_3 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $w_1 = q_{10}^2 + q_{11}^2 + q_{12}^2 + q_{13}^2 - 1$; $w_2 = q_{r,0}^2 + q_{r,1}^2 + q_{r,2}^2 + q_{r,3}^2 - 1$; $w_3 = q_{12}q_{13} + q_{10}q_{11}$ 。令 $W = (w_1 \ w_2 \ w_3)^T$,

$$C = \begin{pmatrix} 2q_{10} & 2q_{11} & 2q_{12} & 2q_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2q_{r,0} & 2q_{r,1} & 2q_{r,2} & 2q_{r,3} \\ q_{11} & q_{10} & q_{13} & q_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

式(6)写成矩阵形式为

$$CX + W = 0 \quad (7)$$

设观测了 n 对同名点,则对每对同名点按照式(3)可列一个误差方程,则整体平差的误差方程式为

$$\begin{cases} V = AX + F_0 \\ CX + W = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: V, F_0 为 $n \times 1$ 维矩阵; A 为 $n \times 8$ 维矩阵。采用联系系数的直接解法^[16],得

$$Y = -N^{-1}W_Y \quad (9)$$

式中: $N = \begin{pmatrix} A^T A & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix}$; $Y = \begin{pmatrix} X \\ K \end{pmatrix}$; $W_Y = \begin{pmatrix} A^T F_0 \\ W \end{pmatrix}$ 。其中:

N 为 11×11 维矩阵, Y 与 W_Y 均为 11×1 维矩阵, K 为过渡性数值^[17],其维数为 3×1 维。当选取的同名点数量 $n \geq 5$ 时,给定 q_1 和 q_r 的初始值,然后解算相对定向元素的改正数,再根据式(9)逐步迭代,直到改正数小于规定的限差终止。

3 实验结果及其分析

本文进行了地区 1 和地区 2 的实际无人机立体图像相对姿态测量实验,实验 1 与实验 2 的各摄像机参数见表 1,匹配点分布情况如图 2、图 3 所示。各姿态角的初值都设为零。

表 1 实验数据参数

Table 1 The experimental parameters

参数	实验 1	实验 2
焦距/mm	24.34	48.1
图像分辨率/像素	5616 × 3744	7264 × 5440
像元大小/mm	0.0064	0.00641
匹配点数	24	18

实验得到的相对姿态的结果、计算时间和精度分别如表 2、表 3 所示。其中,为了统计计算时间的可靠性,将程序运行 100 次取平均值。

从表 2 中看出,计算时间在 0.03 s 左右,可以满足算法的实时性;从表 3 中可以看出,用本文方法进行相

对姿态测量后,两组实验相邻图像的视差的中误差分别为 0.44 和 0.45 个像素,满足立体视觉导航的测量精度要求,而且各姿态角的中误差都小于 0.033° ,也符合要求。



图 2 地区 1 无人机立体图像匹配点分布

Fig.2 The distribution of the matching pairs of UAV stereo images in area 1



图 3 地区 2 无人机立体图像匹配点分布

Fig.3 The distribution of the matching pairs of UAV stereo images in area 2

表 2 无人机图像相对姿态角实验结果

Table 2 The experimental results of relative attitude angles of UAV images

参数	实验 1	实验 2
$\varphi_1 / (^\circ)$	1.5937	2.4075
$\kappa_1 / (^\circ)$	-0.1816	4.2042
$\varphi_2 / (^\circ)$	1.7754	0.2005
$\omega_2 / (^\circ)$	-0.1674	-0.4578
$\kappa_2 / (^\circ)$	-1.2375	4.4537
计算时间/s	0.0298	0.0319

表 3 无人机图像相对姿态测量精度

Table 3 The measurement accuracy of relative attitude of UAV images

参数精度	实验 1	实验 2
中误差/像素	0.44	0.45
$\varphi_1 / (^\circ)$	0.01343	0.01784
$\kappa_1 / (^\circ)$	0.03295	0.02276
$\varphi_2 / (^\circ)$	0.01459	0.01691
$\omega_2 / (^\circ)$	0.00821	0.00501
$\kappa_2 / (^\circ)$	0.03237	0.03215

由于匹配点量测误差是影响无人机立体图像相对姿态测量精度的主要因素,为了讨论此误差对无人机相对位姿精度的影响,利用高斯随机函数生成零均值和一定标准差的高斯误差,并将其加在如图 2 所示的每个像点坐标的 x 和 y 坐标上,要求 x 和 y 的随机误差分别生成,以保证它们的独立性。这里取的标准差分别为 $0 \sim 1$ 个像素。为了保证结果稳定性,在每一个噪声水平上,程序运行 100 次取平均值,得到的结果如图

4 所示。

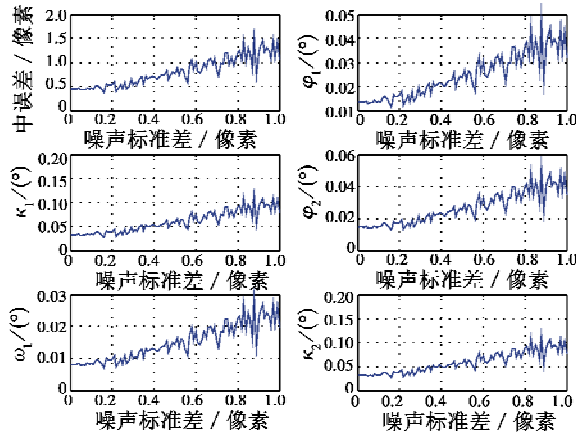


图4 不同噪声水平下相对姿态中误差曲线图

Fig. 4 Error curves of the relative attitude at different noise levels

由图4可以看出,当噪声标准差在0~1像素逐渐增大的过程中,观测值中误差从低于0.5像素逐渐升高到1.5像素,与白噪声的标准差吻合。5个姿态角的中误差也随着噪声标准差的提高而增加,而且总体趋势为线性增长的趋势,说明本文方法在进行无人机图像相对位置姿态测量时,相对位姿的精度与同名像点量测的精度水平线性相关。

4 结论

本文提出一种基于共面条件约束的无人机视觉导航相对姿态测量方法,利用单台摄像机在不同时刻拍摄的图像建立立体视觉,通过共面条件姿态测量模型求解姿态参数,该方法避免了利用2台摄像机进行无人机姿态测定时的摄影同步问题,而且具有更强的灵活性和实用性。无人机实际图像数据实验结果验证了单台摄像机求解无人机相对姿态参数方法的有效性。实验结果还表明,无人机图像同名像点的量测精度与相对位姿的精度影响是线性相关的。由于同名点特征几何约束强度弱,导致相对姿态测量精度受到限制。在无人机图像中存在大量的直线特征,利用直线特征可以增加几何约束性。下一步工作的研究内容是基于无人机立体图像同名直线的相对姿态估计。

参考文献

[1] SINOPOLI B, MICHELI M, DONATO G, et al. Vision based navigation for an unmanned aerial vehicle [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 1757-1764.
[2] REMONDINO F, BARAZZETTI L, NEX F, et al. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-current status and future perspectives[J]. International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, 38(1):25-31.

- [3] JI Z W, ZONG J L, CHENG M L. Reconstruction of buildings from a single UAV image[C]//Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, 2004:100-103.
[4] GINI R, PASSONI D, PINTO L, et al. Aerial images from an UAV system;3D modeling and tree species classification in a park area[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, Melbourne, 2012:361-366.
[5] NEX F, REMONDINO F. UAV for 3D mapping applications: a review[J]. Applied Geomatics, 2013, 35(3):1-15.
[6] EISENBEISS H. A mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): system overview and image acquisition[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 36(5):102-108.
[7] CUI J Q, LAI S, DONG X, et al. Autonomous navigation of UAV in forest [C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014:726-733.
[8] 杨海燕,汤国建. 立体视觉系统的目标可见性及测量精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9):1889-1894. (YANG H Y, TANG G J. Target visibility and measure precision analysis of stereo vision systems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9):1889-1894.)
[9] 王亮,康凤举,邓红德,等. 基于视觉的无人机着陆半物理仿真系统的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(7):1511-1517. (WANG L, KANG F J, DENG H D, et al. Application of vision-based UAV landing hardware-in-loop simulation system [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(7):1511-1517.)
[10] CHANG L, HU B, CHEN S, et al. Comments on quaternion-based method for SINS/SAR integrated navigation system [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2):1400-1402.
[11] WU S, WU G, TAN S, et al. Quaternion-based adaptive terminal sliding mode control for spacecraft attitude tracking [C]//The 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 2013:913-917.
[12] XU D, MANDIC D P. The theory of quaternion matrix derivatives [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2015, 63(6):1453-1556.
[13] SERIEF C. Remote sensing image fusion via quaternion model [C]//The 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, 2014:29-35.
[14] ROSCA D, MORAWIEC A, DE G M. A new method of constructing a grid in the space of 3D rotations and its applications to texture analysis [J]. Modelling and Simulation in

(下转第34页)