

借助于特征点的自主视觉测高方法研究

刘峰^{1,2**}, 樊梦琦^{1,2*}, 王向军^{1,2}, 陈晓昀^{1,2}

¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

²天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 提出了一种借助于单个特征点的异步视觉自主测高方法。所提方法将内外参分离标定, 计算效率高。在构建的 6 自由度飞行模拟装置上对该方法进行了验证, 结果表明: 当测试高度在 2 m 以内时, 测量的绝对误差小于 0.02 m, 相对误差优于 1.5%。该方法对计算负载的要求低, 特别适用于机上快速解算的应用场合, 也可拓展至对地目标定位的测量应用中。

关键词 测量; 自主测高; 异步成像; 无人机

中图分类号 V243.5; TP391.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091206

Self-Vision Height Measurement Method Based on Feature Points

Liu Feng^{1,2**}, Fan Mengqi^{1,2*}, Wang Xiangjun^{1,2}, Chen Xiaoyun^{1,2}

¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract An autonomous measurement method of height based on the asynchronous vision of a single feature point is proposed, in which the internal and external matrix are calibrated separately and thus the computational efficiency is high. This method is verified in the constructed flight simulation device with six degrees of freedom and the results show that, below the testing height of 2 m, the absolute measurement error is less than 0.02 m and the relative error is superior to 1.5%. This method requires a less computing load, and is particularly suitable to the application of fast decoding in planes, and can also be extended to the measurement application of the ground target positioning.

Key words measurement; autonomous measurement of height; asynchronous imaging; unmanned aerial vehicle

OCIS codes 120.2830; 150.0155; 110.5200

1 引言

高度测量单元是无人机上的核心设备之一, 为无人机的飞行控制系统提供实时可靠的高度测量数据^[1]。目前, 无人机的测高模式分为主动式和被动式。在主动测高中, 普遍采用的有气压法、超声波测距法以及激光测距法等。激光高度测量是利用激光传感器测量激光发射到接收之间的延时来实现的, 并利用信息融合技术来提高信息的利用率和测量的精度^[2]。文献[3]中结合多数据加权平均去抖动的

方法, 利用连续脉冲激光来获取无人机接近地面时的高度信息(主要是 50 m 以下)。激光高度计具有较高的检测精度, 作为一种最前沿的激光测距技术^[4], 单光子探测模式激光测距的应用日益广泛, 但其体积、重量以及成本并不能很好地满足小型无人机的要求。气压高度表是无人机的主要测高元件, 其根据气压和高度间的函数关系测量海拔高度, 再通过数据融合等途径提高测量精度^[3]。在无人机搭载气压传感器的基础上, 可利用其他传感器进行补偿, 或通过滤波算法进行数据融合, 从而实现对无人

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-04-04; 录用日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(51575388)

* E-mail: 2541778301@qq.com; ** E-mail: tjuliufeng@tju.edu.cn

机绝对高度的测量^[5-6]。该方法受无人机机动、大气温度以及等压面变化的影响较大^[5]。超声波高度测量是通过测量发射波与反射回波之间的时间差来获得高度数据。在无人机上布局多路超声波测距传感器,利用不同位置处传感器之间的几何关系^[7],获取无人机着陆时的相对高度和姿态信息^[8-9]。该方法增加了传感器数量^[10],必然会增加无人机自身重量,不利于无人机的小型化和轻量化,也不适用于无人机高空飞行的模式。主动测高模式受限于无人机体积以及起飞重量的限制,微小型无人机除光电任务载荷外,无法携带更多的传感器^[11-12]。自主测高利用无人机携带的光电载荷获取图像信息,进行视觉高度测量,但是无法满足实时自主定位^[13-14]。文献^[11-12]采用摄像透视投影模型与数字高程模型相结合的方法获取无人机与目标的相对高差,但误差较大,当飞行高度控制在 450 m 以内时,最低误差达到了 33.3 m,相对误差不小于 7%。

本文提出了一种借助于单个特征点的异步视觉自主测高方法。该方法基于自主测高模式,结合内外参分离标定,在无人机下视异步成像状态下,通过对地面单个特征点的拍照,并结合定位系统提供的位姿信息^[15],即可得到无人机的相对高度信息。相比于文献^[11]的方法,本文方法在测量精度方面有了很大的提高。

2 测量方法

低空遥感物像关系符合视觉线性透视投影变换理论,若对测量模型的内外参分离标定,则在标定过程中会降低对地面特征点的要求,减少机上负载计算量,使得借助于单个点特征的测高方法成为可能。因此,这里首先将内参标定分离,而后对外参进行设计建模,最终解算得到相对高度这一重要飞行数据信息。

当无人机光电载荷处于下视测高状态时,相机光轴 Z_c 竖直向下, O_c 是相机投影中心,选取 Y_c 与无人机飞行方向平行, X_c 遵循右手坐标系,建立相机坐标系模型如图 1 所示。

在传统的测量模型中,通常是固定相机,世界坐标系建立后一般也固定不变,只需标定一次内外参,即可建立物像关系。无人机在空中处于一种运动的状态,如果同样将世界坐标系建立在大地上,则需要实时对其外部参数进行标定,结合无人机携带设备可以实时获取自身运动参数的特点。这里将世界坐标系的原点与摄像机坐标系的原点重合,从而世界

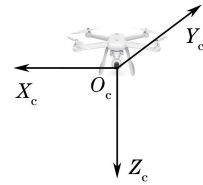


图 1 摄像机坐标系

Fig. 1 Coordinate system of camera

坐标系会跟随相机坐标系的移动而移动。如图 2 所示, O_c 与 O_w 重合,定义世界坐标系的 X_w 轴、 Y_w 轴、 Z_w 轴分别与相机坐标系的 X_c 轴、 Y_c 轴、 Z_c 轴平行(重合),相机在位置 A 处对地面的物点 P 进行拍摄,物点投影到成像平面的坐标为 $m_1(u_1, v_1)$;当相机运动到位置 B 处时,同样对地面物点 P 进行拍摄,物点投影到成像平面的坐标为 $m_2(u_2, v_2)$,两次像素坐标可以由图像直接读出。定义前后两次坐标系分别为 A 、 B 世界坐标系,点 P 在 A 世界坐标系下的三维空间坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) ,在 B 世界坐标系下的三维空间坐标为 (X_2, Y_2, Z_2) ,由于无人机所处的位置始终是世界坐标系的原点,因此通过对 Z_1 、 Z_2 的解算即可得到无人机在 A 、 B 两处的高度。

在测量模型中,需要用某种转换关系将 A 、 B 两个世界坐标系联系起来。由图 2 测量模型可知,在由 A 世界坐标系过渡到 B 世界坐标系的过程中,只发生了坐标系的平移,其中相对位置的变换可以由测量仪器获取,坐标 $A(X_1, Y_1, Z_1)$ 与 $B(X_2, Y_2, Z_2)$ 存在如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

由此得到关系式:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + t_x \\ Y_2 = Y_1 + t_y \\ Z_2 = Z_1 + t_z \end{cases}, \quad (2)$$

式中 (t_x, t_y, t_z) 是两个世界坐标系之间的平移变换。

当无人机在初始位置(如图 2 的 A 位置)时,此时摄像机成像:

$$s_1 m_1 = K_1 [R_1 | 0] X_1, \quad (3)$$

同理,当无人机到达结束位置处(如图 2 的 B 位置)时,摄像机成像:

$$s_2 m_2 = K_2 [R_2 | 0] X_2, \quad (4)$$

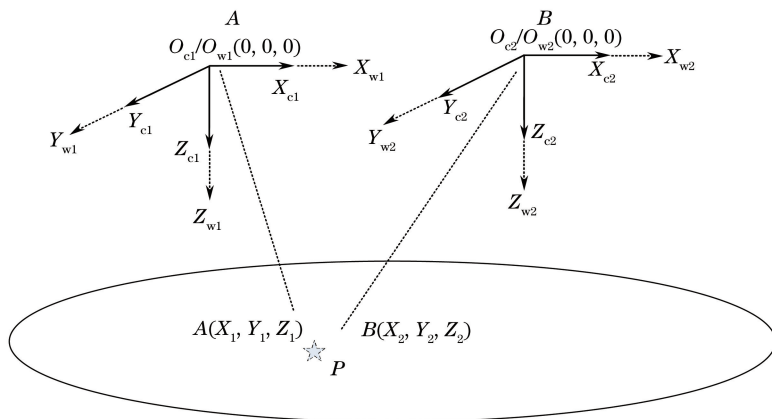


图2 测量模型

Fig. 2 Measurement model

式中 \mathbf{K} 为摄像机矩阵, X 为特征点在世界坐标系中待求的坐标, \mathbf{R} 为摄像机坐标系到世界坐标系的旋转变换, \mathbf{m} 为像素坐标矩阵, s 为比例因子。

结合(3)、(4)式, 摄像机透射成像模型中只存在旋转矩阵, 旋转矩阵中的三个旋转角可由倾角仪或者陀螺仪测量出来。结合成像模型, 本文中单一世界坐标系下的成像转换模型为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_{xy} & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_{xy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 r_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 为旋转矩阵元, f 为相机焦距, d_{xy} 为相机像元大小, u_0, v_0 为像素中心坐标, Z_c 为比例因子, (X, Y, Z) 为世界坐标系坐标, $(u, v, 1)$ 为像素坐标系坐标。为方便后续表述, 将(5)式转换为单应性矩阵:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则在前后两次世界坐标系中存在如下关系:

$$Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) X_1 + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) Y_1 + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) Z_1 = 0 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) X_1 + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) Y_1 + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) Z_1 = 0 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) X_2 + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) Y_2 + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) Z_2 = 0 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) X_2 + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) Y_2 + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) Z_2 = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 u_1, v_1 为特征点在第一个像素坐标系中的像素坐标, u_2, v_2 为特征点在第二个像素坐标系中的像素坐标, Z_{c1} 和 Z_{c2} 为比例因子。结合三角测量法原理, 整理(2)、(9)式, 最终可以实现对高度 Z_1, Z_2 的解算。

3 误差分析及实验验证

无人机在飞行过程中的全球定位系统(GPS)定位误差、特征点提取误差及反馈测角误差, 都会对最终解算结果产生影响。针对这些参数造成的影响, 构建实验系统装置, 如图3所示。该实验装置空地比例模拟实验环境, 可以模拟飞行过程状态, 可对相机6自由度外方位元素等进行实时控制和检测。基于该平台实验验证所提方法, 所测理想相对高度值为 $h = 1.813$ m, 以此作为后续精度评价的参考和依据。

3.1 内参标定

采用张氏标定方法对相机内参进行标定, 所用相机的源图像分辨率是 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像元大小 $d_{xy} = 4.8 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 25 \text{ mm}$, 选取不同角度对 10×10 个高精度靶标(单位格长度 30 mm) 拍摄多幅图片, 最终标定所得相机焦距为 24.970 mm 。

3.2 误差仿真分析

3.2.1 相对位移误差分析

实验中相机在 X 方向和 Y 方向的相对位移利

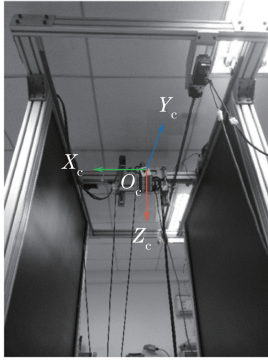


图3 实验装置

Fig. 3 Experimental device

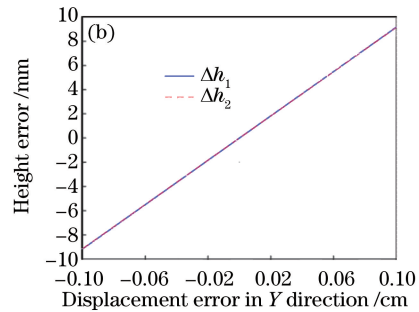
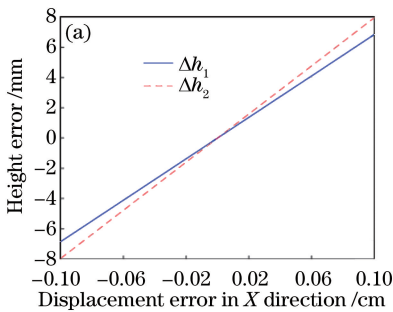


图4 相对位移误差分析。(a)高度误差随X方向位移误差的变化;(b)高度误差随Y方向位移误差的变化

Fig. 4 Analysis of relative displacement error. (a) Height error versus displacement error in direction of X;

(b) height error versus displacement error in direction of Y

3.2.2 特征点像素坐标提取误差分析

特征点的像素提取精度会对测量结果造成影响。由于实验中需要利用到前后两次相机图像中的信息,因此分别就两次像素坐标提取误差对起始和结束位置的高度影响进行误差分析,如图5所示。图5(a)所示为初始位置高度随第一幅标志点像素坐标提取误差的变化,图5(b)所示为结束位置高度随第一幅标志点像素坐标提取误差的变化,图5(c)所示为初始位置高度随第二幅标志点像素坐标提取误差的变化,图5(d)所示为结束位置高度随第二幅标志点像素坐标提取误差的变化。

由图5可以看出,高度误差随着像素坐标提取误差的增大而增大,初始位置处的解算结果更易受影响,结束位置标志点像素坐标提取误差对初始位置的高度解算影响要比对结束位置处的影响大。总体而言,当像素坐标提取误差为正负两个像素时,绝对误差均小于0.01 m,相对定位误差不超过0.5%。

3.2.3 旋转角度测量误差分析

下视光轴的测角误差会对测量精度产生影响,在 $0^\circ \sim 0.5^\circ$ 角度测量误差范围内对解算结果进行误

差仿真分析,结果如图6所示。图6(a)所示为初始位置处三个旋转角度的测量误差对高度解算结果的影响,图6(b)所示为在结束位置处旋转角度测量误差的仿真分析。

由仿真结果可知,Z轴旋转角度的测量误差对结果的影响相比于X、Y轴要更大一些,分析解算模型以及实验操作流程不难判断,Z轴与相机光轴平行,当相机绕轴转动时,在角度偏差较大的情况下,会同时影响U、V方向(像素坐标系中的横、纵坐标)上标志点像素坐标的提取,从而影响最终高度的解算。因此,在实验中需要更加注重Z轴角度的测量精度,以减小误差。结合图6(a)、(b)中的仿真结果可知,当旋转角度测量误差达到最大值(0.5°)时,在忽略Z轴角度误差的情况下,绝对误差不超过0.025 m,相对定位误差小于1.3%。

用光栅尺位移传感器直接测量得到,以无人机GPS定位误差为比例换算依据,利用Matlab软件分析相机坐标轴两个方向(X和Y)的位移误差对高度解算结果的影响,如图4所示,其中 Δh_1 为初始位置测量高度绝对误差, Δh_2 为结束位置测量高度绝对误差。

由图4(a)可知,当相机位置在坐标轴X方向变化 ± 10 mm时,对前后两个位置的高度 h_1 和 h_2 的影响有些差别,对结束位置的影响要大于对初始位置的影响。如图4(b)所示,坐标轴Y方向变化 ± 10 mm时,对前后两个位置的高度解算结果的影响相同。因此,最终的高度误差均不超过0.009 m,相对定位误差小于0.5%。

3.3 实验测试验证

上述误差仿真分析验证了所提测量方法的可行性,为进一步验证该测量方法的准确性,现场进行了多次实验。使用所提出的测量方法对高度进行解算,并将测量结果与1.813 m真值进行比较,统计结果见表1。

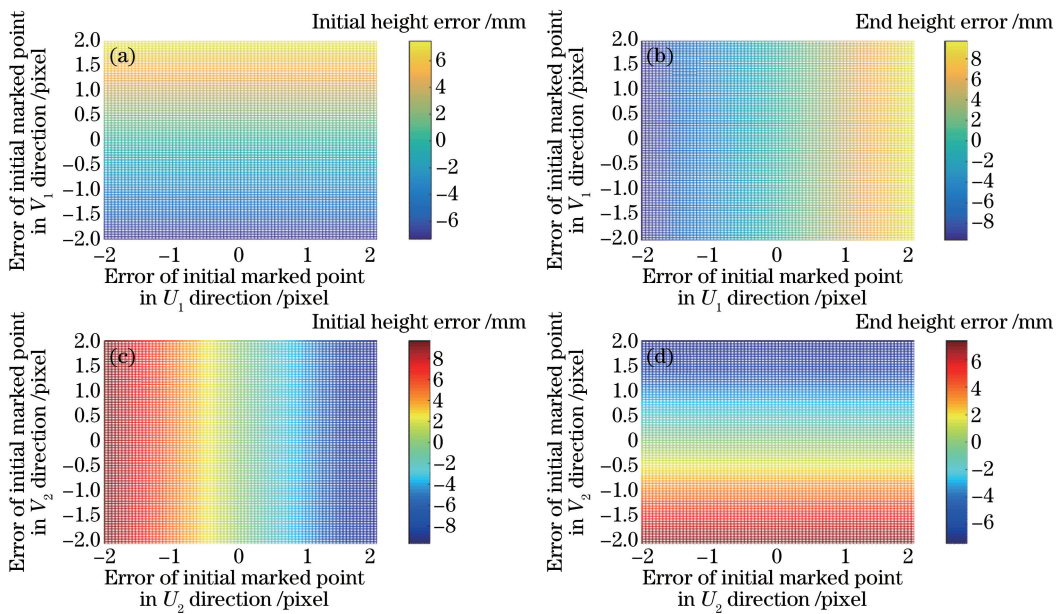


图5 标志点像素坐标提取误差分析。(a)初始位置高度误差随初始标志点像素误差的变化；(b)结束位置高度误差随初始标志点像素误差的变化；(c)初始位置高度误差随结束标志点像素误差的变化；(d)结束位置高度误差随结束标志点像素误差的变化

Fig. 5 Analysis of extraction errors of pixel coordinates of marked points. (a) Height error at initial position versus pixel error of initial marked point; (b) height error at end position versus pixel error of initial marked point; (c) height error at initial position versus pixel error of marked point at end position; (d) height error at end position versus pixel error of marked point at end position

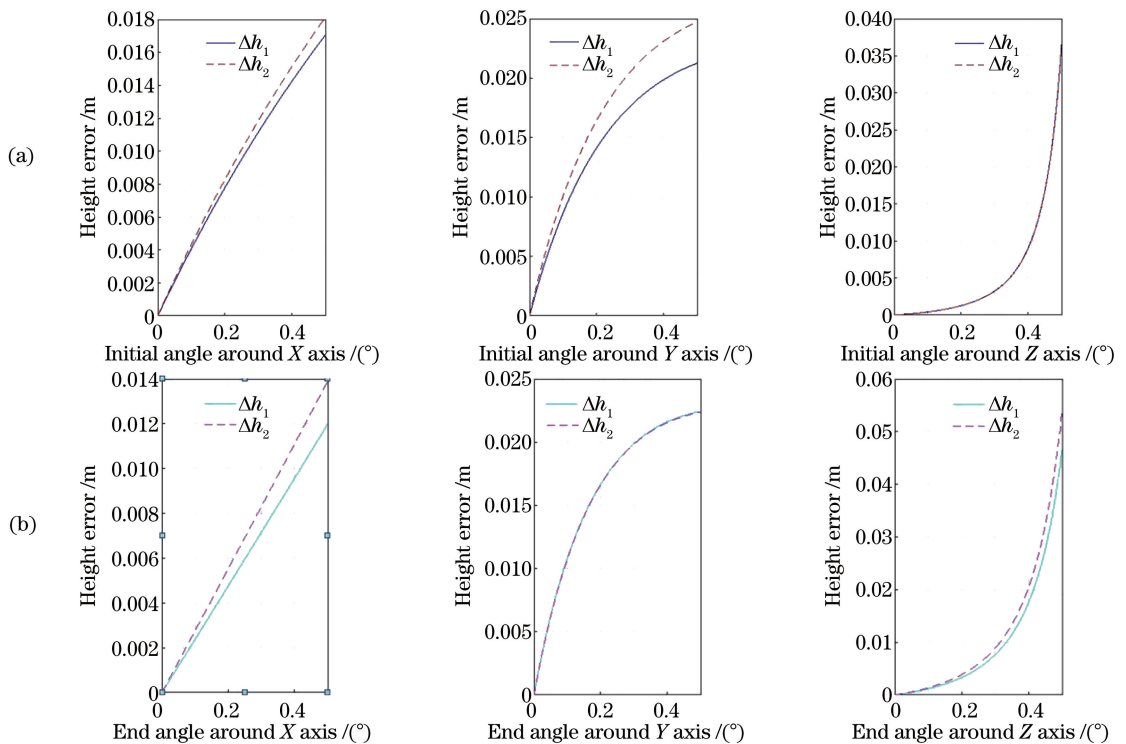


图6 不同位置处旋转角度对高度解算的影响。(a)初始位置；(b)结束位置

Fig. 6 Effect of rotation angle at different positions on height calculation.

(a) Initial position; (b) end position

由表 1 实验结果可知,使用所提出的测量方法,测量高度的绝对误差不超过 0.02 m,相对误差

优于 1.5%,该方法的正确性和准确度均得到了验证。

表 1 实验测量数据及误差

Table 1 Experimental measurement data and errors

Experiment No.	Height from ground /m	Measurement result /m		Absolute error /m		Relative error /%	
		h_1	h_2	Δh_1	Δh_2	δh_1	δh_2
1	1.8130	1.8170	1.8130	0.0040	0	0.22	0
2	1.8130	1.8288	1.8288	0.0158	0.0158	0.87	0.87
3	1.8130	1.8278	1.8260	0.0148	0.0130	0.82	0.72
4	1.8130	1.8130	1.8119	0	-0.0011	0	0.06
5	1.8130	1.8124	1.8124	-0.0006	-0.0006	0.03	0.03
6	1.8130	1.8114	1.8067	-0.0016	0.0063	0.09	0.35
7	1.8130	1.8326	1.8053	0.0196	-0.0077	1.10	0.42
8	1.8130	1.8170	1.8131	0.0040	0.0001	0.22	0.01
9	1.8130	1.8306	1.8033	0.0176	0.0097	0.97	0.54
10	1.8130	1.8188	1.8188	0.0058	0.0058	0.32	0.32
11	1.8130	1.8164	1.8164	0.0034	0.0034	0.19	0.19
12	1.8130	1.8171	1.8106	0.0041	-0.0024	0.23	0.13

4 结 论

提出了一种借助于单个特征点的异步视觉自主测高方法。该方法基于透射成像模型,结合无人机飞控参数,对内外参分离标定,利用两幅图像中一个地面标志点位置的变化,即可求解出无人机距离地面的相对高度。针对所提出的测量方法设计仿真及验证实验,对测量模型进行了系统的误差分析,验证了方法的可行性和有效性,并通过实验进一步验证了测量方法的正确性和准确性。所提方法能够较好地满足自主测高的应用需求,同时对低负载平台下的测距需求也具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ru B C, Xian B, Song Y L, *et al.* An altitude measurement unit for micro unmanned aerial vehicles based on barometer[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013(s2): 94-97.
茹滨超, 鲜斌, 宋英麟, 等. 基于气压传感器的无人机高度测量系统[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013(s2): 94-97.
- [2] Wang Q L, Li J Y, Shen H K. Target tracking system of binocular vision and laser range sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0912002.
王琪龙, 李建勇, 沈海阔. 双目视觉-激光测距传感器目标跟踪系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0912002.
- [3] Meng W, Han W P, Li Y X, *et al.* Pulse laser

altimeter applicable to low-flying UAV[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2010, 11(5): 70-74.

蒙文, 韩万鹏, 李云霞, 等. 适用于无人机超低空飞行的脉冲激光测高系统[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2010, 11(5): 70-74.

- [4] Huang K, Li S, Ma Y, *et al.* Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1110001.
黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1110001.
- [5] Zhou Z J, Yan J G, Chen P. Research and implementation of a height measuring method for small-size UAV [J]. *Measurement & Control Technology*, 2008, 27(11): 92-93.
周志久, 闫建国, 陈鹏. 一种小型无人机高度测量方法的研究与实现[J]. *测控技术*, 2008, 27(11): 92-94.
- [6] Wang X, Li X M. Design of high precision barometric altimeter measuring system in mini UAV [J]. *Measurement & Control Technology*, 2012, 31(2): 12-15.
王晖, 李小民. 高精度小型无人机气压高度测量系统的设计[J]. *测控技术*, 2012, 31(2): 12-15.
- [7] Shen Y H, Liu J L, Du X. Simultaneous three-dimensional environment reconstruction and localization based on monocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 907-914.

- 沈晔湖, 刘济林, 杜歆. 单目视觉的同时三维场景构建和定位算法[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 907-914.
- [8] He F Y, Lin J R, Gao Y, *et al.* Optimized pose measurement system combining monocular vision with inclinometer sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1215002.
何斐彦, 林嘉睿, 高扬, 等. 单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1215002.
- [9] Yang J Y, Li R B, Hang Y J, *et al.* A measuring method of flight altitude and attitude measurement based on ultrasonic array [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2013, 43(5): 128-131.
杨景阳, 李荣冰, 杭义军, 等. 超声波阵列的飞行高度与姿态测量方法 [J]. 航空计算技术, 2013, 43(5): 128-131.
- [10] Chao Z C, Fu S H, Jiang G W, *et al.* Mono camera and laser range finding sensor position-pose measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312001.
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.
- [11] Wang X J, Wan Z J, Wang X, *et al.* Ground targets location of UAV using vision location method [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2014, 43(2): 615-619.
王向军, 万子敬, 王鑫, 等. 无人机地面目标实时自主视觉定位[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 615-619.
- [12] Liu S T. Research on autonomous targets location of an MUAV using DEM-based approach altimeter[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
刘世廷. 基于DEM逼近测高的微小型无人机目标自主定位研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [13] Rui W U, Zhao H Y, Yan L. A method of extracting elevation without GCPs based on UAV images [J]. *Science of Surveying & Mapping*, 2011, 36(5): 34-33.
Rui W U, Zhao H Y, Yan L. A method of extracting elevation without GCPs based on UAV images [J]. *Science of Surveying & Mapping*, 2011, 36(5): 34-33.
- [14] Xuan J Y, Pei H L. Research and realization of a altitude location method for small UAV [J]. *Automation & Instrumentation*, 2010(12): 1001-9944.
禚家裕, 裴海龙. 一种小型无人机高度定位方法的研究与实现 [J]. 自动化与仪表, 2010(12): 1001-9944.
- [15] Han D B, Xu Y C, Wang R D, *et al.* Calibration of three-dimensional lidar extrinsic parameters based on multiple-point clouds matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 022803.
韩栋斌, 徐友春, 王任栋, 等. 基于多对点云匹配的三维激光雷达外参数标定 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 022803.