

基于图像特征融合的无人机位姿测量方法

许勇 贾涛

中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000

摘要 针对实际无人机位姿测量过程中可能出现的特征数不够、测量精度不高等问题,提出了基于图像特征融合的无人机位姿测量方法及系统。测量过程中充分利用提取得到的无人机图像角点、机翼线以及对称轴特征。利用线-线交会最小二乘求解得到无人机图像中同名特征角点的世界坐标;根据各摄像机间的关系及检测到的直线特征,利用奇异值分解方法解算得到机翼线及对称轴在世界系中的单位方向向量;融合检测得到的角点特征、机翼线以及对称轴特征解算得到无人机的位姿参数。仿真试验结果表明:采用2台数字摄像机的合理布站,噪声标准差为1、无人机距离约为1200 m时,位置精度小于0.05 m,姿态测量精度小于 0.5° ,且摄像机的台数增加有助于提高位姿测量精度,精度对比验证了所提测量方法的正确性、可行性和高精度。

关键词 测量;特征融合;无人机;摄像机组网

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.031203

Position and Attitude Measurement Method Based on Unmanned Aerial Vehicle Image Feature Fusion

Xu Yong Jia Tao

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract A new position and attitude measurement method based on unmanned aerial vehicle (UAV) image feature fusion and measurement system are proposed to precisely measure the position and attitude of UAV. To work out the position and attitude parameters of UAV, we take full advantage of the extracted robust corners, wing lines and symmetric axis of UAV. We compute the coordinates of corners by lines intersection, using least squares (LS) method. We find the unit direction vectors of wing lines and axis of symmetry by singular value decomposition method. Considering the corners wing lines and symmetric axis simultaneously, we get the position and attitude of UAV by the proposed feature fusion method. Numeric simulation results show that the precision of position less than 0.05 m and the precision of attitude less than 0.5° , when the measurement system contains two cameras, standard deviation of noise is 1 and the distance of UAV is approximately 1200 m. What's more, increasing the number of network cameras helps to improve the measurement accuracy. Precision comparison proves the correctness, feasibility and high precision of the proposed feature fusion method.

Key words measurement; feature fusion; unmanned aerial vehicle; network cameras

OCIS codes 120.6650; 150.0155; 150.6910; 120.4820

1 引言

无人机的三维位置、姿态是反映其飞行状态、性能的主要参数,对无人机系统的研制开发、姿态控制、航迹实时规划和修改、事故分析、有效载荷效能的发挥等具有非常重要的意义。因此,实现无人机位姿参数的高精度测量具有很强的理论研究价值和广泛的应用前景。

目前,根据测量传感器安装位置的不同可将无人机位姿参数测量方法分为位姿外测法和位姿内测法^[1-2]。位姿内测法是指利用安装在机体上的测量传感器实现无人机位姿测量,主要包括惯导系统(IMU)^[3-5]、全球卫星定位系统(GPS)^[6-7]、高速航空摄像机^[2]等。基于惯导系统的无人机位姿测量方法是目前应用最广泛的测量

收稿日期: 2014-09-28; 收到修改稿日期: 2014-10-10; 网络出版日期: 2015-01-19

作者简介: 许勇(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事位姿估计、模式识别、数字信号处理等方面的研究。

E-mail: mbsdtf@sina.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

方法,该方法具有高可靠性、高精度等特点,但是惯导系统存在累计误差、造价昂贵,且当无人机在做尾旋等机体失重动作时,姿态测量结果不可靠等问题;GPS测量方法具有较高的位置测量精度,但是由于无人机长宽有限导致姿态测量精度不高,且该测量方法依赖于全球定位系统;高速航空摄像机测量无人机位姿需要在地面设置一个大的控制场,且无人机的航迹范围、飞行姿态都受到限制。位姿外测法是指利用安装在地面的测量设备采集无人机图像,提取图像特征,并解算得到位姿参数的方法,主要包括基于模型库的姿态测量方法^[8]、单目运动轨迹交会法^[9-11]、单目加距离信息位姿测量方法^[12]、基于线特征的多站面面交会测量无人机姿态^[10-13]以及基于图像点特征的线线交会测量^[10,14]。模型库姿态测量方法需要建立无人机的图像模型库或者姿态库,要求存储空间大,操作复杂;单目运动轨迹测量方法只能得到无人机的轨迹,且测量精度不高;单目加距离信息位姿测量方法避免了多视图匹配问题,但需要外加设备进行测距,且为了得到高测量精度,限制了目标的姿态范围;面面交会测量无人机姿态的方法,可测量得到高精度的俯仰角和偏航角,但无法得到滚转角和位置参数;基于图像点特征的线线交会测量要求稳点提取到无人机上三个以上不共线点,可靠性不高,且由于无人机飞行较高、机体尺寸较小,导致测量精度不高。

与上述测量方法不同,结合无人机的图像特征,本文提出了基于图像特征融合的无人机位姿测量方法。利用组网摄像机采集得到无人机图像,并提取无人机图像稳定的角点、机翼线以及对称轴;分别利用多视图线-线交会、面-面交会解算得到同名特征点世界坐标和机翼线、对称轴的空间方向;利用特征融合解算得到无人机位姿参数。本方法的提出对于提高无人机位姿参数测量的精度,增强位姿测量的适应性和可靠性具有重要的意义。

2 基本原理及符号

2.1 摄像机成像模型

摄像机成像模型常指针孔摄像机模型,即投影中心位于欧氏坐标系的原点,而平面 $Z=f$ 为像面。在针孔摄像机模型下,空间齐次坐标为 $(X, Y, Z, 1)^T$ 的点 X 被映射到像面上的一点 $\mathbf{x}=(x, y, 1)^T$,该点即投影中心、点 X 的连线与像面的交点。

如图1所示,记世界坐标系为 $W-XYZ$,图像坐标系为 $o-xy$,摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$,图像主点为 (p_x, p_y) ,等效焦距为 (f_x, f_y) ,世界系到摄像机系的旋转矩阵为 R 和摄像机中心在世界系中的坐标为 T 。根据旋转、平移变换及相似三角形原理,易知该三维射影空间 IR^3 到二维射影空间 IR^2 的映射: $IR^3 \rightarrow IR^2$ 为

$$k\mathbf{x} = \mathbf{KR}[\mathbf{1} | -\mathbf{T}]\mathbf{X} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & p_x \\ 0 & f_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机标定矩阵, $\mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为 3×3 单位阵, \mathbf{x} 、 \mathbf{X} 均为齐次坐标,

$\mathbf{C} = \mathbf{KR}[\mathbf{1} | -\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_5 & c_6 & c_7 & c_8 \\ c_9 & c_{10} & c_{11} & c_{12} \end{bmatrix}$ 为摄像机矩阵, k 为空间点到投影中心的距离。(1)式即为投影中心、像点、

空间点的共线方程。

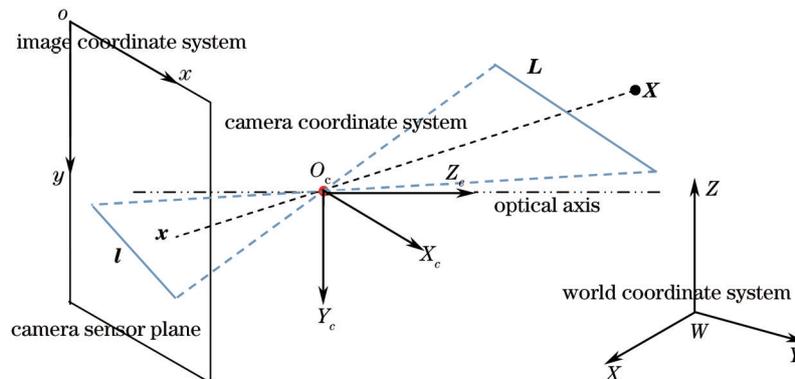


图1 摄像机成像模型

Fig.1 Camera imaging model

根据成像模型知,三维空间中的一条直线 L 投影到像面上的一条直线 l ,假设该直线在图像上的方程为 $ax + by + c = 0$,该直线的齐次表示为 $l = (a, b, c)^T$,则经摄像机矩阵 C 映射成直线 l 的空间的点集为一平面,且该平面方程为

$$X^T C^T l = 0, \quad (2)$$

则该平面的齐次表示为 $C^T l$, (2)式即为投影中心、图像直线、空间直线的共面方程。

2.2 多视图几何测量模型

根据(1)、(2)式可知,摄像机单视图测量只能根据共线方程确定空间点所在的射线或者根据共面方程确定空间直线所在的平面,而无法得到其确切的空间信息。鉴于此,采用多视图几何线-线交会、面-面交会的方法来达到测量空间点、线的目的。多视图可通过单摄像机不同时刻、不同位置拍摄得到,也可通过多台摄像机拍摄得到,本文采用布置多台摄像机的方式实现无人机多视图位姿测量。

假设测量系统由 $n(n \geq 2)$ 台摄像机组成,记摄像机 Cam_i 的摄像机矩阵为 C_i ,空间点 X 映射到摄像机 Cam_i 像面上的像点为 x_i ,空间直线 L 映射到 Cam_i 像面上的直线为 l_i 。(1)式表示3个线性方程,但其自由度为2,因此 n 台摄像机 $2n$ 个方程:

$$\begin{cases} (x_1 c_{31}^1 - c_{11}^1)X + (x_1 c_{32}^1 - c_{12}^1)Y + (x_1 c_{33}^1 - c_{13}^1)Z + (x_1 c_{34}^1 - c_{14}^1) = 0 \\ (y_1 c_{31}^1 - c_{21}^1)X + (y_1 c_{32}^1 - c_{22}^1)Y + (y_1 c_{33}^1 - c_{23}^1)Z + (y_1 c_{34}^1 - c_{24}^1) = 0 \\ (x_1 c_{31}^2 - c_{11}^2)X + (x_1 c_{32}^2 - c_{12}^2)Y + (x_1 c_{33}^2 - c_{13}^2)Z + (x_1 c_{34}^2 - c_{14}^2) = 0 \\ (y_1 c_{31}^2 - c_{21}^2)X + (y_1 c_{32}^2 - c_{22}^2)Y + (y_1 c_{33}^2 - c_{23}^2)Z + (y_1 c_{34}^2 - c_{24}^2) = 0 \\ \vdots \\ (x_1 c_{31}^n - c_{11}^n)X + (x_1 c_{32}^n - c_{12}^n)Y + (x_1 c_{33}^n - c_{13}^n)Z + (x_1 c_{34}^n - c_{14}^n) = 0 \\ (y_1 c_{31}^n - c_{21}^n)X + (y_1 c_{32}^n - c_{22}^n)Y + (y_1 c_{33}^n - c_{23}^n)Z + (y_1 c_{34}^n - c_{24}^n) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

同理,由(2)式可得 n 个平面方程:

$$\begin{cases} X^T C_1^T l_1 = 0 \\ X^T C_2^T l_2 = 0 \\ \vdots \\ X^T C_n^T l_n = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 c_{uv}^i 表示摄像机 Cam_i 的摄像机矩阵 C_i 的第 u 行、 v 列元素,(3)、(4)式即为经典的线-线交会测量空间点、面-面交会测量空间直线的多视图几何测量模型。

2.3 无人机体坐标系

在无人机水平飞行情况下定义无人机体坐标系,如图2所示(无人机图片来源于互联网),体坐标系的坐标原点为 P ,以无人机对称轴为 X 轴(无人机主轴)并指向飞行方向, Y 轴垂直于地面向上, Z 轴根据右手法则确定。

实际工程应用中,无人机机上各点、线在体坐标系中的坐标都是已知的或者可精确标定得到,如图中各角点的坐标、机翼线的方向向量等。本文后续内容中均默认无人机角点、机翼线在体坐标系中的坐标已知。

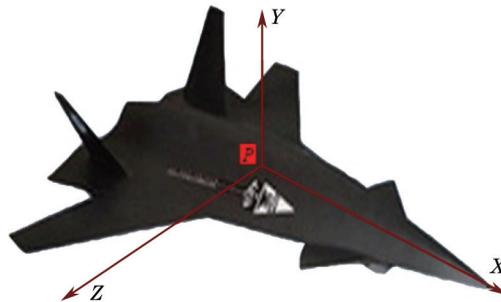


图2 无人机体坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of UAV coordinate system

3 摄像机组网无人机位姿测量系统设计

为实现无人机位置、姿态的高精度测量,采用多台摄像机通过摄像机组网的方式建立测量系统,如图3所示。测量系统由多台数字摄像机、图像处理系统、时间同步控制器、数据传输链路以及数据处理终端等组成。

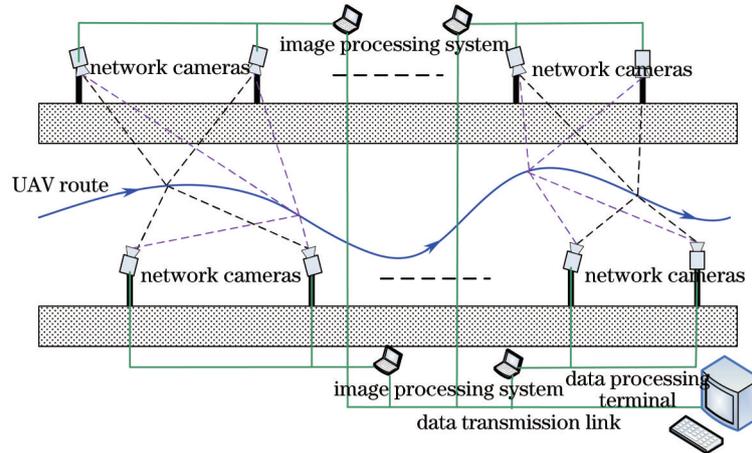


图3 摄像机组网无人机位姿测量系统

Fig.3 Position and attitude measuring system of UAV basing on network cameras

数字摄像机分布在无人机飞行轨迹两侧以形成摄像机网络,各摄像机间的理想交会角为 90° ,因此在摄像机组网过程中各摄像机间的交会角尽量设计在 90° 附近,且覆盖无人机飞行整个过程;时间同步控制器提供统一的时间轴,同步触发各组网摄像机采集图像;图像处理系统用于存储各组网摄像机图像数据并提取无人机图像特征;数据传输链路用于将各图像处理系统提取到的图像特征传至数据处理终端;数据处理终端主要完成特征融合位姿解算等工作。系统测量前需要对各摄像机进行标定,本文后续内容默认已经标定得到各摄像机的摄像机矩阵 C_i ,主要论述如何利用图像特征融合方法高精度测量无人机位姿参数。

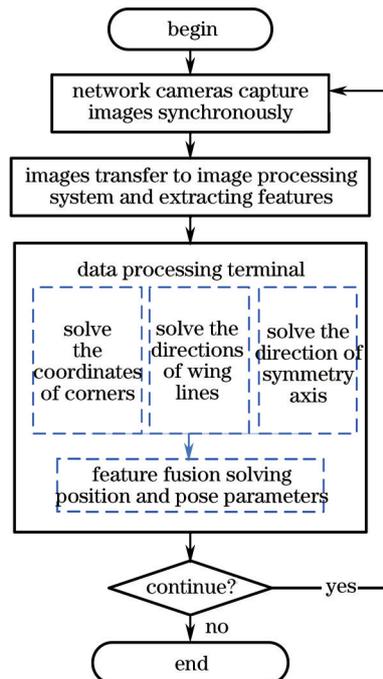


图4 摄像机组网无人机位姿测量流程图

Fig.4 Flow chart of measuring UAV position and attitude basing on network cameras

本文所提无人机位姿测量方法,提取得到各组网摄像机图像中无人机的角点、机翼线以及对称轴特征,并利用无人机航向、尺寸等先验信息,根据各特征及各摄像机间的几何关系完成同名特征匹配;利用多视图几何原理实现点特征的定位和线特征的定向;利用得到的点、线特征进行特征融合,同时解算得到无人机的

位置、姿态。摄机组网测量系统的工程流程如图4所示。

4 特征融合无人机位姿参数高精度测量

基于图像特征融合的无人机位姿参数测量主要包括两方面的内容:无人机图像特征提取以及基于图像特征融合的无人机位姿参数高精度解算。

4.1 无人机图像特征提取

无人机图像特征的高精度提取是高精度解算位姿参数的前提,但实际测量过程中受环境、无人机姿态及高速运动等因素的影响,要想检测得到无人机详尽的特征信息比较困难,且检测到的特征的可靠性值得商榷。同时由于拍摄角度的不同,根据各网摄像机图像提取得到的特征也不尽相同,因此同名特征点、线的匹配也是需要考虑的问题。实际特征提取过程中发现角点、机翼线以及对称轴是无人机较稳点的图像特征。

角点主要指无人机图像亮度剧烈变化或边缘曲线上曲率极大值的点,这类点所在邻域信息量丰富,且可能具有旋转不变、尺度不变和光照不变等特性,本文所指角点主要包括机头、机翼及尾部稳定且易于匹配的角点,但可能会因为姿态等原因被遮挡而不能提取,如图5所示(无人机图片来源于互联网)。机翼边缘直线性包括左右两条,实际特征提取中可能由于无人机飞行高度、姿态等因素使得图像中机翼线很短或者被遮挡,不易提取,但机翼线特征仍然具有一定的利用价值。对称轴是无人机稳定的特征线,绝大多数情况下各网摄像机图像均能提取得到对称轴所对应的特征直线,该特征的稳定提取也是本文所提方法能解算得到高精度位姿参数的前提。鉴于上述讨论,本文采用提取无人机图像稳定角点、机翼线以及对称轴的方式来实现无人机位姿测量。

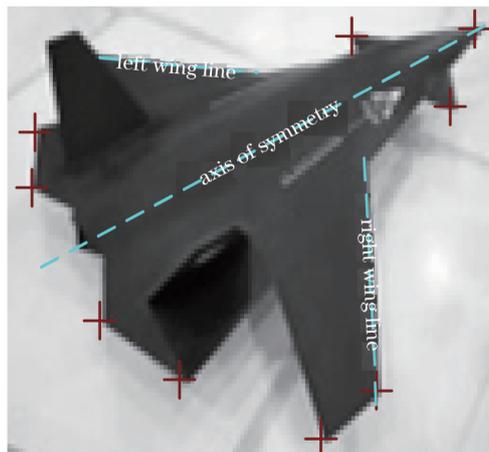


图5 无人机图像特征示意图

Fig.5 Schematic diagram of UAV image features

目前基于角点、直线以及对称轴特征的提取算法已比较成熟,主要有Harris角点算子、Hough变换直线检测以及最大转动惯量提取对称轴等,文献[10,15-16]中对上述特征提取算法进行了比较全面的总结,这里不再赘述。

4.2 特征融合无人机位姿高精度测量方法

当提取得到的图像特征较少时,若单独考虑点特征或线特征将导致无法解算得到无人机的位姿参数或者解算得到精度不高的测量结果。鉴于此,本文利用无人机稳定的对称轴特征解算得到无人机主轴在世界系中的单位方向向量,进一步融合检测得到的角点和机翼线特征高精度解算得到无人机的位姿参数。

4.2.1 线-线交会最小二乘求解同名特征点世界坐标

设测量网络中有 n 台摄像机,无人机坐标系到世界系的旋转矩阵为 \mathbf{R} ,体坐标系中心在世界系中的坐标为 \mathbf{T} ,无人机角点 $P_i(i=1,2,\dots,N)$ 在无人机坐标系和世界系中的坐标分别记为 \mathbf{P}_i 、 \mathbf{X}_i ,且其对应的同名像点个数为 $m(m \leq n)$ 。根据(3)式可得到 $2m$ 个线性方程,为表述简洁,将方程组改写为

$$\mathbf{A}_{2m \times 3} \mathbf{X}_i = \mathbf{B}_{2m \times 1}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{A}_{2m \times 3}$ 、 $\mathbf{B}_{2m \times 1}$ 为角点图像坐标及摄像机矩阵元素构成的常系数矩阵,方程个数为 $2m$,未知数个数为3,

因此当 $m \geq 2$ 时方程可解。利用线性最小二乘方法即可求解得到角点世界坐标

$$X_i = \left(A_{2m \times 3}^T A_{2m \times 3} \right)^{-1} A_{2m \times 3}^T B_{2m \times 1} \quad (6)$$

已知 N 各角点在体坐标系和世界系中的坐标,求解两坐标系间的位姿关系即所谓的绝对定向问题,可表述为

$$X_i = RP_i + T, \quad (7)$$

式中 $i=1,2,\dots,N$, 自由度为6,其中3个姿态角、3个位置参数,需要至少3个以上不共线点才能唯一确定无人机的位姿参数,因此要求组网摄像机每帧都要稳定提取得到3个以上同名角点。实际特征提取中可能会因为环境、姿态等原因导致无法满足上述条件,因此单纯利用角特征测量无人机位姿参数不够可靠,且角点特征太少测量结果对噪声敏感,解算精度能否达到要求值得考虑。

4.2.2 同名特征直线空间方向奇异值分解方法

记测量网络中有 n 台摄像机,无人机对称轴 L_0 、左机翼边缘直线 L_1 、右机翼边缘直线 L_2 在体坐标系中的单位方向向量分别为 $Q_0=(1,0,0)^T$ 、 $Q_1=(q_{1x},q_{1y},q_{1z})^T$ 、 $Q_2=(q_{2x},q_{2y},q_{2z})^T$,在世界系中的单位方向向量分别为 $L_0=(L_{0x},L_{0y},L_{0z})^T$ 、 $L_1=(L_{1x},L_{1y},L_{1z})^T$ 、 $L_2=(L_{2x},L_{2y},L_{2z})^T$,且提取得到的同名图像特征直线数分别为 m_0 、 m_1 、 m_2 (m_0 、 m_1 、 $m_2 \leq n$)。先考虑求解无人机对称轴在世界系中的单位方向向量,由(2)式可知对称轴同名特征直线 L_i 对应的平面方程的表达式为 $\pi_i=(a_i,b_i,c_i,d_i)^T=C_i^T L_i$,根据空间平面方程的定义知该平面的单位法向量为

$$N_i = \frac{(a_i, b_i, c_i)^T}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}} \quad (8)$$

实际测量中受设备工艺、环境变化、特征提取算法等因素的影响,不可避免地存在测量误差,若直接使用面-面交会多视图几何测量模型(4)解算空间直线的方程,将得到离各平面距离平方和最小的一个点,而无法得到特征直线在世界系中的空间方向,虽然两平面交会能得到直线的空间方向,但测量结果对噪声敏感,测量精度不高。无人机对称轴经过平面 π_i 的本质是对称轴与各平面的法向量 N_i 正交,即 $N_i^T L_0 = 0$ 。于是可以构造如下带约束条件的最优化问题:

$$\min \left\| A_{3 \times m_0}^T L_0 \right\|_2^2, \quad \text{subject to } \|L_0\| = 1, \quad (9)$$

式中 $A_{3 \times m_0}$ 为平面法矢量矩阵,其第 i 列为 N_i ,该最优化问题可通过Newton迭代、Levenberg-Marquardt迭代、神经网络等方法利用初值迭代求解。

考虑到上述问题为特殊的带约束条件的齐次方程组最小二乘问题,本文采用奇异值分解方法(SVD)解算该最优化问题。对 $A_{3 \times m_0}^T$ 进行奇异值分解得到

$$A_{3 \times m_0}^T = U_{m_0 \times m_0} D_{m_0 \times 3} V_{3 \times 3}^T, \quad (10)$$

由于正交变换不改变向量的模,于是有

$$\begin{cases} \|L_0\| = \|V_{3 \times 3}^T L_0\| = 1 \\ \|A_{3 \times m_0}^T L_0\| = \|U_{m_0 \times m_0} D_{m_0 \times 3} V_{3 \times 3}^T L_0\| = \|D_{m_0 \times 3} V_{3 \times 3}^T L_0\| \end{cases} \quad (11)$$

令 $L = V_{3 \times 3}^T L_0$,则最优化问题(9)可转化为

$$\min \left\| D_{m_0 \times 3} L \right\|_2^2, \quad \text{subject to } \|L\| = 1, \quad (12)$$

矩阵 $D_{m_0 \times 3}$ 是 $m_0 \times 3$ 的对角阵,且对角元素按降序排列,易知该问题的最优解为

$$L = (0, 0, 1)^T \rightarrow L_0 = V_{3 \times 3} L = v_3, \quad (13)$$

式中 v_3 为正交阵 $V_{3 \times 3}$ 的第三列, v_3 即为无人机对称轴在世界系中的单位方向向量,实际测量中可根据无人机的航迹确定其飞行方向为 v_3 还是 $-v_3$ 。同理,可解算得到左、右机翼边缘直线 L_1 、 L_2 在世界系中的单位方向向量 L_1 、 L_2 。

4.2.3 基于特征融合的无人机位姿高精度求解

由上述讨论可知,单纯利用点特征或者线特征实现无人机位姿参数高精度测量比较困难。本文采用两

步特征融合方法解算得到无人机全方位位姿参数,首先利用上述SVD方法高精度解算无人机主轴在世界系中的单位方向向量,然后进一步融合检测得到的角点和机翼线特征解算无人机的位姿参数。

无人机位姿参数可表示为 (\mathbf{R}, \mathbf{T}) , 假设已经根据(6)式和(13)式解算得到无人机角点世界坐标 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})^T$ ($i = 1, 2, \dots, n$)、对称轴及左右机翼线在世界系中的单位方向向量 \mathbf{L}_0 、 $\mathbf{L}_1 = (L_{1x}, L_{1y}, L_{1z})^T$ 、 $\mathbf{L}_2 = (L_{2x}, L_{2y}, L_{2z})^T$, 且无人机左右机翼线在机体系中的单位方向向量 $\mathbf{Q}_1 = (q_{1x}, q_{1y}, q_{1z})^T$ 、 $\mathbf{Q}_2 = (q_{2x}, q_{2y}, q_{2z})^T$ 已知。无人机对称轴方向已解算得到,即已知体坐标系 X 轴在世界系中的单位方向向量 \mathbf{L}_0 , 则姿态矩阵 \mathbf{R} 的第一列为 \mathbf{L}_0 , 记 \mathbf{R}_1 为任意的第一列为 \mathbf{L}_0 的正交变换矩阵, \mathbf{R}_2 为绕体坐标系 X 轴旋转 μ 角的旋转矩阵, 则姿态矩阵可表示为 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 的乘积, 即

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_0 & \mathbf{r}_2^1 & \mathbf{r}_3^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r_{22}^2 & r_{23}^2 \\ 0 & r_{32}^2 & r_{33}^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 \mathbf{r}_2^1 、 \mathbf{r}_3^1 分别为矩阵 \mathbf{R}_1 的第 2、3 列向量, r_{ij}^2 为矩阵 \mathbf{R}_2 的第 i 行 j 列元素, 且 $r_{22}^2 = r_{33}^2 = \cos \mu$ 、 $r_{23}^2 = -r_{32}^2 = \sin \mu$, 于是无人机角点坐标变换关系(7)式可改写为

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 \mathbf{P}_i + \mathbf{T} \xrightarrow[\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{R}_1^T \mathbf{T}]{\hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{R}_1^T \mathbf{X}_i} \hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{R}_2 \mathbf{P}_i + \hat{\mathbf{T}}, \quad (15)$$

同理, 可得左右机翼线单位方向向量的变换关系为

$$\mathbf{L}_j = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 \mathbf{Q}_j \xrightarrow[\hat{\mathbf{L}}_j = \mathbf{R}_1^T \mathbf{L}_j]{\hat{\mathbf{L}}_j = \mathbf{R}_1^T \mathbf{L}_j} \hat{\mathbf{L}}_j = \mathbf{R}_2 \mathbf{Q}_j, j = 1, 2. \quad (16)$$

(15)式中未知数为 $\mathbf{S} = (r_{22}^2, r_{23}^2)^T$, 因此可视为未知数为 5, 方程数为 3 的线性方程组, 当提取得到两个以上稳定角点时, 方程可解。(16)式中未知数为 $\mathbf{S}' = (r_{22}^2, r_{23}^2)^T$, 独立方程数为 2, 当提取得到 1 条机翼线即可求解得到角 μ 。联立(15)、(16)式, 并改写成矩阵形式, 得到

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{13} & 0 & 1 & 0 \\ p_{13} & -p_{12} & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{n2} & p_{n3} & 0 & 1 & 0 \\ p_{n3} & -p_{n2} & 0 & 0 & 1 \\ q_{12} & q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ q_{13} & -q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{22} & q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ q_{23} & -q_{22} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{22}^2 \\ r_{23}^2 \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} - p_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ \vdots \\ x_{n1} - p_{n1} \\ x_{n2} \\ x_{n3} \\ l_{12} \\ l_{13} \\ l_{22} \\ l_{23} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{MS} = \mathbf{G}, \quad (17)$$

式中 $\hat{\mathbf{X}}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})^T$ 、 $\hat{\mathbf{L}}_i = (l_{i1}, l_{i2}, l_{i3})^T$ 、 $\hat{\mathbf{T}} = (t_1, t_2, t_3)^T$ 、 $\mathbf{S} = (r_{22}^2, r_{23}^2, t_1, t_2, t_3)^T$, 于是可得到下述带约束条件的最优化问题:

$$\min \|\mathbf{MS} - \mathbf{G}\|_2^2, \quad \text{subject to } (r_{22}^2)^2 + (r_{23}^2)^2 = 1, \quad (18)$$

上述最优化问题可利用迭代算法估计得到未知参数 \mathbf{S} , 也可先利用线性最小二乘方法求解(17)式, 然后强制约束条件, 得到次优参数估计

$$\begin{cases} \mathbf{S} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{G} \\ \mathbf{T} = \mathbf{R}_1 [s_3, s_4, s_5]^T \\ r_{22}^2 = s_1 / \sqrt{s_1^2 + s_2^2}, r_{23}^2 = s_2 / \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \end{cases}. \quad (19)$$

解算得到的 \mathbf{T} 即为无人机在世界系中的位置参数向量, \mathbf{R} 即为无人机在世界系中的姿态参数矩阵, 假设 \mathbf{R} 是有先后绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转角度 γ 、 α 、 ϕ 得到的, 则可进一步解算得到以俯仰角 ϕ 、偏航角 α 以及滚转角 γ 表示的姿态参数

$$\begin{cases} \lambda = \arctan(r_{23}/r_{33}) \\ \alpha = -\arcsin(r_{13}) \\ \phi = \arctan(r_{12}/r_{11}) \end{cases}. \quad (20)$$

综上,即为基于特征融合的无人机位姿参数高精度测量方法,本方法首先利用无人机对称轴这一稳定图像特征高精度解算出无人机主轴在世界系中的单位方向向量,然后进一步利用各组网摄像机提取到的角点特征以及机翼线特征解算位姿参数。

5 仿真分析

为了验证所提特征融合位姿测量方法的正确性、可行性,针对单纯利用无人机点特征或线特征测量位姿参数方法以及本文所提特征融合位姿测量方法进行了数字仿真,比较了三种方法的测量精度;并通过改变摄像机数量,仿真得到摄像机数量对所提特征融合位姿测量方法的影响。

5.1 仿真条件

仿真中机体系到世界系的姿态矩阵用先后绕 x 、 y 、 z 轴旋转的欧拉角表示,且有 $(\gamma, \alpha, \phi) = (10^\circ, 20^\circ, -30^\circ)$, $T_0 = [1000, 1000, 0]^T$ 为机体系原点在世界系中的坐标;角点特征个数设为7,在机体系中的坐标 X 、 Y 、 Z 分别为 $[-5, 5]$ 、 $[-1, 1]$ 、 $[-4, 4]$ 上均匀分的随机数,主轴及左右机翼线在机体系中的单位方向向量分别为 $[1, 0, 0]^T$ 、 $[\sqrt{3}/2, 0, 0.5]^T$ 、 $[\sqrt{3}/2, 0, -0.5]^T$;摄像机主点 $(C_x, C_y) = (1280, 1280)$,等效焦距 $F_x = F_y = 2400$;不失一般性,采用两台数字摄像机交会测量的方式,两摄像机与世界系的位姿关系分别表示为 $[1000, 0, 1000 \times \sqrt{3}/3]^T$ 、 $(37.74^\circ, 77.10^\circ, -30.37^\circ)$ 和 $[1000, 0, -1000 \times \sqrt{3}/3]^T$ 、 $(172.06^\circ, 41.19^\circ, 117.25^\circ)$ 。当改变摄像机数目时,根据无人机在世界系中的位置,设置各摄像机在世界系中的 Y 坐标为0, X 、 Z 坐标分别为 $[500, 1500]$ 、 $[-1000, 1000]$ 上均匀分的随机数;以各摄像机指向无人机的方向作为摄像机系的 z 轴,摄像机系的 x 、 y 轴为随机生成的垂直于 z 轴平面上的两相互垂直的方向。考虑到实际图像特征提取误差,根据仿真需求在投影得到的点特征及线特征坐标上加入均值为0标准差为 σ 的高斯分布的随机噪声。

5.2 数字仿真

针对单纯利用角点求解无人机位姿参数问题,首先利用双目线交会得到角点在世界系中的坐标,然后利用线性最小二乘求解绝对定向问题得到无人机位姿参数;针对单纯利用线特征求解姿态角,首先利用摄像机主轴特征面面交会得到机体系 X 轴在世界系中的单位方向向量,然后利用(16)式求解得到姿态矩阵;针对特征融合位姿测量方法充分利用点线特征,首先面面交会得到无人机主方向,然后结合点特征及左右机翼线求解得到无人机位姿参数。仿真中,噪声标准差从0.1间隔0.1增加到1,且针对每一噪声级别程序运行1000次,统计得到平均测量误差 $P_{\text{mean}} = |P_{\text{real}} - P_m|/1000$,仿真结果如图6、7所示。为进一步得到所提特征融合位姿测量方法与组网摄像机台数的关系,仿真中摄像机台数从2间隔1增加到6,加入标准差为1的噪声,

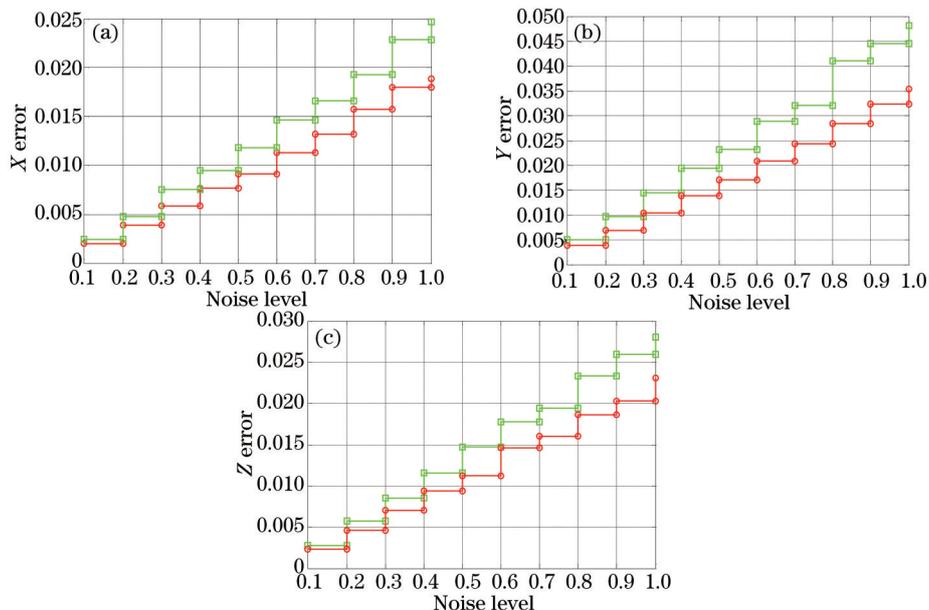


图6 噪声变化位置参数仿真测量误差。(a) X; (b) Y; (c) Z

Fig.6 Simulation errors of position parameters with the changes of noise. (a) X; (b) Y; (c) Z

且针对同一摄像机数目程序运行 1000 次,得到位姿参数的测量误差分布情况 $P_{\text{error}}=P_{\text{real}}-P_m$,并统计平均测量误差,仿真结果见图 8、9 所示。

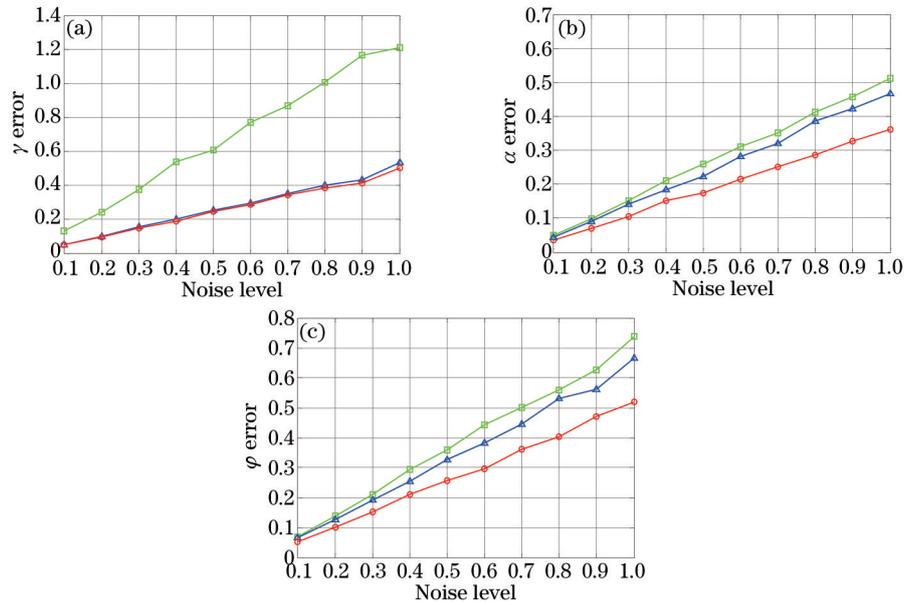


图 7 噪声变化姿态参数仿真测量误差。(a) γ ; (b) α ; (c) ϕ

Fig.7 Simulation errors of attitude parameters with the changes of noise. (a) γ ; (b) α ; (c) ϕ

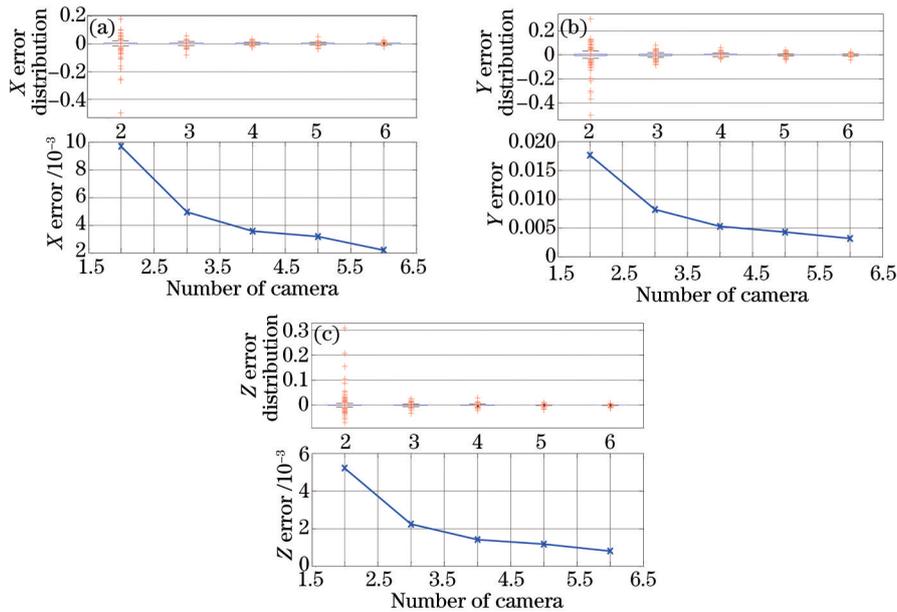


图 8 摄像机数变化位置参数仿真测量误差。(a) X; (b) Y; (c) Z

Fig.8 Simulation errors of position parameters with the changes of number of cameras. (a) X; (b) Y; (c) Z

图 6 所示分别为位置参数 x 、 y 、 z 三个方向的仿真测量误差,图中绿色、红色阶梯曲线分别表示利用角点特征求解绝对定向问题得到的位置参数和特征融合解算得到的位置参数。由图可得,随着噪声的加大,测量误差不断增大;利用所提特征融合的方法求解位置参数的精度高于单纯利用点特征的求解方法,且噪声标准差为 1 时三个方向的位置参数统计误差均小于 0.05 m。图 7 所示分别为姿态参数 γ 、 α 、 ϕ 仿真测量误差,图中绿色、蓝色、红色曲线分别表示利用角点求解绝对定向问题。利用线特征交会以及特征融合方法解算得到的姿态参数可知,仿真条件姿态测量误差随着噪声级别的增大而增大;特征融合方法求解得到的姿态参数明显高于其他两种情况,且噪声标准差为 1 时姿态测量误差小于 0.4° 。图 8 和图 9 分别表示摄像机数目从 2 增加到 6 过程中无人机位置、姿态参数测量误差分布及统计平均测量误差随摄像机台数增加的变化趋势,其中箱线图表示误差分布,曲线图表示相应的平均测量误差,从图中可以看出随着摄像机数目的增

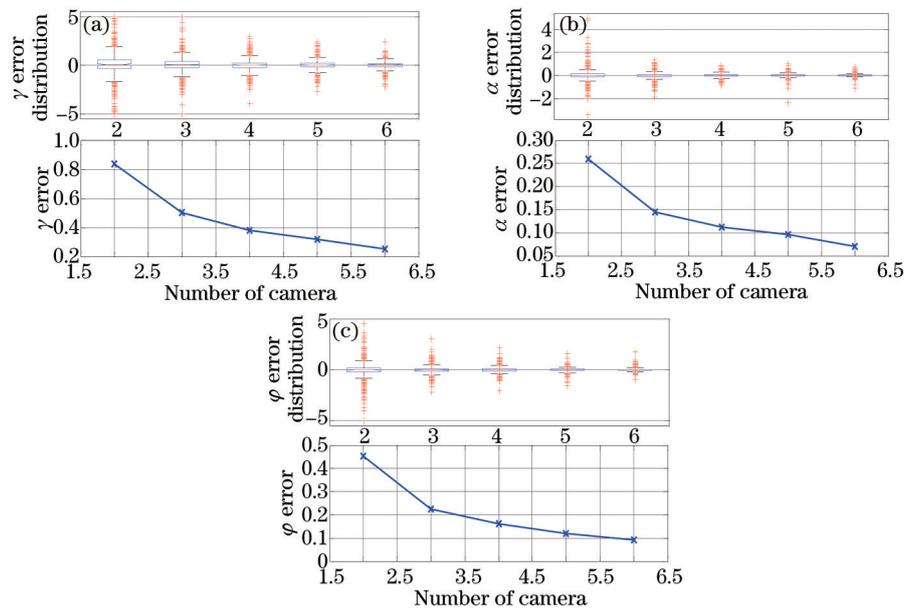


图9 噪声变化姿态参数仿真测量误差。(a) γ ; (b) α ; (c) φ

Fig.9 Simulation errors with the changes of number of cameras. (a) γ ; (b) α ; (c) φ

加,测量误差方差越来越小,平均测量误差逐渐变小。仿真结果验证了所提基于特征融合位姿测量方法的正确性和可行性,证明了所提方法有助于提高无人机位姿测量精度。

5.3 误差分析

由图6(a)~(c)可知,仿真条件下噪声标准差为1时无人机 x 、 y 、 z 三个方向的位置参数统计误差分别均小于0.025、0.05、0.03 m,即 X 、 Z 方向的测量精度是明显高于 Y 方向,因为仿真条件下光轴方向与世界系 X 、 Y 、 Z 轴的夹角分别为 90° 、 30° 、 60° ,而交会测量中交会角越接近 90° 测量精度越高,因此仿真结果与理论相符。从图7(a)~(c)可看出,噪声标准差为1时无人机三个方向的姿态角误差分别小于 0.55° 、 0.38° 、 0.5° ,可知无人机绕 X 轴的滚转角测量精度低于另外两个姿态角,这是由于基于无人机主轴、机翼特征的双目面面交会对滚转角和俯仰角不敏感,而对偏航角敏感造成的。

6 结 论

为实现无人机位置、姿态参数的高精度测量,提出了基于图像特征融合的无人机位姿测量方法。针对实际无人机位姿测量过程中可能出现的特征数不够、测量精度不高等问题,利用无人机稳定的主轴特征解算得到无人机主轴在世界系中的单位方向向量,进一步融合检测得到的角点特征以及机翼线特征解算得到无人机的位姿参数。相比于单纯利用点特征或线特征求解无人机位姿参数的方法,基于图像特征融合无人机位姿测量方法具有高精度、适应性强等优点。基于图像特征的无人机位姿高精度测量是无人机试验研制、姿态控制、事故分析以及提高有效载荷效能等的重要手段,具有重要的理论研究意义和广泛的军事应用前景。

参 考 文 献

- 1 Su Guozhong. Research on the Method of Aircraft Pose Surveying from Image Sequences Obtained by Photoelectric Theodolite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- 2 Lu Junyun, Li Qinghui, Jiang Hua. Measure method of the attitude of UAV based on the optical image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 102–105.
陆钧昀, 李庆辉, 姜 华. 基于光测图像的无人机姿态测量方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 102–105.
- 3 Derek Kingston, Randal Beard. Real-time attitude and position estimation for small UAVs using low-cost sensors[C]. AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, 2004. 6488–6493.
- 4 Hong S K. Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, (2): 109–118.

- 5 Zhu R, Sun D, Zhou Z Y. A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-Based sensors[J]. *Measurement*, 2007, 40(3): 322-328.
- 6 Ma Peisheng, Xiao Qiangui, Yang Liuqing. Design on attitude determination system without gyroscope based on single-antenna[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(6): 1465-1466.
马培圣, 肖前贵, 杨柳庆. 基于单天线GPS的无陀螺姿态测量系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(6): 1465-1466.
- 7 Wendel Jan, Meister Oliver, Schlaile Christian. An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006, 10(6): 527-533.
- 8 Zhang Zuxun, Su Guozhong, Zhang Jianqing, *et al.*. Airplane pose measurement from image sequences[J]. *Geometrics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(4): 287-281.
张祖勋, 苏国中, 张剑清, 等. 基于序列影像的飞机姿态跟踪测量方法研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004, 29(4): 287-291.
- 9 HASSAN Mostafavi. Rigid body pose estimation accuracy: a comparison of single-camera and stereo techniques[C]. *SPIE*, 1994, 2350: 206-217.
- 10 Yu Qifeng, Shang Yang. *Videometrics: Principles and Researches*[M]. Beijing: Science Press, 2009. 22-77.
于起峰, 尚 洋. *摄像测量学原理与应用研究*[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 22-77.
- 11 Wang Chao, Zhang Yahui, He Peilong. Determination of rotary object's 3D pose from mono-view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2515-2518.
王 超, 张涯辉, 何培龙. 利用单站光测图像确定回转体目标三维姿态[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2515-2518.
- 12 Zhao Lirong, Liu Yuhan, Zhu Wei, *et al.*. Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2786-2793.
赵立荣, 柳玉晗, 朱 玮, 等. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2786-2793.
- 13 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Chen Guojun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(2): 15-19.
于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. *国防科学技术大学学报*, 2000, 22(2): 15-19.
- 14 Shang Yang. *Researches on Vision-Based Pose Measurements for Space Targets*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 10-77.
尚 洋. *基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究*[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006. 10-77.
- 15 Ding Weili, Wang Wenfeng, Zhang Xuguang, *et al.*. Extracting straight lines from building image based on edge orientation image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2904-2911.
丁伟利, 王文锋, 张旭光, 等. 基于边缘方向图的建筑物直线特征提取[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2904-2911.
- 16 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng, *et al.*. A robust image registration algorithm based on feature points matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 444-461.
刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏, 等. 一种稳健的特征点配准算法[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 444-461.

栏目编辑: 何卓铭