

文章编号 1004-924X(2013)07-1831-09

采用多站图像直线特征的飞机姿态估计

王 彬^{1,2}, 何 昕^{1*}, 魏仲慧¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:在角平分线方向向量法基础上提出了一种新的基于直线特征的飞机姿态多站测量方法。首先,用角平分线方法计算飞机的中轴线及其共面垂线的方向向量,由此得到飞机参考系到经纬仪摄像机参考系的旋转矩阵。然后,提取所有测站经纬仪图像上机翼边缘的直线特征,联合经纬仪俯仰方位角等参数,推导出直线特征的目标空间共面总误差函数,并使用改进的正交迭代方法优化旋转矩阵使总误差最小。最后,分解优化后的旋转矩阵得到飞机的姿态值。仿真实验得到的四站测量精度为 0.17° , 图像处理速度为 32 frame/s, 比角平分线法有了大幅的提高, 另外, 算法处理速度能达到实时。这些结果证明了文中方法的有效性和优越性。

关键词:飞机姿态; 多站测量; 经纬仪; 直线特征; 正交迭代

中图分类号: TP391; V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1831

Attitude estimation of aircrafts using line features on multi-camera images

WANG Bin^{1,2}, HE Xin^{1*}, WEI Zhong-hui¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: hexin6627@sohu.com*

Abstract: A new aircraft attitude estimation algorithm by use of line features for multi-camera images was proposed based on the direction vector method of angle bisector line. First, the angle bisector method was used to get direction vectors of the central and coplanar vertical axes of the aircraft, thus the rotation matrix R from the aircraft coordinate system to the theodolite camera reference coordinate system was obtained. Then, all line edges of the wings on theodolite images were extracted, and the total spacial coplanar error equation functions of line characteristics were derived with the pitch, azimuth and other parameters of theodolite. Moreover, an improved orthogonal iteration method was presented to minimize the total error of rotation matrix R . Finally, the optimized rotation matrix R was decomposed to get the aircraft's attitude. By a simulation experiment, the accuracy of four-camera system achieves 0.17° and the speed is 32 frame/s, which shows the accuracy is much better than that

收稿日期: 2012-12-29; 修订日期: 2013-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60878052)

of the angle bisector method and the processing speed reaches real-time level. These results prove the effectiveness and superiority of the proposed algorithm.

Key words: aircraft pose; multi-camera measurement; theodolite; line feature; orthogonal iteration

1 引言

飞机三维姿态是反映飞机状态性能的重要参数,获得这些参数具有重要的意义,如试飞阶段获取的姿态可以分析飞机的性能,或者从姿态参数研究飞机的故障原因。在军事领域,精确测量舰载机的三维姿态,将姿态信息反馈给飞机,是引导舰载飞机安全着舰过程中很关键的技术。通常利用地面安装的测量设备对空中飞机的姿态进行测量,通过分析飞机图像解算飞机姿态。目前靶场测量中通常运用光电经纬仪跟踪拍摄飞机,得到连续的飞机实时运动的序列图像,然后通过处理这些图像来获得其对应时刻的三维姿态。

文献[1-2]介绍了单站经纬仪测量飞机姿态的方法,但是单站方法得到的飞机图像可能不完整,没有计算姿态的完整信息,甚至捕捉不到飞机图像,造成测姿失败,所以单站方法鲁棒性不高,对特殊情况的适应性差。在对飞机姿态数据要求很高的场合,例如光电经纬仪跟踪飞机引导其安全着舰时,一旦失去姿态数据可能造成严重的后果。所以本文研究了多站经纬仪跟踪飞机,用多视角得到飞机的更多信息,以避免上述测姿失败的情况。

得到飞机的图像之后,学者们采用的方法是分析图像中以下三类特征进行姿态解算。文献[3]中给出了基于图像中点特征求解姿态的特征点算法。文献[4]介绍了基于目标轮廓特征的匹配方法。文献[5-6]介绍了基于特征直线的中轴线法和角平分线法。实际应用中特征点易被遮挡,且图像中点特征定位精度受噪声影响很大,鲁棒性不好。轮廓匹配法需要建立各种飞机的表面三维模型和经纬仪模拟系统,用模拟影像匹配真实影像,计算量很大,且通用性差。中轴线法和角平分线法采用的直线特征抗噪性能更好,但是中轴线法适用于柱状的目标,且只能求得俯仰角和偏航角,不适用于飞机目标的三维姿态求解,角平

分线法中采用的是线性计算方法,精度不高,且若是有一条机翼边缘被遮挡或成像不清晰,即会造成很大的误差。

本文在文献[6]角平分线方向向量方法的基础上,提出了一种改进的方法,称之为多站直线正交迭代算法。它能将所有测站的机翼边缘信息全局利用起来进行迭代求解,必要的时候还可以利用飞机本身固有的其他特性直线。结合多个固定在平台上的经纬仪摄像机间的几何约束,得到统一表达的直线边缘特征的目标空间共面性误差,求得总误差函数,最后用迭代求解得到使该误差函数最小的旋转矩阵 \mathbf{R} ,分解 \mathbf{R} 即可得到姿态值(本文称为终值)。

2 坐标系和飞机姿态角定义

飞机坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 如图 1 所示, $O_P X_P$ 指向机身前方, $O_P Y_P$ 指向左边机翼,与 $O_P X_P$ 垂直, $O_P Z_P$ 与 $O_P-X_P Y_P$ 按右手螺旋定则。飞机依次绕 $O_P Z_P, O_P Y_P, O_P X_P$ 旋转,当从原点看向坐标轴正向时逆时针旋转为正向,分别定义为偏航角(yaw),俯仰角(pitch),滚动角(roll)。

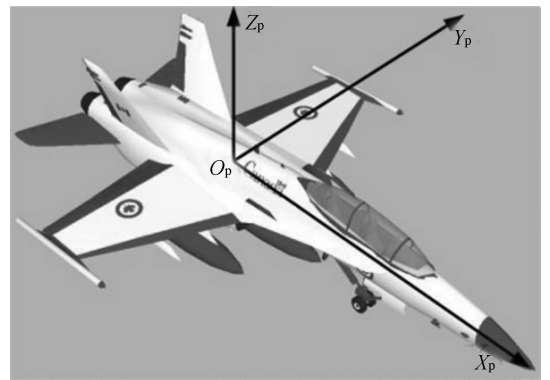


图 1 飞机坐标系
Fig. 1 Axis of plane

姿态参考系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 为计算飞机姿态的参考坐标系, $X_S Y_S$ 为水平面。当三姿态角都为 0

$$s_j = \frac{1}{\sqrt{a_j^2 + b_j^2}}(b_j, -a_j, 0)^T$$

$$m_j = \frac{1}{\sqrt{a_j^2 + b_j^2}}(-a_j c_j, -b_j c_j, a_j^2 + b_j^2)^T. \quad (1)$$

飞机坐标系内的直线 L_j , 其向量为 D_j , 它在经纬仪摄像机坐标系内向量为 RD_j , 它在平面 N_j 上。令 $\hat{U}_j = s_j s_j^T + m_j m_j^T$, 则有 N_j 平面内向量 RD_j 可表示为 $RD_j = \hat{U}_j RD_j$, \hat{U}_j 是 OI 算法中的投影矩阵, 类似 \hat{V}_j 。由于噪声的影响, 实际投影的时候空间直线 L 不完全在平面 N_j 上, 因此可建立直线 L_j 的共面误差方程:

$$e_j = \|(I - \hat{U}_j)RD_j\|^2. \quad (2)$$

4.3 多站直线共面性误差

本节推导了全局、统一地建立多个摄像机图像直线特征的目标空间共面性误差。

假设利用的飞机边缘直线特征(如机翼边缘, 尾翼边缘等)为 $L_j (j=1, \dots, M)$, 共 M 条。他们在飞机系下的方向向量为 D_j , 第 i 站经纬仪摄像机观测到的特征直线 $D_{ij} \in \{D_1, D_2, \dots, D_M\}$ 。如第 2 节所述将摄像机 i_0 坐标系 $O_{i_0}-X_{i_0}Y_{i_0}Z_{i_0}$ 与待测飞机坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 之间的旋转矩阵 R 作为待估计量, 因此需将所有摄像机的数据都转化到摄像机参考坐标系 $O_{i_0}-X_{i_0}Y_{i_0}Z_{i_0}$ 下考虑。参照图 2, 直线 L_j 在飞机坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 下的向量为 D_j , 则它在 $O_{i_0}-X_{i_0}Y_{i_0}Z_{i_0}$ 下向量为 RD_j 。 L_j 投影在摄像机 i 的成像平面上的直线为 l_{ij} , 他们构成的平面为 N_{ij} , 在 $O_i-X_iY_iZ_i$ 坐标系下 N_{ij} 上两垂直单位向量的 s_{ij}, m_{ij} 。

$$s_{ij} = \frac{1}{\sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2}}(b_{ij}, -a_{ij}, 0)^T$$

$$m_{ij} = \frac{1}{\sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2}}(-a_{ij}c_{ij}, -b_{ij}c_{ij}, a_{ij}^2 + b_{ij}^2)^T. \quad (3)$$

根据 $O_i-X_iY_iZ_i$ 和 $O_{i_0}-X_{i_0}Y_{i_0}Z_{i_0}$ 的关系可得到 s_{ij}, m_{ij} 在 $O_{i_0}-X_{i_0}Y_{i_0}Z_{i_0}$ 下的向量为 $R^i s_{ij}, R^i m_{ij}$, 此时的投影矩阵为 \hat{U}_j^i 。

$$\hat{U}_j^i = \frac{R^i s_{ij} (R^i s_{ij})^T}{(R^i s_{ij})^T R^i s_{ij}} + \frac{R^i m_{ij} (R^i m_{ij})^T}{(R^i m_{ij})^T R^i m_{ij}}. \quad (4)$$

有了投影矩阵, 与单站直线共面性误差同理, 在 $O_{i_0}-X_{i_0}Y_{i_0}Z_{i_0}$ 坐标系下, 直线 L_j 的向量为 RD_j ,

它满足 $RD_j = \hat{U}_j^i RD_j$ 。假设第 i 测站摄像机观测到的直线特征 L_j 的共面误差方程为 e_j^i :

$$e_j^i = (I - \hat{U}_j^i)RD_j. \quad (5)$$

4.4 最小化共面性误差的迭代求解

假设第 i 站经纬仪摄像机观测到的特征直线 $D_{ij} \in A_i, A_i = \{D_1, D_2, \dots, D_M\}$, $|A_i|$ 是集合 A_i 中的元素个数。则多站经纬仪测姿系统观测到直线特征的总数为 $N, N = \sum_{i=1}^K |A_i|$ 。

建立所有测站的观测直线的共面误差总和函数 $E(R)$ 。

$$E(R) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{|A_i|} \|e_j^i\|^2 = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{|A_i|} \|(I - \hat{U}_j^i)RD_{ij}\|^2. \quad (6)$$

该误差函数包含了对所有测站摄像机图像信息进行了全局统一的表达, 优化目标即是求解使 $E(R)$ 最小的旋转矩阵 R , 因此这种方法得到的结果精度更高。

下面给出文献[10]的一个定理, 矩阵 AB^T 的奇异值分解矩阵是 UDV^T , 使得关于旋转矩阵 R 的函数 $\|RB - A(R)\|^2$ 值最小的 R 满足: $R = USV^T$, 其中矩阵 U, D, V, S 定义在文献[9]中有具体规定, 本文不赘述。

将上述误差函数表述为定理中的形式:

$$E(R) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{|A_i|} \|(I - \hat{U}_j^i)RD_{ij}\|^2 = \|RB - A(R)\|^2, \quad (7)$$

$$A(R) = (\hat{U}_{11}^1 RD_{11}, \dots, \hat{U}_{1|A_1|}^1 RD_{1A_1}, \hat{U}_{11}^2 RD_{i1}, \dots, \hat{U}_{1|A_1|}^2 RD_{iA_1}, \dots, \hat{U}_{1|A_1|}^K RD_{KA_1}, \dots, \hat{U}_{1|A_1|}^K RD_{KA_K}), \quad (8)$$

$$B = (D_{11}, \dots, D_{1A_1}, D_{i1}, \dots, D_{iA_i}, \dots, D_{KA_K}). \quad (9)$$

理论上只要 $N \geq 3$, 即可进行迭代。在上述定理的基础上, 给出求解 R 的迭代方法, 步骤如下:

(1) 首先提取所有测站经纬仪飞机图像的直线边缘, 得到这些直线对应的空间向量 D_{ij} , 按(9)式可以求得 B ; 对应由提取直线的参数按(3)式可以得到 s_{ij}, m_{ij} , 据此计算 \hat{U}_j^i ;

(2) 并将 $R^{(n)}$ 代入(8)式求得 $A(R^{(n)})$, n 表示

迭代次数,迭代初值为角平分线法求得的 $\mathbf{R}^{(0)}$;

(3)按照前述定理,对 $\mathbf{A}(\mathbf{R}^{(n)})\mathbf{B}^T$ 进行奇异值分解, $\mathbf{A}(\mathbf{R}^{(n)})\mathbf{B}^T = \mathbf{UDV}^T$;

(4)求解 $\mathbf{R}^{(n+1)} = \mathbf{USV}^T$;

(5)比较 $\mathbf{R}^{(n+1)}$ 和 $\mathbf{R}^{(n)}$ 的差值是否在设定的阈值范围内,是则表示收敛,迭代结束。否则继续步骤2进行下次迭代;

迭代结束求得 \mathbf{R} 后,结合第2节中提到的经纬仪摄像机参考系 $O_{i0}-X_{i0}Y_{i0}Z_{i0}$ 到姿态参考系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 的旋转矩阵,设为 \mathbf{R}_{i0-s} ,可以得到飞机坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 到姿态参考系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 旋转矩阵 $\mathbf{R}_{ps} = \mathbf{R}_{i0-s}\mathbf{R}$,分解矩阵 \mathbf{R}_{ps} 即可得到最终的三维姿态角。

5 实验分析

5.1 实验环境和参数设置

为了验证算法的有效性,建立了仿真实验。实验平台为3DSMAX,建立目标飞机模型和经纬仪摄像机成像模型,利用VC++6.0对算法进行了实现。实验建立了加拿大舰载战斗机“大黄蜂”的三维模型,它的尺寸为17.64 m×12.50 m×5 m,该模型和真实的飞机模型有一定差距,但在验证本算法的实验中并无影响。

直线特征的设置:选取了飞机机翼两端的边缘直线特征共4条作为实验仿真的直线特征,如图3。必要时也可采用尾翼边缘等特征。

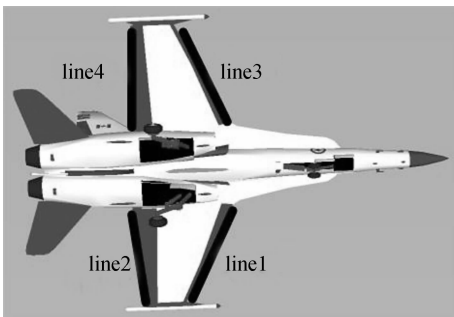


图3 飞机坐标系的4条机翼边缘直线特征

Fig. 3 4 lines in plane axis

可取模型中的机翼直线两端点作为其参数。图中直线的端点在飞机坐标系下的坐标如下表1。

表1 飞机坐标系下的4条机翼特征直线的位置参数
Tab. 1 Position of 4 lines in plane axis (m)

	Line1	Line2	Line3	Line4
端点1	-11.366	-13.179	-9.183	-13.548
	6.049	6.041	-1.797	-1.649
	0.313	0.329	0.585	0.521
端点2	-9.183	-13.548	-11.243	-13.179
	1.797	1.649	-6.17	-6.041
	0.585	0.521	0.000	0.329

坐标系的设置:将软件中的世界坐标系作为文中的姿态参考系。软件中的自带相机工具,可以用来模拟经纬仪的摄像机对飞机成像,相机坐标系相对世界坐标系的参数可以读取,进而可以得到文中的 $\mathbf{R}_i^c (i=1, \dots, 4)$ 。

飞机机动过程和经纬仪的设置:飞机的机动和其中2个测站的布置按照文献[5]的方法,但飞机模型换成上述“大黄蜂”飞机模型,另外再增加2个测站,即测站1、2、3、4的摄像机光心相对世界坐标系(即姿态参考系)的位置分别为(500 m, -200 m, 0)、(-800 m, 350 m, 0)、(-500 m, -200 m, 0)、(800 m, 350 m, 0),经纬仪的摄像机焦距是各种内参数设置与文献[5]相同,所有经纬仪焦距 f 为380 mm、口径为150 mm、1040 pixel×1024 pixel、像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$,跟踪帧频为50 frame/s。仿真4站跟踪飞机眼镜蛇的机动过程,跟踪过程的图像附加上了变化云层的天空背景以尽量模拟真实的跟踪情况。

5.2 实验数据的处理

根据表1可以求得 $\mathbf{D}_j (j=1, \dots, 4)$;

飞机机动过程中,每台经纬仪获取301帧图像,获取经纬仪在拍摄图像时刻的 \mathbf{R}_i^c ;以下是4站经纬仪的图像,从中各选出对应的4帧进行姿态计算,下图4-(a)(b)(c)(d)给出了4个测站第20,80,140,260帧的飞机图像。



(a) 4 个测站各自获取的第 20 帧飞机图像

(a) The 20th images from 4 cameras



(b) 4 个测站各自获取的第 80 帧飞机图像

(b) The 80th images from 4 cameras



(c) 4 个测站各自获取的第 140 帧飞机图像

(c) The 140th images from 4 cameras



(d) 4 个测站各自获取的第 260 帧飞机图像

(d) The 260th images from 4 cameras

图 4 4 个测站的飞机图像

Fig. 4 Images from 4 cameras

测站 1,2 初值:选取 1,2 两站的图像进行角平分线求解姿态初值;对图像预处理,边缘检测,再利

用 hough 变换分别从图像中提取其观测到的机翼边缘直线,得到参数 $a_{ij}, b_{ij} (i=1,2; j=1,3)$,结合

跟踪参数,可以得到角平分线姿态初值。

测站 1,2 终值:只利用测站 1,2 数据进行迭代, $\mathbf{B}=(\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{D}_3, \mathbf{D}_4, \mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{D}_3, \mathbf{D}_4)$ 根据 a_{ij}, b_{ij} ($i=1, 2; j=1, \dots, 4$), 进而得到 $\hat{\mathbf{U}}_j^i$, 结合初值 $\mathbf{R}^{(0)}$ 得到 $A(\mathbf{R}^{(0)})=(\hat{\mathbf{U}}_1^1 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_1, \hat{\mathbf{U}}_2^1 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_2, \hat{\mathbf{U}}_{13} \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_3, \hat{\mathbf{U}}_4^1 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_4, \hat{\mathbf{U}}_1^2 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_1, \hat{\mathbf{U}}_2^2 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_2, \hat{\mathbf{U}}_3^2 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_3, \hat{\mathbf{U}}_4^2 \mathbf{R}^{(0)} \mathbf{D}_4)$

迭代求解得到两站终值。

4 个测站终值:再提取 3,4 测站的图像机翼边缘直线参数,得到 4 站对应的 \mathbf{B} 和 $A(\mathbf{R}^{(0)})$ 迭代求解姿态终值。

5.3 实验结果与分析

计算得到的飞机姿态角平分线初值,2 站迭代终值,4 站迭代终值结果如下表 2,3,4。

表 2 初值误差

Tab.2 Initial attitude errors

帧号	姿态角设定值/(°)			角平分线初值/(°)			初值-设定值		
	偏航角	俯仰角	滚动角	偏航角	俯仰角	滚动角	偏航角	俯仰角	滚动角
20	-90.60	7.80	1.20	-90.27	7.43	0.87	0.33	0.37	0.33
80	-94.60	70.20	9.20	-93.98	70.75	9.61	0.62	0.55	0.41
140	-90.00	123.50	0.00	-89.00	122.40	-0.94	1.00	1.10	0.94
180	-87.60	100.70	-4.80	-88.24	100.03	-4.14	0.64	0.67	0.66
220	-84.60	62.30	-10.80	-84.03	62.83	-11.26	0.57	0.53	0.46
260	-87.8	23.90	-4.40	-87.46	24.30	-4.74	0.34	0.40	0.34
						平均误差	0.583	0.603	0.523

表 3 两站迭代值误差

Tab.3 Final attitude errors of two cameras

(°)

帧号	2 站迭代值(终值)			终值-设定值		
	偏航角	俯仰角	滚动角	偏航角	俯仰角	滚动角
20	-90.52	7.67	1.13	0.08	0.13	0.07
80	-94.41	70.00	9.29	0.19	0.20	0.09
140	-89.65	123.13	-0.31	0.35	0.37	0.31
180	-87.90	100.37	-4.57	0.30	0.33	0.23
220	-84.38	62.52	-10.92	0.22	0.22	0.12
260	-87.70	24.06	-4.50	0.10	0.16	0.10
			平均误差	0.207	0.235	0.153

表 4 四站迭代值误差

Tab.4 Final attitude errors of four cameras

(°)

帧号	4 站迭代值(终值)			终值-设定值		
	偏航角	俯仰角	滚动角	偏航角	俯仰角	滚动角
20	-90.53	7.71	1.14	0.07	0.09	0.06
80	-94.46	70.05	9.28	0.14	0.15	0.08
140	-89.75	122.23	-0.21	0.25	0.27	0.21
180	-87.80	100.47	-4.62	0.20	0.23	0.18
220	-84.43	62.47	-10.90	0.17	0.17	0.10
260	-87.74	24.01	-4.47	0.06	0.11	0.07
			平均误差	0.148	0.170	0.117

从表 2, 表 3 数据得知, 在不增加经纬仪测站的情况下, 采用正交迭代对角平分线姿态值进行优化后结果精度有了很大的提高, 最大平均误差从 0.603° 减小到 0.235° 。从表 4 中数据可知, 四站数据迭代之后的姿态角精度提高到 0.170° , 总体精度越来越好。

为了检验本文方法在实际运用中的运算速度性能, 在 Intel Core2.2 GHz、内存 2 GB 的 PC 机上, VC++6.0 的软件环境下对算法进行了实现, 算法的主要耗时运算为图像的边缘检测和直线提取, 以及正交迭代运算。运行时间如下表 5。

表 5 算法耗时比较

Tab. 5 Time-consuming of three algorithm (ms)

	角平分线法	两站迭代	四站迭代
边缘检测和直线提取耗时	3.60	7.23	14.50
迭代运算耗时	0	9	11
其他运算	<5	<5	<5
总耗时	8.60	21.23	30.50

表 5 的数据表明采用两站经纬仪图像进行正交迭代计算飞机姿态可以达到的速度可达到 47 frame/s, 采用 4 站经纬仪图像处理速度可达到 32 frame/s, 都在可接受的范围之内, 基本可满足实时

场合的需要。

从以上精度和处理速度的实验数据分析可知, 精度高的方法, 处理速度会相应降低。所以在实时性要求高的场合, 可以只利用机翼边缘信息, 少布测站; 在姿态值精度要求较高的场合, 可以利用飞机本身固有的其他特性直线, 如尾翼边缘直线等, 多布测站。

6 结 论

本文在角平分线方向向量法测飞机姿态的基础上, 推导了两站及多站经纬仪基于直线特征的测量飞机姿态的 OI 迭代算法。这种方法的优点在于利用上了所有测站的直线特征信息, 经全局表达的误差函数的最小化使全局最小, 结果精度更高且抗干扰能力更强, 同时因为正交迭代算法具有全局快速收敛的特点, 所以改进后的算法具有高精度, 鲁棒性好, 收敛快等优点。实验结果证明: 利用两站机翼边缘直线正交迭代对角平分线姿态值进行优化后大幅提高了结果精度, 最大平均误差从 0.603° 减小到 0.235° , 四站测量的姿态角精度则达到 0.17° , 且他们的处理速度可满足实时测量的需要, 在靶场测量领域具有较大的意义。另外, 接下来的工作将要考虑将算法进行硬件实现和优化, 以将算法整体提升到更快的处理速度。

参考文献:

- [1] 于起峰, 孙祥一, 邱志强. 从单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 77-79.
YU Q F, SUN X Y, QIU ZH Q. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. *Optical Technique Eng.*, 2002, 28(1): 77-79. (in Chinese)
- [2] 王晓明, 乔彦峰, 宋立维, 等. 用单站光电雷达一体化系统测量目标三维姿态[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1779-1784.
WANG X M, QIAO Y F, SONG L W, et al.. Measurement of three-dimensional attitude by single opto-electrical and radar integration instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1779-1784. (in Chinese)
- [3] 尚洋. 基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006: 53-57.
SHANG Y. *Researches on Vision-Based Pose Measurements for Space Targets* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 53-57. (in Chinese)
- [4] 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: 95-100.
SU G ZH. *Research on the method of aircraft pose surveying from Image Sequences obtained by photoelectric theodolite* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 95-100. (in Chinese)
- [5] 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]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.
YU Q F, SUN X Y, CHEN G J. 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 Eng.*, 2000,22(2):15-19. (in Chinese)

- [6] 王习文,马军,陈娟,等.飞机三维姿态测量的角平分线方向向量法[J].*光学精密工程*,2010,18(2):369-371.

WANGX X W, MA J, CHEN J, *et al.*. Direction vector method of angle bisector lines for measuring aircraft's 3D attitude [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(2):369-371. (in Chinese)

- [7] LU C P, HAGER G, ERIC M. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (S0162-8828),2000,22(6):610-622.

- [8] YING K Y, KIN H W, MICHAEL M. Pose estimation for augmented reality applications using genetic algorithm [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 2005, 36 (6) : 1295-1301.

- [9] MARIO L F, LORENZO P, BRIAN S. A comparison of pose estimation algorithms for machine vision based aerial refueling for UAVs [C]. *Proc. of the 2006 Conference on Control and Automation, Mediterranean*, 2006 : 1-6.

- [10] DESHPANDE A, GUESTRN C, HONG W, *et al.*. Exploiting correlated attributes in acquisitional query processing [C]. *Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering (ICDE)*. Washington: *IEEE Computer Society*, 2005: 143-154.

作者简介:



王 彬(1988—),男,江西宜春人,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光电测量及图像处理等方面的研究。E-mail: pcql@mail.ustc.edu.cn



魏仲慧(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1982年于吉林大学获得学士学位,主要从事图像处理、图像存储等方面的研究。E-mail: wzhlv@sohu.com



何 昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1991年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)