

文章编号:1004-4213(2010)02-0320-5

一种基于特征点间线段倾角的姿态测量方法*

赵汝进^{1,2}, 张启衡¹, 徐智勇¹, 徐勇^{1,2}, 左颢睿^{1,2}, 吴明军^{1,2}

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:基于目标特征点间线段倾角信息,提出了一种适合于目标远距离成像和相机内参未知条件下解算目标姿态的目标 3 维姿态测量方法.采用仿真图像对该方法的正确性进行了验证.实验结果:姿态测量误差绝对值均值小于 0.6°,且目标成像尺寸为 350 pixel 时,姿态测量误差绝对值小于 0.5°.实验表明该算法具有较高解算准确度和较强的收敛性.

关键词:三维姿态;单目视觉;特征点;姿态估计问题

中图分类号: TP39

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0320

0 引言

单目视觉测量技术具有结构简单,非接触等特点,因此广泛应用于视觉导航,航天器对接,目标跟踪等领域^[1-12].单目视觉测量目标姿态就是同时给定目标上 N 个点在目标坐标系下的 3 维坐标和对应点在图像坐标系下的 2 维坐标,利用这 N 个点对应关系求解目标坐标系和相机坐标系之间的相对旋转关系,这也被称为姿态估计(Perspective-N-Points, PNP)问题. PNP 问题于 1981 年由 Fishler 等人首次提出^[5],由于其在目标姿态解算方面的重要应用价值,引起人们广泛关注^[6-8,11].但 PNP 问题的研究往往都是在相机内部参量(焦距, CCD 像元尺寸等)已知的前提下进行的.实际成像系统中,相机内参量往往难以确知,文献[7]研究了相机内参量未知条件下 PNP 问题.针对远距离成像目标,Thomas S. Huang 从纯几何角度证明了弱透视成像模型下目标空间姿态的唯一性^[8].文献[9-10]研究了在相机内参未知条件下,利用轴对称体目标(如火箭)长宽比等几何先验特征测量远距离成像目标空间姿态角.

针对远距离成像的非轴对称体目标(如飞机),本文提出基于特征点间线段倾角信息的目标 3 维姿态迭代解算方法.该方法适用于相机内参未知条件下求

解目标姿态.仿真实验结果表明了算法的正确性.

1 坐标系及目标姿态角定义

首先建立相应的相机坐标系 $o_c x_c y_c z_c$,如图 1,

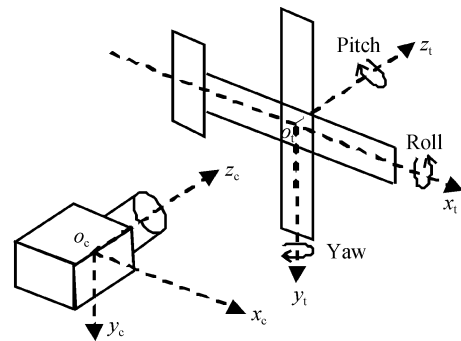


图 1 目标坐标系、相机坐标系及姿态角定义

Fig. 1 The object reference frame, camera reference frame and the definition of attitude angles

o_c 为相机光心, $o_c x_c$ 轴指向相机右方, $o_c y_c$ 轴与 $o_c x_c$ 轴垂直向下, $o_c z_c$ 轴与 $o_c x_c y_c$ 垂直, $o_c z_c$ 轴为相机主光轴方向, $o_c x_c y_c z_c$ 满足右手螺旋定理.以目标中心 o_t 为原点固联目标坐标系 $o_t x_t y_t z_t$, $o_t x_t$ 指向机身前方, $o_t y_t$ 与 $o_t x_t$ 垂直并指向机身下方, $o_t z_t$ 与 $o_t x_t y_t$ 垂直.目标依次绕 $o_t z_t$, $o_t y_t$, $o_t x_t$ 轴旋转,顺时针为正,分别定义为俯仰(pitch),偏航(yaw),翻滚(roll).则 $\theta = (\text{pitch}, \text{yaw}, \text{roll})$ 为目标姿态角变量, $R(\theta)$ 为目标旋转矩阵.

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} r_1^T \\ r_2^T \\ r_3^T \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c(y)c(p) & -c(y)s(p) & s(y) \\ s(r)s(y)+c(r)s(p) & -s(r)s(y)s(p)+c(r)c(p) & -s(r)c(y) \\ -c(r)s(y)c(p)+s(r)s(p) & c(r)s(y)s(p)+s(r)c(p) & c(r)c(y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $-p, y, r$ 分别对应 pitch, yaw, roll, c, s 表示 \cos, \sin .

*国家高技术研究发展计划高新技术预研课题(2003AA823050)资助

Tel: 028-85100510

Email: zrzj0515@163.com

收稿日期: 2008-08-10

修回日期: 2008-10-08

2 姿态测量

已知目标特征点 p_i 在目标坐标系 $o_t x_t y_t z_t$ 下坐标为 $C_i^{\text{ob}} = (x_i, y_i, z_i)^T$, 其中 $i=1, 2 \cdots n, n \geq 3$. 点 p_i 在相机坐标系 $o_c x_c y_c z_c$ 下坐标为 $C_i^{\text{cm}} = (x'_i, y'_i, z'_i)^T$, C_i^{ob} 和 C_i^{cm} 变换关系为

$$C_i^{\text{cm}} = R(\theta)C_i^{\text{ob}} + T \quad (2)$$

式中 $T = (t_1, t_2, t_3)^T$ 为目标平移向量. 相机内参包括焦距 f , CCD 象元尺寸 d , 图像中心坐标 (u_0, v_0) . 则 p_i 投影到像面坐标为

$$u_i = \frac{f}{d} \frac{r_1^T C_i^{\text{ob}} + t_1}{r_3^T C_i^{\text{ob}} + t_3} + u_0 \quad (3)$$

$$v_i = \frac{f}{d} \frac{r_2^T C_i^{\text{ob}} + t_2}{r_3^T C_i^{\text{ob}} + t_3} + v_0 \quad (4)$$

式(3)、(4)为经典摄影测量理论中的像面共线性方程. 为求解目标平移向 T 和姿态 θ , 并使像面特征点坐标共线性误差平方和最小, 通常构造最优化目标函数.

$$(\theta, T) = \operatorname{argmin} \| f(\theta, T) \|^2 = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n [(\tilde{u}_i - u_i)^2 + (\tilde{v}_i - v_i)^2] \quad (5)$$

式中 $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$ 为 p_i 像面坐标的观测值. 显然式(3)(4)在相机内参未知时, 无法求解 (u_i, v_i) , 导致式(5)无法求解目标姿态. 为在相机内参未知条件下依然能求解目标姿态 θ , 必须构造出新的目标函数. 设 p_i 和 p_j 的像面特征点之间线段的倾角为 k_{ij} .

$$k_{ij} = \arctan \left(\frac{v_i - v_j}{u_i - u_j} \right) \quad (i, j = 1, 2 \cdots n, n \geq 3, i < j) \quad (6)$$

将式(3)、(4)代入(6)

$$k_{ij} = \arctan \left\{ \frac{[(r_2^T C_i^{\text{ob}} + t_2)(r_3^T C_j^{\text{ob}} + t_3) - (r_2^T C_j^{\text{ob}} + t_2)(r_3^T C_i^{\text{ob}} + t_3)] / [(r_1^T C_i^{\text{ob}} + t_1) \cdot (r_3^T C_j^{\text{ob}} + t_3) - (r_1^T C_j^{\text{ob}} + t_1)(r_3^T C_i^{\text{ob}} + t_3)]}{(r_2^T C_i^{\text{ob}} + t_2)(r_3^T C_j^{\text{ob}} + t_3) - (r_2^T C_j^{\text{ob}} + t_2)(r_3^T C_i^{\text{ob}} + t_3)} \right\} \quad (7)$$

对于空间目标远距离小视场成像, 物距一般在几公里左右, 远大于目标自身尺寸, 满足近似弱透视成像条件[8-10], 即有关系

$$t_3 \gg r_3^T C_i^{\text{ob}}, t_3 \gg r_3^T C_j^{\text{ob}} \quad (8)$$

所以

$$t_3 + r_3^T C_i^{\text{ob}} \approx t_3, t_3 + r_3^T C_j^{\text{ob}} \approx t_3 \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 则有

$$k_{ij} \approx \arctan \left[\frac{r_2^T (C_i^{\text{ob}} - C_j^{\text{ob}})}{r_1^T (C_i^{\text{ob}} - C_j^{\text{ob}})} \right] \quad (10)$$

构造最优化目标函数, 使像面投影点之间线段的倾角观测值 \tilde{k}_{ij} 与测量值 k_{ij} 误差平方和最小.

$$\theta = \operatorname{argmin} |f(\theta)|^2 = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\tilde{k}_{ij} - k_{ij}]^2 \quad (11)$$

利用 Gauss-Newton 迭代法求解上述非线性优化问题, 取 $f(\theta)$ 在当前第 m 次迭代解 $\theta^{(m)}$ 附近的一

阶 Taylor 展开式, 则

$$\min \| f(\theta^{(m)} + \Delta\theta^{(m)}) \|^2 \approx \min \| f(\theta^{(m)}) + J(\theta^{(m)})\Delta\theta^{(m)} \|^2 \quad (12)$$

式中雅可比矩阵

$$J(\theta^{(m)}) = \frac{\partial f(\theta^{(m)})}{\partial \theta^{(m)}} \quad (13)$$

法方程为

$$-J(\theta^{(m)})^T f(\theta^{(m)}) = J(\theta^{(m)})^T J(\theta^{(m)}) \Delta\theta^{(m)} \quad (14)$$

则 θ 迭代求解过程为:

1) 提取特征点像面坐标, 由式(6)得到 \tilde{k}_{ij} . 设置迭代初值 $\theta^{(0)}$ 和限差 $\Delta\theta_{\min}$.

2) 由式(1)计算 $R(\theta)$. 再由式(10)~(13)逐点计算 $k_{ij}, f(\theta), J(\theta)$.

3) 由式(14)解得第 m 次迭代改正数 $\Delta\theta^{(m)}$, 则 θ 第 $m+1$ 次迭代新解 $\theta^{(m+1)} = \theta^{(m)} + \Delta\theta^{(m)}$.

4) 若 $\Delta\theta$ 大于限差 $\Delta\theta_{\min}$, 返回 2)~3) 步继续迭代, 否则解算结束.

3 实验与讨论

为验证算法的有效性, 利用 Carnegie Mellon 大学开发的 3 维视景仿真软件 Alice 建立相机成像模型, 并生成 boeing707 模型在各种位姿下投影图像见图 2. boeing707 各特征点在目标坐标系下坐标如表 1.

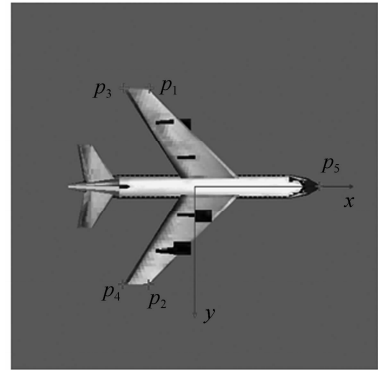


图 2 boeing707 特征点分布

Fig. 2 Feature points of boeing707

表 1 特征点在目标坐标系下坐标

Table 1 The coordinates of feature points expressed in an object-centered reference frame

Feature point	x/m	y/m	z/m
p_1	-4.880 8	-10.733 3	0
p_2	-4.880 8	10.733 3	0
p_3	-7.809 3	-10.733 3	0
p_4	-7.809 3	10.733 3	0
p_5	13.734 7	0	0

相机内参量设置: 相机视场角: $0.573^\circ \sim 2.276^\circ$, 图像尺寸: 512×512 (pixel). 目标尺寸: $27.43 \text{ m} \times 21.43 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 成像距离 $3 \sim 15 \text{ km}$. 设

定迭代限差 $\Delta\theta_{\min}=0.01^\circ$.

首先选定目标各个特征部位(机翼,机头),如图 3. 在选定窗口内提取机翼边缘,利用 Hough 变换检测边缘直线,如图 4(a)~(d)分别为机翼边缘符合直线特征的像素点,拟合直线相交得特征点 $p_1 \sim p_4$. 提取机头附近角点,如图 4(e),十字标示为机头部位的角点,取靠近窗口中心的角点为 p_5 特征点.



图 3 选定目标各特征部位
Fig. 3 Demarcate feature parts of target

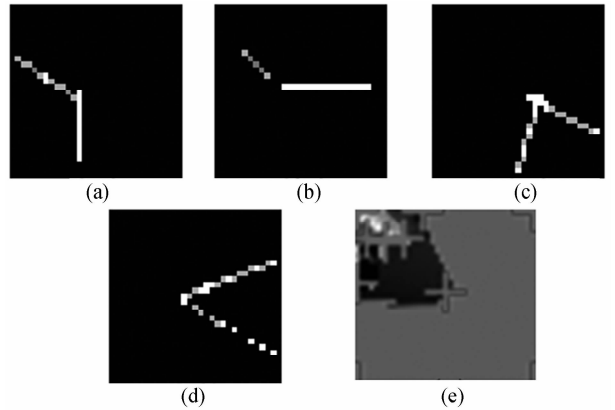


图 4 检测目标特征点
Fig. 4 Detect feature points of target

由于相机成像视场角很小,所以目标集中在主光轴附近成像. 而目标成像距离在公里量级,远大于目标尺寸,满足近似弱透视成像条件,适用于本文姿态解算方法. 如表 2,相机视场角固定为 0.573° 时,测量误差绝对值均值 $\bar{\theta}_{\text{error}}=(0.306\ 2^\circ, 0.489\ 4^\circ, 0.561\ 4^\circ)$,目标处于各种位姿,算法均可保持较高的姿态解算准确度. 然而姿态测量误

表 2 姿态测量结果

Table 2 The result of estimating attitude angle

Real pose $\theta/(^\circ)$	Object location T/m	Measure results $\hat{\theta}/(^\circ)$	Error $\theta_{\text{error}}/(^\circ)$
(30,30,30)	(0,10,4 000)	(29.830 8,31.046 8,30.005 7)	(-0.169 2,1.046 8,0.005 7)
(50,10,40)	(8,-12,5 000)	(50.027 8,9.937 3,38.322 5)	(0.027 8,-0.062 7,-1.677 5)
(30,-40,50)	(-10,20,6 000)	(30.783 2,-40.701 5,49.997 0)	(0.783 2,-0.701 5,0.003 0)
(10,40,20)	(-10,-10,5 000)	(10.090 7,39.316 9,19.648 7)	(0.090 7,-0.283 1,-0.351 3)
(-20,-30,20)	(0,0,3 000)	(-20.460 0,-30.353 0,19.230 6)	(-0.460 0,-0.353 0,-0.769 4)

差除了和目标本身位姿有关,还和目标在图像中成像尺寸有直接关联.

固定相机视场角 0.573° ,目标姿态 $\theta=(30^\circ, 30^\circ, 30^\circ)$,调整目标成像距离由远到近变化,使目标成像尺寸在 50~350 pixel 范围内变化. 如图 5,利用目标翼展成像宽度来表示目标成像尺寸. 随着成像尺寸增大,姿态测量误差绝对值随之变小,最终目标成像 350 pixel 时, $|\theta_{\text{error}}|=(0.191\ 0^\circ, 0.140\ 4^\circ, 0.403\ 6^\circ)$. 这主要得益于目标成像尺寸越大, Hough 变换检测获得直线特征的边缘像素点越多,

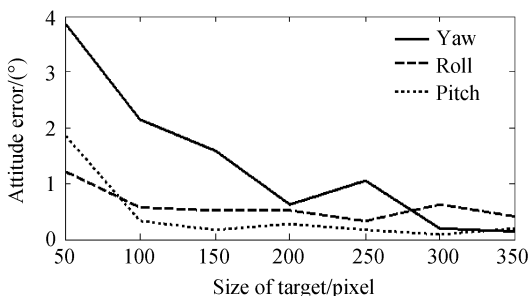


图 5 姿态测量误差和目标成像尺寸关系
Fig. 5 The relation between error of attitude angles and the size of object in image

所以参与直线拟合的像素也越多,拟合出直线也更加准确,从而直线相交获得特征点坐标准确度更高. 另一方面,目标成像尺寸越大,坐标量化误差对角点检测准确度影响也会更小. 所以成像尺寸越大,提取特征点坐标更加精确,使目标姿态测量结果也更加准确.

固定目标姿态 $\theta=(30^\circ, 30^\circ, 30^\circ)$ 和成像距离为 4 km,相机视场角与图像大小的比值决定了成像系统角分辨率,如图 6,调整相机视场角使角分辨率在 $4\sim 16$ ("/pixel)范围内变化. 对固定成像距离目标而

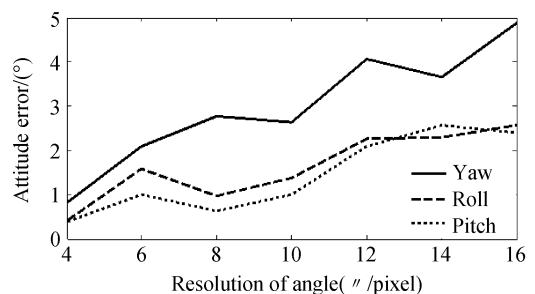


图 6 姿态测量误差和相机角分辨率关系
Fig. 6 The relation between error of attitude angles and the resolution of angle of camera

言,通过调整相机焦距提高相机角分辨率,使目标成像尺寸变大,达到提高姿态解算准确度的目的.调整过程中应配合目标景深范围来调整,使目标成像尺寸变大同时保持一定的清晰度,以保证特征点提取的准确性.图6中,角分辨率为 $4''/\text{pixel}$ 时,姿态解算误差可达到 1° 以内.

固定目标姿态 $\theta=(30^\circ, 30^\circ, 30^\circ)$,相机视场角 0.573° ,成像距离为3 km.设置不同的迭代初值进行姿态解算,如图7,横轴为选取的迭代初值偏离真实姿态大小,纵轴表示在各迭代初值下改正数 $\Delta\theta$ 收敛到小于限差 0.01° 所需迭代次数.随着迭代初值偏离真实姿态误差越大,所需迭代次数越多.当初值偏离量大于 20° 时,结果有可能不收敛或者收敛到错误姿态,这和文献[5]结论是一致的.利用线性方法可在较少特征点下估算出姿态近似值^[11],虽然准确度有限,但满足误差小于 20° 的条件,所以将它作为迭代初值能够保证算法的收敛性.如图8,初值设为 $\theta^{(0)}=(10^\circ, 10^\circ, 10^\circ)$ 时,共需迭代6次,而随着迭代次数增加,姿态误差 $|\theta_{\text{error}}|$ 也随之迅速减小.当经过仅4次迭代后, $|\theta_{\text{error}}|$ 已经小于 1° .说明姿态解算过程具有较快的收敛速度.

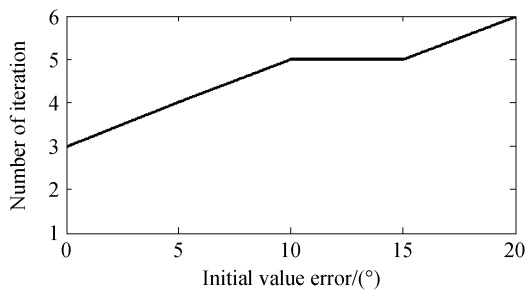


图7 迭代次数和迭代初值误差关系

Fig. 7 The relation between the number of iteration and initial value error

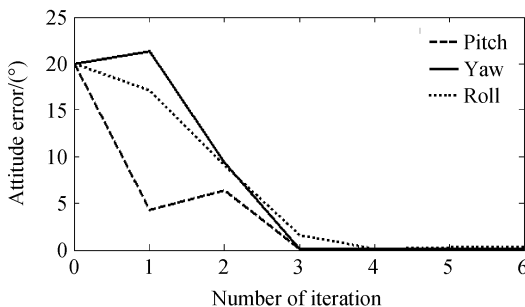


图8 经过 n 次迭代后的姿态误差

Fig. 8 The error of attitude angle after n times iteration

目标姿态变化过程中,当某些特征点被遮挡时,只要能跟踪或提取特征点数目大于或等于3,按式(6)依然可进行姿态的解算.当目标姿态变化过程中大多数特征点坐标都无法获取时,导致提取特征点数目小于3时,此时应判定姿态无法测量.随着姿态的继续变化,当目标特征点重新出现在图像中时,利

用识别方法,识别出目标机翼等特征部位并提取特征点,即可重新开始对目标姿态进行测量.

4 结论

研究了一种基于目标特征点间倾角角度信息的目标3维姿态迭代解算方法,该方法适用于远距离成像目标和相机内参量未知条件下目标姿态求解.采用Alice生成的图像对方法正确性进行了验证.实验结果:目标成像尺寸为350 pixel时,姿态解算准确度优于 0.5° ;初值设置在偏离真值 20° 范围内能保证算法的收敛.结果表明本文方法具有较高解算准确度和较强的收敛性.

姿态解算准确度主要还取决于前期目标边缘提取,直线检测以及角点提取的准确度.因此在将来实际应用中,还应注意选取适当方法,确保提取到准确的特征点坐标,提高目标姿态解算准确度.

参考文献

- [1] TANG Zi-li, MA Cai-wen, LIU Bo, *et al.* A approach of determination of object's 3D pose from mono-view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1480-1485.
唐自力, 马彩文, 刘波, 等. 单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12):1480-1485.
- [2] PENG Xiao-dong, ZHOU Si-zhong, LIU Bo, *et al.* Application of ellipse of inertia in measuring the object's 3D[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3):568-573.
彭晓东, 周泗忠, 刘波, 等. 惯量椭圆法在单站光测目标三维姿态测量中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3):568-573.
- [3] WANG Feng, CAO Jian-zhong, ZHOU Ren-kui. Image processing method used in flying object's pose measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1780-1783.
王锋, 曹剑中, 周仁魁. 飞行目标姿态测量中的图像处理[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11):1780-1783.
- [4] LU Jun-yun, LI Qing-hui, JIANG Hua. Measure method of the attitude of UAV based on the optical image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1):102-105.
陆钧韵, 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.
- [5] 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.
- [6] ZHANG X. Pose estimation using L_∞ [C]. *Proceeding of Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, 2005.
- [7] WU Fu-chao, HU Zhan-yi. A note on the P5P problem with an uncalibrated camera[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, **24**(11):1321-1326.
吴福朝, 胡占义. 摄像机未标定的P5P问题研究[J]. *计算机学报*, 2001, **24**(11):1321-1326.
- [8] HUANG T S, BRUCKSTEIN A M, HOLT R J, *et al.* Uniqueness of 3D pose under weak perspective: a geometrical proof [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence*, 1995, **17**(12):1220-1221.
- [9] YU Qi-feng, SUN Xiang-yi, QIU Zhi-qiang. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1):77-79.
于其峰, 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):77-82.
- [10] YU Qi-feng, SUN Xiang-yi, CHEN Guo-jun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image [J]. *Journal of University of National 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]. *国防科技大学学报*, 2000, **22**(2):15~19.
- [11] DAVID P, DEMENTHON D F, DURAISWAMI R, *et al.* SoftPOSIT: Simultaneous Pose and Correspondence Determination [C]. Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part III. London, UK: Springer-Verlag, 2002, 2352:698-714.
- [12] MENG Qing-li, WANG Feng, ZHANG Zhi-min, *et al.* Error analysis of a method for measuring flying object's 3D pose [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):1172-1175.
孟庆利, 王锋, 张志敏, 等. 利用光测影像测量飞行目标姿态方法的误差分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):1172-1175.

A Method of Measuring Attitude Based on Inclined Angle of the Line Between Feature Points

ZHAO Ru-jin^{1,2}, ZHANG Qi-heng¹, XU Zhi-yong¹, XU Yong^{1,2}, ZUO Hao-rui^{1,2}, WU Ming-jun^{1,2}

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method of measuring 3D attitude of objects based on inclined angle of the lines between feature points is proposed, which is applicable to the condition that inter parameter is unknown and object is in a long distance. Synthetic images are applied to verify the correctness of the proposed method. As a result, the mean of absolute value of attitude error is less than 0.6° , and when the size of target are 350 pixels, the measuring error is less than 0.5° . The result shows that the proposed method is with highly correct and strongly convergent.

Key words: 3D attitude; Mono-vision; Feature point; PNP problem



ZHAO Ru-jin was born in 1982. He is pursuing the Ph. D. degree at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests focus on computer vision and 3D pose measurement.



ZHANG Qi-heng was born in 1950. He is a Professor and Ph. D. candidate Supervisor. His main research field focus on target detection and signal processing.