

doi: 10.3788/gzxb20144305.0512002

# 基于弱透视成像模型的目标三维姿态测量

赵汝进<sup>1</sup>, 刘恩海<sup>1</sup>, 张文明<sup>1</sup>, 赵连军<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**为了准确获取空间目标跟踪、视觉导航等领域中目标的三维姿态,进行了目标三维姿态单目视觉测量方法研究.提取图像目标的典型特征点构造出直角三角形,并通过其边长比例先验信息以及弱透视成像模型推导出目标三维姿态的单目解算算法.与传统测姿方法相比,该算法在相机焦距等内参量未知条件下依然可解算姿态,增大了测姿应用范围;与传统迭代测姿方法相比,避免了循环迭代求解过程,无需设置迭代初值,提高了解算效率.数值仿真试验结果表明目标在离相机 1~3 km 成像时姿态测量误差低于 1.5°;实际图像序列测量结果表明目标俯仰角和偏航角测量结果拟合残差小于 1°,翻滚角拟合残差小于 2°.实验验证了算法的正确性和稳定性,表明该算法在内参量未知条件下能有效测量中远距离成像目标三维姿态.

**关键词:**弱透视;特征点检测;三维姿态;单目视觉

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0512002-6

## Measurement of 3D Pose of Objects Based on Weak Perspective Model

ZHAO Ru-jin<sup>1</sup>, LIU En-Hai<sup>1</sup>, ZHANG Wen-Ming<sup>1</sup>, ZHAO Lian-jun<sup>1,2</sup>

(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:** In the fields of tracking target and navigation based on vision, to measure the 3D pose of rigid objects besides the special location, the research of measuring the 3D pose of the object based on mono-view was performed. An algorithm of measuring 3D pose was proposed from the weak perspective model and the information of right-angled triangle formed by characteristic points of object that was the ratio of side-length. The algorithm was applicable under the condition that the interior parameters were unknown and it avoided iteration. The result of mathematical simulating experiment shows that the error of the 3D pose angles are less than 1.5° when the distance from object to camera is in the range of 1~3 km. The result of actual images shows that the remnants difference between the raw results and smooth results of pitch and yaw are less than 1°, and of roll angle is less than 2°. The experiment proves the correctness and stability of the proposed algorithm, which shows that the 3D pose of object can be measured effectively in the proposed algorithm, which can be perfectly applied to the objects with long distance and small visual angle.

**Key words:** Weak perspective; Feature point detection; 3D pose; Mono-view

**OCIS Codes:** 120.1680; 150.1135; 100.4999; 110.2970

## 0 引言

空间目标三维姿态是反映目标运动状态的重要参量.而单目视觉位姿测量技术具有结构简单、非接触等特点,因此广泛应用于航天器对接、机器人导航、视觉跟踪等领域<sup>[1~9]</sup>.

基于单目视觉姿态测量系统中,同时给定目标  $N$  个特征点在目标坐标系下的三维坐标和对应点在图像坐标系下的二维坐标,利用这  $N$  个对应点求解目标坐标系和相机坐标系之间的相对旋转关系,称为多点透视(Perspective- $N$ -Points, PNP)问题. PNP 问题于 1981 年由 Fishler 等人首次提出<sup>[10]</sup>,其在目标姿态解

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2014CB744200)资助

第一作者:赵汝进(1982-),男,副研究员,博士,主要研究方向为空间目标视觉位姿测量、跟踪识别、图像处理. Email: zrzj0515@163.com

收稿日期:2013-07-19;录用日期:2013-11-18

<http://www.photon.ac.cn>

算方面有重要应用价值<sup>[11-18]</sup>. 但 PNP 问题的研究往往都是在相机内参量(焦距, CCD 像元尺寸)已知的前提下进行的, 而对于相机内参量未知的 PNP 问题的研究报道较少<sup>[11]</sup>. 实际成像系统中, 相机内参量往往是不确知的. 而 PNP 通常采用迭代求解算法, 包括 Gauss-Newton(GN)法<sup>[12]</sup> 和 Levenberg-Marquardt(LM)法<sup>[13]</sup> 等, 迭代初值的设置对结果的收敛性及准确度影响很大<sup>[14-15]</sup>, 这也限制了 PNP 研究的适用性. T. D. Alter 和 Radu Horaud 分别对弱透视成像模型下目标位姿问题做了讨论<sup>[16-17]</sup>, 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<sup>[18]</sup>, 却没有给出几何上求解姿态的方法. 于起峰<sup>[6]</sup> 利用长宽比等目标几何先验特征测量平行透视或弱透视成像下的圆柱体目标姿态, 该方法在相机内参量未知条件下同样适用, 并且避免了迭代求解过程, 然而对于飞机、卫星等非轴对称目标并不适用.

基于文献[6], 本文在弱透视成像模型下, 利用飞行器目标特征点确定的直角三角形边长比例先验特征, 从几何角度求解内参量未知情况下飞行器等类三角形非轴对称目标空间的三维姿态, 并利用数学仿真实验和实际图像序列来验证算法的有效性.

### 1 坐标系及目标姿态角定义

相机坐标系  $o_c x_c y_c z_c$ , 见图 1.  $o_c$  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. 在目标上固联目标坐标系  $o_t x_t y_t z_t$ ,  $o_t$  为目标主轴和机翼两特征点连线的交点,  $o_t x_t$  指向机身前方为机身主轴,  $o_t y_t$  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, 和机翼两特征点连线重合, 并指向机身右方. 采用以  $o_t z_t$  轴为主轴的转角系统, 旋转轴顺序  $z_t - y_t - x_t$ , 顺时针为正, 分别定义为俯仰(pitch), 偏航(yaw), 翻滚(roll).

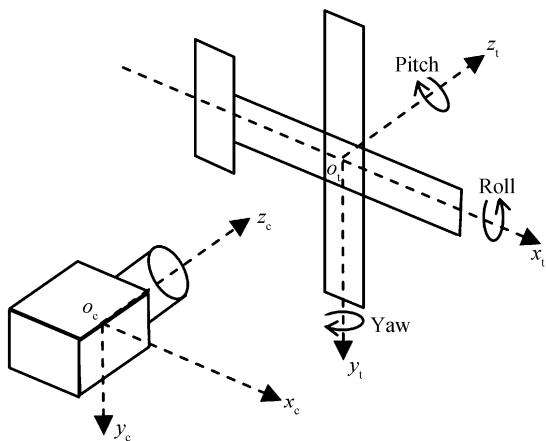


图 1 目标坐标系、相机坐标系及姿态角  
Fig. 1 The object reference frame, camera reference frame and the attitude angles

### 2 目标特征点选取

选取目标特征点如图 2, 设定机翼的中轴线和各机翼边缘的交点 A、B, 目标机头顶点 C 为目标特征点. 若机翼前后边缘不平行(三角形或梯形), 可设定各机翼前后两边缘延长线相交的虚点为特征点. 特征点检测可利用角点提取和 Hough 直线提取等方法.

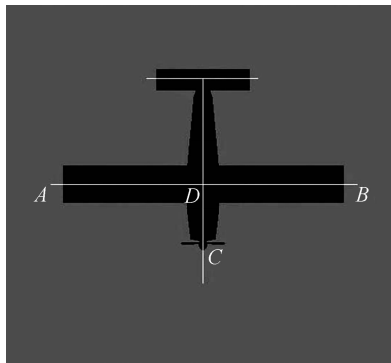


图 2 目标机身特征点的选取  
Fig. 2 The selection of feature points of object  
A、B 为机翼特征点, 易得线段 AB 中点 D. 设 D 为

目标坐标系原点, 目标主轴方向  $\vec{DC}$ .  $\Delta(ADC)$  为直角三角形, 其边长比值  $p = |AD| / |DC|$ ,  $p$  提供目标姿态测量所需的先验几何信息.

### 3 姿态解算

对于透视成像, Fischler 和 Bolles 曾指出: 当目标尺寸远小于成像物距时, 透视投影成像关系可以用弱透视成像模型近似描述, 而弱透视投影也就是经过比例缩放的正射投影. 对于远距离探测空间目标, 成像物距一般可达数公里, 远大于目标自身尺寸. 基于弱透视成像模型, 利用机身特征点从几何角度推导目标投影变换关系, 提出在焦距等内参量未知情况下单目视觉目标姿态解算方法.

根据  $z_t - y_t - x_t$  转角顺序, 设姿态角向量为  $A = (\varphi \ \omega \ \kappa)$ , 分别对应俯仰, 偏航, 翻滚. 当  $A = (0 \ 0 \ 0)$  时, 由目标特征点确定的  $\Delta(ADC)$  在假想成像平面  $oxy$  正投影如图 3.

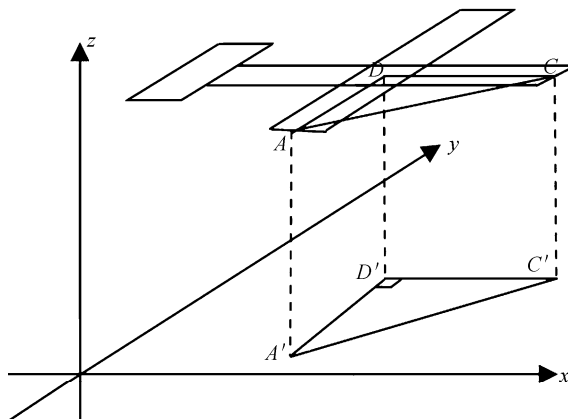


图 3 目标姿态角为(0,0,0)时  $\Delta(ADC)$  在假想平面正投影  
Fig. 3 The triangle  $\Delta(ADC)$  is projected orthographically in supposed plane when the object attitude angle is (0,0,0)

如图4,假想平面  $oxy$  和  $o_c x_c y_c$  平行,根据弱透视投影变换原理,目标依次经过俯仰、偏航、翻滚变换后,目标主轴  $DC$  在  $oxy$  的投影为  $D'C'$ ,  $D'C'$  与  $ox$  轴所成夹角为俯仰角  $\varphi$ .

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y_{C'} - y_{D'}}{x_{C'} - x_{D'}}\right) \quad (1)$$

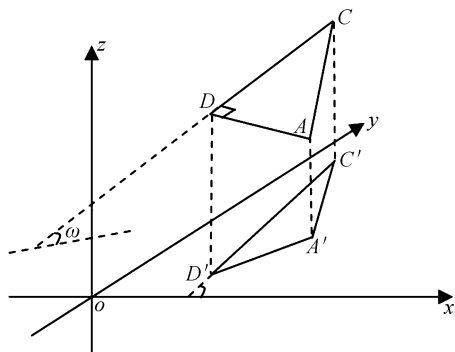


图4 目标经姿态变换后,  $\Delta(ADC)$  在假想平面投影

Fig. 4 The triangle  $\Delta(ADC)$  is projected orthographically in supposed plane after the transformation of pose

其中  $(x_{C'}, y_{C'})$ ,  $(x_{D'}, y_{D'})$  表示  $C$  和  $D$  的图像坐标.  $DC$  与  $oxy$  面所成夹角为偏航角  $\omega$ . 目标主轴  $DC$  长为  $L$ , 投影长度为  $L'$ , 这里利用的是目标主轴的实际长度  $L$ . 需要注意的是, 实际成像过程中存在投影缩放系数问题, 这个缩放系数可以由  $AD$  实际长度和翻滚前  $AD$  成像长度的比值确定. 设  $AD$  实际长度为  $H$ , 翻滚前  $AD$  成像长度为  $H'_1$ , 则缩放系数为  $H/H'_1$ .

$$\omega = \arccos(L'/L) = \arccos\left(\frac{H \cdot L'_1}{L \cdot H'_1}\right) \quad (2)$$

$H/L = p = |AD|/|DC|$  为已知的目标特征信息,  $L'_1$  为  $DC$  成像长度.

目标经过俯仰, 偏航变换后, 在  $DC$  的法平面内, 作出绕  $DC$  轴翻滚的旋转圆. 如图5,  $A_1D$  为目标翻滚前  $AD$  边所在直线,  $\angle ADA_1$  即为目标绕  $DC$  的翻滚角  $\kappa$ . 假想平面过  $D$  点且与  $o_c x_c y_c$  平行,  $C'$ 、 $A'$  分别为  $C$ 、 $A$  在假想平面的投影点.

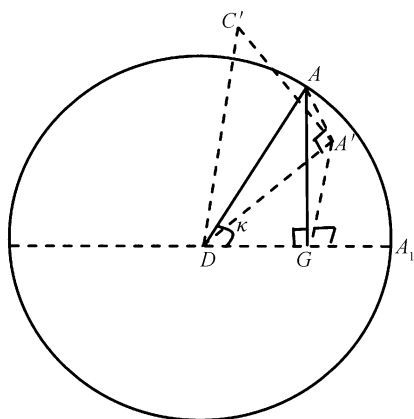


图5 目标翻滚角示意

Fig. 5 The sketch map of object rolling angle

图5中  $AA'$  垂直于投影平面,  $\angle AGA'$  为偏航角的余角, 即  $\angle AGA' = 90^\circ - \omega$ . 考虑投影缩放系数, 由几何关系可得翻滚前  $AD$  成像长度  $H'_1$ ,

$$H'_1 = \sqrt{(H'_k \cdot \sin(\theta))^2 + \left(\frac{H'_k \cdot \cos(\theta)}{\sin(\omega)}\right)^2} \quad (3)$$

式中  $\angle C'DA' = \angle GA'D = \theta$ ,  $H'_k$  为翻滚后  $AD$  成像长度. 而翻滚角为

$$\kappa = \arctan\left(\frac{\cot(\theta)}{\sin(\omega)}\right) \quad (4)$$

$(x_{A'}, y_{A'})$ ,  $(x_{D'}, y_{D'})$ ,  $(x_{C'}, y_{C'})$  分别表示  $A$ ,  $D$ ,  $C$  图像坐标, 则

$$H'_k = \sqrt{(x_{A'} - x_{D'})^2 + (y_{A'} - y_{D'})^2} \quad (5)$$

$$L'_1 = \sqrt{(x_{C'} - x_{D'})^2 + (y_{C'} - y_{D'})^2} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_{C'} - y_{D'}}{x_{C'} - x_{D'}}\right) - \arctan\left(\frac{y_{A'} - y_{D'}}{x_{A'} - x_{D'}}\right) \quad (7)$$

根据式(1)可解算得目标主轴成像  $D'C'$  与  $x$  轴夹角即为  $\varphi$ , 式(2)~(4)可解算  $\omega, \kappa, p$  为已知的目标几何特征信息, 而  $L'_1, H'_k, \theta$  可根据特征点图像坐标由式(5)~(7)计算获得. 本节几何推导过程完全基于弱透视成像模型且在相机焦距等内参量未知情况下开展.

## 4 实验与讨论

为验证算法的有效性, 利用 Matlab 建立相机成像数学模型, 对算法进行数值仿真实验与实际场景成像验证试验.

目标特征点在目标坐标系内的坐标如表1,  $D$  为  $AB$  中点, 即  $SD = (0, 0, 0)$ . 显然目标特征信息  $p$  为1.

表1 目标坐标系下特征点坐标

Table 1 Coordinates of characteristic points under object reference frame

Characteristic points	$x/m$	$y/m$	$z/m$
$S_A$	0	10	0
$S_B$	0	-10	0
$S_C$	10	0	0

目标成像位置坐标为  $(T_x \ T_y \ T_z)$ ,  $T_x$  和  $T_y$  表示目标偏离相机光轴的水平距离和垂直距离.  $T_z$  表示目标离相机光心距离,  $T_z$  远大于相机焦距时符合弱透视成像模型. 针对每个成像位置, 按均匀分布随机产生1000个姿态角向量. 根据目标成像位置坐标和姿态角向量建立的相机成像数学模型, 对表中特征点进行投影变换, 计算得到特征点图像坐标: 相机焦距为1000 mm; 象元尺寸为  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ . 对特征点图像坐标加入均值为0, 均方差为  $\sigma$  的高斯随机噪声.

将本文方法与GN测姿法进行对比, 值得注意的是GN法是基于透视成像模型迭代求解姿态, 且利用3点特征点解算姿态必需已知相机内参量. 而在目标距离远大于相机焦距时, 利用弱透视成像模型进行姿态解算无须已知焦距等相机内参量且避免了迭代.

假设  $\sigma=0.1$ ,  $T_x$  和  $T_y$  为 0, 目标在主光轴上移动, 采用 GN 法和弱透视法分别解算出每个成像位置下姿态误差的均值. 图 6 中, 横坐标表示目标离相机距离  $T_z$  与目标自身尺寸(实验中设为 10 m)的比值  $KC$ .  $KC$  越大, 一方面特征点量化误差对姿态测量准确度影响会增大导致姿态测量误差越大; 另一方面采用 GN 法在迭代过程中也会使投影变换矩阵的误差累积增大<sup>[12]</sup>. 所以随着  $KC$  在 100~300 范围内以 10 为步长增大, 两种方法姿态测量误差值也都逐渐增大. 目标在距离相机 1~3 km 成像, 弱透视方法测姿误差均小于 1.5°.

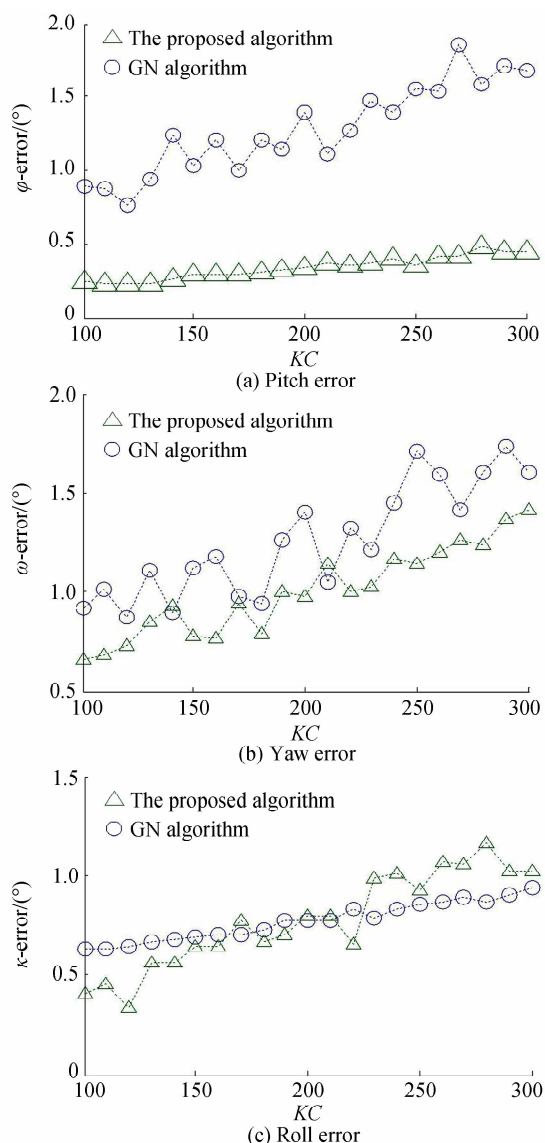


图 6 姿态角误差和目标离相机距离的关系

Fig. 6 The relation between error of attitude angles and distance from object to camera

同理在  $\sigma=0.1$  时, 设定目标  $T_z$  为 1 000 m, 首先固定  $T_x$  为 0,  $T_y$  在 0~10 m 范围内变化, 然后固定  $T_y$  为 0,  $T_x$  在 0~10 m 范围内变化, 采用 GN 迭代法和弱透视方法分别解算出两种情况姿态误差的均值. 目标

越接近主光轴, 越符合弱透视变换模型. 图 7 中, 横轴表示目标离相机主光轴距离与目标尺寸的比值  $KA$ , 随着  $KA$  在 0~1 范围以 0.1 为步长增大, 弱透视方法姿态测量准确度并没有受到较大影响. 这主要得益于目标成像距离为 1 000 m, 远大于目标尺寸, 目标即使在偏离光轴附近成像, 也能较好地近似弱透视成像模型. 而且弱透视方法由于避免迭代法中的误差累积, 适用于远距离小视场成像系统中目标姿态的测量任务.

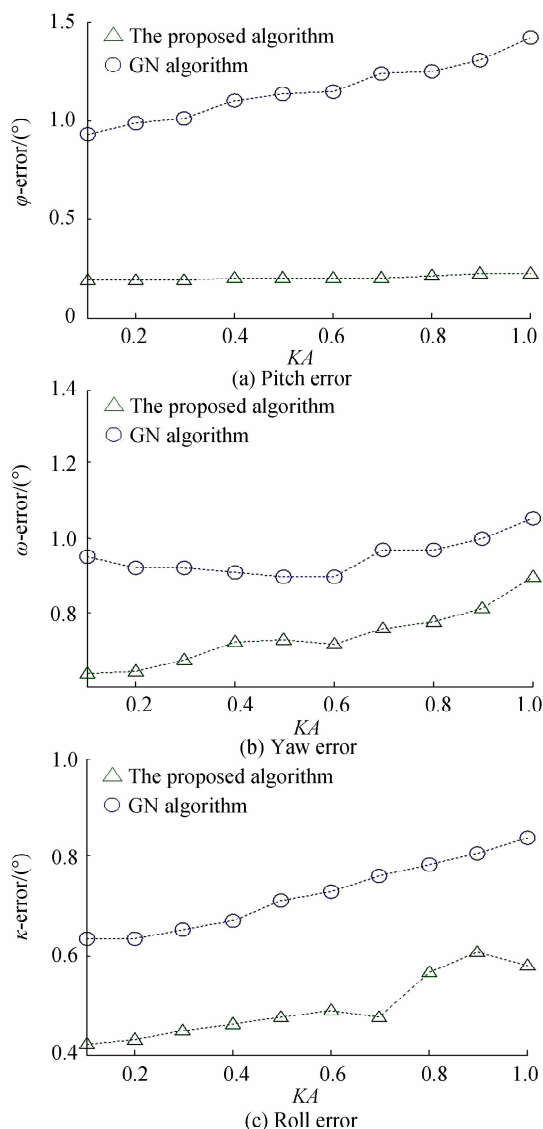


图 7 姿态角误差和目标离相机主轴距离的关系

Fig. 7 The relation between error of attitude angles and distance from object to optical axis of camera

设目标纵向与光心距离  $T_z$  为 1 000 m, 水平平移量  $T_x$  和垂直平移量  $T_y$  为 0, 针对此空间位置, 按均匀分布随机产生 1000 个姿态角向量, 根据目标空间位置和姿态角向量建立相机成像数学模型后, 对目标系下特征点进行投影成像变换, 仿真计算得到特征点图像坐标. 为验证在特征点提取过程中, 各种特征点噪声水平带来的特征点提取误差对位姿测量准确度的影响程

度,试验中对特征点坐标值加入均值为0,均方差为 $\sigma$ 的高斯随机噪声. $\sigma$ 的不同量级反应了特征点提取的准确度, $\sigma$ 越大,表明特征点提取误差越大; $\sigma$ 越小,表明特征点提取误差越小.根据实际工程要求,试验设置 $\sigma$ 在0.1~0.5pixel范围内变化,针对不同特征点提取误差,验证了本文测姿方法的准确度.图8坐标横轴表示噪声均方差 $\sigma$ 在0.1~0.5pixel范围内以步长0.1变化,可知采用本文方法所得的俯仰、偏航、翻滚角测姿误差均小于 $0.6^\circ$ ,表现出良好的抗噪性能,且测姿准确度高于传统GN法.从特征点提取误差与测姿误差的关系可看出,俯仰角和偏航角受特征点提取误差影响较小, $\sigma$ 在0.1~0.5pixel范围内时,测姿准确度比较稳定;而翻滚角受特征点提取误差影响较大, $\sigma$ 在0.1~0.5pixel范围内时,偏航测姿误差起伏较大.

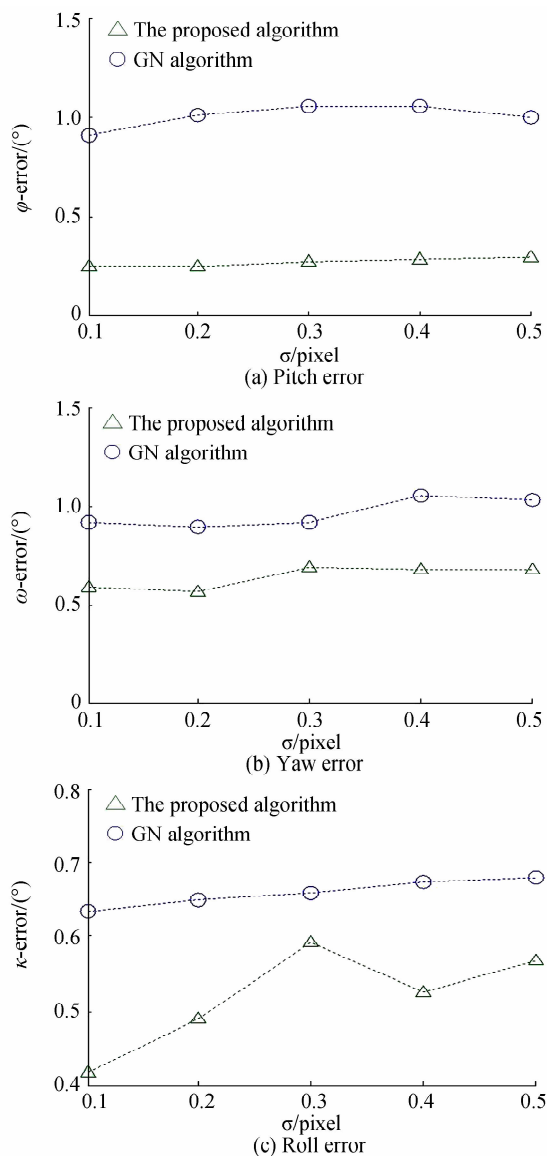


图8 姿态角误差和噪声均方差的关系

Fig. 8 The relation between error of attitude angles and  $\sigma$

为进一步验证算法的稳定性,利用实际采集飞行器图像序列进行姿态解算.图像序列共198帧,图像大小 $768(H) \times 576(V)$ pixel,目标特征信息 $p=1.2$ .目标距离1~3 km,满足弱透视成像条件.

姿态测量过程中图像目标特征点的精确提取一直是图像处理领域中一个难点问题,在验证试验针对飞行器机翼出现平行直线特征,设计了机翼特征点提取方法:1)首先在跟踪窗口内提取机翼边缘;2)HOUGH变换拟合边缘直线;3)利用平行直线特征,求出机翼中轴线;4)提取机翼中轴线与机翼外边缘交点即为特征点.

影响机翼特征点提取准确度的因素主要有两个方面:机翼边缘检测的准确性和HOUGH变换直线拟合的精确性.针对机翼边缘检测精确性问题,在今后的研究中可进一步考虑采用亚像素边缘检测方法提高检测精确性;而针对HOUGH变换直线拟合精确性问题,则可考虑加入RANSAC(随机样本一致性策略)去除奇异点,提高直线拟合的准确性.

图像目标跟踪波门为 $61 \times 61$ pixel,如图9(a).以各跟踪波门中心的 $121 \times 121$ pixel领域内检测机翼边缘平行直线,并提取机翼中轴线和边缘交点确定特征点图像坐标,如图9(b).

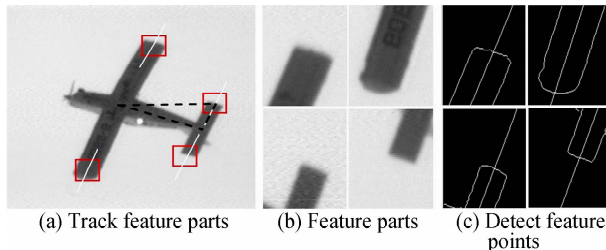
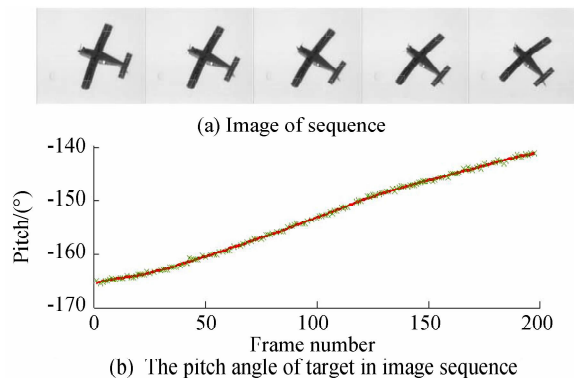


图9 目标特征部位跟踪与特征点检测

Fig. 9 Track feature parts and detect feature

由各机翼特征点中点易得机身中轴线上两点坐标,再结合机翼上特征点坐标,构成目标坐标系下直角三角形,如图9(a).再由已知的目标几何特征信息,即 $p=1.2$ ,解算姿态结果如图10.



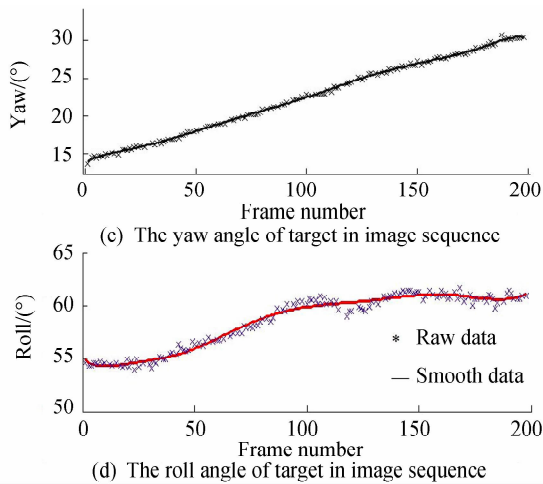


图 10 姿态测量结果及平滑后的结果

Fig. 10 The result of measuring 3D pose and the smooth data

图 10 中 \* 表示测量得到的姿态角原始数据, 由于目标姿态角不会在短时间段内发生剧烈变化, 所以对测量得到的姿态角进行高斯平滑滤波, 如图 10 中实线所示, 平滑滤波有助于消除图像噪音和帧间光照变化引起的姿态角测量随机误差. 而平滑后数据与原始数据的残差反映了姿态测量结果的平稳性. 实验结果中俯仰角和偏航角残差幅度在  $1^\circ$  以内, 翻滚角残差幅度在  $2^\circ$  以内, 可见目标俯仰角和偏航角测量结果比翻滚角更加平稳, 即在同样的随机噪音下, 翻滚角测量结果会产生更大的随机测量误差.

## 5 结论

利用弱透视成像模型, 根据特征点构成直角三角形的先验几何信息, 从几何解析角度提出目标三维姿态解算方法. 该方法克服了相机内部参量未知条件下难于求解姿态的问题, 且避免了迭代求解. 数学仿真表明弱透视姿态测量法适用于远距离小视场成像目标的姿态测量, 在距相机  $1\sim 3$  km 成像时姿态测量误差低于  $1.5^\circ$ . 在目标偏离主轴成像和噪音干扰的情况下, 该方法依然表现出良好的稳定性. 利用实际图像测量姿态结果表明俯仰角和偏航角残差幅度小于  $1^\circ$ , 翻滚角残差幅度小于  $2^\circ$ , 进一步验证了本文算法的稳定性.

### 参考文献

- [1] 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.  
陆钧响, 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.
- [2] 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.
- [3] DHOME M, RICHTIN M, LAPRESTE J T. Determination of the attitude of 3-D objects from a single perspective view [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(12): 1265-1278.
- [4] AI Li-li, YUAN Feng, DING Zheng-liang. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 161-165.  
艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 161-165.
- [5] 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.
- [6] ZHAO Ru-jin, ZHANG Qi-heng, ZUO Hao-rui, et al. A method of improving the measuring accuracy of the pose of targets based on outliers-removal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9):2463-2467.  
赵汝进, 张启衡, 左颢睿, 等. 基于去离群点策略提高目标位姿测量准确度[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9):2463-2467.
- [7] ZHAO Ru-jin, ZHANG Qi-heng, XU Zhi-yong, et al.. A method of measuring attitude based on inclined angle of the line between feature points [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2):320-324.  
赵汝进, 张启衡, 徐智勇, 等. 一种基于特征点间线段倾角的姿态测量方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2):320-324.
- [8] ZHAO Ru-jin, ZHANG Qi-heng, WU Ming-jun, et al. Pose estimation based on the constraints of inner angles and areas of triangles[C]. *SPIE*, 2009, 7384.
- [9] ZHAO Ru-jin, ZHANG Qi-heng, ZUO Hao-rui, et al. A mono-vision method of measuring pose based on line features[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(6):894-897.  
赵汝进, 张启衡, 左颢睿, 等. 一种基于直线特征的单目视觉位姿测量方法[J]. *光子学报*, 2010, **21**(6):894-897.
- [10] FISHLER MA, BOLLES RC. 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.
- [11] 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.
- [12] LOWE D G. Three-dimensional object recognition from single two-dimensional image [J]. *Artificial Intelligence*, 1987, **31**: 355-395.
- [13] WENG J, AHUJA N, HUANG T S. Optimal motion and structure estimation [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, **15**(9): 864-884.
- [14] LU C P, HAGER G D. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(6): 610-622.
- [15] ZHANG Zhi-yong, ZHANG Jin, ZHU Da-yong. A fast convergent pose estimation algorithm and experiments based on vision images [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(4):943-947.  
张志勇, 张靖, 朱大勇. 一种基于视觉成像的快速收敛的位姿测量算法及实验研究[J]. *航空学报*, 2007, **28**(4):943-947.
- [16] ALTER T D. 3D pose from 3 corresponding points under weak-perspective projection [J]. *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, **16**(8):802-808.
- [17] HORAUD R, CHRISTY S, DORNAIKA F. Object pose: the link between weak perspective, para perspective, and full perspective[R]. *INRIA*, September 1994.
- [18] 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.