

文章编号 1004-924X(2013)06-1635-07

# 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量

李 晶\*, 袁 峰, 胡英辉

(哈尔滨工业大学 电气工程与自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为了精确测量悬浮试验场内姿态快速变换的空间物体的姿态角参数,提出了一种采用 3 个线阵 CCD 相机同时测量多个点合作目标的姿态测量方法,以解决传统的线阵 CCD 姿态测量系统中相机位置间的约束条件过多造成的非线性系统误差及校准参数多的问题。该方法采用柱面透镜和线阵 CCD 组成的 3 个一维相机,对被测物体上的多个点合作目标同时进行测量;并针对测量原理对姿态角限制的问题,采用模拟计算的方法进行姿态角测量范围的计算。由神经网络校准线阵 CCD 相机,直接给出点合作目标的空间三维坐标,并通过建立基于 Rodrigues 参数姿态解算模型求解被测物体的姿态角。实验结果表明,本文方法得到的空间点位置测量精度及空间姿态解算精度高于原线阵 CCD 姿态测量方法,验证了该姿态测量方法进行姿态测量的可行性和有效性。

**关键词:**姿态测量;线阵 CCD;姿态解算;相机校准

**中图分类号:**V448.22 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1635

## Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target

LI Jing, YUAN Feng\*, HU Ying-hui

(College of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: hitlijing@163.com

**Abstract:** To measure accurately the attitude of a spatial object that was fast-changing in a suspension state, an attitude measurement method was proposed based on three linear CCD cameras for measuring multiple point cooperation targets. By proposed method, the nonlinear systemic errors and more calibration parameters caused by more overconstraints for camera positions were overcome in the traditional linear CCD attitude measurement. Three 1D cameras composed of linear CCDs and cylindrical lenses were used to measure simultaneously the multiple point cooperation targets on the measured object. Aiming at the restriction of measuring principle on the attitude angle, the simulated calculation method was used to calculate the attitude angle range and the BP neural network was taken to calibrate the CCD cameras and give the spatial 3D coordinates of point cooperation targets. Furthermore, an attitude calculation model based on Rodrigues parameters was established to solve the attitude angles of measured objects. Experimental results indicate that the measurement accuracy of spatial point

收稿日期:2013-01-28;修订日期:2013-02-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50275040)

position and the calculating precision of spatial attitude angle in this system are higher than those of traditional methods, which verifies that this attitude measurement method is feasible and available to measure the attitude.

**Key words:** attitude measurement; linear CCD; attitude calculation; camera calibration

## 1 引言

随着现代科学技术的日益发展,空间物体的姿态测量在工业、军事、航空、航天、航海等领域受到人们越来越多的重视,随之在这些领域中出现了不同的姿态测量方法。空间物体的姿态测量主要是对其俯仰角、滚动角、偏航角 3 个姿态角的测量<sup>[1]</sup>。在空间物体的外姿态测量方法中,光学测量姿态技术逐渐发展成熟,新的方法及设备不断涌现,其中线阵 CCD 图像传感器具有分辨力高、速度快、精度高的优点。因此,采用线阵 CCD 相机作为光测设备来测量空间物体的姿态已经受到研究人员的重视。由于被测物体是运动的,在进行运动测量时,采样速率高,处理的数据量较大,为了实现对被测物体姿态的实时测量,对系统的姿态解算速度有一定的要求;同时,由于存在镜头畸变等非线性系统误差,相机校准的精度也是整个测量系统中需要考虑的问题<sup>[2-5]</sup>。

在悬浮试验场内的空间物体的姿态测量中,被测物体与测量系统的相对速度较慢,而被测物体的姿态变换速度较快。目前采用的一般的外姿态测量方法中,遥测法<sup>[6]</sup>用于远距离姿态测量,精度量级为米;光学测量法中大多数方法使用了面阵 CCD 图像传感器<sup>[7-8]</sup>,但面阵 CCD 的分辨力低,不能满足本文姿态快速变换的姿态测量要求;线阵 CCD 加扫描的方法多适用于被测物体速度较快的情况;线阵 CCD 加扫描的方法<sup>[9]</sup>和文献<sup>[10]</sup>采用线阵 CCD 测量姿态的方法不能测量被测物体的滚动角。因此,上述方法都不适用于本文悬浮试验场内的姿态测量。本文针对悬浮试验场内姿态快速变换的姿态角参数的测量需求,在传统的线阵 CCD 外姿态测量系统的基础上,研究了更加适合这种动态测量的姿态测量方法,并解决了传统的线阵 CCD 姿态测量方法中 9 个线阵 CCD 导致相机间位置关系约束条件过多造成的非线性系统误差以及校准参数多的问题<sup>[11]</sup>。根据线阵 CCD 的特点,提出了一种基于多点合作目

标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量方法,在被测物体上安装点合作目标,由柱面透镜和线阵 CCD 组成的 3 个一维相机对其同时测量,得到点合作目标的像点坐标,由 BP 神经网络校准线阵 CCD 相机直接给出点合作目标对应的空间三维坐标,并通过建立基于 Rodrigues 参数和多点合作目标构成的线段间的相交矢量相结合的姿态解算模型求解被测物体的姿态角。

## 2 多线阵 CCD 外姿态测量系统

多线阵 CCD 姿态测量系统如图 1 所示。被测物体直径为 10~20 cm,长约 1 m,在空间内作小角度悬浮低速飞行,上面安装 3 个由点发光二极管制作的点合作目标 a, b, c。采用 3 个线阵 CCD 一维相机同时测量点合作目标 a、b、c 在线阵 CCD 上的像点坐标,3 个点合作目标同时点亮,并保证放置时 3 个点非共线。通过对线阵 CCD 的标定,即可直接恢复点合作目标的空间三维信息,然后根据所建立的姿态解算模型,即可计算出空间被测目标的姿态信息。一维相机由 3 个一维成像单元组成,一维成像单元由一个线阵 CCD 和一个柱面透镜组成,线阵 CCD 和柱面透镜中心线相互垂直且 CCD 位于透镜的焦平面上。

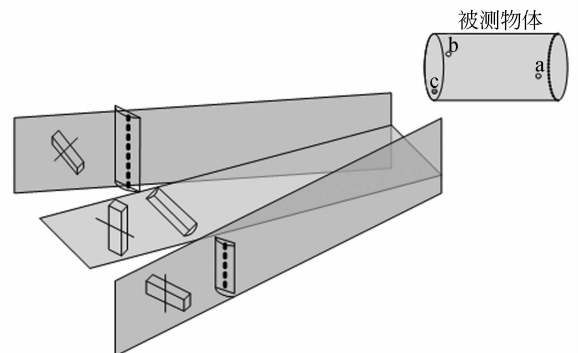


图 1 多线阵 CCD 组合姿态测量系统示意图

Fig. 1 Sketch map of multi-linear CCD exterior attitude measurement system

两侧的一维成像单元的柱面透镜垂直摆放,中间的水平摆放,两者光轴间的夹角小于  $90^\circ$ 。当被测目标绕空间一点转动时,为了获取被测目标的姿态信息,即空间目标的姿态角:偏航角  $\alpha$ 、滚动角  $\beta$  和俯仰角  $\gamma$ 。由于被测物体的运动角度为  $-10^\circ \sim +10^\circ$ ,因此被测物体在此测试范围内转动时,可以保证点合作目标在线阵 CCD 上像点位置顺序的一致性,并以此获取三线阵 CCD 不同点合作目标像点的对应关系。

传统的线阵 CCD 姿态测量系统如图 2 所示,因为 3 个线阵 CCD 构成的点目标三维坐标系不能同时区分 3 个点合作目标 a、b、c,因此每一个点合作目标采用 3 个线阵 CCD 对其进行测量,共有 9 个线阵 CCD。对于距离较近的两个点 b、c,为了尽可能减小光学系统产生的边缘效应,将点 b 和点 c 对应的 2 个点目标三维坐标系通过增加分光棱镜和滤光片,合并成为双点目标三维坐标系,增加滤光片的目的是排除发光二极管之间的干扰,使得每 3 个线阵 CCD 只测量一个点合作目标。

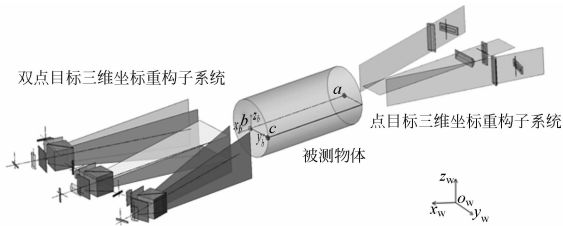


图 2 传统线阵 CCD 姿态测量系统示意图

Fig. 2 Sketch map of traditional linear CCD attitude measurement system

因为本文系统要同时测量 3 个标识点,为了保证空间的标识点和 CCD 像点的对应关系需要满足一个约束条件,即这 3 个标识点在每一个 CCD 上成像的顺序在成像过程中要保持不变。由于引入了这个约束条件,因此限制了被测物体姿态角的转动范围,为了确定转动被限制的范围是否满足测量要求,采用模拟计算的方法来进行姿态角测量范围的计算。

首先,由直接线性变换(DLT)方法求取系统中每个线阵 CCD 所对应的 DLT 系数  $L_{m1} \sim L_{m7}$ ,其中  $m=1,2,3$  为 3 个线阵 CCD 的标号<sup>[12]</sup>。然后确定被测物体和标识点的初始位置并通过标定系统获取当前标识点的空间坐标。对于一个已知

的旋转轴,标识点旋转角度  $\alpha$  后的空间坐标值可以通过计算获得。设旋转后标识点的空间坐标值为  $(X_n, Y_n, Z_n)$ ,其中  $n=1,2,3$  表示标识点标号,则对于每个单个的线阵 CCD,可以通过计算得到该标识点在 CCD 上的像坐标:

$$\mu_{nm} = \frac{L_{m1} X_n + L_{m2} Y_n + L_{m3} Z_n + L_{m4}}{L_{m5} X_n + L_{m6} Y_n + L_{m7} Z_n + 1}, \quad (1)$$

式中: $L_{m1} \sim L_{m7}$  为 DLT 方程的 7 个 L 系数。

如果转角  $\alpha$  的值很小,则连续转动并分别计算每次转动后的  $\mu_{nm}$  值,我们就可以模拟出物体连续转动时标识点在各 CCD 上的像点的移动情况。为了保证标识点在 CCD 上的像点位置顺序不变,需满足以下条件:

$$|\mu_{m1} - \mu_{m2}| > \epsilon, \quad (2)$$

式中: $m=1,2,3, n_1, n_2=1,2,3$ ,且  $n_1 \neq n_2$ ;  $\epsilon$  为判断阈值。

整个算法的流程如下:

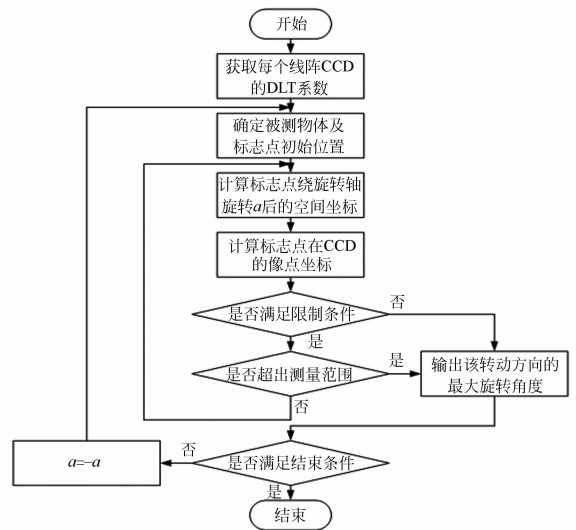


图 3 姿态角范围计算流程图

Fig. 3 Flow chart of attitude angle range calculation

### 3 相机校准和姿态解算

由于镜头畸变等非线性系统误差的存在,考虑到 BP 神经网络能够实现从输入到输出的任意非线性映射,根据 BP 神经网络算法的特点,如果已知一组标识点的空间坐标及其在线阵 CCD 中的图像坐标,那么将这组数据作为样本数据对神经网络进行训练,则充分利用了 BP 神经网络的非线性映射能力,只需要用已知的数据对网络进

行训练,通过学习网络就具有了这种映射能力<sup>[13-16]</sup>,无需建立复杂的数学模型,可以直接实现从图像坐标到世界坐标的映射。设 BP 神经网络算法的输入是一个样本集合:  $\{p_1, q_1\}, \{p_2, q_2\}, \dots, \{p_n, q_n\}$ , 这里  $p_n$  是 3 个线阵 CCD 相机测量一个标识点分别得到的 3 个像点坐标组成的向量,作为网络的输入。 $q_n$  是这个标识点的空间三维坐标,对应目标的输出。每输入一个样本数据,便将网络输出与目标输出相比较。经过样本数据训练好的神经网络,当重新输入点合作目标的像点坐标,可以由网络的输入直接给出点合作目标对应的空间三维坐标<sup>[17]</sup>。

由 Rodrigues 参数的定义为

$$\sigma_i = \frac{n_i \sin \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}} = n_i \tan \frac{\theta}{2}, \quad i=1, 2, 3, \quad (3)$$

其中:  $n = [n_1 \quad n_2 \quad n_3]^T$  为欧拉轴上的单位矢量,  $\theta$  为绕  $n$  的旋转角<sup>[18-19]</sup>。

经线阵 CCD 相机校准得到点合作目标的空间坐标后,由这些空间坐标进行姿态解算。设在测量空间中的参考坐标系为  $o_r-x_r y_r z_r$ , 目标本体坐标系为  $o_t-x_t y_t z_t$ , 目标绕定点旋转后的参考坐标系设为  $o_k-x_k y_k z_k$ , 假设有一虚拟点合作目标  $c'$  与点  $a, b, c$  在一个平面内,  $bc'$  与  $bc$  长度相等, 且  $bc'$  与  $ab$  垂直, 在目标坐标系内的位置关系如图 4 所示。3 个合作目标点  $a, b, c$  在参考坐标系下的坐标为  $(x_a^r, y_a^r, z_a^r), (x_b^r, y_b^r, z_b^r), (x_c^r, y_c^r, z_c^r)$ , 可由多线阵 CCD 外姿态测量系统测得, 3 个点之间的距离分别为  $l_{ab}, l_{bc}, l_{ac}$ 。

$$l_{ab} = \sqrt{(x_b^r - x_a^r)^2 + (y_b^r - y_a^r)^2 + (z_b^r - z_a^r)^2}, \quad (4)$$

$$l_{bc} = \sqrt{(x_c^r - x_b^r)^2 + (y_c^r - y_b^r)^2 + (z_c^r - z_b^r)^2}, \quad (5)$$

$$l_{ac} = \sqrt{(x_c^r - x_a^r)^2 + (y_c^r - y_a^r)^2 + (z_c^r - z_a^r)^2}, \quad (6)$$

根据余弦定理,  $ab$  和  $bc$  之间的夹角  $\theta$  为

$$\theta = \arccos \frac{l_{ab}^2 + l_{bc}^2 - l_{ac}^2}{2l_{ab}l_{bc}}, \quad (7)$$

只要利用点合作目标  $a, b, c$  的三维坐标即可求解虚拟点  $c'$  的三维坐标, 这样就使得点合作目标安装的位置更加灵活。

下面对  $c'$  的三维坐标进行求解, 分两步进行:

(1) 求发现方向

平面  $abc$  法线的单位向量为:

$$N = ab \times bc / |ab \times bc| = (x_N, y_N, z_N), \quad (8)$$

(2)  $bc$  绕法线旋转  $\alpha = (\pi/2 - \theta)$  得到  $bc'$ 。

根据四元数法计算  $c'$  的三维坐标  $(x_c^r, y_c^r, z_c^r)$ , 其四元数表示为  $(0, x_c^r, y_c^r, z_c^r)$ , 则矢量  $bc$  绕以  $b$  为旋转中心, 平面  $abc$  法线为旋转轴旋转  $\alpha$  角的四元数表示是:

$$(0, x_c^r, y_c^r, z_c^r) = R * P * Q, \quad (9)$$

其中:

$$R = (\cos(\alpha/2), x_N \sin(\alpha/2), y_N \sin(\alpha/2), z_N \sin(\alpha/2)), \quad (10)$$

$$Q = (\cos(\alpha/2), -x_N \sin(\alpha/2), -y_N \sin(\alpha/2), -z_N \sin(\alpha/2)), \quad (11)$$

$$P = (0, x_c^r, y_c^r, z_c^r), \quad (12)$$

$R$  是  $Q$  的共轭四元数,  $*$  为四元数乘法。

由公式(9)可以计算得到  $c'$  的三维坐标  $(x_c^r, y_c^r, z_c^r)$ 。

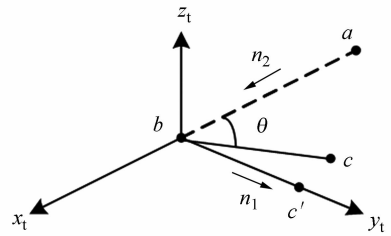


图 4 点合作目标构成的线段间矢量关系图

Fig. 4 Vector relationship between line segments composed of point cooperation targets

求解出  $c'$  的三维坐标, 可用点  $a, b, c'$  的三维坐标求解空间物体的姿态角, 具体求解过程是通过建立基于 Rodrigues 参数姿态解算模型求解被测物体的姿态角<sup>[20]</sup>。为了验证本文相机校准和姿态解算方法的有效性, 将本文采用的方法与传统的 DLT 相机校准方法与四元数姿态解算方法进行了比较。

## 4 实验

为了验证本文提出的姿态测量方法的正确性和有效性, 通过全站仪、三维位移台和三自由度转台进行整个姿态测量验证实验, 并与传统姿态测量方法中采用的相机校准方法和姿态解算方法进行了比较。全站仪采用日本索佳 NET1AX 高精度全站仪, 用来测量空间点的三维坐标, 精度在

100 m 之内可达到 1 mm。首先使用全站仪和三维位移台采集样本数据对线阵 CCD 相机进行校准。将发光二极管安装在三维位移台的工作面上,随位移台在 3 个轴以一定的步长作自由移动。在 600 mm×600 mm×600 mm 的空间范围内大致均匀地取 105 个位置作为校准点的位置,使用全站仪采集这些点的空间三维坐标和线阵 CCD 采集相对应的像点坐标作为线阵 CCD 校准的样本数据,并由这些样本数据对神经网络进行训练。选取 96 个点作为神经网络训练集,随机选取校准点中的 5 个点作为测试点集。将神经网络方法和 DLT 方法进行比较,这 2 种方法对测试点进行三维坐标恢复的坐标值如表 1 所示,由其计算的均方根误差如表 2 所示。

完成线阵 CCD 相机的校准工作以后,在三自由度转台上布置 3 个点发光二极管作为点合作目标,3 个点同时点亮,在测试前,通过试验,选定合适的标识点摆放位置,使得其在测试范围内,标识点在线阵 CCD 上成像的顺序不变。姿态解算模型验证实验图如图 5 所示。使用全站仪和线阵 CCD 分别记下转台上 3 个点合作目标的空间三维坐标和像点坐标,将转台转动一个小角度,再记录一次 3 个点的三维坐标和像点坐标,将转台共

转动 4 次后,得到了 5 组共 15 个点的空间三维坐标和像点坐标对。由已经训练好的神经网络重构这 5 组中点合作目标的三维坐标,并由姿态解算模型求解出姿态角的测量值。然后由传统方法中的 DLT 方法重构这 5 组中点合作目标的三维坐标,基于四元数方法解算姿态。再用全站仪测得的这 5 组中的点合作目标的实际三维坐标,用本文的方法解算姿态角,得到姿态角的实际值。最后对测量值与实际值进行比较给出姿态角的值,如表 3 所示。



图 5 姿态解算模型验证实验图

Fig. 5 Verification experiment diagram of attitude calculation model

表 1 BP 和 DLT 方法对测试点的三维坐标恢复

Tab. 1 3D coordinates reconstruction of testing points with BP and DLT methods (mm)

	全站仪测量值			DLT			BP		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	3 943.0	1 976.0	-105.0	3 903.7	1 893.1	-97.1	3 948.5	1 980.6	-103.9
2	3 817.0	2 008.0	89.0	3 862.2	2 033.5	73.9	3 818.0	2 008.0	87.3
3	3 852.0	2 194.0	-33.0	3 844.2	2 208.9	-29.7	3 850.9	2 195.5	-33.1
4	3 885.0	1 928.0	-34.0	3 907.2	1 896.7	-36.3	3 888.4	1 929.7	-33.7
5	3 837.0	1 863.0	-106.0	3 904.1	1 862.2	-107.2	3 836.2	1 860.5	-105.6

表 2 BP 和 DLT 方法恢复空间点坐标的均方根误差

Tab. 2 Root mean square errors of spatial point coordinate reconstruction with BP and DLT methods (mm)

	X	Y	Z	综合误差
DLT	41.58	41.77	7.85	34.33
BP	2.99	2.46	0.93	2.30

表 3 四元数法和 Rodrigues 参数法解算的姿态角

Tab. 3 Attitude angles of quaternion and Rodrigues methods (mm)

	实际值			传统方法			本文方法		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	7.83	8.09	1.63	7.96	7.76	1.98	7.93	8.32	1.87
2	6.82	0.02	0.64	6.51	0.15	0.35	7.15	-0.04	0.61
3	5.84	8.12	0.02	5.14	8.47	0.25	5.95	7.83	0.23
4	7.89	3.84	6.67	7.45	4.38	6.92	7.99	4.15	6.48
5	7.46	8.22	7.66	8.03	8.47	7.29	7.57	8.03	7.42

在这里,由均方根误差得到的综合误差反应的是测量结果的误差波动性,从表 2 中数据可以看出,基于 BP 神经网络的方法测量结果的误差

波动性比 DLT 方法减小了 93%。由表 1 中可以得到,采用 DLT 方法得到的坐标分量的最大误差是 82.9 mm,采用神经网络方法得到的坐标分量的最大误差是 5.5 mm。

将 2 种方法的测量值与实际值相比较给出姿态角的测量误差如表 4 所示。

表 4 四元数法和 Rodrigues 参数法解算的姿态角误差

Tab.4 Attitude angle errors of quaternion and Rodrigues methods (mm)

	传统方法			本文方法		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	0.13	-0.33	0.35	0.10	0.23	0.24
2	-0.31	0.13	-0.29	0.33	-0.06	-0.03
3	-0.43	0.35	0.23	0.11	-0.29	0.21
4	-0.44	0.54	0.25	0.10	0.31	-0.19
5	-0.57	0.25	-0.37	0.11	-0.19	-0.24

## 参考文献:

- [1] 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,2006:2-4, 79-80.  
SHANG Y. *Researches on vision-based pose measurements for space targets*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 2-4, 79-80. (in Chinese)
- [2] 韩建栋,吕乃光,王锋. 采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. 光学精密工程,2009,17(1): 45-51.  
HAN J D, LV N G, WANG F. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):45-51. (in Chinese)
- [3] HEIDARIAN M, MEMON A Y. Attitude control of VTOL-UAVS[C]. *Internation Conference on Control*, 2012:363-368.
- [4] 尹洪涛,刘成,李一兵. 相机标定误差因素分析[J]. 信息通信,2012(1):28-30.  
YIN H T, LIU CH, LI Y B. Analysis of factors on the error of the camera calibration[J]. *Information & Communications*, 2012 (1): 28-30. (in Chinese)
- [5] RAMAKRISHNAN, PRABADARAN, EKAMBARAVANAN, et al.. Function approximation using feed-forward networks with sigmoidal signals [J]. *Information Journal of Soft Computing*, 2006, 1(1): 76-82.

由表 2 可以看出,基于 BP 神经网络和 Rodrigues 参数方法的测量误差比传统方法中使用的基于 DLT 相机校准方法和四元数姿态解算算法的误差要小,说明本文系统在空间位置测量精度及空间姿态解算精度上要高于传统方法。

## 5 结 论

本文提出了一种基于多点合作目标的多线阵 CCD 姿态测量方法,系统地对整个姿态测量过程进行了介绍,采用模拟计算方法计算了姿态角测量范围。并对姿态测量中提出的线阵 CCD 相机的校准方法和姿态解算方法与传统方法进行了比较,最后通过实验验证了采用该测量系统进行姿态测量的可行性和有效性。

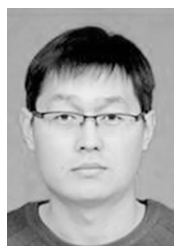
- [6] 林来兴. 四十年空间交会对接技术的发展[J]. 航天器工程,2007,16(4):70-77.  
LIN L X. Development of space rendezvous and docking technology in past 40 years [J]. *Space Craft Engineering*, 2007,16(4):70-77.
- [7] WAHAB M N A, SIVADEV N, SUNDARAJ K. Target distance estimation using momocular vision system for mobile robot [C]. *IEEE Conference on Open Systems*, 2011:11-15.
- [8] 张晓玲,张宝峰,林玉池. 基于光轴垂直双目立体视觉系统的物体运行姿态研究[J]. 光电子·激光, 2010,21(11):1693-1697.  
ZHANG X L, ZHANG B F, LIN Y CH. Study on dynamic object attitude based on a binocular stereo vision system with orthogonal optical axes [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(11): 1693-1697. (in Chinese)
- [9] 姜寿山,雷志勇. 线阵 CCD 测量弹丸飞行姿态方法的研究[J]. 军械工程学院学报,2002,14(3):23-25.  
JIANG SH SH, LEI ZH Y. On the measure of the flying shell with line scan CCD [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*. 2002, 14(3): 23-25. (in Chinese)
- [10] 李金珂,陈良益. 基于线阵 CCD 的弹道同步式狭缝摄影系统[J]. 激光与红外,2009,39(3):300-303.  
LI J K, CHEN L Y. A slit photography system

- based on linear CCD [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(3):300-303.
- [11] 艾莉莉. 基于线阵 CCD 的空间目标外姿态测量关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009, 41-50.  
AI L L. *Study of the key technologies of the exterior attitude measurement for spatial object based on linear CCD* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009:41-50. (in Chinese)
- [12] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]. *Proc Symp Close-Range Photogrammetry*, 1971:1-18.
- [13] 蔡盛, 李清安, 乔彦峰. 基于 BP 神经网络的姿态测量系统摄像机标定[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(7):832-834.  
Camera Calibration of Attitude measurement system based on BP neural network [J]. *Journal of optoelectronics laser*, 2007, 18(7): 832-834. (in Chinese)
- [14] KOLMOGOROV A N. On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition [J]. *Dokl. Akad. Nauk.*, 1957 (114): 953-956.
- [15] RAMAKRISHNAN, PRABADARAN, EKAMB-ARAVANAN, et al.. Function approximation using feedforward networks with sigmoidal signals [J]. *Information Journal of Soft Computing*, 2006, 1(1): 76-82.
- [16] ZHANG W J. Function approximation and documentation of sampling data using artificial neural networks [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006(122): 185-201.
- [17] 李晶, 袁峰, 丁振良. 基于 BP 神经网络的外姿态测量系统线阵 CCD 标定[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(5): 1138-1141.  
LI J, YUAN F, DING ZH L. Linear CCD camera calibration of exterior attitude measurement system based on BP neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5): 1138-1141. (in Chinese)
- [18] 周江华, 苗育红, 王明海. 姿态运动的 Rodrigues 参数描述[J]. *宇航学报*, 2004, 25(5):514-519.  
ZHOU J H, MIAO Y H, WANG M H. Attitude representation using Rodrigues parameter [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(5):514-519. (in Chinese)
- [19] SHUSTER M D. A survey of attitude representations [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1993, 41(4):439-517.
- [20] 李晶, 袁峰, 丁振良. 基于 Rodrigues 参数的多线阵 CCD 外姿态测量系统的姿态解算[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):858-863.  
LI J, YUAN F, DING ZH L. Attitude calculation of multi-linear CCD exterior attitude measurement system based on Rodrigues parameter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 858-863. (in Chinese)

## 作者简介:



李晶(1982—),女,吉林白山人,博士研究生,2005年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间物体外姿态测量的研究。E-mail: hitlijing@163.com



胡英辉(1982—),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,2005年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事宽带接收机及光电检测方面的研究。E-mail: foxhyh@yahoo.com.cn

## 导师简介:



袁峰(1963—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1985年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1988年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术研究。E-mail: yuanf@hit.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)