

文章编号 1004-924X(2008)01-0161-05

应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统

艾莉莉, 袁 峰, 丁振良

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 设计了 9 路线阵 CCD 相机组合的空间目标外姿态测量系统, 该系统解决了面阵图像传感器用于姿态测量时存在的速度和精度的矛盾, 能够实时重构放置于被测物体上的点合作目标在世界坐标系下的三维坐标, 并经空间解算, 确定被测物体的姿态角。该系统着眼于合作目标和相机光学系统的相对位置, 解决了多相机与多点合作目标一一对应时的目标干扰问题; 设计了新的光学系统构架, 提高了精度, 节省了空间; 实现了多相机测量系统的局部标定和全局标定。图像采样率为 1 316 帧/s 时, 姿态测量精度为 $1'$ 。测试结果表明, 该姿态测量系统可以实现对被测对象高精度的实时测量, 且具有合作目标简单, 价格低廉等优点。

关键词: 线阵 CCD; 姿态测量; 合作目标; 多相机测量系统

中图分类号: V248.3; V448.222 **文献标识码:** A

An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD

AI Li-li, YUAN Feng, DING Zhen-liang

(Department of Automatic Testing and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To overcome the conflict between the speed and the accuracy when area image sensors are used for attitude measurement, an exterior attitude measurement system with nine linear CCD cameras for spatial object is designed. The system can realize the real-time measurement for the exterior attitude of measured object by separate real-time reconstruction for the 3D coordinates of point cooperation targets placed on the measured object under world coordinate system and spatial solution. Based on the research of the relative positions of cooperation target and the camera optical system, the interference problem in the one-one corresponding relationship between the point cooperation targets and the camera optical subsystems is solved. A new construction of optical system is designed to improve the measurement accuracy and save space. The local and global calibrations for the multi-camera measurement system are realized. The attitude measurement precision can reach $1'$ when the image sampling frequency is 1 316 frame/s. The test results show that the attitude measurement system can obtain the high accurate and real-time measurement and has advantages of simple cooperation targets, low cost and so on.

Key words: linear CCD; attitude measurement; cooperation target; multi-camera measurement system

收稿日期: 2007-07-09; 修订日期: 2007-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50275040)

1 引言

空间目标的姿态通常用其轴心线相对于某固定参照系的转动角来描述,有俯仰、偏航和滚动 3 个方向,总称为姿态角。姿态测量,也就是对空间目标俯仰角、偏航角和滚动角的测量,根据测量装置放置于被测物体的内部或是外部,可以分为内姿态测量和外姿态测量。目前,基于“体目标”的外姿态测量方式主要有 2 种:1 种是基于激光干涉原理的姿态测量法^[1-3],API 生产的第三代激光跟踪仪是这方面杰出的代表,它可以实现对运动目标高精度的姿态测量,但合作目标复杂,适用性差,不易于实现动态测量,而且价格昂贵;另 1 种是基于机器视觉的姿态测量方式,根据是否在被测物体上安装点合作目标,或是采用摄像机的数量,姿态测量模型各不相同,但均采用基于面阵图像传感器的摄像机进行测量^[4-7]。线阵电荷耦合器件(CCD)的结构简单,成本低,在同等测量精度的前提下,其测量范围可以做得很大,且易于满足实时测量的要求,因此,本文搭建了线阵 CCD 组合的外姿态测量系统,它可以实现对被测对象高精度、实时的测量,且具有合作目标简单,价格低廉等优点。

实现用线阵 CCD 来追踪光点三维运动轨迹最早出现在 Macellari 研制的 COSTEL 系统中,应用于人体运动的分析^[8];清华大学电机工程系也基于这个做了相关研究,应用于被测物体的高精度定位^[9]。而借助于线阵 CCD 重构空间点目标的三维坐标来实现空间物体姿态测量还未见有报道。

2 姿态测量原理

1 个光点在其物距远大于透镜焦距时,在柱面透镜焦平面上成一与柱面透镜轴心线平行的线状光斑,当光点沿着柱面透镜轴心线移动时,线状光斑将相应作水平运动,而当其沿着垂直于轴心线的方向移动时,线状光斑将相应作反向运动。因此,由柱面镜头和位于其焦平面且与其轴心线垂直的线阵 CCD 构成的一维相机可以检测远处光点在垂直于轴心线方向上的一维运动。

3 个由柱面镜头和线阵 CCD 构成的一维相

机,引出 3 个平面相交于一点,唯一确定了光点的空间位置,这里称其为点目标三维坐标重构子系统(见图 1)。理论上,为了更好地体现光点的位置变化,中间相机与两侧相机的线阵 CCD 和光轴均应保持垂直关系;实践中,中间相机与两侧相机光轴的夹角过小,不利于体现光点的位置变化;夹角过大,共同视场变小,精度降低,综合考虑镜头光学特性参数间的相互制约关系,光轴夹角取为 30° 。

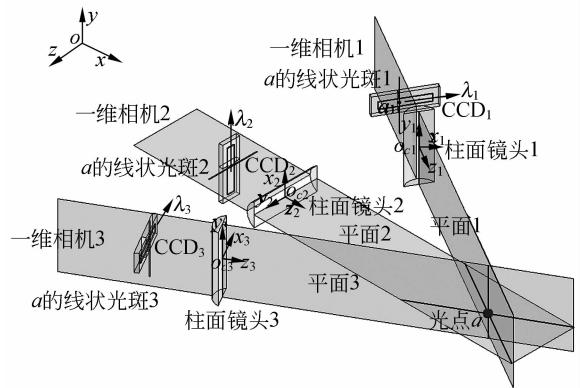


图 1 点目标三维坐标重构子系统

Fig. 1 Subsystem for 3D coordinate reconstruction of spatial point target

角度是二维坐标系下的量,由姿态角的定义知,被测物体上平行其纵轴直线上的任意 2 点,可以确定该物体的俯仰角 α 和偏航角 β ;在 α, β 已知的前提下,垂直于其纵轴平面上的任意 2 点,可以确定该物体的滚动角 γ 。为了方便测量,在被测物体表面辅以点合作目标,若用于测量 α, β 的两个点合作目标或用于测量 γ 的 2 个点合作目标中有一对取自两个端面,则被测物体表面上的 3 个点可以确定其姿态角。对于本文的圆柱体被测对象,当 $\gamma=0$ 时,取参考平面 abc_0 。与前端面交线的两个端点,分别放置点合作目标 b, c ,则 b 应在被测物体纵轴线上,在纵轴线和后端面的交点处放置点合作目标 a (见图 2)。点合作目标 a, b 和 c 分别是波长为 $515 \sim 530 \text{ nm}$ 、 $580 \sim 595 \text{ nm}$ 、 $615 \sim 635 \text{ nm}$ 的点发光二极管,在相对应的点目标三维坐标重构光学子系统 1、2 和 3 中分别加入相应波长的滤光片与之呼应,解决了多相机与多点合作目标间一一对应时的相互干扰问题;同时,为了避免目标脱靶,它们应具有较大的发散角,此处,点合作目标的发散角为 120° 。

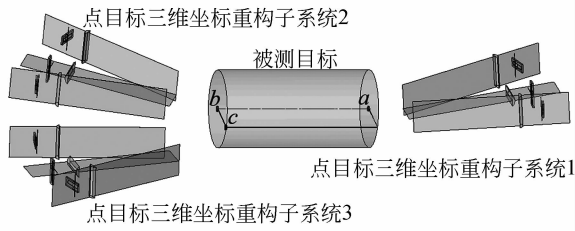


图 2 3 个点目标三维坐标重构子系统确定被测目标姿态角

Fig. 2 Attitude angle of measured object determined by 3D coordinate reconstruction system of spatial point target

3 测量系统的搭建

3.1 硬件平台的搭建

为了最大限度地克服光学系统的边缘效应,保证理论测量精度及其均匀性,处在点目标三维坐标重构子系统中间的一维相机的主光轴最好垂直于点合作目标运动范围的前端面,并对准其中心,而点合作目标运动范围的前端面应尽可能充满整个视场。为此,本文设计了 1 种新的光学构架,图 3 为双点目标一维成像光学子系统,它借助于 1 个分光棱镜和 2 个滤光片,实现对 2 个不同波长范围点合作目标的同时捕捉;3 个双空间点目标一维成像子系统构成双点目标三维坐标重构子系统,它相当于点目标三维坐标重构子系统 2 和 3 的 1 个合并,即 6 个一维相机的组合,可以同时实现对 2 个点合作目标的三维定位,提高了精度,节省了空间。图 4 为该姿态测量系统示意图,它采用一路双点目标三维坐标重构子系统和一路点目标三维坐标重构子系统实现对被测对象外姿态的测量。

图 5 为该姿态测量系统框图,主要体现了多 CPU 并行处理的数据走向。该系统采用 9 个基于线阵 CCD 的一维相机(3 个相机对应 1 个点合作目标)实时进行图像采集,9 路空间上离散的模拟信号分别经 A/D 转换器送 9 个 ARM 单元进行处理;所得点合作目标在相应 CCD 坐标系上的一维坐标值经并/串转换、LVDS 传输后,3 个 1 组分别送主控板上的分 ARM1、ARM2 和 ARM3,它们分别联立方程组求解点合作目标 a 、 b 和 c 在世界坐标系下的三维坐标;3 路三维坐标

再经 SPI 串行传输后送总 ARM,经过空间解算,则被测物体姿态角可求。

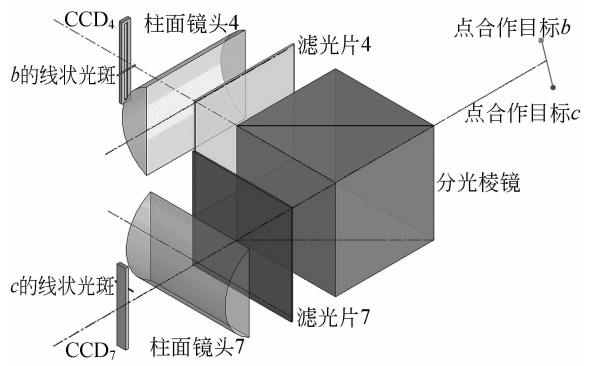


图 3 双点目标一维成像光学子系统

Fig. 3 1D imaging optical subsystem of double spatial point target

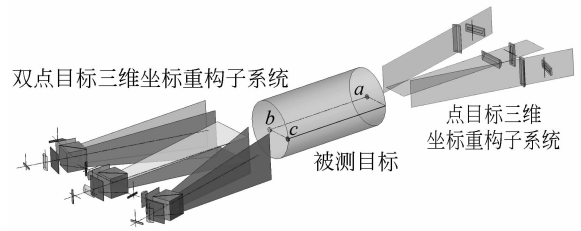


图 4 姿态测量系统示意图

Fig. 4 Scheme of attitude measurement system

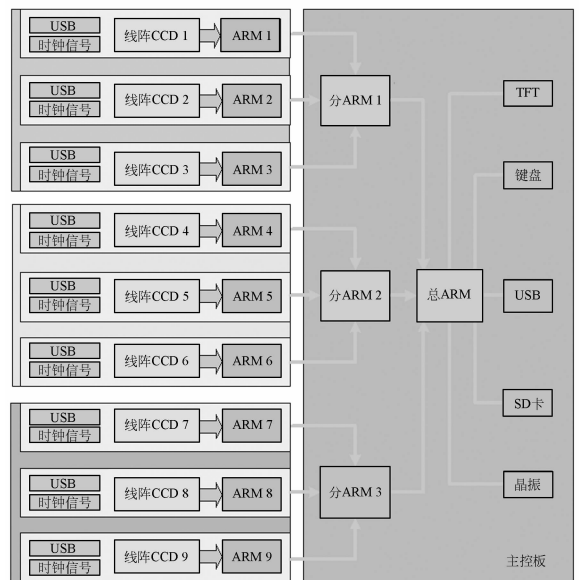


图 5 姿态测量系统框图

Fig. 5 Block diagram of attitude measurement system

3.2 镜头参数的设计

透镜的 2 个折射面均是圆柱面(平面为圆柱面的极限形式)的一部分,这种透镜称为柱面透镜。柱面透镜为非对称折射系统,在其垂直子午面和水平子午面内分别用近轴光线进行追迹,其物像关系分别同平透镜和球透镜。因此,远处光点经柱面透镜后,将成一与其轴心线平行的线状光斑,而非点斑,且物像的位置关系、放大关系及柱面透镜的景深均同球透镜。

镜头的参数设计取决于测量精度、测量范围和测量方案,主要从性能和精度两方面的要求考虑。其中,性能要求包括焦距、相对孔径、像方视场角、景深等;精度要求包括分辨率及像差要求。被测物体在 $3\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的空间内随机地进行姿态运动和位置运动,为避免由复杂的变焦动作引入的测量误差,采用定焦距的柱面光学镜头,必须确保光学系统具有一定的景深,但景深的大小又受光圈数、焦距、物距及像面上允许的弥散斑大小制约。畸变是视场的函数,视场越大,镜头畸变越大,而视场角过小,则焦距变大,景深又会变小,而且对合作目标和通光孔径的要求相应提高;为提高像面上像条纹的亮度,从而提高摄像机测量的可靠性,要求相对孔径尽可能大,但受景深等要求的限制,相对孔径又不能太大,需综合考虑。按图 5 布置测量系统,点目标三维坐标重构子系统和双点目标三维坐标重构子系统具有相同的视场,因此,只需对中间和两侧相机的性能参数分别设计即可。一维相机的分辨率,由线阵 CCD 和镜头的分辨率确定,CCD 的分辨率由像元大小决定,设计镜头分辨率大于 CCD 分辨率,则一维相机分辨率由 CCD 像元大小确定,采用亚像素细分技术可以将 CCD 的分辨率控制在一个像元以内。由于采用带有滤光片的柱面透镜与相应波长的点合作目标相配合,子午场曲、子午彗差、畸变影响显著。本文借助于光学设计软件,有针对性地进行最优化设计,均衡像差在给定的公差范围内,使所设计的小视场镜头(中间相机视场角 30° ,两侧相机视场角 20°)的像差得到控制。

4 标定和解算

该姿态测量系统采用一路点目标三维坐标重构子系统和一路双点目标三维坐标重构子系统,实时确定圆柱体被测对象的外姿态,它相当于 9

个一维相机的组合。由于设计了小像差的镜头,采用 7 系数 DLT 法来实现对每个线阵 CCD 相机 8 个内外方位元素(2 个内方位元素:镜头焦距、镜头与传感器的几何关系;6 个外方位元素:镜头中心在世界坐标系下的位置和方位角)的局部标定^[10];又因为直接利用世界坐标系下的标志点三维坐标对单个相机进行标定,所以实现了对 9 个一维相机局部标定的同时,也实现了对各相机测量数据的统一,即该测量系统的全局标定。

为了求解被测对象的姿态角,本文定义了 1 个世界坐标系、9 个相机坐标系、9 个辅助坐标系和 9 个 CCD 坐标系。世界坐标系由 2 台高精度电子经纬仪建立,它统一了 9 个线阵 CCD 传感器的测量数据;辅助坐标系确定了世界坐标系与相机坐标系的转换关系;相机坐标系的原点位于柱面透镜轴心线上距上下底面相等的位置;CCD 坐标系的原点位于线阵 CCD 的中点。基于相机的针孔模型,确立了相机坐标系下的点合作目标的三维坐标与 CCD 坐标系上其对应一维像点的坐标关系,即确立了关于世界坐标系下的点合作目标的三维坐标与 CCD 坐标系上的对应一维像点坐标的平面方程(世界坐标系、相机坐标系 1、2 和 3、辅助坐标系 1、2 和 3 及 CCD 坐标系 1、2 和 3 参见图 1),该方程的 7 个系数可以通过局部标定得到;9 个一维相机,9 个平面方程,每 3 个联立求解,则点合作目标 a 、 b 和 c 在世界坐标系下三维坐标可以确定;然后通过空间解算,被测对象的姿态角可求。

5 结 果

在 $3\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的空间内,针对一长 0.6 m ,横截面直径为 0.2 m 的圆柱体被测对象进行测量,线阵 CCD 采用东芝公司的 TCD1708D。在测量空间内,均匀布置波长范围为 $515\sim 530\text{ nm}$ 、 $580\sim 595\text{ nm}$ 、 $615\sim 635\text{ nm}$ 的发光二极管各 10 个,它们在世界坐标系下的位置可以通过两台高精度电子经纬仪(三角测量法)测得,按次序依次进行点亮,分别实现对 9 个一维相机内外参数的标定。把被测对象放在测量空间内的三轴转台(精度为 0.003°)上,点合作目标 a 、 b 和 c 的布置如图 2 所示,由转台给出相应姿态,其姿态测量误差见表 1(CCD 像元驱动时钟为 5 MHz ,一维相机图像采样率为 $1\ 316\text{ frame/s}$)。

表 1 姿态角的测量误差值(单位:角分)

Tab.1 Measurement errors of attitude angles for the cylinder object

姿态角的相对真值			姿态角基于 6 次测量的平均误差值		
α	β	γ	α	β	γ
618.75	-618.75	-618.75	-0.83	0.98	-0.79
-506.25	-506.25	-506.25	0.54	0.73	-0.98
-393.75	-393.75	-393.75	-0.60	-0.66	-0.59
-281.25	-281.25	-281.25	-0.33	0.55	0.37
-168.75	-168.75	-168.75	-0.13	0.15	0.08
0	0	0	0.08	-0.07	-0.17
18.75	11.25	18.75	-0.27	0.18	-0.18
168.75	101.25	131.25	0.74	-0.57	-0.59
356.25	206.25	281.25	0.62	-0.75	0.92
506.25	393.75	468.75	0.97	-0.85	0.89
最大测量误差			0.97	0.98	0.98

6 结 论

针对面阵图像传感器自身存在的速度和精度的矛盾,设计并搭建了基于线阵 CCD 组合的外姿态测量系统。该系统基于小像差的光学镜头,采用线性成像模型。测试结果表明,它可以广泛应用于机器人研究、柔性制造系统、精密机械装配等科学技术研究领域。

本文旨在为大家呈现一个新颖的姿态测量系统,并通过试验的方法初步验证了用该系统进行姿态测量的可行性。但对于定空间、定焦距这样一个动态的测量系统,如何确定一个精确的成像描述,以便进一步提高该测量系统的测量精度、可靠性及适用范围,还有待于做深入研究。

参考文献:

- [1] LAU K, HOCKEN R. Three and five axis laser tracking system [P]. U. S. :4714339, 1987.
- [2] HUGHES E B, WILSON A, PEGGS G N. Design of a high-accuracy based on multi-lateration techniques [J]. *Ann. ICRP*, 2000, 49:391-395.
- [3] WANG J, LIU Y D, HU ZH H, *et al.*. Modeling and algorithm of attitude measurement of moving target by laser tracking systems [J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(2):373-382.
- [4] 杜小平, 赵继广, 崔占忠. 航天器位置姿态的光学测量方法研究[J]. *兵工学报*, 2004, 25(1):121-123.
DU X P, ZHAO J G, CUI ZH ZH. Optical method for the position-attitude determination of space vehicles [J]. *Acta Armamentaria*, 2004, 25(1):121-123. (in Chinese)
- [5] ROBERT M H. Determining camera parameters from the perspective projection of a rectangle [J]. *Pattern Recognition*, 1989, 22(3):225-230.
- [6] 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*, 2002, 28(1):77-79. (in Chinese)
- [7] 李清安. 空中目标姿态测量技术及其仿真实验研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2006.
LI Q A. *Research on teehnology of measuring the attitude angles of the aerial target and its relative emulational experiment* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2006. (in Chinese)
- [8] MACELLARI V. Costel: a computer peripheral remote sensing device for 3-dimensional monitoring of human motion [J]. *Med. Biol. Eng. Comp.*, 1983, 21:311-318.
- [9] 秦志军, 王广志, 骆文博, 等. 基于线阵 CCD 的大视场高精度三维实时定位系统[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(增):39-42.
QIN ZH J, WANG G ZH, LUO W B, *et al.*. Light-spot positioning system with large viewing field and high precision [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci & Tech)*, 2002, 42(Supp.):39-42. (in Chinese)
- [10] GAZZANI. Performance of a 7-parameter DLT method for the calibration of stereo-photo grammetric systems using 1-D transducers [J]. *J. Biomedical Eng.*, 1992, 14:476-482.

作者简介:艾莉莉(1978-),女,黑龙江哈尔滨人,在读博士研究生,主要研究方向为空间目标的外姿态测量。E-mail: ldyandall@hit.edu.cn

袁 峰(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术等方面的研究。E-mail:yuanf@hit.edu.cn