

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0184-05

# 双电荷耦合器件交会测量系统精度分析与 结构参数优化

胡 峰 胡春生 王省书 秦石乔

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 为了改善双电荷耦合器件(CCD)交会测量系统的精度,设计出符合实际指标要求的测量系统。基于透视成像原理建立了双 CCD 交会测量数学模型,通过分析系统中目标点的测量误差,研究了双 CCD 视觉传感器光轴倾角、基线距离和焦距长度等结构参数对系统空间坐标测量精度的影响。结果表明,当双 CCD 呈对称结构放置,光轴与基线夹角保持在  $30^\circ \sim 70^\circ$  之间,选择具有较长焦距的透镜并且把待测物体置于测量系统中心位置时,可以获得毫米甚至微米量级的测量精度。基线距离对测量精度的影响较为复杂,一般控制在 0.5~3 倍测量距离之间为宜。研究结果对双 CCD 交会测量系统结构的优化设计具有一定的参考意义。

**关键词** 测量;机器视觉;结构参数;精度分析;交会测量;电荷耦合器件

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0184

## Structural Parameters Optimization and Accuracy Analysis for Intersection Measuring System with Double-Charge Coupled Device

Hu Feng Hu Chunsheng Wang Xingshu Qin Shiqiao

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** In order to improve the measurement precision for intersection measuring system with double-charge coupled device (CCD), a mathematical model for measuring system is established according to geometrical imaging principle. Through analyzing the measure accuracy of the measuring point in the system, the effect of the visual sensor structural parameters such as the angles formed by optical axes of two cameras across a baseline, baseline length on the measurement result is investigated. The simulation results indicate that with a symmetrically-set and longer focal length double-CCD measuring system, when the angles formed by the optical axes across a baseline are between  $30^\circ$  and  $70^\circ$  and the measuring point is located in the center of the system, the higher coordinate measuring accuracy can be obtained. The results is evaluated in designing double-CCD visual sensors.

**Key words** measurement; machine vision; structure parameters; accuracy analysis; intersection measurement; charge coupled device

## 1 引 言

双电荷耦合器件(CCD)交会测量作为一种非接触式坐标测量技术,直接模拟人类双眼处理景物的方式,系统结构简单、可靠简便、测量精度高,并且具有在线、实时三维测量的潜力<sup>[1~4]</sup>。随着 CCD 技术的飞速发展,双 CCD 交会测量系统被广泛应用于工业检测、机器人导航、三维测量学及虚拟现实等诸多领域。

目前,先进制造业要求双 CCD 交会测量系统的精度达到毫米甚至微米量级。双 CCD 交会测量系统的精度主要与 CCD 的性能以及光轴倾角、基线距离等外部结构参数有关。摄像机内部参数和外部结构参数不仅确定有效视场大小,而且决定着有效视场内不同位置的测量精度<sup>[5~8]</sup>。然而,目前对双 CCD 交会测量系统精度进行理论上的系统分析方

**基金项目:** 国家自然科学基金(60677041)资助课题。

**作者简介:** 胡 峰(1983—),男,硕士研究生,主要从事光电仪器与测控等方面的研究。E-mail: hufeng683@163.com

**导师简介:** 秦石乔(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光陀螺方面的研究。E-mail: sqjin8@nudt.edu.cn

面的报道较少,一般是根据实际经验来确定具体系统的结构参数。因此,详细研究双 CCD 交会测量系统的精度与结构参数优化问题,不仅可以改善系统测量精度,而且可以为设计符合实际要求的双 CCD 交会测量系统提供指导,从而提高设计效率。

## 2 双 CCD 交会测量数学模型

双 CCD 交会测量系统基于体视原理,利用两 CCD 图像平面上的图像坐标来求取视场内待测点的空间坐标,对任一具有相交光轴结构的双 CCD 交会测量系统,其测量原理示意图如图 1 所示。

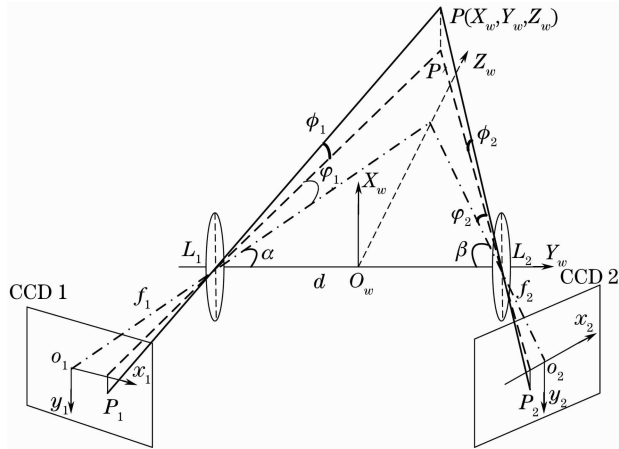


图 1 双 CCD 交会测量原理示意图

Fig.1 Ketch of intersection measuring system with double-CCD

图 1 中两 CCD 水平放置,  $L_1, L_2$  分别是两 CCD 摄像机的透镜中心,  $L_1 L_2$  为基线, 其长度为  $d$ 。以基线中点  $O_w$  作为原点建立世界坐标系  $O_w-X_w Y_w Z_w$ ,  $o_1-x_1 y_1$  和  $o_2-x_2 y_2$  分别是两 CCD 的图像坐标系。如图 1 所示,  $L_1 o_1$  和  $L_2 o_2$  所在直线为两 CCD 的光轴。对于空间中的一点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$ , 在像平面 CCD1 和 CCD2 上的成像点分别为  $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2)$ 。 $\alpha, \beta$  分别是两摄像机光轴与基线之间的夹角, 物点  $P$  在水平面  $Y_w O_w Z_w$  上的投影点  $P'$  与两 CCD 光轴的夹角即水平视场角分别为  $\phi_1, \phi_2$ ,  $\phi_1', \phi_2'$  分别为物点  $P$  垂直方向视场角。设两 CCD 镜头的有效焦距分别为  $f_1, f_2$ , 由三角几何关系可得物点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  空间三维坐标表达式<sup>[5,9]</sup>

$$\begin{cases} Z_w = \frac{d}{\cot(\alpha + \phi_1) + \cot(\beta + \phi_2)} \\ Y_w = Z_w \cdot \cot(\alpha + \phi_1) - d/2 \\ X_w = \frac{Z_w \cdot \tan \phi_1}{\sin(\alpha + \phi_1)} = \frac{Z_w \cdot \tan \phi_2}{\sin(\beta + \phi_2)} \end{cases}, \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \tan \varphi_1 &= \frac{x_1}{f_1}, \quad \tan \varphi_2 = \frac{x_2}{f_2} \\ \tan \phi_1 &= \frac{y_1 \cdot \cos \varphi_1}{f_1}, \quad \tan \phi_2 = \frac{y_2 \cdot \cos \varphi_2}{f_2}. \end{aligned}$$

## 3 双 CCD 交会测量精度分析和结构参数仿真

由(1)式可以看出,物点  $P$  的空间三维坐标不仅与 CCD1 和 CCD2 上的像平面坐标  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  有关,而且取决于双 CCD 交会测量系统的结构参数(基线长度  $d$ , 摄像机光轴倾角  $\alpha, \beta$ , 焦距  $f_1, f_2$ ), 表示成函数形式为

$$P(X_w, Y_w, Z_w) = F(d, \alpha, \beta, f_1, f_2, x_1, y_1, x_2, y_2).$$

根据误差分析和传输理论<sup>[10]</sup>, 物点  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  的空间坐标测量总误差为

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{total}} &= \sqrt{(\Delta X_w)^2 + (\Delta Y_w)^2 + (\Delta Z_w)^2} = \\ &= \sqrt{\sum_k \sum_i \left( \frac{\partial F_k}{\partial i} \Delta i \right)^2}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $i$  代表  $d, \alpha, \beta, f_1, f_2, x_1, y_1, x_2, y_2$  等结构参数,  $\Delta i$  表示上述各参数的测量误差,  $k$  代表物点空间坐标  $X_w, Y_w, Z_w$ 。可以通过分析坐标测量误差来确定其精度高低。

### 3.1 CCD 光轴倾角对系统测量精度的影响

考虑双 CCD 有效视场内水平面上—固定点, 有  $\phi_1 = \phi_2 = 0$ 。由(1)式和(2)式可得系统总测量误差  $\Delta_{\text{total}}$  与两 CCD 光轴倾角  $\alpha, \beta$  的关系。如图 2 所示, 基线长度  $d=1000$  mm, 焦距  $f_1=f_2=100$  mm, 各参数测量误差为<sup>[3]</sup>:  $\Delta d=1$  mm,  $\Delta \alpha=\Delta \beta=10''$ ,  $\Delta f_1=\Delta f_2=f_1/1000$ ,  $\Delta x_1=\Delta x_2=\Delta x_3=\Delta x_4=0.012$  mm。从图 2 中可以看出, 两 CCD 光轴倾角  $\alpha, \beta$  在  $30^\circ \sim 70^\circ$  之间取值时, 坐标测量总误差较小,  $\alpha, \beta < 30^\circ$  (或  $\alpha, \beta > 70^\circ$ ) 时, 随着光轴倾角的减小(或增加), 坐标测量总误差

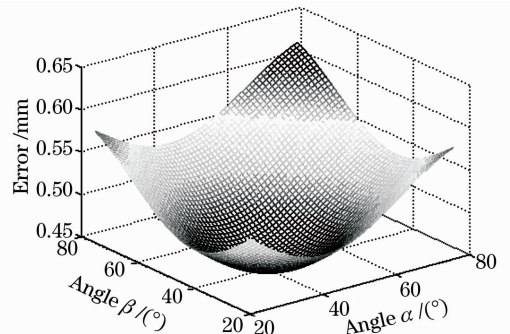


图 2 坐标测量误差与两 CCD 光轴倾角的关系  
Fig.2 Error distribution curves of the angles  $\alpha, \beta$

都相应变大。另外,当两光轴倾角相等( $\alpha=\beta$ )时,总误差相对较小,可以达到微米量级精度。因此,实际设计时,两 CCD 一般对称放置。

### 3.2 CCD 镜头有效焦距对系统测量精度的影响

双 CCD 交会测量系统总测量误差与 CCD 镜头有效焦距  $f_1, f_2$  的关系如图 3 所示。图中垂直视场  $\phi_1 = \phi_2 = 30^\circ$ , 水平视场  $\varphi_1 = \varphi_2 = 10^\circ$ , 光轴倾角  $\alpha = \beta = 45^\circ$ , 基线长度  $d = 1000$  mm, 各参数误差  $\Delta d = 1$  mm,  $\Delta\alpha = \Delta\beta = 10''$ ,  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta y_1 = \Delta y_2 = 0.012$  mm,  $\Delta f_1 = f_1/1000$ ,  $\Delta f_2 = f_2/1000$ 。可以看出,随着焦距  $f_1, f_2$  的逐渐增加,误差逐渐减小;在  $f_1 = f_2$  的对角线上,误差相对周围点较小。因此,在设计双 CCD 交会测量系统时,为了得到毫米量级甚至更高的精度,宜选用具有相同焦距的长焦距镜头。

### 3.3 坐标测量误差与像点坐标的关系

对于一个既定双 CCD 交会测量系统,其外部结

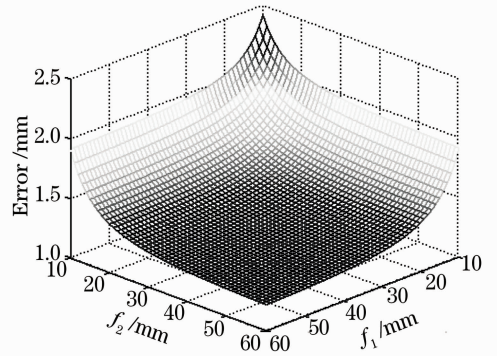


图 3 坐标测量误差与有效焦距  $f_1, f_2$  的关系

Fig. 3 Error distribution varies with the focus  $f$  构参数  $d, \alpha, \beta, f$  是固定不变的,事先已经进行了精确标定,只有提取的像点坐标随算法不同而有所差异。由(1)式可知,可用视场角  $\varphi_1, \varphi_2, \phi_1, \phi_2$  代替像点坐标  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  来分析其对系统测量误差的影响。由(1)式分别对  $x_1, x_2, y_1, y_2$  微分

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_w}{\partial x_1} = \frac{Z_w^2 \cos^2 \varphi_1}{d \cdot f_1 \sin^2(\alpha + \varphi_1)} & \frac{\partial Y_w}{\partial x_1} = -\frac{Z_w^2 \cos^2 \varphi_1 \cot(\beta + \varphi_2)}{d \cdot f_1 \sin^2(\alpha + \varphi_1)} \\ \frac{\partial Z_w}{\partial x_2} = \frac{Z_w^2 \cos^2 \varphi_2}{d \cdot f_2 \sin^2(\beta + \varphi_2)} & \frac{\partial Y_w}{\partial x_2} = -\frac{Z_w^2 \cos^2 \varphi_2 \cot(\alpha + \varphi_1)}{d \cdot f_2 \sin^2(\beta + \varphi_2)} \\ \frac{\partial Z_w}{\partial y_1} = \frac{\partial Z_w}{\partial y_2} = 0 & \frac{\partial Y_w}{\partial y_1} = \frac{\partial Y_w}{\partial y_2} = 0 \\ \frac{\partial X_w}{\partial x_1} = \frac{Z_w \cos \varphi_1 \tan \varphi_1}{f_1 \sin^2(\alpha + \varphi_1)} \left[ \frac{Z_w \cos \varphi_1}{d \cdot \sin(\alpha + \varphi_1)} - \cos \alpha \right] \\ \frac{\partial X_w}{\partial x_2} = \frac{Z_w \cos \varphi_2 \tan \varphi_2}{f_2 \sin^2(\beta + \varphi_2)} \left[ \frac{Z_w \cos \varphi_2}{d \cdot \sin(\beta + \varphi_2)} - \cos \beta \right] \\ \frac{\partial X_w}{\partial y_1} = \frac{Z_w \cos \varphi_1}{f_1 \sin(\alpha + \varphi_1)} \\ \frac{\partial X_w}{\partial y_2} = \frac{Z_w \cos \varphi_2}{f_2 \sin(\beta + \varphi_2)} \end{cases} \quad (3)$$

设像点坐标提取误差  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta y_1 = \Delta y_2 = \delta$ , 由坐标提取误差引起的空间物点坐标测量误差为

$$\Delta_{xy} = \delta \sqrt{\sum_i \left[ \left( \frac{\partial X_w}{\partial i} \right)^2 + \left( \frac{\partial Y_w}{\partial i} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z_w}{\partial i} \right)^2 \right]}, \quad (4)$$

式中  $i$  代表像点坐标  $x_1, x_2, y_1, y_2$ 。

在系统有效视场内某一固定工作距离处  $Z_w = 600$  mm, 由(3)式和(4)式可得此位置上的物点坐标测量误差  $\Delta_{xy}$  随水平视场  $\varphi_1, \varphi_2$  和垂直视场  $\phi_1, \phi_2$  的变化关系,如图 4,图 5 所示。

图中像点提取误差  $\delta = 0.012$  mm, 光轴倾角  $\alpha = \beta = 45^\circ$ , 焦距  $f_1 = f_2 = 100$  mm, 基线距离  $d = 1000$  mm。图 4 中,垂直视场角  $\phi_1 = \phi_2 = 0^\circ$ , -○- 线

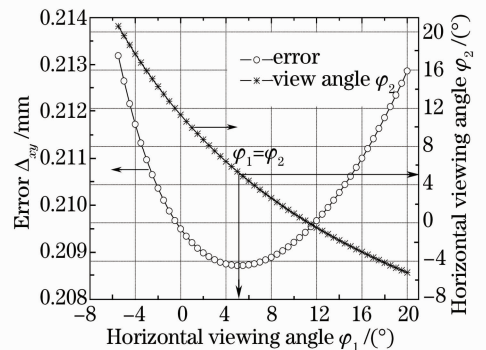


图 4 坐标测量误差随水平视场的变化

Fig. 4 Error distribution features vary with the horizontal viewing angle

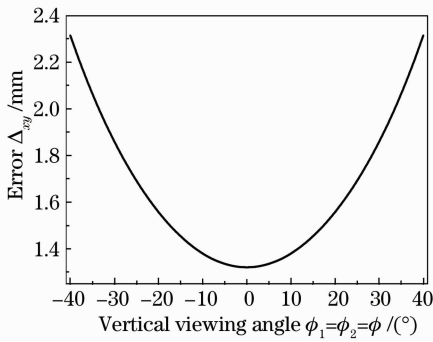


图5 坐标测量误差随垂直视场的变化  
Fig.5 Error distribution features vary the vertical viewing angle

代表测量误差  $\Delta_{xy}$  随水平视场角  $\varphi_1$  的变化，- \* - 线表示水平视场角  $\varphi_2$  的变化。从图中可以看出，对于一定工作距离上的点，当两水平视场角  $\varphi_1 = \varphi_2$  时，此处的坐标测量误差有最小值，即位于基线中垂线上的点误差最小，随着往有效水平视场边缘移动，误差逐渐增加，在有效水平视场边缘处，误差达到最大。

图5中，水平视场角  $\varphi_1 = \varphi_2 = 20^\circ$ 。可以看出，坐标测量误差随垂直视场角的增加而变大，当垂直视场为  $0^\circ$  时，误差最小，精度最高。因此，在实际测量中，为了降低测量误差，尽量使被测物体置于有效视场中心位置。

### 3.4 基线长度和工作距离对测量误差的影响

当光轴倾角相等 ( $\alpha = \beta = 45^\circ$ )，焦距  $f_1 = f_2 = 100 \text{ mm}$ ，工作距离  $Z_w = 600 \text{ mm}$ ，考虑水平面内的物点，垂直视场  $\phi_1 = \phi_2 = 0$ ，水平视场  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ ，由(1)式得  $X_w = 0$ ，

$$Z_w = \frac{d}{2 \cot \alpha}$$

令  $k = d/Z_w$ ，则有

$$\alpha = \arccot \frac{k}{2}$$

由(3)式和(4)式得坐标测量误差为

$$\Delta_{xy} = \delta \cdot \sqrt{(\Delta Y_w)^2 + (\Delta Z_w)^2} = \frac{\delta \cdot Z_w}{f} \left(1 + \frac{k^2}{4}\right) \sqrt{\frac{2}{k^2} + \frac{1}{2}} \quad (5)$$

图6为坐标测量误差  $\Delta_{xy}$  与参数  $k$  ( $k = d/Z_w$ ) 的关系，图中像点提取误差  $\delta = 0.012 \text{ mm}$ 。从图中可以看出，当  $k$  在  $0.5 \sim 3$  之间取值时，综合坐标测量误差较小；当  $k < 0.5$  即 ( $d < 0.5 Z_w$ ) 时，随着  $k$  的减小，误差迅速增加；当  $k > 3$  即 ( $k > 3 Z_w$ ) 时，误差随  $k$  增加而增加。因此，在设计双 CCD 交会测量系统时，基线长度  $d$  在  $0.5 Z_w \sim 3 Z_w$  之间取值为宜。但是在具体应用中，当目标工作距离较大时，由于受

到空间几何结构的限制，基线长度很难保证在上述区间内取值。另外，基线长度还受光轴倾角、视场大小等结构参数的约束，因此在实际设计中，不能只考虑单一参数的影响，应该综合考虑各种参数，合理取舍折中，以使设计达到最优化。

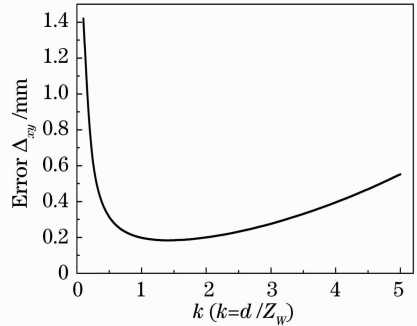


图6 坐标测量误差与参数 k 的关系  
Fig.6 Error distribution of with structural k

## 4 结 论

分析并仿真了双 CCD 交会测量系统的结构参数对坐标测量精度的影响以及有效视场内不同位置处点的误差分布。为了降低坐标测量误差，获得毫米甚至微米量级的高精度，宜选用长焦距镜头，且两 CCD 呈对称结构放置，光轴倾角大小一般控制在  $30^\circ \sim 70^\circ$  之间。基线长度是一个重要结构参数，受到光轴倾角等参数的约束，因此其对坐标测量精度的影响较为复杂，一般控制在  $0.5 \sim 3$  倍工作距离之间为宜。这对于工作距离较近的情况容易满足，但是当工作距离远时，必须综合考虑双 CCD 视觉传感器的几何尺寸限制等因素，以使设计达到最优化。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Huayong, Lü Haibao. Optimization on structure parameters of intersection measuring system with dula-CCD[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(4): 348~351
- 2 杨华勇, 吕海宝. 双 CCD 交汇测量系统结构参数的优化设计[J]. *光学技术*, 2001, **27**(4): 348~351
- 3 Yubo Guo, Yu Yao, Xiaoguang Di. Research on structural parameter optimization of binocular vision measuring system for parallel mechanism[J]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006, **6**: 1131~1135
- 4 Yan Shuhua, Lü Haibao, Zhou Weihong et al.. Modeling and optimal design of double-CCD Vision sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(4): 30~34
- 5 颜树华, 吕海宝, 周卫红等. 双 CCD 视觉传感器的建模及优化设计[J]. *光电工程*, 2000, **27**(4): 30~34
- 6 Zhou Xuebin, Yang Xueyou, Yang Nan et al.. Optimal design and technical study of stereoscopic visual sensor [J]. *Computer Measurement & Control*, 2007, **15**(6): 831~833
- 7 周学斌, 杨学友, 杨楠等. 立体视觉传感器优化设计技术研究[J]. *计算机测量与控制*, 2007, **15**(6): 831~833
- 8 Qiong Liu, Xiansheng Qin, Shenshun Yin. Structural parameters

- optimal design and accuracy analysis for binocular vision measure system [C]. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008, **7**: 156~161
- 6 Wu Zhangliang, Hu Penghao, Lu Rongsheng *et al.*. Design method of structural parameters of binocular visual sensor [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, **24**(3): 35~37  
吴彰良, 胡鹏浩, 卢荣胜等. 一种双目视觉传感器结构参数设计方法 [J]. *传感器技术*, 2005, **24**(3): 35~37
- 7 Yan Long, Zhao Zhengxu, Zhou Yiqi. Accuracy analysis and configuration design of stereo photogrammetry system based on CCD [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2008, **29**(2): 410~413  
闫 龙, 赵正旭, 周以齐. 基于 CCD 的立体视觉测量系统精度分析与结构设计研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(2): 410~413
- 8 Zhu Xiaoming, Gao Zhiyun. Theoretic research on double-CCD stereoscopic system [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 298~300  
朱效明, 高稚允. 双 CCD 立体视觉系统的理论研究 [J]. *光学技术*, 2003, **29**(3): 298~300
- 9 Zhang Guangjun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2006  
张广军. *机器视觉* [M]. 北京: 科学出版社, 2006
- 10 Fei Yetai. *The Theory of the Error and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 102  
费业泰. *误差理论与数据处理* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 102