

文章编号:1002-2082(2016)04-0584-06

基于线阵 CCD 的二维基准大视场传递方法研究

习 超¹, 邓年茂¹, 王海青¹, 肖茂森², 陆卫国²

(1. 北京控制与电子技术研究所, 北京 100038;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘 要:为实现快速定位定向的要求,利用线阵 CCD 测量方法,设计了二维基准传递系统,实现北斗定向信息实时传递功能。该系统由北斗定向天线、光源模块和光学测量模块等组成,采用 N 型目标光源和线阵 CCD 拼接技术,实现二维基准信息的快速精确传递。利用构建的二维基准传递系统设计精度验证实验,实验结果表明,在测量距离 8 m 条件下,该系统测角范围为 $\pm 1.5^\circ$,测量精度在 $5''$ 以内。该方法为实现二维定向基准的大视场传递提供了一种有效的技术解决措施。

关键词:光学测量;大视场;拼接;线阵 CCD;N 型目标光源

中图分类号:TN206

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0403005

Two-dimensional reference large-field transfer method by linear CCD

Xi Chao¹, Deng Nianmao¹, Wang Haiqing¹, Xiao Maosen², Lu Weiguo²

(1. Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 100038, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068, China)

Abstract: To realize locating and heading determination fast, a two-dimensional reference transfer system was proposed which can achieve real-time transferring of heading determination information for Beidou satellite navigation system (BDS) by linear charge coupled device (CCD). This system consists of the BDS heading determination aeriels, the light source part, the optical measuring part and so on. It can realize 2D measurement rapidly and accurately by using the N shape light source and linear CCD splicing technology. A precision testing experiment was designed based on the 2D reference transfer system. The test results shows that on the condition of 8m measuring distance, the measuring range is $\pm 1.5^\circ$, and the measuring accuracy is no more than $5''$. This system provides an effective technical solution for 2D determination heading reference wide-field transferring.

Key words: optical measurement; large field; splicing; linear CCD; N shape light source

引言

根据现代战争的突发、快速、多变等性质,对武器系统提出了“快速反应”和“实战化”要求,要求运载车能够在阵地或行进过程中对自身进行快

速定位定向。随着电子技术、卫星技术、计算机技术的进步,卫星定位导航技术已经成为世界上各主要大国和国际组织竞相发展的前沿技术和显示实力的重要依托。北斗卫星产业是国家大力发展

收稿日期:2016-01-13; 修回日期:2016-02-27

基金项目:总装预研基金资助

作者简介:习超(1991—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事定位定向和光电技术方面的研究工作。

E-mail: xichao@buaa.edu.cn

的领域,将其应用在武器系统中也是一个重要的发展趋势。北斗卫星系统除了用来精确定位外,还能够提供高精度的定向信息,将其应用在武器系统的定位定向方面,能够快速提供高精度的真北方位信息,提高武器系统的机动性。

利用北斗定向算法可得到双天线连线在当地东北天坐标系中的方位角和俯仰角,需要通过光学方法将此二维基准引出,针对这一情况,提出了一种基于线阵 CCD 的二维基准传递方法,用于在运载车上实现北斗定向基准信息的实时传递。

1 CCD 二维测量原理

CCD 按照光敏元阵列的排列不同可分为线阵 CCD 和面阵 CCD 两种。线阵 CCD 的优点是一维像元数多,像元尺寸灵活,测量范围大,帧幅数高,适用于一维动态目标的测量。面阵 CCD 的优点是可以获取二维图像信息,测量图像直观^[1]。缺点是像元总数多,而每行的像元数一般较线阵少,帧幅数受到限制。在二维角度测量方面,线阵 CCD 和转动装置的价格比相同采集效果的面阵 CCD 要低很多,同时配合分辨率比面阵 CCD 高的光栅,可使测量效果优于面阵 CCD。综合比较,线阵 CCD 在要求图像分辨率和大视场等应用场合具有较大的优势。而采用两片线阵 CCD 来获取二维角度信息,无法克服十字丝目标的零位盲区问题,将光线分解成相互垂直的两条光路,会使光学设计和控制电路变得复杂^[2-5]。为了简化系统的光学机械结构,提出一种采用线阵 CCD 器件,结合 N 型目标光源进行二维准直测量的方案,采用 CCD 拼接技术进一步满足大视场高精度的要求。

1.1 N 型目标光源二维测量原理

在小角度精密测量中,利用增维测量原理,通过改变目标光源的形状可以实现基于单片线阵 CCD 的二维角度测量。基于 N 型目标光源测量原理如图 1 所示,图 1(a)为 N 型光源在参考零位时的示意图,图 1(b)为 N 型光源发生二维偏移时的示意图。

假设 WE 为线阵 CCD,方向设为沿 x 轴方向,其中垂线设为 y 方向,当 N 型目标光源的中心 O 位于坐标原点时为初始参考位置,此时与 CCD 的

交点分别为 A, O, B, N 型光源三条边所形成的交点为 C, D , 设 $\angle ACO = \alpha$, $AO = OB = d$, 当 N 型目标光源在 xy 坐标平面内发生位移并旋转后,其与线阵 CCD 的交点变为 A', O', B' 。过 O 点作 x 轴的平行线与 N 型目标光源交于 A'', B'' 点,当目标光源发生偏转时, $A'O' > O'B'$, 向右偏转时, $A'O' > O'B'$, 向左偏转时, $A'O' < O'B'$, 由此可以判断 N 型目标光源旋转角度 β 取值:

$$\begin{cases} \beta = \arcsin \frac{d}{A'B'} & (A'O' - O'B' \geq 0) \\ \beta = 180^\circ - \arcsin \frac{d}{A'B'} & (A'O' - O'B' < 0) \end{cases} \quad (1)$$

由 A'' 点作 x 轴的垂线, 易得 $A''F$ 即为 N 型目标光源在 x 轴上的偏移量 x' , $A''F$ 即为 N 型目标光源在 y 轴上的偏移量 y' , 其关系式如下:

$$\begin{cases} x' = \left(\frac{A'O'}{\sin \alpha} - \frac{d}{\sin \alpha \sin \beta} \right) \sin(180^\circ - \alpha - \beta) \cos \beta \\ y' = \left(\frac{A'O'}{\sin \alpha} - \frac{d}{\sin \alpha \sin \beta} \right) \sin(180^\circ - \alpha - \beta) \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

由此得到了 N 型目标光源在二维平面内的位移和旋转角度。

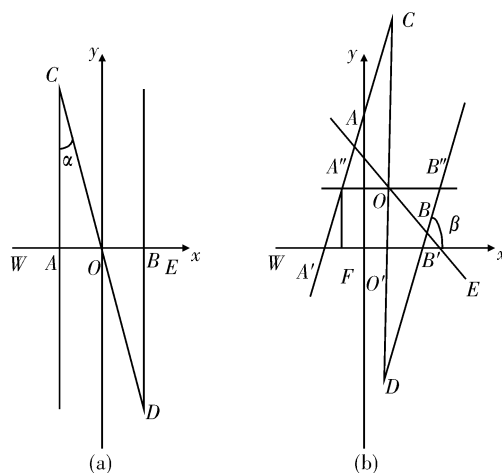


图 1 N 型目标光源二维测量原理

Fig. 1 Two-dimensional measuring principle using N shape light source

1.2 线阵 CCD 拼接技术

为了提高光学系统分辨率和扩大视场,可采用缩小像元尺寸、增大像元数的方法,由于现有 CCD 的像元数有限,不能满足覆盖大视场的要求,需要对其进行拼接。CCD 拼接主要有机械拼接和

光学拼接。机械拼接是将 CCD 器件首尾搭接,由于普通 CCD 器件都有封装结构,有一定的几何尺寸,直接拼接时 CCD 器件之间会产生缝隙,成像时有盲区,无法达到无缝隙拼接的目的。光学拼接是通过光学系统分光的方法进行 CCD 拼接,主要有光束分光和光路分光两种形式^[6-10]。光束分光的成像系统是一种两次成像系统,将一次像面上的光分成多束,再通过透镜将各束光分别成像在第二像面上,从而组成大视场。光路分光是通过分光棱镜把光路分成多路,利用棱镜的分光形成一对光程相等的共轭面,把 CCD 放在这一对等光程的共轭面上进行搭接,从而形成大视场。

本系统采用光路分光的方式对线阵 CCD 进行拼接,分光棱镜选取半透半反式,通过合理选择光源可以弥补光能利用率低的不足,易于拼接和装配,具有很高的精度。系统实现的重点是要保证透射光与反射光等光程,从而保证 CCD 的共面性和光学系统的成像质量。

2 系统组成及工作原理

系统组成如图 2 所示,主要由天线、光源模块和光学测量模块组成。天线 A 与光学测量模块固

连,天线 B 与光源模块固连,利用北斗定向算法可以得到天线 A、B 的相位中心连线相对北向的夹角。天线 A、B 的相位中心一般固定于天线上的某一点。

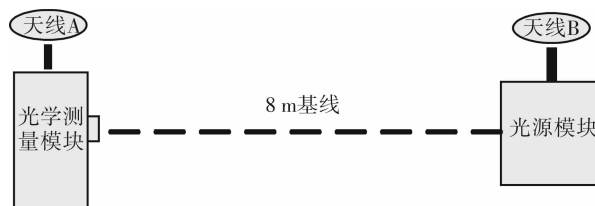


图 2 北斗定向传递装置组成

Fig. 2 Constitution of BDS determination transferring system

当天线 A、B 之间的相对位置发生变化时,基线发生相应的变化(即北向信息发生改变),引起 N 型目标在二维平面内发生偏转,N 型目标图像与线阵 CCD 相交的三点位置会发生变化。根据这三点位置信息可以得出 N 型目标的二维偏移量和旋转角度,进而得到天线基线方向的变化信息,实现对基准信息传递的目的,系统工作原理如图 3 所示。本系统测量条件为光源模块距成像镜头 8 m,光源目标对应视场张角不小于 1° ,镜头视场不小于 $\pm 1.5^\circ$ 。系统设计主要分为 N 型光源目标设计和 CCD 拼接方案设计。

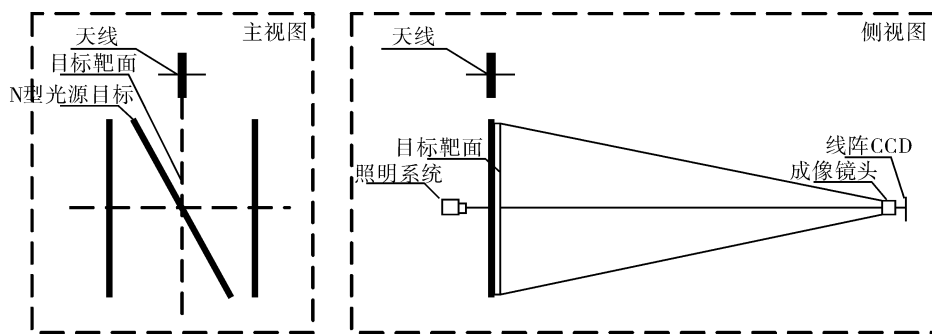


图 3 N 型光源目标系统工作原理

Fig. 3 Working principle of N shape light source system

2.1 N 型光源目标设计

实际使用中,系统需要对光源模块的二维偏移坐标进行测量,本方案采用“N”字形图案的光源目标以及线阵 CCD 实现该系统的二维坐标测量。选用 TCD1501D 线阵 CCD,像元尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,像元数 5 000,接收靶面大小为 35 mm,光学系统焦距为 300 mm,工作距离为 8 m。按照一般成像原则,N 型光源目标标识单线宽度至少应占 3 个像元大小,由横向放大倍率计算公式:

$$\beta = \frac{d'_N}{d_N} = -\frac{f}{x} \quad (3)$$

当 $d'_N = -3 \times 7 \mu\text{m} = -21 \mu\text{m}$, $f = 300 \text{ mm}$, $x = 8 \text{ m}$,那么单线宽度 $d_N \geq 0.56 \text{ mm}$,取 $d_N = 2 \text{ mm}$ 。

为保证在测量范围内任意位置均能完成一维转二维的测量,光源模块的 N 型刻画采用不封口的形式。照明系统照亮光源模块的 N 型目标,通过光学成像镜头使 N 型目标成像到线阵 CCD 上。考虑光源目标对应视场张角不小于 1° ,则光源目标的长度不小于 13.96 cm;考虑镜头视场不小于 $\pm 1.5^\circ$,则对应的测量范围为 $\pm 8 \text{ m} \times \tan 1.5^\circ = \pm 209.5 \text{ mm}$ 。

单个像元对应的 x 方向的分辨率 Δx 为 $\pm 0.19 \text{ mm}$, 当要求 y 方向的分辨率 $\Delta y \leq 1 \text{ mm}$ 时, 可得 N 型光源斜线与竖线夹角 $\alpha \geq \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) = 10.76^\circ$ 。

综合以上因素, N 型光源目标选取的尺寸如表 1 所示。

表 1 N 型光源目标尺寸

Table 1 Size of N shape light source

| N 型长度/mm | N 型宽度/mm | N 型斜线与竖线夹角 / ($^\circ$) | 测量区域/mm ² |
|----------|----------|---------------------------|------------------------------|
| 200 | 100 | 21.038 | $\pm 209.5 \times \pm 209.5$ |

2.2 CCD 拼接方案设计

为满足测量区域 $\pm 209.5 \text{ mm} \times \pm 209.5 \text{ mm}$ 的要求, 采用单线阵 CCD 不能满足要求, 需进行 CCD 拼接。为保证垂直方向上对物方实现不小于 $\pm 1.5^\circ$ 成像测量, 光学系统应至少取视场角为 $\pm 1.5^\circ \times \sqrt{2} = 2.2^\circ$, 为给成像留有充分余量, 设计光学系统视场角为 2.4° 。在水平方向, 按照视场

和焦距计算的接收器大小为 $2 \times 300 \times \tan 2.4^\circ = 25.15 \text{ mm}$, 选用的 TCD1501D 线阵 CCD 接受靶面大小为 35 mm , 符合要求; 在竖直方向, 200 mm 长 N 型光源对应成像大小为 7.5 mm , 考虑线阵 CCD 的封装结构限制, 直接采用两块线阵 CCD 拼接不能满足要求, 提出一种三线阵 CCD 共轭拼接方式完成大视场成像测量的方案。

线阵 CCD 拼接成像测量光路如图 4 所示。在成像光路中, 3 个线阵 CCD 与有限距光源目标 (N 型, 工作距离为 8 m) 共轭成像, 通过共用部分光学系统及分光棱镜将系统分为两路, 其中一路为成像光路 A, 另外一路为成像光路 B, 该光路中用 2 个 CCD 线阵探测器, 两者的中心位置均相对于光轴有 5.7 mm 的平移, 该平移距离对应于物方的 152 mm , 与成像光路 A 中无偏移线阵 CCD 共同完成物方 $\pm 209.5 \text{ mm} \times \pm 209.5 \text{ mm}$ 区域内的成像测量; 设计中保证两路 CCD 焦面均与光源目标共轭, 即实现三线阵共轭拼接, 满足了成像测量对视场的要求。

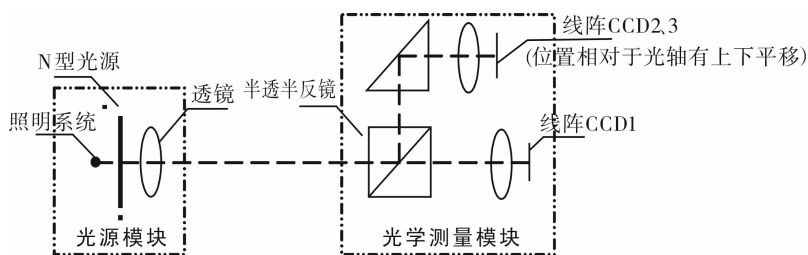


图 4 CCD 拼接成像测量光路

Fig. 4 Optical path of CCD splicing imaging measurement

3 实验设计及验证结果

利用多齿分度台、精密升降台等设备, 按照系统设计要求搭建实验平台, 光源模块距成像镜头 8 m , 光源目标对应视场张角不小于 1° , 镜头视场不

小于 $\pm 1.5^\circ$ 。选用 TCD1501D 线阵 CCD, 像元尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$, 像元数 5000 , 接收靶面大小为 35 mm 。标定设备选用精度为 $1''$ 的准直经纬仪, 实验平台如图 5 所示。

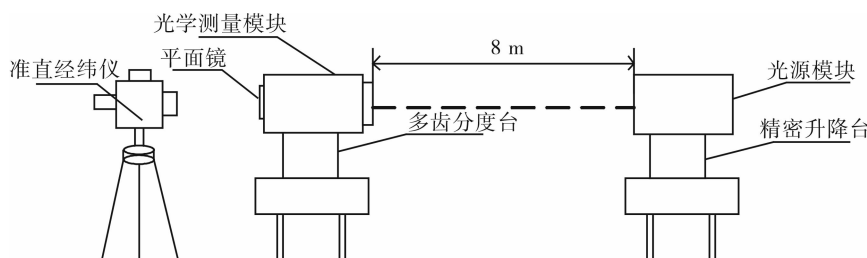


图 5 精度验证实验平台

Fig. 5 Platform of precision testing experiment

按图 5 所示架设光学基准传递装置。光学测量模块放置在多齿分度台上, 光源模块放置在精

密升降台上,二者距离 8 m。启动光学基准传递装置,通过调节光源模块与光学测量模块的相对位置,使得系统输出的方位向和俯仰向的像元坐标值为校零时的值,将准直经纬仪对准固定在光学测量模块上的平面镜。转动多齿分度台,每次转动 $10'$,正负转动 $30'$,记录经纬仪的方位值和俯仰值,调节光学测量模块的俯仰,每次调节约 $10'$,重复以上步骤,完成系统标定,标定结果如图 6 和图 7 所示,方位向和俯仰向分别记录 49 组数据,可得到像元坐标与对应角度的重复性较好,同时像元坐标与偏转角度间具有良好的线性关系。

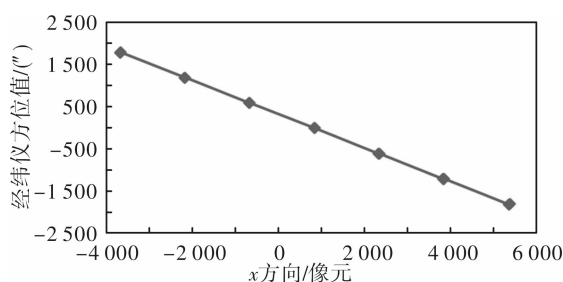


图 6 经纬仪标定结果(方位向)

Fig. 6 Calibrating result of theodolite(direction)

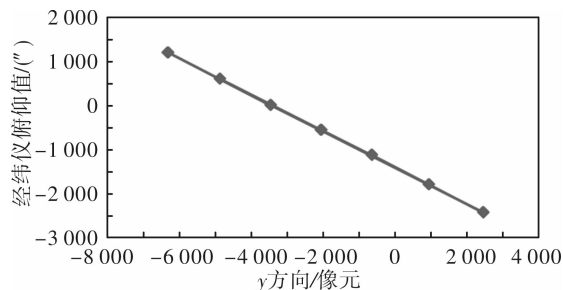


图 7 经纬仪标定结果(俯仰向)

Fig. 7 Calibrating result of theodolite(pitching)

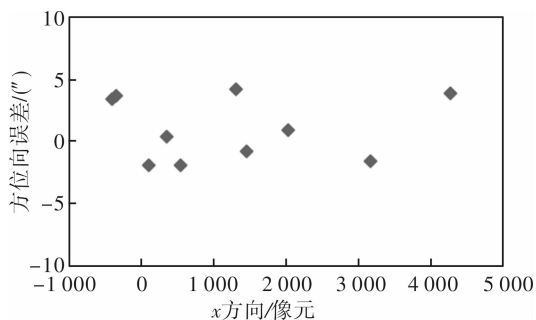


图 8 不同位置的测量误差(方位向)

Fig. 8 Measuring errors of different positions(direction)

标定完成后,调节光学测量模块的位置,选择不同的方位值和俯仰值,根据标定结果计算光学基准传递装置的拟合值,同时记录经纬仪的俯仰值和方位值,并计算两者之差,得到系统测量误差

如图 8 和图 9 所示,可得系统的测量精度在 $5''$ 以内。

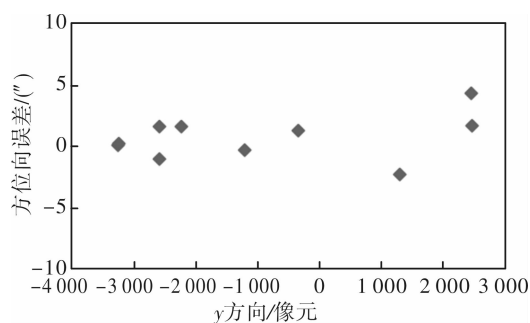


图 9 不同位置的测量误差(俯仰向)

Fig. 9 Measuring errors of different positions(pitching)

4 结论

针对车载北斗定向基准传递问题,本文提出一种利用线阵 CCD 实现大视场二维角度测量的方案。采用 N 型目标光源和线阵 CCD 共轭拼接技术,实现了大视场二维测量。本系统在测量距离 8 m 条件下,光源目标对应视场张角不小于 1° ,测角范围可达到 $\pm 1.5^\circ$,测量精度在 $5''$ 以内,能够实现北斗定向信息的实时传递,满足武器系统的快速定位定向需求,为实现二维定向基准大视场传递提供了一种有效的技术解决措施。

参考文献:

- [1] Gan Junhong, Zou Jiugui, Ji Guoding. Application of surface array CCD in two axis autocollimator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008,37(sup):60-62. 甘俊红,邹九贵,季国定. 面阵 CCD 在双轴自准直仪中的应用[J]. 红外与激光工程,2008,37(增刊):60-62.
- [2] Ma Fulu, Zhang Zhili, Zhou Zhaofa. Single linear CCD linearity collimator based on M shape reticule[J]. Optical Technique, 2002,28(3):224-227. 马福禄,张志利,周召发. 基于 M 型分划丝的单线阵 CCD 直线度准直仪[J]. 光学技术,2002,28(3):224-227.
- [3] Ou Tonggeng, Fu Huiqing. Analysis and comparison of the photoelectric autocollimator reticules[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(5):50-53. 欧同庚,傅辉清. 光电自准直仪中分划丝的分析 and 比较[J]. 光学与光电技术,2004,2(5):50-53.
- [4] Bian Zhenglan, Gao Min, Dong Zuoren, et al. Two-

- dimensional dynamic photoelectric autocollimator based on single linear CCD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(sup):173-176.
- 卞正兰,高敏,董作人,等. 基于单线阵 CCD 的二维动态光电自准直测角仪[J]. 红外与激光工程,2009, 38(增刊):173-176.
- [5] He Shurong, Zhang Le, Bao Peng. Study on utilizing only one linear CCD array to measure two orthogonal displacements of two-dimensions stage[J]. Optical Technique, 2003, 29(6):710-712.
- 何树荣,张乐,鲍鹏. 采用单线阵 CCD 测量工作台二维位移的研究[J]. 光学技术,2003,29(6):710-712.
- [6] Bai Zhao, He Junfeng, Yuan Qi, et al. Improving image stitching accuracy for double CCD[J]. Journal of Applied Optics, 2010,31(6):918-921.
- 白钊,贺峻峰,原琦,等. 一种提高双 CCD 图像拼接精度的方法[J]. 应用光学,2010,31(6):918-921.
- [7] Dai Ruiqing. Research on the high precision measurement based on mechanical splice technology of linear array CCD [J]. Sensor World, 2011(9):15-21.
- 戴锐青. 线阵 CCD 机械拼接技术的高精度测量研究[J]. 传感器世界, 2011(9):15-21.
- [8] Yu Jianjun, Duan Jiayou. Application of connecting technology in linear array CCD[J]. Journal of Applied Optics, 2003,24(1):38-39.
- 余建军,段嘉友. 线阵 CCD 拼接技术的应用[J]. 应用光学,2003,24(1):38-39.
- [9] Ni Xiaofang, Wu Pinghu. Study on target dimension measurement using linear CCD[J]. Optical Instruments, 2011,33(6):11-13.
- 倪小芳,吴平辉. 利用线阵 CCD 对物体尺寸测量的研究[J]. 光学仪器,2011,33(6):11-13.
- [10] Meng Qinghua. Structure design of stitching instrument for area CCD[J]. OME Information, 2010,27(11):32-35.
- 孟庆华. 面阵 CCD 拼接仪结构设计[J]. 光机电信息,2010,27(11):32-35.