

文章编号 1004-924X(2014)05-1274-06

斜视航空相机的斜距离焦补偿

刘 波^{1,2*}, 贾继强¹, 丁亚林¹, 苏东风¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学与测量重点实验室, 吉林 长春, 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对斜视航空相机成像时产生的离焦,设计了相应的调焦机构以补偿斜距离焦量。分析了斜距离焦原理,得出了斜距离焦补偿量的计算公式,并提出采用凸轮机构对斜距离焦量进行补偿。考虑传统的基于偏心凸轮的斜距调焦机构的理论模型具有数学近似的缺点,设计了理论模型没有进行数学近似的基于圆柱凸轮的斜距调焦机构。由于斜距调焦机构设计时是基于某一典型高度,当相机工作于其他高度时会产生剩余离焦量,文中分析了剩余离焦量产生的原因、处理方法和处理流程,从而使斜距离焦量在相机所有工作高度和扫描角范围内均得到补偿,为相机获得高质量图像提供了条件。最后,在实验室利用平行光管模拟了不同物距的成像,验证了提出的斜距调焦机构的有效性和准确性。

关键词:航空相机;斜距离焦;凸轮;剩余离焦量;补偿

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1274

Oblique distance defocus compensation for oblique photographic airborne camera

LIU Bo^{1,2*}, JIA Ji-Qiang¹, DING Ya-Lin¹, SU Dong-Feng¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: liubo1985@gmail.com

Abstract: For defocus generated during imaging from an oblique photographic airborne camera, a corresponding focusing mechanism was designed to compensate oblique distance defocus for high imaging quality. The principle of oblique distance defocus was analyzed, the formula of defocus compensation was obtained and a cam mechanism was proposed to compensate the defocus. A focusing mechanism based on a cylindrical cam was designed to replace the traditional focusing mechanism based on eccentric cam, in which the theoretically mode is exact instead of proximal. As the oblique distance defocus system was designed based on a typical height, the residual defocus would be emerged at other heights. The cause of residual defocus was analyzed. The process method and process flow were developed to eliminate the residual defocus. All amount of oblique distance defocus were compensated in all heights and scan angles. Camera imaging simulation with different objects in laboratory approves the validity and accuracy of the proposed focusing mechanism.

收稿日期:2013-11-12;修订日期:2014-01-07.

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目(No. O70Y32R070)

Key words: airborne camera; oblique distance defocus; cam mechanism; residual defocus; compensation

1 引言

航空相机是装载在飞机上用来拍摄地表目标的光学遥感器,具有机动性好、时效性高、目的性强、分辨率高、投入较低等优点,被广泛用于资源普查、地形测绘、军事侦查等领域。其中,远距离倾斜成像(Long Range Oblique Photography, LOROP)相机由于成像距离远,覆盖宽度大,分辨率高,在高空远距离侦查中应用广泛,如Goordrich公司的DB-110相机,Raytheon公司的全球鹰相机和ROI公司的CA295相机等^[1-5]。对于倾斜成像的航空相机来说,由于成像过程中照相距离不断变化,其焦面位置也不断变化。如果焦面位置偏离过大,超过系统半焦深,相机图像清晰度和分辨率就会下降。为了保证高质量的成像效果,必须有相应的焦面调整机构,以保证在不同斜距照相时的焦面处于正确位置。

由于倾斜成像过程中的焦面位置变化是一个连续过程,采用伺服控制的方法会对系统的控制提出很高要求,因而斜距调焦大多采用机械方法。如KA-112A相机采用的是偏心轮的方式实现斜距调焦^[6],在设计时对其进行了数学近似,如果设计不当,加上加工、装调等产生的误差,实际的调焦精度可能不高。

本文在分析斜距调焦原理的基础上,介绍了传统的基于偏心凸轮的调焦机构,提出了基于圆柱凸轮的调焦机构,并对剩余离焦量进行处理,最后在实验室条件下对基于圆柱凸轮的斜距调焦机构进行了验证。

2 斜距调焦原理

根据几何成像公式可知:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

其中: l 为物距, l' 为像距, f 为相机焦距。只有当物距为无限远时像距才等于焦距,物距小于无限远时,像距大于焦距,也就是说当照相距离减小时,像面向远离镜头的方向移动。

对于倾斜照相的航空相机,照相距离为斜

距。不同的斜距所对应的像面位置不同,如果斜距变化时焦面位置不变,就会造成离焦。定义相机扫描角为相机光轴与水平方向的夹角,则相机的斜距可以由飞行高度和相机的扫描角确定。

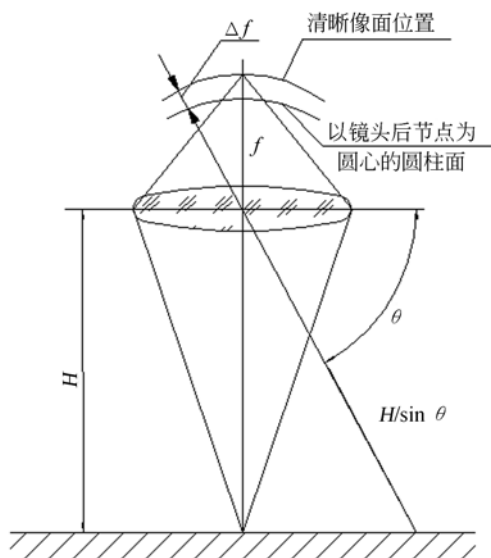


图1 倾斜照相示意图

Fig. 1 Sketch map of oblique imaging

如图1所示,当相机工作高度为 H 时,照相距离为 $H/\sin\theta$,即物距。定义 Δf 为清晰像面位置与焦距之间的距离(即离焦量),则根据几何成像公式有:

$$\frac{1}{H/\sin\theta} + \frac{1}{f + \Delta f} = \frac{1}{f}. \quad (2)$$

考虑到 $H \gg f$,则:

$$\Delta f \approx \frac{f^2}{H} \sin\theta. \quad (3)$$

式(3)即为斜距离焦补偿量的计算公式。由公式可知在焦距 f 一定的情况下由斜距变化引起的离焦量 Δf 是高度 H 和扫描角 θ 的函数。高度 H 越大,离焦量越小。扫描角 θ 越大,离焦量越大。

对于摆扫倾斜成像的航空相机,在一个成像周期内的扫描角是连续变化的,因而由斜距产生的离焦量也是连续变化的。为了补偿离焦量,需要设计相应的斜距调焦机构。在机械设计中,凸轮机构常用于实现各种复杂的运动。凸轮机构是由机架、凸轮和从动件或从动系统组成的高副

机构。只要适当地设计出凸轮的轮廓曲线,就可使从动件得到各种预期的运动规律,且机构简单紧凑。凸轮机构在各种机械,特别是自动机械和自动控制装置中有着广泛应用。斜距调焦就是用凸轮机构完成的。

3 斜距调焦机构

3.1 基于偏心凸轮的斜距调焦机构^[6-8]

基于偏心凸轮的斜距调焦机构的原理如图 2 所示。设置一圆形的偏心凸轮,把凸轮初始位置相对镜筒在 $\theta=90^\circ$ 的位置上设置一个偏心量 $e=f^2/H$ 。凸轮与相机像面组件或调焦镜组相连。当相机进行倾斜扫描成像时,像面位置不再是一个以镜头后节点为圆心的圆柱面,而是如图所示的偏心圆柱面。由几何关系知,在任意扫描角 θ 处,由偏心量产生的焦距补偿量为:

$$\Delta f = e \sin \theta + \sqrt{r^2 - (e \cos \theta)^2} - r, \quad (4)$$

式中: e 为凸轮相对与镜筒旋转中心的偏心量, r 为偏心凸轮半径, θ 为扫描角。

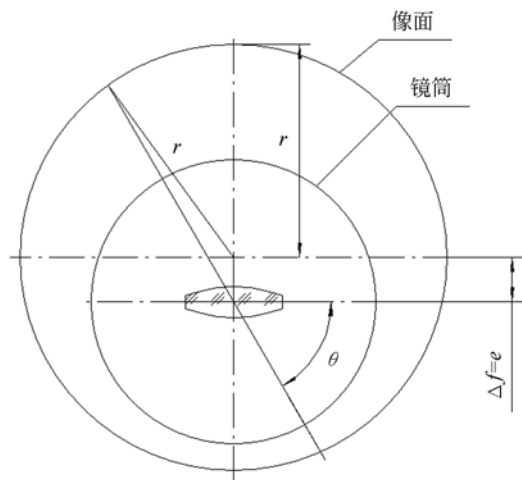


图 2 基于偏心凸轮的斜距调焦原理

Fig. 2 Focusing mechanism based on eccentric cam

实际设计时,一般 $r \gg e$, 故 $\sqrt{r^2 - (e \cos \theta)^2} - r$ 近似为 0, 则:

$$\Delta f \approx e \sin \theta = \frac{f^2}{H} \sin \theta. \quad (5)$$

从上述计算可知,采用偏心凸轮能够实现斜距调焦的补偿。

3.2 基于圆柱凸轮的斜距调焦机构

按凸轮的形状,凸轮机构可分为盘形凸轮和

圆柱凸轮,其中圆柱凸轮是一种空间凸轮机构,在变焦距镜头中经常用到。常用的变焦距镜头结构如图 3 所示,由凸轮、保持架、内筒、导钉等组成^[9-11]。凸轮圆柱面上开出一定规律曲线的槽,保持架上开出直线导槽。当转动凸轮时,导钉沿着保持架的直线导槽移动,同时带动内筒按凸轮曲线的运动规律作直线运动。此过程是把凸轮的旋转运动转化成内筒的直线运动。

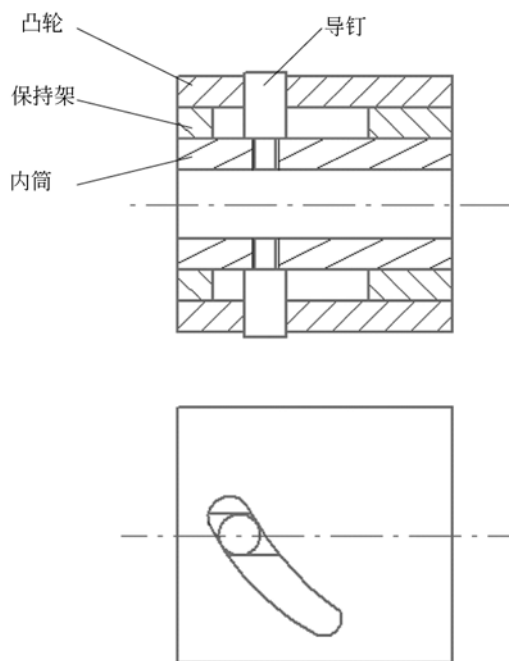


图 3 变焦距镜头结构

Fig. 3 Structure of zoom lens

将上述原理应用到斜距调焦机构中。如图 4 所示,固定环与相机固定部分相连,活动环与相机像面组件或调焦镜组相连,像面组件或调焦镜组置于精密直线导轨上,导钉组件与固定环固定,同时插入活动环的凸轮槽上。活动环上开有一定规律的曲线槽,当相机摆扫成像时,活动环随着旋转,受导钉组件的限制,活动环同时会轴向前后移动,从而带动相机像面组件或调焦镜组前后移动完成斜距调焦过程。活动环上的凸轮曲线槽按照斜距调焦时像面移动的规律加工。为了保证活动环受力均匀,采用两组导钉组件上下对称布置,因而凸轮曲线为:

$$\Delta f = \begin{cases} e \sin \theta & \theta \in [0, \pi] \\ -e \sin \theta & \theta \in [\pi, 2\pi] \end{cases}, \quad (6)$$

其中: $e = \frac{f^2}{H}$ 。凸轮曲线展开如图 5 所示。

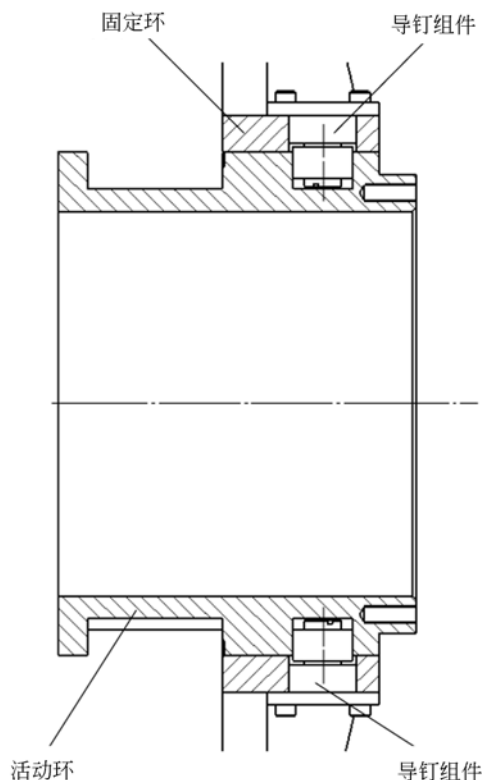


图4 基于圆柱凸轮的斜距调焦机构

Fig. 4 Focusing mechanism based on cylindrical cam



图5 凸轮曲线展开图

Fig. 5 Curve of cylindrical cam

基于偏心凸轮的斜距调焦机构在设计时对式(4)进行了数学近似,而式(6)没有进行数学近似,因而从理论上基于圆柱凸轮的斜距调焦机构比基于偏心凸轮的斜距调焦机构准确。实际上,如果设计不当, $\sqrt{r^2 - (e \cos \theta)^2} - r$ 可能较大,当与相机半焦深相比不能忽略时,基于偏心凸轮的斜距调焦机构的误差就会很大。

从运动转化的方向上看,基于偏心轮的斜距调焦机构是把镜筒的旋转运动转换为镜筒径向的直线运动,而基于圆柱凸轮的斜距调焦机构是把镜筒的旋转运动转换为镜筒轴向的直线运动。具体设计时应该根据安装空间和结构布置选择斜距调焦方式。

4 剩余离焦量的补偿

在设计斜距调焦机构时,其参数 $e = f^2 / H$ 是根据某一典型高度 H_0 来设定的,当相机在此高度工作时,由斜距产生的离焦量能够完全补偿。而实际相机的工作高度是随着需要变化的,因而当相机工作于其他高度时,由斜距产生的离焦量不能够完全补偿,会产生剩余离焦量^[6]:

$$\Delta = \frac{f^2}{H} \sin \theta - \frac{f^2}{H_0} \sin \theta = f^2 \sin \theta \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{H_0} \right). \quad (7)$$

如果相机工作高度范围较大,则工作高度 H 与典型高度 H_0 差距较大时,剩余离焦量仍然可能大于半焦深,这时需要对剩余离焦量进行补偿。

以相机焦距为 1 m,工作高度为 5 000 ~ 12 000 m,相机扫描角为 10°~50°,相机典型高度 $H_0 = 7 000$ m 为例。相机 F 数为 6,中心波长 λ 取 0.58 μm ,则相机半焦深 $\delta = 2F^2\lambda = 0.042$ mm。

根据式(7),得出在不同工作高度,不同扫描角时的剩余离焦量的曲线图。如图6所示,在 $H = 6 000 \sim 11 000$ m,相机在所有扫描角范围内,其剩余离焦量均小于半焦深,在此范围内不需采取措施补偿剩余离焦量。这一高度范围可由下式计算:当 $\theta = 50^\circ$ 时,

$$|\Delta_{\max}| = f^2 \sin 50^\circ \times \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{H_0} \right) \leq \delta. \quad (8)$$

得到 $5 058 \text{ m} \leq H \leq 11 360 \text{ m}$,在这个高度内,所有扫描角内的剩余离焦量均小于半焦深,因此不需补偿。在上述高度之外,扫描角小于某个角度时,其离焦量仍然小于半焦深,但大于这个角度时,离焦量就会超出半焦深。从图6中可以看出, $H = 5 000$ m,扫描角大于 45° 时,剩余离焦量超出半焦深。 $H = 12 000$ m,扫描角大于 43° 时,剩余离焦量大于半焦深。这时就需要通过电控的方法把调焦组件往剩余离焦量反向移动半个焦深的距离补偿剩余离焦量,其控制流程如图7所示。通过这种控制方式,在所有高度范围和扫描角范围的斜距离离焦量都能够得到补偿。

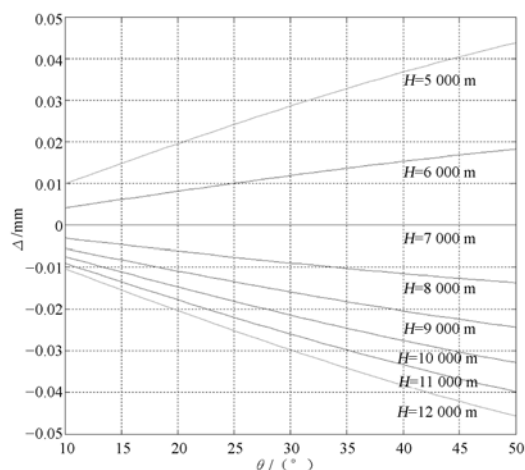


图 6 不同高度下剩余离焦量与扫描角的关系

Fig. 6 Diagram of residual defocus and scan angle

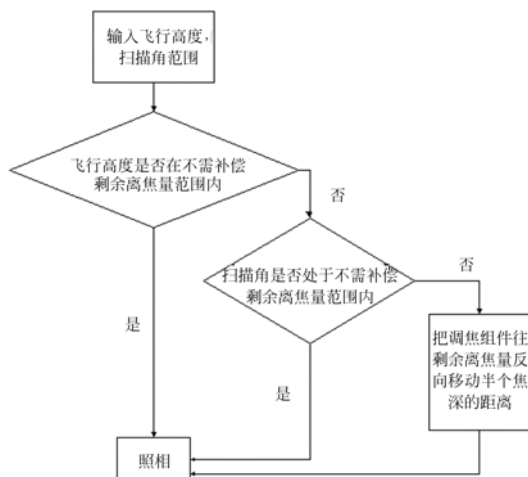


图 7 剩余离焦量补偿流程

Fig. 7 Flow chart of residual defocus compensation

5 实验室成像

在实验室条件下,相机对平行光管成像。调整平行光管像面位置,使平行光管的出射光模拟相机工作的不同斜距,如果相机成像均清晰,则可证明斜距调焦机构的准确性。具体步骤如下:

(1) 相机进行自准直检焦,这时相机像面处于无穷远焦面;

(2) 调整平行光管像面位置至无穷远。把相机镜筒的扫描角调整至 0° 对平行光管成像;

(3) 调整平行光管像面位置,使其出射光对应不同的物距。调整相机的镜筒扫描角,使此时相机的斜距对应平行光管出射光模拟的物距。

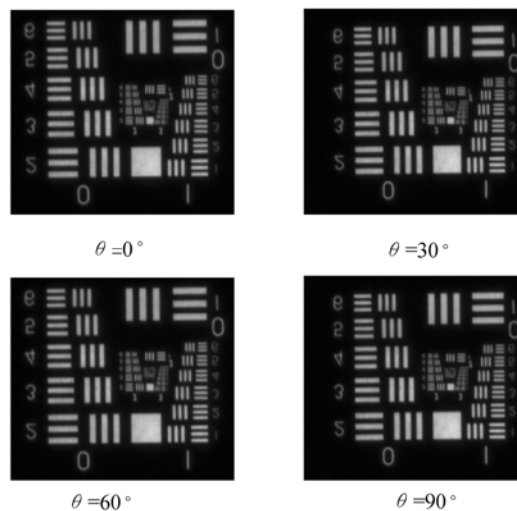


图 8 不同扫描角的鉴别率板图像

Fig. 8 Image of resolution chart in different scan angles

若相机在上述过程中成像均清晰,则证明斜距调焦有效、准确。本文研究的相机参数如第 4 节所述,采用基于圆柱凸轮的调焦机构。图 8 所示为相机扫描角分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° ,平行光管像面位置分别对应无穷远,14 000,8 082 和 7 000 m 时分辨率板的图像。从图中可以看出,图像清晰程度无明显变化。

6 结 论

斜视航空相机成像时由于物距不断变化,其焦面位置也不断变化,因此必须进行斜距离焦补偿。传统的采用偏心凸轮的斜距调焦机构的理论模型具有数学近似的缺点,本文提出了理论模型没有进行数学近似的基于圆柱凸轮的斜距调焦机构。由于斜距调焦机构设计时是基于某一典型高度,当相机工作于其他高度时会产生剩余离焦量。文中在剩余离焦量超过半焦深时采用电控的方法对剩余离焦量进行补偿,使斜距离焦量在相机所有工作高度和扫描角范围内均得到补偿,从而为相机高质量成像提供了保障。

参考文献:

- [1] 刘明,修吉宏.国外航空侦查相机的发展[J].电光与控制,2004,11(1):56-59.
LIU M, XIU J H. Development of oversea aerial reconnaissance camera [J]. *Electronics optics & Control*, 2004, 11(1):56-59 (in Chinese).
- [2] 许永森,田海英.国外传输型航空相机的发展现状与展望[J].光机电信息,2010,27(12):38-43.
XU Y S, TIAN H Y. Trend and development actuality of the real-time transmission airborne reconnaissance camera [J]. *OME Information*, 2010, 27(12):38-43. (in Chinese)
- [3] DAVIS L. The Goodrich 3rd generation DB-110 system; successful flight test on the F-16 aircraft[J]. *SPIE*, 2007, 6546:1-16.
- [4] JAMES K H, BRENDAN H. Robinson. TIER II plus airborne EO sensor los control and image geo location [J]. *IEEE*, 1997, 2:377-405.
- [5] LAREAU A G, PARTYNSKI A J. Dual-band framing cameras; technology and status[J]. *SPIE*, 2000, 4127:148-156.
- [6] 耿立中,安文化,车念曾. KA-112A 全景式航空相机[M]. 北京:中国人民解放军空军司令部情报部,1988.
GENG L ZH, AN W H, CHE N Z. KA-112A *Panorama Airborne Camera* [M]. Beijing: Intelligence branch of PLA air command, 1988. (in Chinese)
- [7] 惠守文.长焦距斜视实时航空相机自动调焦技术研究[D].北京:中国科学院,2003.
HUI S W. *Study of Automatic Focusing Technique for Long Focus Oblique Real-time Aerial Camera* [D]. Beijing: Chinese academy of science, 2003. (in Chinese)
- [8] 惠守文.长焦距斜视实时航空相机离焦补偿[J].光学精密工程,2003,11(2):162-165.
HUI SH W. Compensation for long focus oblique real-time aerial camera being out of focus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):162-165. (in Chinese)
- [9] 王一凡,薛育.一种大口径高精度凸轮变焦机构的设计[J].光学精密工程,2007,15(11):1756-1759.
WANG Y F, XUE Y. Design of heavy caliber and high precision cam-varifocal mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1756-1759. (in Chinese)
- [10] 王平,张葆,程志峰,等.变焦距镜头凸轮结构优化设计[J].光学精密工程,2010,18(4):893-898.
WANG P, ZHANG B, CHENG ZH F, *et al.*. Optimal design of cam structure of zoom lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):893-898. (in Chinese)
- [11] 乔健,曹立华,崔爽,等.连续变焦距镜头结构设计及焦距实时输出分析[J].应用光学,2010,31(4):521-524.
QIAO J, CAO L H, CUI SH, *et al.*. Mechanical design of zoom lens and analysis of its focal length [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4):521-524. (in Chinese)

作者简介:



刘波(1985—),男,江西抚州人,博士研究生,助理研究员。2006、2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航空相机结构设计方面的研究。E-mail: liubo1985@gmail.com



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,1987年于吉林工业大学获学士学位,1994年于东北大学获硕士学位,主要从事航空相机方面的研究。E-mail: dingyl1964@sohu.com