

正组补偿变焦距镜头的焦距输出函数

金春水

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 用于精密跟踪测量的变焦距镜头不同于普通的变焦距镜头, 要求其在变倍过程中实时输出高精度的系统焦距值。本文从几何光学理论出发, 并结合实际变焦距镜头的参数, 讨论了二组元大变倍比正组补偿变焦距镜头的焦距输出函数, 可避免对变焦距镜头实际焦距的逐点标定工作。

关键词: 变焦距系统; 焦距函数

1 概 述

随着图像处理技术及精密加工技术的日益发展, 变焦距电视测量系统在精密跟踪测量领域得到了广泛的应用。变焦距电视测量系统利用其短焦距、大视场实施对目标的捕获, 然后通过连续变倍, 在长焦距实施对目标的高精度跟踪。为了在变倍过程中始终保持对目标的精确测量, 需要变焦距电视测量系统实时输出高精度的系统焦距值, 以保证所计算的脱靶量的准确。为避免对变焦距镜头的实际焦距值作大量的逐点标定工作, 有必要确定其焦距输出的函数形式, 以便利用有限点的焦距实测值, 拟合出变焦距镜头的实际焦距曲线。以下将从几何光学理论出发, 针对实际变焦距镜头的参数, 讨论大变倍比正组补偿变焦距镜头的焦距函数所应具有函数形式, 并给出其函数内各参数的估计方法。

2 变焦距运动过程的讨论

变焦距系统是由变倍组和补偿组的移动(即改变它们之间的空气间隔)来实现焦距的连续变化和像面的稳定。为了使像面稳定, 变倍组和补偿组的移动(即两者的倍率变化)必须满足一定函数关系, 由几何光学理论可知两者必须符合如下方程式:

$$f_3' \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 - \frac{1}{\beta_{3s}} - \beta_{3s} \right) + f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 - \frac{1}{\beta_{2s}} - \beta_{2s} \right) = 0 \quad (1)$$

其中: f_2' —— 变倍组元的焦距;

f_3' —— 补偿组元的焦距;

β_{2_0}, β_{3_0} ——变倍、补偿组元的初始倍率(短焦位置);

β_2, β_3 ——变倍过程中任一位置变倍、补偿组元的倍率。

上式表明了变倍过程中 β_2 和 β_3 之间的约束关系,将上式改写成如下形式:

$$\beta_3^2 - b\beta_3 + 1 = 0 \quad (2)$$

解之得:

$$\begin{cases} \beta_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ \beta_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_{2_0}} + \beta_2 - \beta_{2_0} \right) + \left(\frac{1}{\beta_{3_0}} + \beta_{3_0} \right) \quad (4)$$

变倍组偏离初始状态位置(短焦位置)的移动量 x 可由下式求得:

$$x = f_2' \cdot \left(\frac{1}{\beta_{2_0}} - \frac{1}{\beta_2} \right) \quad (5)$$

上式可进一步表示为:

$$\beta_2 = \frac{\beta_{2_0} \cdot f_2'}{f_2' - k \cdot \theta \cdot \beta_{2_0}} \quad (6)$$

其中: k ——凸轮转动 1° 对应的变倍组移动量;

θ ——凸轮转角。

式(6)反映了凸轮转角与变倍组倍率的变化关系。

从上分析,变倍过程中,对应于变倍组的一个倍率,补偿组有两个倍率 β_{31} 和 β_{32} 满足像面稳定的要求。到底哪一个倍率是系统当前的倍率呢?正组补偿的大变倍比变焦距系统为了实现最速变焦路线,并使外形尺寸紧凑,在短焦时选择 β_{31} 补偿曲线,在 $\beta_2 = -1$ 和 $\beta_{31} = \beta_{32} = -1$ 点实现换根,补偿曲线由 β_{31} 曲线经过切点换到 β_{32} 曲线上来,以便达到补偿曲线保持单调变化,变倍比增长迅速的目的,变倍、补偿曲线如图1所示。实线为补偿组所走的路线。根据补偿组倍率的取段,式(3)可表示为:

$$\beta_3 = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (\beta_2 \geq -1) \quad (7)$$

$$\beta_3 = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (\beta_2 < -1) \quad (8)$$

变焦距镜头的焦距可表示为:

$$f' = f_1' \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \quad (9)$$

其中: f_1' ——前固定组焦距;

β_4 ——后固定组倍率。

已知各组元的焦距及后固定组倍率和变倍组、补偿组在初始状态的倍率,就可利用(6)、(4)、(7)、(8)、(9)式确定变倍过程中任一点的系统焦距的理论值,但很难利用上式表示出具体的焦

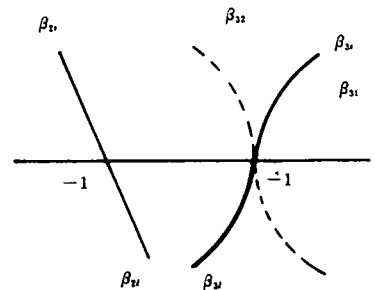


图1 变倍、补偿曲线

Fig.1 Compensating curve

距输出函数。然而,对于此类变焦距系统,以凸轮转角为自变量,必有一固定的焦距函数形式。我们将利用曲线拟合的方法,讨论此类变焦距系统的焦距函数。

3 焦距输出函数的确定

未知函数的曲线拟合,首先应确定此曲线应有的函数形式。在此我们利用正组补偿的 16 倍变焦距系统的初始参数绘制其焦距曲线,并使之与基本函数的曲线相比较,确定此类变焦距系统所应具有焦距输出函数形式,并利用最小二乘法对函数中的参数进行精确地估计。

我们选用的正组补偿的 16 倍二组元变焦距镜头的各参数为: $f_1' = 283.91 \text{ mm}$, $f_2' = -56.00 \text{ mm}$, $f_3' = 91.61 \text{ mm}$, $\beta_{2r} = -0.285$, $\beta_{3r} = -0.367$, $\beta_4 = 2.297$, $k = 0.61 \text{ mm/deg}$ 。

3.1 焦距输出函数形式的确定

①典型变焦距系统的焦距曲线的绘制

以凸轮转角为横坐标,系统的焦距为纵坐标,可绘出变焦距系统的焦距与凸轮转角的关系曲线,如图(2)。把此图形与常用经验公式形式及其函数图形相比较,显见下式可能对这一情形是适用的。

$$f = \exp[a_2 \exp(a_3 \theta)] \tag{10}$$

②用直线化法检验所选定的函数是否适用

依照焦距曲线与常用函数图形选定的焦距函数是否适用,需用直线化法进行检验。为此,令 $Z = \ln f$, 则(10)式变为:

$$\lg(Z - \ln a_1) = \lg a_2 + (a_3 \lg e) \cdot \theta$$

令 $F = \lg(Z - \ln a_1)$, 则上式可进一步表示为:

$$F = \lg a_2 + (a_3 \lg e) \cdot \theta \tag{11}$$

其中:

$$\ln a_1 = \frac{Z_1 Z_2 - Z_3^2}{Z_1 + Z_2 - 2Z_3} \tag{12}$$

Z_1, Z_2 为任取凸轮转角 θ_1, θ_2 及相应的焦距值 f_1, f_2 对应的值, Z_3 为 $\theta_3 = \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2)$ 对应的值。以 θ 值及相应的焦距理论值作出 $F - \theta$ 的关系图, θ 为横坐标, F 为纵坐标, 如图 3。从图中, 我们可以看到 $F - \theta$ 的线性关系相当准确, 因此可以认为该类变焦距系统的焦距与凸轮转角满足函数关系式(10)。下面将讨论该类变焦距系统的焦距输出函数中各参数的估计方法。

3.2 焦距输出函数中各参数初始值的确定

在利用最小二乘法确定非线性函数中的参数时, 首先应给出各参数的初始近似值。我们利

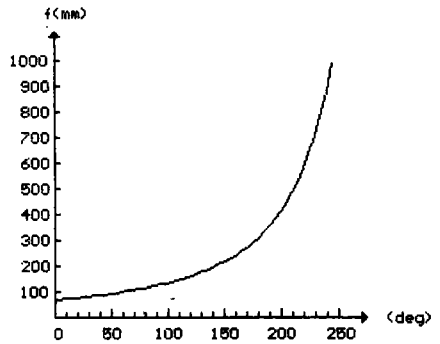


图 2 焦距输出曲线
Fig. 2 Focus curve

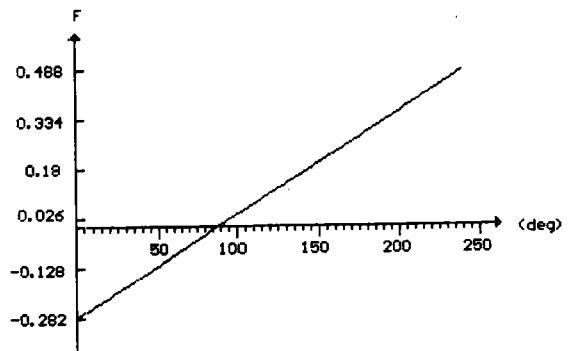


图 3 归直化直线
Fig. 3 Regression line

用均值法,在凸轮转角范围内,选择 $2n$ 个点的焦距理论值,并将其分成两组,代入(11)式,得方程组:

$$\begin{cases} \sum_1^n F_i = n \lg a_{20} + a_{30} \lg e \sum_1^n \theta_i \\ \sum_{n+1}^{2n} F_i = n \lg a_{20} + a_{30} \lg e \sum_{n+1}^{2n} \theta_i \end{cases} \quad (13)$$

解此方程组可得理论焦距输出函数中各参数的初始值 a_{20} 、 a_{30} 。利用式(12)可求得初始参数 a_{10} 。

上述利用均值法确定的各参数值必须利用最小二乘法进一步精确。

3.3 利用最小二乘法精确修正函数中的各参数

以均值法确定的各参数为初始值,利用最小二乘法确定各参数的真值时,可将各参数的真值表示为如下形式:

$$a_i = a_{i0} + \Delta_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (14)$$

这时确定各参数真值的问题就化为确定修正值 Δ_i 。为确定各参数的修正值,可将焦距输出函数(10)式在 a_{10} 、 a_{20} 、 a_{30} 附近作台劳展开,并略去(含)二次以上的各项得:

$$f = f_{k0} + \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_1} \Delta_1 + \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_2} \Delta_2 + \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_3} \Delta_3 \quad (15)$$

式中:

$$\begin{cases} f_{k0} = f(\theta_k, a_{10}, a_{20}, a_{30}) \\ \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_i} = \frac{\partial f}{\partial a_i} \Big|_{\substack{\theta = \theta_k \\ a_1 = a_{10} \\ a_2 = a_{20} \\ a_3 = a_{30}}} \end{cases}$$

给出凸轮转角与焦距的 n 对理论值 (f_k, θ) ,则焦距残差的平方和表示为:

$$Q = \sum_{k=1}^n [f_k - (f_{k0} + \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_1} \Delta_1 + \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_2} \Delta_2 + \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_3} \Delta_3)]^2 \quad (16)$$

为使 Q 达到最小,应满足如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \Delta_1} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \Delta_2} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \Delta_3} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

此方程组进一步表示为:

$$\begin{cases} b_{11} \Delta_1 + b_{12} \Delta_2 + b_{13} \Delta_3 = b_1 \\ b_{21} \Delta_1 + b_{22} \Delta_2 + b_{23} \Delta_3 = b_2 \\ b_{31} \Delta_1 + b_{32} \Delta_2 + b_{33} \Delta_3 = b_3 \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_i} \cdot \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_j} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

$$b_i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_{k0}}{\partial a_i} \cdot (f_k - f_{k0})$$

解此方程组可得各参数的修正值 Δ_i , 进而代入(14)式得 a_i 值。当 $|\Delta_i|$ 值较大时, 可令当前的 a_i 值代替原来 a_{i0} , 重复上述过程, 直至 $|\Delta_i|$ 的值小到可忽略为止, 这样最后得到各参数的真值, 从而得到了变焦距系统的理论焦距输出函数。

3.4 实际焦距输出曲线的拟合

在上述参数估计过程中, 所采用的焦距值均为设计的理论值, 因此拟合出的焦距输出函数亦为理论函数。为了得到变焦距系统的实际焦距输出函数, 只需测得实际变焦距系统在一些特征点的实际焦距值, 并将理论焦距输出函数中的各参数作为初始值, 进一步采用最小二乘法进行精确, 即可求得实际焦距输出函数中的各参数的真值。进而拟合出实际焦距输出函数。

4 结 论

我们从分析正组补偿的 16 倍二组元变焦距系统出发, 得到了需换根的大变倍比正组补偿变焦距系统的焦距输出函数形式, 并给出了其参数的估计方法。

在大视场变焦距电视系统中, 利用上述焦距输出函数形式及参数估计方法, 以 14 位编码器为角度传感器, 实现了优于 1% 的焦距输出精度。

本文得到了史济成、尤英奇两位老师的指导并审阅了全文, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 张以谟主编, 应用光学. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [2] 陶纯堪著, 变焦距光学系统. 北京: 国防工业出版社, 1988
- [3] 冯康等编, 数值计算方法. 北京: 国防工业出版社, 1978

Study on Focal-Length Function of Positive Compensating Zoom Lens

Jin Chunshui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The zoom lens used in capturing and tracing is different from normal zoom lens. It must output the focal-length accurately while varying its focal-length. This paper studies the focal-length function of the two-component, large zoom ratio, positive compensating zoom lens by using the actual zoom lens system parameter and gives a method of determining the focal-length function. By using this method, we can avoid the work of point-to-point calibrating for zoom lens.

Key words: Zoom lens, Focal-length function

金春水 1964 年 10 月生, 1987 年毕业于浙江大学光学仪器工程学系光学仪器专业。1990 年毕业于长春光机所研究生部“光学仪器总体研究专业”, 获硕士学位。现助理研究员, 从事光学仪器总体结构设计, 参与了“多星仿真器”、“星座仿真器”及“变焦距电视测量系统”的研制工作。