

# 实验室内方位元素标定方法

申请号：[201110410386.X](#)

申请日：2011-12-12

**申请(专利权)人** [中国科学院长春光学精密机械与物理研究所](#)  
**地址** [130033 吉林省长春市东南湖大路3888号](#)  
**发明(设计)人** [远国勤](#) [丁亚林](#) [惠守文](#) [刘立国](#) [李延伟](#)  
**主分类号** [G01C25/00\(2006.01\)I](#)  
**分类号** [G01C25/00\(2006.01\)I](#)  
**公开(公告)号** [102494698A](#)  
**公开(公告)日** [2012-06-13](#)  
**专利代理机构** [长春菁华专利商标代理事务所 22210](#)  
**代理人** [王淑秋](#)



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102494698 B

(45) 授权公告日 2014. 03. 12

(21) 申请号 201110410386. X

(22) 申请日 2011. 12. 12

(73) 专利权人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 远国勤 丁亚林 惠守文 刘立国 李延伟

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 王淑秋

(51) Int. Cl.

G01C 25/00 (2006. 01)

审查员 索子繁

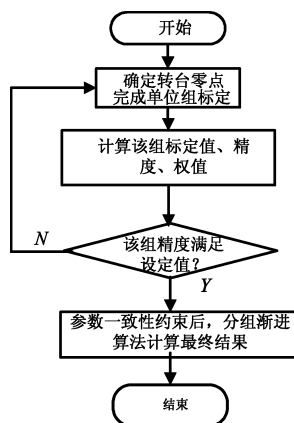
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

实验室内方位元素标定方法

(57) 摘要

本发明涉及一种实验室内方位元素标定方法,该方法采用分组渐进方式逐组调整精密转台零点位置,逼近内方位元素真值;采用参数一致性约束综合处理逼近过程中的各组数据,根据加权理论进行解算。本发明减小了实验室内精密测角法中近似简化及泰勒展开时略去高阶项造成的理论误差;消除了观测点分布状态对标定精度的影响。在相同实验环境条件下,较精密测角法可显著提高标定精度。



1. 一种实验室内方位元素标定方法,其特征在于包括下述步骤:

(1) 根据所需的最终标定精度设定分组逼近精度  $\xi$ ;

(2) 调整转台的位置,使平行光管的星点成像于 CCD 像面的几何中心,并将此时转台的位置作为转台零位;根据测绘相机视场角确定观测点间隔角度,开始采样,得到第 1 组观测点  $p_{1i}$  的物方视场角度  $\alpha_{1i}$  和星点像坐标  $x_{1i}$ ,其中  $i=1, 2, \dots, n_1$ ,  $n_1$  为第一组观测点数量;

(3) 利用第 1 组观测点  $p_{1i}$  的物方视场角度  $\alpha_{1i}$  和星点像坐标  $x_{1i}$ ,根据精密测角法计算得到第 1 组主点、主距标定值  $x_{01}$ 、 $f_{x1}$ 、 $PRS_1$ ;

(4) 调整转台的位置,使平行光管的星点成像于 CCD 像面上第 1 组主点标定值  $x_{01}$  处,将此时转台的位置作为转台零位,重复进行采样,得到第 2 组观测点  $p_{2i}$  的物方视场角度  $\alpha_{2i}$  和星点像坐标  $x_{2i}$ ,其中  $i=1, 2, \dots, n_2$ ;利用第 2 组观测点  $p_{2i}$  的物方视场角度  $\alpha_{2i}$  和星点像坐标  $x_{2i}$ ,根据精密测角法计算得到第 2 组主点、主距的标定值  $x_{02}$ 、 $f_{x2}$ 、 $PRS_2$ ;

(5) 利用精密测角法依次根据第 3 组、第 4 组……,第  $t$  组,……观测点的物方视场角度  $\alpha_{3i}$ ,  $\alpha_{4i}$ , ……  $\alpha_{ti}$  和星点像坐标  $x_{3i}$ ,  $x_{4i}$ , ……  $x_{ti}$  计算第 3、第 4……第  $t$  组…主点、主距的标定值  $x_{03}$ ,  $x_{04}$ , ……  $x_{0t}$ 、 $f_{x3}$ ,  $f_{x4}$ , ……  $f_{xt}$  和观测点畸变平方和  $PRS_3$ 、 $PRS_4$ 、…… $PRS_t$ ;测量每组数据时均以平行光管的星点成像于上一组主点标定值处转台的位置作为零位;若  $|x_{0t}-x_{0t-1}| > \xi$ ,则以平行光管的星点成像于  $x_{0t}$  处转台的位置作为零位,继续进行下一组测量;若  $|x_{0j+1}-x_{0j}| \leq \xi$ ,结束分组渐进过程,再根据参数一致性约束计算主点、主距的最终标定值  $X_0$ ,  $F_x$ ;

所述参数一致性约束综合处理具体步骤如下:

a、采用误差传递理论计算各组的标定精度,第  $t$  组的主点、主距及全视场畸变平方和的标定精度分别记为  $\sigma_{x_{0t}}$ 、 $\sigma_{f_{xt}}$ 、 $\sigma_{PRS_t}$ ,根据最大似然估计计算各组主点、主距及全视场畸变平方和的权值  $P_{xt}$ 、 $P_{ft}$ 、 $P_{Et}$ ,具体计算如下:

$$\sigma_{x_{0t}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial x_{0t}}{\partial x_{ti}}\right)^2 \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial x_{0t}}{\partial \alpha_{ti}}\right)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{f_{xt}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial f_{xt}}{\partial x_{ti}}\right)^2 \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial f_{xt}}{\partial \alpha_{ti}}\right)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{PRS_t}^2 = \sum_{i=1}^{n_t} \left[ \left(\frac{\partial PRS_t}{\partial x_{ti}}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial PRS_t}{\partial \alpha_{ti}}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial PRS_t}{\partial x_{0t}}\right)^2 \sigma_{x_{0t}}^2 + \left(\frac{\partial PRS_t}{\partial f_{xt}}\right)^2 \sigma_{f_{xt}}^2 \right] \quad (9)$$

$$P_{xt} = \frac{1}{\sigma_{x_{0t}}^2}, P_{ft} = \frac{1}{\sigma_{f_{xt}}^2}, P_{Et} = \frac{1}{\sigma_{PRS_t}^2} \quad (10)$$

式(7)、(8)、(9)、(10)中  $x_{ti}$ 、 $\alpha_{ti}$  分别为第  $t$  组观测点位置坐标值和转台角度坐标值, $i=1, 2, \dots, n_t$ ,  $n_t$  为第组观测点数量,  $t=1, 2, \dots, J+1$ ;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_\alpha$  分别为观测点角度误差和像点坐标位置误差;

b、依据参数化一致性约束综合处理各组数据,将最终计算的主点、主距标定值记为  $X_0$ ,  $F_x$ ,参数一致性约束的计算方法如下:

$$X_0 = \bar{x}_0^1 + w_1^0, F_x = \bar{f}_0^1 + w_2^0 \quad (11)$$

$$\bar{x}_0^{-1} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{J+1} P_{xk}} \sum_{k=1}^{J+1} P_{xk} x_{0k}, \bar{f}_0^{-1} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{J+1} P_{fk}} \sum_{k=1}^{J+1} P_{fk} f_{xk} \quad (12)$$

式(11)、(12)中  $\bar{x}_0^{-1}$ 、 $\bar{f}_0^{-1}$  为各组(第 1, 2... t... J+1 组)主点、主距的加权平均值,  $w_1^0$ 、 $w_2^0$  为待求修正值;

$$w_1^0 = \frac{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t2}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1} E_t - \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1} a_{t2} \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t2} E_t}{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t2}^2 - (\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1} a_{t2})^2}$$

$$w_2^0 = \frac{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t2} E_t - \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1} a_{t2} \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1} E_t}{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t2}^2 - (\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{t1} a_{t2})^2}$$

其中

$$E_t = PRS_t - \overline{PRS}_t,$$

$$PRS_t = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{it} - f_{xt} \tan \alpha_{it} + x_{0t} \tan^2 \alpha_{it})^2$$

$$\overline{PRS}_t = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{it} - \bar{f}_0^{-1} \tan \alpha_{it} - \bar{x}_0^{-1} \tan^2 \alpha_{it})^2$$

根据式(6), 第 t 组全视场畸变平方和将会改变, 变化量记为  $W_t$ ,

$$PRS_t = \sum_{i=1}^{n_t} \Delta_{ii}^2 = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{it} - f_{xt} \tan \alpha_{it} + x_{0t} \tan^2 \alpha_{it})^2 \quad (6)$$

则:

$$W_t = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{it} - (\bar{f}_0^{-1} + w_2^0) \tan \alpha_{it} + (\bar{x}_0^{-1} + w_1^0) \tan^2 \alpha_{it})^2 - \sum_{i=1}^{n_t} (x_{it} - f_{xt} \tan \alpha_{it} + x_{0t} \tan^2 \alpha_{it})^2 \quad (13)$$

根据各组数据的权重, 全部 J+1 组数据在主点、主距修正后全视场畸变平方和均会变化, 改变量的加权平方和记为  $\Delta \hat{h}$ , 则  $\Delta \hat{h} = \sum_{k=1}^{J+1} P_{Ek} \cdot W_k^2$ ; 以  $\sum_{k=1}^{J+1} P_{Ek} \cdot W_k^2$  最小作为约束条件求解  $w_1^0$ 、 $w_2^0$ , 进而求得的内方位元素标定值  $X_0$ 、 $F_x$ 。

## 实验室内方位元素标定方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于航空测绘技术领域,特别是涉及一种测绘相机内方位元素实验室内高精度标定方法。

### 背景技术

[0002] 为了使获取图像的信息正确描述空间物点,测绘相机在使用前必须进行精密标定和校正,特别是用于精密测量的相机,光学畸变的大小对测量精度具有决定性的意义,精确标定测绘相机主点、主距等内方位元素是实现高精度测绘的一个必要条件。

[0003] 目前的测绘相机实验室内方位元素采用精密测角法进行标定,标定方法如图 1 所示:M 为转台处于零位时通过平行光管的星点在 CCD 像面所成像的初始值,一般取为 CCD 像面的几何中心;O 为光学系统的待求主点; $S_x$  为主点在 CCD 像面上的投影; $OS_x$  为待求主距, $x_0$  为主点标定值, $f_x$  为主距标定值,位于物方视场角度  $\alpha_i$  处星点  $P_i$  通过平行光管成像于焦平面  $P'_i$  处。根据几何光学, $\alpha_i$  处  $P_i$  光线的光学畸变  $\Delta_i$  为:

$$[0004] \quad \Delta_i = x_i - x_0 - f_x \times \tan(\alpha_i - d\alpha) \quad (1)$$

[0005] 将  $\tan(\alpha_i - d\alpha)$  泰勒展开,并略去高阶项可得:

$$[0006] \quad \tan(\alpha_i - d\alpha) = \tan \alpha_i - \sec^2 \alpha_i \times d\alpha \quad (2)$$

[0007] 式中  $d\alpha = a \tan\left(\frac{x_0}{f_x}\right)$ ,若  $x_0 \ll f_x$ ,近似可得,  $d\alpha \approx \frac{x_0}{f_x}$ 。经过上述简化,可得:

$$[0008] \quad \Delta_i = x_i - f_x \tan \alpha_i + x_0 \tan^2 \alpha_i \quad (3)$$

[0009] 用精密转台改变角度,获取多个星点角度及像点位置,以观测点畸变平方和 PRS 最小为约束条件,根据最小二乘算法求解主点、主距等内方位元素。

$$[0010] \quad x_0 = \frac{-\sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^2 \alpha_i + \sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i}{\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2}, \quad (4)$$

$$[0011] \quad f_x = \frac{\sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - \sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i}{\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2}, \quad (5)$$

$$[0012] \quad PRS = \sum \Delta_i^2 = \sum (x_i - f_x \tan \alpha_i + x_0 \tan^2 \alpha_i)^2 \quad (6)$$

[0013] 实现这种方法的装置包括标准光源 1、光管支架 2、平行光管 3、测绘相机 4、相机支架 5、精密转台 6、隔振平台 7,如图 2 所示。

[0014] 该标定算法具有如下缺陷:

[0015] 1、 $\tan(\alpha_i - d\alpha)$  泰勒展开时略去的高阶项及  $d\alpha$  取值  $\frac{x_0}{f_x}$  时的近似简化,引入了理论误差;

[0016] 2、获取观测点  $p_1, p_2, \dots, p_n$  时角度误差  $\sigma_\alpha$  及获取像点坐标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  时位置误差  $\sigma_x$  致使观测点数量及分布状态影响相机内方位元素的最终标定精度。

## 发明内容

[0017] 本发明要解决的技术问题是提供一种能够减小理论误差及观测点分布状态对标定结果影响的高精度实验室内方位元素标定方法。

[0018] 为了解决上述技术问题,本发明的实验室内方位元素标定方法包括下述步骤:

[0019] (1) 根据所需的最终标定精度设定分组逼近精度  $\xi$ ;

[0020] (2) 调整转台的位置,使平行光管的星点成像于 CCD 像面的几何中心,并将此时转台的位置作为转台零位;根据测绘相机视场角确定观测点间隔角度,开始采样,得到第 1 组观测点  $p_{1i}$  的物方视场角度  $\alpha_{1i}$  和星点像坐标  $x_{1i}$ ,其中  $i=1, 2, \dots, n_1$ ,  $n_1$  为第一组观测点数量;

[0021] (3) 利用第 1 组观测点  $p_{1i}$  的物方视场角度  $\alpha_{1i}$  和星点像坐标  $x_{1i}$ ,根据精密测角法计算得到第 1 组主点、主距标定值  $x_{01}$ 、 $f_{x1}$ ;

[0022] (4) 调整转台的位置,使平行光管的星点成像于 CCD 像面上第 1 组主点标定值  $x_{01}$  处,将此时转台的位置作为转台零位,重复进行采样,得到第 2 组观测点  $p_{2i}$  的物方视场角度  $\alpha_{2i}$  和星点像坐标  $x_{2i}$ ,其中  $i=1, 2, \dots, n_2$ ;利用第 2 组观测点  $p_{2i}$  的物方视场角度  $\alpha_{2i}$  和星点像坐标  $x_{2i}$ ,根据精密测角法计算得到第 2 组主点、主距的标定值  $x_{02}$ 、 $f_{x2}$ ;

[0023] (5) 利用精密测角法依次根据第 3 组、第 4 组……,第  $t$  组,……观测点的物方视场角度  $\alpha_{3i}$ ,  $\alpha_{4i}$ …… $\alpha_{ti}$  和星点像坐标  $x_{3i}$ ,  $x_{4i}$ …… $x_{ti}$ ,根据精密测角法计算第 3、第 4……第  $t$  组…主点、主距的标定值  $x_{03}$ ,  $x_{04}$ …… $x_{0t}$ 、 $f_{x3}$ ,  $f_{x4}$ …… $f_{xt}$ , 测量每组数据时均以平行光管的星点成像于上一组主点标定值处转台的位置作为零位;若  $|x_{0t}-x_{0t-1}| > \xi$ ,则以平行光管的星点成像于  $x_{0t}$  处转台的位置作为零位,继续进行下一组测量;若  $|x_{0j+1}-x_{0j}| \leq \xi$ ,结束分组渐进过程,再根据参数一致性约束计算主点、主距的最终标定值  $X_0$ ,  $F_x$ ;

[0024] 所述参数一致性约束综合处理具体步骤如下:

[0025] a、采用误差传递理论计算各组的标定精度,第  $t$  组的主点、主距及全视场畸变平方和的标定精度分别记为  $\sigma_{x_{0t}}$ ,  $\sigma_{f_{xt}}$ ,  $\sigma_{PRSt}$ ,根据最大似然估计计算各组主点、主距及全视场畸变平方和的权值  $P_{xt}$ ,  $P_{ft}$ ,  $P_{Et}$ ,具体计算如下:

$$[0026] \quad \sigma_{x_{0t}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial x_{0t}}{\partial x_{ti}}\right)^2 \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial x_{0t}}{\partial \alpha_{ti}}\right)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (7)$$

$$[0027] \quad \sigma_{f_{xt}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial f_{xt}}{\partial x_{ti}}\right)^2 \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\partial f_{xt}}{\partial \alpha_{ti}}\right)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (8)$$

$$[0028] \quad \sigma_{PRSt}^2 = \sum_{i=1}^{n_t} \left[ \left(\frac{\partial PRSt}{\partial x_{ti}}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial PRSt}{\partial \alpha_{ti}}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial PRSt}{\partial x_{0t}}\right)^2 \sigma_{x_{0t}}^2 + \left(\frac{\partial PRSt}{\partial f_{xt}}\right)^2 \sigma_{f_{xt}}^2 \right] \quad (9)$$

$$[0029] \quad P_{xt} = \frac{1}{\sigma_{x_{0t}}^2}, P_{ft} = \frac{1}{\sigma_{f_{xt}}^2}, P_{Et} = \frac{1}{\sigma_{PRSt}^2} \quad (10)$$

[0030] 式(7)、(8)、(9)、(10)中  $x_{ti}$ 、 $\alpha_{ti}$  分别为第  $t$  组观测点位置坐标值和转台角度坐标值,  $i=1, 2, \dots, n_t$ ,  $n_t$  为第  $t$  组观测点数量,  $t=1, 2, \dots, J+1$ ;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_\alpha$  分别为观测点角度误差和像点坐标位置误差;

[0031] b、依据参数化一致性约束综合处理各组数据,将最终计算的主点、主距标定值记为  $X_0, F_x$ , 参数一致性约束的计算方法如下:

$$[0032] \quad X_0 = \bar{x}_0^1 + w_1^0, F_x = \bar{f}_0^1 + w_2^0 \quad (11)$$

$$[0033] \quad \bar{x}_0^1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^{J+1} P_{xk}} \sum_{k=1}^{J+1} P_{xk} x_{0k}, \bar{f}_0^1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^{J+1} P_{fk}} \sum_{k=1}^{J+1} P_{fk} f_{xk} \quad (12)$$

[0034] 式(11)、(12)中  $\bar{x}_0^1, \bar{f}_0^1$  为各组(第 1, 2...t...J+1 组)主点、主距的加权平均值,  $w_1^0, w_2^0$  为待求修正值;根据式(6),第 t 组全视场畸变平方和将会改变,变化量记为  $W_t$ , 则:

[0035]

$$W_t = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{ti} - (\bar{f}_0^1 + w_2^0) \tan \alpha_{ti} + (\bar{x}_0^1 + w_1^0) \tan^2 \alpha_{ti})^2 - \sum_{i=1}^{n_t} (x_{ti} - f_{xt} \tan \alpha_{ti} + x_{0t} \tan^2 \alpha_{ti})^2 \quad (13)$$

[0036] 根据各组数据的权重,全部 J+1 组数据在主点、主距修正后全视场畸变平方和均会变化,改变量的加权平方和记为  $\Delta h$ , 则  $\Delta h = \sum_{k=1}^{J+1} P_{Ek} \cdot W_k^2$ ; 以  $\sum_{k=1}^{J+1} P_{Ek} \cdot W_k^2$  最小作为约束条件求解  $w_1^0, w_2^0$ , 进而求得的内方位元素标定值  $X_0, F_x$ 。

[0037] 本发明的有益效果:

[0038] 1、本发明采用分组渐进方式调整精密转台零点位置,使  $x_0 \rightarrow 0, d\alpha \rightarrow 0$ , 逐组逼近内方位元素真值,减小、消除了已有技术中因泰勒展开及近似简化时略去高阶项造成的理论误差,提高了标定精度。

[0039] 2、由于观测点数量及分布状态影响相机标定精度,即使在同一标定环境中,不同的观测点将导致全视场畸变平方和及标定精度发生改变。本发明根据最大似然理论,运用参数一致性约束综合处理逼近过程中所得到的各组数据,消除了已有技术中观测点分布状态对标定精度的影响;

## 附图说明

[0040] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0041] 图 1 是背景技术及本发明的标定原理图。

[0042] 图 2 是实现背景技术及本发明的装置图。

[0043] 图 3 是背景技术的标定流程图。

[0044] 图 4 是本发明的标定流程图。

## 具体实施方式

[0045] 如图 2 所示,实现背景技术及本发明的装置包括标准光源 1、光管支架 2、平行光管 3、测绘相机 4、相机支架 5、精密转台 6、隔振平台 7。

[0046] 如图 3 所示,实现已有技术的方法流程包括确定转台零点位置、采集单位组观测点数据完成标定、计算标定结果和标定精度。本发明的实验室内内方位元素高精度标定方法是通过改变背景技术中只采集单位组观测点数据来实现的,通过进行分组采集观测点数



据,逼近主点、主距的真值,减小、消除已有技术中的理论误差,对各组数据引入数据一致性约束,消除了已有技术中由于观测点数量、分布状态不同对标定结果造成的影响。

[0047] 如图 4 所示,本发明的实验室内方位元素高精度标定方法具体包括如下步骤:

[0048] (1) 根据所需的主点最终标定精度设定分组逼近精度  $\xi = 0.5 \times 10^{-3} \text{mm}$ ;

[0049] (2) 根据 CCD 几何中心位置确定第 1 组观测数据的转台零点位置;

[0050] (3) 根据测绘相机视场角确定观测点间隔角度,进行采样,得到第 1 组观测点  $p_{1i}$  的物方视场角度  $\alpha_{1i}$  和星点像坐标  $x_{1i}$ ,其中  $i=1, 2, \dots, n_1$ ,  $n_1$  为第一组观测点数量;

[0051] (4) 利用第 1 组观测点  $p_{1i}$  的物方视场角度  $\alpha_{1i}$  和星点像坐标  $x_{1i}$ ,根据精密测角法计算得到第 1 组主点、主距的标定值  $x_{01}$ 、 $f_{x1}$ ,全视场畸变平方和  $PRS_1$ ;

$$[0052] \quad x_{01} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} \tan^2 \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} \tan^2 \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} \tan \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} \tan^3 \alpha_{1i}}{\sum_{i=1}^{n_1} \tan^2 \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} \tan^4 \alpha_{1i} - (\sum_{i=1}^{n_1} \tan^3 \alpha_{1i})^2}$$

$$[0053] \quad f_{x1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} \tan \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} \tan^4 \alpha_{1i} - \sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} \tan^2 \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} \tan^3 \alpha_{1i}}{\sum_{i=1}^{n_1} \tan^2 \alpha_{1i} \times \sum_{i=1}^{n_1} \tan^4 \alpha_{1i} - (\sum_{i=1}^{n_1} \tan^3 \alpha_{1i})^2}$$

$$[0054] \quad PRS_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta_{1i}^2 = \sum_{i=1}^{n_1} (x_{1i} - f_{x1} \tan \alpha_{1i} + x_{01} \tan^2 \alpha_{1i})^2$$

[0055] 根据误差传递理论计算第一组数据的主点、主距、全视场畸变平方和的标定精度  $\sigma_{x01}$ ,  $\sigma_{f_{x1}}$ ,  $\sigma_{PRS_1}$ ; 根据最大似然原则确定该组数据主点、主距、全视场畸变平方和标定值的权值  $P_{x1}$ ,  $P_{f1}$ ,  $P_{E1}$ ;

$$[0056] \quad \sigma_{x01} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{\partial x_{01}}{\partial x_{1i}}\right)^2 \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{\partial x_{01}}{\partial \alpha_{1i}}\right)^2 \sigma_\alpha^2}$$

$$[0057] \quad \sigma_{f_{x1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{\partial f_{x1}}{\partial x_{1i}}\right)^2 \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{\partial f_{x1}}{\partial \alpha_{1i}}\right)^2 \sigma_\alpha^2}$$

$$[0058] \quad \sigma_{PRS_1}^2 = \sum_{i=1}^{n_1} \left[ \left(\frac{\partial PRS_1}{\partial x_{1i}}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial PRS_1}{\partial \alpha_{1i}}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial PRS_1}{\partial x_{01}}\right)^2 \sigma_{x01}^2 + \left(\frac{\partial PRS_1}{\partial f_{x1}}\right)^2 \sigma_{f_{x1}}^2 \right]$$

$$[0059] \quad P_{x1} = \frac{1}{\sigma_{x01}^2}, P_{f1} = \frac{1}{\sigma_{f_{x1}}^2}, P_{E1} = \frac{1}{\sigma_{PRS_1}^2}$$

[0060] 式中  $\sigma_x$ 、 $\sigma_\alpha$  分别为观测点角度误差和像点坐标位置误差;

[0061] (5) 调整转台的位置,使平行光管的星点成像于 CCD 像面上组主点标定值处,将此时转台的位置作为转台零位,根据测绘相机视场角确定观测点间隔角度,进行该组采样,其中第  $t$  组观测点记为  $p_{ti}$ ,其物方视场角度记为  $\alpha_{ti}$ 、星点像坐标记为  $x_{ti}$ ,其中  $i=1, 2, \dots, n_t$ ,  $n_t$  为第  $t$  组观测点数量;仿照步骤(4),计算第  $t$  组的标定结果  $x_{0t}$ 、 $f_{xt}$ 、全视场畸变平方和  $PRS_t$ 、标定精度  $\sigma_{x0t}$ ,  $\sigma_{f_{xt}}$ ,  $\sigma_{PRS_t}$ 、权值  $P_{xt}$ ,  $P_{ft}$ ,  $P_{Et}$ ;

[0062] (6) 判断此组主点标定值与上组主点标定值是否满足步骤(1)所设定的逼近精度,



如果满足转入步骤(7),否则转入步骤(5);

[0063] (7)以所有各组数据的标定值、权值确定主点、主距标定值的加权平均值和修正值,计算最终标定结果。

[0064] 精密测角算法

[0065] 精密测角法标定测绘相机原理如图 1 所示, M 为转台处于零位时通过平行光管的星点在 CCD 像面所成像的初始坐标值,一般取为 CCD 像面的几何中心; O 为光学系统的待求主点;  $S_x$  为主点在 CCD 像面投影;  $OS_x$  为待求主距。位于物方视场角度  $\alpha_i$  处星点  $P_i$  通过平行光管成像于焦平面  $P'_i$  处。

[0066] 根据几何光学,  $\alpha_i$  处  $P_i$  光线的光学畸变  $\Delta_i$  为:

$$[0067] \quad \Delta_i = x_i - x_0 - f_x \times \tan(\alpha_i - d\alpha), \quad (1)$$

[0068] 将  $\tan(\alpha_i - d\alpha)$  泰勒展开,并略去高阶项可得:

$$[0069] \quad \tan(\alpha_i - d\alpha) = \tan \alpha_i - \sec^2 \alpha_i \times d\alpha, \quad (2)$$

[0070] 式(2)中  $d\alpha = \alpha \tan(\frac{x_0}{f})$ ,若  $x_0 \ll f$ ,近似可得  $d\alpha \approx \frac{x_0}{f}$ 。经过上述简化,可得:

$$[0071] \quad \Delta_i = x_i - f_x \tan \alpha_i + x_0 \tan^2 \alpha_i, \quad (3)$$

[0072] 用精密转台改变角度,获取多个星点角度及像点位置。观测点记为  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ,分别定义矩阵 V, X, B, N 如下:

$$[0073] \quad V = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tan \alpha_1 & -\tan^2 \alpha_1 \\ \tan \alpha_2 & -\tan^2 \alpha_2 \\ \vdots & \vdots \\ \tan \alpha_n & -\tan^2 \alpha_n \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} f_x \\ x_0 \end{bmatrix},$$

[0074] 则  $V = X - BN$ ,精密测角算法以全视场畸变平方和  $PRS = \min \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \min V^T V$  为约束条件求解内方位元素,由最小二乘可解算出矩阵 N,  $N = (B^T B)^{-1} B^T X$ ,即:

$$[0075] \quad x_0 = \frac{-\sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^2 \alpha_i + \sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i}{\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2}, \quad (4)$$

$$[0076] \quad f_x = \frac{\sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - \sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i}{\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2}, \quad (5)$$

[0077] 精密测角算法采用间接测量得到内方位元素,误差来源包括:

[0078] a、 $\tan(\alpha_i - d\alpha)$  泰勒展开时略去高阶项,  $d\alpha$  取值  $\frac{x_0}{f}$  时近似简化,均带来理论误差;

[0079] b、获取观测点  $p_1, p_2, \dots, p_n$  时角度误差  $\sigma_\alpha$ ;

[0080] c、获取像点坐标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  时位置误差  $\sigma_x$ ;

[0081] d、标定过程中,温度、震动、光源、气流等环境因素的影响。

[0082] 若实验中采用必要条件屏蔽了环境条件的不利影响,根据误差传递理论,可得主点标定精度为:

$$[0083] \quad \sigma_{x_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial x_0}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial x_0}{\partial \alpha_i}\right)^2 \sigma_{\alpha_i}^2} \quad (6)$$

[0084] 由式(4)可以得到：

$$[0085] \quad \frac{\partial x_0}{\partial x_i} = \frac{\tan \alpha_i \sum \tan^3 \alpha_i - \tan^2 \alpha_i \sum \tan^2 \alpha_i}{\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2},$$

$$[0086] \quad \frac{\partial x_0}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial x_0}{\partial \tan \alpha_i} \cdot \frac{d \tan \alpha_i}{d \alpha_i} = \{Q\} \{H\} \cdot \sec^2(\alpha_i),$$

[0087] 其中：

$$[0088] \quad H = \begin{bmatrix} \frac{-4F \sum \tan^2 \alpha_i}{J^2} \\ \frac{2J \cdot \sum x_i \tan^2 \alpha_i - 2F \cdot \sum \tan^4 \alpha_i}{J^2} \\ \frac{2 \sum \tan^2 \alpha_i}{J} \\ \frac{3J \cdot \sum x_i \tan \alpha_i + 6F \cdot \sum \tan^3 \alpha_i}{J^2} \\ \frac{\sum \tan^3 \alpha_i}{J} \end{bmatrix},$$

$$[0089] \quad Q = [\tan^3 \alpha_i \tan^2 \alpha_i x_i \cdot \tan \alpha_i \tan \alpha_i x_i],$$

$$[0090] \quad F = - \sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^2 \alpha_i + \sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i,$$

$$[0091] \quad J = \sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2,$$

[0092] 记  $A_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial x_0}{\partial x_i}\right)^2$ ,  $A_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial x_0}{\partial \alpha_i}\right)^2 \sec^2(\alpha_i)$ , 假设标定过程中观测点角度误差及位置误差保持不变, 即  $\sigma_{\alpha_1} = \sigma_{\alpha_2} = \dots = \sigma_{\alpha_n}$ ,  $\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \dots = \sigma_{x_n}$ 。

[0093] 则：

$$[0094] \quad \sigma_{x_0} = \sqrt{A_1 \sigma_x^2 + A_2 \sigma_\alpha^2} \quad (7)$$

[0095] 同理, 根据公式(5)可得：

$$[0096] \quad \sigma_{f_x} = \sqrt{A_3 \sigma_x^2 + A_4 \sigma_\alpha^2} \quad (8)$$

$$[0097] \quad \text{式(8)中, } A_3 = \sum \left(\frac{\partial f_x}{\partial x_i}\right)^2, A_4 = \sum \left(\frac{\partial f_x}{\partial \alpha_i}\right)^2$$

[0098] 由  $PRS = \sum_{i=1}^n (x_i - f_x \tan \alpha_i + x_0 \tan^2 \alpha_i)^2$  可得：

$$[0099] \quad \sigma_{PRS}^2 = \sum \left[ \left(\frac{\partial PRS}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial PRS}{\partial \alpha_i}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial PRS}{\partial x_0}\right)^2 \sigma_{x_0}^2 + \left(\frac{\partial PRS}{\partial f_x}\right)^2 \sigma_{f_x}^2 \right], \quad (9)$$

[0100] 对于一次独立的标定过程, 观测点  $p_1, p_2, \dots, p_n$  为固定点,  $A_1, A_2, A_3, A_4$  为常数,  $\sigma_{x_0}, \sigma_{f_x}, \sigma_{PRESS}$  为常数。

[0101] 式(6-9)可以得到：

[0102] 1、由于理论误差的存在,精密测角算法得不到主点、主距的精确解；

[0103] 2、仪器精度对标定精度影响较大,单纯依靠增加观测点数量不能无限制的提高标定精度；

[0104] 3、观测点数量及分布状态影响相机标定精度。即使在同一标定环境中,不同的观测点将导致全视场畸变平方和及标定精度发生改变。

[0105] 基于此,本发明提出了一种实验室内分组渐进标定算法,分别针对精密测角算法中的理论误差及观测点状态对标定精度的影响问题进行改进修正,提高标定精度。

[0106] 本发明的分组渐进测量(PAGM)法

[0107] 本发明提出的 PAGM 法包含 2 部分内容：

[0108] 1、采用渐进式分组测量,根据第 J 组结果调整第 J+1 组起始观测点 M 坐标值,使  $x_0 \rightarrow 0, d\alpha \rightarrow 0$ ,然后再进行 J+1 组独立标定,消除理论误差的影响。

[0109] 2、若第 J, J+1 组 M 值调整量已满足精度要求,则认为可忽略理论误差影响。此时采用参数一致性约束综合处理第 1, 2... J+1 组数据,消除观测点的影响。

[0110] 由于 M 初始坐标的微量调整,第 1, 2, ... J+1 组观测点分布各不相同,依据公式(6-9),各组  $\sigma_{x_0}$ 、 $\sigma_f$ 、PRS 均不相同,为消除观测点状态对标定精度的影响, PAGM 算法分别对每组观测数据引入了数据一致性约束,即把各组观测值认为是不等权观测,根据加权理论进行解算。

[0111] 若实验时共测得 J+1 组数据。第 t 组观测点数量记为  $n_t$ ,采用精密测角算法时第 t 组内方位元素解算值为  $x_{0t}$ 、 $f_{xt}$ ,精度为  $\sigma_{x_{0t}}$ 、 $\sigma_{f_{xt}}$ ,全视场畸变平方和

$PRS'_t = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{ii} - f_{xt} \tan \alpha_{ii} + x_{0t} \tan^2 \alpha_{ii})^2$ ,精度为  $\sigma_{PRS_t}$ ,则可设定 PRS<sub>t</sub>、 $x_{0t}$ 、 $f_{xt}$  的权值  $P_{Et}$ 、 $P_{xt}$ 、 $P_{ft}$

分别为  $P_{Et}$ 、 $P_{xt}$ 、 $P_{ft}$ ,

$$[0112] \quad P_{Et} = \frac{1}{\sigma_{PRS_t}^2}, P_{xt} = \frac{1}{\sigma_{x_{0t}}^2}, P_{ft} = \frac{1}{\sigma_{f_{xt}}^2}, \quad (10)$$

[0113] PAGM 算法解算的内方位元素值记为  $X_0$ 、 $F_x$ ,第 t 组全视场畸变平方和变化为 PRS'<sub>t</sub>。同时定义  $\bar{x}_0^1$ 、 $\bar{f}_0^1$  为：

$$[0114] \quad \bar{x}_0^1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^{J+1} P_{xk}} \sum_{k=1}^{J+1} P_{xk} x_{0k}, \bar{f}_0^1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^{J+1} P_{fk}} \sum_{k=1}^{J+1} P_{fk} f_{xk}$$

[0115] 根据最大似然理论,分别将  $\bar{x}_0^1$ 、 $\bar{f}_0^1$ 、 $w_1^0$ 、 $w_2^0$  作为  $X_0$ 、 $F_x$  的近似值及改正数。即：

$$[0116] \quad X_0 = \bar{x}_0^1 + w_1^0, F_x = \bar{f}_0^1 + w_2^0,$$

$$[0117] \quad PRS'_t = \sum_{i=1}^{n_t} (x_{ii} - (\bar{f}_0^1 + w_2^0) \tan \alpha_{ii} + (\bar{x}_0^1 + w_1^0) \tan^2 \alpha_{ii})^2,$$

[0118] 将 PRS'<sub>t</sub> 在  $\bar{x}_0^1$ 、 $\bar{f}_0^1$  处展开,略去高阶项,可得：

$$[0119] \quad PRS'_t = \sum_{i=1}^n ((x_{ii} - \bar{f}_0^1 \tan \alpha_{ii} - \bar{x}_0^1 \tan^2 \alpha_{ii})^2) + a_{t1} w_1^0 + a_{t2} w_2^0, \quad (11)$$

[0120] 其中

$$[0121] \quad \begin{pmatrix} a_{t1} \\ a_{t2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial PRS'_t & 0 \\ 0 & \partial PRS'_t \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\partial x_0} \\ \frac{1}{\partial f_0} \end{bmatrix},$$

[0122] 引入中间量  $\overline{PRS}_t$ 、 $E_t$ 、 $W_t$ 、 $PRS_{\Sigma A}$ 、 $PRS_{\Sigma G}$ ，分别定义如下：

$$[0123] \quad \overline{PRS}_t = \sum_{i=1}^n (x_{ii} - \bar{f}_0^1 \tan \alpha_{ii} - \bar{x}_0^1 \tan^2 \alpha_{ii})^2,$$

$$[0124] \quad E_t = PRS'_t - \overline{PRS}_t,$$

$$[0125] \quad W_t = PRS'_t - PRS_t,$$

$$[0126] \quad PRS_{\Sigma A} = \sum_{k=1}^{J+1} (P_{Ek} \times (\sum_{i=1}^n (x_{ki} - f_i \tan \alpha_{ki} - x_{0i} \tan^2 \alpha_{ki})^2)),$$

$$[0127] \quad PRS_{\Sigma G} = \sum_{k=1}^{J+1} (P_{Ei} \times (\sum_{k=1}^n (x_{ik} - F_x \tan \alpha_{ik} - X_0 \tan^2 \alpha_{ik})^2)),$$

[0128] 则：

$$[0129] \quad W_t = a_{t1} w_1^0 + a_{t2} w_2^0 - E_t \quad (12)$$

[0130] PAGM 算法修正了测绘相机标定值，导致第 t 组全视场畸变平方和变化  $W_t$ ，根据各组数据的权重，测绘相机内方位元素标定的最终约束条件——全部 J+1 组数据在 PAGM 算法修正后全视场畸变加权平方和变化  $\Delta h = \sum_{k=1}^{J+1} P_{Ek} W_k^2 = (PRS_{\Sigma A} - PRS_{\Sigma G})^2$ 。由于各组数据均是可信赖的，全视场畸变加权平方和变化量应具有最小属性，以此作为约束条件，根据偏最小二乘原理，求解  $X_0$ 、 $F_x$  的改正数。

[0131] 即  $w_1^0$ 、 $w_2^0$  应满足：

$$[0132] \quad \min(\sum_{k=1}^{J+1} P_{Ek} W_k^2 = (PRS_{\Sigma A} - PRS_{\Sigma G})^2)$$

[0133] 根据各组观测数据，定义矩阵 W, A,  $w^0$ , L, P 如下：

$$[0134] \quad W = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_{J+1} \end{bmatrix}, A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \vdots & \vdots \\ a_{(J+1)1} & a_{(J+1)2} \end{pmatrix}, w^0 = \begin{pmatrix} w_1^0 \\ w_2^0 \end{pmatrix}, L = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_{J+1} \end{bmatrix}, P = \begin{pmatrix} P_{E1} & 0 & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & P_{EJ+1} \end{pmatrix}$$

[0135] 根据式 (12)， $W = Aw^0 - L$ 。

[0136] 由 PAGM 算法约束条件  $\min_{\mathbf{w}} W^T P W$ ，法方程组可化简为：

$$[0137] \quad A^T P W = 0, \quad (13)$$

[0138] 解可得：

$$[0139] \quad w^0 = (A^T P A)^{-1} A^T P L, \text{ 即：}$$

$$[0140] \quad w_1^0 = \frac{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{r2}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1} E_t - \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1} a_{r2} \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{r2} E_t}{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{r2}^2 - (\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1} a_{r2})^2}$$

$$[0141] \quad w_2^0 = \frac{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{r2} E_t - \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1} a_{r2} \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1} E_t}{\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1}^2 \sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{r2}^2 - (\sum_{t=1}^{J+1} p_{E_t} a_{l1} a_{r2})^2}$$

[0142] 为消除式(11)舍去高阶项时的理论误差,采取逐次迭代的方式逼近  $X_0, F_x$  的真值。将  $w_1^0, w_2^0$  的计算结果作为一级近似值计入  $\bar{x}_0^1, \bar{f}_0^1$ , 重复该迭代过程,求得修正值的二级近似值  $w_1^1, w_2^1$ 。经过  $r$  次迭代后,当  $|w^r - w^{r-1}| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为设定的逼近精度)时,认为获得最终解算值。

[0143] 经过试验测得,在每组观测点  $n=30$  情况下,本发明的标定方法中主点标定精度  $u_{X_0}$ 、主距标定精度  $u_{F_x}$  较传统精密测角算法获得的主点平均标定精度  $\bar{\sigma}_{x0}$ 、主距平均标定精度  $\bar{\sigma}_f$  分别提高了 243.2% 及 200.3%, 如表 1 所示。

[0144] 表 1

[0145]

分组渐进序列	$\xi$ $\times 10^{-3} mm$	$\sigma_{x0t}(t)$ $\mu m$	$\sigma_{fx}(t)$ $\mu m$	$\sum_{i=1}^{n_r} \Delta_{it}^2$ $\mu m$
$t=1$	103.7	7.2	12.2	4.5
$t=2$	42.68	8.7	13.4	5.5
$t=3$	8.4	6.8	11.8	4.2
$t=4(J+1)$	0.3	6.4	10.9	4.7

$$[0146] \quad \bar{\sigma}_{x0} = \frac{1}{J+1} \sum_{t=1}^{J+1} \sigma_{x0t} = 7.275, \bar{\sigma}_f = \frac{1}{J+1} \sum_{t=1}^{J+1} \sigma_{fx} = 12.075, u_{X_0} = 2.12 \mu m, u_{F_x} = 4.02 \mu m$$

$$[0147] \quad v = \left| \frac{u_{X_0} - \bar{\sigma}_{x0}}{u_{X_0}} \right| \times 100\% = 243.2\%, \lambda = \left| \frac{u_{F_x} - \bar{\sigma}_f}{u_{F_x}} \right| \times 100\% = 200.3\%$$

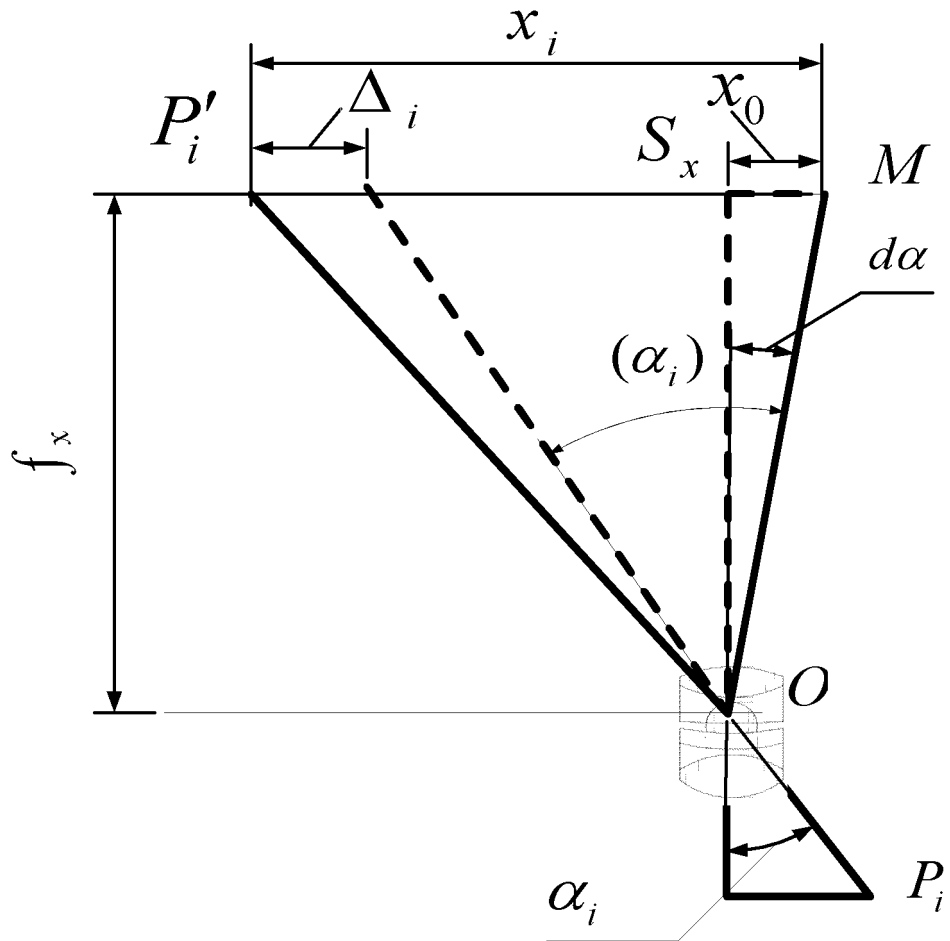


图 1

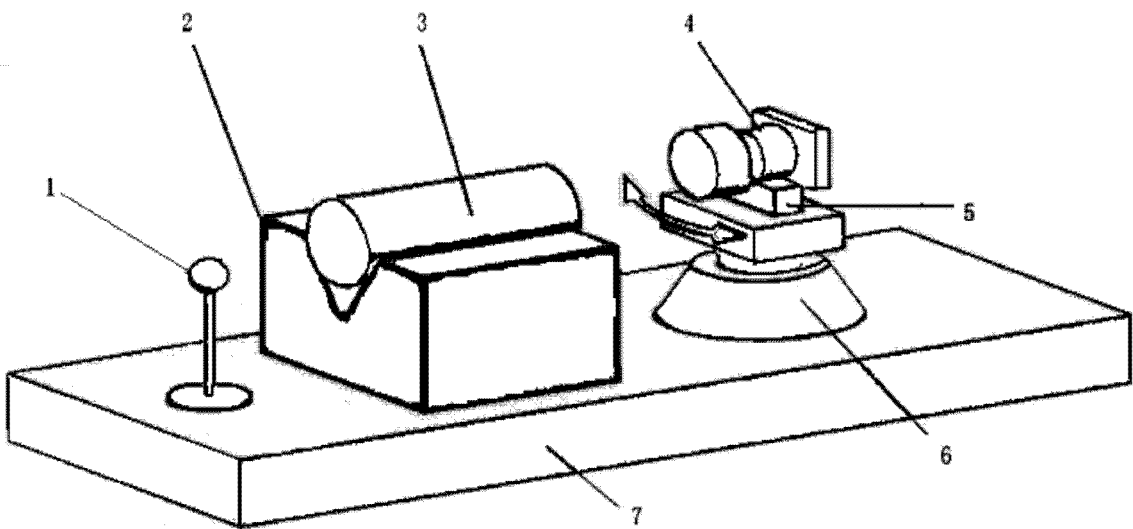


图 2

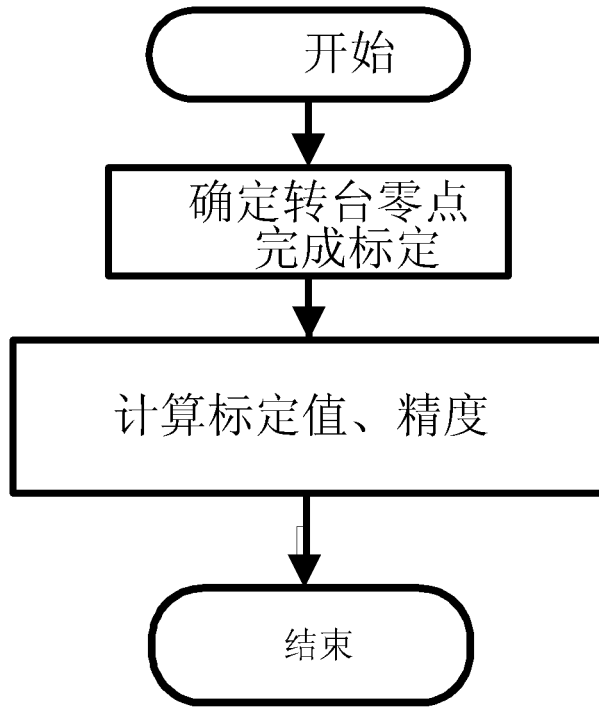


图 3

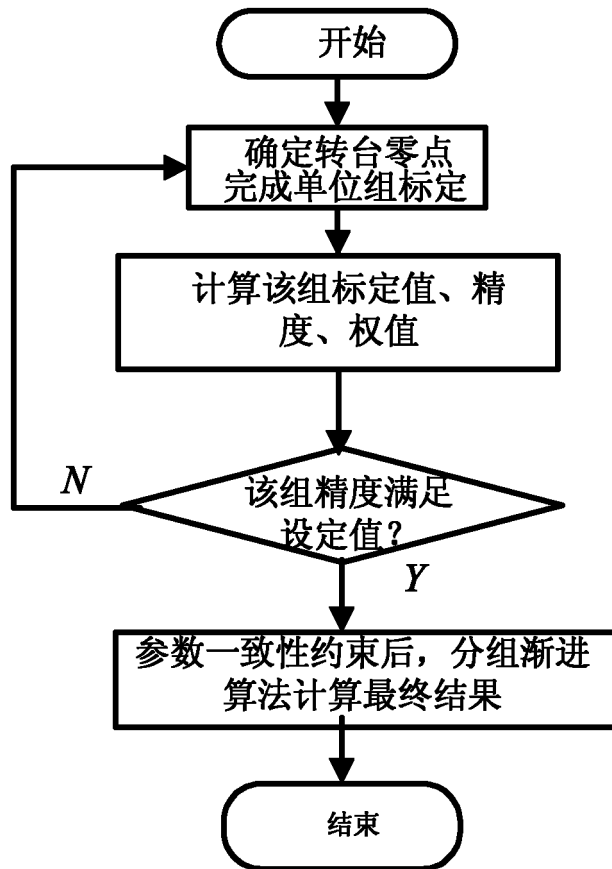


图 4