

摄影测量系统的高精度标定与修正

权铁汉

于起峰

(空军工程学院 西安 710038)

(国防科技大学 长沙 410073)

(E-mail: Quantiehan@263.net)

摘要 介绍了目前国内外较常用的一些摄象机镜头标定与修正的方法,对其优缺点进行了分析,而后根据透镜成象机理,提出了新的误差修正与标定模型,并采用一种隔离的三步法进行求解.该方法能较全面地对摄象机系统进行标定和误差修正,且具有很好的稳定性与精度.

关键词 摄影测量、摄象机标定、镜头畸变、镜头误差修正

HIGH-ACCURACY CALIBRATION AND CORRECTION OF CAMERA SYSTEM

QUAN Tiehan

(Air Force College of Engineering, Xi'an 710038)

YU Qifeng

(National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In this article some popular methods of calibration and correction of camera system are introduced, and their merits and defects are analyzed thereafter. And a new error correction and calibration model is recommended on the basis of camera principle of lens, which is solved by a three-step isolating method. This method can completely calibrate the camera system and correct its errors. What is more, it has good stability and precision.

Key words Camera measurement, camera calibration, lens distortion, lens error correction.

1 引言

摄像机的标定是摄像测量的一个关键内容,在机器人视觉、工业质量控制、目标跟踪定位及力学的三角测量等方面具有重要用途.由于目前数字图像的处理精度越来越高,据文献记载可达0.02个像素精度^[1],考虑镜头畸变的系统误差的标定具有更加重要的意义.

目前国内外进行摄影系统标定与修正的方法比较多,按其求解的方法可分为如下三

类.

①直接非线性求解^[2]. 在此类方法中建立标定点的空间三维坐标与图像坐标的投影关系,用迭代算法对非线性方程组求解. 该方法的优点是可以覆盖所有的像差变形,即可选定任意的系统误差模型,因而若提出的估计模型比较好,且能好的收敛时,可达到很高的精度. 但因采用迭代算法,稳定性能很差;摄像机的内外部参数共有10个,若再引入像差修正参数作为迭代变量,迭代步骤设计不当,像差参数与摄像机位置参数互相干扰,可能导致无意义的解.

②将非线性方程转化为线性方程求解^[2~5]. 该算法不需迭代,它将非线性方程的变量组合成一组新的变量,称之为中间参数,原非线性方程也转化为中间参数的线性方程,利用最小二乘法解出中间参数后,再求得原变量的值. 该方法的优点是不需迭代,速度较快. 缺点是摄像机的系统误差不能加进去,因而不能进行系统误差的修正;另外由于中间参数间互相存在约束,它的维数大于原参数的维数,加上存在噪声及镜头像差的影响,使得标定精度不高.

③两步法. 这一方法是目前较好的方法,是 Tsai 首先提出的^[6,7],该方法的第一步是解线性方程,得到部分外部参数的精确解,第二步再将其余外部参数与畸变修正系数进行迭代求解. 该方法迭代参数较少,且能自动提供较好的初始值,求解速度快,考虑了部分像差,精度比较高,缺点是像差修正只能是轴对称的,且对图像原点没有修正. Weng Y 等提出了另一形式的两步求解法^[8],使之可以修正像平面原点,且加进了对非对称的像差的修正. 由于该方法人为地将摄像机参数和畸变修正系数的求解分开,第一步的摄像机参数的求解运用的是第二步的结果,两步间要进行多次重复;文中对其精度的提高虽提出了改进案,但都是以增加很大的运算量为代价的.

我们在分析综合这些方法的基础上,提出了一种新的更为有效、精度高的标定与修正方法,它不需要迭代运算,所考虑的系统误差也更全面.

2 摄像机模型

2.1 像差模型

理想的透镜成像是针孔模型,物与像满足相似三角型关系. 而实际的透镜并不满足这个条件,成像总存在缺陷,即像差. 像差分轴对称与不对称两大类,轴对称像差有球面像差、彗形像差、像散、像场弯曲和畸变差等,引起的系统误差可用下式来描述^[6,9,10,11]

$$\delta_r = k_0 + k_1 r^1 + k_2 r^2 + k_3 r^3 + o[r^4], \quad (1)$$

其中 k_i 为常数, r 为当前点距图像中心的距离, δ_r 是沿轴上的偏移量. 上式中常数项对应球面像差,一次项对应于彗形像差,二次项对应于像散与像场弯曲像差,三次项对应畸变差,四次项以后为各像差引起的高价小量,均可忽略. 将式(1)转化为直角坐标

$$\delta_u = k_0 \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} + k_1 u + k_2 u \sqrt{u^2 + v^2} + k_3 u (u^2 + v^2), \quad (2)$$

$$\delta_v = k_0 \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} + k_1 v + k_2 v \sqrt{u^2 + v^2} + k_3 v (u^2 + v^2). \quad (3)$$

非中心对称像差主要有不对心像差、薄透镜像差,不对心像差引起的系统误差可以用下式

描述^[12]

$$\delta_u = p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv, \quad (4)$$

$$\delta_v = 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2), \quad (5)$$

而薄透镜像差可用下式进行描述^[9]

$$\delta_u = q_1(u^2 + v^2) \quad \delta_v = q_2(u^2 + v^2). \quad (6)$$

由以上分析,我们提出如下表示的总的像差模型

$$\delta_u = k_0 \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} + k_1u + k_2u \sqrt{u^2 + v^2} + k_3u(u^2 + v^2) + (k_4 + k_5)u^2 + k_6uv + k_4v^2, \quad (7)$$

$$\delta_v = k_0 \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} + k_1v + k_2v \sqrt{u^2 + v^2} + k_3v(u^2 + v^2) + k_7u^2 + k_5uv + (k_6 + k_7)v^2, \quad (8)$$

其中 $k_4 = p_1 + q_1, k_5 = 2p_1, k_6 = 2p_2, k_7 = p_2 + q_2$.

2.2 摄像机标定模型

由摄影测量的几何对应关系,建立全局坐标系 (x_w, y_w, z_w) 及摄像机坐标系 (x_c, y_c, z_c) (以光心为坐标原点,光轴为 z 轴方向), (x, y) 为图像平面坐标系中以像素为单位的坐标,如图1所示.我们要建立的模型是,标定点在空间坐标系中坐标与图像平面坐标系之间坐标的对应关系.空间坐标系与摄像机坐标系间的坐标变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T. \quad (9)$$

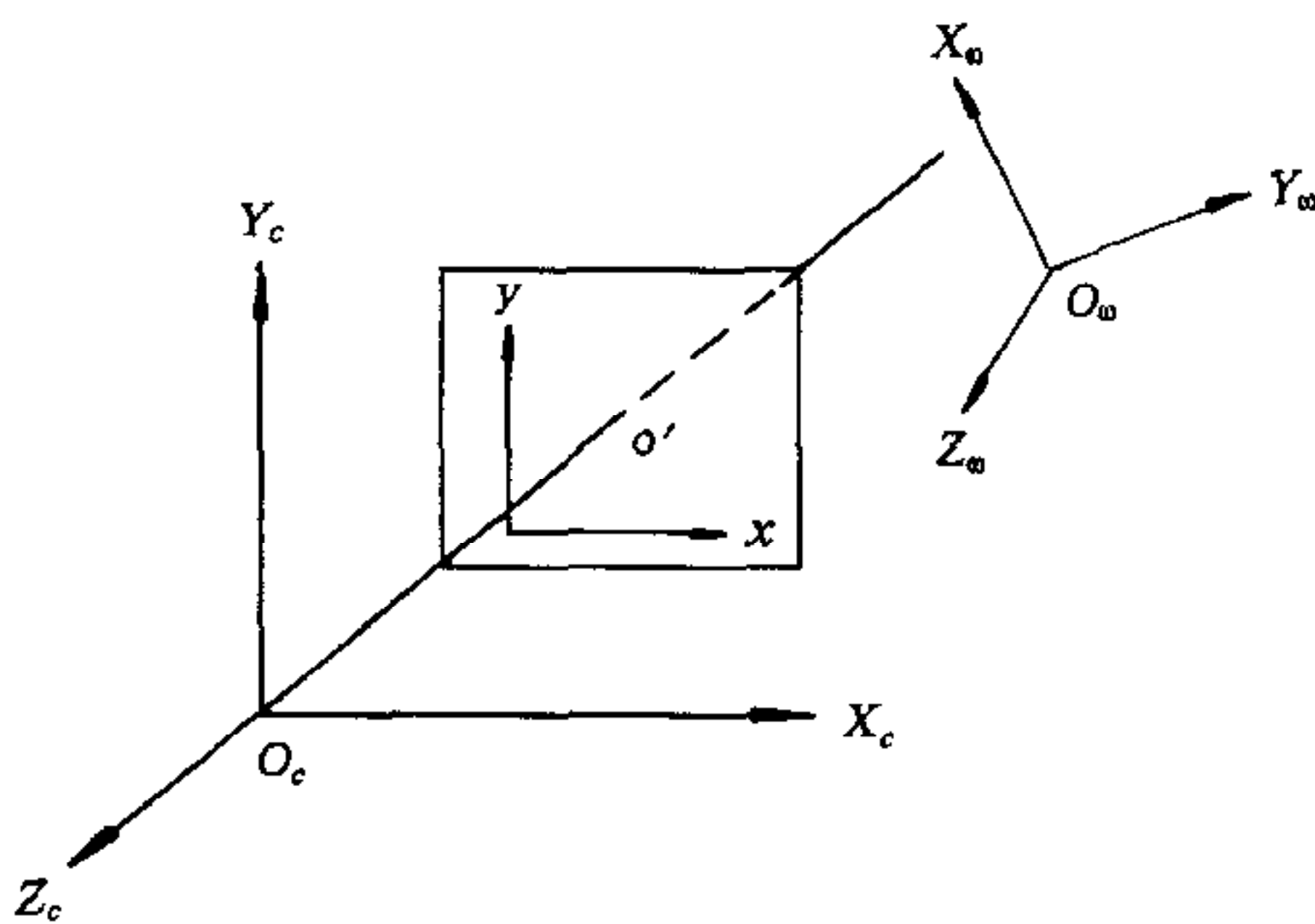


图1 坐标系的位置关系

上式中 R 为两坐标系间的旋转正交矩阵,由摄像机在空间的三个方位角 ψ, ϕ, θ 确定; T 是摄像机光心在空间坐标系中的坐标.在实际图像坐标平面 $O'UV$ 中,原点 O' 为与 O_cZ_c 轴的交点, U, V 分别与 X_c, Y_c 方向一致.由于 CCD 阵列的放置不能恰好关于光轴对称,所以 O' 一般不是图像的几何中心.根据成像的共轭关系

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx_c/z_c \\ fy_c/z_c \end{bmatrix}, \quad (10)$$

若用数字图像的像素坐标 (x, y) 来代替,设 O' 的图像坐标为 (x_0, y_0) , 则

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x - x_0)/s_u \\ (y - y_0)/s_v \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 s_u, s_v 分别为横纵 CCD 阵列的放大比例.将(11)式代入(10)式,令 $f_u = fs_u, f_v = fs_v$, 将(9)式代入得

$$\frac{x - x_0}{f_u} = \frac{r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + T_x}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + T_z}, \quad (12)$$

$$\frac{y - y_0}{f_v} = \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \tag{13}$$

前面的 u, v 中没有考虑像差,实际的图像坐标 \tilde{u} 和 \tilde{v} 是含有像差的,根据前面的像差模型可得:

$$u = \tilde{u} + \delta_{\tilde{u}}, \tag{14}$$

$$v = \tilde{v} + \delta_{\tilde{v}}. \tag{15}$$

由于 $\tilde{u} = (x - x_0)/s_u, \tilde{v} = (y - y_0)/s_v$,代入(13,14)式可得

$$\begin{aligned} \tilde{u} + k_0 \frac{\tilde{u}}{\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}} + k_1 \tilde{u} + k_2 \tilde{u} \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2} + k_3 \tilde{u} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + (k_4 + k_5) \tilde{u}^2 + \\ k_6 \tilde{u} \tilde{v} + k_4 \tilde{v}^2 = f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z}, \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} \tilde{v} + k_0 \frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}} + k_1 \tilde{v} + k_2 \tilde{v} \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2} + k_3 \tilde{v} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + k_7 \tilde{u}^2 + k_5 \tilde{u} \tilde{v} + \\ (k_6 + k_7) \tilde{v}^2 = f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z}. \end{aligned} \tag{17}$$

上面得到了图像坐标与世界坐标的关系式,即为我们将要求解的模型.其中像差修正像素8个,表征摄像机位置的外部参数6个,图像中心偏移值 x_0, y_0 及 x, y 方向有效焦距等内部参数4个,共18个参数.下面将对其求解进行讨论.

3 摄像机模型参数的求解

由于摄像机模型的参数多达18个,而且是一个复杂的非线性方程,为避免考虑稳定性问题,最好是不用迭代算法.由于我们用标准网格(正方形)进行标定,控制点是网格结点,若不存在像差,则根据(12),(13)式物点与像点相似三角形关系,空间平面内的网格在图像上应是四边形网格的像场(虽然成像后存在变形,但在同一直线上的网格点仍在同一直线上,其间距变换也成线性的,可根据此拟合出此网格场).若能根据图像上的网格结点拟合一个无误差的网格像场,就可分别标定像差修正参数和摄像机的内外部参数.首先用亚像素方法提取的网格结点拟合一近似无误差的网格像场;而后根据拟合出的网格像场与空间实际网格的关系,用(12),(13)式进行求解,由此可解得摄像机的内外部参数及图像原点的像素位置,横纵向的有效焦距值.最后根据拟合出来的网格场与用亚像素方法提取出来的结点值对像差修正系数进行求解.

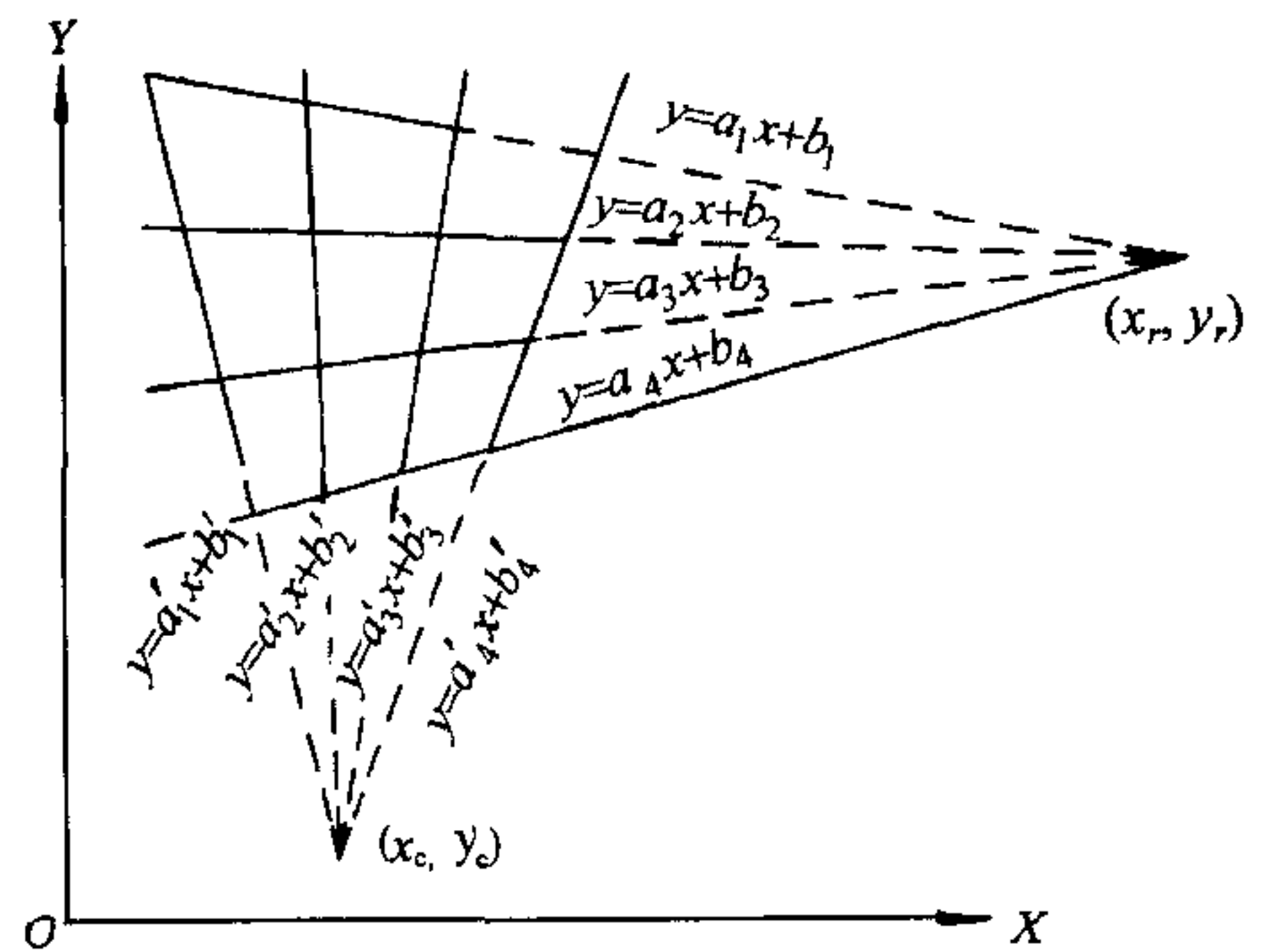


图2 标准网格像场

3.1 拟合标准网格的像场

对于如图2所示的网格像场中横方向的直线可表示如下:

$$y - y_r = a_i(x - x_r), \tag{18}$$

其中 a_i 为直线的斜率, (x_r, y_r) 为直线上的一点, 上式易化为

$$a_i x + y_r - a_i x_r = y. \tag{19}$$

将各网格点代入可得方程组

$$AW = B, \tag{20}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots \\ x_{12} & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ x_{1n} & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & x_{21} & 0 & \cdots & 1 & 0 & -1 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & x_{2n} & 0 & \cdots & 1 & 0 & -1 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & x_{3n} & \cdots & 1 & 0 & 0 & -1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ y_r \\ a_1 x_r \\ a_2 x_r \\ \vdots \\ a_n x_r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ \vdots \\ y_{1n} \\ y_{21} \\ \vdots \\ y_{2n} \\ \vdots \\ y_{3n} \end{bmatrix}. \tag{21}$$

用最小二乘法可解得

$$W = (AA^T)^{-1}A^T B, \tag{22}$$

W 的前 $n+1$ 项分别对应 a_1, \dots, a_n 及 y_r, x_r 由下式得到

$$x_r = \frac{W_{n+2} + W_{n+3} + \cdots + W_{2n+1}}{W_1 + W_2 + \cdots + W_n}. \tag{23}$$

对于纵方向可同样求解, 知道横纵方向的网格线后, 网格点就是两直线的交点.

3.2 求解摄像机位置参数

对于(21), (22)式采用中间参数的方法求解, 先将其化为齐次形式, 可得

$$(x - x_0)x_\omega r_7 + (x - x_0)y_\omega r_8 + (x - x_0)z_\omega r_9 + (x - x_0)T_z - f_u x_\omega r_1 - f_u y_\omega r_2 - f_u z_\omega r_3 - f_u T_x = 0, \tag{24}$$

$$(y - y_0)x_\omega r_7 + (y - y_0)y_\omega r_8 + (y - y_0)z_\omega r_9 + (y - y_0)T_z - f_v x_\omega r_4 - f_v y_\omega r_5 - f_v z_\omega r_6 - f_v T_y = 0. \tag{25}$$

为了能得到一线性方程, 以便非迭代算法求解镜头参数, 假设如下一组中间参数:

$$\begin{cases} M_1 = f_u R_1 + x_0 R_3, \\ M_2 = f_v R_2 + y_0 R_3, \\ M_3 = R_3, \\ m_{10} = f_u T_x + x_0 T_z, \\ m_{11} = f_v T_y + y_0 T_z, \\ m_{12} = T_z. \end{cases} \tag{26}$$

(24), (25)式可化为齐次形式

$$AM = 0, \tag{27}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -x_\omega & -y_\omega & z_\omega & 0 & 0 & 0 & xx_\omega & xy_\omega & xz_\omega & -1 & 0 & x \\ 0 & 0 & 0 & -x_\omega & -y_\omega & -z_\omega & yx_\omega & yy_\omega & yz_\omega & 0 & -1 & y \end{bmatrix},$$

$$M = [M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad m_{10} \quad m_{11} \quad m_{12}]^T.$$

由于(27)式是一齐次方程,它有无穷多组解,而我们所需的摄像机参数满足如下两个条件:

1)因为 M_3 是正交矩阵的最后一行的行向量,它应是一单位向量,即 $\|M_3\|=1$;

2) m_{12} 的符号应与摄像机在世界坐标中的位置相适应,若它在 z_w 轴的正向则为正,反之为负.

由此,当 M 确定后,实际的摄像机参数应是

$$N = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ n_{10} \\ n_{11} \\ n_{12} \end{bmatrix} = \pm \frac{1}{\|M_3\|} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ m_{10} \\ m_{11} \\ m_{12} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

上式中的符号由前面的第二个约束条件确定.

对于(27)式的求解因只需一特解就可知全部的解,可先假设已知一未知数的值,求其余未知数,即得一特解.因世界坐标系原点一般定义在测量对象上, T_z 的值是不为零的,于是可假设 $m_{12}=1$,对 M 进行求解,再按(28)式求实际的值.在该假设下,(27)式可化为

$$A'M' + B = 0, \quad (29)$$

其中 A' 为 A 的前11列, B 为 A 的最后1列, M' 为 M 的前面11个变量.根据最小二乘法可解得 M' ,而后可求得 N 值,再根据(26)式求解摄像机参数.

3.3 求解镜头像差参数

由图像坐标与世界坐标的关系式(25)可得

$$k_0 \frac{\tilde{u}}{\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}} + k_1 \tilde{u} + k_2 \tilde{u} \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2} + k_3 \tilde{u} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + (k_4 + k_5) \tilde{u}^2 + k_6 \tilde{u} \tilde{v} + k_4 \tilde{v}^2 = \bar{u} - \tilde{u}, \quad (30)$$

$$k_0 \frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}} + k_1 \tilde{v} + k_2 \tilde{v} \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2} + k_3 \tilde{v} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + k_7 \tilde{u}^2 + k_5 \tilde{u} \tilde{v} + (k_6 + k_7) \tilde{v}^2 = \bar{v} - \tilde{v}, \quad (31)$$

其中 \tilde{u}, \tilde{v} 和 \bar{u}, \bar{v} 分别表示有镜头像差的图像坐标和无像差的图像坐标.都可计算如下:

$$\tilde{u} = (x - x_0)/s_u, \quad (32)$$

$$\tilde{v} = (y - y_0)/s_v, \quad (33)$$

$$\bar{u} = f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_2 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z}, \quad (34)$$

$$\bar{v} = f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z}. \quad (35)$$

经第二步的计算,系统参数都已算出,(32)~(35)式右边都成了已知的.代入(30),(31)式,得到系数 k_i 的线性方程,即可将其求解出来.

4 实例及精度分析

我们采用的实验方案为标准网格置于可精确升降的平台上,以平台升降的方位为 z_w 轴,分别对 $z_w=0$ mm, $z_w=10.0$ mm 以及 $z_w=20.0$ mm 进行摄影,由前两平面的网格进行标定,后一平面用来检验测量.图3是实验采集的原始图像,在网格边沿处能明显看到有畸变.图4是用标定参数对其进行修正后的无像差图像,可以看出效果比原图好得多.

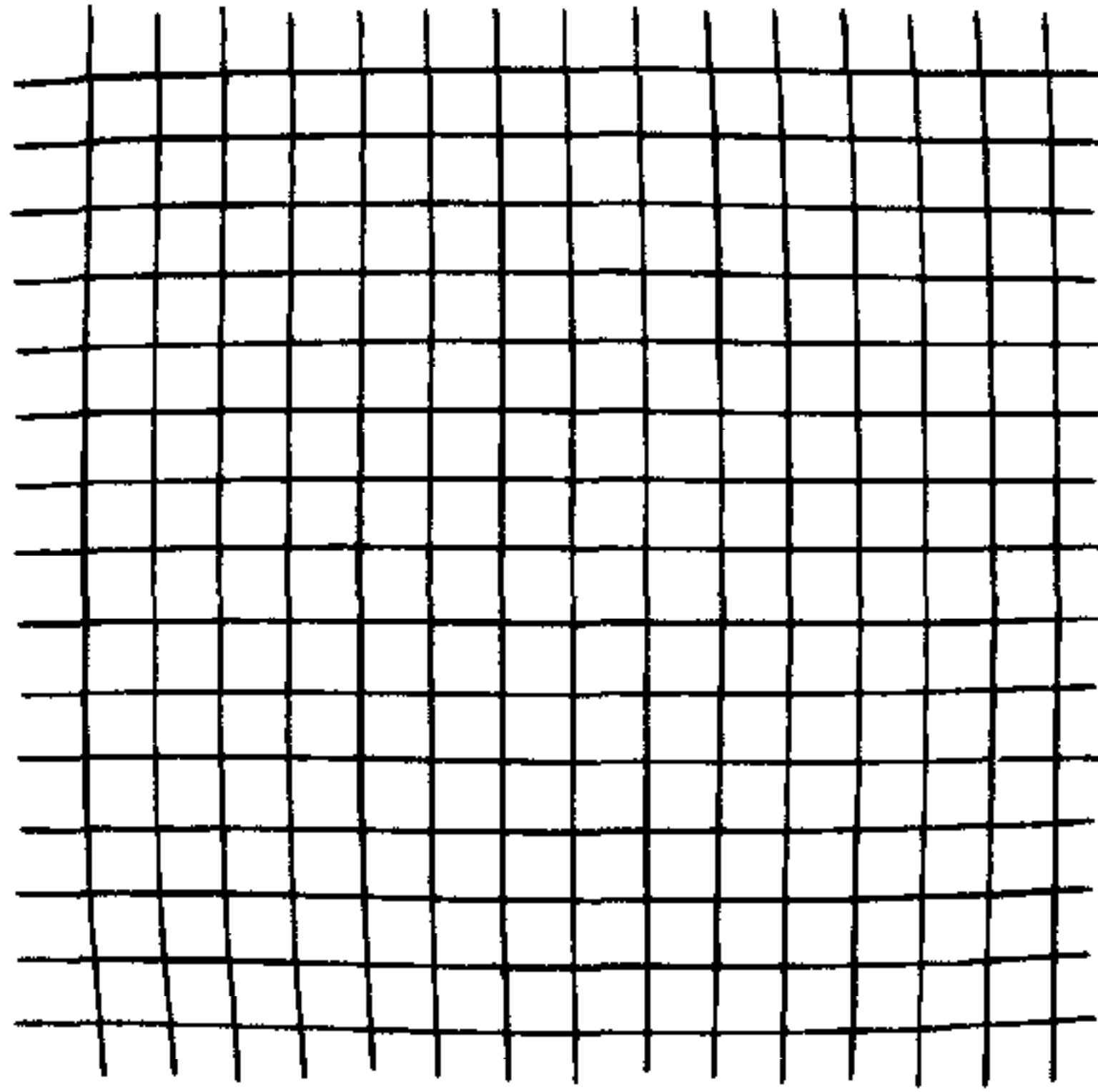


图 3 摄得的网格图像

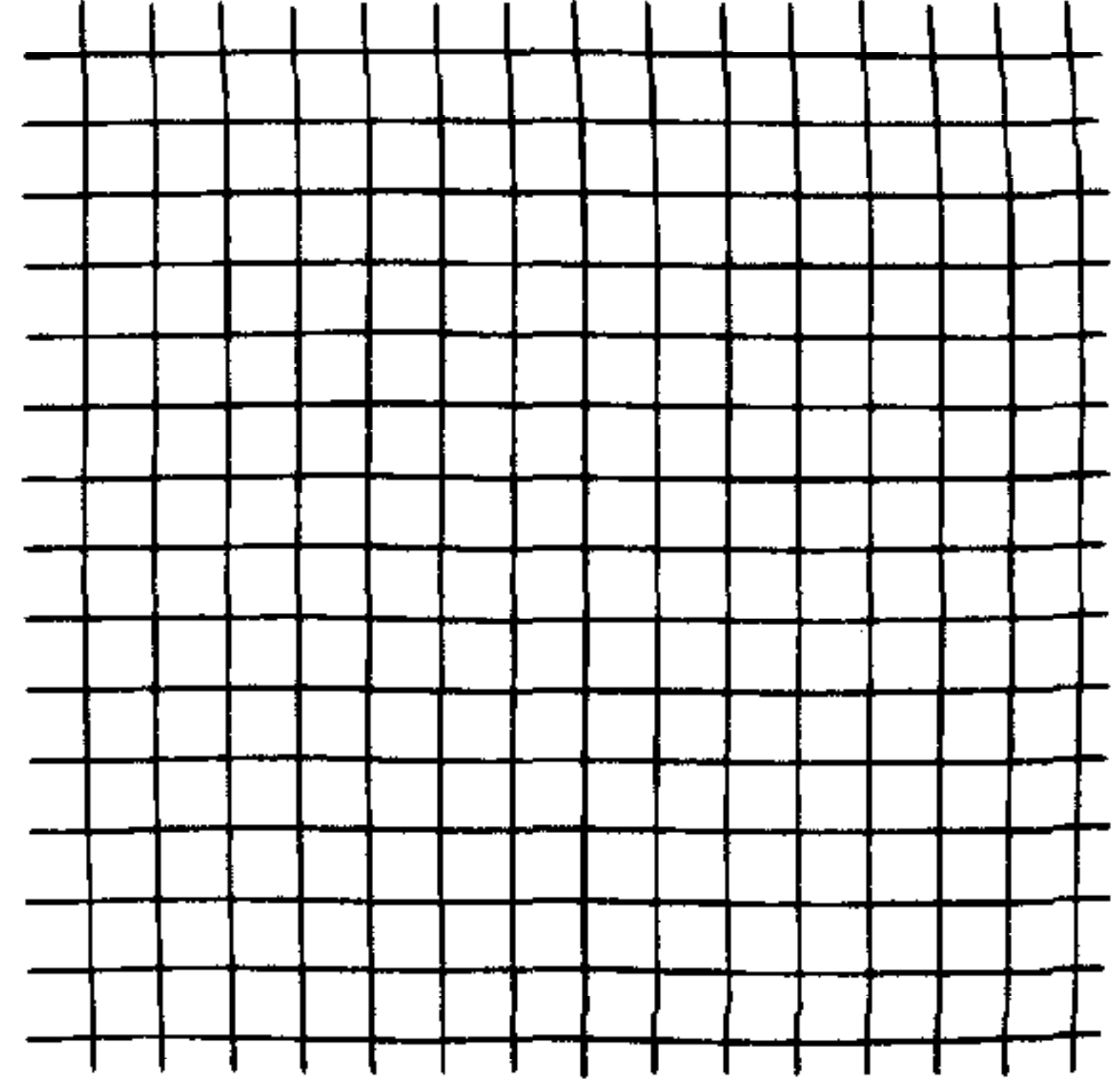


图 4 消除镜头像差后的网格图像

分析测量数据,发现对于200mm范围内的测量,误差可限制在0.2 mm内,折算到像素值,即可达到0.3内的像素精度,而最大的畸变像差达到了3个像素点,可见进行像差修正的重要性,也证明了该标定方法是行之有效的.进一步分析像差修正系数可发现,主要起修正作用的是 k_3 和 k_2 ,即畸变差、像散和像场弯曲像差,其余各系数影响较小.这说明 Tsai 的方法是有效的,但是这仅仅是对普通镜头的像差修正,对于显微镜、望远镜下放大情况以及常见的广角镜头影象测量中,其它几种像差就不容忽视.我们采用这种隔离算法,将位置参数及像差参数分别求解,有效地解决了摄影标定时的参数过多问题,能全面地考虑镜头的像差原因,实现高精度的像差修正.

参 考 文 献

- 1 雷志辉,于起峰.亚像素图像处理技术及其在网格法中的应用.国防科技大学学报,1996,18(4)
- 2 Ganapathy S. Decomposition of transformation matrices for robot vision. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (Atlanta), 1984, (3): 130~139.
- 3 Zhuang H Q, Shiu Y. A Noise-insensitive Algorithm for Robotic Hand/Eye Calibration with or without Sensor Orientation Measurement. *IEEE Trans. Sys. Man Cybernet.*, 1993, (23): 1168~1175
- 4 Stahs T G, Wahl F M. Fast and Robust Range Data Acquisition in a Low-Cost Environment. Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision. In: SPIE 1990, (1395): 496~503
- 5 Zhuang H Q, Roth Z S, Wang K C. Error-model-based Robot Calibration Using the Modified CPC Model. *Int. J. Robot. Comp. Integrated Manufact.*, 1993. 10(4): 287~299
- 6 Roger Y, TSAI. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal Robot. Automat.*, 1987, RA-3(4)
- 7 Lenz K, Tsai R Y. Calibrating a Cartesian Robot with Eye-on-hand Configuration Independent of Eye-to-hand Relationship. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1989, 11(9)

- 8 Weng Y, Cohen P, Herniou M. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10):965~980
- 9 Weng Juyang. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992. **14**(10)
- 10 圣浩然. 航空摄影测量基础知识. 武汉:测绘出版社,1981
- 11 徐枫. 摄影手册. 成都:四川科技出版社,1985
- 12 Wong, W. Mathematical formulation and digital analysis in close range photogrammetry. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*, 1975, **41**(11): 1355~1373

权铁汉 1994年毕业于国防科技大学飞行器结构可靠性专业,同年就读于该校光测力学数字图象处理专业,1996年获硕士学位,1997年在空军工程学院从事相关专业的教学工作及图象处理方面的研究与商业软件的开发工作。

于起峰 博士生导师,1983年毕业于西北工业大学,1985年于国防科技大学获硕士学位,1992年留德讲学,1994年获德国不来梅大学博士学位.从事实验力学、光测力学数字图象处理工作,曾在国外有影响的期刊上发表论文10余篇。

~~~~~  
(上接第735页)

5. 参考文献按文中出现的先后次序排列,文献如为期刊时,按编号,作者(姓在前如 Wiener L N, Kalman R E, Wang H.). 文章题目,期刊名(外文可根据国际惯例使用缩写词),年份,卷号(期号):页码顺序编排. 文献如为图书时,则按编号,作者(姓在前). 书名,版次(初版不写),出版地点:出版者,年份,页码顺序排列. 文中未引用的文献不得列入参考文献栏目。

6. 来稿请用 A4纸1.5倍行距打印。

七、作者必须对稿件内容的真实性和可靠性负责。

八、本编辑部在收稿后一周内通知作者,并在稿件修订过程中与作者保持联系. 如果作者在来稿中不作特殊说明,编辑部将只与第一作者联系。

九、已被本刊接受发表的稿件,按审查意见和“作者加工稿件须知”修改后一式两份同软盘一起寄编辑部. 并需附所有作者的简介。

十、来稿刊登与否由编委会最后审定. 编委会有权对来稿作适当文字删改或退请作者修改. 来稿一经发表,按篇酌付稿费,并赠送当期杂志1本及30份抽印本. 经审查后不拟刊登的文稿,一般在半年内退还。

十一、来稿(一式叁份)请寄北京市中关村中国科学院自动化研究所转《自动化学报》编辑部,邮政编码100080. E-mail:aas@iamail.ia.ac.cn