

文章编号: 0258-7025(2010)02-0488-07

# 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正

葛宝臻 李晓洁 邱 实

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 直接线性变换(DLT)是基于理想的透视变换模型,通过求解线性方程组得到二维(2D)图像坐标与三维(3D)世界坐标的映射关系矩阵,该方法具有求解简单、速度快等优点,但没有考虑透镜畸变的影响。为了达到既求解简单又能校正畸变的目的,在采用共面点线性求解的基础上充分考虑透镜畸变的影响,在根据摄像机的信息确定参数初值后,通过最小二乘优化算法修正变换矩阵及畸变系数,得到了最佳参数值,并采用不同位置分布的数据点对,验证了该方法标定的畸变系数具有相对独立性。最后,利用求得的畸变系数对摄像机获得的方格图像进行校正,校正后图像的变形有了明显的改善,证明了本方法的有效性。

**关键词** 图像处理;畸变校正;最小二乘法;共面点;直接线性变换

**中图分类号** TN101 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0488

## Camera Lens Distortion Correction Based on Coplanar Point Direct Liner Transformation

Ge Baozhen Li Xiaojie Qiu Shi

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** The direct linear transformation (DLT) based on the ideal perspective transformation model can obtain the mapping matrix between the two-dimensional (2D) image coordinates and the three-dimensional (3D) coordinates by solving the linear equations. The method is simple and fast, but it does not take the effect of lens distortion into consideration. In order to correct the distortion in an easy way, this paper takes full account of the lens distortion on the basis of coplanar point linear solution. After initial parameters determined according to the camera information, transformation matrix and distortion coefficient are modified continuously by least-squares method to obtain the optimal parameters, and use data points pair of different location distribution to verify that the distortion coefficient calibrated by the method is relative independence. Finally, square image obtained by the camera was selected and corrected using the distortion coefficient gained by the above-mentioned method. The results have improved significantly and verified the validity of the method.

**Key words** image processing; distortion correction; least squares method; coplanar point; direct linear transformation

### 1 引 言

直接线性变换(DLT)是基于理想的透视变换模型,通过求解线性方程组得到二维图像坐标与三维世界坐标的映射关系矩阵,该方法求解简单,计算方便。但由于加工误差和装配误差的存在,摄像机光学系统与理想的针孔透视模型有一定的差别,从而使得物体点在摄像机图像平面上实际所成的像与

理想成像之间存在不同程度的非线性光学畸变。为了提高图像检测、模式匹配等定量分析的准确性,必须对畸变进行修正。为此,人们探索了各种修正畸变的方法<sup>[1~6]</sup>:除通过分解摄像机的内外参数后再校正畸变<sup>[7~10]</sup>的方法外,还有很多根据特定的几何形状约束求取畸变系数的方法,如根据共线点的特征确定畸变系数<sup>[11,12]</sup>,根据同心圆的约束关系计算

收稿日期:2009-01-09;收到修改稿日期:2009-05-12

基金项目:国家自然科学基金(60277009)和天津市科技攻关计划(05YFGPGX-05000)资助项目。

作者简介:葛宝臻(1964—),男,博士,教授,主要从事光电检测与信息处理、激光粒子测量和激光三维彩色数字化技术等方面的研究。E-mail:gebz@tju.edu.cn

畸变变量<sup>[13]</sup>,利用测量仪器绘制出无畸变坐标,通过无畸变图像和畸变图像间的关系确定畸变系数<sup>[14]</sup>等。

本文提出的基于共面点的畸变校正算法无需分解矩阵,也不需要特定的约束关系,仅依靠共面对即可完成畸变的校正。利用靠近像面中心的点对采用线性求解得到变换矩阵的初值后,再考虑镜头的径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变,通过优化算法求解出矩阵及畸变系数的最佳值,使畸变量与像素的位置关系可以准确地表示出来,由此可以对所有图像点进行畸变校正。本方法用于校正三维传感器摄像机的畸变,得到了较好的效果。

### 2 直接线性变换原理

理想的透视变换模型(针孔模型)<sup>[15]</sup>如图1所示,模型中包含世界坐标系  $O-X_wY_wZ_w$ ,摄像机坐标系  $O_1-xyz$ ,像平面坐标系  $O_2-X_uY_u$  和屏幕坐标系  $O_3-X_fY_f$ 。其中摄像机坐标系  $O_1-xyz$  坐标原点为透镜光学中心  $O_1$  点, $z$  轴与光轴重合。像平面坐标系  $O_2-X_uY_u$  中心在  $O_2$  点(光轴与像平面的交点), $X_u, Y_u$  平行于  $x, y$  轴。屏幕坐标系  $O_3-X_fY_f$  为经图像卡

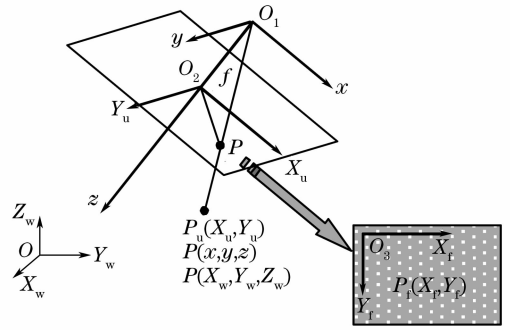


图1 透视变换模型

Fig.1 Perspective transformation model

采样后得到的计算机显示坐标系。 $P(X_w, Y_w, Z_w)$  为世界坐标系中点  $P$  的坐标,  $P(x, y, z)$  为同一点在摄像机坐标系中的坐标,  $P_u(X_u, Y_u)$  为理想针孔模型下  $P$  点的图像坐标,  $P_f(X_f, Y_f)$  为理想情况下  $P$  点在经摄像机和图像卡采集得到的屏幕图像像素坐标。

仅考虑水平面,即  $Z_w = 0$ , 则世界坐标  $(X_w, Y_w)$  与图像像素坐标  $(X_f, Y_f)$  之间映射关系的齐次坐标形式可表示为

$$\rho \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为比例因子,  $\mathbf{M}$  为变换矩阵。(1) 式描述了世界坐标  $(X_w, Y_w)$ , 计算机屏幕图像像素坐标  $(X_f, Y_f)$  和变换矩阵的关系等式, 已知式中的任意两个量可以描述第三个量。设变换矩阵中  $m_{33} = 1$ , 则(1) 式可以用矩阵方程形式表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{AX} &= \mathbf{B}, \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} X_{wi} & Y_{wi} & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_{fi}X_{wi} & -X_{fi}Y_{wi} \\ 0 & 0 & 0 & X_{wi} & Y_{wi} & 1 & -Y_{fi}X_{wi} & -Y_{fi}Y_{wi} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{X} &= [m_{11} \quad m_{12} \quad m_{13} \quad m_{21} \quad m_{22} \quad m_{23} \quad m_{31} \quad m_{32}]^T, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} X_{fi} \\ Y_{fi} \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \end{aligned} \quad (2)$$

因此,确定了  $N(N > 4)$  组世界坐标  $(X_w, Y_w)$  与计算机屏幕图像像素坐标  $(X_f, Y_f)$  后,即可用最小二乘法通过求解(2) 式得到变换矩阵  $\mathbf{M}$ 。由于(2) 式为线性方程组,故称为直接线性变换。但在上述的理想针孔变换模型中没有考虑摄像机的畸变。为了提高精度,必须考虑摄像机畸变的影响。

### 3 畸变校正

由于摄像机镜头的畸变影响使实际像素坐标与理想像素坐标之间存在较大误差,从而图像的信息发生了严重的变形。设  $(x_u, y_u)$  为有畸变的像平面实际坐标,  $(x_f, y_f)$  为有畸变的数字图像像素坐标,则像平面坐标系中理想像点坐标值  $(X_u, Y_u)$  与畸变坐标值  $(x_u, y_u)$  的关系为<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} X_u &= x_u + k_1 x_u (x_u^2 + y_u^2) + k_2 x_u (x_u^2 + y_u^2)^2 + p_1 (3x_u^2 + y_u^2) + 2p_2 x_u y_u + s_1 (x_u^2 + y_u^2), \\ Y_u &= y_u + k_1 y_u (x_u^2 + y_u^2) + k_2 y_u (x_u^2 + y_u^2)^2 + 2p_1 x_u y_u + p_2 (3x_u^2 + y_u^2) + s_2 (x_u^2 + y_u^2), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $k_1, k_2$  为径向畸变系数,  $p_1, p_2$  为切向畸变系数,  $s_1, s_2$  为薄棱镜畸变系数, 它是由于镜头设计缺陷与加工安装误差造成的。

而理想像平面坐标  $(X_u, Y_u)$  与理想计算机屏幕图像坐标  $(X_f, Y_f)$  的关系为<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} X_u &= (X_f - C_x)S_x^{-1}d_x, \\ Y_u &= (Y_f - C_y)d_y, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $C_x, C_y$  为镜头光轴与图像平面的交点在像素坐标系  $X_f, Y_f$  轴上的坐标值,  $S_x$  为垂直比例因子,  $d_x$  为 CCD 在  $x$  方向相邻像敏单元中心距,  $d_y$  为 CCD 在  $y$  方向相邻像敏单元中心距。

相应地, 含有畸变的像平面坐标  $(x_u, y_u)$  与含有畸变的计算机屏幕实际像素坐标  $(x_f, y_f)$  也满足 (4) 式, 即

$$\begin{aligned} x_u &= (x_f - C_x)S_x^{-1}d_x, \\ y_u &= (y_f - C_y)d_y. \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 当得到某一点的图像像素坐标  $(x_f, y_f)$  后, 可通过 (5) 式表示为  $(x_u, y_u)$ , 通过 (3) 式表示为  $(X_u, Y_u)$ , 通过 (4) 式表示为  $(X_f, Y_f)$ , 设  $a_0 = S_x^{-1}d_x$ , 则最终能够将  $(X_f, Y_f)$  与  $(x_f, y_f)$  的关系通过系数  $(C_x, C_y, a_0, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$  表示。

理论上, 采用  $N(N > 4)$  个点求解 (2) 式就可以得到变换矩阵  $\mathbf{M}$ , 但由于摄像机存在畸变, 所以求得的矩阵  $\mathbf{M}$  不是准确值。因此构建目标函数

$$F = \sum_{i=1}^N [(X_{fi} - X'_{fi})^2 + (Y_{fi} - Y'_{fi})^2], \quad (6)$$

式中  $(X_{fi}, Y_{fi})$  为由系数  $(C_x, C_y, a_0, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$  表示的某一点  $(x_f, y_f)$  的实际像素坐标值,

$(X'_{fi}, Y'_{fi})$  为假设  $\mathbf{M}$  为某一初值下, 由某一点  $(X_{wi}, Y_{wi})$  根据 (1) 式计算得到的对应标志点的屏幕图像像素坐标理论值。如果  $(C_x, C_y, a_0, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$  和  $\mathbf{M}$  选取准确, 则  $(X_{fi}, Y_{fi})$  和  $(X'_{fi}, Y'_{fi})$  很接近, 即 (6) 式的值最小。反过来, 如果用某种迭代方法, 已知  $(X_w, Y_w)$  和  $(x_f, y_f)$ , 当 (6) 式的值最小时,  $(C_x, C_y, a_0, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$  和  $\mathbf{M}$  就是所要求的解。通过  $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$  这些系数的引入, 就可对图像畸变进行校正。

## 4 实验结果

实验采用的摄像机型号为 MTV-03K80AHE, 分辨率为  $811 \text{ pixel} \times 508 \text{ pixel}$ , 镜头焦距  $f = 6.0 \text{ mm}$ ; 图像采集卡为 OK\_MC30, 分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。为获取共面点对, 采用精密二维平移台带动圆孔靶标作为标定靶, 设二维平移台的中心为原点, 控制靶标在平面内做以原点为圆心的同心圆运动, 运动半径从  $50 \sim 400 \text{ mm}$ , 每次递增  $50 \text{ mm}$ , 在圆上每  $10^\circ$  取一个采样位置, 共得到 288 个世界坐标  $(X_w, Y_w)$  采样点, 如图 2(a) 所示。在每一设定的世界坐标位置采集一幅图像, 如图 2(b) 所示, 取  $z$  坐标相同一个圆作为采集目标 [如图 2(b) 方框所示], 对采集的圆孔图像提取中心坐标, 得到该圆孔的计算机屏幕像素坐标  $(x_f, y_f)$ , 对每一幅图像处理后得到与图 2(a) 对应的所有点的计算机屏幕像素坐标  $(x_f, y_f)$ , 如图 2(c) 所示。由此就得到了 288 组  $(X_w, Y_w)$  和  $(x_f, y_f)$  共面点对。

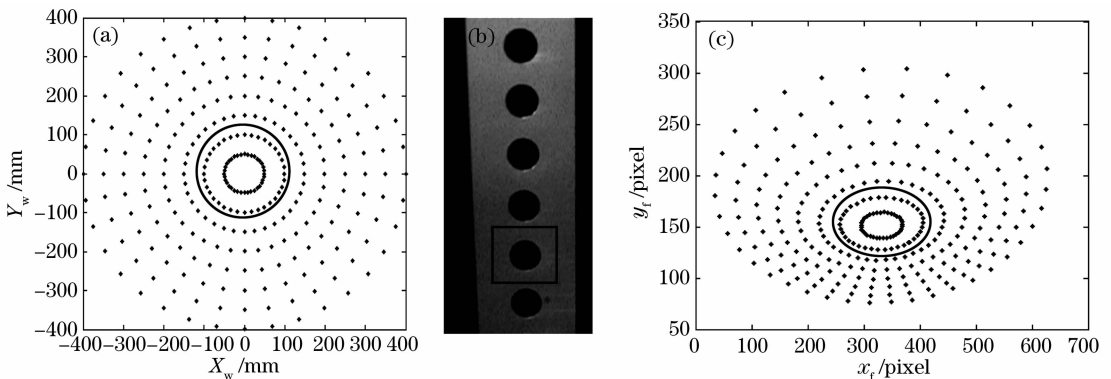


图 2 共面的标定点对。(a) 世界坐标采样点; (b) 采集的图像; (c) 相对应的像素坐标的提取结果

Fig. 2 Corplanar calibration point pairs. (a) world coordinate sampling points; (b) captured image; (c) pixel coordinate result

根据摄像机参数  $d_x = 4.8/811 = 0.00592 \text{ mm/pixel}$ ,  $d_y = 3.6/508 = 0.00707 \text{ mm/pixel}$ , 选取初值  $C_x = 320.000$ ,  $C_y = 240.000$ ,  $S_x = 1.000$ ,

畸变系数  $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$  的初值均为 0。理论上, 矩阵  $\mathbf{M}$  的初值可为任意, 但考虑迭代的收敛和迭代时间,  $\mathbf{M}$  值应尽量接近真值。考虑图像中心的

像素点畸变较小,故选取图 2(a),(c)中椭圆内包括的点用于求解矩阵初值  $M_0$ ,得到的结果如表 1 中第 2 列所示。将参数初值和共面点对坐标  $(X_w, Y_w)$ ,  $(x_i, y_i)$  代入(6)式,利用无约束最小二乘法优化算法即可求得各参数的最优值。

一般情况下,矩阵  $M$  的求解会受  $(x_i, y_i)$  提取精度和畸变影响,而畸变系数应是相对独立的,即不受特征点提取精度和畸变影响,只有这样才有意义。为了验证标定畸变系数的相对独立性,选取 5 种不同位置分布的数据标定同一摄像机,如图 3(a)中

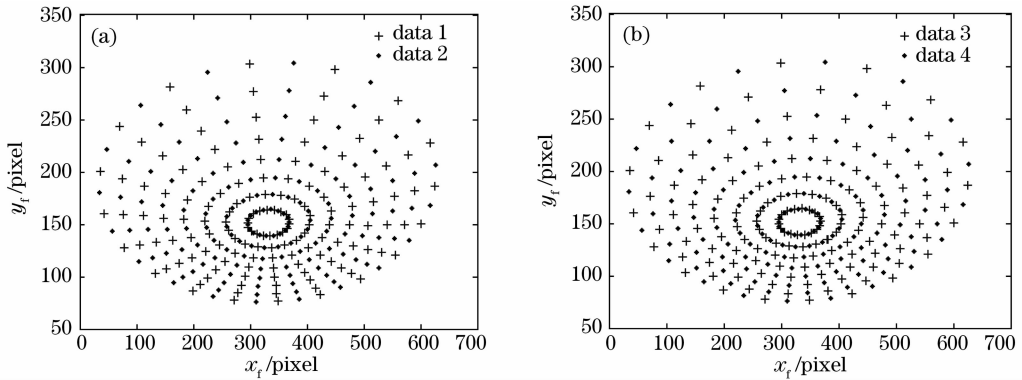


图 3 不同位置分布的数据选取

Fig. 3 Data of different coordinates

表 1 5 种不同位置分布数据的参数优化结果

Table 1 Optimized parameters of 5 different locations data distribution

Parameters	Initial values	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Average	Standard deviation
$k_1$	0	-0.01564	-0.01562	-0.01541	-0.01567	-0.01558	-0.015584	$1.03 \times 10^{-4}$
$k_2$	0	0.001180	0.001182	0.000944	0.001520	0.001212	0.001208	$2.05 \times 10^{-4}$
$p_1$	0	0.000888	0.001016	0.000880	0.001179	0.001259	0.001044	$1.71 \times 10^{-4}$
$p_2$	0	0.01355	0.013819	0.013567	0.013667	0.013695	0.013660	$1.09 \times 10^{-4}$
$s_1$	0	0.000297	0.000307	0.000535	0.000475	0.000332	0.000389	$1.09 \times 10^{-4}$
$s_2$	0	-0.01254	-0.01296	-0.01287	-0.01250	-0.01278	-0.01273	$2.02 \times 10^{-4}$
$a_0$	0.00592	0.006104	0.006136	0.006249	0.005975	0.006107	0.0061142	$9.77 \times 10^{-5}$
$C_x$	320.0000	320.0159	319.9679	320.0008	320.0091	320.0052	319.99978	$1.87 \times 10^{-2}$
$C_y$	240.0000	240.0582	240.0354	240.0677	240.0414	240.0482	240.05018	$1.29 \times 10^{-2}$
$m_{11}$	-0.69918	-0.68609	-0.68610	-0.68611	-0.68550	-0.68540	-0.685840	$3.58 \times 10^{-4}$
$m_{12}$	-0.31399	-0.30569	-0.30466	-0.30538	-0.30449	-0.30437	-0.304918	$5.83 \times 10^{-4}$
$m_{13}$	335.2416	335.0013	335.2996	335.1344	335.1848	335.1687	335.15776	$1.07 \times 10^{-1}$
$m_{21}$	0.074296	0.076056	0.076428	0.076222	0.076673	0.076733	0.0764224	$2.89 \times 10^{-4}$
$m_{22}$	-0.08957	-0.08448	-0.08350	-0.08400	-0.08375	-0.08348	-0.083842	$4.15 \times 10^{-4}$
$m_{23}$	138.8615	139.8622	139.8952	139.8513	139.8934	139.8761	139.87564	$1.92 \times 10^{-2}$
$m_{31}$	-0.00061	-0.00059	-0.00058	-0.00059	-0.00058	-0.00058	-0.000584	$5.48 \times 10^{-6}$
$m_{32}$	0.000589	0.000599	0.000603	0.000600	0.000602	0.000603	0.0006014	$1.82 \times 10^{-6}$
$R_{rss}$		226.1353	223.3238	222.1658	220.5181	219.6233	222.3533	

为了进一步验证,和摄像机经典的 Tsai<sup>[10]</sup>标定方法进行比较,使用数据 5 的 288 个点用 Tsai 方法

“+”所示 144 点为数据 1,“•”所示 144 点为数据 2,图 3(b)中“+”所示 144 点为数据 3,“•”所示 144 点为数据 4,图 3(a)中所有 288 点为数据 5,得到参数的优化结果如表 1 所示,5 种情况的重复误差由表 1 中最后一列标准偏差(standard deviation)表示,可以看出,畸变系数的标准偏差为  $10^{-4}$  量级,数值很小,说明 5 种情况下求得的畸变系数基本一致,畸变系数具有相对独立性。同时可以看出,矩阵  $M$  的各元素的标准偏差变化较大,说明矩阵  $M$  确实受不同位置分布的数据影响。

得到的结果如表 2 所示,比较  $k_1$  值,Tsai 方法与表 1 数据 5 的  $k_1$  相差 2.2%,结果比较吻合,不同的

表2 Tsai 标定结果  
Table 2 Tsai calibration results

Parameters	$f$	$k_1$	$R$	$T$	$R_{\text{rss}}$
Value	6.021	0.01524	-0.684	44.478	440.9448
			-0.296	0.906	-106.325
			-0.663	0.423	1057.37

是本文方法不仅考虑了一阶径向畸变,还考虑了二阶径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变。为了比较标定精度,将288个像素坐标点通过标定结果反求到世界坐标值,并求其与世界坐标真值的残差平方和( $RSS, R_{\text{rss}}$ )。表1得到的5种情况的 $R_{\text{rss}}$ 最大值为226.1353,表2表示的Tsai方法的 $R_{\text{rss}}$ 为440.9448,表明本文方法得到的 $R_{\text{rss}}$ 值明显小于Tsai方法。

为了检验有效性,采用方格图像进行实验验证,图4(a)所示为摄像机采集到的原始图像,从图中可以看出,图像由于畸变发生了明显的弯曲变形。将图像各点的像素坐标 $(x_f, y_f)$ 利用表1中获得的参数值及(3),(4)式求出各点的无畸变像素坐标 $(X_f, Y_f)$ ,再将原图像中像素点 $(x_f, y_f)$ 的灰度值相应地赋给求出的无畸变像素坐标点 $(X_f, Y_f)$ ,就可以得到校正后的图像,结果如图4(b)所示,从图中可以看出,图像的变形有了明显的改善。为了进一步评价图像畸变校正的效果,使用直线拟合的残差平方和作为度量值,该值为边上各点到所拟合直线的距离的平方和, $R_{\text{rss}}$ 值越小反映出边的直线度越好、畸变

越小,反之则说明畸变越大。在进行直线拟合之前,先对图像进行细化操作,使其每条边都为一个像素宽度,这样可以避免因像素宽度不同带来的影响,更容易直观评价直线度的好坏。分别对图4(a),(b)细化后的结果如图4(c),(d)所示,在图4(c)中将各边编号从上到下依次编号为11,12,13,14,15,从左到右依次编号为21,22,23,24,25,26,27,分别对校正前后的上述12条边进行直线拟合,拟合方程为 $y_f = a_{11}x_f + a_{12}, Y_f = a_{21}X_f + a_{22}$ ,其中, $a_{11}, a_{21}$ 为直线的斜率, $a_{12}, a_{22}$ 为直线与 $y_f, Y_f$ 轴交点坐标。求得校正前后各边直线拟合的结果如表3所示,从表中可以看出,校正前各边的 $R_{\text{rss}}$ 值( $R_{\text{rss}1}$ )除了中心线13,24外,其他各边都较大,说明中心线畸变不严重,中心以外畸变较大,符合实际情况。校正后各边的 $R_{\text{rss}}$ 值( $R_{\text{rss}2}$ )明显小于 $R_{\text{rss}1}$ ,说明各边的直线度均有了显著改善,特别是边缘线11,15,21,27残差平方和减小最多,分别减小72.02,84.55,35.33,33.23,说明对这些边的校正效果也是最显著的,当然,由于这些线处在视场边缘,相比中心线还是有一定的畸变,

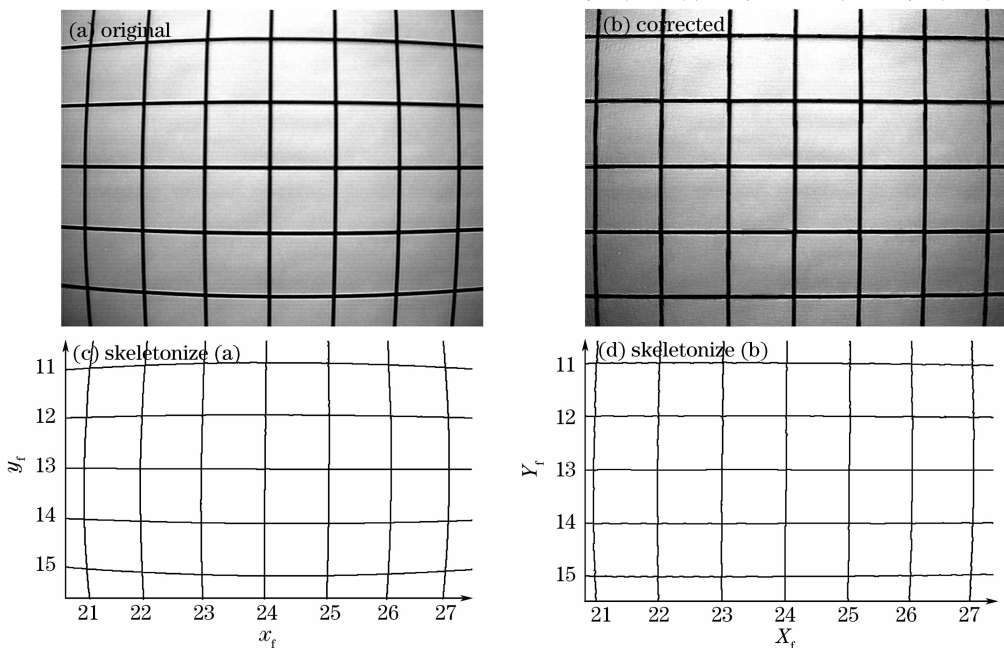


图4 方格图像校正前后结果

Fig. 4 Square image before and after correction

但与原图像相比已有了很大改善。综上所述,说明本文提出的基于共面点的畸变校正算法能有效校正

摄像机畸变,从而校正由畸变引起的图像几何失真,提升图像质量。

表3 图4(c),(d)中12条直线的拟合结果

Table 3 Fitting results of the 12 lines in Fig. 4(c), (d)

No.	Before correction			After correction			$\Delta R_{\text{rss}} = R_{\text{rss1}} - R_{\text{rss2}}$
	$a_{11}$	$a_{12}$	$R_{\text{rss1}}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$R_{\text{rss2}}$	
11	0.0026	-49.89	98.09	-0.0056	-41.428	26.07	72.02
12	-0.00096	-142.48	45.37	-0.0033	-139.78	11.81	33.56
13	-0.0035	-238.57	10.19	-0.0012	-239.21	5.45	4.74
14	-0.0060	-334.93	59.06	0.0017	-338.61	8.97	50.09
15	-0.0077	-428.20	107.39	0.0046	-436.67	22.84	84.55
21	77.10	-3320.12	70.36	167.90	-3265.33	35.03	35.33
22	92.52	-11919.70	50.26	166.67	-19741.67	18.58	31.68
23	118.21	-26195.71	27.28	173.20	-37849.87	7.80	19.48
24	167.52	-53287.48	6.44	189.93	-60461.54	5.55	0.89
25	212.06	-88432.01	19.48	164.34	-68638.24	9.61	9.87
26	400.05	-204760.57	43.73	162.72	-83857.75	19.37	24.36
27	2187.80	-1313489.98	66.34	150.51	-91959.78	33.11	33.23

## 5 结 论

基于共面对,在采用直接线性变换求取变换矩阵初值的基础上,充分考虑系统径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变的影响,利用最小二乘法优化算法得到了畸变系数的准确表达,实现了对摄像机采集图像上各像素点的畸变校正。通过对采集的方格图像校正结果的分析表明,本文算法能够有效校正摄像机畸变,改善图像质量。

## 参 考 文 献

- Sun Yuchen, Ge Baozhen, Mu Bing *et al.*. Calibration of 3D sensors with linear partition method [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2005, **16**(2):135~139  
孙宇臣,葛宝臻,牟冰等.采用线性分区方法对三维传感器的标定[J].*光电子·激光*, 2005, **16**(2):135~139
- Shi Zelin, Kang Jiao, Sun Rui. BP NN-based method for lens distortion correction of large-field imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3):348~353  
史泽林,康娇,孙锐.基于BP神经网络的大视场成像畸变校正方法[J].*光学精密工程*, 2005, **13**(3):348~353
- Liu Jingen. A rectification algorithm for photoelectric image with distortion based on method of onsite ascertained standard [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):732~735  
刘金根.一种基于现场定标的光电图像畸变校正算法[J].*光子学报*, 2004, **33**(6):732~735
- Liu Hang, Yu Daoyin, Du Ji *et al.*. Distortion correction of the wide-angle optical system with digital technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8):1108~1112  
刘航,郁道银,杜吉等.广角成像系统光学畸变的数字校正方法[J].*光学学报*, 1998, **18**(8):1108~1112
- Zhong Xianghong, Zhang Baozheng, Lin Meirong *et al.*. Analysis and correction of angioscope image distortion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):377~379  
钟向红,张包铮,林美荣等.血管内窥镜图像畸变的分析和校正[J].*中国激光*, 2003, **30**(4):377~379
- Rong Changjun, Zhao Huichao, Han Weihua *et al.*. Correction

of CCD lens [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(4):18~20

荣长军,赵会超,韩卫华等.面阵CCD镜头畸变校正[J].*光电技术应用*, 2007, **22**(4):18~20

- Luo Yulin, Li Shiqi, Yin Wensheng. Camera calibration based on data-fitting and image correction with numerical implementation [J]. *Automation & Instrumentation*, 2006, (1):15~18

罗瑜林,李世其,尹文生.基于数据拟合的摄像机标定和图像的数值校正[J].*自动化与仪表*, 2006, (1):15~18

- Cai Jianrong, Zhao Jiewen. Stereovision system calibration based on dual-camera [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2006, **27**(1):6~9

蔡健荣,赵杰文.双目立体视觉系统摄像机标定[J].*江苏大学学报(自然科学版)*, 2006, **27**(1):6~9

- Tian Yongtao, Wang Youqing, Li Congxin *et al.*. A collinear points-based method to solve the distortion [J]. *Coefficient Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2003, **37**(11):1739~1742

田涌涛,王友庆,李从心等.基于共线点的透镜畸变系数标定[J].*上海交通大学学报*, 2003, **37**(11):1739~1742

- Zhang Jing, Zhu Dayong, Jia Xiaodong. Camera lens distortion calibration with co-line points [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2):221~224

张靖,朱大勇,贾晓东.用共线点列标定摄像机镜头畸变[J].*激光技术*, 2006, **30**(2):221~224

- Zhang Yanzhen, Ou Zongying, Xue Bindang. Error correction method based on slope for camera radial distortion [J]. *Mini-Microsystem*, 2002, **23**(5):625~627

张艳珍,欧宗瑛,薛斌党.一种基于斜率的摄像机畸变校正方法[J].*小型微型计算机系统*, 2002, **23**(5):625~627

- Sheng Linyang, Xie Kai, Yang Hongru. Circle video based algorithm of multi-frame alignment and lens distortion correction [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, **42**(15):97~100

盛琳阳,解凯,杨红孺.基于圆序列的多帧对齐和径向畸变校

- 正算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(15):97~100
- 14 Ryusuke Sagawa, Masaya Takatsuji, Tomio Echigo *et al.*. Calibration of lens distortion by structured-light scanning [C]. *Intelligent Robots and Systems*, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on Aug. 2005. 832~ 837
- 15 Sun Yuchen. Study of key techniques of laser 3D and color digitization system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 25~28
- 孙宇臣. 激光三维彩色数字化系统关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2005. 25~28
- 16 Sun Changku, Ye Shenghua. *Laser Measurement Technology* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001. 135~136
- 孙长库,叶声华. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2001. 135~136