

基于直线投影特征的镜头畸变校正方法

杨 麒, 李天伟, 黄 谦, 李 伟

(海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 针对摄像机镜头畸变校正方法的简便和快速问题, 设计了基于直线投影特征的校正方法; 介绍了镜头主要畸变产生原因和畸变模型; 给出直线三点在理想投影下的关系, 确定了适应度函数, 利用遗传算法得到了畸变参数组最优解; 基于 matlab 软件编写校正程序, 并进行了实验验证; 实验表明, 利用畸变参数组的最优解能够实现图像畸变校正, 效果较好; 该标定方法只需场景内有直线存在即可实现对摄像机镜头畸变参数校正, 方法所需实验条件简单, 程序简便, 便于现场快速校正。

关键词: 畸变校正; 畸变系数; 遗传算法; 直线投影

Lens Distortion Correction Method Based on Linear Projection Features

Yang Qi, Li Tianwei, Huang Qian, Li Wei

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: In order to solve the simple and fast problem of camera lens distortion correction, a method based on linear projection feature was designed. The main reason and distortion model of lens are introduced. The relation between three points of a straight line under ideal projection is given, and the fitness function is determined. Matlab software based on the preparation of calibration procedures, and experimental verification. The experiment shows that the image distortion correction can be achieved by using the optimal solution of the distortion parameter set. The calibration method in this paper can realize the correction of camera lens distortion parameters only if there is a straight line in the scene. The experimental conditions are simple, the program is simple, and the field correction is convenient.

Keywords: distortion correction; coefficient of distortion; genetic algorithm; linear projection

0 引言

由于摄像机光学成像并不是理想的小孔成像, 使得空间点在成像平面上实际成像点与理想成像点并不是同一点, 两者之间存在复杂的非线性关系, 即镜头畸变^[1]。镜头畸变的存在使得空间点在图像投影点位置与理想投影位置产生偏差, 直接影响了摄像机标定精度, 从而影响了对三维空间测量和重建的精度。所以, 在摄像机标定的过程中, 镜头畸变校正是不容忽视的一环。

目前畸变校正大致分为三种。一是利用精密几何标定物的传统标定方法, 二是基于透视不变性的校正方法, 三是基于主动视觉的校正方法。在传统的畸变参数标定中, 一般采用精密标定物, 利用空间点与图像点对应关系, 先标定出部分参数, 再考虑畸变因素, 通过优化计算得到内外参数和畸变参数。例如经典的 Tsai^[2]方法, 先线性标定出部分摄像机外参数, 并得到非线性参数初始值, 再考虑径向畸变影响, 通过优化得到内外参数和畸变参数。Martins^[3]的双平面标定法中, 将非线性和线性参数进行转化,

通过求解新构造的参数完成标定。经典的张正友标定法^[4]利用对平面标定板获取的不同位置上的图片来标定出畸变参数, 降低了对精密标定物的依赖。叶峰^[5]等改进了 Tsai 的两步法, 先利用图像中心附近畸变较小的性质计算出初始参数, 再将焦距和平移向量设为变量进行迭代计算逼近精确值。传统的畸变校正方法需要有专门的标定物, 不利于某些参数变化频繁, 标定物设置极为困难的应用场合, 并且标定过程较为繁琐, 参数多, 计算量大, 不利于在线实时标定。基于透视不变形校正方法是利用空间几何图形在图像上投影的一些性质进行标定。周富强^[6]等利用直线的透视不变性, 将畸变参数单独进行标定。贺俊吉^[7]等利用透视投影中共线 4 点交比不变性标定出一阶径向畸变参数。曲学军等^[8]改进了文献 [7] 的方法, 通过分析径向畸变和离心畸变的几何意义, 构建出新的畸变数学模型, 分两步分别求解出了一阶离心畸变和一阶径向畸变。汪贵平等^[9]通过获取一组平行线图像, 分步校正非线性径向畸变、透视畸变参数来校正透视畸变, 可以实现对多种畸变的现场校正。由于该方法不需要精密标定物, 往往算法也比传统方法简便, 已成为畸变校正研究的热点问题。基于透视不变性的畸变校正方法大多数只能求取一阶径向畸变, 有部分已在改进算法和标定步骤上实现对二阶径向畸变以及偏心畸变的标定; 这类方法也需要几何图形有一定的几何特征, 如共线点, 平行线等, 在现场摄像机工作中, 多数情况下无法满足对诸如此类标定物的需求, 不利于在线

收稿日期: 2018-06-20; **修回日期:** 2018-07-16。

作者简介: 杨 麒 (1990-), 男, 江西九江人, 硕士研究生 (在读), 主要从事视觉测量系统标定技术方向的研究。

李天伟 (1963-), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉系统方向的研究。

通讯作者: 黄 谦 (1980-), 男, 福建福州人, 博士, 讲师, 主要从事视觉系统目标识别和跟踪技术方向的研究。

实时校正。基于主动视觉的标定方法^[10-11]通过摄像机或是标定物在平台上做精密相对运动实现标定, 该方法精度较高, 但必须精密的运动平台, 实验条件要求苛刻, 成本高, 不利于部分场合实时在线校正。

空间中的直线投影在理想情况下是直线, 由于畸变存在使得直线投影成像是曲线, 若能找出直线的理想投影的像与实际投影像的关系, 就能确定镜头的畸变。本文基于直线投影特征, 利用遗传算法求解出畸变系数组的最优解。该方法只需场景内存在直线即可实现畸变校正, 实验条件要求简单, 程序简便, 利于现场摄像机在线标定。

1 摄像机成像模型

1.1 理想成像模型

常用的理想摄像机成像模型为经典的针孔模型。若有点 P 为三维空间中的一点, 该点在世界坐标定 R_w 下的坐标表示为 (x_w, y_w, z_w) , 在摄像机坐标系 R_c 下的坐标表示为 (x_c, y_c, z_c) ; 点 p 为点 P 投影到摄像机成像平面上的一点, 在图像坐标系下的坐标为 (u, v) 。则有:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & \mu & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式 (1) 为理想针孔模型的数学表达式, 其中摄像机标定为焦距 f , 旋转矩阵为 \mathbf{R} 、平移向量为 t , 图像坐标 (u_0, v_0) 为主点坐标。由于数字摄像机制造越来越精密, 许多研究中将比例因子 μ 值近似为 0, 该近似对标定精度影响极小。但是, 实际成像过程中, 由于镜头畸变存在, 使得空间点 P 与其投影点 p 并非理想的线性关系。若需要得到更为精确的投影关系, 需加入镜头畸变的数学模型。

1.2 摄像机镜头畸变模型

镜头畸变一般分为三类: 径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变。在像平面上, 可设理想成像点坐标为 (x, y) , 实际成像点坐标为 (\bar{x}, \bar{y}) , 并讨论三种畸变的数学模型以及对成像精度的影响大小。

径向畸变是由于镜头的曲率非标准变化而导致的径向位置误差, 在三种畸变形式中对成像精度影响最大。分为枕形畸变和桶形畸变, 前者是带有畸变的成像点沿径向向内偏移, 后者是带有畸变的成像点沿径向向外偏移。设 $k_i (i \in \mathbf{N}^+)$ 为 i 阶径向畸变系数, Δ_{k_x} 表示为投影点在像平面坐标系中 x 轴上的径向畸变量, Δ_{k_y} 表示为投影点在像平面坐标系中 y 轴上的径向畸变量, 则径向畸变的数学表达式为:

$$\begin{cases} \Delta_{k_x} = \bar{x} \cdot \sum_{i=1}^n k_i (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)^i \\ \Delta_{k_y} = \bar{y} \cdot \sum_{i=1}^n k_i (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)^i \end{cases} \quad (2)$$

偏心畸变是由于组成成像系统的各镜头光轴不重合造成的。偏心畸变包括径向畸变因素和切向畸变因素, 若忽略高次项, 设偏心畸变系数 $p_1, p_2, \Delta_{p_x}, \Delta_{p_y}$ 分别表示为投影

点在像平面坐标系中 x 轴、 y 轴上的偏心畸变量, 则数学模型为:

$$\begin{cases} \Delta_{p_x} = 2p_2 \bar{x} \cdot \bar{y} + p_1 (3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) \\ \Delta_{p_y} = 2p_1 \bar{x} \cdot \bar{y} + p_2 (\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2) \end{cases} \quad (3)$$

薄棱镜畸变是由于光学镜头在制造过程中, 光学镜片和图像传感器在加工和组装过程中产生排列偏差, 造成相对位置平移或倾斜而产生的误差。同样忽略高次项, 设薄棱镜畸变系数为 $s_1, s_2, \Delta_{s_x}, \Delta_{s_y}$ 分别表示为投影点在像平面坐标系中 x 轴、 y 轴上的薄棱镜畸变量, 则数学模型为:

$$\begin{cases} \Delta_{s_x} = s_1 (\bar{x}^2 + \bar{y}^2) \\ \Delta_{s_y} = s_2 (\bar{x}^2 + \bar{y}^2) \end{cases} \quad (4)$$

将以上数学模型式 (2)、(3)、(4) 连立, 则有:

$$\begin{cases} x = \bar{x} + \Delta_{k_x} + \Delta_{p_x} + \Delta_{s_x} \\ y = \bar{y} + \Delta_{k_y} + \Delta_{p_y} + \Delta_{s_y} \end{cases} \quad (5)$$

则式 (5) 即表示理想成像点和实际成像点之间的关系。

加入畸变模型, 能够更为准确的描述空间点与其投影点的投影关系, 使得图像更为接近物体和场景实际, 计算机视觉测量、三维恢复等更为精确。所以, 进行镜头畸变校正是十分重要的环节。

2 基于直线投影特征的校正方法

一般的应用中, 加入一阶或是一、二阶径向畸变已足够准确的描述成像过程。Tsai 在其研究中指出, 过多的考虑镜头畸变的影响, 需要在成像过程的描述中加入更多的畸变参数, 会使得计算的解不稳定, 对提高摄像机标定精度也不能产生足够的帮助^[12]。随着摄像机制造工艺水平的提升和计算机视觉技术应用的领域越来越广泛, 在一些情况下, 仅考虑径向畸变已无法满足实际需求^[13]。基于直线投影特征的畸变校正方法能够实现多个畸变参数组合解的求取, 且标定条件简单, 标定方法简便。

2.1 直线投影特征

空间中一条不平行成像平面的直线在理想情况下, 其投影成像仍是一条直线。由于镜头畸变的存在, 实际所成的像是一条曲线。若有空间直线 L , 在成像面 π 上投影成一条曲线 l , 取直线 l 上任意两点 $a_1(x_1, y_1), a_3(x_3, y_3)$, 并取线段 a_1a_3 上一点 $a_2(x_2, y_2)$, 点坐标为像平面坐标系坐标。在像平面上, 向量 $\vec{a_1a_2}$ 与向量 $\vec{a_1a_3}$ 为同一直线的方向向量。理想情况 (无畸变) 下则有 $\vec{a_1a_2} \times \vec{a_1a_3} = 0$, 将式 (5) 代入可得:

$$f = x_1y_3 + x_2y_1 + x_3y_2 - x_1y_2 - x_2y_3 - x_3y_1 = 0 \quad (6)$$

函数 f 中含有未知数 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i (i \in \mathbf{N}^+), p_1, p_2, s_1, s_2$, 即 $f = 0$ 为 $(i+4)$ 元二次方程。在具体的应用中, 可根据镜头类型和精度要求, 确定畸变系数的数量和类型, 建立所需的二次方程。

2.2 基于遗传算法计算最优畸变系数组

遗传算法是模拟自然界生物遗传过程、进化选择而形成的一种过程搜索最优解的算法, 适用于解决复杂的非线性

性和多维空间寻优问题^[14]。遗传算法的优势在于自组织、自适应和智能性,鲁棒性强,不受函数连续性和可导性约束,易于并行等。广泛应用于自动控制、计算科学、模式识别、工程设计、智能故障诊断、管理科学和社会科学等领域。有研究表明当参数大于 10 个时,标准遗传算法的寻优能力开始变差,且随着搜索空间维数的增加,算法性能会急剧退化^[15],故而在确定染色体基因数量和类型时,需结合实际精度要求和参数影响大小确定。文中遗传算法流程如图 1,根据所求解的畸变系数组成染色体,即系数组合成的解;以正态分布生成初始种群;根据式(6)建立数值评价标准,即适应度函数;每一代染色体种群均进行变异和交叉运算,生成下一代种群;设置计算终止条件,对每一代染色体种群的适应度函数值进行计算后,判断是否符合终止运算条件;遗传计算最多循环 500 代。

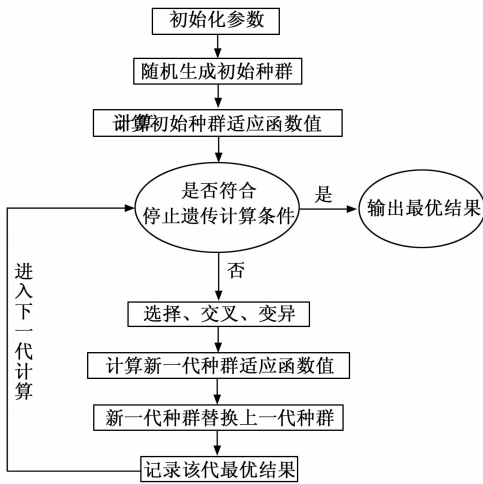


图 1 遗传计算流程图

1) 适应度函数。根据直线投影特征的关系式(6),设目标函数为:

$$f_{\text{target}/\min} = (x_1y_3 + x_2y_1 + x_3y_2 - x_1y_2 - x_2y_3 - x_3y_1)^2 = 0 \quad (7)$$

适应度函数是用来评价生物对生存环境的适应能力,是区分个体(问题解)适应能力优劣的评价标准,以保证适应能力强的个体能够产生更多的子个体。遗传算法以适应度函数作为选择机制,只能朝着适应度增大的方向进化。如何建立适应度函数对遗传算法收敛性和收敛速度的有较大影响,需根据经验或者具体问题中的算法合理设计适应度函数。因目标函数理想值为 0,则可设适应度函数定义为:

$$F(\alpha) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{1}{f_{\text{target}} + 1} \quad (8)$$

其中: j 表示第 j 条直线样本, m 表示直线的样本总量; k 表示某一直线上,第 k 组共线三点,适应度函数理想值为 1,且目标函数越接近理想值 0,适应度函数值则越接近理想值 1。

2) 染色体矢量及初始化种群。将各个待算参数组合成

一个染色体 $\alpha = (k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2) = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6)$,由 N 条染色体组成初始种群,其中每个基因从均值为 0,方差为 0.1 的正态分布中随机产生。

3) 编码方式。本文采用浮点数编码方法,该方法较二进制方法便于在较大空间进行遗传搜索、适合于表示范围较大的数,对精度要求较高的计算,同时能够改善运算的复杂性,提升运算效率。

4) 选择算子。选择运算体现了“优胜劣汰”的自然法则,即适应度函数值高的个体参与生成下一代个体的概率将会更大,通过选择运算使得优质个体得以保存,劣质个体则被淘汰。设选择运算的公式:

$$p_i = q(1 - q)^{i-1} \quad (9)$$

将某一代个体的适应度函数值按大小排序,可得各个个体的选择概率,则 p_i 为第 t 个个体的选择概率, q 为排序第 1 的个体的选择概率。

5) 交叉算子。交叉运算是由两个父体按照特定的组合方式产生出两个新的个体。交叉运算是遗传计算中产生新一代个体的主要方法,保证和影响算法的全局搜索能力。在浮点数编码中一般使用算数交叉。假设两个父体为 β_1, β_2 ,所产生的新个体为 β'_1, β'_2 ,则算子表示为:

$$\begin{cases} \beta'_1 = r\beta_1 + (1-r)\beta_2 \\ \beta'_2 = (1-r)\beta_1 + r\beta_2 \end{cases} \quad (10)$$

$r \in (0, 1)$,是一个随机数,交叉概率设为 P_c 。 P_c 值大小对新生个体生存能力产生影响,当 P_c 值较大时,产生新生个体的能力较强,但可能会破坏较优的基因;当 P_c 值较小时,产生新个体的能力较弱,使得运算的解准确度不足。

6) 变异算子。变异是偶然因素影响下,导致生物基因发生微小变化,使得生物能够表现出新的性状,变异是生成新物种的一个方法,虽然变异概率较小,但也是产生新物种不可或缺的一步。遗传算法中的变异算子能够对解的多样性进行补充,可对搜索空间中的局部细节进行搜索,避免信息丢失,改善局部搜索能力,防止过快收敛到局部最优解。在计算中,变异操作将个体染色体中的某些基因以一定概率进行等位替换,从而产生新的个体。这里采用非均匀变异算子,若父体为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6)$,设其中某个基因 α_i 变异后的子代为 α'_i ,设变异概率为 P_m 。

$$\alpha'_i = \begin{cases} \alpha_i + (\alpha_{i,\min} - \alpha_i)g(D), & \lambda < 1/2 \\ \alpha_i - (\alpha_{i,\max} - \alpha_i)g(D), & \lambda > 1/2 \\ \alpha_i, & \lambda = 1/2 \end{cases} \quad (11)$$

其中: $g(D) = \left[\lambda \left(1 - \frac{D}{D_{\max}} \right) \right]^3$, $\lambda \in (0, 1)$,是一个随机数; D 表示目前运行代数, D_{\max} 表示最大运行代数。

7) 终止条件。满足以下任意一条即终止遗传算法的计算^[16]:

- (1) 当 $D > D_{\max}$,即当前代数大于最大运行代数。
- (2) 若目前运行代数并没有超过最大运行代数,当 $\gamma > \epsilon_{\text{stop}}$,停止计算。

$$\epsilon_{\text{stop}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(f_{\max}(\alpha) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(\alpha_j) \right)^2} \quad (12)$$

其中: ϵ_{stop} 为最优个体适应函数值与平均适应度之差的算数平方根, γ 为运行终止的最小值, N 为第 D 代的个体总数。

3 实验与分析

如图 2, 利用获取到的单幅棋盘网格标定板图像进行实验验证。棋盘网格为 10×10 格, 则可形成横、纵、斜四个方向的多条直线。根据畸变数学模型, 随着成像点与主点的距离增大, 畸变值越大。此外, 一条直线投影成的曲线上的两条线段斜率之差受到曲线位置影响, 曲线位置不同, 各畸变系数对曲线的弯曲程度, 即两线段的斜率之差的影响不同, 例如若空间直线的投影过主点或离主点很近时, 则径向畸变对投影曲线的弯曲程度影响较小, 若选取的直线数量不足, 或分布不均匀, 会使得解的稳定性或准确性不高。因此, 为保证涵盖的直线信息全面, 选择用于实验的直线需在图像中心周围均匀分布, 按照此原则取 28 条直线。考虑两点距离过近可能使得直线斜率误差较大, 取直线上可见的最长线段端点及中点坐标作为式 (6) 的所需坐标点。使用 matlab 软件编写程序。实验中分染色体 $\alpha_1 = (k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$ 和染色体 $\alpha_2 = (k_1, k_2, p_1, p_2)$ 两种情况。表 1 为染色体 α_1 的实验数据, 表 2 为染色体 α_2 的实验数据。每种情况进行 20 组实验。

从实验的数据分析, 一阶径向系数 k_1 比二阶径向畸变系数 k_2 约大两个数量级, 这是因为一阶径向畸变对图像的影响要远大于二阶径向畸变, 在实验数据中明显体现出这一点。在部分应用领域的畸变校正中, 仅考虑一阶径向畸

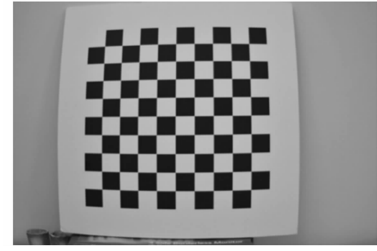


图 2 用于畸变校正的图像

变就能够满足精度需要。遗传算法求取的解是单个染色体的最优解, 各个基因之间的数值大小相互影响, 畸变系数 p_1, p_2, s_1, s_2 本身也包含了一阶径向畸变成分, 所以其数值也比二阶径向畸变系数 k_2 要大。各畸变系数并不是固定不变, 而是在一定范围内有浮动, 即使改变染色体的基因数目也是如此。这是因为遗传算法求取的解是使得适应度函数值最大的组合解, 每一条染色体中的基因值不代表单个畸变系数的最优值。若要进行图像畸变的校正, 应将最优解作为一组整体使用。从适应度函数值分析, 可见每组解均能够使得适应度函数值趋近于 1, 也就是将每条直线投影成的曲线上三点确定的两条线段的斜率校正成趋近相等。对带有畸变的图像进行畸变系数组合最优解的求取, 然后利用该畸变系数组合最优解对其进行校正。图 3 (a) 为校正前图像, 图 3 (b) 为校正后图像, 可见校正效果较好。

4 结语

本文介绍了摄像机镜头的理想成像模型, 分析了镜头畸变产生的原因、各类型畸变对图像的影响程度和畸变的数学模型。基于直线投影特征, 利用存在于直线投影成的曲线上的两条线段, 在理想情况下斜率相等, 而在带有畸变

表 1 染色体为 α_1 的畸变参数与适应度函数值

组次	k_1	k_2	p_1	p_2	s_1	s_2	适应度函数值
1	2.43870E-04	8.88000E-06	9.22000E-05	2.96480E-04	1.23300E-05	1.68690E-04	0.973758842
2	3.27450E-04	7.92000E-06	6.63500E-05	1.90390E-04	9.82800E-05	1.66640E-04	0.992976687
3	2.57430E-04	9.60000E-06	1.18300E-04	1.81750E-04	1.47640E-04	3.09970E-04	0.998478044
4	3.27640E-04	7.77000E-06	9.19200E-05	3.06200E-04	3.11500E-05	1.85000E-04	0.971322803
5	3.27430E-04	7.69000E-06	1.28250E-04	2.12030E-04	5.27300E-05	1.99750E-04	0.991637619
6	3.27520E-04	5.76000E-06	1.46340E-04	3.27380E-04	8.56200E-05	5.59200E-05	0.981847151
7	3.27540E-04	7.20000E-06	7.69600E-05	3.14770E-04	2.13410E-04	2.15900E-05	0.979170044
8	3.27660E-04	6.35000E-06	1.38690E-04	3.27420E-04	7.69000E-05	1.91760E-04	0.990567603
9	3.24640E-04	7.68000E-06	7.20100E-05	2.26690E-04	1.44790E-04	1.03950E-04	0.992054664
10	3.27660E-04	6.35000E-06	1.38690E-04	2.70300E-04	7.69000E-05	1.91760E-04	0.950610283
11	2.63010E-04	8.50000E-06	2.45080E-04	2.69330E-04	1.23700E-05	2.04110E-04	0.966331892
12	2.15120E-04	8.79000E-06	1.13900E-04	3.27300E-04	1.75240E-04	2.36390E-04	0.987152207
13	2.57790E-04	6.64000E-06	2.57900E-05	3.27610E-04	2.32970E-04	3.09240E-04	0.993457869
14	3.27470E-04	8.62000E-06	1.60680E-04	4.43900E-05	7.71200E-05	3.19550E-04	0.996848927
15	3.27660E-04	6.35000E-06	1.38690E-04	3.27420E-04	7.69000E-05	1.91760E-04	0.982201412
16	3.25670E-04	5.47000E-06	1.57640E-04	3.20230E-04	3.10200E-05	2.46890E-04	0.960245734
17	3.24350E-04	6.64000E-06	2.57900E-05	3.03460E-04	5.49000E-05	2.12320E-04	0.962370228
18	3.27660E-04	6.02000E-06	4.22000E-06	7.19400E-05	9.38900E-05	1.10940E-04	0.989842375
19	3.27470E-04	8.62000E-06	1.60680E-04	4.55100E-05	7.71200E-05	3.19550E-04	0.996737256
20	3.27660E-04	6.35000E-06	1.38690E-04	2.68150E-04	1.42700E-04	1.66610E-04	0.962946161

表 2 染色体为 α_2 的畸变参数与适应度函数值

组次	k_1	k_2	p_1	p_2	适应度函数值
1	2.24770E-04	8.43000E-06	3.28000E-05	2.88140E-04	0.984440937
2	3.27610E-04	7.84000E-06	4.56900E-05	2.81570E-04	0.997075234
3	2.59320E-04	8.08000E-06	3.27580E-04	3.10680E-04	0.981905724
4	3.27540E-04	6.82000E-06	4.10000E-05	2.31780E-04	0.980048162
5	3.27410E-04	6.74000E-06	9.06500E-05	2.45700E-04	0.980883811
6	3.27180E-04	6.83000E-06	1.00000E-05	2.66200E-04	0.981292021
7	2.63080E-04	8.49000E-06	1.19000E-05	1.91360E-04	0.975926679
8	2.27310E-04	8.62000E-06	9.62500E-05	2.91570E-04	0.971780335
9	2.83720E-04	7.21000E-06	2.77610E-04	2.95900E-05	0.977976828
10	2.52270E-04	8.62000E-06	6.58000E-06	1.66150E-04	0.957228338
11	3.27520E-04	5.07000E-06	1.70000E-05	2.08490E-04	0.988853629
12	2.97500E-04	7.92000E-06	1.50200E-04	3.11240E-04	0.975816004
13	3.27630E-04	7.16000E-06	3.27420E-04	1.41500E-05	0.985824093
14	2.84290E-04	8.04000E-06	2.50000E-05	2.32510E-04	0.980475184
15	3.27570E-04	6.47000E-06	6.90800E-05	2.37800E-04	0.980037508
16	3.27460E-04	6.78000E-06	2.92880E-04	1.38960E-04	0.991091963
17	2.24270E-04	7.16000E-06	5.34500E-05	2.61720E-04	0.979943507
18	3.24890E-04	7.18000E-06	1.17600E-05	2.87420E-04	0.971150806
19	3.27410E-04	6.73000E-06	3.10000E-05	2.66870E-04	0.989790085
20	3.27420E-04	6.43000E-06	5.86600E-05	1.83360E-04	0.990017133

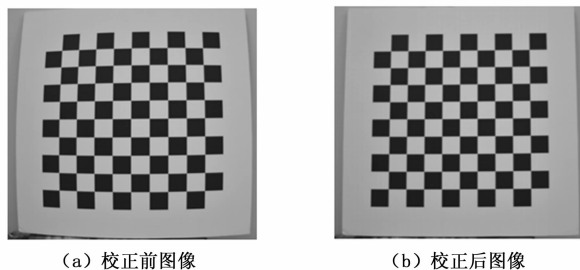


图 3 校正前后图像对比

的情况下不相等的特点，运用遗传算法求解出畸变系数组的最优解，并实现了畸变的校正。从实验结果来看本方法虽不能求出单个畸变系数的最优解，但使用畸变系数组的最优解能够较好的实现图像畸变校正。基于直线投影特征的镜头畸变校正方法，只需在摄像机视场内存在直线，并获取直线的投影图像即可实现标定。该方法对标定条件要求简单，程序简便，能够实现现场镜头校正。

参考文献:

[1] 白福忠, 王建新, 杨慧珍, 刘晓. 视觉测量技术基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

[2] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics Automation, 1987, 3 (4): 323-344.

[3] Martins H A, Birk J R, Kelley R B. Camera models based on data from two calibration planes [J]. Computer Graphics and Imaging Processing, 1981, 17: 173-180.

[4] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelli-

gence, 2000, 22 (11): 1330-1334.

[5] 叶峰, 王敏, 陈剑东, 等. 共面点的摄像机非线性畸变校正 [J]. 光学精密工程, 2015, 23 (10): 2962-2970.

[6] 周富强, 蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (8): 228-232.

[7] 贺俊吉, 张广军, 杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (5): 597-599.

[8] 曲学军, 张璐, 张凌云. 基于新的成像模型的摄像机标定与三维重建 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (8): 1830-1836.

[9] 汪贵平, 王会峰, 刘盼芝, 等. 特征平行直线的成像畸变现场校正 [J]. 光子学报, 2014, 43 (1): 1-5.

[10] MA S D. A Self-calibration technique for active vision system [J]. IEEE Transaction on Robot and Automation, 1996, 12 (1): 114-120.

[11] 明涛, 贾云得. 基于主动视觉的摄像机线性自标定方法 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26 (1): 27-35.

[12] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986, 364-374.

[13] 李晓明, 姚剑, 张继福. 摄像机畸变模型的比较与选择 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27 (5): 824-837.

[14] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25 (10): 2911-2916.

[15] TANG Kezong, YANG Jingyu, CHEN Haiyan, et al. Improved Genetic Algorithm for Nonlinear Programming Problems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22 (3): 540-546.

[16] 熊邦书, 黄武涛, 李新民. 基于改进遗传算法的摄像机标定参数优化方法 [J]. 半导体光电, 2016, 37 (1): 110-114, 118.