

文章编号: 0253-2239(2009)11-3136-07

# 基于一维标定物和改进进化策略的相机标定

张灵飞 陈 刚 叶 东 车仁生

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为了解决运动参数光电探测过程中的相机标定问题,制作一种两端及中间各安装一个红外反光标记球的一维标定物。不需要其它复杂标定装置,只要将这种特制的一维标定物在测量空间内多次随意移动并摄取其图像,即可实现标定。算法首先假定主点位于像面中心附近的某个位置,再求出焦距、旋转矩阵、平移向量和比例因子,最后通过评价函数将相机标定转换成寻找两相机最佳主点对的非线性最小化问题。在传统进化策略中引进个体的自我改进系数、个体间距离等概念,提出了求取子代个体间的欧式距离并排序的方法,设计了搜索最佳主点对的改进型进化策略算法。与传统标定方法相比,基于一维标定物的方法克服了多相机场合的遮挡问题,改进进化策略的引入打破了一维标定物需做某种特殊运动的限制,使一维标定物自由运动时相机内、外参数的同时求解成为可能,改进的模拟退火进化策略改善了算法的全局收敛性能并加快了收敛速度。

**关键词** 测量;机器视觉;相机标定;一维标定物;进化策略;不受限运动;模拟退火

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3136

## Cameras Calibration Based on One-Dimensional Reference Object and Improved Evolutionary Strategy

Zhang Lingfei Chen Gang Ye Dong Che Rensheng

(Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** To calibrate the intrinsic and extrinsic parameters of cameras in motion parameters photoelectric measurement system, a novel approach based on improved evolutionary strategy and surveying a rigid one-dimensional object carrying three markers on its middle and extremities moved inside the working volume, which does not require other complex calibration equipments, was proposed in this paper. Firstly, it is assumed that the principal point is located at a certain location around the image plane center. Then the focal length of cameras, the rotation matrix, translation vector and the scale factor are obtained. Finally, the estimation of intrinsic and extrinsic parameters of cameras is formulated as a nonlinear minimization problem of a cost function. The simulated annealing evolutionary strategy algorithm was improved by introducing the self-improved factor and the Euclidean distance between individual. Consequently the global convergence performance of the search algorithm of this method was mended and accelerated. By introducing the evolutionary strategy, the new method can find out the intrinsic and extrinsic parameters all together, and need not constrain the movement of the one-dimensional object in comparison with traditional methods.

**Key words** measurement; machine vision; cameras calibration; one-dimensional reference object; evolutionary strategy; unconstrained motion; simulated annealing

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(50275040)资助课题。

作者简介: 张灵飞(1980—),男,博士研究生,主要从事计算机视觉,光电探测和图像处理等方面的研究。

E-mail: nickzhlf@163.com

导师简介: 车仁生(1939—),男,教授,博士生导师,主要从事视觉静态与动态三维测试技术,智能传感器和智能仪器,虚拟现实技术与仪器,计算机辅助与计算机辅助质量控制与管理等方面的研究。E-mail: crs@hit.edu.cn

## 1 引言

在光电探测、运动分析、静态测量和三维重建等机器视觉(计算机视觉)应用领域中<sup>[1~7]</sup>,相机标定往往是必不可少的步骤。根据所使用的标定物的维数,相机标定可分为基于三维<sup>[8~11]</sup>、二维<sup>[12~14]</sup>、零维(自标定)<sup>[15,16]</sup>、一维<sup>[17~25]</sup>标定物的四类方法<sup>[17]</sup>。相对于基于三维和二维标定物,基于一维标定物的标定方法,具有造价低,方便移动,适合现场在线标定等优点,并且更重要的是能够解决多相机场合存在的遮挡问题。另外,它的精度和适用范围优于自标定。

国外对基于一维标定物的标定方法也进行了研究。Z. Y. Zhang<sup>[17]</sup>的方法是:一维标定物由3个或更多的彼此距离已知的共线点构成,拍摄其在不同位姿下的6幅以上图像以实现相机标定,但它需要固定其中1个点,只允许一维标定物绕该固定点旋转。P Hammarstedt等<sup>[18]</sup>讨论了基于一维标定物的标定方法的退化失效情况,即其临界运动。F. C. Wu等<sup>[19]</sup>分析了Z. Y. Zhang方法<sup>[17]</sup>的几何本质,并提出了一种允许一维标定物做平面运动的方法。Fei Qi等<sup>[20,21]</sup>先后提出了:a)只限定一维标定物上多个点中的某一个做平面运动;b)一维标定物做一般运动,两种情况下的相机标定方法。

国内周富强等<sup>[22]</sup>采用线性和非线性结合的方法,允许一维靶标自由移动,但其在内参数已知的情况下,只求取双目传感器的结构参数(外参数)。王年等<sup>[23]</sup>限定一维移动物体做平移运动,先后求取相机内、外参数,并给出了将刚体一般运动转化为平移运动的方法。王亮等<sup>[24]</sup>提出了当一维标定物作任意刚体运动时,线性地标定多相机的内参数的方法。邓小明等<sup>[25]</sup>设计了当一维标定物包含5个或更多的共线点,通过其3次或更多次的一般刚体运动,标定反射折射摄像机的内参数的方法。

当前国内外文献中基于一维标定物的诸多方法中,要么需要对一维标定物的运动做某种限制,要么只能求取相机内参数或外参数。原因是自由运动的一维标定物所能提供的约束不足以解出相机所有参数。

解决此问题可以先假定主点位于某个位置,然后求出其它内外参数,最后迭代搜索最佳主点对并优化其它参数。确定两相机的最佳主点对从本质上讲类似于运动员最佳配对问题(Athletes optimum partnership problem)。传统的运动员最佳配对问题可用回溯法(Backtracking algorithm)解决,其本质上是穷举法,最坏时间复杂度很高。传统的优化

方法利用的是目标函数的梯度等信息。然而,确定两相机的最佳主点对的搜索空间是几乎可无限精细化的变化的非离散的四维空间。这是回溯法和梯度法(Gradient method)<sup>[26]</sup>等传统寻优方法难于解决的。进化策略(Evolutionary strategy)<sup>[27,28]</sup>可以从多个初值点开始,沿多条路径搜索实现全局或准全局最优,计算过程中不需要存储状态或决策变量,可大大减少所需的计算内存。但进化策略容易陷入局部收敛(早熟现象),收敛速度较慢,特别是后期收敛速度过慢,加快收敛速度又会导致解的精度降低。模拟退火算法(Simulated annealing algorithm)<sup>[29,30]</sup>是全局最优的随机性算法,它通过赋予搜索过程一种可控的突跳概率来避免局部收敛,但它无历史信息,采用串行结构,搜索过程冗长。

本文提出了一种基于自由运动的一维标定物和改进的模拟退火进化策略的能同时求解相机内、外参数的标定方法。实验结果证明算法是可行的。

## 2 双相机的模型及对极几何关系

### 2.1 相机几何模型

空间点 $A(X, Y, Z)$ 在左、右相机的像平面上的投影为 $a_l(x, y)$ 、 $a_r(x, y)$ ,用投影方程可表示为:

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & fs & u_0 \\ 0 & \tau f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} | -\mathbf{RT}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $\lambda$ 为比例因子, $\tau$ 为高宽比, $s$ 为投影偏斜度, $f$ 为相机焦距, $(u_0, v_0)$ 为相机主点坐标。它们组成了相机内参数。一般情况下,相机光轴垂直于像平面,故 $s = 0$ ;相机像平面为正方形,则高宽比 $\tau = 1$ 。为了方便,绝对坐标系设定在左相机上,其 $x, y$ 坐标轴分别平行于像平面的坐标轴。 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 表示绝对坐标系下的旋转姿态和平移,它们组成相机的外参数。

焦距和主点已知时,点 $a$ 的坐标可归一化为:

$$a_{l,r} = \begin{bmatrix} (x_{l,r} - x_{d,l,r}) / -f_{l,r} \\ (y_{l,r} - y_{d,l,r}) / -f_{l,r} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

### 2.2 双相机对极几何关系(epipolar geometry)

为了公式推导方便,用点 $A$ 代表空间任意点(即公式推导结果对于一维标定物上 $B, C$ 点在空间中的任意位置点同样适用)。图1中过 $A, B, C$ 三点的直线与过 $O_l, O_r$ 两点的直线平行。 $O_l, O_r$ 为左、右相机焦点, $f_l, f_r$ 为左、右相机焦距,即左、右像面中心 $o_l, o_r$ 到相应焦点 $O_l, O_r$ 之间的距离。 $e_l, e_r$ 为左、

右像面与直线  $O_l O_r$  的交点,即极点。

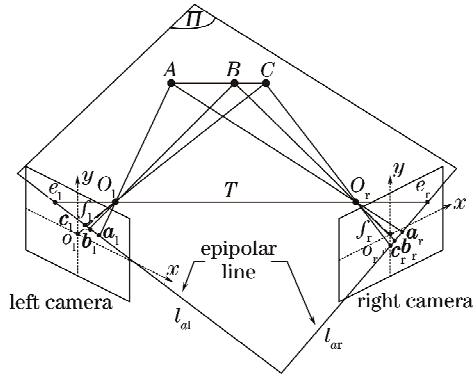


图 1 对极几何及一维标定物上 A、B、C 三点成像关系  
Fig. 1 Binocular epipolar geometry and project relation of one-dimensional objects(point A, B, C)

假定两幅图像的成像中心不重合,任意三维空间点 A 和它在两像平面上的投影点  $a_l, a_r$  共同确定了平面  $\Pi$ , 即极平面(Epipolar plane), 见图 1。极平面与两像平面相交于直线  $l_{al}$  和  $l_{ar}$ , 即外极线(Epipolar line)。对极几何关系用代数的形式可表示为:

$$\mathbf{a}_r^T \mathbf{F} \mathbf{a}_l = 0. \quad (3)$$

根据(3)式,通过改进八点法<sup>[31]</sup>可求基础矩阵  $F$ (Fundamental matrix)。由  $T$  的分量组成反对称矩阵  $S$ ,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{则可得: } \mathbf{F} = \mathbf{K}_r^T \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{K}_l^{-1}. \quad (5)$$

此式由左、右相机内参数矩阵  $\mathbf{K}_l, \mathbf{K}_r$  和外参数矩阵  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{S}$  的标量积组成,包含了需要标定的所有参数。当内参数已知时,考虑(2)式,变换(3)式可得:

$$\mathbf{a}_r^T \mathbf{E} \mathbf{a}_l = 0, \quad \mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{S}, \quad (6)$$

其中矩阵  $\mathbf{E}$  为本质矩阵,它只含外参数。

### 3 双相机的内、外参数和比例因子

#### 3.1 半标定基础矩阵和焦距

假定两相机焦距相等,其高宽比和主点已知,则通过计算  $F$  矩阵和  $E$  矩阵之间的关系,可将完全未标定状态转换成半标定状态<sup>[32]</sup>,可得半标定基础矩阵(Semi-calibrated fundamental matrix):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \tau' & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x'_0 & y'_0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F} \begin{bmatrix} \tau & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{S} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix}. \quad (7)$$

设矩阵  $G$  的奇异值分解形式如下:  $\mathbf{G} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$  其中  $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(a, b, 0)$ , 即由奇异值  $(a, b > 0)$  组成的对角矩阵。 $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  是正交矩阵。可推导出关于  $f^2$  的一个二次方程和两个线性方程:

$$f^4 [a^2 (1 - U_{31}^2) (1 - V_{31}^2) - b^2 (1 - U_{32}^2) (1 - V_{32}^2)] + f^2 [a^2 (U_{31}^2 + V_{31}^2 - 2U_{31}^2 V_{31}^2) - b^2 (U_{32}^2 + V_{32}^2 - 2U_{32}^2 V_{32}^2)] + (a^2 U_{31}^2 V_{31}^2 - b^2 U_{32}^2 V_{32}^2) = 0, \quad (8)$$

$$f^2 [a U_{31} U_{32} (1 - V_{31}^2) + b V_{31} V_{32} (1 - U_{32}^2)] + U_{32} V_{31} (a U_{31} V_{31} + b U_{32} V_{32}) = 0, \quad (9)$$

$$f^2 [a V_{31} V_{32} (1 - U_{31}^2) + b U_{31} U_{32} (1 - V_{32}^2)] + U_{31} V_{32} (a U_{31} V_{31} + b U_{32} V_{32}) = 0. \quad (10)$$

焦距求取方法:

(1) 先求基础矩阵  $F$  和半标定基础矩阵  $G$  (7式)。

(2) 对  $G$  进行奇异值分解,求得系数  $U_{31}, U_{32}, V_{31}, V_{32}$  以及非零奇异值  $a$  和  $b$ 。

(3) 用 8 式求解关于  $f^2$  的 2 次方程,并利用线性方程[(9)式,(10)式]判断求得的  $f$  值以剔除不合理解。

#### 3.2 本质矩阵和外参数

当内参数矩阵  $\mathbf{K}_l, \mathbf{K}_r$  确定后,基础矩阵可被转换成只含外参数的本质矩阵  $\mathbf{E}$ 。然后用奇异值分解(Singular value decomposition, SVD) 的代数解析

方法求取外参数旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  $\mathbf{T}$ 。由于  $\mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{S}$  的右半部  $\mathbf{S} = \mathbf{T}_\perp$ , 因此,  $\mathbf{E} \mathbf{T} = 0$ 。而本质矩阵  $\mathbf{E}$  的 SVD 分解形式为  $\mathbf{E} = [\mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T]$ 。可得:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = \mathbf{U} \mathbf{Z} \mathbf{V}^T \\ \mathbf{R}_2 = \mathbf{U} \mathbf{Z}^T \mathbf{V}^T, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} = \pm \mathbf{V}^3 \end{cases}, \quad (11)$$

其中  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{T}$  都满足(6)式。根据被测 3D 点肯定位于两相机前方的事实,可以唯一地确定  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  的解。

#### 3.3 确定比例因子

求解本质矩阵  $\mathbf{E}$  时,我们假设  $\|\mathbf{T}\| = 1$ , 这样得到的双相机间距只是真实距离的范数<sup>[30]</sup>, 于是重建得到的 3D 点与真实点之间也相差同样的比例因

子  $\lambda$ ：

$$\lambda = \|\mathbf{T}\|, \mathbf{T} = \lambda \mathbf{T}, A^i = \lambda A^i, \quad (12)$$

其中  $A^i$  为真实的 3D 点,  $\mathbf{T}$  为真实相机间距。  $A^i$  是假设  $\|\mathbf{T}\| = 1$  得到的重建意义上的点。

为了确定  $\lambda$  的值, 我们需要知道  $A^i, C^i$  两点之间的确切的距离  $L^i$ , 设  $A^i, C^i$  为重建得到的两点,  $L$  为  $A^i, C^i$  两点之间的三角法重建距离, 则:

$$(A^i - C^i) = \lambda(A^i - C^i) \Rightarrow L^i = \lambda L \Rightarrow \lambda = L^i/L. \quad (13)$$

然而实际测量过程中受噪声等的影响, 重建得到的  $A^i, C^i$  的坐标值存在误差, 因此  $L$  的值也存在误差, 从而导致  $\lambda$  的值也有误差。为了减小误差, 我们采用多次重复测量的方法, 得到  $M$  次测量的  $\lambda$  的均值:

$$\lambda = E\left(\frac{L^i}{L}\right) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{L_i^i}{L_i} \Rightarrow \lambda = \frac{L^i}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{L_i}. \quad (14)$$

文中  $A, C$  是固定在一维标定物(刚性杆)两端的标记球中心点,  $L^i$  有唯一的事先确定的精确值。

#### 4 改进的进化策略确定最佳主点对

前面几节, 我们始终假设主点的位置已知。本节, 我们调整主点的位置, 通过最小化一个根据几何学推导出的评价函数来寻找主点的最佳位置。

##### 4.1 测量误差及评价函数

主点位置不准确使求出的焦距和外参数也不准确<sup>[33]</sup>。导致重建的一维标定物的长度  $L_i$  存在误差  $e_i^L$ :

$$e_i^L = |L_i - L^i|. \quad (15)$$

主点位置的改变导致同一个 3D 空间任意点  $A$  在两像平面上的投影点  $a_l, a_r$  和其对应的主点  $O_l, O_r$  决定的两条直线  $a_l O_l, a_r O_r$  之间的距离也相应改变。理想情况下这两条直线应该相交于点  $A$ 。但实际上由于投影点  $a_l, a_r$  的测量误差, 它们并不相交。因此严格来说, (3) 式并不能完全满足。这就产生了共面误差  $e_i^F$ :

$$e_i^F = |\mathbf{a}_{li}^T \mathbf{F} \mathbf{a}_{ri}|. \quad (16)$$

这样求解相机内外参数问题可转换为基于评价函数的非线性最小化问题。

$$\min_{(q, c)} g(f, \mathbf{R}, \mathbf{T}) = \alpha \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^L + \beta \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^F, \quad (17)$$

其中  $N$  是被测点的个数, (17) 式中第二项对确定 3D 点的影响比第一项小的多, 只是作为优化因素。因此,  $\beta$  的取值应该远小于  $\alpha$ 。实验中取  $\alpha = 1, \beta = 0.05$ 。

##### 4.2 改进的模拟退火进化策略算法最优化主点对

两相机主点  $C_l, C_r$  的候选点的不同会影响相机其它参数的标定, 从而也会影响 3D 点坐标的求取。本文用改进模拟退火进化策略寻找最佳主点对。

在搜索最佳主点对的过程中, (17) 式是唯一的评价函数。每个候选主点对都是独立的, 所有的候选主点对构成了种群集合, 每个候选主点对都以适应度函数  $f_e$  作为其适应性的度量准则。

$$f_e = 1/g(f, \mathbf{R}, \mathbf{T}). \quad (18)$$

进化策略的初始种群的产生方法和规模对初始种群的个体分布状况有着相当的影响, 而初始种群的个体分布状况又直接影响算法的全局收敛性能。由于传统进化策略的初始种群是随机选取的, 初始种群的覆盖空间具有很大的不确定性。如果初始种群空间不包含全局最优解, 而进化算子又不能在有限的进化代数内将覆盖空间扩展到全局最优解所在的区域, 那么局部收敛就不可避免。局部收敛具体表现有:

1) 基于适应度选择作用下, 使进化过程中具有最优解基因的低适应度的个体被逐渐淘汰, 而且使种群中个体趋于一致;

2) 变异产生的适应度高的个体数量很少, 变异的作用不明显。

为了保持初始种群及其进化过程中的多样性, 并在尽可能少的代数内将寻优搜索引导到最优解区域, 避免传统进化策略在随机产生初始种群和进化变异过程中可能导致的近亲繁殖问题, 改进的模拟退火进化策略算法引入个体的自我改进系数、个体间距离的概念。具体做法如下:

1) 计算种群中个体的适应度并从大到小排序, 将适应度超过种群平均值且与当前最好值的欧氏距离高于种群平均值的个体定为最优保护型子代个体。

令种群中个体间距离为  $D_{i,j}$ , 第  $i$  和  $k$  个种群个体的左、右相机候选主点在各自像面的坐标分别为  $[P_{oli}(x_{li}, y_{li}), P_{ori}(x_{ri}, y_{ri})]$  和  $[P_{olk}(x_{lk}, y_{lk}), P_{ork}(x_{rk}, y_{rk})]$ , 则:

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_{li} - x_{lk})^2 + (y_{li} - y_{lk})^2 + (x_{ri} - x_{rk})^2 + (y_{ri} - y_{rk})^2}. \quad (19)$$

2) 计算种群中个体与当前最好解的欧氏距离并由远及近进行排序, 将欧氏距离序号和适应度序号之和最大的  $N$  个个体作为保护型子代个体。

3) 引入个体的自我改进系数  $J$ 。令  $G_{old}$  为变异的父代个体的适应度,  $G_{new}$  为对应子代个体的适应度, 则有

$$J = (G_{old} - G_{new}) / G_{old}. \quad (20)$$

当子代个体优于父代个体, 即  $G_{new} \geq G_{old}$ , 对于  $J$  值达到一定阈值的个体进行最优保护。

为了克服传统进化策略随机产生初始种群(种群的祖先)时, 最佳主点对(全局最优解)可能未被包含在初始种群内, 从而导致搜索算法局部收敛的问题。改进的模拟退火进化策略算法在初始种群产生机制方面做了两项改进:

1) 采用大网格穷举法确定初始种群的一部分( $NP_1$  个候选主点对)。在保证初始种群的多样性的前提下, 尽量使离最佳主点对较近的候选主点对进入初始种群, 从而加快收敛速度。

2) 根据父代中适应度最大的个体的坐标与父代的上一代中适应度最大的个体的坐标的欧式距离  $D_{n-1, n-2}^n$  是否大于阈值  $t$ , 来决定是否扩大搜索区域, 从而尽可能将最佳主点对包含在搜索区域内。

设距离像面中心的最大偏移量  $T_{max}$ , 定义一个对应两个主点的不断改变的超立方体的四维空间  $H^n$  作为主点对搜索区域,

$$\begin{cases} H^n = H^{n-1} + \left[ \begin{matrix} C_{lmax}^n \\ C_{rmax}^n \end{matrix} \right] \pm T_{max}, D_{n-1, n-2}^n > t \\ H^n = H^{n-1}, D_{n-1, n-2}^n \leq t \end{cases} \quad (21)$$

式中  $n$  代表了种群第  $n$  代,  $C_{lmax}^n, C_{rmax}^n$  分别代表第  $n$  代种群中适应度最大的主点对中左、右相机的候选主点的像面坐标; 在产生初始种群时,  $n = 1$ , 则  $C_{lmax}^n, C_{rmax}^n$  分别代表像面中心,  $D_{n-1, n-2}^n$  表示第  $n-1$  代和  $n-2$  代中适应度最大的个体间的距离,  $t$  为阈值。

接着, 在  $H^n$  空间内随机产生一组由  $NP_2$  个主点对组成的集合作为初始种群的另一部分。这样, 可得到由  $NP$  个主点对构成的初始种群集合  $FA = [C_{l1} | C_{r1}] \in H^n, NP = NP_1 + NP_2$ 。

然后用第 3 节的方法求取对应于初始种群所有个体(每个主点对)对应的双相机焦距、外参数以及 3D 比例因子。用(18)式来评价初始种群所有个体的适应度。当初始种群的所有个体的适应度都计算出来后, 通过  $FA$  的变异, 第二个集合  $SA$  产生, 它

被称为子代, 并同样含有  $NP$  个主点对。子代的适应度也通过(18)式计算出来。在变异的过程中, 每个种群祖先被一个随机量替换<sup>[27, 28]</sup>,  $z_i(0, \sigma)$ ,  $z_i$  是一个四维空间的高斯变量, 均值为 0, 标准差为  $\sigma$ 。

$$[C_{li} | C_{ri}]^{n+1} = [C_{li} | C_{ri}]^n + h^n z_i(0, \sigma), \quad (22)$$

其中  $h^n$  代表了父代的变异幅度。为了增加主点搜索的分辨率, 引入模拟退火过程<sup>[29]</sup>。变异的幅度不断降低, 以保证在最好的区域能进行高密度的搜索。变异的幅度定义为:

$$h^n = h^0 / \sqrt{\ln(k+1)}. \quad (23)$$

(22)式中  $\sigma$  是用来改变搜索步长, 当子代更好时, 缩小搜索步长; 当父代更好时, 增大搜索步长<sup>[30]</sup>。 $\sigma$  的值根据子代和父代的优胜数量的比率  $r$  确定,

$$\begin{cases} \sigma^{n+1} = \sigma^n / \rho, & \text{if } r < 1/5 \\ \sigma^{n+1} = \sigma^n, & \text{if } r = 1/5 \\ \sigma^{n+1} = \sigma^n \rho, & \text{if } r > 1/5 \end{cases} \quad (24)$$

其中  $\rho = 0.85^{1/d}$ ,  $d = 4$  代表解空间的维数。

为了加快收敛并防止个别标定点导致的偏差, 每次计算只取标定点集的一部分用于标定。每一代种群里, 取标定点集的其他部分的子集用以评价适应度。

比较每个子代和产生它的父代的适应度, 选择适应度高的作为变异产生下一代种群的父代。用进化论的术语讲, 就是让父代和子代公平竞争, 适者生存, 优胜劣汰。这种通过变异产生子代的过程一直循环到适应度不再升高后终止。

## 5 标定结果和对比测量实验

### 5.1 标定实验

将三个红外反光标记球用刚性轻质细杆串起来, 制成一维标定物。相对于 2 个标记球方案, 采用 3 个是为了方便标记球的区分和标识。标记球的中心点分别表示为  $A, B, C$ 。标记球之间的距离关系是  $AB$  约等于  $2BC$ 。用坐标测量机测得  $AC$  距离为 750.6 mm。

在两台操作系统为 Windows XP Pro, 2GB 的 DDR 内存, 主频为 2.8 GHz 的奔腾 4CPU 的计算机上进行实验。图像采集频率为 200 frame/s, 图像分辨率为 512 pixel  $\times$  512 pixel, 像素尺寸为 10  $\mu\text{m}$   $\times$  10  $\mu\text{m}$ , 8 位图像输出, 曝光时间为自动设定的 4 ms。使用瑞典 Qualisys 公司生产的红外反光标记球, 镜头采用德国 Schneider 工业级 C 接口镜头,

焦距 12 mm, 镜头前安装 850 nm 的前截止滤光片, 镜头外侧装配自制的红外 LED 照明装置。标定算法在 VC++6.0 平台下测试。标定结果如表 1、表 2 所示。

表 1 左右相机的内参数标定结果(均值)

Table 1 Real cameras' intrinsic parameters

	Left camera	Right camera
Focal length /mm	12.037	
Principal point /pixel	(263, 48, 242, 57) (274, 36, 238, 58)	

表 2 相机的外参数标定结果(均值)

Table 2 Real cameras' extrinsic parameters

	0.8088	-0.1451	0.5698	1861.2067
<b>R</b>	0.1616	0.9866	0.0216	T 1863.1709
	-0.5653	0.0747	0.8215	10.0806

## 5.2 对比测量实验

先用 2 个三坐标测量机测量另一自制的刚性杆两端的红外反光标记球, 测得其中心间距为 301.440 mm。再用标定好的双相机分别测量静止和运动状态下刚性杆两端的红外反光标记球中心的间距。测量得到其均值、最大值、最小值和标准差, 见表 3。

表 3 自制刚性杆上空间两点间距离的实验数据 /mm

Table 3 Data of distance between markers /mm

Distance /mm	Static state	Dynamic
Mean value	302.2171	301.5894
Maximum value	303.0246	302.8484
Minimum value	301.9910	301.4745
Standard deviation	0.0419	0.0813

由表 1、表 2、表 3 可知, 相机焦距、主点和具体测量空间两点距离达到了较好的精度。标定精度和 Zhang 的方法<sup>[14]</sup> (2%左右的相对偏差) 基本相当。被测物在静止状态下的间距测量标准差比运动状态下小近 1 倍。算法适合于运动分析等对精度要求不太苛刻的领域, 但对于精密测量领域还有待进一步提高精度。

## 6 结 论

改进进化策略的引入使一维标定参考物从做某种特殊运动扩展到不受限的自由运动, 只需将装有 3 个红外反光标记球的一维标定物在测量空间内多次随意移动, 即可标定出双相机的内、外参数。引入半标定基础矩阵, 采用线性求解双相机焦距的方法, 缩短了标定时间。在进化策略中引进个体的自我改进系数、个体间距离等概念, 提出了求取子代个体间的欧式距离并排序的方法, 改进了模拟退火进化策

略寻找最佳匹配主点对的算法。对比测量实验表明, 红外反光标记球间距 301.440 mm 的 2999 次测量结果的标准差达到 0.04190 mm, 标定算法达到了较好的精度。但标记球中心点坐标的求取精度和一维标定物 AC 两点距离的精度应尽量提高。

本文的双相机标定算法可扩展到多相机应用场合。其应用背景为: 步态分析, 动物、汽车和体育等运动分析、动画制作, 轮船动态分析, 骨伤、老年病等康复, 假肢设计, 人类、动物行为研究等领域。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liquan *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264  
吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- 2 Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Study of stereo vision coordinate measurement system based on optical bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2181~2186  
徐巧玉, 车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2181~2186
- 3 Wu Qingyang, Li Jinzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227  
吴庆阳, 李景镇, 苏显渝等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1224~1227
- 4 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single-camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 697~701  
李为民, 俞巧云, 刘超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 697~701
- 5 Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342  
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 6 Qiu Yuanwu. Applications of CCD camera in automobile industry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(9): 52~56  
邱元武. CCD 相机在汽车工业中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(9): 52~56
- 7 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1440~1442  
余俊, 林家明, 杨建宇等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1440~1442
- 8 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. Rob. Autom.*, 1987, **3**(4): 323~344
- 9 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1992, **14**(10): 965~980
- 10 Ye Dong, Liu Changying, Che Rensheng *et al.*. Dummy solid camera calibration using genetic algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 485~489  
叶东, 刘长英, 车仁生等. 基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(3): 485~489

- 11 Chen Gang, Chen Hua, Che Rensheng. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(9): 1439~1444  
陈刚,陈华,车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(9): 1439~1444
- 12 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 2000, **22**(11): 1330~1334
- 13 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86  
徐巧玉,叶东,车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- 14 Chen Gang, Che Rensheng, Ye Dong *et al.*. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(6): 626~631  
陈刚,车仁生,叶东. 一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(6): 626~631
- 15 S. J. Aybank, O. D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *Int. J. Comput. Vision*, 1992, **8**(2): 123~152
- 16 Q. T. Luong, O. D. Faugeras. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 1997, **22**(3): 261~289
- 17 Zhang Zhengyou. Camera calibration with one-dimensional objects[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 2004, **26**(7): 892~899
- 18 P. Hammarstedt, P. Sturm, A. Heyden. Degenerate cases and closed-form solutions for camera calibration with one-dimensional objects[A]. *Proceedings of the ICCV, Beijing, China*, 2005, **1**: 317~324
- 19 Wu Fuchao, Hu Zhanyi, Zhu Haijiang. Camera calibration with moving one-dimensional objects [J]. *Pattern Recognit.*, 2005, **38**(5): 755~765
- 20 Qi Fei, Li Qihe, Luo Yupin *et al.*. Camera calibration with one-dimensional objects moving under gravity[J]. *Pattern Recognit.*, 2007, **40**(1): 343~345
- 21 Qi Fei, Li Qihe, Luo Yupin *et al.*. Constraints on general motions for camera calibration with one-dimensional objects[J]. *Pattern Recognit.*, 2007, **40**(6): 1785~1792
- 22 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. Calibration binocular vision sensor with one-dimensional target of unknown motion[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2006, **42**(6): 92~96  
周富强,张广军,魏振忠等. 基于未知运动一维靶标的双目视觉传感器标定[J]. *机械工程学报*, 2006, **42**(6): 92~96
- 23 Wang Nian, Tang Jun, Wei Hui *et al.*. Self-calibration of bi-camera setting with 1D moving objects[J]. *Robot*, 2006, **28**(2): 136~143  
王年,唐俊,韦穗等. 基于一维移动物体的双目装置自标定[J]. *机器人*, 2006, **28**(2): 136~143
- 24 Wang Liang, Wu Fuchao. Multi-camera calibration based on 1D calibration object [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 225~231  
王亮,吴福朝. 基于一维标定物的多摄像机标定[J]. *自动化学报*, 2007, **33**(3): 225~231
- 25 Deng Xiaoming, Wu Fuchao, Duan Fuqing *et al.*. Catadioptric camera calibration with one-dimensional objects[J]. *Chinese J. Computers*, 2007, **30**(5): 737~746  
邓小明,吴福朝,段福庆等. 基于一维标定物的反射折射摄像机标定方法[J]. *计算机学报*, 2007, **30**(5): 737~746
- 26 Dimitri P Bertsekas, John N Tsitsiklis. Gradient convergence in gradient methods with errors[J]. *SIAM J. Optimization*, 2000, **10**(3): 627~642
- 27 P. Cerveri, A. Pedotti, N. A. Borghese. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems [J]. *IEEE Tran. Evol. Comput.*, 2001, **5**(3): 271~282
- 28 Wu Yan, Yang Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676  
吴艳,杨万海,李明. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 671~676
- 29 M Locatelli. Simulated annealing algorithms for continuous global optimization: convergence conditions [J]. *J. Optimization Theory Appl.*, 2000, **104**(1): 121~133
- 30 N. Alberto Borghese, P. Cerveri. Calibrating a video camera pair with a rigid bar[J]. *Pattern Recognit.* 2000, **33**(1): 81~95
- 31 R. I. Hartley. In defense of the eight-point algorithm[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell.*, 1997, **19**(6): 580~593
- 32 P. Sturm, Z. L. Chengb, P. C. Y. Chenc *et al.*. Focal length calibration from two views: method and analysis of singular cases [J]. *Comput. Vision and Image Understanding*, 2005, **99**: 58~95
- 33 Borghese NA, P Cerveri, Rigioli P. A fast method for calibrating video-based motion analysers using only a rigid bar [J]. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 2001, **39**: 76~81