

文章编号 1004-924X(2009)08-1942-11

用自由移动的刚性球杆校准多摄像机内外参数

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: 针对用于大空间运动分析的运动参数光电探测系统中多台高速摄像机的内外参数校准需求, 制作了一种两端及中间各安装一个红外反光标志球且两端球距为已知(精确校准)的刚性球杆。将这种特制的刚性球杆在测量空间内多次随意移动, 并用多台前端装有红外发光板和滤光片的高速摄像机摄取其图像, 即可实现焦距不同的多台摄像机的内外参数校准。假定主点位于像面中心附近的某个位置, 通过 Hartley 改进 8 点法求出基本矩阵, 利用极点和外极线约束线性地求出各台摄像机的焦距。接着, 求出本质矩阵, 对其进行奇异值分解后得到旋转矩阵和比例因子意义下的平移向量。利用三角法确定刚性球杆两端点的重建坐标和距离, 与标准距离对比确定比例因子。最后, 通过评价函数将摄像机校准转换成寻找摄像机最佳主点配对的非线性最小化问题, 运用改进的模拟退火进化策略迭代求解出最佳主点配对, 继而求解出摄像机的其它内外参数。标定实验表明, 焦距和主点求解精度达到了 0.1 pixel。对比测量实验表明, 对长为 750.607 mm 的刚性杆进行长度测量, 标准差达到了 0.046 mm。与传统方法相比, 本方法扩展到了多台摄像机应用场合并允许摄像机焦距各不相同, 不需要对球杆的运动做任何限制, 能够同时求解出摄像机内外参数, 而改进的模拟退火进化策略改善了算法收敛速度和全局收敛性能。

关键词: 摄像机校准; 球杆; 自由运动; 模拟退火; 进化策略

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Calibrating internal and external parameters of multi-cameras by moving freely rigid ball bar

ZHANG Ling-fei, CHEN Gang, YE Dong, CHE Ren-sheng

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

Abstract: According to the requirements of calibrating multi-cameras in motion parameter optoelectronic measurement systems used in big space motion analysis, a novel approach of calibrating the internal and external parameters of multi-cameras is proposed. Firstly, a principal point is assumed at a certain location around the image plane center, and the fundamental matrix is found out by Hartley's eight-point-algorithm. Then, different focal lengths of different cameras are obtained linearly through a epipolar geometry and its constraint. After educing the essential matrix, the singular-value-decomposition is carried out to obtain the rotation matrix and translation vector with a scale factor. Moreover, the coordinates and the distances of the ball bar are computed by a triangulation method, and the scale factor is found out through the true distance of the ball bar. Finally, the estimation of internal and external parameters of the multi-cameras is transformed to a nonlinear minimization problem by a

收稿日期: 2009-01-19; 修订日期: 2009-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50275040)

cost function, and the optimal principal points of two cameras are found out iteratively by using the improved simulated annealing evolution strategy. The experimental results show that the precision of focal length and principal point is up to 0.1 pixel and the standard deviation bar length is 0.046 mm. Compared with traditional methods, the novel calibration approach expands the applications of the multi cameras and can find out the internal and external parameters simultaneously without the constraint for the ball bar movement. These results prove that the improved simulated annealing evolution strategy accelerates the convergence speed and improves the global convergence performance.

Key words: camera calibration; ball bar; free motion; simulated annealing; evolution strategy

1 引言

在诸如火箭发动机、坦克、船舶、飞机等的运动分析、三维重建和测量等计算机视觉应用领域,摄像机校准往往是不可或缺的重要步骤。因此,计算机视觉界的众多研究者对此问题进行了大量的研究^[1-2]。根据所使用的校准参考物的维数,可将校准方法大致分为:基于三维校准参考物^[1-7];基于二维校准参考物^[8-10];基于一维校准参考物^[13-24]和基于 0 维校准参考物(自校准)^[11-12]等 4 类方法。由于一维校准参考物具有结构简单、制作容易、使用方便、适合现场在线校准等优点,近年来受到广泛关注。

国内关于基于一维校准参考物校准的文献中,周富强等^[13]采用线性和非线性结合的方法,允许一维靶标自由移动,但其在双目传感器部分内参数已知的前提下,求取的只是双目传感器的结构参数,即外参数。王年等^[14]限定一维移动物体做平移运动,给出了求取摄像机内、外参数的校准方法。王亮等^[15]提出了当一维标定物做任意刚体运动时,线性地校准多摄像机的内参数的方法。邓小明等^[16]给出了当一维标定物包含 5 个或 5 个以上的共线点时,通过其 3 次或 3 次以上的一般刚体运动,标定出反射折射摄像机的内参数的方法。孙军华等^[17]针对大视场视觉测量应用,提出了一种基于基线尺的大视场双目视觉传感器标定方法,采用线性解和非线性优化相结合的方法同时估计双目传感器的内参数和结构参数。刘震等^[18]基于交比不变性原理和一维靶标点共线的特点,提出了一种多视觉传感器全局校准方法,并通过捆绑调整方式得到转换矩阵的最

优解。

国外关于基于一维校准参考物的文献中,Zhang Zhengyou^[19]给出的方法是:由 3 个或 3 个以上彼此之间距离已知的共线点构成一维校准参考物,拍摄 6 幅以上与一维校准参考物不同位姿的图像以实现摄像机的校准,但该方法需要固定其中 1 个点,只允许一维校准参考物绕该固定点旋转。P. Hammarstedt 等^[20]讨论了基于一维校准参考物的校准方法的退化失效情况,给出了一维校准参考物的临界运动。F. C. Wu 等^[21]分析了 Zhang Zhengyou 的基于一维校准参考物的校准方法的几何本质,并提出了一种允许一维校准参考物做平面运动的校准方法。Fei Qi 等^[22-23]先后提出了只限定一维校准参考物上多个点中的某一个点做平面运动和一维校准参考物做一般运动等两种情况下的双目摄像机校准方法。

综上所述,当前国内外文献中基于一维校准参考物的诸多方法,要么无法应用于超过 3 台摄像机应用场合,要么需要对一维校准参考物的运动做某种限制,要么只能求取摄像机内参数或外参数。

在继承和改进 N. Alberto Borghese, P. Cerveri 和周富强等的研究成果的基础上,本文提出了一种适用于超过 3 台摄像机场合并且不限定刚性球杆(一维校准参考物)做某种特殊运动,而只需将安装有 3 个红外反光标志球的球杆在测量空间内多次随意移动,即可求出焦距可变的多台摄像机的内、外参数的校准方法。该方法首先假定主点位于像面中心附近搜索区域的某个位置,用改进 8 点法求出基本矩阵 F ,继而求出极点 e ,然后利用极点 e 对所有投影点进行坐标变换,利用变换后的投影点坐标再用改进 8 点法解出简化

的基本矩阵 F_e , 利用 F_e 的矩阵分量线性地求出多台摄像机的不相同的焦距。接着求出本质矩阵 E , 对其进行奇异值分解后得到旋转矩阵 R 和比例因子意义下的平移向量 T 。之后利用三角法确定球杆两端点的重建坐标和距离 d , 与标准距离 d' 对比以确定比例因子 λ 。最后通过评价函数将摄像机校准转换成寻找摄像机最佳主点配对的非线性最小化问题。运用改进的模拟退火进化策略算法迭代优化求解出最佳主点配对, 继而求解出摄像机其它内、外参数。

2 多摄像机数学模型及其几何关系

2.1 多摄像机数学模型及成像关系

假设任意空间点 $A(X, Y, Z)$ (见图 1) 在第 $0, 1, \dots, i$ 号摄像机的像平面上的投影为 $a_0(x, y), a_1(x, y), \dots, a_i(x, y)$, 用投影方程可表示为:

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i & sf_i & u_{oi} \\ 0 & \tau f_i & v_{oi} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R | -RT] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式(1)中, λ 为比例因子, τ 为高宽比, s 为投影偏斜度, f_i 为摄像机焦距, $o_i(u_{oi}, v_{oi})$ 为摄像机主点坐标, 它们共同组成了摄像机的内参数。 R 和 T 分别表示在某个坐标系下各摄像机的姿态矩阵和平移向量, 它们共同组成了摄像机的外参数。本文校准的是多摄像机的内、外参数。

不失一般性, 用点 A 代表空间任意点(公式推导结果对球杆上 B, C 点同样适用)。图 1 中 O_0, O_i 为第 $0, i$ 号摄像机的焦点, f_0, f_i 为第 $0, i$ 号摄像机的焦距, 即第 $0, i$ 号摄像机的像面中心 o_0, o_i 到相应焦点 O_0, O_i 之间的距离。为了方便, 绝对坐标系原点设定在第 0 号摄像机的光心, 其 X, Y 坐标轴分别平行于像平面的 u, v 坐标轴, Z 轴垂直于像平面, 方向符合右手规则。

考虑一般情况, 像面扭曲参数 $s=0$, 像面高宽比 τ 由摄像机厂家给定。则摄像机模型可转化为如下的数学模型,

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i & 0 & u_{oi} \\ 0 & \tau f_i & v_{oi} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R | -RT] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

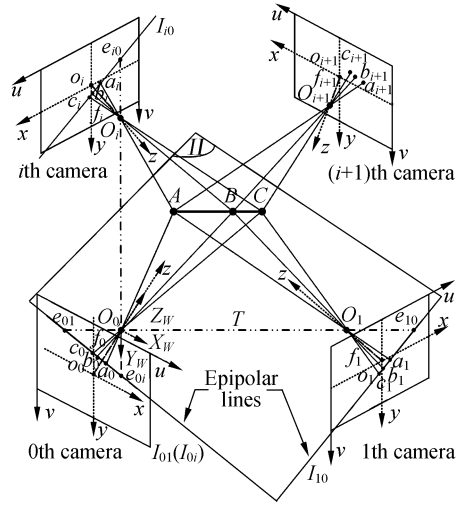


图 1 3 台以上多摄像机之间对极几何关系及球杆上 A, B, C 3 点成像的简单关系示意图

Fig. 1 Sketch map of multi-camera epipolar geometry and projects of A, B, C on ball bar

当已知第 i 号摄像机的投影中心(主点)时, 点 a 的坐标向量可变换为:

$$a_i^0 = \begin{bmatrix} x_i - u_{oi} \\ y_i - v_{oi} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

当已知第 i 号摄像机的投影中心(主点)和焦距时, 点 a 的坐标向量可归一化为:

$$a_i^1 = \begin{bmatrix} (x_i - u_{oi}) / (-f_i) \\ (y_i - v_{oi}) / (-f_i) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.2 摄像机对极几何关系

对极几何关系(Epipolar Geometry)是指: 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 a_0, a_i 共同确定了极平面(Epipolar Plane)。极平面与两像平面相交于直线 I_{0i} 和 I_{i0} , 即外极线(Epipolar Line)。 I_{0i} 上的点 a_0 的外极线是 I_{i0} ; I_{i0} 上的点 a_i 的外极线是 I_{0i} 。 e_{0i}, e_{i0} 为第 $0, i$ 号摄像机像面与直线 O_0O_i 的交点, 即极点。

考虑任意空间点 A 在第 1 号摄像机和第 0 号摄像机像面上的投影关系时, 极平面为点 a_0, a_1 和直线 O_0O_1 共同确定的平面 Π 。令 a_0, a_1 表示点 a_0, a_1 的坐标向量, 则其对极几何关系可表示为:

$$\mathbf{a}_0^T \mathbf{F} \mathbf{a}_1 = 0. \quad (6)$$

矩阵 \mathbf{F} 即基本矩阵(Fundamental Matrix), 它是对极几何的代数表示。根据式(6), 通过 Hartley 改进 8 点法^[26], 可求出基本矩阵 \mathbf{F} 。

定义摄像机内参数矩阵 \mathbf{K}_i 和由平移向量 \mathbf{T} 的各分量组成的反对称矩阵 \mathbf{S} 如下:

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} f_i & 0 & u_{oi} \\ 0 & \tau f_i & v_{oi} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix},$$

则可得,

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_1^{-T} \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{K}_0^{-1}. \quad (7)$$

此式由第 0、1 号摄像机内参数矩阵 \mathbf{K}_0 、 \mathbf{K}_1 和外参数矩阵 \mathbf{R} 、 \mathbf{S} 的标量积组成, 包含了需要校准的所有参数。当内参数已知时, 用式(4)中的归一化后的坐标向量对式(6)进行变换可得:

$$\mathbf{a}_0^{1T} \mathbf{E} \mathbf{a}_1 = 0, \mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{S}. \quad (8)$$

矩阵 \mathbf{E} 即本质矩阵, 它只含外参数(旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T})。

3 摄像机的内、外参数求解

3.1 暂定主点 \mathbf{o}_i 位置先求解焦距 f_i

首先假定摄像机主点位于像面中心附近的某个位置, 这是算法开始迭代优化的前提。然后将像面坐标系的原点平移到假定的主点, 则像面上的投影点可通过式(3)进行变换。于是, 摄像机内参数矩阵 \mathbf{K}_i 可简化为对角矩阵: $\mathbf{K}_i = \text{diag}(f_i, f_i, 1)$ 。

考虑第 1 号摄像机和第 0 号摄像机, 利用 Hartley 改进 8 点法^[26] 求出基本矩阵 \mathbf{F} , 令 $\mathbf{e}_{01} = [e_{01}^1, 0, e_{01}^3]^T$, $\mathbf{e}_{10} = [e_{10}^1, 0, e_{10}^3]^T$ 。通过

$$\mathbf{F} \mathbf{e}_{0i} = 0, \mathbf{F}^T \mathbf{e}_{i0} = 0, \quad (9)$$

可分别求得第 0、1 号摄像机的极点。根据 Hartley 自校准方法^[27], 由于像面坐标系的平移和摄像机内参数矩阵 \mathbf{K}_0 、 \mathbf{K}_1 的简化, \mathbf{F} 矩阵可简化为,

$$\mathbf{F} \approx \begin{bmatrix} e_{10}^3 & & \\ & 1 & \\ & & -e_{10}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b & a \\ c & d & c \\ a & b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{01}^3 & & \\ & 1 & \\ & & -e_{01}^1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

则可由下式求出第 0、1 号摄像机焦距的初值,

$$f_0 = \sqrt{\frac{-ac(e_{01}^1)^2}{ac(e_{01}^3)^2 + bd}}, f_1 = \sqrt{\frac{-ab(e_{10}^1)^2}{ab(e_{10}^3)^2 + cd}}. \quad (11)$$

3.2 确定旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T}

当主点和焦距先被确定后, 即内参数矩阵 \mathbf{K}_0 、 \mathbf{K}_1 暂时确定后, 基本矩阵可变换成只含外参数的本质矩阵 \mathbf{E} 。然后用奇异值分解^[24,28] (Singular Value Decomposition, SVD) 的代数解析方法求取外参数 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。本质矩阵 \mathbf{E} 的 SVD 分解为 $\mathbf{E} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$, 旋转矩阵和平移向量可由下式求得,

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = \mathbf{U} \mathbf{W}^T \mathbf{V}^T \\ \mathbf{R}_2 = \mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^T \\ \lambda^{-1} \mathbf{T} = \pm \mathbf{V}^3 \end{cases}, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

根据被测空间点肯定位于摄像机前方的事实, 以及摄像机的位置关系, 可以唯一地确定 \mathbf{R} 的解和 \mathbf{T} 的符号。 \mathbf{T} 的解所带的比例因子在下一节确定。

4 确定比例因子 λ 和最佳主点对

4.1 比例因子 λ

前面求解本质矩阵 \mathbf{E} 时, 假设 $\|\mathbf{T}\| = 1$, 这样得到的摄像机间距是真实距离的范数^[24], 于是重建得到的点与真实空间点之间也相差同样的比例因子。假定 A^r 、 C^r 为真实的空间点, 两者之间的已知距离为 d^r 。而 A^r 、 C^r 是重建意义上的空间点, 令 d 为点 A^r 、 C^r 之间的重建距离。 T^r 为真实摄像机间距。则,

$$\lambda = \frac{T^r}{T} = \frac{A^r}{A^r} = \frac{A^r - C^r}{A^r - C^r} = \frac{d^r}{d}. \quad (13)$$

然而, 事实上, 因为测量过程中噪声的影响, 重建得到的 A^r 、 C^r 的坐标值不是完全精确的, 因而 d 的值也存在误差, 从而导致 λ 的值也有误差。为了减小误差, 本文采用多次重复测量的方法, 得到 M 次测量的均值。文中 A 、 C 是固定在刚性杆两端的特征点, d^r 有一个经校准的精确值, 故,

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

4.2 误差分析及评价函数

前面几节,本文始终假设主点的位置为已知。但当主点位置不准确时,以此估计出的焦距和外参数也不可能准确^[28],从而导致重建得到的刚性球杆的长度也存在误差 g_d ,

$$g_d = |d^i - d_i(A_i^r, C_i^r)|. \quad (15)$$

由于主点位置的改变,从而导致过同一个空间任意点 A (B 、 C 同理) 在两像平面上的投影点 a_0, a_i 和其对应的主点 O_0, O_i 的两条直线(直线 a_0O_0, a_iO_i) 之间的距离也相应改变。理想状态下,这两条直线应该相交于空间点 A 。但实际上,由于投影点 a_0, a_i 的测量误差,它们并不相交,而产生共面误差 g_p ,

$$g_p = |a_i^T K_i^{-1} RSK_0^{-1} a_i|. \quad (16)$$

这样,可以将求解摄像机内外参数转化成基于评价函数 $g_c(f_i, \mathbf{R}, \mathbf{T})$ 的非线性最小化问题。

$$\min_{(O_0, O_i)} g_c(f_i, \mathbf{R}, \mathbf{T}) = \theta \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g_d + \delta \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^{2N} g_p. \quad (17)$$

式中 N 是被测点的个数, g_p 对确定空间点的影响比 g_d 小的多,只是作为优化因素。因此, δ 的取值应该远 $< \theta$ 。实验中取 $\theta = 1, \delta = 0.05$ 。

4.3 改进模拟退火进化策略最优化主点

这里通过调整主点的位置,基于最小化评价函数 $g_c(f_i, \mathbf{R}, \mathbf{T})$ 来确定主点的确切位置。

确定摄像机的最佳主点对从本质上讲类似于运动员最佳配对问题。传统的最佳配对问题可用回溯法解决,实践中采用一些限界或剪枝函数对搜索范围进行控制。但是,其本质仍然是采用穷举法的思想,最坏时间复杂度仍然很高。传统的优化算法主要利用评价函数的梯度等解析信息,但是,本文确定摄像机的最佳主点对的搜索空间是接近连续的、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^[30]等传统寻优方法难于解决的。

模拟退火算法^[31]是一种随机全局优化算法,它通过赋予搜索过程一种可控的突跳概率来避免陷入局部极小。但是,该算法是一种串行搜索结构,没有历史信息,通常搜索过程冗长。

进化策略^[32]的主要特点是可以从多个初值

点开始,沿多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的离散点,可大大减少所需的计算内存。但是,其容易陷入局部收敛(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。

进化策略初始种群的产生方法和规模对其个体分布状况影响很大,进而影响算法的全局收敛性能。传统进化策略的初始种群是随机选取的,其覆盖空间有不确定性。若初始种群空间不包含全局最优解,而进化种群又不能在有限的进化代数内扩延到全局最优解区域,就会导致局部收敛,具体表现有:

- (1) 在适应度选择作用下,使进化过程中具有最优解基因的低适应度的个体逐渐被淘汰,使种群中个体趋于一致;
- (2) 变异产生适应度高的个体数量少,变异的作用不明显。

实际上,无论是初始种群的分布状况,还是进化中种群分布的变化状况,其核心都是希望种群无论是初始还是进化过程中都尽可能地保持多样性,并在尽可能少的步骤内将寻优搜索引导到最优解区域。

为了保持种群多样性,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了个体的自我改进系数、个体间距离。具体做法如下:

- (1) 计算种群中子代个体的适应度值并从大到小进行排序,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作为最优保护型子代个体。

令种群中个体间距离为 $D_{j,k}$, 第 j, k 号个体的第 $0, i$ 号摄像机候选主点在各自像面的坐标分别为 $\{P_{0j}(x_{0j}, y_{0j}), P_{ij}(x_{ij}, y_{ij})\}$ 和 $\{P_{0k}(x_{0k}, y_{0k}), P_{ik}(x_{ik}, y_{ik})\}$,

$$D_{j,k} = \sqrt{(x_{0j} - x_{0k})^2 + (y_{0j} - y_{0k})^2 + (x_{ij} - x_{ik})^2 + (y_{ij} - y_{ik})^2}. \quad (18)$$

- (2) 计算种群中个体与当前最好解的欧氏距离并由远到近进行排序,将欧氏距离序号和适应

值序号之和最大的 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} 为父代个体的适应值; G_{new} 为变异产生的子代的适应值,

$$J = (G_{\text{old}} - G_{\text{new}}) / G_{\text{old}}. \quad (19)$$

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

在搜索最佳主点对的过程中产生的候选主点对构成了种群集合。每个候选主点对都是独立的, 其适应性以适应度函数 G_f 作为度量准则。

$$G_f = 1/g_c(f_i, \mathbf{R}, \mathbf{T}). \quad (20)$$

在迭代求解最佳主点对的过程中, 通过比较每个子代和产生它的父代的适应度, 选择适应度高的再用作父代变异产生下一代种群, 即父代和子代公平竞争, 适者生存, 优胜劣汰。

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, 尽量找到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的大小, 来决定是否扩大搜索区域, 从而尽可能地将最佳主点对包含在搜索区域内。

针对每代种群相应改变寻找最佳主点对的搜索区域, 设参考距离像面中心的最大偏移量为 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 , n 代表了种群第 n 代,

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

$C_{0_{\text{max}}}^n$ 、 $C_{i_{\text{max}}}^n$ 分别代表第 n 代种群中适应度最大的主点对中 0 、 i 号摄像机的候选主点的像面坐标; 在产生初始种群时 $n=1$, 则 $C_{0_{\text{max}}}^n$ 、 $C_{i_{\text{max}}}^n$ 分别

代表像面中心, $D_{n, n-1}$ 表示第 $n-1$ 代和第 $n-2$ 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的集合 $FA = [C_{01} | C_{i1}] \in H$, $NP = NP_1 + NP_2$ 。

然后, 确定对应于初始种群的所有个体, 即每个主点对的摄像机焦距、外参数以及比例因子。用式(20)来评价初始种群中所有个体的适应度。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, 产生第二个集合 SA , 它被称为子代, 并同样含有 NP 个主点对。在变异的过程中, 每个种群祖先被一个随机量替换^[32-33], $z_j(0, \sigma)$ 是一个四维空间的高斯变量, 均值为 0 , 标准差为 σ 。

$$[C_{0j} | C_{ij}]^{n+1} = [C_{0j} | C_{ij}]^n + h^n z_j(0, \sigma). \quad (22)$$

式(22)中, h^n 代表了父代的变异幅度^[33]。为了增加主点搜索的分辨率, 引入模拟退火过程。变异的幅度不断降低, 以保证算法在开始阶段能低密度快速搜索, 而在最好的区域能进行高密度的搜索。 σ 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^[34]。 σ 值根据子代和父代的优胜数量的比率 r 来确定,

$$\begin{cases} \sigma^{n+1} = \sigma^n / \rho & r < 1/5 \\ \sigma^{n+1} = \sigma^n & r = 1/5 \\ \sigma^{n+1} = \sigma^n \rho & r > 1/5 \end{cases}, h^n = \frac{h^0}{\sqrt{\ln(k+1)}}. \quad (23)$$

式(23)中, $\rho = 0.85^{1/d}$, $d=4$ 代表解空间的维数。

为加快收敛并防止个别校准点导致的偏差, 每次计算只取校准点集的一部分用于校准。每一代种群里, 取校准点集中其它部分的子集评价适应度。

5 校准的主要流程

完整的校准算法可以概括如下:

(1) 用多台摄像机拍摄自由移动的刚性球杆, 取得一段时间内刚性球杆两端标志点的大量像面坐标, 抽取两端点在多摄像机视场内均可见的点形成点集 $\{P_c^{\text{NC}}\}$, 它们在两摄像机像面上的投影点为 $\{P_{0c}^{\text{NC}}\}$, $\{P_{ic}^{\text{NC}}\}$, 这些点用于后面的

校准。

(2) 在摄像机像平面内,先分别沿 x 轴平行于 y 轴和沿 y 轴平行于 x 轴,距离像面中心 8、16、32、64 个像素的平行线束的交叉点得到摄像机各自的 81 个网格点,得到大小为 81×81 的搜索空间。遍历这个搜索空间,按适应度大小排序,确定 NP_1 个误差最小的候选主点对构成初始种群的一部分。

(3) 在搜索区域 H^n 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,加上上一步的结果,可得到由 NP 个主点对构成的初始种群集合 $FA = [c_{o0} | c_{i0}] \in H, NP = NP_1 + NP_2$ 。

(4) 将种群适应度的参考值设为 0。

(5) 从集合 $\{P_c^{NC}\}$ 中抽取 $M (< NC/2)$ 对点组成子集 $\{P_c^M\}, \{p_{oc}^M\}, \{p_{ic}^M\}$, 这些点对用于估计焦距、外参数和比例因子。

(6) 再从集合 $\{P_c^{NC}\}$ 中抽取 $N (< NC/2)$ 对点组成子集 $\{P_c^N\}, \{p_{oc}^N\}, \{p_{ic}^N\}$, 这些点对用于计算适应度以评价种群。

(7) 用点集 $\{P_c^M\}$ 中的点 p_{oc}, p_{ic} 计算对应的种群 $FA = [c_{o0} | c_{i0}]$ 对应的基本矩阵 F , 得到一个由 NP 个 F 矩阵组成的集合。

(8) 根据求得的 F 矩阵,利用式(9),求解得到对应两像面上的极点 e_{oi}, e_{io} 。

(9) 根据求得的极点 e_{oi}, e_{io} ,进行坐标变换将图像旋转使两个极点位于 x 轴,归一化极点的坐标,使极点 $e_{oi} = [e_{oi}^1, 0, e_{oi}^3]^T, e_{io} = [e_{io}^1, 0, e_{io}^3]^T$ 。

(10) 根据所有空间点投影被变换后的坐标,重新求解 F 矩阵,使之简化为如式(10)的形式。

(11) 利用新求得的简化 F 矩阵的分量: a, b, c, d ,通过式(11)求取焦距 f_i ,得到一个由 NP 个焦距 f 组成的集合。

(12) 根据式(4)用已知的主点和焦距 f_i 将点 p_{oc}, p_{ic} 的坐标归一化,计算得到由 NP 个本质矩阵 E 组成的集合。

(13) 用 3.2 节的方法,通过分解 NP 个本质矩阵 E ,得到归一化的相对位姿, NP 个旋转矩阵 R 和平移向量 $T (\|T\| = 1)$ 。

(14) 计算得到 NP 个比例因子的集合 $\{\lambda\}$ 。

(15) 用估计出的旋转矩阵集合 $\{R\}$ 、平移向量集合 $\{T\}$ 、比例因子集合 $\{\lambda\}$ 、焦距集合 $\{f\}$ 和主点种群 FA 重建 NT 个测试点的三维空间坐标。

(16) 用式(17)计算每对测试点的评价函数值,再用式(20)求出每个主点对的适应度,并从大到小排序,找到适应度最大的主点对(当前最优解)。

(17) 将适应度超过种群平均值且与当前最好解的欧氏距离高于种群平均值的个体作为最优保护型子代个体。

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

(19) 计算种群个体的自我改进系数 J ,对 J 值达到一定阈值的个体进行最优保护。

(20) 淘汰种群中适应度低于种群平均值且与当前最好解的欧氏距离低于种群平均值的个体,保持适度的种群数量。

(21) 计算种群中适应度最好的个体与父代中适应度最好的个体之间的欧氏距离,如果超过阈值,就扩大搜索区域 H^n ,并在新增的区域内随机产生一部分个体参与竞争。

(22) 在搜索区域 H^n 内随机变异父代集合产生一个由 NP 对主点组成的子代种群。

(23) 用(7)~(21)步的方法计算对应于子代的内、外参数和适应度。

(24) 如果种群适应度的参考值大于原参考值,则更新参考值,并将相应参数保存。

(25) 对比父代和子代的适应度,将优胜者保留用于繁殖下一代,重复执行(5)~(21)步。

当种群适应度的参考值大于给定的阈值时,停止对最优主点对的搜索和其它参数的优化。

6 校准和对比测量实验及结果分析

6.1 校准实验

组成标定及测量实验系统的 4 台 CMOS 摄像机的镜头外围安装有红外 LED 板照明装置,镜

头前安装 850 nm 前截止滤光片;图像采集频率为 180 frame/s,图像分辨率为 $2\ 352\ \text{pixel} \times 1\ 728\ \text{pixel}$,像素尺寸为 $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$,4 台摄像机焦距均为约 16 mm;校准算法在 VC++6.0 平台下测试。



图 2 4 台摄像机组成的标定及测量实验系统实物图
Fig. 2 Experimental calibration and measurement system composed of four CMOS cameras

将 3 个红外反光标志球用刚性碳纤维轻质细杆串起来,制成球杆(一维校准参考物),中间标志

球是为了增大采样并方便区别和标识。用 A, B, C 表示标志球中心点,其间距关系为 $AB \approx 2BC$ 。用坐标测量机测得 AC 间距为 $(750.607 \pm 0.005)\ \text{mm}$ 。

校准时考虑的是主点、焦距、旋转矩阵和平移向量,而未考虑镜头畸变,故校准时球杆应在小范围运动并尽量投影在各像面中间。摄像机内参数校准结果如表 1 所示,外参数校准结果如表 2 所示。

表 1 摄像机的内参数校准结果(均值)

Tab. 1 Calibration results of internal parameters for camera

摄像机编号	焦距 f/mm	主点 o_x/pixel	主点 o_y/pixel
0 号	16.273	1 163.475	845.357
1 号	16.275	1 179.563	856.574
2 号	16.277	1 155.397	872.795
3 号	16.272	1 179.806	879.314

表 2 摄像机的外参数校准结果

Tab. 2 Calibration results of external parameters for camera

	旋转矩阵			平移向量
1 号摄像机	0.0493 18	-0.427 099	0.902 859	2.463×10^3
	0.099 965	0.901 531	0.421 010	-1.754×10^2
	-0.993 768	0.069 491	0.087 156	7.859×10^1
2 号摄像机	-0.936 225	-0.342 263	0.079 621	2.637×10^3
	-0.340 476	0.939 585	0.035 449	-6.874×10^2
	-0.086 943	0.006 080	-0.996 195	2.495×10^3
3 号摄像机	0.061 093	-0.378 322	-0.923 656	8.572×10^1
	0.081 129	0.924 204	-0.373 181	-7.965×10^2
	0.994 829	-0.052 137	0.087 156	2.758×10^3

因绝对坐标系设定在第 0 号摄像机上,故第 0 号摄像机的旋转矩阵为单位阵,平移向量为 0 向量。所以,表 2 中只给出了第 1、2、3 号摄像机相对于第 0 号摄像机的旋转矩阵和平移向量(外参数)。

6.2 对比测量实验

用标定好的摄像机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、标准差、最大值、最小值以及最大值与最小值之差,如表 3 所示。

表 3 球杆上空间两点间距离的实验数据

Tab. 3 Calibration results of ball bar's length

数据名称	数值/mm
标准值(坐标测量机事先测定)	750.607
均值(本文方法测量结果)	750.554
标准差	0.046
最大值	750.704
最小值	750.332
最大值-最小值	0.372

由表 1、2 可知,本文方法求解的摄像机焦距、主点和空间两点距离达到了较好的精度,标定精度和 Zhang^[19]的方法(2%左右的相对偏差)基本相当。但是,相对于 Zhang 的方法,本文方法取消了对一维校准参考物须绕固定点做旋转运动的限制,现场使用更方便,适应性更好。

7 结 论

针对超过 3 台的多摄像机应用场合的摄像机在线校准和校准物自遮挡问题,将一维校准参考物从做某种特殊运动推广到不受限的自由运动,

只需将装有 3 个红外反光标志球的刚性球杆在测量空间内多次随意移动,即可校准出多摄像机的内、外参数。先在像面中心附近选取一点作为暂定主点,继而解出其它内外参数,然后用改进模拟退火进化策略搜索确定最佳匹配主点。采用自校准的方法线性求解摄像机焦距,缩短了校准时间。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,改进模拟退火进化策略寻找最佳主点配对的算法改善了算法速度和全局收敛性。校准和测量实验结果说明本文校准算法是可行的,测量实验标准差达到了 0.046 mm。

参考文献:

- [1] 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 and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [2] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1992, 14(10): 965-980.
- [3] 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.
YE D, LIU CH Y, CHE R SH, *et al.*. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 485-489. (in Chinese)
- [4] 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.
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)
- [5] YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 883-890.
- [6] CHEN H, YE D, CHE R SH, *et al.*. Stereo camera calibration based on accurate control points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 903-909.
- [7] 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.
CHEN G, CHE R SH, YE D. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 626-631. (in Chinese)
- [8] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] 李喆,丁振良,袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(3): 467-472.
LI ZH, DING ZH L, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 467-472. (in Chinese)
- [10] 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.
XU Q Y, YE D, CHE R SH. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 81-86. (in Chinese)
- [11] MAYBANK S J, FAUGERAS O D. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(2): 123-152.
- [12] LUONG Q T, FAUGERAS O D. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(3): 261-289.
- [13] 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.

- ZHOU F Q, ZHANG G J, WEI ZH ZH, *et al.*. Calibration binocular vision sensor with one-dimensional target of unknown motion[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(6): 92-96. (in Chinese)
- [14] 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.
WANG N, TAN J, WEI S, *et al.*. Self-calibration of bi-camera setting with 1D moving objects[J]. *Robot*, 2006, 28(2): 136-143. (in Chinese)
- [15] 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.
WANG L, WU F CH. Multi-camera calibration based on 1D calibration object[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(3): 225-231. (in Chinese)
- [16] 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.
DENG X M, WU F CH, DUAN F Q, *et al.*. Catadioptric camera calibration with one-dimensional objects[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(5): 737-746. (in Chinese)
- [17] 孙军华,吴子彦,刘谦哲,等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [18] 刘震,张广军,魏振忠. 一维靶标的多视觉传感器全局校准[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2274-2280.
LIU ZH, ZHANG G J, WEI ZH ZH. Global calibration of multi-vision sensor based on one dimensional target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2274-2280. (in Chinese)
- [19] ZHANG Z Y. Camera calibration with one-dimensional objects[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(7): 892-899.
- [20] HAMMARSTEDT P, STURM P, HEYDEN A. Degenerate cases and closed-form solutions for camera calibration with one-dimensional objects [C]. *Proceedings of the ICCV, Beijing, China*, 2005: 317-324.
- [21] WU F C, HU Z Y, ZHU H J. Camera calibration with moving one-dimensional objects[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(5): 755-765.
- [22] QI F, LI Q H, LUO Y P, *et al.*. Camera calibration with one-dimensional objects moving under gravity[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40: 343-345.
- [23] QI F, LI Q H, LUO Y P, *et al.*. Constraints on general motions for camera calibration with one-dimensional objects[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40: 1785-1792.
- [24] BORGHESE N A, CERVERI P, RIGIROLI P. A fast method for calibrating video-based motion analysers using only a rigid bar[J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2001, 39: 76-81.
- [25] ZHANG Z Y. Determining the epipolar geometry and Its uncertainty: a review [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 27(2): 161-195.
- [26] HARTLEY R I. In defense of the eight-point algorithm[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(6): 580-593.
- [27] HARTLEY R. Extraction of focal lengths from the fundamental matrix[R]. Technical report, G. E. CRD, Schenectady, NY, 1993.
- [28] BORGHESE N A, CERVERI P. Calibrating a video camera pair with a rigid bar[J]. *Pattern Recognition*, 2000, 33: 81-95.
- [29] HARTLEY R I, STURM P. Triangulation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 68(2): 146-157.
- [30] DIMITRI P B, JOHN N, TSITSIKLIS G. Convergence in gradient methods with errors[J]. *SIAM Journal of Optimization*, 2000, 10(3): 627-642.
- [31] LOCATELLI M. Simulated annealing algorithms for continuous global optimization: convergence conditions[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2000, 104(1): 121-133.
- [32] DARRELL W. An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls[J]. *Information and Software Technology*, 2001, 43: 817-831.
- [33] MICHALEWICZ Z, SCHOENAUER M. Evolutionary algorithms for constraint parameter optimization problems[J]. *Evolutionary Computation*, 1996, 4(1): 1-37.

- [34] CERVERI P, PEDOTTI A, BORGHESE N A. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems [J].

IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001,5(3):271-282.

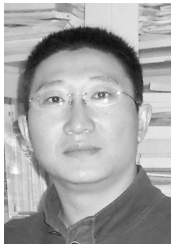
作者简介:



张灵飞(1980—),男,河南汝州人,博士研究生,主要研究领域为光电探测技术,计算机视觉,图像处理等。E-mail: nickzhlf@163.com



叶东(1968—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为机器视觉与大空间视觉测量技术。E-mail: yedong@hit.edu.cn



陈刚(1971—),男,博士,副教授,主要研究领域为视觉坐标测量与视觉检测技术。E-mail: chengang@hit.edu.cn

导师简介:



车仁生(1939—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为视觉静态与动态三维测试与校准技术,计算机辅助测试与质量工程等。E-mail: crs@hit.edu.cn

● 下期预告

加速度在控制系统扰动补偿中的应用

刘晶红¹,朱志强^{1,2},沈宏海¹,韩松伟¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

现代精密光电稳定平台对电机伺服系统的动态特性及抗扰动性提出了更高的要求。为了提高直流力矩电机速度控制系统的伺服性能,使系统具有更好的动态性能和更强的抗干扰能力,本文提出了一种基于加速度信号的扰动补偿控制方法。该方法建立了标称控制器,并利用加速度信号构造扰动观测器,对外界扰动及由模型误差造成的影响进行快速、精确的补偿,从而提高系统的响应速度及抗扰动能力。实验结果证明,该控制方法显著地改善了电机控制系统的动态性能,使电机响应迅速而且没有超调;对于阶跃型外界扰动,系统的速度仅仅出现了宽度仅为 0.1 s 的脉冲型波动,且幅度较 PID 控制至少减小 50%;此外,控制系统对于电机模型的不确定性具有鲁棒性。本文所述控制方法效果显著、实现容易,非常适于工程应用。