

一种新的三维测量机器人手眼标定方法

邹劲松¹, 黄凯锋²

(1. 重庆水利电力职业技术学院 电子信息工程系, 重庆 402160; 2. 洛阳师范学院 信息技术学院, 河南 洛阳 471022)

摘要: 为了提高三维测量机器人的手眼标定精度以更好地满足工业需求, 提出了一种采用动态改变变异率的自适应差异进化算法进行手眼标定的新方法; 首先构建了由线结构光测头和机器人组成的视觉测量系统, 利用齐次坐标变换的方法建立了测量系统的数学模型; 然后针对数学模型中的手眼关系, 使用半径已知的球体, 采用定点变位姿的方法, 进行粗略的估计, 并对手眼关系求解的精度进行分析; 最后采用动态改变变异率的自适应差异进化算法对手眼关系做进一步寻优; 实验结果表明, 算法具有较高的求解精度; 该方法用于手眼标定是可行的、有效的, 整个标定过程简单, 便于实际应用。

关键词: 自适应差异进化; 三维测量机器人; 手眼标定; 线结构光测头

A New Method of Hand-eye Calibration for Robot Measuring System

Zou Jinsong¹, Huang Kaifeng²

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Chongqing College of Water Resources and Electric Engineering, Chongqing 402160, China; 2. College of Information Technology, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract: In order to improve hand-eye calibration accuracy of the three-dimensional measuring robot to better meet industry needs, a new method of an adaptive differential evolution algorithm that adopts dynamic changes in mutation rate to conduct hand-eye calibration is proposed. Firstly, the vision measuring system is constructed, which consists of linear structured light measuring head and robot, a mathematic model for measuring system is constructed using homogenous coordinate transform principle. Then, for the hand-eye relationship in mathematical model, which is estimated roughly using a known radius of the sphere and the fixed displacement pose method, and the accuracy of solutions of hand-eye relation is analyzed; Finally, an adaptive differential evolution algorithm with dynamic changes in mutation rate is used to conduct further optimization on hand-eye relationship. Experimental results show that the algorithm has a high accuracy. The method for hand-eye calibration is feasible and effective, and the whole calibration process is simple and easy to the practical application.

Keywords: adaptive evolution; three dimensional measuring robot; hand-eye calibration; linear structured light measurement head

0 引言

近年来, 作为一种非接触式的三维轮廓重构主动视觉方法, 结构光法测量技术^[1]发展迅速, 成为了物体测量领域的基本方法之一。目前, 结构光法用于工业的智能加工时, 一般的做法是将线结构光测头安装在机器人手腕部位, 实现对工件在加工的过程中进行检测的目的^[2]。其输出数据为二维形式, 需要准确定位与定量光学测头与机器人的末端执行器两者的对应关系, 即手眼标定^[4]。

针对手眼标定的问题, 利用球体特征的优势, 找到了采用大小固定的标准球实现对手眼问题的准确解决。这种方法首先要选取大小合适的标准球, 核心思路是获取光平面与球体相交构成的圆平面, 利用此圆求取球心坐标位置和表达形式。为进一步提高精度, 将标定问题转化为多变量非线性优化问题^[5-6]。差异进化算法 (DE) 是 Storn 等学者提出的基于实数编码的具有保优思想的启发式算法^[7]。该算法以遗传算法作为基本框架, 在解决寻优问题与变量耦合问题时, 具备较高的鲁棒性能, 特别是在经典寻优运算的解答中, 计算水平很高^[8], 同其他进化算法一样, 差异进化算法也存在早熟或者收敛速度慢的缺点。

受粒子群优化理论^[9]中的一些成果的启发, 本文提出了一种采用动态改变变异率的自适应差异进化算法, 将其应用于手眼关系的进一步寻优, 进行手眼标定。

1 测量系统的数学模型

构建相应的模型, 首先要选定合适的运动平台, 本文选用莫托曼 HP3 系列的六轴机器人作为实验平台, 组建测量系统为图 1, 对应的结构图示为图 2, 相关装置已安装完毕。测量系统的探测头获取的数据信息为二维形式, 但对待测的目标物体进行描绘时用到的是空间三维形式。所以, 在这两种信息数据之间要经过适当形式的转换, 才能够完成装置的三维测量的任务。通常使用的方法是采用测量系统对应的模型来进行转换, 这就需要对装置各部位的空间关系进行正确定位, 构建三坐标测量机完成位置标定任务, 如图 1 所示。



图 1 测量机器人系统

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2014-12-04。

作者简介: 邹劲松 (1975-), 男, 重庆人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机软件与理论方向的研究。

1) 第一种: 全局坐标系 $O_w - X_w - Y_w - Z_w$, 要求该坐标

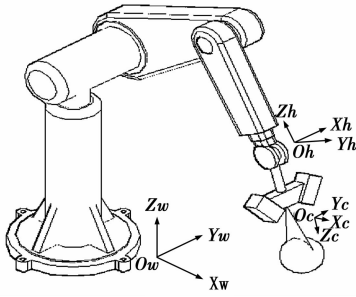


图 2 测量系统坐标系的定义

系与系统基坐标系应相同, 全部数据将汇总与此。

2) 第二种: 手腕坐标系 $O_h - X_h - Y_h - Z_h^w$, 要求根据平台的正向运动原理确定该坐标系与基坐标系之间的相对位置, 确定法兰盘几何中点为该坐标系的零点。

3) 第三种: 测头坐标系 $O_c - X_c - Y_c - Z_c^w$, 要求该坐标系与手腕坐标系的空间位置关系恒定, 要根据测头相关参量来确定该坐标系的零点位置。

定义第三种较第二种坐标系的姿态表示为 (R_x, t_x) , 第二种较系统基坐标系的姿态表示为 (R_h, t_h) 。在此基础上, 对于上面建立的 3 种坐标系, 进行把后面坐标系转换为前临坐标系的准确操作。在此, 给出准确的坐标变换模型表示如下:

$$X_w = R_h(R_x X_c + t_x) + t_h \quad (1)$$

式中, X_c 与 X_w 对应为被测元素在第三种与基坐标系内的坐标值。 t_h 与 R_h 是根据实验平台的正向运动理论求解获得, R_x 与 t_x 表示未知参量。

在计算 R_x 与 t_x 时, 要根据坐标变换模型表达式转换成含有此待求量的等式, 相关系数和求解过程需满足要求。

2 手眼关系的标定方法

2.1 手眼关系粗标定

把大小合适的标准球放入机器人的操作区域, 测试平台将按照多种姿态对标准球实施探测, 并使用系统模型, 根据球心坐标位置按照一致性原理^[10]来确定准确的手眼关系。实施步骤如下:

首先在第三种坐标系内构建球体对应的方程表示如下:

$$X_C - X_{OC} = R \quad (2)$$

由上文的分析可知, 非接触性的光测头捕获的数据信息为目标物体的二维数据的形式。取在坐标系内光对应的水平面方程表示为 $x_c = 0$ 。根据球面与光平面相交构成圆平面, 在坐标系内方程表示为:

$$(y_c - y_{oc})^2 + (z_c - z_{oc})^2 = R^2 - x_{oc}^2 \quad (3)$$

由测量数据拟合出的圆的方程为

$$(y_c - y'_{oc})^2 + (z_c - z'_{oc})^2 = r^2 \quad (4)$$

球心在测头系下的坐标为

$$\begin{aligned} y_{oc} &= y'_{oc} \\ z_{oc} &= z'_{oc} \\ x_{oc} &= \pm \sqrt{R^2 - r^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, 由右手定理对 x_{oc} 进行符号确定。

通过变换相应位姿获得多组球心坐标表达式, 表示如下:

$$X_{oc}^i = [x_{oc}^i, y_{oc}^i, z_{oc}^i]^T, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

将这些球心坐标映射到机器人基坐标系

$$X_b^i = R_{hi}(R_x X_{oc}^i + t_x) + t_{hi} \quad (7)$$

1) 求解和确定 R_x :

规定手腕的运动是纯平移形式, 所以满足表达式 $R_{hi} = R_{hj}$, 球心坐标在系统基坐标系内是一定的。

$$R_x(X_{oc}^i - X_{oc}^j) = R_{hi}^T(t_{hj} - t_{hi}) \quad (8)$$

改变手腕的姿态可以得到形如 $R_x A = B$ 的矩阵方程, R 的求解等价于以下优化问题

$$\begin{aligned} \min \sum_i^n (R_x a_i - b_i)^T (R_x a_i - b_i) = \\ \min \sum_i^n (a_i^T a_i - 2b_i^T R_x a_i + b_i^T b_i) \end{aligned} \quad (9)$$

其中: a_i 和 b_i 为矩阵 A, B 的列向量

上述问题等价于最大值问题

$$\max \sum_i^n b_i^T R_x a_i \quad (10)$$

R 为单位正交矩阵, 故 $R_x a_i = a_i$, 即 R_x 只会改变 a_i 的方向, 而不会改变 a_i 的长度。上述最大值问题, 即要寻找单位正交矩阵, 使得 a_i 和 b_i 具有相同的方向。

$$\sum_i^n b_i^T R_x a_i = \text{tr}(R_x A B^T) \quad (11)$$

$\text{tr}()$ 表示矩阵的迹令矩阵 $A B^T$ 的奇异值分解为 $A B^T = U \Sigma V^T$ 。

$$\text{tr}(R A B^T) = \text{tr}(R_x U \Sigma V^T) = \text{tr}(V^T R_x U \Sigma) =$$

$$\text{tr}(\Sigma) = \sum_i^n z_{ii} \sigma_i \leq \sum_i^n \sigma_i \quad (12)$$

当且仅当正交矩阵 $Z = I$ 即 $R = V U^T$ 时, 等号成立。

2) t_x 确定:

根据式 (7):

$$R_{hi}(R_x X_{oc}^i + t_{hi}) - R_{hj}(R_x X_{oc}^j + t_{hj}) = (R_{hj} - R_{hi}) t_x \quad (13)$$

多个姿态的测量组成形如 $A_x = b$ 的方程, 由最小二乘法即可确定 t_x 。

$$t_x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (14)$$

机器人的绝对定位精度较低, 但其相对定位精度较高。由以上过程, 可以看到 R_x 和 t_x 的求解主要和不同位置之间的相对运动有关。因此, R_x 和 t_x 的解应该具有一定的精度。

2.2 手眼关系求解的精度分析

根据上述规定的步骤, 命令从 3 种各不相同的视角对实验用标准球进行仔细扫描检测, 每个姿态得到若干组数据信息集合。实验用机器人装置的测头精度和重复精度均是 0.02 mm 。所求的手眼关系结果如下:

$$R_x = \begin{bmatrix} -0.0009 & -0.0432 & 0.9991 \\ 0.9997 & -0.0242 & -0.0019 \\ 0.242 & -0.9988 & 0.0432 \end{bmatrix}^T$$

$$t_x = [-0.5772 \quad -0.8213 \quad 196.5311]^T$$

根据上述的手眼矩阵, 把获得的任意两个数据变换在第一种坐标系之内, 拟和出球心在该坐标系的坐标数值。表 1 给出了其中的 10 组坐标值。

表中:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i$$

表 1 重复精度测试数据

序号	x/mm	y/mm	z/mm
1	443.501	11.648	172.866
2	443.563	11.639	172.870
3	443.529	11.679	172.858
4	443.498	11.692	172.840
5	443.511	11.695	172.839
6	443.529	-11.659	-172.845
7	443.494	-11.662	-172.837
8	443.524	-11.629	-172.785
9	443.545	-11.620	-172.846
10	443.547	-11.680	-172.835
3σ	0.066	0.075	0.067

从表中的数据可以看出，在每一个方位对球心坐标值进行恢复计算操作时，存在较大的具有重复性的误差。对比可知：测头所处的空间方位不同时，标准球球面与光平面经过交汇所形成的探测点数目是不尽相同的，距离 CCD 镜头越近的位置，数目相对多一些，对应的拟合测量精度也越大。若出现球心与光平面的距离很微小的情况时，由于此时标准球半径与拟合圆半径大致相等。在这种情况下，如果拟合圆半径测量时有很小的误差，在第三种坐标系下求解球心坐标时误差会得到很大程度的放大。

2.3 手眼关系的寻优搜索

为了寻找手眼关系的精确结果，提出了一种基于自适应差异进化算法的搜索寻优方法。差异进化理论的核心是由群体内的元素差来组建过渡种群，实现对个体的方向性干扰，接着按照父子组合个体元素适应度的大小，产生下一代种群。该算法采用一对一的淘汰机制来更新种群，大大提高了搜索结果的准确高效性。该算法的搜寻能力与种群的特定变异程度关系很大^[11-12]。在小变异率的情况下，寻优结果虽容易保存下来，但容易出现局部寻优的早熟收敛现象，影响全局效果；如果变异率较高，会出现运算速度较低的情况，寻优结果也不易保存下来^[13]。为解决上述问题，本文以差异进化算法作为理论基础，采用动态改变变异率的自适应差异进化新算法（ADE），发挥其自适应的功能，变异率由种群的进化速度和聚集度决定。

在笛卡尔坐标系中，两个直角坐标系之间的旋转变换关系可以用其中的一个坐标系绕另一个坐标系的 3 个轴的 3 个旋转角 α, β, γ 表示：

$$R_x = \begin{bmatrix} \alpha\alpha\beta & \alpha\alpha\beta\gamma - \alpha\alpha\gamma & \alpha\alpha\beta\gamma + \alpha\alpha\gamma \\ \alpha\alpha\beta & \alpha\alpha\beta\gamma + \alpha\alpha\gamma & \alpha\alpha\beta\gamma - \alpha\alpha\gamma \\ -\beta & \beta\beta\gamma & \beta\beta\gamma \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中， $\alpha = \cos(\alpha), \alpha = \sin(\alpha)$

寻优是以上面解出的手眼关系作为参考值，在这些值附近进行搜索。将不同姿态测量的标准球的二维数据转化为三维数据并拟合成球，以离散点到拟合球面的距离之和最小作为寻优条件。适应度函数为：

$$f = \sum_i^n |(x_w - x_{ow})^2 + (y_w - y_{ow})^2 + (z_w - z_{ow})^2 - R^2| \quad (16)$$

定义进化速度因子

$$h = \frac{f(x_{best}(g))}{f(x_{best}(g-1))} \quad (17)$$

其中： $x_{best}(g)$ 表示第 g 代搜索到的最优个体。

进化速度因子数值大小表示对应种群的进化快慢程度。在迭代一段过程后，进化速度因子恒等于 1，这就说明运算处于停歇状态或是目标解已经出现。

定义种群聚集度系数：

$$s = \frac{f(x_g^{best})}{\frac{1}{n} \sum_i^n f(x_i)} \quad (18)$$

该系数与种群聚集程度呈正相关关系，而与元素的多样性呈负相关关系。若出现该值为 1 的情况，说明全部个体元素不具备多样性。

定义变异系数

$$F = F_0 - h \cdot F_h + s \cdot F_s \quad (19)$$

由式 (19) 可以看出，变异系数与进化速度和聚集程度有关。倘若种群的进化效率较高，该运算的搜寻范围将进行相应的扩充。如果进化速度降低，应该通过降低 F 数值的方式，使得种群在小空间内搜索，以便更快地找到目标解。如果种群聚集度系数值很大，该运算很可能出现局部寻优的情况，在这种情况下，应该提高变异系数值，扩充搜寻空间内的元素种类，保证进行全局优化。

2.4 寻优算法的实现

寻优算法的流程图如图 3 所示。

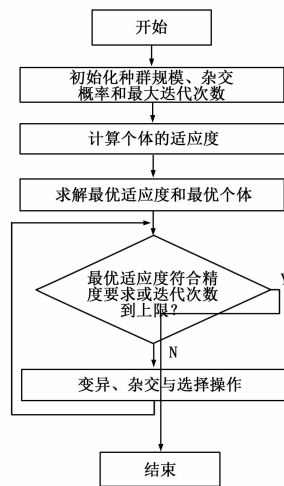


图 3 寻优算法流程图

步骤 1：初始化种群规模 N ，杂交概率 C_R ，确定最大迭代次数 g_{max} ，令 $g=1$ ，按公式 (20) 随机初始化每一个个体

$$x_{ij} = x_j^l + rand(0,1)(x_j^u - x_j^l) \quad (20)$$

式中， $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, D(D = 6), x_j^u$ 和 x_j^l 分别为第 j 维变量的上限和下限。

步骤 2：利用公式 (16) 计算每个个体的适应度，求出最优适应度及最优个体。

步骤 3：判断最优适应度是否符合精度要求或是否实现迭代运算上限值，若是则退出，若不是继续运算下去。

步骤 4：按式 (21) 执行变异操作，变异系数 F 由式 (19) 确定。

$$v_i = x_{r_1} + F(x_{r_2} - x_{r_3}), i = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

其中: r_1, r_2, r_3 是 $[1, N]$ 中任意选取的 3 个不同的整数。

步骤 5: 按式 (22) 执行杂交操作, 生成试验个体。

$$u_{ij} = \begin{cases} v_{ij} \text{rand}() > C_R \\ x_{ij} \text{rand}() \leq C_R \end{cases} \quad (22)$$

步骤 6: 按式 (23) 执行选择操作, 生成 $g+1$ 代种群。

$$x_i(g+1) = \begin{cases} u_i(g), f(u_i(g)) \leq f(x_i(g)) \\ x_i(g), \text{ others} \end{cases} \quad (23)$$

步骤 7: 返回步骤 3。

2.5 精度验证

自适应差异进化算法的相关参数设定为: 种群规模 $N=100$, 杂交概率 $CR=0.5$; 最大迭代次数 $g_{\max}=200$; 变异系数的初始值 $F_0=0.9$, $F_h=0.5$, $F_s=0.05$ 。以粗标定计算的结果作为初始值, 在其周围进行寻优。分别使用 DE 和 ADE 进行 50 次寻优, 图 4 给出了其中 3 次 DE 和 ADE 适应度函数的收敛曲线。图 5 给出测量数据转换到基坐标系的值, 粗标定时拟合球的直径为 30.196, 寻优后的拟合球的直径为 30.245 mm, 而球的标称直径为 30.280 mm。由此可见, 拟合的精度有比较明显的提高。图 5 中, ① ② ③ 为测量数据, ④ 为拟合球面。表 2 给出每片测量数据中各点到球面的最大距离。

图 4 表明, 在收敛精度方面, ADE 相对于 DE 优势比较明显。由表 2 中可知每个测头方向下测量数据到拟合球面的最大距离基本相近, 这些值稍大于测头的标称精度。拟合球的直径和球的标称直径比较接近, 这表明 3 次测量数据到基坐标系的转换具有较高的精度。因此, 手眼矩阵具有较高的计算精度。

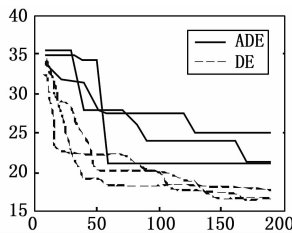


图 4 适应度函数收敛曲线

表 2 测量数据到拟合球面的最大距离

测头方向	最大距离/mm
1	0.150
2	0.149
3	0.152

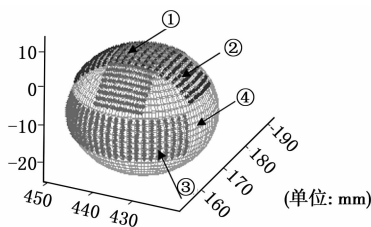


图 5 测量数据和拟合球面

3 结论

为解决企业在产品生产与实时监测方面存在的弊端, 增强测量方法的适应性和准确性, 本文提出由工业机器人与非接触式光测头等装置组建的全方位测量装置, 并提出了一种采用动态改变变异率的自适应差异进化算法进行手眼标定的新方法。首先构建了由线结构光测头和机器人组成的视觉测量系统, 利用齐次坐标变换的方法建立了测量系统的数学模型; 然后针对数学模型中的手眼关系, 使用半径已知的球体, 采用定点变位姿的方法, 进行粗略的估计, 并对手眼关系求解的精度进行分析; 最后采用动态改变变异率的自适应差异进化算法对手眼关系做进一步寻优。整个标定过程简单, 便于实际应用, 实验结果也表明, 算法具有较高的求解精度。由于测量数据和机器人的末端位姿不可避免的存在偏差, 这些误差势必对系统的精度产生影响。如何将这些误差的影响反映到标定过程并加以补偿, 是下一步有待解决的问题。

参考文献:

- [1] 彭彬帆, 陶毅阳, 于超, 等. 基于红外结构光的三维显示用交互装置 [J]. 光学学报, 2013 (4): 108-114.
- [2] 尹仕斌, 任永杰, 郝继贵, 等. 机器人视觉测量系统中的工具中心点快速修复技术 [J]. 机器人, 2013, 35 (6): 736-743.
- [3] Michael Demeyere, D o Rurimunzu, Christian Eugène, Diameter Measurement of Spherical Objects by Laser Triangulation in an Ambulatory Context [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 56 (3): 867-872
- [4] Shiu Y C, Ahmad S. Calibration of wrist mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX=XB$ [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5 (1): 16-27.
- [5] 李龙, 白瑞林, 吉峰, 等. 结构光视觉引导的轨迹跟踪系统的标定技术 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (16): 259-264.
- [6] 张黎烁, 赵志梅. 基于主动视觉的结构光手眼系统自标定方法 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (9): 202-206.
- [7] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space [J]. Journal of Global Optimization, 2012, 11 (4): 341-359.
- [8] Neri F, Tirronen V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis [J]. Artificial Intelligence Review, 2013, 33 (1-2): 61-106.
- [9] 温卓漫, 王延杰, 邸男, 等. 基于合作靶标的在轨手眼标定 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (5): 1005-1012.
- [10] 黄佳. 基于工业机器人的三维激光扫描测量系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] 王海伦, 余世明, 郑秀莲. 自适应差分进化算法及其在参数估计中的应用 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (5): 202-204.
- [12] 薛羽, 庄毅, 顾晶晶, 等. 自适应离散差分进化算法策略的选择 [J]. 软件学报, 2014, 25 (5): 984-996.
- [13] 颜学峰, 余娟, 钱锋. 自适应变异差分进化算法估计软测量参数 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23 (5): 744-748.
- [14] 陈华, 范宜仁, 邓少贵. 基于 logistic 模型的自适应差分进化算法 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (7): 1105-1108.