基于遗传算法的多关节三维扫描仪系统参数定标*

陈振羽[1]，付楚胜[1]，李德华[2]

(1. 第二炮兵指挥学院，湖北 武汉 430012；
2. 华中科技大学 模式识别与人工智能研究所，湖北 武汉 430074)

摘要：介绍了多关节三维扫描仪坐标测量原理，分析了结构参数误差模型，指出多关节三维扫描仪定标实质上是一个优化过程，提出了利用遗传学原理进行定标，并给出了算法，实验结果表明该算法能有效地确定扫描仪的结构参数。

关 键 词： 多关节三维扫描仪； 结构参数； 定标

中图分类号：TH74 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-2276(2003)05-0535-04

Genetics-based calibration algorithm for structure parameters of multi-joints 3D scanner*

CHEN Zhen-yu[1], FU Chu-sheng[1], LI De-hua[2]

(1. Second Artillery Command College, Wuhan 430012, China;
(2. Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The principle of determining 3D coordinates of a point in the space using multi-joints 3D scanner is described. The error metric between the real value and the designed value of structural parameters of multi-joints 3D scanner is analyzed. It is pointed out that the calibration problem is measuring error minimization problem over all possible values of the parameters, and a genetics-based calibration algorithm for the structural parameters of multi-joints 3D scanner is presented. The experiments show that the proposed method is effective to calibration.

Keywords: Multi-joints 3D scanner; Structural parameters; Calibration

1 坐标计算模型

接触式多关节三维扫描仪是由 6 个杆件和一个铁笔通过旋转关节级联构成的开放式运动链，第一个杆件作为该链的一端与底盘相联，运动链的另一端(铁笔)是测头，可以在一个球形空间内自由活动。设

收稿日期：2003-02-28； **修订日期**：2003-04-08

* **基金项目**：国家自然科学基金(69775022)；国家 863 计划(863-306-ZT04-06-3)

作者简介：陈振羽(1958-)，男，江苏南京人，教授，博士，研究领域为通信与电子系统、模式识别与智能系统、计算机视觉和指挥自动化，发表学术论文 40 余篇。

底盘(基座)的参考坐标系为$\{O_0X_0Y_0Z_0\}$,则杆件 1～6 及铁笔的局部坐标系的标定如图 1 所示。

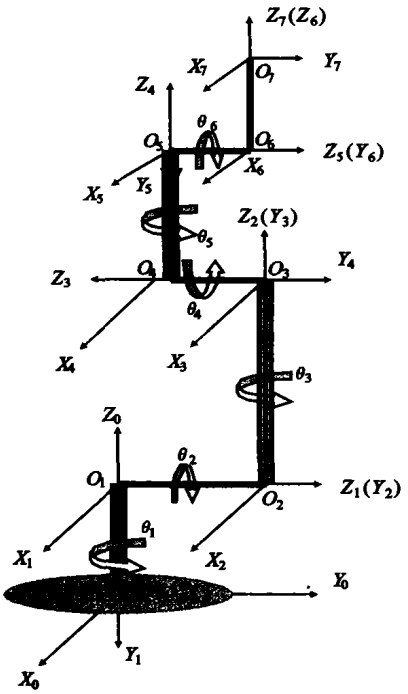

图 1 多关节三维扫描仪坐标系统

Fig. 1 The coordinate system of multi-joints 3D scanner

Denavit 和 Hartenberg[1,2]较为合理地描述了两个相邻杆件的特殊坐标系的建立方法:设杆件 i 与杆件 $i-1$ 通过关节 i 相连,杆件 i 的坐标系$\{O_iX_iY_iZ_i\}$的坐标原点设在关节 i 的轴线与杆件 i 轴线交合处,Z_i 轴与杆件 i 的轴线重合;X_i 轴与关节 i 的轴线重合,Y_i 轴按右手法则确定,如图 2 所示。$\{O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}\}$与$\{O_iX_iY_iZ_i\}$之间的变换可以通过坐标系的平移、旋转来实现:即可以令$\{O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}\}$先绕 Z_{i-1} 轴旋转 θ_i 角,再沿 Z_{i-1} 轴平移 d_i,然后沿 X_{i-1} 轴平移 a_i,最后绕 X_{i-1} 轴旋转 α_i 角。用变换矩阵 $\boldsymbol{A}_{i-1,i}(i=1,2,\cdots7)$表示,则有:

$$\boldsymbol{A}_{i-1,i}=Rot(Z_{i-1},\theta_i)Trans(0,0,d_i)Trans(a_i,0,0)Rot(X_{i-1}\alpha_i)=\begin{bmatrix}\cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i\\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i\\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_{i(3\times3)} & q_{i(3\times1)}\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

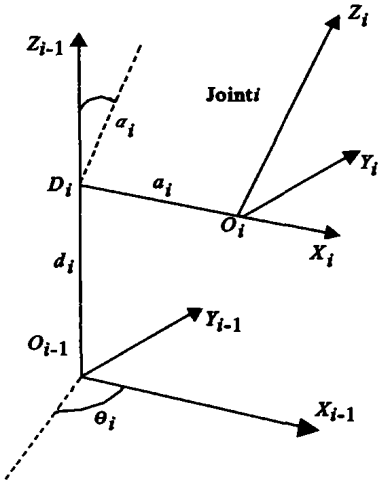

图 2 关节的坐标关系

Fig. 2 The coordinate relationship of a joint

在理想的情况下,相邻杆件旋转轴线的夹角 α_i 近似为直角,相邻杆件轴线沿空间公垂线的距离 a_i 近似为零。d_i 为杆件的杆长,θ_i 是关节的转角,由光学编码器测得,称为关节变量。这样,铁笔坐标系与基座参考坐标系之间的关系矩阵 $\boldsymbol{T}_{07}$ 可以表示为:

$$A_{07}=A_{01}A_{12}A_{23}A_{34}A_{45}A_{56}A_{67} \tag{2}$$

将公式(1)与公式(2)合并,得铁笔(头)位置坐标方程为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}=&(R_1R_2R_3R_4R_5R_6)q_7+(R_1R_2R_3R_4R_5)q_6+\\&(R_1R_2R_3R_4)q_5+(R_1R_2R_3)q_4+\\&(R_1R_2)q_3+R_1q_2+q_1\end{aligned} \tag{3}$$

写成矢量函数形式有:

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{F}(a,d,\alpha,\theta) \tag{4}$$

式中 $a=(a_1a_2a_3a_4a_5a_6)^{\mathrm{T}}$;$d=(d_1d_2d_3d_4d_5d_6d_7)^{\mathrm{T}}$;$\alpha=(\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\alpha_5\alpha_6)^{\mathrm{T}}$;$\theta=(\theta_1\theta_2\theta_3\theta_4\theta_5\theta_6)^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{P}=(p_xp_yp_z)^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{F}=(f_xf_yf_z)^{\mathrm{T}}$。

2 系统结构参数误差模型

像杆长、相邻杆件间的夹角等结构参数由于加工及装配不十分理想,与标称值相比总有一点误差:用 Δd_i 表示杆长误差;Δa_i 表示相邻关节的旋转轴线不

相交于一点而产生的误差；$\Delta\theta_i$ 表示在装配过程中，角度光学编码器的零位与理论模型中关节旋转零位不重合而产生的零位偏置误差。所有这些结构参数误差将对测量结果造成影响，通常，扫描仪的工作半径越大，影响就越大；前端的结构参数误差对测量结果的影响要比末端的大。实际上，这些结构参数的误差都很小，这样测量误差可用下面的方程来表示：

$$\Delta P \approx \frac{\partial F}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial F}{\partial d}\Delta d + \frac{\partial F}{\partial \alpha}\Delta \alpha + \frac{\partial F}{\partial \theta}\Delta \theta \qquad (5)$$

将公式(5)简写成：

$$\Delta P = \boldsymbol{J}_\delta \Delta \delta \qquad (6)$$

式中　$\Delta P = (\Delta p_x\ \Delta p_y\ \Delta p_z)^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{J}_\delta$ 是一个 3×25 的误差系数矩阵，即：

$$\boldsymbol{J}_\delta = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial a_1}\cdots\frac{\partial f_x}{\partial a_6} & \frac{\partial f_x}{\partial d_1}\cdots\frac{\partial f_x}{\partial d_7} & \frac{\partial f_x}{\partial \alpha_1}\cdots\frac{\partial f_x}{\partial \alpha_6} & \frac{\partial f_x}{\partial \theta_1}\cdots\frac{\partial f_x}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial f_y}{\partial a_1}\cdots\frac{\partial y_y}{\partial a_6} & \frac{\partial f_y}{\partial a_1}\cdots\frac{\partial f_y}{\partial d_7} & \frac{\partial f_y}{\partial \alpha_1}\cdots\frac{\partial f_y}{\partial \alpha_6} & \frac{\partial f_y}{\partial \theta_1}\cdots\frac{\partial f_y}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial f_z}{\partial a_1}\cdots\frac{\partial f_z}{\partial a_6} & \frac{\partial f_z}{\partial d_1}\cdots\frac{\partial f_z}{\partial d_7} & \frac{\partial f_z}{\partial \alpha_1}\cdots\frac{\partial f_z}{\partial \alpha_6} & \frac{\partial f_z}{\partial \theta_1}\cdots\frac{\partial f_z}{\partial \theta_6} \end{bmatrix}$$

$$\Delta\delta = (\Delta a_1 \cdots \Delta a_6\, \Delta d_1 \cdots \Delta d_7\, \Delta\alpha_1 \cdots \Delta\alpha_6\, \Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_7)^{\mathrm{T}}$$

3　基于遗传算法的系统参数定标算法

从以上分析不难看出，系统结构参数的误差是影响测量误差的直接原因。为得到尽可能高的测量精度，应找出系统结构参数的实际取值，而不是标称值。寻找系统结构参数真实取值的方法之一是通过误差方程先求出各个参数的误差，然后对其标称值进行校正；还有一种方法是把寻找结构参数问题看作是对潜在解的一种搜索，在参数空间中寻找一组最贴近实际的参数，使得用这组参数计算得到的测量误差最小，这便是一个优化问题。

无论用哪种方式定标，都需要用测量误差作为比较和计算的基础，因而需要一系列已知标准位置坐标或相对位置坐标，这些标准位置坐标可以通过高精度的三坐标测量机测得。标记这些标准位置坐标精确的装置，称为定标模块。

叶东等人[3,4]介绍了用最小二乘法计算结构参数误差，其方法如下：首先设定 m 个标准位置坐标，m 的大小依待求参数的数目而定，要求 $3\times m$ 大于这个数目。然后用多关节坐标测量机的测头分别触测这些标准位置，将当前的参数值代入测头坐标计算公式(4)，计算出测头的理论位置坐标，再与标准坐标对比，得到 m 个测头位置误差，把这些数据代入公式(6)，可得到 $3\times m$ 个位置误差方程，即：

$$\Delta Q = G\Delta\delta \qquad (7)$$

其中

$$G = (\boldsymbol{J}_\delta^1 \cdots \boldsymbol{J}_\delta^m)^{\mathrm{T}}, \Delta Q = (\Delta P^1 \cdots \Delta P^m)^{\mathrm{T}}$$

进而求出

$$\Delta\delta = (G^{\mathrm{T}}G)^{-1}G^{\mathrm{T}}\Delta Q \qquad (8)$$

采用这种方法的最大困难在于偏导矩阵 $\boldsymbol{G}$ 在最优解附近各元素的值都很小，使得 $\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}$ 奇异或接近奇异，这时其逆的求解会遇到很大的困难甚至无法进行。

实际上系统结构参数定标是一个优化问题，其任务就是在参数空间中寻找一组尽可能准确的结构参数，使得应用这组结构参数能够得到更为精确的测量结果。由于搜索空间庞大，经典的穷举法显然无能为力，需要借助特殊的人工智能技术，遗传算法便是一个合适的选择。遗传算法是一种基于自然选择和群体遗传机理的搜索算法，模拟自然选择和自然进化过程中发生的繁殖、交配和变异现象，将每个可能的解看作是群体(所有可能解)中的一个个体，并将每个个体进行编码。根据确定的目标函数对每个个体进行评价，给出一个适应度值。开始时随机地产生一些个体(初始群体)，然后使用遗传算子对这些个体(选择、交叉、变异)进行交叉组合，得到新一代群体，这一群新的个体由于继承了上一代的一些优良性态，明显优于上一代，这样就逐步朝着更优解的方向进行。由于遗传算法通过保持一个潜在解的群体上执行了多方向的搜索并支持这些方向上的信息构成和交换，因而它能在概率意义上找到全局最优解。

在遗传算法中，可能解的编码方法、遗传算子的设计是构造遗传算法需要考虑的主要问题，它直接关系到算法在解决实际问题时的能力，简单而常用的基因编码方式是采用二进制编码，即将个体编码为一个

二进制字符串，交叉和变异算子的设计也是根据二进制字符串的特点来设计的。然而，虽然这种编码方式的特点是简单易用，但表达能力有限，许多应用还要根据自己面对的问题开发特殊的编码方式。为此把参数向量联合编码为染色体个体，染色体的各基因分别对应于一个参数，染色体的适应值的计算方法是：将该染色体中各个基因所代表的结构参数值代入坐标计算公式并将计算结果与标准值进行比较，两个数值越接近，则这个染色体的适应值越高，也就是说该染色体对应的这组结构参数的值越接近实际。

需要指出的是：为防止结构参数在变异操作过程中出现超出给定的误差容限，在对基因进行变异操作后要进行超容限判断；若定标的内容包含旋转编码器的零位偏差 $\Delta\theta$，则 θ 的基本值取接触式多关节三维扫描仪在触测标准坐标点时某个姿态下的各个旋转编码器的角度值。基于遗传算法的结构参数定标算法流程如下：

(1) 产生初始群体，在各参数的误差容限内，随机地生成 M 组参数，即 M 染色体个体。M 是群体的规模，一般取 20～60；

(2) 在当前群体中，对所有个体随机地配对，并对每对个体依交叉概率 p_c 进行交叉操作；

(3) 对每个个体依变异概率 p_m 进行变异操作；

(4) 计算交叉、变异后的群体中各个体的适应值并从中取出较大适应值个体和上一代群体中较大适应值个体组成新一代群体；

(5) 是否满足优化目标或达到给定的迭代次数？若是转(6)，否则转(2)；

(6) 停止。

4 实验结果与分析

表1给出了系统主要参数的标称值和用定标算法得到的各参数的偏差，由于系统采用的角度传感器是增量型旋转编码器，故这里没考虑关节零位与角度传感器零位之间的偏差。第一节杆件的误差大，可能与地面的水平度有关。

目前系统的测量精度已达到 1 mm 以下。由于系统的工作半径比较大，对于各杆件参数误差在传递到末端测头时将有放大作用，这给提高精度带来难度。为了提高测量精度和方便用户使用，今后应在以下几方面进行改进：

(1) 进一步提高光学编码器的分辨率；

(2) 尽可能提高零部件加工精度和安装工艺水平；

(3) 减轻系统质量；

(4) 提高系统自复位能力；

(5) 采用低温度系数材料。

文中给出了利用 Denative-Hartenberg 方法建立的系统数学模型和误差模型，介绍并分析了常用的结构参数的定标最小二乘法，指出寻找接触式多关节三维扫描仪结构参数的实际取值实质上是一个优化过程，提出了利用遗传学原理进行定标的思想，并给出了算法。实验表明：定标算法计算简便，运行效率高，能找到实际参数，对提高系统精度具有重要意义。

表1 结构参数定标实验结果

Table 1 Experimental result for structural parameters calibration

Rod(joint) No.	d_i/mm	Δd_i/mm	a_i/mm	Δa_i/mm	α_i/rad	$\Delta\alpha_i$/rad
1	624	1.07	0	0.001	$\pi/2$	0.001
2	218	0.029	0	−0.003	$\pi/2$	−0.004
3	1 003	0.105	0	0.000	$\pi/2$	0.001
4	218	−0.034	0	0.002	$\pi/2$	−0.002
5	1 003	0.071	0	−0.004	$\pi/2$	0.001
6	135	0.019	0	0.002	$\pi/2$	−0.001
7	192	−0.046				

参考文献：

[1] Rachid Manseur, Keith L Doly. Structural kinematics of 6-revolute-axis robot manipulators[J]. Mech Mach Theory, 1996, 31(5):647-657.

[2] Ming Z Huang, Oren Masory. A simple method of accuracy enhancement for industrial manipulators[M]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1993,(8):114-122.

[3] 叶东，黄庆成，车仁生. 多关节坐标测量机误差模型[J]. 光学精密工程，1999,7(2):91-96.

[4] 叶东，黄庆成，车仁生. 多关节坐标测量机结构参数校准[J]. 宇航计测技术，1999,19(6):12-16.