

基于球面均匀分布的焊接机器人 TCP 标定方法

洪磊, 杨小兰, 王保升, 吕东升

(南京工程学院, 南京, 211167)

摘要: 当前焊接机器人工具中心点 (TCP, tool center point) 采用固定参考点法标定时, 存在机器人位姿选择的随机性和分布的不均匀性, 为解决这一问题, 提出了一种基于球面均匀分布的 TCP 标定方法. 以机器人自带的“六点法”为初步标定基础, 创建初始测量点位形; 在离线仿真环境下, 采用力学斥力迭代法构建以固定参考点为球心呈球面均匀分布的虚拟点, 逐组计算使虚拟机器人第六轴末端中心处于各虚拟点处, 剔除其中关节角超限、连杆之间发生碰撞的情形; 最后调节实际机器人到筛选后的各测量点位形, 应用最小二乘球面拟合法求解最终的 TCP 标定结果. 结果表明, 该方法使机器人姿态在各测量点绕固定参考点均匀分布, 最大限度增大了各测量点之间机器人位姿的差异度, 可有效提高标定精度和稳定性.

关键词: 焊接机器人; 工具中心点标定; 球面均匀分布; 力学斥力迭代法

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20191212001

0 序言

焊接机器人在实际应用中通过安装在末端法兰上的焊枪工具来完成各种作业任务^[1-2], 而工具中心点 (TCP) 相对于末端位置的偏移量大多是未知的, 或者不准确的, 机器人工具 TCP 标定就是计算焊枪工具端相对于机器人末端坐标系的位置辨识过程^[3]. 焊枪标定的精度直接影响到机器人焊接轨迹精度, 因此, 准确快速的标定对机器人焊接具有重要作用.

目前焊接机器人工具标定方法主要有辅助设备法和固定参考法. 辅助设备法是利用工业摄像机、激光跟踪仪等测量仪器完成标定^[4-7], 但这类标定方法依赖于精确的外部基准或辅助设备, 增加了额外的硬件成本, 不利于现场标定.

固定参考点法无需提供外部设备, 实施简易, 因此成为当前主流的标定方法. 目前国内外机器人生产商均提供了固定参考点标定法, 其中以“四点法”或“六点法”居多. 但在实际操作时, 操作人员对机器人姿态的选择分布具有随机性, 尤其是当四点都分布在参考点一侧时, 因分布位置的集中限制了机器人能做姿态的幅度, 因此, 导致标定误差增大.

张华君等人^[8]通过多点测量数据构建超定方程组进行求解, 该算法一定程度上减小了标定误差, 但未考虑方程组系数矩阵条件对标定结果的误差影响. 侯仰强等人^[9]提出一种利用四元数进行位姿坐标表示的工具标定算法, 简化了标定计算, 但方法未对标定时机器人的姿态分布进行研究. 李福运^[10]采用一种 TCP 自标定精度叠加方法对“六点法”进行了改进, 提出应最大限度增大测量点之间的机器人位姿差异度, 但未给出具体实现方法.

为解决固定参考点法在实施过程中存在的现有不足, 针对 TCP 点与固定参考点重合时机器人位姿之间差异度这一影响标定精度的关键因素, 提供了一种实现差异度优化的解决方法. 该方法使机器人末端腕部中心点在各测量点绕固定参考点呈球面均匀分布, 从而最大限度增大各测量点之间机器人位姿的差异度. 文中阐明了该方法的具体实现方案, 并基于试验结果验证了该方法的精度和稳定性.

1 TCP 标定球面拟合原理与误差分析

1.1 TCP 标定的球面拟合原理

固定参考点标定法示意图如图 1 所示. 选定空间中某参考点 P_r , 操作机器人运动, 多次让机器人焊枪 TCP 达到点 P_r 的位置, 操作时尽可能让两者重合, 则机器人第六轴末端位置形成了以点 $P_r(x_r, y_r, z_r)$

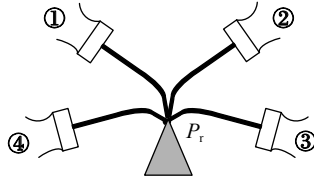


图 1 固定参考点标定法示意图

Fig. 1 Schematic of fixed reference point method

为球心, 分布在同一球面上的若干空间点, 球体半径为 r .

设共采集 $n(n \geq 4)$ 个末端空间点 ${}^0P_{6i}(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1 \sim n$), 对应的机器人第六轴末端位姿包括位置坐标 ${}^0P_{6i}$ 和姿态矩阵 ${}^0R_{6i}$ ($i = 1 \sim n$). 设 TCP 标定结果记为 (P_m, R_m) , 分别对应 TCP 相对于机器人末端的位置和姿态矩阵.

根据运动学约束关系 $P_r = {}^0P_{6i} + {}^0R_{6i}P_{mi}$, 得

$$P_{mi} = R_{6i}^{-1}(P_r - P_{6i}) \quad (i = 1 \sim n) \quad (1)$$

取均值作为最终的 TCP 位置标定结果, 即为

$$P_m = \sum_{i=1}^n P_{mi} / n \quad (n \geq 4) \quad (2)$$

至此实现对 TCP 的位置标定. 式 (1) 中, 机器人的第六轴末端位姿 (${}^0P_{6i}, {}^0R_{6i}$) 可由示教器读数得到. 参考点 P_r 的坐标是未知的, 需要根据采样的末端空间点 ${}^0P_{6i}$ ($i = 1 \sim n$) 通过球面拟合求解. 因此, 参考点 P_r 拟合的准确性直接影响到 TCP 标定的精度.

由采样空间点与参考点构造标准球面方程为

$$\|{}^0P_{6i} - P_r\|^2 = r^2 \quad (i = 1 \sim n) \quad (3)$$

任一个采样点到参考点的偏差为

$$d(i) = R(i) - r \quad (4)$$

$$\text{式中: } R(i) = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}.$$

构造残差优化目标函数为

$$E = \sum_{i=1}^n d(i)^2 = \sum_{i=1}^n (R(i) - r)^2 \quad (5)$$

采样线性最小二乘拟合法^[11]求解目标函数中的未知量, 忽略二次交叉项后, 目标函数可写成矩阵形式, $A^T A P = A^T B$, 通过求解 $P = (A^T A)^{-1} A^T B$ 可以得到球心和半径的值.

$$A = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & -1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & 2z_n & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r & x_r^2 + y_r^2 + z_r^2 - r^2 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

根据式 (6) 得到 P 的系数矩阵 $A^T A$ 为

$$A^T A = 2 \cdot \begin{bmatrix} 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 & 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i & 2 \sum_{i=1}^n x_i z_i & - \sum_{i=1}^n x_i \\ 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i & 2 \sum_{i=1}^n y_i^2 & 2 \sum_{i=1}^n y_i z_i & - \sum_{i=1}^n y_i \\ 2 \sum_{i=1}^n x_i z_i & 2 \sum_{i=1}^n y_i z_i & 2 \sum_{i=1}^n z_i^2 & - \sum_{i=1}^n z_i \\ - \sum_{i=1}^n x_i & - \sum_{i=1}^n y_i & - \sum_{i=1}^n z_i & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式 (7) 可知 $A^T A$ 是实对称矩阵, 其矩阵条件数与空间点 ${}^0P_{6i}$ 位置坐标 (x_i, y_i, z_i) ($i = 1 \sim n$) 的分布有很大的关系. 当在球面的分布区域越集中时, $A^T A$ 的各项数值之间越接近, 矩阵最小特征值越接近于 0, 条件数越大, 导致 $A^T A$ 病态程度越高, 拟合结果的误差越大, 导致最终的标定结果有很大的误差.

1.2 空间点分布对球面拟合结果的误差分析

空间点坐标位置在球面上的区域分布对拟合结果会产生很大的影响, 设计仿真试验做进一步的验证.

以原点 $O(0,0,0)$ 为球心, 半径 $r = 1$ 的单位球面上生成 n 个随机点 P_i ($i = 1 \sim n$), 根据球面坐标公式进行计算为

$$\begin{cases} P_{ix} = \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\beta_i) \\ P_{iy} = \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\beta_i) \\ P_{iz} = \sin(\beta_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $0 \leq \alpha_i \leq 2\pi$; $-\pi/2 \leq \beta_i \leq \pi/2$. 为进行不同区域分布的检验, 需要对上式 α_i , β_i 的范围做不同限定, 同时对坐标值进行一定的均匀随机误差扰动. 于是有

$$\begin{cases} P_{ix} = \cos(a \cdot \alpha_i) \cdot \cos(b \cdot \beta_i) + 0.2\varepsilon_i - 0.1 \\ P_{iy} = \sin(a \cdot \alpha_i) \cdot \cos(b \cdot \beta_i) + 0.2\phi_i - 0.1 \\ P_{iz} = \sin(b \cdot \beta_i) + 0.2\varphi_i - 0.1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\alpha_i = 2\pi\xi_i$; $\beta_i = \arcsin(2\varsigma_i - 1)$; a, b 表示限定空间点分布范围的分布系数, 满足 $0 \leq a, b \leq 1$. $\xi_i, \varsigma_i, \varepsilon_i, \phi_i, \varphi_i$ 表示 $(0, 1)$ 之间随机数. 则 $(0.2\varepsilon_i - 0.1)$, $(0.2\phi_i - 0.1)$, $(0.2\varphi_i - 0.1)$ 分别表示对空间点 x, y, z 坐标在 ΔP_r 范围内的误差扰动.

在仿真试验中, 取 $n=8$ 个空间点进行测试, a 和 b 每次取值相同, 依次取 $a, b=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1 , 共得到 5 种顺次扩大区域分布的点集, 采用式 (6) 进行球面拟合计算. 为增加评价的准确性, 每种区域分布分别完成 200 次拟合计算, 取均值作为最终结果. 根据拟合结果分别计算出球心位置误差 ΔP_r 和半径误差 Δr . 由式 (7) 可计算出矩阵

$A^T A$ 的条件数 $\text{cond}(A^T A)$, 如表 1 所示. 由表 1 可见, 空间采样点的分布区域越大, 反映的球体形状信息越多; $A^T A$ 矩阵条件数越小, 拟合的误差越小, 验证了 1.1 节的理论分析结果. 理想情况下, 空间采样点在整个球面内均匀分布可以获得最佳的拟合效果. 上述分析为球面均匀分布标定法提供了重要依据.

表 1 空间点不同区域分布的球面拟合误差分析

Table 1 Spherical fitting error analysis of spatial points in different regions

分布系数 a, b	条件数 $\text{cond}(A^T A)$	位置误差 ΔP_r	半径误差 Δr
0.2	614.787 9	53.914 1	53.801 8
0.4	135.264 1	0.187 9	0.108 8
0.6	112.448 5	0.111 1	0.047 5
0.8	73.595 1	0.081 0	0.027 5
1.0	55.638 1	0.080 7	0.023 7

2 基于球面均匀分布的标定方法

基于球面姿态均匀分布的焊接机器人 TCP 标定方法以“六点法”为基础, 主要包括 5 个基本步骤, 下面将详述方法的原理与具体实现过程.

2.1 初始标定

选取固定参考点 P_r , 采用一般工业机器人自带的“六点法”进行初步标定, 将该结果作为 TCP 的初始值, 其中 TCP 位置记为 P_m^0 , 姿态矩阵记为 R_m^0 .

2.2 初始测量点位形创建

用焊枪末端近似垂直的姿态使 TCP 点与固定参考点重合并作为初始测量点位形, 如图 2 所示. 此时的机器人第六轴末端位置记为 P_0 , 姿态矩阵记为 R_0 , 均可由示教器得到. 根据 TCP 初始标定可计算得到机器人重定位到固定参考点的近似位

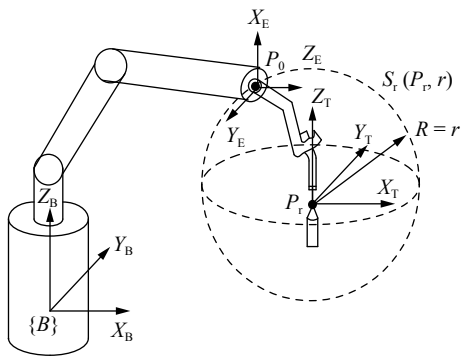


图 2 初始测量点位形示意图

Fig. 2 Schematic of initial measurement point configuration

姿, 固定参考点位置为 $P_r = P_0 + R_m^0 \cdot P_m^0$, 姿态矩阵为 $R_r = R_0 \cdot R_m^0$. 上述 P_r, R_r, P_0, R_0 4 个变量数据即为初始测量点位形的关键数据, 为后续计算提供基准.

2.3 构建球面均匀分布的虚拟点

以参考点 P_r 为球心, 以 $P_r P_0$ 的长度 r 为半径构建虚拟球面 $S_r(P_r, r)$, 在该球面上创建 n 个沿球面均匀分布的虚拟点 (即各相邻点之间均等距离, 点数 $n \geq 4$), 球面均匀虚拟点可在离线编程环境下模拟产生, 如图 3 所示.

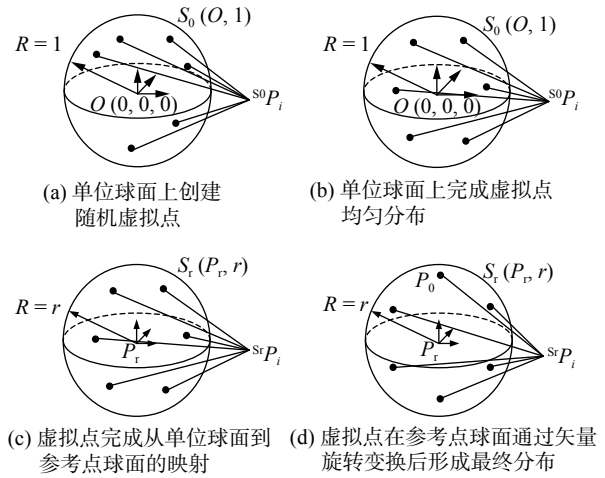


图 3 固定参考点球面均匀分布虚拟点的创建

Fig. 3 Virtual points creation with uniform distribution on the spherical surface of a fixed reference points. (a) virtual points creation randomly on the unit sphere; (b) virtual points uniform distribution on the unit sphere; (c) virtual points mapping from the unit sphere to the reference sphere; (d) virtual points final distribution on the reference sphere formed by vector rotation transformation.

2.3.1 单位球面上创建随机虚拟点

以原点 $O(0,0,0)$ 为球心的单位球面上 $S_0(O, 1)$, 产生随机分布的 n 点作为初始状态, 虚拟点 $P_i (i = 1 \sim n)$ 的坐标采用球面坐标公式 (8) 进行计算. 这里 P_i 应完整表述为 ${}^{S_0}P_i$, 左上标 S_0 表示其在单位球面上. 由于步骤 2.3.1 和 2.3.2 中涉及的相关变量均在单位球面内计算, 对应的变量符号众多, 为简化书写, 这里统一省略了 S_0 . 为了表示当前值为初始状态, 在其坐标符号中加上标 0, 记为 $P_i^0 (i = 1 \sim n)$.

2.3.2 单位球面上完成虚拟点均匀分布

根据球面随机分布的正电荷可以在相互斥力作用下形成均匀分布的原理, 衍生出力学斥力迭代法, 逐次更新虚拟点 $P_i (i = 1 \sim n)$ 的坐标, 最终使各点

沿单位球面均匀分布. 计算方法如下.

下列各变量的右上标 k 表示该变量的第 k 次迭代值, k 从 0 开始, 表示初始状态.

$$(1) \text{ 计算任意两点之间的矢量差 } \mathbf{r}_{ij}^k$$

$$\mathbf{r}_{ij}^k = \mathbf{P}_i^k - \mathbf{P}_j^k \quad (i = 1 \sim n, j = 1 \sim n, \text{且} i \neq j) \quad (10)$$

$$(2) \text{ 计算任意两点之间的距离 } L_{ij}^k$$

$$L_{ij}^k = \|\mathbf{r}_{ij}^k\| \quad (i = 1 \sim n, j = 1 \sim n, \text{且} i \neq j) \quad (11)$$

(3) 计算相对于任意一点 \mathbf{P}_i^k , 该点与其它点之间的斥力之和 \mathbf{F}_i^k 为

$$\mathbf{F}_i^k = \sum_{j=1}^n \frac{\mathbf{r}_{ij}^k}{(L_{ij}^k)^3} \quad (i = 1 \sim n, \text{且} j \neq i) \quad (12)$$

(4) 计算合力的径向分量 \mathbf{F}_{ir}^k 和切向分量 \mathbf{F}_{iv}^k 为

$$\mathbf{F}_{ir}^k = \mathbf{F}_i^k \cdot \mathbf{r}_i^k, \mathbf{F}_{iv}^k = \mathbf{F}_i^k - \mathbf{F}_{ir}^k, \mathbf{r}_i^k = \mathbf{P}_i^k - \mathbf{O} \quad (13)$$

式中: \mathbf{r}_i^k 表示各虚拟点相对于球心的径向矢量.

(5) 计算虚拟点 \mathbf{P}_i^k 的更新移动速度 \mathbf{V}_i^{k+1} 为

$$\mathbf{V}_i^{k+1} = \mathbf{V}_i^k + \mathbf{G} \cdot \mathbf{F}_{iv}^k \quad (i = 1 \sim n) \quad (14)$$

式中: \mathbf{G} 为斥力常数, 更新速度的初值可设为 $\mathbf{V}_i^0 = \mathbf{0}$.

(6) 计算更新后的虚拟点坐标 \mathbf{P}_i^{k+1} 为

$$\mathbf{P}_i^{k+1} = \mathbf{P}_i^k + \mathbf{V}_i^{k+1}, \mathbf{P}_i^{k+1} = \mathbf{P}_i^{k+1} / \|\mathbf{P}_i^{k+1}\| \quad (15)$$

$\mathbf{P}_i^{k+1} (i = 1 \sim n)$ 经过更新后可满足仍在单位球面上.

(7) 结束迭代条件判定: 当各点更新速度的最

$$\text{Rot}_{01} = \begin{bmatrix} n_x^2(1 - c\theta) + c\theta & n_x n_y(1 - c\theta) + n_z s\theta & n_x n_z(1 - c\theta) - n_y s\theta \\ n_x n_y(1 - c\theta) - n_z s\theta & n_y^2(1 - c\theta) + c\theta & n_y n_z(1 - c\theta) + n_x s\theta \\ n_x n_z(1 - c\theta) + n_y s\theta & n_y n_z(1 - c\theta) - n_x s\theta & n_z^2(1 - c\theta) + c\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $c\theta, s\theta$ 分别表示 $\cos(\theta)$ 和 $\sin(\theta)$. 由此可见矢量旋转矩阵 Rot_{01} 是 $(\text{Sr} \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_0, \mathbf{P}_r)$ 的函数. 根据上述方法构建矢量旋转矩阵求解的自定义函数 CalTwoVecRotMtx, 使得

$$\text{Rot}_{01} = \text{CalTwoVecRotMtx}(\text{Sr} \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_0, \mathbf{P}_r) \quad (18)$$

(2) 转换更新虚拟点 $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 的位置: $\mathbf{P}_i = \text{Rot} \cdot \text{Sr} \mathbf{P}_i \quad (i = 1 \sim n)$. 等式左边的 $\mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 是最终得到的满足 $S_r(\mathbf{P}_r, r)$ 球面均匀分布, 同时 \mathbf{P}_1 与初始测量点 \mathbf{P}_0 重合条件的虚拟点序列, 至此虚拟点创建完成, 由于后续计算中的 $\mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 已明确在 $S_r(\mathbf{P}_r, r)$ 球面上, 故至此可省略上标 Sr.

2.4 创建并筛选理想测量点位形

创建机器人理想测量点位形需满足如下两个条件: ① 机器人第六轴末端法兰盘中心处于各虚拟

大值满足 $\max_{i=1}^n \|\mathbf{V}_i^{k+1}\| < e$ 时, 结束迭代, 否则返回步骤 (1) 继续下一次迭代, 其中 e 为更新速度阈值常数.

经过上述步骤得到的 $\mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 已近似均匀分布, 其近似度取决于式 (7) 中阈值 $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 的取值大小, 为进行下一步的映射变换, 后续记为 $^{S0} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$, 前述已做说明.

2.3.3 完成从单位球面到参考点球面的映射

将上述单位球面 $S_0(O, 1)$ 均布的虚拟点 $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 映射到以参考点 $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 为球心的球面 $S_r(\mathbf{P}_r, r)$ 上的点 $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$. 即

$$\text{Sr} \mathbf{P}_i = \mathbf{P}_r + r \cdot ^{S0} \mathbf{P}_i \quad (i = 1 \sim n) \quad (16)$$

2.3.4 在参考点球面上形成最终分布

经过步骤 2.3.3 后, $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 已经形成了虚拟点的均匀分布, 但由于 $^{S0} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 产生之初的分布是随机的, 因此, 映射后得到的 $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 并不包含 \mathbf{P}_0 . 由于初始测量点位形同时具备姿态数据 R_0 (或 E_0), 为后续计算提供了姿态计算基准, 为此, 需要通过转换使 $\text{Sr} \mathbf{P}_1$ 与 \mathbf{P}_0 重合, $\text{Sr} \mathbf{P}_i (i = 2 \sim n)$ 随之转换以保持均匀分布. 方法如下.

(1) 创建矢量旋转矩阵 Rot_{01} . 首先构建转换前矢量: $\mathbf{V}_{\text{bef}} = (\text{Sr} \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_r) / \|\text{Sr} \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_r\|$, 转换后矢量: $\mathbf{V}_{\text{aft}} = (\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_r) / \|\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_r\|$. 由此得到旋转轴矢量 $\mathbf{n} = \text{cross}(\mathbf{V}_{\text{bef}}, \mathbf{V}_{\text{aft}})$, 记 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$, 旋转角 $\theta = \arccos(\mathbf{V}_{\text{bef}} \cdot \mathbf{V}_{\text{aft}})$, 则旋转矩阵 Rot_{01} 可由 Goldman 公式计算如下.

点 $\mathbf{P}_i (i = 1 \sim n)$ 处; ② 同时机器人末端工具 TCP 点 $\mathbf{P}_m (i = 1 \sim n)$ 与固定参考点 \mathbf{P}_r 重合 ($\mathbf{P}_i \mathbf{P}_m (i = 1 \sim n)$ 连线通过 \mathbf{P}_r), 如图 4 所示.

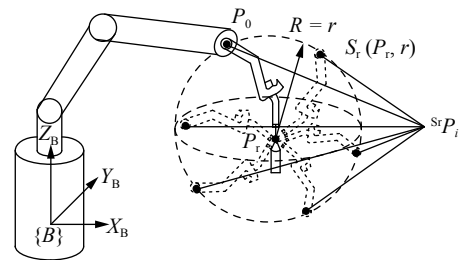


图 4 创建各理想测量点位形示意图

Fig. 4 Schematic of ideal measurement point configuration

2.4.1 计算各理想测量点位形对应的机器人关节角

(1) 确定各理想测量点位形对应的机器人第六

轴末端位姿矩阵 ${}^0T_{6i}(i=1\sim n)$, 包括位置坐标 n 和姿态矩阵 ${}^0R_{6i}(i=1\sim n)$. 由于第六轴末端位置位于虚拟点处, 因此 ${}^0P_{6i}=P_i$ ($i=1\sim n$)满足条件①. 第六轴末端姿态矩阵可由初始测量点姿态矩阵 R_0 通过旋转变换得到. 旋转矩阵 Rot_{1i} 的计算与 Rot_{01} 相同, 即

$$Rot_{1i} = \text{CalTwoVecRotMtx}(P_i, P_1, P_r)(i=1\sim n) \quad (19)$$

因此, ${}^0R_{6i} = Rot_{1i} \cdot R_0$ ($i=1\sim n$). 由于旋转前后的 $P_i P_r(i=1\sim n)$ 和 $P_1 P_r$ 两矢量以 P_r 为旋转原点, 同时初始测量点 TCP 与 P_r 重合. 因此, 满足条件②. 最终, 基于上述条件得到位姿矩阵.

(2) 利用运动学逆解方法^[12]解出位姿矩阵对应的机器关节角 $q_i(i=1\sim n)$.

2.4.2 筛选理想测量点位形

按步骤 2.4.1 得到的 n 组机器人关节角 $q_i(i=1\sim n)$, 在离线编程仿真软件中逐组调节虚拟机器人到对应理想测量点位形, 剔除其中关节角超限、连杆之间发生碰撞的位形组, 剩下的 N 组为可实施的理想测量点位形, 要求 $N \geq 4$. 重新调整编组后, 其对应的机器人关节角记为 $q_i(i=1\sim N)$.

2.5 调节机器人实际测量点位形并标定

2.5.1 调节机器人实际测量点位形

按步骤 2.4.2 的 N 组机器人关节角, 逐组调节实际机器人到各理想测量点位形, 由于步骤 2.4 的计算是依据初始标定“六点法”结果得出的, 其存在固有误差, 因此, 各理想测量点位形的机器人末端工具 TCP 并不与固定参考点 P_r 重合, 但已十分接近, 因此, 通过机器人线性运动, 在不改变机器人 TCP 姿态的情况下, 微调机器人 TCP 使其与 P_r 重合, 每次理想测量点修正后的位形称为实际测量点位形. 由示教器读出并记录每次实际测量点位形对应的数据. 其中, 修正后关节角仍记为 $q_i(i=1\sim N)$, 修正后的第六轴末端位姿仍记为 ${}^0P_{6i}$ 和 ${}^0R_{6i}(i=1\sim N)$, 位姿数据也可通过运动学正解计算得到.

2.5.2 计算最终标定结果

对步骤 2.5.1 得到的 x 组第六轴末端位置 ${}^0P_{6i}(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1\sim N$)进行最小二乘球面拟合, 拟合得到的球心坐标 $O_0(x_0, y_0, z_0)$ 即为最终标定的固定参考点坐标, 仍记为 P_r . 拟合球半径记为 r_0 .

根据式 (1) 和式 (2) 得到最终的 TCP 位置标定结果. TCP 标定的重点是位置标定, 对于姿态标定, 由于同一工具的姿态可有多种选择模式, 没有唯一性, 仍可沿用“六点法”中的姿态标定法, 不再赘述.

3 试验验证

3.1 标定试验

采用末端固定焊枪的 ABB1410 六自由度工业机器人进行试验验证, 如图 5 所示.

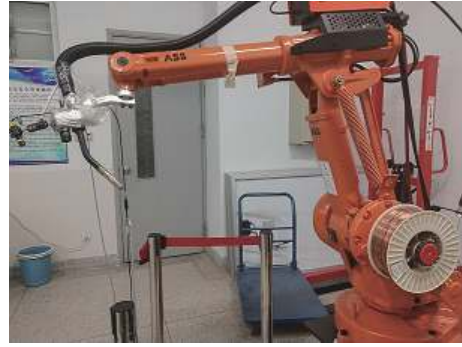


图 5 机器人焊枪工具 TCP 标定

Fig. 5 TCP calibration of robot welding torch

采用机器人示教器自带的“六点法”标定得到初始的 TCP 位姿坐标为: $P_m^0 = (-1.84, 2.55, 324.08)$, $E_m^0 = (179.82, 44.97, 0.18)$.

以焊枪近似垂直的姿态接触参考点作为首个测量点, 记录机器人第六轴末端法兰中心位姿坐标: $P_0 = (845.94, 36.33, 929.00)$, $E_0 = (172.16, 5.69, 178.81)$ 结合初始 TCP 位姿坐标计算得到初步标定的固定参考点坐标为: $P_r = (1\ 078.13, 13.74, 704.03)$.

构建以固定参考点 P_r 为球心, 半径为 $P_r P_0$ 的球面均匀分布的虚拟点. 设虚拟点数 $n=20$, 采用力学斥力迭代法得到虚拟点 $P_i(i=1\sim n)$ 的坐标, 根据虚拟点坐标创建理想测量点位形, 在离线编程仿真软件中逐组设置虚拟机器人到对应理想测量点位形, 剔除其中关节角超限、连杆之间发生碰撞的位形组, 创建及筛选过程如图 6 所示.

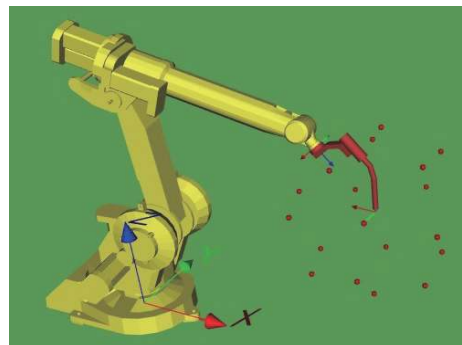


图 6 离线编程创建并筛选理想测量点位形

Fig. 6 Creating and selecting ideal measuring points by off-line programming

经筛选后共得到 8 个可供调节的机器人实际测量点位形. 经过机器人示教调试, 8 个实际测量点位形对应的机器人第六轴末端位姿数据可从机器人示教器上读出, 如表 2 所示.

表 2 8 个实际测量点位形的机器人末端位姿数据
Table 2 Robot end position and pose data of eight actual measurement points

位形组	末端坐标系原点位置坐标(mm)			末端坐标系姿态 ZYX欧拉角 $\theta/(^{\circ})$		
	x	y	z	α	β	γ
P_1	845.94	36.33	929.00	172.16	5.69	178.81
P_2	844.32	-203.71	754.63	151.85	63.13	111.52
P_3	1156.84	-273.80	837.78	-160.67	8.48	114.83
P_4	892.07	264.87	626.98	-100.54	71.36	-45.25
P_5	967.25	272.23	861.60	170.38	43.32	-132.83
P_6	994.18	-169.04	959.54	-177.80	19.47	146.93
P_7	918.90	-205.95	524.97	70.66	55.97	14.60
P_8	1080.09	90.62	1020.30	167.39	2.66	-166.33

根据表 2 实际机器人测量位形数据拟合得到固定参考点坐标为: $P_r = [1\ 080.60\ 12.20\ 704.55]$. 进一步根据公式 (2) 得到试验最终的工具 TCP 位置标定结果为: $P_m = [-3.73\ 1.10\ 324.67]$.

3.2 方法的精度和稳定性分析

为检验方法的精度和稳定性, 首先按 3.1 节方式做 10 组试验, 然后按任意选择姿态的方式再做 10 组试验, 分别作为姿态均匀 (1 ~ 10 组) 和非均匀分布标定 (11 ~ 20 组) 的测试样本. 由于姿态均匀分布标定时每组筛选得到的测量点位形数不完全相同, 为便于比较, 每组标定试验取 7 ~ 9 个测量点位形; 而非均匀分布每组均取 8 个测量点, 并按 2.5.1 节方法进行标定计算, 在姿态选择时也尽可能使姿态差异较大, 避免出现明显集中的极端情况. 上述 20 组试验的 TCP 位置标定结果如表 3 所示.

表 3 TCP 位置标定试验结果
Table 3 Experimental results of TCP position calibration

序号	均匀分布组(1 ~ 10组)TCP位置标定 P_m 值(mm)			非均匀分布组(11 ~ 20组)TCP位置标定 P_m 值(mm)		
	P_{mx}	P_{my}	P_{mz}	P_{mx}	P_{my}	P_{mz}
1	-3.63	0.94	325.77	-3.77	0.09	326.07
2	-3.77	1.33	324.71	-4.68	1.87	324.25
3	-3.44	1.54	325.01	-5.60	-0.73	324.32
4	-3.81	1.23	325.26	-4.93	1.53	324.37
5	-3.73	1.10	324.67	-4.78	-0.74	326.46
6	-3.69	1.12	325.36	-2.31	0.21	325.17
7	-3.78	1.10	325.89	-4.12	2.30	326.76
8	-3.47	1.46	325.80	-5.98	0.98	324.73
9	-3.78	1.35	324.80	-4.75	-0.04	324.68
10	-3.91	1.34	324.72	-3.80	1.45	324.46

3.2.1 方法精度分析

为检验方法的精确性, 首先取每组试验中各个测量点计算得到的 P_m 值相对于每组试验平均 P_m 值 (即表 3 中的标定结果) 之间的绝对偏差 $|\Delta P_m|$, $|\Delta P_m|$ 各轴向分量变化曲线如图 7a 所示. 并可计算得到均匀分布组平均偏差 $E_e(|\Delta P_m|)$ 和非均匀分布组

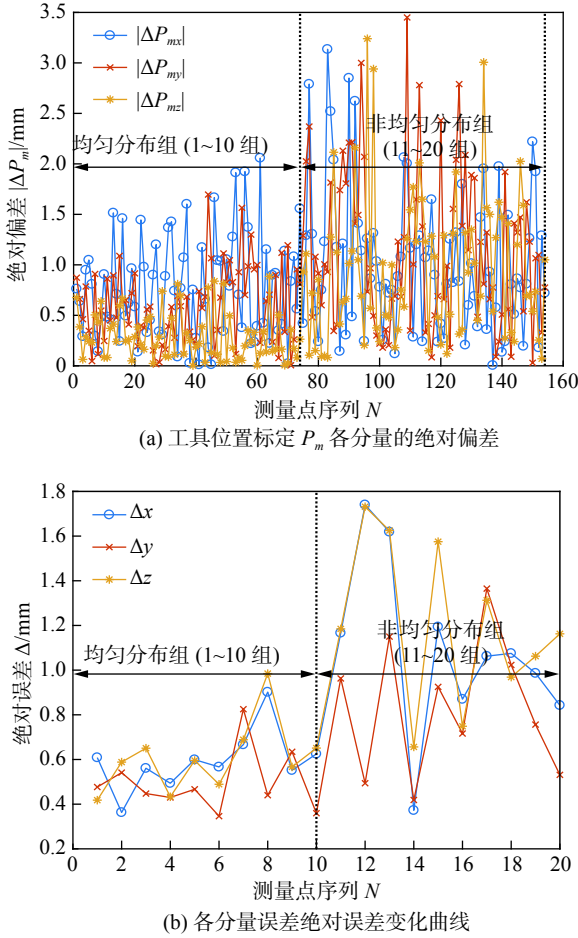


图 7 标定结果精度分析

Fig. 7 Accuracy analysis of calibration results. (a) absolute deviation of tool position calibration P_m components; (b) absolute error curve of Δ components.

平均偏差 $E_{ne}(|\Delta P_m|)$ 各轴向分量的结果 (mm) 为

$$E_e(|\Delta P_{mx}|, |\Delta P_{my}|, |\Delta P_{mz}|) = [0.771, 0.597, 0.292] \quad (20)$$

$$E_{ne}(|\Delta P_{mx}|, |\Delta P_{my}|, |\Delta P_{mz}|) = [1.204, 1.347, 1.213] \quad (21)$$

为进一步检验准确性, 将每组试验计算得到的 P_r 和 P_m 代入式 (1) 的左右两侧, 构造式 (22) 作为标定结果准确性的绝对误差计算式.

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^N |{}^0 R_{6i} P_m + P_{6i} - P_r|}{N} \quad (N \geq 4) \quad (22)$$

由式 (22) 计算结果得出各组试验 Δ 各分量误差曲线如图 7b 所示. 计算均匀分布组和非均匀分布组 Δ 误差平均期望 $E_e(\Delta)$ 和 $E_{ne}(\Delta)$ 各分量结果 (mm) 为

$$E_e(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z) = [0.594, 0.498, 0.607] \quad (23)$$

$$E_{ne}(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z) = [1.331, 1.146, 1.245] \quad (24)$$

从图 7a, 7b 显示的试验结果可以看出, 相对于非均匀分布组, 均匀分布组的平均绝对偏差 $|\Delta P_m|$ 和 P_m 误差均较小, 且最大 Δ 误差分量也不超过 1 mm, 而非均匀组 Δ 误差各分量均超过 1 mm, 最大误差试验组接近 1.5 mm, 由此验证了均匀分布组具有较好的标定精度.

3.2.2 方法稳定性分析

为分析方法的稳定性, 对表 3 中的 TCP 标定结果分别计算 10 组均匀分布试验和 10 组非均匀分布试验的平均值, 各组相对于各自平均值的绝对偏差 $|P_m - E(P_m)|$ 曲线如图 8 所示.

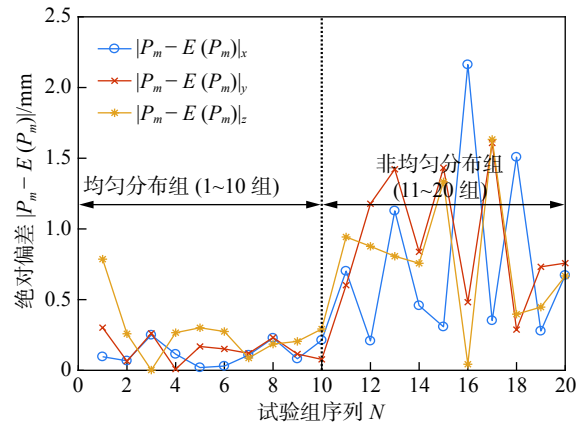


图 8 方法标定结果稳定性分析

Fig. 8 Stability analysis of calibration results of this method

进一步计算出均匀分布组和均方差 $D_e(P_m)$ 和 $D_{ne}(P_m)$, 结果为

$$D_e(P_{mx}, P_{my}, P_{mz}) = [0.1436, 0.1739, 0.3303] \quad (25)$$

$$D_{ne}(P_{mx}, P_{my}, P_{mz}) = [0.9856, 1.0265, 0.9017] \quad (26)$$

由图 8 及相应均方差的计算结果可见, 均匀分布组各组试验结果的均方差远小于非均匀试验组, 未出现各组试验结果偏差很大的情况, 验证了均匀分布试验具有很高的稳定性.

4 结论

(1) 借鉴力学斥力迭代的基本原理, 提出了一种基于球面均匀分布的焊接机器人 TCP 固定参考点标定方法.

(2) 解决了固定参考点法标定时机器人位姿选择的随机性和分布不均匀性的问题, 使机器人位姿在各测量点绕固定参考点均匀分布, 最大限度增大了各测量点之间机器人位姿的差异度, 有效提高了

标定精度和稳定性。

(3) 通过离线编程仿真有效地筛选出可用于实际操作测量点位形, 避免了不必要的操作时间, 提高了工作效率。

参考文献

- [1] Hong Y X, Du D, Pan J L, *et al.* Seam-tracking based on dynamic trajectory planning for a mobile welding robot[J]. *China Welding*, 2019, 28(4): 46 – 50.
- [2] 余卓骅, 胡艳梅, 何银水. 薄板机器人自动焊接焊枪三维偏差的有效提取 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(11): 49 – 53.
Yu Zhuohua, Hu Yanmei, He Yinshui. Effective three-dimensional deviation extraction of the welding torch for robotic arc welding with steel sheets[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(11): 49 – 53.
- [3] Deniz C, Cakir M. High precise and zero-cost solution for fully automatic industrial robot TCP calibration[J]. *Industrial Robot: An Industrial Journal*, 2019, 46(5): 650 – 659.
- [4] Ruther M, Lenz M, Bischof H. The narcissistic robot: robot calibration using a mirror[C]//11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision. IEEE, 2010: 169-174.
- [5] Gordic Z, Ongaro C. Calibration of robot tool centre point using camera-based system[J]. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2016, 13(1): 9 – 20.
- [6] Cai Y, Gu H, Li C. Easy industrial robot cell coordinates calibration with touch panel[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50: 276 – 285.
- [7] Borrmann C, Wollnack J. Enhanced calibration of robot tool centre point using analytical algorithm[J]. *International Journal of Materials Science and Engineering*, 2015, 3(1): 12 – 18.
- [8] 张华君, 夏超, 叶永龙. Staubli 激光切割机器人工具标定 [J]. *轻工机械*, 2013, 31(2): 7 – 11.
Zhang Huajun, Xia Chao, Ye Yonglong. Tool calibration of staubli laser cutting robot[J]. *Light Industry Machinery*, 2013, 31(2): 7 – 11.
- [9] 侯仰强, 王天琪, 李亮玉, 等. 基于双机器人协调焊接标定算法 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(2): 92 – 96.
Hou Yangqiang, Wang Tianqi, Li Liangyu, *et al.* Study of calibration algorithm based on dual-robot coordinate welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(2): 92 – 96.
- [10] 李福运. 工业机器人 TCP 自标定精度叠加方法的设计与应用 [J]. *机械*, 2017, 44(8): 50 – 53.
Li Fuyun. The designation and application of TCP self-calibration precision superposition method on industrialrobot[J]. *Machinery*, 2017, 44(8): 50 – 53.
- [11] 朱晓鹏, 张轲, 涂志强, 等. 基于球面拟合法的机器人与变位机位姿关系标定 [J]. *焊接学报*, 2013, 34(1): 41 – 44.
Zhu Xiaopeng, Zhang Ke, Tu Zhiqiang, *et al.* Calibration of relative position and orientation between robot and positioner based on spheres fitting method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(1): 41 – 44.
- [12] 陈庆诚, 朱世强, 王宣银. 基于旋量理论的串联机器人逆解问题求解算法 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(1): 8 – 14.
Chen Qingcheng, Zhu Shiqiang, Wang Xuanyin. Inverse kinematics sub-problem solution algorithm for serial robot based on screw theory[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2014, 48(1): 8 – 14.

第一作者简介: 洪磊, 1982 年出生, 博士, 副教授; 主要从事机器人焊接自动化技术及应用方面的科研和教学工作; 发表论文 20 余篇; Email: njithl@163.com.

(编辑: 王星星)

[上接第 9 页]

- [10] 勾健, 王志江, 胡绳荪, 等. CMT+P 过程及后热处理对 TC4 钛合金增材构件组织和性能影响 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(12): 31 – 35.
Gou Jian, Wang Zhijiang, Hu Shengsun, *et al.* Effects of CMT+P process and post heat treatment on microstructure and properties of TC4 component by additive manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(12): 31 – 35.
- [11] 冯英超, 刘金平, 王世杰, 等. 固溶处理对 Inconel 625 合金电弧

增材组织的影响 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(6): 81 – 85.

Feng Yingcao, Liu Jinping, Wang Shijie, *et al.* Effect of solution treatment on the microstructure of Inconel 625 alloy fabricated by arc additive manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(6): 81 – 85.

第一作者简介: 杨东青, 1990 年出生, 博士, 讲师; 主要从事电弧增材方面的研究工作; 已发表文章 10 余篇; Email: yangdq@njust.edu.cn.

(编辑: 杨婉春)