基于旋量理论及距离误差的机械臂标定新方法

谭月胜 孙汉旭 贾庆轩

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (北京邮电大学 自动化学院,北京 100876)

邵志宇

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 为提高机械臂的定位及定姿精度,必须对其进行标定. 标定能否达到预期目的,主要取决于所采用的运动学模型及消除参数识别过程中外来误差的影响. 分析了基于不同运动学模型时机械臂的初始位姿误差对标定结果的影响. 提出了一种结合旋量理论与距离模型的标定用数学模型. 该模型考虑了机械臂初始位姿误差对标定的影响,解决了用 D-H 参数建模存在的弊端,同时能消除因机械臂坐标系统与测量设备坐标系统之间转换所带来的误差,克服了测量技术上的困难. 仿真计算验证了这种新标定数学模型的可行性.

关 键 词: 机械臂; 运动学标定; 螺旋理论; 距离误差; 数学模型; 误差分析

中图分类号: TP 24

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1104-05

New manipulator calibration method based on screw theory and distance error

Tan Yuesheng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Sun Hanxu Jia Qingxuan

(Automation School, Beijing University of Post and Telecommunication Beijing 100876, China)

Shao Zhiyu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Accuracy of a manipulator is determined by its ability to position and orient its end-effector at the desired point in its workspace. It must be calibrated in order to improve its position accuracy. Kinematic model and the disturbance of exterior error are critical to the manipulator calibration. The effect of the manipulators' initial orientation error on calibration was analyzed with different kinematic model. A new mathematical model for manipulator calibration, which makes use of screw theory and distance error model, rather than conventional Denavit-Hartenberg(D-H) parameters and position error, was proposed. Based on the new model, the initial orientation errors of the manipulator were included thereinto. The nature drawbacks of D-H parameters in which small errors in the actual structure do not result in small changes in the kinematic parameters were avoided. The error resulting from the transformation between a measurement device frame system and a manipulator frame system was eliminated, and the difficulty in measurement technology could be overcome. Simulation was made to verify the correctness of the model.

Key words: manipulator; kinematic calibration; screw theory; distance error; mathematical models; error analysis

收稿日期: 2005-11-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 资助项目(2005AA742050)

作者简介: 谭月胜(1971-),男,湖北利川人,博士生, tanyuesheng@sohu.com.

选择合适的运动学模型是确定机械臂绝对定位精度的极为重要的因素. 研究表明,机械臂定位精度误差中的 95% 是由所建运动模型的不准确引起的[1]. 一个有效的标定模型必须满足 3 个原则[2]:完备性、比例性和连续性. 先前有关机械臂标定的文献主要利用 D-H(Denavit-Hartenberg)参数法或者修正后的 MD-H(Modified Denavit-Hartenberg)参数法来进行建模[3-4]. 不过 D-H 参数法存在根本的缺陷,即所有的运动都是关于 x 和 z 轴的,无法表示关于 y 轴的运动[5]. 许多学者对 D-H 参数法进行了改进或者提出了新的模型,这些模型分别包括 4 个参数、5 个参数、6 个参数或者更多参数,但它们存在和 D-H 法类似的问题[3],因此有必要利用另一种方法建立运动学模型. 同时在对机械臂进行标定的过程中,如果采用常规方法来测定机械臂的绝对位置误差与角度误差,必然存在其它坐标系(如测量系统坐标系)与机械臂坐标系之间的坐标变换,从而会引入误差,这种误差常足以使常规的补偿策略失效[6]. 空间中的两点(此处对应于机械臂末端执行器在空间中的两个不同位置)虽然在不同坐标系中的坐标不同,但这两点在不同坐标系中的距离却一定相同,因此本文采用距离误差模型来研究标定问题,这样可以避免其它坐标系(如测量系统坐标系)与机械臂坐标系间的坐标变换,从而克服了测量技术上的困难,并可使原测量系统的测量精度得到充分利用.

本文以一模块化空间机械臂为研究对象,采用旋量理论与距离误差模型建立了运动学标定模型.

1 用旋量理论建立标定用运动学模型

如图 1 所示,两相邻关节 $i-1$ 与关节 i 的轴 $i-1$ 与轴 i 平行时公法线 a_{i-1} 不唯一,此时假定连杆的偏置 $d_i=0$. 但实际上不可能存在理想平行的关节轴线,在两轴线稍微偏离理想平行位置时,其公法线落在原假定位置很远位置处,也就是说真实结构的微小变化将会导致运动学参数发生巨变. 在图 1 中具体表现为当轴 $i-1$ 与轴 i 稍偏离平行位置时,公法线 a_{i-1} 将离关节很远,导致 d_i 变得很大. 因此在进行微分时不能忽略高阶项,从而增加了数值计算的难度. 从下面的分析可看到,利用旋量理论中的运动旋量来建立标定的运动学模型可解决该问题.

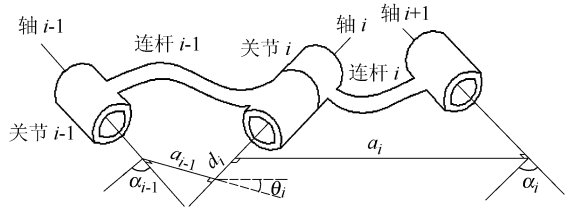

图 1　两连杆的 D-H 参数描述图

1.1　运动学模型建立

若机械臂末端执行器的自由度为 6,其姿态用欧拉角(φ,θ,ψ)表示,则其位姿可用向量 $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_6]^{\mathrm{T}}=[r_x,r_y,r_z,\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3]^{\mathrm{T}}$ 表示,其中 r_x,r_y,r_z 为末端执行器的位置广义坐标,记为 $\boldsymbol{r}=[r_x,r_y,r_z]^{\mathrm{T}}$;$\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3$ 为末端执行器的广义姿态坐标,记为 $\boldsymbol{\phi}=[\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3]=[\varphi,\theta,\psi]$.

利用运动旋量得到具有 n 个自由度任意开链机械臂的运动学正解公式[7]:

$$\boldsymbol{g}_{\mathrm{st}}(\theta)=\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_2\theta_2}\cdots\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_n\theta_n}\boldsymbol{g}_{\mathrm{st}}(0)=$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}(\theta) & \boldsymbol{p}(\theta)\\ 0 & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}n_x & o_x & a_x & p_x\\ n_y & o_y & a_y & p_y\\ n_z & o_z & a_z & p_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

其中,$\hat{\boldsymbol{\xi}}_k\in se(3)$ 为与运动旋量坐标 $\boldsymbol{\xi}_k=(\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})\in\mathbf{R}^6$ 对应的旋量;θ_k 为第 k 个关节的转角;$\boldsymbol{g}_{\mathrm{st}}(0)$ 为各关节转角/位移为 0 时,与末端执行器固联的工具坐标系在基坐标系中的位形.

任意的刚体运动均可以通过绕一轴的转动加上平行于该轴的移动实现,运动旋量坐标有 6 个参数,将这 6 个参数作为结构参数,θ_k 为运动变量. 因此第 k 个关节存在的结构误差可表示为 $\Delta q_{k1},\Delta q_{k2},\Delta q_{k3},\Delta\omega_{k1},\Delta\omega_{k2},\Delta\omega_{k3}$. 其中,$\boldsymbol{\omega}_k\in\mathbf{R}^3$ 为确定旋转轴方向的单位矢量;$\boldsymbol{q}_k\in\mathbf{R}^3$ 为旋转轴上一点,本文中各旋转轴分别为 6 个关节的旋转轴.

因此机械臂末端执行器的位姿误差可分别近似表示如下:

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{r}\approx&\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\theta_k}\right)\Delta\theta_k+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial q_{k1}}\right)\Delta q_{k1}+\\&\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial q_{k2}}\right)\Delta q_{k2}+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial q_{k3}}\right)\Delta q_{k3}+\\&\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\omega_{k1}}\right)\Delta\omega_{k1}+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\omega_{k2}}\right)\Delta\omega_{k2}+\\&\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\omega_{k3}}\right)\Delta\omega_{k3}\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{\phi}\approx&\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\phi}}{\partial\theta_k}\right)\Delta\theta_k+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\phi}}{\partial q_{i1}}\right)\Delta q_{k1}+\\&\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\phi}}{\partial q_{k2}}\right)\Delta q_{k2}+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\phi}}{\partial q_{k3}}\right)\Delta q_{k3}+\end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial \boldsymbol{\omega}_{k1}}\right)\Delta\omega_{k1}+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial \boldsymbol{\omega}_{k2}}\right)\Delta\omega_{k2}+\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial \boldsymbol{\omega}_{k3}}\right)\Delta\omega_{k3} \tag{3}$$

利用矩阵可表达为

$$\delta \boldsymbol{X}=\boldsymbol{J}\delta \boldsymbol{L} \tag{4}$$

其中,$\delta \boldsymbol{X}$ 为机械臂末端执行器实际位姿与标称位姿间的误差值;$\boldsymbol{J}$ 为用于辨识的雅可比矩阵,其为一个 $6m\times n$ 矩阵,m 为终端执行器位姿的测量次数,n 为机械臂待辨识的未知参数的个数;$\delta \boldsymbol{L}$ 为要识别的参数,即 Δq_{k1}, Δq_{k2}, Δq_{k3}, $\Delta\omega_{k1}$, $\Delta\omega_{k2}$, $\Delta\omega_{k3}$. 利用式(4),若测量足够多的 $\Delta \boldsymbol{r}$, $\Delta \boldsymbol{\phi}$,即可计算出 $\delta \boldsymbol{L}$.

1.2 初始位置误差对两种表示方法的影响比较

图2为六自由度机械臂第1关节与第2关节处于不同初始位置时的旋量运动表示,图中已假定由于各种误差因素的影响,关节1的轴线与关节2的轴线不相交于一点. 由图1与图2可知,如果应用运动旋量坐标来建立标定运动学模型,由于各个关节的旋转轴即为旋量运动的旋转轴,而 q 为旋转轴上的一点,因此若因各种因素的影响(如装配误差的影响)而导致相邻轴线稍微偏离平行位置,q 在空间中的位置坐标只与其所在的旋转轴相关,而与另一轴无关,因而只发生微小变化,这种微小变化可通过 $\boldsymbol{\omega}_k\in\mathbf{R}^3$ 与 $\boldsymbol{q}_k\in\mathbf{R}^3$ 的微小变化充分表示出来,不会出现D-H参数表示法所存在的类似问题.

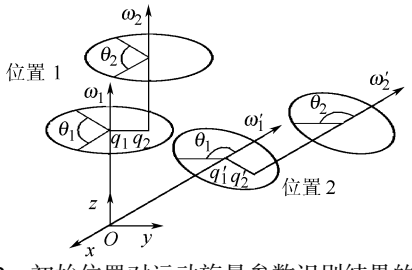

图2 初始位置对运动旋量参数识别结果的影响

从图2可知,当机械臂的初始位置(在此也称为机械臂的参考位形)为图中的位置1时,可识别出一组参数(ω_1, q_1), (ω_2, q_2);而为图中的位置2时,则得到另外一组不同的参数(ω_1', q_1'), (ω_2', q_2'). 这两组不同的参数只是确定了机械臂不同的初始位形(参考位形),即使得式(1)中的 $\boldsymbol{g}_{st}(0)$ 互不相同,此时所识别出的参数因初始位置的不同而不同,因此机械臂的初始安装位姿误差对于参数识别结果的正确性与精度并无影响.

如图3所示,两关节轴线公称平行,若其中一轴,比如轴 i(即旋转轴 ξ_i),偏离其原位置 α 角,若角度 α 很小,则两轴将在很远的地方相交,$l=a_{i-1}\cdot\cot\alpha$, $\alpha\to 0$,则 $l\to\infty$,从而导致连杆的偏置 d_i 变得很大;而若用运动旋量坐标,则轴 i 上一点 q_i 的坐标变化只与该旋转轴在空间中的位姿相关:

$$\left.\begin{aligned}\Delta x_{q_i}&=x_{q_i'}-x_{q_i}=(x_{q_i}-x_p)(1-\cos\alpha)\\ \Delta y_{q_i}&=y_{q_i'}-y_{q_i}=(x_{q_i}-x_p)(1-\sin\alpha)\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

从公式(5)可知,偏角 $\alpha\to 0$ 时,$\Delta x_{q_i}\to 0$, $\Delta y_{q_i}\to 0$, $|\Delta x_{q_i}|$ 与 $|\Delta y_{q_i}|$ 的最大值不会超过 $|x_{q_i}-x_p|$.

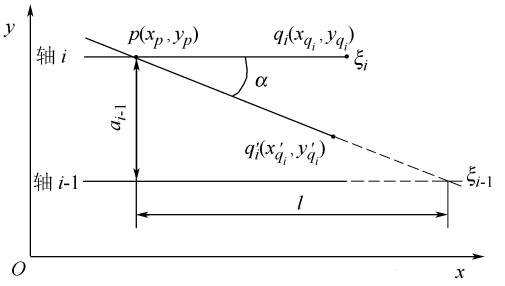

图3 机械臂相邻轴偏离标称平行位置时两种方法对比

因此可见,利用旋量理论建立标定模型时,初始位置不同,所识别出的参数值不同,但不会影响到识别精度,而用D-H参数法建立模型则不然,下面用一简单的例子加以说明.

图4为六自由度机械臂第1关节与第2关节处于不同初始位置时的D-H参数描述. D-H参数只与机械臂本身的结构有关,但从图4可以看到,机械臂的初始位置分别为位置1和位置2时,所识别出的 d_1 显然不相同.

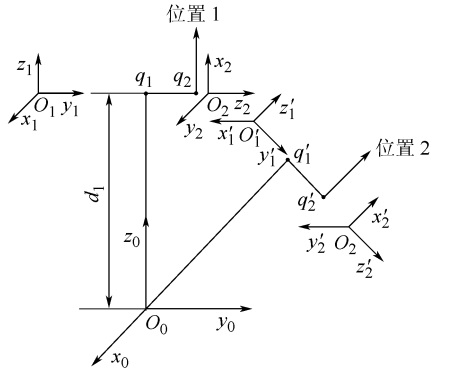

图4 初始位置对D-H参数识别结果的影响

2 距离误差模型

机械臂的距离误差意指机械臂在定位过程中,实际距离与指令距离之间的差值. 对于空间中的任意两点 i, j($i\neq j$),根据文献[6],机械臂实际轨迹与标称轨迹上两点间的距离误差表示为

$$\Delta l(i,j)=\left[\frac{x_r(j)-x_r(i)}{l_r(i,j)},\frac{y_r(j)-y_r(i)}{l_r(i,j)},\frac{z_r(j)-z_r(i)}{l_r(i,j)}\right]\cdot\begin{bmatrix}\Delta x_r(j)-\Delta x_r(i)\\ \Delta y_r(j)-\Delta y_r(i)\\ \Delta z_r(j)-\Delta z_r(i)\end{bmatrix}\tag{6}$$

其中,$\{x_r,y_r,z_r\}$为机械臂基础坐标系中的指令位置坐标;$l_r(i,j)$为 $i,j(i\neq j)$两点间的指令距离;$\Delta l(i,j)$为 $i,j(i\neq j)$两点间的距离误差,它等于指令距离与对应的实测距离之差;$\Delta x_r(j)$,$\Delta y_r(j)$,$\Delta z_r(j)$,$\Delta x_r(i)$,$\Delta y_r(i)$,$\Delta z_r(i)$分别为指令轨迹上 i,j 点与实际轨迹上对应点的坐标分量误差,即公式(2)中的 $\Delta\boldsymbol{r}(\Delta r_x,\Delta r_y,\Delta r_z,)$;$\Delta\boldsymbol{p}$ 为机械臂的结构参数误差,若用运动旋量表示,则为 $(\Delta q_{k1},\Delta q_{k2},\Delta q_{k3},\Delta v_{k1},\Delta v_{k2},\Delta v_{k3})$,但为了便于计算,此处用$(\Delta q_{k1},\Delta q_{k2},\Delta q_{k3},\Delta\omega_{k1},\Delta\omega_{k2},\Delta\omega_{k3})$表示.

而在公式(6)中

$$\begin{bmatrix}\Delta x_r(j)-\Delta x_r(i)\\ \Delta y_r(j)-\Delta y_r(i)\\ \Delta z_r(j)-\Delta z_r(i)\end{bmatrix}\approx \mathrm{d}(\boldsymbol{P}_j-\boldsymbol{P}_i)=\mathrm{d}\boldsymbol{P}_j-\mathrm{d}\boldsymbol{P}_i\tag{7}$$

其中,d 表示求微分;$\boldsymbol{P}_k$ 为机器人末端位置向量;$\mathrm{d}\boldsymbol{P}_k$ 为机器人位置误差向量.

由于引入了距离误差的概念,对比公式(4)与公式(6)可知,标定用运动学模型中末端执行器的误差不再是公式(4)中所示的机械臂末端执行器实际位姿与标称位姿间的误差值,而是指空间中两点指令距离与对应的实测距离之差 Δl_{ij},相应地,将参数误差映射到距离误差的转换矩阵 $\boldsymbol{J}$ 因此也不再是式(4)中的雅可比矩阵. 由式(2)、式(6)、式(7)得:

$$\begin{aligned}\Delta x_r(j)-\Delta x_r(i)=&\sum_{k=1}^{n}\left[\left(\frac{\partial r_x(j)}{\partial\theta_k}-\frac{\partial r_x(i)}{\partial\theta_k}\right)\cdot\Delta\theta_k+\right.\\&\sum_{m=1}^{3}\left(\frac{\partial r_x(j)}{\partial q_{km}}-\frac{\partial r_x(i)}{\partial q_{km}}\right)\cdot\Delta q_{km}+\\&\left.\sum_{m=1}^{3}\left(\frac{\partial r_x(j)}{\partial\boldsymbol{\omega}_{km}}-\frac{\partial r_x(i)}{\partial\boldsymbol{\omega}_{km}}\right)\cdot\Delta\boldsymbol{\omega}_{km}\right]\end{aligned}\tag{8}$$

$$\begin{aligned}\Delta y_r(j)-\Delta y_r(i)=&\sum_{k=1}^{n}\left[\left(\frac{\partial r_y(j)}{\partial\theta_k}-\frac{\partial r_y(i)}{\partial\theta_k}\right)\cdot\Delta\theta_k+\right.\\&\sum_{m=1}^{3}\left(\frac{\partial r_y(j)}{\partial q_{km}}-\frac{\partial r_y(i)}{\partial q_{km}}\right)\cdot\Delta q_{km}+\\&\left.\sum_{m=1}^{3}\left(\frac{\partial r_y(j)}{\partial\boldsymbol{\omega}_{km}}-\frac{\partial r_y(i)}{\partial\boldsymbol{\omega}_{km}}\right)\cdot\Delta\boldsymbol{\omega}_{km}\right]\end{aligned}\tag{9}$$

$$\begin{aligned}\Delta z_r(j)-\Delta z_r(i)=&\sum_{k=1}^{n}\left[\left(\frac{\partial r_z(j)}{\partial\theta_k}-\frac{\partial r_z(i)}{\partial\theta_k}\right)\cdot\Delta\theta_k+\right.\\&\sum_{m=1}^{3}\left(\frac{\partial r_z(j)}{\partial q_{km}}-\frac{\partial r_z(i)}{\partial q_{km}}\right)\cdot\Delta q_{km}+\\&\left.\sum_{m=1}^{3}\left(\frac{\partial r_z(j)}{\partial\boldsymbol{\omega}_{km}}-\frac{\partial r_z(i)}{\partial\boldsymbol{\omega}_{km}}\right)\cdot\Delta\boldsymbol{\omega}_{km}\right]\end{aligned}\tag{10}$$

将式(8)~式(10)代入式(6)中即可得到基于旋量理论与距离误差的标定模型. 在标定的过程中,每个关节的实际转角为已知量,因此需要识别的参数为(Δq_{11},Δq_{12},Δq_{13},…,Δq_{n1},Δq_{n2},Δq_{n3},$\Delta\omega_{11}$,$\Delta\omega_{12}$,$\Delta\omega_{13}$,…,$\Delta\omega_{n1}$,$\Delta\omega_{n2}$,$\Delta\omega_{n3}$),若标定对象为一六自由度的机械臂,则要识别的参数一共有 36 个,因此至少需要 36 组距离误差值才能识别出这些参数.

3　仿真实例

如图 5 所示,本文所研究的模块化机械臂具有 6 个自由度,全部为旋转关节,关节 1 与关节 2 轴线、关节 3 与关节 4 轴线相互公称垂直且相交于一点(即 q_1 与 q_2 重合,q_3 与 q_4 重合),最后 3 个关节轴线公称相交于一点. 其中 S 为基础坐标系,T 为工具坐标系,$l_0=200$ mm,$l_1=800$ mm,$l_2=650$ mm,$l_3=250$ mm.

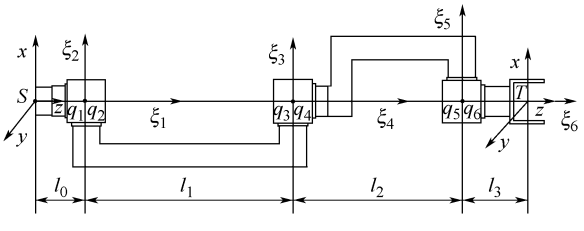

图 5　处于参考位形时的六自由度机械臂

根据这种结构特殊性,可利用 Paden-Kahan 的 3 个典型子问题[7]来进行运动学求逆.

$$\boldsymbol{\omega}_1=\boldsymbol{\omega}_4=\boldsymbol{\omega}_6=\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega}_2=\boldsymbol{\omega}_3=\boldsymbol{\omega}_5=\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}$$

取旋转轴上的点所对应的坐标矢量:

$$\boldsymbol{q}_1=\boldsymbol{q}_2=\begin{bmatrix}0\\0\\l_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\\200\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{q}_3=\boldsymbol{q}_4=\begin{bmatrix}0\\0\\l_0+l_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\\1\,000\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{q}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_0 + l_1 + l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1\,650 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{q}_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_0 + l_1 + l_2 + l_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1\,900 \end{bmatrix}$$

本仿真的目的仅在于验证本方法能否有效地识别参数,尤其是两相邻公称平行的轴稍微偏离平行位置时参数识别的有效性,故此处仅假定关节 1 与关节 2 的参数存在误差,而关节 3 ~ 关节 6 的参数无误差. 计算中发现,对于为该种构型的机械臂所建立的标定模型中,q_{13}与 q_{21}为与其它参数线性相关的参数,因此在所建立的运动学模型中将不出现这两个参数或者将其误差值定为 0. 具体误差如下:

$$\Delta q_{11} = \Delta q_{12} = \Delta q_{21} = \Delta q_{22} = 0.05$$
$$q_{13} = q_{21} = 0$$
$$\omega_{11} = \omega_{23} = 0.01$$
$$\omega_{13} = \omega_{22} = -0.000\,05$$
$$\omega_{12} = \omega_{21} = 0$$

由于要识别的参数有 12 个(不将 q_{13}与 q_{21}纳入模型中时为 10 个),因此至少需要 12 个以上的距离误差. 为验证本方法的正确性,同时为简化计算,在式(11)所表示的圆周上取 $j(j \geqslant 12)$个测量点,该圆周的圆心为(500, 0, 500),半径 r = 500 mm.

$$\left.\begin{aligned} x &= 500 + 500(1 - \cos\theta) \\ y &= 500\sin\theta x \\ z &= 500 \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

经过计算,分别得到在 $j_1, j_2, \cdots, j_{12}$及 i 处机械臂末端执行器实际位置与标称位置间的位置误差,然后根据距离误差模型,可计算出 $j_1, j_2, \cdots, j_{12}$与 i 点之间的距离误差 $\Delta l(i, j_i)(i = 1, 2, \cdots, 12)$.

根据式(8) ~ 式(11)计算所得的数据,并利用前面所建立的参数识别模型(式 4),可识别出机械臂的结构参数误差值如下(小数点后保留 6 位有效数字):

$$q_{11} = 0.049\,999$$
$$q_{12} = 0.050\,000$$
$$q_{13} = 0$$
$$q_{21} = 0$$
$$q_{21} = 0.049\,999$$
$$q_{22} = 0.049\,999$$
$$\omega_{11} = 0.01$$
$$\omega_{12} = 0$$
$$\omega_{13} = -0.000\,050$$
$$\omega_{21} = 0$$
$$\omega_{21} = -0.000\,050$$
$$\omega_{23} = 0.01$$

将识别出的参数误差值与假定值相对比,可以看到,计算误差极小,可以忽略不计.

4 结 束 语

本文针对常用标定模型中所存在的问题,分析了初始位置误差对基于 D-H 参数法、MD-H 参数法与旋量理论法误差计算的影响,将旋量理论与距离误差模型结合起来建立了机械臂标定的运动学建模,这种数学模型既克服了 D-H 参数法及 MD-H 参数所存在的根本缺陷,又克服了因测量仪器坐标系统与机器人坐标系统之间的相对位置关系无法精确确定而带来的误差影响,有利于提高机械臂标定精度.

参考文献(References)

[1] Judd R P, Knasinski. A technique to calibrate industrial robots with experimental verfication[J]. IEEE Trans. On Robotics & Automation, 1991, 6(1): 20-30

[2] Everett L J, Driels M, Mooring B W. Kinematic modelling for robot calibration[C]//Proceedings-1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1987: 183-189

[3] Ziegert J, Datseris P. Basic consideration for robot calibration [C]//Proceedings-1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1988: 932-938

[4] Alici G, Shirinzadeh B. Laser interferometry based robot position error modelling for kinematic calibration[C]//IEEE Int Conf Intell Rob Syst. New York: IEEE, 2003, 4: 3588-3593

[5] Hayati S A. Robot arm geometric link parameter estimation [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control Including The Symposium on Adaptive Processes 22nd. New York: IEEE, 1983, 3: 1477-1483

[6] 周学才,张启先,郑时雄. 一种新的机器人机构距离误差模型及补偿算法[J]. 机器人,1991,13(1):44-49
Zhou Xuecai, Zhang Qixian, Zheng Shixiong. A new model with conpensation algorithm for distance errors of robot mechanisms [J]. Robot, 1991, 13(1): 44-49(in Chinese)

[7] Murray R M, Li Z X, Sastry S S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994

(责任编辑:文丽芳)