

# 基于轴线法与卡尔曼滤波的 Baxter 机器人标定<sup>\*</sup>

陈勋漫<sup>1,2</sup>, 黄沿江<sup>1,2</sup>, 张宪民<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学广东省精密装备与制造技术重点实验室 广州, 510641)

(2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

**摘要** 为提高 Baxter 机器人的绝对定位精度, 首先根据机器人操作系统(robot operating system, 简称 ROS)的通用机器人模型统一机器人描述格式(unified robot description format, 简称 URDF)文件, 详细分析了 Baxter 机器人的运动学模型, 通过建立坐标间的约束条件进行模型简化, 并提取待标定参数。针对机器人的多参数模型以及非几何参数影响较大的情况, 提出一种结合轴线测量法与卡尔曼滤波系统辨识法的分步标定方法, 分析了针对 URDF 模型的轴线法和卡尔曼滤波的标定原理, 最后分别利用 Matlab 和激光跟踪仪进行仿真和实验验证。对 Baxter 机器人标定结果表明, 该标定方法能够获得较准确的运动学几何参数, 适用于 ROS 搭建的多几何参数的机器人及关节柔性较大的机械臂。

**关键词** Baxter 机器人; 运动学标定; 轴线测量法; 卡尔曼滤波

**中图分类号** TP242; TH113.2

## 引 言

绝对定位精度是衡量机器人性能的一个重要的指标, 而提高绝对定位精度的一个关键途径就是提高运动学模型的准确度<sup>[1]</sup>。实际上, 由于机器人零件存在加工误差, 装配误差, 以及零件磨损或变形等, 机器人的名义运动学模型与实际模型会存在一定的偏差, 因此需要对其参数进行修正, 以接近实际的运动学模型, 这也称为运动学标定。机器人的运动学标定一般分为两种<sup>[2]</sup>: 几何参数标定, 如连杆长度、相邻连杆距离、连杆扭转角等; 非几何参数标定, 如齿轮间隙、关节和连杆柔度等。文中主要研究几何参数标定的方法。

几何参数的标定通常可分为建模、测量、参数辨识和误差补偿 4 个步骤<sup>[1]</sup>。最常用的标定模型是基于齐次变换矩阵的 D-H 模型<sup>[3]</sup>, 但对于平行或近似平行关节轴存在奇异性问题。Hayati 等<sup>[4]</sup>对 D-H 模型进行了修改, 在平行关节轴处引入了绕 y 轴的旋转分量。后来学者又提出了关节坐标系采用 6 个参数的 S 模型<sup>[5]</sup>, 基于指数积的 POE 模型<sup>[6]</sup>, CPC 模型<sup>[7]</sup>和微分模型<sup>[8]</sup>, 以及基于这些模型的改进模

型<sup>[9-10]</sup>等。机器人标定的测量手段是决定标定效率和准确性的关键因素, 测量的仪器主要包括大范围的测量工具, 如激光跟踪仪, CMM 系统<sup>[11-13]</sup>等, 这些工具测量精度较高, 但设备的成本也相对较高。小范围的测量如视觉测量系统、声呐传感器<sup>[14-15]</sup>等。另外有学者采用自制的工具, Joubair 等<sup>[16]</sup>采用一个特殊带金属球的三角盘和触觉探针进行测量; Nubiola 等<sup>[17]</sup>采用可伸缩球杆仪和自制的固定盘来测量姿态。参数辨识能够根据测量数据获取运动学模型参数的近似值, 不同的辨识方法适用性也不同。目前最常用的有最小二乘法<sup>[18]</sup>、极大似然法<sup>[19]</sup>及扩展卡尔曼滤波<sup>[20]</sup>等。Omodei 等<sup>[21]</sup>利用测量的轨迹误差数据, 对比了线性迭代、最小二乘法、扩展卡尔曼滤波几种参数辨识方法, 最终得出扩展卡尔曼滤波方法具有较快的收敛速度和较好的稳定性。上述标定方法一般采用特定的非线性运动学模型, 系统辨识时, 往往对模型进行微分线性化再进行参数辨识, 或采用对噪声比较敏感的非线性辨识方法进行辨识。对于参数较多且柔性较大的机器人, 难以标定得到准确的运动学参数。

Baxter 是基于机器人操作系统开发的一款人机协作型机器人, 采用串联弹性驱动器作为关节驱

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51505151); 广州市科技计划资助项目(2015090330001); 机械系统与振动国家重点实验室课题资助项目(MSV 201605)

收稿日期: 2016-01-03; 修回日期: 2016-03-18

动,有较高的安全性;它的运动学模型是基于统一机器人描述格式文件建立的,具有很好的通用性。但是,其关节高柔性特性降低了它的定位精度,且 URDF 文件的运动学几何参数较多,使得传统的标定方法难以适用。因此结合不同标定方法的优点,提出姿态与位置变换参数分步标定的方法。首先,分析并建立基于 ROS 的 URDF 文件的运动学模型;然后,提取模型中需标定的几何参数,再采用轴线测量法和卡尔曼滤波分别标定姿态变换参数和位置参数;最后,通过 Matlab 对标定方法进行仿真验证,并通过激光跟踪仪进行实验验证。

## 1 运动学建模

### 1.1 URDF 文件

URDF 是机器人操作系统 ROS 中一个通用的描述机器人模型的 XML 格式文件,详细描述了机器人关节参数、杆件几何参数、动力学参数、坐标转换关系及碰撞模型等。它有一套简单的建模规则,可以为开发人员建立和修改复杂的机器人模型的过程提供便利,还可以结合 Gazebo 进行三维仿真。URDF 文件建立了完整的机器人关节坐标系,并定义各关节的属性和坐标系之间的静态变换关系,结合运动学和动力学(kinematic and dynamic library,简称 KDL)即可以建立机器人的运动学模型。

URDF 采用树结构(如图 1 所示)来构建机器人的基本框架,并假设所有杆件均为刚性杆。其中有两个描述机器人几何模型的关键元素:“joint”和“link”。

“link”用来定义机器人连杆的物理模型、碰撞模型和刚性惯量等;它以前一个关节的坐标系作为连杆坐标系,并以该坐标系为基坐标来定义连杆的各个参量。“joint”用来定义机器人关节的运动形

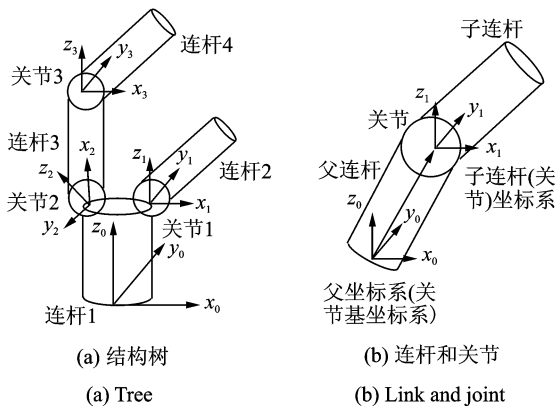


图 1 URDF 文件规则

Fig. 1 The convention of URDF

式、运动学和动力学属性、关节坐标及坐标变换关系等;每个关节连接两个连杆,分别为父连杆和子连杆,对应有父坐标系和子坐标系,子坐标系即为对应的关节坐标系;以父坐标系为基,转换到子坐标系的变换关系采用 3 个位置偏移量(如图 2 所示的“xyz”)和 3 个姿态偏移量(如图 2 所示的“rpy”)来表示。因此,从基座(第 1 个连杆)坐标系开始,通过定义相邻两连杆坐标系之间的变换关系,即可构建从机器人的基坐标系到各个连杆坐标系的转换模型。简单的 URDF 文件定义如图 2 所示。

```
<robot name="robot">
  <link name="link1"/>
  <link name="link2"/>
  <joint name="joint" type="rotation">
    <parent link="link1"/>
    <child link="link2"/>
    <origin xyz="5 3 0" rpy="0 0 0"/>
  </joint>
</robot>
```

图 2 URDF 文件示例

Fig. 2 Example of URDF

URDF 文件定义了机器人的静态模型和关节属性。对于正逆运动学的求解则可通过 KDL 库来实现,KDL 用链结构来构建机器人的运动学和动力学模型,它提供了 URDF 文件的编译接口,编译时能够自动读取 URDF 文件定义的连杆及关节,并将 URDF 文件定义的机器人位形视为关节零点,从而建立起一套完整的运动学模型。

### 1.2 Baxter 机器人的运动学模型

Baxter 是一台具有双臂的仿人形工业机器人,两只手臂各有 7 个转动关节,分别为两个肩关节  $S_0, S_1$ , 两个肘关节  $E_0, E_1$  和三个腕关节  $W_0, W_1, W_2$ 。7 个关节使 Baxter 的手臂具有较高的灵活性,能够完成较复杂的作业和规避碰撞及奇异位形。Baxter 的关节是由串联弹性驱动器(series-elastic actuator,简称 SEA)驱动的,该驱动器电机与关节之间通过一个扭簧连接。电机不是直接驱动关节运动,而是通过扭簧传递扭力进而驱动关节运动;Baxter 通过测量扭簧的转角并根据胡克定律即可计算出关节转矩。SEA 使 Baxter 的手臂具有较好的柔性和良好的力感应能力,从而降低手臂碰撞的危险。

Baxter 的运动学模型是基于 URDF 文件建立起来的,其连杆坐标系的建立和坐标系的转换关系满足 URDF 文件的规则:相邻坐标系中,后一坐标系由前一坐标系经 3 个坐标方向的位移和旋转得到(位移和转轴方向均以以前坐标系为基准)。因此,相

邻坐标系的变换矩阵为

$${}_{i+1}^i \mathbf{T} = \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{T}_{xyz}(\mathbf{P}_i) \mathbf{R}_z(\alpha_{iz}) \mathbf{R}_y(\alpha_{iy}) \mathbf{R}_x(\alpha_{ix}) \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{R}_a$  表示绕  $a$  轴的旋转矩阵;  $\mathbf{T}_a$  表示沿  $a$  轴的平移矩阵; 当中有变量  $\alpha_{ix}$ ,  $\alpha_{iy}$ ,  $\alpha_{iz}$  和  $\mathbf{P}_i$ , 分别对应 URDF 文件(如图 2 所示)中 joint 的参数“ $rpjy$ ”和“ $xyz$ ”。

Baxter 的基坐标系建立在其躯干底盘中心处; 各关节坐标系以关节中心为原点, 以转轴为  $z$  轴(方向满足右手定则),  $x$  轴和  $y$  轴的方向可以自定义, 根据 Baxter 的名义 URDF 文件(如图 3 所示)建立如下的关节坐标系。

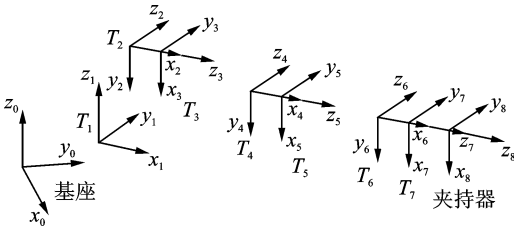


图 3 Baxter 手臂坐标系

Fig. 3 The frames of Baxter's arm

连杆坐标系定义为连杆后一关节的坐标系, 则关节  $S_0, S_1, \dots, W_2$  的坐标系即为连杆坐标系  $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_7$ , 末端夹持器坐标系为  $\mathbf{T}_g$ 。  $\mathbf{T}_1$  为固定坐标系, 其相对于基坐标系  $z$  轴的旋转参数为  $\pi/2$ ;  $\mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3, \mathbf{T}_5, \mathbf{T}_7$  的  $x$  轴为前一连杆坐标系  $z$  轴和当前坐标的  $z$  轴的公垂线, 它们相对于前一坐标系的  $y$  轴的旋转参数均固定为 0;  $\mathbf{T}_4, \mathbf{T}_6$  的  $y$  轴为前一坐标系  $z$  轴与当前坐标系  $z$  轴的公垂线, 它们相对于前一坐标系的  $x$  轴的旋转参数均为 0;  $\mathbf{T}_g$  相对  $\mathbf{T}_7$  为固定坐标系, 且只有位置变换。即可得到下式

$${}_{i+1}^i \mathbf{T} =$$

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{xyz}(\mathbf{P}_i) \mathbf{R}_z(\pi/2) \mathbf{R}_y(\alpha_{iy}) \mathbf{R}_x(\alpha_{ix}) & (i=0) \\ \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{T}_{xyz}(\mathbf{P}_i) \mathbf{R}_z(\alpha_{iz}) \mathbf{R}_y(0) \mathbf{R}_x(\alpha_{ix}) & (i=1, 2, 4, 6) \\ \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{T}_{xyz}(\mathbf{P}_i) \mathbf{R}_z(\alpha_{iz}) \mathbf{R}_y(\alpha_{iy}) \mathbf{R}_x(0) & (i=3, 5) \\ \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{T}_{xyz}(\mathbf{P}_i) & (i=7) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $i=0$  时为基坐标系;  $i=8$  时为末端坐标系。

Baxter 单支手臂的正运动学模型为

$${}^b_g \mathbf{T} = {}^b_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \dots \mathbf{T}_g \quad (3)$$

## 2 几何参数辨识方法

由上述式(2)和式(3)可知, 要准确建立 Baxter 的运动学模型, 至少需要标定 38 个参数, 其中包括

姿态变换的 14 个参数和位置变换的 24 个参数。

### 2.1 轴线测量法标定姿态参数

轴线测量法<sup>[23]</sup>利用某关节单独运动, 而其他关节保持静止时, 测量该关节上某个固定点的轨迹, 从而获取该关节的轴线位姿, 进而计算运动学参数。采用轴线测量法只用于获取关节姿态的变换参数, 即 URDF 文件的“ $rpjy$ ”参数。因此, 计算关节轴线时只需计算轴线方向即可。由于 Baxter 的运动学模型以 URDF 文件定义的关节状态为零位, 故测量某关节运动轨迹时, 必须将其他关节置于零位状态。

采集了某关节运动轨迹数据之后, 通过平面拟合和求取拟合平面的法向量即可获取轴线的方向向量。设关节轨迹的拟合平面方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (4)$$

变换式(4), 可得二元回归模型

$$z = \lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 \quad (5)$$

其中:  $x, y$  为自变量;  $z$  为因变量;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为模型参数。

采用最小二乘法拟合式(5), 可获得  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  的值, 则对应平面的法向量为

$$\bar{\mathbf{n}} = [\lambda_1, \lambda_2, -1] \quad (6)$$

关节轴方向可能与该法向量相同或相反。假设  $\mathbf{p}_i (i=1, 2, \dots, m)$  为测量的轨迹点, 选取  $\mathbf{p}_i$  上 3 个点  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$  和  $\mathbf{p}_3$ , 且这 3 个点为关节从角度较小值运动到较大值依次出现的点。根据右手定则, 计算这 3 点构成的平面法向量为

$$\mathbf{n} = (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1) \quad (7)$$

可获得关节轴线单位向量为

$$\mathbf{n}_i = \text{sgn}(\bar{\mathbf{n}}, \mathbf{n}) \frac{\bar{\mathbf{n}}}{|\bar{\mathbf{n}}|} \quad (8)$$

获得各关节轴线单位向量  $\mathbf{n}_i (i=1, 2, \dots, 7)$  后, 需转换为 URDF 文件的“ $rpjy$ ”参数。由 2.2 节所述的关节坐标系建立规则。

当  $i=0$  时, 类比式(2)和(8), 即可求得  $\alpha_{ix}$  和  $\alpha_{iy}$ , 带入式(2)可得第 1 个关节坐标系姿态矩阵为

$$\mathbf{R}_1 = [\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1, \mathbf{z}_1]$$

当  $i=1, 2, 4, 6$  时,

$$\begin{cases} \alpha_{ix} = -\arccos \frac{\mathbf{n}_{i+1} \mathbf{n}_i}{|\mathbf{n}_{i+1}| |\mathbf{n}_i|} \\ \alpha_{iz} = -\arccos \frac{(\mathbf{n}_{i+1} \times \mathbf{n}_i) \times \mathbf{x}_i}{|\mathbf{n}_{i+1} \times \mathbf{n}_i| |\mathbf{x}_i|} \end{cases}$$

代入式(2), 得到第  $i+1$  个关节坐标系的姿态矩阵为

$$\mathbf{R}_{i+1} = [\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1}, \mathbf{z}_{i+1}]$$

当  $i=3,5$  时,

$$\begin{cases} \alpha_{iy} = -\arccos \frac{\mathbf{n}_{i+1} \mathbf{n}_i}{|\mathbf{n}_{i+1}| |\mathbf{n}_i|} \\ \alpha_{iz} = -\arccos \frac{(\mathbf{n}_{i+1} \times \mathbf{n}_i) \mathbf{y}_i}{|\mathbf{n}_{i+1} \times \mathbf{n}_i| |\mathbf{y}_i|} \end{cases}$$

代入式(2)可得第 4 和 6 个关节的姿态矩阵为

$$\mathbf{R}_{i+1} = [\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1}, \mathbf{z}_{i+1}]$$

### 2.2 卡尔曼滤波标定位置参数

由 2.1 节获得的姿态变换参数,代入式(3)可得只包含位置变换参数的运动学模型,包含 24 个参数。由于各个关节坐标系的原点只需定在关节轴上,即其有一个沿关节轴方向的自由度,故可以自定义其中一个方向的位置变换参数(无需辨识参数),则其他两个参数为固定的几何参数(待辨识参数)。因此,全部待辨识参数个数为  $(2 \times 7 + 3 =) 17$  个。则可得末端位置的运动学模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{p} + \mathbf{d} \quad (9)$$

其中: $\mathbf{X}$  为  $3 \times 1$  向量,表示机器人末端的位置向量; $\mathbf{p}$  为  $1 \times 17$  向量,由所有待辨识的位置变换参数组成; $\mathbf{K}$  为含关节角度变量的  $3 \times 24$  系数矩阵; $\mathbf{d}$  为  $3 \times 1$  常数向量。

若给定某一时刻下的关节角度值,则可获得该状态下线性的运动学模型,可采用卡尔曼滤波进行参数的辨识。离散模型的状态方程和输出方程为

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (10)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{d}_k + \mathbf{v}_k \quad (11)$$

其中: $\mathbf{z}_k$  为  $k$  时刻机器人手臂末端的位置测量值,为  $3 \times 1$  的向量; $\mathbf{H}_k = \mathbf{K}$  为  $3 \times 17$  矩阵,通过式(3)代入  $k$  时刻的机器人关节角度值可以计算得到; $\mathbf{x}_k = \mathbf{p}$  是一个  $1 \times 17$  的向量,表示  $k$  时刻机器人的位置变换几何参数; $\mathbf{w}_k$  为  $1 \times 17$  向量,表示系统过程噪声, $\mathbf{v}_k$  为  $3 \times 1$  向量,表示机器人末端的测量噪声; $\mathbf{w}_k$  和  $\mathbf{v}_k$  均为白噪声,它们的协方差矩阵分别为  $\mathbf{Q}_k = E(\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T)$  和  $\mathbf{R}_k = E(\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T)$ 。

卡尔曼滤波参数辨识方程为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{P}_{k-1|k-1} + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (13)$$

其中: $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  和  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  表示  $k$  时刻不考虑测量值  $\mathbf{Z}_k$  而预估的状态变量值和系统协方差矩阵; $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和  $\mathbf{P}_{k|k}$  表示  $k$  时刻综合考虑测量值  $\mathbf{Z}_k$  而计算得到的状态变量值和系统协方差矩阵。

卡尔曼增益计算方程为

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (14)$$

状态变量的递归方程为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_{nk} - \mathbf{d}_k) \quad (15)$$

系统协方差的最优估计为

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k-1|k} \quad (16)$$

卡尔曼滤波迭代的参数初始值为名义的参数值。 $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{P}$  的初始值均设置为  $10^{-4} \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{R}$  的初始值设置为  $10^{-2} \mathbf{I}$ 。

## 3 实验与结果分析

本实验的实验平台如图 4 所示。手臂末端的实际位置值及各关节的旋转轨迹点均由激光跟踪仪测得,激光跟踪仪的测量精度为  $(10+5L) \mu\text{m}$ ,其中  $L$  为测量距离,本实验测量距离在 2 m 以内,因而测量精度约为  $20 \mu\text{m}$ ;手臂各关节角度值由编码器测得,并通过话题“robot/joint\_states”发布,分辨率为  $3.834 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。实验中通过机器人底座上的螺纹孔进行定位,以使激光跟踪仪的世界坐标系与机器人的基坐标系(/base 坐标系)重合。

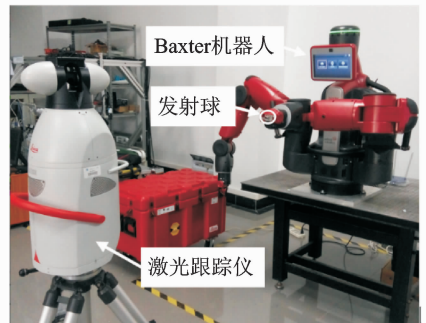


图 4 Baxter 标定实验平台

Fig. 4 A setup of experimental calibration system for Baxter

### 3.1 轴线测量法姿态标定实验

测量第  $i$  个关节的旋转轨迹时,将激光跟踪仪的反射球固定在该关节的子连杆上,且该关节前面的所有关节均转动到零位位置。让关节角度  $\theta_i$  由一个较小的值开始运动,以  $1^\circ$  的步长逐步递增,每增加一个步长,待机器人稳定后测量反射球的三维坐标,待  $\theta_i$  增大到较大值时停止运动。依次测量各个关节的旋转轨迹,然后根据 3.1 节所述方法,利用 Matlab 进行关节轴方向拟合并计算“rpy”参数,得到表 1 的标定结果。

通过平面度和平面拟合度来衡量平面拟合的效果,平面度定义为测量点到拟合平面距离的最大值与最小值之差(包含正负号),平面拟合度定义为各

表 1 轴线测量法标定后的关节轴方向及“*rpy*”参数Tab. 1 Joint axis direction vector and “*rpy*” parameters obtained through screw-axis measurement method

关节	关节轴方向向量			URDF 文件参数		
	<i>x</i> /mm	<i>y</i> /mm	<i>z</i> /mm	<i>r</i> /rad	<i>p</i> /rad	<i>y</i> /rad
1	-0.007	0.009	1.000	0.002	0.012	0.785
2	0.712	-0.702	0.013	-1.570	0.000	0.016
3	0.702	0.712	-0.011	1.570	0.000	1.580
4	0.712	-0.703	0.014	0.000	-1.572	-1.570
5	0.697	0.717	-0.030	1.580	0.000	1.590
6	0.712	-0.702	0.017	0.000	-1.579	-1.567
7	0.701	0.713	-0.021	1.572	0.000	1.561

个测量点到拟合平面的距离平方的平均值。各关节轴测量点的平面拟合结果如表 2 所示,拟合度和平面度都各自保持在 0.01 mm 和 0.1 mm 的数量级上,说明测量点都比较稳定,受柔性关节变形的影响较小,平面拟合的效果良好。

表 2 各关节轴测量点的平面拟合结果

Tab. 2 The plane fit of the measured points of all axis

关节	1	2	3	4	5	6	7
拟合度/ ( $10^{-2}$ mm)	1.44	6.12	5.38	4.64	3.28	4.38	2.21
平面度/ ( $10^{-1}$ mm)	1.68	2.28	3.14	6.29	6.29	2.35	1.64

传统的轴线测量法在平面拟合后将进一步拟合圆,获取圆心,从而获得关节轴线的方程,然后进行运动学参数的求解。然而,由于机器人柔性关节及非几何参数等因素的影响,测量点往往在测量平面会有较大的偏移,故拟合出来的关节轴线方程也存在较大偏差。因此,只有采用轴线测量法拟合平面获取姿态变换参数,位置变换参数采用卡尔曼滤波方法进行辨识。

### 3.2 卡尔曼滤波位置标定仿真及实验

通过 Matlab 对 2.2 节所述的标定方法进行仿真验证,仿真时假设的名义与实际 URDF 文件参数如表 3 所示。由于 Baxter 的关节存在轻微的抖动现象,而激光跟踪仪的测量噪声的数量级远小于 Baxter 抖动引起的末端位置噪声,因此将后者的噪声归为测量噪声,该噪声通过激光跟踪仪在 Baxter 某个固定位形下的采样点获得。由于受非几何参数的影响,Baxter 的绝对定位精度较差,由此造成的测量误差也归结为测量噪声。综上所述,仿真时将噪声设为均值零,标准差为 1 mm 的高斯白噪声。

表 3 仿真时 URDF 参数(“×”表示无需标定参数)

Tab. 3 The parameters of URDF in simulation (“×” unidentifiable)

关节	名义参数			实际参数		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	64	256	129.6(×)	64.03	259.0	129.6
2	72	0(×)	272	69.00	0	270.4
3	102.0(×)	4	3	102.0	0	0
4	66	0(×)	265	69.00	0	262.4
5	103.6(×)	4	5	103.6	0	0
6	14	0(×)	273	10.00	0	270.7
7	116.0(×)	-2	3	116.0	0	0
8	3	4	162	0	0	158.6

实验设置 150 个机器人位形点作为测量点,末端位置测量值则通过 Baxter 的正运动学方程加上测量噪声后求解获得,这 150 个测量点差不多覆盖了 Baxter 单臂的工作空间。卡尔曼滤波进行参数标定时,以表 4 的名义参数为初始值开始迭代,各个参数滤波过程如图 5 所示,图中的物理量 *x*, *y*, *z* 分别表示辨识的参数(URDF 文件中的 *xyz* 参数)。另外取 150 个位形点用于验证标定的效果。同样的,这 150 个点差不多覆盖 Baxter 单臂的整个工作空间。定前后的误差对比如图 6 所示。

表 4 标定前后的位置误差对比

Tab. 4 The position error before and after calibration mm

参数	平均误差	最大误差	标准差
标定前	11.831 8	23.210 1	4.397 9
标定后	2.491 2	4.924 9	1.048 6

表 4 列出了标定前后最大误差、平均误差和误差值的标准差。从表中可以看出,标定后机器人的平均位置误差从 11.83 mm 减小到 2.49 mm,最大误差也从 23.21 mm 减小到 4.92 mm,标准差从 4.40 mm 减小到 1.05 mm,说明标定后整个工作空间的定位精度都有较大的提升。

### 3.3 卡尔曼滤波标定实验及结果分析

本实验同样采用图 6 所示的实验平台。实验时以 Baxter 左臂为测量对象,将反射球固定手臂末端的中心点处,通过末端夹持器上的螺纹孔来定位该中心点。测量机械臂 300 个位形下的关节角度值和末端的位置,其中前 150 个位形用于卡尔曼滤波标定参数,后 150 个位形用于验证标定的结果。每次运动到一个位形,待手臂稳定后,通过订阅 ROS 话题(ROS 的通信方式,将传感器数据以话题方式发布)

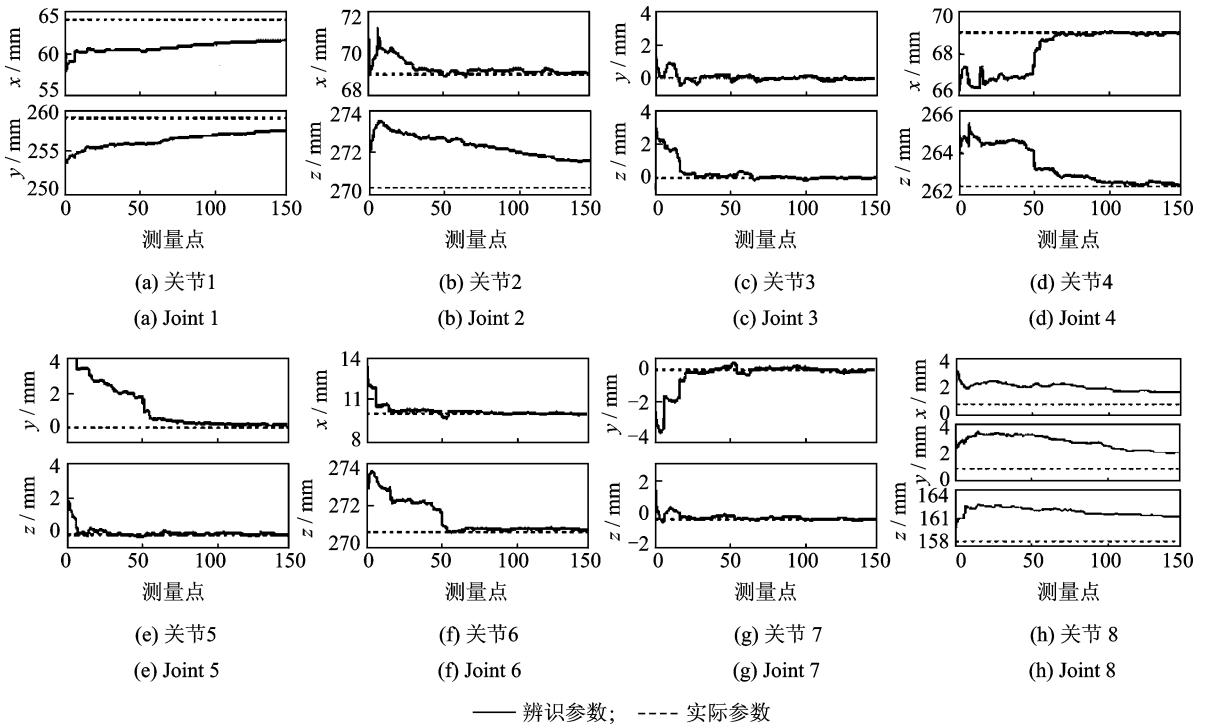


图 5 几何参数辨识结果

Fig. 5 Identified geometric parameters

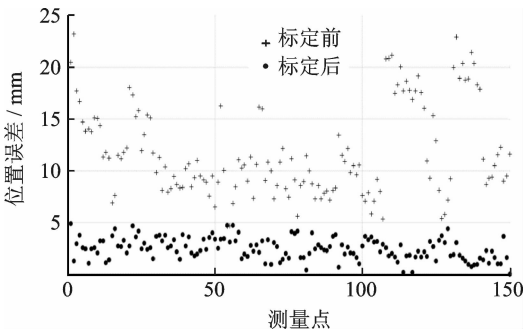


图 6 仿真标定前后的位置误差

Fig. 6 The position error before and after calibration

表 5 KF 标定前后的 URDF 参数 (“×”表示无需标定参数)

Tab. 5 The URDF parameters before and after KF calibration (“×” unidentifiable) mm

关节	名义参数			修正参数		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
1	64.03	259.0	129.6	62.79	260.73	(×)
2	69.00	0	270.4	73.11	(×)	265.52
3	102.0	0	0	(×)	2.21	1.31
4	69.00	0	262.4	68.31	(×)	261.24
5	103.6	0	0	(×)	0.32	-2.82
6	10.00	0	270.7	10.07	(×)	271.04
7	116.0	0	0	(×)	0.59	2.43
8	0	0	158.6	4.77	2.39	157.73

“robot/joint\_states”来获取关节角度值,通过激光跟踪仪测量末端的位置值。

卡尔曼滤波进行参数辨识时,以表 5 所示的名义参数为初始值开始迭代,姿态变换参数采用轴线测量法标定获得的参数,如表 2 所示。辨识得到的运动学参数如表 5 所示;利用测量的 150 个位形点来验证辨识结果,得到标定前后的位置误差如图 7 所示。

卡尔曼辨识过程参数的收敛情况与图 5 的仿真结果近似,虽然辨识曲线没有理论上卡尔曼滤波辨识曲线那么平稳,但总体趋势还是收敛的,且标定后的平均位置误差从 14.21 mm 减小到 6.25 mm,说明标定后的模型参数趋近于真实值。但是标定后仍

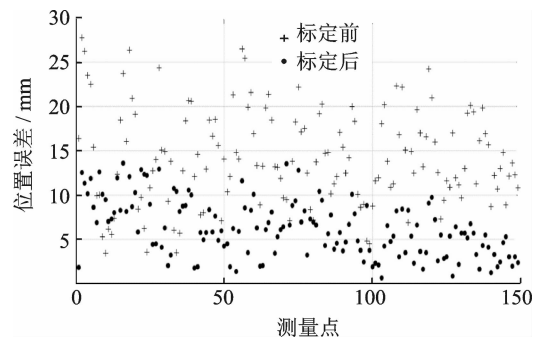


图 7 标定前后的位置误差

Fig. 7 The position error before and after calibration

然存在较大的定位误差,说明 Baxter 机器人的绝对

定位精度受非几何参数的影响很大。Baxter 关节采用 SEA 驱动器,具有较大的柔性,受连杆重力影响会发生偏转,从而产生关节转角误差,因此一般需要建立准确的重力补偿模型对关节偏转进行补偿。另外,Baxter 关节减速器采用精度不高的齿轮传动机构,齿轮间隙、回程误差等也会影响机器人的定位精度。

本研究也尝试采用几种常用的标定方法(扩展卡尔曼滤波、最小二乘法、轴线法)对 Baxter 进行标定,标定结果如表 6 所示。最小二乘法、EKF(扩展卡尔曼滤波)和轴线测量方法获得的标定结果没能改善模型的精度,主要原因在于最小二乘法对测量的误差比较敏感,辨识的参数将会偏离实际运动学参数;EKF 标定时需将运动学模型转化为线性的误差模型,而且标定的参数较多且测量误差较大,测量协方差矩阵比较难调整,可能导致某些参数不能较好的收敛,从而导致辨识参数偏离实际参数;轴线测量法标定时,对求解出来的轴线方程的精度要求很高,但 Baxter 本身关节柔性较大,非几何参数对关节运动影响很大,故难以保证轴线方程的精度。因此上述方法并不适用于标定 Baxter 机器人,而采用笔者提出的分步标定方法可以减小模型的误差,获得较好的运动学参数。

表 6 标定前后的位置误差对比

Tab. 6 The position error before and after calibration mm

参数	平均误差	最大误差	标准差
名义模型	14.214 1	27.742 0	5.389 5
轴线法+KF	6.256 0	13.604 5	3.220 8
最小二乘法	13.433 5	25.378 3	4.964 0
EKF	16.105 8	60.183 5	10.776 7
轴线法	18.462 3	34.979 6	6.205 8

## 4 结束语

首次操作机器人之前,需要对机器人的运动学模型参数进行标定。本研究针对 ROS 的通用机器人模型及 Baxter 机器人关节柔性等非几何参数误差较大的条件下,提出了适合该机器人的标定方法。笔者详细分析了基于 ROS 的 Baxter 机器人的运动学模型及标定模型,根据该模型的特点提出了分步标定的方式。传统的标定方法并不能达到预期的标定结果,且大部分解算过程较为复杂。结合轴线测量法和卡尔曼滤波的标定方法,能够很好地分别标定出机器人模型的姿态变换参数和位置变换参数,特别适用于标定参数较为复杂,且非几何参数误差

较大机器人。文中的运动学解算方式及标定方法具有一定通用性,可为基于 ROS 开发的机器人的 URDF 文件参数标定提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Elatta A Y, Gen L P, Zhi F L, et al. An overview of robot calibration[J]. Information Technology Journal, 2004, 3(1): 74-78.
- [2] Nguyen H N, Zhou J, Kang H J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network[J]. Neurocomputing, 2015, 151: 996-1005.
- [3] Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. Trans of the ASME, Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215-221.
- [4] Hayati S A. Robot arm geometric link parameter estimation[C]// The 22nd IEEE Conference on Decision and Control. San Antonio, Texas, USA:IEEE, 1983: 1477-1483.
- [5] Stone H W. Kinematic modeling, identification, and control of robotic manipulators[J]. Kluwer International, 1987, 29:7-29.
- [6] Okamura K, Park F C. Kinematic calibration using the product of exponentials formula[J]. Robotica, 1996, 14(4): 415-421.
- [7] Zhuang H, Roth Z S, Hamano F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators [J]. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 1992, 8(4): 451-463.
- [8] Park I W, Lee B J, Cho S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics [J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2012,17(6): 1059-1067.
- [9] Zhuang H, Roth Z S. A note on singularities of the MCPC model[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 1996, 12(2): 169-171.
- [10] Lou Yunjiang, Chen Tieniu, Wu Yuanqing, et al. Improved and modified geometric formulation of POE based kinematic calibration of serial robots [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, Missouri, USA: IEEE Press, 2009: 5261-5266.
- [11] Nubiola A, Bonev I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(1):

- 236-245.
- [12] Lightcap C, Hamner S, Schmitz T, et al. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 452-456.
- [13] Nubiola A, Slamani M, Joubair A, et al. Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker[J]. *Robotica*, 2014, 32(3): 447-466.
- [14] Du Guanglong, Zhang Ping. Online robot calibration based on vision measurement[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(6): 484-492.
- [15] Stone H W, Sanderson A C. A prototype arm signature identification system[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Raleigh, North Carolina, USA; IEEE, 1987, 4: 175-182.
- [16] Joubair A, Bonev I A. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(1-4): 515-523.
- [17] Nubiola A, Bonev I A. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(3): 472-480.
- [18] 王品, 廖启征, 庄育锋, 等. 一般7R串联机器人标定的仿真与实验[J]. *机器人*, 2006, 28(5): 483-487.  
Wang Pin, Liao Qizheng, Zhuang Yufeng, et al. Simulation and experimentation for calibration of general 7R serial robots[J]. *Robot*, 2006, 28(5): 483-487. (in Chinese)
- [19] Renders J M, Rossignol E, Becquet M, et al. Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, 7(6): 721-732.
- [20] Du Guanglong, Zhang Ping. Online serial manipulator calibration based on multisensory process via extended kalman and particle filters[J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2014, 61(12): 6852-6859.
- [21] Omodei A, Legnani G, Adamini R. Three methodologies for the calibration of industrial manipulators: Experimental results on a SCARA robot[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2000, 17(6): 291-307.
- [22] Orocos Wiki. Kinematic trees[DB/OL]. (2015-12-03) [2016-01-01]. <http://www.orocos.org/wiki/mainpage/kdl-wiki/user-manual/kinematic-trees>.
- [23] Barker L K. Vector-algebra approach to extract Denavit-Hartenberg parameters of assembled robot arms[R]. Hampton, Virginia, USA; NASA Technical Paper 2191, Aug. 1983, NASA-TP-2191.



**第一作者简介:**陈勋漫,男,1992年1月生,硕士、工程师。主要研究方向为双臂机器人的运动控制及视觉伺服。  
E-mail:365743374@qq.com

**通信作者简介:**黄沿江,男,1981年11月生,博士后、副教授。主要研究方向为人机共融机器人技术、工业自动化生产线的设计与优化及机电一体化技术。  
E-mail:mehuangyj@scut.edu.cn



