第18卷 第6期 自 动 化 学 报 Vol. 18, No. 6
1992年11月 ACTA AUTOMATICA SINICA Nov., 1992

短文

机器人几何连杆参数辨识[1)]

卜永洪 王翼
(南开大学计算机与系统科学系,天津 300071)

摘 要

本文给出了一种通用的机器人几何连杆参数估计方法. 基于机器人运动学模型和运动学误差模型,可以推导出包含未知参数的线性输入输出方程;然后采用最小二乘法得到参数估计值. 该方法已应用于 PUMA 机器人参数辨识.

关键词: 机器人,运动学,建模,参数估计.

一、引 言

由于机械加工精度的限制和安装偏差，实际机器人装置的几何参数并不等于原设定值,并且还会因机器人运行产生的形变而改变. 为提高精度,定期校正机器人控制系统中几何连杆参数是十分必要的. 为此，作者提出一种采用辨识技术估计机器人几何连杆参数的方法.

二、机器人运动学模型

用 Denavit-Hartenberg 表示法可标定机器人每个连杆上的坐标架. 机器人结构可由一组几何连杆参数表示，每个关节四个参数，第 i 个关节相应的参数是 l_i，α_i，r_i 和 θ_i[2].

如果第 i 个关节为旋转关节,则 θ_i 为关节变量,其它三个为常值参数; 如果第 i 个关节为平移关节,则 l_i 为零,r_i 为关节变量，其余二个为常值参数. 本文假定这些常值参数全部或部分为未知的,需要辨识.

A_i 表示从坐标架 $i-1$ 到坐标架 i 的齐次变换阵,一般地有

$$A_i=\begin{bmatrix}\cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & l_i\cos\theta_i\\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & l_i\sin\theta_i\\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & r_i\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{1}$$

本文于1991年3月19日收到.
1) 国家自然科学基金资助的课题. 本文曾在第八届 IFAC 辨识会议(北京)上宣读.

记左上角 3×3 子阵为 R_i^{i-1}，记第四列前三行上的元素组成的子列为 $\boldsymbol{p}_i^{i-1}$，则有

$$A_i=\begin{bmatrix} R_i^{i-1} & \boldsymbol{p}_i^{i-1} \\ \boldsymbol{0} & 1 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

对于一个具有 n 关节机器人，从机座坐标架到最后一个坐标架的齐次变换阵定义为

$$\begin{aligned} T_n &= A_1\cdot A_2\cdots A_{n-1}\cdot A_n \\ &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_n^0 & \boldsymbol{s}_n^0 & \boldsymbol{a}_n^0 & \boldsymbol{p}_n^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{n}_n^0$ 为手爪的法向矢量，$\boldsymbol{s}_n^0$ 为滑动矢量，$\boldsymbol{a}_n^0$ 为接近矢量，$\boldsymbol{p}_n^0$ 为位置矢量.

由机器人运动学模型可以导出关于 l_i 和 r_i $(i=1,2,\cdots,n-1,n)$ 的线性方程

$$E\cdot\boldsymbol{l}+F\cdot\boldsymbol{r}=\boldsymbol{p}_n^0, \tag{4}$$

其中 E 为 $3\times n$ 阵，它的第 i 列元素 $\boldsymbol{e}_i$ 为

$$\boldsymbol{e}_i=\boldsymbol{n}_{i-1}^0\cdot\cos\theta_i+\boldsymbol{s}_{i-1}^0\cdot\sin\theta_i, \tag{5}$$

F 为 $3\times n$ 阵，它的第 i 列元素 $\boldsymbol{f}_i$ 为

$$\boldsymbol{f}_i=\boldsymbol{a}_{i-1}^0. \tag{6}$$

式(4—6)中出现的几个矢量定义如下：

$$[\boldsymbol{n}_{i-1}^0\ \boldsymbol{s}_{i-1}^0\ \boldsymbol{a}_{i-1}^0]=R_1^0\cdot R_2^1\cdot\cdots\cdots R_{i-2}^{i-3}\cdot R_{i-1}^{i-2}, \tag{7}$$

$$\boldsymbol{l}=[l_1\ l_2\cdot\cdots\cdots l_{n-1}\ l_n]^T, \tag{8}$$

$$\boldsymbol{r}=[r_1\ r_2\cdot\cdots\cdots r_{n-1}\ r_n]^T. \tag{9}$$

三、机器人运动学误差模型

A_i 的全微分可由下式得到

$$dA_i=\frac{\partial A_i}{\partial\theta_i}\Delta\theta_i+\frac{\partial A_i}{\partial r_i}\Delta r_i+\frac{\partial A_i}{\partial l_i}\Delta l_i+\frac{\partial A_i}{\partial\alpha_i}\Delta\alpha_i. \tag{10}$$

dT_n 表示由所有参数误差引起的 T_n 微分值

$$T_n+dT_n=(A_1+dA_1)(A_2+dA_2)\cdots\cdots(A_{n-1}+dA_{n-1})(A_n+dA_n). \tag{11}$$

展开式(11)，忽略高阶微分项，不难得到

$$dT_n=T_n\cdot\sum_{i=1}^{n}(A_i\cdot A_{i+1}\cdots\cdots A_{n-1}A_n)^{-1}dA_i(A_{i+1}A_{i+2}\cdots\cdots A_{n-1}A_n). \tag{12}$$

定义　$\delta T_n=T_n^{-1}\cdot dT_n,$　　(13)

由文献[2]中讨论可知 δT_n 有如下形式：

$$\delta T_n=\begin{bmatrix} 0 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 0 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{d}=[d_x\ d_y\ d_z]^T$ 表示机器人末端执行器端点的位置偏差，$\boldsymbol{\delta}=[\delta_x\ \delta_y\ \delta_z]^T$ 表示方向偏差.

由前面各式可以推导出下式：

$$\boldsymbol{\delta} = M\Delta\boldsymbol{\theta} + W\Delta\boldsymbol{\alpha}, \tag{15}$$

式中 $\Delta\boldsymbol{\theta} = [\Delta\theta_1 \ \Delta\theta_2 \cdots\cdots \Delta\theta_{n-1} \ \Delta\theta_n]^T$ 表示由 θ_i 偏差 $\Delta\theta_i$ 组成的向量,类似有$\Delta\boldsymbol{\alpha} = [\Delta\alpha_1 \ \Delta\alpha_2 \cdots\cdots \Delta\alpha_{n-1} \ \Delta\alpha_n]^T$.

M为 $3 \times n$ 阶矩阵,$\boldsymbol{m}_i$ 表示其第 i 列元素

$$\boldsymbol{m}_i = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{k}_i \cdot \boldsymbol{n}_n^{i+1}) \\ (\boldsymbol{k}_i \cdot \boldsymbol{s}_n^{i+1}) \\ (\boldsymbol{k}_i \cdot \boldsymbol{a}_n^{i+1}) \end{bmatrix}. \tag{16}$$

W为 $3 \times n$ 阶矩阵,$\boldsymbol{w}_i$ 表示其第 i 列元素

$$\boldsymbol{w}_i = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{h}_i \cdot \boldsymbol{n}_n^{i+1}) \\ (\boldsymbol{h}_i \cdot \boldsymbol{s}_n^{i+1}) \\ (\boldsymbol{h}_i \cdot \boldsymbol{a}_n^{i+1}) \end{bmatrix}, \tag{17}$$

其中 $\boldsymbol{n}_n^{i+1}$, $\boldsymbol{s}_n^{i+1}$ 和 $\boldsymbol{a}_n^{i+1}$ 三个方向矢量由下式给出

$$[\boldsymbol{n}_n^{i+1} \ \boldsymbol{s}_n^{i+1} \ \boldsymbol{a}_n^{i+1}] = R_{i+1}^{i} \cdot R_{i+2}^{i+1} \cdots\cdots R_{n-2}^{n-1} \cdot R_{n}^{n-1}, \tag{18}$$

$$\boldsymbol{k}_i = [0 \quad \sin\alpha_i \quad \cos\alpha_i], \tag{19}$$

$$\boldsymbol{h}_i = [l_i \quad 0 \quad 0]. \tag{20}$$

四、几何连杆参数估计

依据机器人的设计图或粗测可给出一组几何连杆参数初值，由此建立机器人运动学模型和运动学误差模型.

1. $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 中未知参数的估计

关节类型决定 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ 的每个元素是参数偏差还是关节变量误差. $\Delta\boldsymbol{\theta}_p$ 表示由 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ 中所有参数偏差元素组成的参数偏差子向量，其余元素组成关节变量误差子向量 $\Delta\boldsymbol{\theta}_v$. 假定关节变量值可准确量测,则有 $\Delta\boldsymbol{\theta}_v = \boldsymbol{0}$. 这时式(15)可以改写成

$$\boldsymbol{\delta} = M_p \cdot \Delta\boldsymbol{\theta}_p + W \cdot \Delta\boldsymbol{\alpha}, \tag{21}$$

其中 M_p 由M中与 $\Delta\boldsymbol{\theta}_p$ 中元素相对应的列组成.

齐次矩阵T表示测量得到的机器人方向和位置值，T_n 由式(3)所表示的运动学模型算出

$$dT_n = T - T_n. \tag{22}$$

由式(13)可求出 δT_n, 进而由式(14)得到 $\boldsymbol{\delta}$. 式(21)中各系数可由参数初值和关节变量值求得，采用最小二乘法或其它辨识方法不难得到 $\Delta\boldsymbol{\theta}_p$ 与 $\Delta\boldsymbol{\alpha}$的估计值. 初值加上偏差估计值便得到了 $\boldsymbol{\theta}$ 与 $\boldsymbol{\alpha}$ 中未知参数的估计值.

2. $\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{l}$ 中未知参数估计

本节 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 中参数均作为已知值，$\boldsymbol{r}$ 分成两个子向量 $\boldsymbol{r}_p$ 和 $\boldsymbol{r}_v$, $\boldsymbol{r}_v$ 为关节变量部分, $\boldsymbol{r}_p$ 为参数部分. $\boldsymbol{l}$ 也相应于 $\boldsymbol{r}_p$ 和 $\boldsymbol{r}_v$ 分成 $\boldsymbol{l}_p$ 和 $\boldsymbol{l}_v$,这时有 $\boldsymbol{l}_v = \boldsymbol{0}$. 式(4)可改写为

$$E_p \cdot \boldsymbol{l}_p + F_p\boldsymbol{r}_p = \boldsymbol{p}_n^0 - F_v \cdot \boldsymbol{r}_v, \tag{23}$$

其中 E_p 由 E 中相应于 $\boldsymbol{l}_p$ 的列组成, F_p 和 F_v 分别由 F 中相应于 $\boldsymbol{r}_p$ 和 $\boldsymbol{r}_v$ 的列组成,它们均可由 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 中已知参数求出. $\boldsymbol{r}_v$ 为关节变量可以量测, $\boldsymbol{p}_n^0$ 为位置向量亦可量测. 采

用最小二乘法不难得到 $\boldsymbol{r}$ 和 $\boldsymbol{l}$ 中未知参数的估计值.

五、应　用

实验系统由一台具有六个旋转关节的 PUMA 760 机器人和一个水平工作平台构成. 机器人机座坐标系的 XOY 平面也在水平面上. 在工作平台确定一个基准点，它在机座坐标系下的位置为已知值. 机器人手爪上一端点可沿工作平台从基准点出发作 X(或 Y) 方向上距离不等的平移,用直尺测量其距离,通过换算就可得到这些直线终点在机座坐标系下的位置. 另一方面计算机系统可从光码盘中读出相应机器人手爪每一空间位置的关节变量值. 这样就解决了输入输出数据的量测问题.

应用本文提出的方法可以估计 PUMA 760 机器人几何连杆参数 $\boldsymbol{l}$ 和 $\boldsymbol{r}$ 中的几个关键非零参数 r_2、r_3、r_6、l_2 和 l_3，其它参数用原设计值而不参加辨识(见表一). 选用三十组数据,估计得到参数值 $r_3 = 113.971$(mm)，$r_4 = 600.019$(mm)，$r_6 = 125.007$ (mm)，$l_2 = 649.968$(mm) 和 $l_3 = 0.001$(mm).

表 1　PUMA-A760 机器人连杆参数

关节	a	r	l	关节变化范围
1	−90°	0	0	315°
2	0°	0	l_2	220°
3	90°	r_3	l_3	270°
4	−90°	r_4	0	515°
5	90°	0	0	200°
6	0°	r_6	0	515°

利用参数估计值,本文建立了机器人运动学仿真模型. 输入同样关节变量值,仿真模型算出位置值与实际位置值偏差小于 0.1mm.

由于测量条件限制，只辨识了部分参数. 如解决了手爪在空间任意位置和方向的测量问题,就可以辨识机器人全部几何连杆参数.

参　考　文　献

[1] Khalil, W. and Gautier, M., Identifacation of Geometric Parameters of Robots, Proc. of Symp. on Robot Control, 191—194, (1985).

[2] Paul, R. P., Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control, MIT Press, (1981), 46—61.

[3] Wu, C. H., The Kinematic Error Model for The Design of Robot Manipulator, Proc. of ACC, 497—502, 1983.

THE IDENTIFICATION OF GEOMETRIC LINK PARAMETERS OF ROBOT MANIPULATORS

Bu Yonghong Wang Yi

(*Dept. of Computer and System Sciences, Nankai University, Tianjin* 300071)

Abstract

In this paper, a method for geometric link parameter estimation of robot manipulators has been proposed. Based on the kinematic model and kinematic error model of a robot, linear input-output equations concerning all of unknown parameters are developed. The unknown parameters are estimated by the least square method. This method has been applied to the parameter estimation of an actual PUMA 760 industrial robot.

Key words: Robot; parameter estimation; modelling; kinematics.

第二届全国人机语音通讯学术会议在桂林召开

第二届全国人机语音通讯学术会议于 9 月 18～20 日在桂林召开. 这次会议由中国自动化学会、计算机学会、电子学会、声学学会、中文信息学会的有关专业委员会及中国科学院自动化研究所联合筹办. 来自全国44个单位的近百名科技工作者出席了会议. 有90多篇论文分别在大会和分组会上进行了交流. 这些论文涉及到听觉模型与特征提取、语音识别方法与系统、非特定人语音识别、连续语音识别与语音模型、说话人识别、神经网络应用、语音合成、语音库与系统评价方法、语音分析与基音提取、语音编码与增强以及语音技术应用等人机语音通讯技术的各个方面.

会议主席黄泰翼主持了开幕式. 美国贝尔实验室华裔学者李锦辉应邀在开幕式上作了"Spoken Language Understanding System"的学术报告. 清华大学方棣棠和哈尔滨工业大学的陈会鹏也在大会上分别作了"听觉模型研究现状及动态"、"分数维方法在语音处理中的应用"的报告,受到了与会者的欢迎.

会议还就国内人机语音通讯学术界关心的"汉语语音识别与合成现状及实用化前景"、"汉语语音数据库与系统评价方法"两个问题组织了专题讨论. 到会的专家和青年科技工作者都踊跃地发表了意见,讨论十分热烈. 有的学者专门录了音,准备整理资料或回单位与大家共享.

这次会议开的很成功. 经本次会议程序委员会商定,第三届人机语音通讯学术会议将于 1994 年在四川召开

为便于学术交流中国科学院自动化所为本次会议编印了会议论文集.

本刊编辑部