

机器人关节控制系统参数的识别方法*

周学才 张启先

(北京航空航天大学 100083)

尹朝万

(中科院沈阳自动化研究所)

摘要 准确地标定和识别机器人关节控制系统的参数,是对机器人进行动力误差补偿,提高机器人动态精度的关键技术。本文提出了一种机器人控制系统参数的直接标定与识别方法,并给出了一个实例,表明该方法是正确可行的。

叙词: 机器人 动力学 标定 补偿

0 前言

目前,为适应工业机器人向高速、高精度方向发展的要求,各国学者对机器人动态精度问题展开了深入研究。在这些研究之中,出现了一类基于机器人关节电机力学、适合于改进现行工业机器人动态精度的方法。例如前馈补偿比例微分控制方法(FCPD)^[1]和离散时间内模原理方法(Discrete time internal model principle)^[2]等。这类方法可以在不同的条件下,从不同的角度,不同程度地改善和提高机器人的动态精度,从而为工业机器人向高速、高精度方向发展奠定了理论基础。但是,在这类方法应用过程中,需要机器人关节动力学的精确建模,也即需要精确知道机器人各关节控制系统的结构参数(以下简称关节控制系统参数)。

本文针对这一问题,提出了一种机器人关节控制系统参数的直接标定与识别方法,并给出了一个实例,表明这一方法的正确可行。

1 关节控制系统参数的标定与识别方法

对于现行的大多数工业机器人,其关节都采用直流永磁力矩电机驱动。这类工业机器人的各个驱动关节实质上都是带有比例微分(PD)反馈及扰动输入的双输入单输出二阶系统^[7]。其动态特性可用下面的微分方程来描述。

* 中科院机器人学开放研究实验室资助课题。19920408收到初稿,19920915收到修改稿

$$\dot{q}_{Lj}^d(t) + C_j q_{Lj}^d(t) = A_j q_{Lj}(t) + B_j \dot{q}_{Lj}(t) + C_j q_{Lj}(t) + E_j D_j(t) \quad (1)$$

式中

t ——时间变量

j —— $j = 1, 2, \dots, m$, m 为机器人的自由度

$q_{Lj}^d, \dot{q}_{Lj}^d$ ——分别为关节空间内机器人的指令轨迹和沿轨迹的指令速度

$q_{Lj}, \dot{q}_{Lj}, \ddot{q}_{Lj}$ ——分别为在关节空间内机器人的实际轨迹和沿实际轨迹的速度、加速度

D_j ——作用在机器人第 j 关节上的, 由重力负载和杆件离心效应等产生的扰动力矩

A_j, B_j, C_j, E_j ——为关节控制系统参数

现在的问题是, 如何利用现有的测试手段, 由式(1)所表达的机器人关节控制系统的动态特性方程来标定和识别出机器人关节控制系统参数 A_j, B_j, C_j, E_j ($j = 1, 2, \dots, m$)。

作者认为有以下两种可供选择的解决方法: 即直接标定法和综合标定法。采用前一种方法时, 在各驱动关节安装位移传感器或直接利用机器人本身的各关节位移检测器, 于关节空间实时记录对应指令轨迹的动态跟踪轨迹, 并由系统动态特性方程(1)来识别出系统的参数。用后一种方法时, 可利用诸如 PSD 位置测量系统, 在工作空间实时记录机器人末端对应指令轨迹的动态跟踪轨迹, 并由系统动态特性方程来识别出系统的参数。由于后一方法的精度受到机器人几何误差的影响, 而且涉及到测量系统坐标与机器人坐标间的坐标变换标定的复杂过程, 很难精确得到系统的参数, 所以, 本文建议采纳第一种方法, 即直接标定法。

1.1 关节控制系统参数的直接标定法

这一方法是利用机器人各关节实时响应指令轨迹的动态跟踪轨迹信息来确定系统参数的。其标定过程如下:

(1) 利用机器人各关节位移检测器 (通常是角编码器) 实时测量与记录机器人响应指令轨迹的动态跟踪轨迹。

(2) 由各关节指令轨迹计算各关节控制系统所受到的扰动力矩 (注: 如果指令轨迹在工作空间给出, 则须先调用该机器人的逆运动学求出与之对应的各关节指令轨迹)。

(3) 将(1)、(2)的结果代入式(1), 求解出关节控制系统的全部参数。

以下详述上述过程的实现方法。

1.1.1 关节空间内机器人动态跟踪轨迹的确定

为实时测出机器人对应于指令轨迹的动态响应轨迹, 可令机器人在其规定的 100% 的速度下沿指令轨迹运动, 同时利用机器人控制器和各关节位移检测器进行实时采样并存储各关节对应指令轨迹的动态跟踪轨迹。

设采样周期为 T , 则对任一瞬时 $t_i = iT$, $i = 1, 2, \dots, N$ (N 为采样点数), 机器人第 j 关节 ($j = 1, 2, \dots, m$) 的动态响应为

$$q_{Lj} = q_{Lj}(t_i), \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

为准确求出与该动态响应对应的沿轨迹的速度 $\dot{q}_{Lj}(t_i)$ 和加速度 $\ddot{q}_{Lj}(t_i)$, 现在在时间采样值序列每个小区间 $[t_i, t_{i+1}]$, ($i = 0, 1, \dots, N-1$) 上作三次样条插值, 可得样条函数

$$\begin{aligned}
 S_j(t) = & \frac{\mu_i(t_{i+1}-t)^3}{6T} + \frac{\mu_{i-1}(t-t_i)^3}{6T} \\
 & + \left[\frac{q_{Lj}(t_{i+1}) - q_{Lj}(t_i)}{T} - \frac{T}{6}(\mu_{i+1} - \mu_i) \right] (t - t_i) \\
 & + q_{Lj}(t_i) - \mu_i \frac{T^2}{6}
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$j = 1, 2, \dots, m$$

$\mu_i = \dot{S}_j(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$ 由下式确定

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & 1 & 4 & 1 & \\ & & 1 & 4 & 1 \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_{N-1} \\ \mu_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ 2\lambda_1 \\ 2\lambda_2 \\ \vdots \\ 2\lambda_{N-1} \\ \lambda_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\lambda_i = \frac{3}{T^2} [q_{Lj}(t_{i+1}) - 2q_{Lj}(t_i) + q_{Lj}(t_{i-1})], \quad i = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{T^2} [q_{Lj}(t_3) - 3q_{Lj}(t_2) + 3q_{Lj}(t_1) - q_{Lj}(t_0)]$$

$$\lambda_N = -\frac{1}{T^2} [q_{Lj}(t_N) - 3q_{Lj}(t_{N-1}) + 3q_{Lj}(t_{N-2}) - q_{Lj}(t_{N-3})]$$

可以证明^[6], 当 $q_{Lj}(t)$ 在采样区间内具有四阶连续导数时, 则当 $T \rightarrow 0$ 时, 有 $S_j(t)$ 一致收敛于 $q_{Lj}(t)$; $\dot{S}_j(t)$ 一致收敛于 $\dot{q}_{Lj}(t)$; 且 $S_j(t) - q_{Lj}(t) = o(T^4)$, $\dot{S}_j(t) - \dot{q}_{Lj}(t) = o(T^3)$, $\ddot{S}_j(t) - \ddot{q}_{Lj}(t) = o(T^2)$ 。一般, 机器人关节伺服控制器的采样周期可以很小 (例如, 对 PUMA560, $T \approx 0.875 \text{ ms}$), 所以我们有充分的理由认为, 在保证足够精度的条件下, 有

$$\begin{cases} q_{Lj}(t_i) = S_j(t_i) = \frac{q_{Lj}(t_{i+1}) - q_{Lj}(t_i)}{T} - \frac{T}{3}\mu_i - \frac{T}{6}\mu_{i+1} \\ j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} q_{Lj}(t_i) = S_j(t_i) = \mu_i \\ j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (6)$$

这样, 由机器人控制器存储的各关节动态跟踪轨迹, 就可以同时确定与之对应的沿轨迹的速度和加速度。

1.1.2 各关节扰动力矩的确定

假定所研究的机器人运动为刚体运动, 则在已给定指令轨迹的条件下, 求解机器人各关节的扰动力矩, 实质上就是求解动力学逆问题。因此, 应用拉格朗日—欧拉方法, 可写

出〔7〕

$$D_j(t_i) = \sum_{k=1}^m D_{jk} \ddot{q}_{Lk}^d(t_i) + I_{sj} \ddot{q}_{Lj}^d(t_i) + \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^m h_{jkn} \dot{q}_{Lk}^d(t_i) \dot{q}_{Ln}^d(t_i) + G_j(t_i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中

I_{sj} ——驱动关节 j 的反射惯量 (Reflected Inertia)

D_{jj}, D_{jk} ——关节 j 的有效惯量和关节 j 与关节 k 间的耦合惯量

h_{jkn}, h_{jkm} ——离心及哥氏力

G_j ——重力负载, 包括有效载荷

由于机器人的惯性参数 (质量, 质心坐标, 反射惯量) 已有现成的方法〔3, 4, 5〕可以求出, 所以, 由式 (7) 可计算出机器人各关节的扰动力矩。

1.1.3 关节控制系统参数的确定

为叙述方便, 令

$$\begin{cases} K_{1j}(t_i) = q_{Lj}(t_i), & K_{2j}(t_i) = \dot{q}_{Lj}(t_i) \\ K_{3j}(t_i) = [q_{Lj}(t_i) - q_{Lj}^d(t_i)] \\ K_{4j}(t_i) = D_j(t_i), & j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (8)$$

则由式 (1) 对于任一用于计算的采样点 k ($k = 1, 2, \dots, Nk$) 有

$$[K_{1j}(t_k), K_{2j}(t_k), K_{3j}(t_k), K_{4j}(t_k)] \begin{bmatrix} A_j \\ B_j \\ C_j \\ E_j \end{bmatrix} = \ddot{q}_{Lj}^d(t_k) \quad (9)$$

又令

$$K_j = \begin{bmatrix} K_{1j}(t_1) & K_{2j}(t_1) & K_{3j}(t_1) & K_{4j}(t_1) \\ K_{1j}(t_2) & K_{2j}(t_2) & K_{3j}(t_2) & K_{4j}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{1j}(t_{Nk}) & K_{2j}(t_{Nk}) & K_{3j}(t_{Nk}) & K_{4j}(t_{Nk}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

(Nk 为用于计算的采样点总数)

$$\beta_j = [A_j, B_j, C_j, E_j]^T \quad (11)$$

(右上角标 T 表示对矩阵转置)

$$H_j = [q_{Lj}^d(t_1), q_{Lj}^d(t_2), \dots, q_{Lj}^d(t_{Nk})]^T \quad (12)$$

则有

$$K_j \beta_j = H_j \quad (13)$$

应用 Gauss 最小二乘理论, 可写出最小二乘意义下的 (13) 式的最优解为

$$\beta_j = (K_j^T K_j)^{-1} K_j^T H_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

这样, 我们就间接地识别出机器人各关节控制系统的全部参数。

2 数值实例

为表明本文所述方法的正确与可行性, 现就一 2 自由度机器人 (如图 1) 进行研究。该机器人的几何及动力学参数如表 1 所示。

所取指令轨迹为 (参见图 3、图 4)

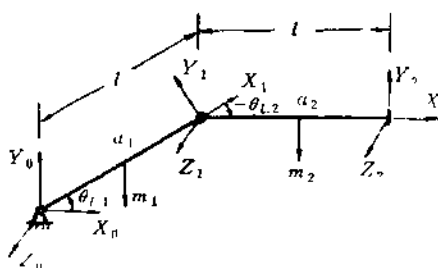


图 1 二自由度机器人

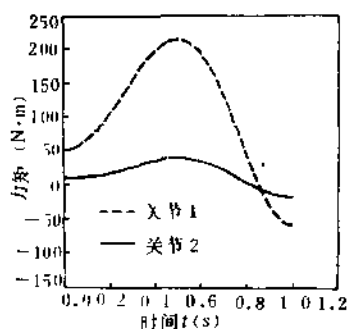


图 2 关节扰动力矩

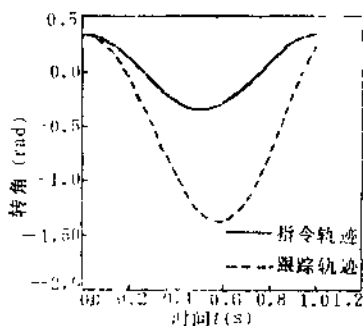


图 3 关节 1 的动态响应

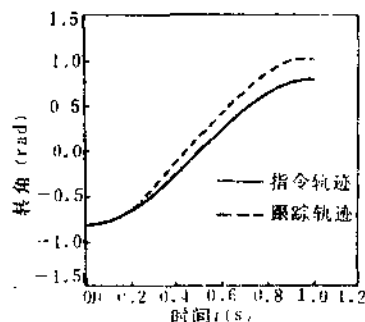


图 4 关节 2 的动态响应

表 1 几何及动力学参数

关节	θ_{Li} (rad)	a_i (m)	m_i (kg)	$\bar{x}_i$ (m)	$\bar{y}_i$ (m)	I_{ai} (kg·m ²)
1	θ_{L1}	0.4318	23.11	-0.2159	0.0	2.3616
2	θ_{L2}	0.4318	10.02	-0.2159	0.0	0.5827
说明	m_i ——杆质量 $\bar{x}_i, \bar{y}_i$ ——质心坐标					

$$\begin{cases} \theta_{L1}^d(t) = 0.3391667 \cos(2\pi t) \\ \theta_{L2}^d(t) = -0.8 \cos(\pi t) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 1$$

机器人所受的扰动力矩方程为 (参见图 2)

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 m_1 l^2 + 4/3 m_2 l^2 + m_2 \cos(\theta_{L2}^d) l^2 & 1/3 m_2 l^2 + 1/2 m_2 l^2 \cos(\theta_{L2}^d) \\ 1/3 m_2 l^2 + 1/2 m_2 l^2 \cos(\theta_{L2}^d) & 1/3 m_2 l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{L1}^d \\ \ddot{\theta}_{L2}^d \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} -1/2 m_2 \sin(\theta_{L2}^d) l^2 (\dot{\theta}_{L2}^d)^2 - m_2 \sin(\theta_{L2}^d) l^2 \dot{\theta}_{L1}^d \dot{\theta}_{L2}^d \\ 1/2 m_2 \sin(\theta_{L2}^d) l^2 (\dot{\theta}_{L1}^d)^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{e1} \theta_{L1}^d \\ I_{e2} \theta_{L2}^d \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} 1/2 m_1 g l \cos(\theta_{L1}^d) + 1/2 m_2 g l \cos(\theta_{L1}^d + \theta_{L2}^d) + m_2 g l \cos(\theta_{L1}^d) \\ 1/2 m_2 g l \cos(\theta_{L1}^d + \theta_{L2}^d) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

式中 g ——重力加速度 ($g = 9.806 \text{ m/s}^2$)

图 3、图 4 分别表示机器人关节 1 与关节 2 的指令轨迹和动态响应轨迹。总采样时间为 1s, 采样周期约为 10ms。表 2 为按本文方法的标定识别结果。这一结果与机器人关节控制系统参数的真实值是基本吻合的。

表 2 关节控制系统参数

关 节 j		A_j	B_j	C_j	E_j
1	原始值	0.0385484	0.7709680	3.854839	0.0201613
	识别值	0.038573	0.770091	3.848115	0.020118
2	原始值	0.0150	0.4500	3.3900	0.0185
	识别值	0.014161	0.462271	3.219147	0.018243

注: 表中“原始值”即给定系统的真实值。

3 结论

本文提出了一种机器人关节控制系统参数的直接标定与识别方法。这一方法只须利用机器人本身的控制器及位移检测器来确定机器人关节控制系统对应指令轨迹的动态跟踪轨迹, 成功地避开了综合标定方法的复杂测量与识别过程。数值实例显示了这种方法的正确有效性。

致谢 本文在撰写过程中, 得到了华南理工大学郑时雄教授和中科院沈阳自动化研究所谈大龙研究员的热情支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Leahy M B, Jr, Saridis G N. Compensation of Industrial Manipulator Dynamics. The International Journal of Robotics Research, 1989, 8(4):73~84
- 2 Middleton R H, et al. A Method for Improving the Dynamic Accuracy of a Robot Performing a Repetitive Task. The International Journal of Robotics Research, 1989, 8(5):67~74
- 3 Lim T G, et al. A Parameter Identification Method for Robot Dynamic Models Using a Balancing Mechanism. Robotica, 1989, 7:327~337
- 4 Sheu Shihying, Walker M W. Identifying the Independent Inertial Parameter Space of Robot Manipulators. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(6): 668~683

- 5 Tarn T J, Bejczy A K, et al. Dynamic Equations for PUMA560 Robot Arm. Washington University Robotics Laboratory Report SSM-RL-86-05, 1986.
- 6 Forsythe G E 等. 计算机数值计算方法. 计九三译, 北京: 清华大学出版社, 1987.
- 7 付京逊等. 机器人学. 杨静宇等译, 中国科技出版社, 1989.

A PARAMETER IDENTIFICATION METHOD FOR THE JOINT CONTROL SYSTEM OF ROBOTS

Zhou Xuecai Zhang Qixian

(Beijing University of Aeronautics & Astronautics)

Yin Chaowan

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences)

Abstract To accurately calibrate and identify the parameters of robot joint control system is the key technique for carrying out the scheme of dynamic compensations and for improving the dynamic accuracy of robots. In this paper, the method of direct parameter calibration and identification for robot joint control systems is proposed and the correctness is perfectly demonstrated by a true example on a robot with two degrees of freedom.

Key words: Robot Dynamics Calibration Compensation

作者简介 周学才, 1955年4月出生, 北京航空航天大学机器人研究中心博士研究生, 讲师。主要从事机器人精度方面的研究。近年来先后在国内外发表有关上述研究论文10余篇(英文2篇), 曾获能源部葛州坝水电工程学院科技进步二等奖。