

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201706082



# 六自由度机械臂运动轨迹自动生成方法仿真与实现

余乐<sup>1,2</sup>, 李庆<sup>1,2</sup>, 郑力新<sup>1,2</sup>, 朱建清<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021;

2. 华侨大学 工业智能化技术与系统福建省高校工程研究中心, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 运用运动捕捉系统,结合机器人运动学方法,提出一种六自由度机械臂运动轨迹自动生成方法.首先,在运动捕捉系统下得到人手臂末端的 Marker 标记点的位姿信息;然后,通过数据处理得到标记点的位姿矩阵,并将其作为机械臂末端执行器的位姿矩阵,进而通过数据流通道将该数据传入机器人运动学仿真系统,在仿真系统中运用代数解法求机器人运动学逆解,并进行运动学仿真.最后,将逆解求得的 6 个关节角度传入机械臂本体,实现机械臂末端执行器按照运动捕捉系统下手臂末端标记点的运动轨迹而运动.仿真实验表明:该方法具有可行性.

**关键词:** 机械臂; 六自由度; 运动捕捉系统; 机器人运动学; 运动学仿真; 轨迹生成

**中图分类号:** TP 242.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0355-05

## Simulation and Relization of Motion Trajectory Automatic Generation Method of Six Degrees of Freedom Mechanical Arm

YU Le<sup>1,2</sup>, LI Qing<sup>1,2</sup>, ZHENG Lixin<sup>1,2</sup>, ZHU Jianqing<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Engineering Research Center of Fujian Province Industrial Intelligent Technology and System,  
Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Using the motion capture system and the robot kinematics method, a six degree of freedom mechanical arm's motion automatic generation method is proposed. Firstly, the pose information of the marker at the end of the human arm is obtained under the motion capture system, and then obtain the pose matrix of the marker by means of data processing, and used it as the pose matrix of the end effector of the mechanical arm. Then, through the data stream channel, the data is imported into the robot kinematics simulation system. In the simulation system, the algebraic solution is used to solve the inverse kinematics and the kinematics simulation is carried out. Finally, the 6 joint angles obtained from the inverse solution are introduced into the mechanical arm, and the end effector of the mechanical arm is moved according to the trajectory of the marker of the the arm end under the motion capture system. Simulated experiment shows that the proposed method is

**收稿日期:** 2017-06-28

**通信作者:** 郑力新(1967-),男,教授,博士,主要从事运动控制、机器视觉、图像处理与模式识别的研究. E-mail: 1275373176@qq.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61602191);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20173045);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1511422005)

feasible.

**Keywords:** mechanical arm; six degree of freedom; motion capture system; robot kinematics; kinematics simulation; trajectory generation

在机器人的发展过程中,模仿人类运动一直是一个主要研究和实现的方向,从实现最简单的“两足步行”到仅仅通过观察就能模仿人类动作. 模仿学习<sup>[1-4]</sup>已经受到越来越多研究者的关注. 在国外,Rosa-do 等<sup>[5]</sup>使用 Kinect 捕捉人手臂动作,并提出了一种改进骨架的姿态修正算法再现手臂动作. Durdu 等<sup>[6]</sup>提出和设计出了一个模拟人类手臂的机器人手臂,然后使用人工神经网络进行分类,而机械臂执行这些分类后的结果是实现模仿人体手臂动作. 在国内,对于机器人动作模仿的研究也有不少成果. 于建均等<sup>[7-8]</sup>将体态感知技术与 Nao 机器人结合,以机器人的模仿学习框架为指导实现机器人动作模仿,通过 BP 神经网络建立模仿学习策略实现机械臂对示教行为的快速学习. 陈家顺<sup>[9]</sup>基于 Kinect 传感器和语音交互,提出的 BP 人工神经网络算法能对比较简单的动作序列进行识别,实现机器人的动作模仿. 本文提出在运动捕捉系统下得到人手臂末端的 Marker 标记点的位姿信息,并通过运动学反解到机器人各关节数据,从而实现机器人仿人手臂末端轨迹的生成.

1 运动捕捉系统

采用的 OptiTrack 运动捕捉系统具有红外影像追踪技术,能对人体和目标物的三维运动进行分析和重建,支持物体的六自由度数据实时和离线处理,如图 1 所示.

系统的主要部件是内置现场可编程门阵列(FPGA)处理芯片的智能摄像机,采用 850 nm 红外感光互补金属氧化物半导体(CMOS),分辨率有 30 万,130 万,170 万和 410 万等 4 个像素级别,能实时跟踪高速运动物体的轨迹,定位精度高达 0.1 mm. 系统配还备一些特制并能识别和处理的标记点,通过标记点的红外成像,实时获取标记点在空间中的位置,当相机帧率够高,就能得到该点的运动轨迹<sup>[10]</sup>.

2 六自由度机械臂逆解求解

采用 D-H 坐标对上海新时达 SA 1400 型六自由度机器人(机械臂)建立运动学模型,其参数如表 1 所示. 图 2 为六自由度机器人(机械臂)的结构示意图.

表 1 SA 1400 型机器人 D-H 坐标参数  
Tab. 1 SA 1400 robot D-H coordinate parameters

连杆 $i$	$\alpha_i/(^{\circ})$	$a_i/\text{mm}$	$d_i/\text{mm}$	$\theta_i/(^{\circ})$	变量范围/ $(^{\circ})$
1	-90	180	415	$-\theta_1$	-160~160
2	0	590	0	$\theta_2-90$	-80~145
3	-90	115	0	$\theta_3$	-190~65
4	90	0	625	$-\theta_4$	-165~165
5	-90	0	0	$\theta_5$	-115~115
6	0	0	98	$-\theta_6$	-360~360

相邻连杆  $i-1$  相对于连杆  $i$  的变换矩阵为

$$A_i = R(z, \theta_i) T(0, 0, d_i) T(\alpha_i, 0, 0) R(x, \alpha_i) =$$
$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & -a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

末端执行器的位姿矩阵为

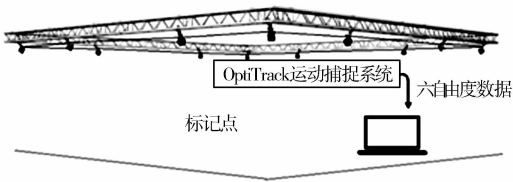


图 1 OptiTrack 运动捕捉系统  
Fig. 1 OptiTrack motion capture system

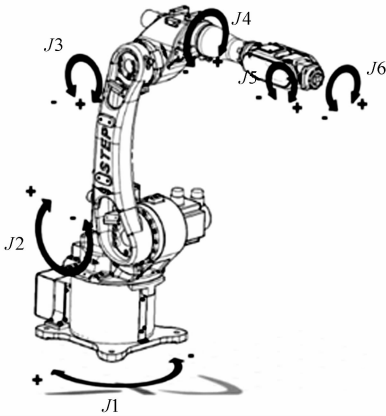


图 2 SA 1400 型机器人  
各关节运动示意图  
Fig. 2 Motion diagram of  
SA 1400 robot joints

$$\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5 \mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对于六自由度机器人而言,运动学反解非常复杂,一般没有封闭解. SA 1400 型机械臂 3 个相邻关节 4,5,6 轴线交于一点,满足三轴相交的皮贝尔解法<sup>[11]</sup>,因此可以使用皮贝尔方法解出它的封闭解. 机械臂的运动学逆解封闭解可以通过代数解和几何解得到. 文中采用代数解求机械臂运动学逆解,其逆解方程为  $\mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5 = \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T} \mathbf{A}_6^{-1}$ <sup>[12]</sup>. 假设该等式左右两边矩阵乘积为  $\mathbf{A} = \mathbf{B}$ ,并分别令等式左右两边相关项元素相等,则  $\theta_i$  存在如下多解的情况.

**情况 1** 令  $\mathbf{A}(3,4) = \mathbf{B}(3,4)$ ,由此可计算得到

$$\theta_1 = \text{ATAN2}[-(p_y - d_6 a_y), p_x - d_6 a_x].$$

**情况 2** 令  $\mathbf{A}(2,4) = \mathbf{B}(2,4)$  及  $\mathbf{A}(1,4) = \mathbf{B}(1,4)$ ,可计算得到

$$\theta_2 = -\text{ATAN2}(u, v) + \text{ATAN2}(w, \pm \sqrt{v^2 + u^2 - w^2}).$$

其中:  $u = a_1 + \cos \theta_1 \cdot (a_x d_6 - p_x) + \sin \theta_1 \cdot (p_y - a_y d_6)$ ;  $v = a_z d_6 + d_1 - p_z$ ;  $w = \cos \theta_2 \cdot v + \sin \theta_2 \cdot u$ .

**情况 3** 由情况 2 可得到

$$\sin \theta_3 = -(m d_4 - n a_3) / (a_3^2 + d_4^2), \quad \cos \theta_3 = (m a_3 + n d_4) / (a_3^2 + d_4^2).$$

其中:  $m = -a_2 - v \cos \theta_2 - u \sin \theta_2$ ;  $n = -u \cos \theta_2 + v \sin \theta_2$ . 则有  $\theta_3 = \text{ATAN2}(\sin \theta_3, \cos \theta_3)$ .

**情况 4** 令  $\mathbf{A}(2,3) = \mathbf{B}(2,3)$  及  $\mathbf{A}(1,3) = \mathbf{B}(1,3)$ ,则有

$$\cos \theta_5 = (a_x \cos \theta_1 - a_y \sin \theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) - a_z \sin(\theta_2 + \theta_3).$$

进一步可得到  $\theta_5 = \arccos(\cos \theta_5)$ .

**情况 5** 令  $\mathbf{A}(3,3) = \mathbf{B}(3,3)$ ,可以得到

$$\sin \theta_4 = -(a_x \sin \theta_1 + a_y \cos \theta_1) / \sin \theta_5.$$

进一步可得到  $\theta_4 = \arcsin(\sin \theta_4)$ .

**情况 6** 令  $\mathbf{A}(3,2) = \mathbf{B}(3,2)$ ,可以得到

$$(o_x \sin \theta_1 + o_y \cos \theta_1) \cos \theta_6 - (n_x \sin \theta_1 + n_y \cos \theta_1) \sin \theta_6 = -\cos \theta_4.$$

令  $M = o_x \sin \theta_1 + o_y \cos \theta_1$ ,  $N = n_x \sin \theta_1 + n_y \cos \theta_1$ ,则有

$$\theta_6 = 2 \arctan 2((-N \pm \sqrt{N^2 + M^2 - c_{\theta_4}^2}) / M - \cos \theta_4).$$

对于  $\theta_i$  存在多解的情况,首先,根据表 1 中关节变量范围进行取舍,选择在关节变量范围的角度作为关节解. 如果两个解  $\theta_i$  均满足在关节变量范围内,则分别计算这两个解与当前角度值的欧氏距离,取其中欧氏距离最小时的  $\theta_i$  为最优解.

### 3 数据处理及传输实现

#### 3.1 数据处理

OptiTrack 运动捕捉系统下实时六自由度数据流的数据结构为  $\{X, Y, Z; \text{Yaw}, \text{Roll}, \text{Pitch}\}$ ,其中: XYZ 为轴坐标; Yaw 为偏航角; Roll 为横摇角; Pitch 为俯仰角;后 3 者一组被称为欧拉角<sup>[13-14]</sup>. 数据处理过程即为这 6 个数据转换为机器人关节空间的过程.

由于运动捕捉系统中标记点 Marker 位姿涉及到 Yaw( $\beta$ ), Roll( $\alpha$ ), Pitch( $\gamma$ ) 3 个角度,所以对 Marker 姿态描述采用的是 Z-Y-X 欧拉角表示法,即用一个绕  $z$  轴旋转  $\alpha$  角,再绕新的  $y$  轴( $y'$ )旋转  $\beta$  角,最后绕新的  $x$  轴( $x''$ )旋转  $\gamma$  角来描述任何可能的姿态<sup>[14]</sup>. 欧拉变换 Euler( $\alpha, \beta, \gamma$ )可由 3 个旋转矩阵相乘求得,即

$$\text{Euler}(\alpha, \beta, \gamma) = R(z, \alpha) R(y, \beta) R(x, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cdot \cos \gamma & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma & 0 \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta & \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \gamma & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta \cdot \sin \gamma & \cos \beta \cdot \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

那么已知 Marker 的运动姿态后,它在基系中的位姿矩阵就可以通过左乘一个对应的位置矢量  $p$  的平移变换得到,即

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \text{Euler}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

当得到 Marker 的位姿后,通过机器人运动学逆解得到 6 个关节角度;然后,通过运动学正解得到末端执行器位姿  $T_6$ . 通过机器人控制器的控制,机器人末端即可按照 Marker 的运动轨迹而运动.

3.2 数据传输的实现

OptiTrack 运动捕捉系统与 SA 1400 型机器人系统是不同的产品,是完全独立的. 因此,需要搭建一个平台,实现两个系统之间的数据传输,从而实现机械臂按照人手臂末端运动轨迹的生成.

在 Windows 系统下,工控机与 OptiTrack 运动捕捉系统通过 USB 2.0 接口连接,机械臂与工控机之间通过网络连接,用 C# 创建数据传送与接收的服务器和客户端. 运动捕捉系统软件 Motive 实时捕捉人体手臂末端标记点信息——六自由度数据,并以软件自身作为服务器,通过 Motive 配套的实时数据流通道开发包 NatNet 将数据传输到 MATLAB 程序中;然后,在 MATLAB 中进行运动学逆解求解,以及三维运动学仿真,得到的运动学逆解通过以太网 TCP/IP 协议进行数据传输;在客户端接收后,通过服务器传送到机械臂运动控制器,从而通过机械臂 API 接口驱动机械臂各个关节的运动. 如果关节角度超过机械臂运动关节角度范围,关节角度将保持与上一时刻未超标关节数据一致,避免机械臂运行卡死情况. 系统数据传输过程,如图 3 所示.

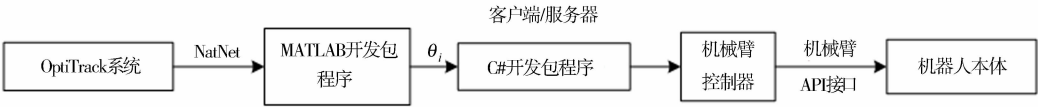


图 3 系统数据传输图  
Fig. 3 System data transfer chart

4 实验仿真及结果

为了实现机器人根据人体手部的运动生成运动轨迹的过程,在实验过程中,实验者手部拿着 Marker 标记点在运动捕捉系统下运动,运动捕捉系统实时捕捉手部标记点的数据. 经过数据处理和传输后,在机器人端轨迹再现. 在数据传入机器人控制器前需在 Matlab 中进行仿真. 其目的是为了更直观地显示机器人是否运动异常及各关节是否异常. 在 Matlab 仿真环境下,机器人末端的轨迹再现,机器人末端会按照运动捕捉系统下标记点的运动轨迹运动,如图 4 所示.

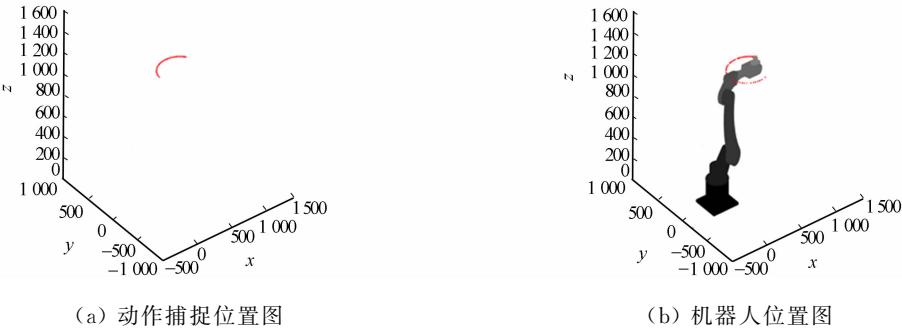


图 4 运动捕捉系统与机器人系统运动轨迹仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of motion capture system and robot system motion trajectory

由图 4 可知:在仿真系统下,机器人末端能够实时按照运动捕捉系统下标记的运动轨迹而跟随运动,这在一定程度上说明两个系统的结合是可行的.

在实际操作中,记录运动捕捉系统下 Marker 点位置信息与同时刻机器人系统下末端执行器的位

置信息,如表 2 所示.由表 2 可知:运动捕捉系统下的数据是基本可以准确传输到机器人系统下,经多次实验验证在实际操作中机器人末端能按照运动捕捉系统下的 Marker 点的运动轨迹而运动.

表 2 Marker 点位置坐标与同时刻机器人末端执行器位置坐标

Tab.2 Marker point position coordinates and position coordinates of end effector at same time

Marker 点位置/mm			机器人末端执行器世界坐标/mm		
X	Y	Z	X	Y	Z
-726	1 068	421	-727	1 068	421
-818	1 067	458	-818	1 067	458
-600	1 067	-101	-600	1 067	-101
-640	1 032	-50	-640	1 032	-50
-713	1 025	-124	-713	1 025	-124

5 结束语

将运动捕捉系统与机器人结合作为一种人机交互方式,使用运动捕捉系统下的 Marker 点的位姿信息通过数据处理得到了机器人关节数据,建立了服务器和客户端,实现了端到端的数据传输.经过实验仿真,能够实现机器人按照 Marker 点的运动而运动.

参考文献:

[1] BAKKER P,KUNIYOSHI Y. Robot see, robot do: An overview of robot imitation[C]// Aisb96 Workshop on Learning in Robots and Animals. Brighton:[s. n. ],1996:3-11.

[2] WANG Qizhi,XU De,SHI Luyan. A review on robot learning and controlling: Imitation learning and human-computer interaction[C]//Control and Decision Conference. Guiyang:IEEE Press,2013:2834-2838.

[3] 于建均,门玉森,阮晓钢,等. 模仿学习在机器人仿生机制研究中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2016,42(2):210-216. DOI:10. 11936/bjtxb2014090072.

[4] GUEDJOU H,BOUCENNA S,CHETOUANI M. Posture recognition analysis during human-robot imitation learning[C]//Joint IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics. [S. l. ]:IEEE Press,2017:193-194.

[5] ROSADO J,SILVA F,SANTOS V,*et al.* Reproduction of human arm movements using Kinect-based motion capture data[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenzhen:IEEE Press,2013:885-890. DOI:10. 1109/ROBIO. 2013. 6739574.

[6] DURDU A,CETIN H,KOMUR H. Robot imitation of human arm via artificial neural network[C]// International Conference on Mechatronics-Mechatronika. Brno:IEEE Press,2015:370-374. DOI: 10. 1109/MECHATRONIKA. 2014. 7018286.

[7] 于建均,门玉森,阮晓钢,等. 基于 Kinect 的 Nao 机器人动作模仿系统的研究与实现[J]. 智能系统学报,2016,11(2):180-187. DOI:10. 11992/tis. 201511020.

[8] 于建均,徐骢驰,阮晓钢,等. 基于神经网络的机械臂的模仿学习研究[J]. 控制工程,2017(11):2368-2373. DOI:10. 14107/j. cnki. kzgc. 150746.

[9] 陈家顺. 基于人机交互的机器人动作模仿学习[D]. 广州:华南理工大学,2015.

[10] 卫沅,赵京. 基于运动捕捉下的 7R 机械臂的实时控制[J]. 机械工程学报,2013,49(23):68-73. DOI:10. 3901/JME. 2013. 23. 068.

[11] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 3 版. 负超,等译. 北京:机械工业出版社,2006:88-90.

[12] 李庆,谢一首,郑力新,等. 采用 Matlab 的六自由度机器人三维运动学仿真[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016,37(3):299-303. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2016. 03. 0299.

[13] 黄真,李艳文,高峰. 空间运动构件姿态的欧拉角表示[J]. 燕山大学学报,2002,26(3):189-192. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-791X. 2002. 03. 001.

[14] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2009:35.