

基于旋量理论的仿人下肢机器人运动分析

朱惠芳

(陆军步兵学院石家庄校区 河北 石家庄 050000)

摘要: 对仿人下肢机器人正运动学的分析和研究是当今研究领域的热点。本文基于旋量理论建立了仿人下肢机器人的运动学模型; 根据指数积公式进行了仿人下肢机器人运动学正解分析并建立了运动学模型; 利用 MATLAB 进行仿真, 证明由旋量理论和指数积公式建立的机器人运动学方程的正确性和可行性。

关键词: 人体下肢; 机器人; 旋量理论; 运动学

0 引言

仿人机器人是近年热门的研究领域, 它能协助人类完成各种任务, 能够在危险环境中代替人类作业, 应用前景广阔。因此, 研究仿人机器人运动具有很高的学术价值和实际意义。本文以传统的仿人下肢 6 自由度机器人为例, 应用旋量理论建立运动学模型, 分析其运动正解问题, 并对结果进行仿真, 验证其正确性。

1 仿人下肢机器人正运动分析

仿人下肢机器人自由度的合理布置对于仿人下肢机器人是否能实现像人一样灵活运动至关重要。目前大多数的仿人下肢机器人都选择 6 自由度的方式, 其分配方式为胯关节 2 个自由度, 膝关节 2 个自由度, 踝关节 2 个自由度 (如图 1 所示)。其中, JR₁ 是右腿踝关节, RS 是右脚。JR₂ 是右腿膝关节, R₂ 是右小腿。JR₃ 是右腿胯关节, R₃ 是右大腿。W 是机器人的腰部。JL₃ 是左腿胯关节, L₃ 是左大腿。JL₂ 是左腿膝关节, L₂ 是左小腿。JL₁ 是右腿踝关节, LS 是右脚。

在进行正运动学公式推导时, 需要固定机器人的一个部位作为基准, 为此假设机器人的右脚固定在地面上, 为了简化分析, 假设机器人在运动时, 双脚始终平行于地面。仿人下肢机器人参考位形如图 2 所示。

在图 2 中, 设机器人左边的脚为惯性坐标系 S, 右边的

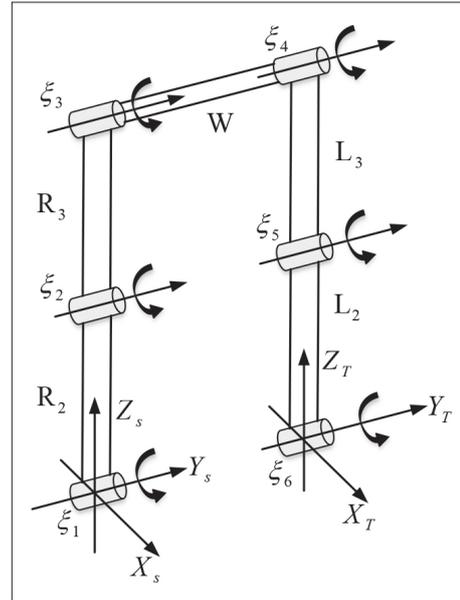


图 2 机器人参考位形

脚为工具坐标系 T, 则当各个关节角度为零时的机器人初始位形为:

$$g_{st}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W \\ 0 & 0 & 1 & R_2 + R_1 - L_3 - L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由图 2 建立每个关节的旋量运动坐标

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = [0 \ 1 \ 0]^T \quad (2)$$

根据仿人下肢机器人参考位形选取各关节轴线的点:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= [0 \ 0 \ 0]^T, \\ q_2 &= [0 \ 0 \ R_2]^T, \\ q_3 &= [0 \ 0 \ R_2 + R_3]^T, \\ q_4 &= [0 \ W \ R_2 + R_3]^T, \\ q_5 &= [0 \ W \ R_2 + R_3 - L_3]^T, \\ q_6 &= [0 \ W \ R_2 + R_3 - L_3 - L_2]^T. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由 $\xi_i = [q_i \ w_i]$ 可得到各个关节的单位旋量运动:

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T, \\ \xi_2 &= [0 \ 1 \ 0 \ -R_2 \ 0 \ 0]^T, \\ \xi_3 &= [0 \ 1 \ 0 \ -R_2 - R_3 \ 0 \ 0]^T, \\ \xi_4 &= [0 \ 1 \ 0 \ -R_2 - R_3 \ 0 \ 0]^T, \\ \xi_5 &= [0 \ 1 \ 0 \ -R_2 - R_3 + L_3 \ 0 \ 0]^T, \\ \xi_6 &= [0 \ 1 \ 0 \ -R_2 - R_3 + L_3 + L_2 \ 0 \ 0]^T. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

于是整个运动学的正解为:

$$g_{st}(\theta) = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} g_{st}(0) = \begin{bmatrix} R(\theta) & P(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

若记 $R(\theta) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$, $P(\theta) = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$ 则有:

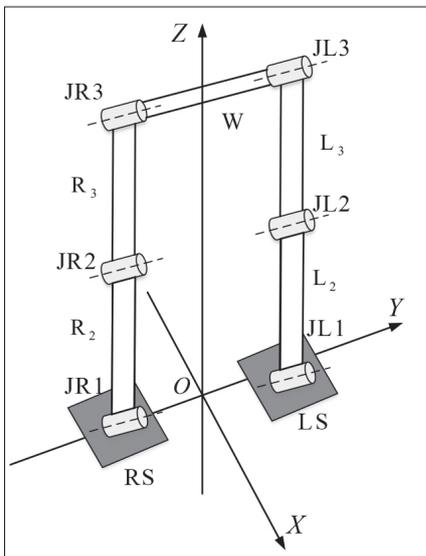


图 1 仿人下肢机器人构成图

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6), r_{12} = 0, r_{13} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6), \\
 r_{21} &= 0, r_{22} = 1, r_{23} = 0, \\
 r_{31} &= -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6), r_{32} = 0, r_{33} = -\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6), \\
 p_1 &= R_3 \sin(\theta_1 + \theta_2) - L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + R_2 \sin(\theta_1) - L_2(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5), \\
 p_2 &= W, \\
 p_3 &= R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2) - L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + R_2 \cos(\theta_1) - L_2(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5).
 \end{aligned}$$

2 仿真分析

由公式 (1) ~ 公式 (5), 就可以根据机器人的各关节脚值 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$, 计算各个关节 (右脚 JR₁、右膝 JR₂、右胯 JR₃、左胯 JL₃、左膝 JL₂ 和左脚 JL₁) 在惯性坐标系 S 中的位置坐标。利用 MATLAB 正运动学理论控制机器人的仿真程序, 进行仿真验证。

设定机器人参数: $R_2=R_3=L_2=L_3=W=100\text{mm}, RS=LS=40 \times 40\text{mm}$, 任意抽取二组关节数值。

(1) 当 $\theta_1=\theta_2=\theta_3=\theta_4=\theta_5=\theta_6=15^\circ$ 时, 如图 3 所示;

(2) 当 $\theta_1=\theta_2=\theta_3=\theta_5=\theta_6=30^\circ, \theta_4=-30^\circ$ 时, 如图 4 所示。

从上面正运动学理论控制机器人仿真图, 可以看出由旋量理论和指数积公式建立的机器人正运动学方程的正确性, 以及旋量理论应用于刚体正运动学分析的可行性。

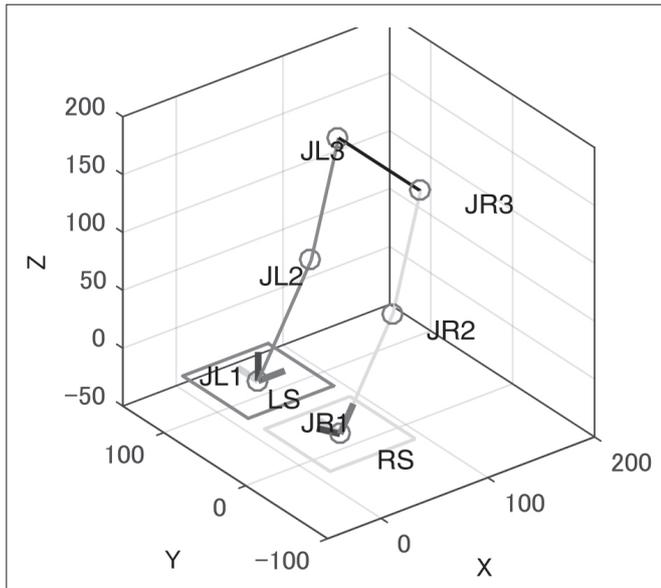


图 3 15 度示意图

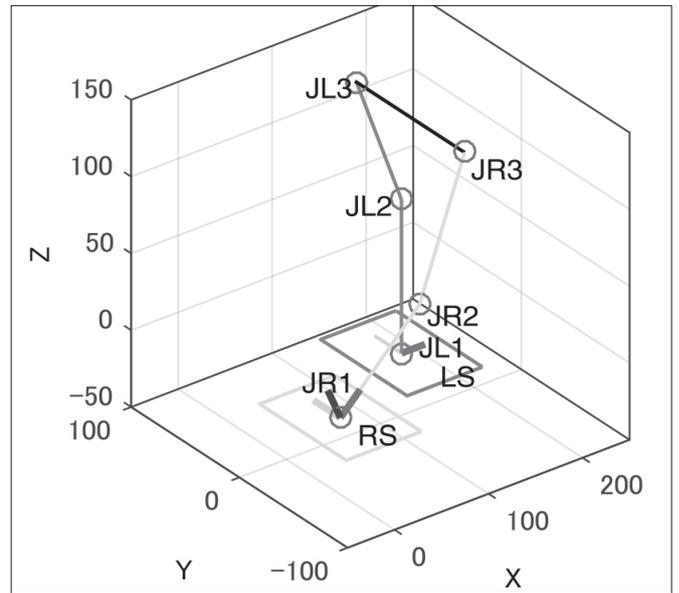


图 4 30 度示意图

3 结语

本文应用旋量理论推导了仿人下肢机器人的运动学分解方程, 该过程具有较高的全局性、明显的几何意义。利用 MATLAB 仿真验证了运动学方程的正确性, 为建立机器人动力学模型与探索机器人运动规划提供了新的途径, 奠定了理论基础。

参考文献:

[1] 张伯, 黄强, 李光日, et al. 具有 7 自由度和双球型髋关节的仿人机器人下肢运动分析与规划 [J]. 机器人, 2007, 29(6):558-562.

[2] 戴建生. 机构学与机器人学的几何基础与旋量代数 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.

[3] 摩雷. 机器人操作的数学导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[4] 谈全一. 仿人机器人下肢机构设计与分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2014.

[5] 张禹, 丁磊宇. 基于 Matlab 的 6R 工业机器人运动学仿真与研究 [J]. 机械工程师, 2017(1):24-27.