

仿人机器人的腰部结构设计及动力学分析

郑 勐 胡艳凯 李 恒 何备林

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 针对目前市场上机器人各运动关节都需要靠伺服电机驱动的情况,设计了一台具有躲闪功能的仿人机器人。采用单电机驱动并通过控制电磁离合器的状态,实现腰部关节的运动,最终完成机器人的躲闪动作。为了验证其主要零部件选型的正确性和结构设计的合理性,运用拉格朗日函数对机器人躯干结构进行了动力学研究;然后利用 ADAMS 软件对机器人虚拟样机进行动力学仿真分析,得到相应的关节转矩曲线;最后,完成机器人实物装配并通过实验测试对机器人躲闪功能进行了验证。

关键词 躲闪功能 仿人机器人 拉格朗日动力学 ADAMS

Waist Structure Design and Dynamics Analysis of Humanoid Robot

Zheng Meng Hu Yankai Li Heng He Beilin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract In view of the simple structure of the robot in the current market and the fact that each joint is driven by a servo motor, a humanoid robot with a dodge function is designed, which is driven by a single motor and controls the state of the electromagnetic clutch to realize the movement of the lumbar joint. And finally the dodge motion of robot is completed. In order to verify the correctness of the main component selection and the rationality of the structural design, the dynamics of the robot trunk structure is studied by using the Lagrangian Function, and then the dynamics simulation analysis of the robot virtual prototype is performed by using ADAMS software, the corresponding joint torque curve is obtained. Finally, the robot physical assembly is completed and the dodge function is verified through experimental test.

Key words Dodge function Humanoid robot Lagrangian dynamics ADAMS

0 引言

近些年,仿人机器人得到了空前的发展,它能完成的动作越来越复杂,如动态行走、跌倒起立、对路径或图像进行动态规划、全身协调运动等^[1-5];然而,机器人完成动作质量的高低不仅依靠智能系统或者控制系统,仿人机器人本体的结构设计也是非常重要的环节^[6-7]。另外,机器人多模态的运动动作对机器人躯干结构提出了很高的要求,尤其仿人机器人上半身结构,它对协调、补偿机器人整体运动至关重要,因此,机器人的本体结构设计的好坏决定着这些精密系统运行效率高低。近些年,国内仿人机器人领域得到了一定的发展,针对机器人对腰部结构的研究还不是很深入^[8],但其在机器人运动中的作用是必不可少的,它可以保持机器人的稳定,

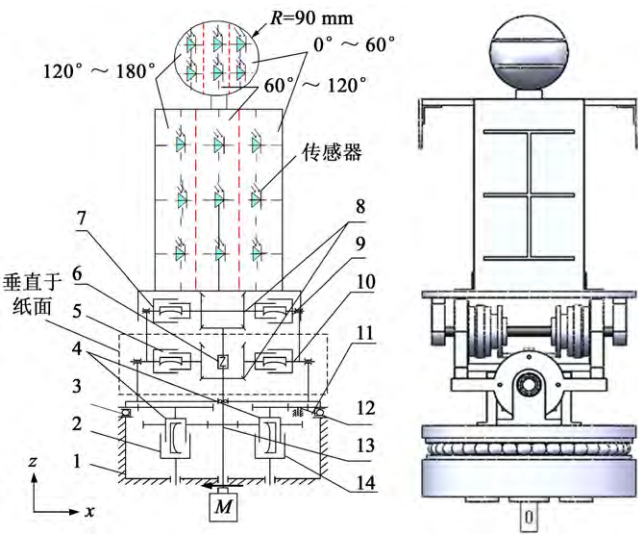
在重心偏移的情况下,可以通过腰部关节的运动进行补偿。基于此,本文中我们提出了一种具有3自由度躲闪功能的仿人机器人上身结构并对其各运动关节进行了动力学分析。

1 机器人结构设计

1.1 机器人躯干结构设计

机器人上半身以及头部结构的作用主要是通过搭载传感器感应障碍物,考虑到轻量化的设计原则^[9],机器人上半身及头部由两块支撑肋板以及前后两块铝板构成,头部是一个圆球,并在球体上开槽,槽孔里装有传感器,用来测量与障碍物的距离。设计躲闪动作分为以下几部分:头部及上身分3个部位($0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$),当来袭物距机器人100 mm时,机器人产生躲避动作,当不同部位的

传感器识别到物体时, 相对应地完成不同的躲闪动作, 如图 1 所示。



1 腰部底座; 3 推力球轴承; 4 直齿轮; 6 十字联轴器; 8 锥齿轮; 11 盖板及内齿轮; 12 过渡齿轮; 13 主轴及输入齿轮; 2、5、7、9、10、14 电磁离合器

图 1 仿人机器人

机器人自由度主要分布在腰部, 腰部结构依靠齿轮传递运动, 利用不同电磁离合器的吸合与断开实现运动的换向。腰部自由度等于 3, 分别是回转运动、左右摆动以及前后俯仰运动。图 1 中电机 M 驱动主轴沿顺时针转动, 主轴及输入齿轮 13 将运动传递到固定在电磁离合器 2 的齿轮上, 然后通过齿轮 4 (图中左边) 与固定在盖板上的内齿轮 11 的啮合, 使机器人腰部完成正转运动; 主轴及输入齿轮 13 将运动传递到固定在电磁离合器 14 的齿轮上, 先通过齿轮 4 (图中右边) 与过渡齿轮 12 的啮合将运动进行反向, 过渡齿轮 12 再与固定在盖板上的内齿轮 11 啮合, 实现机器人腰部的反转运动。腰部的正反转运动是垂直于 Z 轴的正转和反转, 运动平面是 XY 面。步进电机 M 驱动主轴 13 转动, 通过锥齿轮传动传递和改变运动的方向。然后, 电磁离合器 7 吸合, 9 断开, 则实现机器人腰部的后仰运动; 反之, 电磁离合器 7 断开, 9 吸合, 则实现机器人的前倾运动, 即绕坐标轴 X 的顺时针和逆时针转动, 运动平面是 YZ 面。左右摆动的实现类似于俯仰运动, 即绕 Y 轴的顺时针和逆时针转动, 运动平面是 XZ 面。考虑到沿轴向的位移补偿, 使用万向联轴器 6 将两段主轴连接, 每节的转动极限是 45° 。

由上所述可知, 本文设计的机器人本体结构具有单驱动、控制系统简单的特点, 仅由 1 个电机驱动, 通过单片机控制电机和电磁离合器来实现机器人的不同运动。

1.2 机器人运动功能性设计

本文设计的机器人腰部结构的运动极限与人体腰部相似, 根据人体的稳定极限(LOS)^[10]以及能方便控制和更有效地躲开物体的要求, 设定躲闪机器人的转动、前倾后仰及摆动的角度在 20° 左右^[11]。躲闪动作时间的设定参考人体应急反应的时间^[12], 最终躲闪动作的时间取 $0.4\text{ s}\sim 0.8\text{ s}$ 。机器人躲闪动作的实现由 6 个电磁离合器的吸合与断开控制, 机器人末端执行器的位姿也不同。结合机器人结构设计躲闪动作的 3 个部分, 得到电磁离合器的有效组合如表 1 所示。

表 1 机器人躲闪动作及离合器的有效组合

机器人部位	躲闪动作	离合器接合编号	备注
$0^\circ\sim 60^\circ$	正转、右摆、后仰	2、5、9	每组动作时, 除了表中离合器吸合, 其余均断开。
$60^\circ\sim 120^\circ$	后仰	9	
$120^\circ\sim 180^\circ$	反转、左摆、后仰	9、10、14	

由于机器人各个关节传动比不同, 导致运动速度不同, 在能够保持平衡的状态下, 结合设定的机器人运动时间和位移范围, 得到机器人各关节的相关运动参数如表 2 所示。

表 2 各关节运动参数

部位	回转速度/ (($^\circ$)/s)	回转时间/ s	摆动、俯仰 速度/(($^\circ$)/s)	摆动、俯仰 时间/s
$0\sim 60^\circ$	35.6	0.56	225	0.09
$60^\circ\sim 120^\circ$	0	0	225 (后仰)	0.09 (后仰)
$120^\circ\sim 180^\circ$	26.3	0.76	225	0.09

当障碍物来袭时, 搭载在机器人上半身和头部的传感器接收到障碍物信号, 传递到单片机并触发芯片内的程序, 单片机控制相应的继电器开关, 间接控制电磁离合器的吸合与断开, 从而使机器人呈现不同的动作。

2 机器人动力学分析

为了验证机器人主要零部件的选型和结构设计的合理性, 选用拉格朗日功能平衡法推导机器人动力学模型。本文设计的机器人有 3 个旋转关节, 用 θ_i 表示可选择机器人相应关节的关节变量, m_i 表示各运动关节的总质量, T_i 表示各关节所受转矩, g 表示重力加速度。首先, 对 $0^\circ\sim 60^\circ$, $120^\circ\sim 180^\circ$ 部分分析, 建立机器人广义坐标系如图 2 所示。

通过分析组成机器人各运动关节相关的零部件, 分别得到各关节的质量和质心坐标如表 3 所示。

为了表示方便, 在计算过程中, 各个关节的总

质量用 m_1 、 m_2 、 m_3 来代替真实值, 相应的质心坐标分别为 $c_1 = (0 \ 0 \ -l_1)^T$ 、 $c'_2 = (l_2 \ 0 \ 0)^T$ 、 $c'_3 = (d_5 \ 0 \ l_5)^T$ 。

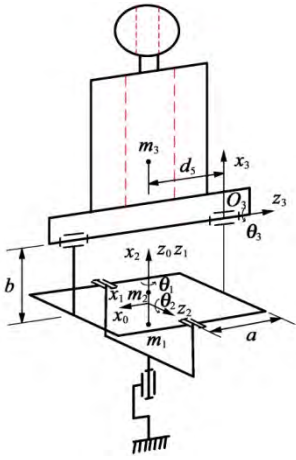


图2 机器人 $0^\circ \sim 60^\circ$ 、 $120^\circ \sim 180^\circ$ 部分广义坐标系

(1) 正反转运动(关节1)的动能(E_1)和势能(P_1)

$$E_1 = \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \dot{\theta}_1^2, \quad P_1 = -m_1 g l_1 \quad (1)$$

(2) 左右摆动(关节2)的动能(E_2)和势能(P_2)

关节2速度的求解, 首先要根据刚体的空间位姿

$$v_3^2 = [c^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_1^2 + s^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_1^2 + c^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_2^2 + s^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_2^2 + c^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + s^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + 2c\theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2s\theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2s\theta_2 s\theta_3 c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + 2s\theta_2 s\theta_3 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - 2c\theta_2 s^2 \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + c^2 (\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_2^2] d_5^2 + (s^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) (l_3^2 + a^2) + (c^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) b^2 + 2d_5 (l_3 + a) (s\theta_2 c\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1^2 + s\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - s\theta_2 c\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_2^2 - c^2 \theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) + 2d_5 b (c^2 \theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1^2 + s^2 \theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_2^2 + s\theta_2 c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) + 2b (l_3 + a) s\theta_2 c\theta_2 \dot{\theta}_1^2 + 2l_3 a (s^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2)$$

其中, $s\theta = \sin\theta$, $c\theta = \cos\theta$, $s^2\theta = \sin^2\theta$, $c^2\theta = \cos^2\theta$,

$$P_3 = m_3 g h_3 = m_3 g [-d_5 (\sin\theta_2 \cos\theta_3) + l_3 \cos\theta_2 - b \sin\theta_2 + a \cos\theta_2] \quad (5)$$

推导出3个关节的动能和势能后, 根据拉格朗日方程得到

$$T_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -m_2 l_2^2 s(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 d_5^2 \left\{ -\frac{1}{2} s(4\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left[\left(\frac{1}{2} c\theta_2 - c^2 \theta_2 \right) s(2\theta_2) - s\theta_2 s^2 \theta_3 \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + [s\theta_2 c(2\theta_2) - c\theta_2 s(2\theta_2) - s\theta_2 c^2 \theta_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{1}{2} c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 \right\} + m_3 (l_3^2 - b^2 + a^2) s(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 d_5 (a + l_3) [(2c^2 \theta_2 c\theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + s(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 - s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_3^2] + m_3 [2(ab + bl_3) c(2\theta_2) + al_3 c(2\theta_2) - 2s(2\theta_2) c\theta_3 d_5 b] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2m_3 d_5 b c^2 \theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \quad (7)$$

(2) 关节2的力矩函数表达式

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = (m_1 r_1^2 + m_2 l_2^2 c^2 \theta_2) \dot{\theta}_1 + m_3 d_5^2 (c^2 \theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_1 + s^2 \theta_2 \dot{\theta}_1 + c\theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_3 + s\theta_2 s\theta_3 c\theta_3 \dot{\theta}_2 + c\theta_2 s^2 \theta_3 \dot{\theta}_3) + m_3 (l_3^2 s^2 \theta_2 + b^2 c^2 \theta_2 + a^2 s^2 \theta_2) \dot{\theta}_1 + m_3 d_5 (a + l_3) (2s\theta_2 c\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 + s\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_3 - c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2) + m_3 d_5 b (2c^2 \theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 + s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2) + m_3 [2b(a + l_3) s\theta_2 c\theta_2 + 2l_3 a s^2 \theta_2] \dot{\theta}_1 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = -m_2 l_2^2 s(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 d_5^2 [s(2\theta_2) s^2 \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - c^2 \theta_2 s(2\theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - 2s\theta_2 c(2\theta_3) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{1}{2} c\theta_2 c(2\theta_3) \dot{\theta}_2^2] + m_3 (l_3^2 - b^2 + a^2) s(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + m_3 d_5 (a + l_3) \{ 2c\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - s(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + [c(\theta_2 + \theta_3) + c\theta_2 c\theta_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \} + m_3 d_5 b (-2s\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2c^2 \theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 + s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) + m_3 [2b(a + l_3) c\theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2al_3 s(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2] \quad (9)$$

变换矩阵, 求解出关节2的质心在空间坐标系中的位置表达形式为

$$E_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + \sin^2 \theta_2 \dot{\theta}_2^2) \quad (2)$$

$$P_2 = m_2 g h_2 = m_2 g l_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

(3) 前后俯仰运动关节(关节3)的动能(E_3)和势能(P_3)

关节3与关节2的动能、势能求解的方法相同, 根据刚体的空间位姿变换矩阵求解关节3质心在空间坐标系中的位置表达形式。

$$E_3 = \frac{1}{2} m_3 v_3^2 \quad (4)$$

表3 机器人各关节的运动参数

关节 i	质量 m_i/kg	质心坐标	广义坐标 (θ_i)
正反转运动 (关节1)	6.7	(0, 0, -64.78)	θ_1
左右摆动 (关节2)	5.8	(48.22, 0, 0)	θ_2
前后俯仰 (关节3)	5.4	(105, 0, 246.5)	θ_3

式中,

$$L = E_k - E_p = (E_1 + E_2 + E_3) - (P_1 + P_2 + P_3) \quad (6)$$

式(6)中的动能和势能均为已知, 为求解机器人各个关节的动力学方程, 需构造解出机器人各关节的广义力矩, 需要对拉格朗日方程进行求解偏导数。

(1) 关节1的力矩函数表达式

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = & \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{s}(2\theta_2) \dot{\theta}_2^2 - 2c(2\theta_2) s\theta_2 \dot{\theta}_1^2) + \frac{1}{2} m_3 d_5^2 [-s\theta_2 c^2 \theta_3 \dot{\theta}_1^2 + s(2\theta_2) c^2 \theta_3 \dot{\theta}_2^2 - s(2\theta_2) c^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + 2c(2\theta_2) c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - \\ & c\theta_2 c(2\theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - s(2\theta_2 + 2\theta_3) \dot{\theta}_2^2] + (l_3^2 - b^2 + a^2) s(2\theta_2) \dot{\theta}_1^2 + 2d_5 b (-s(2\theta_2) c\theta_3 \dot{\theta}_1^2 + s(2\theta_2) c\theta_3 \dot{\theta}_2^2 + \\ & c(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) + 2b(a + l_3) c(2\theta_2) \dot{\theta}_1^2 + 2al_3 s(2\theta_2) \dot{\theta}_1^2 - m_2 gl_2 c\theta_2 + m_3 g [c(\theta_2 + \theta_3) d_5 + \\ & (a + l_3) s\theta_2 + bc\theta_2] \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)和式(10)相减得到关节2的拉格朗日数学模型为

$$T_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \quad (11)$$

(3) 关节3的力矩函数表达式

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = & m_3 d_5 \left[\frac{1}{2} c(2\theta_2) s(2\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} s(2\theta_2) c(2\theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - s(2\theta_2) c^2 \theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - c^2 \theta_2 s(2\theta_3) \dot{\theta}_3^2 - s(2\theta_3) \dot{\theta}_3^2 - \right. \\ & \left. s\theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \right] + m_3 d_5 (a + l_3) [c\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - s\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + s(2\theta_3) s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 - c^2 \theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3] + \\ & \frac{1}{2} m_3 d_5 b [2c(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 + s(2\theta_2) c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_3} = & \frac{1}{2} m_3 d_5^2 \{ s^2 \theta_2 s(2\theta_3) \dot{\theta}_1^2 - [c^2 \theta_2 s(2\theta_3) + s(2\theta_2 + 2\theta_3) \dot{\theta}_2^2 + s^2 \theta_2 s(2\theta_3) \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} s(4\theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3] + \\ & 2s\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \} + m_3 d_5 (a + l_3) (-s(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_1^2 - 2s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + s(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 - 2c^2 \theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - \\ & 2c\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) + \frac{1}{2} m_3 d_5 b (-2c^2 \theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1^2 - 2s^2 \theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2^2 + s(2\theta_2) c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + 2s\theta_2 c\theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_3 g d_5 s\theta_2 s\theta_3 \end{aligned} \quad (14)$$

上述式(7)~式(14)中, $s\theta = \sin\theta$, $c\theta = \cos\theta$, $s^2\theta = \sin^2\theta$, $c^2\theta = \cos^2\theta$, $s2\theta = \sin2\theta$, $c2\theta = \cos2\theta$ 。

式(13)与式(14)相减得到关节3的拉格朗日数学模型为

$$T_3 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} \quad (15)$$

本文设计的运动是匀角速度转动,其大小根据机器人躲闪动作的设计可知;式中其他参数整理如表4所示。将表中各数据代入各关节拉格朗日方程中得到相应的拉格朗日矩阵,可用来计算得到动力学正逆解相关参数,为机器人控制系统设计做准备。

表4 拉格朗日方程相关参数表

参数	参数值	参数	参数值
$\dot{\theta}_1$	5.93 r/min(正转)	r_1	95 mm
$\dot{\theta}_1'$	4.38 r/min(反转)	l_1	-64.78 mm
$\dot{\theta}_2$	37.5 r/min	l_2	48.22 mm
$\dot{\theta}_3$	37.5 r/min	l_3	246.5 mm
m_1	6.7 kg	d_5	105 mm
m_2	5.8 kg	a	105 mm
m_3	5.34 kg	b	86 mm

对于机器人头部60°~120°部分,只有后仰动作,仅有关节3运动。对于这部分的动力学分析同样首先建立广义坐标系,如图3所示。

通过计算,得到关节3的质心 m_3 坐标为 $c''_3 = (-a - l_3 - d_5 \sin\theta_3, b + d_5 \cos\theta_3)$,根据质心坐标计算出关

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = & \frac{1}{2} m_3 d_5^2 [2(c^2 \theta_2 c^2 \theta_3 + c^2 \theta_3) \dot{\theta}_3 + 2c\theta_2 \dot{\theta}_1 + \\ & \frac{1}{2} s(2\theta_2) s(2\theta_3) \dot{\theta}_2] + m_3 d_5 (a + l_3) (s\theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_1 - \\ & c^2 \theta_2 s\theta_3 \dot{\theta}_2) + \frac{1}{2} m_3 d_5 b s(2\theta_2) s\theta_3 \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (12)$$

节3的动能和势能分别为

$$E'_3 = \frac{1}{2} m_3 d_5^2 \dot{\theta}_3^2, \quad P'_3 = m_3 g (b + d_5 \cos\theta_3) \quad (16)$$

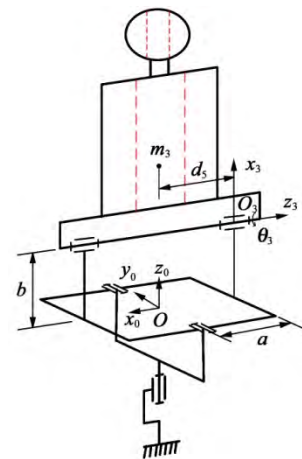


图3 机器人60°~120°部分关节3广义坐标系

此时,关节3的拉格朗日函数方程为

$$L' = E'_3 - P'_3 = \frac{1}{2} m_3 d_5^2 \dot{\theta}_3^2 - m_3 g (b + d_5 \cos\theta_3) \quad (17)$$

$$T'_3 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L'}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L'}{\partial \theta_3} = -m_3 g d_5 \sin\theta_3 \quad (18)$$

3 ADAMS仿真和实验验证

3.1 ADAMS动力学仿真

当机器人0°~60°和120°~180°两部分检测到障碍

物时,由前文可知,机器人的3个关节动作具有非同步性,首先是关节1运动,随后3个关节同时运动。因此,本文中我们对机器人进行动力学仿真时主要针对的是3个关节同时运动的情况。

本文选用ADAMS软件进行动力学仿真分析^[13-14],首先在ADAMS/view中建立机器人虚拟样机模型,然后添加相应的转动副和驱动,为了使仿真更加符合实际情况,在转动副处添加摩擦力,将电磁离合器法兰盘与电枢之间用固定副代替。最后,在ADAMS/view中进行仿真,步长设置为100,得到机器人不同情况的躲闪动作,如图4所示。

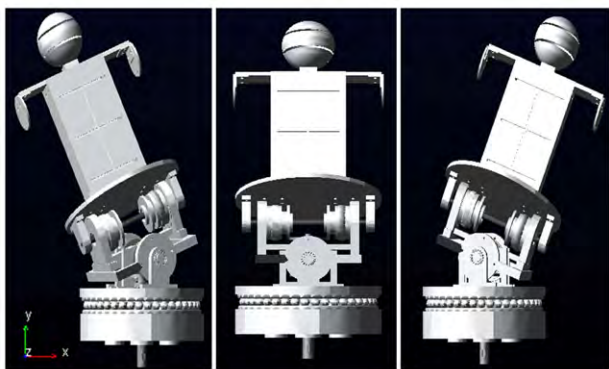


图4 ADAMS/View中机器人躲闪动作

仿真设定为3个关节同时运动的时间,然后进行动力学仿真并绘制机器人各关节的所受转矩曲线图,各关节处所受的力矩如图5和图6所示。图5是机器人60°~120°部位避障时所受的关节转矩,机器人仅由关节3产生后仰动作,运动稳定时产生的转矩基本在2.0 N·m的左右。图6(a)、图6(b)是机器人在0°~60°和120°~180°部位感应到障碍物,机器人产生躲闪动作时各关节所受转矩。

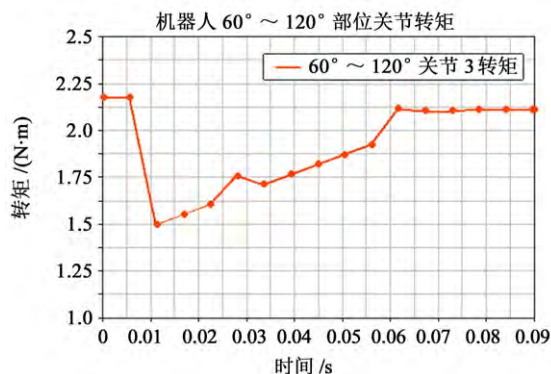


图5 机器人60°~120°部位关节转矩

由图6(a)、图6(b)中可以看到:

- (1) 3个关节同时转动时,在启动瞬间时的转矩最大,之后逐渐趋于稳定状态。
- (2) 稳定时,0°~60°部位,关节1的转矩处于7.16 N·m左右,关节2的转矩处于6.9 N·m左右,关

节3的转矩处于4.3 N·m左右;120°~180°部位,关节1的转矩处于7.9 N·m左右,关节2的转矩处于7.3 N·m左右,关节3的转矩处于4.4 N·m左右。

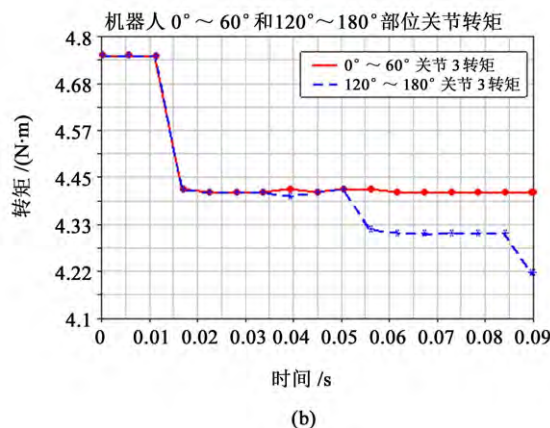
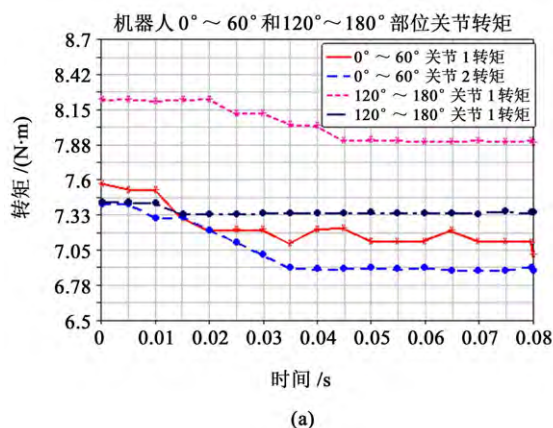


图6 机器人0°~60°和120°~180°部位关节转矩

(3) 转矩图中关节受力曲线有时会出现突然上升或下降,这说明机器人在运动过程中不是时刻平稳的,在运动的传递过程中,随着机器人上半身重心的偏移会出现抖动现象。

3.2 机器人样机转矩的测量

3.2.1 实验测量

机器人实物如图7所示。采用数字显示转矩仪测量机器人各关节受力实际情况,转矩仪上显示关节的转矩值,如图8所示。通过对摆动关节和俯仰关节分别进行多次测量得到结果如表5所示。



图7 机器人样机

从表5中看出,实验测量的各关节实际转矩数据与仿真值相比存在一定的误差,主要是因为仿真时仅在运动副处添加了摩擦力,而实际机器人样机中各零部件之间均存在摩擦力,但是误差不会影响机

器人躲闪动作的实现。

表 5 不同情况下各关节实际转矩

实验 次数	0°~60°部分 关节转矩/(N·m)		120°~180°部分 关节转矩/(N·m)		60°~120°部 分关节转矩/ (N·m)
	摆动关节	俯仰关节	摆动关节	俯仰关节	俯仰关节
1	8.41	4.53	7.52	4.75	2.07
2	7.12	4.03	8.57	4.85	2.10
3	7.32	4.92	7.02	5.05	2.05
4	7.24	4.90	7.10	4.12	2.12
5	7.22	4.12	8.20	4.40	2.01
6	7.02	4.85	7.21	4.41	2.21
7	7.90	4.97	7.21	4.42	2.01
8	8.03	4.69	7.10	4.17	2.12
9	6.89	4.03	8.91	4.76	1.91
10	7.33	4.46	7.92	4.07	1.99
均值	7.45	4.55	7.68	4.5	2.06

3.2.2 误差分析

将各关节运动时的稳定值与实验测量数据的平均值对比，如表6所示。

表 6 测量值与最大仿真值误差统计

类别	0°~60° 部分		120°~180° 部分		60°~120° 部分
	关节 2	关节 3	关节 2	关节 3	关节 3
转矩误差/%	7.54	7.76	6.91	6.19	8.37

分析误差产生的原因主要有以下几点：

(1) 机器人装配精度的限制。本文设计的机器人腰部机构比较复杂，零部件设计和加工也存在误差，导致机器人在运动时产生误差，进一步影响相关的运动学和动力学参数。



图 8 机器人动力学实验

(2) 机器人运转时，运动从底端的步进电机传递到关节2或关节3时，运动链距离长，传动精确度不足和传动不稳定会导致机器人各项参数产生误差。

(3) 机器人左右两部分检测到障碍物时，机器人进行的躲闪动作不是同步的，首先进行正反转，然后才进行左右摆动和后仰动作，运动的延时会导致机器人在3个关节同时进行运动的瞬间会产生比较大的关节力矩，也使机器人相关参数产生误差。

(4) 本文选用的是步进电机驱动的开环控制系

统，只能完成单方向的控制，误差会沿着控制的方向累积，而且不能通过控制系统进行反馈，因此会导致机器人存在运动参数的误差。

本文设计的机器人主要功能是躲避来袭物体，当机器人检测到障碍物时，能够完成躲开的动作，存在的各项参数误差对躲闪动作的效果影响不大。

4 结论

经过上述理论分析和实验测量，得到以下几个结论：

(1) 设计的机器人腰部结构具有3个自由度，可以模仿人体上身躯干在受到袭击时的躲闪动作并保持动态稳定，证明了机器人结构设计的合理性。

(2) 运用拉格朗日动力学分析，推导出了关于不同部位不同状态下各关节转矩的数学模型，可根据动力学参数对机器人控制系统进行优化，为以后对机器人进行闭环伺服控制提供了依据。

(3) 运用ADAMS软件对机器人虚拟样机进行了动力学仿真分析，得到了不同状态不同关节的关节转矩并通过实验测量，从最终结果来看，机器人驱动电机和电磁离合器满足使用要求，虽然存在一定的误差，但是不会影响机器人躲闪动作的实现。

(4) 由于机器人0°~60°和120°~180°部分检测到障碍物时，先进行正反转，再进行左右摆动和前后俯仰，机器人各关节之间的运动存在着延时，导致机器人的3个关节在同时运动的瞬间会产生一定的冲击力，使机器人抖动，但是影响不大，也不会影响躲闪动作的实现。

参 考 文 献

[1] BAJRAMI X, KOPACEK P, SHALA A, et al. Modeling and control of a humanoid robot[J]. E & I Elektrotechnik Und Informationstechnik, 2013, 130(2):61-66.

[2] WILLIAMS R L. DARwIn-OP humanoid robot kinematics [J] ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2012:1187-1196.

[3] 艳涛. 汇童机器人第4、5代集体亮相[J]. 机器人技术与应用, 2012(4):44.

[4] TIAN Y, CHEN X, HUANG Q, et al. Kinematic analysis and solution of the natural posture of a 7 DOF humanoid manipulator[C]// IEEE International Conference on Automation and Logistics, August16-20, 2010, Hong Kong and Macau. New York: IEEE, 2010: 156-162.

[5] 卢璐. 仿人机器人的发展现状及展望[J]. 科技信息, 2012 (21):42.

(下转第 128 页)

的实现减少难度。

(3) 从机床工作空间分析可得到, 机床在较小的驱动范围内可完成较大的工作空间输出, 由于机床移动副(3根导轨)长度可调节, 更加大了Z轴方向平移切削空间, 实际上, 该机床已经将3个平移切削完全解耦(除去转动自由度引起的刀尖点小范围平移累加); 在机床设计过程中, 更具优势。

5 总结

(1) 通过对 Tricept 混联机床结构的研究, 并结合方位特征集(POC)方法以及支链构造法, 提出一种可完成五轴联动的混联机床, 并分析了五轴联动实现原理及过程, 属于传统五轴联动范畴。

(2) 限于篇幅, 且该机床的串联模块(2自由度滑台)目前应用已较为成熟, 故文中未做过多描述; 主要对并联模块(3-PRS 并联机构)的运动学、动力学性能通过理论推导并结合 Matlab 数值仿真的方法进行了评估。

(3) 通过 Matlab 对理论分析结果进行数值计算, 并在已知工件切削量参数情况下, 反解驱动端所需位移、速度以及驱动力输入情况, 总结出该机床并联模块具有良好的运动平稳性以及自由度解耦性等, 同时也具备良好的动力学响应特性。

(4) 结合运动学分析结果, 对机床工作空间进行了分析, 结果表明, 该机床具有小空间输入、大空间输出的良好工作性能, 且加工自由度解耦性较好, 便于加工的实现。

参 考 文 献

- [1] 李晓丹, 王晓磊, 陈雪叶. SPS+SP+SPR 并联机构的静刚度分析[J]. 机械设计与制造, 2015(11):178-180.
- [2] 张双双, 刘齐更. 一种少自由度并联机构静刚度研究[J]. 机械设计与制造, 2014(4):178-181.
- [3] NEUMANN K E. Robot: 4732525[P]. 1988-03-22.
- [4] NEUMANN K E. System and Method for Controlling a Robot, No.6301525[P]. 2001-10-9.
- [5] Adept Technology Company Website. Quattro parallelrobots [EB/OL]. [2011-03-01]https://industrial.omron.us/en/products/quattro.
- [6] GAO Z, ZHANG D. Performance analysis, mapping, and multiobjective optimization of a hybrid robotic machine tool [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1):423-433.
- [7] 刘辛军, 汪劲松, 高峰, 等. 并联机器人机构新构型设计的探讨[J]. 中国机械工程, 2001, 12(12):1339-1342.
- [8] 朱小蓉, 宋月月, 沈惠平, 等. 基于 POC 方法的少自由度无约束并联机构构型综合[J]. 农业机械学报, 2016(8):370-377.
- [9] 郭盛, 孙振瑶, 曲海波. 基于支链构造法的新型 6-DOF 并联机构构型设计[J]. 机械工程学报, 2015(17):35-42.
- [10] 陈根良, 王皓, 来新民, 等. 基于广义坐标形式牛顿-欧拉方法的空间并联机构动力学正问题分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7):41-48.
- [11] ZHAO Y J, YANG Z Y, HUANG T. Inverse dynamics of delta robot based on the principle of virtual work[J]. Transactions of Tianjin University, 2005, 11(4):268-273.
- [12] 孙恒辉, 刘正士, 陈恩伟. 6-SPR 并联机构运动学的一种分析方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1):194-197.
- [13] 白志富, 韩先国, 陈五一. 基于 Lagrange 方程三自由度并联机构动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(1):51-54.
- [14] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:245-252.
- [15] 江山, 韩伯棠. 可操作的保持安全车距的方法研究[C]. 第十二届中国管理科学学术年会, 2010:39-45.
- [16] 高广娣. 典型机械机构 Adams 仿真应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2013:86-102.
- [17] 宫鹏涵, 胡仁喜, 康士廷. Adams2014 虚拟样机从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2015:117-132.
- [18] 涂姗姗, 宋桂芸. 健康青年人稳定极限与身体质量指数的相关性研究[C]. 北京:第9届北京国际康复论坛, 2014:940-944.
- [19] 恽晓平. 康复疗法评定学—高等医学院校康复治疗学专业教材[M]. 北京:华夏出版社, 2005:246-248.
- [20] 郑勐(1963—), 男, 陕西长安人, 硕士, 副教授, 工程训练中心副主任, 主要研究方向为机械设计制造。
- [21] 胡艳凯(1990—), 男, 河北廊坊人, 硕士, 主要研究方向为机械制造及其自动化(机器人方向)。

收稿日期: 2018-05-04 收修改稿日期: 2018-06-12

基金项目: 四川省科技支撑计划(2017RZ0062)

作者简介: 覃才友(1978—), 男, 四川达州人, 硕士, 副教授, 工程师, 主要从事机械设计制造、自动控制等研究。

(上接第 73 页)

- [6] JIN Y, XIE M. Vision guided homing for humanoid service robot [C]// Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition, September3-7, 2000. Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2000:4511.
- [7] 黄湖林. 仿人机器人混联三自由度躯干设计[D]. 北京:北京理工大学, 2016:1-8.
- [8] 张雨. 仿人机器人的设计与研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2017:2-4.
- [9] 张展. 机械设计通用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2017:22-30.
- [10] 恽晓平. 康复疗法评定学—高等医学院校康复治疗学专业教材[M]. 北京:机械工业出版社, 2017:22-30.
- [11] 恽晓平. 康复疗法评定学—高等医学院校康复治疗学专业教材[M]. 北京:机械工业出版社, 2017:22-30.

收稿日期: 2018-05-24 修回日期: 2018-06-04

作者简介: 郑勐(1963—), 男, 陕西长安人, 硕士, 副教授, 工程训练中心副主任, 主要研究方向为机械设计制造。

通信作者: 胡艳凯(1990—), 男, 河北廊坊人, 硕士, 主要研究方向为机械制造及其自动化(机器人方向)。