

基于 X86 平台和 RSI 的工业机器人步态自动控制系统设计

孙文革

(新疆职业大学 机械电子工程学院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 工业环境中的任务和工作场景是动态变化的, 机器人需要根据环境的变化调整步态, 以满足新的任务需求; 为此, 设计基于 X86 平台和机器人传感器接口 (RSI, robot sensor interface) 的工业机器人步态自动控制系统; 以复杂指令集计算机为基础的 X86 架构设计机器人控制器主板, 使系统具有高集成度和扩展性; 利用超声波传感器和红外线传感器获取步态自动控制传感信号; 使用基于 AS5040 型高精度非接触磁性转动编码器的步态关节控制器, 通过总线扩展, 定位关节运动方向; 分析机械臂前后摆动步态规划轨迹, 控制髋关节; 使用 RSI 应用程序包控制点位运动, 实现步态自动控制; 实验结果表明, 设计系统的膝关节 x 方向与实际轨迹只存在最大为 20 mm 的误差, y 方向与实际轨迹一致; 髋关节 x 方向与实际轨迹只存在最大为 20 mm 的误差, y 方向与实际轨迹只存在最大为 15 mm 的误差, 能够提高控制精度, 控制效果较好。

关键词: X86 平台; RSI; 工业机器人; 步态自动控制

Design of Gait Automatic Control System for Industrial Robots Based on X86 Platform and RSI

SUN Wenge

(School of Mechanical and Electronic Engineering, XinJiang Vocational University, Urumqi 830000, China)

Abstract: There are dynamic and changing tasks and work scenarios in industrial environments, robots need to adjust their gait according to environmental changes, and meet the requirements of new tasks. To achieve this, an industrial robot gait automatic control system based on X86 platform and robot sensor interface (RSI) is designed. The robot controller board is designed based on X86 architecture of computer with complex instruction set, which enables the system to have high integration and scalability. The ultrasonic sensors and infrared sensors are used to acquire the automatic gait control sensing signals, and adopt the gait joint controller based on the high-precision non-contact magnetic rotary encoder of AS5040, it locates the direction of joint motion through the bus extension. The gait planning trajectory of mechanical arm is analyzed to control the hip joint. The RSI application package is used to control the point-based motion and achieve gait automatic control. The experimental results show that compared with the actual trajectory of the hip joint, the maximum error of the designed system is only 20 mm of x -direction and consistent with that of the y -direction during the grasping time of 12 s; The maximum error in the x -direction is only 20 mm, and that of the y -direction only 15 mm during the grasping time of 4 s to 22 s, which can improve the control accuracy and achieve better control results.

Keywords: X86 platform; RSI; industrial robots; automatic gait control

0 引言

工业机器人能够代替一些重复性、危险性的工作, 不但可以降低生产成本, 还能提升生产效率, 因此受到越来越多的人关注。工业机器人的控制系统和本体结构是一个相互联系、相互影响、不可分割的有机整体, 在设计机器人时, 一个合适的机械装置可以最大程度地体现控制系统的性能, 而一个与机械装置结构相适应的控制系统能够更好地发挥机械装置的特性。工业环境常常存在复杂的地形、不确定的障碍物和动态变化的工作场景, 机器人需要

根据传感器信息和环境反馈进行调整, 以应对各类挑战和不确定性。对于一个工业机器人来说, 最重要的控制方式是步态控制。步态控制依赖于精确的传感器数据来进行反馈和调整。然而, 传感器可能存在延迟、噪声和误差, 使得步态控制结果存在偏差。因此, 对机器人步态控制进行研究。

文献 [1] 提出了基于深度强化学习的控制方法, 采用 DDPG 方式对其进行动态建模和稳定性建模, 构建状态空间、运动空间、状态空间和收益函数。利用 DDPG 方式对其持续学习, 使其能够在更宽的坡度下保持平稳运动。文

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-11-30。

作者简介: 孙文革 (1967-), 男, 大学本科, 副教授。

引用格式: 孙文革. 基于 X86 平台和 RSI 的工业机器人步态自动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 122-128.

文献 [2] 提出了基于奖励引导的学习方法，该方法设计一种基于自主设计的六足机器人机构，并将其和基于奖赏的机器人步态学习算法相结合，在不熟悉的情况下让机器人自主学习，以此实现步态控制。文献 [3] 提出了基于反演滑模算法的控制方法，利用 MATLAB 的 Robotics 工具箱及 Simulink 模拟软件对所提出理论与技术进行实验研究，并对所提出理论与技术进行实验验证。文献 [4] 建立了工业机器人动力学模型，基于重力效应测量法辨识其关节刚度，通过计算摩擦因数等参数获取摩擦模型，提高机器人恒速运动的平衡性，设计陷波滤波器，实现动态前馈补偿控制。文献 [5] 在分析工业机器人控制需求的基础之上，设计由 ARM 工控机、伺服电机、编码器等组成的硬件系统，并通过 NURBS 插补算法完成机器人的运动姿态控制。然而上述方法容易产生不理想的行为，泛化性能较差，控制精度较低。

工业机器人是一类多输入、多输出、强耦合、时变的非线性系统，其控制是一项非常繁重的工作，仅凭一套简单控制方法往往难以获得良好控制效果。为此，设计基于 X86 平台和 RSI 的工业机器人步态自动控制系统。为了更好地提高工业机器人路径规划、越障、避障等能力，设计由全景摄像机、超声波和红外线传感器组成的硬件系统，通过配置 X86 工业机器人控制器主板和步态自动控制传感器，提高机器人的控制稳定性，设计步态关节控制器调整机器人的关节位置和动作，以此完成硬件部分的设计。在软件系统中，设计以 RSI 为中心的机器人步态自动控制方案，进行髋关节控制、点位运动控制，有效控制机器人的下身姿态，实现高精度控制。

1 基于 X86 平台的系统硬件结构设计

基于 X86 平台的自动控制系统硬件结构能够实现自主导航、路径规划、越障和避障，对外部环境具有较强的适应性。为此，其需要具备多个关节的协同动作以及动态均衡调节功能。基于 X86 平台的系统硬件结构如图 1 所示。

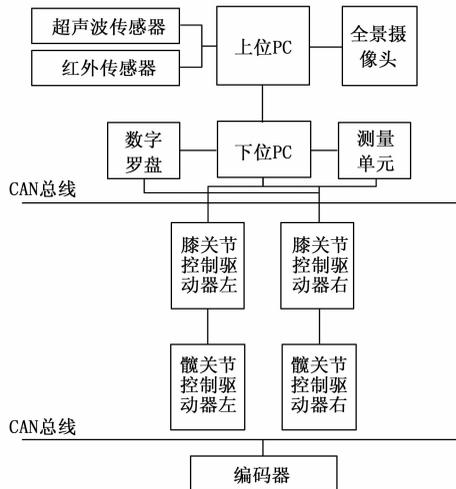


图 1 基于 X86 平台的系统硬件结构

采用全景摄像机、超声波和红外线传感器，实现了对移动机械臂的动态监控，为机器人在移动机械臂上的自主定位和运动轨迹的精确定位奠定基础^[6]。利用数字罗盘、惯性元件、脚底开关（作用力）等多种姿态传感器^[7]，实现机器人的行走姿态调节和平衡点调节。靠近开关被设置在机器人的双腿上，其作用为：一是启动时对其进行初始化位姿；二是自由移动时，避免关节移动到一个极致的位置而导致对电动机或机器人本体的损坏^[8]。将嵌入式计算机用作机器人处理器，单一嵌入式计算机很难完成处理器功能，采取了上、下两级分布式控制方式。

为了实现图像处理、数据融合处理以及对电机实时性控制，结合 X86 平台实现步态的自动控制。

1.1 X86 工业机器人控制器主板

X86 架构属于一种以复杂指令集计算机（CISC）为基础的处理器架构，支持多任务处理和科学计算^[9]。X86 工业机器人控制器主板使用了工业级的芯片和器件，能够在苛刻条件下长时间稳定工作，并且具有较高的稳定性和抗干扰能力，为此，被广泛地应用于工业控制等高稳定性的应用领域。

X86 机器人控制器主板结构如图 2 所示。

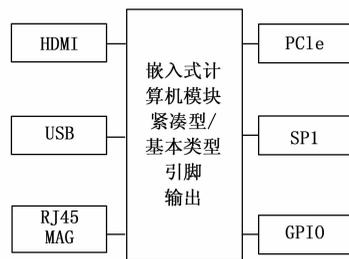


图 2 X86 机器人控制器主板结构

以 X86 架构为基础的工业机器人控制主板为基础，将通用异步接收器和通用异步发送器分别与核心板的输入端和输出端相连接^[10-12]。将桥接芯片与核心板的一端相连接，接口连接器与核心板的另一端相连接。X86 机器人控制器主板结构可以应用于复杂的工作环境中，还能够对系统周边电路设计简化，从而拥有更高集成度和扩展性，降低成本^[13]。此外，采用模块化设计方案，具有强大的数据处理能力，软件与硬件兼容性好，可以提高机器人的控制效果。

1.2 工业机器人步态自动控制传感器

X86 工业机器人控制器主板根据传感器提供的信息来调整和执行工业机器人的运动轨迹、动作序列和步态。为此，对步态自动控制传感器进行设计。步态自动控制传感器主要是由两个传感器组成，分别是超声波传感器、红外传感器。

1.2.1 超声波传感器

采用型号为 HC-SR04 的超声波传感器。超声波传感器

是将超声波信号转换成其他信号，具有高频率、短波长、极少出现衍射现象的优点，另外，其方向性较好，能够变成光线进行有目的的传输^[14-15]。当超声接触到杂质或边界时会发生明显的折射，从而形成一个反射波，接触到运动对象时，会发生多普勒现象。超声波传感器结构如图 3 所示。

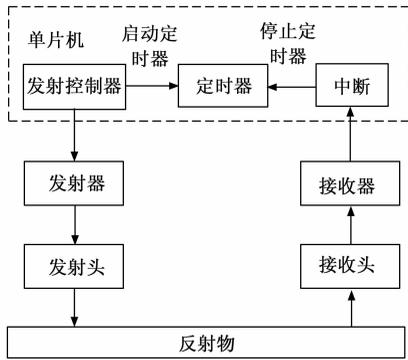


图 3 超声波传感器结构

超声定位的基本理论是利用接收端接收到超声信号的时间间隔，通过超声发送设备发送超声信号，这一理论类似于雷达定位^[16-17]。当超声波在空中飞行时，遇到障碍时会被反弹回去，当接收到信号后，立刻停止计时。

1.2.2 红外线传感器

选择 GP2Y0A02YK0F 型红外线传感器。红外线传感器是一种以红外为信号源的传感技术，通过红外信号来实现对传动系统的控制。通过红外的物理化学特性，将红外光发射到任何物体上，在其自身存在的特定温度下（在零度以上），发射红外光^[18]。红外线传感器不会与被测物发生直接的接触，所以没有摩擦力。

根据检测工作机理，检测单元可以划分为热检测单元和光检测单元^[19]。热敏电阻器是热敏器件中使用最广泛的器件，使用 NTC Thermistor MF52-103/3435 型热敏电阻器。当红外光照射在热敏电阻器上时，热敏电阻器的温度上升，从而使其电阻产生改变，并使其经过变换后成为电信号的输出形式。

1.3 工业机器人步态关节控制器

步态自动控制传感器提供了必要的感知数据，机器人步态关节控制器将这些数据作为输入，调整机器人的关节位置和动作。工业机器人步态关节控制器具有体积小、功能强大、可扩充性好的特点，是一种双通道控制器。步态关节控制器结构如图 4 所示。

利用霍尔效应，通过固定连接在关节上的磁性钢片转动，使其产生改变的电场，并将其转化为可辨识的电信号。该设计方式主要存在两个目的：一是提高关节控制精度。利用 ACS712 型变相霍尔传感器，实现每转一周转动 24 次的位移测量，并与齿轮系的减速率进行了比较，得出了各个关节的转动角度^[20]。由于这种方法并不能完全消除关节



图 4 步态关节控制器结构

的传递误差，因此将这种传感元件安装在关节的输入轴处，实现关节的旋转角的直接检测；二是避开每一次上电位的精确定位。电动机内置的霍尔传感器仅能检测出电动机旋转方向相对角，必须使用霍尔检测晶片，才能实现对关节运动方向准确测量。

选择 AS5040 型高精度非接触磁性转动编码器，它是一种高密度芯片，在芯片上包括一个霍尔检测模块，以及模拟和数字两个部分。本设计为微型封装，适用于微型关节的集成性要求，可实现 360°全方位精确测量，并能够辨识出每分钟 10 000 转以上的旋转速度，拥有串行接口输出和脉宽调制（PWM）两种数字模式、10 位的绝对位置输出模式以及 3 种增量位置输出模式，其中分别包含了 Index 和正交模式（A/B）信号输出、Index 和同步/方向模式信号输出模式，此外，还可编程零位/索引位置。

2 基于 RSI 的步态自动控制方案设计

在获取工业机器人步态自动控制系统硬件结构后，设计基于 RSI 的步态自动控制系统。

2.1 工业机器人髋关节控制

工业机器人在移动时，一方面需要和人类一样能够维持上半身的笔直，另一方面是在不平坦地面上或者是受到干扰出现倾斜时需要及时调整。为此，对下半身姿态进行矫正，控制髋关节，以较好地控制平衡。设置下半身姿势传感器，在工业机器人检测到姿势出现偏差时，启动下半身姿势控制。

RSI 是一种在机械臂与传感系统间进行信息交互的软件，它的时间反应速度可以达到微秒级。每个机械臂主要由 3 个关节组成，每个关节有 3 个自由度，冗余自由度能够让机器人的运动变得非常柔韧和敏捷。然而，由于冗余自由度的存在，使得机器人在进行步态规划与控制时存在一定的难度，为此，对机械臂进行规划，使其能够满足动作需求。单臂规划由侧臂、大腿和小腿等部件构成，通过转动髋关节进行连接。髋关节主要负责身体的内、外摆动，完成身体的左右摆动。其中膝关节主要负责大腿、小腿的升降，从而使机械臂能够进行前后摇摆^[21]。以机械臂为研究对象，以机械臂的端点位姿为目标，充分发挥机械臂在

移动时的高速、负载等方面的优势，以提升机械臂在行走时的平稳性。

机械臂前后摆动的步态规划轨迹表示为：

$$\begin{cases} x = \mu_x \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right] \\ y = \mu_y \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中， μ_x 、 μ_y 分别表示机械臂 x 、 y 方向的步幅； t 表示摆动时间； T 表示摆动周期。当 $t = T$ 时，机器人腿部被提起，发生加速跳跃，同时会有很大的触点压力。

基于此，当 $t = T$ 时，设计机械臂 x 、 y 方向的位移方程，表示为：

$$\begin{cases} x' = \mu_x \left[\frac{1}{2\pi} \sin(2\pi) \right] - \frac{\mu_x}{2} \\ y' = A \sin(n\pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中， A 表示机械臂摆动运动曲线系数^[22]； n 表示斜线数量。当确定斜线数量时，使机械臂轨迹在平面内呈现为曲线，有利于躲避障碍物。

为了消除机械臂抓取时发生滑落及过大的冲击，在步态中，摆动的机械臂速度和抓取速度都为 0。参考摇摆阶段的路径规划，由于机械臂加速度呈现周期性变化，机械臂抓取与抓取物摩擦的幅度与方向都将保持不变，造成机械臂抓取与抓取物之间的相对滑移及身躯上下波动，进而影响机械臂抓取速度与稳定性。为此，在支撑阶段规划中，尽可能保证机器人身躯与地面平行。为避免机械臂抓取相对于抓取物发生滑移，在机械臂末端设计为匀速直线移动，并通过短周期正弦加速度导向，使机械臂由零速向匀速和匀速向零速的平稳过渡，降低因骤然加速而带来的冲击力。由此，工业机器人向前运动，机械臂完成一次步态循环，实现工业机器人髋关节控制。

2.2 工业机器人点位运动控制

髋关节控制是点位运动控制的基础，通过对髋关节进行精确控制，可以调整机器人的姿态和身体位置。髋关节的运动控制与其他关节的协同配合，实现了机器人在空间中的准确定位和路径跟踪。为此，进行工业机器人点位运动控制。工业机器人点位运动过程中最主要的目的是确保其运动稳定，而运动稳定性由 RSI 应用程序包直观地体现。RSI 应用程序包是双脚着地的力量集中点。将 RSI 分析方法应用到脚底接触的多边形体上，得到平衡点。

根据 RSI 原理控制下身姿态，将相应的信息与控制装置交互，再应用控制装置进行控制。机器人点位运动控制分为两种，一种是单轴操作，另一种是多轴并行操作。使用 RSI 应用程序包，并对其进行仿真。工业机器人由伺服电机带动，在持续工作时，突然停止会影响定位准确度。解决方式为：当达到预定减速点时，启动一种均匀减速运动方式，直到机器人点位运动速度达到最小为止。

为了实现机器人多轴联动控制，确定控制空间中的两个点 $a_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ 和 $a_1 = \{x_1, y_1, z_1\}$ ，计算两点间距

离，公式为：

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (3)$$

基于此，计算比例因子 $\{\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z\}$ ，公式为：

$$\begin{cases} \lambda_x = \frac{x_1 - x_0}{d} \\ \lambda_y = \frac{y_1 - y_0}{d} \\ \lambda_z = \frac{z_1 - z_0}{d} \end{cases} \quad (4)$$

结合该公式，计算各轴按照步距修正得到的移动步距为：

$$D = \begin{cases} \lambda_x \cdot s_x \\ \lambda_y \cdot s_y \\ \lambda_z \cdot s_z \end{cases} \quad (5)$$

式中， s_x 、 s_y 、 s_z 分别表示各轴上的给定单位步距。将计算得到的比例因子代入 RSI 应用程序中，实现机器人的多轴联动控制。

由于机械臂的柔韧性对控制结果产生较大影响，控制器难以只对其中一个关节修改，从而使其保持稳定，因此，采用对支撑腿全部关节进行修改的方式，加速 RSI 应用程序包控制器的收敛。将全部关节作为一个柔性体，利用多段控制获得更好的控制效果。除此之外，因为下半身姿态控制中的步态修改对工业机器人稳定性也产生了一定影响，所以在 RSI 应用程序包控制器中将该修改纳入其中，以提高 RSI 应用程序包控制器的收敛速度。具体形式为：

$$r = D \cdot \varphi(R(t) - R'(t)) + \varphi(R(t) - R'(t)) \quad (6)$$

式中， r 表示控制器对支撑肘关节的修正量； $R(t)$ 、 $R'(t)$ 分别表示期望机械臂摆动轨迹和实际机械臂摆动轨迹； φ 、 φ' 分别表示控制比例系数和微分系数。

通过在行走过程中的各个阶段对支撑腿对应关节进行校正，实现对 RSI 应用程序包位置控制的精确调整。在机器人处于两足支撑阶段时，对两条腿的各个关节进行校正。

地面撞击不仅对机械结构产生损害，还会成为影响其稳定性的一个主要原因。因此，人们使用非线性落地控制方式来控制落地脚的离地高度，避免产生过大的地面撞击。具体原理为：当机器人在崎岖不平的地形中行走时，由于其足部与地面的接触时间较早或较晚会产生较大的撞击，从而对其稳定性产生较大的影响，因此，采用摆动腿与地面接触力分配作用力的方式，实现轻盈着陆。当双脚与地面的间距达到一定程度后，触发双脚控制，双脚的各个关节均会被调节。

具体的控制规则为：

1) 当摆动腿的实际着地高度比现有落地高度低时，摆动腿以一定加速度下降。

2) 当着陆点与地面接触的分力超过预期设定的阈值时，即表示机器人已经完全进入了两足支撑状态，每条腿的支撑力只有机器人重量的二分之一。控制程序将会假设

当前的摆动腿处于一个较高的位置，摆动腿将以一个恒定的速率往上运动。

3) 当着陆点与地面接触的分力低于预期设定的阈值时，即表示机器人未进入两足支撑状态，因为双足阻抗特性，所以控制程序在控制过程中都假定双足是在平直状态下着地。此时，修改摇摆脚着地高度，从而校正该数值。

根据上述控制规则，定义工业机器人下身姿态运动周期 T_m ，在髋关节坐标系下，为了与 x 方向的动作功能相匹配，就必须将时间作周期性变化处理：

$$t_i = r(t + \eta_i) \bmod T_m \quad (7)$$

式中， η_i 表示步态的第 i 条摆动腿相对于落后的时间与步态周期比值； \bmod 表示求余函数。基于此，将步态中的单腿在各自髋关节坐标系下表示为：

$$W_i = \begin{pmatrix} g(i) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t_i) \\ y(t_i) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中， $g(i)$ 表示自髋关节函数，其表达式为：

$$g(i) = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \\ \text{站立} \\ \text{后退} \end{cases} \quad (9)$$

通过上述公式，有效控制工业机器人下身姿态，实现工业机器人步态自动控制系统设计。

3 仿真与分析

3.1 机器人仿真分析

本次实验以仿真的方式进行。在结构设计上，利用 Pro/E 按照本体的大小和材质构建机器人模型，并利用 Adams 软件对其进行了运动学和动力学模拟，仿真机器人结构如图 5 所示。

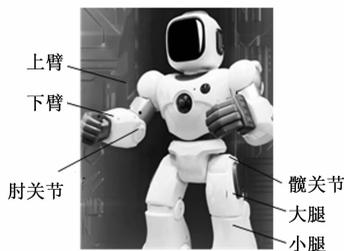


图 5 仿真机器人结构

通过仿真软件模拟传感器的输入，并生成虚拟的传感器数据。采用双线程实时通信，实现对多个传感器的工作过程实时通信。该传感器为 Ether CATF/T 型，具有 1 毫秒的时间延迟。在多项工作同时进行的情况下，工作转换延迟是指在某一项工作完成之后，该工作向下一项工作转换所需时间。中断反应时间是当一个系统收到中断信息后，该信息会被操作系统回应，并且结束转换进入下一个中断过程。

通过对仿真过程分析，得到了各个实时参数的数量级，

这些数量级的实时参数都在毫秒级别。一般情况下，工业机器人的控制循环不超过 1 ms，因此，该系统可以很好地满足工业机器人的控制需求。

结合仿真机器人结构，设计详细仿真过程：

在保持完整的控制体系情况下，当控制方法有必要扩充或修改时，只需将新方法扩充到源程序中就可以了。在系统操作台上采集到的机械人员和有关的数据之后，对这些数据进行详细的分析，并将这些数据应用到有关算法当中，而最终结果就是将这些数据作为函数来实现。根据功能需求对算法数据库进行了更新和完善。

采用 RSI 技术实现与工控机之间的数据交互，适用于各类工业机器人。在工业机器人控制系统中，通过设置 RSI 的应用程序和相应的通信协议，实现人机对话。而对于不同类型（例如，不同自由度）的工业机器人，在不影响整个控制体系结构的情况下，对其进行相应的调整。

3.2 仿真数据分析

以工业机器人避障抓取动作为例，下半身膝关节的 x 、 y 方向运动轨迹如图 6 所示。

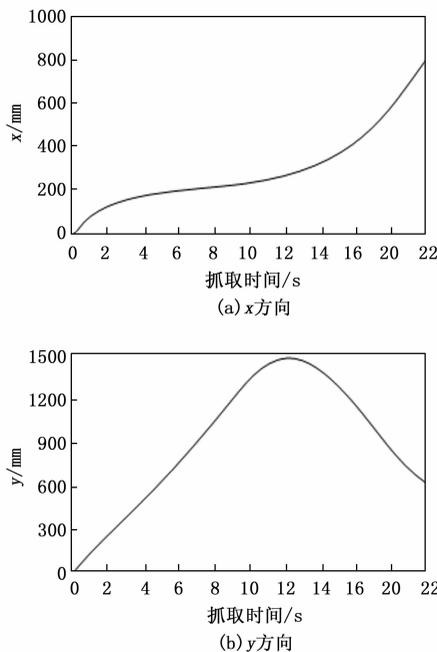


图 6 膝关节 x 、 y 方向运动轨迹

由图 6 (a) 可知，在 0~4 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 180 mm，在 4~12 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 280 mm，在 12~22 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 800 mm。由图 6 (b) 可知，在 0~12 s 抓取时间内， y 方向最大位移为 1 480 mm，在 12~22 s 抓取时间内， y 方向由最大位移 1 480 mm 减小到最终位移 600 mm。

对于下半身髋关节的 x 、 y 方向运动轨迹，如图 7 所示。

由图 7 (a) 可知，随着抓取时间的增加， x 方向最大位移为 1 420 mm。由图 7 (b) 可知，在 0~4 s 抓取时间内， y 方向最大位移为 1 435 mm，在 4~22 s 抓取时间内，

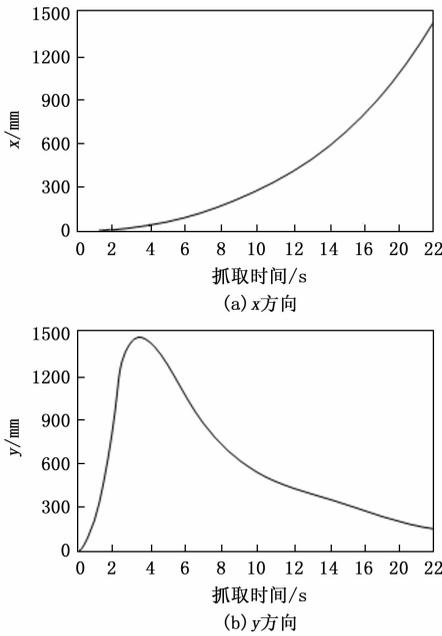


图 7 髋关节 x 、 y 方向运动轨迹

y 方向由最大位移 1 435 mm 减小到最终位移 200 mm。

3.3 仿真结果与分析

将文献 [1] 方法、文献 [2] 方法、文献 [3] 方法和设计系统进行对比，分析机器人膝关节控制效果，膝关节 x 、 y 方向运动轨迹如图 8 所示。

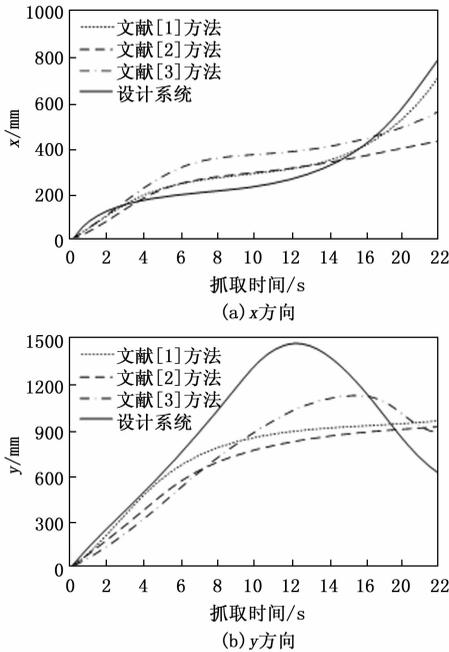


图 8 膝关节 x 、 y 方向运动轨迹

由图 8 (a) 可知，文献 [1] 方法与控制轨迹不一致，在 0~6 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 240 mm，在 6~12 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 310 mm，在 12~22 s

抓取时间内， x 方向最大位移为 415 mm；使用文献 [2] 方法与控制轨迹不一致，在 12~22 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 405 mm；使用文献 [3] 方法与控制轨迹不一致，在 0~8 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 345 mm，在 8~12 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 395 mm，在 12~22 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 565 mm；而设计系统在 0~4 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 180 mm，在 4~12 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 280 mm，在 12~22 s 抓取时间内， x 方向最大位移为 780 mm，与实际轨迹只存在最大为 20 mm 的误差。

由图 8 (b) 可知，随着抓取时间的增加，使用文献 [1] 方法的 y 方向最大位移为 901 mm，与实际 y 方向轨迹不一致；使用文献 [2] 方法的 y 方向最大位移为 990 mm，与实际 y 方向轨迹不一致；使用文献 [3] 方法在 0~16 s 抓取时间内， y 方向最大位移为 1 105 mm，在 16~22 s 抓取时间内， y 方向由最大位移 1 105 mm 减小到最终位移 895 mm，与实际 y 方向轨迹不一致；而设计系统在 0~12 s 抓取时间内， y 方向最大位移为 1 480 mm，在 12~22 s 抓取时间内， y 方向由最大位移 1 480 mm 减小到最终位移 600 mm，与实际 y 方向轨迹一致。

使用不同方法分析机器人髋关节控制效果，髋关节 x 、 y 方向运动轨迹如图 9 所示。

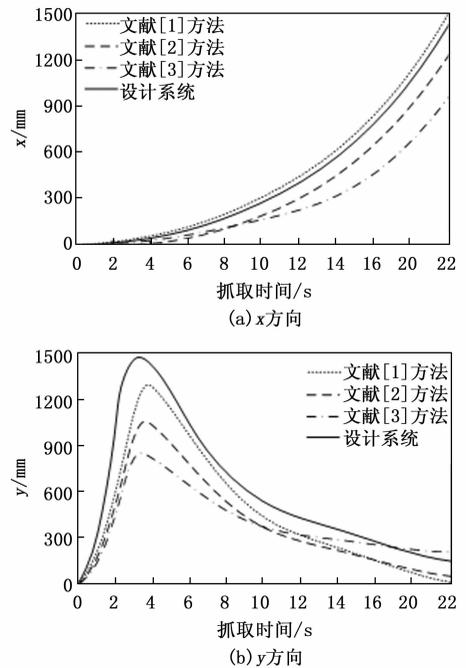


图 9 髋关节 x 、 y 方向运动轨迹

由图 9 (a) 可知，随着抓取时间增加，文献 [1] 方法在抓取时间为 20 s 时， x 方向达到了最大为 1 500 mm。文献 [2] 方法的 x 方向最大位移为 1 250 mm。文献 [3] 方法的 x 方向最大位移为 950 mm。设计系统的 x 方向最大位移为 1 440 mm，与实际数值最接近，最大误差为 20 mm。

由图 9 (b) 可知, 文献 [1] 方法、文献 [2] 方法、文献 [3] 方法和设计系统在抓取时间为 3~4 s 内, y 方向均达到最大位移, 对应的数值依次为 1 300、1 050、850、1 450 mm。在抓取时间为 4~22 s 内, y 方向位移逐渐减小, 对应的数值依次为 100、50、270、190 mm。设计系统与实际轨迹一致, 只存在最大为 15 mm 的误差。综上所述, 设计系统的控制精度更高。

为了进一步展示设计系统的控制效果, 在相同的实验环境下进行 7 组移动动作的控制时间仿真测试, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同系统的控制时长/ms

仿真组别/组	设计系统	文献[1]方法	文献[2]方法	文献[3]方法
1	78	108	144	131
2	82	114	142	135
3	75	121	148	129
4	77	108	150	132
5	81	114	153	130
6	79	112	155	128
7	76	118	161	129

由表 1 结果可知, 设计系统的工业机器人移动动作步态自动控制时间始终在 82 ms 以下, 控制时间最短, 而文献 [1] 方法、文献 [2] 方法和文献 [3] 方法的控制时间分别在 110、140 和 130 ms 左右, 控制时间较长, 说明设计系统具有较高的控制效率, 控制效果更好。

4 结束语

鉴于机器人在一定程度上代替人工完成复杂环境下的工作, 机器人的步态控制成为当前研究热点。针对当前工业机器人控制误差较大的问题, 设计了基于 X86 平台和 RSI 的工业机器人步态自动控制系统。在 X86 复杂指令集计算机处理器架构下, 设计基于 X86 平台的步态自动控制系统硬件结构。在该结构下使用了 RSI 应用程序包, 实现了工业机器人步态自动控制。通过引入 X86 平台和 RSI 应用程序包, 可以让机器人与外部 PC 进行实时数据交互, 同时与 Window、操作系统的数据处理功能相结合, 在确保机器人的实时性的同时, 达到扩展和增强性能的目的。通过仿真证明设计系统具有高精度的控制效果, 能够有效控制工业机器人。

参考文献:

[1] 吴晓光, 刘绍维, 杨磊, 等. 基于深度强化学习的双足机器人斜坡步态控制方法 [J]. 自动化学报, 2021, 47 (8): 1976-1987.

[2] 朱晓庆, 陈璐, 冉登宇, 等. 基于奖励引导的六足机器人自主步态学习 [J]. 北京工业大学学报, 2021, 47 (2): 120-126.

[3] 王君, 李景春. 基于反演滑模算法的工业机器人导纳控制

[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, 582 (8): 14-17.

[4] 张军, 许洪龙. 考虑关节非线性的串联双连杆机械臂工业机器人运动控制 [J]. 机械传动, 2020, 44 (1): 28-34.

[5] 王玉婷. 工业机器人运动控制系统设计研究 [J]. 微型电脑应用, 2020, 36 (10): 86-88.

[6] 赵东辉, 王威, 张紫涵, 等. 基于多模态步行意图识别的助行机器人柔顺控制 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (2): 205-215.

[7] 李汉超, 高燕, 黄昕. 基于工业机器人控制系统的软 PLC 设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (5): 60-63.

[8] 熊蕊. 考虑瞬态性能的工业机器人双臂反步控制方法 [J]. 现代制造工程, 2022, 503 (8): 53-59.

[9] 梁艳阳, 吴伟, 姚超智, 等. 基于 PLCopen 标准的工业机器人运动控制器的设计与实现 [J]. 现代制造工程, 2021, 495 (12): 35-40.

[10] 苏建, 李在娟. 融合视觉和以太网技术的工业机器人分拣装配控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (24): 119-123.

[11] 王瑗琿, 葛祎霏, 胡宁宁, 等. 基于步态数据的下肢康复机器人控制设计 [J]. 控制工程, 2021, 28 (11): 2266-2272.

[12] 刘波, 赵一冰, 张南, 等. 机器视觉与工业机器人相结合的自动上料系统 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 180-185.

[13] 孟静静, 郝睿, 王惠卿, 等. 基于 PLC 与工业机器人的自动生产线智能包装系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2021, 713 (11): 63-67.

[14] 赵江波, 龚思进, 王军政. 四足机器人步态参数优化及探索性行走策略 [J]. 北京理工大学学报, 2022, 42 (4): 407-414.

[15] 张卉, 朱永飞, 刘雪飞, 等. 基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 工程设计学报, 2022, 29 (5): 564-571.

[16] 刘力卿, 王伟, 张弛, 等. 基于频域互相关的机器鱼双曲线质心定位仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (10): 414-419.

[17] 张俊鑫, 陈威, 黄斯凯, 等. 基于力位混合导向的工业机器人顺槽运动控制策略 [J]. 中国机械工程, 2023, 34 (6): 712-719.

[18] 刘东来, 崔亚飞, 罗辉, 等. 基于改进型 LeNet-5 的工业机器人工件自动识别研究 [J]. 制造技术与机床, 2021, 710 (8): 103-107.

[19] 惠小健. 任意初态下的工业机器人迭代学习控制 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (3): 261-265.

[20] 郑雪芳, 林意. 基于布谷鸟算法的工业机器人轨迹跟踪控制 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (5): 50-54.

[21] 谭丹丹. 基于自适应变阻抗的工业机器人双机械臂控制 [J]. 现代制造工程, 2022, 503 (8): 39-45.

[22] 楚雪平, 王晓玲. 采用神经网络的工业机器人双臂鲁棒控制方法 [J]. 现代制造工程, 2022, 506 (11): 41-47.