



基于乐高 EV3 平台的三轮全向 机器人教学项目设计

马纪明, 宁浩伦

(北京航空航天大学 中法工程师学院, 北京 100191)

摘要: “智能机器人设计与实践”课程是面向具有一定数学与计算机学科基础的工科高年级学生开设的理论与实践综合课程, 目标是培养学生的系统设计、建模仿真、动手实践、计算机控制、数据分析及设计优化能力。乐高 EV3 智能机器人平台配套零件类型多样, 接口灵活开放, 适合作为教学平台应用于实践教学。以基于该平台设计的三轮全向机器人为例, 讨论 EV3 机器人的结构组成、系统环境与配置方案、运动机构及模型、实验结果分析方法等内容, 全面阐述平台在教学过程中的应用方法。

关键词: 全向机器人; 控制; 运动学; 仿真实验; 面向工科

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20210186](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20210186)

Three-wheel Omnidirectional Robot Pedagogical Project Design Based on LEGO EV3

MA Jiming, NING Haolun

(Sino-French Engineer School, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The course “Intelligent Robot Design and Practice”, which is provided to senior engineering students with enough mathematics and computer basics, aims to cultivate students’ ability in system design, modeling and simulation, hands-on practice, computer control, data analysis, as well as technology optimization. LEGO EV3 robot platform has various types of supporting parts, flexible and open interfaces. In consideration of the various design potential and complete functions of LEGO EV3 robot, it is suitable for practical teaching as a teaching platform. This paper introduces the three-wheel omnidirectional robot based on the platform EV3, discussing the structure, system environment, configuration scheme, motion mechanism, as well as results analysis method. The application of this platform in actual teaching process is introduced in detail.

Key words: omnidirectional robot; automatic control; kinematics; simulation experiment; engineering-oriented

近年来, 智能机器人在工业领域得到了广泛的应用, 工科类高校相应地开设了越来越多与智能控制相关的课程, 自动控制原理及自动控制系统的设计和实现将成为未来工程师必备的基本能力之一。北京航空航天大学开设的通识课程: “智能机器人设计与实践”面向具有一定数学和计算机基础的工科类高年级本科生及研究生, 让学生了解智能机器人的基本结构、组成与工作原理, 并通过结构设计、硬件系统配置、软件系统配置、系统建模和仿真、控制器设计和计算机实现、实验和结果分析等环节, 掌握智能机器人设

计与实践的一般流程, 以及初步的机器人控制理论和实践方法^[1]。课程要求学生在实践中运用高等数学、自动控制、运动与力学相关知识, 培养学生面对复杂系统时的分析能力、设计和实践能力、多学科知识融合能力和优化能力。

本课程的实践教学部分基于 LEGO Mindstorm EV3 机器人平台^[2-3]。作为第三代编程机器人, 它的核心部分是一个智能主机, 最多可同时驱动 4 个电机进行相互独立的运动。电机集成有编码器, 可以检测电机转动角度及速度信号。乐高机器人配备的丰富多样的结构件, 可以让学生自主

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2022-03-11

基金项目: 北京航空航天大学 2020 年一流本科课程建设项目(2020)。

作者简介: 马纪明(1979-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事工业系统中的科学技术与实践、航空机电产品的试验方法等工作。E-mail: Jiming.ma@buaa.edu.cn

设计结构功能各异的机器人。平台配备红外、触碰、超声波、色彩、陀螺仪 5 种传感器,实现定量的测量与控制。借助 Wi-Fi、USB 数据线、蓝牙 3 种方式,智能主机(下位机)可以建立与上位机的连接,在上位机运行 python、MATLAB 多种语言环境,既可以实现上下位机的“监视-控制”模式,也可以由上位机下载控制程序,由智能主机独立运行^[4]。多种方式支持实现计算机和机器人智能主机运行数据的双向传输,可以方便地将机器人运行和试验数据传输到上位机,与计算机仿真数据进行对比分析。综合来看, EV3 机器人功能强大,能够满足课堂教学的需要。

三轮全向机器人是机器人教学与竞赛领域所广泛应用的一种设计,具有结构简单、运行高效、控制精准等优点。它装有 3 个完全相同的万向轮,且由完全相同的电机驱动^[5-6]。3 个轮子径向对称安装,相互之间夹角为 120°。三轮全向机器人的 3 个驱动轮之间的运动是解耦的,不会因为不同驱动轮的转动方向冲突而发生打滑,相较于常规的四轮机器人在速度指令的输入上更加自由,单个驱动轮与整体之间的运动关系更易于观察和理解,有助于学生掌握智能机器人的运动控制方法^[7-9]。

本文主要结合“智能机器人设计与实践”课程实践教学中的经验,论述了如何搭建以 EV3 机器人为中心的教学平台,并以教学中用到的三轮全向机器人为例,阐述 EV3 机器人的软硬件配置与工作环境、机器人的运动学原理与实例分析,以及从终端发出指令到机器人进行运动之间所经历的步骤,最后借助一个仿真实验来测试教学平台的实用性。

1 机器人系统及配置

基于 LEGO EV3 平台搭建的三轮全向机器人,如图 1 所示,主机有 A、B、C 共 3 个端口分别连接 3 个大型电机,以驱动 3 个万向轮的转动。机器人加装了红外传感器(远程模式),与红外遥控器配合使用,可以远距离控制机器人。机器人装有陀螺仪,用于测量其转动的角度与速度,在前后和左右两个方向加装了超声波传感器,用于测量机器人在自身坐标系 X 轴与 Y 轴两个方向上的位移。上述 4 个传感器分别由连接线连接在机器人主机的 1、2、3、4 接口上,结构部件将主要零件拼装为整体,确保运动过程中机器人可以被视为一个刚体,并保证其运动过程足够平稳,可以视为在水平面上的平移与旋转。

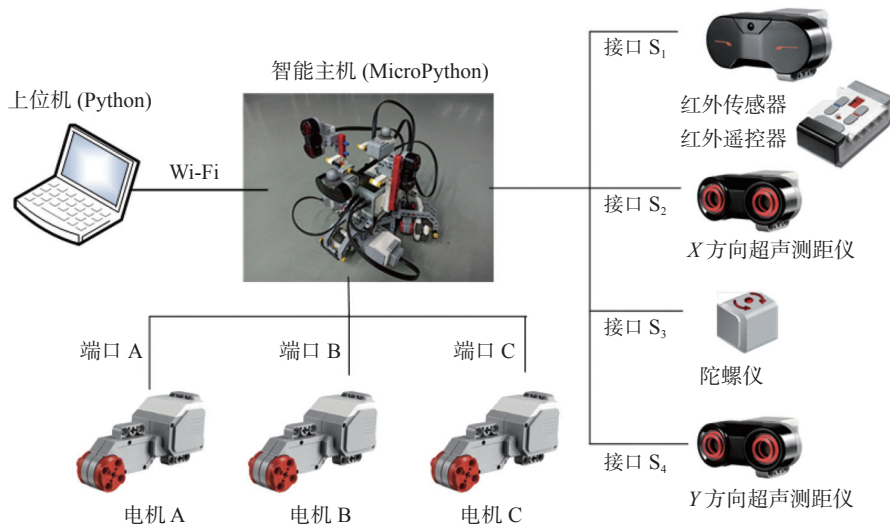


图 1 三轮全向机器人组件与配置

1.1 组件参数

作为一款鼓励自主设计与拼装,拥有良好可扩展性的产品,LEGO EV3 拥有十分丰富而功能各异的组件(见图 1)用于满足不同的实际需求,为搭建教学平台提供了极大的便利和自由。本文论述的三轮全向机器人主要部件及特征如下。

1.1.1 智能主机

机器人的主机是一个集成了许多功能的核心部件,内置基于 Linux 系统的 AMR9 处理器,拥有黑白显示器、内置扬声器和若干按键,用户可以直接在智能主机上进行控制操作,也可以通过 Wi-Fi、蓝牙和 USB 数据线 3 种方式与终端建立连

接进行间接控制。主机有 4 个接收数据的输入端口 (S_1, S_2, S_3, S_4) 用于连接传感器, 以及 4 个用于执行命令的输出端口 (A, B, C, D) 用于连接电机。

供电电压: 9 VDC。

1.1.2 大型电机

LEGO 机器人的大型电机是一个可以和主机进行信息交互的智能配件, 配备有一个内置的转速传感器, 用于监测自身的转动速度。

控制精度: 1 deg。

最大转动速度: 900 deg/s。

失速扭矩: 40 N·cm。

1.1.3 万向轮

万向轮具有两个自由度, 可以沿相互垂直的两个方向运动, 其中沿径向方向的运动是受电机驱动的主动运动(万向轮半径: 24 mm)。

1.1.4 红外传感器与遥控器

红外传感器是一种数字传感器, 根据设置, 它可以检测 4 个独立频道的信号, 通过将红外遥控器设置在相应的频道, 可以实现机器人的远程控制。遥控器总共有 4 个按键和 1 个大按钮, 通过单独触碰以及按键之间两两组合的方式, 共计能对机器人发送 11 种指令。

遥控距离: 2 000 mm。

视角: ± 75 deg。

1.1.5 超声波传感器

超声波传感器通过发出超声波并测量声音反射回传感器所需的时间来精准计算传感器正前方物体的距离, 准确定量分析机器人在传感器正对方向上的速度与位移。

精度: 1 mm。

量程: 0 ~ 2 550 mm。

1.1.6 陀螺仪

陀螺仪传感器检测旋转运动和旋转速度, 并且会记录在一定时间内机器人总计转动的角度, 实验中借助陀螺仪测量机器人的旋转情况。

精度: 1 deg。

1.2 环境配置

如图 1 所示, EV3 机器人的操作环境可分为 3 大部分。

上位机: 用于执行编译操作的终端, 需安装 Visual Studio Code 软件并加载 LEGO Mindstorms EV3 工具包, 使用 Python 语言进行编译。

下位机: LEGO EV3 智能主机, 需要配置写

入 MicroPython 操作系统的 SD 卡。

执行机构: 电机、各类传感器。

用户可以直接对下位机进行操作, 但一般选择在上位机进行程序的编译, 上位机与下位机之间可以通过 Wi-Fi、蓝牙、USB 共 3 种方式建立双向连接, 使用前应将编译好的程序下载到下位机内存中。在实验过程中, 用户可借助红外传感器、遥控器实现对机器人的简单命令, 为此需要将红外传感器设置为远程模式, 并与遥控器设置在同一频道, 下位机与所用到的执行结构均通过连接线直连。

2 机器人模型

2.1 三轮全向机器人解析模型

如图 2 所示, 三轮全向机器人总共装配有 3 个电机, 分别与驱动轮相连, 3 个驱动轮的转动速度 (v_1, v_2, v_3) (单位: m/s) 正方向在图中标出。机器人整体是一个刚体, 在水平面上的运动是 3 个驱动轮综合运动的结果, 现讨论机器人沿自身坐标系的运动, 即坐标系 (X_R, Y_R, θ) 下机器人所做的运动, X_R, Y_R 方向如图 2 所示, 定义逆时针方向为 θ 的正方向, 则 (V_x, V_y, W) (单位: m/s, deg/s) 可以描述机器人整体的运动状态。

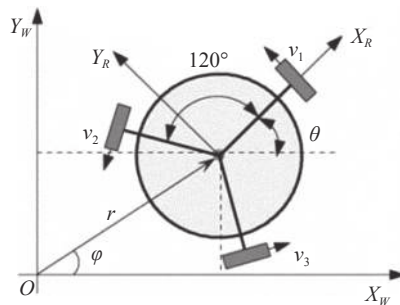


图 2 三轮全向机器人理想模型

本节将建立机器人整体运动与其所加装的 3 个电机转动之间的运动学方程。

运动学逆解: 当给出机器人的运动期望 (V_x, V_y, W) 时, 计算应当给予电机的命令。

运动学正解: 当给出 3 个电机分别的转速 (v_1, v_2, v_3) 时, 如何计算机器人整体的运动特性。

教学中, 要求 EV3 机器人能够精准地按照给定的速度在水平面上运动, 为此需要将机器人整体运动分解为 3 个驱动轮的运动, 上述三轮 EV3 机器人, 收到运动信号 (V_x, V_y, W) 之后, 3 个轮子应当以 (v_1, v_2, v_3) 的速度运动^[10-11]:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & R_r \\ -\sin\frac{\pi}{3} & -\cos\frac{\pi}{3} & R_r \\ \sin\frac{\pi}{3} & -\cos\frac{\pi}{3} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ W \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_r 为机器人中心点距离驱动轮中心点的距离(单位: m)。

实际的控制中, 通过控制电机的转速来间接控制轮子的运动, 二者之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{180}{\pi r_w} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, r_w 为驱动轮的半径(单位: m)

通过式(1)和式(2), 可以根据水平面运动速度预期值(V_x, V_y, W)计算出应当赋予每一个电机的转动速度($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)。相应的, 将($\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$)作为转动指令输入给电机时(假定($\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$)不超过电机的最大运转速度), 也能计算出机器人运动过程的唯一解, 计算过程为上述过程的逆解:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{\pi r_w}{180} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3R_r} & \frac{1}{3R_r} & \frac{1}{3R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{12} \\ \omega_{13} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)显示三轮全向机器人的一个重要特征: 当且仅当 3 个电机的转速($\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$)均为 0 时, 机器人保持原地不动。任意电机不为 0 的转动速度一定会引起整体运动^[12-14]。

这一特征保证了三轮全向机器人单个电机的运动一定能反映在整体运动过程中, 不会出现原地打滑的情况, 允许学生不受限制地任意设置 3 个电机的转动状态, 充分理解机器人部分与整体的运动关系, 适合作为智能机器人课程的起步部分。

2.2 机器人工作流程

图 3 展示 EV3 机器人在接收到速度指令之后执行的流程, 输入量是预期的运动速度(V_x, V_y, W), 首先机器人需要根据这一要求计算出对于每一个电机所需要下达的指令, 为此借助运动学方程(1)与方程(2)定义函数 Kinematics() 来计算电机的运转速度, 随后这一指令被转化为电压信号并分别发送给三轮 EV3 机器人的 3 个独立电机, 电机的详细工作过程如图 3 中电机系统流程图, 该系统是带有饱和值上限的一阶系统, 电机的输出为实际转动角速度 ω , 由于机器人是一个刚体, 3 个电机的运动共同作用于机器人整体, 最终结果为机器人实际运动状态(v_x, v_y, ω)。

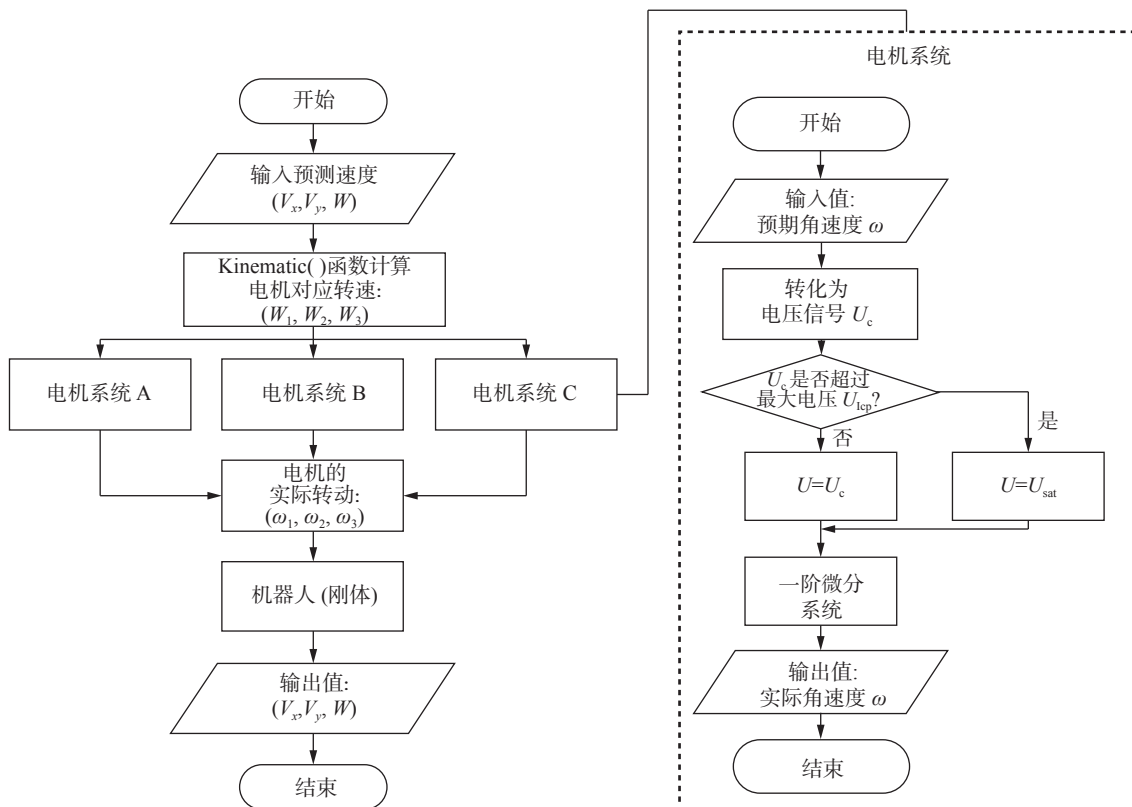


图 3 EV3 机器人将输入的运动指令转化为实际运动的处理流程

2.3 仿真模型

第 2.2 节描述了机器人运动的理想状态，忽略了机器人的动态响应过程，认为随着信号的下达，机器人立即获得了与信号完全相同的运动速度，即 $(v_x, v_y, \omega) = (V_x, V_y, W)$ 。在实际操作中，EV3 机器人对运动信号的响应结果是一个时变过程，机器人需要经历短暂的启动阶段后达到稳定的运动速度，考虑到这一时变过程对运动结果的影响，图 4 为使用 MATLAB Simulink 建立的机器人

仿真模型，模拟运动命令下达后机器人的动态响应过程。

模型中输入量为 3 个阶跃信号，左侧方程依照运动学关系式(1)和式(2)给出，计算得到的预期角速度 $\omega_a, \omega_b, \omega_c$ 分别输入到一阶系统(电机)中，右侧转换矩阵可参照式(3)，模型的仿真结果为机器人的速度 (v_x, v_y, ω) 随时间变化的曲线，该结果作为机器人运动的理想值，为后续实验提供了比对基准。

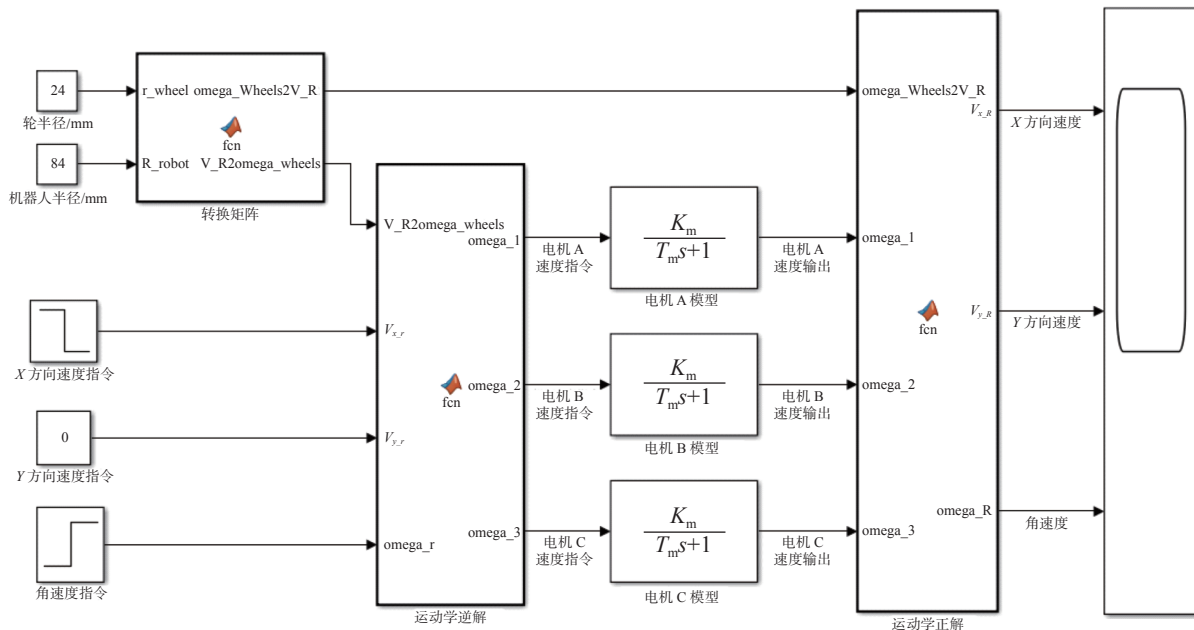


图 4 机器人预期与实际运动状态响应仿真模型

3 实验

3.1 实验流程

为测试在实际应用过程中 EV3 教学平台的实用性，实验以课堂教学中所常用的 3 种运动为例，比较 EV3 机器人运动的仿真值与实验值，给出 EV3 响应运动信号的准确性、快速性评价，包括以下 3 种运动情况：

- ① 沿正前方直线前进， $(V_x, V_y, W) = (0.1, 0, 0)$ ；
- ② 沿斜前方 45°前进， $(V_x, V_y, W) = (0.1, 0.1, 0)$ ；
- ③ 原地绕自身中心旋转， $(V_x, V_y, W) = (0, 0, \frac{\pi}{2})$ 。

实验中，仿真值通过 Simulink 拟真模型给出，实验值则来自机器人装载的传感器读数，机器人在 X 轴和 Y 轴方向分别安装了超声波传感器，可以实时地通过 `sensor.distance()` 函数返回机器人距离前方物体的距离，陀螺仪传感器则提供了 `sensor.speed()` 函数用于测量机器人的转动速度，

以及 `sensor.angle()` 记录转动的总计角度。

工业实践中常使用准确性与快速性评价系统的性能，系统的准确性取决于其在最终达到稳定之后，所具有的速度与预期的速度之间是否有偏差，而快速性则衡量系统达到最终稳定区间所需要的时间长短，我们将上述返回值作图并与仿真值进行比对，进而评价 EV3 机器人的性能。

3.2 结果展示与分析

EV3 机器人在 $t = 2$ s 时收到沿正前方前进的指令后，其位移随时间变化的曲线如图 5 所示。

由于超声波传感器仅返回离散的距离结果，机器人的速度仿真曲线同样进行了积分处理，机器人在运动刚刚开始的一段时间内基本保持了与仿真曲线相近的运动规律，但随着误差的累积，其最终的位移量与发出的指令存在较明显的偏差。

基于此实验平台，不仅可以对比机器人的运动特性，还可以通过对比各个电机的实际和仿真

结果,验证设计的合理性。图6展示了在直线运动情况下机器人电机的仿真和试验结果。

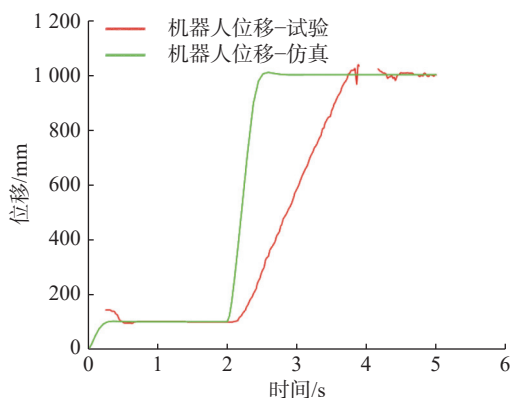


图5 机器人直线运动响应结果

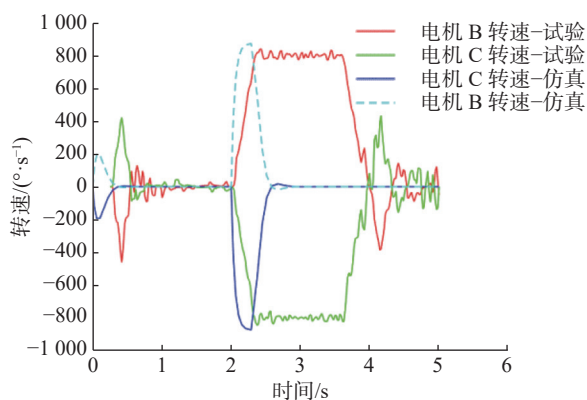


图6 机器人电机仿真和试验响应对比

4 结束语

EV3 机器人平台具有硬件资源丰富,软件接口方便,使用方式灵活等一系列优点。基于EV3平台搭建的三轮全向机器人平台应用于实践教学,既能够按照指令执行运动过程,也能通过传感器反馈运动状态参数。平台整体操作便捷,功能性强,适合于在课堂教学中进行使用,引导学生掌握智能机器人的设计与控制方法。基于此平台开设的实践课程,可以有效锻炼学生的动手能力、建模能力、理论及实践结果对比分析能力及解决问题的能力。

参考文献

- [1] 马纪明,黄行蓉.工业科学与实践[M].北京:北京航空航天大学出版社,2020.
- [2] 劳伦斯·沃尔克.乐高机器人EV3探索书[M].王睿,译.北京:人民邮电出版社,2014.
- [3] GÓMEZ-DE-GABRIEL J M, MANDOW A, FERNÁNDEZ-LOZANO J, et al. Mobile robot laboratory project to introduce engineering students to fault diagnosis in mechatronic systems[J]. *IEEE Transactions on Education*, 2015, 58(3): 187–193.
- [4] SORIANO A, MARIN L, VALLES M, et al. Low cost platform for automatic control education based on open hardware[J]. *IFAC Proceedings*, 2014, 47(3): 9044–9050.
- [5] WILSON S, GAMEROS R, SHEELY M, et al. Pheeno, a versatile swarm robotic research and education platform[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2): 884–891.
- [6] LI Y, ISHIKAWA T, MATSUBARA Y, et al. A platform for LEGO Mindstorms EV3 based on an RTOS with MMU support[J]. *OSPERT*, 2014: 51–54.
- [7] ZHAO Y, BeMent S L. Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots[C]//*Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. France, Nice: IEEE Computer Society, 1992: 91–92.
- [8] WATANABE K. Control of an omnidirectional mobile robot[C]//*Second International Conference Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems*. Adelaide, South Australia: IEEE, 1998.
- [9] 葛亚明.面向自动化专业新生实践教学的轮式机器人设计[J].*实验科学与技术*, 2020, 18(2): 117–121.
- [10] 富月,周晓杰.现代控制系统课程创新实验教学实践[J].*实验研究与探索*, 2019, 38(11): 151–155.
- [11] 李亚娟,尤文斌,祖静.三轮机器人小车无线控制系统的设计[J].*实验科学与技术*, 2011(6): 54–56.
- [12] 阎世梁.三轮全向机器人运动特征分析[J].*工业控制计算机*, 2013(6): 81–83.
- [13] 王勇,刘洋,祝鑫.基于三轮全向移动平台的运动控制系统研究[J].*现代机械*, 2019(6): 5–9.
- [14] 孙科学,郭宇锋,肖建,等.面向新工科的工程实践教学体系建设与探索[J].*实验技术与管理*, 2018, 35(5): 233–235.

编辑 张俊