

基于滑模变结构的轮式机器人运动误差控制器设计

刘妍萍

(西安工程大学, 西安 710600)

摘要: 面对当前使用的基于黎卡提微分方程、综合位姿误差控制优化仿真方法受到不确定性因素干扰, 导致控制误差较大的问题, 提出了基于滑模变结构的轮式机器人运动误差控制器设计; 使用双框架陀螺仪, 为控制器提供电力; 采用 FB900C/E 角位变送器, 将交流信号转换为角位移输出; 使用 TMS320F2812 的 DSP 控制器, 负责控制整个控制器的数据传输以及电平转换; 充分考虑相变量输入的 n 阶线形数据, 设计滑模变结构控制律, 计算滑模变结构控制滑动面; 在滑模变结构模态控制阶段, 构建滑模变结构模态控制阶段的运动方程矩阵; 对滑模切换面强制状态点运动, 通过控制目标实现稳定控制; 对 DSP 程序控制流程进行设计, 将基于滑模变结构的误差控制结果传递到电位器上, 并将运行数据发送到主机, 由此完成轮式机器人运动误差控制; 由实验结果可知, 该控制器通过自适应调整参数后, 滑模抖动得到明显消除, 且最大控制误差为 0.01 rad, 具有精准控制效果。

关键词: 滑模变结构; 轮式机器人; 运动误差; 控制器

Design of Motion Error Controller for Wheeled Robot Based on Sliding Mode Variable Structure

LIU Yanping

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: The motion error controller of wheeled robot based on sliding mode variable structure was proposed to solve the problem of large control errors caused by the disturbance of uncertain factors in the current optimization simulation method of position and pose error control based on Riccati differential equation. A dual-frame gyroscope is used to provide power to the controller. FB900C/E Angle transmitter is used to convert AC signal into angular displacement output. The DSP controller of TMS320F2812 is used to control the data transmission and level conversion of the whole controller. Considering the n -order linear data of phase variable input, the control law of variable structure control of synovial film was designed and the sliding surface of variable structure control was calculated. In the mode control stage of the synovial variable structure, the motion equation matrix of the mode control stage was constructed. The state point is forced to move on the synovial switching surface, and the stability control is achieved by controlling the target. The DSP program control flow is designed, and the error control result based on sliding mode variable structure is transmitted to the potentiometer, and the operation data is sent to the host computer, so as to complete the motion error control of the wheeled robot. The experimental results show that the sliding mode chattering is obviously eliminated after the controller adaptively adjusts the parameters, and the maximum control error is 0.01 rad, which has an accurate control effect.

Keywords: sliding mode variable structure; wheeled robot; motion error; controller

0 引言

轮式机器人在探索未知领域方面有很大的优势, 其应用已从工业延伸到服务业、教育、国防等领域, 轮式机器人在各个领域的应用已经对人类社会的生产和生活产生了积极而深远的影响。在轮式机器人的实际应用环境中, 各种不确定性因素影响着控制系统的性能, 甚至使控制系统不稳定, 降低了控制精度。车轮移动机器人是一个典型的非完整控制系统, 在考虑轮滑的运动模型时, 不可避免地要考虑轮毂的滑移系数, 因为车轮一旦发生滑移, 若在复杂情况下, 理想运动学控制器不再适用, 则使其跟踪精度

降低, 使其轨迹偏离预期轨迹。为此, 应对轮式机器人的运动误差进行控制。

目前已有相关学者对轮式机器人运动误差控制器进行设计研究。文献 [1] 提出基于黎卡提微分方程的移动机器人运动误差控制研究方法, 构建黎卡提微分方程, 以此推导轮式机器人动力学方程。通过设计黎卡提微分控制器, 推导机器人运动的相关状态, 实现机器人运动控制的稳定性; 文献 [2] 结合综合位姿误差控制方法, 在机器人逆运动学模型基础上, 构建误差传递矩阵模型, 根据求解结果, 确定机器人姿态, 根据相关姿态数据, 控制机器人运动状

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-03-24。

作者简介: 刘妍萍(1987-), 女, 陕西蒲城人, 硕士, 讲师, 主要从事电子信息方向的研究。

引用格式: 刘妍萍. 基于滑模变结构的轮式机器人运动误差控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 115-120.

态。然而，这两种方法受到不确定性因素干扰，使得控制效果不理想，为此，结合滑模变结构，设计了一种轮式机器人运动误差控制器。

1 控制器硬件结构

轮式机器人运动误差控制系统硬件结构是由基于 TMS320F2812DSP、FB900C/E 角度变送器、自校正角度变送器和陀螺组成的。该硬件结构分为俯仰通道和倾斜通道两个通道，除了进动速度快或慢之外，其他情况相同^[3]。该系统的硬件结构如图 1 所示。

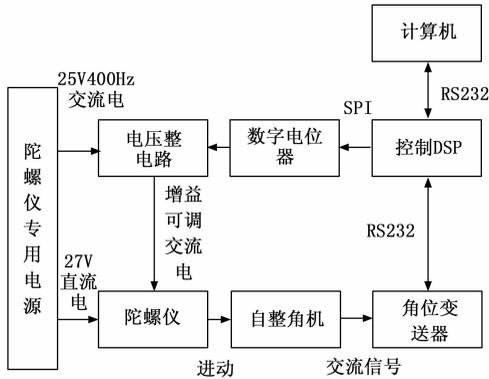


图 1 控制器硬件结构示意图

由图 1 可知，陀螺仪是系统的控制对象，为系统提供电力；角度变送器由 FB900C/E 角度变送器实现角位移或线位移输出，两者共同组成系统的信号采集部分；采用 TMS320F2812DSP 作为控制系统控制器的电路板，用于控制整个系统各部分的工作状态及各部件间的数据传输，并通过调整陀螺仪控制电压，为系统各部分提供电平转换^[4]。

1.1 双框架陀螺仪

双框陀螺仪由两个机架组成，分别为俯仰和倾斜机架，为交流力矩电机提供驱动力。扭矩电机可以接受的最大供电电压为 25 V 的 400 Hz 交流电，通过改变电压来控制电动机的速度，通过改变正负向功率来改变其方向^[5]。双框式陀螺仪有 3 种控制方式，一是改变进动速度，二是改变陀螺仪框架的方向，三是改变的复位信号。采用自校正装置，利用数模变换将陀螺仪两通道进动角度位置转换为比例交流信号，然后输出。通过一个 32 孔插座，将陀螺仪自带的内部信号进行采集和处理^[6]。

图 2 中显示了改变陀螺仪速度的程序控制放大器。

由图 2 可知，该程控增益放大器电路由数据锁存器 74LS373、4SPST 模拟开关 MAX313、运放 OP07 和一个电阻网络组成。其功能是将 DSP 输出的数字量转换为模拟量，即幅度可调电压。通过选择电阻网络电阻 R1~F4 和电阻 RI 的阻值，经模拟开关 4 个通道的切换与组合，可得到 15 个不同的放大/衰减增益。此电路的输入、输出交流电压幅值很小，可使信号在传输时保持电压相位不变。该方法利用 DSP 对给定的输入值进行调节，进而改变陀螺仪的进动速度^[7]。

1.2 角位变送器

反馈部分采用 FB900C/E 角变送器作为传感器，其内

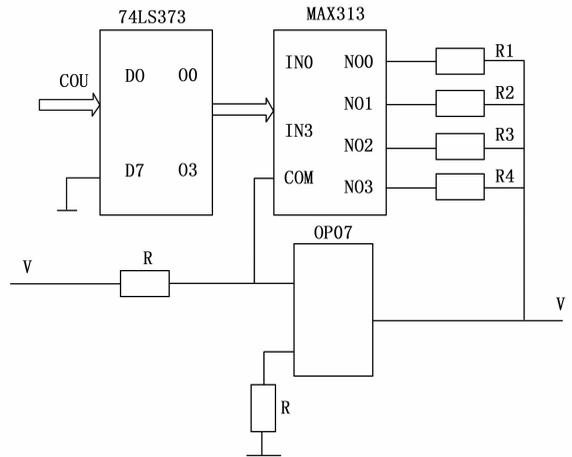


图 2 程控放大器电路示意图

部采用自调节的陀螺仪作为检测部件。利用对接收到的交流信号进行处理，可将陀螺仪两个通道旋转的角度转换为角位移或线位移，并输出模拟量或数字量。选取发送数位，即通过串口将陀螺仪的进动角以特定格式发送给 DSP，由 DSP 程序从中提取进动角度值。角变送器分辨率为 10 位，用于 360°角的检测。如此，发射器至少能感觉到 0.3°的角度位置进动^[8]。

FB900C/E 变送器具有串口输出 RS232C 和 RS485，每次只能使用其中的一个，资料由串行端口传送。发射机可以编号，以便主机能通过串口存取来自多个发射机的数据^[9]。变送器串行通信协议有两种选择，一个是使用 ASCII 码，另一个是十六进制数。角位变送器存在两种输出模式，分别是数据连续输出和指令单独输出^[10]。其中数据连续输出指的是在串口处连续发送数据，而指令单独输出指的是通过上位机发送相关命令。因 DSP2812 在设计中使用了两个串行接口，一种是用于与计算机通讯，另一种是用于采集两个通道的角位置信号，所以本设计采用了 ASCII 编码的指令输出。

1.3 DSP 控制器

选择 TI 公司的 C2000 系列 DSP：TMS 320 f 2812。TMS320F2812 程序空间与数据空间分离，CPU 可同时存取程序和数据，有效提高了 DSP 的运算速度。采用 DSP 采集陀螺仪的进动信号，调节控制电压，实现与计算机的通讯，由于 TMS320F2812 芯片具有相应的存储器控制系统，因此外部存储器接口问题无需考虑^[11]。TMS320F2812 正常工作所需的电压包括两个部分：1.8 V 芯片核心电压和 3.3 V Flash 电压。该控制器还具备去耦合电容作用，一是可用于抑制电源产生的噪声对数字信号处理机的正常工作；二是作为储能电容器；三是可以滤除 DSP 芯片工作时产生的高频噪声^[12]。

DSP 用于控制整个系统各部分的工作状态及各部件间的数据传输，根据滑模变结构误差控制计算结果设置 DSP 指令，能够实现数字信号的处理，将数字信号转换为控制指令，轮式机器人运动误差控制。

1.4 数字电位器

利用数字输入来控制数字电位器, 产生模拟输出。数字电位器, 也叫 CNC 可编程电位计, 是一种新型的 CMOS 集成电路, 取代了传统的机械电位计 (模拟电位计)^[13-14]。最常见的 Max5432 型数字电位计是一种是由 Maxim 公司制造生产的 7 位, 且具有 32 个可选择的螺杆, 不容易丢失的线性数字电位计, 它包括了 7 位的移位寄存器、数据锁存器、电位器和控制时钟逻辑电路。该数字电位计的控制主要包括 3 个部分, 分别是晶片选择 (Circuit Select)、DIN (Digital Input, DIN)、SCLK (SCLK)^[15]。电路采用 2.7 V 至 5.25 V 供电, 它的内部电阻上的电压是由 VDD 和 VSS 外部提供的。VDD 和 VSS 的电压应该在 9 V 以上, 在 31.5 V 以下。这样, Max5432 就可以很好地选择输入电压。另外, Max5432 的外部线路也很简单, 该系统无需外部器件即可调整输入电压及输出。

数字电位器芯片使用 I2C 串行总线作为接口, 以 400 kbps 的数据通讯速度对芯片和电位计进行调速。当上电时, 电可擦可编程只读存储器 (EEPROM) 能使滑动端回到上次关机时所储存的位置。该装置接收到的最大分电流能够达到几百微安或几毫安, 这与数字电位器的性能有关。数字电位器具备数控调整功能, 能够取代机械式电位计, 是一种半导体集成电路, 取消了传统的基板和电阻。在自动控制过程中, 能够精准地测量电刷上的电阻^[16-18]。在系统控制过程中, 也能够精准地测量控制角度, 并根据输出的反馈信号, 通过旋转轴来调整输出^[19-20]。数字电位器一般都有一个总线接口, 它既可以用单片机也可以用逻辑电路来实现。

1.5 自整角机

自整角机具有两个自调节装置和一个双极型调节方式, 它是一种利用自整定步进特性, 可以把角转换成交流电压的异步电动机。在伺服系统中, 该装置起到了位移检测的作用。同时, 它还可以进行远距离的传输、转换、接收、显示等功能。通过导线连接的两个以上的电机, 能够使两个以上没有机械连接的转轴实现自转或同步转动, 该过程的工作模式被称为自调整模式^[21]。

在两个自调整装置中, 一个是用来传送角信号的, 它的激励线圈连接到一相交流电源上。另一个是利用角度信号, 将角度信号转换为感应电势, 由感应线圈所输出, 也就是自调节角度接收机^[22-23]。采用两台自调角机的定子上的全步进线圈组成一星形, 三相的相位绕组构成环形。将单相 AC 电流加到同步变频器的励磁绕组上, 在两个同步器的间隙处形成一个脉冲磁场, 该脉冲磁场的幅值随时间变化, 脉动磁场使自整角传感器产生了一个全步进线圈的相感电位^[24]。全阶绕组的电势最大值是由各相绕组的轴与激发线圈轴的相对位置决定的, 全阶绕组的电势最大值是由各相绕组的轴与激发线圈轴的相对位置决定的。

2 控制器软件部分设计

2.1 基于滑模变结构的误差控制

滑模变结构是一种非线性特殊结构, 具有不连续性,

该结构并非固定, 而是根据结构当前状态随时发生改变, 使得系统进入预先设定的运动轨迹中。研究单输入、 n 阶线性定常系统的相位变量形式, 所构造的运动方程矩阵如下:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1 = \lambda_2 \\ \dot{\lambda}_2 = \lambda_3 \\ \vdots \\ \dot{\lambda}_n = -\sum_{i=1}^n a_i \lambda_i - bR \end{cases} \quad (1)$$

公式 (1) 中, a_i 和 b 分别表示已知的常规参数。

滑模变结构控制, 存在如下不连续形式, 可表示为:

$$R(\lambda) = \begin{cases} \lambda^+(x), f(x) > 0 \\ \lambda^-(x), f(x) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

公式 (2) 中, $f(x)$ 表示滑模切换函数, 当 $\lambda^+(x) \neq \lambda^-(x)$ 时, 滑模变结构控制律应满足如下条件:

$$\begin{cases} \lim_{f \rightarrow 0^+} f(x) < 0 \\ \lim_{f \rightarrow 0^-} f(x) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

滑模切换函数也可称为状态向量的线性函数, 其公式为:

$$f(x) = \epsilon_1 x_1 + \epsilon_2 x_2 + \dots + \epsilon_{n-1} x_{n-1} + x_n \quad (4)$$

公式 (4) 中, $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{n-1}$ 表示相变量参数。在 n 维相空间中, 滑模变结构控制滑动面可表示为:

$$\epsilon_1 x_1 + \epsilon_2 x_2 + \dots + \epsilon_{n-1} x_{n-1} + x_n = 0 \quad (5)$$

由于运动方程矩阵为相变量形式, 所以为了保证滑模变结构模态控制阶段的稳定, 需选择合理的相变量参数, 使特征方程的所有特征根都具有负实数。

当滑模变形轮式机械手的运动轨迹达到转换流型后, 便会沿着它的运动方向继续向前, 这时, 滑模变结构的轮式机器人的运动轨迹仍停留在转换流形上, 这就是所谓的“理想滑模”状态。但在实际工作中, 由于机械臂的惯性延迟, 使其无法维持原有的运动轨迹, 只能在接近转换流形的地方来回移动, 这就是所谓的抖振。为此, 理想状态下的滑模与实际情况滑模存在一定偏差^[25]。在理想情况下, 当滑模变结构的轮式机器人进入滑模运动状态后, 由于滑模变结构的轮式机器人的运动轨迹停留在其上面, 所以运动点趋近切换面的运行速率为 0, 为此可确定在轮式机器人上施加的力是等效或平均作用力。轮式机器人在滑模上运动的微分方程实质上是对滑模运动的一种极限状态, 在该状态下, 轮式机器人处于滑模运动状态时, 是无法用连续控制方式来实现非连续控制的。因此, 在滑模变结构模态控制阶段, 使滑模切换函数 $f(x) = 0$, 由此可得到:

$$\epsilon_1 x_1 + \epsilon_2 x_2 + \dots + \epsilon_{n-1} x_{n-1} = -x_n \quad (6)$$

抖振是滑模变结构控制研究中的一个重要问题, 抖振的加剧会导致机器人的稳定偏差, 从而对滑模变结构的性能造成一定的影响, 而且还会不断地消耗轮式机器人的能源。基于此该问题, 提出了一种等效控制方法。利用指数逼近律, 使机械臂在一定的时间内进入稳定的工作状态, 并能满足轮式机械臂的良好运动平顺性, 极大地减少了

抖振；在滑模片状态下，当移动点靠近切换表面时，移动速度为 0 时，滑模变结构模型的运动方程也为 0，此时，由于不存在高频分量，使得滑模抖振更趋近等效控制，因而可以有效地防止滑模抖振。

基于此，构建的滑模变结构模态控制阶段的运动方程矩阵可改写为：

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1 = \lambda_2 \\ \dot{\lambda}_2 = \lambda_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = -\epsilon_1 x_1 - \epsilon_2 x_2 - \cdots - \epsilon_{n-1} x_{n-1} \end{cases} \quad (7)$$

因此，在滑模变结构模态控制阶段的动态行为可以由 $n-1$ 阶状态方程来表征。

当控制器工作状态穿越滑模面 $f(x) = 0$ 进入 $f(x) < 0$ 时，控制量 $\lambda(x)$ 从 $\lambda^+(x)$ 切换到 $\lambda^-(x)$ 而达到条件公式 (2)，使得控制器状态迅速穿越滑模面，并进入 $f(x) > 0$ ，由此完成了滑模面的滑变运动。

充分考虑非线性时变系统，在状态空间中，存在一个超曲面 ϵ 为 0，如图 3 所示，可将其状态空间分为 $\epsilon > 0$ 和 $\epsilon < 0$ 两个部分。

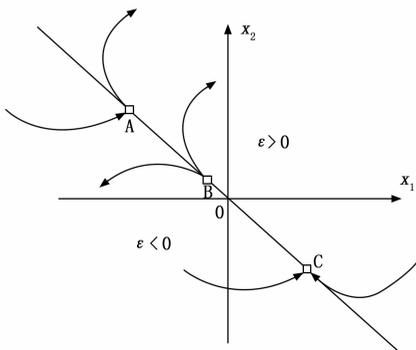


图 3 滑模面的滑变运动示意图

滑动模变结构与传统控制不同，滑模变结构是一种不连续控制，甚至系统的“结构”在切换特性上是动态变化的。其主要目标是利用滑模变结构控制的不连续状态设计状态空间中的超平面，即在有限条件下按预定状态轨迹连续改变系统结构。该系统的状态逐渐滑向某一超平面的平衡点并最终移动到接近平衡点边界的边界区域，即滑模运动。一般而言，控制器状态空间存在一个超平面 $\epsilon = 0$ ，这 3 个点分别为普通点，初始点和截止点，当它通过超平面的控制器，使其接近一个超平面时，如 A 点所示；当控制器的初始点靠近超平面时，将运动到超平面的两边，如 B 点所示；当控制台在接近超平面的时候，切断点从超平面的两侧移动到此点，如 C 点所示。

滑动模变结构控制中，截止点相对于共同点和初始点具有特殊的意义。假如某一切面上的某一区域只有一个截止点，那么当系统移动到该区域时，就会被“吸引”到该区域的移动。所以，包含开关平面上所有截止点的区域称为“滑

动模域”，这一地区的系统性运动称为“滑模运动”。滑动模变结构控制主要是通过控制目标来设计滑模切换面，使系统的状态点向滑模切换面移动，从而最终实现控制目标。

2.2 程序流程设计

DSP 程序主要由主程序和定时中断子程序组成。DSP 程序流程如下所示。

步骤一：在 DSP 主程序中，首先对系统进行初始化，包括 CPU 的初始化和相关外设的初始化。在 DSP 主程序中，需要对系统进行初始化，并对 CPU 及外部设备进行初始化。其次，对数字式电位计进行初始化，也就是把电位计的滑臂放在规定的位置。最后，通过启动计时器中断来接收主机的运行指令。一旦接到指令，计时器就会被触发，并进入一个死循环。在中断时限结束时，将会执行一个中断子程序；在接收到一个系统终止命令时，停止该系统的运行。

步骤二：启动数字电位计，也就是将电位计的滑动臂放在指定位置。数字式电位计和机械式电位计一样，具有很好的实用价值。3 个端子中的两个与电阻器的两个端子相接触，而另一个（也就是电阻器）可以将不同的点连接到一个电阻的长度，由此设置了一个期望的电阻值。区别于机械电位器和数字电位器，它是对电阻型接触的控制。当数字电位计由串行总线或数字控制线路来实现时，机械电位计是用来实现电阻触点的连接的。数码可程式电位计的体积也较小，使得它更适用于便携使用。该装置具有新的接口，便于与系统集成，并能直接由微处理器进行控制。另外，它对干扰的影响也不是很大。DSP 电位计的电阻接触位置可以被储存在不同的易失性存储器或电位计自身的非挥发存储器中，这样以前的设定信息就不会丢失，而在系统重新调节后，又会重新进行。

步骤三：开启计时器，接受上位机系统运行命令，如果接收到打开定时器的命令，进入循环，中断时间执行中断子程序。

步骤四：当接收到停止指令时，停止系统移动。

步骤五：将读取指令发送到角度变送器，并接收其反馈数据；

步骤六：在误差控制的基础上，将滑模变结构控制指令送至数字电位器。把陀螺仪的运行数据最终发送给 PC。

综上，可得出控制器的软件流程图如图 4 所示。

由图 4 可看出，首先构造滑模变结构控制器的运动方程矩阵，设计滑模变结构控制律，控制机械臂在一定的时间内进入稳定的工作状态，通过控制目标来设计滑模切换面，使系统的状态点向滑模切换面移动，并设计 DSP 程序流程将控制指令传输至从而最终实现控制目标。

3 实验分析

为验证基于滑模变结构的轮式机器人运动误差控制器设计的有效性，以图 5 所示轮式机器人为对象进行轮式机器人运动误差控制器实验。

3.1 数值分析

分别采用分别使用基于黎卡提微分方程、综合位姿误

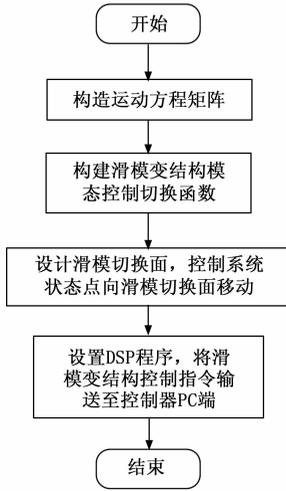


图 4 控制器的软件流程图



图 5 轮式机器人实验对象

差控制优化仿真方法和基于滑模变结构的误差控制器对轮式机器人运动轨迹进行跟踪控制, 实验选定的目标是直线轨迹。轮式机器人机身几何中心到两轮中心的距离均为 0.2 m, 轮子半径均为 0.25 m, 车身总质量为 5 kg。

在直线轨迹误差控制实验中, 图 6 显示了关节 1、2 的轨迹跟踪及控制输入曲线。

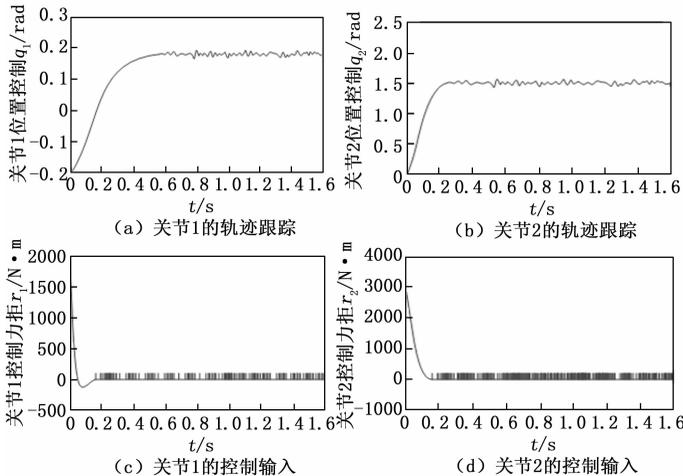


图 6 关节 1、2 轨迹跟踪和控制输入曲线

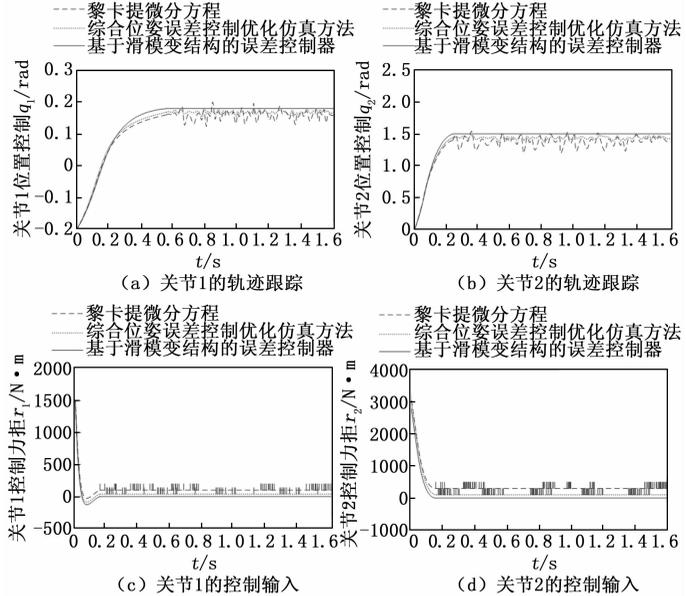


图 7 3 种方法关节 1、2 轨迹跟踪和控制输入结果对比

由图 6 可知, 未经过处理的曲线受到不确定性因素干扰, 关节 1、2 轨迹跟踪和控制输入曲线均出现毛糙现象。

3.2 结果分析

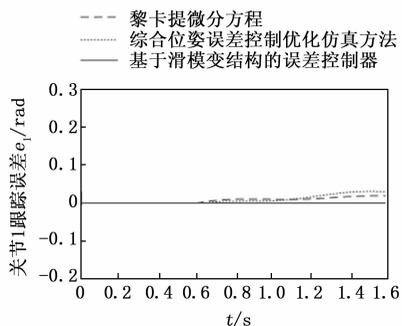
基于此, 分别使用基于黎卡提微分方程、综合位姿误差控制优化仿真方法和基于滑模变结构的误差控制器, 对比分析轮式机器人运动误差控制情况, 对比结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 使用基于黎卡提微分方程的控制方法, 关节 1 位置控制力矩在 0.2~1.6 s 内, 最大值为 250 N·m, 最小为 0 N·m。关节 2 位置控制力矩在 0.2~1.6 s 内, 最大值为 550 N·m, 最小为 200 N·m; 使用综合位姿误差控制优化仿真方法, 关节 1 位置控制力矩在 0.2~1.6 s 内, 最大值为 100 N·m, 最小为 -150 N·m。关节 2 位置控制力矩在 0.2~1.6 s 内, 保持不变, 力矩值为 200 N·m; 使用基于滑模变结构的误差控制器, 关节 1 位置控制力矩在 0.2~1.6 s 内, 最大值为 0 N·m, 最小为 ~150 N·m。关节 2 位置控制力矩在 0.2~1.6 s 内, 保持不变, 力矩值为 0 N·m。

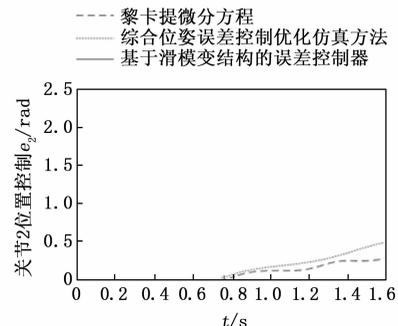
通过上述分析可知, 使用基于黎卡提微分方程、综合位姿误差控制优化仿真方法受到不确定性因素干扰, 没有消除滑模抖振, 且在跟踪时间范围内, 关节运动轨迹与实际运动轨迹不一致; 使用基于滑模变结构的误差控制器通过自适应调整参数后, 滑模抖振得到明显消除。且在短时间内, 关节运动轨迹与实际运动轨迹一致。

分别使用这 3 种方法, 对比分析轮式机器人运动误差控制精度, 对比结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 使用基于黎卡提微分方程、综合位姿误差控制优化仿真方法存在轨迹跟踪误差, 最大误差分别为 0.3 rad 和 0.6 rad。使用基于滑模变结构的误差控制器, 最大误差为 0.01 rad。



(a) 关节1的轨迹跟踪



(b) 关节2的轨迹跟踪

图 8 3 种方法轮式机器人运动误差控制精度对比

4 结束语

针对传统滑模变结构变结构控制方法受到不确定性因素影响而出现控制效果不佳的问题,设计了一种基于滑模变结构的运动误差控制器,消除了常规滑模变结构控制的趋近模态环节,模拟结果表明该方法是有效的。该方法的研究是在系统初始状态下进行的,使得滑模面在很大程度上取决于系统工作状态,因此,该方法不具有普适性。而且,该方法受到环境噪声影响,使得系统偏离了滑模面,引起强烈抖振。因此,在今后研究进程中,需加入一种神经网络来干扰信号,并设计补偿控制器,使滑模颤振得到一定的抑制。

参考文献:

[1] 赵龙,田祥.基于黎卡提微分方程的工业机器人运动误差控制研究[J].机床与液压,2019,47(23):94-97,110.
 [2] 田小玲.轮式移动机器人综合位姿误差控制优化仿真[J].计算机仿真,2019,36(8):338-341.
 [3] 许洋洋,王莹,薛东彬.采用改进模糊神经网络PID控制的工业机器人运动误差研究[J].中国工程机械学报,2019,017(6):510-514.
 [4] 赵东亚,崔文豪,严星刚.轮式移动机器人瞬态模型鲁棒自适应同步终端滑模编队控制[J].控制理论与应用,2020,37(2):423-430.
 [5] 万军,贾宇明.采用逆神经网络模型的工业机器人速度控制回路研究[J].机床与液压,2021,49(17):54-58.
 [6] 王申全,谢咚咚.基于质心偏移的工业机器人轨迹跟踪控制[J].机床与液压,2019(15):11-15.

[7] 杨帅,薛岚.基于阻抗控制的双臂机器人关节限制规避仿真研究[J].中国工程机械学报,2020,18(3):195-198,204.
 [8] 孙平,张帅.康复步行训练机器人位置和速度跟踪误差同时约束的安全预测控制[J].电机与控制学报,2019,23(6):119-128.
 [9] 肖献强,程亚兵,王家恩,等.轮式移动机器人路径跟踪控制方法研究[J].机械设计与制造,2021(1):256-258,262.
 [10] 赵新华,栾倩倩,赵磊,等.3-RRRU并联机器人运动学建模与误差分析[J].机械设计与制造,2020(01):274-276,280.
 [11] 梁振英,徐玉镜,董莉莉,等.含未标定摄像机参数的非完整移动机器人的自适应动力学跟踪控制[J].控制与决策,2019,34(10):2164-2170.
 [12] 王立玲,董力元,马东,等.滑动与打滑条件下的轮式移动机器人自抗扰跟踪控制[J].控制理论与应用,2020,37(2):431-438.
 [13] 张郭,许艳英,张亮.基于动静安全场的机器人避障路径控制仿真研究[J].中国工程机械学报,2021,19(3):232-237.
 [14] 孙辉辉,张玉洁,钱森.并联臂增材制造机器人滑模变结构运动控制系统研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(8):109-112,125.
 [15] 王玉洁,杨杨,苏世卿.基于关约束的双臂机器人协调控制器研究[J].机床与液压,2020,48(23):64-68.
 [16] 霍延军,崔巍.基于强跟踪滤波的机器人运动轨迹控制系统设计[J].计算机测量与控制,2020,28(8):149-152,170.
 [17] 陈芬,王敏,刘海涛,等.基于改进型滑模变结构的电动汽车用PMSM DTC研究[J].微特电机,2019,47(1):74-77,90.
 [18] 王韬.基于小波神经网络模糊滑模控制的轮式移动机器人避障研究[J].中国工程机械学报,2020,18(3):278-282.
 [19] 陈昊,封锋,曹钦柳,等.反旋稳定舵机的改进型滑模变结构控制[J].弹箭与制导学报,2020,40(2):109-112.
 [20] 宋平岗,龙日起,杨长槐,等.基于滑模变结构的模块化多电平铁路功率调节器直接功率控制[J].科学与技术工程,2020,20(14):5790-5797.
 [21] 丁璇.基于大数据聚类的智能探测机器人运动控制系统设计[J].计算机测量与控制,2021,29(8):142-145,162.
 [22] 刘艳雄,王根聚,华林,等.采用自适应滑模变结构控制的精神机双驱动协调控制系统[J].中国机械工程,2021,32(18):2189-2196.
 [23] 刘竹娟,肖岚,贾宛英,等.基于滑模变结构控制的DSEM驱动系统研究[J].电力电子技术,2019,53(4):52-54.
 [24] 甘屹,陈扬,孙福佳.基于滑模变结构控制的车载摄像稳定平台的干扰力矩补偿研究[J].机械设计与制造,2019(7):111-114.
 [25] 姜海红,孙丽丽,黄庭培.基于数据驱动的轮式移动机器人控制[J].控制工程,2020,27(3):572-576.