

基于 STM32F429 的全向运动平台的运动控制

刘林¹, 杨开明², 汪伟², 朱煜², 钱宇阳², 何佳宝²

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院, 四川成都 611731;

2. 清华大学机械工程学院机械电子研究所, 北京 100084)

摘要: 全向运动平台系统是可以实现人体在各个方位行走的 2D 运动平台。针对实现人体在全向运动平台稳定行走的运动控制, 采用加入观测器的一阶控制算法对平台运动控制进行探究。先通过 MATLAB 软件进行算法的仿真, 验证方法的可行性; 再通过现场测试, 验证控制算法的有效性。最终试验表明, 加入观测器的一阶控制算法可对全向运动平台实现有效的运动控制。此运动控制策略的探究为全向运动平台的运动控制提供了一种可行的控制思路和方案。

关键词: 全向运动平台; 运动控制; 控制算法

中图分类号: TM 921.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0040-06

Motion Control of Omnidirectional Motion Platform Based on STM32F429

LIU Lin¹, YANG Kaiming², WANG Wei², ZHU Yu², QIAN Yuyang², HE Jiabao²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Institute of Mechatronic Engineering, School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The omnidirectional motion platform system was a 2D motion platform that could realize walking of the human body in various directions. In order to realize the motion control of the human body in the omnidirectional motion platform, the first-order control algorithm added to the observer to explore the motion control of the platform was used. Firstly, the algorithm was simulated by MATLAB software to verify the feasibility of the method. Then, the effectiveness of the control algorithm was verified by field tests. Experiments showed that the first-order control algorithm added to the observer achieved effective motion control for the omnidirectional motion platform. The exploration of this motion control strategy provided a feasible control idea and solution for motion control of the omnidirectional motion platforms.

Key words: omnidirectional motion platform; motion control; control algorithm

0 引言

全向运动平台可用于实现在虚拟现实(VR)^[1]环境下有限空间中的无限运动。目前的全向运动平台主要分为传送带阵列和重力被动驱动类型 2 种。传送带阵列式的全向运动平台, 有 1999 年日本筑波大学研究的 Torus Treadmill^[2]、2008 年欧洲

团队研究的 CyberWalk^[3-5]、2016 年美国 Infinadeck 团队展示的 Infinadeck 全向运动平台等。其中, 跑步带方向为 X 方向, 由拖轮辘子组成的为 Y 方向。此项目中, Torus Treadmill 主要对结构和平台控制算法进行研究; CyberWalk 主要运用于结合虚拟现实^[6-7]的人体行走控制研究; Infinadeck 主要进行一些商业化的产品设计研究。重力被动驱动类型^[8]

作者简介: 刘林(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为全向运动平台的运动控制。

杨开明(1971—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为超精密工件台运动控制技术。

汪伟(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为全向运动平台的运动控制。

有 VirtuSphere、Virtuix Omni、KAT Walk。VirtuSphere 是一种球形平台,人们在里面行走,球被动转动,通过重力的方式让人会回到最低点;Virtuix Omni 周边有斜面,人走在上面会滑到中心点,底盘被设计成表面是一个凹陷圆形曲面的带有许多细小凹槽的光滑跑道,用户需要穿上特制的鞋子在跑道上运动;KAT Walk 是杭州虚拟科技有限公司设计的全向运动平台,采用的是开放式独立支撑设计。虽然已经存在允许在虚拟环境中行走的不同的移动接口,但是,其通常会限制使用者的脚、身体或腿部。此外,运动或者限于在线性跑步机上的一维运动,就像 Treadport 平台中的斜坡效应^[9];或者在空间和速度上受到限制,就像 CirculaFloor 的移动瓷砖^[10-12]。

本课题主要针对整套系统运动控制的实现进行探究,应用 Keil-RTX 操作系统进行控制程序设计,实现运动控制的稳定性与时效性。同时为了实现运动控制的稳定性,对全向运动平台的运动控制策略进行探究,从而实现人体在全向运动平台中平稳行走的实时运动控制。

本文首先简单介绍了整个控制系统的结构组成;然后进行了系统运动控制的策略探究,构建和运动控制算法,仿真之后,结合全向运动平台系统进行现场试验验证,评估算法的可行性和实际价值;最后对系统的实现过程进行总结,得出结论。

1 全向运动平台的组成结构

本文研究的控制对象是传送带阵列式全向运动平台,控制主体是人,控制目标是实现人体在全

向运动平台上平稳行走而不会让人体走出平台。在构建全向运动的整个硬件框架之后,对全向运动平台进行运动控制,系统对人体的运动进行数据的采集,然后在控制机中进行数据处理,处理的数据传输给全向运动平台系统进行控制,平台的运动影响人体的运动数据。重复这个过程,实现整个系统的闭环控制。

全向运动平台示意图如图 1 所示。有两个方向, x 方向是由 20 条跑步带组成的运动方向, y 方向是由 2 条链轮形成的运动方向。这两个方向运动可以合成平面内任意的运动。当人往前走时,全向运动平台向反方向运动,抑制人体往外走的趋势,保证人体不会走出全向运动平台。这个过程需要整个硬件控制系统进行保证。

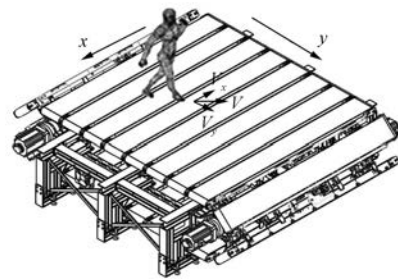


图 1 全向运动平台示意图

整个系统控制的流程如图 2 所示。可分为人体的数据采集系统、数据的传输系统、数据的处理系统、数据的接收运动系统。人体运动数据采集是由 HTC 的 VIVE 头盔和 Lighthouse 定位系统完成的,人体的动作捕捉由动作捕捉设备实现。数

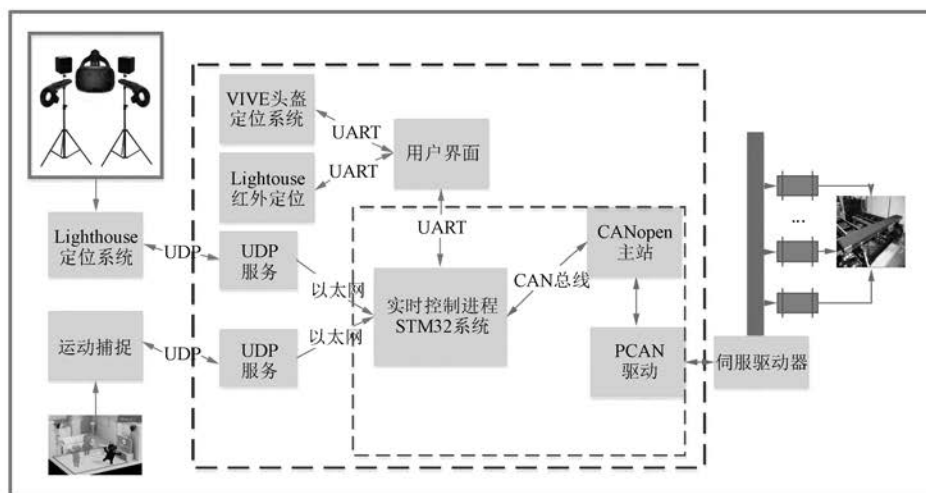


图 2 系统的控制流程图

据传输系统主要由 CAN 总线^[13]、以太网总线和串口传输 CANopen 协议信息^[14]、UDP 信息和串口信息。传输信息之后,在 STM32F429 中进行数据的处理。STM32F429 同时还负责控制数据传输的帧的处理,并发送数据给平台的伺服运动系统,因而成为控制的核心。伺服运动平台系统就是全向运动平台,每条单独的跑步带由 1 套伺服驱动器和伺服电机组成运动系统,2 条链轮中由 4 个伺服驱动器和伺服电机组成运动系统。这 4 部分相互连接,组成了整个平台的控制系统。

STM32F429 控制整个运动平台的运动。在整个控制流程中,以 STM32F429 为控制中心,连接了 UART 串口线、Ethernet 以太网、CAN 总线。算法的编写是应用 Keil-RTX 系统,用 J-link 仿真器传输程序至 STM32F429。STM32F429 通过 Ethernet 接收^[15]到 VIVE 头盔和 Lighthouse 定位的人体位置信息,进行数据的分析和处理,得出目标速度,然后利用 CANopen 协议封装目标速度,通过 CAN 总线给出到伺服驱动器中进行驱动^[16]。在整套系统起动前,STM32F429 通过与 UART 连接的用户界面去起动伺服驱动器。这里组合了头盔信息和协议信息,从而 STM32F429 在整个系统起到工控机作用。

2 控制策略的探究

在运动控制试验测试之前,需要搭建整个硬件系统。整个平台用 VIVE 头盔和 Lighthouse 作

为人的定位系统。VIVE 头盔是与虚拟现实相结合的,所以初始的位置要经过虚拟现实的游戏运行(VR 机)作为传输中介,用以太网线与 STM32F429 连接进行以太网通信,进而采集人体的位置信息。再将个人电脑(PC)用仿真器(J-link)与 STM32F429 进行连接,在 Keil 软件下进行程序的编写、编译、烧写和调试。用 CAN 总线连接 STM32F429 和伺服驱动器。伺服驱动器控制伺服电机。这样以 STM32F429 为控制中心,VIVE 头盔和 Lighthouse 为定位,VR 机采集和传递位置信息,PC 机做程序的调试与编写以及图形用户界面(GUI 界面),再加上伺服系统,组成了一个完整的运动控制系统。

2.1 控制算法探究与仿真

为了达到人体始终在运动平台上行走稳定而不走出平台的目的,首先设想让平台始终把人体拉回初始位置点。设人的初始位置为 $start_pos$, 人体行走中的实际位置为 act_pos , 两个位置相减形成一个位置误差^[17], 然后利用 PID 算法处理进行输入, 给到驱动器的目标速度为 $target_speed$, 设计控制算法。先直接用比例控制如下:

$$target_speed = P(act_pos - start_pos) \quad (1)$$

用比例控制去实现人体的运动控制,可以简单地归结为人体所走的距离与速度的关系。为了不产生剧烈的振荡,比例系数 P 不超过 3.5。运动控制流程如图 3 所示,以此验证整套系统的硬件可行性。

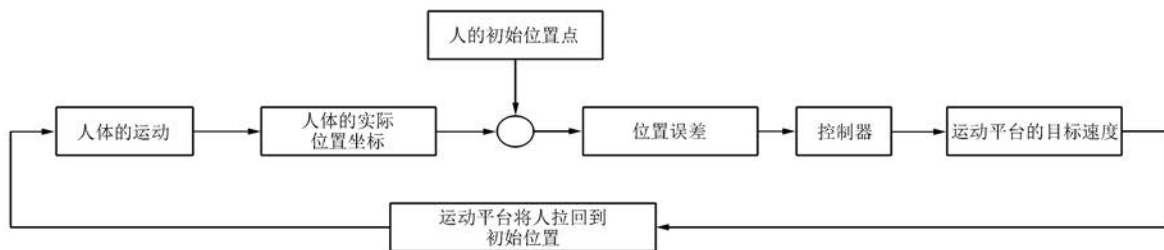


图 3 控制算法流程图

对于控制系统,在许多情况下一个系统内部的状态变量并不能直接测量,故状态反馈困难。因此,要利用系统可测的量来构造状态变量。由于原系统的输入输出可以直接量测,所以可以另外构造一个系统,以原系统的输入输出作为输入,将状态重新构造出来。这样构造的系统称为状态

观测器,原理如图 4 所示。

给定系统的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

由于系统完全能观,说明状态向量可以用输入 u 和输出 y 以及其导数估计出来。为了避免观

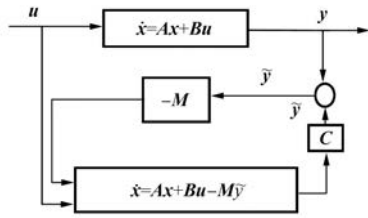


图4 状态观测器原理图

测器含有微分器及观测器开环导致的噪声和干扰问题,设计成闭环状态观测器。

把可量测的 y 及 \hat{y} 的差值乘以适当的加权矩阵 M 进行反馈。此时观测器方程为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - M\hat{y} \quad (3)$$

从式(3)可知,对原开环观测器模型增加了一项取决于输出误差量的校正项。由于

$$\hat{y} = y - \hat{y} = y - C\hat{x} \quad (4)$$

则式(3)可以写成:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu - M(y - C\hat{x}) = \\ &(A + MC)\hat{x} + Bu - My \end{aligned} \quad (5)$$

为了表示状态误差量,将式(3)减去式(4),可得:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax - A\hat{x} + M\hat{y} = \\ &A(x - \hat{x}) + MC(x - \hat{x}) = \\ &(A + MC)(x - \hat{x}) = (A + MC)\bar{x} \end{aligned} \quad (6)$$

只要适当地选择 M ,使 $A+MC$ 的特征值具有负实部,则:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t) - \hat{x}(t)] = 0 \quad (7)$$

这说明只要原系统完全能观,总可以按要求配置观测器的极点,使得状态观测器误差 \bar{x} 按要求的速度衰减到零。所示的状态观测器称为全维观测器。其结构特点是仿生系统加上反馈矩阵 M 。

假设人体速度可以被测量出来,本系统可以采用一阶控制系统方程,表述为

$$\begin{cases} \dot{x} = -v_c + v_w \\ y = v_c = k(x - x_{ref}) + v_w \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_c ——平台的实际速度;

v_w ——人在平台行走的速度;

x ——人体的实际位置;

x_{ref} ——人体的参考位置;

k ——比例系数。

人的速度为输入量,输出量为平台的速度。

考虑加速度对平台控制的影响,则平台的二

阶控制系统方程可表述为

$$\begin{cases} \dot{x} = -v_c + v_w \\ \dot{v}_c = a_c \\ y = v_c \end{cases} \quad (9)$$

其中, a_c 通过 v_c 的微分可得:

$$\begin{aligned} a_c = \dot{v}_c &= \frac{d[k(x - x_{ref}) + v_w]}{dt} = \\ &k_1(-v_c + v_w) + k_2(x - x_{ref}) \end{aligned} \quad (10)$$

则二阶控制式(10)可以写成:

$$\begin{cases} \dot{x} = -v_c + v_w \\ \dot{v}_c = k_1(-v_c + v_w) + k_2(x - x_{ref}) \\ y = v_c \end{cases} \quad (11)$$

式(11)的系统方程状态空间化可以写成以下形式:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{v}_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ k_2 & k_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ v_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ k_1 \end{pmatrix} v_w \\ y = [0 \quad 1] \begin{pmatrix} x \\ v_c \end{pmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

由上述特点可知, $A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ k_2 & k_1 \end{bmatrix}$; $B = \begin{pmatrix} 1 \\ k_1 \end{pmatrix}$; $C = [0 \quad 1]$; 可得能控性和能观性矩阵 $M = (B, AB) = \begin{bmatrix} 1 & -k_1 \\ k_1 & k_1^2 + k_2 \end{bmatrix}$, $N = \begin{pmatrix} C \\ CA \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_2 & k_1 \end{bmatrix}$ 。本研究的设定的系数不为0,由能控性和能观性矩阵可得:

$$\text{rank}(M) = 2 \quad (13)$$

$$\text{rank}(N) = 2 \quad (14)$$

由式(13)、式(14)判定,系统方程建立的数学模型是能控和能观系统。

所设计系统的人体速度通过速度观测器可得。设计观测器如式(15)所示^[10]:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = -v_c + k_{obv}(x - \xi) \\ \dot{\bar{v}}_w = k_{obv}(x - \xi) \\ k_{obv} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中: \bar{v}_w 表示速度观测器的输出; ξ 表示观测器内部状态变量,即用户相对于地面位置的估计值;输入为跑步带的速度 v_c 和用户的绝对位置 x 。易知, \bar{v}_w 是其真实值 v_w 低通滤波的结果,参数 k_{obv} 可以改变该低通滤波器的截止频率。

对于式(15)所示的速度观测器模型,利用

MATLAB Simulink 搭建模型如图 5 所示。通过仿真,进行理论验证和参数的调试。仿真参数设置如下:用户相对平台的真实运动速度 v_w 为先通过 5 s 的匀加速运动达到 1 m/s,再匀速运动 10 s,最后通过 5 s 的匀减速运动速度恢复为 0。

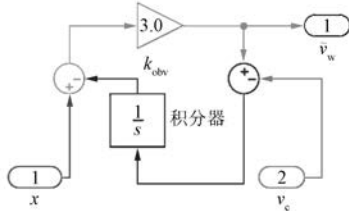


图 5 状态观测器仿真图

图 6 给出了不同反馈因子 k_{obv} 下速度观测器的输出曲线,可知, k_{obv} 越大, \hat{v}_w 越接近真实值 v_w 。这也证明了 \hat{v}_w 是其真实值 v_w 低通滤波后的结果。同时,当 $k_{obv} \geq 10$ 时, \hat{v}_w 与 v_w 的误差在 1% 以内,此时继续增大 k_{obv} ,对观测器的输出结果影响不大。因此,该观测器的反馈因子 k_{obv} 取值为 10。

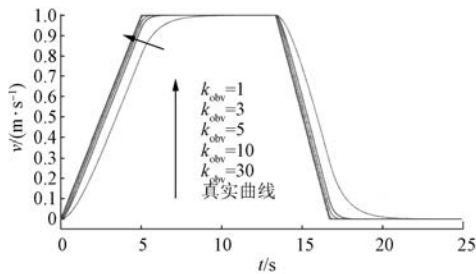


图 6 不同反馈因子下的状态观测器输出曲线

通过引入速度观测器的概念,设计了针对本控制系统的速度观测器,并通过仿真分析确定了相关参数的取值,从而解决了用户相对于传送带的速度 v_w 无法测量的问题,进而可以改进控制算法:

$$v_{ct} = k_{pos}(x - x_{ref}) + v_{wE} \quad (16)$$

式中: v_{wE} —— 人体的估计速度;

x_{ref} —— 人体的参考位置,也就是初始位置点;

k_{pos} —— 比例系数;

v_{ct} —— 目标速度。

一阶控制算法用 MATLAB 进行仿真分析,如图 7 所示。

对比人体的目标速度 v_{ct} 、估计速度 v_{wE} 、实际速度 v_w 三者之间的关系,如图 8 所示。可以看到

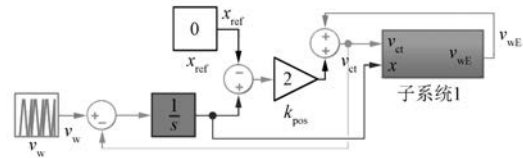


图 7 控制仿真图

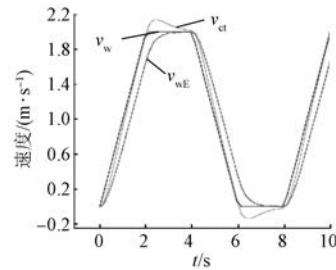


图 8 仿真对比速度

实际速度 v_w 的跟随性只在平稳运行时出现超调,而估计速度 v_{wE} 与目标速度 v_{ct} 相比大约滞后 1/60 个周期。该试验的控制周期是 55 ms,因此滞后时间小于 1 ms,可以接受。

2.2 试验测试

硬件平台搭建完成、算法程序实现之后,进行现场试验,利用现场采集的数据进行分析。利用 MATLAB 软件画出相应的数据曲线,可以利用曲线直观地看出数据的关系与运动的变化。

利用上述的改进算法进行试验数据的采集和分析,目标速度 v_{ct} 与实际速度 v_w 对比如图 9 所示。

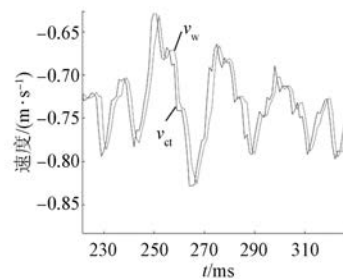


图 9 目标速度与实际速度试验对比

从图 9 可以看出,实际速度 v_w 滞后于目标速度 v_{ct} ,滞后时间是 5 ms。事实上,通过 CAN 总线传输速度与返回速度的时间差约为 5 ms。在同一时刻,实际速度与目标速度相差 0.015 m/s。考虑目标速度与实际速度的速度差与时间差,设置运动平台的最大加速度为 2 m/s²。试验过程中也

有一定的波动,因为在人体向前走的时候,对于跑步带的压力不一样,在人体接触跑步带的瞬间会造成速度波动。

3 结 语

本文主要探索全向运动平台的运动控制实现。为了使人在平台上行走而不致走出运动平台,进行了PID算法的运动控制的仿真与实现,并在控制中加入了人体速度观测器的算法。仿真中,平台的速度滞后目标速度约1ms。在试验中,由于硬件和数据的传输,滞后时间约为5ms。在性能要求上能够达到运动平台的运动控制的目的。本研究可以为全向运动平台的运动控制实现提供一种思路。

【参考文献】

- [1] 姜学智,李忠华. 国内外虚拟现实技术的研究现状[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2004,23(2): 238.
- [2] IWATA H. The Torus Treadmill: realizing locomotion in VEs [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999,19(6): 30.
- [3] BERTIN R J V, COLLET C, ESPIE S, et al. Optokinetic or simulator sickness: objective measurement and the role of visual-vestibular conflict situations[J]. Perception, 2005,34: 85.
- [4] SOUMAN J L, GIORDANO P R, SCHWAIGER M, et al. CyberWalk: enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments [J]. ACM Transactions on Applied Perception, 2011, 8(4): 25.
- [5] SCHWAIGER M, THUIMMEL T, ULBRICH H. Cyberwalk: an advanced prototype of a belt array platform [C] // IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Games, 2007: 50.
- [6] BACH H J M. Locomotion interfaces[M]. STANNEY K M. Handbook of virtual environments: design, implementation and applications. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2002: 239-254.
- [7] SOUMAN J L, GIORDANO P R, SCHWAIGER M, et al. CyberWalk: enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments [J]. ACM Transactions on Applied Perception, 2011, 8(4): 25.
- [8] LUCA A D, TONE R M, GIORDANO P R B. Acceleration level control of the CyberCarpet [C] // 2007 IEEE International Conference on Robotic and Automation, 2007: 2330.
- [9] LUCA A D, TONE R M, GIORDANO P R B. Feedforward schemes for motion control of the CyberCarpet [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2006, 39(15): 400.
- [10] YOON J. A novel locomotion interface with two 6-DOF parallel manipulators that allows human walking on various virtual terrains [J]. The International Journal of Robotics Research, 2006,25(7): 689.
- [11] VU D S, FOUCAULT S, GOSSELIN C M, et al. Design of a locomotion interface for gait simulation based on belt-driven parallel mechanisms [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2015: 1581.
- [12] IWATA H, YANO H, FUKUSHIMA H, et al. CirculaFloor [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005,25(1): 64.
- [13] 柳吉龄,张宇河,张洁. 基于 CAN 总线的运动控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2005: 13(7): 683.
- [14] YOON J, PARK H S, DAMIANO D L. A novel walking speed estimation scheme and its application to treadmill control for gait rehabilitation [J]. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, 2012,9: 62.
- [15] 吴辉,罗富文,杜文广. 基于 STM32 和 FPGA 的 CAN 总线运动控制器的设计[J]. 电子设计工程, 2013,21(1): 45.
- [16] 张文亚,李恩,蔡丽. 一种基于 lwIP 的 CAN/Ethernet 嵌入式网关设计[J]. 计算机应用, 2007, 27(2): 278.
- [17] FRISSEN I, CAMPOS J L, SREEMIVASA M, et al. Human walking in virtual environments [M]. New York: Springer New York, 2013: 113-144.

收稿日期: 2018-08-17