

# 双足机器人 RCG 姿态控制算法的研究

刘 迪,孔令文,杜巧玲  
(吉林大学电子科学与工程学院,吉林长春 130012)

**摘 要:** 稳定步行是仿人双足机器人开展实际作业的基础,也是研究的难点和热点. 为了提高对仿人机器人步行失稳的响应速率和控制准确性,克服利用陀螺仪进行姿态测量及控制无法完整表述机器人运动状态,从而造成控制滞后的缺点. 本文提出了 RCG 姿态控制算法,在以角速度和角度作为控制参量的模型基础上,引入机器人运动过程中的加速度作为姿态判断和调整的影响因子,实现对机器人行走过程的反馈控制,提高了双足机器人对失稳状态的响应速率和响应的准确性. 通过对自主搭建的机器人样机进行测试,结果表明:当双足机器人步行失稳时,RCG 姿态控制算法比以角速度和角度作为参量的控制算法能够更快速、准确的修正姿态偏差,保持姿态稳定.

**关键词:** 仿人机器人; 步态稳定; 控制算法; 姿态测量

**中图分类号:** TP242      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2018)08-1842-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.08.007

## Research on RCG Attitude Control Algorithm of Biped Robot

LIU Di, KONG Ling-wen, DU Qiao-ling  
(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** Stable walking is the foundation of humanoid robot in practical work, and is the key and hot topic of research. In order to improve the response rate and control accuracy of the humanoid robot's walking instability, the attitude measurement and control of the gyroscope can not be used to describe the movement state of the robot completely, which leads to the shortcomings of the control lag. In this paper, the RCG attitude control algorithm is proposed. Based on the model of angular velocity and angle as the control parameters, the acceleration of robot movement in the process is taken as the factor of attitude judgment and adjustment, and the feedback control of the robot walking process is realized. The response rate and response accuracy of the robot to the unstable state are improved. The test of RCG attitude control algorithm were carried using self-built robot prototype. The results show that RCG attitude control algorithm can correct attitude deviation more timely and accurately compared with the attitude of the control method only using angular velocity and angle, and maintain a stable attitude, when the biped robot is unstable.

**Key words:** humanoid robot; gait stability; control algorithm; attitude measurement

### 1 引言

双足机器人是多自由度的复杂机械结构,具有非线性、强耦合等特点,因此,控制双足机器人自主稳定步行是其研究领域的难点之一. 为了实现对机器人姿态的控制,通常的做法是在机器人的躯干部位安装多种惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU),并且在足底安装多个压力传感器,通过采集各种传感器的实时数据得到机器人的整体姿态信息<sup>[1-3]</sup>,然后利用控制重心位置实现静态行走;利用零力矩点(Zero Moment

Point, ZMP)实现动态步行<sup>[4]</sup>,对不稳定状态进行控制以及实现摔倒时的自我保护. 但医学研究表明,人类行走过程中躯干对姿态的感知和反馈对整体姿态控制起到主要作用,而足端反馈回的压力起到的作用较小<sup>[5]</sup>. 因此本文研究如何通过安装于重心位置的惯性测量单元实现对双足机器人行走状态的控制.

在双足机器人行走过程当中,行走姿态会受到不平整地面或外力的影响导致躯干处于非平衡状态. 获取机器人姿态信息普遍采用的方法是通过机器人角度和角速度进行测量<sup>[6]</sup>,根据数据波动的大小,采取一

定的调整措施. 在文献[7]中, Jianxi Li 等人采用三轴加速度计、三个单轴陀螺仪和压力传感器作为数据采集单元, 通过 FIR 低通滤波消除测量过程中产生的噪声, 判断足部是否稳定落地, 与陀螺仪配合实现步态稳定控制. 在文献[8]中, 韩国 Seung-Joon Yi 团队提出了一种层次式的反射动作来保持机器人受到外部冲击时的步态稳定. 文献[9]介绍了 Hongzhe Jin 等人以 ARM 处理器作为系统核心, 利用陀螺仪实现对角速度以及倾角的实时测量, 对环境干扰做出及时响应, 维持系统平衡. 文献[10]Shiuh-Jer Huang 使用三轴加速度计和三轴陀螺仪对机器人姿态进行控制, 预先估计出了机器人运动过程中的加速度变化, 并将其作为基准对机器人状态进行修正.

在以上研究中, 采用陀螺仪与加速度计作为姿态校正检测单元, 其中陀螺仪测量角速度, 进而积分得到角度. 在这种算法中加速度计的数据只起到对陀螺仪数据的修正作用, 并未充分使用加速度数据对双足机器人姿态进行控制, 数据利用程度不高, 进而导致控制精度较低<sup>[7,9]</sup>.

本文提出一种新的双足机器人姿态控制算法——RCG (Remove the components of gravity, RCG) 姿态控制算法. 所谓 RCG, 是指去除重力加速度在各个方向上对机器人实际姿态加速度的干扰. 由于在机器人行走过程自身的姿态变化, 重力加速度在传感器三维坐标各个方向上的分量也随之变化, 因此, 通过去除重力分量得到准确的机器人姿态加速度可以提高机器人的控制精度. 该算法将陀螺仪的短时高精度与加速度计的长程角度测量稳定性高的优点结合起来, 既能利用加速度计修正陀螺仪测量数据, 又能利用加速度计的数据控制机器人的姿态.

## 2 RCG 姿态解算算法

### 2.1 RCG 姿态解算算法

在机器人完成整个行走周期过程中速度并不是恒定的. 三轴加速度计输出三个方向的加速度值, 该值是重力加速度分量与机器人运动加速度分量的叠加和. 在姿态解算过程中, 只需要机器人运动加速度分量, 因此重力加速度分量需要去除, 并将加速度数据从传感器坐标系变换到世界坐标系. 为了得到机器人相对于世界参考系的加速度, 本文采用方向余弦矩阵对机器人运动加速度分量进行坐标转换, 处理结果作为控制机器人稳定行走的判据之一. 总体算法流程图如图 1 所示.

RCG 姿态解算算法是对传统姿态解算算法的改进. 陀螺仪采集角速度数据  $\omega$ , 通过积分得到角度数据  $\phi$ , 为了消除误差积累产生的漂移, 结合加速度数据通

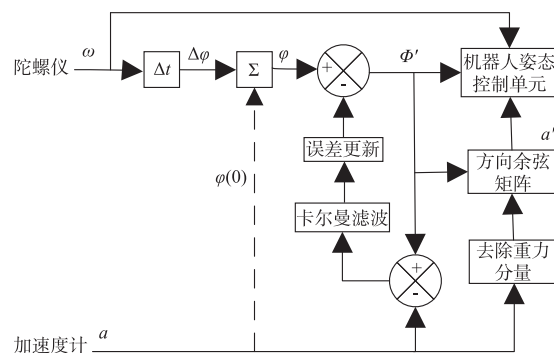


图1 总体算法示意图

过卡尔曼滤波器对  $\phi$  进行修正得到  $\phi'$ <sup>[11]</sup>. 加速度计采集到的加速度数据  $a$  则通过去除重力分量和方向余弦矩阵两次数据处理, 转化为世界坐标系下机器人自身的加速度  $a'$ . 最后, 角速度、角度、加速度共同作为姿态控制的影响因子输入机器人姿态控制单元.

为了让机器人在受到冲击时能够及时对姿态做出修正, 需要得到机器人自身运动过程的加速度. 然而, 加速度计在每一个坐标轴上测得的加速度值是重力加速度  $G$  与机器人自身加速度  $a'$  的和, 即  $a_n = G_n + a'_n, n = X, Y, Z$ . 为了能够准确得到机器人躯干在各个方向上的加速度, 就需要去除重力分量. 假设初始状态加速度计坐标系与世界坐标系重合, 两坐标系各轴之间夹角为  $0^\circ$ . 在机器人运动过程中, 加速度计会随躯干发生倾斜, 此时加速度计坐标系与世界坐标系不再重合, 相对于世界坐标系, 加速度坐标系会有一定的旋转角度  $\Phi'_n, n = X, Y, Z$ . 倾角  $\Phi'_n$  由陀螺仪测得, 进而可以计算出重力加速度  $G$  在传感器各轴上的分量. 因此对于每一个坐标轴, 有  $a'_n = a_n - G_n, n = X, Y, Z$ .

由于加速度计测量数据的坐标系与世界坐标系并不是同一的, 并且在机器人行走过程中加速度计会发生偏转, 使得加速度计坐标系与世界坐标系之间存在夹角. 机器人姿态出现的偏差是相对与世界坐标系而言的, 因此要将在传感器坐标系下得到的数据转化成为机器人整体所在的世界坐标系下的加速度数据. DCM 利用两坐标系各坐标轴之间的角度来实现两个坐标系之间的转化, 若以  $X$  轴正方向为世界坐标系下机器人的前进方向,  $Z$  轴指向上方, 则两坐标系  $X$  轴的夹角称为翻滚角  $\Phi$ ,  $Y$  轴的夹角称为俯仰角  $\theta$ ,  $Z$  轴的夹角称为航向角  $\Psi$ . 由加速度计坐标系转化到世界坐标系的过程可以表示为:

$$\begin{cases} X' = X \cdot \cos(\Phi) + Y \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\theta) - Z \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\theta) \\ Y' = Y \cdot \cos(\Phi) + Z \cdot \sin(\theta) \\ Z' = X \cdot \sin(\Phi) - Y \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\Phi) + Z \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\Phi) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(X, Y, Z)$  是在加速度计坐标系下的数据,  $(X', Y', Z')$  是对应世界坐标系下的数据.  $\Phi, \theta, \Psi$  分别由陀螺仪各轴数据积分得到.

通过以上处理,可以得到机器人行走过程中躯干相对于世界参考系的加速度,以此作为行走稳定控制的影响因子.

## 2.2 除重力分量的必要性分析

机器人前行时,需要通过躯干的侧向倾斜调整重心的位置,进而保持平衡,这会导致放置于重心处的加速度计发生偏转,使原本只分布在竖直方向上的重力加速度,由于偏转在其他坐标轴上也产生了分量,并且这个重力分量达到了无法忽略不计的程度.

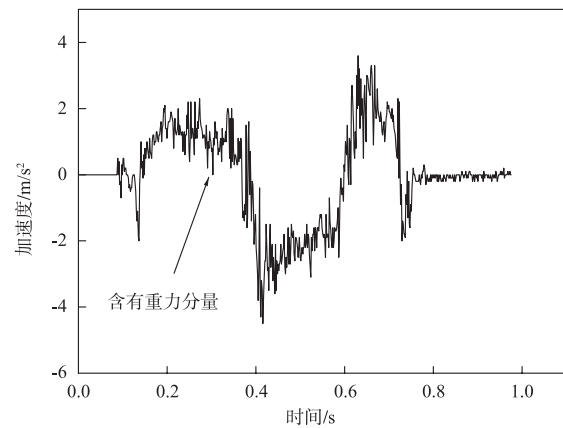
为了验证去除重力分量的必要性,本文以机器人前行一个周期为例对去除重力分量前后的加速度数据进行了实验对比,如图 2 所示. 图 2(a) 表示加速度计测量的原始数据,图 2(b) 表示去除重力分量后的加速度数据. 对比发现,图 2(a) 原始数据中机器人加速度与重力加速度叠加在一起. 由于不同时刻躯干的侧倾角度不同,导致重力分量的大小也不相同. 重力分量呈现正弦式的变换规律,对判断机器人当前加速度是否超出阈值造成干扰. 图 2(b) 通过修正后的角度数据可以得到对应时刻重力分量的大小,去除重力分量后,消除了重力对姿态判断造成的偏差,提高了姿态求解的准确性. 因此,需要对采集到的加速度数据进行去除重力分量处理.

## 3 RCG 行走稳定控制

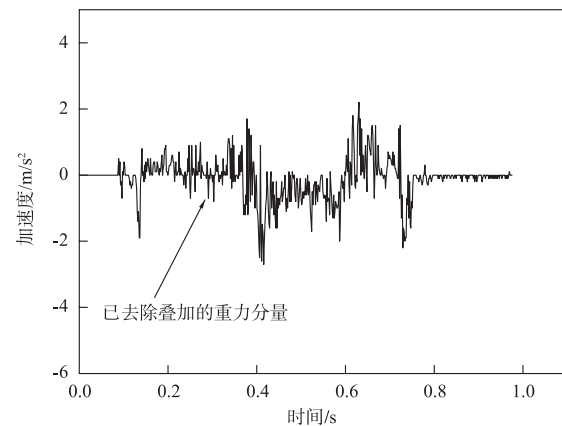
机器人正常行走状态下,重心会在一定范围内波动,当出现失稳状态时,机器人的重心会发生明显偏移,调整重心的偏移量可以实现机器人姿态的校正控制. 本文提出 RCG 行走稳定控制算法. 该算法分析 RCG 姿态解算算法处理后的数据,通过设定正常行走时的阈值,得到重心偏移量,根据偏离程度做出姿态调整.

### 3.1 改进的行走失稳判据

机器人处于失稳状态时,会以支撑脚为中心发生偏转,通过观察其加速度、角速度的变化以及角度的大小,可以判断其是否处于失稳状态. 传感器放置于重心处,当机器人稳定行走时,躯干在前向和侧向的角度变化较小,加速度会小幅度有规律的波动. 当机器人整体受外力发生偏转时,通过机器人各关节之间的角度关系可以确定此时偏离正常行走时的参数,当偏差超出预先设定的阈值时,即可判定处于失稳状态. 例如,若在前后运动方向上有突然施加在机器人躯干上的力,则前进( $X$ 轴)方向加速度会发生明显突变,并且俯仰( $Y$ 轴)方向的角速度也会发生明显变化. 常用的失稳判据是以角速度和角度作为影响因子,本文对该行走判据做了改进,引入加速度作为失稳判据的影响因子之一.



(a) 去除重力分量前加速度数据



(b) 去除重力分量后加速度数据

图2 去除重力分量前后对比图

利用改进失稳判据可以提高双足机器人对外部冲击的响应速度.

在不考虑航向的情况下,将改进的双足机器人稳定步行的判据设定为:

$$\begin{cases} \eta_h = K_h \cdot \varepsilon_{\omega-Y} + L_h \cdot \varepsilon_{\Phi-Y} + M_h \cdot \varepsilon_{a-X} \\ \eta_r = K_r \cdot \varepsilon_{\omega-X} + L_r \cdot \varepsilon_{\Phi-X} + M_r \cdot \varepsilon_{a-Y} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\eta_h$  和  $\eta_r$  分别为前向和侧向的稳定步行参数,  $K_h$ 、 $L_h$ 、 $M_h$  和  $K_r$ 、 $L_r$ 、 $M_r$  分别为前向和侧向的加权系数,  $\varepsilon_{\omega-X}$ 、 $\varepsilon_{\omega-Y}$ 、 $\varepsilon_{\Phi-X}$ 、 $\varepsilon_{\Phi-Y}$ 、 $\varepsilon_{a-X}$ 、 $\varepsilon_{a-Y}$  分别是两个方向实测数值与规划值的偏差. 当  $\|\eta\|$  大于稳定行走临界值  $\|\eta\|_{\text{threshold}}$  时,机器人处于失稳状态.

### 3.2 RCG 行走稳定控制算法

基于改进的行走失稳判据,本文提出了 RCG 行走稳定控制算法,该算法是在传统算法的基础上引入加速度作为控制参量. 利用该控制算法,在检测有失稳情况时及时做出步态调整,使机器人在不平整路面以及受到一定冲击时保持稳定行走状态,不至于发生倾覆. 该控制算法主要是通过在不打断当前行走状态的情况下,调整机器人的步频和步幅,改变落脚点,同时保证脚

底与地面平行,实现在有限步数之内机器人重新回到稳定行走状态<sup>[12]</sup>.

机器人正常行走时,重复完成倾斜移重心、向前跨步和摆动腿落地等动作.假设完成每个动作所需的时间为  $T$ ,在一个动作执行过程中可以对机器人姿态做  $N$  次调整,则机器人姿态更新周期为  $t = T/N$ ,且有  $t = n \cdot \Delta t$ ,其中  $\Delta t$  为传感器的采样周期, $n$  表示更新周期内的采样次数.上层控制部分需要根据多次采集到的数据来判断机器人的行走状态.对于机器人步频的调整则以单个动作为周期.

本文以常见的五连杆模型机器人为研究对象,建立以各连杆与竖直方向夹角  $\theta_n$  为参数的广义坐标系,如图 3 所示.

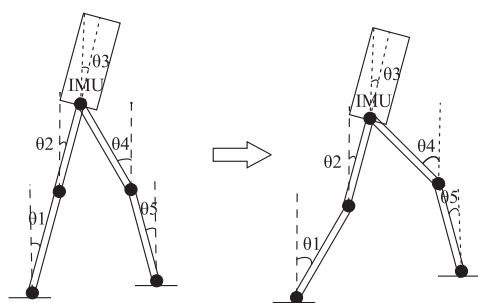


图3 动作中的步态调整

在一个动作内,当有外力施加在机器人躯干时,根据加速度的突变对机器人相应关节角度  $\theta_n$  进行实时调整<sup>[14]</sup>.以对机器人施以向前的外力为例,调整方式是通过增大  $\theta_1$  和  $\theta_4$ ,降低重心,改变向前的步长,调整周期为  $t$ .

上图中,有  $\theta_1' - \theta_1 = \theta_2' - \theta_2 = C_a \cdot (a - \|a\|)$ ,其中  $a$  为某段时刻内的加速度平均值,  $\|a\|$  为与之对应的加速度阈值.当检测到加速度超出阈值后,依据比例系数  $C_a$  对关节角度进行调整.

在一个步行周期内,经计算得到角速度、角度和加速度相对与正常阈值的偏差为  $\varepsilon_\omega(k)$ 、 $\varepsilon_\phi(k)$  和  $\varepsilon_a(k)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ .在机器人的一个动作中,开始阶段和停止阶段各数据会出现较大波动,加速度尤其明显.因此需要对各次得到的偏差数据进行加权处理.开始、停止阶段赋予的权值较小,中段赋予较大的权值.据此得到一个动作过程中角度、加速度和加速度偏离正常阈值的程度:

$$\begin{cases} \varepsilon_\phi = \sum_{k=1}^N C_k \cdot \varepsilon_\phi(k) \\ \varepsilon_\omega = \sum_{k=1}^N C_k \cdot \varepsilon_\omega(k) \\ \varepsilon_a = \sum_{k=1}^N C_k \cdot \varepsilon_a(k) \end{cases} \quad (3)$$

其中加权系数  $C_k$  满足  $\sum_{k=1}^N C_k = 1$ .

由此,可以根据第  $n$  个周期的机器人状态参数判断机器人所处状态,并在第  $n+1$  个周期对步频和步幅作出进一步调整,形成闭环的控制系统.过程如图 4 所示.

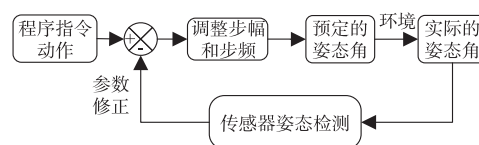


图4 控制过程图

整个控制过程实际上是一种 PID 控制,通过观测角速度  $\omega$  相对于正常阈值的偏差  $\varepsilon_\omega$ ,偏差累积的效果  $\varepsilon_\phi$ ,以及加速度偏差  $\varepsilon_a$ ,并将其转换为姿态控制信息反馈给机器人,达到闭环控制的目的.对应步幅在前向、侧向的变化量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  可以表示为:

$$\Delta x = C_x \cdot (K \cdot \varepsilon_\omega + L \cdot \varepsilon_\phi + M \cdot \varepsilon_a) \quad (4)$$

$$\Delta y = C_y \cdot (K \cdot \varepsilon_\omega + L \cdot \varepsilon_\phi + M \cdot \varepsilon_a)$$

其中,  $C_x$  和  $C_y$  是调节变化量大小的比例系数.

为了能够更快的响应状态的变化,需要对动作时间作出调整<sup>[13]</sup>.根据实验验证,在不平整地面上,当支撑脚与水平面形成一定夹角时,对关节角度的调整使摆动腿能够稳定落地是重点,并不需要对步频作出调整,而当一个动作结束时仍然存在加速度和角速度,则需要进行下一个动作的时间调整.时间的调整可以表示为:

$$\Delta t = -(K_\omega \cdot \varepsilon_\omega + K_a \cdot \varepsilon_a) \quad (5)$$

其中,  $K_\omega$  和  $K_a$  均大于 0.因此,始终有  $\Delta t \leq 0$ ,当相对于正常行走出现偏差时,下一动作的动作时间都要快于正常的动作时间,以便及时对机器人姿态做出及时调整.

## 4 行走稳定控制实验

为了验证行走控制算法的性能,本文基于该算法设计了双足机器人行走控制系统,采用自主搭建的 19 自由度双足机器人作为实验样机,如图 5 所示.双腿各有 5 个自由度,分别为髋关节 2 个自由度,膝关节 1 个自由度,踝关节 2 个自由度.腿部采用 LD-20MG 数字舵机,扭力达到  $20\text{Kg} \cdot \text{cm}$ .以 TMS320VC5509A 作为机器人的主控制器,时钟频率为 200MHz.机器人的总重量为 2.64Kg,重心高度为 21.8cm.机器人的单步周期为 500ms,机器人的关节控制周期为 50ms.惯性传感器放置于机器人的重心处,该传感器参数如表 1 所示.重心通过多次测量身体前后倾斜的临界位置,并根据对称性得到.由于将九轴传感器放置于机器人盆骨处,随着机器人行走状态不同,两腿舵机所产生的磁场是时刻

变化的,会对磁力计的数据产生很大影响,所以此处并未使用磁力计修正陀螺仪偏差<sup>[14]</sup>.

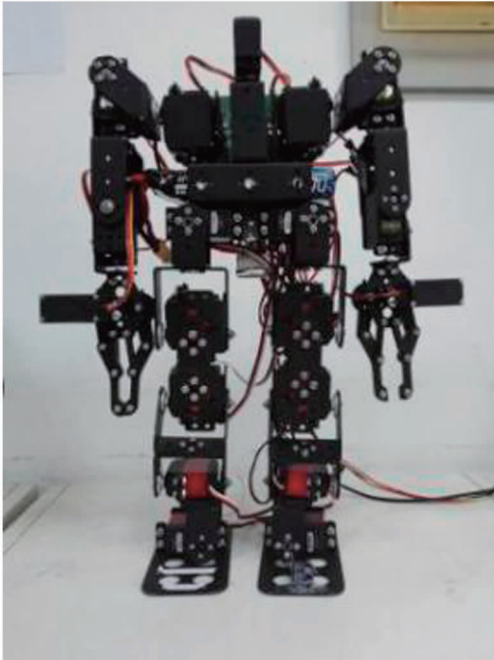


表 1 机器人九轴传感器 MPU9250 参数

传感器名称	测量范围	灵敏度
加速度计	$\pm 19.6\text{m/s}^2$	$0.000598\text{m/s}^2$
陀螺仪	$\pm 200^\circ/\text{s}^2$	$0.0610^\circ/\text{s}^2$
磁力计	$\pm 4800\mu\text{T}$	$0.146\mu\text{T}$

本文采用加速度传感器对陀螺仪数据修正,并实验验证 RCG 行走稳定控制算法的有效性. 传感器对姿态数据的采集频率为 100HZ.

#### 4.1 姿态校正实验

为了验证引入加速度数据可以提高系统响应速率,进行如下实验. 图 6 是机器人施加外部冲击时,传感器采集到的数据. 虚线代表机器人受冲击的起始位置.

从图 6 可知,当机器人受到外部冲击时,加速度、角速度和角度都发生了明显的变化,但加速度的变化提前于角速度和角度. 因此,引入加速度作为姿态的影响因子之一,可以提高姿态调整的及时性,防止较大偏差的发生.

#### 4.2 RCG 稳态控制实验

在此基础上对机器人步态修正效果进行了实验. 首先,对机器人进行侧向冲击测试,图 7(a)是受冲击后机器人根据传统陀螺仪修正方式得到的下一步修正步态数据,图 7(b)是有 RCG 姿态控制算法得到的机器人调整步态数据. 可以看出,受到同样大小的冲击,RCG

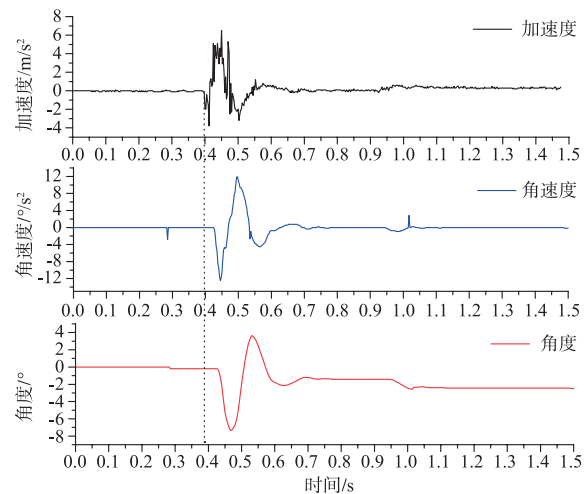
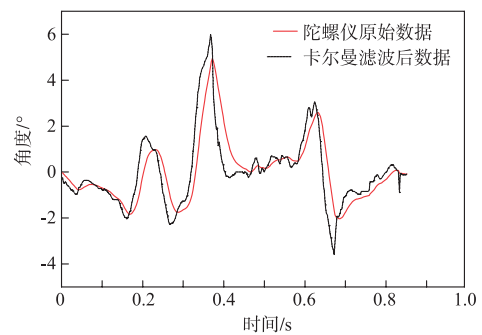
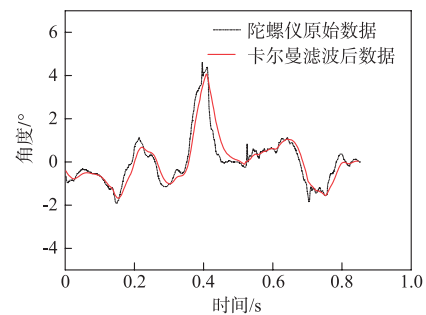


图6 姿态角整实验数据图

姿态控制算法衰减冲击的效果更为明显,动作衔接更稳定.



(a) 传统控制方式侧行冲击姿态调整图



(b) RCG控制算法侧行冲击姿态调整图

图7 侧行控制算法对比图

然后,对保持直立状态的机器人进行前向冲击测试. 当机器人受到外力冲击达到需要进行调整的阈值时,机器人会做出跨步动作以保持身体平衡. 图 8 为在机器人直立状态下,两种控制方式对外部冲击做出调整的数据对比图,图 8 上图为传统控制方式的姿态调整图,下图为 RCG 控制算法调整图. 可以看出,使用 RCG 控制算法能够更快的判断出姿态的偏差,并作出调整.

最后,对正常行走状态的机器人进行外力冲击测

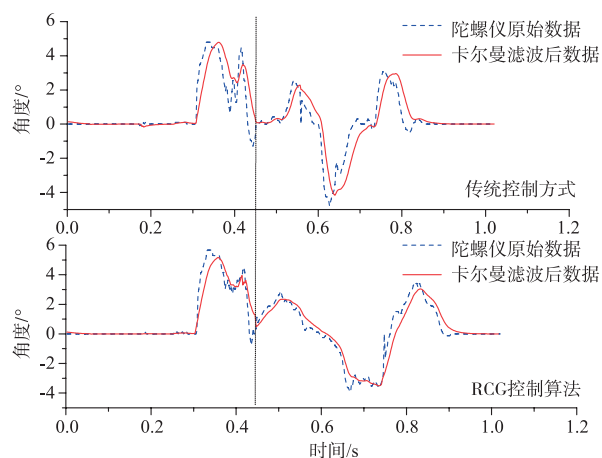


图8 直立冲击姿态调整对比图

试. 图9为双足机器人“正常行走—受到冲击—调整步态—恢复直立”的整个运动状态. 可以看出, 当机器人因外界环境导致姿态发生突变时, RCG 控制算法相比于传统控制方式能够更快速的对姿态突变作出调整. 在姿态调整阶段, 传统控制方式出现了较大范围的角度波动, 而使用 RCG 控制算法调整角度波动较小. 经过多次重复实验, 双足机器人利用 RCG 控制算法恢复正常状态所需的时间比使用传统控制算法平均减少 0.15 秒.

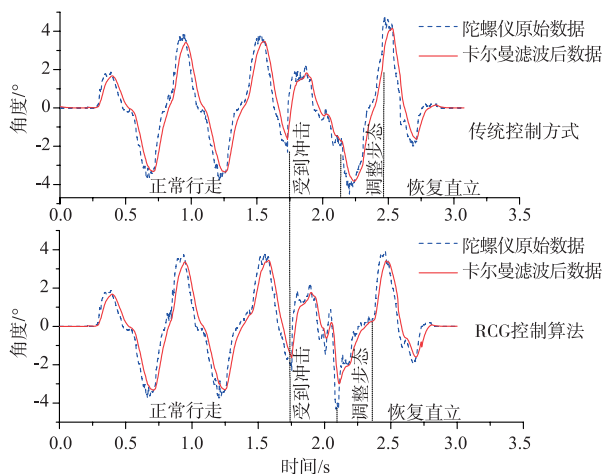


图9 行走姿态稳定控制图

## 5 结论

本文提出了 RCG 控制算法, 通过引入机器人运动过程中的加速度作为姿态判断和调整的影响因子, 提高了双足机器人对失稳状态的响应速率和响应的准确性. 数据处理过程中, 首先使用 RCG 姿态解算算法, 利用加速度计和卡尔曼滤波修正测量角度的偏差, 并通过去除重力分量和方向余弦矩阵变换得到机器人加速

度数据. 然后, 使用 RCG 姿态控制算法, 根据改进的姿态稳定判据, 建立了双足机器人步行稳定控制的比例—微分环节, 以较低的成本和较小的运算量实现对双足机器人的实时姿态修正. 当双足机器人步行失稳时, RCG 控制算法相较于只使用角速度和角度进行姿态判断的传统控制方式能够更快速、准确的修正姿态偏差, 保持姿态稳定.

## 参考文献

- [1] Al-Busaidi A M. Development of an educational environment for online control of a biped robot using MATLAB and Arduino [A]. 9th France-Japan and 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics [C]. H Martikka; Mechatronic, 2012. 337 - 344.
- [2] Juan Botero Valencia, David Marquez Vilorio, et al. A low-cost platform based on a robotic arm for parameters estimation of inertial measurement units [J]. Measurement, 2017, 110: 257 - 262.
- [3] 王立兵, 杨松普, 罗巍, 等. 足部安装 MEMS-IMU 个人导航系统 [J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(4): 460 - 463. WANG Li-bing, YANG Song-pu, LUO Wei, et al. MEMS-IMU personal navigation system installed on foot [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(4): 460 - 463. (in Chinese)
- [4] 李建, 陈卫东, 王丽军, 等. 未知不平整地面上的双足步行稳定控制 [J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2669 - 2674. LI Jian, CHEN Wei-dong, WANG Li-jun, et al. Stability control of biped walking on unknown uneven ground [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(11): 2669 - 2674. (in Chinese)
- [5] Mergner T. A neurological view on reactive human stance control [J]. Annual Reviews in Control, 2010, 34(2): 177 - 198.
- [6] Jian F, Xue Y, Xiang L. Real-time measure and control system of biped walking robot based on sensor [A]. IEEE International Conference on Control and Automation [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2013. 1429 - 1434.
- [7] Li J, Huang Q, Zhang W, et al. Real-time foot attitude estimation for a humanoid robot based on inertial sensors and force sensor [A]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. Bangkok: IEEE Computer Society, 2009. 365 - 370.
- [8] Yi S J, Zhang B T, Hong D, et al. Learning full body push recovery control for small humanoid robots [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, 19(6): 2047 - 2052.
- [9] Jin H, Yang D, Liu Z, et al. A gyroscope-based inverted pendulum with application to posture stabilization of bicy-

- cle vehicle [A]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. New York: IEEE, 2015. 2103 – 2108.
- [10] Takahashi M, Nishiwaki K, Kagami S, et al. Development and evaluation of an attitude measuring system that uses acceleration information of walking for biped robots [J]. Sensors, 2007, 292 – 295.
- [11] Huang S J, Shiao Y W. 2D path control of four omni wheels mobile platform with compass and gyro-scope sensors [J]. Sensors & Actuators: A Physical, 2015, 234: 302 – 310.
- [12] Sato T, Ohnishi K. Walking trajectory modification with gyroscope for biped robot on uneven terrain [A]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2011. 969 – 974.
- [13] Yasin A, Huang Q, Xu Q, et al. Biped robot push detection and recovery [A]. International Conference on Information and Automation [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2012. 993 – 998.
- [14] Sen Gupta G, Barlow P, David S. Review of sensors and sensor integration for the control of a humanoid robot [A]. Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2011. 1 – 5.

## 作者简介



刘迪 女, 1992 年生于吉林延吉. 吉林大学电路与系统硕士. 研究方向为机器人步态控制.



孔令文 男, 1992 年生于黑龙江双鸭山. 吉林大学电路与系统硕士. 研究方向为机器人步态控制.

E-mail: konglw15 @ mails. jlu. edu. cn

杜巧玲 (通信作者) 女, 1978 年生于吉林通化. 博士, 研究方向为机器人控制系统与水质监测控制系统.

E-mail: Duql@jlu.edu.cn