

二足机器人之动态平衡研究

王仲淳,倪世铨,黄加庆,李明哲,郑晖腾,郭怡均

(元智大学 电机系,台湾 中坜 32003)

摘要:主要探讨二足机器人(biped robots)行走或受到外力干扰时,通过动态平衡控制使机器人行走更趋稳定,并增强站立时稳定性.二足机器人动态平衡之实现,主要是将动态平衡控制程序撰写于 Nios II 发展环境中,当二足机器人行走时,利用脚底压力传感器取得压力值,运算及判断二足机器人实际重心是否落在二足机器人支撑多边形范围内,并计算实际重心与期望重心之误差,以模糊控制器将二足机器人重心控制于支撑多边形范围内,使二足机器人行走时能够更加稳定,实验结果表明该方法是有有效的.

关键词:二足机器人;动态平衡控制;模糊控制器

中图分类号:TP242 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2009)05-0463-08

Dynamic balance for bipedal robots

WANG Jong-chwen, NI Shih-chiuan, HUANG Chia-ching, LI Ming-che, CHENG Hui-teng, KUO Yi-chun

(Department of Electrical Engineering, Yuan Ze University, Chung-Li 32003, China)

Abstract: The main purpose of this paper was to study how to enhance the dynamic balance of bipedal robots during walking or when interacting with external forces. Their stability while standing was also examined. The dynamic equilibrium of the tested biped robots resulted from built-in dynamic control programs which were written in the Nios development environment. To get pressure values from the pressure sensors of biped robots, we used control algorithms to compute the position of the actual center of gravity (CoG) and also to determine whether the CoG fell inside the polygon defining the area of balance for the robot. It was found possible to use a fuzzy controller to compensate for errors due to differences between the actual CoG and the theoretical one. The objective was to keep the CoG within the supporting polygon area. This helped the bipedal robots walk more steadily and also improved their overall stability when standing. The experimental results show that this method is effective.

Keywords: biped robot; dynamic state control; fuzzy control

随着科技的进步,世界各国渐渐开始投入机器人领域的研究.机器人有很多不同类型,像是水下机器人、飞行机器人、地下机器人等.不论是何种类型机器人大致上都可以分为轮型、多足型和轨道式等,其中又以最像人类的二足机器人(biped robots)最受世人瞩目.

目前二足机器人步行还无法像人类一样,来去自如行走于不同的地形上,而且人类步行时本身因为拥有平衡功能,所以步行时才不至于跌倒,目前二足机器人步行时最需克服的就是平衡问题.二足机器人克服地形限制后,即可代替人类于危险环境或是人类无法到达的地方执行各种任务.

本文主要研究二足机器人的动态平衡,当机器人运行时,经由传感器取值并通过控制器补偿机器人重心稳定位置,分析比较不同控制器的性能差异,让机器人不论在静态或动态状态下都能够具有抗干扰性能,使得机器人在姿态及运作效能上有所改善.

1 二足机器人硬件架构

1.1 硬件架构

如图1所示为二足机器人正面及侧面图,该二足机器人是由双足10个自由度、头部1个自由度、FPGA发展实验板、伺服机驱动模块、无线模块、超音波传感器、电子罗盘、加速度计以及8颗压力传感器所架构出的.二足机器人站立时高为320 mm,宽为230 mm,重量约1.5 kg,脚底是A/D转换电路及

8 颗压力传感器组合,大小为 $6\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ 。

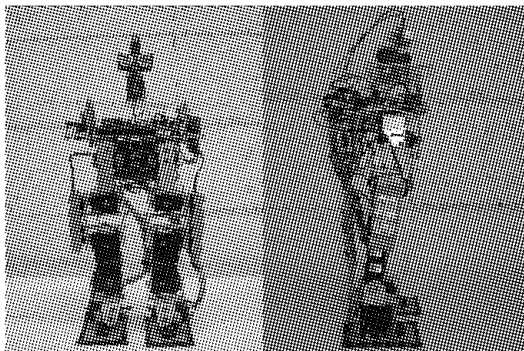


图1 二足机器人正面及侧面图

Fig. 1 The biped robot

该二足机器人主要是藉由脚底压力传感器取值并运算出实际重心位置后,并控制伺服机以达到行走平衡的目的. 本文所使用的压力传感器为 FSR400,如图 2 所示. FSR400 是一种整体体积小且能够连续检测压力强弱的电阻式压力传感器。

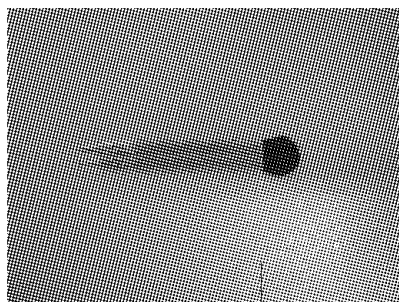


图2 FSR400 压力传感器实体图

Fig. 2 FSR400 pressure sensor entity chart

由于压力传感器输出为模拟信号,为了使得 FPGA 发展实验板取得压力值,故透过 IC 设计出 A/D 转换电路. 为了节省空间,故将 A/D 转换电路制作于二足机器人脚底,如图 3 所示为二足机器人脚底实体图。

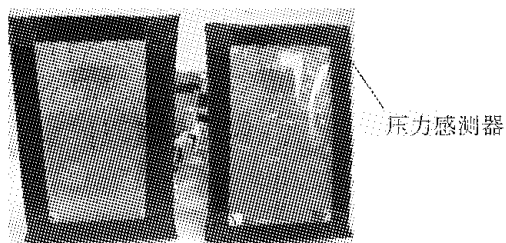


图3 二足机器人脚底实体图

Fig. 3 The biped robot sole physical map

1.2 软件架构

本研究的目的是实现二足机器人的动态平衡,主要通过程序撰写于 FPGA 发展实验板中. 为了能够方便测试与监控整个机器人状态,使用 VC 6.0 (Microsoft visual C ++ 6.0)开发环境,并利用 MFC

(Microsoft foundation classes)架构建立了监控画面,以利能够在桌上型计算机 (desktop) 上监控二足机器人各个传感器取值的情况. 如图 4 所示为压力监控画面。

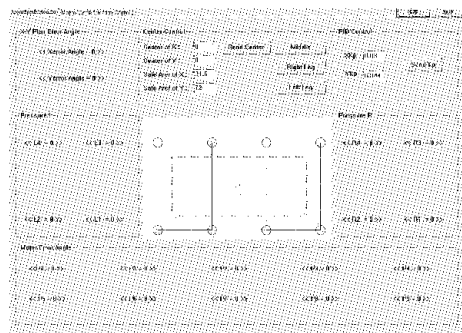


图4 脚底压力监控画面

Fig. 4 Foot pressure monitoring screen

1.2.1 平衡架构

二足机器人步行时,平衡控制重心的偏移分为双脚与单脚 2 种情况^[1],如图 5 所示为二足机器人双脚控制流程。

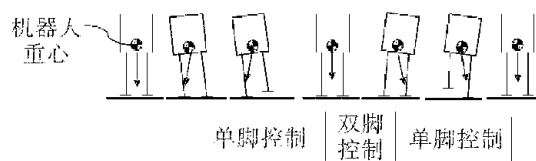


图5 二足机器人双脚控制流程

Fig. 5 Biped robot legs control flow

如图 6 所示为二足机器人脚底坐标系统,二足机器人重心位置偏移分为 X 、 Y 2 种不同方向,经由这 2 种不同方向判断出实际重心位置,当二足机器人步行时往前为 $-X$ 方向,往后为 $+X$ 方向,而往左倾时为 $-Y$ 方向,往右倾则为 $+Y$ 方向。

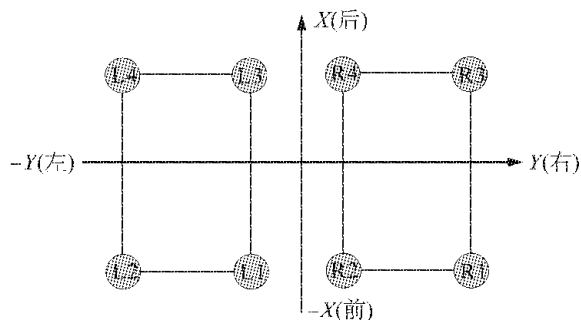


图6 二足机器人脚底坐标系统

Fig. 6 Biped robot foot coordinate system

本文平衡架构分为压力传感器初始化、压力传感器取得压力值、压力值滤波、重心误差、平衡控制及伺服机补偿等 6 个架构,通过这 6 部分规划出整个二足机器人步行平衡控制流程,如图 7 所示。

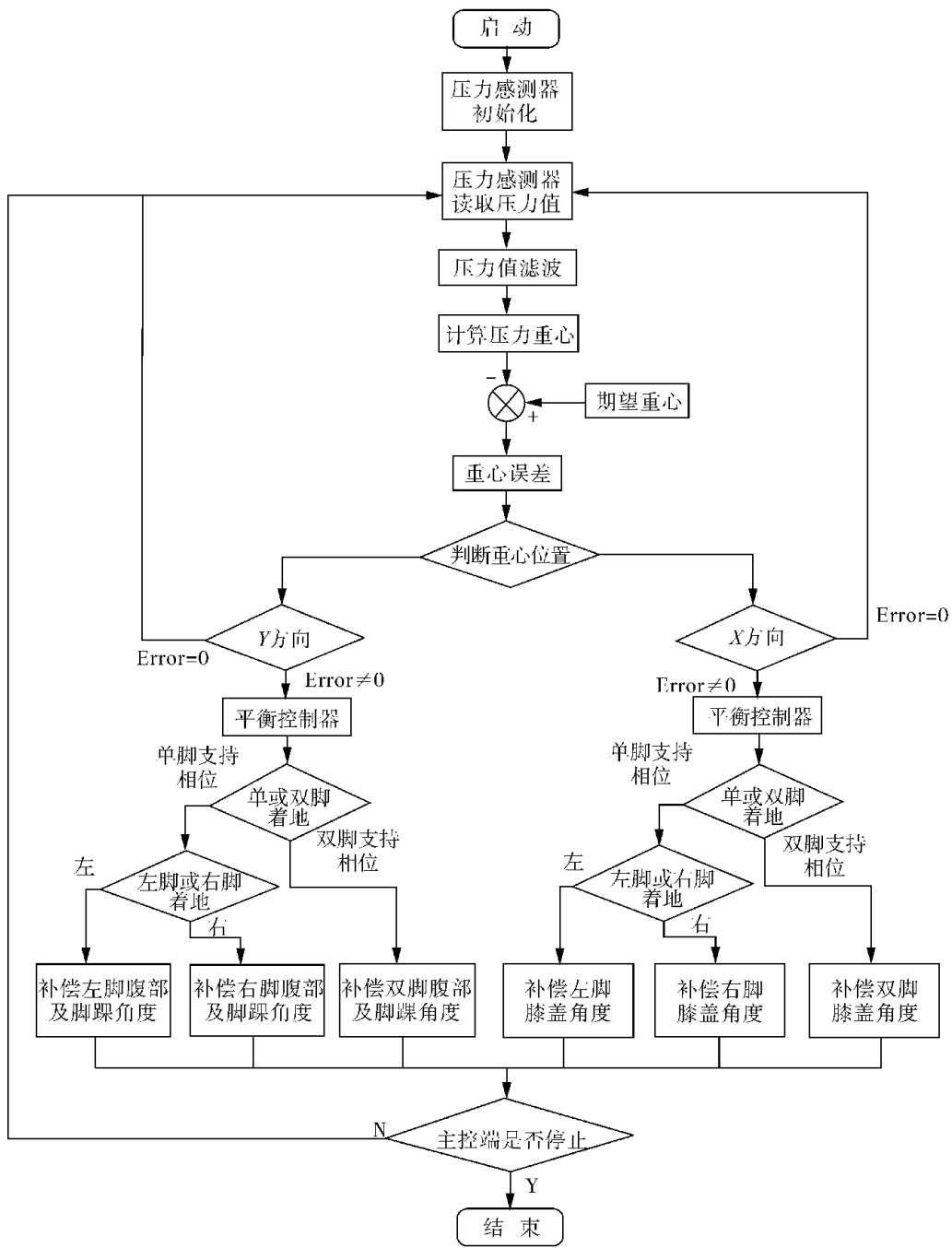


图 7 步态平衡流程图
Fig.7 The flow chart of walk-state balance

1.2.2 压力传感器初始化

图 8 所示为压力值初始化流程图. 二足机器人站立时的重量对地面有一定作用力,所以二足机器人启动前会将压力传感器初始化,其用意为取得二足机器人站立时初始状态压力值,并排除机器人本身震动之干扰,避免二足机器人平衡系统误判.

1.2.3 计算压力值

二足机器人运行时,压力传感器受力后其电阻值随之改变,经由 A/D 电路转换成 PWM 信号,透过 FPGA 实验板运算 PWM 由低电位到高电位脉波数量,从而取得各个压力传感器的实际压力值,如图 9 所示为取得压力值流程图. FPGA 实验板运算后各个压力传感器压力值的范围为 0 ~4 000 个脉冲.

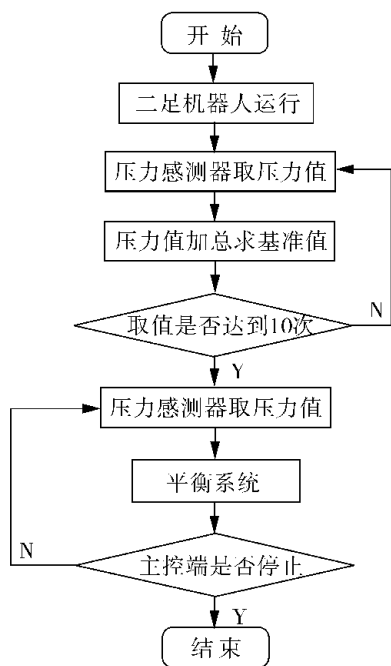


图8 压力传感器初始化流程图

Fig. 8 Pressure sensor initialization flowchart

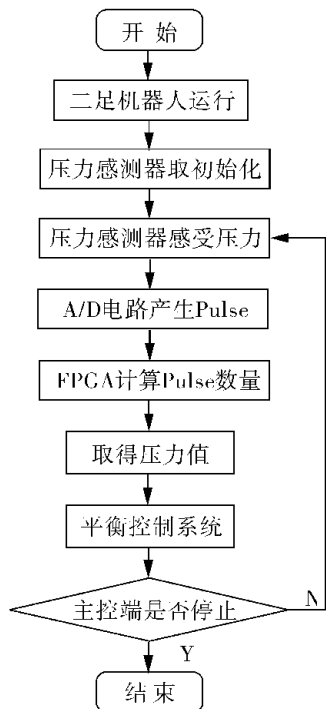


图9 取得压力值流程图

Fig. 9 The flow chart of pressure value obtaining

1.2.4 压力值滤波

二足机器人运行时机身晃动将产生突波,因此藉由滤波器降低突波干扰. 本文采用的滤波方法是将各个压力传感器当次取得的压力值与前1次及前2次所取得的压力值分别乘一定得倍率后加总而成. 如图10所示为数字滤波器, $d(t)$ 为当前所取到的压力值、 $d(t-1)$ 为前1次所取到的压力值、 $d(t-2)$ 为前2次所取到的压力值.

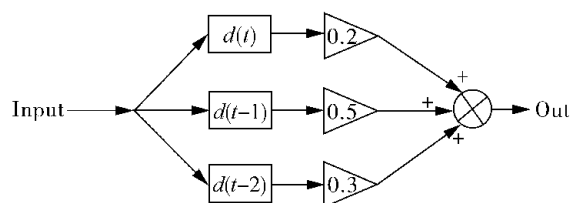


图10 数字滤波器

Fig. 10 Digital filter

1.2.5 计算重心及平衡控制

二足机器人移动时会有有一个实际重心位置,实际重心分为 X 、 Y 2个不同方向,二足机器人运动时每一个动作都会对应一个理论重心位置,将实际重心与期望重心相减后得到一组重心误差值,此误差值是平衡控制的主要依据. 将重心的误差值通过控制器运算,运算出伺服机补偿角度,藉由此角度补偿所对应的伺服机,来补偿误差的影响,使二足机器人行走时能更加顺畅稳定,并让机器人能够拥有抗干扰的功能,如图11所示.

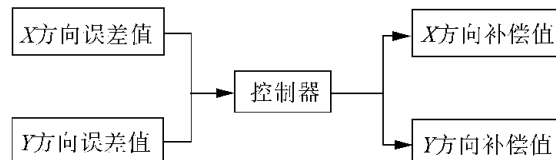


图11 补偿值运算流程图

Fig. 11 The flow chart of compensation value operation

2 平衡控制理论

2.1 零力矩点

零力矩点(zero moment point, ZMP)是由 Vukobratvic 于 1968 年提出^[3]. 如图12所示为脚底反作用力情形,二足机器人接触地面时,若将地面的反作用力集中一点 P ,会有集中力(counterforce) N 及力矩 M 产生,此时 P 点周围的惯性力及重力产生的净力矩和为零,即称 P 点为零力矩点.

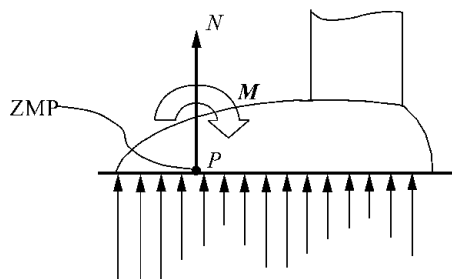


图12 脚底反作用力情形

Fig. 12 Foot reaction force

二足机器人运动时本身各连杆会产生加速度而具有惯性力. 假设机器人本身全部连杆、力矩与地面反作用力相互抵消,即二足机器人所有杆件合力作用于二足机器人支撑多边形(脚掌)内,此时二足机

机器人则保持稳定不倾倒;反之若二足机器人合力作用于支撑多边形外,二足机器人则会有产生倾倒状况发生,如图 13 所示。

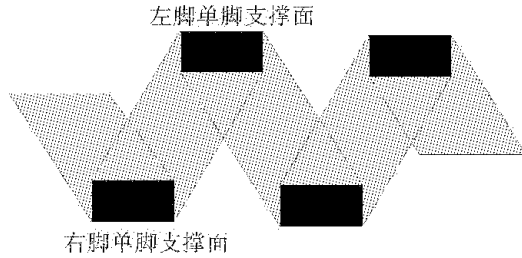


图 13 二足机器人步行时 ZMP 的稳定范围

Fig. 13 Biped robot walking stability of the scope of ZMP

通过机器人机身各连杆的关系可求得零力矩点位置,其公式如式(1)所示^[3]:

$$\begin{cases} x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i x_i g - (m_i (z_i \dot{x}_i - x_i \dot{z}_i) + \dot{\omega}_{iy}))}{mg + \sum_{i=1}^n m_i \dot{z}_i}, \\ y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i y_i g - (m_i (z_i \dot{y}_i - y_i \dot{z}_i) + \dot{\omega}_{ix}))}{mg + \sum_{i=1}^n m_i \dot{z}_i}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:\$(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)\$为零力矩点的坐标位置;\$m\$为总质量;\$g\$为重心的加速度;\$m_i\$为第\$i\$个连杆的质量;\$(x_i, y_i, z_i)\$为第\$i\$个连杆的质心位置;\$(\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i)\$为第\$i\$个连杆的质心位置加速度;\$\dot{\omega}_{ix}\$、\$\dot{\omega}_{iy}\$为第\$i\$连杆\$X\$、\$Y\$轴角加速度。

Vukobratvic 也说明若二足机器人运动时所有杆件合力作用于支撑多边形内,压力中心与零力矩点的位置是同一个点,则零力矩点与重心关系可以通过二足机器人脚底压力传感器与地面反作用力反馈计算出二足机器人实际零力矩点位置^[4,5]。实际重心位置可由式(2)求得:

$$\begin{cases} x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}, \\ y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:\$f_i\$为地面的反作用力;\$(x_i, y_i)\$为压力传感器坐标位置。图 14 所示为压力传感器位置图。

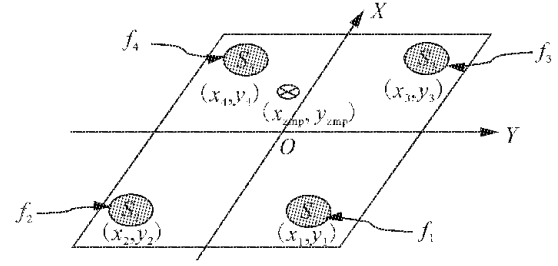


图 14 压力传感器位置图

Fig. 14 Pressure sensor location

2.2 模糊控制器

本文还要设计一模糊控制器,并由模糊控制器运算出各伺服机所需的补偿角度。如图 15 所示为模糊控制器补偿流程,将二足机器人期望重心\$h_p\$与实际重心位置\$e_p\$相加减会得到位置误差\$e\$,误差\$e\$通过模糊控制器运算得到各个伺服机补偿角度\$\theta\$,经由所对应伺服机将补偿角度\$\theta\$作补偿,让二足机器人在站立或步行时达到平衡。

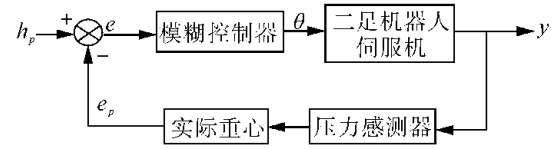


图 15 模糊控制器补偿流程

Fig. 15 Fuzzy controller compensation process

补偿方向分为\$X\$、\$Y\$2个方向,所以\$X\$方向及\$Y\$方向的前件部分别为重心误差\$\Delta x\$、\$\Delta y\$,重心误差变化量\$\Delta \dot{x}\$、\$\Delta \dot{y}\$,后件部为二足机器人双脚伺服机补偿角度大小\$u_x\$、\$u_y\$。\$X\$方向补偿角度向机器人前方\$u_x\$为负,向后\$u_x\$为正,\$Y\$方向补偿角度向右\$u_y\$为正,向左\$u_y\$为负。前件部模糊集合为5个,后件部模糊集合为7个。\$\Delta x\$、\$\Delta y\$可以取EM(误差负大)、ES(误差负小)、EZ(误差零)、EL(误差正小)、EB(误差正大),\$\Delta \dot{x}\$、\$\Delta \dot{y}\$可以取DS(差量负大)、DY(差量负小)、DZ(差量零)、DB(差量正小)、DL(差量正大), \$u_x\$、\$u_y\$其值为ML(补偿负大)、MM(补偿负中)、MS(补偿负小)、ZO(补偿零)、PS(补偿正小)、PM(补偿正中)和PL(补偿正大)。

经由前件部与后件部的对应并定义出\$X\$、\$Y\$方向的模糊集合如图 16~21 所示。

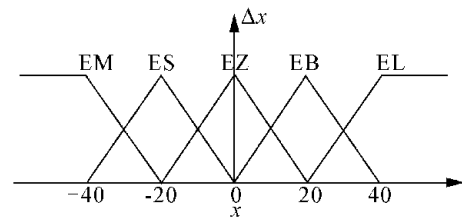


图 16 \$\Delta x\$ 归属函数

Fig. 16 \$\Delta x\$ membership functions

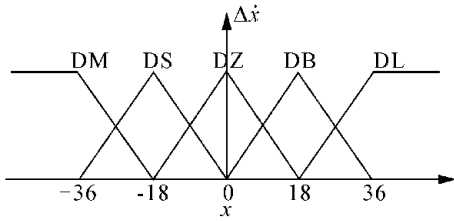


图 17 Δx 归属函数

Fig. 17 Δx membership functions

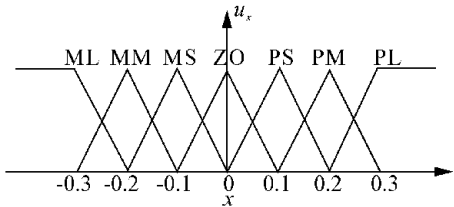


图 18 u_x 归属函数

Fig. 18 u_x membership functions

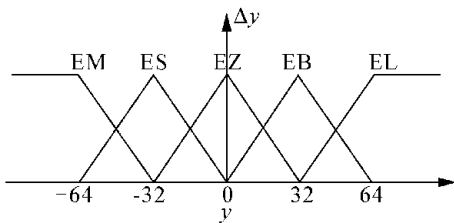


图 19 Δy 归属函数

Fig. 19 Δy membership functions

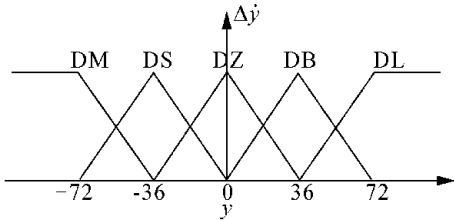


图 20 Δy 归属函数

Fig. 20 Δy Membership functions

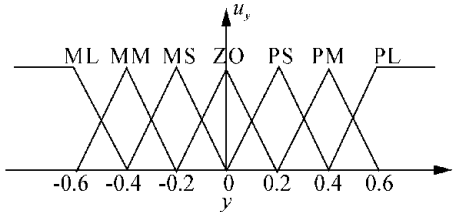


图 21 u_y 归属函数

Fig. 21 u_y membership functions

各前件部与后件部参数经由 if-then 形式订定出模糊规则库,本研究规则库分 X、Y 2 个不同方向,所以规则库也分为 2 个,如表 1 及表 2 所示。

当模糊控制器输入值于输入归属函数的位置,经由模糊推论的运算方法,判断所触发归属函数的激发量,定义出输出的模糊归属函数的触发范围。本文模糊规则所使用的推论方法是曼达宁 (Mamdani) 的 Min-Max 推论法。

将模糊推论的结果作解模糊化,本文的解模糊化是使用重心解模糊化法,其公式如下:

$$y^* = \frac{\int y B'(y) dy}{\int B'(y) dy} \quad (3)$$

表 1 X 方向规则库

Table 1 The X direction of the rule base

Δx	u_x				
	$\Delta x = EM$	$\Delta x = ES$	$\Delta x = EZ$	$\Delta x = EB$	$\Delta x = EL$
DM	PL	PL	PL	PM	MS
DS	PL	PM	PS	ZO	MM
DZ	PL	PS	ZO	MS	ML
DB	PM	ZO	MS	MS	ML
DL	PS	MM	ML	ML	ML

表 2 Y 方向规则库

Table 2 The Y direction of the rule base

Δy	u_y				
	$\Delta y = EM$	$\Delta y = ES$	$\Delta y = EZ$	$\Delta y = EB$	$\Delta y = EL$
DM	PL	PL	PL	PM	MS
DS	PL	PM	PS	ZO	MM
DZ	PL	PS	ZO	MS	ML
DB	PM	ZO	MS	MS	ML
DL	PS	MM	ML	ML	ML

3 实验结果与分析

3.1 平坦地面步行测试

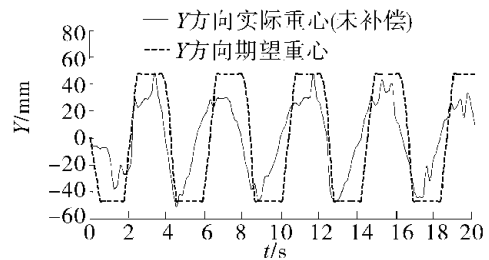


图 22 重心未补偿 Y 轴轨迹

Fig. 22 Y-axis trajectory when center of gravity is not compensated

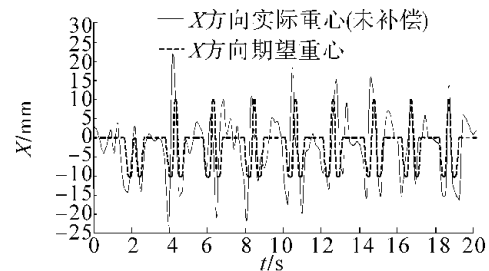


图 23 重心未补偿 X 轴轨迹

Fig. 23 X-axis trajectory when center of gravity is not compensated

如图 22 及图 23 为重心未补偿 X 、 Y 轴轨迹,当二足机器人步行时没有控制器作运算及补偿,实际重心左右方向振幅较大且没有到达期望重心位置,实际重心位置与期望重心位置相差很多,二足机器人移动并不顺畅.由此可知道二足机器人在未补偿时步行并不稳定且没有平衡功能.

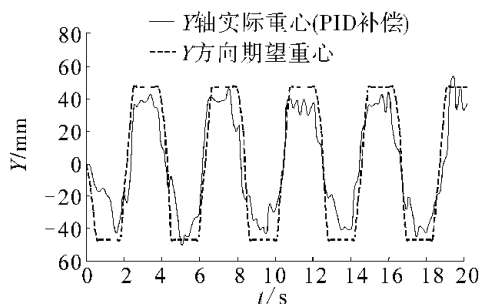


图 24 重心 PID 补偿 Y 轴轨迹

Fig. 24 Y-axis trajectory when center of gravity is compensated using PID controller

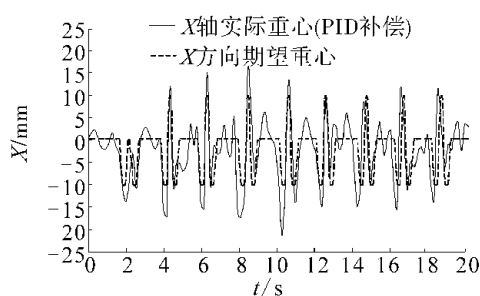


图 25 重心 PID 补偿 X 轴轨迹

Fig. 25 X-axis trajectory when center of gravity is compensated using PID controller

当加入了 PID 控制器后,如图 24 及图 25 所示为重心 PID 补偿 X 、 Y 轴轨迹.重心左右方向 Y 轴移动轨迹明显比未补偿更接近期望重心位置,重心振幅也较为规律稳定,可以看出振幅与未补偿时较为稳定且拥有基本的平衡功能.

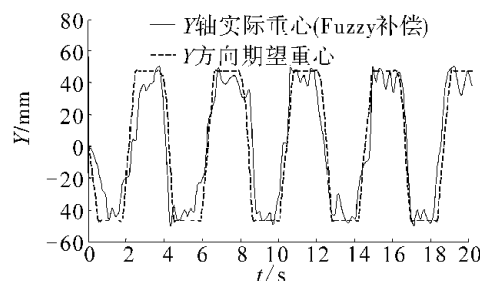


图 26 重心 Fuzzy 补偿 Y 轴轨迹

Fig. 26 Y-axis trajectory when center of gravity is compensated using Fuzzy controller

如图 26 与图 27 所示为重心 Fuzzy 补偿 X 、 Y 轴轨迹.当机器人使用模糊控制器时,明显看出重心左右方向 Y 轴轨迹较 PID 控制器更为稳定且较符合期

望重心位置,跨步时的前后方向 X 轴晃动的幅度也明显变小.透过 Fuzzy 作补偿可让机器人达到较稳定的平衡状态.

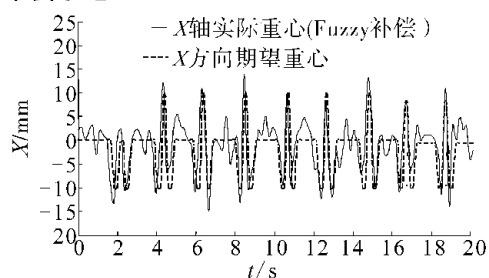


图 27 重心 Fuzzy 补偿 X 轴轨迹

Fig. 27 X-axis trajectory when center of gravity is compensated using Fuzzy controller

3.2 抗干扰测试

该实验在二足机器人站立时受到外力干扰时,测试其重心经由不同控制器补偿后的结果.如图 28~30 所示,可以看出二足机器人受到了外力干扰时,使用模糊控制器补偿后较使用 PID 控制器更迅速及稳定.

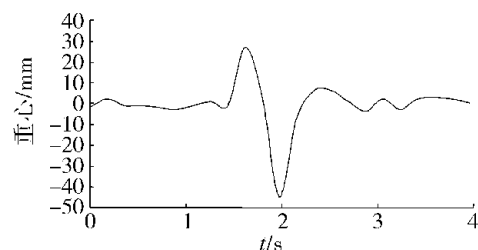


图 28 立抗干扰 PID 控制器补偿重心变化

Fig. 28 The change of center of gravity is compensated using legislative immunity PID controller

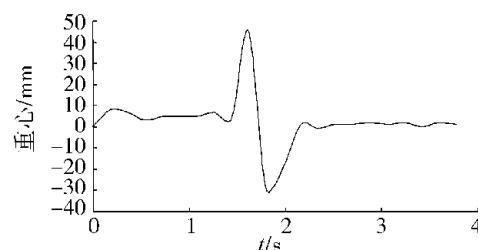


图 29 立抗干扰 Fuzzy 控制器补偿重心变化

Fig. 29 The change of center of gravity is compensated using legislative immunity Fuzzy controller

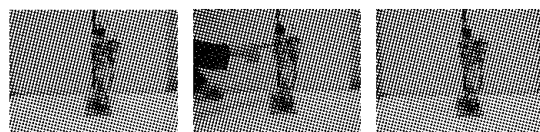


图 30 抗干扰实际测试图

Fig. 30 Disturbing the actual test pattern

3.3 斜坡步行测试

本文透过模糊控制器补偿伺服机角度,使二足

机器人能够从平坦地面一路步行上倾斜角 8° 的斜坡上. 如图 31 为机器人步行于斜坡实际测试图.

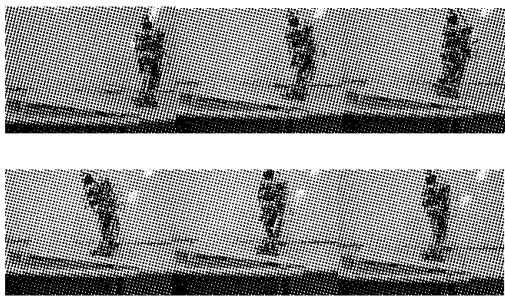


图 31 二足机器人上坡测试图

Fig. 31 The uphill test of biped robot

4 结 论

主要研究了二足机器人于步行时的动态平衡问题,透过压力传感器取得二足机器人脚底压力值,并计算二足机器人的实际重心位置,再将实际重心位置以模糊控制器运算,计算二足机器人在步行时各伺服机所需补偿角度,并与 PID 控制器运算做比较,透过各伺服机角度补偿可明显看出补偿前后的差异. 经由实际实验测试二足机器人补偿后的波形可以得到下列结论:

1) 二足机器人在未补偿重心误差值时,明显看出重心移动轨迹较不稳定且较没有达到期望重心位置,所以在行走时若是地面不平坦或是外界突然有干扰时则二足机器人就容易倾倒;

2) 使用 PID 控制器时可以看出波形变得较稳定且渐渐有重心轨迹出现,但某些时候实际重心位置与期望重心位置还是有距离,不过此控制器已让二足机器人行走较为稳定且可以看出二足机器人已经拥有了抗干扰性;

3) 使用模糊控制器作为补偿角度时,明显地看出实际重心轨迹与期望轨迹更加相似,使二足机器人行走更为顺畅及稳定,运用此控制器可以明显看出二足机器人遇到干扰时,其抗干扰性比使用 PID 控制器更强,并使二足机器人能够步行于 8° 的斜坡上,这使得机器人行走于不同地形上有所突破.

参考文献:

[1] KUN A, MILLER W T. Adaptive dynamic balance of a bi-

ped robot using neural networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, USA, 1996: 240-245.

[2] VUKOBRATOVIC M, BOROVAC B. Zero-moment-point thirty five years of its Life[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2004, 1: 157-173.

[3] SARDAIN P, BESSONNET G. Forces acting on a biped robot. Center of pressure-zero moment point[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2004, 34: 630-637.

[4] KONNO A, KATO N, SHIRATA S, et al. Development of a light-weight biped humanoid robot [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu, Japan, 2000, 3: 1565-1570.

[5] 涂志芳. 人型机器人分布式实时控制及步行分析[D]. 台北: 台湾科技大学, 2007.

TU Zhifang. Humanoid robot walking distributed real-time control and analysis[D]. Taipei: Taiwan University of Science and Technology, 2007.

[6] 葛新成, 胡永霞. 模糊控制的现状与发展概述[J]. 现代防御技术, 2008, 36(3): 51-55.

GE Xincheng, HU Yongxia. Present analysis and development trends of Fuzzy control techniques[J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(3): 51-55.

作者简介:



王仲淳, 男, 1945 年生, 教授. 主要研究方向为国防太空电力系统、能源及发电系统与高科技产业等. 发表学术论文 70 余篇.



倪世铨, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为智能机器人.



黄加庆, 男, 1982 年生, 硕士研究生. 主要研究方向为智能机器人.