

## 可变形机器人自主攀爬楼梯控制研究<sup>①</sup>

常 健<sup>②\*</sup> 王亚珍<sup>\*\*</sup> 李 斌<sup>\*</sup>

(\* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(\*\* 浙江省特种设备检验研究院 杭州 310015)

**摘 要** 设计并实现了一种机器人自主攀爬楼梯系统,研究了复杂环境下可变形机器人自主攀爬楼梯的控制方法。通过分析楼梯面与机器人履带的接触方式,包括梯面打滑、棱刺打滑、履带打滑等,确定了机器人进行梯面翻越、梯面行走时不打滑的条件,以提高机器人的爬行效率。对传感器的感知信息进行滤波,以提高机器人的感知能力,确定楼梯的首末台阶,进而制定有效的爬行策略。通过对整个控制系统进行建模分析,建立了系统的软件流程图;通过对多种典型楼梯环境进行试验,验证设计方法的有效性及其较好的鲁棒性。

**关键词** 可变形机器人, 攀爬楼梯, 自主控制, 履带接触

## 0 引言

灾后复杂的救援环境严重阻碍了搜救人员快速有效地进行救援,因而有效利用机器人辅助搜救的研究得到广泛的关注。要实现机器人的应用,必须研究机器人的控制。本人研究了可变形机器人自主攀爬楼梯的控制,因为楼梯是废墟楼宇环境中的典型障碍物之一。机器人攀爬楼梯的过程较为复杂,难以对其进行有效控制,因而研究机器人爬楼梯控制具有重要的实际意义。机器人能否有效爬楼梯是评价机器人运动性能的重要指标之一。

通过与参加芦山地震搜救任务者的交流发现,采用远程遥控的方式操作机器人攀爬楼梯易出现以下问题:楼梯环境狭小时难以准确有效控制机器人;通信及视频信号被阻断时机器人无法继续行进作业任务。因此研究机器人自主攀爬楼梯的控制方法能够极大地减轻操作人员的负担且在通信中断时机器人能够继续完成作业任务,使其应用范围得到加强。研究发现,国内外对机器人攀爬楼梯的控制主要停

留在遥控的方式,也就是说操作者需要实时观测到外界环境信息及机器人本体运动状态信息,主观人为地执行相应的控制策略去操控机器人完成爬楼梯任务。这种控制方法在很大程度上依赖于操作人员的工作经验。但是由于废墟环境中恶劣的通信条件,通信信号在传输过程中损耗巨大,机器人可能处于操作“盲区”,此时就需要废墟搜救机器人具有自主能力,能够自主攀爬楼梯。

国内外专家对机器人攀爬楼梯的研究取得了一定的进展。多伦多大学研制的 LMA 机器人<sup>[1]</sup>具有较好的攀爬楼梯的能力,可以利用机器人的履带构型的改变翻越障碍物,同时利用相应的算法使得机器人能够避免倾翻。韩国大学设计 MACbot 机器人<sup>[2]</sup>利用其特有的四履带行进,机器人可以选择常规运动模式和越障模式,其模式的选取依靠每个履带模块电机转动的方向。中国科学院沈阳自动化研究所李斌等研制的水路两栖可变形履带机器人平台<sup>[3-5]</sup>对机器人翻越楼梯的基本过程进行阶段划分,并进行运动学和准静态力学分析,针对翻越楼梯过程的各阶段建立模块联合运动协调准则、防止倾

① 国家科技支撑计划(2014BAK12B01)资助项目。

② 男,1983年生,博士,副研究员;研究方向:可变形机器人自主控制,自主避障;联系人,E-mail:changjian@sia.cn  
(收稿日期:2016-05-15)

翻准则和防止干涉准则,实现机器人翻越楼梯运动的实时在线预测控制。北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室研发的关节式履带机器人<sup>[6]</sup>能够适应复杂地形并具有攀爬楼梯的能力,并提出了一种基于动态稳定性准则的爬楼梯控制方法。在两前摆臂的辅助下,该机器人能够攀爬楼梯的最大台阶高度为192mm,宽度为349mm。哈尔滨工业大学的胡庆龙设计的机器人<sup>[7]</sup>具备完成正常的直线行走、原地转弯以及野外路面的行走的基本性能,并且机器人按照规划实现了自主爬楼梯的功能。本研究提出了一种适应复杂环境的可变形机器人自主攀爬楼梯的控制方法,该方法可有效减轻搜救人员狭小环境下操控机器人的负担,同时使机器人有一定的自主能力,可以在通信中断时自主攀爬楼梯,跳出通信盲区,继续执行任务。

## 1 可变形机器人及攀爬楼梯过程分析

传统固定构型的机器人由于机构单一,运动能



图1 可变形机器人 AMOEBA-I 常用构型

表1 可变形机器人不同构型下运动性能

	越障性	抗倾翻性	转向性	通过性
三角构型	较好	较好	较好	差
并排构型	差	较好	很好	差
直线构型	很好	一般	差	很好
d 构型	较好	较好	一般	一般

### 1.2 机器人攀爬楼梯策略分析

机器人攀爬楼梯的过程如图2所示,本文只考虑攀爬楼梯的过程,包括楼梯接近、楼梯攀爬和梯面翻越等,对楼梯的识别不再考虑,其中楼梯的攀爬包括梯面爬升和梯面行走两部分,建模过程参照文

力有限,使其使用受到了限制。而对于可变形机器人而言,其本身的形状可以根据不同的任务灵活改变,其环境适应性和空间通过能力得到了提升,适用于复杂非结构的废墟环境,因此本部分将对机器人本体的运动特性及攀爬楼梯的过程进行详细的分析。

### 1.1 可变形机器人

由中国科学院沈阳自动化研究所自主设计和研制的可变形机器人 AMOEBA-I<sup>[8-10]</sup>适用于灾难发生后的搜救环境,其特有的变形能力能够适应多种复杂危险环境。常用的构型包括:三角构型、直线构型、并排构型及“d”构型,如图1所示。图3描述了机器人采用三角构型的楼梯攀爬情况。机器人处于不同的构型具有不同的运动能力<sup>[11-13]</sup>,如表1所示。相比于其他构型,三角构型具有较好的对称性及越障性,这些特性使其成为最优攀爬楼梯的构型,因此本文主要研究基于三角构型的机器人自主攀爬楼梯控制方法。

献[14]。

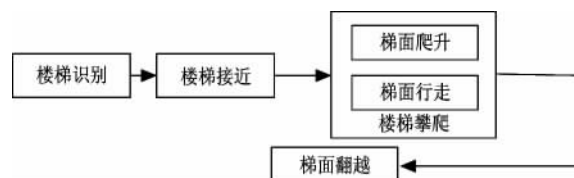
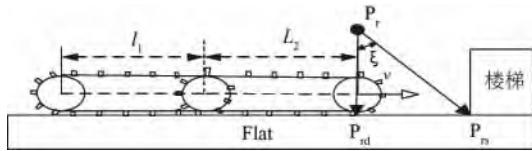
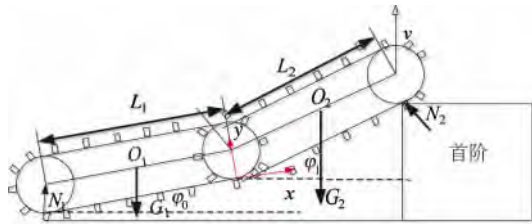


图2 机器人攀爬楼梯过程

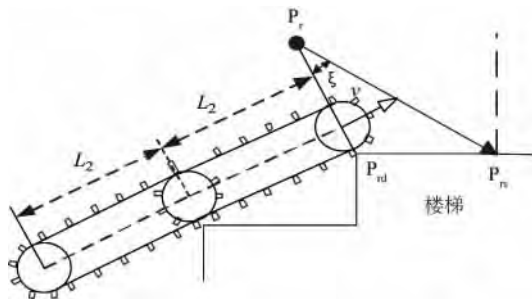
判断机器人能否有效地攀爬楼梯的指标主要包括:机器人能否保证攀爬过程的安全性(躲避障碍物及远离墙面);机器人能否快速地攀爬楼梯(较少的方向调整)和机器人能否以较少的能耗攀爬楼梯



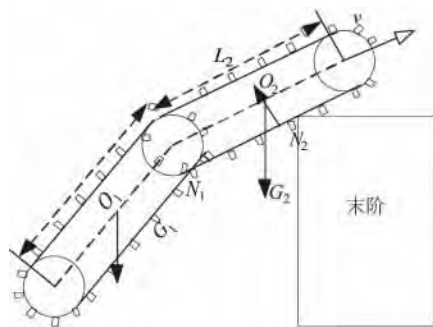
(a) 机器人采用三角构型接近楼梯首阶



(b) 机器人开始攀爬楼梯首阶



(c) 机器人进行梯面行走



(d) 机器人进行末阶翻越

图3 机器人采用三角构型攀爬楼梯

等方面。本文研究针对室内环境下的标准楼梯(符合国标)机器人首先利用超声传感器对楼梯进行识

别,当测量值到达传感阈值时,机器人开始利用俯仰关节抬头及攀爬楼梯,此时制定的策略是保证攀爬能量最优。当机器人进行梯面行走时,制定策略使机器人能够安全行驶,最后计算动力学特性保证末阶翻越的有效性。

当机器人进行末阶翻越时,需要精准判断末端台阶的位置高度信息,通过安装在机器人特殊位置的传感器可以实现。依照楼梯国标,  $P_{rd}P_{rs} < PP_{mst}$ 。定义方向角  $\xi$

$$\tan \xi = \frac{P_{rd}P_{rs}}{P_{rd}P_r} \Rightarrow \xi < \arctan \frac{P_{rd}P_{rs}}{P_{rd}P_r} \quad (1)$$

为了有效探测距离,传感器不能与机器人履带产生干涉,因此需要保证

$$\xi > \arcsin \frac{r}{P_r P_{rd} - r} \quad (2)$$

$$\arcsin \frac{r}{P_r P_{rd} - r} < \xi < \arcsin \frac{P_{rd}P_{rs}}{P_{rd}P_r} \quad (3)$$

设定  $PP_{var}$  为阈值,用以确定机器人能否准确到达楼梯顶端。

$$P_r P_{rs} = P_r P_{rd} \left( \frac{1}{\cos \xi} + \frac{\tan \xi \sin \xi}{\cos(\xi + Q)} \right) \quad (4)$$

$$P_r P_{rs} \geq P_r P_{rd} \left( \frac{1}{\cos \xi} + \frac{\tan \xi \sin \xi}{\cos(\xi + Q)} \right) \quad (5)$$

$$P_r P_{rd} \left( \frac{1}{\cos \xi} + \frac{\tan \xi \sin \xi}{\cos(\xi + Q)} \right) < PP_{var} < \frac{(PP_{mst} - \frac{L2}{\cos Q}) \sin(\xi + Q)}{\sin \xi} \quad (6)$$

当传感器返回的数值大于  $PP_{var}$  时,机器人能够识别出末端楼梯,然后进行梯面翻越。

### 1.3 机器人梯面行走运动力学分析

履带与梯面的接触打滑方式主要分为3种:梯面打滑、履带打滑和棱刺打滑,如图4所示。

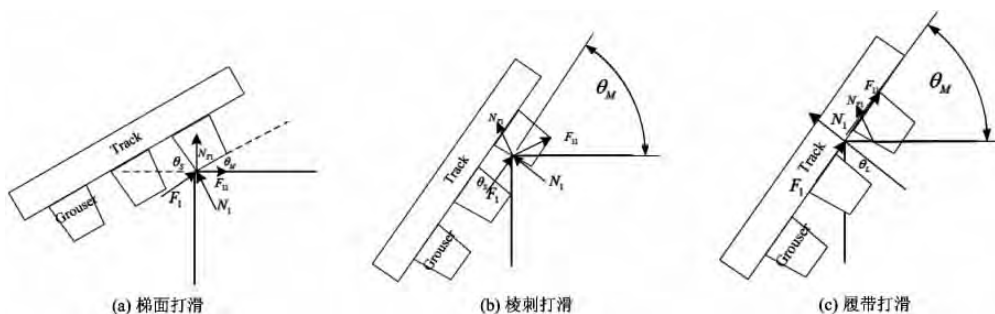


图4 履带与楼梯接触方式的多种打滑现象

当  $0^\circ \leq \theta_M \leq \theta_s$  时,易发生梯面打滑现象,因此切向力和法向力必须满足式下式:

$$-f_s \leq \frac{F_{11}}{N_{11}} = -\frac{N_1 \cos\theta_M - F_1 \cos\theta_M}{N_1 \cos\theta_M + F_1 \cos\theta_M} \leq f_s \quad (7)$$

当  $N_1 > 0, N_{11} = F_1 \sin\theta_M + N_1 \cos\theta_M > 0$  时,确定不打滑的条件:

$$-\frac{f_s \cos\theta_M - \sin\theta_M}{\cos\theta_M + f_s \cos\theta_M} \leq \frac{F_1}{N_1} \leq -\frac{f_s \cos\theta_M + \sin\theta_M}{f_s \sin\theta_M - \cos\theta_M} \quad (8)$$

当  $\theta_s \leq \theta_M \leq 90^\circ$  时,棱刺打滑现象可能发生,此时切向力和法向力满足下式:

$$-f_s \leq \frac{F_{11}}{N_{11}} = -\frac{N_1 \cos\theta_s - F_1 \cos\theta_s}{N_1 \cos\theta_s + F_1 \cos\theta_s} \leq f_s \quad (9)$$

这里  $N_1 > 0, N_{11} = F_1 \sin\theta_s + N_1 \cos\theta_s > 0$ ,利用式

$$-\frac{f_s \cos\theta_s - \sin\theta_s}{\cos\theta_s + f_s \cos\theta_s} \leq \frac{F_1}{N_1} \leq -\frac{f_s \cos\theta_s + \sin\theta_s}{f_s \sin\theta_s - \cos\theta_s} \quad (10)$$

可得到不打滑的条件。

当  $\theta_L \leq \theta_M \leq 90^\circ - \theta_L$  时,履带打滑的现象发生,可以得到不打滑的条件满足下式:

$$-f_s \leq \frac{F_1}{N_1} \leq f_s \quad (11)$$

这里  $N_1 > 0$ 。

## 2 机器人自主攀爬楼梯系统的设计和实现

### 2.1 机器人控制系统硬件设计

机器人攀爬楼梯的运动控制采用遥操作控制模式还是采用自主运动控制模式,由操作人员确定。本文的研究重点为采用自主运动控制模式。当机器人采用遥操作控制模式进行运动控制时,机器人自主运动系统处于休眠状态;当机器人确定为采用自主运动模式进行攀爬楼梯运动时,自主运动控制与决策系统主控单元通过无线通信模块获取自主运动控制模式控制指令,自主运动系统被激发,处于激发状态。

可变形搜救机器人自主运动系统由感知系统和控制与决策系统两大部分组成,如系统控制设计图(图5)所示。

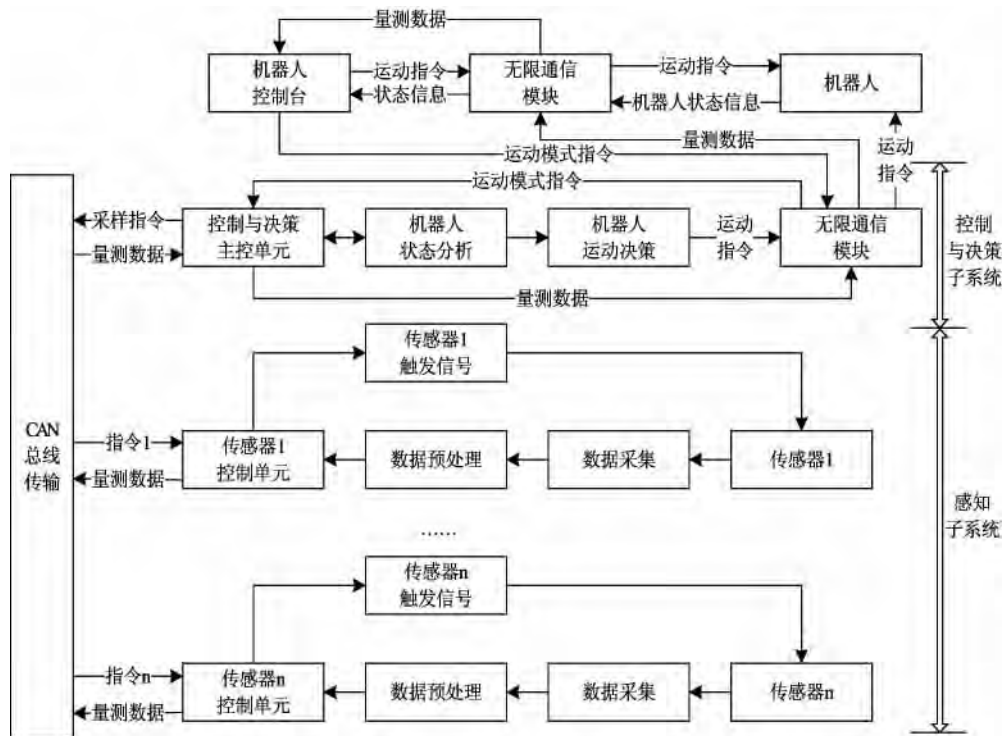


图5 系统控制设计图

图5中“传感器n”中的n代表2~8,其中,传感器1、传感器2、传感器3、传感器4、传感器5和传感器6分别为超声波传感器A、超声波传感器O、超声波传感器C、超声波传感器D、超声波传感器E和超声波传感器F,传感器7为三维电子罗盘传感器,传感器8为倾角传感器。

当自主运动系统处于激发状态时,控制与决策主控单元通过CAN总线向各传感器控制单元发送数据采集指令,传感器控制单元对CAN总线所传输数据进行解析。当传感器控制单元被控制与决策主控单元通过CAN总线发送的采样指令激发后,传感器控制单元向传感器发送触发信号,触发传感器进行数据采集,传感器控制单元将传感器采集的原始数据进行数据预处理,并将预处理后的传感器量测数据通过预定的通信协议发送到控制与决策主控单元(采用的CAN协议,扩展帧,位速率500kbps)。

可变形机器人自主运动系统控制与决策主控单元根据感知系统获得的采样数据,对机器人的当前状态进行分析,并根据感知系统的采样数据和机器人的当前状态,通过无线通信模块(通信频率433MHz)向机器人发送控制指令,如图6所示。

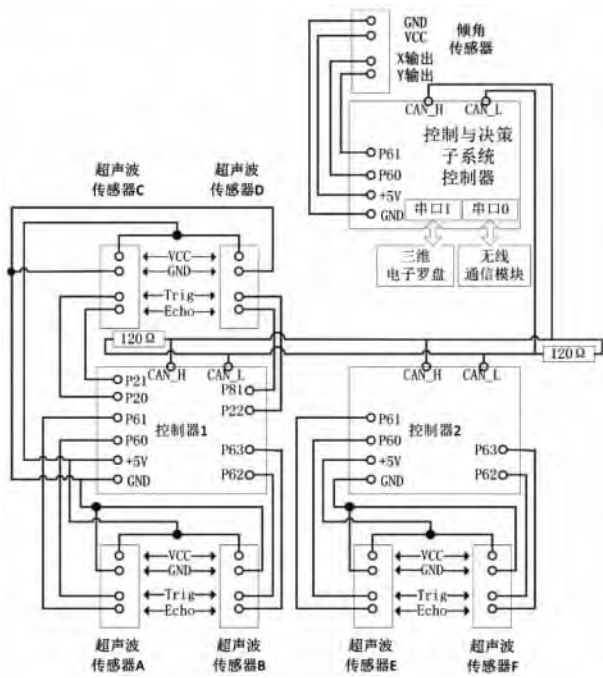


图6 控制系统各模块之间的连接

控制器具有两个串口接口,分别为UART0和UART1,控制与决策主控单元需要UART0和UA-

TR1两个UART接口进行通信。本文分别对两个串口模式寄存器、串口控制寄存器和数据输入输出寄存器进行初始化设置,确定UART的工作时钟、工作模式、通信波特率、数据位等信息。UART的数据传输格式为“9600 n 8 1”,即波特率为9600bps、无偶校验位、8个数据位和1个停止位。

为保持系统的洁净与精简,提高程序的可读性,保持系统便捷地通过UART进行数据传输,本文将UART发送和接收功能代码函数化。UART0和UART1数据发送函数采用查询方式实现,UART1数据接收函数采用中断方式实现。

基于CAN总线设计了控制单元间的通信协议,如表2所示,为控制器网络的通信协议表。采用CAN2.0B版本的CAN总线技术规范,该总线技术规范包含标准帧和扩展帧两种帧模式,此处采用扩

表2 控制器网络通信协议表

项目	设置			
CAN版本	CAN2.0B			
帧模式	扩展帧			
远程帧/数据帧	数据帧			
位速率	500kbps			
验收屏蔽码	AMR0	AMR1	AMR2	AMR3
	0xFE	0x00	0x00	0x00
ID标志符	IDR0	IDR1	IDR2	IDR3
	0x01	0x00	0x00	0x00
ID号设置				
校验和	无			
数据区描述				

表3 ID标识表

代号	名称	ID标识
10	控制与决策主控单元	0x10
11	超声波传感器A	0x11
12	超声波传感器O	0x12
13	超声波传感器C	0x13
14	超声波传感器D	0x14
15	超声波传感器E	0x15
16	超声波传感器F	0x16
1A	倾角传感器	0x1A
1B	三维电子罗盘传感器	0x1B
33	控制模式	0x33

展帧模式,报文采用数据帧,位速率为500kbps。表3所示为CAN总线的ID标识表。本文对系统的所有传感器、控制模式选择单元和控制与决策主控单元赋予独立的ID,通过ID的不同区分不同的单

元。为满足控制器网络通讯数据的完整性和可读性等要求,本文对CAN总线通信的数据区进行了规范,如表4所示。该表为CAN总线数据格式规范表。

表4 数据传输协议表

数据位								功能描述
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	
11	11	00	00	00	00	00	00	触发超声波 A
11	12	00	00	00	00	00	00	触发超声波 B
11	13	00	00	00	00	00	00	触发超声波 C
11	14	00	00	00	00	00	00	触发超声波 D
11	15	00	00	00	00	00	00	触发超声波 E
11	16	00	00	00	00	00	00	触发超声波 F
11	1A	00	00	00	00	00	00	触发倾角传感器
11	1B	00	00	00	00	00	00	触发三维电子罗盘
22	11	00	00	00	00/01	0x**	0x**	超声波 A 返回数据
22	12	00	00	00	00/01	0x**	0x**	超声波 B 返回数据
22	13	00	00	00	00/01	0x**	0x**	超声波 C 返回数据
22	14	00	00	00	00/01	0x**	0x**	超声波 D 返回数据
22	15	00	00	00	00/01	0x**	0x**	超声波 E 返回数据
22	16	00	00	00	00/01	0x**	0x**	超声波 F 返回数据
22	1A	00/01	0x**	0x**	00/01	0x**	0x**	倾角返回数据
22	1B	00	00	00	00/01	0x**	0x**	电子罗盘返回数据
33	33	00	00	00	00	00	00	遥操作模式
33	33	00	00	00	00	00	00	自主攀爬楼梯
33	33	00	00	00	00	00	00	楼道自主漫游

## 2.2 机器人控制系统软件设计

整个控制系统的软件流程如图7所示,各模块的主要功能如下:

(1) 传感器预处理模块:统一各传感器量测数据格式和传感器量测数据数据滤波。由于采用多种不同类型传感器量测的数据具有不同的数据格式和物理意义,根据上文的数字滤波算法进行传感器原始数据的数字滤波。

(2) 机器人状态分析模块:机器人在运动过程中的状态分析。机器人的状态通过相应的状态标志位进行表示和区分。基于感知系统通过各传感器获得的距离、倾斜角度、航向等量测数据,状态分析模块分析机器人当前运动状态的所属环节、是否满足位姿调整条件,并根据状态分析结果置位相应的状

态标志位。该过程为基于数据的定量分析。

(3) 机器人运动决策模块:进行机器人运动决策并向机器人发送运动控制指令。针对机器人状态分析模块的定性分析结果,结合基于机器人运动学分析的预定运动目标和传感器量测数据,对机器人的下一步运动动作进行决策。决策结果以运动控制指令的形式通过无线通信模块向机器人进行发送。

## 3 实验验证与分析

可变形机器人 AMOEBA-I 的主要参数如下:

$l$  —— 单个模块的长度为 42cm;

$w$  —— 单个模块的宽度为 12cm;

$k$  —— 连接杆的长度,为 22cm;

$\Delta m = 5.7\text{kg}$ ,  $m = 5\text{kg}$ 。

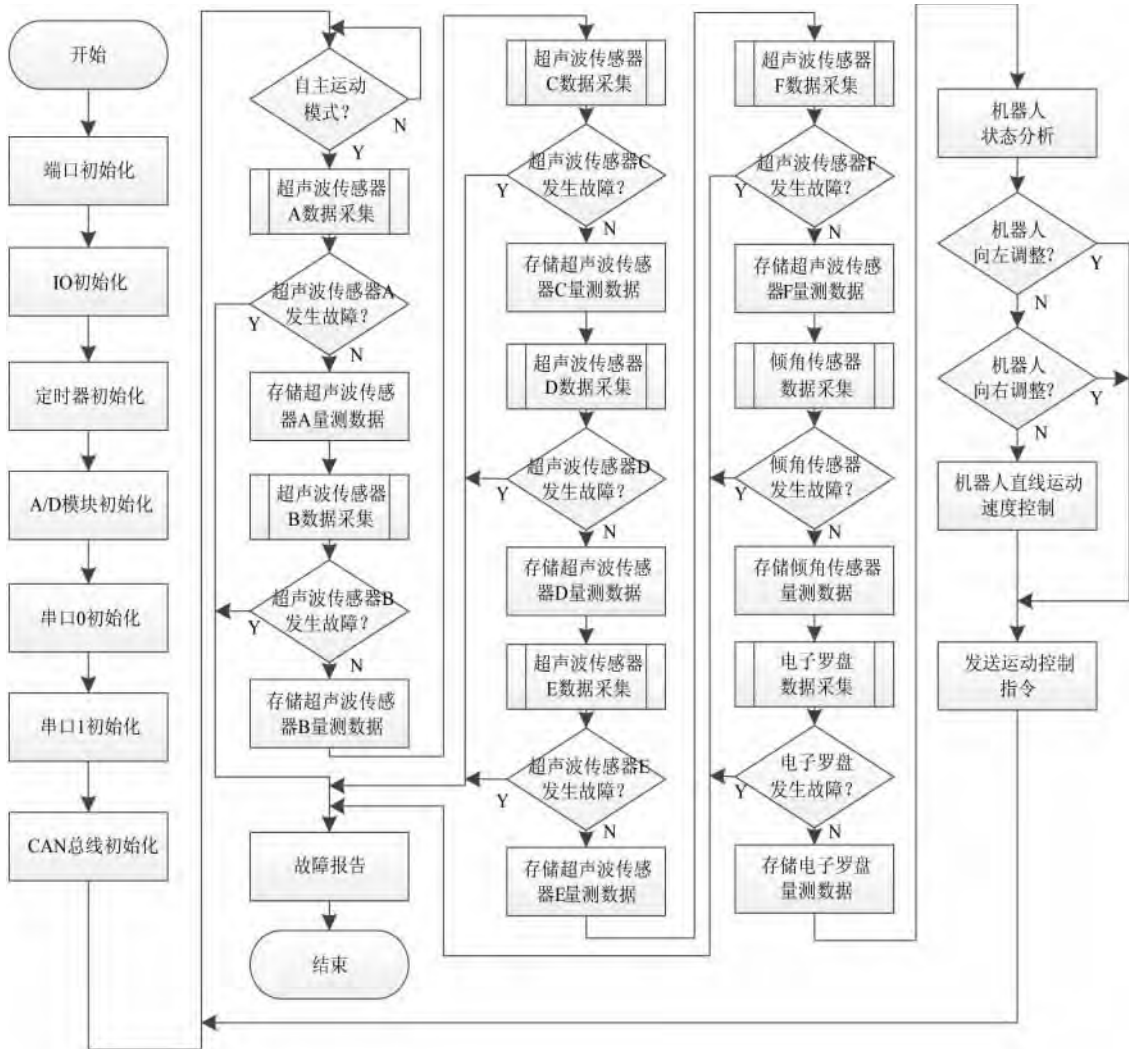


图 7 系统软件流程图

对于固定在机器人上的传感器包括 6 个超声波传感器( HC-SR04 )、一个 3D 罗盘( SEC345 )、一个激光传感器( URG-04LX )，具体参数如表 5 所示。

表 5 机器人本体所携带传感器参数

	URG-04LX	HC-SR04	SEC345
范围	20 ~ 4000mm	4 ~ 400mm	- 40° ~ + 40°
精确度	测试距离 1%	0.5mm	1°

图 8 所示为超声波传感器在楼宇废墟环境下对楼梯踏步进行距离检测所获得的采样数据和经过数字滤波后得到的数据，滤波算法采用的是限幅滤波算法。

其中阈值  $M$  的确定必须充分考虑可变形废墟搜救机器人利用超声波传感器在实际环境下的采样

数据特点确定。

由于废墟环境下，可变形废墟搜救机器人附近 80cm 范围内的物体对机器人运动产生的影响较大，

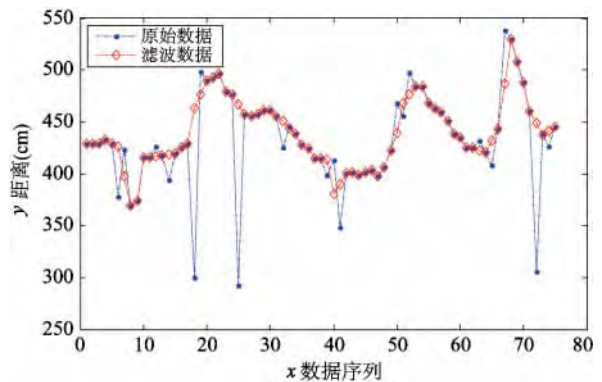


图 8 超声波传感器的原始数据和滤波后得到的数据

超声波传感器在 80cm 范围内的量测误差绝对值不超过 3.1cm; 同时, 机器人在运动过程中, 采集所处环境距离数据时, 相邻两次所采集的距离数据数值之差的绝对值小于 5cm。综合上述分析, 阈值参数  $M$  应同时满足  $M \geq 3.1$  和  $M \geq 5$  两个条件的同时, 取最小值。因此,  $A$  的值最终确定为 5cm。

携带多种传感器的可变形机器人如图 9 所示。

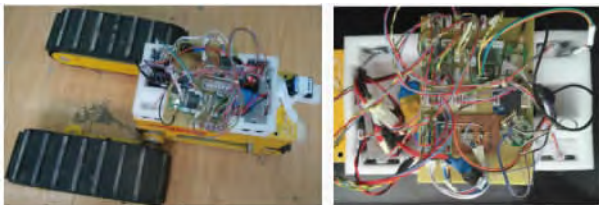


图 9 携带多种传感器的可变形机器人

可变形机器人攀爬楼梯的过程如图 10、图 11 所示。为了验证方法的通用性, 选取三种楼梯环境如图 12 所示, 包括: 一侧是墙的楼梯, 两侧都是墙的楼梯, 两侧都是扶手的楼梯。



图 10 机器人自主攀爬一侧有墙的楼梯

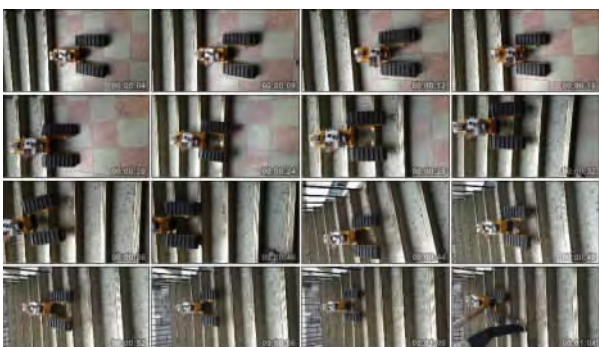
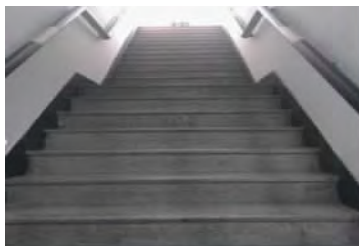


图 11 机器人自主攀爬两侧都是扶手的楼梯



(a) 一侧是墙的楼梯 (b) 两侧都是扶手的楼梯



(c) 两侧都是墙的楼梯

图 12 三种典型的楼梯环境

首先, 利用固定在机器人本体前方的传感器返回的阈值  $M$ , 判断是否到达楼梯, 如果机器人检测到楼梯信息, 立刻进行抬头和接近楼梯的动作。俯仰关节的角度设置为  $12^\circ$  (针对的符合国标的楼梯),  $\varphi_p = \varphi_1 + \varphi_0$ 。当机器人开始进行首阶翻越时, 由罗盘测得  $\varphi_p$ ,  $\varphi_p = \varphi_1 - \varphi_0$ , 将迅速变化。

为了验证方法的鲁棒性, 在每种楼梯环境下进行 30 次实验, 结果如表 6 所示。可以看出机器人攀爬两侧都是墙的楼梯能够保证较好的安全性及行驶效率, 对于两侧都是扶手的环境, 机器人行驶在安全区域的次数大大降低, 这主要与传感器的观测能力密切相关。

表 6 机器人行驶在不同的楼梯环境的表现

	危险区域	次危险区域	安全区域
两侧都是墙	7% (2 次)	17% (5 次)	76% (23 次)
一侧扶手	13% (4 次)	23% (7 次)	64% (19 次)
两侧都是扶手	30% (9 次)	43% (10 次)	37% (7 次)

图 13 机器人自主控制软件控制界面图。右上角的自主运动包括机器人自主攀爬楼梯、自主越障及 SLAM 等, 通过此控制软件, 操作者可以更加方便地操控机器人, 当接近楼梯的时候, 只需要点击自主攀爬楼梯按钮, 机器人即可完成相应运动。



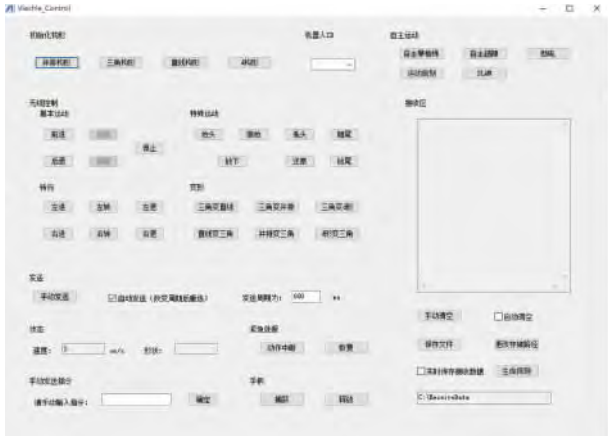


图 13 机器人自主控制软件控制界面

## 4 结论

本文提出了一种机器人自主攀爬楼梯的控制方法,可以有效减轻搜救人员在狭小环境下操控机器人的负担。机器人具有一定的自主能力,可以在通信中断时自主地攀爬楼梯,跳出通信盲区,继续完成任务。为了验证结果的有效性及鲁棒性,选取了多种不同类型的楼梯,同时进行了数十次的实验。

通过实验发现,机器人自主攀爬楼梯的成功率与楼梯环境关系较大,当处于两侧都是扶手的楼梯时,机器人自主爬行的成功率较低,在两侧都是墙的条件下,机器人能够有效地自主攀爬楼梯。本研究中的楼梯都是符合国标标准的楼梯,对于灾难废墟环境而言,楼梯可能变形、断裂及倾斜等,这就需要机器人具有更好的适应性,未来的工作将围绕这部分展开。

### 参考文献

- [ 1 ] Ben-tzvi P , Ito S , Andrew A G . Autonomous Stair Climbing with Reconfigurable Tracked Mobile Robot. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments , Ottawa , Canada , 2007 . 104-109
- [ 2 ] Vu Q , Kim B , Song J . Autonomous stair climbing algorithm for a small four-tracked robot. In: Proceedings of the International Conference on Control , Automation and Systems , Seoul , Korea , 2008 . 2356-2360

- [ 3 ] 李楠,王明辉,马书根等. 基于联合运动规划的可变形履带机器人在线翻越楼梯控制方法. 机械工程学报, 2012, 48(1): 47-56
- [ 4 ] 李楠,王明辉,马书根等. 基于多目标遗传算法的水陆两栖可变形机器人结构参数设计方法. 机械工程学报, 2012, 48(17): 10-20
- [ 5 ] 王明辉,马书根,李斌等. 异构模块型可变形机器人狭窄空间转向性能研究. 机器人, 2015, 37(2): 161-167
- [ 6 ] 饶伟,施家栋,王建中. 关节式履带机器人爬楼梯动态稳定性分析. 机械工程学报, 2014, 50(15): 60-67
- [ 7 ] 胡庆龙. 关节履带式移动机器人控制系统设计及爬楼梯分析 [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机械电子, 2010. 17-63
- [ 8 ] Liu J G , Wang Y C , Ma S G , et al . Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety , Security and Rescue Robotics , Kobe , Japan , 2005 . 53-58
- [ 9 ] Li B , Ma S G , Liu J G , et al . AMOEBa-I: a shape-shifting modular robot for urban search and rescue. *Advanced Robotics* , 2009 , 23(9) : 1057-1083
- [10] Liu J G , Wang Y C , Ma S G , et al . Configuration and locomotion research for a link-type reconfigurable robot. In: Proceedings of the Asia Pacific Conference on Circuits and Systems , MaCao , China , 2009 . 737-740
- [11] Chang J , Li B , Wang C , et al . The turning control research of the shape-shifting robot in different configurations. In: Proceedings of the 11th World Congress on International Control and Automation ( WCICA ) , Shenyang , China , 2014 . 4055-4060
- [12] Chang J , Li B , Wang C , et al . The research of shape-shifting robot turning manners in line configuration with turning-configuration algorithm. In: Proceedings of the 11th World Congress on International Control and Automation ( WCICA ) , Shenyang , China , 2014 . 519-524
- [13] 常健,吴成东,李斌. 可变形机器人直线构型滑移转向方法. 机械工程学报, 2012, 48(7): 9-15
- [14] Liu Y G , Liu G J . Track-Stair Interaction Analysis and Online Tip-over Prediction for a Self-Reconfigurable Tracked Mobile Robot Climbing Stairs. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics* , 2009 , 14(5) : 528-538

## Research on the autonomous stair climbing control of shape-shifting robots

Chang Jian<sup>\*</sup>, Wang Yazhen<sup>\*\*</sup>, Li Bin<sup>\*</sup>

(<sup>\*</sup> Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences,  
State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016)

(<sup>\*\*</sup> Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310015)

### Abstract

A robot system capable of autonomous stair climbing was designed and implemented, and a method for autonomous stair climbing control of shape-shifting robots in complex environments was studied. Through the analysis of the contact modes between stairs and robot tracks, including tread slipping, edge slipping and track slipping, the non-slipping conditions meeting the robot during the tread overcoming process were determined to improve the efficiency of climbing stairs for the robot. Through filtering of the sensor's perception information, the robot's awareness was enhanced. Then the first and last stairs were determined and the control strategy was established effectively. By the modeling analysis of the whole control system, the software flow diagram was established. The experiments were done on several typical kinds of stairs to test the robustness and validity of the design, and the results were satisfactory.

**Key words:** shape-shifting robot, climbing stairs, autonomous control, track contact