

基于模糊推理的复杂地形下六足机器人 步态辅助决策方法

尤 波¹, 王明磊¹, 许家忠¹, 李佳钰¹, 丁 亮², 高海波²

(1. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 目前载人六足机器人驾驶员在复杂地形下步态决策完全依赖主观经验, 为提高驾驶员决策质量, 提出一种步态辅助决策方法。建立驾驶员信息处理模型, 将地形环境作为决策因素, 步态及优先级作为决策结果, 利用模糊推理系统进行辅助决策; 将坡度、起伏度、粗糙度及障碍高度明确为地形特征量, 划分其隶属度并制定模糊规则库; 利用半物理仿真操纵平台对比驾驶员在无辅助和有辅助时的决策结果。实验结果表明, 辅助决策方法能够辅助驾驶员在地形变化时做出合理决策, 提高六足机器人在复杂地形下的稳定性与操纵性。

关键词: 六足机器人; 辅助决策; 驾驶员模型; 地形评估; 模糊推理

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.01.015

中图分类号: TP242 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2020)01-0100-08

Assistant Decision-making Method for Gaits of Hexapods Robot Based on Fuzzy Reasoning in Complex Terrain

YOU Bo¹, WANG Ming-lei¹, XU Jia-zhong¹, LI Jia-yu¹, DING Liang², GAO Hai-bo²

(1. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The drivers of manned hexapod robots rely on subjective experience in decision-making in complex terrain. In order to improve the quality of drivers' decision-making, an auxiliary decision-making method is proposed. The information processing model of drivers is established, and the terrain is used as the decision factor while the priorities of gaits as the result. The fuzzy decision-making system is established to assist the drivers. The slope, fluctuation, roughness and barrier height are defined as the terrain features, degrees of membership are classified and the fuzzy rules are formulated. The semi-physical simulation platform of the hexapod manipulation is used to compare the decision results of the drivers with auxiliary and without auxiliary. The experimental results show that the auxiliary decision method can assist the driver to make reasonable decisions when the terrain changes, and increase stability and maneuverability of the hexapod robot in complex terrain.

Keywords: hexapod robots; assistant decision-making; driver model; terrain assessment; fuzzy reasoning

收稿日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51575120, 51275106); 国家 973 计划(2013CB035502).

作者简介: 尤 波(1962—), 男, 教授, 博士研究生导师;

王明磊(1992—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 丁 亮(1980—), 男, 教授, 博士研究生导师, E-mail: liangding@hit.edu.cn.

0 引 言

足式机器人是近代仿生设计的典型应用,运动方式上具有非连续支撑的特点,因此对地形的鲁棒性好,可适应更多的地形。六足机器人在运动过程中由于支撑足数量较多可以保持良好的稳定性,同时在运动控制方面也具有较多的研究成果^[1-2]。因此六足机器人在工程应用领域受到更多的重视。

目前,在六足机器人操纵系统的决策方面已经取得了许多成果,主要体现在自主步态生成与足端轨迹规划方面。赵小川等^[3]基于 Webots 仿真软件对六足机器人步态进行规划;Aparna 等^[4]生成六足机器人的三种规则波动步态,通过遥控操作机器人完成任务;Belter 等^[5]通过机器人仿真模型对步态进行迭代优化,实现六足机器人在平坦地形上的快速运动。然而这些方法面对的地形环境为实验室环境或平坦路面,不适合障碍较多的情况;陈伟海等^[6]利用中枢神经模式发生器(CPG)结合神经网络实现六足机器人的平面越障;Socha 等^[7]利用强化学习算法能够模仿生物体决策的特点,在多障碍地形下取得了较好运动效果,并有效减少自由步态时六足机器人运动的步数。但是这些方法都是针对平面障碍,并不能满足三维崎岖地形下的运动。Hauser 等^[8]对地形复杂性进行研究,通过组合地形图像来规划三维空间内移动机器人的足端轨迹;Belter 等^[9]通过快速搜索随机树对机器人进行路径规划,实现小型六足机器人在崎岖地形下的自主运动。以上对机器人的决策控制基本都是针对小型六足机器人,而载人六足机器人由于机械结构与任务地形更加复杂,目前的技术仍无法实现自主决策,需要完全由驾驶员进行实时决策。

载人六足机器人操纵系统具有多种模式和步态^[10]来适应多种地形,包括自动模式下的二、三、六步态,手动模式下的手动步态。驾驶员感知地面环境并根据经验在多种功能模式中决策出合理的步态。决策结果受经验、情绪、注意力等主观因素影响,不能保证决策质量。因此需要研究一种步态辅助决策方法,辅助驾驶员进行步态决策。

本文首先在车辆驾驶员模型的基础上,结合六足机器人结构和运动方式,建立六足机器人驾驶员决策模型,确定采用模糊推理方法进行辅助决策,将地形信息作为决策因素;对复杂地形进行分类,提取坡度、起伏度、粗糙度和障碍高度作为地形描述特征,并对其进行计算;利用六足机器人半物理仿真操

纵平台^[11]采集的实验数据及专家经验制定模糊决策规则库。通过半物理仿真实验验证了步态辅助决策方法的有效性。

1 辅助决策方法

载人六足机器人的驾驶员模型对于分析驾驶员决策行为与控制决策风险具有重要意义。载人足式机器人运行过程中需要人-机-路作为一个整体进行考虑,才能更准确的对驾驶员的信息处理过程进行描述。本文结合六足机器人运动特点建立了基于信息处理的驾驶员模型,如图 1 所示。

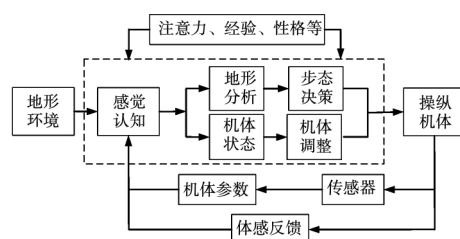


图 1 驾驶员信息处理模型

Fig. 1 The information processing model of driver

驾驶员在行驶过程中接收机体内部与外部环境多方面的信息。对地形信息进行感觉认知,将复杂地形根据驾驶经验提取出不同地形特征并进行估算,与步态相关知识进行匹配,决策出当前地形下步态;机体运动状态通过各种传感器检测机体参数,并通过界面返回给驾驶员,驾驶员结合体感反馈信息分析机体综合状态从而实现机体控制。将步态决策与运动控制结合,利用控制面板、操纵杆等操纵终端共同完成驾驶任务。行驶过程中驾驶员对六足机器人的决策与控制能力受到注意力、经验、性格等主观因素的影响。

通过对驾驶员信息处理模型的分析可知,步态决策主要由六足机器人外部地形环境决定。由于地形特征与步态可行性都具有很大的模糊性,运用模糊推理进行决策是一种有效的方法。模糊推理实际是利用严格的数学方法模仿人类专家求解专业领域问题,只要规则库足够完善,利用模糊推理可以描述任意非线性函数。因此本文以地形为决策属性,研究一种基于模糊推理系统的六足机器人决策辅助方法,整体流程如图 2 所示。

辅助决策方法的核心为模糊推理系统,由数据库、规则库和推理机 3 个部分组成。首先传感器采集六足机器人外部地形环境,提取坡度、起伏度等地形特征信息作为决策属性,模糊化后存入数据库;基

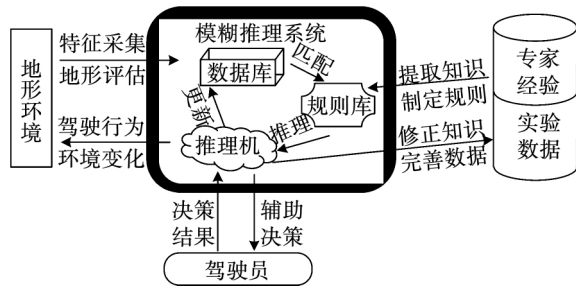


图2 辅助决策方法流程图

Fig. 2 Flow char of assistant decision-making method

于实验数据与专家经验建立模糊规则库,将数据库中信息与规则库中相关规则进行匹配;最终利用模糊推理得到当前地形下各步态优先级供驾驶员辅助决策。驾驶员结合自身知识和辅助做出当前环境下最终步态决策,并操纵六足机器人运动。

六足机器人的行驶状态改变后,将其实验数据反馈至模糊推理系统,由专家进行分析后进一步校正和完善现有规则库,提高辅助决策方法的准确性。

2 步态决策模糊推理系统

2.1 复杂地形评估

载人六足机器人行驶的地形具有非结构化的特点,但复杂地形都能由少数几种基本地形特征评估,因此针对六足机器人在复杂地面下的运动特点,提取坡度、起伏度、粗糙度与障碍高度四种基本地形特征量来对地形进行评估。

坡度属于地形坡面信息,对六足机器人的整体稳定性产生较大影响。根据稳定锥稳定性分析方法^[3]得出,机器人在爬坡过程中由于机体俯仰和侧倾导致重心容易超出稳定多边形范围,造成运动失控甚至机体倾覆等后果。

起伏度用来宏观衡量地面的波动程度,对机器人的机体位姿与单腿运动产生影响。当地形起伏剧烈时,机体位姿发生突变,驾驶舱产生颠簸,影响机器人稳定性甚至驾驶员安全。

粗糙度用来衡量地面的障碍分布和粗糙程度,对机体的落足点产生约束。如当粗糙度较大、障碍较多时,不宜选取二步态等多足行进步态,应选取六步态或手动步态等单足行进步态。

越障能力是六足机器人最重要的性能指标之一。在面对垂直障碍时,驾驶员需要确定障碍的高度信息,并结合机器人的最大障碍翻越能力、静态稳定性、越障时重心变化等因素做出越障或避障的决策。

对采集的地形信息采用规则栅格组成的数字高程模型 DEM 进行表示,每个栅格存储了该区域的平均高程。驾驶员预瞄区域内地形特征量均可由局部 3×3 的 DEM 栅格进行计算后平均得到。DEM 地形信息如图 3 所示, e_i 为当前坡度平面中 i 点的坡面高程, $Y(f)$ 表示机体前进方向, $X(l)$ 表示机体侧面方向。

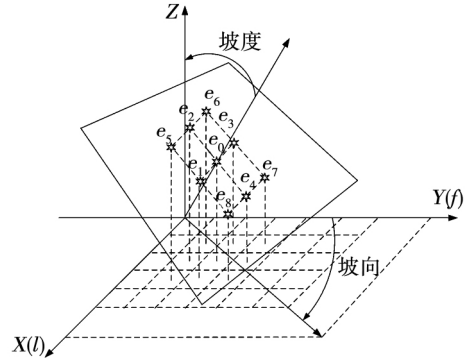


图3 DEM地形信息示意图

Fig. 3 DEM terrain information diagram

地表某点的坡度 S 是地形曲面 $z = f(x, y)$ 在该点邻域内高程变化率的函数, 计算方式如式(3)所示:

$$S_f = \frac{(e_7 + 2e_4 + e_8) - (e_2 + 2e_5 + e_6)}{8 \times L} \quad (1)$$

$$S_l = \frac{(e_8 + 2e_1 + e_5) - (e_7 + 2e_3 + e_6)}{8 \times L} \quad (2)$$

$$S = \frac{S_f}{|S_f|} \arctan \sqrt{S_f^2 + S_l^2} \quad (3)$$

式中: S_f, S_l 分别为行进方向正向及侧向的高程变化率; L 为栅格边长; $S_f/|S_f|$ 的正负表示上坡与下坡。

起伏度 F 传统上由邻域内最大和最小高程值之差得到,但仅仅选取两点难以反映整体起伏情况。而高程标准差法计算邻域内所有点的高程值的标准差,因此更能综合反映出地形的局部起伏变化。起伏度的计算如式(5)所示:

$$\bar{e} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 e_i \quad (4)$$

$$F = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (e_i - \bar{e})^2} \quad (5)$$

其中 $\bar{e}$ 为当前邻域的平均高程值。

粗糙度 R 为地面单元的曲面面积与其在坡面投影面积之比。当分析窗口为 3×3 时,采用式(6)进行近似计算。

$$R = \frac{1}{\cos(\arcsin(S - \bar{S}))} \quad (6)$$

式中 $\bar{S}$ 为预瞄区域平均坡度。

垂直障碍高度 H 为地面某点邻域范围内的最大高程与平均高程的差值, 计算方式如式(7)所示。

$$H = e_{\max} - \bar{e} \quad (7)$$

2.2 模糊决策系统实现

模糊推理决策系统选择梯形函数为模糊化的隶属度函数。对比常见的三角形函数、S 型函数、 π 型函数, 梯形函数具有信息量大、表示直观、推理速度快等优点。

模糊推理机采用零阶 Takagi - Sugeno (T-S) 模糊推理法。T-S 模糊推理得到的结果是精确的, 所以不需要进行耗时的去模糊化运算^[12], 适合需要实时决策的任务环境。

模糊规则的结构如下:

If x_1 is $\tilde{A}_1$ and x_2 is $\tilde{A}_2 \cdots$ and x_n is $\tilde{A}_n$, then $z = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$

其中: $x_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 为输入量, n 为单条规则的前件数量; $\tilde{A}_i$ 是输入变量的规则模糊子集; z 是输出结果, $f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为输出变量的归属函数, 是关于输入变量 x_i 的任意函数。当 f 是常数时, 所得到的模糊推理系统为零阶 T-S 模糊模型。

规则关系生成算法采用 $\min$ 运算, 即:

$$\omega_{A_i} = \bigvee_{x_i \in X} [\mu_{\tilde{A}_i^*}(x_i) \wedge \mu_{\tilde{A}_i}(x_i)] \quad (8)$$

$$\omega_j = \omega_{A_1} \wedge \omega_{A_2} \cdots \wedge \omega_{A_n} \quad (9)$$

其中 ω_{A_i} 为单规则单前件的适配度, $\tilde{A}_i^*$ 为输入量的事实模糊子集; $\omega_j (j=1, 2, \cdots, N)$, 为单规则多前件的激励强度, 表示此规则整体被满足的程度, N 为规则数目。

规则推理合成算法采用加权平均法, 得到输出结果为

$$z = \frac{\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2 + \cdots + \omega_N z_N}{\omega_1 + \omega_2 + \cdots + \omega_N} \quad (10)$$

模糊推理系统的输入变量为坡度 (S)、起伏度 (F)、粗糙度 (R) 和障碍高度 (H), 输出变量为步态的优先级 (Z)。 S 的基本论域为 $-35 \sim 35^\circ$, 划分为 NL (负大)、NM (负中)、S (小)、PM (正中)、PL (正大) 5 个模糊子集。 A 论域为 $0 \sim 90^\circ$, F 论域为 $0 \sim 0.6 \text{ m}$, R 论域为 $1 \sim 2$, H 论域为 $0 \sim 1 \text{ m}$, 均划分为 3 个模糊子集为 S (小)、M (中)、L (大)。输出变量 Z 的论域为 $0 \sim 100$, 划分为 3 个模糊子集为 S (低)、M (中)、L (高), 由于采用 T-S 模糊推理法, 因此对输出步态优先级进行预先去模糊化处理, 对模糊区间 S、M 和 L 内的变量, 其常值归属函数 f 分别为

30、60 和 90。输入输出变量的其隶属度图像如图 4 所示。

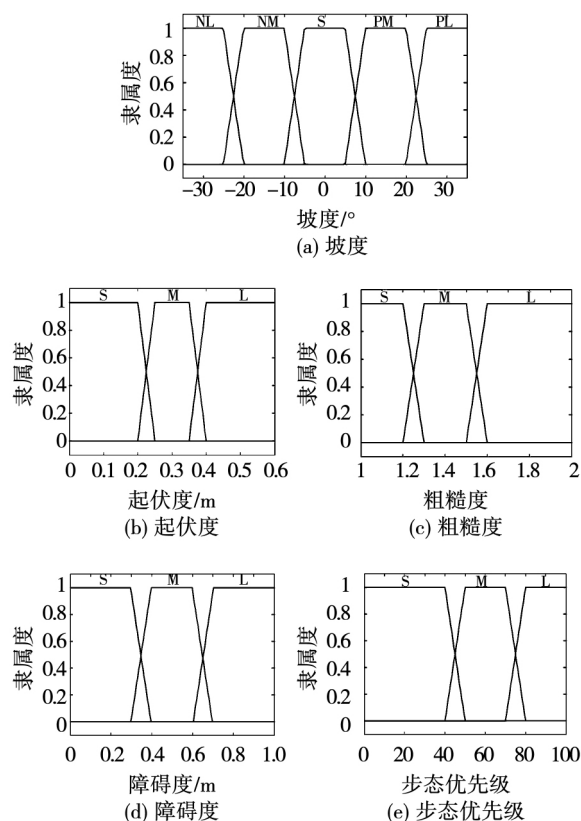


图 4 决策属性隶属度图

Fig. 4 Membership function for decision attribute

六足机器人各步态的地形适应性、稳定性和操纵性都有所区别, 结合实验数据与专家经验, 总结出不同地形特征下各步态的优先级, 提取推理规则并建立模糊推理规则库。由于篇幅所限, 仅列出二步态相关规则, 如表 1 所示。

表 1 二步态相关规则

Tab. 1 The rules about two-gait

NO	S	F	R	H	Z
1	S	S	S	S	L
2	S	S	M	S	M
3	-	-	L	-	S
4	S	M	S	-	M
5	S	M	M	S	S
6	-	L	-	-	S
7	S	S	S	M	S
8	S	-	M/L	S	S
9	S	M/L	-	L	S
10	PM	S	S	S	L

续表 1

NO	S	F	R	H	Z
11	PM	S	M	S	M
12	PM	M	S	S	M
13	PM	M	M	L	S
14	PM	S	S	S	M
15	PM	M	-	L	S
16	PM	-	M	-	S
17	PL	-	-	M	S

由于本文模糊隶属度函数的划分、规则的制定是基于已有实验数据与专家经验,因此可随着知识和经验的积累不断对隶属度函数与规则进行检验、修改和完善,使决策结果更为准确合理。

3 实验验证

3.1 半物理仿真实验流程

本文通过六足机器人半物理仿真操纵平台对辅助决策方法进行验证,如图5所示。以欧空局开发的实时仿真框架 Eurosim 和加拿大 CMLabs 公司的动力学仿真软件 Vortex 为仿真环境搭建虚拟六足机器人,保证实时性与真实性;地形环境为 Vortex 导入 DEM 文件得到的数据模型,如图6所示;硬件操纵系统由驾驶舱、方向盘、操纵杆等硬件组成,满足六足机器人在复杂地形下多步态的操纵需求。



图5 半物理仿真操纵平台

Fig. 5 Semi-physical simulation platform of manipulation

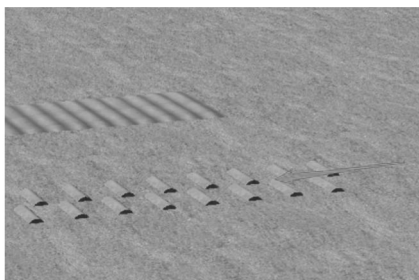


图6 仿真地形环境

Fig. 6 Simulation of terrain environment

半物理仿真过程由几个主要部分组成: 仿真计算机、辅助决策系统、实物驾驶舱、驾驶员。仿真流程如图7所示。仿真流程以驾驶员为核心,按信息流分为3部分,分别为驾驶员地形感知部分、辅助决策结果感知部分和操纵系统信息感知部分。下面以信息流为线索,介绍整个半物理仿真流程。

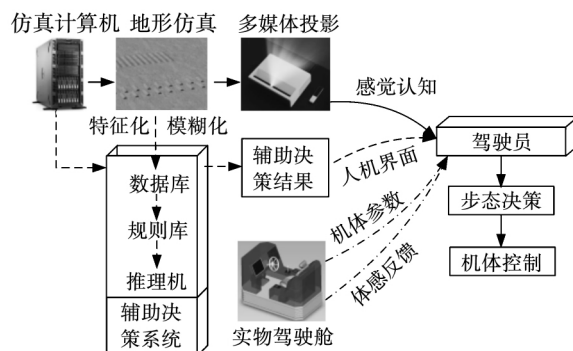


图7 半实物仿真流程图

Fig. 7 Flow chart of semi-physical simulation

地形感知部分首先由仿真计算机提供仿真实验需要的视景仿真地形,然后通过与仿真计算机连接的多媒体投影设备进行投影,更立体的展示六足机器人行进的地形,使驾驶员在驾驶舱中更具有沉浸感。最后驾驶员将视觉感觉到的地形环境信息存入工作记忆区,为决策进行进一步的认知处理。

辅助决策结果感知部分的核心为辅助决策系统。首先仿真计算机提取 DEM 高程信息,根据 2.1 节所示将地形数字信息特征化,即计算为坡度、起伏度等特征量,并根据 2.2 节所示隶属度函数进行特征量的模糊化,存入数据库。然后根据零阶 T-S 模糊推理方法,对比数据库中特征量与存储的决策规则,按 $\min$ 运算法则进行规则匹配并根据加权平均法进行规则合并,最终得到各步态的决策优先级,通过人机界面将最优先的步态决策结果展现给驾驶员,供驾驶员进行思考决策。

操纵系统信息感知部分首先由操纵驾驶舱中的操纵计算机获得仿真计算机中的机器人的机体参数,如当前运行步态、步幅、转角等信息,同时根据驾驶舱内部的力反馈系统模拟机器人的侧倾、颠簸等受力状态,将体感信息反馈给驾驶员,增强操纵真实性。

信息流交汇到驾驶员的工作记忆区进行综合处理,得到最终的步态决策结果并进行机体控制。

3.2 辅助决策系统验证

六足机器人行驶的地形环境为光滑硬质平坦路

面与不同其他地形的组合,这里采用坡面地形、垂直障碍地形和崎岖地形作为仿真实验地形环境,地形数据如表 2 所示。

表 2 仿真地形数据
Tab. 2 Simulation terrain data

地形特性	平坦地形	崎岖地形	坡面	障碍
坡度/($^{\circ}$)	0	0	15	0
起伏度/m	0	0.22	0.14	0.15
粗糙度	1	1.5	1	1
障碍高度/m	0	0.3	0	0.6

由于六足机器人运动速度较慢,因此前进和转向方向上的加速度较小,在复杂地形环境中,由足和地面接触冲击引起的机身法向震颤对机体稳定性产生最大影响。因此实验采集六足机器人驾驶舱在运行过程中的法向位置数据,反映当前机体与驾驶舱稳定性。

1) 坡面地形

由表 2 可知,坡面地形环境为坡度为 15° 的光滑斜坡。驾驶员操纵机器人在水平地面上以二步态快速行走,辅助决策系统根据表 1 中规则 1 计算得到二步态运行的优先级为 90,等级为高,与驾驶员选择一致,不进行干预。当六足机器人行进到坡面地形区域时,二步态优先级为 90,等级为高,提示驾驶员继续以二步态继续运行。而驾驶员在没有决策辅助时,由于对坡度的判断不同或对机器人的能力评估不同,为获得更好的稳定性则可能切换为更稳定的三步态行进。机体行驶状态如图 8、图 9 所示。

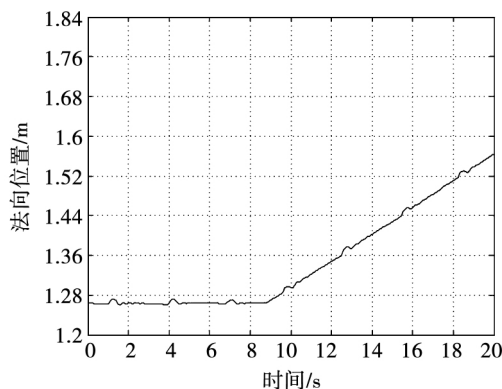


图 8 驾驶员无辅助爬坡状态

Fig. 8 Robot state of climbing slope without driver assistant

由半实物仿真实验结果可知,无辅助决策时,机器人在坡面地形切换为三步态前进。当六足机器人

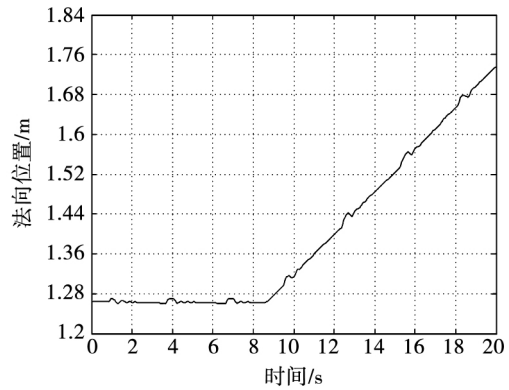


图 9 驾驶员有辅助爬坡状态

Fig. 9 Robot state of climbing slope with driver assistant

从平坦地形过渡到坡面地形时,可以在爬坡过程中较为平稳行进,但是爬坡速度较为一般。当有辅助决策时,驾驶员根据决策结果选择以二步态继续行进,因为当前坡度较小同时坡面障碍起伏较小,以此在爬坡过程中可以保持很好的稳定性。同时由于二步态行进速度比三步态更快,因此满足当前坡面地形下快速平稳通过的需要。

2) 崎岖地形

驾驶员行驶地形如图 6 所示,崎岖地形环境由连续间隔的矮障碍构成。当六足机器人行进到崎岖地形区域时,辅助决策系统根据表 1 中规则 2 与规则 5 计算得到二步态的优先级为 48,等级为中,手动步态优先级为 90,等级为高,提示驾驶员切换为手动步态运行。而驾驶员在没有决策辅助时,由于对障碍大小密度有不同的判断,则可能继续以二步态行进。机体行驶状态如图 10、图 11 所示。

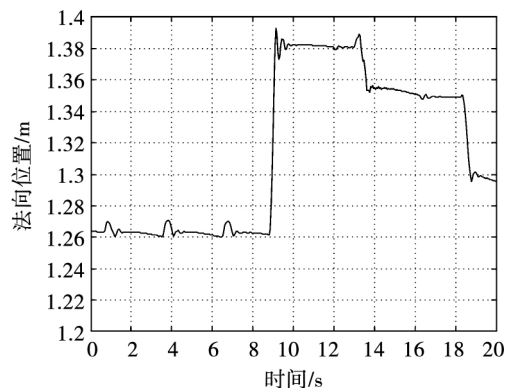


图 10 驾驶员无辅助通过崎岖地形

Fig. 10 Robot state in rough terrain without assistant

由半物理仿真实验结果可知,在连续障碍地形继续以二步态前进时,由于六足机器人以自动步态进行运行,机体落足点选在障碍上,产生强烈的落足

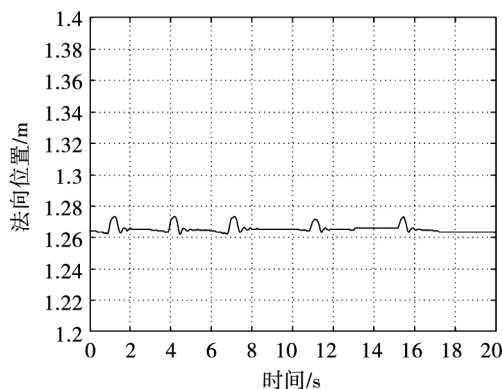


图11 驾驶员有辅助通过崎岖地形

Fig. 11 Robot state in rough terrain with assistant

冲击,机体法向位置变化剧烈,机体与驾驶舱发生明显颠簸,影响行驶稳定与安全。当有辅助时,驾驶员选择手动步态运行,根据实时地形与机体状态手动调整平台位姿与落足点,避免过大的落足冲击,因此机体法向加速度和位置变化较小,机体运行平稳,更适合当前多障碍地形。

3) 垂直障碍地形

驾驶员行驶地形由表2可知,为高为0.6m的垂直障碍地形。驾驶员在平坦地形下以二步态快速前进。当六足机器人行进到垂直障碍区域时,辅助决策系统计算得到手动步态优先级为86,等级为高,提示驾驶员切换为手动步态继续运行。而驾驶员在没有决策辅助时,由于对障碍高度判断不同或对六足机器人行驶能力评估不同,则可能将二步态切换为更为稳定的三步态进行越障。机体行驶状态如图12、图13所示。

由半实物仿真实验结果可知,无辅助决策时,机器人以三步态进行越障。当六足机器人从平坦地形过渡到障碍地形时,因为三步态在同一时刻有两条腿处于摆动相,同时行进速度稍快,在遇到障碍后落足点落在障碍上,机体受足地冲击较大,重心位置发生突变,机体与驾驶舱发生明显颠簸。在随后的两个摆动周期落在障碍上的腿作为支撑足,机身位置相对稳定。当障碍上的支撑足从支撑相转化为摆动相时,由于落足点的高度快速变化,还会产生剧烈的重心变化。因此,当前步态不适合进行越障。

当有辅助决策时,驾驶员根据决策结果选择手动步态进行越障。首先驾驶员判断障碍高度,控制单腿与机身平稳提升至障碍上方,然后进行越障,整个过程中机身重心的变化较为平稳连续,驾驶舱波动较小。单腿越障后,驾驶员控制其他腿继续行进。整个越障过程中足地冲击较小,机器人运行平稳。

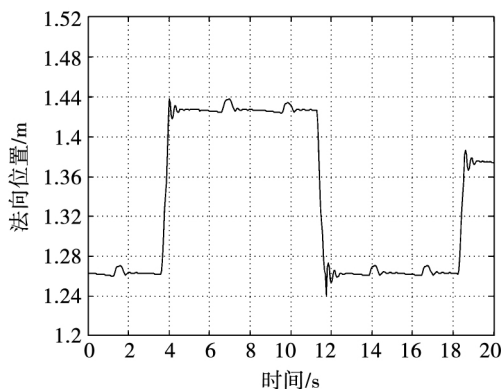


图12 驾驶员无辅助越障状态

Fig. 12 Robot state of crossing a barrier without driver assistant

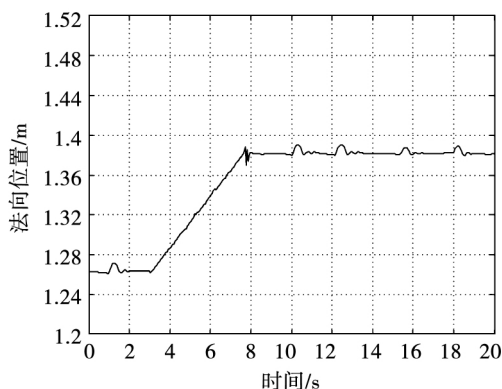


图13 驾驶员有辅助时越障状态

Fig. 13 Robot state of crossing a barrier with driver assistant

实验表明,六足机器人在行驶过程中遇到地形变化时,与驾驶员做出的步态决策对比,本文提出的决策辅助方法做出的决策能有效提高系统的稳定性,同时在保证稳定性的情况下获得更快的行进速度,更好地适应行驶过程中的地形情况。

4 结论

通过对六足机器人驾驶员模型进行分析,提出一种基于模糊推理的步态辅助决策方法,利用地形环境数据决策出合适的步态,辅助驾驶员在复杂地形下进行步态决策。

根据六足机器人运动特征与运行环境,将坡度、起伏度、粗糙度和障碍高度作为地形特征量对复杂地形进行评价。确定了地形特征量的计算方式与模糊隶属度函数,并制定各步态模糊推理规则。实验表明,本文提出的辅助决策方法能够为驾驶员提供合理的步态决策,辅助驾驶员更好地完成任务。

参考文献:

- [1] GARCIA E, JIMENEZ M A, DE SANTOS P G, et al. The Evolution of Robotics Research [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine (S1070-9932), 2007, 14(1): 90.
- [2] 张博文. 重载六足机器人操纵控制系统局部半自主控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [3] 赵小川, 罗庆生, 韩宝玲. 基于 Webots 仿真软件的仿生六足机器人机构设计与步态规划 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(11): 3241.
ZHAO Xiaochuan, LUO Qingsheng, HAN Baoling. Developing Biologically Inspired Hexapod Robot in Webots Simulation Software Environment [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(11): 3241.
- [4] APARNA K, GEETA S. Insect Inspired Hexapod Robot for Terrain Navigation [J]. International Journal of Research in Engineering and Technology (S2319-1163), 2013, 2(8): 63.
- [5] BELTER D, SKRZYPCZYŃSKI P. A Biologically Inspired Approach to Feasible Gait Learning for a Hexapod Robot [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (S2083-8492), 2010, 20(1): 69.
- [6] 陈伟海, 刘涛, 王建华, 等. 仿生六足机器人传感信息处理及全方向运动控制 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 430.
CHEN Weihai, LIU Tao, WANG Jianhua, et al. Sensor Signal Processing and Omnidirectional Locomotion Control of a Bio-inspired Hexapod Robot [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(3): 430.
- [7] SOCHA V, KUTILEK P, STEFEK A, et al. Decision Making Process of Hexapods in a Model of Complex Terrains [J]. Acta Polytechnica Hungarica (S1785-8860), 2016, 13(4): 141.
- [8] HAUSER K, BRETEL T, LATOMBE J C, et al. Motion Planning for Legged Robots on Varied Terrain [J]. The International Journal of Robotics Research (S1741-3176), 2008, 27(11/12): 1325.
- [9] BELTER D, SKRZYPCZYŃSKI P. Integrated Motion Planning for a Hexapod Robot Walking on Rough Terrain [J]. IFAC Proceedings Volumes (S2405-8963), 2011, 44(1): 6918.
- [10] 尤波, 蔡佳龙, 许家忠, 等. 载人六足机器人人机功能分配及操纵系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(1): 48.
YOU Bo, CAI Jialong, XU Jiazhong, et al. The Manned Hexapod Robot's Man-machine Function Allocation and the Design of the Control System [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(1): 48.
- [11] 金马, 高海波, 丁亮, 等. 一种六足机器人模拟驾驶系统研究与实现 [J]. 机器人, 2016, 38(6): 678.
IN Ma, GAO Haibo, DING Liang, et al. Research and Implementation of a Driving Simulator for Hexapod Robots [J]. Robot, 2016, 38(6): 678.
- [12] 姜滨, 孙丽萍, 曹军. 木材干燥过程温湿度的 T-S 型模糊神经网络控制器设计 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(10): 114.
JIANG Bin, SUN Liping, CAO Jun. Design of T-S Fuzzy Neural Network Controller for Temperature and Humidity in Wood Drying Process [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(10): 114.
- [13] 田海波, 方宗德, 周勇, 等. 轮腿式机器人倾覆稳定性分析与控制 [J]. 机器人, 2009, 31(2): 159.
TIAN Haibo, FANG Zongde, ZHOU Yong, et al. Analysis and Control for Tumble Stability of Wheel-Legged Robots [J]. Robot, 2009, 31(2): 159.

(编辑: 王 萍)