

基于生物触角的仿生条件反射机器人导航算法

江济良,屠大维,许 烁,赵其杰

(上海大学机电工程与自动化学院,上海 200072;上海市机械自动化及机器人重点实验室,上海 200072)

摘 要: 运用神经行为学原理提出一种模拟生物条件反射活动的机器人导航算法.对于环境感知,提出生物触角模型,因仅对特定区域信息进行处理,大大减小了计算量;对于运动控制,提出一种实用的改进 Bug 算法,机器人依靠生物触角感知环境刺激,实时激励触发相应的行走行为.最后在多种障碍物分布情形下进行算法对比验证.结果表明,机器人可以利用该算法实现未知环境下定目标点自主导航,具有转向次数少、绕行障碍物距离小及运动路径平滑等优点.该算法在自主移动机器人和自主牵引车辆中具有潜在应用价值.

关键词: Bug 算法; 自主导航; 移动机器人; 生物触角; 条件反射; 仿生

中图分类号: TP249 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)02-0388-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.028

Mobile Robot Navigation Algorithm of Biomimetic Conditioned Reflex Based on Biological Antennas

JIANG Ji-liang, TU Da-wei, XU Shuo, ZHAO Qi-jie

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
Shanghai Key Laboratory of Manufacturing Automation and Robotics, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper proposes a navigation algorithm of biomimetic conditioned reflex for mobile robots based on neuroethology principles. For environment perception, a biological antenna model is proposed to delineate the interested sensing areas, and thus decrease the computational burden. For motion planning and control, according to a practical Bug algorithm proposed in this paper, the obtained environment stimulation is responded to generate the corresponding walking behavior. Experiments have been carried out in different conditions of obstacle distribution for algorithm verification. The results present its practicability, fewer turning number, smaller route length and smooth motion path. It can be expected that this algorithm will be of potential application in automated mobile robot (AMR) and automated guided vehicle (AGV).

Key words: Bug algorithm; autonomous navigation; mobile robot; biological antenna; conditioned reflex; biomimetic

1 前言

避障与导航是机器人领域广泛研究的热点之一.对自主移动机器人 (Automated mobile robot, AMR) 或自主牵引车辆 (Automated guided vehicle, AGV) 来说,其基本要求是,在未知环境中安全无碰撞地自主到达指定的目的地^[1]. 目前所提出的机器人导航算法主要有人工势场法 (APF)、向量场直方图法 (VFH)、模糊逻辑法、行为控制法、神经网络、遗传算法和 Bug 算法等^[2~5]. Bug 算法是基于传感器的著名导航算法,由 LUMELSKYS 等^[6]于 1987 年首次提出,之后许多学者对其进行研究并提出一些衍生算法以实现较短行程路径,如 VisBug 算法、DistBug 算法、TangentBug 算法、CautiousBug 算法及 MR-

BUG 算法等^[8~11]. Bug 算法基本原理是,机器人通过正对目标点直线前进和遇到障碍物时沿着障碍物边缘绕行两种基本行走模式来实现未知环境定目标点自主导航.

Bug 算法只是一个“宏观”意义上的算法,它假设了两个前提条件:(1)机器人是一个质点,没有实体尺寸;(2)提供全方位的探测信息,且是精确可靠的,不存在误差.实际情况下这两个假设都是不成立的.此外 Bug 算法要求机器人本身就具有沿着障碍物边缘绕行的能力,这一点对于机器人来说也有一定困难. Bug 算法的重点和难点在于绕行障碍物边缘的具体方式以及如何确定两种基本行走模式的切换时机.郝宗波等^[12]综合考虑传感器的数据误差和机器人形体尺寸提出一种基于传

传感器的移动机器人路径规划的改进 Bug 算法;康亮等^[13]将 Bug 算法与基于滚动窗口的路径规划相结合,提出了一种改进的移动机器人路径规划方法.两者均只在理论上仿真.目前国内对 Bug 类算法在移动机器人上的实际运用比较少.

近十年来,仿生学正渗透到机器人领域并不断得到成功应用.文献[14]提出基于昆虫神经行为学模型的无地图仿生导航新方法,并以移动机器人觅食任务实验对该方法进行验证.文献[15]开发出由一个中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)组成的神经系统模型的四足机器人,实现室外规则地形下中等前进速度自适应动态行走.

本文在 Bug 算法基础上,运用神经行为学原理,提出一种实用的仿生条件反射机器人导航算法.该算法中,机器人依靠构建的三类生物触角感知周围未知环境,实时激励触发对准转向、直线前进、避开转向和弧线绕行四种条件反射行走行为来实现未知环境下定目标点自主导航.最后以室内移动机器人为对象进行算法对比验证,给出了该算法的实际验证结果.

2 机器人生物触角模型

通过模拟生物触角结构及其原理能有效提高机器人的环境感知能力,为实现自主导航提供必要的决策判断.赵祚喜等^[16]设计了“虚拟触角”模型,并提出一种适用于非 360°探测机器人避障导航算法.在此基础上,本文对仿生触角的结构及内涵进一步延伸,提出了“生物触角”模型,即相对于机器人本体定义一些特定形状区域,它们位于机载传感器探测范围之内.其作用是借助机载传感器(测距传感器、驱动电机编码器、GPS 等)探测得到特定区域的触觉信息,包括周围障碍物分布情况、自身运动状态信息等.生物触角因仅对特定感兴趣区域的信息进行处理,大大减小计算量.生物触角还具有记忆与更新功能,能记住并实时更新特定区域的触角信息.

图 1 为机器人生物触角模型设计.将轮式机器人简化成圆形,半径为其外接圆半径,用 R_r 表示.共三类五

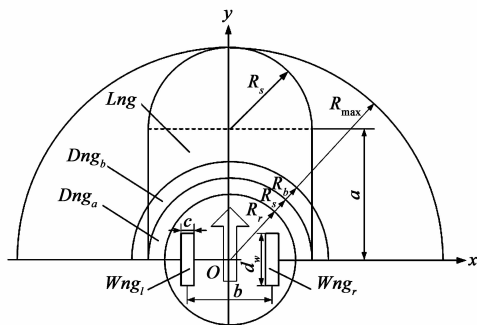


图1 机器人生物触角模型

个生物触角,分别是位于前方的半圆环形触角 Dng_s 与 Dng_b (半径分别为 R_s 和 R_b),位于左右主动轮位置的矩形触角 Wng_l 与 Wng_r ($d_w \times c$),以及位于正前方位置由矩形($2R_s \times a$)加半圆形(半径 R_s)组成的宽面积型触角 Lng .其中 R_{max} 为测距传感器的最大探测距离.设计上 $R_s > R_r$ 以保证不发生碰撞. Dng_s 与 Dng_b 用于绕行障碍物边缘过程中避开转向行走行为的实现,按施密特触发器设计有 $R_s < R_b$ 以提高系统的稳定性; Wng_l 与 Wng_r 用于记录当前行走行为过程中左右主动轮运动的实时位移 s_l 和 s_r ; Lng 用于检测当前传感器探测范围内无障碍直线行走的最大距离 s_{max} .

生物触角模型与文献[16]虚拟触角模型类似,但第二类触角有所不同.两者除相对于机器人本体的位置分布不同外,主要区别在于所测量的数据及其使用方式不同.文献[16]矩形触角 Bar_l 与 Bar_r 记录每次直线行走段无障碍行走距离,用于障碍物边缘绕行过程中接近转向的实现.本文矩形触角 Wng_l 与 Wng_r 记录当前行走行为过程中左右主动轮无障碍行走的实时位移 s_l 和 s_r ,其作用是实时测定机器人位姿.机器人依靠自身定位系统进行初定位,利用 Wng_l 和 Wng_r 实时测定当前位置 X .文献[16]算法通过直线前进和原地转向两种行走方式来实现 Bug 算法中两种基本行走模式,其中第一种模式为直线前进,第二种模式为原地转向与直线前进相结合.采用分段直线的方式绕行障碍物边缘,保证前进时避障容易实现,但转向动作过于频繁,路径的连贯平滑性还有待提高.

为叙述方便,定义以下符号:机器人起点 S ,目标点 T ,当前位置 X ,用 (x_r, y_r, θ_r) 表示机器人位姿,用 d_{XT} 表示矢线段 XT 的长度,用 θ_{XT} 表示矢线段 XT 的夹角, d_{min} 表示测距传感器探测范围内机器人与障碍物之间的最近距离,用 s_{max} 表示 XT 方向可无障碍直线行走的最大距离.其中 S 、 T 已知, X 依靠自身定位系统由 Wng_l 与 Wng_r 实时测得. s_{max} 由 Lng 测得.用相遇点 H 表示机器人碰到障碍物时所处的位置点,用脱离点 L 表示机器人绕行障碍物边缘结束时所处的位置点.在每一次采样时刻,每一个生物触角都刷新各自对应区域的感知信息.机器人依靠上述三类生物触角感知周围未知环境.

3 基于生物触角的仿生条件反射机器人导航算法实现原理

从仿生学的角度看,机器人导航运动过程实质就是机器人对外部环境实时进行感知并产生适当运动反应的过程.生物触角感知的触角信息相当于输入给机器人的“无关刺激”,实时激励触发对应的机器人行走

行为相当于机器人产生的“反射”运动.例如,当机器人依靠其生物触角感知前方遇到障碍物,则触发避开转向行走行为以避开障碍物.其原理类似于产生式系统,其基本形式为:IF <条件> THEN <结果>,即当条件满足时相应的规则被触发.机器人导航运动过程就是生成规则不断触发的过程.机器人通过学习获得并实现参数修正、触角信息记忆与更新等.

3.1 机器人条件反射行走行为

本算法通过直线前进、原地转向和弧线绕行三种行走行为来实现 Bug 算法正对目标点直线前进和遇到障碍物时绕行障碍物边缘两种行走模式.其中原地转向分为两种:对准转向,即使机器人对准目标点 T ;避开转向,即使机器人避开障碍物.其中第一种模式按对准转向与直线前进实现,第二种模式按避开转向与弧线绕行实现.运用神经行为学原理设计如下四种机器人条件反射行走行为:

(1)对准转向:是指在 S 和 L 处执行的旨在对准目标点 T 的原地转向动作.转向方向按最小转角原则来决定,直到对准目标点 T 对准转向行走行为结束.

(2)直线前进:是指在对准目标点 T 后所执行的沿 XT 方向的直线行走动作,直到到达目标点 T (此时任务结束)或者遇到障碍物(此时位于相遇点 H)为止,包括从 S 完成对准转向行为后的直线行走动作,以及脱离障碍物边缘后对准目标点 T 的直线行走动作.

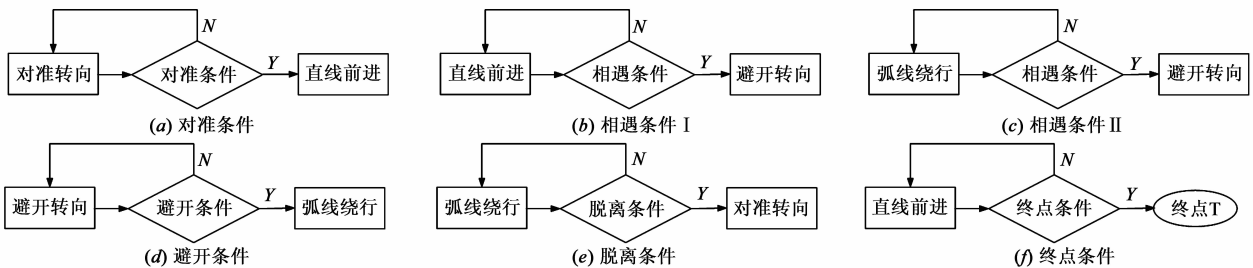


图2 机器人条件反射行走行为组合示意图

(1)对准条件:判断对准转向过程中航向角是否沿着 XT 方向,用于连接对准转向与直线前进,见图 2(a).对准条件通过 Wng_l 与 Wng_r 判断,其原理用伪代码表达为:IF ($\theta_r = \theta_{XT}$) {对准条件成立,直线前进触发}; ELSE {对准条件不成立,保持当前行为}.

(2)相遇条件:判断直线前进或弧线绕行过程中是否遇到障碍物,即是否处于相遇点 H ,用于连接直线前进与避开转向(图 2(b))或弧线绕行与避开转向(图 2(c)).相遇条件通过 Dng_s 判断其原理用伪代码表达为:IF ($d_{\min} \leq R_s$) {相遇条件成立,避开转向触发}; ELSE {相遇条件不成立,保持当前行为}.

(3)避开条件:判断避开转向过程中是否避开障碍物,用于连接避开转向和弧线绕行,见图 2(d).避开条

(3)避开转向:是指在障碍物边缘绕行过程中所执行的为远离障碍物而实施的原地转向动作.当处于直线前进或弧线绕行行走行为过程中遇到障碍物,即 Dng_s 检测到位于相遇点 H ,则触发避开转向行走行为,直至 Dng_b 检测不到障碍物时避开转向行走行为结束.转动方向确定方法是:当避开转向行走行为开始时刻障碍物位于机器人左侧则原地右转,反之原地左转.如果机器人避开转向一周,则表示无法避开障碍物,停止运动.

(4)弧线绕行:是指在障碍物边缘绕行过程中所执行的沿一定曲率半径圆弧绕行行走动作.当遇到障碍物执行的避开转向行走行为结束时,则触发弧线绕行行走行为,直至再次遇到障碍物(Dng_s 检测到下一个相遇点 H)或满足脱离点条件,则弧线绕行行走行为结束.弧线绕行转弯方向与避开转向转弯方向对应,当遇到障碍物执行的避开转向为原地左转,则弧线右转,反之弧线左转.如果机器人弧线绕行一圈,则表示无法脱离障碍物,停止运动.

3.2 机器人条件反射行走行为触发时机的确定

本算法的核心在于确定机器人条件反射行走行为的触发时机.图 2 为机器人条件反射行走行为组合示意图,共提出对准条件、相遇条件、避开条件、脱离条件和终点条件五种判断条件.下面对图 2(a)~(f)中五种判断条件予以说明.

件通过 Dng_b 判断,其原理用伪代码表达为:IF ($d_{\min} \geq R_b$) {避开条件成立,弧线绕行触发}; ELSE {避开条件不成立,保持当前行为}.

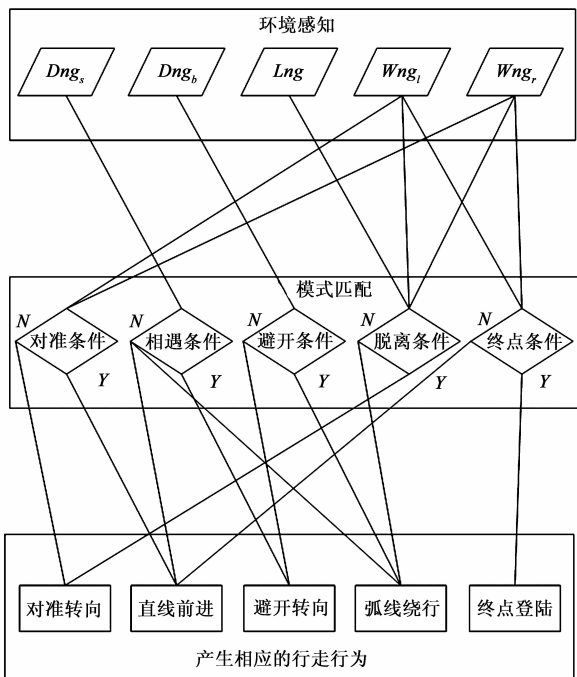
(4)脱离条件:判断在弧线绕行过程中是否脱离障碍物边缘,即判断是否处于脱离点 L ,用于连接弧线绕行与对准转向,见图 2(e).脱离条件通过 Lng 判断,其原理用伪代码表达为:IF ($(|\theta_r - \theta_{XT}| \leq \theta_e \& \& s_{XT} \leq s_{\max})$ OR $(|\theta_r - \theta_{XT}| \leq \theta_e \& \& s_{\max} \geq s_{step})$) {脱离条件成立,对准转向触发}; ELSE {脱离条件不成立,保持当前行为}.其中 θ_e 为预先设定的对准角度容差, s_{step} 为预先设定的脱离阈值.

(5)终点条件:判断直线前进过程中是否到达目标点 T ,用于判断整个导航任务是否完成,见图 2(f).终

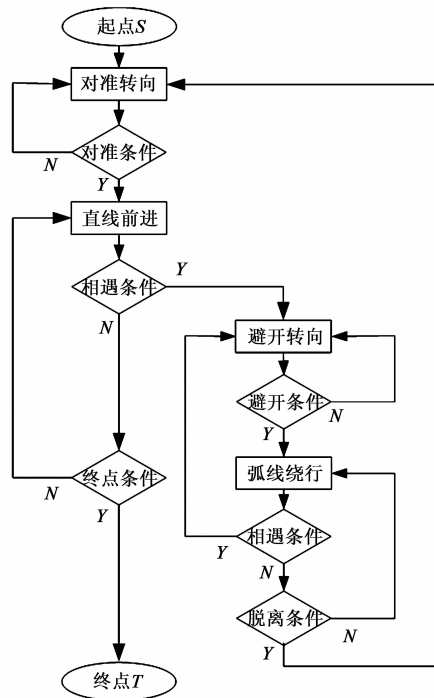
点条件通过 Wng_l 与 Wng_r 判断,其原理用伪代码表达为:IF($d_{XT} \leq d_e$)|终点条件成立,启动登陆程序,导航任务结束|;ELSE|终点条件不成立,保持当前行为|.其中 d_e 为预先设定的终点距离容差.

3.3 机器人仿生条件反射导航算法原理

基于生物触角的仿生条件反射机器人导航算法原理如图 3 所示.其中,图 3(a)为算法原理图,图 3(b)为算法流程图.下面结合图 3 给出机器人未知环境下定目标点自主导航的完整步骤.



(a) 算法原理图



(b) 算法流程图

图3 基于生物触角的仿生条件反射机器人导航算法原理

步骤 1 机器人从起点 S 出发,触发对准转向行走行为,一旦对准条件成立,则立即触发直线前进行走行为,并不断进行相遇条件和终点条件判断,如果一直有相遇条件不成立,最终有终点条件成立,到达目标点 T 结束导航任务,否则保持直线前进行走行为.

步骤 2 在步骤 1 的直线行走行为过程中,如果相遇条件成立,则触发避开转向行走行为和弧线绕行行走行为,直到脱离条件成立,转至步骤 1 触发对准转向和直线前进行走行为.

步骤 3 在步骤 2 的弧线绕行行走行为过程中,如果相遇条件成立,转至步骤 2 继续触发避开转向和弧线绕行行走行为.

在上述整个机器人导航过程中,机器人的行走行为具有连贯性和保持性.如果一旦某个判断条件成立,则立即触发相应的条件反射行走行为,否则继续保持当前的行走行为.

3.4 机器人仿生条件反射导航的实现

用图示举例来说明机器人仿生条件反射导航过程.图 4 为机器人绕行轮廓为直线的障碍物的导航结果.机器人从起点 S 出发,行至第一个 H_1 处碰到障碍

物,于是停下来执行避开转向,直到满足避开条件,然后执行弧线绕行,直到满足相遇条件至第二个 H_2 处,接着重复避开转向和弧线绕行,直到满足脱离条件行至 L 处执行对准转向和直线前进到达目标点 T ,运动轨迹为 $SH_1H_2H_3LT$.由于障碍物轮廓为直线,在弧线脱离障碍物之前每一次弧线绕行的距离相同,即有弧线段 $|\widehat{H_1H_2}| = |\widehat{H_2H_3}|$.弧线绕行次数与绕行弧线曲率半径 R_a 有关.减小 R_a ,弧线绕行次数增多,转向动作过于频繁;增大 R_a ,弧线绕行次数减少,但易使机器人忽视环境中障碍物之间的间隙,陷入“局部死区”.设计上有 $R_a > R_b$, R_a 应根据机器人车体尺寸和环境中障碍物间隙大小合理进行选取.此外目标点 T 与障碍物之间的距离不能过小,否则也易陷入“局部死区”.

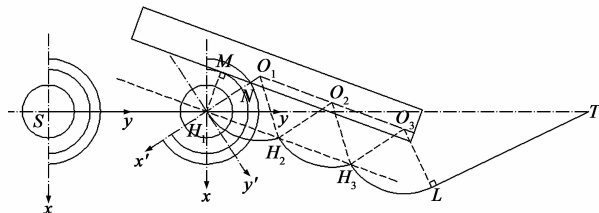


图4 机器人绕行轮廓为直线的障碍物示意图

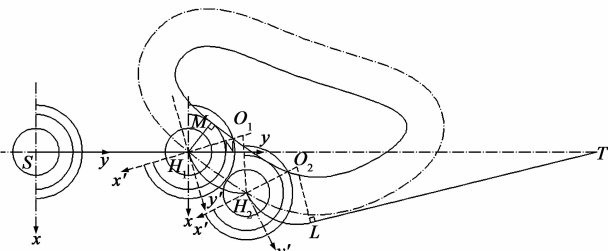


图5 机器人绕行不规则障碍物示意图

实际环境中障碍物具有任意形状的边缘,图5为机器人绕行不规则障碍物的导航结果.如前所述,机器人完成绕行不规则障碍物的导航过程也是通过对准转向、直线前进、避开转向和弧线绕行四种条件反射行走行为来实现,运动轨迹为 SH_1H_2LT . 由于障碍物轮廓形状的不规则性,每一次弧线绕行的弧线段长度不一定相等.

4 机器人导航实验及结果分析

实验系统如图6所示,由移动机器人和 $6m \times 4m$ 室内走廊实验现场组成.该机器人安装了差动驱动的左右主动轮,以及驱动电机编码器、LMS200 激光测距仪、声纳、数字罗盘、GPS 等.其中 LMS200 激光测距仪具有 180° 探测范围,角度分辨率为 0.5° ,每次扫描得到 361 个距离数据.本文在 Windows 平台下基于 Visual C++ 语言编写出一套完整的机器人导航算法程序.实验现场采用常见规则形状物体如箱柜等作为障碍物,且障碍物的高度均高于激光测距仪测量平面.



图6 移动机器人及实验现场

图7表示不同障碍物分布情形下机器人导航运动的行走轨迹,用四边形表示随机摆放的障碍物.图7中(a)和(d)、(b)和(e)、(c)和(f)分别为单一障碍物、分散障碍物和密集障碍物情形下的实验结果.图7(a)~(c)为采用文献[16]算法得到的行走轨迹,图7(d)~(f)为采用本文算法得到的行走轨迹.

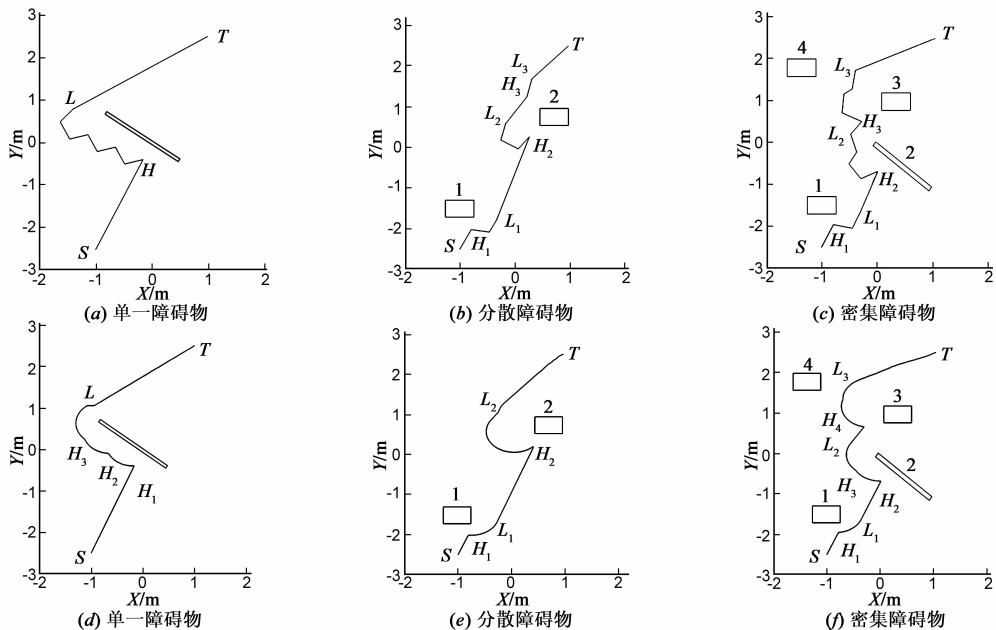


图7 机器人导航实验结果

算法主要参数为: 机器人半径 $R_r = 250mm$, 半圆环形触角 $R_s = 480mm$, $R_b = 500mm$, 弧线绕行曲率半径 $R_a = 520mm$, 脱离阈值 $S_{step} = 200mm$, 对准角度容差 $\theta_e = 2.5^\circ$, 终点距离容差 $d_e = 180mm$. 较大的 R_s 和 R_b 有利于提高机器人的探测范围,但易使其忽略障碍物之间的间隙.较大的 R_a 有利于减少了弧线绕行次数使机器人更快脱离障碍物边缘,但易陷入“局部死区”.较小的 S_{step} 使机器人易于脱离障碍物.综合考虑通信速率和算法实时性等因素,机器人行走速度不宜设置过大,其中直线前进速度为 $100mm/s$, 弧线绕行速度为 $50mm/s$, 原地转向角速度为 $0.243rad/s$. 在导航实验过程中,程序以数据文件实时记录机器人运动位姿信息,实验结束后用 Origin 绘图分析结果.

由图 7(d)看出,机器人经历多次避开转向和弧线绕行脱离障碍物边缘最终顺利到达目标点 T ,运动轨迹为 $SH_1H_2H_3LT$.由图 7(d)看出,由于直线轮廓障碍物的特殊性,弧线绕行的弧线段长度近似相等;脱离点 L 位置略微有些滞后,主要是由于传感器采样数据更新滞后引起,故在直线脱离障碍物边缘之前增加了对准转向保证了机器人准确到达目标点 T .从图 7(e)和图 7(f)中看出,机器人经历多次遇到障碍物和脱离障碍物边缘的过程顺利到达目标点 T .由图 7(e)看出,障碍物“1”、“2”之间间距较大,机器人较容易绕开障碍物到达目标点;由图 7(f)看出,机器人忽略障碍物“2”、“3”之间较小间隙,选择从较大间距的障碍物“3”、“4”之间绕行障碍物边缘行走至目标点 T .

表 1 为在单一障碍物、分散障碍物和密集障碍物三种情形下两种算法的性能指标对比.在现场中障碍物大小变化不大的情形下,随着障碍物密集程度的增加,转向次数增加,绕行障碍物距离增大.在同一障碍物分布情形下,与文献[16]算法相比,本算法转向次数减少近一半,绕行障碍物距离减小.除此之外,由图 7 中看出,本算法得到的运动路径圆润自然,提高了路径的连贯平滑性.

表 1 两种算法的性能指标对比分析

性能指标	文献[16]算法			本文算法		
	单一障碍物	分散障碍物	密集障碍物	单一障碍物	分散障碍物	密集障碍物
转向次数	9	10	14	5	5	8
绕行障碍物距离(m)	3.148	2.712	3.347	1.905	2.309	2.885

5 结论

(1)运用神经行为学原理,提出了一种基于生物触角的仿生条件反射机器人导航算法.将机器人的导航运动提升到生物行为的高度.机器人不仅具有类似生物感知的触角结构,而且具有模拟生物“条件反射”活动的行走行为.机器人依靠生物触角感知周围未知环境,实时激励触发相应的行走行为实现未知环境定目标点自主导航.

(2)提出生物触角的概念,方便直观地分析应用大量传感器数据.整个算法依靠定义 3 类生物触角感知周围未知环境并进行自主导航行为决策.

(3)与文献[16]算法相比,其改进之处主要是绕行障碍物边缘的算法,主要特点是原地转向与弧线绕行相结合.与文献[16]分段直线的绕行方式相比,本文采用分段弧线的方式绕行障碍物边缘,转向次数减少一半,绕行障碍物距离减小,路径变得圆滑自然,保证了较短路径脱离障碍物边缘.

(4)机器人避障导航是一项复杂的任务,尽管以室

内移动机器人为对象对本算法进行了验证,达到了预计的效果,本算法在对复杂环境的适应性、“局部死区”问题等方面仍须进一步深入研究.

参考文献

- [1] P Foggia, A Limongiello, et al. A real-time stereo-vision system for moving object and obstacle detection in AVG and AMR applications[J]. IEEE CAMP, 2005: 1 - 6.
- [2] S S GE, Y J CUI. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method[J]. Autonomous Robots, 2002, 13: 207 - 222.
- [3] Borenstein J, Koren Y. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 278 - 288.
- [4] 陈卫东, 朱奇光. 基于模糊算法的机器人路径规划[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 971 - 974.
Chen Weidong, Zhu Qiguang. Mobile robot path planning based on fuzzy algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 971 - 974. (in Chinese)
- [5] Manikas, TW Ashenayi, K, Wainwright RL. Genetic algorithms for autonomous robot navigation[J]. IEEE Instrumentation & Measurement, 2007, 10(6): 26 - 31.
- [6] LUMELSKY V J, STEPANOV A A. Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst obstacles of arbitrary shape[J]. Algorithmica, 1987: 403 - 430.
- [7] LUMELSKY V J, SKEWIS T. Incorporating range sensing in the robot navigation function[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1990, 0(5): 1058 - 1069.
- [8] KAMON I, RIVLIN E. Sensory-based motion planning with global proofs[J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1997, 13(6): 1058 - 1068.
- [9] KAMON I, RIMON E, et al. TangentBug: A range-sensor-based navigation algorithm[J]. Int J Robot Res, 1998, 17(9): 934 - 953.
- [10] MAGID E, RIVLIN E. Cautiousbug: A competitive algorithm for sensory-based robot navigation [A]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems [J]. Japan: 2004. 2757 - 2762.
- [11] Shahar Sarid, Amir Shapiro, et al. MRBUG: A competitive multi-robot path finding algorithm [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Roma, Italy: 2007. 10 - 14.
- [12] 郝宗波, 洪炳熔. 未知环境下基于传感器的移动机器人路径规划[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 953 - 956.
Hao Zongbo, Hong bingrong. Sensor-based path planning for mobile robot in unknown environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 953 - 956. (in Chinese)
- [13] 康亮, 赵春霞, 等. 未知环境下改进的基于 BUG 算法的

移动机器人路径规划[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5414 - 5420.

Kang liang, Zhao Chunxia, et al. Improved path planning based on bug algorithm for mobile robot in unknown environment[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5414 - 5420. (in Chinese)

- [14] Zenon Mathews, Miguel Lech' on, et al. Insect-like mapless navigation based on head direction cells and contextual learning using chemo-visual sensors [A]. IEEE IROS, St Louis [C]. USA, 2009. 2243 - 2250.

- [15] H Kimura, Y Fukuoka, et al. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts[J]. International Journal of Robotics Research, 2007, 26: 1 - 25.

- [16] 赵祚喜, 汪宁, 等. 一种适用于非 360°探测机器人的避障导航算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 44 - 52.
Zhao Zuo-xi, Wang Ning, et al. Implementation of sensor-based navigation on mobile robots using non-360°range sensor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 44 - 52. (in Chinese)

作者简介



江济良 男, 1985 生于湖北黄冈. 现为上海大学博士研究生, 研究方向为服务机器人、人机协作、人机智能等.



许 烁 男, 1982 年生于河北望都. 博士, 讲师, 硕士生导师, 现为上海大学机电工程与自动化学院教师, 研究方向为服务机器人语义认知、人机关系、自主导航等.



屠大维 (通信作者) 男, 1965 年生于浙江诸暨. 博士, 教授, 博士生导师, 现为上海大学机电工程与自动化学院院长, 研究方向为机器视觉及伺服控制、光机电一体化智能机械及仪器、人机智能系统等.

E-mail: tdwshu@staff.shu.edu.cn



赵其杰 男, 1977 年生于河南辉县. 博士, 副教授, 硕士生导师, 现为上海大学机电工程与自动化学院教师, 研究方向为传感检测与控制, 人机交互与智能系统等.