

基于蜂窝地图的全方位步进式机器人系统^{*}

余 翀[†]

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

(2012 年 2 月 17 日收稿; 2012 年 6 月 11 日收修改稿)

Yu C. Omni-directional stepping robotic system based on cellular grid map[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(3): 394-402, 424.

摘 要 从硬件实现和软件算法两方面, 对基于蜂窝地图的全方位步进式机器人系统进行设计实现. 通过对 6 轮全向移动平台的力学、运动学和动力学分析建模, 借助基于 FPGA 的高精度光电里程计和激光校准装置, 设计出适合蜂窝地图下运行的全方位步进式机器人. 结合多维度传感器的数据融合, 在蜂窝栅格地图中分 2 个层次, 分别进行基于“六向分块”思想的局部路径规划和基于遗传算法 TSP 优化问题的全局路径规划. 实验证明了该系统在实际运行中的精确性和鲁棒性.

关键词 智能空间; 步进式机器人; 数据融合; 蜂窝栅格地图; 路径规划

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7523/j. issn. 1002-1175. 2013. 03. 018

Omni-directional stepping robotic system based on cellular grid map

YU Chong

(School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract We design and implement an omni-directional stepping robotic system based on cellular grid map to provide physical services in intelligent space. By analyzing and modeling the mobile platform in mechanics, kinematics, and dynamics, we design the robot suitable on cellular grid map, with the help of high-precision optical odometer based on FPGA and of laser calibration device. Based on multi-dimensional sensor data fusion, we make the path planning task into two stages: six-directional local path planning and global path planning based on TSP optimization of genetic algorithm. Experiments show the accuracy and robustness of the system during the actual operation.

Key words intelligent space; stepping robot; data fusion; cellular grid map; path planning

智能空间^[1]是嵌入了计算、信息设备和多模态的传感装置的工作或生活空间, 具有自然便捷的交互接口^[2], 以支持人们方便地获得计算机系

统的服务. 普适计算使计算和信息服务以适合人们使用的方式普遍存在于我们的周围, 以往相互隔离的信息空间和物理空间相互融合. 在这个融

^{*} 机器人学国家重点实验室基金(R2200703)资助

[†] 通信作者, E-mail: dxzdxz@126.com

合的空间中,人们可以随时随地、透明地获得计算机系统的服务. 普适计算中信息空间和物理空间的融合可以在不同尺度上得到体现. 借助普适计算,人们可以以自发交互的方式获取智能空间的计算和信息服务.

为使智能空间能够向人们提供特定的物理服务,则须在物理空间中增加智能执行机构^[3],而机器人是提供这种智能物理服务的最佳选择^[4]. 能够实现自主前进和精确定位的步进式机器人系统是实现在特定环境下,提供各种相应服务的高端机器人的基础和前提. 文献[5]提出一种基于机器人位姿和线性地图特征的机器人同时定位与地图构建算法,并以此对机器人系统进行导航. 该文章创建的地图虽然精度较高,但相对于蜂窝地图创建来说,需要较高的硬件支持,时间复杂度又较高,不利于进一步提高系统实时性. 此外该方法针对大型机器人在室外环境下作业,定位精度相对不高. 文献[6]提出一种基于概率占据地图和多传感器数据融合^[7]的机器人检测环境算

法,并通过提取二维图像中的纹理信息对机器人进行导航. 然而该方法主要适用于大型无人机的导航,并不适用于室内智能空间中的服务机器人应用.

本文设计实现居室智能环境中轮式步进机器人的全方位移动平台系统模型,并据此进一步研究轮式步进机器人系统相关问题,主要包括:步进式机器人感知环境的方式选择及实现、多传感器的数据融合、空间环境描述和栅格地图创建、步进式机器人在栅格地图下的局部路径规划,以及机器人执行智能任务时的全局路径规划等.

1 步进式机器人系统框架

本文中的步进式机器人系统总体结构框架由图 1(a)给出. 根据实际应用要求,重点设计并实现电源子系统、感知子系统、控制子系统、上位机子系统及移动平台. 涉及到具体的实现,可以把步进式机器人硬件结构分成 3 层,图 1(b)给出步进式机器人 3 层式硬件电路系统框图.

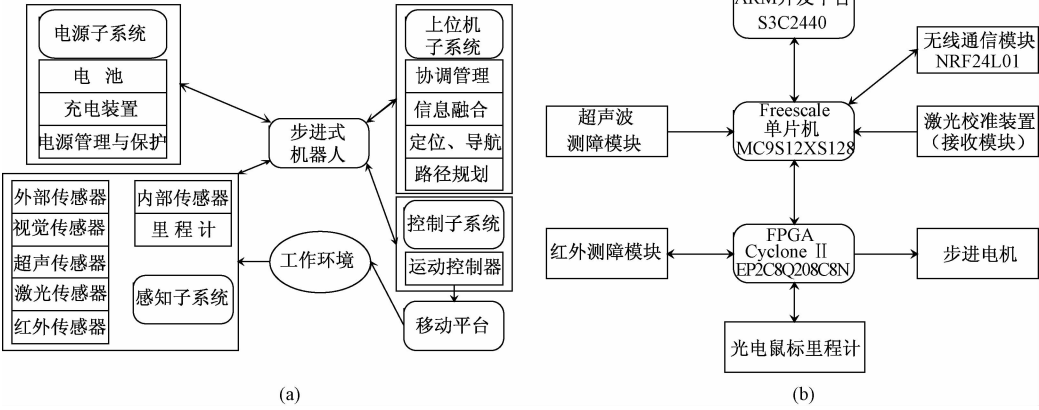


图 1 步进式机器人系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of the stepping robotic system structure and hardware

步进式机器人硬件系统底层核心为 FPGA, 采用 Cyclone II EP2C8Q208C8N 器件实现. 其主要任务包括:接收上层指令并驱动步进电机、采集 6 个光电鼠标信息,并对数据加以处理融合、监测 12 个红外测障模块、上传检测数据及反馈指令执行结果. 中间层核心是 MCU,采用 Freescale 单片机 MC9S12XS128 器件实现. 其主要任务包括:采集激光校准模块信息、处理超声波测障模块信号、控制无线通信模块实时地向后台传送机器人状态信息,并接收控制命令. 上层为 ARM 平台,采用 S3C2440 器件实现. 其主要任务包括:收集各项

检测数据,完成蜂窝式栅格地图创建及更新、完成局部和全局路径规划、下发机器人运动控制命令.

结合步进式机器人系统的硬件结构和总体框架,其中,连接在 FPGA 上的光电鼠标里程计和红外测障模块、以及连接在 Freescale 单片机上的超声波测障模块和激光校准装置,共同组成步进式机器人的感知子系统;Freescale 单片机实现运动控制算法,并下发控制命令到以 FPGA 为核心的电机驱动系统,由 FPGA 和驱动模块按照运动控制算法,驱动 3 组电机精确步进,这是机器人控制子系统;上位机子系统负责多种算法:地图创建、

环境匹配、路径规划和定位校正,主要放在 ARM 平台和后台系统上实现,并通过通信系统,如总线、无线通信模块等,完成信息交互。

2 全方位移动平台

全方位移动是指移动机构能够不受任何约束地从当前位置向工作平面上的任何位置和任意方向运动,实现完美的运动性能,比非全方位机构系统有着明显优势。例如全方位移动机构由于其零回转半径的特点,可在拥挤狭窄的场所内,使机器人本体灵活自如地穿行;可对自己所处位置进行细微调整,实现精确定位和高精度轨迹跟踪等。针对系统总体要求,所设计的全方位移动平台应能方便地在蜂窝式栅格地图上进行移动,并且能精确地控制机器人的位移量。另外,平台机械结构应具备较好的环境适应能力,有较大的负载力。

自行设计的全方位轮轮框由 3 块亚克力板合成,每块板材外缘开有 8 个空槽,用于安放侧向辊

子。侧向辊子外套有硅胶管,以增大轮子和室内地板之间的摩擦力。中间 1 块亚克力板上开有侧槽,用于安放侧向辊子的转动轴,两侧板材夹紧侧向辊子的转动轴。另外,在保证轮子框架有足够强度的前提下,将 3 板材中间适度镂空以减少车轮重量。车轮中心有圆孔(有一侧是平的),用以同步进电机转轴连接。

为弥补经典全方位轮的主要缺点,即辊子之间存在的间隙会使得轮子在转动过程中同地面接触点的高度不断变化,从而导致机器人车体的震动或打滑,增加了运动计算的误差。本系统将 2 个全方位轮错开角度并列安装,形成互补结构,保证轮组在转动过程中至少有 1 个侧向辊子与地面保持接触,减少了震动和打滑情况的发生。

图 2 所示为平台机械结构,底盘均匀布置 3 组 6 个步进电机,两两轴向夹角为 60°。所示平台可方便实现“全方位步进”功能,并且可以提供较大驱动力。

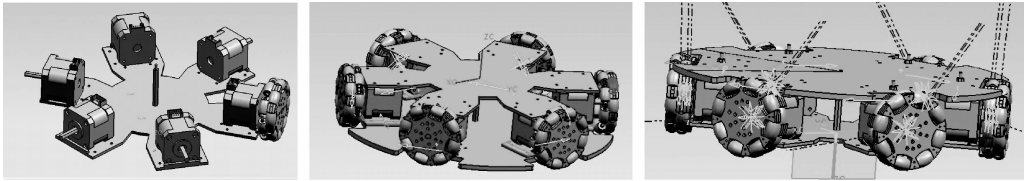


图 2 全方位移动平台的 3D 视图

Fig. 2 3D view of the omni-directional mobile platform

考虑在实际应用中,地面的不平整或车架的细微形变等因素将导致 6 个车轮无法同时着地的情况,就此本文进行了相应的辅助设计。图 3 右

图所示红框位置安装弹簧使得 6 个车轮处于预紧状态,这样可以有效解决 6 个轮子不同时着地的问题,同样这一措施也有使车体减震的效果。

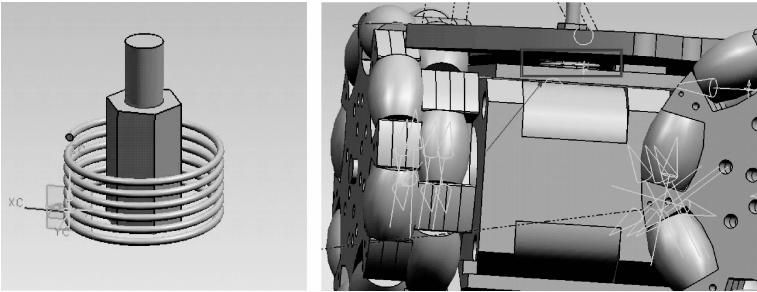


图 3 全方位移动平台预紧减震结构的 3D 视图

Fig. 3 3D view of the preloaded damper structure on the omni-directional mobile platform

2.1 全方位移动平台的力学分析

全方位轮的基本结构是在大轮边缘装有轴向垂直的侧向辊子,这样每一个全方位轮即使是横向移动时,也始终保持与地面为滚动摩擦。采用全方位轮,使得步进式机器人在向任意方向移动

时,都可大大减少移动阻力。下面对此做出力学分析,首先给出 2 个前提假设:1) 每个轮组是完全一样的,不考虑由于加工精度导致各轮组之间的细微差异;2) 滑动摩擦力要远远大于滚动摩擦力,即在下面的力学分析中,主要考虑滑动摩擦力

对于步进式机器人的影响。

考虑6轮全向步进式机器人在1组步进电机驱动、2组步进电机随动的情况下,做驱动方向的直线运动. 假设每台步进电机提供的驱动力为 F_M , 每个轮组受到的滑动摩擦力为 f , 则每个驱动轮组提供的驱动力 F 满足: $F = F_M - f$.

当不采用全向轮组,即使用普通的未装侧向辊子的车轮组时,步进式机器人在前进方向上的驱动力 F_{drive} 为 $2F$, 4个与前进方向呈 60° 角的随动轮组将是前进的阻力,受到的阻力 F_{resist} 大小为 $4f$, 如图4(a)所示. 则此种情况下,步进式机器人所受合力 F_{total} 满足:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{drive}} - F_{\text{resist}} = 2F - 4f. \quad (1)$$

当采用全方位轮组时,由于大轮边缘装有轴向垂直的侧向辊子,随动轮组受到的阻力会使得侧向辊子沿轴转动,所以将随动全方位轮组所受的滑动摩擦力,分解到和轮组轴垂直方向和平行方向,如图4(b)所示.

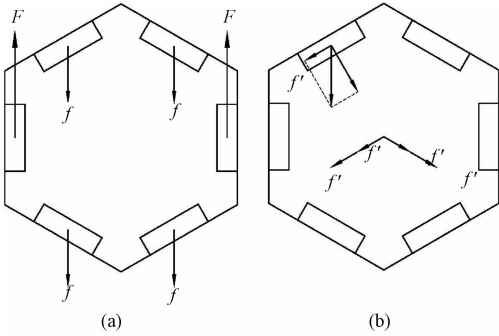


图4 普通移动平台和全方位移动平台的力学分析

Fig. 4 Mechanics analyses of common mobile platform and the omni-directional mobile platform

此时随动全向轮组所受的滑动摩擦力在轮组轴平行方向上的分量作为侧向辊子的驱动力,使得滑动摩擦力变为滚动摩擦力. 对于整个步进式机器人来说,前进过程中受到的阻力主要是滑动摩擦力在轮组轴垂直方向上的分量. 对于每一个轮组来说,滑动摩擦力 $f' = f \cos 60^\circ = f/2$, 对于整个步进式机器人来说,阻力为这4个随动轮组受到的阻力的合力,因此阻力 $F_{\text{resist}}' = 4f' \cos 60^\circ = f$. 而步进式机器人在前进方向上的驱动力 F_{drive}' 仍为 $2F$, 则此种情况下,步进式机器人所受合力 F_{total}' 满足:

$$F_{\text{total}}' = F_{\text{drive}}' - F_{\text{resist}}' = 2F - f. \quad (2)$$

由此可见,采用全方位轮组可以大大减少步进式机器人在移动过程中受到的阻力.

2.2 全向移动平台的运动学分析

步进式机器人的运动空间为一个平面,建立如图5所示的绝对坐标系 $X_a O Y_a$ 和机器人坐标系 $X_r O_r Y_r$.

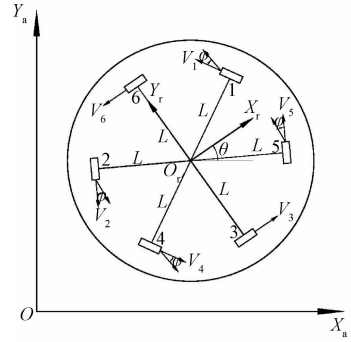


图5 全向移动平台的运动学分析

Fig. 5 Kinematics analysis of the omni-directional mobile platform

其中机器人坐标系原点 O_r 与步进式机器人中心重合, θ 为 X_a 与 X_r 的夹角, ϕ 为轮组与 Y_r 的夹角(如图中所标,取锐角), L 为步进式机器人中心到轮组中心的距离, v_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 为轮组 i 提供的沿着驱动方向的速度. 根据如图7所示的几何关系,可得步进式机器人系统的运动学方程:

$$v_1 = -\dot{x}_a \sin(\phi + \theta) + \dot{y}_a \cos(\phi + \theta) + L\dot{\theta}, \quad (3)$$

$$v_2 = -\dot{x}_a \sin(\phi - \theta) - \dot{y}_a \cos(\phi - \theta) + L\dot{\theta}, \quad (4)$$

$$v_3 = \dot{x}_a \cos \theta + \dot{y}_a \sin \theta + L\dot{\theta}, \quad (5)$$

$$v_4 = \dot{x}_a \sin(\phi + \theta) - \dot{y}_a \cos(\phi + \theta) + L\dot{\theta}, \quad (6)$$

$$v_5 = \dot{x}_a \sin(\phi - \theta) + \dot{y}_a \cos(\phi - \theta) + L\dot{\theta}, \quad (7)$$

$$v_6 = -\dot{x}_a \cos \theta - \dot{y}_a \sin \theta + L\dot{\theta}. \quad (8)$$

根据机器人坐标系的建立情况和步进式机器人的实际结构可知, $\phi = 30^\circ$, 将其代入(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)式中,并写成矩阵形式,可得步进式机器人的运动学模型:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(30^\circ + \theta) & \cos(30^\circ + \theta) & L \\ -\sin(30^\circ - \theta) & -\cos(30^\circ - \theta) & L \\ \cos \theta & \sin \theta & L \\ \sin(30^\circ + \theta) & -\cos(30^\circ + \theta) & L \\ \sin(30^\circ - \theta) & \cos(30^\circ - \theta) & L \\ -\cos \theta & -\sin \theta & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

令 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -\sin(30^\circ + \theta) & \cos(30^\circ + \theta) & L \\ -\sin(30^\circ - \theta) & -\cos(30^\circ - \theta) & L \\ \cos\theta & \sin\theta & L \\ \sin(30^\circ + \theta) & -\cos(30^\circ + \theta) & L \\ \sin(30^\circ - \theta) & \cos(30^\circ - \theta) & L \\ -\cos\theta & -\sin\theta & L \end{bmatrix}$,

$\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6]^T, \mathbf{s} = [\dot{x}_a \ \dot{y}_a \ \dot{\theta}]^T$,

则(9)式可以简写成矩阵表达式: $\mathbf{v} = \mathbf{P}\mathbf{s}$, 式中: \mathbf{v} 为全方位轮组线速度矢量, \mathbf{P} 为变换矩阵, \mathbf{s} 为步进式机器人期望速度矢量.

对于 2 轮驱动机构的移动平台, 机器人是非完整约束系统, 向某一方向做直线运动通常需要事先做旋转运动以调整姿态. 而采用我们设计的全方位移动平台, 步进式机器人不存在非完整约束, 它可以向任意方向做直线运动, 而不需要事先做旋转运动; 并且在以直线运动到达目标点的过程中, 同时可以做自身旋转运动以调整机器人的姿态, 从而达到终态所需的姿态角. 同时相比于 3 轮全向驱动平台, 6 轮全方位移动平台能更好地减少机器人运动时的振动, 且大大提高承载能力.

2.3 全方位移动平台的动力学分析

建立如图 6 所示的绝对坐标系 X_aOY_a 和机器人坐标系 $X_rO_rY_r$.

设 m 为步进式机器人质量, f_i 为第 i 个电机提供给机器人的驱动力, 在绝对坐标系 X_aOY_a 下, 设绕步进式机器人中心的转动惯量为 I , 根据牛顿第二定律有: $F_{xa} = m\ddot{x}_a, F_{ya} = m\ddot{y}_a, M_i = I\ddot{\theta}$.

根据各驱动力方向及步进式机器人的姿态, 可以写出具体的动力学方程如下:

$$m\ddot{x}_a = -f_1\sin(\phi + \theta) - f_2\sin(\phi - \theta) + f_3\cos\theta + f_4\sin(\phi + \theta) + f_5\sin(\phi - \theta) - f_6\cos\theta, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x}_a \\ m\ddot{y}_a \\ I\ddot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{k}{r} \begin{bmatrix} -\sin(30^\circ + \theta) & -\sin(30^\circ - \theta) & \cos\theta & \sin(30^\circ + \theta) & \sin(30^\circ - \theta) & -\cos\theta \\ \cos(30^\circ + \theta) & -\cos(30^\circ - \theta) & \sin\theta & -\cos(30^\circ + \theta) & \cos(30^\circ - \theta) & -\sin\theta \\ L & L & L & L & L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} - \frac{3l}{2r} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ 2L^2\dot{\theta} \end{bmatrix}.$$

3 传感检测与蜂窝地图构建

3.1 传感检测子系统

该子系统由 3 部分组成: 机器人环境测障模

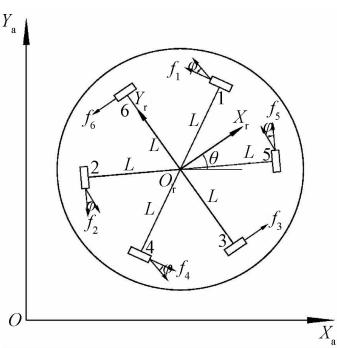


图 6 全方位移动平台的动力学分析

Fig. 6 Dynamics analysis of the omnidirectional mobile platform

$$m\ddot{y}_a = f_1\cos(\phi + \theta) - f_2\cos(\phi - \theta) + f_3\sin\theta - f_4\cos(\phi + \theta) + f_5\cos(\phi - \theta) - f_6\sin\theta, \quad (11)$$

$$I\ddot{\theta} = L \sum_{i=1}^6 f_i. \quad (12)$$

由几何关系可知, 上式中 ϕ 为驱动力 f_i 与相应驱动轮组线速度的夹角, 根据步进式机器人全方位轮结构可知, $\phi = 30^\circ$. 第 i 个轮组的动力学模型可描述为

$$ku_i - l\dot{\psi}_i = I_w\ddot{\psi}_i + f_i r, \quad (13)$$

(13) 式中, k, l 为常数, I_w 表示轮组绕其轴线的转动惯量, r 表示轮组半径, $\dot{\psi}_i, \ddot{\psi}_i$ 表示第 i 个轮组的角速度和角加速度, u_i 表示第 i 个电机的驱动电压. 由于在 (13) 式中, 轮组的转动惯量 I_w 很小, $I_w\ddot{\psi}_i$ 相对于 $f_i r$ 所消耗的扭矩很小, 在实际问题中, 可以采用简化计算形式, (13) 式可近似写为 $ku_i - l\dot{\psi}_i = f_i r$, 则 6 轮全方位步进式机器人系统的动力学模型方程为

块、机器人位移检测模块及激光接收装置 (用于接收环境中校准系统所发激光束, 以在适当时机对机器人的位置进行校准). 在机器人技术中, 红外和超声波是 2 种常用的测量障碍方式. 超声波

传感器价格低廉、硬件简单、应用广泛,同时因其指向特性、盲区特性及镜面反射、低采样率的问题而在应用中受到限制;红外传感器有方向性好,响应速度快等优点,但红外检测方式也有不足,如受限反射面、容易受环境光干扰等。

因为红外和超声波检测之间互不干扰,而 2 种检测方式又可互补长短,故本文选取 2 种方式为机器人设计测障装置以提高可靠性。为适应系统中机器人“六向步进”和蜂窝式地图的创建,2 种传感器的安装方案如图 7 所示,其中双向箭头表示红外检测模块,小方框表示超声波检测模块。

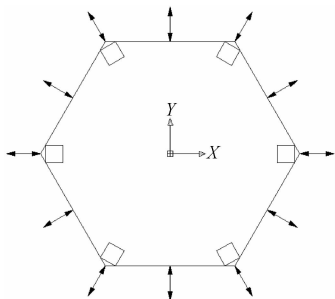


图 7 传感器安装示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the sensors' installation

采用上图所示的安装方式,是因为考虑到超声波散射角较大,如果两两超声波模块相距太近,则容易形成相互干扰,故只安放 6 个在机器人的 6 个行进方向上;另外红外光线方向性相对较好,且成本更低,所以较密集地排布,可提高检测精度。考虑到所选用红外发射管发射张角是 60° ,系统亦可组合相邻 2 红外模块(A,B)进行交互式检测,如,由 A 发射、B 接收,这样可以进一步提高障碍物检测精度。

机器人系统中,常用的里程计有光电编码器、加速度计等,本文针对整体系统方案需求,基于 FPGA 和 6 个光电鼠标设计实现高精度机器人里程计,作为步进式机器人位移检测模块,检测精度达毫米级^[8]。在实际应用中,传感器检测系统受传感器自身精度、环境噪声和人为干扰等因素的影响,测量结果与真值存在偏差。将多传感器实测不确定数据按一定算法^[9-10]进行综合处理,可得出比单一传感器或是单一类传感器更为准确、可靠的信息和结论。我们利用 FPGA 并行读取 6 个光电鼠标输出,并将数据融合算法固化到 FPGA 中进行实现。

航距推算法是应用广泛的移动机器人相对定

位方式,它不依赖外部参照,主要靠机器人自身携带的里程计完成到出发点的距离计量。然而,受里程计精度制约,计量误差随时间积累,航距推算法难以完成长时间相对定位。系统中设计了激光校准装置,可以方便消除里程计积累误差,实现机器人长时间相对定位,也可用激光束引导机器人在局部进行精确定位。

装置示意图 8 所示为激光校准装置系统的接收部分,该装置安放在步进式机器人上,由以下 4 部分构成:PVC 材质的半透膜、PAL 制式红外摄像头、摄像头数据采集模块和视频数据处理软硬件。其中半透膜是用来承接红外激光束并形成一光斑(所述红外激光束来自于固定在环境中适当位置的红外激光发射器),而红外摄像头负责捕捉这一光斑,后续部分则完成摄像头信号的转换和光斑位置提取。

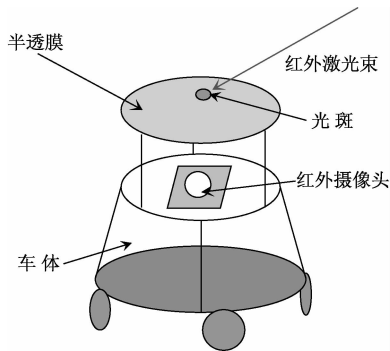


图 8 激光接收装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the laser receiver

3.2 地图栅格编码

如图 9 所示,在栅格平面定义 3 个主方向(定义横向向右为 x 轴的正方向,沿右下箭头方向为 y 轴的正方向,沿左下箭头方向为 z 轴的正方向),并将所有栅格按图所示进行分层编码。栅格位置编码为 (a,b) ,表示该栅格位于第 a 层,是该

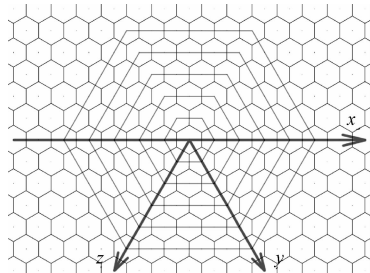


图 9 栅格编码示意图

Fig. 9 Schematic diagram of grid map coding

层栅格下的 b 号栅格. 该编码方式中 $0 \leq b < 6a$.

系统中,机器人沿着地图中的 3 个主方向以“六向步进”方式运动,运动状态标记为 $+X_n$ 、 $-X_n$ 、 $+Y_n$ 、 $-Y_n$ 、 $+Z_n$ 、 $-Z_n$,其中‘ $+/-$ ’表示机器人沿轴的运动方向, n 为步进量. 下式给出由步进式机器人运动量推算出其所在栅格编码值计算方法,极大方便了系统中机器人蜂窝地图构建.

$$\begin{cases} x, z < 0 \\ x, z > 0 \end{cases} \begin{cases} |z| = 2a & (a, b) = (|x|, y + 4x) \\ |z| \neq 2a & (a, b) = (|x|, z + 3x) \end{cases}, \begin{cases} z = 2a & (a, b) = (x, |y| + x) \\ z \neq 2a & (a, b) = (x, z) \end{cases}.$$

4 路径规划

4.1 蜂窝地图中步进式机器人局部路径规划

采用正六边形作为栅格单元,从而构成栅格化蜂窝地图,并进行路径规划,是因为对于每一个正六边形来说,它到周围 6 个相邻的正六边形中心的距离相同,这是一种能够方便引入波传播路径规划的算法;而对于每一个正方形来说,它到周围 8 个相邻的正方形中心的距离有 2 种取值,造成在做路径规划时,基于步数和路径长度的评价

标准,得出的最优结果不同. 所以较之于传统的四边形栅格地图,它能更好地适应圆形波的传播,而相比前人提出的扇形栅格地图,该地图表达方式更易于机器人对地图的实时操作,无需动态构建极坐标系.

基于蜂窝地图的特性,本文采用“六向分块”思想进行局部路径规划. 在已知起始点和目标点的坐标之后,就近调整步进式机器人到两点所对应栅格的中心点,直线连接起始栅格和目标栅格中心,并计算连线同水平方向夹角,根据夹角大小,确定步进式机器人下一步将要前进到的栅格. 行进中,机器人可通过栅格边长和目标栅格编码计算出目标栅格中心坐标,从而得出当前运动向量与水平轴夹角,并以“夹角最小化”作为启发函数,决定下一步将要前进到的相邻栅格. 图 10 是六向分块式局部路径规划算法流程图.

所谓死角现象,是指在起始点到目的地的行进路径上,步进式机器人遇到“U”形的障碍物,这时,根据避障^[11]规则,步进式机器人行进到优先权高的相邻栅格;再次循环时,发现刚才路过的那个栅格成为这一次循环中优先权最高的相邻栅格,于是退回刚才路过的栅格,从而陷入死循环.

解决方法是用一个数组记下步进式机器人已

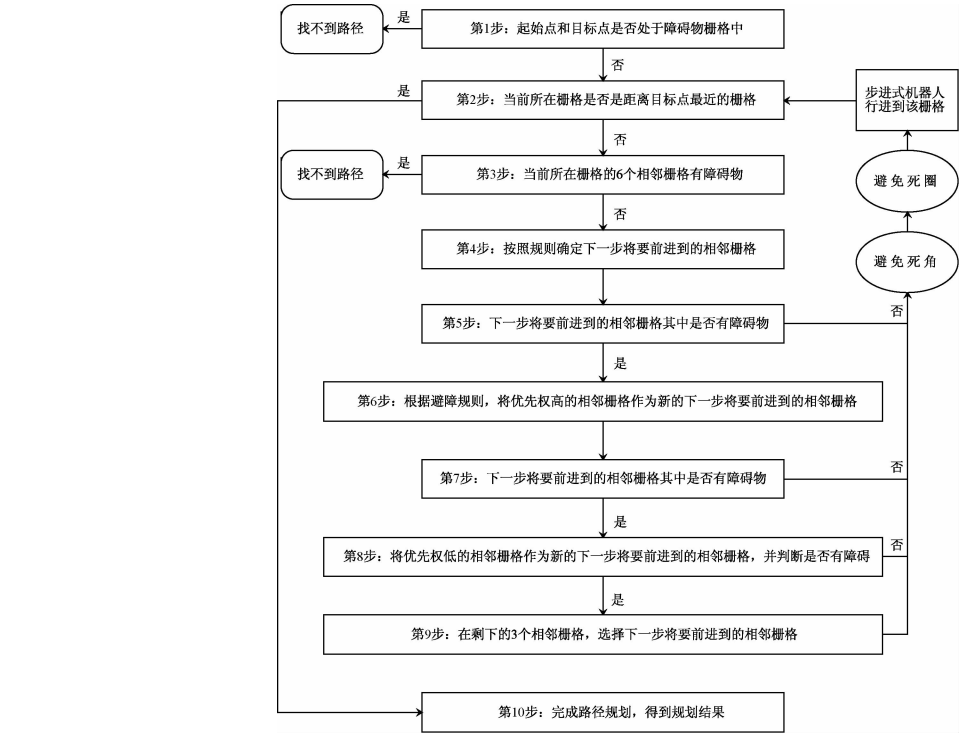


图 10 六向分块式局部路径规划的程序流程

Fig. 10 Flowchart of local path planning by “dividing moving direction into six regions”

通过的栅格,在得到下一步将要前进到的相邻栅格的规划结果后,判断这个相邻栅格是否是步进式机器人已通过的栅格,如果是,说明步进式机器人陷入死角. 此时在当前步进式机器人所在栅格剩下的 5 个栅格中寻找无障碍且未曾通过的栅格. 若有,步进式机器人前进到该相邻栅格,继续路径规划;若没有,说明步进式机器人还得再向后回溯一步,直到完全退出死角.

“在当前步进式机器人所在栅格剩下的 5 个栅格中寻找无障碍且未曾通过的栅格”这一个步骤中,如果继续按照逆时针顺序确定相邻栅格的优先权高低,会存在潜在的危险,即陷入更大的一个死角中. 也就是说,步进式机器人在一步范围内不会遭遇死角,但是可能前进了 3 步以上时,发现自己又回到原地,可以称之为“死圈”现象. 这是因为每一步执行时,采用同样的判断标准来确定优先权大小,而六边形蜂窝栅格地图又具有高度的对称性,所以作为局部规划来说,有可能陷入在一个大范围中死循环的现象.

在死角问题中,通过回溯,总可以找到开始进

入死角的起始点;而在死圈问题中,形成的是一个大范围中的死循环,很难找到开始进入死圈的起始点,这就导致死圈问题难以解决. 想要解决死圈问题,可以在确定优先级时,不用固定标准,而采用随机数、轮盘赌或遗传算法中的变异操作,来打破这种潜在的对称性.

在栅格化蜂窝地图中,采用六向分块式路径规划,并躲避随机生成的障碍物. 遇到死角时,取 \tan 小的路径或取 \tan 大的路径都可走出“困境”,如图 11 所示. 其中,边框被加粗的栅格代表被障碍物占据的栅格,其余的是空闲栅格;小方框表示步进式机器人开始陷入死角;step 表示从距离起始点最近的栅格中心点到达距离目标点最近的栅格中心点,步进式机器人所用步数;distance 表示从起始点到达目标点的路径总长度; t_i 代表程序运行时间.

从仿真结果可以看出,采用“取 \tan 值小的路径”和“取 \tan 值大的路径”这 2 种策略,步进式机器人都可以完成从起始点到达目标点的路径规划. 而且随着障碍栅格相对于起始点和目标点位

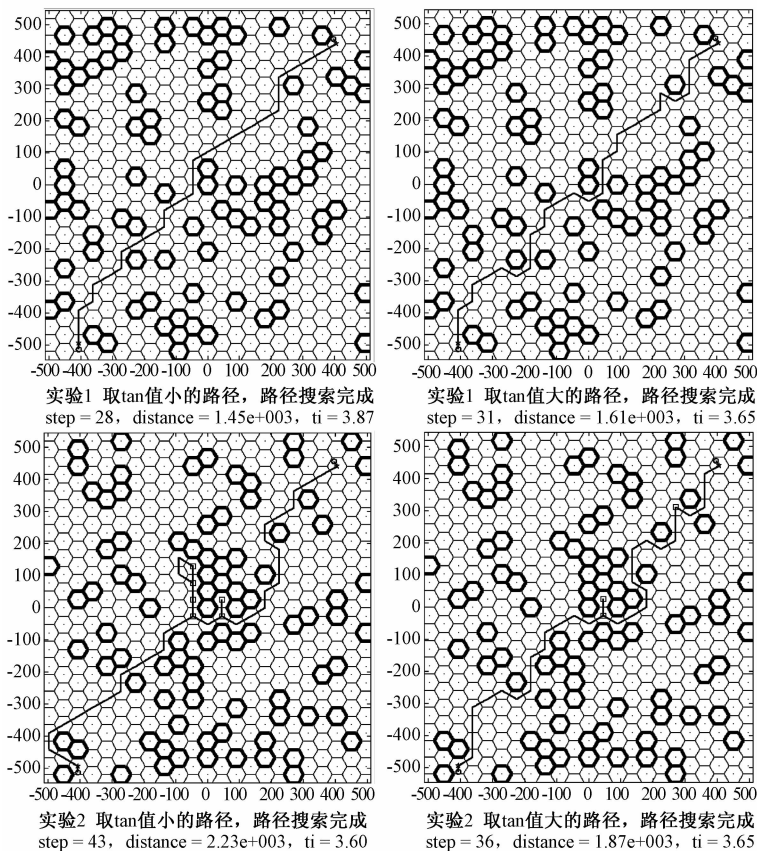


图 11 六向分块式局部路径规划仿真结果

Fig. 11 Simulation results of local path planning

置关系的不同,2 种策略都有可能成为针对特定情况下的较优路径. 由于六向分块式局部路径规划时间复杂度小,因此在实际应用中,步进式机器人分别采用 2 种策略得到 2 条规划路径,选择其中的较优路径作为最后指导运行的轨迹.

“六向分块”路径规划最大的优点是,步进式机器人只要知道起始点和目的地的坐标,以及栅格地图中栅格边长,即可完成路径规划任务. 步进式机器人在任意一个栅格中,通过传感器扫描,只需要知道周围 6 个相邻栅格是否有障碍物;而不需要事先构建带有障碍物的栅格地图,减小了步进式机器人所需的存储空间,也使每一步循环所需要处理的情况大大简化,提高了系统的实时性. 但是通过仿真研究发现:步进式机器人有时会陷入死角、死圈,而且规划出的路径往往只是局部最优^[12],为此,论文进一步讨论栅格状态下步进式机器人全局路径规划.

4.2 蜂窝地图中步进式机器人全局路径规划

为寻找离散栅格状态下全局路最优路径,本文采取分层思想. 首先,利用遗传算法,在连续的环境地图中规划出一条全局最优路径^[13-14];然后,将连续的环境地图用蜂窝栅格化,并在蜂窝地图上采用局部路径规划方法进行局部路径查找. 这一路径规划思想的选取是由整个系统定位精度要求决定的. 按精度要求,机器人定位分为 2 个阶段:一是机器人由当前位置奔趋事发点的旅途定位,二是机器人到达事发点后执行相关任务时的作业定位. 在旅途中,只要不会发生严重的事,步进式机器人的实时精确位姿并不是我们所关注的,所以可以采用平滑路径,以尽可能短的路径绕开所有障碍物,接近目标点. 而第 2 阶段,即当步进式机器人行进到目标点附近后,由于下面要完成相应的服务任务,如用机械手夹取水杯等,步进式机器人的位置和精度就至关重要了. 仿真结果如图 12 所示,其中 $ans = 3.663\ 138\ 044\ 845\ 680e + 003$ 代表最终不重不漏地通过所有目标点,并回到起始位置的路径总长度, $ti = 2.645\ 836\ 373\ 058\ 587e + 002$ 代表程序运行时间. 图 12 中圆圈代表各个目标点的实际位置,五角星代表最接近各个目标点的栅格中心位置.

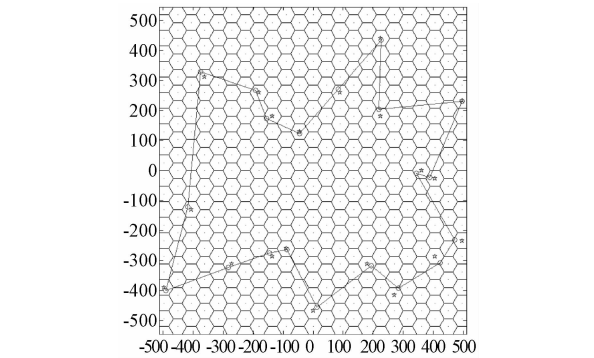


图 12 蜂窝地图中全方位步进式机器人全局路径规划仿真结果

Fig. 12 Simulation results of global path planning based on cellular grid map

5 结论

本文从硬件实现和软件算法 2 个方面,对基于蜂窝地图的全方位步进式机器人进行设计与实现,设计出适用于室内智能空间中、可以自主前进和精确定位的全方位步进式机器人系统. 系统主要包括了对全方位轮系结构和步进式机器人整体结构、步进电机驱动层和传感检测层的设计与实现;并基于所设计实现的硬件实体,研究了步进式机器人系统相关的软件算法,其中包括步进式机器人蜂窝地图创建、多传感器的数据融合算法、基于蜂窝地图的局部路径规划方法和全局路径规划方案. 最后通过实验证明了该全方位步进式机器人系统,在实际运行中的精确性和鲁棒性.

参考文献

[1] Reetz Eike S, Tonjes Ralf, Baker Nigel. Towards global smart spaces: Merge wireless sensor networks into context-aware systems[C] // 5th IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC). Italy: Modena, 2010: 337-342.

[2] Blum N, Yamada J, Fukayama A, et al. A smart information sharing architecture in a multi-access network, multi-service environment [C] // International Conference on Communications (ICC). Japan: Kyoto, 2011: 1-6.

[3] Varkonyi-Koczy A R, Tusor B. Human-computer interaction for smart environment applications using fuzzy hand posture and gesture models [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1505-1514.

- Dependable Systems and Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2010: 566-571.
- [5] Antunes N, Vieira M. Detecting SQL injection vulnerabilities in Web services[C] // The 4th Latin-American Symposium on Dependable Computing. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 17-24.
- [6] Antunes N, Laranjeiro, Vieira M, et al. Effective detection of SQL/XPath injection vulnerabilities in Web services[C] // 2009 IEEE International Conference on Services Computing. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 260-267.
- [7] OWASP. WSFuzzer[CP/OL]. (2010-09-13) [2012-03-03]. https://www.owasp.org/index.php/Category:OWASP_WSFuzzer_Project.
- [8] MeiJunjin. An approach for SQL injection vulnerability detection[C] // The Sixth International Conference on Information Technology: New Generations. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 1411-1414.
- [9] Martin M, Lam M S. Automatic generation of XSS and SQL injection attacks with goal-directed model checking[C] // The 17th USENIX Security Symposium. California: USENIX Association Berkeley, 2008: 31-43.
- [10] Fu X, Lu X, Peltserver B, et al. A static analysis framework for detecting SQL injection vulnerabilities[C] // The 31st Annual International Computer Software and Applications Conference. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007: 87-94.
- [11] Kosuga Y, Kono K, Hanaoka M, et al. Sania: Syntactic and semantic analysis for automated testing against SQL injection[C] // The 23rd Annual Computer Security Applications Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2007: 107-116.
- [12] Fielding R T. Architectural styles and the design of network-based software architectures[D]. Irvine: University of California, Irvine, 2000.
- [13] Atwood M, Balfanz D, Bounds D, et al. OAuth core 1.0 revision A[S/OL]. (2009-06-24) [2012-01-03]. <http://oauth.net/core/1.0a/>.
- [14] Hammer-Lahav E. RFC 5849, The OAuth 1.0 protocol[S/OL]. (2010-04-30) [2012-01-03]. <http://tools.ietf.org/html/rfc5849>.
- [15] Hammer-Lahav E. The OAuth 2.0 protocol[S/OL]. (2011-09-22) [2012-01-03]. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-oauth-v2-22>.
- [16] Acunetix. Acunetix Web vulnerability scanner[CP/OL]. (2011-12-27) [2012-01-03]. <http://www.acunetix.com/vulnerability-scanner/>.
- [17] IBM. IBM rational AppScan[CP/OL]. (2011-12-27) [2012-01-03]. <http://www-01.ibm.com/software/awdtools/appscan/>.
- [18] Chinotec Technologies Company. Paros[CP/OL]. (2006-08-08) [2012-01-03]. <http://www.parosproxy.org/>.

(上接第 402 页)

- [4] Ruiz D, Urena J, Garcia J C, et al. Simultaneous mobile robot positioning and LPS self-calibration in a smart space[C] // International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Spain: Henares, 2010: 2865-2870.
- [5] Anousaki G C, Kyriakopoulos K J. Simultaneous localization and map building of skid-steered robots[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007, 14(1): 79-89.
- [6] Merhy B A, Payeur P, Petriu E M. Application of segmented 2-D probabilistic occupancy maps for robot sensing and navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(12): 2827-2837.
- [7] Olivier K, Francois C. Multi-sensor data fusion in sensor-based control: Application to multi-camera visual servoing[C] // International Conference on Robotics and Automation (ICRA). France: Beaulieu, 2011: 4518-4523.
- [8] Yu C, Gao X, Qiu Q W. Design and implementation of robot odometer based on multi-sensor data fusion[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(1): 53-57 (in Chinese).
- 余翀, 高翔, 邱其文. 基于多传感器数据融合的机器人里程计设计与实现[J]. 传感技术学报, 2012, 25(1): 53-57.
- [9] Xu S S, Lin X G. Asynchronous multi-sensor hierarchical adaptive data fusion algorithm[C] // International Conference on Complex Medical Engineering (CME). China: Harbin, 2011: 285-288.
- [10] Jemin G, Lancem K. Multi-sensor data fusion: An unscented least squares approach[C] // Proceedings of the 14th International Conference on Information Fusion (FUSION). USA: Chicago, 2011: 1-8.
- [11] Maarefdoust R, Amani M. Risk reduction in autonomous local path-planning for a mobile robot with set fitness function[C] // 3rd International Conference on Computer Research and Development (ICCRD). China: Shanghai, 2011: 195-198.
- [12] Lee S K, Lee S, Nam C J, et al. Local path planning scheme for car-like vehicle's shortest turning motion using geometric analysis[C] // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). South Korea: Hawolgok, 2010: 4761-4768.
- [13] Tsai C C, Huang H C, Chan C K. Parallel elite genetic algorithm and its application to global path planning for autonomous robot navigation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4813-4821.
- [14] Liu Y J, Wang H Y, Xie J. Global path planning method based on geometry algorithm in a strait environment[C] // International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE). China: Wuhan, 2010: 1066-1069.