

# 一种服务机器人家庭全息地图构建方法研究<sup>\*</sup>

吴培良, 孔令富, 赵逢达

(燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 提出了一种满足家庭服务机器人环境认知和智能服务需要的融合环境和目标信息的家庭全息地图。设计了局部几何—全局拓扑的全息地图分层表示模型。分析了机器人坐标系、局部环境坐标系和目标的相对关系,给出了机器人局部环境自定位算法和基于坐标变换的服务机器人全息地图构建方法。家庭环境下机器人实物实验表明,基于局部几何—全局拓扑表示的全息地图,服务机器人路径规划和任务执行效率得到有效提升。

**关键词:** 家庭服务机器人; 家庭全息地图; 几何—拓扑分层模型; QR code 标签

**中图分类号:** TP242.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)03-0981-05

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.047

## Research on constructing of household holographic map for service robot

WU Pei-liang, KONG Ling-fu, ZHAO Feng-da

(College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** This paper proposed a novel household holographic map, which combined information of environment and objects, to meet the needs of intelligent cognition and operation for home service robot. It designed a locally-metric and globally-topological hierarchical model. Analyzed the relationships between robot coordinate, local environment coordinate and object, and then presented both the algorithm for service robot self-localization within local environment and the methods to build the holographic map based on coordinate transformation. The robot experiments in real household environments show that according to the holographic map described with the hierarchical metric-topological model, the efficiencies of both path planning and task execution for robot are obvious improved.

**Key words:** home service robot; household holographic map; hierarchical metric-topological model; QR code label

## 0 引言

在移动式服务机器人研究领域,环境地图是机器人工作环境的抽象化表示,是机器人感知并适应环境,继而完成路径规划和定位导航,并最终提供特定服务的依据。目前,对于环境地图表示方法已有许多文献从不同侧面给予了讨论<sup>[1,2]</sup>。从机器人工作环境上看可分为室内结构化环境地图和室外非结构化环境地图;从环境的描述方法来看,有几何地图、拓扑地图和混合地图等;从描述的空间范围上看,有二维平面地图和三维立体地图等。

作为服务机器人的重要分支,家庭服务机器人工作于家庭室内结构化环境中,对于这种结构事先已知的确定性环境的地图描述方法研究较为广泛。文献[3]给出了一种基于几何特征的室内服务机器人环境地图表示方法。文献[4]提出了一种适于机器人在大规模室内环境下自主导航的新型拓扑地图;文献[5,6]综合考虑几何和拓扑两种表示方法的优缺点,创建了几何—拓扑混合环境地图,在全局空间采取拓扑描述以保证全局连续性,在具体的局部环境中则采用几何表示以利于机器人精确定位。上述地图模型仅仅约束了机器人的可活动空间,而没有融入操作目标的必要信息,利用这种地图,机器人能够

解决“我在哪里”和“我怎样到达那里”的问题,但由于目标在地图中没有体现,导致机器人对环境各目标及其分布缺乏必要的认知,难以自主完成“目标在哪里”和“我要去目标那里”的任务。可见,基于目前地图的机器人路径规划和定位导航难以满足家庭服务机器人任务的需要。

此外,尽管机器人对操作目标的识别已得到了深入研究,基于颜色<sup>[7]</sup>、局部兴趣点<sup>[8]</sup>等视觉特征对某一具体目标或某类目标的识别具有较高的成功率。然而,家庭环境作为人们日常生活的主要场所,其中目标繁多、背景杂乱,并呈现出一定的动态性,而且,目标的深层次信息往往并不能简单地通过机器人传感器数据获得。为了提供高效、智能服务,家庭服务机器人必须能够有效地、深层次地理解其所在的工作环境(包括整个家庭空间、操作目标、服务对象等),并实时感知其变化。

基于上述考虑,本文把融合家庭全局空间及其中目标资源分布和动态变化的环境称为服务机器人的全息家庭环境,记录全息家庭环境信息的地图称为服务机器人的家庭全息地图。这里,全息体现了两个层次的含义:a)全息地图记录了环境及其中目标的全局空间分布信息;b)全息地图记录了环境及其中目标的动态变化信息。本文设计了局部几何—全局拓扑的全息地图分层表示模型,并给出了基于坐标变换的服务机器人全息地图构建方法。

**收稿日期:** 2009-08-11; **修回日期:** 2009-09-27      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60975062); 国家“863”计划资助项目(2006AA04Z212)

**作者简介:** 吴培良(1981-),男,河北晋州人,博士研究生,主要研究方向为家庭服务机器人、机器人 SLAM (peiliangwu@gmail.com); 孔令富(1957-),男,教授,博导,博士,主要研究方向为智能信息处理、智能机器人; 赵逢达(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为机器人 SLAM、家庭服务机器人、足球机器人。

# 1 家庭全息地图的表示

## 1.1 局部几何—全局拓扑分层模型

局部几何—全局拓扑的混合分层环境模型一方面利用全局拓扑结构保持了全局一致性,另一方面基于局部几何特征提高了机器人在非拓扑节点位置处的定位精度<sup>[5,6]</sup>。全局拓扑是在逻辑角度上的环境描述,其节点往往并不是单纯的某一个空间点,而是代表包含一定量局部环境信息的标志该节点特性的局部几何地图。机器人从一个节点运动到另一个节点,即机器人从一个局部几何地图进入另一个局部几何地图,在此情况下要求全局拓扑地图能够给出这种状态变化的描述,这就是拓扑边的作用。在传统的几何—拓扑地图中,几何特征是指由机器人传感器获取的环境高级特征,如线段、拐角等,拓扑节点指不同通道之间的交叉区域或只有一个出口的区域,拓扑边描述两个拓扑节点之间的连通性,当两个节点间存在拓扑边时表明这两个节点之间存在通路。

## 1.2 全息地图表示方法

本文借鉴传统几何—拓扑地图的思想,并对其进行改进以适于描述融合家庭环境及其中目标分布的家庭全息地图。全息地图采用局部几何—全局拓扑的两层结构:局部层面上,局部几何地图分别由局部环境地图和目标信息构成;全局层面上,在传统拓扑地图基础上引入目标拓扑节点及其拓扑边的概念,即将拓扑节点分为环境节点和目标节点两种,其中环境节点对应局部环境特征模型及其数据,目标节点对应目标过完备特征集模型及其数据。由于拓扑节点分别表征局部环境或目标,分两种情况定义拓扑边:a)当拓扑边连接两个环境节点时,该拓扑边表征两个局部环境地图之间的可达路径信息,以供机器人路径规划;b)当拓扑边连接目标节点和环境节点时,该拓扑边表征目标节点相对于环境节点的空间位置信息,以供机械臂操作规划。该家庭全息地图的公式表述如下:

$$M = \{V, E\} \tag{1}$$

$$V = V_e \cup V_o = \{v_1, v_2, \dots, v_m, \dots, v_M\} \tag{2}$$

$$v_m = \begin{cases} \{H, L_m\} & v_m \in V_e \\ \{F, G_m\} & v_m \in V_o \end{cases} \tag{3}$$

$$E = E_e \cup E_o = \{e_0, e_1, \dots, e_n, \dots, e_N\} \tag{4}$$

$$e_n = \begin{cases} \{v_i v_j, S_{ij}, w_{ij}\} & v_i \in V_e \text{ and } v_j \in V_e \\ \{v_i v_j, P_{ij}, k_{ij}\} & v_i \in V_o \text{ and } v_j \in V_e \end{cases} \tag{5}$$

其中: $M$ 表示家庭全息环境的全局拓扑地图; $V$ 表示拓扑节点集,由环境拓扑节点集合 $V_e$ 和目标拓扑节点集合 $V_o$ 的并集构成。对于 $V$ 中的拓扑节点 $v_m$ ,若 $v_m$ 为环境拓扑节点,有局部几何地图模型 $H$ 和该局部几何地图的特征数据 $L_m$ 与之绑定;若 $v_m$ 为目标拓扑节点,则有目标过完备特征集模型 $F$ 和该目标的过完备特征集数据 $G_m$ 与之绑定。 $E$ 表示拓扑边集,由连接环境—环境拓扑节点的拓扑边集合 $E_e$ 和连接目标—环境拓扑节点的拓扑边集合 $E_o$ 的并集构成。对于 $E$ 中的每一条边 $e_n$ ,当 $e_n$ 连接两个环境拓扑节点 $v_i, v_j$ 时,有表示节点 $v_i, v_j$ 之间通路的说明序列 $S_{ij}$ 和表示两节点所对应环境坐标系间位姿关系的参数 $w_{ij}$ 与之对应;当 $e_n$ 连接目标拓扑节点 $v_i$ 和环境拓扑节点 $v_j$ 时,有表示节点 $v_i, v_j$ 之间相对关系的说明序列 $P_{ij}$ 和表示目标在环境坐标系中空间位置的参数 $k_{ij}$ 与之对应。

直观起见,图1给出了一个简易的家庭全息地图实例以描

述该问题的典型场景,选择走廊路口、房门和水杯三种常见环境特征或机器人操作目标构建局部几何地图。从局部几何地图中提取拓扑节点,将一系列拓扑节点按照一定的拓扑结构组织起来构建出全局拓扑地图。

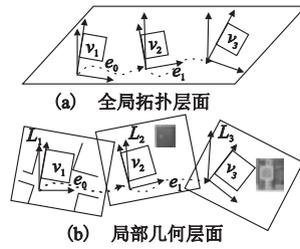


图1 几何—拓扑两层结构的家庭全息地图实例

## 2 家庭全息地图的构建

### 2.1 机器人传感器模型

本文所用家庭服务机器人主体为一台 Pioneer III型移动机器人,为其配备了一套由 PTZ 摄像机和手眼摄像机组成的双目系统(图2),机械手系统安装在机器人顶部以获得较大的操作空间,采用 Logitech S5500 作为手眼摄像机固定安装在机械手末端平台,该摄像机直接通过 USB 2.0 接口连接到机器人主机上。PTZ 摄像机采用 Canon VC-C4,通过图像采集卡连接到机器人主机上。不失一般性,以机械手基座坐标系作为机器人坐标系 $C_R$ ,假设 $X_{OR} = (x_{OR}, y_{OR}, z_{OR}, 1)^T$ 为坐标系 $C_R$ 中目标点 Obj 的空间齐次坐标, $m_h = (u_h, v_h, 1)^T$ 和 $m_p = (u_p, v_p, 1)^T$ 分别为空间点 Obj 在手眼摄像机和 PTZ 摄像机像平面上的像点齐次坐标,两摄像机均采用小孔成像模型,其成像过程由下方方程表示:

$$\lambda_h m_h = [K_h \ 0] \begin{bmatrix} R_h & t_h \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} X_{OR} \tag{6a}$$

$$\lambda_p m_p = [K_p \ 0] \begin{bmatrix} R_p & t_p \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} X_{OR} \tag{6b}$$

其中: $0$ 为 $3 \times 1$ 的零向量; $K_h$ 和 $K_p$ 分别为手眼摄像机和 PTZ 摄像机的内参矩阵,可离线标定。 $[R_h \ t_h]$ 和 $[R_p \ t_p]$ 分别为两摄像机相对于机器人坐标系的外参矩阵,其计算过程如下:

对于手眼摄像机,机械手基座坐标系(即机器人坐标系)到机械手末端平台坐标系的变换矩阵 $[R_1 \ t_1]$ 可通过由机械手控制器直接读出,机械手末端平台坐标系与手眼摄像机坐标系之间的手眼关系矩阵 $[R_a \ t_a]$ 为一定值,故可通过离线标定<sup>[9]</sup>,则手眼摄像机在机器人坐标系下的外参数矩阵 $[R_h \ t_h]$ 可由下式得到:

$$[R_h \ t_h] = [R_1 \ t_1][R_a \ t_a] \tag{7}$$



图2 本文所用服务机器人

对于 PTZ 摄像机,机械手基座坐标系与 PTZ 云台坐标系

的变换矩阵 $[R_2 \ t_2]$ 为一定值,故可通过离线标定。不妨假设PTZ摄像机满足以下两个条件:旋转中心和光心重合,pan和tilt的旋转轴正交。基于此,PTZ云台坐标系与PTZ摄像机坐标系的变换矩阵 $[R_b \ t_b]$ 为

$$R_b = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & 0 & \sin \theta_p \\ -\sin \theta_p \sin \theta_T & \cos \theta_T & \cos \theta_p \sin \theta_T \\ -\sin \theta_p \cos \theta_p & -\sin \theta_T & \cos \theta_p \cos \theta_T \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$t_b = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (8b)$$

其中: $\theta_p$ 和 $\theta_T$ 分别为PTZ摄像机绕云台坐标系的 $x$ 轴摆动(pan)和 $y$ 轴俯仰(tilt)的角度,其值可由云台控制器直接读出。故PTZ摄像机在机器人坐标系下的外参数矩阵可由下式得到:

$$[R_p \ t_p] = [R_2 \ t_2][R_b \ t_b] \quad (9)$$

除双目视觉外,机器人还配备激光测距仪SICK LMS-200作为外部传感器,里程仪和数字罗盘作为内部传感器,相关传感器模型已在文献[10]中给出,在此不作详细介绍。通过分析传感器获取的周围环境数据,机器人同时完成自身定位和家庭全息地图创建。

## 2.2 局部地图的构建

### 2.2.1 局部环境地图构建及机器人定位

在全息地图的几何—拓扑结构中,局部层面上几何地图由局部环境地图和目标信息构成。本文中采用环境中的特征点、线段、路口和拐角作为局部环境特征模型 $H$ 表征局部环境地图,即

$$H = \{ \text{point, line, cross, corner} \} \quad (10)$$

其中:环境特征主要利用激光测距仪和机器人视觉提取,对于点、线段、通路和拐角等环境特征的提取已有众多文献介绍<sup>[6,10,11]</sup>,在此不再赘述。

按照模型 $H$ 从获取的当前环境数据中提取出点、线段等高级特征之后,离线地建立其与当前局部环境地图 $L$ 的坐标系 $C_L$ 的映射。由于机器人运动在与地面平行的水平面上,简化起见,设定机器人坐标系 $C_R$ 和局部环境地图坐标系 $C_L$ 的 $z$ 轴均竖直向上,且两坐标系的 $x$ - $y$ 坐标平面重合,则机器人坐标系 $C_R$ 相对于当前局部环境地图坐标系 $C_L$ 仅存在沿 $x$ - $y$ 坐标平面内的平移和绕 $z$ 轴的旋转。若 $C_R$ 相对于 $C_L$ 的位姿参数用 $[R_{RL} \ t_{RL}]$ 表征,则有

$$R_{RL} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{RL} & -\sin \theta_{RL} & 0 \\ \sin \theta_{RL} & \cos \theta_{RL} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11a)$$

$$t_{RL} = [x_{RL} \ y_{RL} \ 0]^T \quad (11b)$$

其中: $x_{RL}$ 、 $y_{RL}$ 分别为坐标系 $C_R$ 的原点在坐标系 $C_L$ 中的 $x$ 、 $y$ 坐标, $\theta_{RL}$ 为坐标系 $C_R$ 相对于坐标系 $C_L$ 绕 $z$ 轴旋转的角度。为表述方便,后面将用 $[R_{RL}(\theta_{RL}) \ t_{RL}(x_{RL}, y_{RL})]$ 表示 $C_R$ 相对于 $C_L$ 的位姿参数 $[R_{RL} \ t_{RL}]$ 。

在线阶段,利用实时获取的环境特征与离线建立的局部环境地图坐标系中的特征进行匹配,进而求解机器人坐标系 $C_R$ 与所在局部环境坐标系 $C_L$ 之间的位姿参数 $[R_{RL}(\theta_{RL}) \ t_{RL}(x_{RL}, y_{RL})]$ ,此即为机器人自定位。这也是后续全局拓扑地图构建的关键。

假设特征点Obj在机器人坐标系 $C_R$ 下的齐次坐标为 $X_{OR} = (x_{OR}, y_{OR}, z_{OR}, 1)^T$ ,在局部环境地图坐标系 $C_L$ 中对应点坐

标为 $X_{OL} = (x_{OL}, y_{OL}, z_{OL}, 1)^T$ ,不难推导出如下关系:

$$x_{OL} = x_{RL} + \sqrt{x_{OR}^2 + y_{OR}^2} \cos(\beta + \theta_{RL}) \quad (12a)$$

$$y_{OL} = y_{RL} + \sqrt{x_{OR}^2 + y_{OR}^2} \sin(\beta + \theta_{RL}) \quad (12b)$$

其中: $\beta = \arctan(y_{OR}/x_{OR})$ 。上式存在三个未知数,因此至少需要两对特征点对,即可求得 $x_{RL}$ 、 $y_{RL}$ 和 $\theta_{RL}$ ,进而根据式(11a)(11b)得到机器人坐标系 $C_R$ 与局部环境坐标系 $C_L$ 之间的位姿参数 $[R_{RL}(\theta_{RL}) \ t_{RL}(x_{RL}, y_{RL})]$ 。实际中,选取多组特征点对以提高 $x_{RL}$ 、 $y_{RL}$ 和 $\theta_{RL}$ 的求解精度。

### 2.2.2 目标过完备特征集构建

目标过完备特征集尽量保留目标的各种信息,用于在后续机器人工作过程中跟踪和定位变动的目标,进而完成全息地图中相应目标节点和拓扑边的更新。本文中以双目视觉作为主要传感器,选择目标的尺寸、纹理、主色集和兴趣点作为目标过完备特征集模型 $F$ 表征目标,即

$$F = \{ \text{size, texture, ODCICS, SIFT} \} \quad (13)$$

其中:size为目标的尺寸特征,其数据可通过服务机器人双目主动视觉获取;texture、ODCS和SIFT分别为目标的纹理、主色集和兴趣点SIFT特征,其数据均通过图像处理获取<sup>[7,8]</sup>。依据过完备特征集 $F$ ,目标特征可在机器人建图过程中在线提取,但基于实时性考虑,本文利用服务机器人离线提取目标过完备特征集数据。

## 2.3 全局拓扑地图的构建

在提取出局部环境地图和目标信息之后,需要将其映射为全局拓扑层面上的相应拓扑节点。广义Voronoi图(generalized Voronoi graph, GVG)易于描述室内结构化环境<sup>[12]</sup>,其节点对应于走廊的交叉口或者一个开放的区域(如房间、电梯等)。本文采用GVG模型来描述全息地图,不同之处在于其拓扑节点由式(2)中的环境节点和目标节点构成,环境节点仍对应交叉路口或开放区域,目标节点则从家庭常见目标提取得到。

对于拓扑地图中的某一环境或目标拓扑节点,按照一定准则将该拓扑节点与地图中其他已建拓扑节点连接起来,即构建拓扑边,包括环境—环境拓扑边的构建和目标—环境拓扑边的构建。

### 2.3.1 环境—环境拓扑边的构建

从运动空间上看,机器人运动空间可以近似看做是与地表面平行的二维平面,通过坐标变换得到式(5)中环境拓扑节点间的拓扑边,以及表示二维平面内通路关系的说明序列和记录两局部环境地图坐标系的相对位姿参数。

假设在 $t_i$ 时刻,机器人处于由环境拓扑节点 $v_m$ 表征的局部环境地图 $L_m$ 中,此时机器人坐标系 $C_{Ri}$ 相对于 $L_m$ 坐标系 $C_{Lm}$ 的位姿参数 $[R_{RiLm}(\theta_{RiLm}) \ t_{RiLm}(x_{RiLm}, y_{RiLm})]$ 已通过2.2.1节计算得到。在 $t_j(j > i)$ 时刻,机器人运动到由环境拓扑节点 $v_n$ 表征的局部环境地图 $L_n$ 中,且此时机器人坐标系 $C_{Rj}$ 相对于 $L_n$ 坐标系 $C_{Ln}$ 的位姿参数 $[R_{RjLn}(\theta_{RjLn}) \ t_{RjLn}(x_{RjLn}, y_{RjLn})]$ 也已通过2.1节计算得到。以坐标系 $C_{Lm}$ 为基准坐标系, $\theta_k$ 为 $t_k(i \leq k \leq j-1)$ 时刻机器人相对于基准坐标系的航向角, $s_k$ 为 $t_k$ 到 $t_{k+1}$ 时刻机器人行驶过的距离,其值由里程仪换算得到; $\Delta\theta_k$ 为 $t_k$ 到 $t_{k+1}$ 时刻机器人航向角的变化量,其值可以从数字罗盘直接读出,则机器人坐标系 $C_{Rj}$ 相对于局部地图 $L_m$ 坐标系 $C_{Lm}$ 的位姿 $[R_{RjLm}(\theta_{RjLm}) \ t_{RjLm}(x_{RjLm}, y_{RjLm})]$ 可通过如下航迹推算公式得到:

$$x_{RjLm} = x_{RiLm} + \sum_{k=i}^{j-1} s_k \cos \theta_k \quad (14a)$$

$$y_{RjLm} = y_{RiLm} + \sum_{k=i}^{j-1} s_k \sin \theta_k \quad (14b)$$

$$\theta_{RjLm} = \theta_{RiLm} + \sum_{k=i}^{j-1} \Delta\theta_k \quad (14c)$$

与式(11)类似,环境拓扑节点  $v_n$  到  $v_m$  之间拓扑边的参数(即局部环境几何地图  $L_n$  到  $L_m$  的位姿关系)  $w_{nm}$  可记为  $[R_{LnLm}(\theta_{LnLm}) \quad t_{LnLm}(x_{LnLm}, y_{LnLm})]$ , 则其参数可通过如下坐标变换得到:

$$x_{LnLm} = x_{RjLm} - \sqrt{x_{RjLm}^2 + y_{RjLm}^2} \cos(\alpha + \theta_{LnLm}) \quad (15a)$$

$$y_{LnLm} = y_{RjLm} - \sqrt{x_{RjLm}^2 + y_{RjLm}^2} \sin(\alpha + \theta_{LnLm}) \quad (15b)$$

$$\theta_{LnLm} = \theta_{RjLm} - \theta_{RiLm} \quad (15c)$$

其中  $\alpha = \arctan(y_{Rj}/x_{Rj})$ 。

### 2.3.2 目标—环境拓扑边的构建

利用平面扫描式激光测距仪难以定位分布在三维空间中的操作目标,故空间目标定位主要通过机器人双目主动视觉完成。当机器人能够从目标所在局部环境到达并操作该目标时,建立式(5)中的连接目标节点与所在环境节点的拓扑边,以及描述两个节点间的空间位置关系的说明序列和记录目标在局部环境坐标系下的空间位置参数。

假设在  $t_i$  时刻,机器人坐标系  $C_{Ri}$  相对于其所在局部环境地图  $L_m$  坐标系  $C_{Lm}$  的位姿参数  $[R_{RiLm}(\theta_{RiLm}) \quad t_{RiLm}(x_{RiLm}, y_{RiLm})]$  已由 2.2.1 节得到。在机器人坐标系  $C_{Ri}$  下,机器人双摄像机的外参数矩阵已由式(7)(9)得到,联立式(6a)(6b),解得目标 Obj 在机器人坐标系  $C_{Ri}$  下的空间齐次坐标  $X_{ORi} = (x_{ORi}, y_{ORi}, z_{ORi}, 1)^T$ 。实际中,通过控制双摄像机获取多视角下的目标图像点对,以提高目标点在机器人坐标系下坐标  $X_{ORi}$  的求解精度。 $t_i$  时刻 Obj 所对应目标节点与环境节点  $v_m$  间拓扑边的参数(即 Obj 在局部环境地图  $L_m$  的空间位置)  $k_{OLm}$  可由平移向量  $[x_{OLm} \quad y_{OLm} \quad z_{OLm}]^T$  表示。其参数通过如下坐标变换得到:

$$x_{OLm} = x_{RiLm} + \sqrt{x_{ORi}^2 + y_{ORi}^2} \cos(\beta + \theta_{RiLm}) \quad (16a)$$

$$y_{OLm} = y_{RiLm} + \sqrt{x_{ORi}^2 + y_{ORi}^2} \sin(\beta + \theta_{RiLm}) \quad (16b)$$

$$z_{OLm} = z_{ORi} \quad (16c)$$

其中  $\beta = \arctan(y_{ORi}/x_{ORi})$ 。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验描述

以前面所述 Pioneer III 作为实验平台,选择面积约为  $9.5 \text{ m} \times 10.5 \text{ m}$  的真实家庭环境作为实验场地。如图 3 所示,家庭环境主要由起居室、餐厅、厨房、书房和两个卧室构成。其中放置沙发、空调、水杯等目标。为常见家庭目标设计了便于机器人视觉识别的 QR code 标签<sup>[13]</sup>,将目标的惟一标志、属性及其操作信息录入到标签中,机器人通过读取 QR code 标签来获取目标的相关信息。图 4 给出了家庭环境中的几种常见目标及其标签。

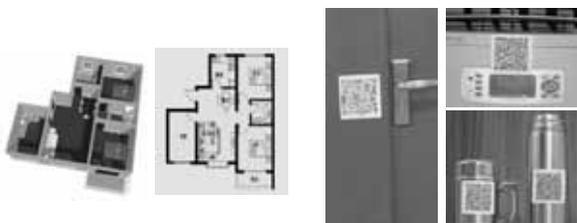
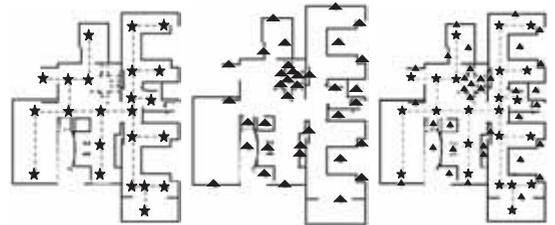


图3 家庭环境及其平面示意图 图4 家庭几种常见目标及标签

### 3.2 家庭环境地图的构建

采用激光测距仪和 CCD 摄像机作为主要的外部传感器,完成基于扫描匹配的环境特征提取;CCD 摄像机用于识别目标的 QR code 标签,并提取目标的过完备特征集数据。针对图 3 布局的家庭环境,通过遥操作方式控制机器人构建出三种形式的家庭环境地图,即基于传统几何—拓扑表示的地图、基于单纯几何特征表示的简单全息地图和基于几何—拓扑表示的全息地图。图 5 为三种地图的俯视图。由图可见,传统几何—拓扑地图由 23 个环境拓扑节点和 22 条拓扑边构成,为机器人建立了家庭环境可活动空间的概念。单纯几何特征的简单全息地图中给出了 35 个粘贴 QR code 标签的目标及其在环境地图中的位置,实现了机器人对家庭环境中各操作目标位置的感知。几何—拓扑结构的全息地图中,全局层面上,拓扑节点由 23 个环境节点和 35 个目标节点构成,拓扑边由 22 条环境—环境拓扑边和 34 条目标—环境拓扑边构成。由于餐厅墙角处的椅子在机器人操作范围之外,故没有建立其与环境节点的拓扑边。



(a)传统几何—拓扑地图 (b)几何特征全息地图 (c)几何—拓扑全息地图  
注:图中★代表环境拓扑节点,▲代表目标节点,-----代表环境—环境拓扑边,.....代表环境—目标拓扑边。

图5 构建的三种家庭地图

### 3.3 性能分析

为了验证全息地图的实用性和构建方法的有效性,分别从地图创建用时、基于地图的机器人路径规划用时和任务执行效率等角度进行分析和评价。

如表 1 所示,从机器人地图创建的耗时来看,利用 SLAM 技术机器人可在线构建地图;基于单纯几何特征表示的简单全息地图构建耗时主要取决于机器人的移动速度和目标发现与定位的耗时;在机器人运动速度相同的情况下,由于从环境中提取拓扑节点并构建 GVG 拓扑地图的计算量较大,传统几何—拓扑地图和基于几何—拓扑混合模型的全息地图构建需要较长的耗时;此外,由于需要发现和定位环境中的目标,基于几何—拓扑混合模型的全息地图耗时更多。

表1 图5中三种地图的性能比较

对比项	图5(a)地图	图5(b)地图	图5(c)地图
建图用时/min	6.41	5.34	8.77
路径规划/ms	15.40	175.36	15.82
任务T时间/min	4.63	1.91	0.75

从基于地图的机器人路径规划效率角度来看,基于传统几何—拓扑地图表示,机器人能够从当前位置无碰撞地运动到人为指定的操作目标位置,或是通过特定的搜索策略遍历整个地图直至运动到环境中的特定目标位置,可见,基于该地图的机器人路径规划是被动的。基于几何特征的简单全息地图,机器人能够感知各操作目标的位置,继而完成由当前位置到目标位置的主动路径规划,但由于路径规划的计算量巨大(尤其是对于三维地图),基于该地图的路径规划速度较慢,难以满足机器人工作的实时性要求。几何—拓扑混合表示的全息地图通过拓扑层面上的全局路径规划,快速生成从当前位置到目标位

置的最优路径,在机器人导航过程中,不断通过局部几何地图辅助机器人位姿矫正,确保机器人在非节点位置处仍能成功定位。

从基于地图的机器人任务执行效率角度来看,表 1 中列出了分别基于三种形式的环境地图,机器人从厨房房门处出发,发现并抓取阳台处水杯的任务  $T$  的执行时间(基于传统几何—拓扑地图的机器人采用深度优先搜索策略),可见,基于几何特征表示和基于几何—拓扑表示的两种全息地图机器人执行效率具有明显优势。

#### 4 结束语

本文针对家庭服务机器人工作环境的复杂性,提出了融合环境特征和目标信息的家庭全息地图,其优势在于:

a) 全息地图将环境和目标信息融合起来,并通过 QR code 标签实现环境和目标的通用和准确识别,深化了家庭服务机器人对其工作环境和操作目标的认知,是提高机器人服务效率和智能程度的有效途径。

b) 采用局部几何—全局拓扑的分层混合结构表示家庭环境。实验表明该表示方法具有较高的机器人路径规划和任务执行效率。

本文对全息地图的表示和构建进行了初步探讨。机器人自身感知范围有限,通过机器人巡游的策略发现环境及目标变更的方法,无疑会消耗机器人的能量和服务时间。智能空间技术将物理世界与信息空间融合起来,力求实现家庭环境的全程动态监控,并通过推理机制预测环境变化以满足各种特定任务的需要<sup>[14]</sup>。在智能空间指导下,机器人能够及时有效地发现环境和目标的变动。因此,与智能空间交互的家庭服务机器人全息地图创建与更新研究,将是本文进一步的研究方向。

#### 参考文献:

[1] THRUN S. Simultaneous localization and mapping [J]. Springer Tracts in Advanced Robotics and Cognitive Approaches to

Spatial Mapping, 2008, 38:13-41.  
 [2] LEONARD J J, DURRANT-WHYTE H F, COX I J. Dynamic map building for an autonomous mobile robot [J]. International Journal of Robotics Research, 1992, 11(4): 286-298.  
 [3] RODRIGUEZ L D, MATIA F, GALAN R. Building geometric feature based maps for indoor service robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(7):546-558.  
 [4] 石朝侠, 洪炳镛, 周彤, 等. 大规模环境下的拓扑地图创建与导航 [J]. 机器人, 2007, 29(5):433-438.  
 [5] TOMATIS N, NOURBAKHSH I, SIEGWARD R. Hybrid simultaneous localization and map building: a natural integration of topological and metric [J]. Robotics and Autonomous System, 2003, 44(1):3-14.  
 [6] 王珂, 王伟, 庄严, 等. 基于几何—拓扑广域三维地图和全向视觉的移动机器人自定位 [J]. 自动化学报, 2008, 34(11):1369-1378.  
 [7] WU Pei-liang, KONG Ling-fu, LI Xian-shan, et al. A hybrid algorithm combined color feature and keypoints for object detection [C]// Proc of the 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2008: 1408-1412.  
 [8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.  
 [9] 杨广林, 孔令富, 王洁. 一种新的机器人手眼关系标定方法 [J]. 机器人, 2006, 28(4): 400-405.  
 [10] 庄严, 王伟, 王珂, 等. 移动机器人基于激光测距和单目视觉的室内同时定位和地图构建 [J]. 自动化学报, 2005, 31(6):925-933.  
 [11] LI Mao-hai, HONG Bing-rong, LUO Rong-hua. Mobile robot hierarchical simultaneous localization and mapping using monocular vision [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 12(6): 765-772.  
 [12] RANGANATHAN P, HAYET J B, DEVY M, et al. Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multi-sensory perception [J]. Robotics and Autonomous System, 2002, 41(2-3): 137-144.  
 [13] 穴洪涛, 田国会, 李晓磊, 等. QR code 在多种类物体识别与操作中的应用 [J]. 山东大学学报, 2007, 37(6):25-30.  
 [14] HA Y G, SOHN J C, CHO Y J, et al. A robotic service framework supporting automated integration of ubiquitous sensors and devices [J]. Information Sciences, 2007, 177(3):657-679.

(上接第 976 页) Spartan3(-4) 的 FPGA 上就能实现每秒 126 M 的数据吞吐量,而采用 Virtex5(-3) 的 FPGA 上可实现高达每秒 300 MB 的数据吞吐量。表 2 列出了本文优化后结构和原结构硬件资源消耗的对比,可以看出,在速度提高为原来 2.5 倍的情况下,硬件资源开销仅增加了 50%。

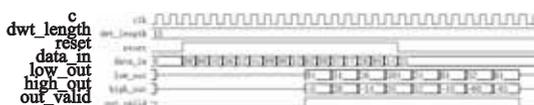


图 6 Modelsim6.2 仿真 5/3 小波变换

表 1 用 ISE8.2 综合得到不同器件的最大频率对比

Device	Pipe-less archi/MHz	Full piped archi/MHz
xc3s1000-4fg456	47.461	126.470
xc3s1000-5fg456	54.958	146.192
xc2v500-6fg256	70.119	184.911
xc4vlx100-12ff1148	105.166	281.148
xc5vlx50-3ff324	134.818	303.076

表 2 流水线结构和原结构的资源占用

Resource utilization	4I-LUT	Flip flops	slices
Pipe-less archi	200	198	171
Piped archi	249	310	225

#### 4 结束语

为满足基于小波的高速信号实时处理的要求,基于 FPGA 实现更高速的 5/3 小波变换,需设计一种能工作在更高频率的

高速小波变换结构。本文利用静态时序分析的方法分析了现有小波变换结构<sup>[3]</sup>设计中制约速度的关键因素,针对性地采用流水线设计的方法对原结构进行改进优化,以提高 5/3 提升小波结构的工作频率。实验采用 VHDL 语言实现了流水线设计的 5/3 小波变换结构和原设计中的变换结构。结果表明,优化后的流水线结构在 Xilinx 公司的几种常用 FPGA 器件上得到的最高综合频率均达到原结构的 250%,能够在 FPGA 上实行更高速的变换结构,更好地满足高速信号处理需求。

#### 参考文献:

[1] SWEDENS W. The lifting scheme: a new philosophy in biorthogonal wavelet constructions [C]// Proc of SPIE. San Diego: SPIE, 1995: 68-79.  
 [2] TAN K C B, ARSLAN Low power embedded extension algorithm for lifting-based discrete wavelet transform in JPEG 2000 [J]. Electronics Letters, 2001, 37(25):1328-1330.  
 [3] 黄思齐, 杨鲁平, 刘桥. 一种适合 JPEG 2000 的 5/3 离散小波变换硬件系统结构 [C]// 2004 年中国自动化学会, 中国仪器仪表学会会议论文集, 2004.  
 [4] 黄思齐, 杨鲁平, 刘桥. JPEG 2000 的 5/3 离散小波变换 FPGA 硬件实现 [J]. 贵州大学学报, 2004, 21(4): 403-406.  
 [5] 熊承义, 田金文, 柳健, 等. 有效的 JPEG 2000 小波变换 VLSI 结构设计 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(22):14-15, 66.  
 [6] 孙延奎. 小波分析及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.  
 [7] CILETTI M D. Verilog HDL 高级数字设计 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005.