

## 基于人机交互的移动服务机器人导航系统

黄志华, 屠大维, 赵其杰

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 针对目前全自主移动机器人尚难实现的问题, 基于人机结合的思想研制了由操作者、人机交互平台和移动机器人组成的“人一机一环境”一体化移动机器人导航系统. 介绍了该系统的结构组成, 阐述了系统导航策略, 详细分析了人机交互、人机协作、移动机器人位姿预测及基于扩展卡尔曼滤波的位姿校正方法. 设计了导航系统界面, 通过在室内真实环境下的导航实验, 验证了该“人一机一环境”一体化移动机器人导航系统的有效性.

**关键词:** 人一机一环境; 人机交互; 移动机器人; 导航; 位姿校正

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

### A Human-Robot-Interaction-Based Navigation System for Mobile Service Robot

HUANG Zhi-hua, TU Da-wei, ZHAO Qi-jie

(College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Since it is difficult to construct a completely independent mobile robot at present, a “human-machine-environment” integrated navigation system for mobile robot based on human-machine integration philosophy is proposed, which consists of an operator, a human-robot interaction platform and a mobile robot. The architecture and navigation strategy are introduced. Human-robot interaction and cooperation, pose prediction and pose regulation based on extended Kalman filter for the mobile robot are also analyzed in detail. The navigation system interface is designed, and navigation experiments under indoor environment are made to verify the effectiveness of the proposed mobile robot “human-machine-environment” integrated navigation system.

**Keywords:** human-machine-environment; human-robot interaction; mobile robot; navigation; pose regulation

## 1 引言 (Introduction)

服务机器人是一种半自主或全自主工作的机器人, 它能完成有益于人类的服务工作. 室内移动服务机器人的导航一直是国内外研究的热点<sup>[1,2]</sup>. 目前, 全自主的智能移动服务机器人由于受到人工智能发展水平的限制尚难实现<sup>[3]</sup>. 鉴于移动服务机器人一般是一个“人一机一环境”系统, 在这一系统中, 人(服务对象)的参与和协调对提高系统的性能也是十分重要的<sup>[4]</sup>. 本文围绕助老助残服务机器人, 提出基于人机交互的人机智能融合方法. 在这一“人一机一环境”一体化系统中, 一方面移动机器人拥有位姿预测、位姿校正和防碰撞的能力, 另一方面操作者(服务对象)又可以通过友好的人机界面获取机器人反馈的多种信息并根据这些信息指挥、协调机器人的运动.

## 2 基于人机交互的移动机器人导航 (Navigation for mobile robots based on human-robot interaction)

根据开放性模块化设计思想, 研制了一种基于人机交互的人机一体化移动机器人导航系统, 该系统主要由三部分组成: 操作者(老人、残疾人等服务对象)、人机交互平台和移动机器人, 如图 1 所示. 操作者通过按钮输入模块和语音输入模块输入控制命令, 并通过语音输出模块、文字及图像输出模块获取当前机器人位置和状态信息以及环境视频图像和距离信息. 移动机器人利用由数字罗盘、激光雷达和彩色 CCD 摄像头等外部传感器组成的环境信息感知模块去感知外界环境信息, 另外通过运动控制模块达到避障及执行用户运动控制命令的功能. 人机交互平台和移动机器人的信息交换及处理分别

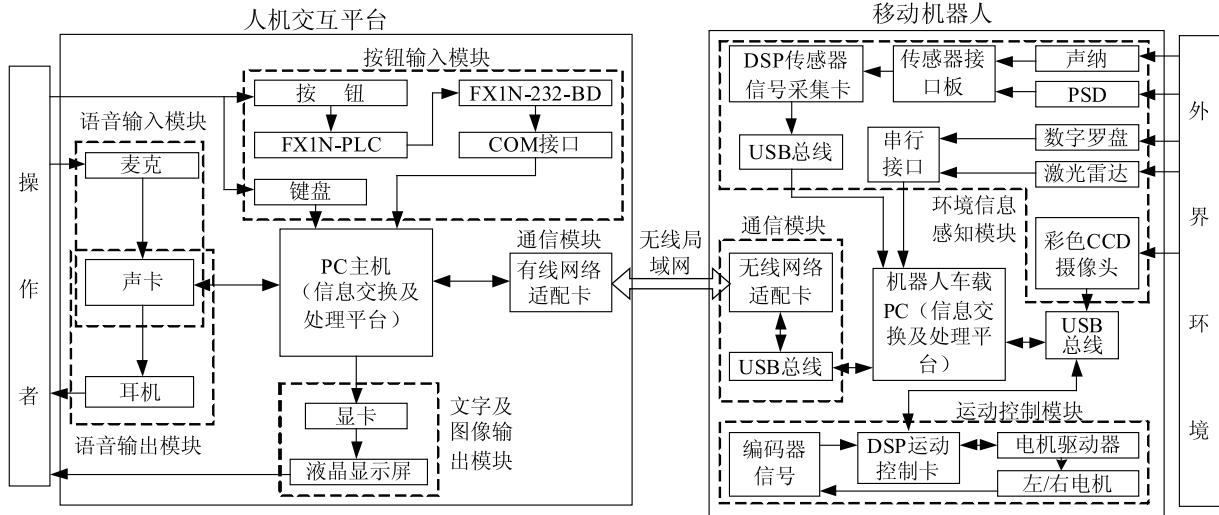


图 1 移动机器人导航系统结构组成

Fig.1 The architecture of the navigation system for the mobile robot

通过两台 PC 机实现，两台 PC 机通过无线局域网连接，并采用客户机/服务器模式进行通信。

将校正结果反馈给操作者。

### 3 移动机器人位姿预测 (Pose prediction of the mobile robot)

图 3 所示的是全局坐标系  $X_wO_wY_w$  和机器人坐标系  $X_RO_RY_R$ ， $\theta_k$  表示机器人  $X$  坐标轴与全局  $X$  坐标轴的夹角，逆时针为正。假设机器人左右轮移动的距离分别为  $\Delta d_L$  和  $\Delta d_R$ ，两轮间的距离为  $a$ ，机器人从位姿  $\mathbf{X}_{k|k} = (x_k, y_k, \theta_k)^T$  移动到  $\mathbf{X}_{k+1|k} = (x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1})^T$ 。

机器人移动的距离为  $\Delta D_k = (\Delta d_L + \Delta d_R)/2$ ，机器人转动的角度  $\Delta \theta_k = (\Delta d_R - \Delta d_L)/a$ ，于是测量值为  $\mathbf{u}_k = (\Delta D_k, \Delta \theta_k)^T$ ，则当前机器人的预测位姿为：

$$\mathbf{X}_{k+1|k} = \mathbf{f}(\mathbf{X}_{k|k}, \mathbf{u}_k) + \boldsymbol{\omega}_k \quad (1)$$

其中  $\mathbf{f}(\mathbf{X}_{k|k}, \mathbf{u}_k)$  为：

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}_{k|k}, \mathbf{u}_k) = \begin{pmatrix} x_k + \frac{\Delta D_k}{\Delta \theta_k} (\cos(\theta_k + \Delta \theta_k) - \cos \theta_k) \\ y_k + \frac{\Delta D_k}{\Delta \theta_k} (\sin(\theta_k + \Delta \theta_k) - \sin \theta_k) \\ \theta_k + \Delta \theta_k \end{pmatrix}, \quad |\Delta \theta_k| > 0$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}_{k|k}, \mathbf{u}_k) = \begin{pmatrix} x_k - \Delta D_k \sin \theta_k \\ y_k + \Delta D_k \cos \theta_k \\ \theta_k \end{pmatrix}, \quad |\Delta \theta_k| = 0 \quad (2)$$

参数  $\boldsymbol{\omega}_k$  为系统的过程噪声序列， $\mathbf{X}_{k+1|k}$  的协方差矩阵为：

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{X}_k} \right) \mathbf{P}_{k|k} \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{X}_k} \right)^T + \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}_k} \right) \mathbf{Q}_k \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}_k} \right)^T \quad (3)$$

其中参数  $\mathbf{Q}_k$  为  $\boldsymbol{\omega}_k$  的方差阵。

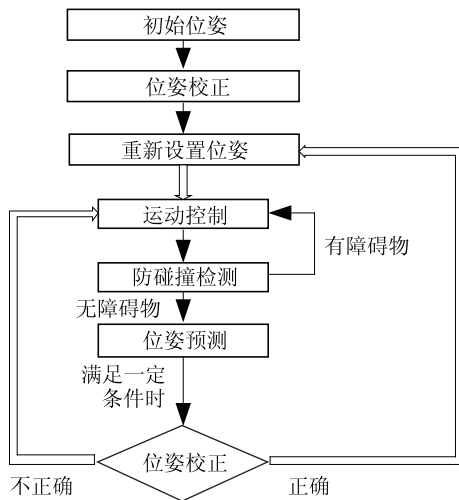


图 2 人机智能融合导航策略

Fig.2 Navigation strategy with human-robot intelligence fusion

图 2 是基于人机交互的移动机器人导航策略，图中单线箭头表示移动机器人能自动执行的动作，而双线箭头表示需要操作者参与的动作。这一人机一体化服务机器人导航系统采用“人主机辅”的策略解决人机冲突问题。机器人对初始位姿进行校正后，将校正位姿反馈给操作者。操作者根据机器人反馈信息向机器人发送运动控制命令，机器人接收到命令后进行防碰撞检测，确认在其安全区域内没有障碍物才执行上述命令，一旦检测到障碍物则停止运动，并将该消息及时反馈给操作者，操作者接到消息后，发出转弯避障命令。机器人运动后使用位姿预测方法实时预测位姿，并在满足一定条件时，如行程达到预设值时，校正位姿并停止运动，同时

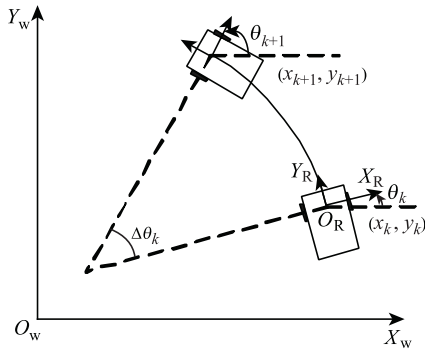


图3 机器人运动的里程计模型

Fig.3 Odometry model of the robot motion

### 4 移动机器人位姿校正 (Pose regulation of the mobile robot)

#### 4.1 基于扩展卡尔曼滤波的位姿校正工作原理

为了校正机器人的位姿并消除由位姿预测方法造成的累积误差,设计了基于环境特征提取的扩展卡尔曼滤波位姿校正方法,其工作原理如图4所示.首先对激光雷达数据进行采集、变换及特征提取,得到当前的机器人外界环境特征.另外,由位姿预测法给出机器人的当前位姿,在此基础上利用环境特征变换模型对已知环境进行变换,得到在当前机器人位姿下的预测环境特征.对上述两组环境特征进行特征匹配,计算出匹配特征的差异,从而得到滤波器的新息,进而得到滤波器的增益,最终完成机器人位姿的校正.

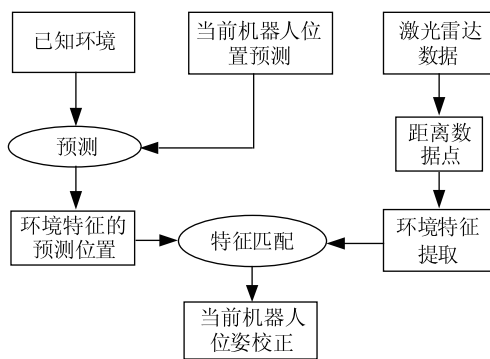


图4 基于扩展卡尔曼滤波的位姿校正法工作原理

Fig.4 Working principle of the extended Kalman filter based pose regulation

#### 4.2 环境特征的描述

用线段来表示对应的环境特征,例如一条线段可以表示与之对应的一面墙,全局地图和局部地图就表示为线段的集合.每条线段用参数  $(\rho, \theta)$  表示,其中参数  $\rho$  为坐标原点到该线段的垂线距离,参数  $\theta$  为垂线与  $X$  轴正向的夹角,  $\theta$  取值范围是  $(-\pi, \pi]$ ,如图5所示.另外,为了方便判断两个特征是否匹配,还需要知道线段的长度、线段的起点坐

标和线段的终点坐标,分别用参数  $l, (x_s, y_s), (x_e, y_e)$  表示.  $C_i$  表示参数  $(\rho, \theta)$  的协方差矩阵.

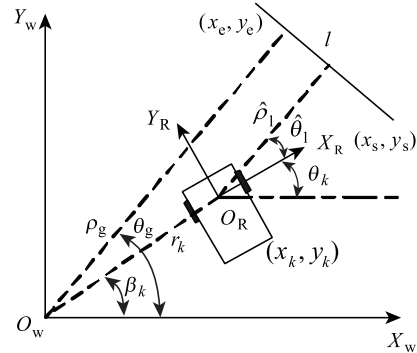


图5 线段特征及其变换模型

Fig.5 Line feature and its transformation model

#### 4.3 线段特征提取

##### 4.3.1 数据点坐标变换

激光雷达测得的原始数据是距离及相应的扫描角度,即  $(r_i, \alpha_i)$  的形式,转换到机器人坐标系有:

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \alpha_i \\ y_i = r_i \sin \alpha_i \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中参数  $x_i$  和  $y_i$  分别为第  $i$  个数据点在机器人坐标系下的坐标,参数  $n$  为数据点数.将(4)式看成  $\mathbf{X}_i = f(\mathbf{S}_i)$  的形式,其中  $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i)$ ,  $\mathbf{S}_i = (r_i, \alpha_i)$ ,则每个坐标点  $(x_i, y_i)$  对应的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{F}_i \mathbf{C}_{S_i} \mathbf{F}_i^T \quad (5)$$

其中  $\mathbf{F}_i$  是  $\mathbf{X}_i$  对于  $\mathbf{S}_i$  的雅可比矩阵:

$$\mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

而  $\mathbf{C}_{S_i} = \begin{pmatrix} \sigma_{r_i r_i} & 0 \\ 0 & \sigma_{\alpha_i \alpha_i} \end{pmatrix}$  为原始数据点的协方差阵,其中  $\sigma_{r_i r_i}$  和  $\sigma_{\alpha_i \alpha_i}$  分别为激光雷达测量误差的距离方差及角度方差.

##### 4.3.2 数据帧分隔及数据点直线拟合

数据点分隔的目的是把属于同一线段特征的数据点聚集起来,它包括两个步骤:(1)将每帧361个扫描数据点分隔成不同的连通区域;(2)对每个连通区域的数据点进行再次分隔<sup>[5]</sup>,直到分隔后的每个数据区块都是统计线性的.

对于已分隔好的某个包含  $n$  个数据点的数据区块  $\mathbf{X} = \{(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\}$ ,将它拟合成  $y = mx + q$  或者  $x = sy + t$  的形式<sup>[6]</sup>.对于  $y = mx + q$

的形式, 参数  $m, q$  计算公式如下:

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad q = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - m \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

令  $\mathbf{V} = (m, q)^T$ , 则参数  $(m, q)$  的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_v = \sum_{i=1}^n \mathbf{J}_i \mathbf{C}_i \mathbf{J}_i^T \quad (8)$$

其中  $\mathbf{J}_i$  为  $\mathbf{V}$  相对于  $\mathbf{X}_i$  的雅可比矩阵. 同理可以计算出参数  $(s, t)$  的协方差矩阵.

#### 4.3.3 直线参数转化成 $(\rho, \theta)$ 参数形式

为了统一参数  $(m, q)$  和  $(s, t)$ , 并便于线段特征的匹配, 需要将上述参数转化成  $(\rho, \theta)$  形式.  $(m, q)$  转化成  $(\rho, \theta)$  的公式如下:

$$\rho = \left| \frac{q}{\sqrt{m^2 + 1}} \right| \quad (9)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan(-\frac{1}{m}), & mq < 0 \\ \arctan(-\frac{1}{m}) + \frac{m}{|m|} \pi, & mq > 0 \\ \pi/2, & m = 0, q \geq 0 \\ -\pi/2, & m = 0, q < 0 \end{cases} \quad (10)$$

令  $\mathbf{X}_1 = (\rho, \theta)^T$ , 则  $(\rho, \theta)$  参数的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{C}_v \mathbf{H}_1^T \quad (11)$$

其中  $\mathbf{H}_1$  为  $\mathbf{X}_1$  对于  $\mathbf{V}$  的雅可比矩阵.  $(s, t)$  形式的转化及相应  $(\rho, \theta)$  参数的计算可类推.

#### 4.3.4 线段起始点、终点和长度的计算

由于激光雷达扫描数据点按逆时针方向顺序排列, 可以把  $(x_1, y_1)$  和  $(x_n, y_n)$  在拟合直线  $(\rho, \theta)$  上的投影  $(x_s, y_s)$  和  $(x_e, y_e)$  作为线段的端点, 如:

$$\begin{aligned} x_s &= x_{p_1} + \cos \theta (\rho - x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) \\ y_s &= y_1 + \sin \theta (\rho - x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) \end{aligned} \quad (12)$$

同理可计算参数  $(x_e, y_e)$  的值. 线段的长度  $l$  为:

$$l = \sqrt{(x_s - x_e)^2 + (y_s - y_e)^2} \quad (13)$$

#### 4.4 环境特征变换模型

如图 5, 假设  $\mathbf{L}_g(\rho_g, \theta_g)^T$  为全局地图中的某个线段特征, 该线段在当前机器人位姿  $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, \theta_k)^T$  下的变换线段为  $\hat{\mathbf{L}}_1 = (\hat{\rho}_1, \hat{\theta}_1)^T$ , 则当机器人位置和全局坐标系原点在直线的同侧时, 有:

$$\hat{\mathbf{L}}_1 = (\hat{\rho}_1, \hat{\theta}_1)^T = \begin{pmatrix} \rho_g - r_k \cos(\theta_g - \beta_k) \\ \theta_g - \theta_k \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中  $r_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2}$ ,  $\beta_k = \arctan(y_k/x_k)$ . 而当机器人位置和全局坐标系原点在直线的异侧时, 有:

$$\hat{\mathbf{L}}_1 = (\hat{\rho}_1, \hat{\theta}_1)^T = \begin{pmatrix} -\rho_g + r_k \cos(\theta_g - \beta_k) \\ \theta_g - \theta_k - \pi \end{pmatrix} \quad (15)$$

如果  $|\hat{\theta}_1| > \pi$ , 则  $\hat{\theta}_1$  的取值修改为:

$$\hat{\theta}_1 = \begin{cases} \hat{\theta}_1 - 2\pi, & \hat{\theta}_1 > \pi \\ \hat{\theta}_1 + 2\pi, & \hat{\theta}_1 < -\pi \end{cases} \quad (16)$$

将式 (14) 和式 (15) 统一表示成如下的形式:

$$\hat{\mathbf{L}}_1 = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{L}_g \quad (17)$$

其中  $\mathbf{H}_k = \frac{\partial \hat{\mathbf{L}}_1}{\partial \mathbf{X}_k}$ .

#### 4.5 特征匹配

为了减少误匹配, 当前局部特征线段  $\mathbf{L}_1 = (\rho_1, \theta_1)^T$  的长度必须大于一定的阈值. 另外, 判断它与全局特征的变换特征  $\hat{\mathbf{L}}_1 = (\hat{\rho}_1, \hat{\theta}_1)^T$  是否匹配, 还要满足 3 个判断准则:

- (1) 两个特征的  $\rho$  值之差必须小于一定的阈值, 即  $|\hat{\rho}_1 - \rho_1| < \rho_{\text{thr}}$ ;
- (2) 两个特征的  $\theta$  值之差必须小于一定的阈值, 即  $|\hat{\theta}_1 - \theta_1| < \theta_{\text{thr}}$ ;

(3) 局部线段向全局线段进行投影, 该投影线段必须和全局线段有重叠. 假设局部线段的中点和长度分别为  $(x_{\text{ml}}, y_{\text{ml}})$ 、 $L_1$ , 全局线段的中点和长度分别为  $(x_{\text{mg}}, y_{\text{mg}})$ 、 $L_g$ , 这两条线段所在直线的夹角为  $\Delta\theta$ , 其中点距离  $D_p = \sqrt{(x_{\text{ml}} - x_{\text{mg}})^2 + (y_{\text{ml}} - y_{\text{mg}})^2}$ , 则上述准则可以表示为:  $D_p \cos(\Delta\theta) < \frac{L_g}{2} + \frac{L_1}{2} \cos(\Delta\theta)$ .

#### 4.6 移动机器人位姿的更新

假设经过上述的特征匹配一共找到  $M$  对匹配特征, 每对特征根的编号为  $i (i = 1, \dots, M)$ , 且令  $\mathbf{X}_{k+1|k,0} = \mathbf{X}_{k+1|k}$ ,  $\mathbf{P}_{k+1|k,0} = \mathbf{P}_{k+1|k}$ , 则机器人的位姿及其协方差矩阵更新过程为:

$$\mathbf{S}_{k+1,i} = \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{P}_{k+1|k,i} \mathbf{H}_{k,i}^T + \mathbf{C}_{1L_g} \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_{k+1,i} = \mathbf{P}_{k+1|k,i-1} \mathbf{H}_{k,i}^T \mathbf{S}_{k+1,i}^{-1} \quad (19)$$

$$\mathbf{X}_{k+1|k,i} = \mathbf{X}_{k+1|k,i-1} + \mathbf{K}_{k+1,i} (\mathbf{L}_{1,i} - \hat{\mathbf{L}}_{1,i}) \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k,i} = \mathbf{P}_{k+1|k,i-1} - \mathbf{K}_{k+1,i} \mathbf{S}_{k+1,i} \mathbf{K}_{k+1,i}^T \quad (21)$$

式 (19) 中,  $\mathbf{S}_{k+1,i}$  为线段  $\mathbf{L}_{g,i}$  对应的新息  $(\mathbf{L}_{1,i} - \hat{\mathbf{L}}_{1,i})$  的方差阵,  $\mathbf{C}_{1L_g}$  为线段  $\mathbf{L}_{g,i}$  的  $(\rho, \theta)$  参数的协方差阵; 式 (20) 中,  $\mathbf{K}_{k+1,i}$  为线段  $\mathbf{L}_{g,i}$  对应的卡尔曼增益. 经过  $M$  次循环后, 得到  $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_{k+1|k,M}$ ,  $\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k,M}$ .

### 5 移动机器人导航实验 (Navigation experiment of the mobile robot)

实验平台由移动机器人和人机交互平台组成, 如图 6 所示. 移动机器人为两轮独立驱动的移动小车, 装载了编码器、激光测距雷达、彩色摄像头、声纳和 PSD 等传感器. 人机交互平台选用 PLC 及通信模块组成按钮输入通道, 利用 Microsoft Speech SDK 5.1 语音开发包实现语音输入及输出通道, 另外人机交互界面可以实现文字及视频图像反馈. 实验环境为所在实验楼走廊及相连房间, 如图 7(a) 所示.

实验目的是通过真实环境中的导航实验来验证该导航系统的有效性. 实验任务是让机器人从图 7(b) 中所示起点开始前进, 在操作者的帮助下绕开障碍物, 最终安全地到达图 7(b) 中所示门 2 的位置. 图 8 为导航系统人机交互界面, 界面上显示了机器人反馈的视频图像、当前机器人位姿下激光雷达扫描并经过提取的线段信息、机器人在全局地图中的位置和机器人的运动状态等信息. 操作者通过该界面使用语音或按钮的方式输入控制命令, 同时根据第 2 节所述的导航策略, 将机器人导航到目标点. 实验一共进行了 5 次, 均取得了令人满意的结果. 其中某次导航过程中机器人的运动轨迹如图 7(b) 所示, 在人机智能的共同作用下, 移动机器人成功地避开了障碍物, 到达了门 2 的位置.

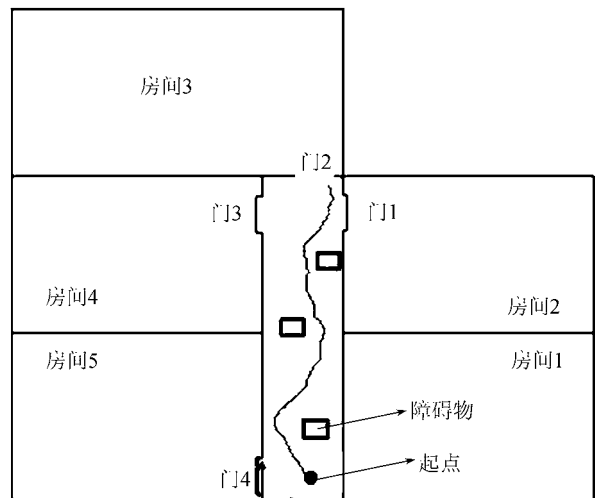


图 6 移动机器人及人机交互平台

Fig.6 Mobile robot and human-robot interacting platform



(a) 实验环境



(b) 地图及机器人轨迹

图 7 实验环境、地图及移动机器人轨迹

Fig.7 Experimental environment, map and the track of mobile robot



图 8 人机交互界面

Fig.8 Human-robot interaction interface

### 6 结论 (Conclusion)

针对目前完全自主移动机器人尚难实现的问题, 研制了由操作者 (服务对象)、人机交互平台和移动机器人组成的“人一机一环境”一体化移动机器人导航系统. 该系统采用人机智能融合的导航策略: 即移动机器人本体具有位姿预测、位姿校正和防撞的功能, 而操作者 (服务对象) 可以通过友好的人机界面获取机器人反馈的多种信息并根据这些信息协调机器人的运动. 实验结果表明, 这种人机智能融合的移动服务机器人导航系统具有实时性好、适应环境变化能力强的优点.

### 参考文献 (References)

[1] 肖雄军, 蔡自兴. 服务机器人的发展 [J]. 自动化博览, 2004, 21(6): 10~13.

- Xiao Xiong-jun, Cai Zi-xing. Development of service robots[J]. Automation Panorama, 2004, 21(6): 10~13.
- [2] 王志文, 郭戈. 移动机器人导航技术现状与展望 [J]. 机器人, 2003, 25(5): 470~474.
- Wang Zhi-wen, Guo Ge. Present situation and future development of mobile robot navigation technology[J]. Robot, 2003, 25(5): 470~474.
- [3] 王挺, 王越超. 人机系统在移动机器人平台的应用 [J]. 机器人, 2004, 26(6): 553~557.
- Wang Ting, Wang Yue-chao. Human-machine system and its application to mobile robot[J]. Robot, 2004, 26(6): 553~557.
- [4] Kawamura K, Pack R T, Iskarous M. Design philosophy for service robots[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995. 3736~3741.
- [5] 许伟. 基于激光雷达环境信息处理的机器人定位/导航技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- Xu Wei. Research on Robot Location and Navigation Technology Based on Information Processing of the Laser Range Finder[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [6] Vandorpe J, van Brussel H, Xu H. Exact dynamic map building for a mobile robot using geometrical primitives produced by a 2D range finder[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996. 901~908.

#### 作者简介:

黄志华 (1983-), 男, 硕士. 研究领域: 移动机器人定位与导航.

屠大维 (1965-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 光电检测及仪器, 机器人传感及控制.

赵其杰 (1977-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 人机交互, 计算机视觉.

(上接第 247 页)

- [13] Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1985. 722~728.
- [14] Suh K C, Hollerbach J M. Local versus global torque optimization of redundant manipulators[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1987. 619~624.
- [15] Kazerounian K, Wang K. Global versus local optimization in redundancy resolution of robotic manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1988, 7(5): 3~12.
- [16] Chung C L, Desa S. A Global Approach for Using Kinematic Redundancy to Minimize Base Reactions of Manipulators[R]. USA: Carnegie Mellon University, 1989. 1~27.
- [17] Chung C L, Desa S, de Silva C W. Base Reaction Optimization of Redundant Manipulators for Space Applications[R]. USA: Carnegie Mellon University, 1988. 1~27.
- [18] Nechyba M C, Xu Y S. Human-robot cooperation in space: SM<sup>2</sup> for new space station structure[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1995, 2(4): 4~11.
- [19] Xu Y S, Brown B, Friedman M, *et al.* Control system of self-mobile space manipulator[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992. 866~871.
- [20] Gefke G G, Carignan C R, Roberts B J, *et al.* Ranger telerobotic shuttle experiment: Status report[A]. Proceedings of SPIE (vol.4570)[C]. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2001. 123~132.
- [21] Russakow J, Rock S M, Khatib O. An operational space formulation for a free-flying, multi-arm space robot[A]. Proceedings of the Fourth International Symposium on Experimental Robotics[C]. Berlin, Germany: Springer, 1997. 448~457.
- [22] 梁斌, 刘良栋, 陈建新, 等. 舱外自由移动机器人系统 [J]. 控制工程, 2001, (5-6): 91~100.
- Liang Bin, Liu Liang-dong, Chen Jian-xin, *et al.* Extravehicular free-moving robot system[J]. Control Engineering of China, 2001, (5-6): 91~100.
- [23] Sawada H, Ui K, Mori M, *et al.* Micro-gravity experiment of a space robotic arm using parabolic flight[J]. Advanced Robotics, 2004, 18(3): 247~267.

#### 作者简介:

史士财 (1978-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 机器人技术.

吴剑威 (1981-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人运动规划.

崔平远 (1965-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 飞行器动力学与控制, 深空探测器轨道设计、自主导航与控制.