

# 基于 ROS 的细胞机器人重构仿真

蔡映凯, 安德孝, 田 浩<sup>✉</sup>

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨, 150001)

**摘要** 基于 ROS 机器人操作系统及其包含的功能包,对细胞机器人进行开发,利用细胞模块上的惯性测量元件、激光雷达与单目摄像头,确定自身位姿信息与周围环境信息,完成细胞机器人重构操作。在 Gazebo 仿真重构平台中,通过细胞机器人的重构验证了自定位、地图构建、路径规划、自主导航和视觉调姿算法,并完成不同种类细胞模块之间的重构和器官层面的重构,按照任务规划构型实现了细胞机器人的自组装,验证了重构方案的可行性。

**关键词** 细胞机器人;ROS;SLAM;路径规划;自重构

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.006

**中图分类号** TP18 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0030-06

## Research on Self-Reconstruction of Cellular Robots Based on ROS

CAI Yingkai, AN Dexiao, TIAN Hao<sup>✉</sup>

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Based on the ROS robot operating system and its included function package, this paper aims at the development of cell robot, and the inertial measurement elements, laser radar and the monocular camera on the cell module are used to determine the position and posture information and the surrounding environment information, and the cell robot reconstruction operation is completed. In reconstructing the Gazebo simulation reconfiguration platform, the algorithm of self positioning, map building, path planning, autonomous navigation and visual attitude adjustment are verified through the reconstruction of cell robot, and the reconstruction of different kinds of cell modules and the reconstruction of organ level are completed. The self-assembly of cell robots is realized according to the configuration of task planning. The reconfiguration scheme is feasible.

**Key words:** cellular robots; ROS; SLAM; path planning; self-reconstruction

细胞机器人的概念最早源于日本 Nagoya 大学 T. Fukuda 等人提出的 CEBOT (Cellular Robotic System)<sup>[1]</sup>,从生物领域的“细胞”获取灵感,将传统机器人进行单层模块化划分,各个细胞模块均具有

运动、感知及作业能力,并能够实现“细胞”间的自主连接与分离。随着模块化机器人的发展,哈尔滨工业大学的赵航等人在继承了传统模块化自重构机器人对多任务和未知任务的处理能力的基础上,提出

**收稿日期:** 2018-06-19

**基金项目:** 国家国防科技创新特区项目(17-H863-03-ZT-001-001-01)

**作者简介:** 蔡映凯(1995—),男,陕西西安人,硕士生,主要从事细胞机器人系统研究。E-mail: hitcyk@163.com

**通信作者:** 田 浩(1968—),男,湖北秭归人,博士,副教授,主要从事复杂航天器动力学及新型机器人系统研究。E-mail: tih@hit.edu.cn

**引用格式:** 蔡映凯,安德孝,田浩. 基于 ROS 的细胞机器人重构仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(5): 30-35. CAI Yingkai, AN Dexiao, TIAN Hao. Research on Self-Reconstruction of Cellular Robots Based on ROS[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 30-35.

了一种能够实现多层次自重构的空间细胞机器人系统<sup>[2]</sup>。由于空间细胞机器人自身模块的多样性和可替换性,其功能性、适应性和鲁棒性也远远优于传统固定构型机器人。

在现有的多机器人系统研究中,具有自重构功能的平台较少,其中日本名古屋大学的 CEBOT 系统和东京工业大学研制的 Uni-Rovers 系统<sup>[3-4]</sup>,实现了主体结构 and 子机器人之间的自主连接。SWARM 单体运动自重构机器人系统中<sup>[5]</sup>,每个 s-bot 个体具有独立运动和完成的功能,多个 s-bot 连接可以形成功能相对复杂的群体机器人。在模块化机器人自主连接研究方面,BOJINOV<sup>[6]</sup>等提出了一种给定目标构型的模块化机器人自主构建的方法;KELLY<sup>[7]</sup>等提出了一种平面分布式自组装模型;北京航空航天大学基于 Sambot 机器人提出一种分布式自组装控制模型<sup>[8]</sup>,按照目标构型实现了多个 Sambot 机器人之间的自组装。现有的机器人重构平台和自主连接方式大多围绕同构模块化机器人展开,而鲜有针对更具有多样性的异构模块化机器人自重构研究。

## 1 细胞机器人系统概述

细胞机器人系统是一种新型的智能操控装置,它由若干数量同构和异构的单元组成,能够通过多层次自主重构而实现不同构型和不同功能的机器人或机器人团队,以满足不同空间任务的需求。细胞机器人的实现层为整个系统的物理框架,按照层级由小到大分为细胞、组织、器官和机器人 4 个层次<sup>[2]</sup>。

细胞作为细胞机器人的最小组成单位,根据其功能的不同,主要分为间质细胞、旋转细胞、摆转细胞和末端细胞<sup>[2]</sup>。

组织是细胞机器人的最小广义运动单元,由细胞组成。按照输出运动的不同可以分为 2 类:①关节组织,用于实现传统的旋转与平移运动;②功能组织,用于实现扩展的功能运动。

器官是空间细胞机器人面向行为的最小功能单位,由组织组成。每个器官都能够实现若干运动组合而成的一种或几种行为。

机器人是最终用于实现目标任务的单位,由器官组成,能够实现一种或几种指定任务。

细胞机器人重构过程的实现,主要包括细胞模块基础、信息交互以及细胞模块控制 3 部分,重构实现框架,从组成上可以划分为细胞仓库、器官仓库、构型信息管理、细胞机器人。

## 2 细胞模块定位与环境地图构建

### 2.1 定位与地图构建中的传感器消息类型

细胞机器人在进行重构操作的过程中,对各细胞模块的定位与地图的构建,都需要利用二维深度数据信息和里程计信息。其中二维深度信息用于地图的创建以及导航过程中的实时避障,可以通过激光雷达或者深度摄像机获取<sup>[9]</sup>,但是深度摄像机获取的图像数据不能直接用于 SLAM 中,需要通过 ROS 的 depthimage\_to\_laserscan 功能包将深度图转为激光数据 sensor\_msgs/LaserScan。基于 ROS 机器人操作系统下的二维深度数据的通用接口如下(括号内文字为字段含义):

```
[sensor_msgs/LaserScan]:
std_msgs/Header header
float32 angle_min(传感器检测范围的起始角度)
float32 angle_max(传感器检测范围的终止角度)
float32 angle_increment(相邻两数据点间角度步长)
float32 time_increment(相邻两帧数据间时间步长)
float32 scan_time(传感器采集 1 帧数据所需要时间)
float32 range_min(传感器可检测的最近距离)
float32 range_max(传感器可检测的最远距离)
float32[] ranges(1 帧距离数据的存储数组)
float32[] intensities(强度系数)
```

ROS 使用坐标变换包 TF 来求解机器人的位置以及将传感器数据与静态地图关联起来,然而 TF 坐标变换包主要负责以 TF 坐标变换树的形式管理机器人的各种坐标系之间的关系,TF 中没有提供机器人的速度信息,因此导航功能包要求里程计编码器在 ROS 上发布位姿的变换信息以及包含速度信息的里程计 nav\_msgs/Odometry 消息,其消息接口定义如下:

```
[nav_msgs/Odometry]
std_msgs/Header header
uint32 seq
time stamp
string frame_id
geometry_msgs/PoseWithCovariance pose
geometry_msgs/Pose pose
  geometry_msgs/Point position
    float64 x
    float64 y
    float64 z
  geometry_msgs/Quaternion orientation
    float64 x
    float64 y
    float64 z
    float64 w
float64[36] covariance
geometry_msgs/TwistWithCovariance twist
geometry_msgs/Twist twist
  geometry_msgs/Vector3 linear
    float64 x
    float64 y
    float64 z
  geometry_msgs/Vector3 angular
    float64 x
    float64 y
    float64 z
float64[36] covariance
```

pose 为机器人当前位置坐标,包括机器人的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴位置与方向参数,以及用于校正误差的协方差矩阵;twist 为机器人当前运动状态,包括  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴的线速度与角速度,以及用于校正误差的协方差矩阵。

## 2.2 基于 AMCL 的自定位

在 ROS 自带导航包的自定位方面,通过 AMCL 功能包,根据订阅到的地图数据配合激光扫描特征,使用蒙特卡罗定位方法<sup>[10]</sup>,完成移动细胞二维环境下的概率定位,针对已有的地图系统使用粒子滤波器跟踪一个细胞模块的姿态。AMCL 与里程计定位的区别在于,里程计只能通过里程计数据来处理 /base 和 /odom 之间的 TF 转换,利用航迹推测的方式完成机器人的定位,不能确定出机器人在地图中的位置信息;而 AMCL 则可以根据传感器信息,完成机器人相对于地图的位置估算,可以估算机器人相对于地图坐标系 /map 的位姿信息,提供 /base、/odom 和 /map 之间的 TF 变换,见图 1。

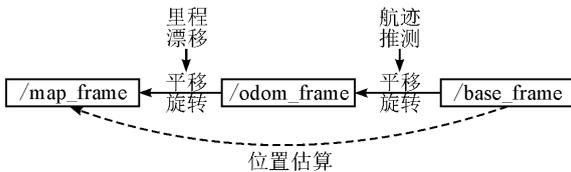


图 1 AMCL 定位框架

Fig. 1 AMCL positioning framework

通过 AMCL 获取机器人即时定位信息可以通过系统方程和观测方程来获得:

$$\mathbf{X}(t) = f(\mathbf{X}(t-1), \mathbf{u}(t)) + \mathbf{W}(t)$$

$$\mathbf{Z}(t) = h(\mathbf{X}(t)) + \mathbf{E}(t)$$

式中:  $\mathbf{X}(t)$  为  $t$  时刻机器人的状态空间位姿向量;  $\mathbf{u}(t)$  为  $t$  时刻的机器人里程计输入信息向量;  $\mathbf{W}(t)$  为  $t$  时刻的里程计误差向量;  $\mathbf{Z}(t)$  为  $t$  时刻的观测值向量;  $\mathbf{E}(t)$  为  $t$  时刻的观测值误差向量。

系统方程可通过里程计信息从原有  $(t-1)$  时刻  $\mathbf{X}$  的状态空间,得出  $t$  时刻  $\mathbf{X}$  的状态信息;观测方程则根据已有地图信息,通过激光信息与地图匹配过程得到  $t$  时刻观测值向量,  $\mathbf{W}(t)$  与  $\mathbf{E}(t)$  为互不干扰的高斯白噪声。由系统方程和观测方程可以估算出机器人的实时坐标信息。

## 2.3 基于 Gmapping 的 SLAM

在细胞机器人进行重构之前,需要通过间质细胞对其组装平台进行地图构建,并在构建地图的过程中对自身进行定位,即 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)问题,这也是进行路径规划和导航的基础。Gmapping 功能包提供了基于激光

雷达信息的 SLAM,使用 Rao-BlackWellized 粒子滤波算法,该算法中每一个粒子承载了一个独立的环境地图,采用自适应技术来降低粒子数量,不光考虑移动而且考虑最近的观测值来计算精确的粒子分布,这样极大的降低了机器人位姿的不确定性,算法中还使用有选择地重采样技术,有效降低了粒子耗散对算法的影响。

使用 Gmapping 需输入深度信息,IMU(Inertial Measurement Unit)信息和里程计信息,其中深度信息和里程计信息为必要信息,IMU 信息为非必要信息。激光雷达可以实时检测到二维环境深度信息,并根据当前深度信息建立部分已知环境的地图;由里程计信息可以获取机器人当前位姿和角速度以及线速度;IMU 信息通过测量的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的角速度和加速度解算出物体的姿态,可以修正里程计产生的漂移误差,达到对机器人更高精度的定位。根据输入数据输出地图话题 nav\_msgs/Occupancy-Grid 创建 2D 栅格地图,其功能包总体框架见图 2。Gmapping 算法精度高,可靠性好,本文实验采用 Gmapping 算法实现 SLAM 的机器人定位及地图构建。

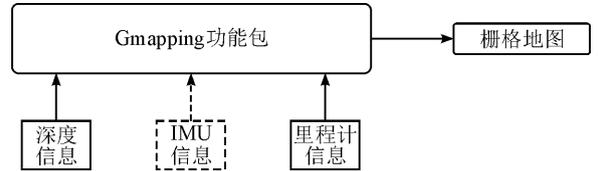


图 2 Gmapping 功能包框架

Fig. 2 Gmapping functional package framework

## 3 细胞机器人导航与自主连接

### 3.1 细胞机器人导航规划

在构建完成地图后,就可以对地图中的细胞模块进行导航,ROS 框架下导航过程分为全局路径规划、本地实时规划及速度控制模块。本文采用 move\_base 功能包实现细胞机器人导航,导航的起点为间质细胞的初始位置,终点为目标细胞的连接准备点,其导航框架见图 3(参见网址 [http://wiki.ros.org/move\\_base](http://wiki.ros.org/move_base))。

导航框架中的全局路径规划(global planner)采用 A\* 算法,A\* 算法是一种静态路网中求解最短路径的搜索方法,在细胞机器人重构的过程中,规划出从间质细胞到目标细胞之间的最短路径,算法中的距离估算值与实际值越接近,最终搜索速度就越快。

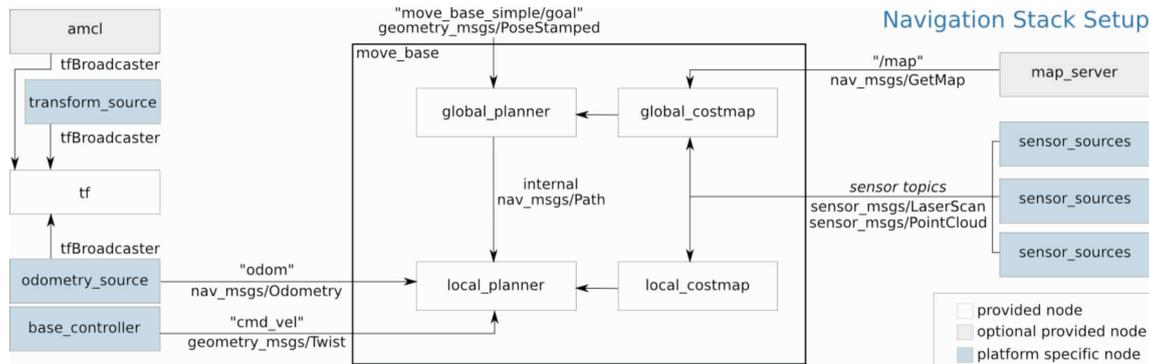


图 3 基于 move\_base 的导航框架

Fig. 3 Navigation framework based on move\_base

由于细胞仓库和组装平台上各模块的动态性,在实际重构的过程中可能会在规划出的全局路径上遇到障碍物,因此还需要机器人的本地实时路径规划(Local Planner)。本地实时规划采用动态窗口(Dynamic Window Approaches)算法,规划机器人每个周期内的线速度和角速度,使之尽量符合全局最优路径,搜索躲避和行进的多条路径,综合各评价标准选取最优路径。

### 3.2 细胞模块自主连接方案

细胞机器人重构的关键就是解决细胞模块间的自主连接问题。在根据任务需求规划完成细胞机器人构型之后,通过构型信息管理系统将构型信息传递至细胞仓库,细胞仓库对应细胞接收到构型信息后进行重构,重构过程由间质细胞负责操作,间质细胞自主寻找和连接构型所需目标细胞模块。细胞模块之间的自主连接分为 3 个过程:全局路径导航,机器视觉调姿和连接机构锁紧。以间质细胞与目标细胞的连接为例,其连接的流程见图 4。

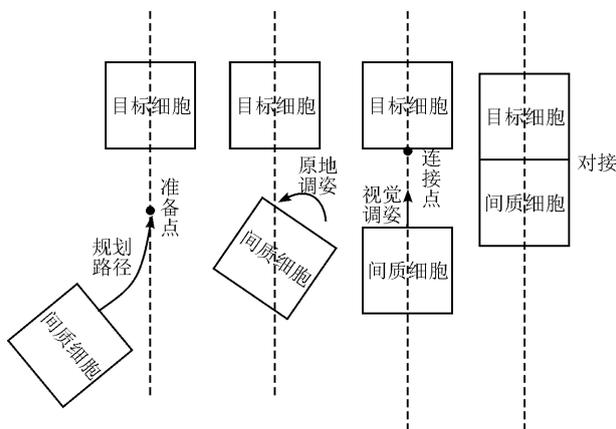


图 5 自主连接过程

Fig. 5 Autonomous docking process

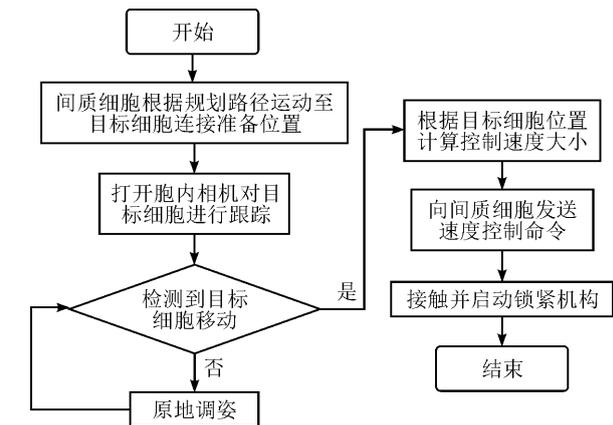


图 4 自主连接流程图

Fig. 4 Autonomous docking flow chart

在细胞模块自主连接过程中,连接开始时的初始位置为细胞仓库中间质细胞的起始位置,连接准备点位置为目标细胞连接面正前方 0.1 m 处位置,分别利用全局路径规划、本地实时路径规划和视觉调姿完成细胞模块间的自主连接,自主连接过程示意图 5。

### 3.3 机器视觉调姿

当间质细胞按照规划路径运动至连接准备点时,打开胞内相机对目标细胞进行跟踪,并根据目标细胞位置调整自身位姿向目标细胞靠近。通过胞内相机获取的单目视觉信息,可以得到间质细胞与目标细胞之间的相对位姿关系,结合里程计信息与激光雷达信息,就可由间质细胞在地图中的位姿通过转换得到目标细胞在地图中的位姿。本文所采用的机器视觉为和 ROS 深度整合的 OpenCV (Open Source Computer Vision Library) 库。首先对胞内相机进行标定,标定方法采用张正有相机标定法<sup>[11]</sup>。完成相机标定后的 ROS 图像消息转换为 OpenCV 的图像数据,通过 OpenCV 中的 cam\_shift 算法对目标细胞进行跟踪,并将 OpenCV 格式的图像再转换成 ROS 图像数据,根据目标细胞的位置信息计算间质细胞的速度大小,并向间质细胞发送速度控制消息,完成从准备点到连接点的位姿调整。

通过 OpenCV 对目标细胞进行追踪前,需要先对各目标模块图进行颜色分割,反向投影,计算直方图并保存,当进行视觉调姿的过程中,根据 cam\_shift 算法将所追踪的目标细胞用矩形框标记出来

(图6),并根据之前标定相机的位置数据,返回目标物体相对于相机的位置信息,进而将相对位置信息转换为速度控制信息。

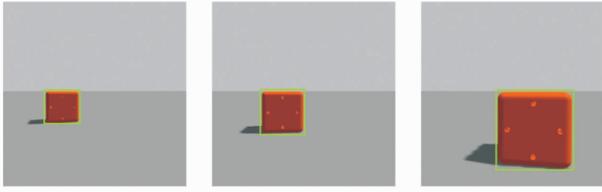


图6 目标细胞位置追踪

Fig. 6 Target cell location tracking

通过 Opencv 中的 `cv2.boundingRect(img)` 函数返回的 4 个值  $x, y, w$  和  $h$ , 其中  $x$  和  $y$  为矩形左上方点的坐标,  $w$  和  $h$  为矩形的宽和高。由返回的 4 个值可以得到目标细胞相对于标定相机(即间质细胞)的位姿。已知间质细胞最大移动速度为  $v_m$ , 设间质细胞实际速度为  $v_j$ , 返回目标矩形面积越大, 说明距离目标细胞位置越近, 则可给出间质细胞实际控制速度大小为:

$$|v_j| = k|v_m| / (wh + 1)$$

间质细胞实际速度在  $x$  方向分量  $v_{jx}$  与返回矩形中点位置坐标有关, 已知标定相机图像中点坐标为  $(x_m, y_m)$ , 则: ①当  $(w+x)/2 < x_m$  时,  $|v_{jx}| < 0$ , 发送向左速度控制指令; ②当  $(w+x)/2 > x_m$  时,  $|v_{jx}| > 0$ , 发送向右速度控制指令; ③当  $(w+x)/2 = x_m$  时,  $|v_{jx}| = 0$ , 发送向前速度控制指令。

## 4 仿真试验与结果

本文利用 Gazebo 仿真环境搭建细胞机器人重构平台, 将 Solidworks 中设计各细胞模块转换为 URDF 格式, 配置激光雷达、里程计及单目摄像头传感器模块与驱动插件, 导入细胞机器人重构平台中, 见图 7。

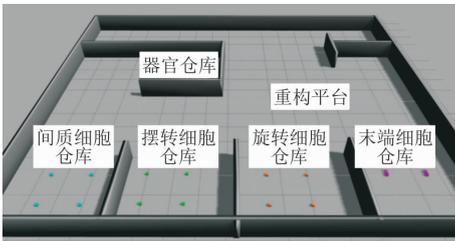


图7 Gazebo 仿真平台

Fig. 7 Gazebo simulation platform

通过间质细胞进行 SLAM 地图创建, 利用 AMCL 功能包对细胞进行自定位, 根据不同任务所需要的细胞机器人构型要求, 由间质细胞在各细胞仓库中寻找、导航并自主连接相应细胞模块, 实现细胞机器人的重构。SLAM 地图创建的过程及创建完成的地图见图 8。

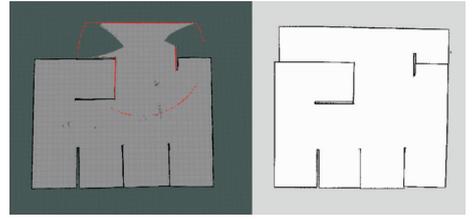


图8 SLAM 建图过程

Fig. 8 SLAM building process

地图建立完成之后, 将地图信息导入 `move_base` 导航功能包中, 当构型信息管理系统给出需要连接两细胞的位姿信息, 就会从间质细胞向目标细胞准备点规划出一条路径, 通过 `rviz` 可以看到规划出的路径以及细胞的自定位, 图 9 的细线为规划出的路径, 当遇到细胞仓库中其他细胞模块时会做出局部路径规划, 对实时障碍物进行躲避, 验证了  $A^*$  算法、DWA 算法和蒙特卡洛定位法的有效性。当间质细胞到达目标细胞准备点之后, 进行机器视觉调姿, 使间质细胞继续运动至目标细胞连接点进行连接。

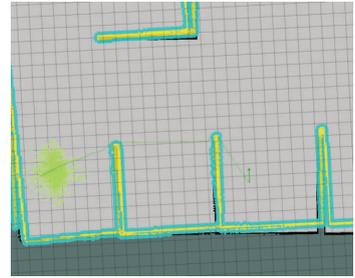


图9 路径规划与导航

Fig. 9 Path planning and navigation

图 10 为间质细胞与旋转细胞在 Gazebo 仿真环境中的自主连接过程, 通过多次仿真自主连接实验, 验证了机器视觉调姿的有效性。



图10 细胞自主连接过程

Fig. 10 Cell autonomic docking process

当间质细胞与目标细胞连接完成后, `move_base` 导航参数中的机器人尺寸半径也会随之更改, 以确保在下一路规划的过程中不会因为连接后尺寸的变化而发生碰撞。随后构型信息管理系统给出下一目标细胞的位姿信息, 由间质细胞驱动连接体继续进行下一次自主连接, 重复自主连接过程, 最终按照构型要求重构的细胞机器人器官模块见图 11。

重构完成的器官模块通过自主导航运动至器官仓库待命, 等待构型信息管理系统发布消息, 从而进行器官层面的重构。本实验以双臂协同操作细胞机器人为例, 作为任务规划的最终构型。间质细胞接收到构型

消息后运动至器官仓库,见图 12。按照构型要求连接相应器官模块,由多个间质细胞将两器官模块按构型要求连接,最终重构完成的双臂细胞机器人,见图 13。

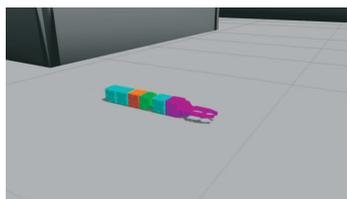


图 11 细胞机器人重构器官模块

Fig. 11 Cell robot reconstruction organ module

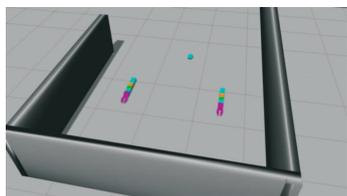


图 12 细胞机器人器官层面重构

Fig. 12 Cell robot organ reconstruction

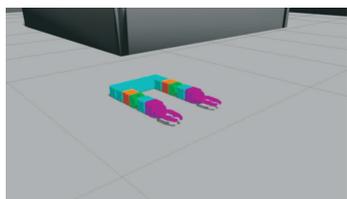


图 13 双臂细胞机器人

Fig. 13 Double arm cell robot

## 5 结论

1) 在细胞机器人系统的研究基础上,对异构模块化机器人的重构方法进行研究,提出细胞机器人重构实现框架,由构型信息管理系统实现细胞仓库、器官仓库和细胞机器人之间的信息交互,按任务规划需求对仓库中各模块进行任务分配。

2) 基于 ROS 机器人操作系统,利用 Gazebo 搭建细胞机器人地面仿真环境,将各细胞模块及其传感器与驱动插件导入仿真环境中,构成细胞机器人自重构平台,通过 Gmapping 算法整合各数据信息,并利用蒙特卡洛定位法,实现了组装平台地图构建和模块实时定位。

3) 针对异构模块化机器人自主连接问题,提出一种细胞模块间自主连接方案,利用 A\* 算法和 DWA 算法实现了全局及本地路径规划,并通过 Opencv 利用机器视觉完成姿态连接,实现模块间的自主重构。

针对 4 种类型细胞模块,按照任务规划构型,实现了各细胞模块之间的自主重构以及细胞与器官模块之间的自重构,完成了双臂细胞机器人自重构仿真试验,验证了细胞机器人自重构平台的可行性与

自主连接方案的有效性。

## 参考文献(References):

- [1] FUKUDA T, NAKAGAWA S. Dynamically Reconfigurable Robotic System[C]//1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1988; 1581-1586.
- [2] 安德孝,空间细胞机器人体系研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016:77.  
AN D X, Research on the System of Cellular Space Robots[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016; 77. (in Chinese)
- [3] KAWAKAMI A, TORII A, MOTOMURA K, et al. SMC Rover: Planetary Rover with Transformable Wheels[C]//Sice 2002. Proceedings of the Sice Conference. IEEE, 2003(1):157-162.
- [4] MOTOMURA K, KAWAKAMI A, HIROSE S. Development of Arm Equipped Single Wheel Rover: Effective Arm-Posture-Based Steering Method[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA. IEEE, 2005(1):63-68.
- [5] GROB R, BONANI M, MONDADA F, et al. Autonomous Self-Assembly in Swarm-Bots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(6):1115-1130.
- [6] BOJINOV H, CASAL A, HOGG T. Multiagent Control of Self-Reconfigurable Robots[J]. Artificial Intelligence, 2002, 142(2): 99-120.
- [7] KELLYT J, ZHANG H. Combinatorial Optimization of Sensing for Rule-Based Planar Distributed Assembly [C]// 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006; 3728-3734.
- [8] 魏洪兴,刘森,李德忠,等.一种新的自组装模块化群体机器人——连接机构设计与自组装控制[J]. 机器人, 2010, 32(5):614-621.  
WEI H X, LIU M, LI D Z, et al. A Novel Self-Assembly Modular Swarm Robot: Docking Mechanism Design and Self-Assembly Control[J]. Robot, 2010, 32(5):614-621. (in Chinese)
- [9] 乔佳楠.基于二维激光雷达的无人运动平台环境感知方法研究[D].北京:北京理工大学,2016.  
QIAO J N. Research on Environment Perception Method of Unmanned Platform Based on 2D Lidar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] MONTEMERLO M, THRUN S. Fast SLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem[C]// Proceedings the Eighteenth National Conference Artificial Intelligence. Alberta:2002;593-598.
- [11] 马颂德,张正友.计算机视觉——计算理论与算法基础[M].北京:科学出版社,2003.  
MA S D, ZHANG Z Y. Computer Vision: Calculation Theory and algorithm Foundation[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)