



## 中尺度机器人群集的设计创新：合作式城市传感和测绘场景下的应用<sup>\*</sup>

Audelia G. DHARMAWAN, Gim Song SOH<sup>†‡</sup>, Shaohui FOONG,

Roland BOUFFANAIS, Kristin L. WOOD

新加坡科技设计大学, 新加坡 487372, 新加坡

<sup>†</sup>E-mail: sohgimsong@sutd.edu.sg

投稿日期: 2019-07-30; 录用日期: 2019-12-17; Crosschecked: 2019-12-25

**摘要:** 由于中尺度机器人具有隐蔽性、便携性等特点，安全与监测领域的中尺度机器人研发越来越受到重视。为实现快速、节能、分布式、自适应、具有鲁棒性和可伸缩的系统，中尺度机器人设计和开发需大量硬件、控制和行为创新。本文从4方面详述其设计和开发过程：(1) 嵌入式平台的系谱学；(2) 关键系统架构和功能布局；(3) 研发和实施中尺度机器人系统的设计原则；(4) 为中尺度机器人族群有效集体运作而开发的各种关键算法，及在城市传感和测绘领域的应用。这需要我们对可靠运行的嵌入式硬件需求具有清晰认知，以及在磁感、室内定位、中央模式发生器控制和中尺度器人群体分布式自治方面作出关键创新。虽然在复杂机器人系统设计过程中不可避免采用一些临时方法，但本文主要关注成体系系统的设计过程以及组件设计集成。成体系系统的设计过程为该领域未来系统的开发提供了基础。本文所介绍的设计代表最新发展趋势，可作为其他应用的基准，并推广到其他领域。

**关键词:** 成体系系统设计；中尺度机器人；群集；城市传感

本文译自 Dharmawan AG, Soh GS, Foong S, et al., 2020. Design innovation of mesoscale robotic swarms: applications to cooperative urban sensing and mapping. *Front Inform Technol Electron Eng*, 20(12):1618-1631.  
<https://doi.org/10.1631/FITEE.1900384>

中图分类号: TP242

### 1 引言

自主小型机器人具有许多优势，例如其灵活性可以让微型机器人轻松通过狭窄的空间，这是大型机器人无法做到的；再者，微型机器人可以去一些对人类来说非常危险的偏远地区，特别是在执行搜索和救援的任务时 (Dharmawan et al., 2018b)。它们的足迹相对较小，便于运输和部署，但同时它们能够在比自身规模大得多的范围内进行大量协同群集行为 (Dharmawan et al., 2018a)。

开发微型机器人时会遇到一些挑战诸如传感器或组件的尺寸限制(Dharmawan et al., 2017)、能

源供应不足、自主处理能力缺乏等。举个例子，用于机器人视觉的典型测距模块通常体积庞大 (Sundram et al., 2018)。特别是在室内监测和绘图的情况下，微型机器人非常需要低功耗、高精度的非 GPS 定位技术 (Nguyen et al., 2018)。

可扩展性是中尺度机器人的另一个显著特点，它可以通过一大群微型机器人来扩大覆盖范围。这需要一个去中心化的（分散式）多机器人系统(MRS)，并由单个机器人在局部进行计算、控制和通信。它对多个单元的丢失具有很高的容错能力，这以更高的系统复杂性为代价。分散的群系统需要分布式通信网络 (Sekunda et al., 2016)，分散计算框架 (Kit et al., 2018) 和协作控制策略 (Zoss et al., 2018)。为了更高效，所实施的分散系统和协作策略需要在不同数量的机器人（可扩展性）下具有很强的适应性，对抗个体的失败（鲁

<sup>‡</sup> 通讯作者

\* 本文得到以下机构的资助：新加坡科技设计大学淡马锡实验室  
自主侦察与监视系统技术和 SUTD-MIT 国际设计中心

ORCID: Gim Song SOH, <http://orcid.org/0000-0002-0042-5151>

棒性) 和对未知动态环境的反应(灵活性)(Bouffanais, 2016)。

考虑到上述因素, 我们已确定且致力于解决这三个开发中尺度机器人群集的系统级的挑战, 分别是微型化设计、适应性设计和可扩展性设计。为了克服这些困难, 尤其是城市感知以及空间测绘方面的应用, 我们在过去几年中开发了一些关键方法以应对, 如图 1 所示。这篇论文展示了我们在微机器人系统研究方面的新高度, 通过以算法集群驱动设计原则和多机器人系统的形式, 为以下领域提供了持久的贡献: 中尺度机器人挑战形式、谱系发展、系统设计方法、一种可实现的且最先进的系统架构。



图 1 城市感知与空间测绘方面微型机器人面临的主要挑战及其开发解决方案

现有文献中, 大多数集群系统的开发都集中在同质的机器人设计上。从系统中的系统的设计层级, 我们预计机器人将在设计和能力方面都进一步演化。因此, 与绝大多数现有的群系统相比, 我们的设计方法集中于开发集成群系统的各个构件, 这些构件从一开始就是模块化的, 更重要的是与平台无关。这种方法使我们能够在不影响最终的一体化过程的情况下继续设计、原型制作和开发机器人设计。

为了聚焦每一次工作的提升所在, 我们建立了三个不同的试验台。这样在最初阶段每一项工作的进展过程都不会妨碍其他的工作, 但需要有汇集一个通用平台的终极目标, 同时通过保持系统前端和中心的集成性。图 2 包含了三个不同的

试验台, 每个主要集中在一个特定的工作上。每个试验台将会在第二节中进行具体描述。第三节将更详细地讨论每个已开发的解决方案。在第四节中, 我们举例说明了已经开发的用于城市感知以及空间测绘方面的微机器人群集系统的用例, 并在第五节中讨论开发过程中的启示和洞见。



图 2 试验台的设计谱系

## 2 设计谱系

如果只在单一平台上针对小型化、适应性和可扩展性这三类问题共同开发解决方案, 可能会牵制单一问题的进展。例如, 当传感器技术微型化仍处于完善中时, 很难测试自治群系统的可扩展性。同样地, 当针对适应性设计的模块化平台处于演化中时, 对所开发技术的性能的评估也很困难。

基于这一角度, 我们利用不同的测试平台架构来实现不同的目标, 即 Virgo 的小型化、Taurus 的可扩展性和 Orion 的适应性。利用多个试验台是“并行原型”设计原型原理和策略的一种应用, 在预算灵活、探索潜力大的情况下, 这种方法可以同时呈现和比较多个设计概念 (Camburn et al., 2017b)。它同样是对系统演化的“TRIZ 定律”的一种适应, “TRIZ 定律”指的是: 技术在技术系统发展中具有不平衡性 (Altshuller, 1984)。虽然每个平台都有其独特的作用, 但如果某一技术的体系结构更合适, 可以将该技术的开发集中在其他平台上; 试验台与所开发技术之间的相互关系如图 2 所示。所开发的技术实际上与平台无关, Orion 架构本身将是集成了所有技术的最终公共平台。

## 2.1 Virgo: 微型化工作平台

Virgo 架构旨在通过设计和开发微型基础技术来实现微型机器人的移动、传感和自适应自治的功能。基础技术蕴含了传感和计算的核心基础，这一基础将最终用于集成架构。

Vir-go 是新加坡科技设计大学 (SUTD) 开发的微型球形机器人家族。最新的 Virgo 3.0 的系统架构的主要组件包括顶部和底部底盘、印刷电路板(PCB)、两个直流电机、电池和相机 (如图 3 所示)。我们之所以选择球形机器人结构作为微型化工作的试验台，是因为通过组件小型化来适应球形的封闭几何形状是一个难点。该结构还具备高效的全向平面活动性特征，而外壳在碰撞时则具有自然的动态阻尼 (Niu et al., 2014) 和自然的避障及机动性特征，这在微型化技术的实验阶段是很重要的。表 1 总结了 Virgo 组件的迭代。

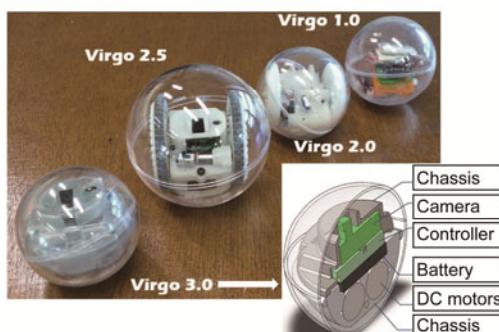


图 3 新加坡科技与设计大学 (SUTD) 开发的历代 Virgo 微型球形机器人，以及 Virgo3.0 的主要部件(reprinted from Wu et al. (2017))

由于现成的商用电子元件的微型化并不是最理想的，微型化工作的第一步是建立一个定制的印刷电路板 (PCB)。为减少所需的组件数量，我们可以采用“片上系统”技术作为解决方案，利用微控制器单元(MCU)节约空间和能耗。从 Virgo 3.0 开始，我们设计了一个定制化的下一代 4 层 PCB，其物理足迹为 30 mm×30 mm×4 mm (Nguyen

et al., 2018)，包括以下主要组件：STM32F411 32 位 ARM Cortex M4 CPU、9 轴惯性测量单元(IMU) 和电机驱动 (如图 4 所示)。

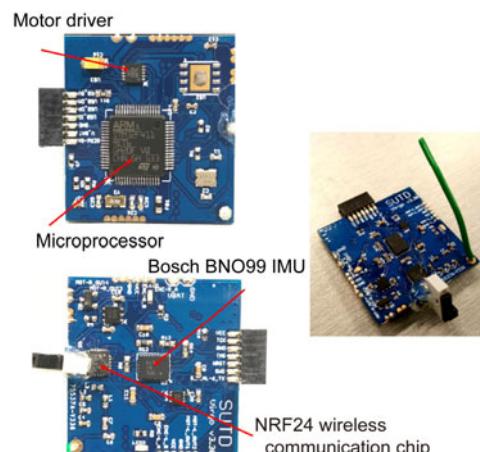


图 4 定制化下一代印刷电路板(PCB)

使用印刷电路基板，通过车轮测程（位移）和 IMU（轴承）(Ajay et al., 2015) 的传感器融合可以实现航迹推算。为了提高无 GPS 环境下的定位精度，我们研究了超宽带技术 (UWB) 模块和气压计功能，这两种模块体积都很小，因此很紧密。同时我们还开发了一种微型机器人的室内定位技术。

考虑到尺寸限制，利用板载 IMU 的三轴磁强计进行静磁检测有助于提高传感能力 (Wu et al., 2016)。因此，我们也致力于开发一种紧凑的磁性接近传感器，作为 Virgo 微型化工作的一部分。人们发现，在机器人的视觉方面，常用的测距模块通常体积庞大 (Sundram et al., 2018)。因此，我们开发了一种定制的光探测和测距 (LiDAR) 模块来重建微型机器人的环境点云，从而实时构建占用网格地图 (Kit et al., 2019)。由于测距模块需要清晰的视线，在 Vir-go 上开发它是不现实的。因此，我们直接在 Orion 平台上开发微型激光雷达测绘技术。

表 1 历代 Virgo 组件迭代

版本	处理器	时钟频率 (Hz)	尺寸 (mm)	质量 (g)	电池寿命 (满载状态) (小时)
Virgo 1.0	8-bit ATmega328 8-MHz CPU	15–20	60	46	0.4 小时
Virgo 2.0	32-bit ARM Cortex-M4 72-MHz CPU	750–800	60	50	2.0 小时
Virgo 3.0	32-bit ARM Cortex-M4 100-MHz CPU	>10 kHz	60	80	2.0 小时

为了使机器人进一步微型化而开发的各种技术将在第 3 节中详细讨论。

## 2.2 Taurus: 可扩展化工作平台

Taurus 平台允许开发有效的多主体分布式控制算法，以实现具有生物启发性的集群行为，从而提供改变游戏规则的集体行动。最新的 Taurus 测试平台系统架构的主要组件包括 XBee 通信模块、Raspberry Pi 单板计算机 (SBC)、实时时钟、移动电源和超声传感器，如图 5a 所示。Taurus 的集合体有望在控制（集体决策）、计算（信息处理）和通信方面以完全分布式的模式运作。具体来说，没有中央计算节点，每个智能体都以分布和分散的方式处理所有数据采集和全局处理。因此，我们为机器人配备了通信模块，通过发送和接收群集算法所使用的相关数据，从而产生大量的集体行动，使通信模块能够在分布式网状网络中进行通信。此外，还需要利用一个实时时钟来确保通信时所有平台都同步。为达成这一目标，应重点开发 Taurus 的群集单元（Swarm Enabling Unit - SEU）(Chamanbaz et al., 2017)。

如图 5b 所示，SEU 由通信模块和处理单元组成，它充当了特定机器人和集合体之间的桥梁。

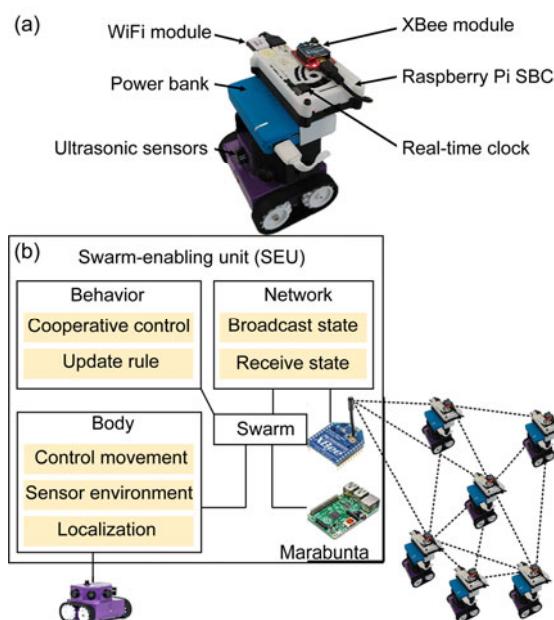


图 5 Taurus 平台的主要组件 (a) 以及群集构造 (b) (图片来源: Bouffanais; Reprinted from Chamanbaz et al., 2017)

在软件层面，每个群都由三个元素组成：“身体”控制机器人的运动，并从其状态和感知到的环境数据中收集信息；“网络”负责分布式通信，将智能体的当前状态广播到群集，并从其他智能体的状态中收集信息；“行为”包含去分散式合作控制策略。

这样的设计保证了 SEU 中所有元素的相互独立。例如，更改主体元素（即机器人配置和传感器）不会影响分布式网络配置，也不会影响集体控制策略，反之亦然。因此，SEU 具有平台无关性 (platform-agnostic)，并能够轻松集成到其他具有各种传感器的开发平台中，从而提高了微机器人人群集的可适应性。

为使微型机器人具备有效可扩展性而开发的分散式群集和协作控制策略将在第 3.5 节中详细讨论。

## 2.3 Orion: 可适应性工作平台

Orion 平台设计考虑了灵活性问题，具有灵活性的微型机器人可以适应不同环境，从而更好地完成工作任务。Orion 平台的通用系统架构的主要组件包括底盘、可重新配置的车轮和任何其他可选的传感器系统（图 6）。因此，Orion 开发的核心是探索平台的可重构性和模块化设计。

为了实现微型机器人的适应性和异构性，Orion 平台的体系结构分为两部分：(1) 底盘，它作为主要的统一元素容纳其他平台开发的电子和技术；(2) 可根据要求重新配置的车轮。迄今为止，有两种针对城市感知以及空间测绘方面的特定应用而开发的 Orion：地面型 (O-map) 和爬壁型 (O-climb)。

如图 6 所示，O-map 单元配备橡胶轮和滚珠脚轮，可在各种地形上轻松移动，而 O-climb 单元则具有特殊的轮腿，带有顺应的胶带以及利于稳健攀爬的尾部 (Hariri et al., 2018; Koh et al., 2019; Dharmawan et al., 2019a,b)。每个物种在开发过程中都使用同类电子器件和技术，并在异构分散群集中发挥其特定功能，同时保持其小型的规模。第 4 章介绍了 Orion 平台变体的用例。表 2 总结了两种 Orion 种类的技术规格。

微型机器人的适应性还可从控制角度进行管理。我们探索了使用中枢模式发生器 (CPG) 作为前馈控制器来响应不同的环境条件生成所需的

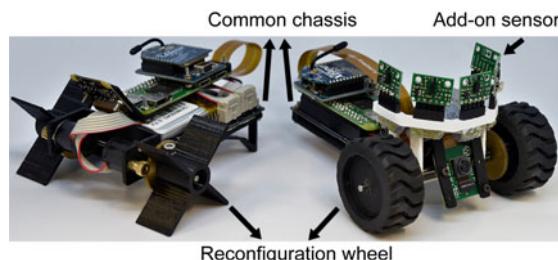


图 6 爬壁型 (O-climp) (左) 和地面型 (O-map) (右)  
Orion 及其主要部件(reprinted from Kit et al. (2019), Copyright 2019, with permission from IEEE)

机器人运动的方法。在第 3.4 节中将更详细地讨论已开发的适应性控制方式。

## 2.4 设计统一

三个独立的测试平台的共同目标是将它们集成到一个通用平台中，并由此建立起微型机器人群集系统。图 7 显示了当三个平台的技术统一在一起时的系统架构，包括硬件的能量流和软件的信息流。Ori-on 集成系统还另外包括一个被动红外 (PIR) 传感器和一个用于基本监视的摄像头。未来还可以使用这些传感器提供的信息来开发城市检测智能。在撰写本文时，Taurus 技术已完全嵌入 Orion 模块化平台中，虽然一些 Virgo 技术也已应用。图 7 的 Orion 和 Taurus 部分中列出的硬件和软件总结了集成 Orion 系统体系结构中的组件。在前面的小节中已经讨论了统一化设计的每个独立构建块的细节，读者可以参考相应的小节了解统一设计的具体元素的更多细节。

我们已经使用当前的集成系统测试了已开发的异构中尺度机器人群集，他们可以在实际场景中执行常见的城市感知以及空间测绘方面任务，尤其是多层室内测绘。第 4 节将详细讨论多机器人系统执行任务的性能。

## 3 设计方案

本节简要概述并总结了我们在构建自主微机器人群集系统方面正在开发的技术。

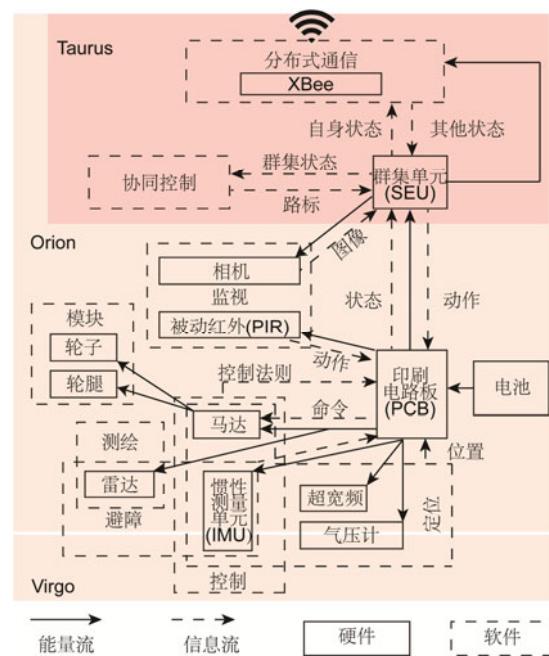


图 7 3 个中尺度机器人的系统架构

Taurus 已经在 Orion 中完全实现，而一些 Virgo 技术仍处于整合过程中

### 3.1 雷达测绘

传统的 LiDAR 系统由单个静态放置的激光发射和感应单元组成，其发射的激光束可以通过一个构成视场 (Field of View, FoV) 的旋转反射镜扫描特定视场 (FoV)，其测试距离可达 10 - 20 m。然而，对微型机器人而言，这些装置过于庞大、笨重且耗能巨大。为了克服这一问题，我们定制设计了自己的测距模块，该模块由五个静态放置的 VL53L0X 飞行时间测距传感器组成，如图 8a 所示。该模块可以实现较小的尺寸、重量和电压消耗。根据传感器阵列的布置，该模块能以 45° 的离散间隔（最多 2 m 的距离）测量机器人前方的深度信息。图 8b 显示了机器人穿过矩形空间时 LiDAR 传感器的输出示例。

通过内部定制设计的基于 LiDAR 的深度传感器阵列，我们开发了一种使用概率测绘法对周围环境进行测绘的算法。将 2D 空间划分为多个网格单元，其中每个网格都被分配了一个占用的后验

表 2 两种 Orion 的技术规格

种类	尺寸 (mm×mm)	质量(g)	结构	性能
地面型	100×82	137.5	底盘、轮腿、垂直尾部	可爬 360°斜坡，内部过渡，外部过渡
爬壁型	120×100	203.4	底盘、轮、脚轮	航点导航，避障，测绘

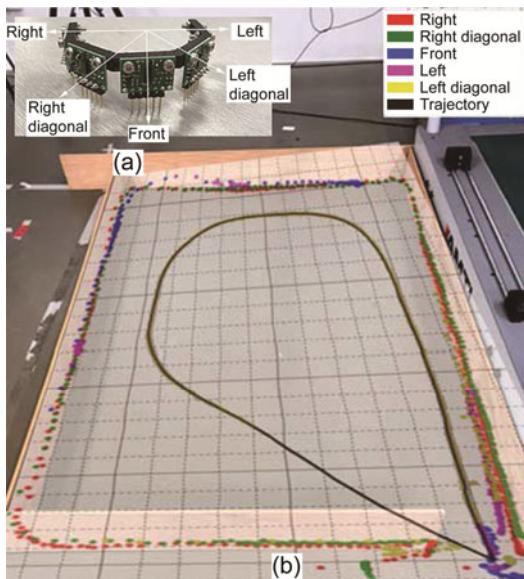


图 8 已开发的微型 LiDAR 静态传感器阵列 (a) 以及机器人轨迹覆盖在矩形空间上时的雷达测绘输出 (b) (reprinted from Sundram et al. (2018), Copyright 2018, with permission from IEEE)

概率，称为占用网格。如果来自机器人的 LiDAR 传感器返回了一个单元的距离值，则该单元的占用概率将增加。否则，单元占用概率将降低。当一个单元的占用概率超过某个阈值时，该单元标记为已占用；否则，将视为未被占用。未涉及的单元占用率为零。该方法采用了贝叶斯定理 (Bayes Theo-rem) 进行计算，考虑机器人的位置，读取 LiDAR 传感器中的数值，并返回占用概率。该方法还考虑了动态对象在空间中的移动。定制设计的 LiDAR 传感器已在 Orion 平台上完成了实施和测试，Sundram 等人 (2018) 报告了其测绘性能。

### 3.2 磁感

许多诸如家具和墙壁等的室内障碍物包含金属成分，而均匀磁场在铁磁元件周围发生形变。考虑到这种效应，我们设计了一种基于磁性的接近传感器，该传感器不仅可以放大磁场，还可以检测附近铁磁障碍物的方向接近性。

把两个磁化强度相反的永久磁铁 (permanent magnets, PMs) 彼此靠近放置，可产生对空间高敏感的磁场。随后在 IMU 内部，三轴磁力计放置在两个 PMs 的中间 (如图 9a 所示)，用来测量接近铁磁障碍物时的扰动场。Wu 等人(2016)讨论了磁场扰动的理论解释，确定了引起磁场形变的物体

空间形态 (轴承和距离)。他们还通过对 PMs 的尺寸进行了设计优化，提出了最强的检测力和避障策略(Wu et al., 2017)。拟议的基于微型磁接近传感器已在 Virgo 平台上进行了测试，机器人的避障动作快照如图 9b 所示。

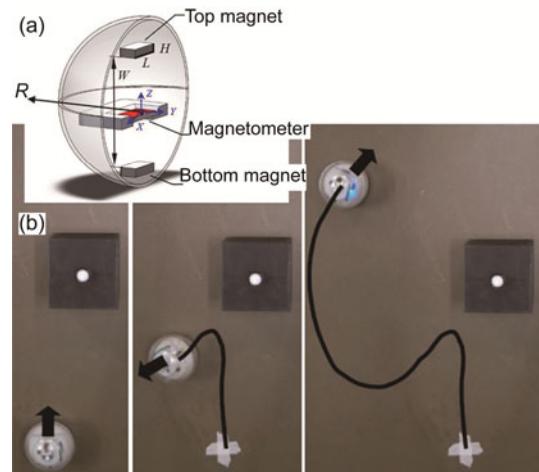


图 9 Virgo 内部的磁传感器阵列的布置(a)以及机器人在检测并避开障碍物时的快照(b) (reprinted from Wu et al. (2017))

### 3.3 超宽频和气压计支持的定位功能

考虑到室内城市遥感和测绘，我们还探索了 UWB 模块和气压计的组合使用，以提高在 GPS 受限环境中的定位精度。飞行时间原理可用于估计任何两个 UWB 模块在发送和接收消息时的距离。与 GPS 类似，UWB 定位采用三边测量法，通过从已知 UWB 锚点位置进行距离测量来估计对象的位置。2D 平面上的位置至少需要 3 个锚点来定位，而 3D 位置则需要 4 个锚点。

我们探索了用扩展的卡尔曼滤波器来融合轮胎里程计、IMU 和 UWB 模块的数据，从而提高了在 2D 平面上定位 Virgo 的准确性(Nguyen et al., 2018)。我们还将 UWB 模块的 2D 三边测量扩展到 3D 定位中，结合气压计的读数，进一步提高了 3D 定位的准确性(Goh et al., 2019)。此外还提出了一种新颖的水平投影模型，以减少 3D 定位的计算复杂性。

### 3.4 中枢模式发生器的前馈控制

生物学家将产生节奏性步态的现象称为“中枢模式发生器” (CPG)。通过将每个周期分配为快速离散的脉冲序列，在输入馈送为低维输入信

号时, CPGs 可以生成高维有节奏的输出步态信号作为协调模式, 同时, 正如前馈控制策略一样, CPGs 控制便于生成不同类型的模式轨迹 (Chowdhury et al., 2017b)。

这一概念也可用于机器人的运动控制。将 CPG 用作机器人的前馈控制涉及开发机器人步态的 CPG 模型。我们探索了用这种方法来控制 Virgo 的滚动运动。采用 CPG 架构的机器人步态模型是基于 Matsuoka 架构的非线性振荡器(Chowdhury et al., 2017a) 和 Hopf 非对称非线性振荡器 (Chowdhury et al., 2018a) 构建的。该数学模型中的一项增加了对外部干扰 (例如, 摩擦或噪声) 的神经元响应, 并能生成不同类型的模式轨迹。例如, 我们使用 CPG 模型为室内环境生成了平滑的步态 (图 10a), 为室外环境生成了粗糙的步态 (图 10b), 从而根据地面条件优化了最终的滚动步态轨迹。

然后, 将我们在 Virgo 平台上测试开发的 CPG 模型、前馈控制器与多个反馈控制器 (例如滑模控制 (SMC) (Chowdhury et al., 2017b)、高阶滑模控制 (HOSMC) (Chowdhury et al., 2017a)和自适应滑模控制 (ASMC) (Chowdhury et al., 2018a)结合使用, 可以增强抵抗外部干扰和参数不确定性的能力。通过前馈 - 反馈控制策略调节滚动角的稳定性, 从而调节机器人的滚动运动。图 10c - d 显示了结合 SMC 和 HOSMC 的 CPG 模型的侧倾角误差结果(Chowdhury et al., 2018b)。如结果所示, 基于 CPG 开发的控制器能够通过自适应前馈轨迹来稳定机器人在两个不同表面上运动时的侧倾角。

### 3.5 分散式群集系统

为了使微型机器人具有可扩展性, 我们利用并开发了一种分散式群集技术, 以便微型机器人的机群可以在各种系统尺度下协调工作。在可扩展、稳健和灵活的分散群操作中, 分布式通信网络和协作控制策略是最重要的因素。

为保证微型机器人能以分布式方式建立动态 (交换) 通信网络, 在操作过程中添加或减少节点, 我们为其配备了 XBee-PRO 模块。这些模块不仅可以创建分布式网状网络, 而且当智能体移动并进入或离开彼此的通讯范围时, 可以自动重新配置(Zoss et al., 2018)。可以通过调整板载 XBee

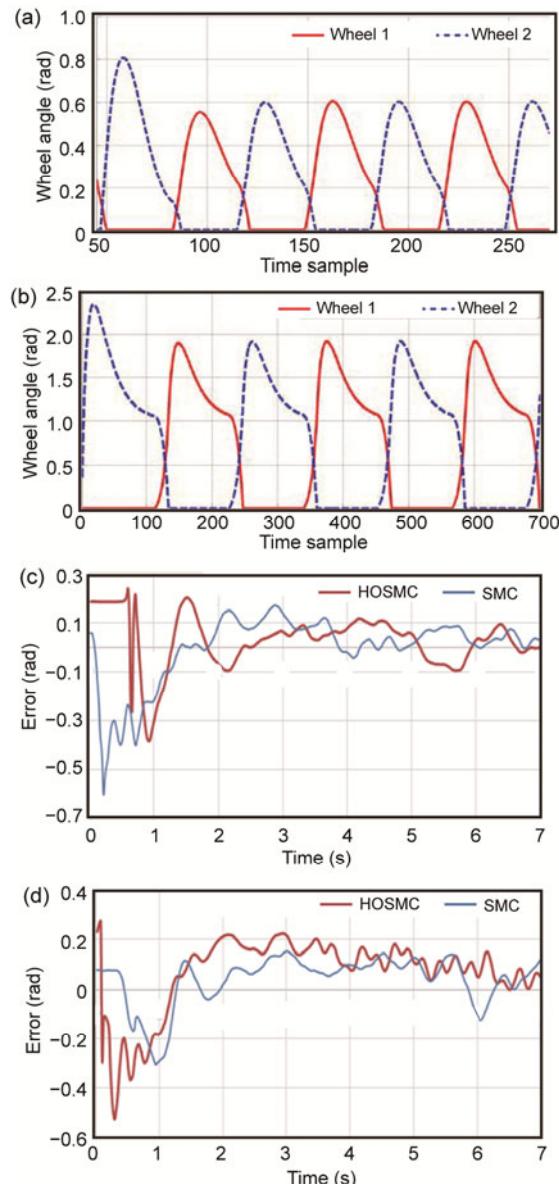


图 10 CPG(中枢模式发生器)实验结果: (a) 表面光滑的滚动步调; (b) 表面粗糙的滚动步调; (c) 表面光滑的错误信号; (d) 表面粗糙的错误信号

模块形成的无线自组织网络的动态拓扑, 实现最佳的集体性能, 例如在受到局域干扰时(Mateo et al., 2019)。

作为一个整体, 群集系统应朝着共同的全局目标运行。这些全局目标必须映射到单独的、特定智能体的命令中——协同控制策略所激发的操作及其采取的方法决定了系统大规模集体行为的有效性。为了实现在分布式通信下的分散操作, 我们将空间和时间局域性加诸协作控制策略上,

即，智能体的动作仅由在其位置的某个当前邻域上收集的信息确定。这些条件可以通过迭代更新控制智能体轨迹的规则来实现。我们针对不同的全局目标探索了不同的合作控制策略，例如共识、外圈防御、环境探索(Chamanbaz et al., 2017)、群聚、集体航行、区域覆盖率(Zoss et al., 2018)和基于边界的探索(Kit et al., 2019)。这些行为规则可以是特定的，且在任何给定时间中，不同的智能体可能遵循不同的规则。

图 11 显示了在一群智能体形成阻碍时，遵循集体导航策略的智能体如何达到目标(Zoss et al., 2018)。其余的智能体可以在其平衡位置周围移动，从而为单个智能体通过留下空间（图 11a）。当移动的智能体绕过他们到达目标时，该组也可以保持静止状态（图 11b）。又或，移动智能体可以直接穿过集合体以达到其目标（图 11c）。

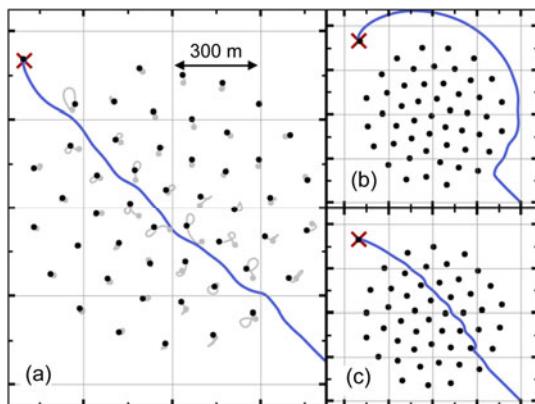


图 11 可能的群体行为的仿真模拟图

### 3.6 技术概要

本小节中，我们总结了前述用于应对中尺度机器人系统挑战的技术。在微型化方面，表 3 总结了添加到中尺度型机器人中的各个技术的尺寸和质量。

在适应性方面，图 12 总结了所开发的微型机器人的各个模块。从软件的角度来看，SEU 可以实现网络、行为和主体元素的适应性。模块化的运动和易于添加的传感器为硬件提供了适应性。

在可扩展性方面，我们对所开发的具有不同数量单元的分散集群进行了测试。表 4 总结了每项研究工作中所用机器人的最大数量。迄今为止，我们的测试数量中最多的为 45 个。

表 3 微型化技术总结

技术	尺寸( $\text{mm}^3$ )	质量(g)
雷达测绘	60×40×20	4.75
磁感	12.7×12.7×6.35	7.75
2D 超宽频定位	23×13×2.9	1.40
3D 超宽频+气压计定位	21.6×16.6×3	1.20

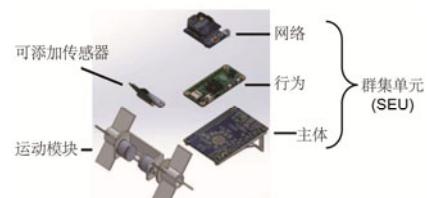


图 12 地面型微型机器人的适应性模块概要

表 4 可拓展性总结

来源	数量
Mateo et al. (2019)	11
Kit et al. (2019)	12
Vallegra et al. (2018)	22
Zoss et al. (2018)	45
Chamanbaz et al. (2017)	45

## 4 案例

在本节中，我们说明了我们开发的分散式和异构微机器人群的用法-其硬件和系统架构在图 6 和 7 中进行了描述,其分别是在现实世界的环境中执行多层映射的城市感知以及空间测绘方面任务。集体的任务是在办公时间内绘制一栋校园建筑中两层非结构化和动态环境的地图(Kit et al., 2019)。八个地面型机器人单元位于一层 (F1)，其他四个位于上层 (F2)。在实验过程中，将两个爬壁型机器人放置在垂直的墙壁上并缓缓上升，从而扩展了楼层之间的分布式通信网络，以及从高空有利位置的基于传感器的监视能力。要在 F1 和 F2 上绘制的表面积的布局在图 13 中以浅灰色显示——它们由开放空间，电梯大厅和带开门的办公室组成。从图 13 中的离散快照可以看出，使用探索合作控制策略时，即使所有机器人都从空间的中心开始，也能够良好地发散并在三到四分钟内覆盖完所要求的空间，所需时间视遇到的障碍物而定。

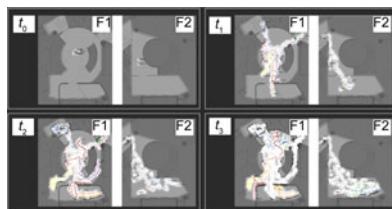


图 13 两层(F1 和 F2)上 12 个单元连续时间点( $t_0, t_1, t_2, t_3$ )的地图区域快照

## 5 讨论

在本节中，我们将简要回顾在开发微机器人群系统的过程中获得的思考。表 5 概述了基于我们在微机器人系统开发方面的经验，观察和广泛测试而确定的设计原则，以及实现或得出该主题的相应参考。这些原则遵循命令式（形式主义），并作为(Fu et al., 2015, 2016)工作后的规范。从此意义上讲，一条原则是“从大量经验和/或经验证据中归纳得出的基本规则或法律，为设计过程提供指导以增加获得成功解决方案的机会”。在这种情况下的重点是开发创新的微机器人系统。在表 5 的最后一栏中以基础和支持性参考的形式提供了原理及其实用性和可扩展性的证明。

根据设计原则，我们的工作从系统级设计的角度来处理群系统的开发，我们通过模块化的方法来开发不同的重点功能(小型化、可扩展性、适应性)，并在并行和平台无关的情况下开发它们。这使我们受益良多，因为可以在蜂群系统中独立地添加或删除这些功能，因此，在开发单个构建块的同时，还可以对功能齐全的异构群体进行测试。我们的各种工作(表 4)，包括这一个，都证明了它可以用于多种不同的机器人平台，如地面车辆，地面机器人，有不同的硬件配置和能力的爬坡和翻滚机器人等。

集群启发的设计原则，特别是合作控制算法的设计，是为了不需要一个可靠的和永久的通信渠道之间的所有参与单位以确保有效的操作。每个平台在任何时刻的行为都受其当前状态和网络中相邻单元的状态控制。因此，这仅仅需要短距离的本地通信。尽管如此，在开发阶段和试验阶段，对系统进行更精确的控制通常是有益的。这就解释了我们在第 4 节中讨论的多楼层映射实验中使用了一个通过自适应网络连接到群集的监测站。这个站点聚集了所有智能体上的可获取的信息。这种程度的控制很容易由装备 XBee PRO 模

块的微型机器人群集来获得。如前所述，这些模块可以构建一个动态的全局路由网络，即使它不在直接通信范围内也可使消息从基站发送到任何特定的单体。

我们的群集系统在现实世界的可扩展性已经用 45 台设备进行了测试。虽然这个数字可能还很少，考虑到系统设计的分散性，如果分布式通信策略可相应地扩展，那么它的可扩展性将适用于大量的智能体(Zoss et al., 2018)。此外，100 多个集群系统(一直到 1000 机器人(Rubenstein et al., 2014)的 1024 个)本质上是操作极其简单和基本的机器人单元，他们的集体操作确实是非凡的科学“杰作”。然而，当考虑在非结构化动态环境中执行“有用的”集体操作的实际工程集群系统时，很少有超过 10 个单元的集群系统。当考虑到系统在没有任何支持基础设施的情况下运行时，这一点尤为正确(例如，开销定位摄像机、用于控制目的的中央计算机)。在这方面，我们相信我们拥有真正分散的架构和超过 10 个单元的集群系统是最先进的。

## 6 结论

微机器族群因其便携性和可扩展性而极具魅力，而其系统的复杂性对其开发过程面临许多挑战。在本文中，我们夯实和总结了在开发微型机器人群系统方面的各种努力和成就。其中，我们确定了要解决的挑战，并简要说明了各种设计的解决方案。同时还介绍了机器人平台的设计谱系和系统架构，以及技术的发展和集成。在真实世界的模拟演示说明了已开发技术的实用性和功能性。最后，我们讨论了在开发微型机器人群系统的整个过程中涉及到的关键设计原理。

我们的合作控制策略通常是由用户根据群集目标预先定义和制定的。这些智能体还不具备独立切换或生成更新规则的能力。在这项工作的基础上，在未来，我们有兴趣开发一个高度智能的集群系统，其中的个体能够独立决定应用哪条规则，并根据当前的状态创建新的规则，以实现更复杂的全局目标。

### 遵守伦理准则声明

作者声明发表这篇论文没有利益冲突。

表 5 两种 Orion 的技术规格

分类	设计原则	开发参考或原则应用	基本的支持性参考设计原则
微型机器人系统架构及组件	<p>紧凑元件：为了使系统小型化和提高系统性能，通过优化和新技术的开发来减小元件的尺寸和质量。</p> <p>低功耗：实现系统在持续时间和寿命方面的性能，通过优化、消除冗余或不必要的功能和智能能源管理，降低组件、子系统和整个系统的功耗。</p> <p>模块化：为了提高系统灵活性和可重构性，可通过</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 单独的模块来执行不密切相关的功能。</li> <li>2. 将功能限制在单个模块中。</li> <li>3. 将功能限制与越少的组件越好。</li> <li>4. 将模块分成为多个较小相同的模块。</li> <li>5. 收集预料之中不会改变的组件成为单独的模块。</li> <li>6. 收集相同能量功能域关联的零件成为单独的模块。</li> </ol> <p>协同式群集：为了提高微型机器人扩展性和性能简介。可通过分布式网关中发展分散式通信以及收发相关数据来采取协同控制。</p> <p>异构性：为了具有更好的可适应性，需要开发不同状态、功能或可重构性多样化的系统替代方案或互补架构。</p>	<p>Sundram et al., 2018; Dharmawan et al., 2018b; Ajay et al., 2015; Niu et al., 2014</p> <p>Dharmawan et al., 2019b; Kit et al., 2018; Nguyen et al., 2018</p> <p>Kit et al., 2019; Hariri et al., 2018</p> <p>Zoss et al., 2018; Chamanbaz et al., 2017</p> <p>Kit et al., 2019; Vallegra et al., 2018</p>	<p>Singh et al., 2009; Weaver et al., 2010</p> <p>Tilstra et al., 2015; Keese et al., 2007; Qureshi et al., 2006</p> <p>Stone et al., 2000; Tilstra et al., 2015; Keese et al., 2007; Qureshi et al., 2006; Singh et al., 2009; Weaver et al., 2010</p>
微型机器人系统设计过程	<p>并行系统测试和原型设计：为了达到精益开发和缩短开发周期的目的，探索多个平行系统作为一个多种类和亚种系谱。</p> <p>技术的不均衡发展：鉴于技术系统的技术开发潜伏期不同且不均衡，以资源利用和关键技术创新为目的，创建多样的测试平台。</p> <p>微型机器人的创新和创意：在微型机器人的开发前沿中会遇到诸多矛盾和争议，故开发者需要运用一些关于发现过程和设计创新的方法论来为创新创意解决方案选择关键知识领域和子系统。</p> <p>新技术和架构的精益开发：为了精益开发微型机器人系统，运用 DIY 制造商和制造原则，例如重新使用现成的组件和子系统，制造流程标准化以及满足最低要求模块质量。</p> <p>用增材制造(DIwAM)做设计创新：快速开发系统组件、子系统和物理架构，并管理复杂的几何形状、减少组件和紧固件、减少质量，在微型机器人的开发中采用增材制造过程原理以及拓扑优化。</p>	<p>Kit et al., 2019; Hariri et al., 2018; Sundram et al., 2018; Wu et al., 2017</p> <p>Vallegra et al., 2018; Nguyen et al., 2018; Wu et al., 2017</p> <p>Koh et al., 2019; Goh et al., 2019; Chowdhury et al., 2018a,b; 2017a,b; Wu et al., 2017; Dharmawan et al., 2017</p> <p>Goh et al., 2019; Nguyen et al., 2018; Sundram et al., 2018; Chamanbaz et al., 2017; Niu et al., 2014</p> <p>Koh et al., 2019; Kit et al., 2019; Dharmawan et al., 2018a; Ajay et al., 2015</p>	<p>Camburn et al., 2017b; Blank, 2013; Ries, 2011; Lauff et al., 2017, 2018; Moe et al., 2004</p> <p>Camburn et al., 2017b; Altshuller, 1984; Lauff et al., 2018; Moe et al., 2004</p> <p>Camburn et al., 2017a; Sng et al., 2017; Venkataraman et al., 2017; Luo and Wood, 2017; Luo et al., 2017, 2018</p> <p>Camburn and Wood, 2018; Camburn et al., 2015; Blank, 2013; Ries, 2011</p> <p>Perez et al., 2015; Perez, 2018; Perez et al., 2019; Cho et al., 1998; Dutson and Wood, 2005</p>