

基于物联网的输电线路巡检机器人控制策略研究

李睿

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘要: 完整设计一种具有自主协调运动功能的小型电力输电线路的巡检机器人, 为了实现机器人自主越过塔头和绝缘子串, 同步感知适应不同档距的杆塔以及多个机器人在一定长度的作业范围内能够协调运动作业, 文章重点研究基于自抗扰控制技术的多机协调控制策略; 同时考虑到输电线路环境的复杂性, 在设计机器人本体中, 引入了基于物联网框架的多传感器融合算法; 最后通过算法仿真和设计制作实物样机, 测试本实验装置和控制策略的有效性。

关键词: 输电线路巡检; 多机器人协调; 数据融合; 姿态控制; 物联网

Research on IoT Control Strategy of Inspection Robot for Transmission Line

Li Rui

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: A small power transmission line inspection robot with the function of autonomous coordinated motion is designed. In order to realize autonomous crossing of tower head, insulator. Perception of poles with different spacing and coordinated motion of multiple robots within a certain length of operation range, the robot can realize autonomous crossing of tower head. This paper focuses on the multi-machine coordinated control strategy based on ADRC technology. Considering the complexity of transmission line environment, a multi-sensor fusion algorithm based on Internet of Things framework is introduced in the design of robot ontology. Finally, a prototype is made through algorithm simulation and design to test the effectiveness of the experimental device and control strategy.

Keywords: transmission line inspection; robot group; data fusion; attitude control; Internet of things

0 引言

随着电力输电网络高速发展, 对全自动化巡检技术、智能化运维以及新装备的应用提出了更高更迫切的需求。未来十年实现电网设备全过程管控要求改变传统的运检管理模式, 打造物物互联, 智能化设备状态的自动预警和动作规划泛在型电力物联网^[1]。基于这种需求, 泛在物联网的应用逐步深入到电力系统的每个环节, 为了解决远距离高可靠性的通信问题, 最新的窄带物联网(Narrow Band Internet of Things)技术发挥关键性作用, 相对于zigbee自组网技术, NBIOT不仅拥有广联接、低功耗和可靠性更高的特性, 并且点对点的传输距离大幅度提升。这对于输电线路这一领域的应用是至关重要, 我国幅员辽阔输电线路的运行空间大, 而巡检和监测装置有效作业范围相对较小一直以来都是一个技术瓶颈。长距离输电领域中电力线路巡检机器人是机器人技术研究和应用的一个重要课题, 不仅要解决当机器人遇到障碍物时, 机器人能在障碍物的前后悬挂导轨弧形臂以便越过障碍, 或是专门设计在塔头架设在在线夹之间的越障桥, 帮助机器人实现长距离连续巡检^[2]。本研究基于越障桥的本体机器人设计, 进一步研究开发成组的协同作业机器人相关技术, 将多个机器人联动

控制置于新型物联网框架中这一类的工程研发目前在电力物联网领域已经十分紧迫。近年来, 国内科研机构也进行了大量的工作。成果比较突出的是沈阳自动化研究所、南方电网公司进行了不少电力领域的特种巡检机器人的开发^[3]。但是上述机器人样机的耗电量大、陡坡和上下转弯存在困难、在线作业时间短, 较难适应户外广域环境作业, 尤其多机通讯协同巡检能力欠缺, 难以做到大规模实用化。

针对耗电量问题, 一方面有必要突破现有的机器人靠自身和融入新一代窄带物联网和5G通讯技术实现多机协同智能巡检, 另一方面需要设计优化机器人本体, 减轻重量、提高电池能量密度、优化电路的功耗、更新节能算法以及设计更加高效便捷的充电装置等。为此, 本文是立足高速泛在融合技术, 在基础机器人基础上结合了先进的窄带物联网架构, 即NB-IoT。本文设计的巡检机器人是安装在架空输电线路上的自动巡检设备, 在同一档内或相邻档内, 可能安装多个机器人终端。这样可以通过协同控制多个机器人, 实现广域作业范围的复杂协作巡检操作^[4]。因此, 提出采用多传感器数据的融合技术, 构造基于物联网通讯模式的多机器人协作体系。实现多机器人同步控制在现代输电通道的巡检。有利于进一步推进生产设备管理对象、感知设备的规范管理, 实现各类感知数据的共享汇聚和整合应用。本文采用的NB-IoT技术是IoT领域一个新兴的技术, 起最大的特色是支持低功耗设备在广域网的蜂窝数据连接^[5]。本研究即采用小型低功耗的姿态传感器和自主研发的无线轻量化半实物调试系统, 实现对小型电力线路巡检机器人机身姿态的实时调控。采用基于多种传感器

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-06-14。

基金项目: 北京信息科技大学科研基金(5221910917); 北京信息科技大学师资补充与支持计划(2019-2021; 5111911144)。

作者简介: 李睿(1983-), 男, 黑龙江人, 博士, 讲师, 主要从事非线性控制, 机器人技术方向的研究。

的数据融合算法，结合窄带物联网技术，将小型电力线路巡检机器人运动控制的各传感器数据相关联，实现稳定的输电线路多机器人同步运动控制，为进一步全自动智能化巡检提供技术储备和参考。

1 巡检机器人系统设计

对于输电线路的越障机构，本研究中设计了桥式跨塔越障结构。经过深入的对比研究，保证高可靠性，绝对禁止出现坠落，因为地线下方就是特高压输电线路，所以不宜依赖跨越式的摆臂过塔头，并且机器人本体必须加装防坠落保险带装置。为了提高机器人在不同档间的协同作业稳定性和连续性，既适应了现有电网的钢塔结构，也可以相对减轻机器人的电池重量，一定程度上解决了以往机器人电池续航的问题。实现巡检机器人的轻型化和实用化，另外，越障桥式结构造价低，安装维护也十分方便。

因为本文研究的课题是面向未来多巡检机器人，在不同档距的电线上协同作业。所以首先要考虑的是机器人巡检工作过程中不仅需要实时计算机器人自身姿态角度，而且需要根据自身和邻近机器人的 GPS 定位信息进行自身运动规划。

在机器人开启和运动过程中，机器人需要对系统电源电压实时监测，要求如下：

- 1) 主动行进轮具有位置反馈（关键部位执行机构有码盘反馈）；
- 2) 电池电压实时监测和物联网上传功能；
- 3) 实时将机器人运动状态、以及传感器信息传至控制台；
- 4) 配备倾角、加速度计和陀螺仪传感器，可实时获得机器人三维姿态信息；
- 5) 配备高精度的 GPS 定位模块，配合高精度姿态算法将定位精度控制在一米以内。
- 6) 机身搭载压力传感器，行动轮的限位开关以及简单的气象和线温非接触传感装置。

机器人组的各个机器人配置相同，其控制系统结构如图 1 所示；地面控制端部分由主控计算机、控制箱体、以及窄带物联网接收端和图传数传模块组成^[6]。主控平台装有机器人专用控制软件，对于那些需要人工参与的复杂任务，操作人员可通过人机交互界面设置切换自动巡检或实时人工控制机器人。或者更新巡检路径规划，布置机器人做新的巡检任务。

机器人的本体的关键部分还有输电线路检测模块，巡检过错方中可以通过单独的检测仪对线路和杆塔绝缘子进行电阻和放电检查，机身本体还配有超声波和巡检摄像头，便于实时观测输电线路、跳线和绝缘子金具的状态，并通过高性能数传和图传模块与地面控制机交互。

2 基于物联网的数据融合

2.1 多传感器数据融合模型

多传感器的数据融合模型数据的融合以及如何通过算法协同使用多个传感器传来的数据，并且使各个数据能够

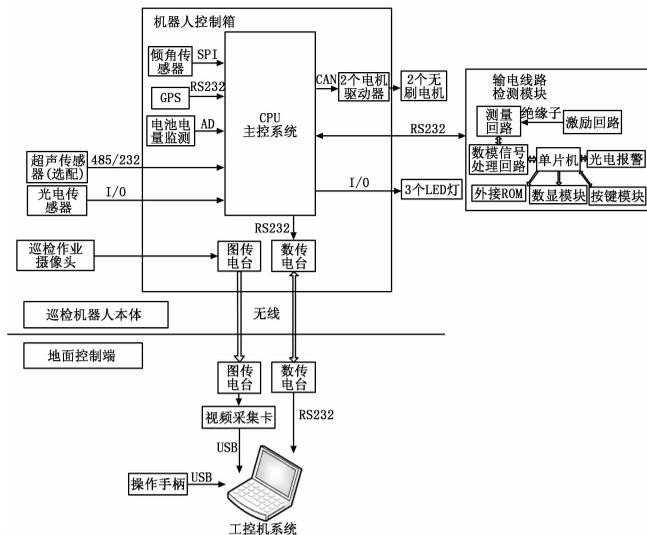


图 1 控制系统总体结构示意图

有机融合，互相支撑以获得对同一被控对象的客观描述以及进一步的深入挖掘处理。这里就需要有针对性的开发一种具有较大的冗余和智能互补的特点。

在本研究中每一个机器人都配备了多种传感器包括温度，湿度加速度压力风速等传感器还有红外和可见光的叫大数据量传输设备对于一些明显的输电线路在线监测故障数据。需要与红外图像在线识别功能相配合，达到更智能化的巡检效果。例如监测到的温度有上升明显的情况要结合红外图像进一步确定是哪一种放电情况。应用最广的数据融合的模型如图 2，是在美国学者的 JDL 数据融合模型，以及在此基础上改进的一些样本。

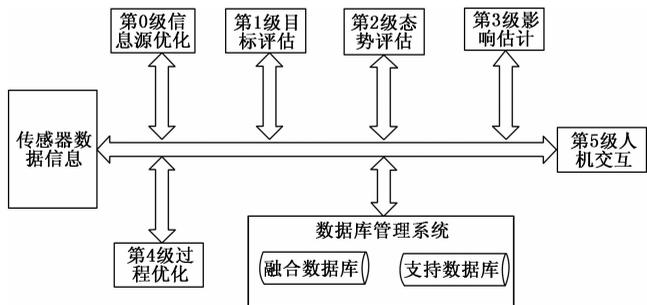


图 2 传感器数据融合模型

如图所示数据融合过程中，根据融合系统当中数据的模式识别和抽象算法的层次，可以分为数据级传感器数据融合、决策级抽象数据融合和特征级模式融合^[7]。数据融合的数据流流向一般按照原始向高级抽象的顺序依次为：多个传感器数据采集系统、模数转换模块、原始数据预处理器、特征提取模式识别计算模块以及抽象数据融合计算器。本文正是采用这种结构，对于多个智体数据源用于应用的加权平均法进一步处理^[8]。

2.2 物联网应用架构设计

在本文所设计的郧县物联网机器人架构中多个机器人的协调控制是通过艾真体的形式来实现的。在整个控制系统

中，每一个机器人被视为一个智能体。每一个智能体，都是一个能够独立完成计算机控制的人工智能终端。在此终端中集成大量巡检人员的经验和知识体系。智能体是计算机学科与控制学科的交叉成果。我们也是引荐智能体的结构，设计专用的程序来模仿人类从事电力巡检的经验和知识，进而驱动机器人作业执行机构。在巡检的过程中，重点是两个机器人的协同运动问题，要完成一个看似简单的动作配合，需要多个层级的参数进行调整，因此，作出类似人类的控制决策。我们必须在智能控制器中，加入很多模式识别算法和产生式规则，使得控制系统能够有效运作。

智能体技术，众所周知是一种分布式的智能技术一个智能体，可以在特定的环境中，完成拟人的某类任务^[9]。例如，我们这个应用中，在户外的高压输电线路。他的地线，环境运行，每个机器人能够独立运行，也能够相互配合，运行。单个终端不仅具有信息处理功能，有独立的知识库，而且具有半自主的学习功能，在感知输电线路环境，特征变量之后。

经过数据融合算法的处理生成特定的任务作业单。驱动整个机器人系统运行，并且把实施的数据处理结果传到后方控制中心。在这种艾真体系统控制框架下，我们是要实现一个机器人智能控制同时呢，要实现相邻机器人与之配合，满足最优化的条件是在既定的网络拓扑中，路径最短，能量损耗最小，需要对机器人的速度和运行方向，进行动态规划，一句两个输电杆塔，之间挡区的温度，倾斜度，湿度，风度分数，磁场强度和地理位置进行实时分析，得出一个最优的控制方案，进而做出类似人工智能的决策，以前很多的控制参数，视频巡检人员的经验进行确定的，而现在的每一个智能体可以看作是一个专家系统。这些专家的经验，写成机器人的内部算法。并且可以在不同的智能体，也就是智能群体之中互相交互，共享知识库，使得整个大系统运行更经济：本文为实现多个巡检机器人的组织和协作，引入了多 Agent 模式，Agent 之间的通讯采用最新型的窄带物联网^[10]。多个机器人同时运动，实际上是一个多 Agent 的协调 (Coordination)：满足系统目标或达到系统的和谐。协商 (Negotiation)：目的是消除冲突，争取双赢。协作 (Cooperation)：目的是完成共同目标。结合多线程技术和双通道通信技术，可以有效实现移动机器人之间的协调运动与作用。由于反馈回的线速度不是直接测得的，而是由加速度计测得的某个方向的线加速度，再经两次积分运算得到的，其精度依赖于积分初值和参考坐标的矫正，所以准确性并不是很高。因此控制器的外环速度补偿控制采用高精度的控制配置性价比不高，而应在保证控制的快速性，重点在于整机的稳定性与鲁棒性，再稳定运行的前提下尽可能提高精度。本设计通过 GPS 模块实时测算机器人距离越障桥的距离，在输电线路路上，各个机器人都实时测距离并且预判位置的情况下，通过增加线速度补偿控制器和一个角速度控制器。依据速度补偿控制器的输入量为速度误差。输出相应的电机速度和功率补偿量，本体中各电机驱动依据自抗扰非线性控制器原理设计。这样的

控制器不需要基于模型的大量数据运算，能耗要求不高，并且易于配置参数，尤其适合移动类执行单元的控制集成。

移动机器人智能体内部通讯软件结构如图 3 所示。

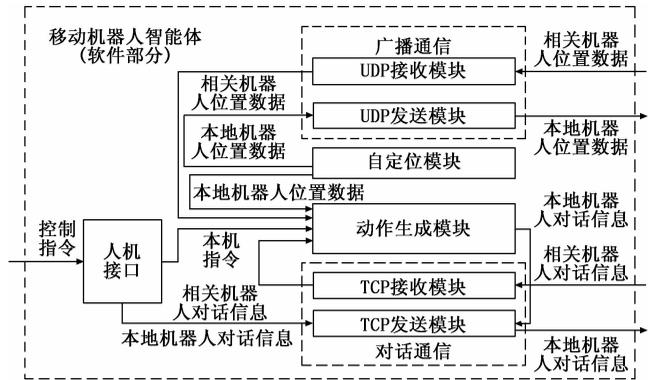


图 3 智能体通信的多移动机器人运动协调系统

多 Agent 系统中应用闭环控制律的多移动机器人编队算法，多移动智体的位置姿态模型如图 4 所示。其控制目的为：在机器人编队运行时，控制机器人之间的相对距离和相对（方位）角度，使之收敛并保持为设定值。

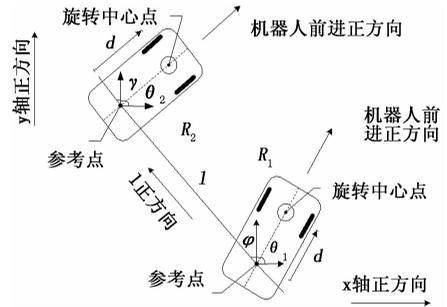


图 4 多移动智体的位置姿态模型

机器人行进的距离和角度： l 和 φ 满足如下关系式：

$$\omega_2 = -\frac{\cos\gamma}{d}[\alpha_2 l(\varphi_d - \varphi) - v_1 \sin\varphi - d\omega_1 \cos\varphi + l\omega_1 + \rho \sin\gamma]$$

$$\rho = \frac{v_1 \cos\varphi}{\cos\gamma} - \frac{d\omega_1 \sin\varphi}{\cos\gamma} + \frac{\alpha_1(l_d - l)}{\cos\gamma}, v_2 = \rho + d\omega_2 \tan\gamma$$

推导得到控制律为： $\dot{l} = \alpha_1(l_d - l), \dot{\varphi} = \alpha_2(\varphi_d - \varphi)$ 。

其中： l 是执行机构机器人的行进距离， φ 是前进方向的角度。

若 leader-follower 两个机器人的编队系统遵循 $l-\varphi$ 闭环控制律，且 l 和 φ 是渐近稳定的。

证：整个多机系统稳定符合下列命题：令 $\delta = \theta_1 - \theta_2$ ， δ 为 leader 与 follower 之间的迎角差，若 leader 以 $\dot{v}_1 = 0, \omega_1 = 0$ 的模式进行运动指数收敛到 0。

若 leader 以 $v_1 = K_1, \omega_1 = K_2$ 的模式进行运动，(K_1, K_2 为常数)，渐近收敛到常数， $\delta^* = -\varphi_d + B + \arccos\left(\frac{K_2}{A}\right)$ ，其中：

$$A = \sqrt{\left(\frac{K_1 \sin\varphi_d + dK_2 \cos\varphi_d - K_2 l}{d}\right)^2 + \left(\frac{dK_2 \sin\varphi_d - K_1 \cos\varphi_d}{d}\right)^2}$$

$$B = \arctan\left(\frac{dK_2 \sin\varphi_d - K_1 \cos\varphi_d}{K_1 \sin\varphi_d + dK_2 \cos\varphi_d - K_2 l}\right)$$

A 和 B 都是有界参数，所以系统输出的无穷范数有界，系统是稳定的。

3 实验与算法仿真研究

在无线的窄带物联网环境中，实验测试的实物机器人实现了对选定的测试路线进行自动巡检功能，所开发的机器人如图 5 所示。在两个相邻的输电线路档内各安装一个机器人样机，在远端模拟发生待处理操作事件，根据操作票，两台机器人同时向目标行进，对其轨迹进行自动规划。过程中观察并记录两巡检机器人的运动情况。

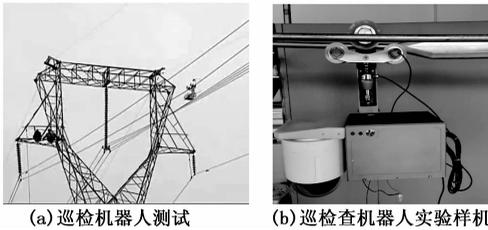


图 5 输电线路巡检机器人实物设计

对控制算法的研究与验证过程中，首先对两个机器人置于同一起点，并设定相同的目标轨迹。每个机器人的控制器采用自抗扰非线性控制器进行实时调节运动系统，得到两个机器人对单个共同任务的轨迹跟踪效果如图 6 所示。

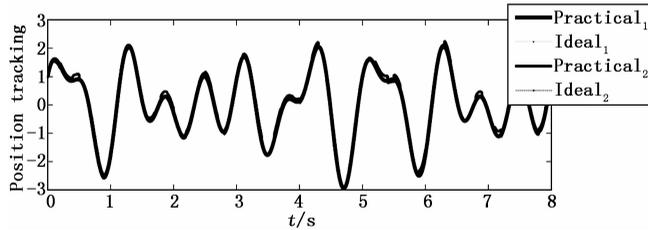


图 6 多机器人对单任务的轨迹跟踪控制效果

结果显示两个机器人的运动轨迹能够迅速跟踪设定的轨迹，在短时间内到达目标值，运动位置偏差如图 7 所示。

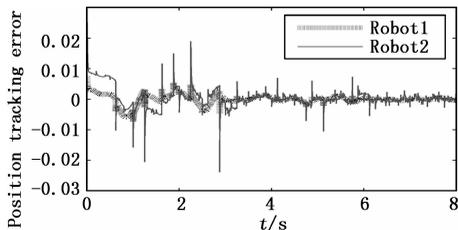


图 7 单任务情况下两机器人运动位置误差

在另一组对比实验中，将两个机器人赋予不同的目标值，同样从相同的出发点出发，运动过程中不同的机器人通过物联网的传感机制实时获取群体中其它个体的信息和势场信息，并采用本文的协同控制机制，使得每个机器人在原单个行动的控制算法下，顺利完成各自的运动轨迹。轨迹跟踪的实验结果如图 8 所示：

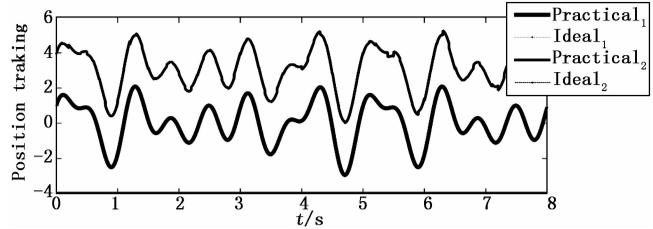


图 8 多机器人对多任务的轨迹跟踪协同控制效果

机器人的协同控制效果明显，不仅每个机器人可以实现各自的任任务，而且轨迹跟踪的误差同样快速收敛，并且总体误差小于单个机器人的任务执行情况，两机器人协同运动的轨迹误差收敛情况如图 9 所示。

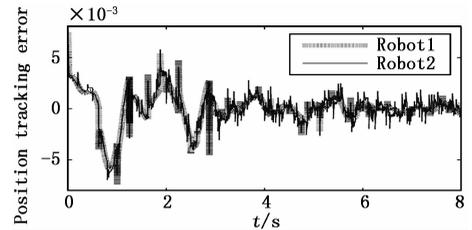


图 9 单任务情况下两机器人运动位置误差

实验结果显示，采用本文提出的控制策略，所设计的双机器人协同运动的轨迹误差不仅没有增加，甚至还要相对于单任务误差低一个数量级，充分显示了该双机器人控制算法和机器人本体设计的有效性。

4 结束语

本文围绕开发具有多自由度的两台小型电力线路巡检机器人进行了研究：采用小型姿态传感器和自主研发的无线半实物调试系统，实现了小型电力线路巡检机器人自身姿态的实时调控和自动巡线功能；并且搭建了基于 Simulink 的机身姿态调整仿真模型，使用自抗扰控制算法，很好地实现了姿态的实时跟踪控制；本文重点研究基于自抗扰控制技术的多机协调控制策略。同时考虑到输电线路环境的复杂性，在设计机器人本体中，引入了基于物联网框架的多传感器融合算法。最后通过算法仿真和设计制作实物样机，测试本实验装置和控制策略的有效性，实现了输电线路多机器人多任务同步自动巡检的稳定控制。

参考文献：

[1] 赵小鱼, 徐正飞, 付 渊. 一种适用于智能变电站巡检机器人的异物检测算法研究 [J]. 现代电子技术, 2015 (10): 124-127.
 [2] 王凯源, 周 力, 杨建军. 外骨骼机器人人体姿态解算算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 207-211, 222.
 [3] 刘珍娜. 高压输电线路巡检机器人研究综述 [J]. 科技经济导刊, 2016 (30): 53-56.
 [4] 杨建栋. 面向城市生命线管理的物联网关键技术研究与应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
 [5] 张 磊. 物联网环境下多移动机器人编队控制 [D]. 南京航空航天大学, 2017.