

基于粒子群并行优化的煤矿井下机器人路径规划

赵少林, 程 杰

(郑州升达经贸管理学院 资讯管理系, 郑州 451191)

摘要: 路径规划是煤矿井下搜救探测机器人自主导航的关键步骤, 矿井是三维的非机构化的环境, 机器人行走过程应该具有高度智能的路径规划, 传统的自适应能力与处理非线性的问题能力较差, 路径规划误差较大, 提出基于粒子群并行优化的煤矿井下机器人路径规划方法, 充分考虑井下的环境高低变化, 采用栅格法对环境建模, 将粒子群独立分布在不同容器中分别进行路径建模, 不同容器中粒子分别进行优化操作; 因为速度和最优子群被分别保留, 在机器人路径规划实验阶段, 路径规划的时间较传统方法降低 20%, 避障成功率高达 95%, 最优路径的出现概率能保持在 99%, 这种方法具有很强的指导性与实用价值。

关键词: 井下机器人; 路径规划; 并行计算; 粒子群优化

Coal Mine Underground Robot Path Planning Based on Parallel Particle Swarm Optimization

Zhao Shaolin, Cheng Jie

(Department of Information Management, Shengda Economics, Trade & Management

College of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Path planning is mine rescue detection of autonomous navigation key steps, mine is three dimensional non institutional environment, the robot walk process should be highly intelligent path planning, the traditional adaptive ability and processing nonlinear problem ability is bad, the error is bigger, path planning of coal mine underground robot based on parallel particle swarm optimization is proposed. Fully consider down hole environment height change, the grid method is adopted to environment modeling, particle swarm independent distribution in different containers are path modeling, different containers particle separately optimization operation, because of the speed and the most optimal group were retained in robot path planning, the experimental stage, path planning time reduced by 20% than the traditional methods, obstacle avoidance success rate reaches as high as 95%, the optimal path appear probability can maintain at 99%, this method has a strong guidance and practical value.

Key words: downhome robot; path planning; parallel computing; particle swarm optimization

0 引言

煤矿灾害发生后如何对矿井中的矿工进行及时有效地救援是应对灾害的头等大事。但是煤矿的环境复杂危险, 在安全事故发生以后, 因为井下的环境未知与危险性阻碍了救援人员进入矿井对被困人员实施营救。传统的救援设备对煤矿井下的未知环境与地势的高低不平没有充分计算与考虑, 还主要停留在一些建筑物塌陷救援与灭火机器人的阶段, 不适合在环境复杂的煤矿矿井中使用^[1-4]。本文提出了一种基于粒子群并行优化计算的煤矿井下探测救援机器人路径规划方法, 传统的路径规划时间消耗大大降低, 路径最优出现的概率高达 99%, 具有很强的实用价值与指导意义。

1 煤矿井下机器人探测设计

煤矿井下的环境恶劣, 复杂未知, 经常存在甲烷、一氧化碳等可燃性气体。路面凹凸不平的环境也使矿井搜救探测难度加大, 矿井探测与救援机器人的运动规划与设备构造要求较高。根据一般的机器人理论煤矿机器人探测与救援机器人平台设计包括: 机器人结构设计、路径选择设计、交互设计等 3 个

部分, 这 3 个部分相互协作完成机器人的运动与控制^[5-6]。

1.1 机器人结构设计

机器人的结构设计主要包括机器人的尺寸、运动结构、传感器、处理器等设备的设计与控制。机器人的尺寸描述应该包括机器人的重量、最大尺寸、最小尺寸等信息。搜救机器人的运动方式包括轮式结构、行走结构、履带结构等, 本文选取的探测机器人的行走方式使用的是履带式两轮差动驱动行驶结构, 传感器中本文选取的主要包括声纳传感器、PSD 传感器、视觉传感器几种。在处理器段本文使用嵌入式系统对整个机器人运转与控制, 在运动驱动部分选取了 DSP 运动控制卡来实现。

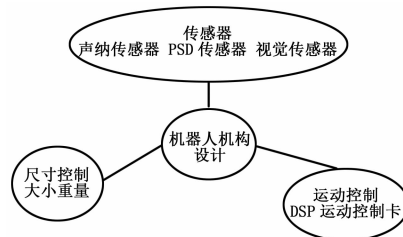


图 1 机器人结构设计

收稿日期: 2013-12-27; 修回日期: 2014-02-12。

作者简介: 赵少林 (1975.2-), 男, 河南延津县人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机软件与理论方向的研究。

本文中的机器人中的传感器中选取包括声纳传感器、PSD 传感器、视觉传感器几种。声纳传感器主要是通过测量超声波与障碍物之间来回传播的时间来进行距离测量, 这种传感器可

以工作在十分恶劣的环境中, 测量距离更远相比光学传感器, 广泛应用在机器人的环境感知与探测中, 不受到光线条件的限制、操作简单、处理速度快, 测量的计算障碍物与传感器之间的距离公式如下:

$$L = \frac{c \times t}{2} \quad (1)$$

式中, L, c, t 分别代表机器人与障碍物之间的距离, 声音的传播速度、超声波的发射返回时间。在不同的环境下上面公式可以根据如下的数据进行补偿:

$$c = 331.45 \sqrt{\frac{T+273.16}{273.16}} = 331.4 + 0.6T(\text{M/s}) \quad (2)$$

$$L = 165.7 \times t + 0.3t \times T \quad (3)$$

使用环境温度 T 对测距公式补偿后, 算出井下探测器与障碍物之间的距离。视觉传感器中本文选取了 Sony 公司的 EV1-D100P 型云台摄像机, 这种摄像机的像素高达 752×582 , 具有 $3.1 \sim 31 \text{ mm}$ 的焦距:

煤矿井下探测机器人通过 PCI 接口与视频采集卡连接各种设备。因为在煤矿井下工作环境恶劣, 路面崎岖不平, 本文在机器人的驱动部分采取了前后履带可以折转的三段履带式结构。

如图 2 所示, 两个履带驱动电机控制主轴进行 360° 的旋转, 利用齿形带保证主双联轮与从双联轮的运动一致, 机器人根据左右轮的速度差转动。运动控制就是基于运动控制器对运动控制量进行更新, 本文选取的运动控制器是 DSP 运动控制卡, 控制平台基于各种工业标准总线实现。这样便于探测机器人中各个零部件的连接。

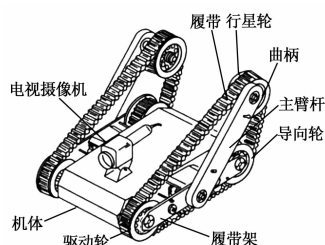


图 2 机器人运动控制

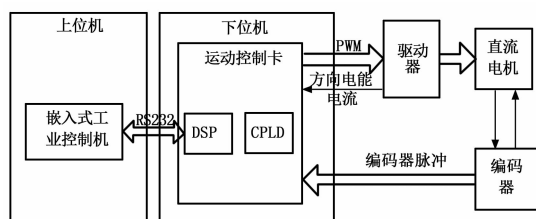


图 3 机器人运动控制原理

运动控制卡的核心处理器采用了 T1 公司的 DSP 芯片 TMS320LF2407, 这是一种专用的控制芯片, 采用静态的 CMOS 技术, 使用 3.3 V 的电压供电能够降低控制器的能耗。为了能够更有效地对更多传感器的扩展与减少外围逻辑电路的使用, 本文使用了可编程逻辑器件 (CPLD) 扩展 DSP 的输入输出实现外围的数字逻辑电路设计。这种设计方法不但可以有效增加运动控制卡的扩展, 还增加了电路板的可靠性。

1.2 探测机器人路径规划

煤矿井下探测与救援机器人要在复杂的环境中完成自主移动并且完成环境感知等一系列任务, 首先安装在机器人上的各

种传感器对外部环境的感知后通过总线传输到具有各个不同功能的模块中。机器人控制系统的不同模块完场数据感知、任务分析、决策动作等一系列的控制动作。机器人的软件设计应该保证机器人的控制系统中整体能够有效拟合各个不同功能的模块, 处理模块具有智能型与自主性外还要保证机器人具有较强的扩展能力与路径规划能力。本文中的探测机器人的软件设计思想使用的是分层设计的思想, 将软件设计分为决策层、计算层、控制层等 3 个部分。决策层负责机器人行走过程中的环境建模、全局路径规划。环境建模时路径规划的首要前提, 就是将环境特征进行数据表示, 本文使用栅格法实现空间中的环境建模, 使用分布式的粒子群优化方法对路径进行规划。在计算层负责接收的数据进行处理, 将各个传感器的信息进行融合, 得到环境信息库为决策层服务。控制层主要是采集机器人的实时运动状态, 包括传感器的感知信息与机器人的位姿信息, 然后通过决策层的指令对机器人的轨迹与实时避障进行控制, 控制层具有良好的实时性与快速性。

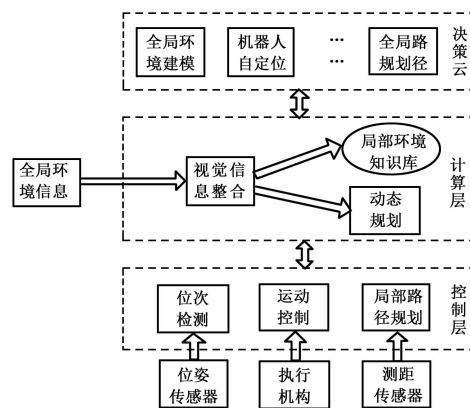


图 4 路径规划软件控制

探测机器人各层采用不同的数据表示方法, 具有自己各自的规划模块与空间表达方式, 本文在计算层使用栅格法对煤矿井下的环境进行建模。求解机器人路径的方法有很多种, 智能仿生优化算法是能够通过生物行为进行路径逼近的非线性系统。在随机性与鲁棒性方面, 使用智能仿生学的理论进行非线性系统的逼近与解析比传统的方法具有更明显的效果。PSO 算法核心思想是模仿鸟群在集体觅食中对食物寻找过程的位置与速度更新。粒子的位置与速度的更新依靠适应度函数的不断检验。在搜索空间中, 粒子被是没有体积与重量的微粒, 在食物的搜索中具有自身的速度, 并且飞行速度根据个体与群体的飞行经验进行更新。假设第 i 个粒子的位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, 粒子的空间寻优的飞行速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$

$P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$, $G_i = (G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{in})$ 分别代表整个粒子群在空间寻优的自己本身的最优位置与整个粒子群的空间群体最优位置, 粒子群根据如下的公式进行位置的更新:

$$V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{id}^k - x_{id}^k) \quad (4)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1}$$

上式中第一部分是粒子群中粒子的速度更新公式, 第二部分代表粒子在全局寻优中本身的学习能力, 这种学习能力是粒子群的社会学习能力体现, 粒子间相互协作不断学习周围粒子的位置与速度更新。第三部分是整个粒子群的社会能力即互相学习能力, 这种能力可以帮助粒子群进行全局的寻优, 经过初

始值设置的迭代次数更新后找到全局的最优解，避免粒子陷入局部最小值。量子粒子群算法是一种新的粒子群模型，本文在机器人的路径规划计算中基于这种仿生模型建立路径规划，因为量子粒子群算法本文具备良好的并行性，无需过多的参数调整就可以实现并行计算。并行量子粒子群算法将并行计算机的高速计算能力与量子粒子群的随机性结合，在优化迭代中共享一个迁移算子，该算子保存着个体当中最好的位置，可以通过该个体提高收敛的速度与收敛精度。将粒子群分别安置在不同的容器中，采用一传多的方式，将相邻处理器中的个体的最优位置与自己容器的最有位置进行统筹考虑选取一个更为优良的个体代替本身容器中的最优个体。采用对等分组的方式将一个粒子群体分为 q 个子群体， $ppes$ 定期交换 $gbest$ 与同步信息，子群体的 $gbest$ 被所有的 $ppes$ 接收。子群从相邻的容器群体中的最有位置选择一个 $gbest$ 替换本身的 $gbest$ 。替换的周期时间可以根据指数的递减数列递减，初始值为 $N_g/2$ ，随后变为 $N_g/4$ ，在开始搜索的阶段，群体的多样性较高，这一阶段的局部搜索能力比全局搜索能力更重要， $ppes$ 独立地工作较长的时间后会出现不同处理机中的 $gbest$ 值，这是转向全局收敛的重要阶段。每一个粒子的行走路线可以编码为一条井下的路径，用序号法标识栅格，从起始位置到终点位置使用不同的序号序列进行路径的表示如图 5 所示。

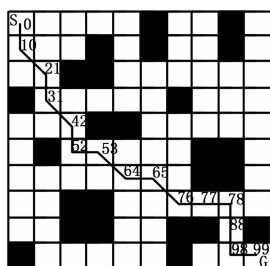


图 5 机器人路径示意图

如图 5 所示的路径可以根据符号串 (0,10,21,31,42,52,53,64,65,76,77,78,88,98,99) 描述。初始种群尽量保证搜索的多样性分布在不同的搜索空间中。因为在种群的进化中需要使用目标函数进行粒子的速度与位置的判定，本文将路径的总长度与能量消耗作为粒子的更新目标函数的主体：

$$Fitness = aFitness + bFitness \quad (5)$$

在式 (5) 的适应度函数中， a, b 是权重系数表示不同的评价指标占的比重。

$$Fitness_1 = \frac{1}{L} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} d_i} \quad (6)$$

$$Fitness_2 = \frac{1}{E} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (7)$$

式中， L, E 分别代表路径总长度与能量损耗， d_i 表示相邻两点的距离， h_i 表示第 i 个栅格的高度。根据并行计算的思想将粒子群的更为编码为路径的规划更新程序装载在机器人的程序中可以有效指导煤矿井下机器人的导航与路径更新。

2 实验分析

本文根据模块化的设计思想，基于 C++ 面向对象的设计思想开发了煤矿井下机器人探测的软件架构，并且结合结构设计对

本文的算法思想进行了有效的实验仿真。机器人的性能分析包括传感器感知数据的准确性与路径规划的有效性两个方面，利用机器人中控制器采集的数据与现场人工使用测量仪器对传感器的数据进行测定比较，表 1 是部分声纳传感器测量的数据表。

表 1 声纳传感器测量数据表

实际值	测量值	误差值	相对误差率
400	425	25	6.25
500	526	26	5.2
1 000	1 014	14	1.4
1 500	1 498	2	0.133
4 000	3 296	74	1.9
4 500	4 420	80	1.92
5 000	4 890	110	2
5 500	5 397	103	2
6 500	6 366	134	2.14

表 1 可见经过测量距离的不断增长，机器人的测试误差也在不断加大，但是在规定的测试距离中传感器误差始终能保持在允许的范围内，经过后期的粒子群网络优化路径后测试误差带来的影响将会有效降低。这种方法同样对于视觉传感器与 PSD 传感器的测量数据也能够保证系统的要求。为了比较本文的算法与传统的路径规划算法优势，进行了大量的不同障碍设定的路径规划实验，图 6 是在两种方法在针对某一情境中的路径规划对比图。

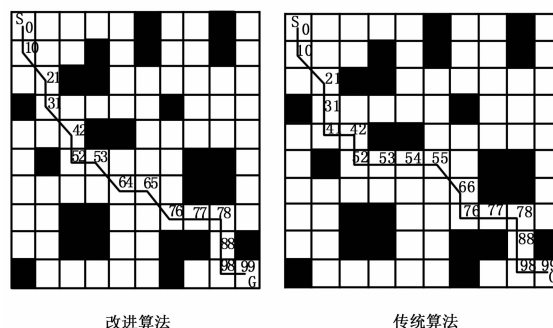


图 6 路径规划对比图

由图 6 可见，改进后的路径规划较原先的路径规划算法在路径距离上有了明显的改进，路径更短，实际的测试中，路径规划因为使用了并行计算的粒子群优化方法时间大大降低，路径规划效率有效提升，具有很强的实用价值。

3 结束语

本文针对矿井是三维的非机构化的环境，机器人行走过程应该具有高度智能的路径规划，传统的自适应能力与处理非线性问题的能力较差，路径规划误差较大的问题，提出基于粒子群并行优化的煤矿井下机器人路径规划方法，充分考虑井下的环境高低变化，采用栅格法对环境建模，将粒子群独立分布在不同容器中分别进行路径建模，不同容器中粒子分别进行优化操作，因为速度和最优子群被分别保留，在机器人路径规划实验阶段，路径规划的时间较传统方法降低 20%，避障成功率高达 95%，最优路径的出现概率能保持在 99%，这种方法具有很强的指导性与实用价值。

(下转第 1615 页)

指令输出显示是系统常见的故障现象,本文以该常见故障为例建立飞行指挥与控制系统的故障模型,如图3所示。

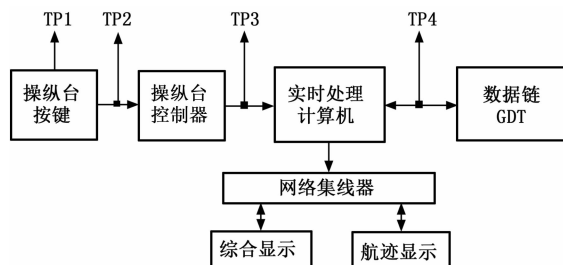


图3 飞行指挥与控制系统故障模型

飞行指挥与控制系统故障模型的要素如下:

(1) 故障源集合 $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ 。 C_1 为操纵台按键, $SC(C_1) = \{s_1, s_2\}$; C_2 为操纵台控制器, $SC(C_2) = \{s_3\}$; C_3 为实时处理计算机, $SC(C_3) = \{s_4\}$ 。

(2) 信号测试点集合 $TP = \{TP_1, TP_2, TP_3, TP_4\}$, 见图3中的黑色信号测试点。 $SP(TP_1) = \{T_1\}$; $SP(TP_2) = \{T_2\}$; $SP(TP_3) = \{T_3\}$; $SP(TP_4) = \{T_4\}$ 。

(3) 与故障案例相关的独立信号集 $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ 。其中 s_1 为操纵台按键损坏情况; s_2 为按键电源线电压值; s_3 为操纵台控制器输出遥控帧; s_4 为实时处理计算机输出遥控帧。

(4) 测试集合 $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ 。 T_1 为操纵台按键损坏情况测试, $ST(T_1) = \{s_1\}$, 按键按下后电平改变时测试通过, 反之不通过; T_2 为按键电源线电压值测试, $ST(T_2) = \{s_2\}$, 电压值为 12 V 测试通过, 反之不通过; T_3 为操纵台控制器输出遥控帧测试, $ST(T_3) = \{s_3\}$, 输出遥测帧“EB90...55...”测试通过, 反之不通过; T_4 为实时处理计算机输出遥控帧, $ST(T_4) = \{s_4\}$, 输出遥测帧“EB90...55...”测试通过, 反之不通过。

飞行指挥与控制系统故障模型在仿真运行时, 通过模型控制信号管理 4 个故障源的工作模式 (正常或故障), 并由虚拟仪表从信号测试点输出测量数据。受训者通过测量数据推断故障产生的原因, 进而排除故障。

4.2 Virtools 中故障仿真实现

(1) 故障现象仿真脚本设计:

在 Virtools 中故障现象的表现主要依靠脚本编写实现。Show BB (Building Block) 和 Hide BB 实时控制显示屏和指示灯的纹理; Replace Rendering BB 控制报警灯的闪烁; Wave Player BB 控制声音的播放。利用以上的 BB 组合, 编写故障现象的脚本程序。如图4所示。

(2) 基于虚拟仪表的故障数据测试:

(上接第 1602 页)

参考文献:

- [1] 王勇, 朱华, 王永胜, 等. 煤矿救灾机器人研究现状及需要重点解决的技术问题 [J]. 煤矿机械, 2007, 28 (4): 107-109.
- [2] 朱建国, 李科杰, 高峻峤. 煤矿探测与救援机器人分布式控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, (11): 2686-2688.
- [3] 李允旺, 葛世荣, 朱华, 等. 煤矿救灾机器人隔爆壳体的设计

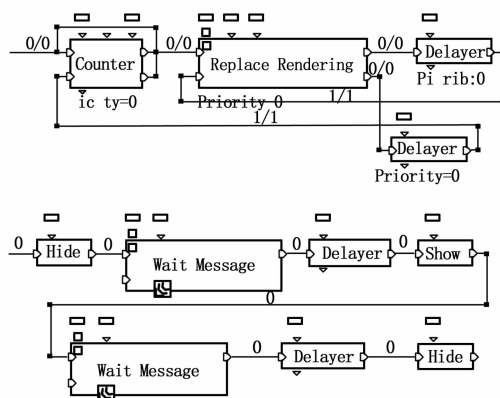


图4 故障现象脚本程序

本文以 VC++ 环境开发的虚拟仪表为检测工具, 借助自主开发的实时通信模块, 完成对虚拟样机上故障数据的获取。每个测试点均包括正常与故障两组数据, 并存储于 Virtools 中的 Array 阵列中。在故障仿真时, 通过脚本设计有选择地改变信号流程上测试点的当前数据。

5 结论

文章从工程角度提出了基于多信号模型的电子装备故障建模方法, 建立了系统的故障模型, 并解决了测试数据的生成与实时检测问题, 最后以某型无人机飞行指挥与控制系统为例, 验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 郝建平, 蒋科艺, 王松山, 等. 虚拟维修仿真实理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 朱元昌, 邸彦强, 全厚德. 通用雷达装备模拟训练系统及其关键技术研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (11): 2633-2637.
- [3] 赵春宇. 电子装备故障诊断虚拟训练技术研究与应用 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2009.
- [4] 贾晨星. 电子装备模拟训练系统机理建模方法研究与应用 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2011.
- [5] 林志文, 贺喆, 刘松风. 基于多信号模型的系统测试性分析与评估 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 222-224.
- [6] 刘颖, 朱元昌, 邸彦强. 面向维修训练的故障建模、仿真与评估 [J]. 计算机工程, 2007, 13 (33): 245-247.
- [7] 王红霞, 叶晓慧, 田树新. 复杂电子装备故障诊断建模方法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 6 (29): 62-64.
- [8] 王上军, 时和平, 赵兴业. 虚拟维修训练中故障建模与仿真 [J]. 军械工程学院学报, 2010, 22 (6): 50-53.

与加工 [J]. 煤矿机械, 2009, 30 (2): 104-106.

- [4] 李岩, 杨向东, 陈恩. 履带式移动机器人动力学模型及其反馈控制 [J]. 清华大学学报, 2006, 46 (8): 1377-1380.
- [5] 吴卫国, 陈辉堂, 工月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制 [J]. 自动化学报, 2001, 27 (3): 326-331.
- [6] 王一川, 单甘霖, 童俊. 改进离散粒子群优化算法求解广义指派问题 [J]. 科技通报, 2013, 8 (29): 130-132.