



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104199455 A

(43) 申请公布日 2014. 12. 10

(21) 申请号 201410427484. 8

(22) 申请日 2014. 08. 27

(71) 申请人 中国科学院自动化研究所  
地址 100190 北京市海淀区中关村东路 95 号

(72) 发明人 谭湘敏 易建强 范国梁 袁如意 蒲志强

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

代理人 宋焰琴

(51) Int. Cl.  
G05D 1/08 (2006. 01)

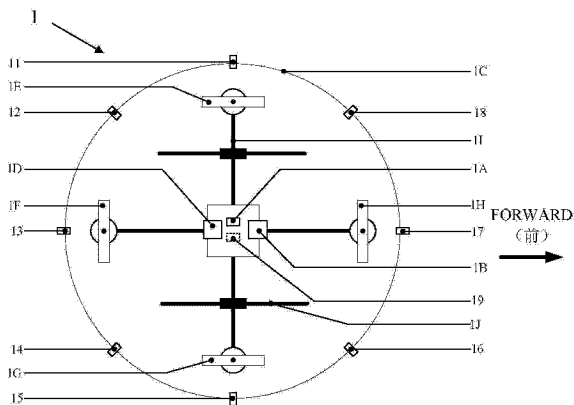
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统,该系统包括:多旋翼飞行器和地面工作站,其中:多旋翼飞行器用于携带照明设备、图像/视频采集设备和测距传感器,接收并按照地面工作站发送的指令飞行,对各个设备进行控制,并将采集得到的图像/视频信息和状态信息发送给地面工作站;地面工作站用于设置多旋翼飞行器的任务参数,向所述多旋翼飞行器发送指令,通过手动或自动方式控制多旋翼飞行器飞行,并对多旋翼飞行器传送回来的图像/视频信息和状态信息进行存储、处理和显示。本发明所述的基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统机械结构简单,能够以较高的精度、较快的速度,安全可靠地完成隧道、山洞、巷道、管道等待检场所的巡检工作。



1. 一种基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统,其特征在于,该系统包括:多旋翼飞行器和地面工作站,其中:

所述多旋翼飞行器用于携带照明设备、图像/视频采集设备和测距传感器,接收并按照所述地面工作站发送的指令飞行,对各个设备进行控制,并将采集得到的图像/视频信息和状态信息发送给所述地面工作站;

所述地面工作站用于设置多旋翼飞行器的任务参数,向所述多旋翼飞行器发送指令,通过手动或自动方式控制所述多旋翼飞行器飞行,并对所述多旋翼飞行器传送回来的图像/视频信息和状态信息进行存储、处理和显示。

2. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,所述多旋翼飞行器包括:多个测距传感器、图像/视频采集设备、测距传感器安装环、自动驾驶仪、多个推进器、多旋翼机架和起落架,其中:

所述多个测距传感器用于测量所述多旋翼飞行器与各个方向的障碍物之间的距离;

所述图像/视频采集设备用于采集待检场所内的图像或视频信息,并将采集到的图像或视频信息经由自动驾驶仪处理后回传到所述地面工作站;

所述测距传感器安装环用于固定所述多个测距传感器中的部分测距传感器,其它测距传感器安装在所述多旋翼机架上;

所述多个推进器用于产生推进力;

所述自动驾驶仪用于接收所述地面工作站的指令来控制所述多旋翼飞行器的飞行,接收各个传感器的信息,以确定自身的状态;

所述起落架用于在所述多旋翼飞行器起降时对所述多旋翼飞行器进行缓冲和保护;

所述多旋翼机架是所述多旋翼飞行器的主构架,用于安装所述多旋翼飞行器中的各个部件。

3. 根据权利要求2所述的系统,其特征在于,所述图像/视频采集设备还包括辅助照明设备。

4. 根据权利要求2所述的系统,其特征在于,所述推进器包括电机和螺旋桨。

5. 根据权利要求1所述的系统,其特征在于,所述自动驾驶仪包括:飞控图传电台、飞控数传电台、GPS模块、遥控接收机、飞控中央处理器、图像采集器、多路电调、气压高度计、三轴加速度计及三轴陀螺仪、三轴地磁计、传感器采集模块和飞控电源,其中:

所述飞控图传电台用于将所述图像/视频采集设备采集得到的图像/视频信息传送给所述地面工作站;

所述飞控数传电台用于将所述多旋翼飞行器的状态信息传给所述地面工作站;

所述GPS模块用于接收GPS信号并计算得到所述多旋翼飞行器的定位信息;

所述遥控接收机用于接收由所述地面工作站的遥控器传送的手动遥控信号,以备手动控制所述多旋翼飞行器;

所述飞控中央处理器与飞控图传电台各个部分通信,得到需要的信息,以完成多旋翼飞行器的手动或自动控制;

所述图像采集器用于采集图像或视频信息;

所述多路电调用根据飞控中央处理器的指令控制推进器中的电机旋转并调节其转速;

所述气压高度计用于计算所述多旋翼飞行器的海拔高度,并将高度信息发送给飞控中央处理器;

所述三轴加速度计及三轴陀螺仪用于测量多旋翼飞行器的三轴加速度、三轴旋转速率,并将速度信息发送给飞控中央处理器;

所述三轴地磁计用于测量地磁在多旋翼飞行器上的三轴分量,并与三轴加速度计及三轴陀螺仪测量到的三轴加速度、三轴旋转速率一起传送给飞控中央处理器,以得到所述多旋翼飞行器的姿态;

所述传感器采集模块用于采集测距传感器与各个方向的障碍物之间的距离信息,并将距离信息发送给飞控中央处理器;

所述飞控电源用于为整个自动驾驶仪供电。

6. 根据权利要求 5 所述的系统,其特征在于,所述多旋翼飞行器的姿态信息基于所述三轴地磁计、三轴加速度计及三轴陀螺仪的测量结果,通过卡尔曼滤波法计算得到。

7. 根据权利要求 5 所述的系统,其特征在于,所述飞控电源至少包括电压变换模块。

8. 根据权利要求 1 所述的系统,其特征在于,所述地面工作站包括:数传电台、图传电台、地面计算机、遥控器和地面工作站电源,其中:

所述数传电台用于接收所述多旋翼飞行器发送过来的信息;

所述图传电台用于接收所述多旋翼飞行器发送过来的图像/视频信息;

所述地面计算机与数传电台、图传电台、遥控器通信,以进行任务规划、参数设置、手动控制、信息记录、检测和分析;

所述遥控器用于产生手动遥控信号,以对所述多旋翼飞行器进行手动控制;

所述地面工作站电源用于为整个地面工作站供电。

## 基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及隧道检测领域,尤其涉及一种基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统。

### 背景技术

[0002] 对于情况未知的隧道、山洞、巷道、管道之类的场所,其潜在的危险性不允许人直接进入检查;更坏的是,由于这类场所的地面情况复杂,譬如,地面崎岖不平、积水、积泥等,无法使用轮式或履带式移动机器人,在这种情况下,利用小型飞行器进行巡检是解决问题的一种有效方法。多旋翼飞行器凭借其机动性强、易操控、易维护、精度高、成本低及易运输等显著优势,无疑是未来最有竞争力的一种无人机平台。然而,利用多旋翼飞行器在隧道或狭窄巷道里进行巡检所面临的困难主要在于:①由于隧道、山洞、巷道、管道之类场所地形复杂,空间狭小,对定位的精度要求较高,而隧道中一般无GPS定位信号,无法实现实时的高精度定位;②隧道、山洞、巷道、管道之类场所中的地磁场与地面相比较弱,而且容易受到铁磁物、地下矿产的干扰,无法实现高精度定向;③由于隧道、山洞、巷道、管道之类场所的特殊性,对多旋翼飞行器的运动性能(动静态性能、可靠性、安全性)提出了很高的要求。因此,旨在克服以上困难和已有系统的技术缺陷,本发明提出一种基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统。

### 发明内容

[0003] 本发明旨在提供一种基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统,能够以较高的精度、较快的速度、安全、可靠地在较大的范围内进行隧道检测。

[0004] 本发明提出的一种基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统包括:多旋翼飞行器和地面工作站,其中:

[0005] 所述多旋翼飞行器用于携带照明设备、图像/视频采集设备和测距传感器,接收并按照所述地面工作站发送的指令飞行,对各个设备进行控制,并将采集得到的图像/视频信息和状态信息发送给所述地面工作站;

[0006] 所述地面工作站用于设置多旋翼飞行器的任务参数,向所述多旋翼飞行器发送指令,通过手动或自动方式控制所述多旋翼飞行器飞行,并对所述多旋翼飞行器传送回来的图像/视频信息和状态信息进行存储、处理和显示。

[0007] 其中,所述多旋翼飞行器包括:多个测距传感器、图像/视频采集设备、测距传感器安装环、自动驾驶仪、多个推进器、多旋翼机架和起落架,其中:

[0008] 所述多个测距传感器用于测量所述多旋翼飞行器与各个方向的障碍物之间的距离;

[0009] 所述图像/视频采集设备用于采集待检场所内的图像或视频信息,并将采集到的图像或视频信息经由自动驾驶仪处理后回传到所述地面工作站;

[0010] 所述测距传感器安装环用于固定所述多个测距传感器中的部分测距传感器,其它测距传感器安装在所述多旋翼机架上;

- [0011] 所述多个推进器用于产生推进力；
- [0012] 所述自动驾驶仪用于接收所述地面工作站的指令来控制所述多旋翼飞行器的飞行,接收各个传感器的信息,以确定自身的状态；
- [0013] 所述起落架用于在所述多旋翼飞行器起降时对所述多旋翼飞行器进行缓冲和保护；
- [0014] 所述多旋翼机架是所述多旋翼飞行器的主构架,用于安装所述多旋翼飞行器中的各个部件。
- [0015] 其中,所述图像/视频采集设备还包括辅助照明设备。
- [0016] 其中,所述推进器包括电机和螺旋桨。
- [0017] 其中,所述自动驾驶仪包括:飞控图传电台、飞控数传电台、GPS 模块、遥控接收机、飞控中央处理器、图像采集器、多路电调、气压高度计、三轴加速度计及三轴陀螺仪、三轴地磁计、传感器采集模块和飞控电源,其中:
- [0018] 所述飞控图传电台用于将所述图像/视频采集设备采集得到的图像/视频信息发送给所述地面工作站；
- [0019] 所述飞控数传电台用于将所述多旋翼飞行器的状态信息传给所述地面工作站；
- [0020] 所述 GPS 模块用于接收 GPS 信号并计算得到所述多旋翼飞行器的定位信息；
- [0021] 所述遥控接收机用于接收由所述地面工作站的遥控器传送的手动遥控信号,以备手动控制所述多旋翼飞行器；
- [0022] 所述飞控中央处理器与飞控图传电台各个部分通信,得到需要的信息,以完成多旋翼飞行器的手动或自动控制；
- [0023] 所述图像采集器用于采集图像或视频信息；
- [0024] 所述多路电调用于根据飞控中央处理器的指令控制推进器中的电机旋转并调节其转速；
- [0025] 所述气压高度计用于计算所述多旋翼飞行器的海拔高度,并将高度信息发送给飞控中央处理器；
- [0026] 所述三轴加速度计及三轴陀螺仪用于测量多旋翼飞行器的三轴加速度、三轴旋转速率,并将速度信息发送给飞控中央处理器；
- [0027] 所述三轴地磁计用于测量地磁在多旋翼飞行器上的三轴分量,并与三轴加速度计及三轴陀螺仪测量到的三轴加速度、三轴旋转速率一起发送给飞控中央处理器,以得到所述多旋翼飞行器的姿态；
- [0028] 所述传感器采集模块用于采集测距传感器与各个方向的障碍物之间的距离信息,并将距离信息发送给飞控中央处理器；
- [0029] 所述飞控电源用于为整个自动驾驶仪供电。
- [0030] 其中,所述多旋翼飞行器的姿态信息基于所述三轴地磁计、三轴加速度计及三轴陀螺仪的测量结果,通过卡尔曼滤波法计算得到。
- [0031] 其中,所述飞控电源至少包括电压变换模块。
- [0032] 其中,所述地面工作站包括:数传电台、图传电台、地面计算机、遥控器和地面工作站电源,其中:
- [0033] 所述数传电台用于接收所述多旋翼飞行器发送过来的信息；

- [0034] 所述图传电台用于接收所述多旋翼飞行器发送过来的图像 / 视频信息；
- [0035] 所述地面计算机与数传电台、图传电台、遥控器通信，以进行任务规划、参数设置、手动控制、信息记录、检测和分析；
- [0036] 所述遥控器用于产生手动遥控信号，以对所述多旋翼飞行器进行手动控制；
- [0037] 所述地面工作站电源用于为整个地面工作站供电。
- [0038] 根据上述技术方案，本发明具有以下有益效果：
- [0039] ①安全性高：对于隧道等待检场所内状况不明，譬如地面不平整、泥泞或者地面有积水的情况下，能够代替人、轮式机器人、履带式机器人进入隧道等待检场所内部进行巡检，提高巡检设备的安全性，降低该项工作的危险性。
- [0040] ②机械结构简单，成本低：相对于轮式机器人或履带式机器人，本发明所涉及的系统机械结构简单、容易维护、制造成本低；
- [0041] ③速度快：由于采用了飞行的运动方式，因而相对于轮式机器人、履带式机器人而言，本发明所涉及的系统速度快，工作效率高。

#### 附图说明

- [0042] 图 1 是本发明基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统的结构示意图；
- [0043] 图 2 是根据本发明一实施例的多旋翼飞行器 1 的俯视图。
- [0044] 图 3 是根据本发明一实施例的自动驾驶仪 1D 的结构框图。
- [0045] 图 4 是根据本发明一实施例的地面工作站 2 的结构框图。
- [0046] 图 5 是根据本发明一实施例的基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统的工作流程图。

#### 具体实施方式

[0047] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本发明进一步详细说明。

[0048] 图 1 是本发明基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统的结构示意图，如图 1 所示，所述基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统包括：多旋翼飞行器 1 和地面工作站 2，其中：

[0049] 所述多旋翼飞行器 1 用于携带照明设备、图像 / 视频采集设备、测距传感器及其它专用设备，接收并按照所述地面工作站 2 发送的指令飞行，对各个设备进行控制，使各个设备按照要求工作，并将采集得到的图像 / 视频信息和状态信息发送给所述地面工作站 2；

[0050] 所述地面工作站 2 用于设置多旋翼飞行器的任务参数，向所述多旋翼飞行器 1 发送指令，通过手动或自动方式控制所述多旋翼飞行器 1 飞行，并对所述多旋翼飞行器 1 传送回来的图像 / 视频信息和状态信息进行存储、处理和显示，以达到有效巡检的目的。

[0051] 所述隧道巡检系统工作时，所述地面工作站 2 通过手动或自动的遥控方式控制多旋翼飞行器 1 在隧道、山洞、巷道、管道等待检场所内巡检，利用其所携带的图像 / 视频采集设备、测距传感器或其它专用设备在隧道、山洞、巷道、管道等待检场所内检测，并将采集到的图像 / 视频信息和状态信息通过数传电台、图传电台以无线或有线的方回给地面工作站 2，由地面工作站 2 通过人工或自动等方式来完成对相应场所的巡检。

[0052] 图 2 是根据本发明一实施例的多旋翼飞行器 1 的俯视图，如图 2 所示，所述多旋翼飞行器 1 包括：第一测距传感器 11、第二测距传感器 12、第三测距传感器 13、第四测距传感

器 14、第五测距传感器 15、第六测距传感器 16、第七测距传感器 17、第八测距传感器 18、第九测距传感器 19、第十测距传感器 1A、图像 / 视频采集设备 1B、测距传感器安装环 1C、自动驾驶仪 1D、第一推进器 1E、第二推进器 1F、第三推进器 1G、第四推进器 1H、多旋翼机架 1I 和起落架 1J, 其中 :

[0053] 所述第一测距传感器 11、第二测距传感器 12、第三测距传感器 13、第四测距传感器 14、第五测距传感器 15、第六测距传感器 16、第七测距传感器 17、第八测距传感器 18、第九测距传感器 19、第十测距传感器 1A 用于测量所述多旋翼飞行器 1 与各个方向的障碍物之间的距离, 以备避障、导航、保护使用 ;

[0054] 所述图像 / 视频采集设备 1B 安装在所述多旋翼机架上, 用于采集隧道、山洞、巷道、管道等待检场所内的图像或视频信息, 并将采集到的图像或视频信息经由自动驾驶仪 1D 中的图像采集器 1D6 初步处理后由飞控图传电台 1D1 回传到所述地面工作站 2 ;

[0055] 在本发明一实施例中, 所述图像 / 视频采集设备 1B 还包括辅助照明设备。

[0056] 所述测距传感器安装环 1C 安装在所述多旋翼机架 1I 上, 用于固定所述第一测距传感器 11、第二测距传感器 12、第三测距传感器 13、第四测距传感器 14、第五测距传感器 15、第六测距传感器 16、第七测距传感器 17、第八测距传感器 18, 所述第九测距传感器 19、第十测距传感器 1A 安装在所述多旋翼机架 1I 上。

[0057] 所述第一推进器 1E、第二推进器 1F、第三推进器 1G、第四推进器 1H 安装在所述多旋翼机架 1I 上, 其均包括电机和螺旋桨, 用于产生推进力 ;

[0058] 所述自动驾驶仪 1D 安装在所述多旋翼机架 1I 上, 用于接收所述地面工作站 2 的指令来控制所述多旋翼飞行器 1 的飞行, 接收各个传感器的信息, 以确定自身的状态, 实现避障、导航、保护等功能 ;

[0059] 所述多旋翼机架 1I 是整个多旋翼飞行器 1 的主构架, 用于安装所述多旋翼飞行器 1 的其它各个部件 ;

[0060] 所述起落架 1J 安装在所述多旋翼机架 1I 上, 用于在所述多旋翼飞行器 1 起降时产生缓冲和保护作用。

[0061] 图 3 是根据本发明一实施例的自动驾驶仪 1D 的结构框图, 如图 3 所示, 所述自动驾驶仪 1D 包括 : 飞控图传电台 1D1、飞控数传电台 1D2、GPS 模块 1D3、遥控接收机 1D4、飞控中央处理器 1D5、图像采集器 1D6、多路电调 1D7、气压高度计 1D8、三轴加速度计及三轴陀螺仪 1D9、三轴地磁计 1DA、传感器采集模块 1DB 和飞控电源 1DC, 其中 :

[0062] 所述飞控图传电台 1D1 用于将所述图像采集器 1D6 采集得到的图像 / 视频信息通过无线方式传送给所述地面工作站 2 ;

[0063] 所述飞控数传电台 1D2 用于将所述多旋翼飞行器 1 的状态信息通过无线方式传给所述地面工作站 2 ;

[0064] 所述 GPS 模块 1D3 用于接收 GPS 信号并计算得到所述多旋翼飞行器 1 的经度、纬度、高度等定位信息, 所述定位信息可用于所述多旋翼飞行器 1 在隧道外起飞的阶段和巡检完毕飞出隧道降落的阶段 ;

[0065] 所述遥控接收机 1D4 用于接收由所述地面工作站 2 的遥控器 24 传送的手动遥控信号, 以备手动控制所述多旋翼飞行器 1 ;

[0066] 所述飞控中央处理器 1D5 是整个自动驾驶仪 1D 的核心, 其与飞控图传电台 1D1、飞

控数传电台 1D2、GPS 模块 1D3、遥控接收机 1D4、图像采集器 1D6、多路电调 1D7、气压高度计 1D8、三轴加速度计及三轴陀螺仪 1D9、三轴地磁计 1DA、传感器采集模块 1DB 各个部分通信,得到需要的姿态、位置、遥控等信号,以完成多旋翼飞行器 1 的手动或自动控制;

[0067] 所述图像采集器 1D6 用于采集图像或视频信息;

[0068] 所述多路电调 1D7 用于根据飞控中央处理器 1D5 的指令控制第一推进器 1E、第二推进器 1F、第三推进器 1G、第四推进器 1H 中的电机旋转并调节其转速;

[0069] 所述气压高度计 1D8 用于通过测量大气压力和环境温度来以较高的精度计算所述多旋翼飞行器 1 的海拔高度,并将高度信息发送给飞控中央处理器 1D5;

[0070] 所述三轴加速度计及三轴陀螺仪 1D9 用于测量多旋翼飞行器 1 的三轴加速度、三轴旋转速率,并将速度信息发送给飞控中央处理器 1D5;

[0071] 所述三轴地磁计 1DA 用于测量地磁在多旋翼飞行器 1 上的三轴分量,并与三轴加速度计及三轴陀螺仪 1D9 测量到的三轴加速度、三轴旋转速率一起传送给飞控中央处理器 1D5,以通过卡尔曼滤波法来计算得到所述多旋翼飞行器 1 的姿态;

[0072] 所述传感器采集模块 1DB 用于采集第一测距传感器 11、第二测距传感器 12、第三测距传感器 13、第四测距传感器 14、第五测距传感器 15、第六测距传感器 16、第七测距传感器 17、第八测距传感器 18、第九测距传感器 19、第十测距传感器 1A 与各个方向的障碍物之间的距离信息,并将距离信息发送给飞控中央处理器 1D5,以备避障、导航、保护使用;

[0073] 所述飞控电源 1DC 用于为整个自动驾驶仪 1D 供电,其包括电压变换模块等组件,无需专门说明,本领域技术人员可根据实际系统的需要自行选择电压等级、功率大小,或者可以理解为根据需要作相应的修改。

[0074] 图 4 是根据本发明一实施例的地面工作站 2 的结构框图,如图 2 所示,所述地面工作站 2 包括:数传电台 21、图传电台 22、地面计算机 23、遥控器 24 和地面工作站电源 25,其中:

[0075] 所述数传电台 21 用于接收由所述多旋翼飞行器 1 的飞控数传电台 1D2 发送过来的信息;

[0076] 所述图传电台 22 用于接收由所述多旋翼飞行器 1 的飞控图传电台 1D1 发送过来的图像/视频信息;

[0077] 所述地面计算机 23 是所述地面工作站 2 的核心,其与数传电台 21、图传电台 22、遥控器 24 通信,以进行任务规划、参数设置、手动控制、信息记录、检测和分析等操作;

[0078] 所述遥控器 24 用于产生手动遥控信号,以对所述多旋翼飞行器 1 进行手动控制;

[0079] 所述地面工作站电源 25 用于为整个地面工作站 2 供电,无需专门说明,本领域技术人员可根据实际系统的需要自行选择电压等级、功率大小,或者可以理解为根据需要作相应的修改。

[0080] 图 5 是根据本发明一实施例的基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统的工作流程图,如图 5 所示,所述基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统工作时主要包括以下几个流程步骤:

[0081] 步骤 S1:用户根据作业现场的特点,设置任务参数,所述任务参数包括但不限于安全距离、避障方式、飞行时间等;

[0082] 步骤 S2:多旋翼飞行器 1 从待检场所外起飞,按照任务要求飞入待检场所内;

[0083] 步骤 S3:根据任务要求完成巡检操作,即根据任务要求,控制图像/视频采集设备

完成拍照、摄像等操作,或控制其它专用设备完成相应的探测操作;

[0084] 步骤 S4:判断是否巡检完毕,若已按照任务要求完成巡检操作,则执行下一个步骤,若未完成,则重新执行步骤 S3;

[0085] 步骤 S5:完成规划的任务后,自动控制多旋翼飞行器 1 飞出待检场所并安全降落。

[0086] 以上对本发明基于多旋翼飞行器的隧道巡检系统进行了详细的说明。由以上公开的技术方案可知,本发明具有下列有益效果:

[0087] ①安全性高:对于隧道等待检场所内状况不明,譬如地面不平整、泥泞或者地面有积水的情况下,能够代替人、轮式机器人、履带式机器人进入隧道等待检场所内部巡检,提高巡检设备的安全性,降低该项工作的危险性。

[0088] ②机械结构简单,成本低:相对于轮式机器人或履带式机器人,本发明所涉及的系统机械结构简单、容易维护、制造成本低;

[0089] ③速度快:由于其采用了飞行的运动方式,因而相对于轮式机器人、履带式机器人而言,本发明所涉及的系统速度快,工作效率高。

[0090] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

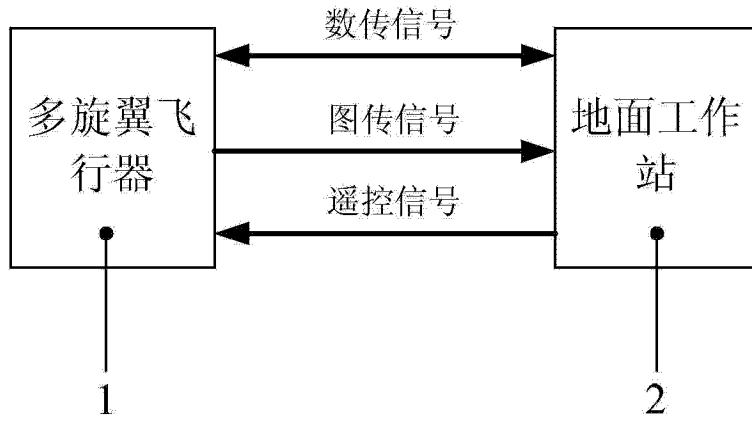


图 1

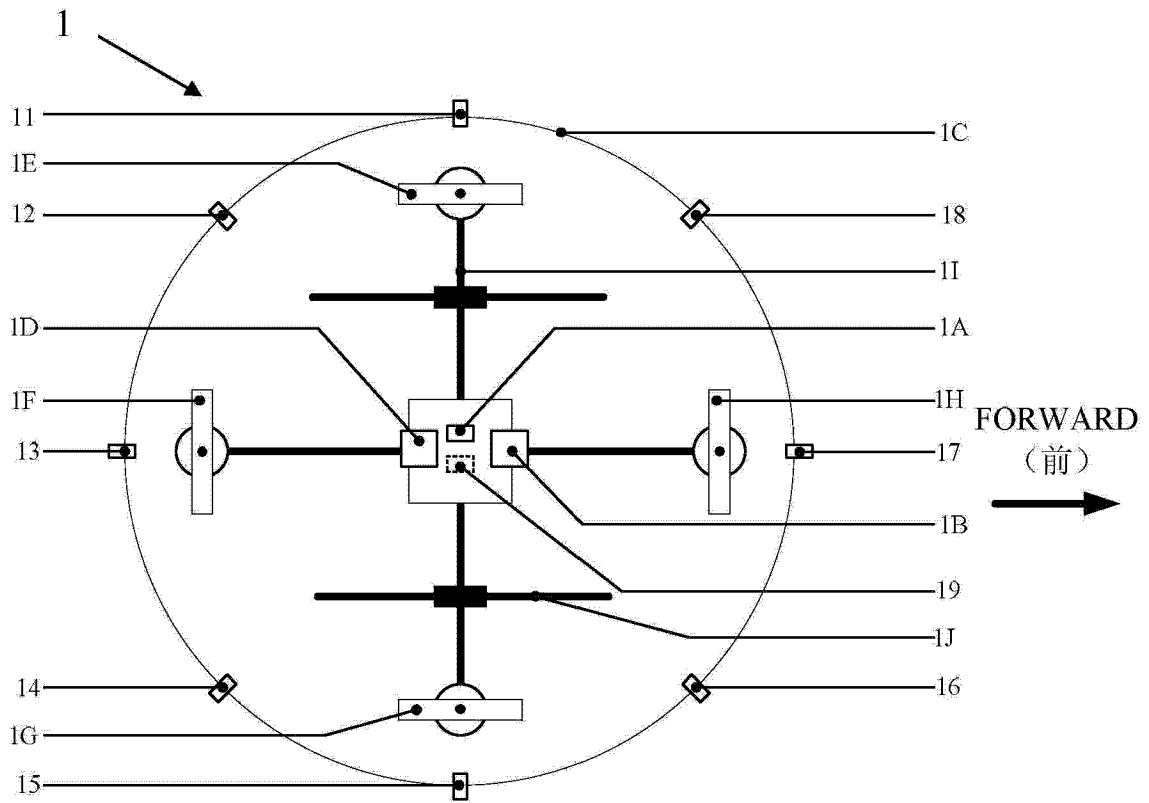


图 2

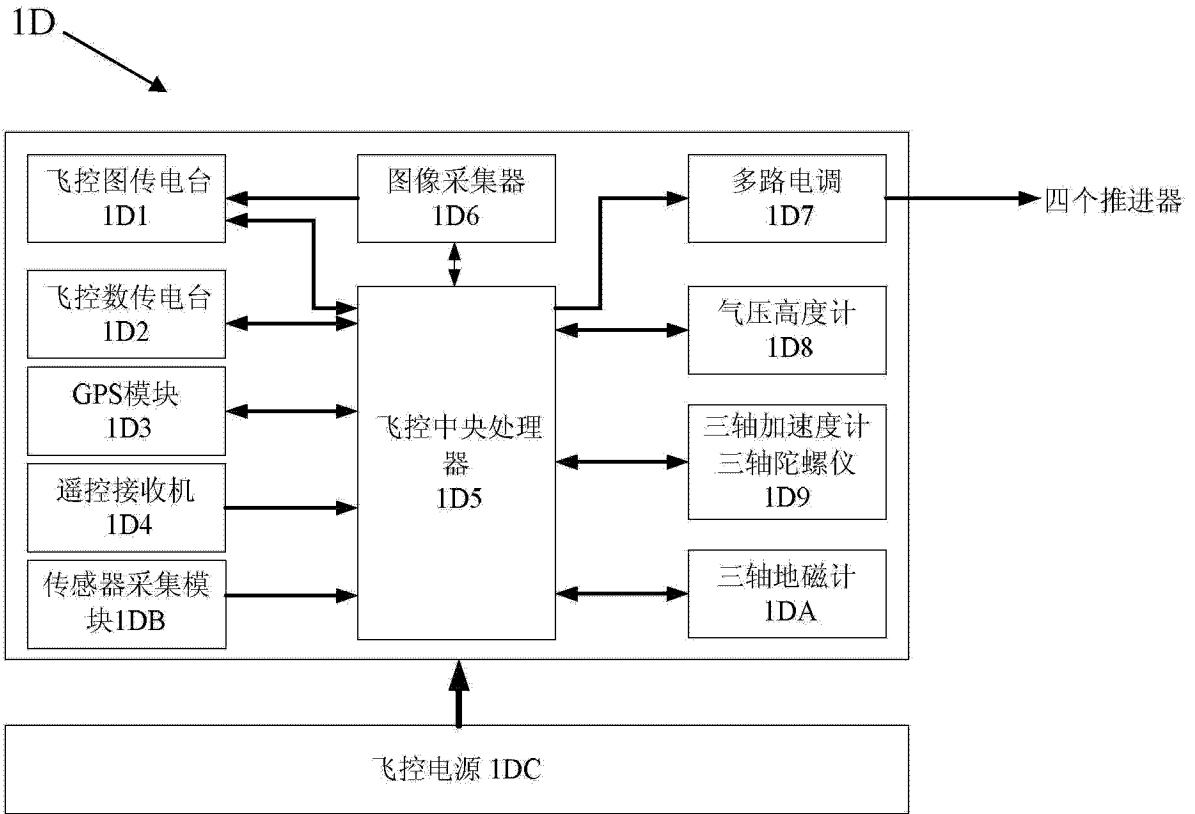


图 3

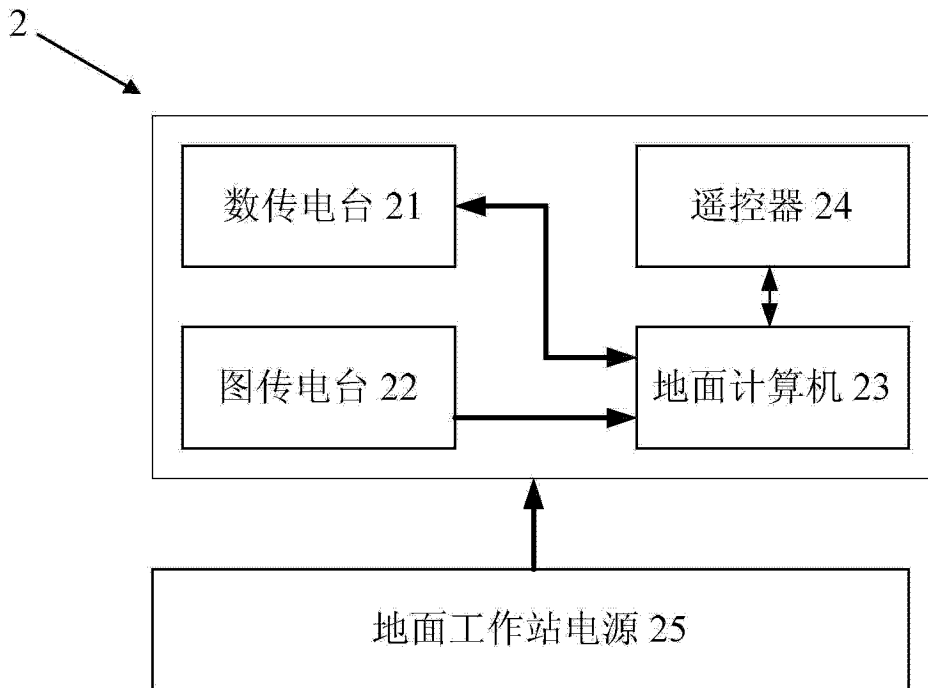


图 4

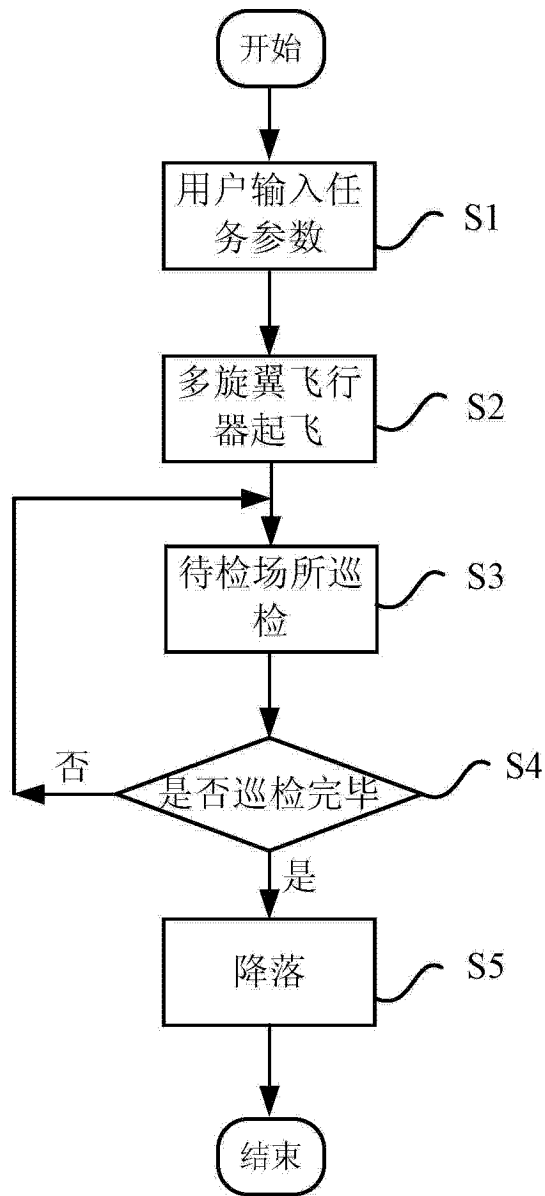


图 5