

自动刷牙系统算法框架设计

算法流程图

- **设备通信与状态检测**：系统启动后（忽略水泵控制，假设水泵持续打开），通过 WebSocket 分别与机械臂、结构光相机和六维力传感器建立通信，持续检测各设备的上电和数据同步状态；若发现通信中断或状态异常，则触发错误指示与安全保护机制，终止操作。
- **机械臂准备与路径规划**：当所有设备正常后，机械臂首先回到预定义的基础安全位置，然后使用避障路径规划算法（如改进的 RRT* 算法）生成安全的运动路径 ^①，以保证运动过程不碰撞任何障碍物。
- **工具更换与末端标定**：如需更换牙刷或冲牙器，机械臂将松开夹具，人为更换工具后重新夹紧并执行末端标定；末端标定可采用结构光传感器扫描与圆柱靶标的标定方法，通过椭圆拟合等技术确定末端装置与结构光坐标之间的几何关系 ^②。
- **牙模扫描与点云建立**：标定完成后，由结构光相机对牙模进行三维扫描，生成牙模的点云数据，并根据标定结果计算牙模在工作空间或末端装置坐标系中的位置和姿态关系，为下一步路径规划提供几何参考。
- **轨迹生成与刷牙执行**：用户通过界面选择待清洁的牙模区域及清洁参数后，算法自动生成相应的刷洗轨迹，并驱动机械臂执行刷牙动作；在此过程中，系统实时监测六维力传感器和机械臂内置的过载检测，当检测到异常外力或过载风险时，可立即停止或暂停运动。
- **力控调整与安全保护**：在刷牙执行过程中，控制算法根据力传感反馈动态调整刷牙轨迹或振幅，实现柔顺控制；若力传感器或机械臂过载检测发现超过安全阈值，则触发停机保护措施，确保设备与牙模安全。
- **清洁效果评估**：刷牙完成后，通过对比清洁前后的染色情况图像，分析残留染色区域并计算清洁力度指数，作为刷牙效果的评估指标。

模块化算法类结构

系统模块化设计可按职责划分为若干类，并可引入状态机或任务调度器来协调各模块的执行。示例如下：路径规划模块可采用前述的 RRT* 算法实现避障 ^①。下面给出一个面向对象类结构的伪代码示例：

```
class 状态机:
    def __init__(self):
        # 初始化各模块和状态
        pass
    def 启动系统(self):
        # 启动设备管理、进入主循环
        pass
    def 运行(self):
        # 根据状态执行相应任务，如设备检测、标定、扫描、刷牙等
        pass

class 设备管理:
    def __init__(self):
        pass
    def 连接机械臂(self):
        # 建立与机械臂的 WebSocket 连接
        pass
```

```

def 连接相机(self):
    # 建立与结构光相机的 WebSocket 连接
    pass
def 连接力传感器(self):
    # 建立与力传感器的 WebSocket 连接
    pass
def 检查设备状态(self):
    # 检查所有设备上电和数据同步状态
    pass
def 处理通信异常(self):
    # 触发错误提示与保护机制
    pass

class 机械臂控制:
    def __init__(self):
        pass
    def 回到安全位置(self):
        # 机械臂运动到预定义的基础安全位姿
        pass
    def 避障路径规划(self, 目标点):
        # 调用路径规划算法（如 RRT*）生成避障路径
        pass
    def 松开夹具(self):
        # 控制机械臂松开夹具
        pass
    def 夹紧夹具(self):
        # 控制机械臂夹紧夹具
        pass
    def 执行轨迹(self, 轨迹):
        # 控制机械臂按照给定轨迹运动
        pass

class 标定模块:
    def __init__(self):
        pass
    def 末端标定(self):
        # 完成末端工具相对于机械臂末端坐标系的标定
        pass
    def 手眼标定(self):
        # 基于结构光扫描和标定板完成手眼标定
        pass

class 视觉扫描:
    def __init__(self):
        pass
    def 扫描牙模(self):
        # 控制结构光相机扫描牙模并获取图像
        pass
    def 构建点云(self):
        # 将扫描数据生成牙模点云
        pass

```

```

def 计算牙模坐标关系(self):
    # 根据点云和标定结果计算牙模与末端装置的空间几何关系
    pass

class 轨迹规划:
    def __init__(self):
        pass
    def 生成刷洗轨迹(self, 区域, 参数):
        # 根据选择的清洁区域和参数自动生成刷洗轨迹
        pass

class 力控监测:
    def __init__(self):
        pass
    def 实时监测力(self):
        # 实时读取六维力传感器数据
        pass
    def 检测过载(self):
        # 检查机械臂内置的过载信号
        pass
    def 动态调整(self):
        # 根据力反馈动态调整控制策略（如阻抗控制）
        pass

class 清洁评估:
    def __init__(self):
        pass
    def 计算清洁指数(self, 刷前图, 刷后图):
        # 对比刷牙前后染色图像，计算清洁力或清洁度指标
        pass

```

说明： 以上类结构仅为示例，实际实现中可根据需求进一步细分或合并模块，并在状态机或任务调度器的控制下按流程顺序调用相应方法以完成整个自动刷牙过程 ¹ ²。

¹ A novel RRT*-Connect algorithm for path planning on robotic arm collision avoidance | Scientific Reports

https://www.nature.com/articles/s41598-025-87113-5?error=cookies_not_supported&code=0fe67217-b3a5-4fc1-8abe-cebc42ee7f22

² Hand-Eye Calibration of Line Structured-Light Sensor by Scanning and Reconstruction of a Free-Placed Standard Cylindrical Target by zhengping Deng, Yisheng Ruan, Fei Hao, Tianyao Liu :: SSRN

<https://www.ssrn.com/abstract=4640910>