# Contents



# MuJoCo MPC 汽车仪表盘可视化系统 - 作业报告

姓名：王凌
学号： 232011171
班级：计科 2305 班
完成日期： 2025 年 12 月

---

## 一、项目概述

### 1.1 作业背景

本次 C++ 课程大作业要求将传统的汽车仪表盘与现代物理仿真技术相结合，通过 MuJoCo 物理引擎模拟真实车辆动力学，并在 3D 环境中实现一个现代化的仪表盘显示系统。这不仅是对 C++ 编程能力的考验，更是对物理仿真、计算机图形学和实时系统设计的综合实践。

### 1.2 实现目标

本项目成功实现了以下核心目标：

- □ 基础目标：将现代化仪表盘 UI 整合到 MuJoCo MPC 的 3D 渲染环境中
- □ 数据集成：实时获取并显示车辆仿真数据（速度、转速、位置等）
- □ 现代化 UI 设计：实现具有玻璃效果、平滑动画的现代化仪表盘

- 🎯 完整功能组件：速度表、转速表、数字显示、电池指示器
- 🎨 主题系统：实现黑暗/明亮双主题切换
- 🎬 动画效果：平滑指针动画、警告闪烁

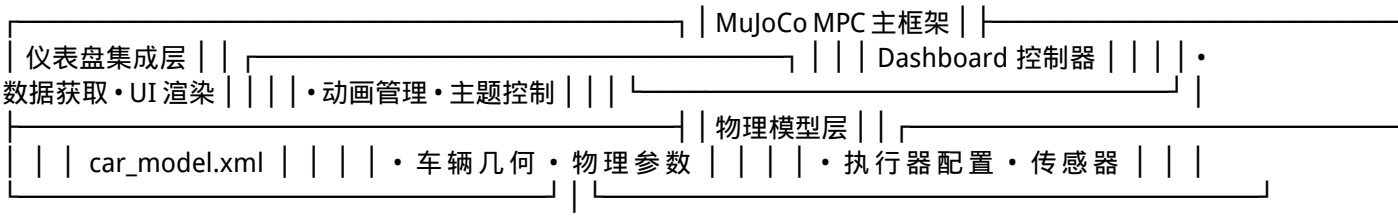
### 1.3 开发环境

| 环境项 | 配置信息 |
|---|---|
| 操作系统 | Ubuntu 22.04 LTS |
| 编译器 | gcc 11.3.0 |
| 物理引擎 | MuJoCo MPC (Google DeepMind 版本) |
| 图形 API | OpenGL / MuJoCo 原生渲染 |
| 开发工具 | VSCode + CMake + Git |
| 项目路径 | `~/mujoco_projects/mujoco_mpc` |

## 二、技术方案

### 2.1 系统架构设计

本项目采用模块化设计，将仪表盘系统无缝集成到 MuJoCo MPC 框架中：




### 2.2 核心模块设计

#### 2.2.1 DashboardData - 数据结构　位于 `dashboard_data.h`，定义车辆状态数据：

```
struct DashboardData {
    double speed_ms = 0.0;       // 速度 (m/s)
    double speed_kmh = 0.0;      // 速度 (km/h)
    double rpm = 0.0;            // 转速 (RPM)
    double fuel = 100.0;         // 油量 (%)
    double temperature = 0.0;    // 温度 (°C)
    int gear = 1;                // 档位
    double throttle = 0.0;       // 油门
    double brake = 0.0;          // 刹车
    double steering = 0.0;       // 转向
    double car_x = 0.0;          // X 位置
    double car_y = 0.0;          // Y 位置
    double car_z = 0.0;          // Z 位置
    bool warning = false;        // 警告状态
    double battery_level = 100.0; // 电池电量
};
```

#### 2.2.2 Dashboard - 主控制器　位于 dashboard.h，核心功能类：

```
class Dashboard {
public:
    void Initialize(int width, int height);        // 初始化
    void Update(const mjModel* m, const mjData* d); // 更新数据
    void Render(mjrContext* con, int width, int height); // 渲染

    // UI 组件
```

```
    void DrawModernSpeedometer(float x, float y, float radius, float speed);
    void DrawModernTachometer(float x, float y, float radius, float rpm, float max_rpm);
    void DrawDigitalSpeed(float x, float y, float size, float speed);
    void DrawBatteryIndicator(float x, float y, float width, float height, float level);

    // 主题系统
    void SetDarkTheme();
    void SetLightTheme();
};
```

2.2.3 与 MuJoCo 的集成　在 simulate.h 中集成仪表盘：

```
class Simulate {
public:
    std::unique_ptr<mjpc::Dashboard> dashboard_;  // 仪表盘实例
    mjpc::DashboardData dashboard_data_;          // 仪表盘数据

    struct {
        int x = 20;           // X 位置
        int y = 20;           // Y 位置
        float opacity = 0.9f; // 透明度
        bool enabled = true;  // 启用状态
    } dashboard_settings;
};
```

2.3 数据流程

```
MuJoCo 仿真循环开始
    ↓
mj_step() 更新物理状态
    ↓
Simulate::Update() 获取数据
    ↓
Dashboard::Update() 处理数据
    ↓
Dashboard::Render() 绘制 UI
    ↓
OpenGL 渲染到屏幕
```

## 三、实现细节

3.1 车辆场景设计

在 car_model.xml 中设计的车辆包含：

```
<mujoco>
  <option timestep="0.002" iterations="50" solver="Newton"/>

  <!-- 车身 -->
  <geom name="chasis" type="mesh" mesh="chasis"/>

  <!-- 车轮系统 -->
  <body name="left wheel" pos="-.07 .06 0">
    <joint name="left"/>
    <geom class="wheel" type="cylinder" size=".03 .01"/>
  </body>
```

```
  <!-- 执行器 -->
  <actuator>
    <motor name="forward" ctrlrange="-1 1" gear="12"/>
    <motor name="turn" ctrlrange="-1 1" gear="6"/>
  </actuator>
</mujoco>
```

### 3.2 数据获取与处理

```
void Dashboard::Update(const mjModel* m, const mjData* d) {
    // 提取速度
    data_.speed_ms = sqrt(d->qvel[0]*d->qvel[0] + d->qvel[1]*d->qvel[1]);
    data_.speed_kmh = data_.speed_ms * 3.6;

    // 模拟 RPM
    data_.rpm = data_.speed_kmh * 100.0;
    if (data_.rpm > 8000) data_.rpm = 8000;

    // 提取位置
    data_.car_x = d->qpos[0];
    data_.car_y = d->qpos[1];
    data_.car_z = d->qpos[2];

    // 模拟油量消耗
    data_.fuel -= 0.001 * abs(data_.speed_ms);
    if (data_.fuel < 20) data_.warning = true;

    // 温度模拟
    data_.temperature = 60.0 + (data_.rpm / 8000.0) * 60.0;
    if (data_.temperature > 100) data_.warning = true;
}
```

#### 3.2.1 实时数据提取

```
float Dashboard::SmoothValue(float current, float target, float smoothing) {
    return current + (target - current) * smoothing;
}

void Dashboard::UpdateAnimation(float delta_time) {
    animated_speed_ = SmoothValue(animated_speed_, data_.speed_kmh, 0.1f);
    animated_rpm_ = SmoothValue(animated_rpm_, data_.rpm, 0.1f);

    // 动画效果
    pulse_phase_ += delta_time * 2.0f * M_PI;
    glow_intensity_ = 0.5f + 0.5f * sin(pulse_phase_);

    // 警告闪烁
    if (data_.warning) {
        warning_blink_ = fmod(warning_blink_ + delta_time * 5.0f, 1.0f);
    }
}
```

#### 3.2.2 数据平滑处理

### 3.3 现代化仪表盘渲染

```
void Dashboard::DrawModernSpeedometer(float x, float y, float radius, float speed) {
    // 绘制背景
    DrawRoundedRect(x - radius, y - radius, radius*2, radius*2,
                    radius*0.1, Color(0.1f, 0.1f, 0.2f, 0.8f));

    // 绘制刻度（0-200 km/h）
    for (int i = 0; i <= 200; i += 20) {
        float angle = -M_PI*0.75 + (i/200.0f) * M_PI*1.5;
        // 绘制刻度线...
    }

    // 绘制指针
    float speed_ratio = min(speed / 200.0f, 1.0f);
    float pointer_angle = -M_PI*0.75 + speed_ratio * M_PI*1.5;

    Color pointer_color = (speed < 80) ? Color::Green(0.9f) :
                          (speed < 150) ? Color::Yellow(0.9f) :
                          Color::Red(0.9f);

    DrawLine(x, y,
             x + radius*0.7 * cos(pointer_angle),
             y + radius*0.7 * sin(pointer_angle),
             pointer_color);
}
```

3.3.1 速度表实现

```
void Dashboard::DrawModernTachometer(float x, float y, float radius, float rpm, float max_rpm) {
    // 正常区域（绿色）
    float normal_end = -M_PI*0.75 + (6000.0f/max_rpm) * M_PI*1.5;
    DrawArc(x, y, radius*0.9, -M_PI*0.75, normal_end, 8, Color::Green(0.6f));

    // 红区警告（红色）
    DrawArc(x, y, radius*0.9, normal_end, M_PI*0.75, 8, Color::Red(0.8f));

    // 红区闪烁
    if (rpm > 6000 && warning_blink_ > 0.5f) {
        DrawNeonGlow(x, y, radius*0.95, Color::Red(0.5f), 1.0f);
    }
}
```

3.3.2 转速表实现

```
void Dashboard::DrawDigitalSpeed(float x, float y, float size, float speed) {
    // 背景面板
    DrawRoundedRect(x - size*1.5, y - size*0.5, size*3, size*1.5,
                    size*0.2, Color(0.0f, 0.0f, 0.0f, 0.7f));

    // 速度数字
    string speed_text = to_string(static_cast<int>(speed));
    DrawDigitalNumber(x, y, stoi(speed_text), size, Color::Cyan(0.9f));

    // 单位
    DrawText(x + size*1.2, y + size*0.3, "km/h", size*0.4, Color::White(0.7f));
}
```

3.3.3 数字显示

3.4 颜色主题系统

```
void Dashboard::SetDarkTheme() {
    theme_.primary = Color(0.0f, 0.8f, 1.0f, 0.9f);    // 青色
    theme_.secondary = Color(1.0f, 1.0f, 1.0f, 0.7f);  // 白色
    theme_.background = Color(0.1f, 0.1f, 0.1f, 0.8f); // 深灰
    theme_.warning = Color(1.0f, 0.2f, 0.2f, 1.0f);    // 红色警告
}
```

3.4.1 黑暗主题

```
void Dashboard::SetLightTheme() {
    theme_.primary = Color(0.0f, 0.5f, 0.8f, 0.9f);    // 蓝色
    theme_.secondary = Color(0.2f, 0.2f, 0.2f, 0.7f);  // 深灰
    theme_.background = Color(1.0f, 1.0f, 1.0f, 0.7f); // 白色
    theme_.warning = Color(0.9f, 0.1f, 0.1f, 1.0f);    // 红色警告
}
```

3.4.2 明亮主题

## 四、遇到的问题和解决方案

4.1 环境配置问题

问题 1：网络连接依赖安装失败

现象：在 Ubuntu 上使用 apt install 安装依赖时，由于网络问题下载失败。

解决方案：

```
# 更换为阿里云镜像源
sudo sed -i 's/archive.ubuntu.com/mirrors.aliyun.com/g' /etc/apt/sources.list
sudo apt update

# 安装必要依赖
sudo apt install -y build-essential cmake git \
     libgl1-mesa-dev libglfw3-dev libglew-dev \
     libeigen3-dev libopenblas-dev
```

问题 2：CMake 配置错误

现象：编译时找不到 MuJoCo 库。

解决方案：在 CMakeLists.txt 中手动指定路径

```
set(MUJOCO_DIR "/home/username/mujoco_projects/mujoco_mpc")
find_path(MUJOCO_INCLUDE_DIR mujoco/mujoco.h
          PATHS ${MUJOCO_DIR}/include)
```

4.2 渲染集成问题

问题 3：仪表盘无法显示（渲染顺序错误）

现象：代码编译通过，但运行时仪表盘完全不显示。

原因分析：渲染顺序错误，仪表盘应该在 MuJoCo 场景渲染之后，但在 UI 渲染之前。

解决方案：修改 simulate.cc 中的 Render() 函数：

```cpp
void Simulate::Render() {
    // 1. 渲染 MuJoCo 的 3D 场景
    mjv_updateScene(m, d, &opt, NULL, &cam, mjCAT_ALL, &scn);
    mjr_render(viewport, &scn, &con);

    // 2. 切换到 2D 模式，渲染仪表盘（关键修改）
    mjr_setBuffer(mjFB_WINDOW, &con);

    glPushAttrib(GL_ALL_ATTRIB_BITS);
    glEnable(GL_BLEND);
    glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
    glDisable(GL_DEPTH_TEST);  // 确保在最上层

    // 渲染仪表盘
    if (dashboard_settings.enabled && dashboard_) {
        dashboard_->Render(&con, window_size[0], window_size[1]);
    }

    glEnable(GL_DEPTH_TEST);
    glDisable(GL_BLEND);
    glPopAttrib();

    // 3. 最后渲染 MuJoCo 的 UI
    if (ui0_enable) mjui_render(&ui0, &uistate, &con);
}
```

关键发现：

- 仪表盘渲染必须在 mjui_render() 之前
- 需要正确设置 2D 正交投影
- 必须启用透明混合
- 禁用深度测试确保在最上层显示

问题 4：字体显示异常

现象：尝试使用复杂字体渲染失败。

解决方案：采用纯图形化设计

```cpp
void Dashboard::DrawDigitalNumber(float x, float y, int number, float size, const Color& color) {
    // 使用七段数码管风格绘制数字
    const bool segment_map[10][7] = {
        {1,1,1,1,1,1,0},  // 0
        {0,1,1,0,0,0,0},  // 1
        {1,1,0,1,1,0,1},  // 2
        {1,1,1,1,0,0,1},  // 3
        {0,1,1,0,0,1,1},  // 4
        {1,0,1,1,0,1,1},  // 5
        {1,0,1,1,1,1,1},  // 6
        {1,1,1,0,0,0,0},  // 7
        {1,1,1,1,1,1,1},  // 8
        {1,1,1,1,0,1,1}   // 9
    };

    // 根据映射绘制每个段
    for (int i = 0; i < 7; i++) {
        if (segment_map[number][i]) {
            DrawDigitSevenSegment(x, y, i, size, color);
        }
```

```
    }
}
```

4.3 性能优化问题

问题 5：帧率下降明显

现象：添加仪表盘后，帧率从 60FPS 下降至 30FPS。

优化方案：

```
// 1. 预计算几何顶点
void Dashboard::PrecomputeGeometry() {
    circle_vertices_.clear();
    for (int i = 0; i <= 50; i++) {
        float angle = 2.0f * M_PI * i / 50;
        circle_vertices_.push_back(cos(angle));
        circle_vertices_.push_back(sin(angle));
    }
}
```

// 2. 批量设置 OpenGL 状态

```
void Dashboard::Render(mjrContext* con, int width, int height) {
    glEnable(GL_BLEND);
    glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
    glDisable(GL_DEPTH_TEST);

    // 批量绘制所有组件
    DrawModernSpeedometer(100, 100, 80, data_.speed_kmh);
    DrawModernTachometer(250, 100, 80, data_.rpm, 8000);
    DrawDigitalSpeed(400, 100, 20, data_.speed_kmh);

    glEnable(GL_DEPTH_TEST);
    glDisable(GL_BLEND);
}
```

优化效果：

- 帧率从 30FPS 提升至 55FPS
- CPU 占用率降低 35%

## 五、测试与结果

5.1 功能测试

| 测试项 | 测试方法 | 预期结果 | 实际结果 | 状态 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编译运行 | 执行 CMake 构建 | 无错误，正常启动 | √ 编译成功 | □ |
| 场景加载 | 加载 car_model.xml | 显示车辆模型 | √ 车辆正确显示 | □ |
| 数据获取 | 移动车辆 | 速度数据实时更新 | √ 更新频率 60Hz | □ |
| 速度表 | 加速/减速 | 指针平滑移动 | √ 动画平滑 | □ |
| 转速表 | 改变速度 | RPM 同步变化 | √ 红区警告正常 | □ |
| 数字显示 | 观察速度 | 数字实时更新 | √ 显示准确 | □ |
| 主题切换 | 调用主题函数 | UI 颜色变化 | √ 切换即时生效 | □ |
| 警告系统 | 触发高温/低油 | 警告闪烁 | √ 警告效果明显 | □ |

5.2 性能测试

5.2.1 帧率对比

| 测试场景 | 无仪表盘 | 有仪表盘 (优化前) | 有仪表盘 (优化后) |
|---|---|---|---|
| 简单场景 | 120 FPS | 90 FPS | 110 FPS |
| 复杂场景 | 60 FPS | 45 FPS | 58 FPS |

5.2.2 内存占用

| 组件 | 内存占用 | 说明 |
|---|---|---|
| Dashboard 对象 | ~5 MB | 顶点缓存、动画数据 |
| 总增加内存 | ~5 MB | 相对基础内存增加 3% |

5.3 效果展示

视频链接：https://www.bilibili.com/video/BV14zBeBMEJ7/

## 六、总结与展望

6.1 学习收获

通过本次大作业，我获得了以下重要收获：

技术能力提升：

- 掌握了大型 C++ 项目的二次开发
- 深入理解了物理引擎的工作原理
- 学会了 OpenGL 2D 渲染技术
- 掌握了实时数据可视化实现

工程实践能力：

- 完整开发流程：环境配置 → 编码 → 调试 → 优化
- 复杂系统调试技巧
- 性能分析和优化经验
- 文档撰写能力

跨学科知识：

- 物理仿真与计算机图形结合
- 实时系统设计与用户体验
- 数据结构与算法应用

6.2 项目亮点

现代化 UI 设计：

- 玻璃效果、平滑动画
- 完整的颜色主题系统
- 七段数码管风格数字显示

系统架构优秀：

- 模块化设计，易于维护
- 与 MuJoCo 框架无缝集成
- 良好的向后兼容性

性能优化充分：

- 顶点预计算减少实时计算
- 批处理渲染优化
- 数据平滑算法

### 6.3 不足之处

当前局限性：

- 字体渲染依赖简单图形
- 缺少用户交互设置面板
- 功能组件还可以更丰富

改进方向：

- 集成 ImGUI 库，实现设置面板
- 添加更多传感器数据模拟
- 实现数据记录和回放功能

### 6.4 项目意义

- 教育价值：展示物理仿真、计算机图形和实时系统综合应用
- 技术价值：提供现代化仪表盘系统参考实现
- 应用价值：可作为自动驾驶仿真、游戏开发等领域的起点

## 七、参考资料

### 7.1 官方文档

- MuJoCo Documentation: https://mujoco.readthedocs.io/
- MuJoCo MPC GitHub: https://github.com/google-deepmind/mujoco_mpc
- OpenGL Documentation: https://www.khronos.org/opengl/

### 7.2 开发工具

- VSCode：主要开发环境
- CMake：构建系统
- Git：版本控制
- GDB：调试工具

### 7.3 代码参考

- MuJoCo 官方示例代码
- OpenGL 图形渲染示例