

360° 全景拼接相机

双目背靠背 · 无物理连接软件同步

双鱼眼 220° 超广角 · 显存直读计算 · 低延迟实时全景拼接

本机为**双目背靠背**结构，两枚 220° 鱼眼镜头反向安装，单台设备即覆盖 360° 全向视野。系统**不依赖任何物理同步线缆**，通过软件锁相环（PLL）在毫秒级动态调节帧周期，使两路曝光时间中心严格重合；图像数据全程留在**显存**内完成颜色转换与网格融合，CPU 侧零重排，输出端到端渲染延迟 **33 ms**。

360°

全向覆盖
双镜头 220° 视场，重叠区
40°

28.05 FPS

稳态实时帧率
高速档实测，额定 30 FPS

33 ms

端到端渲染延迟
GPU 单帧 27~29.5 ms

<100 μs

双摄同步时差
软件锁相环实测

一 产品概述

PRODUCT OVERVIEW

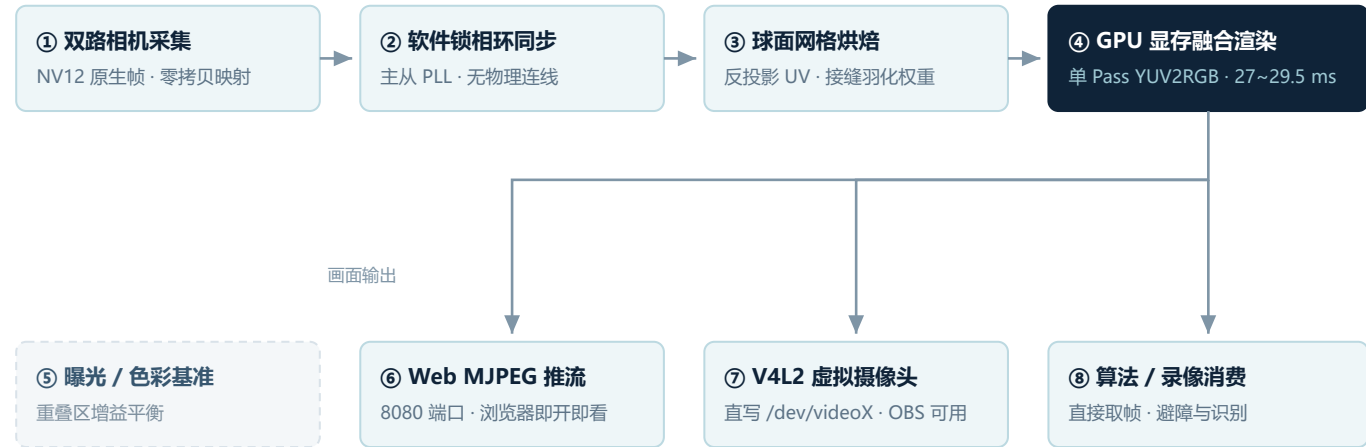
360° 全景拼接相机是一套面向机器人、无人车、智能装备与工业视觉场景的**实时全景视频采集与拼接系统**。设备以树莓派 5 为主控平台，接入两路 Sony IMX477 高清传感器与两枚 220° 鱼镜头，镜头沿光轴背靠背反向安装，构成分辨率为 2048 × 1024 的标准 2:1 等距柱状 (Equirectangular) 全景画面。

与常见的多相机拼接方案不同，本机的差异点集中在三处：**不布物理同步线**、**计算全程发生在显存**、**拼接过程低延迟**。这三个特征直接决定了它在移动与振动工况下的可用性——没有线缆就没有接头松脱与走线牵拽，显存直读则把 CPU 从像素搬运的任务里彻底解放出来，低延迟让全景画面可以直接进入避障、识别等实时链路，而不必停留在“录下来再看”的阶段。

核心亮点



数据链路概览



关于硬件平台：本机以树莓派 5 (Broadcom BCM2712, VideoCore VII GPU, 8 GB RAM) 为运算平台，系统基于 Raspberry Pi OS Bookworm 64 位 (Linux 6.6 内核) 运行。GPU 渲染走 DRM/GBM 纯无头 EGL 上下文，**无需启动任何桌面图形界面**，适合无屏、无显示器的嵌入式部署。

2.1 核心性能指标

指标	实测 / 规格	技术实现途径
稳态实时帧率	28.05 FPS (额定 30 FPS)	着色器单 Pass 融合 + 显存直读 + 64 字节步长对齐
GPU 单帧渲染延迟	27.0 ~ 29.5 ms	VideoCore VII 无头 DRM/EGL 离屏渲染 (FBO)
端到端渲染延迟	33 ms	从纹理上传到全景帧可用的完整链路
双摄同步时差	< 100 μ s (实测最小 -2 μ s)	基于 libcamera 的软件主从锁相环 (PLL)
镜头光学视场 FOV	220° 超广角	双镜头背靠背安装, 空间重叠区 40°
输入分辨率	1536 $\times$ 1536 (高速档) 2028 $\times$ 1520 (原画档)	IMX477 2 $\times$ 2 Binning / 原生全画幅双模式
输出全景分辨率	2048 $\times$ 1024 (标准 2:1 等距柱状) 原画档可按需配置 4096 $\times$ 2048	180 $\times$ 360 经纬球面网格, 共 65,341 顶点
推流与访问方式	Web HTTP MJPEG (端口 8080) V4L2 虚拟摄像头节点	现代 PC / 手机 / VR 浏览器即开即看
接缝处理	距离变换高斯羽化 55 px (高速档) / 50 px (原画档)	自动定位最优拼接中线

2.2 硬件配置

部件	规格
运算平台	树莓派 5 (Broadcom BCM2712, VideoCore VII GPU, 8 GB RAM)
图像传感器	双路 Sony IMX477 HQ 摄像头, CSI-2 直连主控双 CAM 端口
光学镜头	双路 M12 接口 220° 鱼眼镜头, 13 mm 基线背靠背安装
镜头畸变模型	等距鱼眼 ($r = f \cdot \theta$) + Kannala-Brandt 四阶径向多项式
视频采集格式	NV12 (Y / UV 双平面), libcamera 原生 DMABUF 零拷贝映射
渲染输出格式	BGRA / BGR (通道顺序由着色器直出), 2048 $\times$ 1024

2.3 两档运行 Profile 对比

配置维度	高速实时档	高清原画档
相机输入分辨率	1536 $\times$ 1536	2028 $\times$ 1520
硬件 Stride 特性	1536 字节 (64 字节完美对齐, 零填充开销)	2048 字节 (含 20 字节行尾填充)
全景输出分辨率	2048 $\times$ 1024	2048 $\times$ 1024 (可配 4096 $\times$ 2048)
实测稳态帧率	28.05 FPS	18 ~ 20 FPS

配置维度	高速实时档	高清原画档
GPU 单帧耗时	27.0 ~ 29.5 ms	45.0 ~ 50.0 ms
羽化平滑宽度	55 像素	50 像素
主要适用场景	实时视频推流、低延迟全景图传、机器人全向避障导航	高清静态全景拍摄、离线录制与高质量建图

选型建议：涉及避障、跟随、远程操控等实时闭环场景，选**高速实时档**；以画质换帧率可接受、主要做静态建模或录像留存，选**高清原画档**。两档共用同一套拼接架构，可通过启动参数直接切换。

三 功能清单

FEATURE LIST

3.1 采集与同步

双路原生采集	libcamera 原生 C++ 驱动接管双路 CSI 摄像头，DMABUF 零拷贝内存映射，NV12 格式直出
软件锁相环同步	主从相机帧周期动态微调，曝光时间中心严格重合，实测偏差稳定收敛于 $ \Delta t < 100\ \mu s$
硬件跨度自适应	自动探测 64 字节行对齐 stride 并传递给 OpenGL，消除画面水平拉丝与 CPU 重排
ISP 色彩调校	自动挂载 IMX477 专用调色文件，解决非红外滤光片条件下的画面偏红问题

3.2 拼接与渲染

360° 球面视角	输出完整 360° 全向球面视角，可直接用于 VR 头显沉浸浏览与全景回放
2D 平铺展开	输出标准 2:1 等距柱状平铺展开图（2048 × 1024），可直接嵌入网页、二次开发与算法取帧
无缝接缝融合	基于 40° 重叠区距离变换自动定位最优拼接中线，配合高斯羽化平滑过渡
曝光 / 色彩平衡	对比双路重叠区像素均值，自动生成 RGB 三通道增益系数
显内存计算	颜色转换、Y 轴翻转、通道排列全部在 GPU 着色器内完成，CPU 侧零像素级重排
零视差深度可调	投影球半径 0.5 ~ 2.5 m 可配，室内近距场景可下调以消除重影

3.3 输出与接入

Web MJPEG 推流	内置轻量 HTTP 服务（默认 8080 端口），局域网内 PC / 平板 / 手机 / VR 浏览器打开即看，无需插件
V4L2 虚拟摄像头	拼接画面直写 /dev/videoX 虚拟节点，OBS、直播推流软件、ROS 节点即插即用
按需编码调度	无 Web 客户端时自动跳过 JPEG 编码，CPU 占用降至极低；有客户端接入时毫秒级激活多路分发
离线渲染工具	提供离线图片 / 视频全景渲染程序，支持 CPU 与 GPU 两条路径，便于效果验证

四、典型应用场景

- 机器人全向避障
- 无人车环视
- VR / 全景直播
- 远程巡检与运维
- 安防监控拼接
- 工业产线空间定位
- 无人机 / 移动底盘

场景适配说明

场景	推荐档位	关注点
移动机器人避障	高速实时档	关注端到端延迟与同步时差；软件同步在振动工况下比线缆同步更易维护
无人车环视	高速实时档	关注全向视野连续性与输出分辨率对识别精度的影响
VR 全景直播	高速实时档	关注推流带宽与客户端并发数量，可通过虚拟摄像头对接推流软件
远程巡检运维	高速实时档	关注网络带宽与弱网表现，建议局域网部署
安防监控拼接	高清原画档	关注细节还原与接缝平滑度，可接受较低帧率
工业空间建模	高清原画档	关注分辨率与零视差深度设置，建模场景建议配合离线渲染工具验证

五、随机交付清单

类别	内容
主机	运算主机（含双 CAM 端口启用）、双路图像传感器与 220° 鱼镜头组件
线缆与配件	双路摄像头排线、电源适配器、散热组件
软件包	实时拼接推流程序、离线标定与渲染工具、配置文件与标定文件集
文档	《产品规格书》（本文档）、《产品使用说明书》

版本状态说明：本文件对应**原型机**阶段。文中性能数据均来自原型机在标准工况下的实测值，最终量产版本可能因器件批次、结构件公差与固件版本调整而变化，正式对外报价与合同附件以双方确认的最终版本规格书为准。

备注：本文档所载型号、参数与功能均以原型机实测为准，详见《360° 全景拼接相机产品使用说明书》中的配置说明与调优章节。