ESP32-P4

ESP-VISION 编程指南

Release 2026.06.27-6-g62ba28bae5
乐鑫信息科技
2026 年 07 月 08 日

目录

Python 模块索引 **89**

索引 **91**

ESP-VISION 是面向乐鑫 SoC 的低代码端侧 AI 与计算机视觉框架，深度整合了摄像头采集、图像处理、视频编解码、网络传输、模型部署和 AI 推理等核心能力，并提供统一标准化的 Python 接口，赋能开发者快速构建集视觉采集、智能识别、画面显示与流媒体传输于一体的边缘应用。

本指南的章节结构如下。

Chapter 1

简介

1.1 什么是 ESP-VISION

ESP-VISION 是面向乐鑫 SoC 的低代码端侧 AI 与计算机视觉框架，深度整合了摄像头采集、图像处理、视频编解码、网络传输、模型部署和 AI 推理等核心能力，并提供统一标准化的 Python 接口，赋能开发者快速构建集视觉采集、智能识别、画面显示与流媒体传输于一体的边缘应用。

1.2 主要特性

- 为受支持的芯片和开发板统一提供摄像头、图像、显示、视频编码、预览与推流 API。
- 提供绘图、滤波、颜色追踪、特征检测、二维码、条码和 AprilTag 等图像处理能力。
- 基于 ESP-DL 提供目标检测、姿态估计和图像分类能力，同时支持通过 TensorFlow Lite Micro 运行 `.tflite` 模型。
- 底层高效的 C/C++ 基础组件深度协同芯片的多媒体外设与硬件加速模块，切实保障应用的高效与实时运行性能。
- 可通过 VSCode 主机工具或 Web IDE 进行开发，并使用 `idf.py` 管理固件构建。

1.3 支持的开发板

ESP-VISION 支持基于 ESP32-P4、ESP32-S3 与 ESP32-S31 的开发板。完整开发板列表以及各芯片的模块和限制见芯片与开发板支持。

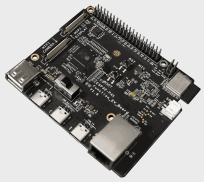
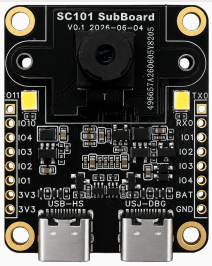
构建与烧录固件请参阅快速入门，整体架构请参阅方案架构。

Chapter 2

芯片与开发板支持

ESP-VISION 文档按支持的芯片分别构建。请选择开发板固件所使用的芯片，使文档中的模块和 API 与默认固件保持一致。

2.1 支持的开发板

图片	开发板	芯片	ESP-VISION 支持情况
	ESP32-S31-Korvo-1	ESP32-S3	**支持 (仅支持 ESP-IDF master)** | 模块: sensor, image, display, espdl, tflite, imageio | MicroPython: network, WLAN, I2C, SPI, UART, PWM, WDT | 视觉能力: pixel/math, filters, geometry, template matching, QR code, AprilTag
	ESP32-P4X-EYE	ESP32-P4	**支持** | 模块: sensor, image, display, espdl, tflite, imageio, h264, rtsp, barcode | MicroPython: network, WLAN, I2C, SPI, UART, PWM, WDT | 视觉能力: pixel/math, filters, geometry, template matching, QR code, AprilTag
	ESP32-P4X-Function-EV-Board	ESP32-P4	**支持** | 模块: sensor, image, display, espdl, tflite, imageio, h264, rtsp, barcode | MicroPython: network, WLAN, I2C, SPI, UART, PWM, WDT | 视觉能力: pixel/math, filters, geometry, template matching, QR code, AprilTag
	ESP32-P4X-VISION	ESP32-P4	**支持** | 模块: sensor, image, display, espdl, tflite, imageio, h264, rtsp | MicroPython: network, WLAN, I2C, SPI, UART, PWM, WDT | 视觉能力: pixel/math, filters, geometry, template matching, QR code, AprilTag
	AtomS3R-M12	ESP32-S3	**支持** | 模块: sensor, image, display, espdl, tflite, imageio | MicroPython: network, WLAN, I2C, SPI, UART, PWM, WDT | 视觉能力: pixel/math, filters, geometry, template matching, QR code, AprilTag
			

备注： 支持摘要根据 `mpconfigport.h`、各开发板的 `mpconfigboard.h` 与 `imlib_config.h`，以及芯片相关的模块选择自动生成。

2.2 芯片能力与板级能力

所选芯片控制芯片级源文件选择。例如，只有 `IDF_TARGET` 为 `esp32p4` 时，`micropython.cmake` 才会加入 `h264` 和 `rtsp`。板级配置还可以通过 `boards/<BOARD>/board.cmake` 进一步启用或关闭 ZXing-C++ 条形码后端等功能。

API 导航和芯片相关的符号条件会根据这些构建文件生成。因此，`micropython.cmake`、`boards/*/port/mpconfigboard.cmake` 和各开发板的 `board.cmake` 是 ESP-VISION API 可用性的权威来源。

2.3 标准 MicroPython 功能

标准 MicroPython 功能采用另一条配置路径：全局 `overlay/micropython/ports/esp32/mpconfigport.h` 与各开发板的 `mpconfigboard.h`。上表会索引这些文件中显式启用的基础能力，其他条件还可能取决于芯片能力和固件配置。

当前开发板头文件也都关闭了 Bluetooth 和 ESP-NOW；S31 开发板还关闭了 `machine.ADC` 和 `machine.ADCBlock`。开发板仍需具备相应网络硬件和固件配置，`network.WLAN` 才能建立连接。

这些条件并非只由芯片决定，因此芯片选择器会过滤 ESP-VISION API 参考，但不代表标准 MicroPython 模块的完整清单。构建环境兼容性说明统一维护在项目 README 中。

芯片文档描述当前开发板配置共同采用的默认能力。自定义开发板或修改编译选项后的固件可能与已发布芯片页面不同；发生差异时应以固件配置为准。

Chapter 3

快速入门

3.1 前置条件

- 受支持的 ESP-IDF 环境，并已 source 导出脚本，使 `idf.py` 位于 `PATH` 中；当前分支兼容性请查看项目 README。
- 一块列在芯片与开发板支持 中且与所选芯片对应的开发板。

3.2 构建、烧录与监视

带子模块克隆仓库，然后在仓库根目录使用板级感知的 `idf.py` 扩展：

```
git clone --recursive https://github.com/espressif/esp-vision.git esp-vision
cd esp-vision
```

```
idf.py --board ESP32_P4X_EYE -p /dev/ttyACM0 build flash monitor
```

该命令会先运行 `prepare-micropython`：校验 `lib/micropython` 已检出到固定的 MicroPython v1.28.0 提交，在 `build/micropython/` 下导出干净的 MicroPython 构建副本，再将 `overlay/micropython/` 应用到该副本，然后将每个 `boards/<BOARD>/port/` 投射到该副本的 `ports/esp32/boards/<BOARD>/`。`lib/micropython` 始终保持干净。

3.3 常用 idf.py 命令

命令	说明
`idf.py --board <BOARD> build`	为某块开发板构建固件。
`idf.py --board <BOARD> -p <PORT> flash`	构建并烧录固件。
`idf.py --board <BOARD> -p <PORT> monitor`	打开串口监视器。
`idf.py --board <BOARD> menuconfig`	打开 menuconfig。
`idf.py --board <BOARD> -p <PORT> erase-flash`	擦除 flash。
`idf.py --board <BOARD> clean`	清理该板的构建输出。
`idf.py --board <BOARD> fullclean`	删除所选开发板的完整构建目录。

3.4 运行第一个脚本

烧录完成后，通过 REPL 连接并尝试相机功能。每个*API 参考* 模块页面都会链接到对应 API 的可运行 `example/` 脚本。

Chapter 4

基础概念

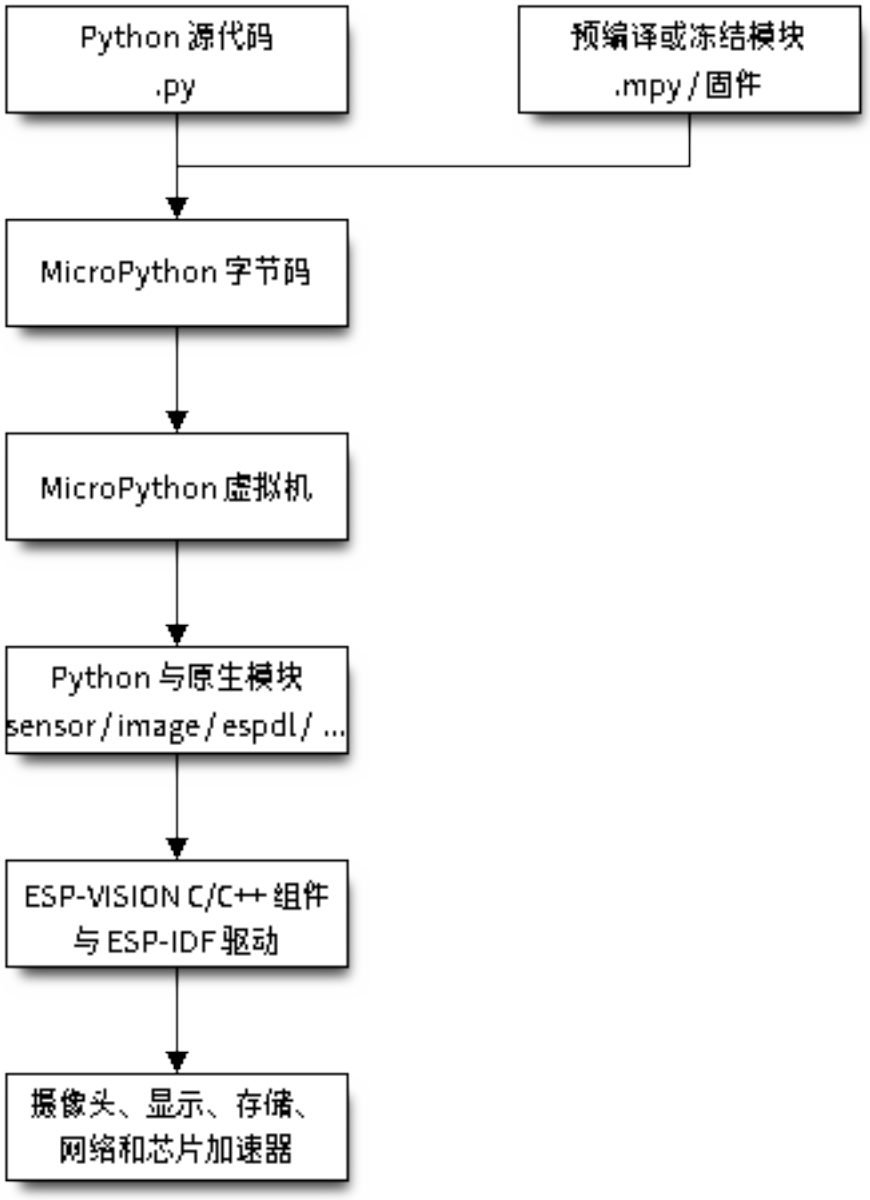
本章解释 ESP-VISION API 背后的原理：图像在内存中的表示方式、各类图像处理算法的工作机制、神经网络推理如何在设备上运行，以及图像帧如何在摄像头与编解码流水线中流转。建议与*API 参考* 对照阅读，理解每个函数“为什么”这样工作。

4.1 MicroPython 语言基础

MicroPython 是面向微控制器直接运行的紧凑型 Python 语言实现。ESP-VISION 使用 MicroPython v1.28.0 作为应用开发语言，同时通过 C/C++ 与 ESP-IDF 组件实现硬件访问和性能关键的视觉处理。本章介绍阅读和编写 ESP-VISION 应用所需的语言模型；完整权威说明仍以 MicroPython v1.28.0 语言与实现参考 为准。

4.1.1 执行模型

上游 MicroPython 以实现 Python 3.4 语法为目标，并选择性支持后续 Python 版本的部分特性。ESP-VISION 以 `EXTRA_FEATURES` 配置级别构建 ESP32 port，并启用设备端编译器、垃圾回收器、MPZ 长整数、单精度浮点、调度器、VFS 和持久字节码加载。源代码仍是动态类型的 Python，但会被编译为紧凑字节码，并由 MicroPython 虚拟机执行。原生模块将 Python 对象连接到 ESP-VISION C/C++ 组件、ESP-IDF 驱动和芯片硬件：



从 `.py` 加载的代码会在设备上编译，并在编译期间占用 RAM。预编译的 `.mpy` 文件和冻结到固件中的模块可以减少运行时编译开销；冻结模块中的不可变常量可以保留在 Flash 中。Python 仍负责应用策略和对象生命周期，而原生组件负责图像帧采集、图像处理、编解码和 AI 推理等操作。

4.1.2 基本语法

ESP-VISION 当前配置使用缩进定义代码块，并支持赋值、表达式、条件、循环、函数、类、异常、上下文管理器、推导式、生成器、导入以及 `async`/`await` 等常用 Python 形式。名称会动态绑定到对象，因此声明时不需要指定 C 风格的存储类型：

```
from micropython import const

_MIN_PIXELS = const(80)
```

(续下页)

(接上页)

```
class Detection:
    def __init__(self, label, score):
        self.label = label
        self.score = score

    def accepted(self, threshold=0.5):
        return self.score >= threshold

def select_results(results):
    selected = []
    for label, score in results:
        item = Detection(label, score)
        if item.accepted():
            selected.append(item)
    return selected

try:
    detections = select_results((("person", 0.91), ("chair", 0.42)))
    for item in detections:
        print(item.label, item.score)
except (ValueError, TypeError) as error:
    print("invalid result:", error)
finally:
    print("processing complete")
```

`const()` 是 MicroPython 扩展，允许编译器直接替换常量值，并可减少字节码和全局字典开销。类型注解有助于开发者和编辑器理解代码，但 MicroPython 不会借此提供 C 风格的静态类型或自动内存布局。

4.1.3 主要数据结构

在微控制器上，可变对象与不可变对象的选择十分重要，因为创建、扩容或拼接对象都会分配堆内存：

类型	可变性	ESP-VISION 使用建议
`None` 与 `bool`	不可变	表示值缺失和状态标志，无需额外定义自有哨兵对象。
`int` 与 `float`	不可变	存储计数、坐标、阈值和分数。重复算术运算可能创建新对象；硬中断上下文中应避免浮点运算。
`str`	不可变	存储文本、路径、标签和 JSON 键。拼接会创建新字符串，因此应避免每帧构造大型字符串。
`bytes`	不可变	存储紧凑的二进制常量、编码数据包以及只读模型或协议数据。
`bytearray`	可变	为外设 I/O 和数据包组装提供可复用二进制缓冲，避免每次操作都分配新对象。
`list`	可变	存储长度变化的有序结果。`append()` 和扩容可能分配内存，因此持续帧循环中的列表应限制大小或重复使用。
`tuple`	不可变	表示矩形和检测结果等固定记录。常量元组通常比反复创建列表更节省内存。
`dict`	可变	表示配置和共享标量状态。新增键可能触发表扩容，应在初始化期间创建预期结构。
`set`	可变	在额外哈希表内存开销合理时，用于成员关系和唯一性检查。
`range`	不可变	描述整数迭代范围，无需构造包含全部数值的列表。
`memoryview` 与 `array`	视图 / 可变	以较少拷贝访问类型化或切片缓冲数据；视图有效期间必须保持底层缓冲存活且不能调整其大小。

对象引用不会自动复制。执行 `b = a` 后，两个名称会引用同一个可变列表、字典、图像或缓冲；仅在确实需要独立数据时才应显式复制。对于由可复用摄像头帧缓冲支持的 *image.Image* 对象，这一点尤其重要。

4.1.4 面向微控制器的设计理念

MicroPython 优先考虑可移植性、交互式开发、紧凑固件集成和直接硬件访问，而不是完整覆盖 CPython 标准库。垃圾回收堆使动态应用代码可行，但 RAM、Flash、栈空间和内存分配时延仍然有限。MicroPython 受限设备指南 建议减少重复对象创建、预分配缓冲、将常量和可复用模块放入冻结字节码，并使用 `gc.mem_free()` 与 `gc.mem_alloc()` 监控堆。

ESP-VISION 应用应在进入帧循环前初始化模块、模型、缓冲和结构稳定的字典。重复使用 `bytearray` 与图像缓冲，限制每帧临时数据量；除非已经复制，否则不要在下一次 `sensor.snapshot()` 后继续持有摄像头帧缓冲支持的图像。Python 适合表达编排与产品行为；确定性实时工作、ISR 处理、大批量像素处理、编解码和推理内核应保留在原生组件中。

4.1.5 MicroPython 与 CPython

本文档在进行运行时对比时，“Python” 指通常运行于 PC 和服务器的参考实现 CPython 3.x。MicroPython 的具体功能集取决于固件配置，因此下表描述的是 ESP-VISION 当前配置的 MicroPython v1.28.0：所有维护中的开发板 manifest 都会冻结 `asyncio`，ESP32 port 启用了带 GIL 的 `_thread`，硬件 API 则仍受芯片和开发板配置约束。

对比项	ESP-VISION MicroPython	CPython
主要运行环境	运行于 MCU 固件内部，可直接访问外设与板级服务。	作为操作系统进程运行于 PC、服务器和较大型嵌入式系统。
语言语法	实现 Python 3.4 语法并选择性支持后续特性；常用控制流、函数、类、异常、生成器和异步语法均可使用。	跟随当前 Python 语言规范，通常最先引入新语法。
类型系统	动态类型；类型注解不会使执行过程变为静态类型。	动态类型；类型注解主要由工具和可选库使用。
标准库	提供构建固件时选择的资源导向子集，并增加 `machine`、`micropython`、`esp` 和 `esp32` 等硬件与运行时模块。	为安装的版本提供完整 CPython 标准库，但不包含标准 MCU 外设 API。
软件包部署	模块可复制到存储、预编译为 `.mpy` 或冻结到固件中；不能假定支持桌面 `pip` 和任意二进制 wheel。	通常使用 `pip`、虚拟环境、源码发行包和平台 wheel。
内存模型	使用与固件资源共享的小型垃圾回收堆，必须显式考虑分配失败和碎片化。	使用容量大得多的进程堆，并采用引用计数和循环垃圾回收。
并发	提供固件内冻结的 `asyncio`、已启用且带 GIL 的 `_thread`，以及经过调度的 GPIO IRQ 与 Timer 回调；外设可用性仍取决于所选芯片和开发板。	提供 `asyncio`、线程、进程和丰富的操作系统同步机制。
性能路径	高负载操作调用原生 C/C++ 模块和硬件加速器；Python 更适合用于编排。	可使用优化扩展模块、带 JIT 的其他运行时或多进程，但通常拥有更多 CPU 与内存资源。
兼容性细节	为减少代码体积和 RAM 使用，部分内置行为、异常文本、反射能力、模块内容和边界情况存在差异。	定义 MicroPython 差异文档所对照的参考行为。
可移植性	使用受支持子集的纯 Python 代码通常可以移植；硬件模块和资源假设与设备相关。	依赖可用时，纯 Python 代码通常可在受支持操作系统间移植。

不能只根据语法判断可移植性，还应检查导入模块、内存使用、文件系统路径、并发假设和硬件访问。上游 MicroPython 与 CPython 差异 记录了已知行为差异，*MicroPython API* 则说明 ESP-VISION 可用的沿用 API 与并发模型。

4.2 软件包与部署

MicroPython 以模块和软件包组织可复用代码，但嵌入式产品还需要确定代码的存储位置和更新方式。本章基于 ESP-VISION 当前固定使用的 MicroPython v1.28.0 介绍软件包管理与部署；完整的通用行为请参考上游 软件包管理 和 manifest 文档。

4.2.1 模块与软件包结构

模块通常是 `.py` 源文件或预编译的 `.mpy` 文件。软件包是包含 `__init__.py` 文件以及一个或多个模块或子包的目录，因此可复用的视觉流水线可以采用以下结构：

```
my_vision/
    __init__.py
    pipeline.py
    transport.py
```

应用程序使用标准 Python 语法导入软件包成员：

```
from my_vision.pipeline import VisionPipeline

pipeline = VisionPipeline()
```

4.2.2 当前固件的软件包管理

MicroPython 使用 `mip` 而不是 CPython 的 `pip`，可从 micropython-lib、软件包索引、URL 或本地 `package.json` 描述中安装软件包。ESP-VISION 默认 manifest 当前没有嵌入设备端 `mip` 模块，因此标准固件不支持 `import mip`；请在开发主机上使用 `mpremote` 将软件包安装到设备文件系统：

重要： ESP-VISION 默认固件不支持设备端 `mip`。在设备上执行 `import mip` 或 `mip.install()` 会引发 `ImportError`。主机端 `mpremote mip` 命令仍然可用，并且是默认的软件包安装方式。

```
mpremote connect <PORT> mip install --target=/lib <PACKAGE>
mpremote connect <PORT> mip install --target=/lib <PACKAGE>@<VERSION>
mpremote connect <PORT> mip install --target=/lib ./package.json
```

`package.json` 用于描述 `mip` 在运行时或设备预配置阶段安装的文件和依赖项。它不是固件 manifest，也不决定哪些模块会被编译进 ESP-VISION。由于 MicroPython 软件包可能依赖固件功能或特定架构的 `.mpy` 文件，因此必须确认其兼容 MicroPython v1.28.0 和所选芯片架构。

在设备端使用 `mip.install()` 安装软件包，需要客制化固件显式加入 `mip` 以及所需的网络和 TLS 支持。默认推荐通过主机端 `mpremote` 安装，因为这种方式不会增大产品固件，也不要求设备通过网络下载代码。

4.2.3 文件系统中的软件包

ESP-VISION 将内部 Flash 文件系统挂载到 `/`，并将 `/lib` 加入 `sys.path`。可复用软件包应安装到 `/lib`；此后应用程序无需修改代码，即可导入当前目录中的模块、冻结模块和 `/lib` 下的软件包。

启用 SD 卡后，SD 卡挂载到 `/sdcard`，但其软件包目录不会自动加入 `sys.path`。导入其中的软件包前需要显式添加路径：

```
import sys

sys.path.append("/sdcard/lib")
from my_vision.pipeline import VisionPipeline
```

`.py` 源文件在导入时编译，会占用 RAM 保存字节码并增加导入延迟。预编译的 `.mpy` 文件无需在设备上编译并可减少源代码暴露，但加载后的字节码仍会占用 RAM，而且必须匹配 MicroPython 版本和架构。

4.2.4 嵌入固件的软件包

固件 manifest 用于选择需要编译并冻结到固件镜像中的 Python 模块和软件包。ESP-VISION 将开发板 manifest 保存在 `boards/<BOARD>/manifest.py`，当前通过这些文件冻结端口模块、ESP-VISION 初始化模块、`asyncio` 以及特定开发板需要的功能。

例如，将 `my_vision/__init__.py` 及其模块放在 `boards/<BOARD>/packages` 下，然后在该开发板的 manifest 中加入软件包：

```
package(
    "my_vision",
    base_path="$(ESP_VISION_ROOT)/boards/<BOARD>/packages",
)
```

底层 `freeze()` 函数也可以冻结一个目录或指定模块，`include()` 和 `require()` 则用于复用已配置 manifest 库中的 manifest 片段和软件包。修改 manifest 后，需要重新配置并构建所选开发板：

```
idf.py --board <BOARD> reconfigure
idf.py --board <BOARD> build
idf.py --board <BOARD> flash
```

4.2.5 选择部署方式

可以根据软件包的预期更新频率及其是否属于产品固定依赖来选择部署方式：

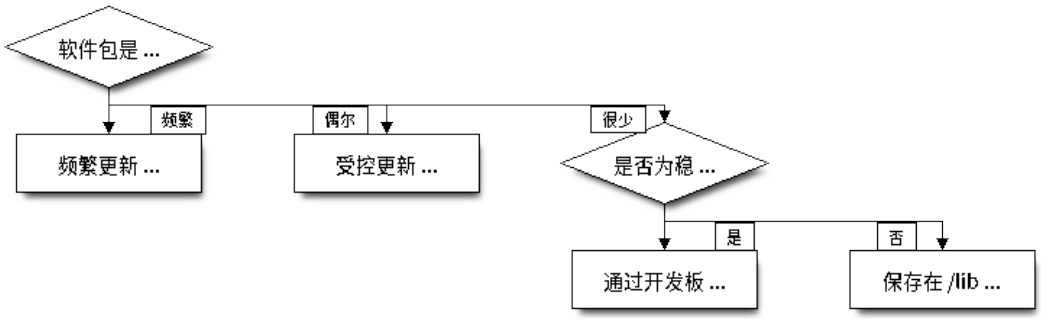


图 1: 软件包部署决策

表 1: 部署方式对比

属性	/lib 下的 .py	/lib 下的 .mpy	冻结到固件
存储位置	可写文件系统	可写文件系统	固件 Flash 镜像
导入行为	导入时编译	无需编译源文件即可加载	直接执行冻结字节码
运行时 RAM	字节码和对象占用 RAM	字节码和对象占用 RAM	冻结字节码和常量可保留在 Flash
更新方式	替换文件或使用 mpremote mip	替换兼容的 .mpy 文件	重新构建并烧录固件
主要用途	开发及频繁更新的应用代码	导入开销较低且可替换的模块	稳定的产品依赖和启动模块

4.2.6 导入优先级与版本管理

当前固件依次搜索当前目录、通过 .frozen 提供的冻结模块，然后搜索 /lib。因此，同名的文件系统软件包在正常导入时不能覆盖冻结软件包；需要从 manifest 中移除冻结软件包并重新构建固件，或使用不同的软件包名称。

应将开发板 manifest 和冻结软件包版本纳入源码管理，以确保固件构建可复现。package.json 用于描述 mip 安装的文件和依赖项，manifest.py 用于定义固件构建时嵌入的模块；两者服务于不同的部署阶段，不能相互替代。

对于 ESP-VISION 产品，建议冻结稳定的框架扩展和启动依赖，将产品脚本、配置及需要现场更新的模块保存在 /lib。大型 AI 模型、图像和视频资源通常应作为数据文件保存在 Flash、SD 卡或外部存储中，而不是作为 Python 软件包数据嵌入固件，以便更新并由适合的运行时组件进行映射。

4.3 图像模型

ESP-VISION 中的每一个视觉操作都在读写一个*image.Image*：一个由像素组成的矩形网格，外加描述其宽、高与像素格式的小头部。理解像素的排布方式、算法使用的色彩空间，以及底层内存的管理方式，是写出高效且正确脚本的关键。

4.3.1 像素格式

像素格式决定每个像素占用多少字节，以及其数值如何被解释。

格式	字节/像素	说明
BINARY	1 bit	黑/白。用于掩膜以及*image.Image.binary()* 的输出。
GRAYSCALE	1	8 位灰度（0-255）。多数滤波与检测算法优先使用的格式。
RGB565	2	16 位彩色：红 5 位、绿 6 位、蓝 5 位。
BAYER	1	来自传感器的原始单通道马赛克，按需去马赛克。
YUV422	2	亮度/色度打包，常见于摄像头与编解码流水线。
JPEG / PNG	不定	由*image.Image.to_jpeg()* / to_png 生成的压缩字节流。

RGB565 把一个颜色打包进 16 位，以色彩精度换取相较 RGB888 一半的内存。绿色多分到一位，因为人眼对绿色最敏感。*image.Image.get_pixel()* 既可返回打包值，也可返回展开为每通道 8 位的 (r, g, b) 元组。

4.3.2 色彩空间

尽管像素以灰度或 RGB565 存储，颜色阈值化却在 **LAB** 色彩空间中进行。LAB 把亮度（L）与两条颜色对立轴（A：绿-红，B：蓝-黄）分开，因此用 LAB 表示的阈值对亮度变化远比 RGB 鲁棒。这也是为什么颜色阈值是六元组 `(l_min, l_max, a_min, a_max, b_min, b_max)`，而灰度阈值只是 `(min, max)`。

模块级转换辅助函数（*image.rgb_to_lab()*、*image.lab_to_rgb()*、*image.rgb_to_grayscale()* 以及其余 `*_to_*` 系列）对单个像素暴露这些转换，便于离线计算阈值。

4.3.3 帧缓冲与 `fb_alloc`

嵌入式内存十分有限，因此 ESP-VISION 避免逐帧在堆上分配。*sensor.snapshot()* 返回的图像由一块可复用的 **帧缓冲** 支撑：下一次 `snapshot()` 会覆盖它。如果需要保留某一帧（例如在*image.Image.difference()* 中与后续帧比较），请显式调用 `img.copy()`。

许多算法需要只在调用期间存在的临时内存。它们使用一个栈式分配器 `fb_alloc`，从帧缓冲区域中划出临时缓冲，并在操作返回时一次性释放。这就是重负载方法不会造成堆碎片的原因，也是在热循环中应优先复用同一图像而非反复分配的原因。

4.3.4 感兴趣区域（ROI）

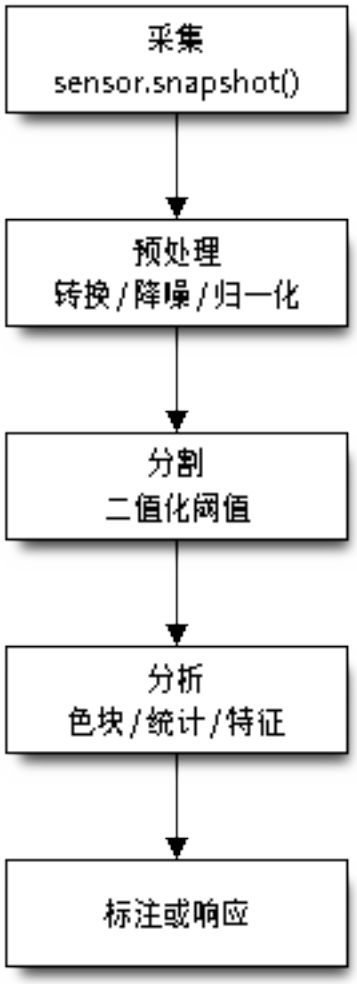
多数分析与转换方法接受 `roi=(x, y, w, h)` 关键字，把操作限制在图像的某个子矩形内。在 ROI 上工作既更快（像素更少）又更有针对性（忽略无关区域）。ROI 始终以源图像的像素坐标表示。

4.4 图像处理

image – 图像处理 模块中的视觉算法来自 OpenMV 的 `imlib` 库，在本仓库中以 `components/imlib` IDF 组件的形式维护。它们大致分为几类：点变换与几何变换、邻域滤波、统计分析，以及特征检测。本页说明每一类的作用与适用场景。

4.4.1 典型处理流水线

多数颜色跟踪或检测脚本都遵循以下处理流程：



预处理可以组合使用*image.Image.to_grayscale()*、*image.Image.gaussian()* 和*image.Image.histeq()*；分割通常使用*image.Image.binary()*；分析阶段再使用*image.Image.find_blobs()*、*image.Image.get_statistics()* 或特征检测器，随后由应用绘制结果或执行相应操作。

4.4.2 阈值化与分割

image.Image.binary() 通过把每个像素与一组颜色阈值比较，把图像转换为掩膜（阈值为何用 LAB 表示见图像模型）。只要像素落入 任一阈值即为 “有效”，因此可同时跟踪多种颜色。配套的*image.Image.find_blobs()* 在相同阈值上运行 8 连通分量标记，为每个连通区域返回一个*image.blob*，包含质心、外接框、像素数、朝向，以及圆度、实心度等形状描述子。

4.4.3 邻域（卷积）滤波

这些方法用像素 `(2*ksize+1)` 方形邻域的某个函数来替换该像素：

- *image.Image.mean()* ——盒式平均；快速模糊。
- *image.Image.gaussian()* ——用帕斯卡三角（二项式）近似高斯核的加权平均；标准降噪模糊。设 `unsharp=True` 则改为锐化。

- *image.Image.laplacian()* ——二阶导数边缘响应；设 `sharpen=True` 可叠加回原图以增强边缘。
- *image.Image.morph()* ——应用任意整数卷积核。`mul` 与 `add` 缩放并偏置结果；`mul` 默认为 `1/sum(kernel)`，以保持图像亮度。

它们都带有 `threshold/offset/invert` 关键字，可在一次遍历中把滤波变成自适应阈值化操作。

4.4.4 秩滤波与保边滤波

秩滤波对邻域排序而非求平均，能在较少模糊边缘的前提下去噪：

- *image.Image.median()* ——取百分位（默认 0.5）值；对椒盐噪声效果极佳。
- *image.Image.mode()* ——取最常见值。
- *image.Image.midpoint()* ——在最小值与最大值之间按 `bias` 混合。
- *image.Image.bilateral()* ——同时按空间距离（`space_sigma`）与颜色相似度（`color_sigma`）加权的高斯模糊，平滑平坦区域的同时保持边缘锐利。

4.4.5 形态学

image.Image.erode() 与*image.Image.dilate()* 用方形结构元收缩或扩张（通常为二值图像的）有效像素；*image.Image.open()* 与*image.Image.close()* 组合二者以去除小噪点或填补小孔。`threshold` 参数控制需要多少个邻居为有效，从而推广了经典二值算子。

4.4.6 直方图与统计

image.Image.get_histogram() 按通道对像素值分箱；返回的*image.histogram* 可计算 Otsu 阈值（*image.histogram.get_threshold()*）、百分位以及完整统计量。*image.Image.get_statistics()* 一次返回均值、中位数、众数、标准差、四分位数与最小/最大值，便于在运行时自动整定阈值。

4.4.7 特征检测

更高层的检测器用于发现几何结构：

- *image.Image.find_lines()* 与*image.Image.find_circles()* 使用霍夫变换；其 `threshold` 是最小累加器分数，`*_margin` 关键字用于合并近似重复的结果。
- *image.Image.find_rects()* 定位四边形（适用于基准标记与屏幕）。
- *image.Image.find_qrcodes()* 与*image.Image.find_apriltags()* 检测并解码相应的标记类型；在提供相机内参时，AprilTag 还能返回 6 自由度位姿。

当前 ESP32-P4 板级配置还通过 ZXing-C++ 后端提供*image.Image.find_barcodes()*。

备注： 本构建禁用了 OpenMV 中受 GPL 许可的代码路径（`OMV_NO_GPL=1`），因此少量上游算法被有意排除。每块板子的 `imlib_config.h` 决定编译哪些可选算法；未启用的方法会在调用时抛出异常。

4.5 AI 推理

ESP-VISION 通过*espdl –模型推理* 和*tflite –模型推理* 提供端侧神经网络执行能力：前者使用 ESP-DL，后者通过 TensorFlow Lite Micro 运行 TensorFlow Lite `.tflite` 模型。可用 API 覆盖从面向任务的辅助接口到通用模型执行；模型相关的预处理或后处理可以放在模块绑定、辅助代码或 Python 脚本中，取决于具体模型族。

4.5.1 模型运行时

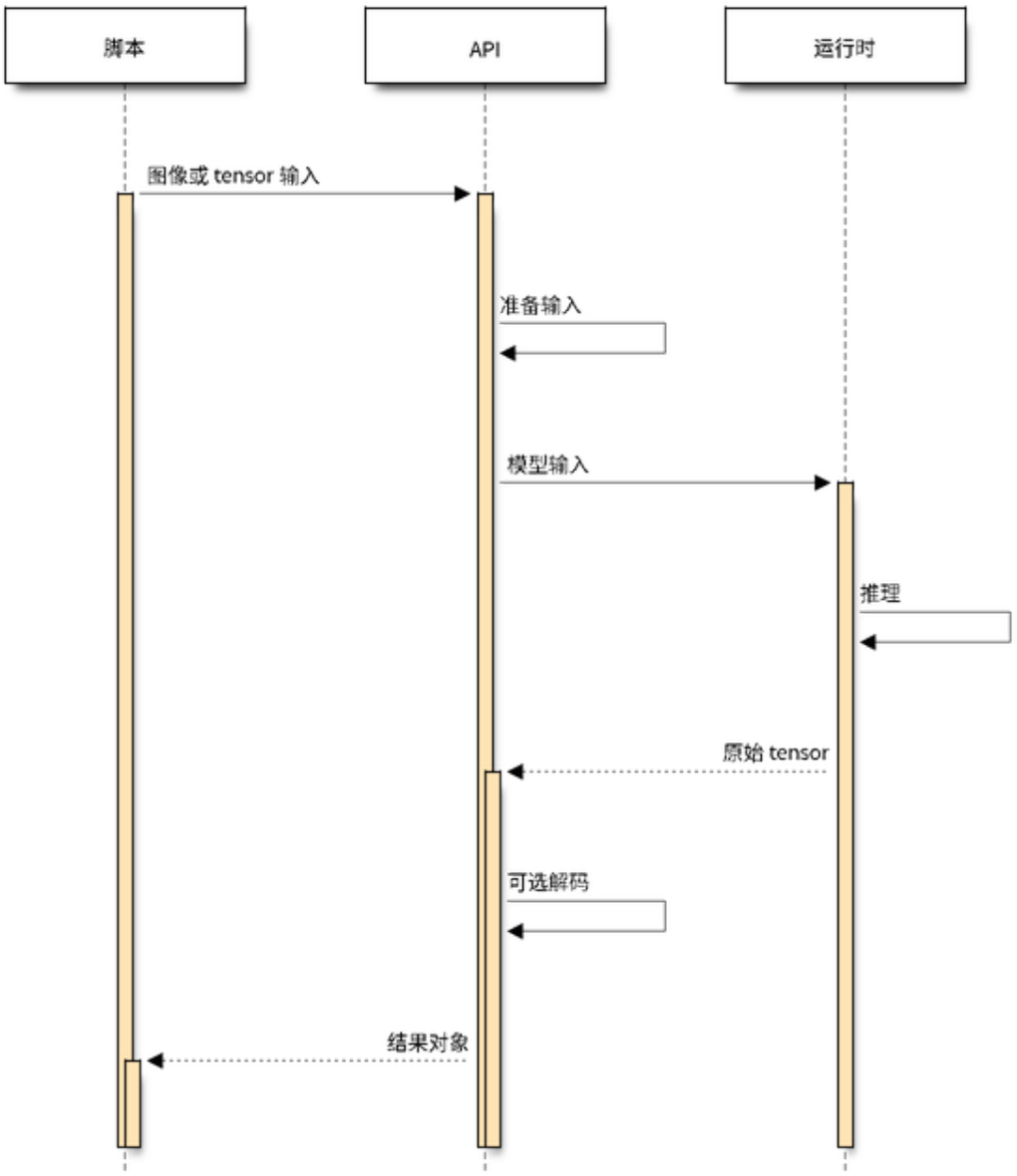
ESP-DL 和 TFLite Micro 是 ESP-VISION 当前暴露的两条模型运行路径。`espdl` 模块使用 `.espdl` 文件，`tflite.Model` 使用 `.tflite` 文件。模型文件可放在 `/sdcard` 或 `/flash` 等板级存储中，并在运行时加载。具体 API 形态、量化元数据、输入输出解释由所选运行时和模型共同定义。

4.5.2 模型文件与量化

模型通常在 PC 端从训练框架导出或转换后，再拷贝到板级存储。对于微控制器，量化模型通常更合适，因为它能降低模型体积、激活内存和计算开销。量化会用 scale 与 zero point 等元数据把浮点 tensor 范围映射到整数值；具体元数据和文件布局取决于运行时及转换工具链。

4.5.3 推理流程

一次推理调用通常组合若干阶段：准备输入数据、运行量化网络，再把原始输出解码成应用可用的结果：



4.5.4 预处理

推理前，输入数据必须与模型训练时一致：

- **形状**必须匹配模型输入 tensor，图像模型还包括分辨率和通道数。
- **颜色**顺序与像素格式必须匹配训练流程。
- **归一化或量化**必须使用模型期望的 scale、zero point、mean、standard deviation 或其他变换。部分 API 会把这些暴露为参数，示例也可能直接在 Python 中展示。

4.5.5 后处理

网络原始输出通常需要按任务解码后，才能被应用直接使用：

- **目标检测**（*espdl.ESPDet*、*espdl.YOLO11*）产生带类别分数的候选框。置信度 `score` 阈值剔除弱框，**非极大值抑制**（`nms`）去除重叠重复，最终得到 `(x, y, w, h, score, category)` 元组。`YOLO11` 还用 `topk` 限制数量。
- **姿态估计**（*espdl.YOLO11nPose*）为每个检测附加 17 个 COCO 关键点。
- **分类**（*espdl.ImageNetCls*）应用可选的 `softmax`，返回 `topk` 个 `(label, score)` 对。
- **原始输出解码**（*espdl.Model*、*tflite.Model*）暴露任务解码前的模型输出。应用代码需要解包 tensor dtype，使用量化元数据，并执行 anchor 解码、sigmoid 或 softmax、NMS、top-k 选择以及坐标映射等模型相关步骤。

阈值和结果数量通常可以在运行时调整而无需重新加载模型，便于适应光照、距离或场景密度变化。

4.5.6 内存与性能

模型及其激活缓冲较大，分配在 PSRAM 中。请加载一次模型并跨帧复用，而不要逐帧重建。用完后调用 `deinit()`（或释放最后一个引用）以释放模型。推理开销通常随输入分辨率和模型规模增长，因此较小模型一般比全尺寸网络帧率更高。

4.6 摄像头流水线

sensor.snapshot() 看起来只是一次调用，但其背后是一条与硬件相关的采集流水线，把光子变成*image.Image*。了解这些阶段有助于理解配置调用（`set_pixformat`、`set_framesize`、`skip_frames`）以及各开发板的性能特征。

4.6.1 从传感器到图像

取流前，传感器控制总线会应用开发板默认配置以及请求的图像格式。双缓冲允许处理当前帧的同时填充下一帧。ESP32-P4 使用硬件 PPA 完成缩放和色彩转换，ESP32-S3 则由软件完成转换。配置后调用 `sensor.skip_frames(time=2000)`，可为自动曝光和自动白平衡预留收敛时间。

4.6.2 各开发板后端

摄像头后端在构建时按板选择：

开发板系列	后端	说明
ESP32-P4	`esp_video` / V4L2 + PPA	MIPI-CSI 传感器；硬件加速的缩放与色彩转换。
ESP32-S3	`esp32-camera`	DVP 传感器；软件转换，建议使用较小分辨率。

由于公开的 `sensor` API 在各板上完全一致，同一脚本可在两者上运行；区别仅在于可达到的分辨率与帧率。

4.6.3 分辨率

`set_framesize` 接受来自共享分辨率表的命名尺寸（`QQVGA`、`QVGA`、`VGA` 等）。较小的帧在每个阶段都更省内存、更省处理时间，因此当模型或算法只需小输入时，应直接采集小帧，而不是采集大帧再缩小。

4.7 编解码与推流

拿到图像帧后，常常需要把它 *送出开发板*：在主机上预览、录制，或实时推流。ESP-VISION 提供多种编解码与传输方式，各自适用于不同场景。

4.7.1 静态图像编码：JPEG 与 PNG

`image.Image.to_jpeg()`（及其别名*`image.Image.compress()`*）把一帧编码为 JPEG。JPEG 有损：`quality` 关键字（1-100）在大小与画质之间权衡，`subsampling` 控制色度被压缩的程度（`JPEG_SUBSAMPLING_420` 最小，`444` 画质最好）。带硬件 JPEG 编码器的板会进行硬件卸载，否则使用软件编码器（`esp_new_jpeg`）。*`image.Image.to_png()`* 产生无损 PNG，体积更大但精确，适合保存参考帧。

4.7.2 录制序列：ImageIO

`imageio.ImageIO` 录制一 *序列帧*并保留帧间时间，从而以原始速度回放。**文件流**在存储上写容器文件；**内存流**把帧保存在预分配的 PSRAM 缓冲中，以便快速采集与回放。详见*image.ImageIO –图像流*。

4.7.3 视频编码：H.264

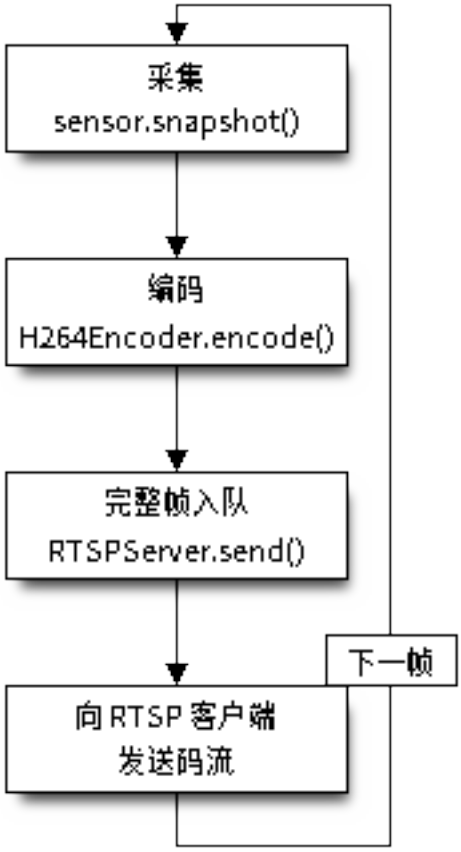
对于连续视频，逐帧 JPEG 很浪费，因为它无法利用相邻帧之间的相似性。*`h264.H264Encoder`* 产生 H.264 流，其中偶发的 **关键帧**（IDR/I）是自包含的，而其间的帧只编码发生变化的部分。编码器参数用于调节这一权衡：

- `gop` ——关键帧间隔。越短则恢复越快、越易跳转，但输出越大；`0` 表示每秒一个关键帧。
- `bitrate` ——目标每秒比特数；大小/画质的主要控制项。
- `qp_min` / `qp_max` ——限定每帧量化参数的范围。

丢失一个 P 帧会导致画面损坏，直到下一个关键帧为止，这对下面的推流传输很重要。

4.7.4 网络推流：RTSP

`rtsp.RTSPServer` 通过 RTSP 发送编码后的 H.264 帧，使 VLC、ffplay 等客户端能在 `rtsp://<board-ip>:8554/` 观看摄像头画面。应将每个*`h264.H264Encoder.encode()`* 的结果交给*`rtsp.RTSPServer.send()`*。



服务器维护一个短小且有序的帧队列；若客户端缓慢或缺席，它会整帧丢弃，而不是阻塞采集循环或发送会破坏码流的半帧。

4.7.5 主机预览：USB CDC

在开发期间，看到摄像头画面最快的方式是*image.Image.flush()*，它通过 USB CDC 把当前帧作为 EVFRAME JPEG 预览推送到主机，由配套的主机工具解码并显示。该通路无需 Wi-Fi、无需 SD 卡，是脚本迭代时默认的反馈回路。

4.8 启动流程

ESP-VISION 沿用 MicroPython 的复位与启动模型，并增加 Flash 文件系统、板级存储、摄像头、显示和预览服务的初始化。本章说明当前固件实际实现的启动顺序。关于上游模型和通用行为，请参阅 MicroPython v1.28.0 复位与启动流程。

4.8.1 硬复位与软复位

硬复位会先重启 MCU 和 ESP-IDF 运行时，再创建新的 MicroPython 环境。上电、开发板复位按键、`machine.reset()`、看门狗或欠压复位以及从深度睡眠唤醒都会触发硬复位。应用需要区分复位来源时，可以使用 `machine.reset_cause()`。

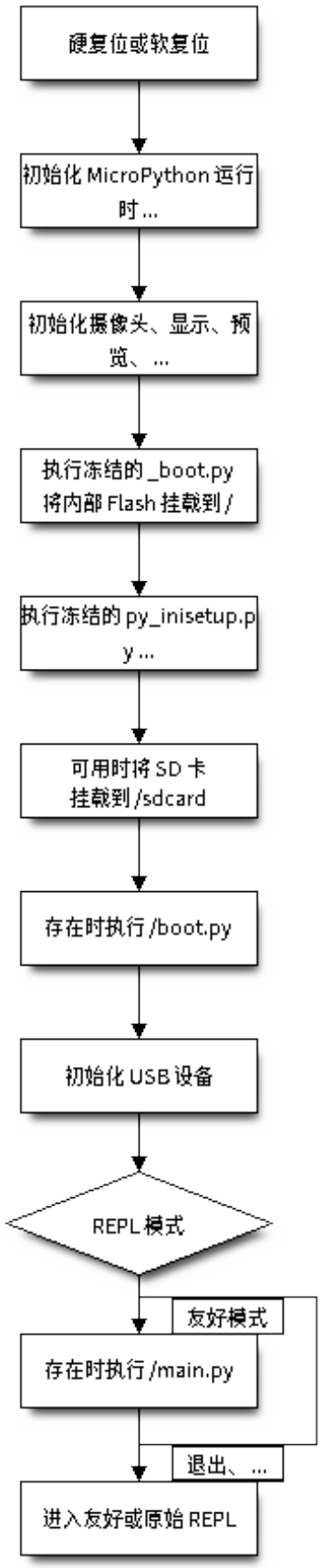
软复位在不重启完整 MCU 运行时的情况下重新启动 MicroPython 环境，可通过友好 REPL 中的 `Ctrl-D` 或 `machine.soft_reset()` 触发。ESP-VISION 会清除 Python 对象和模块，通过 MicroPython 清理过

程关闭文件和 socket，释放摄像头、显示、预览、USB、PWM、定时器、UART、线程及其他托管资源，然后重新执行 Python 启动流程。

部分系统状态可能在软复位后保留，包括 RTC、CPU 时钟配置，以及 IP 层仍处于活动状态的网络接口。应用代码不能假定表示这些资源的 Python 对象仍然存在；每次复位后都应重新创建对象并检查其状态。

4.8.2 ESP-VISION 启动顺序

硬复位或软复位后，ESP-VISION 执行以下启动流程：


硬复位或软复位
初始化 MicroPython 运行时 ...
初始化摄像头、显示、预览、 ...
执行冻结的 _boot.py 将内部 Flash 挂载到 /
执行冻结的 py_inisetup.py ...
可用时将 SD 卡挂载到 /sdcard
存在时执行 /boot.py
初始化 USB 设备
REPL 模式
友好模式
存在时执行 /main.py
退出、 ...
进入友好或原始 REPL

主机自动化工具使用的原始 REPL 可以在软复位时跳过 `main.py`，从而使开发工具无需自动启动产品应用即可取得设备控制权。

4.8.3 首次启动与 Flash 文件系统

冻结的 `_boot.py` 仅尝试挂载内部 Flash 文件系统，ESP-VISION 专用初始化由 `py_inisetup.py` 完成。如果 Flash 引导扇区为空，该脚本会格式化配置的 `vfs` 或 `ffat` 分区，并将其挂载到 `/`。随后在对应文件不存在时创建 `/boot.py`、`/main.py`、`/README.txt` 和 `/.esp_vision_disk` 标记文件。

如果挂载文件系统或写入默认文件失败，`py_inisetup.py` 会尝试通过格式化文件系统并重新创建默认文件进行修复。格式化会清除该文件系统中的文件，因此必须在文件系统恢复后保留的产品数据应存放在独立分区、SD 卡或设备外部。

正常固件升级或软复位不会覆盖已有启动文件。开发板包可以通过 `boards/<BOARD>/board_inisetup.py` 提供板级默认 `main.py` 和 `README.txt` 内容。

4.8.4 使用 boot.py

`boot.py` 适合执行必须在应用启动前完成、耗时短且结果确定的初始化，例如选择产品模式、准备配置或启动必需的网络接口：

```
import network

wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
wlan.active(True)
```

`boot.py` 必须返回，不应包含应用的永久循环。ESP-VISION 仅在 `boot.py` 完成后初始化 MicroPython USB 设备，因此阻塞或长时间运行的 `boot.py` 可能导致 USB REPL 和主机工具无法使用。

4.8.5 使用 main.py

`main.py` 应作为产品应用入口。建议将具体实现放在独立模块中，使启动策略与应用逻辑彼此独立：

```
import sys
import my_app

try:
    my_app.main()
except KeyboardInterrupt:
    raise
except Exception as error:
    print("Fatal application error:")
    sys.print_exception(error)
```

允许 `KeyboardInterrupt` 继续抛出，可以使用 `Ctrl-C` 停止应用并进入友好 REPL。产品应用需要自动恢复时，也可以记录异常后调用 `machine.reset()`，但无条件复位循环会增加开发和故障诊断难度。

ESP-VISION 默认 `main.py` 会输出开发板就绪信息并在循环中休眠，使 VSCode 扩展和其他主机工具能够取得控制权。可按 `Ctrl-C` 中断该脚本并进入 REPL，或使用产品入口替换 `/main.py`。

4.8.6 REPL 与故障恢复

`main.py` 正常退出或抛出未捕获异常后，控制权会转交给友好 REPL。`Ctrl-C` 会向正在运行的 Python 脚本注入 `KeyboardInterrupt`，在友好 REPL 中按 `Ctrl-D` 则会启动软复位。

如果应用导致设备无法正常启动，可以连接 REPL，使用 `Ctrl-C` 中断应用，然后重命名或删除启动文件：

```
import os

print(os.listdir("/"))
os.rename("/main.py", "/main.disabled.py")
# 使用 Ctrl-D 重新启动，并避免运行之前的 main.py。
```

如果无法恢复 REPL，应在仓库根目录擦除并重新烧录开发板。`erase-flash` 会清除设备的全部 Flash，包括内部文件系统和用户数据：

```
idf.py --board <BOARD> -p <PORT> erase-flash
idf.py --board <BOARD> -p <PORT> flash monitor
```

不执行 `erase-flash` 的重新烧录通常会保留数据文件系统，因此也可能保留存在问题的 `boot.py` 或 `main.py`。

Chapter 5

API 参考

ESP-VISION 提供摄像头采集、图像处理、画面显示、视频编码与传输以及 AI 推理等 Python API。开发者还可以直接使用固件中启用的 MicroPython 标准 API，完成硬件控制、网络通信、文件访问、系统管理及通用应用开发。ESP-VISION 在适用范围内兼容常用的 OpenMV 模块名称，包括 `sensor` 和 `image`，并进一步提供 `display`、`espdl` 和 `tflite` 等模块。

ESP-VISION 模块页面与 `stubs/` 下的类型存根保持同步，存根同样可用于 IDE 补全；其可用性在文档构建时根据 `micropython.cmake` 自动推导。*MicroPython API* 页面索引 ESP-VISION 固件从固定 MicroPython 版本沿用的语言、标准库、硬件、网络、文件系统和运行时 API。

5.1 MicroPython API

ESP-VISION 基于 MicroPython ESP32 port 构建，并直接沿用其语言、标准库、硬件控制、网络、文件系统和运行时 API。这些 API 可以在同一脚本中与 `sensor`、`image`、`display`、`espdl` 及其他 ESP-VISION 模块组合使用；ESP-VISION 不会对其进行二次封装或重命名。

5.1.1 文档基线

ESP-VISION 固定使用 MicroPython v1.28.0。应以 MicroPython v1.28.0 文档 为权威 API 参考，重点参阅 MicroPython 库 和 ESP32 快速参考。MicroPython 面向资源受限设备实现 CPython 功能子集，因此不能将 CPython 文档视为模块内容或行为的精确说明。

5.1.2 语言与内置 API

ESP-VISION 沿用 MicroPython 语言，以及内置类型、函数、异常、迭代协议、上下文管理器、类和异步语法。详细说明请参阅 MicroPython 语言与实现 和 内置功能。

使用异常和上下文管理器可以提高长时间运行的视觉应用的可恢复性，并确保文件能够确定性关闭：

```
try:
    with open("/sdcard/result.txt", "w") as output:
        output.write("capture complete\n")
except OSError as error:
    print("storage error:", error)
```

5.1.3 标准库与微型库

常用的沿用模块包括 `array`、`asyncio`、`binascii`、`cmath`、`collections`、`errno`、`gc`、`gzip`、`hashlib`、`heapq`、`io`、`json`、`marshal`、`math`、`os`、`platform`、`random`、`re`、`select`、`socket`、`struct`、`sys`、`time`、`weakref`、`zlib` 和 `_thread`。ESP-VISION 的开发板 manifest 还会将 MicroPython 的 `asyncio` 软件包冻结到固件中。

各模块的类和函数请参阅 MicroPython 库索引。上游文档中存在的模块仍可能因所选固件配置而被裁减或省略。

5.1.4 JSON 与时间示例

```
import json, time

result = {
    "timestamp_ms": time.ticks_ms(),
    "objects": 3,
    "confidence": 0.91,
}
payload = json.dumps(result)
print(payload)
```

`time.ticks_ms()` 适合测量时间间隔和生成本地运行时间戳；计算两个 tick 值之差时应使用 `time.ticks_diff()`，以正确处理计数回绕。`json` 可用于在存储或网络传输前序列化推理结果。

5.1.5 硬件与 ESP32 API

沿用的 machine 模块提供 MCU 控制和外设类，包括 `Pin`、`Signal`、`ADC`、`ADCBlock`、`PWM`、`I2C`、`SoftI2C`、`SPI`、`SoftSPI`、`UART`、`Timer`、`RTC`、`WDT`、`SDCard`，以及芯片支持时可用的 `DAC`、`I2S` 和 `I2CTarget`。引脚分配和外设冲突取决于开发板，因此将这些 API 与摄像头、显示、存储或编解码硬件组合使用前，应查阅开发板原理图。

沿用的 esp 和 esp32 模块提供 ESP32 port 专用的系统和外设功能。`esp32.PCNT`、`esp32.RMT` 及其他 SoC 专用模块中各个类的可用性取决于所选芯片和 ESP-IDF 版本。

5.1.6 GPIO 与 PWM 示例

```
from machine import Pin, PWM

led = Pin(LED_GPIO, Pin.OUT)
led.value(1)

pwm = PWM(Pin(PWM_GPIO), freq=1000, duty_u16=32768)
pwm.duty_u16(49152)
pwm.deinit()
```

应将 `LED_GPIO` 和 `PWM_GPIO` 替换为所选开发板上的空闲引脚。摄像头、显示、存储、USB 和编解码外设可能已经占用部分 GPIO，因此使用前应检查原理图和板级配置。

5.1.7 网络 API

沿用的 network、socket 和 select 模块提供网络接口管理及 TCP/UDP 通信能力。当前产品开发板配置均启用了 `network.WLAN`，但实际使用仍需要兼容的网络硬件和固件配置。

当前开发板配置关闭了 bluetooth 和 espnow。SSL/TLS、`cryptolib`、WebSocket、WebREPL 和 socket event 支持取决于构建固件使用的 ESP-IDF 版本；维护中的支持摘要见芯片与开发板支持。

5.1.8 连接 Wi-Fi

```
import network, time

wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
wlan.active(True)
wlan.connect("ssid", "password")

for _ in range(100):
    if wlan.isconnected():
        break
    time.sleep_ms(100)

if not wlan.isconnected():
    raise OSError("Wi-Fi connection failed")
print("address:", wlan.ifconfig()[0])
```

Wi-Fi 需要兼容的硬件和开发板配置。产品代码应设置超时、避免打印凭据，并处理重新连接，而不是无限期等待。

5.1.9 文件系统与运行时 API

ESP-VISION 沿用 MicroPython 的虚拟文件系统和流行为，包括 os、io、vfs 和内置 `open()` 函数。当相应分区与硬件可用时，开发板启动代码会挂载 `/flash`、`/sdcard` 等产品存储。

运行时服务继续通过 micropython、gc、`sys`、`time` 和 `_thread` 提供。ESP-VISION 启用了带 GIL 的 MicroPython 线程；除非 API 明确说明支持并发使用，视觉对象和硬件资源仍应作为共享资源处理。

5.1.10 列出存储并检查内存

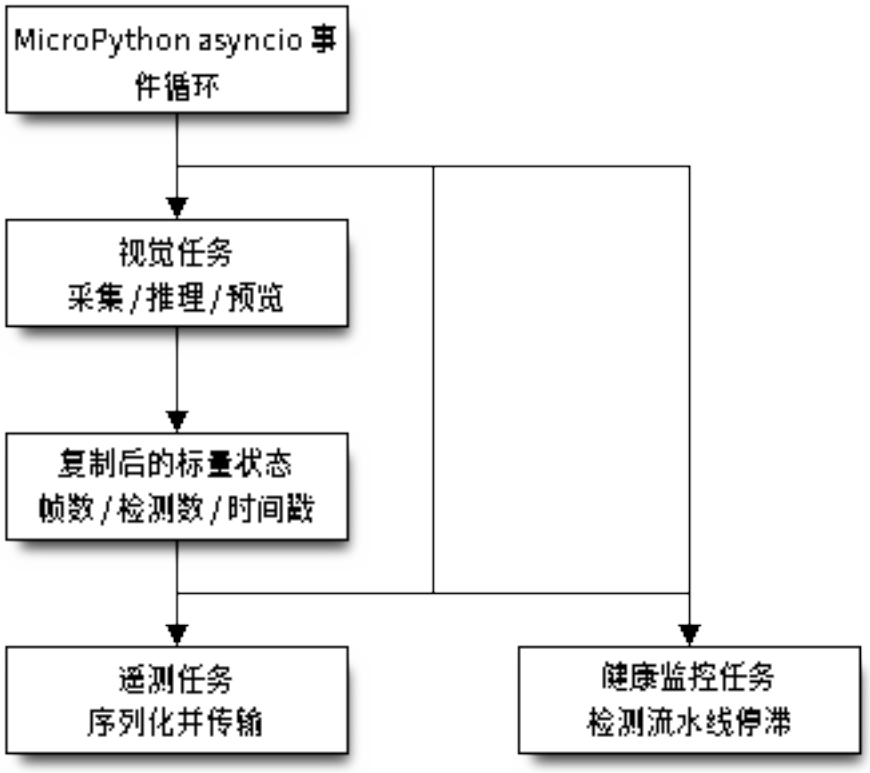
```
import gc, os

print("flash:", os.listdir("/flash"))
if "sdcard" in os.listdir("/"):
    print("sdcard:", os.listdir("/sdcard"))

gc.collect()
print("free heap:", gc.mem_free())
```

使用可选挂载点前应先检查其是否存在。加载大型模型或分配图像历史缓冲区前可以调用 `gc.collect()`，但在每帧循环中反复强制回收可能降低吞吐量。

5.1.11 组织复杂应用

对于熟悉 ESP-IDF 的开发者，`asyncio` task 是协作调度的 Python 协程，而不是 FreeRTOS task。多个协程共享同一个 Python 执行上下文，并且仅在执行 `await` 时切换。控制逻辑、网络 I/O、状态上报和定时工作应优先采用这种结构，因为它可以避免并发访问摄像头、模型、显示和帧缓冲对象。

以下结构由一个协程独占视觉流水线，遥测与健康监控协程只读取复制后的标量结果：




```
import asyncio
import espdl
import json
import sensor
import time

MODEL = "/sdcard/espdet_pico_224_224_face.espdl"

state = {
    "frames": 0,
    "detections": 0,
    "last_frame_ms": time.ticks_ms(),
}
state_lock = asyncio.Lock()

async def vision_task(detector):
    while True:
        img = sensor.snapshot()
        results = detector.detect(img)
        for x, y, w, h, score, category in results:
            img.draw_rectangle(x, y, w, h, color=(255, 0, 0))
        img.flush()

        async with state_lock:
            state["frames"] += 1
            state["detections"] = len(results)
            state["last_frame_ms"] = time.ticks_ms()

        # 每帧结束后允许已就绪的控制与网络任务运行。
```

(续下页)

(接上页)

```
        await asyncio.sleep_ms(0)

async def telemetry_task():
    while True:
        await asyncio.sleep_ms(1000)
        async with state_lock:
            payload = json.dumps({
                "frames": state["frames"],
                "detections": state["detections"],
            })
        print("telemetry:", payload)
        # 实际应用中应替换为非阻塞 socket 传输。

async def health_task():
    while True:
        await asyncio.sleep_ms(500)
        async with state_lock:
            age = time.ticks_diff(
                time.ticks_ms(), state["last_frame_ms"]
            )
        if age > 3000:
            print("warning: vision pipeline stalled")

async def main():
    sensor.reset()
    sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
    sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
    sensor.skip_frames(time=1000)
    detector = espdl.ESPDet(MODEL, score=0.5, nms=0.7)

    vision = asyncio.create_task(vision_task(detector))
    telemetry = asyncio.create_task(telemetry_task())
    health = asyncio.create_task(health_task())
    try:
        await asyncio.gather(vision, telemetry, health)
    finally:
        vision.cancel()
        telemetry.cancel()
        health.cancel()
        detector.deinit()

asyncio.run(main())
```

`sensor.snapshot()`、推理、图像处理和 `img.flush()` 等调用都是同步操作。执行其中任一调用时，其他协程不能运行；显式调用 `await asyncio.sleep_ms(0)` 可在帧与帧之间提供调度点。如果某个网络操作可能阻塞，应使用 `asyncio` stream 或非阻塞 socket，而不是长时间执行阻塞调用。

5.1.12 线程与原生任务

沿用的 `_thread.start_new_thread()` API 会创建另一个 FreeRTOS task，但它作为应用接口并不等同于 `xTaskCreatePinnedToCore()`。Python 在此不提供任务优先级或核亲和性参数；MicroPython 线程固定在 `MP_TASK_COREID` 上，并通过 GIL 共享解释器。可以使用 `_thread.stack_size()` 配置后续创建线程所分配的栈。

仅当某个阻塞操作无法集成到 `asyncio` 时才应使用 `_thread`，使用 `_thread.allocate_lock()` 保护共享 Python 数据；除非 API 明确说明线程安全，否则摄像头、显示、编解码器、模型和帧缓冲应始终由同一个线程持有。IRQ 或其他线程可以通过 `asyncio.ThreadSafeFlag` 通知事件循环，而无需直接操作视觉对象。

如果应用需要确定的时延、明确的 FreeRTOS 优先级或核亲和性、ISR 到任务的通知，或者需要在 Python

持有 GIL 时仍持续执行的工作，应将工作任务实现为 ESP-IDF C/C++ 组件，并向 Python 暴露边界清晰的 API。用 ESP-IDF 的思维理解：应用状态机使用 `asyncio` task，特殊的阻塞集成使用 `_thread`，实时服务使用原生 task。

5.1.13 检查固件中的可用性

标准 MicroPython API 的可用性由 `overlay/micropython/ports/esp32/mpconfigport.h`、所选开发板的 `mpconfigboard.h` 与 `mpconfigboard.cmake`、ESP-IDF 版本条件和 SoC 能力宏共同决定。由于可用性并非只取决于芯片，最终应以实际固件检查结果为准：

```
help("modules")
import machine
help(machine)
```

应用需要跨多块 ESP-VISION 开发板运行时，应使用 `hasattr()` 或受保护的 import。产品固件需要移除或增加沿用 API 时，请按照客制化固件功能 操作。

参见：

仅使用标准 MicroPython API 的可运行示例：`example/00-HelloWorld/helloworld.py`（首个脚本）、`example/06-Peripherals/00-Storage/sdcard.py`（文件系统）与 `example/06-Peripherals/02-WiFi/webrepl.py`（Wi-Fi 与 WebREPL）。

5.2 sensor –摄像头

`sensor` 模块用于控制摄像头并采集图像帧。它的接口与 OpenMV 的 `sensor` 保持一致，因此大多数 OpenMV 脚本无需改动即可移植。

5.2.1 摄像头初始化与连续采集

典型流程是复位传感器、选择像素格式与分辨率、等待自动曝光和自动白平衡稳定，然后连续采集图像：

```
import sensor

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
sensor.skip_frames(time=2000)

while True:
    img = sensor.snapshot()
```

`sensor.reset()` 会应用开发板的默认摄像头配置。`RGB565` 适用于显示、绘图和大多数 AI 工作流，`GRAYSCALE` 则可降低许多检测算法的内存占用和处理开销。`sensor.snapshot()` 返回由可复用帧缓冲承载的*image.Image*，因此需要在下一次采集后继续保持图像内容不变时，应先复制该图像。

5.2.2 图像方向与摄像头状态

摄像头传感器的实际安装方向可能导致画面翻转，可通过水平镜像和垂直翻转进行校正。`status()` 返回当前分辨率、像素格式、传感器 ID、图像方向和裁剪信息，可用于诊断：

```
import sensor

sensor.reset()
```

(续下页)

(接上页)

```
sensor.set_hmirror(True)
sensor.set_vflip(False)

info = sensor.status()
print("sensor id:", info["id"])
print("output:", info["width"], "x", info["height"])
print("ready:", info["ready"])
```

镜像和翻转设置会影响后续采集的图像。产品代码可在初始化后调用 `status()`，确认摄像头已经就绪，并验证协商得到的输出尺寸与处理链路一致。

5.2.3 暂时停止采集

不需要采集时可以停止摄像头流，并在下一次采集前重新启动：

```
sensor.shutdown(True)
# 执行不需要摄像头的任务。
sensor.shutdown(False)
sensor.skip_frames(n=3)
img = sensor.snapshot()
```

重新启动摄像头流后，如果曝光或输入帧队列需要重新稳定，应丢弃少量图像帧。

参见：

摄像头流水线 说明了一帧图像如何从图像传感器到达*image.Image*；图像模型 介绍像素格式与色彩空间。

可运行示例：`example/01-Camera/00-Snapshot`（采集并保存）与 `example/01-Camera/03-MJPEG`（Wi-Fi MJPEG 串流）。

5.2.4 Constants

`sensor.`**`GRAYSCALE`**

Pixel format constants accepted by set_pixformat().

`sensor.`**`RGB565`**

`sensor.`**`QQVGA`**

Frame size constants accepted by set_framesize().

`sensor.`**`QVGA`**

`sensor.`**`VGA`**

5.2.5 Functions

`sensor.`**`reset`**`()`

Reset and initialize the camera with the board default sensor configuration.

`sensor.`**`shutdown`**`(`*enable*`=...)`

Stop or restart the camera stream.

参数

`enable` –True shuts the camera down; False starts it again.

sensor.**set_pixformat**(*pixformat*)

Select the output pixel format.

参数

pixformat –sensor.GRAYSCALE or sensor.RGB565.

sensor.**get_pixformat**()

Return the current pixel format constant.

sensor.**set_framesize**(*framesize*)

Select the output frame size.

参数

framesize –sensor.QQVGA, sensor.QVGA, or sensor.VGA when supported by the board.

sensor.**get_framesize**()

Return the current frame size constant.

sensor.**width**()

Return the current output image width in pixels.

sensor.**height**()

Return the current output image height in pixels.

sensor.**get_id**()

Return the camera sensor ID.

sensor.**set_hmirror**(*enable*)

Mirror the camera image horizontally.

参数

enable –True enables horizontal mirror.

sensor.**get_hmirror**()

Return whether horizontal mirror is enabled.

sensor.**set_vflip**(*enable*)

Flip the camera image vertically.

参数

enable –True enables vertical flip.

sensor.**get_vflip**()

Return whether vertical flip is enabled.

sensor.**skip_frames**(*time=..., n=...*)

Drop frames while camera exposure and processing settle.

参数

time –milliseconds to wait. n: number of frames to skip.

sensor.**snapshot**(*buffer=...*)

Capture one image from the camera.

参数

buffer –reserved for compatibility; pass None in current ESP-VISION builds.

sensor.**status**()

Return camera readiness, size, format, mirror, flip, and crop status.

5.2.6 Classes

class sensor.**SensorStatus**

Dictionary returned by status().

5.3 image –图像处理

`image` 模块提供 `Image` 对象以及基于 OpenMV `imlib` 的视觉算法：绘图、格式转换、滤波、颜色/色块分析，以及特征检测（直线、圆、矩形、二维码、AprilTag）。编解码流类型*`imageio.ImageIO`* 见*image.ImageIO –图像流*。

当前 ESP32-P4 板级配置还会启用 ZXing-C++ 条形码后端和*`image.Image.find_barcodes()`*。

5.3.1 绘图与颜色色块追踪

```
import sensor

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
sensor.skip_frames(time=1000)

img = sensor.snapshot()
img.draw_rectangle(10, 10, 50, 50, color=(255, 0, 0))
thresholds = [(30, 100, 15, 127, 15, 127)]
for blob in img.find_blobs(thresholds, pixels_threshold=80, area_threshold=80):
    img.draw_rectangle(blob.rect(), color=(255, 0, 0), thickness=2)
    img.draw_cross(blob.cx(), blob.cy(), color=(0, 255, 0))
```

RGB565 阈值包含六个 LAB 范围值：`(L_min, L_max, A_min, A_max, B_min, B_max)`。`pixels_threshold` 会过滤匹配像素过少的区域，`area_threshold` 会过滤外接矩形面积过小的区域。色块坐标以源图像像素为单位，可直接传给绘图方法。

5.3.2 滤波与二值分割

```
sensor.set_pixformat(sensor.GRAYSCALE)
img = sensor.snapshot()
img.gaussian(1)
img.binary([(80, 255)])
img.erode(1)
img.dilate(1)
img.flush()
```

`gaussian()` 在阈值处理前抑制高频噪声。`binary()` 将匹配的灰度值转换为有效二值，随后先腐蚀再膨胀可去除孤立像素并恢复主体区域。这些方法会原地修改图像。

5.3.3 二维码识别

```
sensor.set_pixformat(sensor.GRAYSCALE)
img = sensor.snapshot()
for code in img.find_qrcodes():
    img.draw_rectangle(code.rect(), color=255, thickness=2)
    print(code.payload())
```

`find_qrcodes()` 返回二维码的几何信息和解码内容。灰度输入通常可以降低处理开销；如果二维码只会出现在画面的固定区域，还可以指定较小的 ROI。

5.3.4 直线与圆检测

```
img = sensor.snapshot()
for line in img.find_lines(threshold=1400, theta_margin=25, rho_margin=25):
    img.draw_line(line.line(), color=255, thickness=2)

for circle in img.find_circles(threshold=2500, r_min=8, r_max=80, r_step=4):
    img.draw_circle(circle.x(), circle.y(), circle.r(), color=255, thickness=2)
```

检测阈值用于控制所需的累加器强度，提高阈值可减少较弱的检测结果。限制半径范围、ROI 或图像分辨率可以降低计算量，并通常能够提升稳定性。

5.3.5 编码并保存图像

```
import image

img = sensor.snapshot()
jpg = img.to_jpeg(quality=85, subsampling=image.JPEG_SUBSAMPLING_420)
jpg.save("/sdcard/snapshot.jpg")
print("encoded bytes:", jpg.size())
```

JPEG quality 用于权衡编码体积与图像细节，4:2:0 色度抽样通常可以得到更小的彩色图像。保存图像前，目标文件系统必须已经挂载且可写。

大多数原地操作的方法会返回图像本身，因此可以链式调用：`img.to_grayscale().gaussian(1).binary([(128, 255)])`。

参见：

关于这些方法背后的原理，参见图像模型（像素格式、色彩空间、帧缓冲）与图像处理（滤波、阈值化、特征检测）。

可运行示例：`example/02-Image-Processing`（绘图、滤波、颜色追踪、帧差分）、`example/04-Barcodes`（二维码）与 `example/05-Feature-Detection`（AprilTag、直线、圆）。

5.3.6 Constants

`image.`**`BINARY`**

1-bpp black-and-white pixel format (one bit per pixel).

`image.`**`GRAYSCALE`**

8-bit grayscale pixel format.

`image.`**`RGB565`**

16-bit RGB565 color pixel format.

`image.`**`BAYER`**

Raw Bayer mosaic pixel format from the sensor.

`image.`**`YUV422`**

Packed YUV422 pixel format.

`image.`**`JPEG`**

JPEG-compressed image format.

`image.`**`PNG`**

PNG-compressed image format.

`image.`**`PALETTE_RAINBOW`**

False-color rainbow palette (cold to hot).

image.**PALETTE_IRONBOW**
: “Ironbow” thermal palette.

image.**PALETTE_DEPTH**
: Depth-map palette.

image.**PALETTE_EVT_DARK**
: Event-camera dark palette.

image.**PALETTE_EVT_LIGHT**
: Event-camera light palette.

image.**AREA**
: Scaling/geometry hint flags for copy()/crop()/scale()/draw_image(): area-average downscaling.

image.**BILINEAR**
: Bilinear interpolation hint.

image.**BICUBIC**
: Bicubic interpolation hint.

image.**HMIRROR**
: Mirror horizontally.

image.**VFLIP**
: Flip vertically.

image.**TRANSPOSE**
: Swap X and Y (transpose).

image.**CENTER**
: Center the source in the destination.

image.**EXTRACT_RGB_CHANNEL_FIRST**
: Extract the RGB channel before applying the color palette.

image.**APPLY_COLOR_PALETTE_FIRST**
: Apply the color palette before other steps.

image.**SCALE_ASPECT_KEEP**
: Keep aspect ratio, fitting inside the destination.

image.**SCALE_ASPECT_EXPAND**
: Keep aspect ratio, expanding to fill the destination.

image.**SCALE_ASPECT_IGNORE**
: Ignore aspect ratio, stretching to the destination.

image.**BLACK_BACKGROUND**
: Treat the background as black (needed for correct alpha blending).

image.**ROTATE_90**
: Rotate 90 degrees.

image.**ROTATE_180**
: Rotate 180 degrees.

image.**ROTATE_270**
: Rotate 270 degrees.

image.**JPEG_SUBSAMPLING_AUTO**
: Let the JPEG encoder pick chroma subsampling automatically.

image.**JPEG_SUBSAMPLING_444**
: 4:4:4 JPEG chroma subsampling (best quality).

image.**JPEG_SUBSAMPLING_422**
: 4:2:2 JPEG chroma subsampling.

image.**JPEG_SUBSAMPLING_420**
: 4:2:0 JPEG chroma subsampling (smallest size).

image.**SEARCH_EX**
: Exhaustive template-search strategy.

image.**SEARCH_DS**
: Diamond-search (faster, approximate) template-search strategy.

image.**EDGE_CANNY**
: Canny edge-detection method for find_edges().

image.**EDGE_SIMPLE**
: Simple gradient-threshold edge-detection method for find_edges().

image.**CORNER_FAST**
: FAST corner detector for find_keypoints().

image.**CORNER_AGAST**
: AGAST corner detector for find_keypoints().

image.**EAN2**
: Barcode symbology constants returned by barcode.type() / accepted by find_barcodes().

image.**EAN5**

image.**EAN8**

image.**UPCE**

image.**ISBN10**

image.**UPCA**

image.**EAN13**

image.**ISBN13**

image.**I25**

image.**DATABAR**

image.**DATABAR_EXP**

image.**CODABAR**

image.**CODE39**

image.**PDF417**

image.**CODE93**

image.**CODE128**

image.**TAG16H5**
: AprilTag family constants accepted by find_apriltags().

image.**TAG25H7**

image.**TAG25H9**

image.**TAG36H10**

image.**TAG36H11**

5.3.7 Functions

image.**binary_to_grayscale**(*pixel*)
Convert a 1-bpp binary pixel to a grayscale value.

image.**binary_to_rgb**(*pixel*)
Convert a 1-bpp binary pixel to an (r, g, b) tuple.

image.**binary_to_lab**(*pixel*)
Convert a 1-bpp binary pixel to a LAB tuple.

image.**binary_to_yuv**(*pixel*)
Convert a 1-bpp binary pixel to a YUV tuple.

image.**grayscale_to_binary**(*pixel*)
Convert a grayscale value to a 1-bpp binary pixel.

image.**grayscale_to_rgb**(*pixel*)
Convert a grayscale value to an (r, g, b) tuple.

image.**grayscale_to_lab**(*pixel*)
Convert a grayscale value to a LAB tuple.

image.**grayscale_to_yuv**(*pixel*)
Convert a grayscale value to a YUV tuple.

image.**rgb_to_binary**(*pixel*)
Convert an (r, g, b) color to a 1-bpp binary pixel.

image.**rgb_to_grayscale**(*pixel*)
Convert an (r, g, b) color to a grayscale value.

image.**rgb_to_lab**(*pixel*)
Convert an (r, g, b) color to a LAB tuple.

image.**rgb_to_yuv**(*pixel*)
Convert an (r, g, b) color to a YUV tuple.

image.**lab_to_binary**(*pixel*)
Convert a LAB tuple to a 1-bpp binary pixel.

image.**lab_to_grayscale**(*pixel*)
Convert a LAB tuple to a grayscale value.

image.**lab_to_rgb**(*pixel*)
Convert a LAB tuple to an (r, g, b) tuple.

image.**lab_to_yuv**(*pixel*)
Convert a LAB tuple to a YUV tuple.

image.**yuv_to_binary**(*pixel*)
Convert a YUV tuple to a 1-bpp binary pixel.

image.**yuv_to_grayscale**(*pixel*)
Convert a YUV tuple to a grayscale value.

image.**yuv_to_rgb**(*pixel*)

Convert a YUV tuple to an (r, g, b) tuple.

image.**yuv_to_lab**(*pixel*)

Convert a YUV tuple to a LAB tuple.

5.3.8 Classes

class image.**line**

A detected line segment with Hough-space attributes.

line()

Return the line as (x1, y1, x2, y2).

x1()

Start-point x coordinate.

y1()

Start-point y coordinate.

x2()

End-point x coordinate.

y2()

End-point y coordinate.

length()

Segment length in pixels.

magnitude()

Hough accumulator magnitude (line strength).

theta()

Line angle theta in degrees (Hough space).

rho()

Line distance rho in pixels (Hough space).

class image.**circle**

A detected circle.

circle()

Return the circle as (x, y, r).

x()

Center x coordinate.

y()

Center y coordinate.

r()

Radius in pixels.

magnitude()

Hough accumulator magnitude (circle strength).

class image.**rect**

A detected rectangle (quadrilateral).

corners()

Return the four corner points in clockwise order.

rect()
Return the bounding box as (x, y, w, h).

x()
Bounding-box top-left x.

y()
Bounding-box top-left y.

w()
Bounding-box width.

h()
Bounding-box height.

magnitude()
Detection strength.

class image.**blob**
A connected color region found by find_blobs().

corners()
The four bounding-box corners.

min_corners()
The four corners of the minimum-area enclosing rectangle.

rect()
Bounding box as (x, y, w, h).

x()
Bounding-box top-left x.

y()
Bounding-box top-left y.

w()
Bounding-box width.

h()
Bounding-box height.

pixels()
Number of pixels in the blob.

cx()
Centroid x (integer).

cxf()
Centroid x (float).

cy()
Centroid y (integer).

cyf()
Centroid y (float).

rotation()
Orientation of the blob’ s major axis in radians.

rotation_deg()
Orientation in degrees.

rotation_rad()
Orientation in radians.

code()
Bitmask of the thresholds this blob matched.

count()
Number of blobs merged into this one.

perimeter()
Bounding-box perimeter.

roundness()
Roundness metric in [0, 1] (1 == circle).

elongation()
Elongation metric in [0, 1].

area()
Bounding-box area (w * h).

density()
Pixel density: pixels / area.

extent()
Alias of density().

compactness()
Compactness metric in [0, 1].

solidity()
Solidity (pixels / convex-hull area) in [0, 1].

convexity()
Convexity metric in [0, 1].

x_hist_bins()
Horizontal projection histogram bins.

y_hist_bins()
Vertical projection histogram bins.

major_axis_line()
Major-axis line as (x1, y1, x2, y2).

minor_axis_line()
Minor-axis line as (x1, y1, x2, y2).

enclosing_circle()
Minimum enclosing circle as (x, y, r).

enclosed_ellipse()
Best-fit enclosed ellipse as (x, y, rx, ry, rotation).

class image.**qrcode**
A decoded QR code found by find_qrcodes().

corners()
The four corner points.

rect()
Bounding box as (x, y, w, h).

x()
Bounding-box top-left x.

y()
Bounding-box top-left y.

w()
Bounding-box width.

h()
Bounding-box height.

payload()
Decoded payload string.

version()
QR version (size) number.

ecc_level()
Error-correction level.

mask()
Data mask pattern index.

data_type()
Encoding mode of the payload.

eci()
Extended Channel Interpretation value.

is_numeric()
True if the payload is numeric.

is_alphanumeric()
True if the payload is alphanumeric.

is_binary()
True if the payload is binary.

is_kanji()
True if the payload is Kanji.

class image.**barcode**
A decoded 1D/2D barcode found by find_barcodes().

corners()
The four corner points.

rect()
Bounding box as (x, y, w, h).

x()
Bounding-box top-left x.

y()
Bounding-box top-left y.

w()
Bounding-box width.

h()
Bounding-box height.

payload()

Decoded payload string.

type()

Symbology type constant (e.g. EAN13, CODE128).

rotation()

Rotation of the barcode in degrees.

quality()

Decode quality (number of agreeing scan lines).

class image.**apriltag**

A detected AprilTag with optional 6-DoF pose. Attributes are fields, not methods.

class image.**histogram**

Channel histogram returned by get_histogram(). For RGB565 the L/A/B channels correspond to the LAB color space.

bins()

Combined bins (grayscale/binary) or L bins (RGB565).

l_bins()

L-channel (lightness) bins.

a_bins()

A-channel bins (RGB565 only).

b_bins()

B-channel bins (RGB565 only).

get_percentile(*p*)

Return the value at the given cumulative percentile (0..1).

参数

p –percentile in the range 0 to 1.

get_threshold()

Compute an Otsu threshold from the histogram.

get_stats()

Compute statistics (mean/median/mode/stdev/…) from the histogram.

get_statistics()

Alias of get_stats().

statistics()

Alias of get_stats().

class image.**percentile**

A percentile result from histogram.get_percentile().

value()

Combined/L value at the percentile.

l_value()

L-channel value.

a_value()

A-channel value.

b_value()

B-channel value.

class image.**threshold**

An Otsu threshold result from histogram.get_threshold().

value()

Combined/L threshold value.

l_value()

L-channel threshold.

a_value()

A-channel threshold.

b_value()

B-channel threshold.

class image.**statistics**

Region statistics returned by get_statistics(). Combined accessors apply to grayscale/binary; `l_*`/`a_*`/`b_*` apply to RGB565 LAB channels.

mean()

median()

mode()

stdev()

min()

max()

lq()

Lower quartile (25th percentile).

uq()

Upper quartile (75th percentile).

l_mean()

l_median()

l_mode()

l_stdev()

l_min()

l_max()

l_lq()

l_uq()

a_mean()

a_median()

a_mode()

a_stdev()

a_min()

a_max()

a_lq()

a_uq()

b_mean()

b_median()

b_mode()

b_stdev()

b_min()

b_max()

b_lq()

b_uq()

class image.**Image**(*path*, *, *copy_to_fb=...*)

class image.**Image**(*width*, *height*, *pixformat*, *, *buffer=...*, *copy_to_fb=...*)

class image.**Image**(*array*, *, *buffer=...*, *copy_to_fb=...*)

A 2D image backed by a pixel buffer. Create one from a file path, from a width/height/pixformat, or from an array; most often you get one from sensor.snapshot(). Most in-place methods return `self` so calls can be chained.

Load an image from a file (BMP/PPM/PGM/JPEG/PNG depending on build).

参数

- **path** –source file path.
- **copy_to_fb** –True loads the decoded image into the frame buffer.

width()

Image width in pixels.

height()

Image height in pixels.

format()

Pixel format constant (BINARY/GRAYSCALE/RGB565/…).

size()

Size of the pixel buffer in bytes.

bytearray()

Return the pixel buffer as a bytearray (no copy).

get_pixel(*x*, *y*, *, *rgbtuple=...*)

Read one pixel. x, y: pixel coordinates.

参数

rgbtuple –for RGB565, True returns an (r, g, b) tuple, False the packed value.

set_pixel(*x*, *y*, *pixel*)

Write one pixel. x, y: pixel coordinates.

参数

pixel –grayscale value or (r, g, b) color.

flush()

Push this image to the host preview over USB CDC (EVFRAME JPEG stream).

save(*path*, *, *roi=...*, *quality=...*)

Save the image to a file; the format is inferred from the extension.

参数

- **path** –destination path.
- **roi** –optional source rectangle (x, y, w, h).
- **quality** –JPEG quality from 1 to 100 when saving as JPEG.

copy(*, *roi=...*, *x_scale=...*, *y_scale=...*, *rgb_channel=...*, *alpha=...*, *color_palette=...*, *alpha_palette=...*, *hint=...*, *transform=...*, *copy=...*)

Return a scaled/cropped/converted copy of the image. x_scale, y_scale: horizontal/vertical scale factors.

参数

- **roi** –source rectangle (x, y, w, h) to read from.
- **hint** –bitwise OR of AREA/BILINEAR/BICUBIC/HMIRROR/VFLIP/TRANSPOSE/ROTATE_*/SCALE_ flags.
- **rgb_channel** –extract a single RGB channel (0, 1, or 2; -1 for all).
- **alpha** –blend alpha from 0 to 255.
- **copy** –True returns a new image; False converts in place.

crop(*, *roi=...*, *x_scale=...*, *y_scale=...*, *hint=...*, *copy=...*)

Crop/scale the image to a region of interest. Same options as copy().

scale(*, *x_scale=...*, *y_scale=...*, *roi=...*, *hint=...*, *copy=...*)

Scale the image by x_scale/y_scale (alias of crop in this build).

compress(*, *quality=...*, *subsampling=...*, *roi=...*)

Compress the image to JPEG in place (alias of to_jpeg).

参数

- **quality** –JPEG quality from 1 to 100.
- **subsampling** –one of the JPEG_SUBSAMPLING_* constants.

to_bitmap(*, *copy=...*, *roi=...*)

Convert to a 1-bpp bitmap.

to_grayscale(*, *copy=...*, *roi=...*)

Convert to grayscale.

to_rgb565(*, *copy=...*, *roi=...*)

Convert to RGB565.

to_rainbow(*, *copy=...*, *roi=...*)

Apply the rainbow palette and convert to RGB565.

to_ironbow(*, *copy=...*, *roi=...*)

Apply the ironbow thermal palette and convert to RGB565.

to_jpeg(*, *quality=...*, *subsampling=...*, *copy=...*)

Encode to JPEG.

参数

- **quality** –JPEG quality from 1 to 100.
- **subsampling** –one of the JPEG_SUBSAMPLING_* constants.

to_png(*, *copy=...*)

Encode to PNG.

clear(*, *mask=...*)

Fill the image with zeros (optionally only where mask is set).

参数

mask –optional 1-bpp image limiting which pixels are cleared.

draw_line(*x0*, *y0*, *x1*, *y1*, *color=...*, *thickness=...*)

draw_line(*line*, *color=...*, *thickness=...*)

draw_rectangle(*x*, *y*, *w*, *h*, *color=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

draw_rectangle(*rect*, *color=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

draw_circle(*x*, *y*, *r*, *color=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

draw_circle(*circle*, *color=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

draw_ellipse(*x*, *y*, *rx*, *ry*, *rotation*, *color=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

draw_ellipse(*ellipse*, *color=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

draw_string(*x*, *y*, *text*, *color=...*, *scale=...*, *x_spacing=...*, *y_spacing=...*, *mono_space=...*, *char_rotation=...*, *char_hmirror=...*, *char_vflip=...*, *string_rotation=...*, *string_hmirror=...*, *string_vflip=...*)

Draw text using the built-in bitmap font. x, y: top-left position of the text.

参数

- **text** –string to draw.
- **color** –text color.
- **scale** –integer/float scale factor of the font.

draw_cross(*x*, *y*, *color=...*, *size=...*, *thickness=...*)

Draw a cross marker centered at (x, y).

draw_arrow(*x0*, *y0*, *x1*, *y1*, *color=...*, *size=...*, *thickness=...*)

draw_arrow(*line*, *color=...*, *size=...*, *thickness=...*)

draw_edges(*corners*, *color=...*, *size=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

Draw connecting edges between a sequence of corner points.

draw_keypoints(*keypoints*, *color=...*, *size=...*, *thickness=...*, *fill=...*)

Draw a set of keypoints.

draw_image(*image*, *x=...*, *y=...*, ***, *x_scale=...*, *y_scale=...*, *roi=...*, *rgb_channel=...*, *alpha=...*, *color_palette=...*, *alpha_palette=...*, *hint=...*, *transform=...*, *mask=...*)

Alpha-blend/scale another image (or a solid color) onto this one. x, y: destination top-left position. x_scale, y_scale: scale factors; roi: source rectangle; alpha: 0..255;

参数

- **image** –source Image, an (r, g, b) tuple, or a packed scalar color.
- **hint** –SCALE_ASPECT_*/interpolation flags; mask: optional 1-bpp mask.

binary(*thresholds*, ***, *invert=...*, *zero=...*, *mask=...*, *to_bitmap=...*, *copy=...*)

Threshold the image into a binary mask against a list of color thresholds.

参数

- **thresholds** –list of grayscale (min, max) or LAB 6-tuple thresholds.
- **invert** –invert the match.
- **zero** –zero out matching pixels instead of setting them.
- **mask** –optional 1-bpp image limiting the operation.
- **to_bitmap** –output a 1-bpp bitmap.
- **copy** –return a new image instead of modifying in place.

invert()

Invert pixel values.

erode(*ksize*, ***, *threshold=...*, *mask=...*)

Morphological erosion with a (2*ksize+1) square structuring element.

参数

- **ksize** –structuring-element radius.

- **threshold** –minimum number of set neighbors to keep a pixel.
- **mask** –optional 1-bpp image limiting the operation.

dilate(*ksize*, *, *threshold=...*, *mask=...*)

Morphological dilation. See erode() for parameters.

open(*ksize*, *, *threshold=...*, *mask=...*)

Morphological opening (erode then dilate).

close(*ksize*, *, *threshold=...*, *mask=...*)

Morphological closing (dilate then erode).

difference(*image*, *x=...*, *y=...*, *, *roi=...*, *mask=...*)

Absolute per-pixel difference against another image/color (frame differencing). x, y: placement of the other image.

参数

image –other Image, (r, g, b) tuple, or scalar color.

histeq(*, *adaptive=...*, *clip_limit=...*, *mask=...*)

Histogram equalization (global). adaptive is not supported in this build.

参数

clip_limit –reserved; mask: optional 1-bpp image.

mean(*ksize*, *, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Box (mean) blur over a (2*ksize+1) window. threshold/offset/invert: adaptive-threshold the result.

参数

- **ksize** –kernel radius.
- **mask** –optional 1-bpp image.

median(*ksize*, *, *percentile=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Median filter (edge-preserving denoise).

参数

- **ksize** –kernel radius.
- **percentile** –rank in [0, 1] to select (0.5 == median).

mode(*ksize*, *, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Mode (most-common value) filter.

参数

ksize –kernel radius.

midpoint(*ksize*, *, *bias=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Midpoint filter ((min + max)/2 blended by bias).

参数

ksize –kernel radius; bias: 0 == min, 1 == max, 0.5 == midpoint.

morph(*ksize*, *kernel*, *, *mul=...*, *add=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Apply an arbitrary NxN convolution kernel.

参数

- **ksize** –kernel radius; the kernel must be (2*ksize+1) square.
- **kernel** –flat or nested sequence of integer weights.
- **mul** –output multiplier (defaults to 1/sum(kernel)); add: output bias.

blur(*ksize*, *, *unsharp=...*, *mul=...*, *add=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Gaussian blur using a separable Pascal-triangle kernel (alias: gaussian, gaussian_blur).

参数

- **ksize** –kernel radius.
- **unsharp** –True turns the filter into an unsharp-mask sharpener.

gaussian(*ksize*, *, *unsharp=...*, *mul=...*, *add=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Gaussian blur. See blur() for parameters.

gaussian_blur(*ksize*, *, *unsharp=...*, *mul=...*, *add=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Gaussian blur. See blur() for parameters.

laplacian(*ksize*, *, *sharpen=...*, *mul=...*, *add=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Laplacian edge filter (or sharpener when sharpen is True).

参数

ksize –kernel radius.

bilateral(*ksize*, *, *color_sigma=...*, *space_sigma=...*, *threshold=...*, *offset=...*, *invert=...*, *mask=...*)

Bilateral filter (edge-preserving smoothing).

参数

- **ksize** –kernel radius.
- **color_sigma** –range sigma (color closeness); larger blurs across more contrast.
- **space_sigma** –spatial sigma (distance closeness).

get_histogram(*thresholds=...*, *, *invert=...*, *roi=...*, *bins=...*, *l_bins=...*, *a_bins=...*, *b_bins=...*, *difference=...*)

Compute a channel histogram over the image or a region. bins / l_bins / a_bins / b_bins: bin counts; -1 selects the channel default.

参数

- **thresholds** –optional list of thresholds to restrict counted pixels.
- **invert** –invert the threshold match.
- **roi** –region of interest (x, y, w, h).
- **difference** –optional image to histogram the difference against.

get_hist(*thresholds=...*, *, *invert=...*, *roi=...*, *bins=...*, *l_bins=...*, *a_bins=...*, *b_bins=...*, *difference=...*)

Alias of get_histogram().

histogram(*thresholds=...*, *, *invert=...*, *roi=...*, *bins=...*, *l_bins=...*, *a_bins=...*, *b_bins=...*, *difference=...*)

Alias of get_histogram().

get_statistics(*thresholds=...*, *, *invert=...*, *roi=...*, *bins=...*, *l_bins=...*, *a_bins=...*, *b_bins=...*, *difference=...*)

Compute region statistics (mean/median/mode/stdev/quartiles). thresholds/invert/roi/bins: as in get_histogram().

get_stats(*thresholds=...*, *, *invert=...*, *roi=...*, *bins=...*, *l_bins=...*, *a_bins=...*, *b_bins=...*, *difference=...*)

Alias of get_statistics().

statistics(*thresholds=...*, *, *invert=...*, *roi=...*, *bins=...*, *l_bins=...*, *a_bins=...*, *b_bins=...*, *difference=...*)

Alias of get_statistics().

get_regression(*thresholds*, *, *invert=...*, *roi=...*, *x_stride=...*, *y_stride=...*, *area_threshold=...*, *pixels_threshold=...*, *robust=...*)

Fit a line to the thresholded pixels via least-squares (or robust) regression. x_stride, y_stride: pixel sampling steps. area_threshold, pixels_threshold: minimum region area / pixel count to fit.

参数

- **thresholds** –list of color thresholds selecting the pixels to fit.
- **invert** –invert the match; roi: region of interest.
- **robust** –use a robust (Theil-Sen) estimator.

find_blobs(*thresholds*, *, *invert=...*, *roi=...*, *x_stride=...*, *y_stride=...*, *area_threshold=...*, *pixels_threshold=...*, *merge=...*, *margin=...*, *threshold_cb=...*, *merge_cb=...*, *x_hist_bins_max=...*, *y_hist_bins_max=...*)

Find connected color regions (blobs) matching the thresholds. x_stride, y_stride: pixel sampling steps. area_threshold, pixels_threshold: minimum bounding-box area / pixel count. threshold_cb / merge_cb: optional Python filter/merge callbacks.

参数

- **thresholds** –list of color thresholds.
- **invert** –invert the match; roi: region of interest.
- **merge** –merge overlapping blobs; margin: extra merge margin.

find_lines(*, *roi=...*, *x_stride=...*, *y_stride=...*, *threshold=...*, *theta_margin=...*, *rho_margin=...*)

Find straight lines with the Hough transform. theta_margin, rho_margin: merge tolerance for similar lines.

参数

- **roi** –region of interest; x_stride, y_stride: sampling steps.
- **threshold** –minimum Hough accumulator magnitude to report a line.

find_circles(*, *roi=...*, *x_stride=...*, *y_stride=...*, *threshold=...*, *x_margin=...*, *y_margin=...*, *r_margin=...*, *r_min=...*, *r_max=...*, *r_step=...*)

Find circles with the Hough transform. x_margin, y_margin, r_margin: merge tolerances. r_min, r_max, r_step: radius search range and step.

参数

threshold –minimum accumulator magnitude.

find_rects(*, *roi=...*, *threshold=...*)

Find rectangles/quadrilaterals (e.g. for fiducials).

参数

threshold –minimum edge-magnitude score.

find_qrcodes(*, *roi=...*)

Find and decode QR codes.

参数

roi –region of interest.

find_barcodes(*, *roi=...*)

Find and decode 1D/2D barcodes (requires the barcode backend).

参数

roi –region of interest.

find_apriltags(*, *roi=...*, *families=...*, *fx=...*, *fy=...*, *cx=...*, *cy=...*, *pose=...*)

Find and decode AprilTags, optionally estimating 6-DoF pose. fx, fy, cx, cy: camera intrinsics for pose estimation.

参数

- **roi** –region of interest; families: OR of TAG* family constants.
- **pose** –True computes translation/rotation (needs intrinsics).

5.4 display –LCD 显示

`display` 模块驱动开发板上的 LCD。创建一个 `ESP32Display`（别名为 `display.Display`），并用 `ESP32Display.write()` 把图像帧送到屏幕。

5.4.1 摄像头预览

```
import sensor, display

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)

lcd = display.ESP32Display()
while True:
    lcd.write(sensor.snapshot(), fit=True)
```

使用 `fit=True` 时，源图像会缩放以适配屏幕，并沿用显示驱动的默认放置方式。显示对象应只创建一次并持续复用；重复创建对象会重新初始化屏幕资源。

5.4.2 定位、缩放与裁剪

使用 `x` 和 `y` 设置显示位置，使用 `x_scale` 和 `y_scale` 显式缩放，并通过 `roi` 仅显示源图像中的指定区域：

```
img = sensor.snapshot()
lcd.write(
    img,
    x=20,
    y=10,
    x_scale=0.5,
    y_scale=0.5,
    roi=(40, 30, 160, 120),
    fit=False,
)
```

当 `fit=False` 时，输出由显式指定的位置和缩放比例控制。ROI 使用源图像坐标，格式为 `(x, y, width, height)`；缩小 ROI 还可以减少送入显示链路的图像数据量。

5.4.3 背光与资源释放

```
lcd = display.Display(backlight=80)
print("panel:", lcd.width(), "x", lcd.height())
lcd.backlight(30)
lcd.clear()
lcd.deinit()
```

背光值为 0 到 100 的百分比。应用永久释放显示设备时应调用 `deinit()`；驱动反初始化后不得继续写入图像帧。

参见:

可运行示例：`example/06-Peripherals/01-Display/lcd_preview.py`。

5.4.4 Classes

class display.**ESP32Display**(*width=...*, *height=...*, *refresh=...*, *, *backlight=...*)

ESP32 display object for the board LCD.

Create and initialize the display.

参数

- **width** –requested display width; 0 uses board default.
- **height** –requested display height; 0 uses board default.

- **refresh** –target refresh rate in Hz.
- **backlight** –initial backlight percentage, from 0 to 100.

deinit()

Release the display driver resources.

width()

Return the physical display width in pixels.

height()

Return the physical display height in pixels.

clear(*display_off=...*)

Clear the display.

参数

display_off –True may turn the panel output off when supported by the board.

backlight(*value=...*)

Get or set backlight brightness.

参数

value –None returns current brightness; otherwise set 0 to 100 percent.

write(*image*, *, *x=...*, *y=...*, *x_scale=...*, *y_scale=...*, *roi=...*, *fit=...*)

Draw an image on the display. x, y: destination top-left position in display pixels. x_scale, y_scale: optional manual scale factors.

参数

- **image** –source image, normally from sensor.snapshot().
- **roi** –optional source rectangle (x, y, w, h).
- **fit** –True scales the image to fit the display area.

5.5 espdl –模型推理

`espdl` 模块在采集到的图像上运行 ESP-DL 的 `.espdl` 模型，并提供常见任务封装：目标检测（`ESPDet`、`YOLO11`）、姿态估计（`YOLO11nPose`）和图像分类（`ImageNetCls`），同时可通过 `Model` 将 ESP-DL 原始输出 tensor 暴露给 Python。

5.5.1 原始输出 tensor

```
import sensor, espdl

model = espdl.Model("/sdcard/custom.espdl", mean=(0, 0, 0), std=(255, 255, 255),␣
↪letterbox=True)
try:
    print("inputs:", model.inputs())
    print("outputs:", model.outputs())
    img = sensor.snapshot()
    outputs = model.predict(img)
    for name, tensor in outputs.items():
        _, shape, dtype, exponent, raw = tensor
        print(name, shape, dtype, exponent, len(raw))
finally:
    model.deinit()
```

当内置任务封装不匹配模型输出布局时，可使用 `Model`。ESP-DL 仍负责图像预处理和推理；`predict()` 返回原始输出 tensor，Python 代码再执行模型相关解码。`inputs()` 和 `outputs()` 返回 `TensorInfo` 元组 `(name, shape, dtype, exponent)`。`predict()` 返回按输出 tensor 名称索引的 `RawTensor` 元组 `(name, shape, dtype, exponent, bytes)`。应根据 `dtype` 解包原始字节，应用 ESP-DL 的二次幂 `exponent` 量化比例，再执行 sigmoid、框解码、NMS、softmax 或 top-k 选择等逻辑。若启用 `letterbox=True`，将坐标映射回源图像前需要先去除模型输入中的 padding。

5.5.2 目标检测

```
import sensor, espdl

det = espdl.ESPDet("/sdcard/espdet_pico_224_224_face.espdl", score=0.5, nms=0.7)
try:
    img = sensor.snapshot()
    for x, y, w, h, score, category in det.detect(img):
        img.draw_rectangle(x, y, w, h, color=(255, 0, 0), thickness=2)
        img.draw_string(x, max(0, y - 12), "%.2f:%d" % (score, category))
finally:
    det.deinit()
```

`score` 用于过滤低置信度候选框，`nms` 用于控制重叠检测框的抑制。检测坐标会映射回输入图像，可直接用于绘图。模型应加载一次并在多帧之间复用；`deinit()` 会释放模型权重和中间缓冲区。

5.5.3 图像分类

```
import espdl, image

img = image.Image("/sdcard/cat.jpg").to_rgb565(copy=True)
classifier = espdl.ImageNetCls(
    "/sdcard/imagenet_cls_mobilenetv2_s8_v1.espdl",
    topk=5,
    score=0.0,
)
try:
    for label, score in classifier.classify(img):
        print(label, "%.4f" % score)
finally:
    classifier.deinit()
```

分类结果按照模型输出顺序返回最多 `topk` 个 `(label, score)` 元组。必要时应将文件图像转换为 RGB565，确保输入格式可被封装层接受。

5.5.4 姿态估计

```
pose = espdl.YOLO11nPose("/sdcard/espdet_yolo11n_pose_160_160_coco.espdl", score=0.
↪35, topk=5)
try:
    img = sensor.snapshot()
    for x, y, w, h, score, category, keypoints in pose.detect(img):
        img.draw_rectangle(x, y, w, h, color=(255, 0, 0))
        for px, py in keypoints:
            if px > 0 and py > 0:
                img.draw_circle(px, py, 2, color=(0, 255, 0), fill=True)
finally:
    pose.deinit()
```

每个姿态结果包含 17 个 COCO 关键点。缺失或低置信度关键点会返回为 `(0, 0)`，绘图或计算关节几何关系前应将其跳过。

5.5.5 运行时调整阈值

```
det.set_thresholds(score=0.65, nms=0.6)
```

无需重新加载模型即可修改阈值，适合应用根据光照、距离或场景目标密度的变化进行动态调整。

5.5.6 结果元组

- TensorInfo：`(name, shape, dtype, exponent)`
- RawTensor：`(name, shape, dtype, exponent, bytes)`
- 检测：`(x, y, w, h, score, category)`
- 姿态：`(x, y, w, h, score, category, keypoints)`，含 17 个 COCO 关键点
- 分类：`(label, score)`

参见:

AI 推理 介绍 ESP-DL 推理流程、`.espdl` 格式、量化以及前后处理。部署新模型请参见*引入新的模型*。

可运行示例：`example/03-Machine-Learning/00-ESP-DL`（ESP-DL 原始输出解码、ESPDet、YOLO11、姿态、ImageNet 分类）。

5.5.7 Functions

`espdl.`**`load_model`**(*path*, *, *profile*=...)

Preload an ESP-DL model file.

参数

- **`path`** –model path, for example “/sdcard/model.espdl” or “/flash/model.espdl”.
- **`profile`** –True enables ESP-DL profiling output when supported.

5.5.8 Classes

`class` `espdl.`**`Model`**(*path*, *, *mean*=..., *std*=..., *letterbox*=..., *pad*=...)

Generic ESP-DL model runner for examples that implement model-specific decoding in Python.

Create a raw model runner from an .espdl model.

参数

- **`path`** –model path.
- **`mean`** –optional RGB mean values for image preprocessing.
- **`std`** –optional RGB standard deviation values for image preprocessing.
- **`letterbox`** –True keeps aspect ratio and pads the model input.
- **`pad`** –optional RGB padding values used when letterbox is enabled.

`deinit`()

Release model resources.

`inputs`()

Return model input metadata keyed by tensor name.

`outputs`()

Return model output metadata keyed by tensor name.

`predict`(*image*)

Run model inference on an image and return raw output tensors keyed by tensor name.

参数

`image` –RGB565 or grayscale image.

class espdl.**ESPDet**(*path*, *, *score*=..., *nms*=..., *mean*=..., *std*=...)

ESP-DL object detection wrapper for ESPDet models.

Create a detector from an .espdl model.

参数

- **path** –model path.
- **score** –optional confidence threshold.
- **nms** –optional non-maximum suppression threshold.
- **mean** –optional RGB mean values for preprocessing.
- **std** –optional RGB standard deviation values for preprocessing.

deinit()

Release model resources.

detect(*image*)

Run object detection on an image.

参数

image –RGB565 or grayscale image.

set_thresholds(*, *score*=..., *nms*=...)

Update detector thresholds.

参数

- **score** –new confidence threshold, or None to keep current value.
- **nms** –new NMS threshold, or None to keep current value.

class espdl.**YOLO11**(*path*, *, *score*=..., *nms*=..., *topk*=..., *mean*=..., *std*=...)

ESP-DL YOLO11 object detection wrapper.

Create a YOLO11 detector from an .espdl model.

参数

- **path** –model path.
- **score** –optional confidence threshold.
- **nms** –optional non-maximum suppression threshold.
- **topk** –maximum number of detections returned per frame.
- **mean** –optional RGB mean values for preprocessing.
- **std** –optional RGB standard deviation values for preprocessing.

deinit()

Release model resources.

detect(*image*)

Run object detection on an image.

参数

image –RGB565 or grayscale image.

set_thresholds(*, *score*=..., *nms*=...)

Update detector thresholds.

参数

- **score** –new confidence threshold, or None to keep current value.
- **nms** –new NMS threshold, or None to keep current value.

class espdl.**YOLO11nPose**(*path*, *, *score*=..., *nms*=..., *topk*=..., *mean*=..., *std*=...)

ESP-DL YOLO11n COCO pose wrapper.

Create a YOLO11n pose detector from an .espdl model.

参数

- **path** –model path.
- **score** –optional confidence threshold.

- **nms** –optional non-maximum suppression threshold.
- **topk** –maximum number of pose results returned per frame.
- **mean** –optional RGB mean values for preprocessing.
- **std** –optional RGB standard deviation values for preprocessing.

deinit()

Release model resources.

detect(*image*)

Run COCO pose detection on an image. Returns 17 COCO keypoints for each person.

参数

image –RGB565 or grayscale image.

set_thresholds(*, *score*=..., *nms*=...)

Update detector thresholds.

参数

- **score** –new confidence threshold, or None to keep current value.
- **nms** –new NMS threshold, or None to keep current value.

class espdl.**ImageNetCls**(*path*, *, *topk*=..., *score*=..., *mean*=..., *std*=..., *softmax*=...)

ESP-DL ImageNet classification wrapper.

Create a classifier from an .espdl model.

参数

- **path** –model path.
- **topk** –maximum number of classes returned.
- **score** –optional minimum score threshold.
- **mean** –optional RGB mean values for preprocessing.
- **std** –optional RGB standard deviation values for preprocessing.
- **softmax** –True applies softmax to output scores.

deinit()

Release model resources.

classify(*image*)

Run image classification on an image.

参数

image –RGB565 or grayscale image.

set_thresholds(*, *topk*=..., *score*=...)

Update classifier thresholds.

参数

- **topk** –new maximum result count, or None to keep current value.
- **score** –new minimum score, or None to keep current value.

5.6 tflite –模型推理

`tflite` 模块加载 TensorFlow Lite `.tflite` flatbuffer，并通过 TensorFlow Lite Micro 运行。它为 TFLite 模型提供通用执行接口；当某类模型需要共享预处理或后处理时，也可以在其上继续封装更高层的任务接口。

5.6.1 基本用法

```
import tflite

model = tflite.Model("/sdcard/sine.tflite")
try:
    print("input:", model.input_shape, model.input_dtype, model.input_scale, model.
↪input_zero_point)
    print("output:", model.output_shape, model.output_dtype, model.output_scale,␣
↪model.output_zero_point)
    outputs = model.predict([input_array])
    raw = outputs[0]
finally:
    model.deinit()
```

`predict()` 会以 ulab ndarray 返回原始输出 tensor。量化输出不会自动解码；模型需要时，应使用 `output_scale` 和 `output_zero_point` 自行换算。

5.6.2 Callable 输入

对于图像模型，直接填充输入 tensor 往往比先构造中间 ndarray 更省：

```
def fill_input(buffer, shape, dtype_code):
    # 按模型要求填充量化后的原始字节。
    ...

outputs = model.predict([fill_input])
```

callable 会收到输入 tensor 的可写 bytearray 视图、tensor shape，以及 `ord("b")` 这类整数 dtype code。这个路径适合在 Python 示例中处理图像缩放、灰度转换和量化。

5.6.3 后处理

`Model` 可以接收默认 `postprocess` 回调，`predict()` 也可以接收单次 `callback`。回调参数为 `(model, inputs, raw_outputs)`，并且可以返回任意 Python 对象。

参见:

可运行示例：`example/03-Machine-Learning/01-TFLite`（person/no-person 与 sine smoke test）。

5.6.4 Classes

class tflite.**Model**(*path*, *, *postprocess=...*)

TensorFlow Lite Micro model wrapper.

Load a .tflite flatbuffer from the filesystem.

参数

- **path** –model path, for example “/sdcard/model.tflite” or “/flash/model.tflite”.
- **postprocess** –optional callback that receives (model, inputs, raw_outputs) and returns the final result.

deinit()

Release model, interpreter, and tensor arena resources.

predict(*inputs*, *, *callback=...*)

Run inference.

参数

- **inputs** –one item per input tensor. Each item is an ulab ndarray or a callable that fills the raw tensor buffer.
- **callback** –optional one-shot post-processing callback; overrides the default postprocess callback.

5.7 image.ImageIO –图像流

`image.ImageIO` 类型用于录制和回放图像序列，并保留帧间时间间隔。文件流在存储上读写容器文件；内存流则把帧保存在预分配的缓冲区中。它以 `image.ImageIO` 的形式暴露在 `image` 模块上；类型存根位于 `stubs/imageio.pyi`。

5.7.1 录制到存储

```
import sensor, image

stream = image.ImageIO("/sdcard/stream.bin", "w")
for _ in range(30):
    stream.write(sensor.snapshot())
stream.sync()
print("frames:", stream.count(), "bytes:", stream.size())
stream.close()
```

每次 `write()` 都会保存图像以及与上一帧之间的时间间隔。`sync()` 可在不关闭流的情况下将文件缓冲数据写入存储。文件流使用完毕后必须关闭，以完成容器元数据和存储缓冲区的写入。

5.7.2 回放已录制的图像流

```
import image

stream = image.ImageIO("/sdcard/stream.bin", "r")
try:
    while True:
        img = stream.read(loop=False, pause=True)
        if img is None:
            break
        img.flush()
finally:
    stream.close()
```

`pause=True` 会按照录制时的帧间隔进行回放，`loop=False` 则会在流结束时返回 `None`，而不是回到第一帧。需要以处理能力允许的最快速度读取时，可设置 `pause=False`。

5.7.3 使用内存图像流

```
stream = image.ImageIO((320, 240, image.RGB565), 10)
for _ in range(10):
    stream.write(sensor.snapshot())

stream.seek(0)
first = stream.read(pause=False)
print("buffer bytes:", stream.buffer_size())
stream.close()
```

内存流不产生存储 I/O，适合保存短时间图像历史或实现帧差处理，但创建流时会在 RAM 或 PSRAM 中一次性分配全部容量。

参见:

编解码与推流 一并介绍了 ImageIO、JPEG、H.264 以及 USB CDC 预览通路。

可运行示例：`example/02-Image-Processing/03-Frame-Differencing/in_memory_frame_differencing.py` 使用内存 ImageIO 流。

5.7.4 Constants

`imageio.`**`FILE_STREAM`**

Stream backed by a file on storage (e.g. `/sdcard/stream.bin`).

`imageio.`**`MEMORY_STREAM`**

Stream backed by a fixed-size buffer in PSRAM/RAM.

5.7.5 Classes

class `imageio.`**ImageIO**(*stream*, *mode*)

class `imageio.`**ImageIO**(*stream*, *count*)

Record and replay sequences of images, preserving inter-frame timing. Exposed as `image.ImageIO`. A file stream reads/writes the OpenMV "OMV IMG STR" container on storage; a memory stream keeps frames in a pre-allocated buffer for fast capture/playback.

Open a file stream for reading ("r") or writing ("w").

参数

- **stream** –path to the stream file.
- **mode** –"r" to read, "w" to create/overwrite.

type()

Return the stream type: FILE_STREAM or MEMORY_STREAM.

is_closed()

Return True if the stream has been closed.

count()

Return the number of frames recorded in the stream.

offset()

Return the current frame index (read/write cursor).

version()

Return the container version for file streams, or None for memory streams.

buffer_size()

Return the per-frame buffer size for memory streams, or None for file streams.

size()

Return the total stream size in bytes.

write(*image*)

Append one image to the stream (records the elapsed time since the last write).

参数

image –frame to store.

read(*copy_to_fb=...*, *, *loop=...*, *pause=...*)

Read the next frame from the stream.

参数

- **copy_to_fb** –True loads the frame into the frame buffer (and updates the preview).
- **loop** –True rewinds to the first frame at end-of-stream instead of returning None.
- **pause** –True sleeps to honor the frame’s recorded timestamp (real-time playback).

seek(*offset*)

Move the read/write cursor to the given frame index.

参数

offset –target frame index.

sync()

Flush buffered file data to storage (no-op for memory streams).

close()

Close the stream and release its resources.

5.8 h264 –H.264 编码

`h264` 模块把图像编码成 Annex-B H.264 NAL 单元，可用于将视频录制到存储，或送入*rtsp –RTSP 推流* 服务器。该模块可用于 ESP32-P4 构建。

5.8.1 编码单帧图像

```
import sensor, h264

enc = h264.H264Encoder(320, 240, fps=15)
nal = enc.encode(sensor.snapshot())
print("bytes:", len(nal), "keyframe:", enc.keyframe())
enc.close()
```

编码器尺寸必须与每一帧输入图像一致。`encode()` 以 `bytes` 返回一帧编码数据，`keyframe()` 用于判断最近编码的图像是否为 IDR/I 帧。

5.8.2 录制 H.264 裸码流

```
import sensor, h264

FRAME_COUNT = 300
OUT_PATH = "/sdcard/out.h264"

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
sensor.skip_frames(time=1000)

first = sensor.snapshot()
enc = h264.H264Encoder(
    first.width(),
    first.height(),
    fps=15,
    bitrate=1_500_000,
```

(续下页)

(接上页)

```
    gop=15,
)

try:
    with open(OUT_PATH, "wb") as output:
        output.write(enc.encode(first))
        for _ in range(FRAME_COUNT - 1):
            output.write(enc.encode(sensor.snapshot()))
finally:
    enc.close()
```

该示例写入不包含 MP4 容器的 Annex-B 基本码流，可使用 `ffplay out.h264` 播放，或在主机上重新封装。`bitrate` 表示目标每秒比特数，`gop` 表示以帧为单位的关键帧间隔，QP 上下限则控制允许的质量与体积范围。

5.8.3 资源与吞吐量注意事项

应为固定分辨率创建一个编码器，并在整个视频流中持续复用，使用完毕后再将其关闭。如果采集或存储无法维持配置的帧率和码率，应降低分辨率、帧率或码率，而不是反复创建编码器。

参见:

编解码与推流 说明了“编码—推流”流程，以及 H.264 关键帧与 RTSP 传输之间的关系。

可运行示例：`example/01-Camera/01-H264/record_h264.py`。

5.8.4 Classes

class h264.**H264Encoder**(*width*, *height*, *, *fps=...*, *gop=...*, *bitrate=...*, *qp_min=...*, *qp_max=...*)

Hardware-accelerated H.264 video encoder. Feed it images frame by frame with encode(); it returns Annex-B NAL units ready to mux into a file or stream over the network (see the rtsp module).

Open an encoder for a fixed frame size.

参数

- **width** –frame width in pixels.
- **height** –frame height in pixels.
- **fps** –target frame rate; also the default GOP length.
- **gop** –keyframe (IDR) interval in frames; 0 selects one keyframe per second (== fps).
- **bitrate** –target bitrate in bits per second; 0 auto-selects width*height*fps.
- **qp_min** –lower quantization-parameter bound (better quality, larger frames).
- **qp_max** –upper quantization-parameter bound (lower quality, smaller frames).

encode(*image*)

Encode one image and return its Annex-B NAL units as bytes.

参数

image –source frame; its size must match the encoder width/height.

keyframe()

Return True if the most recently encoded frame was a keyframe (IDR/I).

close()

Release the encoder. Using the object afterwards raises OSError.

5.9 rtsp –RTSP 推流

`rtsp` 模块通过 RTSP 协议发送 H.264 NAL 单元，使 VLC、ffplay 等客户端能通过网络观看摄像头画面。需与*h264 – H.264 编码* 配合使用。该模块可用于 ESP32-P4 构建。

5.9.1 采集、编码与推流

```
import network, sensor, h264, rtsp, time
from machine import Pin

WIDTH, HEIGHT, FPS = 320, 240, 30

lan = network.LAN(
    mdc=Pin(31),
    mdio=Pin(52),
    reset=Pin(51),
    phy_addr=1,
    phy_type=network.PHY_IP101,
)
lan.active(True)

for _ in range(100):
    if lan.isconnected():
        break
    time.sleep_ms(100)
if not lan.isconnected():
    raise OSError("Ethernet connection failed")

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
sensor.skip_frames(time=1000)

enc = h264.H264Encoder(WIDTH, HEIGHT, fps=FPS, bitrate=3_000_000)
server = rtsp.RTSPServer(WIDTH, HEIGHT, fps=FPS, listen_port=8554)

print("rtsp://%s:8554/" % lan.ifconfig()[0])
try:
    while True:
        server.send(enc.encode(sensor.snapshot()))
finally:
    server.stop()
    enc.close()
```

上述以太网引脚映射适用于带 IP101 RMII PHY 的 ESP32-P4X-Function-EV-Board，其他产品开发板应使用对应的网络配置。`RTSPServer` 公布的宽度、高度和帧率必须与编码器配置一致。

5.9.2 客户端与队列行为

可使用 `ffplay rtsp://<board-ip>:8554/` 或其他支持 RTSP 的播放器打开输出地址。`send()` 会将一帧编码数据加入队列，并且不会等待客户端；没有客户端连接或客户端处理过慢时，帧可能被丢弃，从而避免阻塞采集循环。如果高分辨率或高码率编码帧超过默认限制，可增大 `max_frame_len`。

5.9.3 停止服务

释放网络或编码器资源前必须调用 `server.stop()`。使用 `try/finally` 可以确保脚本被中断或抛出异常时仍会完成资源清理。

参见：

编解码与推流 完整介绍了采集、编码与推流的整个流程。

可运行示例：`example/01-Camera/02-RTSP/stream_rtsp.py`。

5.9.4 Classes

class `rtsp.`**RTSPServer**(*width*, *height*, *, *fps=...*, *listen_port=...*, *max_frame_len=...*)

Minimal RTSP server that streams H.264 video over the network. Create it once Wi-Fi is up, then push encoded NAL units from an h264.H264Encoder with send(). Clients connect to `rtsp://<board-ip>:<listen_port>/`. Only video (no audio) is served.

Start the RTSP server and advertise the given stream format.

参数

- **width** –advertised video width in pixels.
- **height** –advertised video height in pixels.
- **fps** –advertised frame rate, used for SDP and pacing.
- **listen_port** –TCP port the RTSP service binds to.
- **max_frame_len** –max accepted encoded frame size in bytes; 0 uses width*height as a safe ceiling.

send(*nal*)

Queue one encoded H.264 frame (Annex-B NAL units) for delivery. Frames are sent in order; if the client is slow or absent the frame is dropped rather than blocking the caller. Frames larger than max_frame_len are ignored.

参数

nal –encoded frame bytes from h264.H264Encoder.encode().

stop()

Stop the server, join its task, and free queued frames.

Chapter 6

操作指南

面向具体任务的 ESP-VISION 扩展指南。

6.1 添加新的 Python 模块

ESP-VISION 通过 MicroPython 的 `USER_C_MODULES` 机制暴露 Python 模块。绑定层位于 `modules/`，仅做对象转换与轻量 API 适配；重逻辑应放在纯 C 或 `platform/` 中。本指南以添加名为 `foo` 的模块为例。

6.1.1 总览

```
modules/py_foo.c              # 绑定 + MP_REGISTER_MODULE(MP_QSTR_foo, ...)
modules/qstrdefs_esp_vision.h   # 任何受功能开关控制的 qstr
micropython.cmake             # 将 py_foo.c 加入源文件列表
stubs/foo.pyi                 # 供 IDE 补全的类型存根
docs/.../api-reference/foo.rst  # 参考页面
```

6.1.2 1. 创建绑定源文件

新增 `modules/py_foo.c`：定义模块函数，构建 globals 字典，并自注册模块。现有模块是最佳模板——纯函数模块可参考 `modules/py_sensor.c`，类型/类模块可参考 `modules/py_display.c`。

```c
/*
 * SPDX-FileCopyrightText: 2026 Espressif Systems (Shanghai) CO LTD
 *
 * SPDX-License-Identifier: Apache-2.0
 */
#include "py/runtime.h"

static mp_obj_t foo_hello(void) {
    return mp_obj_new_int(42);
}
static MP_DEFINE_CONST_FUN_OBJ_0(foo_hello_obj, foo_hello);

static const mp_rom_map_elem_t foo_module_globals_table[] = {
    { MP_ROM_QSTR(MP_QSTR___name__), MP_ROM_QSTR(MP_QSTR_foo) },
    { MP_ROM_QSTR(MP_QSTR_hello), MP_ROM_PTR(&foo_hello_obj) },
};
```

(续下页)

(接上页)

```
static MP_DEFINE_CONST_DICT(foo_module_globals, foo_module_globals_table);

const mp_obj_module_t mp_module_foo = {
    .base = { &mp_type_module },
    .globals = (mp_obj_dict_t *)&foo_module_globals,
};

MP_REGISTER_MODULE(MP_QSTR_foo, mp_module_foo);
```

C++ 模块使用 .cpp`` (参见 ``modules/py_espdl.cpp) ；构建已为 C++ 源文件设置 -std=gnu++2b。

6.1.3 2. 按需注册 qstr

大多数 qstr (MP_QSTR_foo、MP_QSTR_hello) 会自动从源码收集。仅当名称受板级功能开关控制、或无法被 qstr 扫描器识别时，才需以 Q(name) 形式添加到 modules/qstrdefs_esp_vision.h。

6.1.4 3. 将源文件接入构建

在 micropython.cmake 的 ESP_VISION_MODULE_SOURCES 中加入该源文件:

```
set(ESP_VISION_MODULE_SOURCES
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_display.c
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_image.c
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_foo.c    # 新增
    ...
)
```

若模块仅在部分芯片上有效，请放入对应的 IDF_TARGET 判断块中（H.264 与 RTSP 模块即以此方式限定为 esp32p4)。若需额外组件，可像 idf::zxing 那样用 target_link_libraries 链接。

6.1.5 4. 添加类型存根

创建 stubs/foo.pyi 描述公开接口，便于 IDE 补全。保留 Apache SPDX 头并与现有存根风格保持一致。

6.1.6 5. 编写模块文档

新增 docs/en/api-reference/foo.rst 与 docs/zh_CN/api-reference/foo.rst，使用 Python 域指令（.. py:module::、.. py:function::、.. py:class::），并在两种语言的 api-reference/index.rst 的 toctree 中加入 foo。

6.1.7 6. 构建并验证

```
idf.py --board ESP32_P4X_EYE build
```

然后在 REPL 中检查:

```
import foo
print(foo.hello())
```

6.2 客制化固件功能

ESP-VISION 将面向应用的模块、图像算法、标准 MicroPython 功能、冻结 Python 代码和板级服务拆分为相互独立的配置层。产品固件既可以移除不需要的能力，以减少 Flash、RAM、依赖项和攻击面，也可以增加产品专用模块，而无需重写摄像头与媒体处理链路。

6.2.1 确定客制化范围

修改配置前，应先确定变更是面向所有 ESP-VISION 固件，还是仅面向某块开发板。修改根目录 `micropython.cmake` 会影响所有满足对应芯片条件的开发板；修改 `boards/<BOARD>/``（包括其中的 MicroPython 移植文件 ``boards/<BOARD>/port/`）仅影响对应开发板。对于产品变体，应按照*添加新的开发板*创建独立板级包，而不是直接修改共享的开发板配置。

6.2.2 客制化 ESP-VISION Python 模块

`micropython.cmake` 中的 `ESP_VISION_MODULE_SOURCES` 列表决定暴露给 Python 的 C/C++ 绑定。移除源码时，应同时处理其依赖的辅助源码；增加源码时可参考*添加新的 Python 模块*。仅适用于部分芯片的模块应放在对应的 `IDF_TARGET` 条件中，例如 H.264 与 RTSP 当前仅为 `esp32p4` 启用。

```
set(ESP_VISION_MODULE_SOURCES
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_display.c
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_image.c
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_imageio.c
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_helper.c
    ${ESP_VISION_ROOT}/modules/py_sensor.c
)
```

移除绑定源码不会自动移除其背后的所有平台服务或托管组件。修改源码列表后，还需检查 `target_sources`、`target_link_libraries`、组件清单和最终 size 报告，确认不需要的依赖已不再链接。

6.2.3 客制化图像算法

每块开发板的 `boards/<BOARD>/imlib_config.h` 用于选择可选的 `imlib` 算法。删除某个 `IMLIB_ENABLE_*` 定义可排除不使用的算法，增加受支持的定义可启用其他算法。常见功能组包括滤波、几何检测、二维码和 AprilTag。

```
#define IMLIB_ENABLE_MEAN
#define IMLIB_ENABLE_GAUSSIAN
#define IMLIB_ENABLE_QRCODES
#define IMLIB_ENABLE_APRILTAGS
```

部分 Python 方法在后端关闭后仍会保留在绑定层中，并在调用时抛出异常。应确保 API 文档、示例和自动生成的开发板支持表与所选算法保持一致。未经许可证审查，不应移除 `OMV_NO_GPL`。

6.2.4 客制化标准 MicroPython 功能

使用 `boards/<BOARD>/port/mpconfigboard.h` 覆盖单块开发板的标准 MicroPython 功能宏，例如网络、Bluetooth、ESP-NOW、ADC、SD 卡、USB，以及其他 `MICROPY_PY_*` 和 `MICROPY_HW_*` 选项。CMake 级选项和板级 sdkconfig 链则在 `mpconfigboard.cmake` 中配置。

```
#define MICROPY_PY_BLUETOOTH (0)
#define MICROPY_PY_ESPNOW (0)
#define MICROPY_PY_NETWORK_WLAN (1)
```

这些宏可能依赖 ESP-IDF 版本与 SoC 能力宏。关闭 Python 功能后，可能还需移除对应的 ESP-IDF 配置或托管依赖，才能获得可观测的固件体积缩减。

6.2.5 客制化冻结 Python 代码

开发板的 `boards/<BOARD>/manifest.py` 控制冻结到固件中的 Python 模块。可根据 MicroPython manifest 机制使用 `freeze()`、`module()`、`package()` 或 `include()` 增加产品启动代码、库或软件包；不需要某个冻结模块时则删除对应条目。

```
freeze("$(PORT_DIR)/modules")
freeze("$(ESP_VISION_ROOT)/modules", "py_inisetup.py")
freeze("$(ESP_VISION_ROOT)/boards/<BOARD>", "board_inisetup.py")
include("$(MPY_DIR)/extmod/asyncio")
```

冻结代码可提升部署一致性并确保启动阶段可用，但会占用固件 Flash。开发期间或产品部署后仍需替换的文件，应保留在根文件系统中（例如 `/lib` 下的软件包）或 `/sdcard` 中。

6.2.6 客制化板级服务与可选组件

板级摄像头、显示和 SD 卡实现位于 `boards/<BOARD>/`。存在 `camera.c`、`display.c` 和 `sdcard.c` 时，`micropython.cmake` 会自动选用。板级 CMake 开关应放在 `boards/<BOARD>/board.cmake` 中，例如当前 P4 开发板通过 `ESP_VISION_ENABLE_BARCODE` 启用可选的 ZXing 条码后端。

```
set(ESP_VISION_ENABLE_BARCODE OFF)
```

增加组件时，应注册其源码或 IDF 组件，并将其链接到 `usermod_esp_vision_platform`；移除组件时，应一次性移除源码、头文件路径、编译定义、链接依赖和组件清单条目。

6.2.7 构建与验证

修改 CMake、sdkconfig、manifest 或功能宏后，应重新配置并构建所选开发板：

```
idf.py --board <BOARD> reconfigure
idf.py --board <BOARD> build
idf.py --board <BOARD> size
```

在 REPL 中验证模块导入和受影响的 API，运行相关示例，并对比修改前后的 size 报告。还应重新构建文档，因为模块导航和开发板能力摘要会根据固件配置自动生成。

6.3 引入新的模型

ESP-VISION 支持两类模型运行路径：ESP-DL `.espdl` 模型使用*espdl –模型推理* 模块，TensorFlow Lite `.tflite` 模型使用*tflite –模型推理* 模块。模型不会编入固件，而是存放在板级存储中、运行时加载。本指南介绍如何添加并运行一个新模型。

6.3.1 1. 获取或转换模型

先选择模型运行时：

- ESP-DL：可从 ESP-DL 模型库 获取现成的 `.espdl`，或使用 ESP-DL 的量化/导出工具链将自有模型转换为 `.espdl` 格式，并与目标芯片（ESP32-P4、ESP32-S3 或 ESP32-S31）匹配。
- TFLite Micro：使用 TensorFlow Lite `.tflite` flatbuffer，并确保模型适配 TensorFlow Lite Micro 以及固件启用的算子集合。在当前板级资源下，量化 int8 模型通常是更实际的目标。

向仓库添加共享资源时，请保持 `models/` 下的目录结构，参照 `models/espdet/` 和 `models/tflite/`。

6.3.2 2. 将模型拷贝到板级存储

将 `.espdl` 或 `.tflite` 文件放到固件可读取的存储中，例如 `/sdcard` 或 `/flash`：

- SD 卡：将文件拷贝到卡上，挂载点为 `/sdcard`。
- 片上 FAT（`ffat`）：数据分区通过 USB MSC 暴露，可将文件拖入大容量存储盘，路径为 `/flash`。

6.3.3 3. 选择合适的 API

根据运行时和模型任务选择对应 API：

任务	API	结果
ESP-DL 目标检测（ESPDet）	*espdl.ESPDet*	`(x, y, w, h, score, category)`
ESP-DL 目标检测（YOLO11）	*espdl.YOLO11*	`(x, y, w, h, score, category)`
ESP-DL 姿态检测	*espdl.YOLO11nPose*	检测结果加 17 个 COCO 关键点
ESP-DL 图像分类	*espdl.ImageNetCls*	`(label, score)`
ESP-DL 输出由 Python 解码	*espdl.Model*	带 tensor 元数据的原始输出字节
通用 TFLite Micro 执行	*tflite.Model*	原始输出 tensor，或回调返回值

对于 ESP-DL 封装，若模型需要不同的预处理或过滤参数，可向构造函数传入 `mean`、`std`、`score`、`nms`、`topk` 或 `softmax`。当需要保留 ESP-DL 推理、但在 Python 中解码输出时，应检查 `espdl.Model.inputs()` 和 `espdl.Model.outputs()`，再解码 `predict()` 返回的 `RawTensor` 字节。对于 TFLite Micro 模型，应检查 `input_shape`、`input_dtype`、`input_scale`、`input_zero_point`、`output_shape`、`output_dtype`、`output_scale` 和 `output_zero_point`，并在 Python 或辅助代码中实现模型相关的预处理或后处理。

6.3.4 4. 运行 ESP-DL 推理

```
import sensor, image, espdl

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)

det = espdl.ESPDet("/sdcard/my_model.espdl", score=0.5, nms=0.45)

while True:
    img = sensor.snapshot()
    for x, y, w, h, score, category in det.detect(img):
        img.draw_rectangle(x, y, w, h, color=(255, 0, 0))
    img.flush()
```

6.3.5 5. 在 Python 中解码 ESP-DL 输出

当模型可使用 ESP-DL 图像预处理和推理，但输出 tensor 需要由 Python 侧解码时，可使用*espdl.Model*。

```
import sensor, espdl

model = espdl.Model("/sdcard/my_model.espdl", mean=(0, 0, 0), std=(255, 255, 255),␣
```

(续下页)

(接上页)

```
↪letterbox=True)
try:
    print("inputs:", model.inputs())
    print("outputs:", model.outputs())
    img = sensor.snapshot()
    outputs = model.predict(img)
    for name, tensor in outputs.items():
        _, shape, dtype, exponent, raw = tensor
        print(name, shape, dtype, exponent, len(raw))
finally:
    model.deinit()
```

每个输出 tensor 都会以原始字节形式返回，并附带 `shape`、`dtype` 和 ESP-DL `exponent` 元数据。应按 tensor 类型解码字节、应用 exponent 比例，再执行 sigmoid、框解码、NMS、分类 top-k 或坐标去 letterbox 等模型相关后处理。

6.3.6 6. 运行 TFLite Micro 推理

```
import tflite

def fill_input(buffer, shape, dtype_code):
    # 按模型要求填充量化后的输入字节。
    ...

model = tflite.Model("/sdcard/my_model.tflite")
try:
    print("input:", model.input_shape, model.input_dtype, model.input_scale, model.
↪input_zero_point)
    print("output:", model.output_shape, model.output_dtype, model.output_scale,␣
↪model.output_zero_point)
    outputs = model.predict([fill_input])
    raw = outputs[0]
finally:
    model.deinit()
```

ESP-DL 可运行脚本见 `example/03-Machine-Learning/00-ESP-DL/``（``espdet_pico.py`、`espdet_pico_python.py`、`yolo11.py`、`yolo11n_pose.py`、`imagenet_cls.py`），TFLite Micro 可运行脚本见 `example/03-Machine-Learning/01-TFLite/``（``person_detection.py` 和 `sine.py`）。

6.3.7 7. 可选：性能分析和验证

在验证新的 `.espdl` 模型性能时，可使用*`espdl.load_model()`* 并设置 `profile=True`，以输出 ESP-DL 的性能分析信息。对于 TFLite Micro 模型，可打印 `model.len`、`model.ram`、输入元数据和输出元数据，先确认 flash 大小、arena 大小、tensor 布局和量化信息，再调试后处理。

6.4 训练 ESPDet Pico 模型

ESP-VISION 通过*`espdl.ESPDet`* 运行 ESPDet Pico 目标检测模型。模型训练、导出和量化在 ESP-Detection 项目中完成，ESP-VISION 侧只负责加载导出的 `.espdl` 文件，并通过 `sensor`、`image` 和 `espdl` 模块完成实时推理。

本文以单类别目标检测模型为例，说明从环境安装、数据集准备、训练、量化导出到 ESP-VISION 上运行的完整流程。

6.4.1 1. 准备 ESP-Detection 环境

训练仓库地址如下：

```
git clone -b feat/esp-vision-train https://github.com/YanKE01/esp-detection.git
cd esp-detection
```

ESP-Detection 使用 Python 训练环境，不需要先安装 ESP-IDF。只有编译 ESP-VISION 固件，或者运行 ESP-DL 生成的 C++ 示例工程时才需要 ESP-IDF。

ESP-Detection 使用 `uv` 管理依赖。根据操作系统选择对应安装方式。

Linux/macOS：

```
curl -LsSf https://astral.sh/uv/install.sh | sh
```

Windows PowerShell：

```
powershell -ExecutionPolicy ByPass -c "irm https://astral.sh/uv/install.ps1 | iex"
```

安装完成后，重新打开终端，或根据安装脚本提示刷新当前终端的 `PATH`。确认 `uv` 可用后，同步项目环境：

```
uv sync
```

`uv sync` 会安装 Ultralytics、PyTorch、ONNX、ONNX Runtime、OpenCV 和 `esp-ppq`。如果机器有 NVIDIA GPU，训练和量化会明显更快；没有 GPU 时也可以走 CPU，但训练时间会长很多。

环境安装完成后，可以先确认命令入口可用：

```
uv run python espdet_train.py --help
uv run python -m deploy.quantize_aligned --help
```

6.4.2 2. 准备数据集

使用 Roboflow 准备数据集时，推荐导出 `YOLOv11` 格式。导出后可将数据集整理到 ESP-Detection 仓库，例如：

```
datasets/my_object/
  images/
    train/
    val/
  labels/
    train/
    val/
```

ESP-Detection 读取的是 YOLO detection 标签格式。每张图片在 `labels` 目录下有一个同名 `.txt` 标签文件。例如 `images/train/0001.jpg` 对应 `labels/train/0001.txt`。标签文件每一行表示一个目标框：

```
class_id x_center y_center width height
```

其中 `x_center`、`y_center`、`width` 和 `height` 都是相对图片宽高归一化后的浮点数，范围通常为 `0.0` 到 `1.0`。

例如单类别安全帽检测的数据可以写成：

```
0 0.5123 0.4381 0.1840 0.1365
```

数据集标签应和后续 ESP-VISION 端显示的类别名保持一致。

接着在 `cfg/datasets/` 下创建数据集配置，例如 `cfg/datasets/my_object.yaml`：

```yaml
path: datasets/my_object
train: images/train
val: images/val
test:

names:
  0: my_object
```

path 是数据集根目录，train 和 val 是相对 path 的图片目录。names 的顺序非常重要，它决定了板端 espdl.ESPDet.detect() 返回的 category 含义。训练完成后不要随意改变这个顺序。

如果是多类别模型，继续添加类别即可：

```yaml
names:
  0: helmet
  1: person
  2: vest
```

6.4.3 3. 训练 ESPDet Pico

ESP-Detection 提供了 espdet_train.py 作为只训练入口。它会使用 cfg/models/espdet_pico.yaml 构建 ESPDet Pico 网络，并输出最佳权重。

单类别模型训练示例：

```
uv run python espdet_train.py \
  --class_name my_object \
  --pretrained_path None \
  --dataset cfg/datasets/my_object.yaml \
  --size 320 320
```

关键参数说明：

参数	说明
--class_name	训练任务名称，会影响 Ultralytics 输出目录名称。
--pretrained_path	预训练权重路径。没有预训练权重时使用 None，脚本会从 cfg/models/espdet_pico.yaml 构建新模型。
--dataset	数据集 YAML 路径。
--size	输入尺寸，格式为 height width。例如 320 320 表示 320x320 输入。

训练脚本内部默认使用较长训练轮数、较大 batch、RAM cache 和数据增强策略。对于小数据集，训练可能需要观察验证集曲线，避免过拟合。训练完成后，终端会打印类似下面的信息：

```
Training complete: runs/detect/my_object
Best weights: runs/detect/my_object/weights/best.pt
```

后续量化时使用 weights/best.pt。

6.4.4 4. 准备校准数据

导出 .espdl 前需要做 int8 量化，量化需要校准图片。校准图片应尽量覆盖真实使用场景，例如不同光照、距离、角度、背景和目标大小。

最简单的做法是直接使用验证集图片：

```
datasets/my_object/images/val
```

也可以单独准备一个校准目录：

```
deploy/my_object_calib/
  0001.jpg
  0002.jpg
  0003.jpg
```

校准图片不需要标签，但分布要接近摄像头实际输入。如果校准集过于单一，可能出现模拟器指标正常、板端分数偏低或漏检的问题。

6.4.5 5. 量化并导出.espdl

使用 `deploy.quantize_aligned` 将训练好的 `best.pt` 导出为 ESP-DL 可加载的 `.espdl` 模型：

```
uv run python -m deploy.quantize_aligned \
  --model runs/detect/my_object/weights/best.pt \
  --size 320 320 \
  --target esp32p4 \
  --calib_data datasets/my_object/images/val \
  --espdl deploy/espdet_pico_320_320_my_object.espdl \
  --data cfg/datasets/my_object.yaml
```

参数说明：

参数	说明
`--model`	训练得到的 `best.pt`，也可以是已导出的 ONNX。
`--size`	模型输入尺寸，必须和训练尺寸一致。
`--target`	目标芯片，例如 `esp32p4` 或 `esp32s3`。应和最终运行模型的芯片匹配。
`--calib_data`	校准图片目录。
`--espdl`	导出的 ESP-DL 模型路径。
`--data`	数据集 YAML。传入后脚本会额外输出模拟器验证指标。

该量化脚本会在内部完成 `pt` 到 ONNX 的准备，然后使用 ESP-PPQ 导出 int8 ESP-DL 模型。当前配置使用 percentile 校准、bias correction 和面向 scale 一致性的 fusion 设置。脚本会打印导出模型的算子统计；如果传入 `--data`，还会打印模拟器 `mAP50` 和 `mAP50-95`。

量化完成后，确认 `.espdl` 文件存在：

```
ls -lh deploy/espdet_pico_320_320_my_object.espdl
```

6.4.6 6. 添加模型元数据

如果模型需要作为 ESP-VISION 仓库中的共享模型发布，建议放在 `models/espdet/pico/<name>/` 下：

```
models/espdet/pico/my_object/
  README.md
  espdet_pico_320_320_my_object.espdl
  espdet_pico_320_320_my_object.json
```

其中 `.espdl` 是实际模型文件，`.json` 是模型列表和工具链读取的 sidecar 元数据。最小 JSON 示例：

```
{
    "name": "ESPDet Pico My Object",
    "architecture": "ESPDet Pico",
    "api": "espdl.ESPDet",
    "task": "detection",
    "input": "320x320",
```

(续下页)

(接上页)

```
    "inputFormat": "RGB565",
    "dataset": "My Object",
    "labels": ["my_object"],
    "sizeBytes": 574864,
    "description": "Detects my_object in camera images."
}
```

`labels` 必须和数据集 YAML 中 `names` 的顺序一致。`sizeBytes` 应填写实际模型文件大小，在 Linux 上可以这样获取：

```
stat -c '%s' models/espdet/pico/my_object/espdet_pico_320_320_my_object.espdl
```

`README.md` 建议说明模型用途、数据集来源、输入尺寸、量化指标和基本使用方法。对于公开数据集，数据集链接放在 README 中即可，不建议写进 JSON。

6.4.7 7. 拷贝模型到板端存储

ESP-VISION 运行时从文件系统加载模型。常用路径有两个：

路径	用途
`/sdcard`	SD 卡。适合模型较多、文件较大或频繁替换的场景。
`/flash`	片上 FAT 数据分区。通常通过 USB MSC 暴露为 U 盘，适合放少量常用模型。

例如将模型复制到 SD 卡根目录后，板端路径可以写成：

```
MODEL = "/sdcard/espdet_pico_320_320_my_object.espdl"
```

如果复制到 flash 根目录，则路径通常为：

```
MODEL = "/flash/espdet_pico_320_320_my_object.espdl"
```

6.4.8 8. 在 ESP-VISION 上运行

下面是一个完整的 MicroPython 推理脚本：

```
import espdl
import sensor
import time

MODEL = "/sdcard/espdet_pico_320_320_my_object.espdl"
LABELS = ("my_object",)

sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
sensor.skip_frames(time=1000)

det = espdl.ESPDet(MODEL, score=0.5, nms=0.7)

try:
    while True:
        img = sensor.snapshot()
        for x, y, w, h, score, category in det.detect(img):
            label = LABELS[category] if category < len(LABELS) else str(category)
```

(续下页)

(接上页)

```
            img.draw_rectangle(x, y, w, h, color=(255, 0, 0), thickness=2)
            img.draw_string(x, max(0, y - 12), "%s %.2f" % (label, score),␣
↪color=(255, 0, 0))
        img.flush()
        time.sleep_ms(20)
finally:
    det.deinit()
```

sensor 输出应使用 RGB565。score 是置信度阈值，nms 是 NMS 阈值。第一次上板时建议先用较低 score 观察模型是否能稳定出框，再根据误检和漏检情况调整。

6.4.9 9. 验证和调参

建议按以下顺序验证：

- 先看训练日志和验证集指标，确认浮点模型没有明显欠拟合或过拟合。
- 再看量化脚本输出的模拟器指标，确认 int8 模型没有大幅掉点。
- 然后在 ESP-VISION 上运行真实摄像头脚本，观察不同距离、角度和光照下的检测框。
- 最后调节 score 和 nms，并固定最终模型、标签和示例脚本。

如果模拟器指标正常但板端效果差，优先检查这些问题：

- --size 是否和训练尺寸完全一致。
- labels 是否和数据集 YAML 中 names 顺序一致。
- 校准图片是否覆盖真实摄像头输入分布。
- 板端摄像头画面是否曝光异常、颜色异常或目标过小。
- score 是否设得过高，导致低分检测结果被过滤。

模型文件、JSON 元数据、README 和测试脚本都确认后，就可以将模型加入 ESP-VISION 的 models/ 和 example/ 目录，作为可复用模型发布。

6.5 添加新的开发板

一块开发板的板级包集中在单棵目录树 boards/<BOARD>/ 中：顶层为 ESP-VISION 文件，boards/<BOARD>/port/ 子目录为 MicroPython ESP32 移植文件。构建时会将 boards/<BOARD>/port/ 投射到生成的 MicroPython 副本的 ports/esp32/boards/<BOARD>/。建议从 TEMPLATE 板开始。

6.5.1 MicroPython 移植侧

位于 boards/<BOARD>/port/：

文件	用途
mpconfigboard.cmake	IDF_TARGET 配置值与 SDKCONFIG_DEFAULTS 链。
mpconfigboard.h	MicroPython 功能开关与 USB 字符串。
sdkconfig.board	板级 ESP-IDF Kconfig 覆盖项。
partitions-*.csv	分区表。
board.json、board.md	上游板卡清单元数据。

6.5.2 ESP-VISION 侧

位于 boards/<BOARD>/：

文件	用途
`boardconfig.h`	引脚分配与板级运行时常量。
`imlib_config.h`	OpenMV `imlib` 功能开关。
`manifest.py`	冻结的 Python 模块。
`camera.c`	板级相机后端。
`display.c`	LCD 面板与背光实现。
`sdcard.c`	SD 卡供电与插卡检测实现。

当板目录下存在 `camera.c`、`display.c`、`sdcard.c` 时，`micropython.cmake` 会自动选用它们，并包含板卡可选的 `board.cmake`。

6.5.3 构建与烧录

```
idf.py --board <NEW_BOARD> -p /dev/ttyACM0 build flash monitor
```

备注： 本页为起步提纲。详细的适配步骤（传感器选择、PPA 配置、显示时序）将在后续补全。

Chapter 7

方案架构

ESP-VISION 围绕 MicroPython 固件构建、板级硬件后端、共享平台服务以及面向 Python 的视觉模块进行组织。代码按是否触及 MicroPython（`mp_obj_t` / `py/*.h`）进行分层。

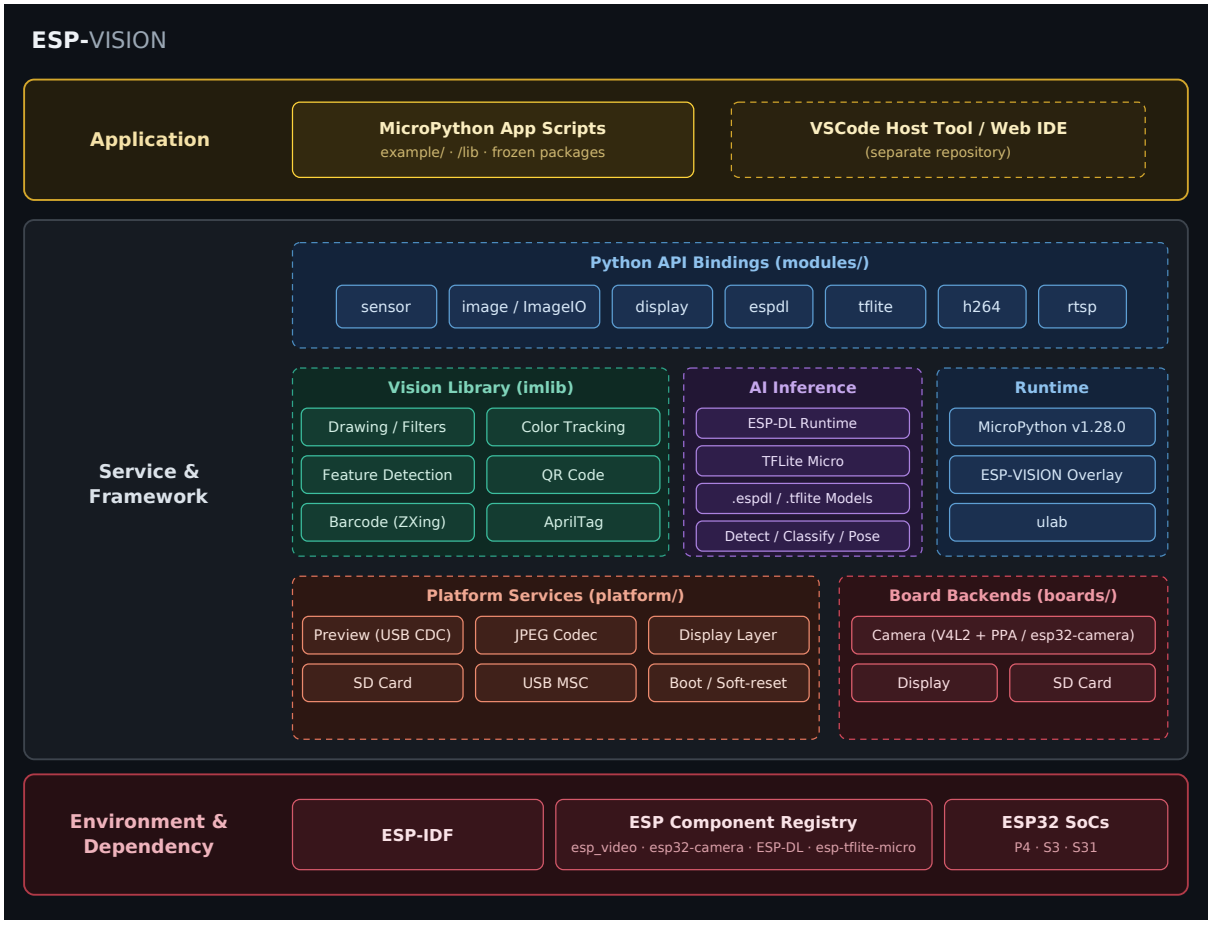
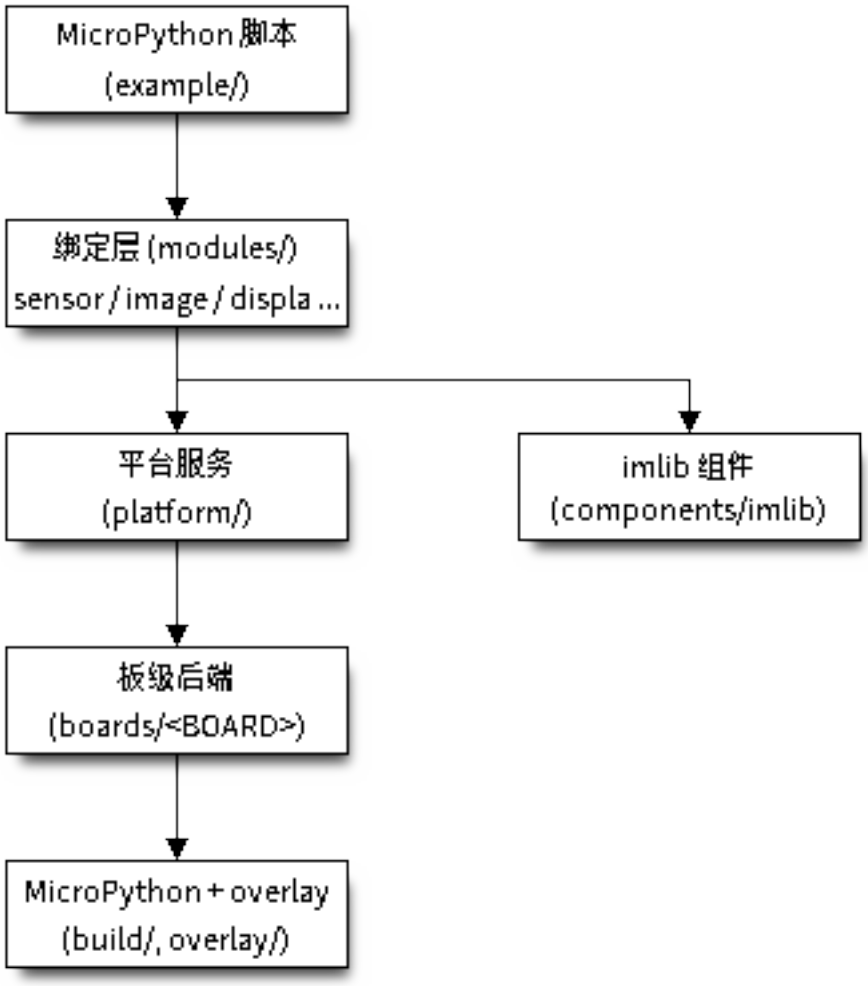


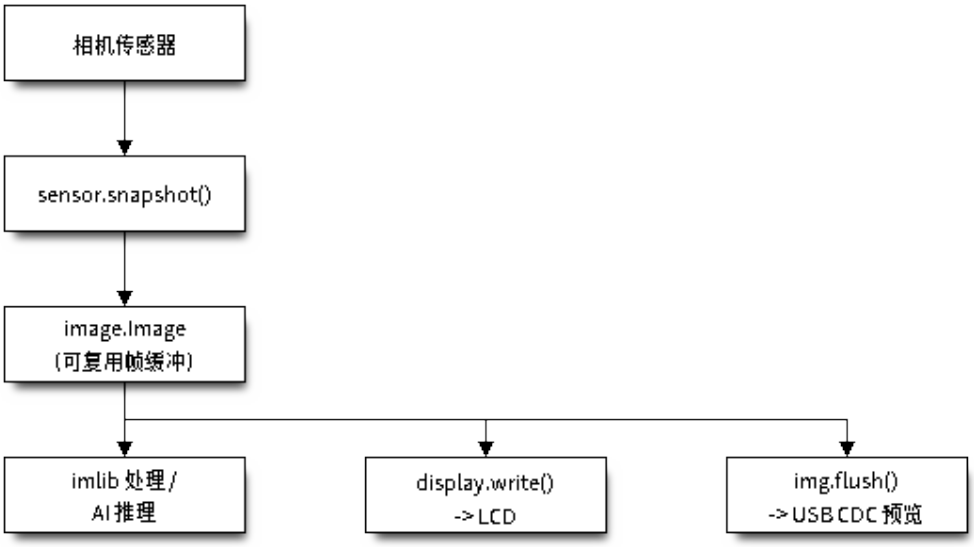
图 1: ESP-VISION 分层架构总览

7.1 分层概览



- **绑定层**（`modules/`）：即 `USER_C_MODULES` 层。主要模块 `image`、`sensor`、`display`、`espdl` 和 `tflite` 通过 `MP_REGISTER_MODULE` 自注册。`py_imageio.c` 提供 `image.ImageIO` 类型，`py_helper.c` 为共享辅助代码。绑定层只做对象转换与轻量 API 适配，重逻辑放在纯 C 或 `platform/` 中。
- **平台服务**（`platform/`）：自研的 ESP32 胶水层。`preview.c`（通过 USB CDC 的 EVFRAME JPEG 预览）、`display.c`（通用显示层）、`sdcard.c`（挂载到 `/sdcard`）、`usb_msc.c`（通过 TinyUSB MSC 暴露 `ffat` 分区）、`jpeg.c`（硬件或软件 JPEG）、`debug.c`，以及 `main.c`（启动初始化与软复位循环）。
- **imlib 组件**（`components/imlib/`）：纯 C 视觉算法，作为以 MIT 维护的 IDF 组件，源自 OpenMV `lib/imlib`。
- **板级后端**（`boards/<BOARD>/`）：各板配置及真实的相机/显示/SD 卡实现。P4X 与 S31 使用 `esp_video`/V4L2，P4X 还使用 PPA；S3 使用 `esp32-camera`。
- **MicroPython + overlay**：以 MicroPython v1.28.0 为固定基线；项目改动位于 `overlay/micropython/`，并应用到 `build/micropython/` 下的生成副本。

7.2 采集到输出的数据流



`sensor.snapshot()` 将一帧采集到可复用的帧缓冲中，并封装为 `image.Image`。脚本随后对图像进行 `imlib` 处理、ESP-DL 推理或 TFLite Micro 推理，再通过 `display.write()` 送往 LCD，或通过 `img.flush()` 送往主机预览。

7.3 源码结构

路径	职责
`idf_ext.py`	仓库根目录下板级感知的 `idf.py` 扩展。
`micropython.cmake`	集成枢纽：注册用户模块、平台与板级源文件、include 路径、条件性 `zxing` 与 `ulab`。
`lib/`	固定版本的第三方子模块（MicroPython、`ulab`、ZXing-C++）。
`overlay/micropython/`	采用 MicroPython 路径布局的 ESP-VISION MicroPython 增量。
`boards/`	各板配置、冻结清单与板级外设后端。
`platform/`	共享运行时服务（相机、预览、存储、显示、USB、JPEG）。
`modules/`	MicroPython C/C++ 绑定（`sensor`、`image`、`display`、`imageio`、`espdl`、`tflite`，以及随芯片启用的 `h264` 和 `rtsp`）。
`components/`	ESP-IDF 组件，包括 OpenMV `imlib` 与 ZXing 后端。
`models/`	运行时从板级存储加载的可选模型资源。
`example/`	MicroPython 示例脚本。
`stubs/`	描述 C 模块的 `.pyi` 类型存根。

7.4 板卡的组成

一块开发板的定义集中在单棵目录树 `boards/<BOARD>/` 中：

- ESP-VISION 侧（顶层）：`boardconfig.h`、`imlib_config.h`、`manifest.py`，以及可选的 `camera.c` / `display.c` / `sdcard.c`。

- MicroPython 移植侧（`boards/<BOARD>/port/`）：IDF 目标、sdkconfig、分区表、USB 字符串。构建时会将该子目录投射到生成的 MicroPython 副本的 `ports/esp32/boards/<BOARD>/`。

完整步骤请参阅添加新的开发板。

7.5 随芯片变化的源码

`micropython.cmake` 根据 `IDF_TARGET` 和板级配置选择模块。ESP32-P4 构建包含 `h264` 与 `rtsp`；当前 P4 板级配置还会启用 ZXing-C++ 条形码后端。最终公开 API 矩阵见芯片与开发板支持。

7.6 MicroPython Overlay

ESP-VISION 以 MicroPython v1.28.0 作为固定上游基线。ESP32 port 的项目增量维护在 `overlay/micropython/` 下。`prepare-micropython` 构建步骤会将其应用到 `build/micropython/idf<ESP_IDF_VERSION>/micropython/` 下的生成副本；`lib/micropython` 子模块保持为干净的上游参考。

ESP-VISION 与上游项目的关系见项目关系；各组件的许可证见许可证。

Chapter 8

项目关系

本章说明 ESP-VISION 与 MicroPython、OpenMV 及主要第三方组件之间的关系。许可证与分发义务请参阅许可证。

8.1 ESP-VISION、MicroPython 与 OpenMV

三者的关系可以概括为：

- **MicroPython 是语言运行时和固件基础**。 ESP-VISION 以固定版本的 MicroPython ESP32 port 为基线，通过 `overlay/micropython/`、MicroPython 用户 C 模块以及 ESP-IDF 组件加入视觉和板级能力。它不是一个独立的 Python 解释器。
- **OpenMV 是部分视觉实现和 API 设计的上游来源**。 ESP-VISION 复用了 OpenMV `imlib` 的一部分图像算法，以及部分 `image` 绑定与辅助代码，并保留这些文件原有的许可证和版权声明。
- **ESP-VISION 是面向乐鑫芯片的独立集成项目**。相机、显示、存储、USB、编解码、ESP-DL 推理、TFLite Micro 推理和板级适配由 ESP-VISION 结合 ESP-IDF 组件实现。ESP-VISION 不是 OpenMV 固件的分支，也不包含完整的 OpenMV 硬件抽象层、IDE 或全部功能。

因此，`sensor`、`image` 等模块会尽量保持 OpenMV 风格，方便迁移已有脚本，但 **API 名称相同不表示行为和功能完全相同**。支持范围还会受到芯片、开发板、内存、硬件外设和编译选项影响。应以本指南的*API 参考* 为准。

8.2 依赖层次

ESP-VISION 固件中的主要代码层次如下：

```
用户脚本
   |
   +-- MicroPython 运行时与 ESP32 port
   |
   +-- ESP-VISION Python 模块
   |       +-- OpenMV 风格的 sensor / image API
   |       +-- display / imageio / espdl / tflite / h264 / rtsp
   |
   +-- 算法与中间件
   |       +-- OpenMV imlib 子集
   |       +-- ulab / ZXing-C++ / ESP-DL / TFLite Micro
   |
   +-- ESP-IDF、托管组件与板级后端
```

依赖来自三种位置：

- `lib/` 中的 Git submodule，例如 MicroPython、`ulab` 和 ZXing-C++；
- `components/` 与部分 `modules/` 中随仓库维护的第三方派生代码；
- `idf_component.yml` 解析并下载的 ESP Component Registry 组件。具体组件及版本可能随 ESP-IDF 版本、目标芯片和开发板而变化。

各依赖的版本、本地路径和许可证见许可证 清单。

Chapter 9

许可证

本章是 ESP-VISION 许可证相关说明的唯一参考。这里的内容用于帮助开发者理解代码来源，不构成法律意见；具体义务始终以对应版本的许可证原文和源文件头为准。

ESP-VISION 自有代码（`platform/`、大部分 `modules/`、`boards/` 以及构建文件）以 Apache License 2.0 发布，记录在仓库顶层的 `LICENSE` 中。引入的第三方代码保持其源文件、SPDX 标识或上游许可证声明的原始许可证；仓库顶层 `LICENSE` 不会覆盖或替换这些许可证。

9.1 许可证清单

下表列出与分发最相关的直接依赖。它不是所有传递依赖的完整清单。

项目或代码	本地路径	在 ESP-VISION 中的作用	许可证
MicroPython v1.28.0	`lib/micropython`	Python 运行时与 ESP32 port 基线	MIT
micropython-ulab 6.12	`lib/ulab`	数组与数值计算	MIT
OpenMV `imlib` 子集	`components/imlib`	图像处理与绘制算法	MIT，部分文件单独授权
OpenMV Python 绑定代码	`modules/py_image*`、`modules/py_helper*`	OpenMV 风格的 `image` API 绑定	MIT
OpenMV AprilTag 实现	`components/imlib/upstream/apriltag.c`	AprilTag 与矩形检测	BSD-2-Clause
ZXing-C++ v3.0.2	`lib/zxing-cpp`	一维条码识别后端	Apache-2.0
ESP-DL	Component Registry	模型推理运行时	MIT
TensorFlow Lite Micro / esp-tflite-micro	Component Registry	TensorFlow Lite Micro 推理运行时	Apache-2.0
esp_new_jpeg	Component Registry	软件 JPEG 编解码	Espressif MIT（限乐鑫产品）
esp32-camera	Component Registry	相机驱动	Apache-2.0
ESP-IDF	外部 SDK	构建系统、驱动和媒体组件	Apache-2.0

9.2 如何理解许可证

仓库顶层的 `LICENSE` 适用于 ESP-VISION 自有代码，但不会覆盖第三方许可证：

- 第三方文件继续由其原始许可证授权，并保留原始版权与许可证头；
- 同一个目录可能包含不同许可证，例如 `imlib` 主要为 MIT，而 `apriltag.c` 为 BSD-2-Clause；
- Apache-2.0、MIT 和 BSD 等宽松许可证通常允许组合分发，但仍需履行保留版权、许可证文本和声明等条件；
- 某些乐鑫组件使用带产品范围条件的许可证。例如当前 `esp_new_jpeg` 许可证文本限定用于乐鑫产品，不能只根据名称将其视为无附加条件的通用 MIT；
- 商标权、专利权、模型文件和数据集可能有独立条款，不能从源码许可证自动推导。

发布源码或固件前，至少应检查：

1. 仓库顶层 `LICENSE`；
2. 每个 Git submodule 的 `LICENSE`；
3. 所选构建生成的 `managed_components/*/LICENSE`；
4. 被修改或新增源文件的 SPDX 标识、许可证头和版权声明；
5. 模型、字体、测试图片等非代码资产的来源和使用条款。

9.3 OpenMV 与 GPL 代码路径

OpenMV 上游并非所有可选算法都采用相同许可证。ESP-VISION 在 `micropython.cmake` 和 `components/imlib/CMakeLists.txt` 中设置 `OMV_NO_GPL=1`，不编译 OpenMV 中受 GPL 条件控制的代码路径。这个开关只说明当前默认构建排除了这些代码，不应被理解为对任意新增文件许可证的自动判定。

修改 `imlib` 功能开关、同步 OpenMV 上游代码或加入新算法时，必须逐文件检查许可证；不要仅根据文件所在目录推断许可证。

9.4 增加第三方代码

向 ESP-VISION 增加第三方包或源文件时：

1. 固定可复现的版本或提交；
2. 逐文件确认许可证及其与项目分发方式的兼容性；
3. 保留上游版权、SPDX 标识、许可证文本和必要的 NOTICE；
4. 在本清单中记录来源、版本、本地路径、用途和许可证；
5. 确认构建开关确实排除了不准备分发的代码，而不是仅在文档中声明；
6. 许可证不清楚或存在商业发布约束时，在合入前完成法律审查。

Python 模块索引

索引

E

F

G

H

I

J

K

L

M

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y