V4L2框架分析学习 - RubyBoss的专栏 - 博客频道

Author：CJOK

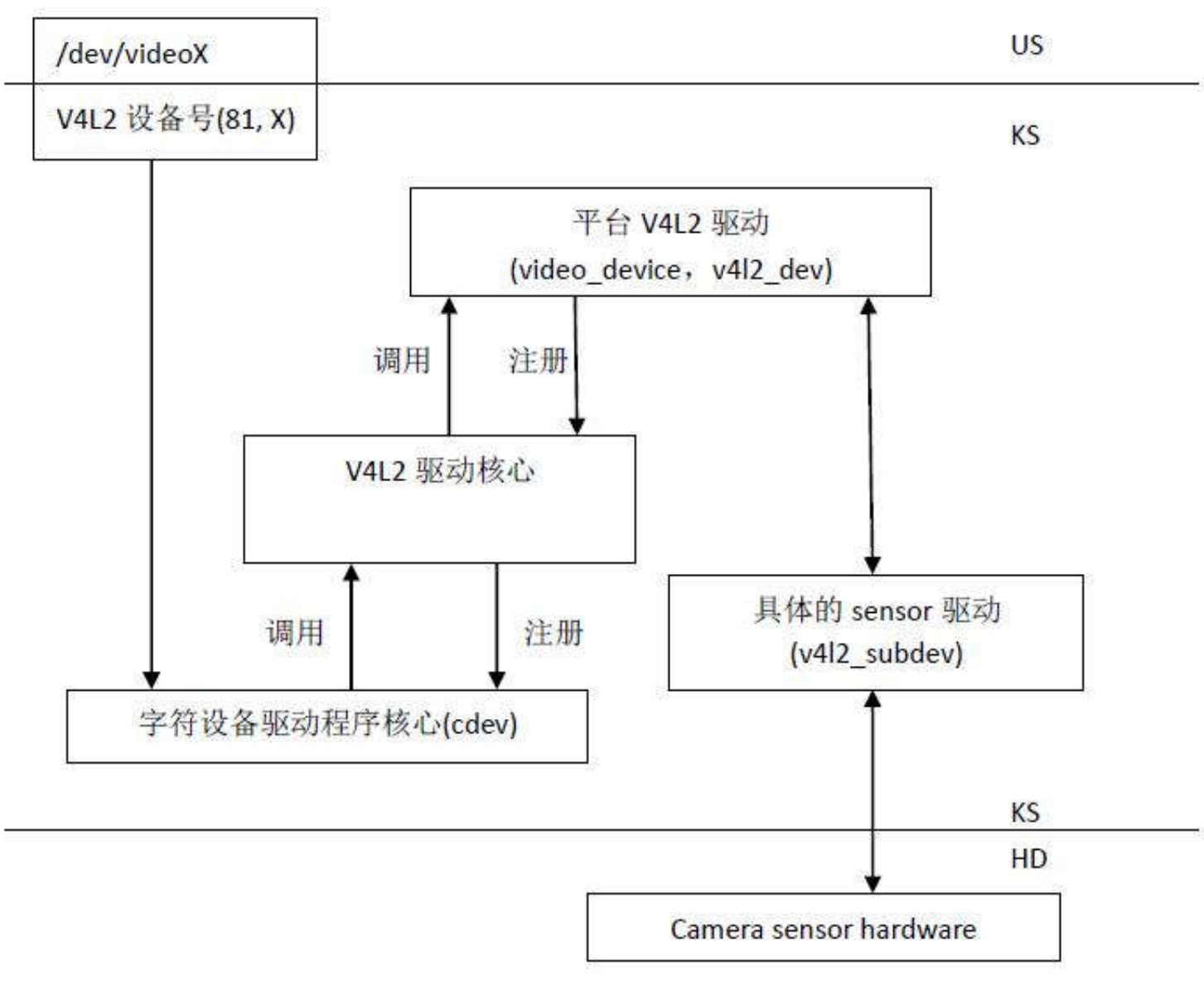
Contact：cjok.liao#gmail.com

SinaWeibo：@廖野cjok

1、概述

Video4Linux2是Linux内核中关于视频设备的内核驱动框架，为上层的访问底层的视频设备提供了统一的接口。凡是内核中的子系统都有抽象底层硬件的差异，为上层提供统一的接口和提取出公共代码避免代码冗余等好处。就像公司的老板一般都不会直接找底层的员工谈话，而是找部门经理了解情况，一个是因为底层屌丝人数多，意见各有不同，措辞也不准，部门经理会把情况汇总后再向上汇报；二个是老板时间宝贵。

V4L2支持三类设备：视频输入输出设备、VBI设备和radio设备(其实还支持更多类型的设备，暂不讨论)，分别会在/dev目录下产生videoX、radioX和vbiX设备节点。我们常见的视频输入设备主要是摄像头，也是本文主要分析对象。下图V4L2在Linux系统中的结构图：



Linux系统中视频输入设备主要包括以下四个部分：

字符设备驱动程序核心：V4L2本身就是一个字符设备，具有字符设备所有的特性，暴露接口给用户空间；

V4L2驱动核心：主要是构建一个内核中标准视频设备驱动的框架，为视频操作提供统一的接口函数；

平台V4L2设备驱动：在V4L2框架下，根据平台自身的特性实现与平台相关的V4L2驱动部分，包括注册video_device和v4l2_dev。

具体的sensor驱动：主要上电、提供工作时钟、视频图像裁剪、流IO开启等，实现各种设备控制方法供上层调用并注册v4l2_subdev。

V4L2的核心源码位于drivers/media/v4l2-core，源码以实现的功能可以划分为四类：

核心模块实现：由v4l2-dev.c实现，主要作用申请字符主设备号、注册class和提供video device注册注销等相关函数；

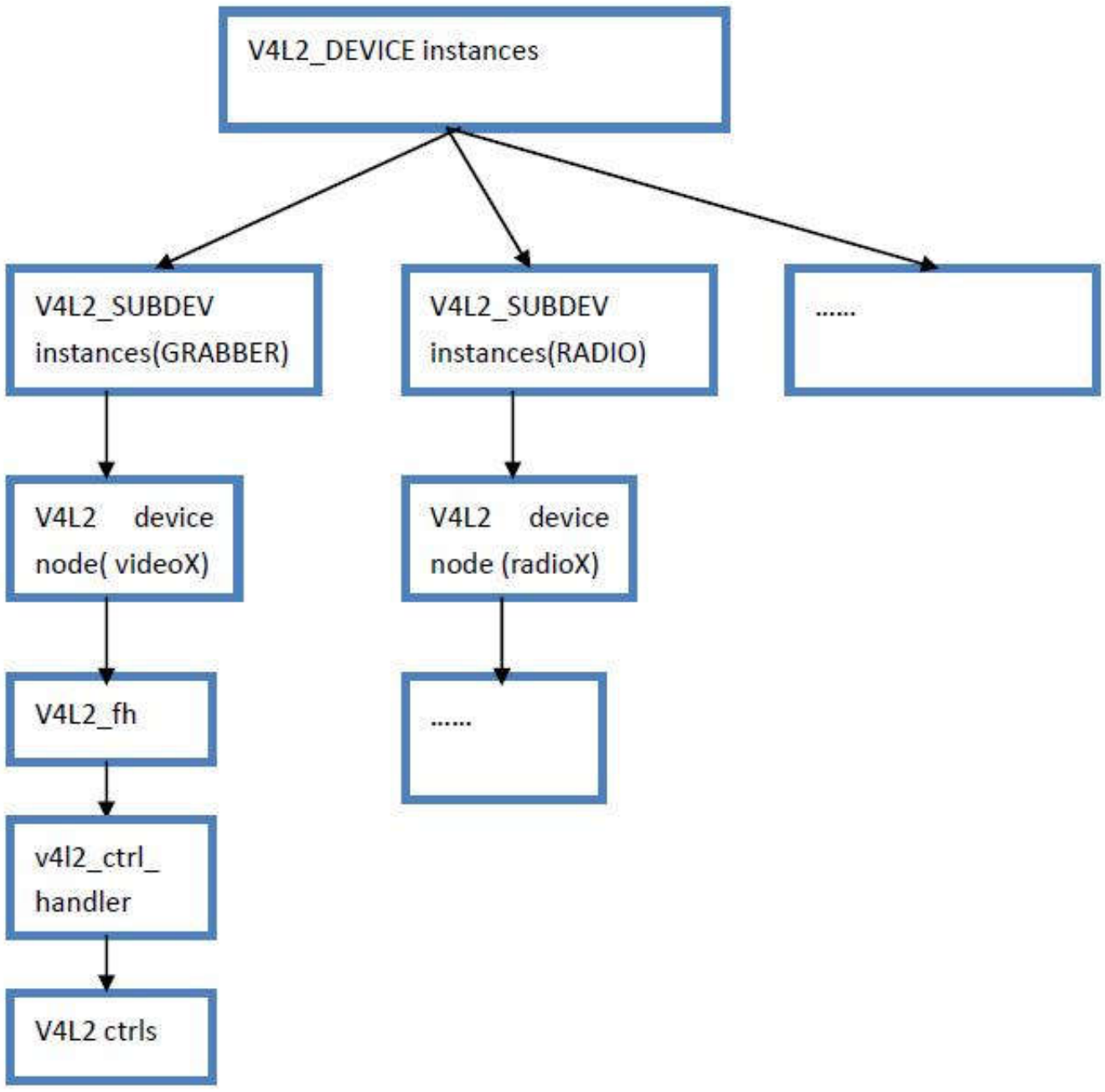
V4L2框架：由v4l2-device.c、v4l2-subdev.c、v4l2-fh.c、v4l2-ctrls.c等文件实现，构建V4L2框架；

Videobuf管理：由videobuf2-core.c、videobuf2-dma-contig.c、videobuf2-dma-sg.c、videobuf2-memops.c、videobuf2-vmalloc.c、v4l2-mem2mem.c等文件实现，完成videobuffer的分配、管理和注销。

Ioctl框架：由v4l2-ioctl.c文件实现，构建V4L2ioctl的框架。

2、V4L2框架

结构体v4l2_device、video_device、v4l2_subdev和v4l2_fh是搭建框架的主要元素。下图是V4L2框架的结构图：



从上图V4L2框架是一个标准的树形结构，v4l2_device充当了父设备，通过链表把所有注册到其下的子设备管理起来，这些设备可以是GRABBER、VBI或RADIO。V4l2_subdev是子设备，v4l2_subdev结构体包含了对设备操作的ops和ctrls，这部分代码和硬件相关，需要驱动工程师根据硬件实现，像摄像头设备需要实现控制上下电、读取ID、饱和度、对比度和视频数据流打开关闭的接口函数。Video_device用于创建子设备节点，把操作设备的接口暴露给用户空间。V4l2_fh是每个子设备的文件句柄，在打开设备节点文件时设置，方便上层索引到v4l2_ctrl_handler，v4l2_ctrl_handler管理设备的ctrls，这些ctrls(摄像头设备)包括调节饱和度、对比度和白平衡等。

v4l2_device

v4l2_device在v4l2框架中充当所有v4l2_subdev的父设备，管理着注册在其下的子设备。以下是v4l2_device结构体原型(去掉了无关的成员)：

```
struct v4l2_device {

                structlist_head subdevs;        //用链表管理注册的subdev

                charname[V4L2_DEVICE_NAME_SIZE];        //device  名字

                structkref ref;             //引用计数

                ……

};
```

可以看出v4l2_device的主要作用是管理注册在其下的子设备，方便系统查找引用到。

V4l2_device的注册和注销：

```
int  v4l2_device_register(struct device*dev, struct v4l2_device *v4l2_dev)

static void v4l2_device_release(struct kref *ref)
```

V4l2_subdev

V4l2_subdev代表子设备，包含了子设备的相关属性和操作。先来看下结构体原型：

```
struct v4l2_subdev {

                structv4l2_device *v4l2_dev;   //指向父设备
```

```
                //提供一些控制v4l2设备的接口
                conststruct v4l2_subdev_ops *ops;
                //向V4L2框架提供的接口函数
                conststruct v4l2_subdev_internal_ops *internal_ops;
                //subdev控制接口
                structv4l2_ctrl_handler *ctrl_handler;
                /* namemust be unique */
                charname[V4L2_SUBDEV_NAME_SIZE];
                /*subdev device node */
                structvideo_device *devnode;
};
```

每个子设备驱动都需要实现一个v4l2_subdev结构体，v4l2_subdev可以内嵌到其它结构体中，也可以独立使用。结构体中包含了对子设备操作的成员v4l2_subdev_ops和v4l2_subdev_internal_ops。

v4l2_subdev_ops结构体原型如下：

```
struct v4l2_subdev_ops {
//视频设备通用的操作：初始化、加载FW、上电和RESET等
                conststruct v4l2_subdev_core_ops              *core;
//tuner特有的操作
                conststruct v4l2_subdev_tuner_ops          *tuner;
//audio特有的操作
                conststruct v4l2_subdev_audio_ops          *audio;
//视频设备的特有操作：设置帧率、裁剪图像、开关视频流等
                conststruct  v4l2_subdev_video_ops          *video;
……
};
```

视频设备通常需要实现core和video成员，这两个OPS中的操作都是可选的，但是对于视频流设备video->s_stream(开启或关闭流IO)必须要实现。

v4l2_subdev_internal_ops结构体原型如下：

```
struct  v4l2_subdev_internal_ops  {
       //当subdev注册时被调用，读取IC的ID来进行识别
                int(*registered)(struct v4l2_subdev *sd);
                void(*unregistered)(struct v4l2_subdev *sd);
//当设备节点被打开时调用，通常会给设备上电和设置视频捕捉FMT
                int(*open)(struct v4l2_subdev *sd, struct v4l2_subdev_fh *fh);
                int(*close)(struct v4l2_subdev *sd, struct v4l2_subdev_fh *fh);
};
```

v4l2_subdev_internal_ops是向V4L2框架提供的接口，只能被V4L2框架层调用。在注册或打开子设备时，进行一些辅助性操作。

Subdev的注册和注销

当我们把v4l2_subdev需要实现的成员都已经实现，就可以调用以下函数把子设备注册到V4L2核心层：

int v4l2_device_register_subdev(struct v4l2_device*v4l2_dev, struct v4l2_subdev *sd)

当卸载子设备时，可以调用以下函数进行注销：

void v4l2_device_unregister_subdev(struct v4l2_subdev*sd)

video_device

video_device结构体用于在/dev目录下生成设备节点文件，把操作设备的接口暴露给用户空间。

```
struct video_device
{
        conststruct v4l2_file_operations *fops;    //V4L2设备操作集合
        /*sysfs */
        structdevice dev;                          /* v4l device */
        structcdev *cdev;                         //字符设备
/* Seteither parent or v4l2_dev if your driver uses v4l2_device */
        structdevice *parent;                       /* deviceparent */
        structv4l2_device *v4l2_dev;                /*v4l2_device parent */
/*Control handler associated with this device node. May be NULL. */
        structv4l2_ctrl_handler *ctrl_handler;
/*  指向video buffer队列*/
        structvb2_queue *queue;
        intvfl_type;          /* device type */
        intminor;   //次设备号
/* V4L2file handles */
        spinlock_t                                fh_lock; /* Lock for allv4l2_fhs */
        structlist_head              fh_list; /* List ofstruct v4l2_fh */
/*ioctl回调函数集，提供file_operations中的ioctl调用  */
        conststruct v4l2_ioctl_ops *ioctl_ops;
        ……
};
```

Video_device分配和释放，用于分配和释放video_device结构体：

struct video_device *video_device_alloc(void)

void video_device_release(struct video_device *vdev)

video_device注册和注销，实现video_device结构体的相关成员后，就可以调用下面的接口进行注册：

```
static inline int __must_checkvideo_register_device(struct video_device *vdev,
                                    inttype, int nr)
```

void video_unregister_device(struct video_device*vdev);

vdev：需要注册和注销的video_device；

type：设备类型，包括VFL_TYPE_GRABBER、VFL_TYPE_VBI、VFL_TYPE_RADIO和VFL_TYPE_SUBDEV。

nr：设备节点名编号，如/dev/video[nr]。

v4l2_fh

v4l2_fh是用来保存子设备的特有操作方法，也就是下面要分析到的v4l2_ctrl_handler，内核提供一组v4l2_fh的操作方法，通常在打开设备节点时进行v4l2_fh注册。

初始化v4l2_fh，添加v4l2_ctrl_handler到v4l2_fh：

```
void v4l2_fh_init(struct v4l2_fh *fh, structvideo_device *vdev)
```

添加v4l2_fh到video_device，方便核心层调用到：

```
void v4l2_fh_add(struct v4l2_fh *fh)
```

v4l2_ctrl_handler

v4l2_ctrl_handler是用于保存子设备控制方法集的结构体，对于视频设备这些ctrls包括设置亮度、饱和度、对比度和清晰度等，用链表的方式来保存ctrls，可以通过v4l2_ctrl_new_std函数向链表添加ctrls。

```
struct v4l2_ctrl *v4l2_ctrl_new_std(structv4l2_ctrl_handler *hdl,
                                    conststruct v4l2_ctrl_ops *ops,
                                    u32id, s32 min, s32 max, u32 step, s32 def)
```

hdl是初始化好的v4l2_ctrl_handler结构体；

ops是v4l2_ctrl_ops结构体，包含ctrls的具体实现；

id是通过IOCTL的arg参数传过来的指令，定义在v4l2-controls.h文件；

min、max用来定义某操作对象的范围。如：

```
v4l2_ctrl_new_std(hdl, ops, V4L2_CID_BRIGHTNESS,-208, 127, 1, 0);
```

用户空间可以通过ioctl的VIDIOC_S_CTRL指令调用到v4l2_ctrl_handler，id透过arg参数传递。

3、ioctl框架

你可能观察到用户空间对V4L2设备的操作基本都是ioctl来实现的，V4L2设备都有大量可操作的功能(配置寄存器)，所以V4L2的ioctl也是十分庞大的。它是一个怎样的框架，是怎么实现的呢？

Ioctl框架是由v4l2_ioctl.c文件实现，文件中定义结构体数组v4l2_ioctls，可以看做是ioctl指令和回调函数的关系表。用户空间调用系统调用ioctl，传递下来ioctl指令，然后通过查找此关系表找到对应回调函数。

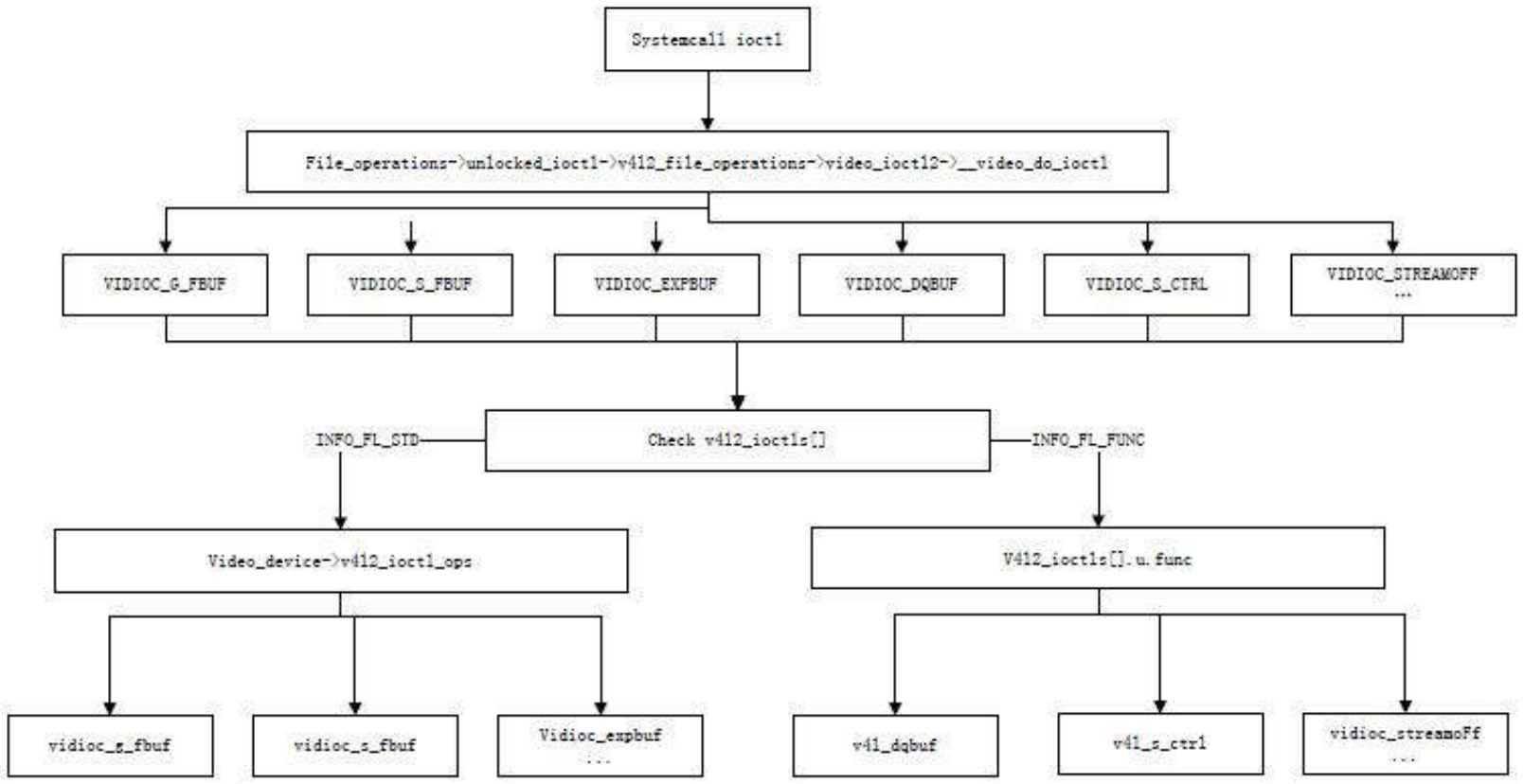
以下是截取数组的两项：

```
IOCTL_INFO_FNC(VIDIOC_QUERYBUF, v4l_querybuf,v4l_print_buffer, INFO_FL_QUEUE | INFO_FL_CLEAR(v4l2_buffer, length)),

IOCTL_INFO_STD(VIDIOC_G_FBUF, vidioc_g_fbuf,v4l_print_framebuffer, 0),
```

内核提供两个宏(IOCTL_INFO_FNC和IOCTL_INFO_STD)来初始化结构体，参数依次是ioctl指令、回调函数或者v4l2_ioctl_ops结构体成员、debug函数、flag。如果回调函数是v4l2_ioctl_ops结构体成员，则使用IOCTL_INFO_STD；如果回调函数是v4l2_ioctl.c自己实现的，则使用IOCTL_INFO_FNC。

IOCTL调用的流程图如下：



用户空间通过打开/dev/目录下的设备节点，获取到文件的file结构体，通过系统调用ioctl把cmd和arg传入到内核。通过一系列的调用后最终会调用到__video_do_ioctl函数，然后通过cmd检索v4l2_ioctls[]，判断是INFO_FL_STD还是INFO_FL_FUNC。如果是INFO_FL_STD会直接调用到视频设备驱动中video_device->v4l2_ioctl_ops函数集。如果是INFO_FL_FUNC会先调用到v4l2自己实现的标准回调函数，然后根据arg再调用到video_device->v4l2_ioctl_ops或v4l2_fh->v4l2_ctrl_handler函数集。

4、IO访问

V4L2支持三种不同IO访问方式(内核中还支持了其它的访问方式，暂不讨论)：

read和write，是基本帧IO访问方式，通过read读取每一帧数据，数据需要在内核和用户之间拷贝，这种方式访问速度可能会非常慢；

内存映射缓冲区(V4L2_MEMORY_MMAP)，是在内核空间开辟缓冲区，应用通过mmap()系统调用映射到用户地址空间。这些缓冲区可以是大而连续DMA缓冲区、通过vmalloc()创建的虚拟缓冲区，或者直接在设备的IO内存中开辟的缓冲区(如果硬件支持)；

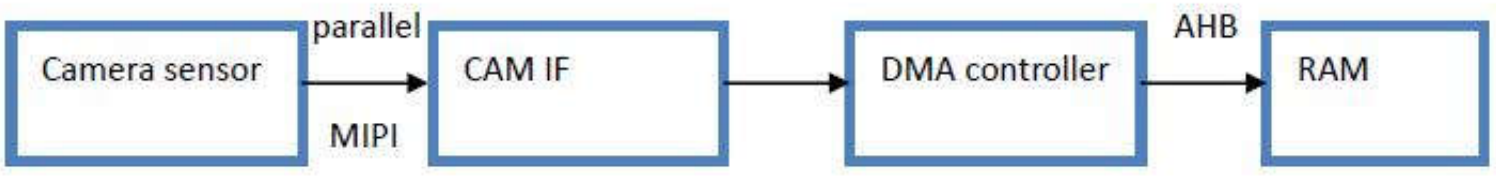
用户空间缓冲区(V4L2_MEMORY_USERPTR)，是用户空间的应用中开辟缓冲区，用户与内核空间之间交换缓冲区指针。很明显，在这种情况下是不需要mmap()调用的，但驱动为有效的支持用户空间缓冲区，其工作将也会更困难。

Read和write方式属于帧IO访问方式，每一帧都要通过IO操作，需要用户和内核之间数据拷贝，而后两种是流IO访问方式，不需要内存拷贝，访问速度比较快。内存映射缓冲区访问方式是比较常用的方式。

内存映射缓存区方式

硬件层的数据流传输

Camerasensor捕捉到图像数据通过并口或MIPI传输到CAMIF(camera interface)，CAMIF可以对图像数据进行调整(翻转、裁剪和格式转换等)。然后DMA控制器设置DMA通道请求AHB将图像数据传到分配好的DMA缓冲区。



待图像数据传输到DMA缓冲区之后，mmap操作把缓冲区映射到用户空间，应用就可以直接访问缓冲区的数据。

vb2_queue

为了使设备支持流IO这种方式，驱动需要实现struct vb2_queue，来看下这个结构体：

```
struct vb2_queue {
                enumv4l2_buf_type                                       type;   //buffer类型
                unsignedint                                                 io_modes;   //访问IO的方式:mmap、userptr etc
                conststruct vb2_ops                                     *ops;     //buffer队列操作函数集合
                conststruct vb2_mem_ops         *mem_ops;   //buffer memory操作集合
```

```
        structvb2_buffer                        *bufs[VIDEO_MAX_FRAME];   //代表每个buffer
        unsignedint                                     num_buffers;       //分配的buffer个数
……
};
```

Vb2_queue代表一个videobuffer队列，vb2_buffer是这个队列中的成员，vb2_mem_ops是缓冲内存的操作函数集，vb2_ops用来管理队列。

vb2_mem_ops

vb2_mem_ops包含了内存映射缓冲区、用户空间缓冲区的内存操作方法：

```
struct  vb2_mem_ops  {
        void                    *(*alloc)(void *alloc_ctx, unsignedlong size);   //分配视频缓存
        void                    (*put)(void *buf_priv);                          //释放视频缓存
//获取用户空间视频缓冲区指针
        void                    *(*get_userptr)(void *alloc_ctx,unsigned long vaddr,
                                                unsignedlong size, int write);
        void                    (*put_userptr)(void *buf_priv);             //释放用户空间视频缓冲区指针
//用于缓存同步
        void                    (*prepare)(void *buf_priv);
        void                    (*finish)(void *buf_priv);
        void                    *(*vaddr)(void *buf_priv);
        void                    *(*cookie)(void *buf_priv);
        unsignedint         (*num_users)(void *buf_priv);                   //返回当期在用户空间的buffer数
        int                         (*mmap)(void *buf_priv, structvm_area_struct *vma);   //把缓冲区映射到用户空间
};
```

这是一个相当庞大的结构体，这么多的结构体需要实现还不得累死，幸运的是内核都已经帮我们实现了。提供了三种类型的视频缓存区操作方法：连续的DMA缓冲区、集散的DMA缓冲区以及vmalloc创建的缓冲区，分别由videobuf2-dma-contig.c、videobuf2-dma-sg.c和videobuf-vmalloc.c文件实现，可以根据实际情况来使用。

vb2_ops

vb2_ops是用来管理buffer队列的函数集合，包括队列和缓冲区初始化

```
struct vb2_ops {
        //队列初始化
        int(*queue_setup)(struct vb2_queue *q, const struct v4l2_format *fmt,
                                        unsigned int *num_buffers, unsigned int*num_planes,
                                        unsigned int sizes[], void *alloc_ctxs[]);
        //释放和获取设备操作锁
        void(*wait_prepare)(struct vb2_queue *q);
        void(*wait_finish)(struct vb2_queue *q);
        //对buffer的操作
        int(*buf_init)(struct vb2_buffer *vb);
```

```
                int(*buf_prepare)(struct vb2_buffer *vb);

                int(*buf_finish)(struct vb2_buffer *vb);

                void(*buf_cleanup)(struct vb2_buffer *vb);
//开始视频流

                int(*start_streaming)(struct vb2_queue *q, unsigned int count);
//停止视频流

                int(*stop_streaming)(struct vb2_queue *q);
//把VB传递给驱动

                void(*buf_queue)(struct vb2_buffer *vb);
};
```

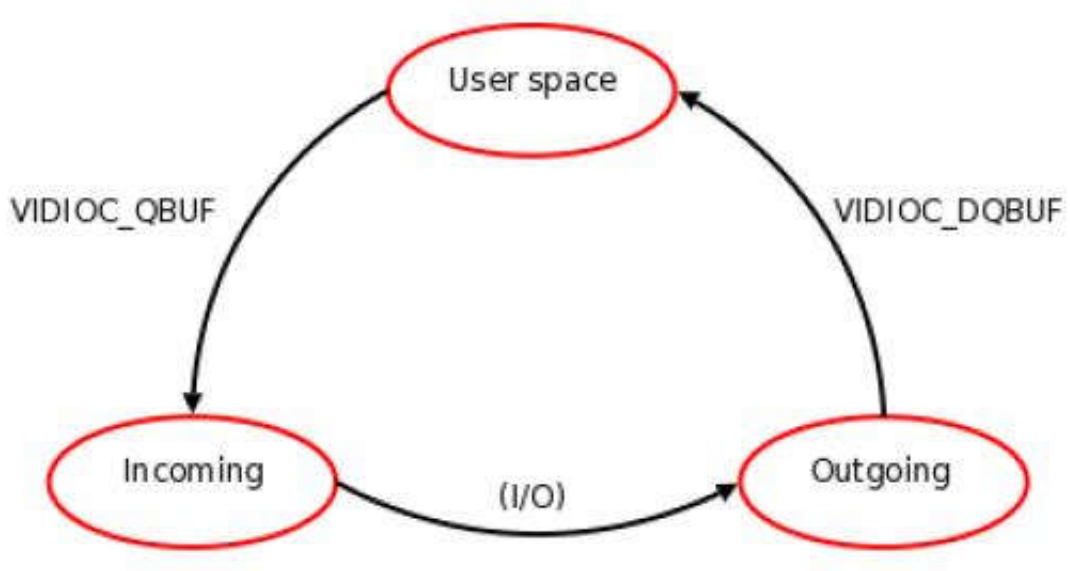
vb2_buffer是缓存队列的基本单位，内嵌在其中v4l2_buffer是核心成员。当开始流IO时，帧以v4l2_buffer的格式在应用和驱动之间传输。一个缓冲区可以有三种状态：

在驱动的传入队列中，驱动程序将会对此队列中的缓冲区进行处理，用户空间通过IOCTL:VIDIOC_QBUF把缓冲区放入到队列。对于一个视频捕获设备，传入队列中的缓冲区是空的，驱动会往其中填充数据；

在驱动的传出队列中，这些缓冲区已由驱动处理过，对于一个视频捕获设备，缓存区已经填充了视频数据，正等用户空间来认领；

用户空间状态的队列，已经通过IOCTL:VIDIOC_DQBUF传出到用户空间的缓冲区，此时缓冲区由用户空间拥有，驱动无法访问。

这三种状态的切换如下图所示：



v4l2_buffer结构如下：

```
struct v4l2_buffer {
                __u32                                                   index;   //buffer  序号
                __u32                                                   type;     //buffer类型
                __u32                                                   bytesused;    缓冲区已使用byte数
                __u32                                                   flags;
                __u32                                                   field;
                structtimeval                     timestamp;   //时间戳，代表帧捕获的时间
                structv4l2_timecode             timecode;
                __u32                                                   sequence;
                /*memory location */
                __u32                                                   memory;   //表示缓冲区是内存映射缓冲区还是用户空间缓冲区
                union {
```

```
                __u32                    offset;   //内核缓冲区的位置
                unsignedlong     userptr;     //缓冲区的用户空间地址
                structv4l2_plane *planes;
                __s32                    fd;
        } m;
        __u32                                   length;     //缓冲区大小，单位byte
};
```

当用户空间拿到v4l2_buffer，可以获取到缓冲区的相关信息。Byteused是图像数据所占的字节数，如果是V4L2_MEMORY_MMAP方式，m.offset是内核空间图像数据存放的开始地址，会传递给mmap函数作为一个偏移，通过mmap映射返回一个缓冲区指针p，p+byteused是图像数据在进程的虚拟地址空间所占区域；如果是用户指针缓冲区的方式，可以获取的图像数据开始地址的指针m.userptr，userptr是一个用户空间的指针，userptr+byteused便是所占的虚拟地址空间，应用可以直接访问。

5、用户空间访问设备

下面通过内核映射缓冲区方式访问视频设备(capturedevice)的流程。

```
1>        打开设备文件
fd = open(dev_name, O_RDWR /* required */ | O_NONBLOCK, 0);
dev_name[/dev/videoX]
2>        查询设备支持的能力
Struct v4l2_capability   cap;
ioctl(fd, VIDIOC_QUERYCAP, &cap)
3>        设置视频捕获格式
fmt.type= V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
fmt.fmt.pix.width              = 640;
fmt.fmt.pix.height             = 480;
fmt.fmt.pix.pixelformat= V4L2_PIX_FMT_YUYV;   //像素格式
fmt.fmt.pix.field              = V4L2_FIELD_INTERLACED;
ioctl(fd,VIDIOC_S_FMT, & fmt)
4>        向驱动申请缓冲区
Struct   v4l2_requestbuffers req;
req.count= 4;   //缓冲个数
req.type= V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
req.memory= V4L2_MEMORY_MMAP;
if(-1 == xioctl(fd, VIDIOC_REQBUFS, &req))
5>        获取每个缓冲区的信息，映射到用户空间
structbuffer {
               void    *start;
               size_t  length;
} *buffers;
```

```
buffers = calloc(req.count, sizeof(*buffers));
for (n_buffers= 0; n_buffers < req.count; ++n_buffers) {
struct   v4l2_buffer buf;
buf.type                = V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
buf.memory            = V4L2_MEMORY_MMAP;
buf.index              = n_buffers;
if (-1 ==xioctl(fd, VIDIOC_QUERYBUF, & buf))
                                                errno_exit("VIDIOC_QUERYBUF");
buffers[n_buffers].length= buf.length;
buffers[n_buffers].start=
                mmap(NULL /* start anywhere */,
                buf.length,
                PROT_READ | PROT_WRITE /* required */,
                MAP_SHARED /* recommended */,
                fd, buf.m.offset);
  }
```

6>　　把缓冲区放入到传入队列上，打开流IO，开始视频采集

```
for (i =0; i < n_buffers; ++i) {
        struct  v4l2_buffer buf;
        buf.type = V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
        buf.memory = V4L2_MEMORY_MMAP;
        buf.index = i;
        if (-1 == xioctl(fd, VIDIOC_QBUF, &buf))
                    errno_exit("VIDIOC_QBUF");
  }
  type = V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
  if (-1 == xioctl(fd, VIDIOC_STREAMON, & type))
```

7>　调用select监测文件描述符，缓冲区的数据是否填充好，然后对视频数据

```
                for (;;) {
                                                fd_set fds;
                                                struct timeval tv;
                                                int r;
                                                FD_ZERO(&amp;fds);
                                                FD_SET(fd,&amp;fds);
                                                /* Timeout. */
                                                tv.tv_sec = 2;
```

```
tv.tv_usec = 0;
                                                        //监测文件描述是否变化
r = select(fd + 1,& fds, NULL, NULL, & tv);
if (-1 == r) {
                if (EINTR ==errno)
                                continue;
               errno_exit("select");
}
if (0 == r) {
                fprintf(stderr,"select timeout\n");
               exit(EXIT_FAILURE);
}
                                                        //对视频数据进行处理
                        if (read_frame())
                                        break;
                        /* EAGAIN - continueselect loop. */
                }
```

8>　　取出已经填充好的缓冲，获取到视频数据的大小，然后对数据进行处理。这里取出的缓冲只包含缓冲区的信息，并没有进行视频数据拷贝。

```
buf.type= V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
buf.memory= V4L2_MEMORY_MMAP;
if (-1 ==ioctl(fd, VIDIOC_DQBUF, & buf))        //取出缓冲
                errno_exit("VIDIOC_QBUF");
process_image(buffers[buf.index].start,buf.bytesused);      //视频数据处理
if (-1 ==xioctl(fd, VIDIOC_QBUF, & buf))    //然后又放入到传入队列
        errno_exit("VIDIOC_QBUF");
```

9>　　停止视频采集

```
type =V4L2_BUF_TYPE_VIDEO_CAPTURE;
ioctl(fd,VIDIOC_STREAMOff, & type);
```

10>　关闭设备

```
Close(fd);
```

暂时分析到这里，后续在更新！

Reference: