

通过现实中的相机拍摄的照片会不可避免地产生畸变。畸变由相机、透镜形状和变焦 程度等因素共同决定。

5.1 图像畸变

5.1.1 径向畸变

由透镜形状引起的畸变称为径向畸变。相机的镜头由多个透镜组成,而透镜的成像原 理涉及弯曲光线,所以经过相机镜头的光线会有不同程度的弯曲,这就会造成图像的失真。 在相机拍摄到图像时,图像越靠近边缘失真越大。

由于透镜往往是中心对称的,在形状上接近于理想的透镜,因此不必考虑透镜的中心位置,并且畸变以径向畸变为主。径向畸变的特点是:光线在远离透镜中心的地方比靠近中 心的地方更加弯曲。径向畸变分为两大类,即桶形畸变和枕形畸变。

5.1.2 桶形畸变和枕形畸变

桶形畸变的特点是:图像的像素向图像中心发散。以网格图片为例,发生桶形畸变的 网格图片的效果如图 5-1 所示。



图 5-1 发生桶形畸变的网格图片的效果

枕形畸变的特点是:图像的像素向图像中心聚拢。以网格图片为例,发生枕形畸变的 网格图片的效果如图 5-2 所示。



图 5-2 发生枕形畸变的网格图片的效果

5.1.3 切向畸变

切向畸变的特点是:透镜不完全平行于图像平面,即相机传感器在装配时与镜头间的 角度不准。

5.2 Hugin

Hugin 是一种易用的跨平台的全景成像工具链,基于 Panorama 工具编写。Hugin 可 以将一组马赛克照片组合成一个完整的身临其境的全景图,以及可以缝合任何一系列重叠 的照片等。

Hugin 的功能很多,可以覆盖和处理与拍摄影像相关的大多数前期处理工作。本章侧 重于 Hugin 的镜头校准功能。

5.2.1 安装 Hugin

通过 DNF 软件源安装 Hugin,命令如下:

\$ sudo dnf install hugin

然后在应用菜单中可以看到安装后的3个选项,如图5-3所示。

D Hugin Batch Processor	
🎾 Hugin Calibrate Lens	Lens Calibrator
🞾 Hugin Panorama Creator	Panorama stitcher

图 5-3 Hugin 在安装后的 3 个选项

其中,Hugin Calibrate Lens(Hugin 镜头校准)就是在校准时需要使用的选项。

5.2.2 Hugin 镜头校准的默认状态

Hugin 镜头校准的 GUI 的默认状态如图 5-4 所示。

*			Hugir	n 镜头校准图形用户界面	~ ^ X
文件 (F)					
图像 (带直线)				预览	
			增加 移除	原始的 🔻 🗹 显示行 🛛 刷新	
镜头类型: 杨	就准的 (直线的	I) -]		
焦距:	mm #	素距乘法器:	x		
选项					
边缘检测比例:	2				
边缘检测阈值:	4	查找行]		
最大图像尺寸:	1600	重置			
最短行长度:	0.3				
镜头参数					
径向畸变		图像偏心 🗌			
畸变 (a): 🗌	0	水平 (d): 0			
桶状 (b): 🔽	0	垂直 (e): 0			
畸变 (c): 🗌	0				
优化	显示	图表>>	保存镜头		
					//

图 5-4 Hugin 镜头校准的 GUI 的默认状态

Hugin 镜头校准选项的默认值如表 5-1 所示。

表 5-1 Hugin 镜头校准选项的默认值

选 项	默认值	选项	默认值
边缘检测比例	2	最大图像尺寸	1600
边缘检测阈值	4	最短行长度	0.3

此外,单击"优化"按钮即可重置"边缘检测比例"输入框、"边缘检测阈值"输入框、"最大图像尺寸"输入框和"最短行长度"输入框中的内容,然后这些输入框中的内容将变为默认值。

5.2.3 Hugin 镜头校准的镜头类型

Hugin 镜头校准支持的镜头类型包括标准的(直线的)、全景的(圆柱的)、圆形鱼眼、全

帧鱼眼、等矩形的、正投影、立体图像、Equisolid 及鱼眼 Thoby。不同的镜头类型可能会导 致算得的校准参数不同。

5.2.4 Hugin 镜头校准的图片要求

Hugin 在校准时需要事先用需要校准的相机或镜头拍摄一张带有直线的照片。一般而言,拍摄一张现代建筑的照片或以平行线组成的照片即可满足 Hugin 的校准需求。

5.2.5 Hugin 镜头校准的必选参数

在选择至少一张图片后,Hugin还需要用户选择正确的镜头类型并至少填写焦距和焦 距乘法器,然后单击"优化"按钮即可得到校准参数。

5.2.6 Hugin 镜头校准的可选参数

Hugin 默认只校准径向畸变。在勾选"图像偏心"复选框后, Hugin 将同时校准径向畸 变和切向畸变。

此外,Hugin 默认只校准 b 参数。在勾选"畸变(a)"复选框后,Hugin 将同时校准 a 参数;在勾选"桶状(b)"复选框后,Hugin 将同时校准 b 参数;在勾选"畸变(c)"复选框后, Hugin 将同时校准 c 参数。

☆注意:在摄影技术中,如果只是校准桶形畸变或枕形畸变,则只应该校准 b 参数。 在AR 技术中目前没有这种要求。

5.2.7 Hugin 镜头校准的常见错误

Hugin 在校准时将试图自动查找图中的直线。如果 Hugin 没有找到直线,则在单击"优化"按钮后弹出错误对话框,如图 5-5 所示。

如果出现这种和检测行相关的错误,此时则可以 适度修改"边缘检测比例"输入框、"边缘检测阈值"输 入框、"最大图像尺寸"输入框和"最短行长度"输入框 中的内容,然后单击"查找行"按钮,最后单击"优化" 按钮重新查找直线。在使用直线效果不够标准的图 片校准时往往要重复多次类似的修改参数的操作。



5.2.8 Hugin 镜头校准的预览功能

Hugin 在 GUI 的右半部分设计了预览区域,允许用户查看原始的图片、边缘检测结果 及已经校正的结果。

预览功能的常见用法如下:

(1)用户可以核对当前文件名对应的原始的图片是否对应了想要用于校准的图片。如 果用户发现当前文件名对应的图片不是想要用于校准的图片,则可及时单击"移除"按钮并 更换正确的图片。

(2)如果出现和检测行相关的错误,则用户可以通过图片的边缘检测结果调整选项,从 而提高调整参数的成功率。

(3) 用户可以查看已经校正的结果,确认参数的有效性。如果用户对已经校正的结果

*	保存镜头	~	^	×
保存镜头数据				
保存镜头参数 Save lens par	到 ini 文件 rameters to lens da	atabase		1
	用取送(C)	地会(の		
	取消(C)	确定(C)	J

图 5-6 在单击"保存镜头"按钮 后弹出的对话框

不满意,则可以手动微调镜头参数,然后单击"刷新"按钮 并查看新的已经校正的结果。

5.2.9 Hugin 保存镜头

此外, Hugin 还允许保存镜头。在 Hugin 成功校准 并得到镜头的优化参数后,可以单击"保存镜头"按钮,弹 出对话框如图 5-6 所示。

如果选择"保存镜头参数到 ini 文件"选项并单击"确 定"按钮,则 Hugin 将打开文件保存器,用户可以先选择 文件夹,然后保存 ini 文件。保存的 ini 文件如下:

```
#第5章/XT-AO72-linux.ini
[Lens]
image width = 4032
image height = 3024
type = 0
hfov = 70.9788
hfov link = 0
crop = 4.75
a = 0
a link = 0
b = 0.0006
b link = 0
c = 0
c link = 0
d = 0
d link = 0
e = 0
e link = 0
q = 0
g link = 0
t = 0
t link = 0
Va = 1
Va link = 0
Vb = 0
Vb link = 0
Vc = 0
```

 $Vc_link = 0$ Vd = 0Vd link = 0Vx = 0Vx link = 0Vy = 0 $Vy_link = 0$ Ra = 0Ra link = 0Rb = 0Rb link = 0Rc = 0Rc link = 0Rd = 0Rd link = 0Re = 0Re link = 0[Lens/crop] enabled = 0autoCenter = 1 left = 0top = 0right = 4032bottom = 3024[EXIF] CameraMake = Sony CameraModel = XQ-AT72FocalLength = 5.11Aperture = 1.7ISO = 100CropFactor = 4.75Distance = 0

如果选择 Save lens parameters to lens database 选项并单击"确定"按钮,则 Hugin 将 打开"保存镜头到数据库"对话框,如图 5-7 所示。

*	保存镜头到数据	库	\sim	^ ×
镜头				_
照相机制造商:	Sony	焦距:	5.1	mm
照相机型号:	XQ-AT72	光圈:	1.7	
镜头名称:	Sony XQ-AT72	主题距离:	0	m
选择应该保存的 到数据库中	参数			
🖌 保存畸变				
□ 保存虚光				
		取消	确定	

图 5-7 "保存镜头到数据库"对话框

在勾选了至少1个应该保存的参数后,"保存镜头到数据库"对话框将允许单击"确定" 按钮,然后单击"确定"按钮即可将当前的镜头保存到远程数据库,此后理论上其他人也可以 在互联网上搜索到这个新的镜头参数。

◎注意:实际上,笔者没能在互联网上搜索到自己上传的新的镜头参数。

5.3 kalibr

kalibr 是一种适用于特定场景的校准工具,可以进行多相机校准、相机-IMU 校准、多 IMU 校准和滚动快门相机校准。

5.3.1 kalibr 在 Docker 之下安装并校准相机

获取 kalibr 的源码,命令如下:

```
$ git clone https://github.com/ethz-asl/kalibr.git
```

进入 kalibr 文件夹,命令如下:

\$ cd kalibr

使用 kalibr 的源码编译 Docker 容器,命令如下:

```
$ docker build -t kalibr -f Dockerfile_ros1_20_04
```

创建共享文件夹,命令如下:

```
$ mkdir /home/linux/kalibr_share_folder
```

编写 kalibr 的启动脚本,代码如下:

```
#第5章/run_kalibr.sh
```

```
FOLDER=/home/linux/kalibr_share_folder
```

xhost +

docker run -it -e "DISPLAY" -e "QT_X11_NO_MITSHM=1" \

```
-v "/tmp/.X11-UNIX:/tmp/.X11-UNIX:rw" \
```

-v "\$FOLDER:/data" kalibr

添加 run_kalibr.sh 文件的可执行权限,命令如下:

\$ sudo chmod +x run_kalibr.sh

启动 kalibr 容器,命令如下:

\$ sudo ./run_kalibr.sh

在 kalibr 的容器的内部执行校准相机的命令如下:

#source devel/setup.bash

```
#rosrun kalibr kalibr_calibrate_cameras \
```

```
--bag /data/cam april.bag --target /data/april 6x6.yaml \
```

```
--models pinhole-radtan pinhole-radtan \backslash
```

```
--topics /cam0/image_raw /cam1/image_raw
```

5.3.2 kalibr 源码安装并校准相机

首先安装 kalibr 的依赖。 kalibr 在编译前需要安装 ROS 1。详见 5.3.3 节中的内容。 首先安装 kalibr 相关的依赖。安装 Eigen 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install eigen3-devel

安装 git,命令如下:

\$ sudo dnf install git

安装 wget,命令如下:

\$ sudo dnf install wget

安装 autoconf,命令如下:

 $\$ sudo dnf install autoconf

安装 automake,命令如下:

\$ sudo dnf install automake

安装 nano,命令如下:

\$ sudo dnf install nano

安装 Boost 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install boost-devel

安装 SuiteSparse,命令如下:

\$ sudo dnf install suitesparse

安装 doxygen,命令如下:

\$ sudo dnf install doxygen

安装 OpenCV 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install opencv-devel

安装 poco 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install poco-devel

安装 TBB 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install tbb-devel

安装 BLAS 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install blas-devel

安装 LAPACK 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install lapack-devel

安装 V4L 的头文件,命令如下:

\$ sudo dnf install v4l-utils-devel-tools

初始化 catkin 工作空间,命令如下:

\$ cd ~/kalibr_workspace/src

将 kalibr 的源码复制到 catkin 工作空间下,命令如下:

\$ git clone https://github.com/ethz-asl/kalibr.git

编译 kalibr,命令如下:

```
$ cd ~/kalibr_workspace/
$ catkin build -DCMAKE BUILD TYPE = Release -j4
```

在 catkin 工作空间下执行校准相机的命令,命令如下:

```
$ source ~/kalibr_workspace/devel/setup.bash
$ rosrun kalibr <command you want to run here>
```

5.3.3 kalibr 以 ROS 包的格式收集数据

kalibr 提供了 bagcreater 命令,用于将图像数据和 IMU 数据收集到同一个 ROS 包中, 其中图像数据为一幅或多幅图片,IMU 数据为 CSV 文件。

将图像数据和 IMU 数据收集到同一个 ROS 包中的命令如下:

\$ kalibr_bagcreater -- folder dataset-dir/. -- output-bag awsome.bag

解压 ROS 包中的数据的命令如下:

```
$ kalibr_bagextractor - - image-topics /cam0/image_raw /cam1/image_raw - - imu-
topics /imu0 -- output-folder dataset-dir -- bag awsome.bag
```

在收集数据时需要保持校准目标固定,并且将相机-IMU系统移动到目标前面,以激发 所有 IMU 轴。此外,还要确保校准目标的良好和均匀照明,并保持较短的相机快门时间, 以避免过度的运动模糊。kalibr 建议用于校准的相机在 20Hz 且 IMU 在 200Hz。

5.3.4 kalibr 校准多个相机

kalibr 的多摄像机校准工具用于估计多摄像机系统的内参和外参,要求相邻摄像机具

有重叠的视场。

图像数据需要作为 ROS 包提供,其中包含所有摄像机的图像流。校准流程将遍历所有 图像,并根据信息论测量并选取图像,以获得系统参数的良好估计。

在校准时允许投影和失真模型的任意组合。

kalibr 在校准多个相机时必须通过命令传入的参数如下:

(1) --bag filename.bag。此参数代表用于校准的图像数据。

(2) --topics TOPIC_0 ... TOPIC_N。此参数代表所有相机的 topic 的列表,并且列表 的顺序必须和--models 参数一一对应。

(3) --models MODEL_0 ... MODEL_N。此参数代表相机模型和/或畸变模型的列表。

(4) --target target.yaml。此参数代表输出校准文件的文件名。

使用 kalibr 校准多个相机的代码如下:

```
kalibr_calibrate_cameras --bag [filename.bag] --topics [TOPIC_0 ... TOPIC_N]
--models [MODEL 0 ... MODEL N] --target [target.yaml]
```

查看 kalibr 校准多个相机的用法的代码如下:

kalibr calibrate cameras --h

5.3.5 kalibr 校准带 IMU 的相机

相机 IMU 校准工具估计相机系统相对于固有校准 IMU 的空间和时间参数。图像数据和 IMU 数据需要作为 ROS 包提供。相机 IMU 校准工具使用样条曲线对系统姿态进行 建模并在批处理优化中估计校准参数。

IMU的固有参数(例如刻度、轴不重合度、非线性度等)需要预先校准,并将其校正应用 于原始测量。将校准参数写入 IMU 配置文件中,并采用 YAML 格式编写,其中包含加速 度计和陀螺仪的噪声密度和偏差的随机扰动。

IMU 配置文件的文件名为 camchain.yaml,用于整个相机系统的校准。每个相机的校准参数如下:

(1) camera_model 代表相机的投影模型,可选 pinhole 或 omni。

(2) intrinsics 代表相机内参向量。如果相机模型是 pinhole,则参数值的格式为[fu fv pu pv];如果相机模型是 omni,则参数值的格式为[xi fu fv pu pv];如果相机模型是 ds,则参数值的格式为[xi alpha fu fv pu pv];如果相机模型是 eucm,则参数值的格式为[alpha beta fu fv pu pv]。详见 kalibr 支持的相机模型。

(3) distortion_model 代表镜头畸变模型,可选 radtan 或 equidistant。

(4) distortion_coeffs 代表镜头畸变模型的参数向量。详见 kalibr 支持的畸变模型。

(5) T_cn_cnm1 代表相机外参的变换矩阵,总和批处理过程中的最后一个摄像头有关。例如,T cn cnm1=T c1 c0 变换将点从相机 c0 的坐标系变换到相机 c1 的坐标系。

(6) T_cam_imu 代表 IMU 外参的变换矩阵,用于将点从 IMU 坐标系变换到相机的坐