

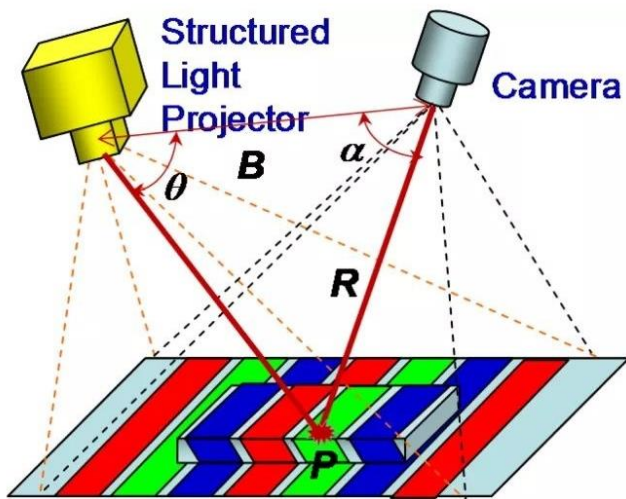
图 结构光系统

- 01 结构光前奏：双目立体匹配算法
- 02 单目标定理论+实践：计算内参，去除畸变
- 03 双目标定理论+实践：确定相机相互位置
- 04 双目立体匹配算法理论+OpenCV实践
- 05 主动标记区域：相移法+多频外差
- 06 主动标记区域：相移法+格雷码
- 07 双目重建实践：三角法
- 08 单目重建实践：逆相机法
- 09 单目重建实践：相高法
- 10 投影仪非线性校正
- 11 结构光+深度学习
- 补充1：工业相机与普通相机区别
- 补充2：选取投影仪性能指标
- 补充3：工业相机、投影仪的硬触发
- 硬件资料

注：图片引用自论文《Calibration of fringe projection profilometry: A comparative review》

结构光前奏

双目立体匹配三维重建基本原理推导



结构光3D扫描系统架构

主讲人：曹博

公众号：3D视觉工坊

研究方向：高速+高动态范围结构光三维重建

个人邮箱：fly_cjb@163.com

GitHub: <https://github.com/SHU-FLYMAN/3dStructureLight>

欢迎关注3D视觉工坊

我们这里有3D视觉算法、VSLAM算法、计算机视觉、深度学习、自动驾驶、图像处理等干货分享！

如果你也想成为主讲人，欢迎加入我们。

➤ 报名方式：请发送邮件至vision3d@yeah.net

公众号



交流群请添加客服



3D视觉从入门到精通知识星球：针对3D视觉领域的知识点汇总、入门进阶学习路线、最新paper分享、疑问解答四个方面进行深耕，更有各类大厂的算法工程人员进行技术指导，近3000+的星球成员为创造更好的AI世界共同进步，知识星球入口：

3D与SLAM

3D 视觉从入门到精通

星主：小凡

👤 3100+ 📖 4400+

目前国内最大的3D视觉学习平台。本星球依托于微信公众号「3D视觉工坊」，重点在于以下几个方面：

1、视频+答疑 | 三维重建系列视频课程...

知识星球

微信扫码加入星球



疯狂的荷兰人 向你推荐这个有用的星球

扫码这里加入星球！我有分享奖励！

目录

1

前言：单目尺度不确定性

2

计算模型：理想双目测距

3

算法关键：寻找同名点

4

极线约束：减少匹配计算量

5

单目、双目标定意义

6

双目结构光与立体匹配算法区别

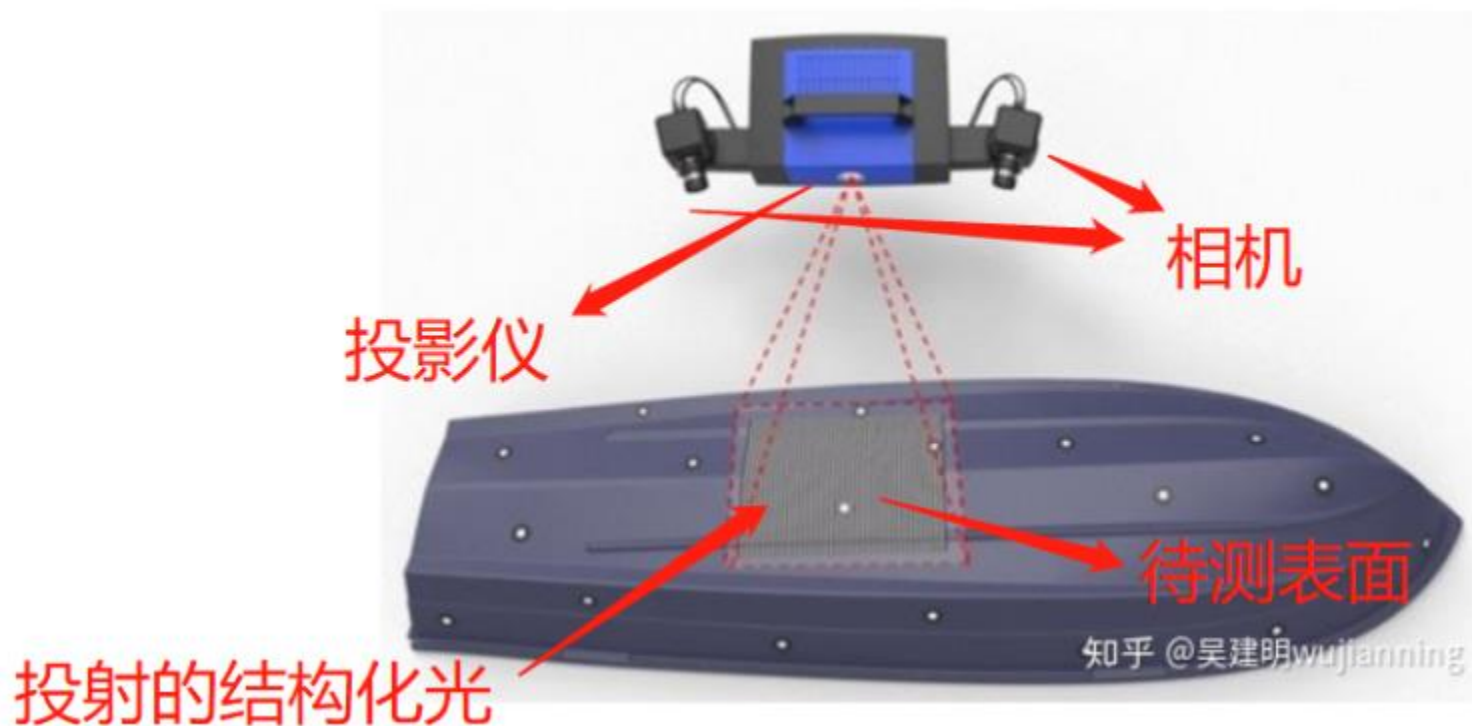


图1 典型双目面结构光设备
(图片引用知乎@吴建明)

事实上，双目结构光的原理与双目立体匹配是非常相似的，或者说是双目立体匹配算法的一个原理延续。如果少掉投影仪，这台设备就可以看做是一个双目立体匹配相机，那么它们的区别在哪里呢？



01 前言：单目尺度不确定性

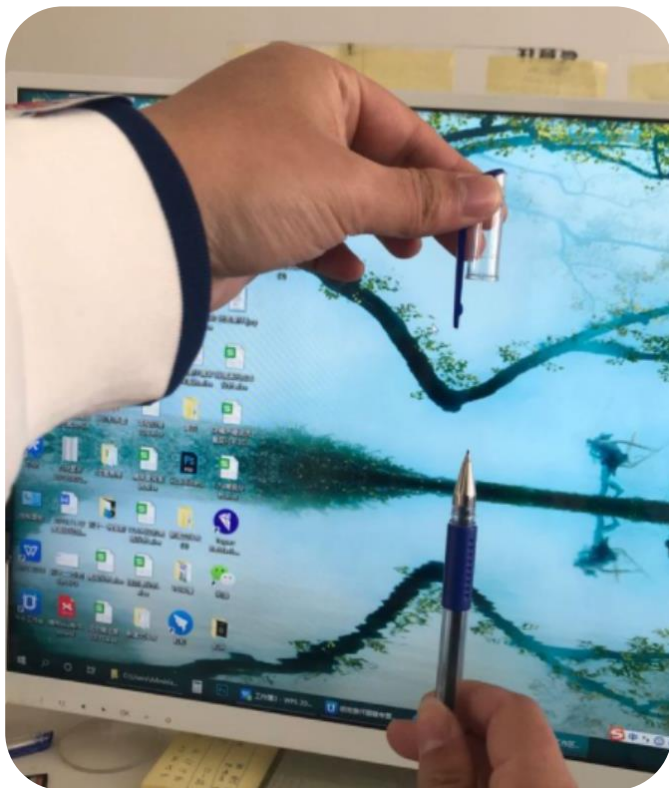


图2 正面：笔帽、笔头看似距离相近



图3 侧面：实际上一前一后

注：图片来源于知乎回答《老何说眼睛》



图4 单目尺度不确定性



图5 蒙蔽了双眼



单目尺度丢失，和人眼估计距离类似，两台相机是视觉测距的最少条件。

（即使是单目**SFM**方法，也是通过前、后两个时刻的图像构成“双目相机”）



02 计算模型：理想双目测距



我们先来讲双目立体匹配视觉的原理，现在我们有二个假设：

两部相机是绝对理想的，不存在任何畸变，且相机参数一致；

左右相机位于同一平面，且光轴平行；

简化后理想的双目相机模型如下图所示：

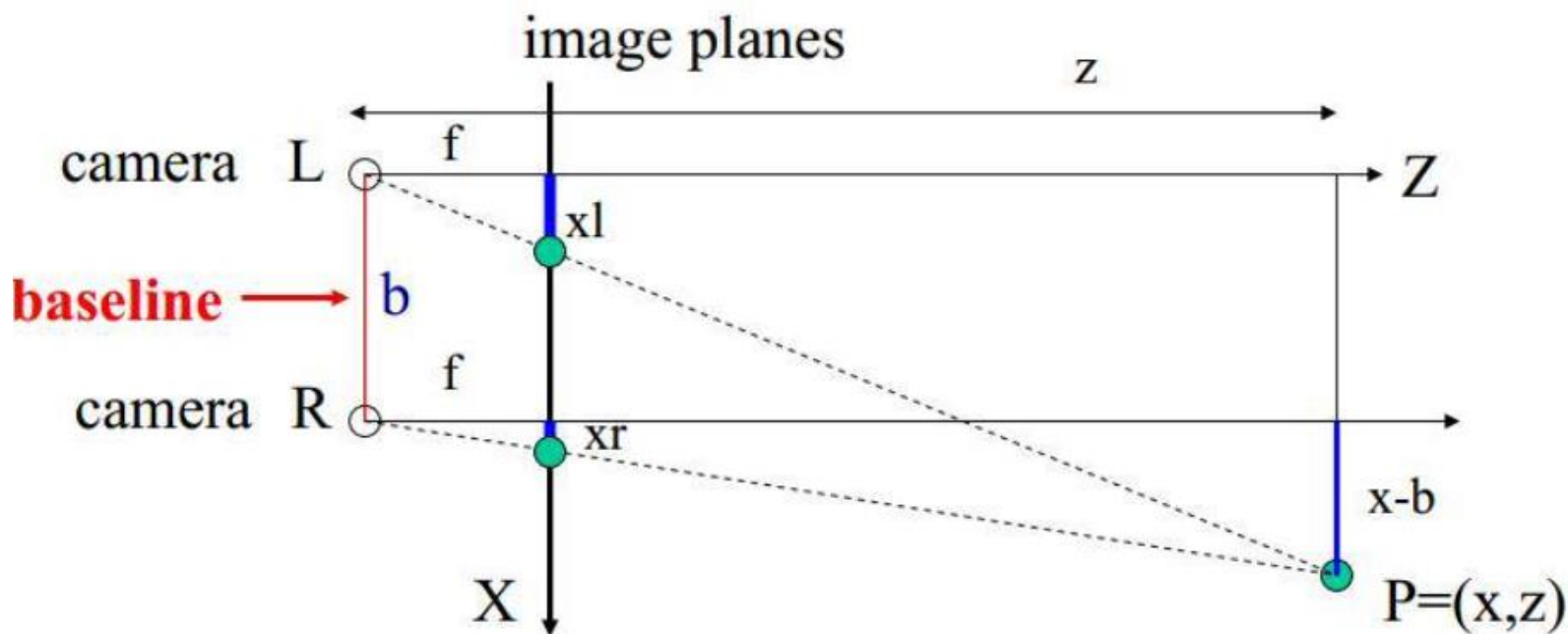


图6 理想双目测距模型



对于空间中的某点 $P(x,y,z)$ ，显然有以下三角相似关系：

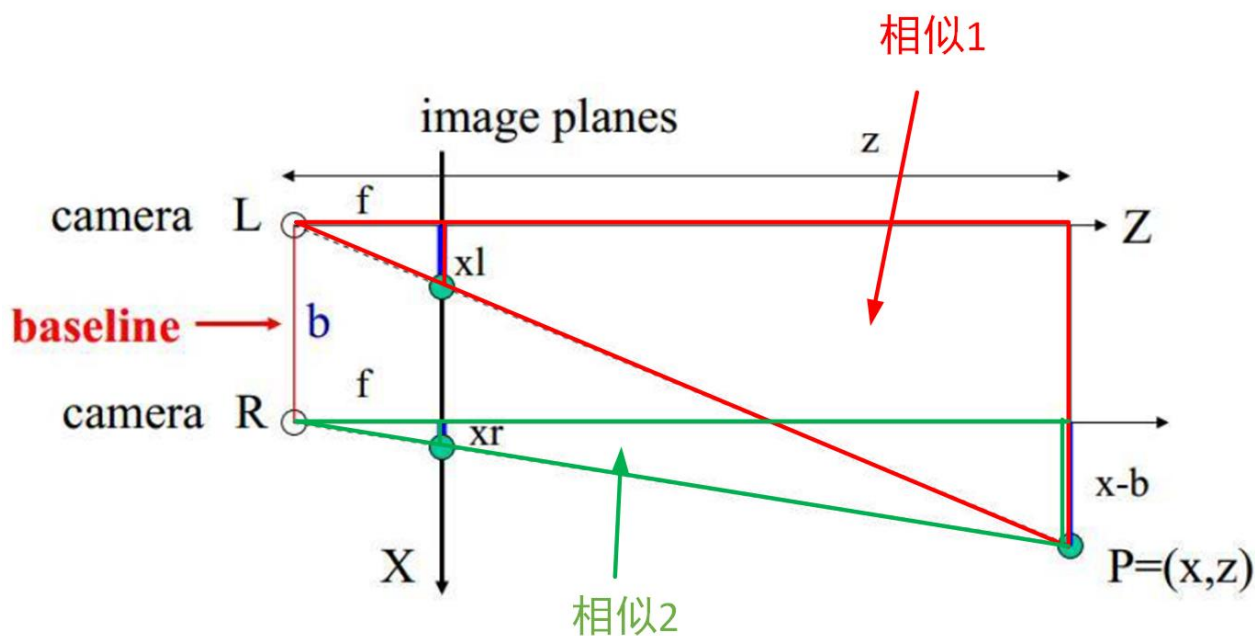


图7 距离计算：相似三角形关系（ x, z 方向）

可得关于 x,z 的表达式：

$$\text{相似1: } \frac{z}{f} = \frac{x}{x_l}$$

$$\text{相似2: } \frac{z}{f} = \frac{x-b}{x_r}$$

令上面两式相等：

$$\begin{aligned} \frac{x}{x_l} &= \frac{x-b}{x_r} \\ \Rightarrow x \cdot x_r &= x \cdot x_l - x_l \cdot b \\ \Rightarrow x_l \cdot b &= x(x_l - x_r) \\ \Rightarrow x &= \frac{x_l \cdot b}{x_l - x_r} \end{aligned}$$

代回相似1，得到 z 的表达式：

$$z: f \cdot \frac{x}{x_l} \Rightarrow f \cdot \frac{\frac{x_l \cdot b}{x_l - x_r}}{x_l} = \frac{f \cdot b}{x_l - x_r} = \frac{f \cdot b}{d}$$



由于两个相机处于同一个高度点，所以还有下列关系：

1. 在左右相机的图像中，这个点的 y 坐标是一致的，即 $y_l = y_r$ ，只是 x 的坐标不一致），如图13所示。
2. 假设在该点摆在左相机的正前方（该点的位置无关紧要），在 y 的方向也有相似三角形，如图14所示。

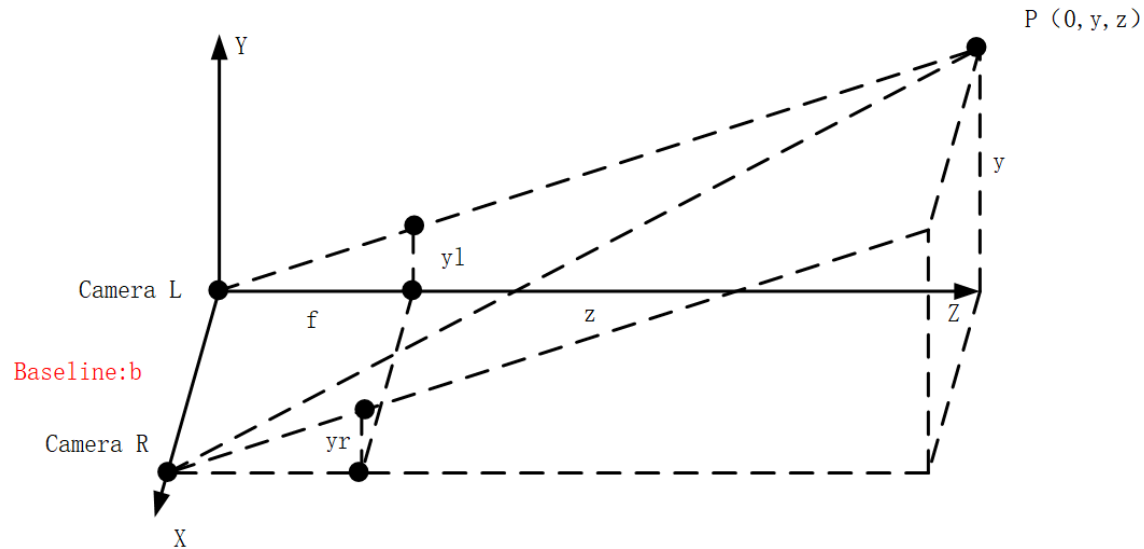


图8 y 方向高度点一致

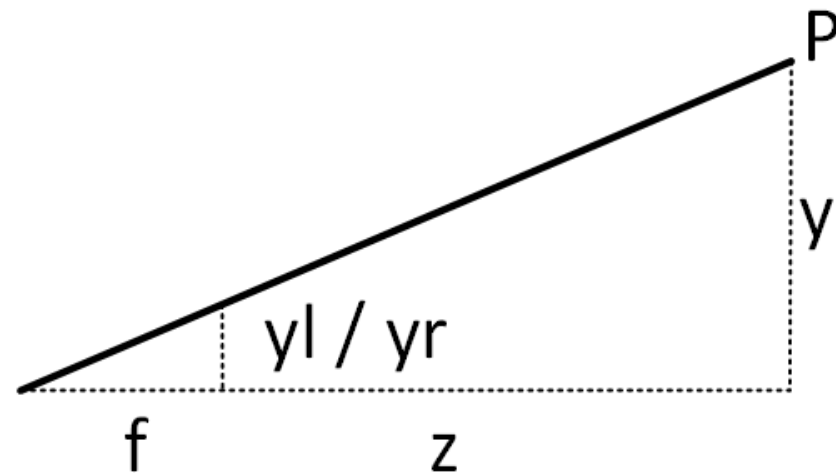


图9 距离计算：相似三角形关系（ y 方向）

可得关于 y 的表达式：

$$\text{相似3: } \frac{z}{f} = \frac{y}{y_l} = \frac{y}{y_r}$$



整理前面式子：

$$\text{相似1: } \frac{z}{f} = \frac{x}{x_l}$$

$$\text{相似2: } \frac{z}{f} = \frac{x - b}{x_r}$$

$$\text{相似3: } \frac{z}{f} = \frac{y}{y_l} = \frac{y}{y_r}$$

$$z: f \cdot \frac{x}{x_l} \Rightarrow f \cdot \frac{x_l \cdot b}{x_l - x_r} = \frac{f \cdot b}{x_l - x_r} = \frac{f \cdot b}{d}$$



$$z := \frac{f \cdot b}{d \rightarrow x_l - x_r}$$

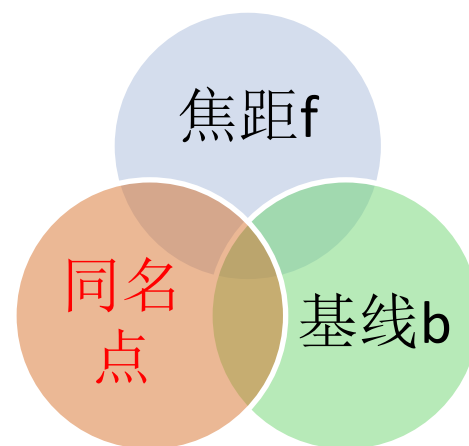
$$x := z \cdot \frac{x_l}{f} = z \cdot \frac{x_r}{f} + b$$

$$y := y_{l/r} \cdot \frac{z}{f}$$

根据上述公式，我们可知，如果我们要计算深度 z 、 x 、 y ，那么必须知道以下参数：

1. 焦距： f 、相机基线： b ，这两个参数可以通过单目、双目标定得来

2. 同名点：空间中某个点在左相机上的点坐标 $P_l(x_l, y_l)$ ，相应的右相机对应点 $P_r(x_r, y_r)$



依据这三个信息，我们就可以计算视差 d ，从而计算出点对应的坐标，完成整个三维重建过程。

注：双目相机，虽然相机的内参无法做到一致，但是分辨率和相机焦距这两个参数最好保持一致！否则影响重建精度！



1. 焦距 f 、基线 b ，我们可以通过相机单目、双目标定，或者厂家直接给出
2. 问题：如何寻找同名点，即可直接计算距离



03 算法关键：寻找同名点



最重要工作：寻找同名点。我们知道空间中一点肯定对应左相机中的某点，那么问题来了，如何确定该点在右图的位置？有了同名点，我们就可以通过右侧双目测距公式计算坐标。可能的办法是：

1. 检测两幅图像上各自的特征点
2. 对这些特征点的关系进行匹配，计算它们之间的相似度距离

$$z := \frac{f \cdot b}{d \rightarrow x_l - x_r}$$
$$x := z \cdot \frac{x_l}{f} = z \cdot \frac{x_r}{f} + b$$
$$y := y_{l/r} \cdot \frac{z}{f}$$

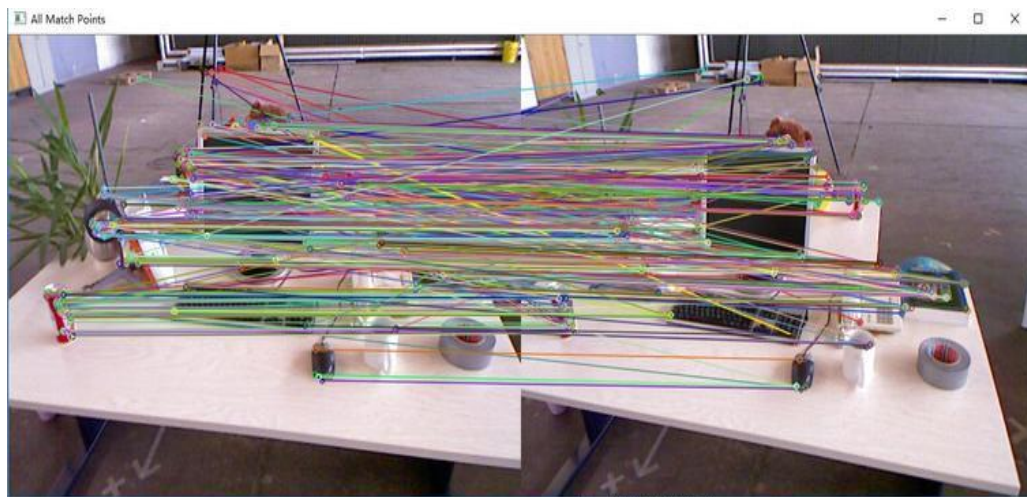


图10 寻找特征点

而计算机寻找同名点的方式，并不如人眼那么智能，我们通过描述子（**SIFT**、**SURF**、**ORB**等）找出两张图片中比较显著的特征点（比如说颜色、边缘变化较为显著的区域，这些区域会被当作特征点），然后对它们一一进行配对。有了这些同名点，我们就可以依据视差计算公式（简单的三角计算关系，我们之后推导）来进行三维重建了。



图11 特征匹配结果

最粗暴的方法是：将左相机图像特征点与右侧图像特征点一一计算距离，进行地毯式地搜索，距离最近的点即是一“对”。



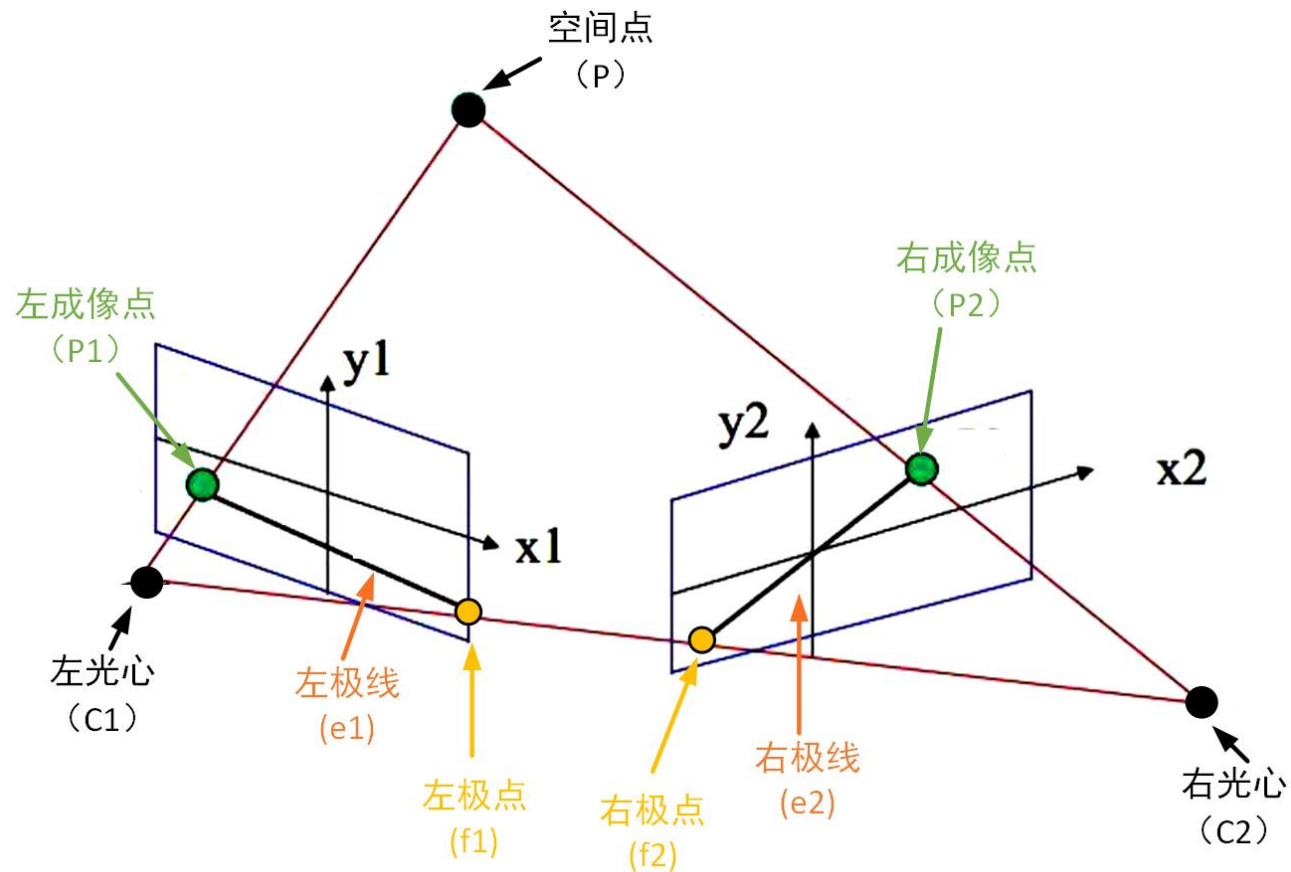
暴力搜索计算量太大，能否降低计算量？



04 极线校正：减少匹配计算量



在双目相机图像的特征点匹配过程中，还存在着一种约束，我们称之为“**极线约束**”，这种约束可以帮助我们减少两幅图像之间特征点匹配的计算量。我们用更通用的双目模型来解释这个极线约束，如下图所示：



- P ：空间中的一个三维点；
- 成像点（ P_1 、 P_2 ）：分别为左右；
- 光心（ C_1 、 C_2 ）：相机中心，它们不完全水平
- 极平面（ PC_1C_2 ）： P 点和两个相机光心 C_1 、 C_2 所构成的平面；
- 极线（ e_1, e_2 ）：成像平面与极平面的交线；
- 极点（ f_1, f_2 ）：成像平面与两光心连线的交点；

极线约束：当已知左成像点 P_1 时，由于单目尺度不确定性，它只可能出现在 PP_1 连线上，这条连线上的点投影到右相机，只可能出现在右极线 e_2 上（右光心 C_2 与 PP_1 连线交点）。

注：关于详细的推导请参考高翔博士《SLAM十四讲》中的讲解，需要你静下心来仔细去看，这里只给出直觉上的讲解。

图12 极线约束示意图

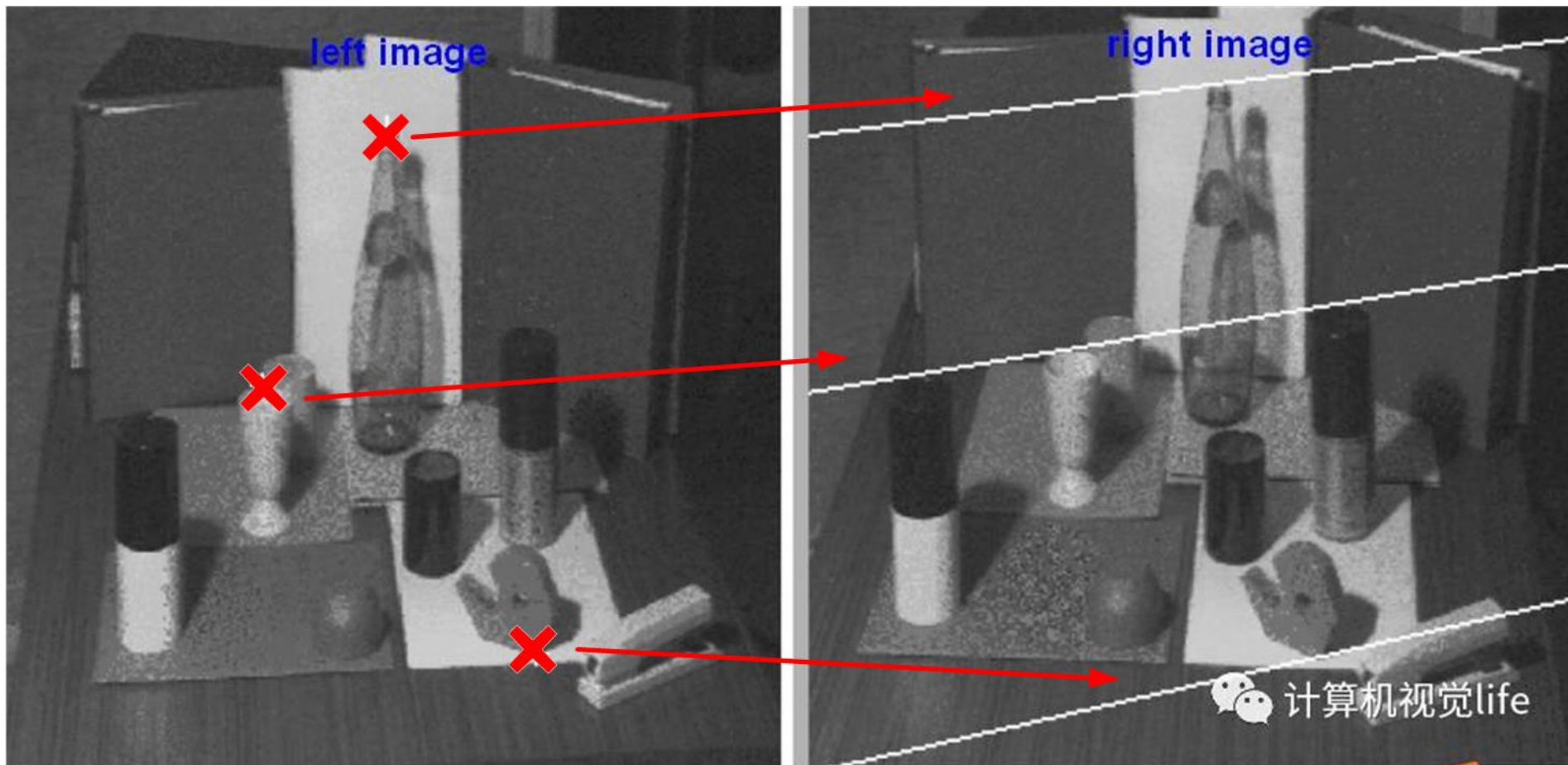


图13 极线约束情况下同名点的寻找：我们只需要沿着极线附近进行搜索即可
(图片引用自微信公众号：计算机视觉life)

问题：极线是斜着的，如下图所示，计算机沿着斜线访问图片像素的效率并不高。



而校正后，这样模型就变成了理想模型。经过光轴平行校正后，左图中任一像素点，只需要沿着水平方向的极线进行搜索即可（图像做了单应性变换，都发生了仿射变换）下所示，：

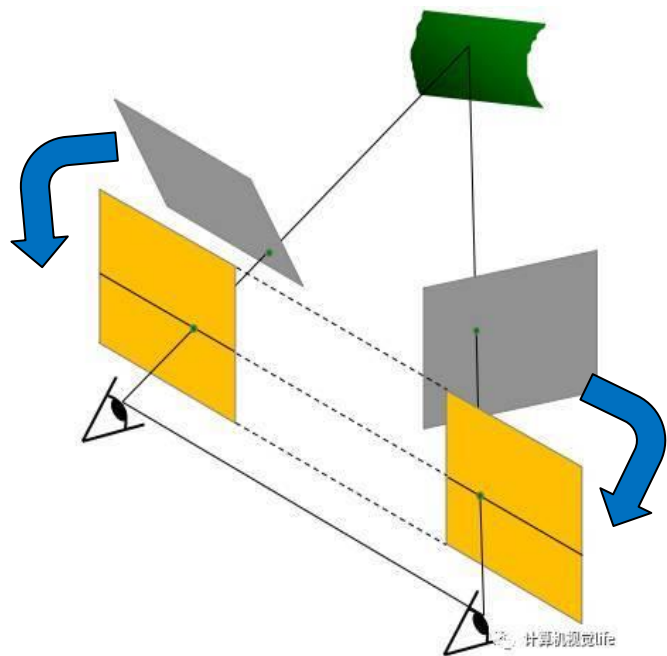


图14 立体校正：将两部相机的光轴平行
(图片引用自微信公众号：计算机视觉life)

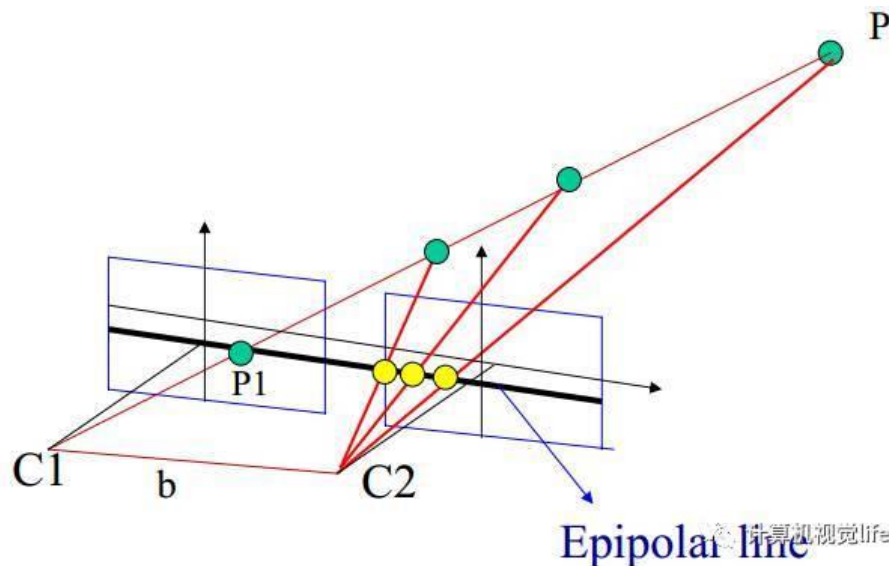


图15 立体校正后的极线模型
(图片引用自微信公众号：计算机视觉life)

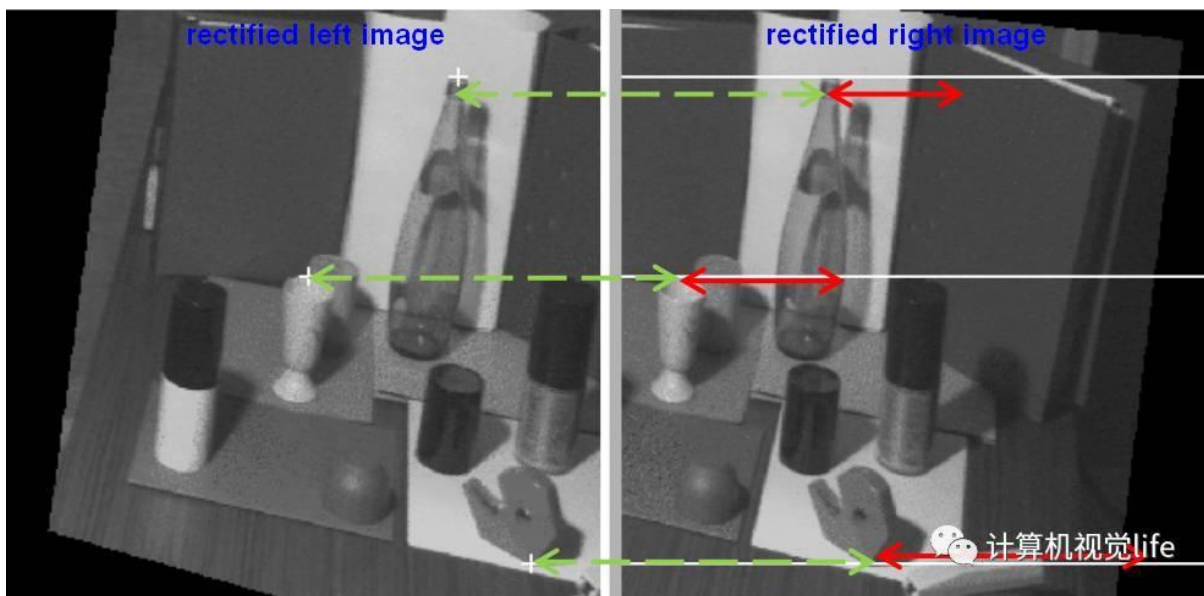


图16 立体校正后的极线情况
(图片引用自微信公众号：计算机视觉life)

立体校正后，沿着极线搜索，特征匹配的计算量大幅下降！



在完成光轴校正（也称为立体校正），对于左图中的某个点，理论上，我们只需要在右图中沿着水平极线方向进行搜索、匹配即可。但实际情况是，算法还存在两个问题：

1. 计算过程中存在误差，对应左图的一个点，其在右图中的对应点不一定在恰好在极线上；
2. 单个像素点进行比较，鲁棒性很差，很容易受到光照变化、视角不同的影响；

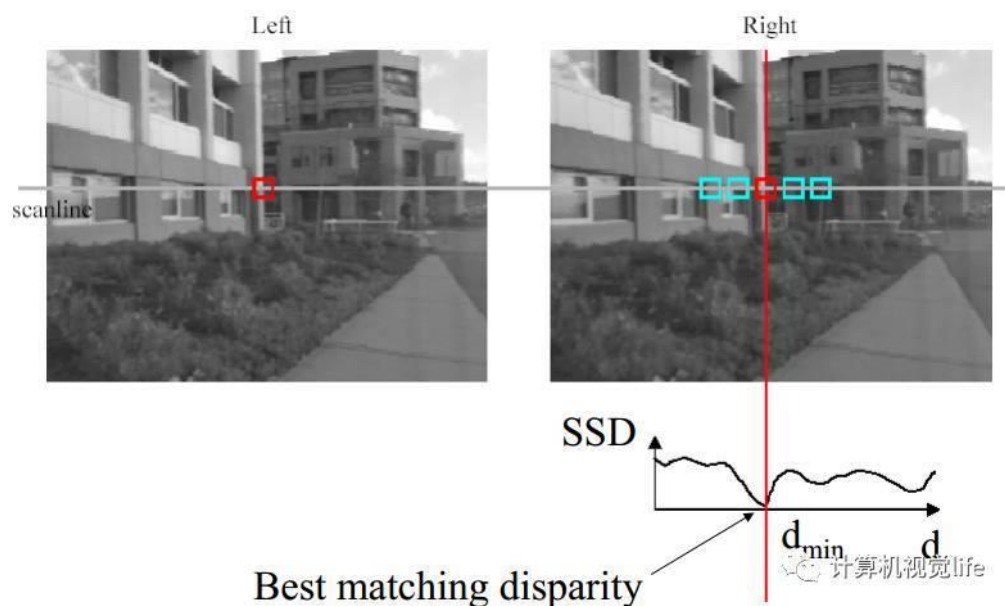


图17 滑动窗口匹配原理示意图
(图片引用自微信公众号：计算机视觉life)

对于左图中的某个像素点（红色方框中心），从右图中从左到右用一个同尺寸滑动窗口内像素跟它计算相似度。左右图中两个窗口越相似，SSD越小，上图SSD曲线显示了计算结果，SSD值最小的位置对应的像素点就是最佳匹配结果。

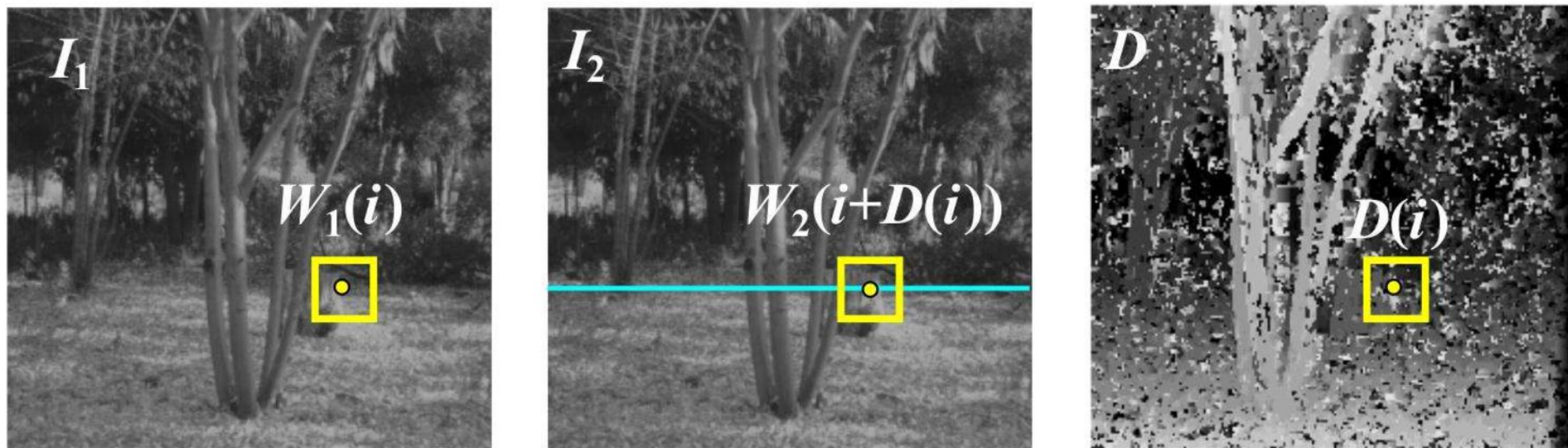


图18 计算视差：左右相机中的同名点

双目立体匹配的工作原理主要在于通过左右相机拍摄到的图片视差来重建三维场景，其原理相似于人的双眼。而这其中最重要的工作，计算视差，就是要寻找左右相机图像中的同名点，效果如上图所示。有了视差图，我们即可以根据之前双目测距模型计算距离！



优点：

1. **对硬件要求低、成本低：**只需要两台普通相机，不需要像TOF、结构光那样特殊的发射器、接收器；
2. **室内外均适用：**只要能采集到的图像，都能进行重建，而TOF、结构光就很难在室外适用；

缺点：

1. **对环境光照敏感：**（这应该是大多数重建算法的共同缺点，算法都很难适应包括：光线过强、较暗情况）
2. **完全不适用于单调缺乏纹理的场景：**如天空、白墙、沙漠等，都会出现匹配困难（但事实上，无论是结构光、TOF方法，都会有自己算法的局限性，比如结构光测量镜面反射物体）。
3. **计算复杂度太高：**由于是纯视觉方法，每个像素点去寻找自己相应的匹配点，即使经过优化，也需要沿着一条线去搜索，算法复杂度依然很高。另外，为了保证匹配结果鲁棒性，算法中还会增加大量错误剔除策略。基于这两点，很难去实现一个可靠商用的算法。
4. **算法精度不高：**有两方面原因：
 - 匹配的精度本就不高，受环境光影响较大；
 - 根据深度公式，其精度很大程度上取决于基线：

$$x = x_l \frac{b}{d}, y = y_l \frac{b}{d}, z = f \frac{b}{d}$$



05 单目标定、双目标定意义



回顾最初简化的双目模型，基于两个假设：

1. 相机是理想无畸变的
2. 两台相机光轴平行

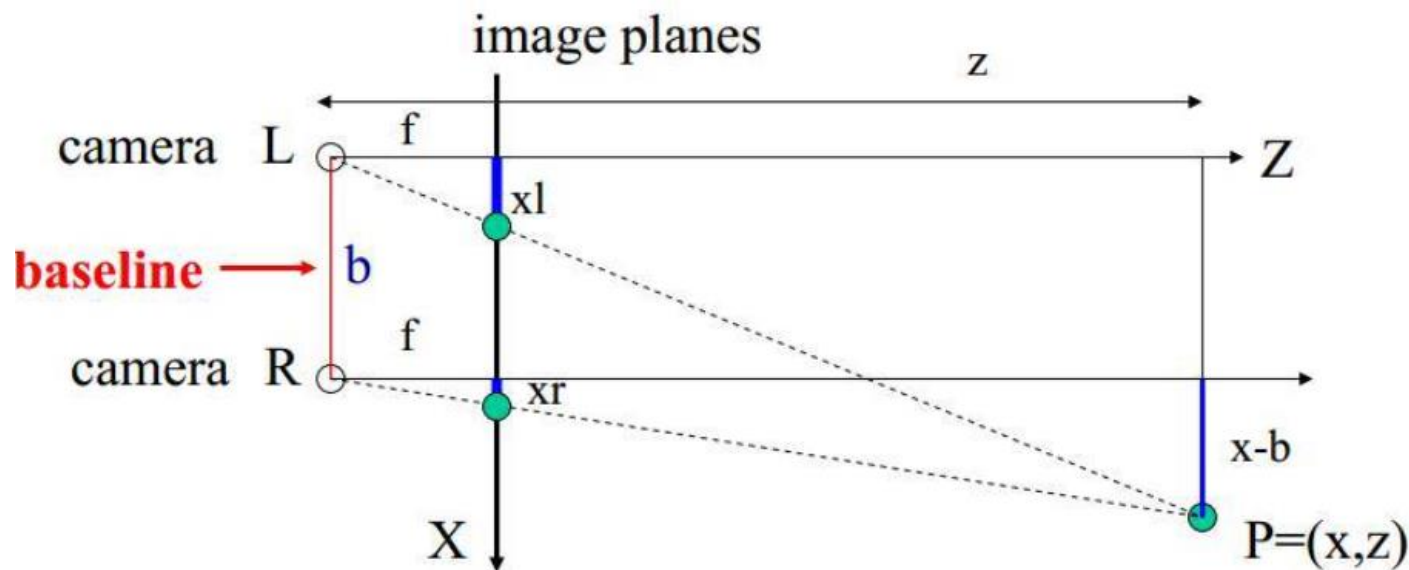


图5 理想双目模型

实际情况：

1. **实际相机是存在畸变的**：我们要把畸变的相机校准为理想模型，这一步称为**单目相机标定**；（除此之外还有标定相机内参的作用，比如计算模型中焦距 f 参数）
2. **实际两部相机的光轴是不平行的**：我们通过图像校正将相机“虚拟”地平移到了一个平面，这里就需要知道两部相机的**相对位置关系**，这一步称为**双目相机标定**；



06 双目结构光与立体匹配算法区别



特征点太少，精度不高！甚至，表面压根没有纹理
怎么办？



但是这个方法，存在一个致命的问题，那就是如果物体的表面没有丰富的纹理信息怎么办？这种情况，事实上，对于大部分刚加工好的机械加工件来说是个非常正常的现象，比如说下面这两个场景：



图19 车身白色喷涂



图20 涡轮叶片



我们可以主动向待测量区域投射结构化的光，主动地为物体表面创造“纹理”，那么问题就迎刃而解了，如下所示：

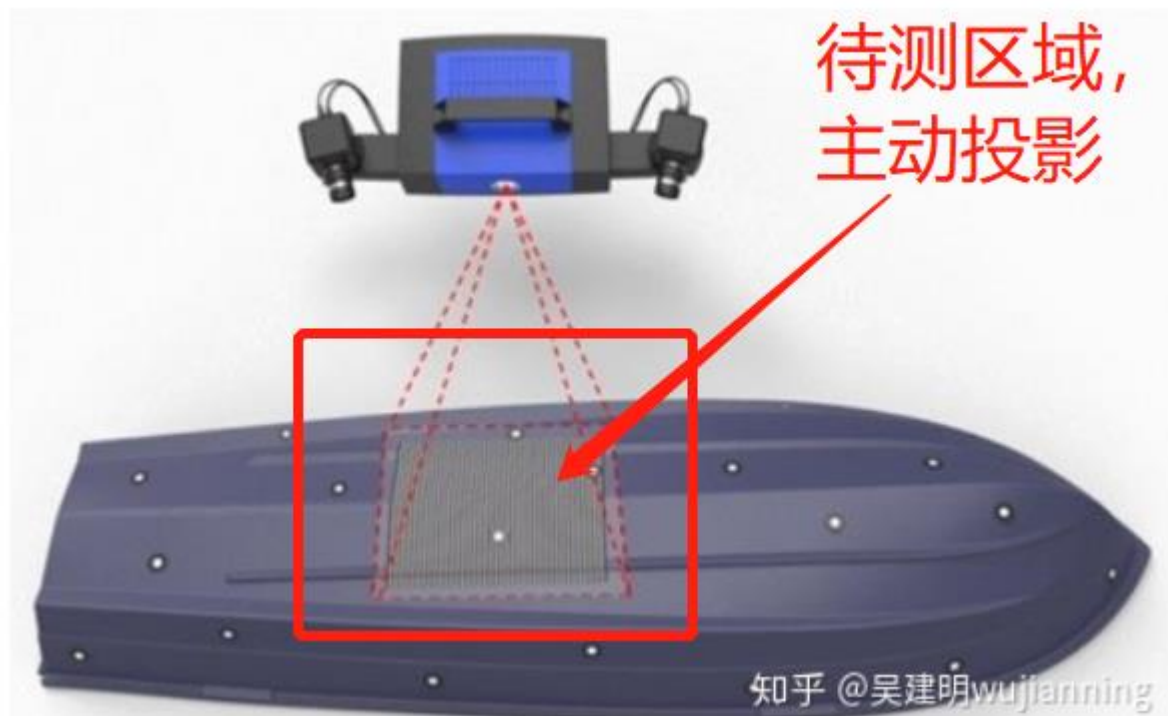


图21 待测区域，主动投影
(图片引用知乎@吴建明)

我们又可以将其看做双目立体匹配模型。实际上，该模型即结构光系统中典型的“三角测距模型”。



常见的面结构光区域标记方法：

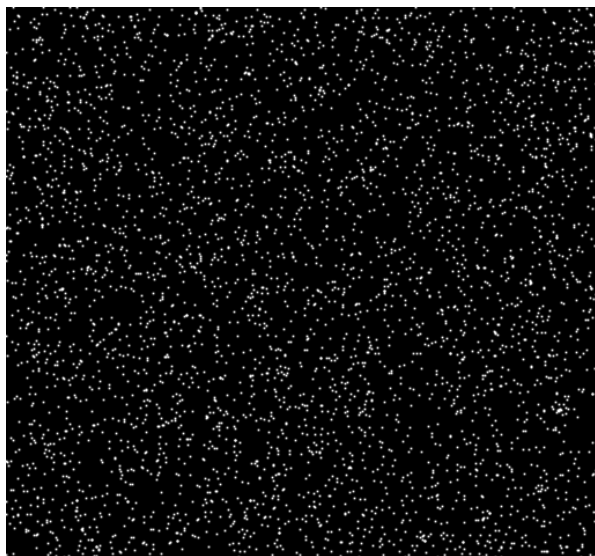


图22 散斑法
(每块小区域的编码都是唯一的)

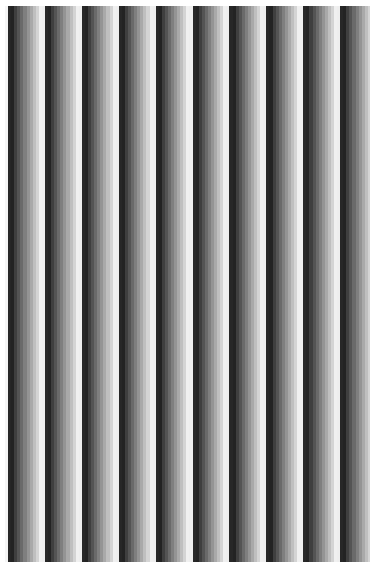


图23 相移法
(灰度标记)

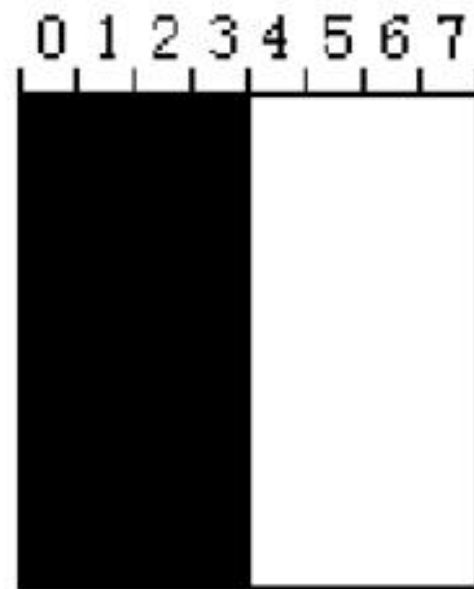


图24 格雷码
(每列区域有独立编号)



以我们之前公开课中的博众公司的产品为例，测量精度最高可以达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 级别，如下所示：

博众光机应用于高精度3D相机 (Rindo 系列相机)：



设备参数	Rindo E3509	Rindo E3511	Rindo E3517	Rindo EM33100
扫描速度	2.5FPS	2.5FPS	2.5FPS	6FPS
安装距离(mm)	90	110	170	1000
测量范围(mm)	5	20	40	450
视野范围(mm)	12×10~12×16	44×34~60×36	62×61~75×106	800×600
测量精度(μm)	8	12	25	500
重复性(μm)	1	1	5	50
外观尺寸(mm)	200×143×56	200×126×56	222×150×56	280×150×50
光源	蓝色 LED (459nm)			
数据接口	电源/以太网插线/IO 插线			
输入	同步触发信号 (5V)			
输入电压	19~24VDC 3A 以上 波动范围±20%			
标准配件	3m 以太网线，3m IO 线			

视场跟精度是成反比的，视场越大，精度越低。



实际测量效果：

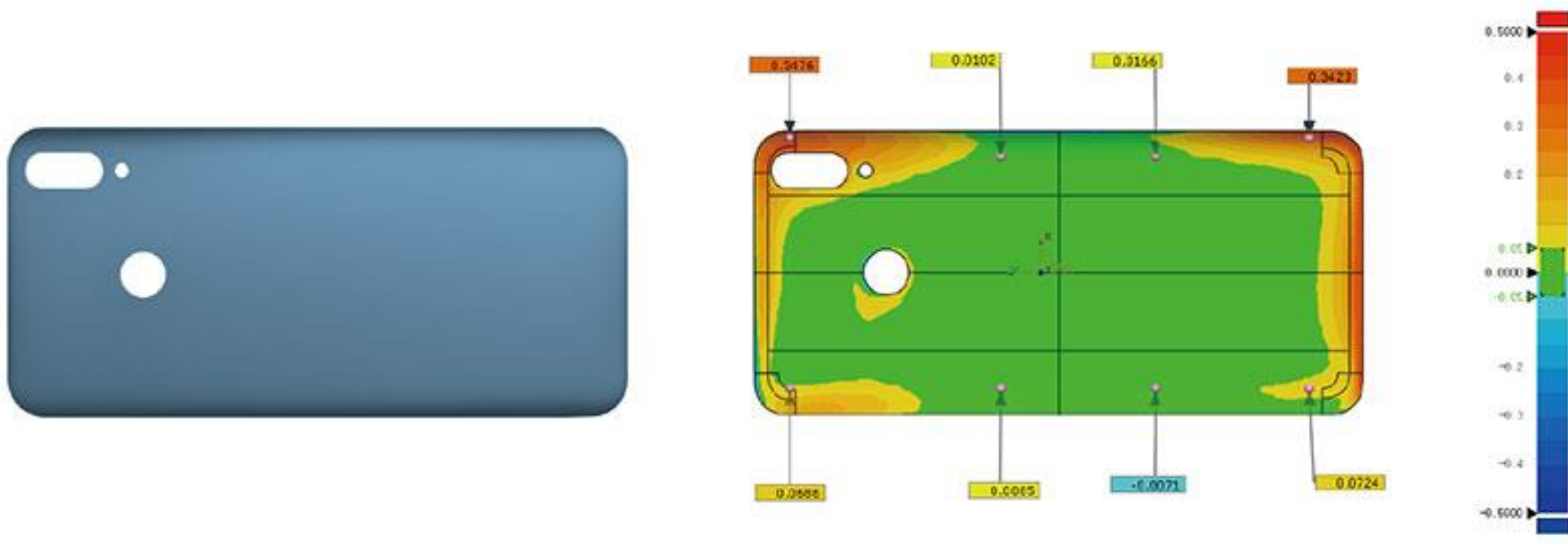


图25 实际结构光测量效果（来源于新拓三维官网）

注：重建效果远远好于立体匹配算法！



立体匹配原理：

1. 李迎松：[立体匹配系列] 经典SGM <https://github.com/ethan-li-coding/SemiGlobalMatching>
2. 李迎松：[3D视觉工坊] 第八期公开课：立体视觉之立体匹配理论与实战
<https://www.bilibili.com/video/BV1Uv411q7GU?from=search&seid=1216114577647307529>

结构光原理（更加偏向理论，与本门课互补）：

1. 基于结构光投影三维重建技术原理剖析：<https://mp.weixin.qq.com/s/WLyuE3ByntGA-Y0w8GZ29A>

后续安排：

1. 单目相机标定原理+实战详解：计算相机内参、去除相机畸变
2. 双目相机标定原理+实战详解：确定相机相互位置
3. 双目立体匹配OpenCV实战
4. 主动标记区域：相移法+多频外差

我们一定要明白算法每一个步骤的意义，比如这里，为什么我们要进行单目、双目的标定，这大概也是大多数老师让你直接从实际项目入门的原因（这种方式，如果没有师兄的话，还是比较困难的）。同时，这里也是为什么我讲结构光，从双目视差原理讲起的原因。当然实际的结构光原理，会略微有一些区别，这个在我们后面的课程讲！

欢迎关注3D视觉工坊

我们这里有3D视觉算法、VSLAM算法、计算机视觉、深度学习、自动驾驶、图像处理等干货分享！

如果你也想成为主讲人，欢迎加入我们。

➤ 报名方式：请发送邮件至vision3d@yeah.net

公众号



交流群请添加客服



3D视觉从入门到精通知识星球：针对3D视觉领域的知识点汇总、入门进阶学习路线、最新paper分享、疑问解答四个方面进行深耕，更有各类大厂的算法工程人员进行技术指导，近3000+的星球成员为创造更好的AI世界共同进步，知识星球入口：

3D与SLAM

3D 视觉从入门到精通

星主：小凡

👤 3100+ 📖 4400+

目前国内最大的 3D 视觉学习平台。本星球依托于微信公众号「3D 视觉工坊」，重点在于以下几个方面：

1、视频+答疑 | 三维重建系列视频课程...

🔄 知识星球

微信扫码加入星球



疯狂的荷兰人 向你推荐这个有用的星球

扫码这里加入星球！我有分享奖励！



感谢聆听