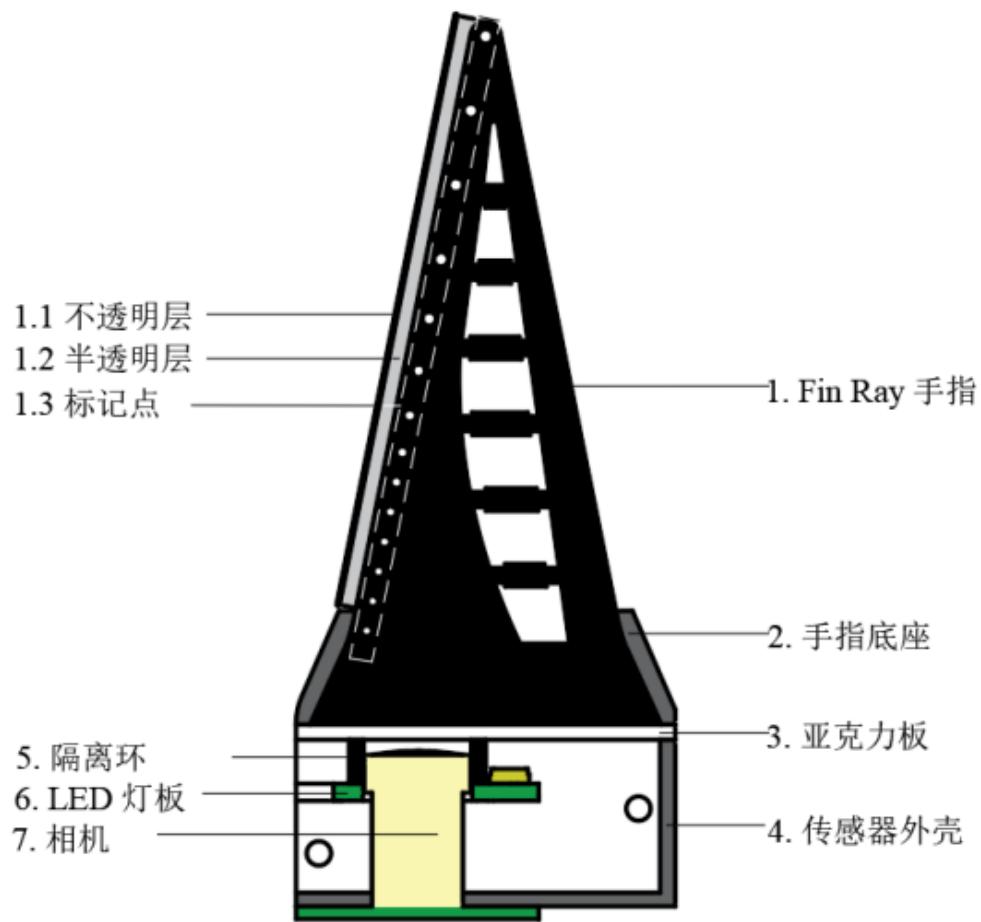


# AllTact Fin Ray 手指制作流程

## 手指简介

AllTact Fin Ray 是一种集成 Fin Ray 鳍条结构手指和视觉触觉传感器的软机械手，可以通过局部变形计算受力位置和识别物体姿势，并结合整体变形重建手指接触面和判断受力方向，其单只手指结构的简化剖视图如下图所示。



结构上，Fin Ray 手指粘接在手指底座上，并且通过亚克力板压紧，手指底部展宽与底座配合；手指底座和传感器外壳设计为分体式，通过螺钉连接；相机被螺钉固定在传感器外壳底部，正对手指接触物体的接触面拍摄。LED灯板装在传感器外壳的插槽中，相机从灯板上的圆孔穿过，所以灯板会被限位，不会从插槽中脱出；为防止LED直接照射相机产生光斑，相机和LED灯板之间还要安装一个黑色隔离环。

为了实现触觉传感和柔性抓取，Fin Ray 手指本体为全透明弹性硅胶制作，表面涂有一层黑色硅胶阻挡环境光；手指侧面用激光雕刻机刻出一列点状标记，通过追踪实时图像中的这些标记我们能够获取此时对应的参考图像用于完成重构，其半径和间距随着与相机的距离成比例增加以确保图像中各个标记点之间的间距和大小趋近一致。

本教程的目的在于让初学者快速学会如何浇铸、组装一只AllTact Fin Ray 手爪，以降低学习成本。

# 制作过程

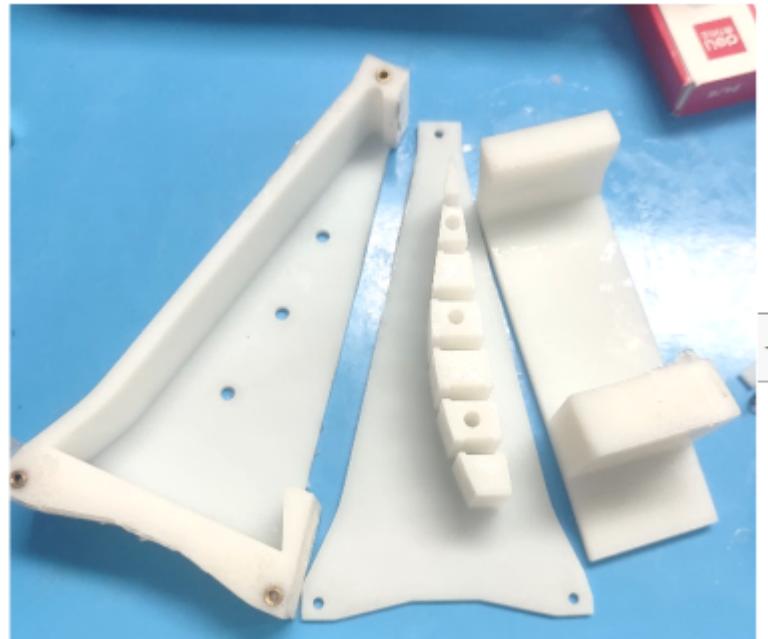
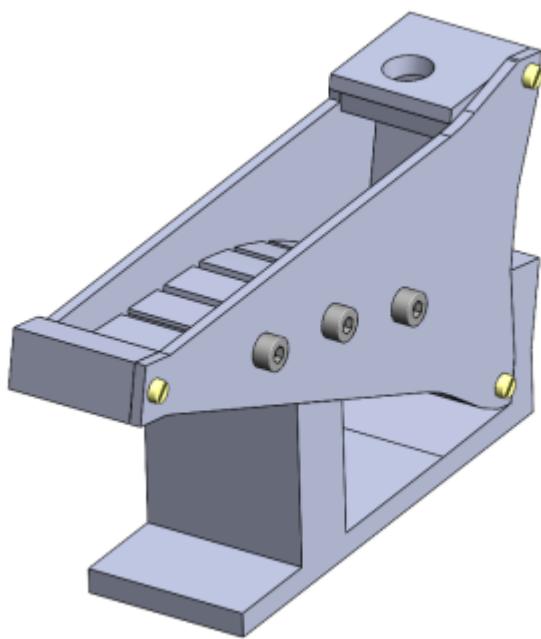
制作一只AllTact Fin Ray 手爪包括以下五个步骤，本章将详细介绍各个步骤。

1. 预加工所需部件
2. 浇铸手指本体
3. 在本体上浇铸半透明层和不透明层
4. 脱模、组装和复涂
5. 涂黑和打点。

## 部件预加工

### 浇铸模具

手指本体使用一次性浇铸成形，因而需要准备一套浇筑模具，模具使用白色韧性树脂(Greatsimple Technology<sup>®</sup>) UTR8360) 3D打印制作，常用商家为淘宝[简播旗舰店](#)，目前的设计如下图所示，其中左侧为组装模型图，右侧为实物图。



模具包括公模、母模和垫块三个部分。浇铸时，公模和母模通过角上的三个螺钉，以及从中间三个通孔内穿过的三个螺栓锁紧合拢，之后放在垫块上来保证上表面水平向上，因为该表面就是手指实际接触物体的表面，并且还需要额外浇筑一层半透明硅胶用于实现变形重建，所以需要让保证其厚度的相对均匀。

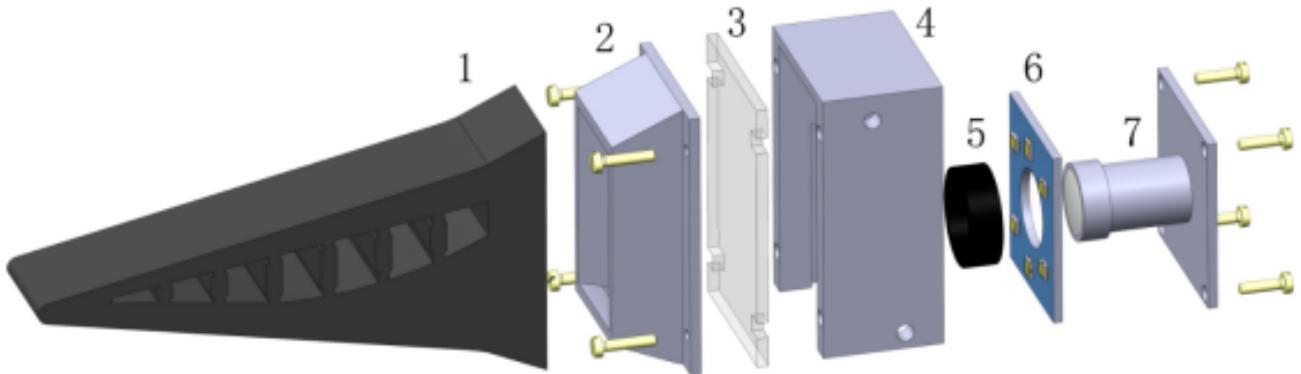
由于手指底部有展宽结构，因此躺倒浇铸会在角落处出现浇不到的空隙，为此，母模的上方打出了一个补浇孔，用于浇入透明硅胶，补充角落浇不到的部分。

事实上，补浇孔并不是一个好方案，因为孔口太窄，内部容易遗留气泡，很难充盈，所以实际取出的手指总是会有一定的缺损，而且还增大了脱模的难度（因为孔中会卡住一部分硅胶）。

补浇孔和展宽结构都是手指早期设计所遗留的结构，因为当时手指并没有采用粘接的方法与底座固结，而是直接压紧，因此经常从底座脱出，为了防止脱出，只好让底部展宽，而采用粘接之后，底部展宽实际上不再必须了，后人可以尝试删去这两个结构。

## 传感器配件

下图为传感器及手指的零件爆炸图，标号与剖视图同。



其中，手指底座、传感器外壳同样使用白色韧性树脂3D打印制作，各零件上需要与螺钉配合的地方让商家镶嵌了螺母，因为树脂材料直接攻出螺纹孔容易滑丝。隔离环使用黑色韧性树脂(Somos® Taurus)打印制作。亚克力板经过简单设计，在四个角落留出了螺钉通过的空间后定制(商家很多，可自行查找)。

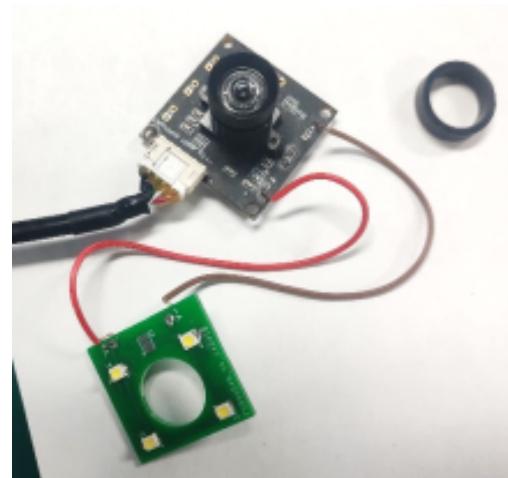
本手指所用的相机来自[新佳华工厂店](#)。参数为分辨率=1920×1080, 每秒帧数FPS = 30, 视场角FOV = 85°，无畸变。

注意，由于厂家生产的相机默认接线插座安装在底部，而这会导致结构的干涉，所以现在所用的相机都是找厂家定制或者自己将插座改装到侧面的，传感器外壳侧面开了一个槽也是为了让插座能够通过。

LED灯板为矩形形状，中间留出相机穿过的圆孔，矩形板宽度略小于传感器外壳的插槽宽度，防止在手爪闭合时与连接台干涉，灯板定制以及电阻、LED灯元件购买均来自[嘉立创商城](#)。

注意的是，一块灯板包含一块基础PCB板和LED灯、电阻元件，其中PCB板在[嘉立创EDA](#)自行设计定做，而各元件在[立创商城](#)购买，然后自行将各元件焊到电路板上。

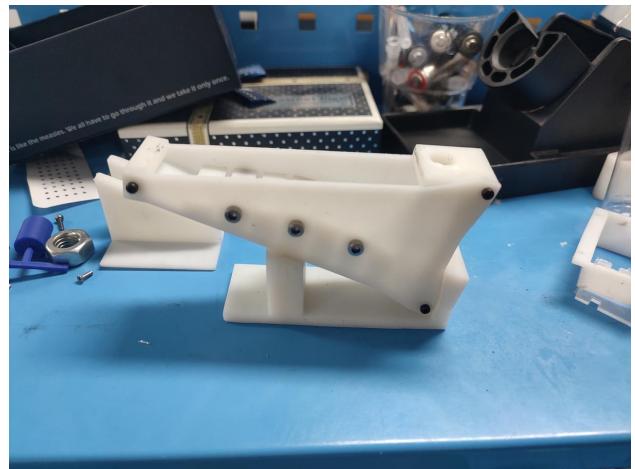
此外，灯板需要供电，我们在设计时让灯板供电电压大小与相机所需电压同为5 V，因而在将灯板与相机焊接后，就可以用相机的USB数据线为两个部件同时供电，如右图所示。



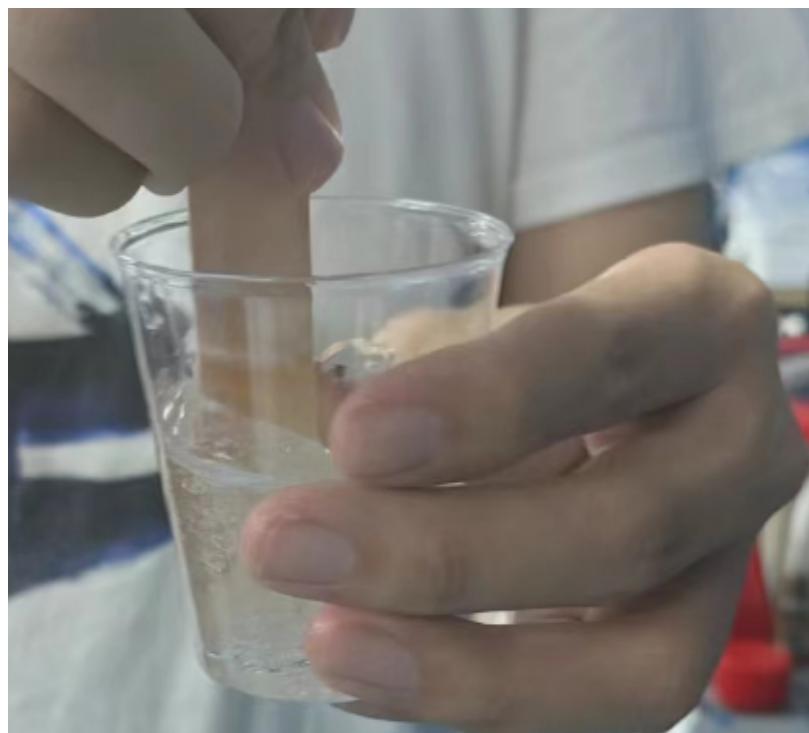
这样供电有一个问题是照明经常会因为接触不良而出现闪动，极其干扰参考图像的使用。很可能是因为焊接者技术太烂，或许应考虑对连接处做一些保护工作。

## 浇铸手指本体

1. 浇铸前，先清洁干净所用的模具，在模具内壁均匀喷涂上脱模剂（Mann<sup>(®)</sup> Release Technologies）以帮助脱模。
2. 喷完后用螺钉和螺栓锁紧模具。用垫块将模具的上表面调至水平以准备浇铸。



3. 配制时，在电子秤上按比例称量所用的硅胶，再将其反复搅拌均匀。对于图示的模具而言，浇铸一只手指需要的量在40g左右，可略多一些，因为会有残余附着在杯壁和搅拌棒上。我们使用透明弹性硅胶（ELASTOSIL<sup>(®)</sup> RT 601, A:B = 9:1比例）制作Fin Ray手指，增强手指的硬度。这种硅胶比半透明层更硬，接触时局部变形较小，重构效果更好；并且整体变形也更小，所以做出的手爪可承受力更大，能抓取更重的物体。

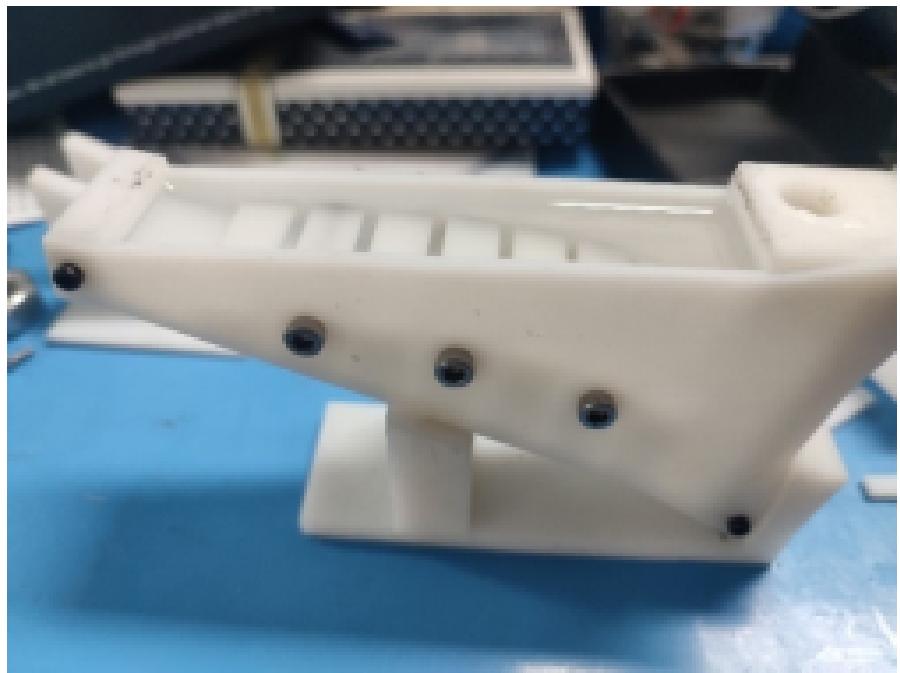


事实上，目前用的这种硅胶有点太硬了，变形柔顺性不太好，耐用性更是堪忧，用个一两周就断裂了，可以考虑结构上的优化和更多可能的材料。

4. 硅胶在调配过程中会产生很多气泡，难以自己消除，需要通过真空消泡机抽除气泡。抽气的时候，让抽气口对准杯口，这样你就可以一边抽一边在合适的时候（比如气泡快满出来了）打开开关放气，把表层的气泡吹散，加快抽气速度。



5. 消泡之后，就可以将硅胶浇入模具，直到液面平齐标记线，浇入过程中可能会产生少量新的气泡，此时需要使用镊子等尖锐物挑除。浇注完成之后，一般需要等待2-4个小时让硅胶固化。



一般来说，如果锁紧了是不会出现明显泄露现象的，如果出现，请用夹子等物品进一步夹紧模具。

## 浇铸接触层

1. 指体凝固后，在模具朝上敞开的一面浇铸接触面，由于透明硅胶浇铸液面仅达到所做的标记线，因此模具内仍然留出了浇入半透明硅胶的空间。首先浇铸半透明层(POSILICONE<sup>®</sup>)，比例 A:B=1:1)。配制硅胶和抽泡步骤同上，半透明层比较软，一般抽一次就能直接抽完气泡。配制的量在10g以内，只要浇铸到让液面平齐模具上表面即可。

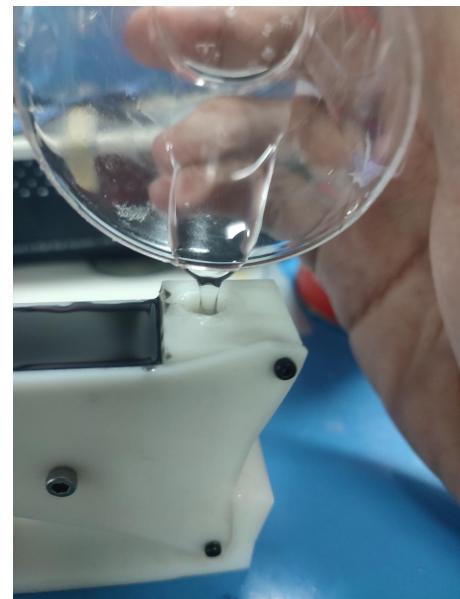


等待硅胶完全固化的时间一般是2~4个小时，然而，在浇铸时其实只需等待硅胶固化到不会互相混合的程度就可以继续下一个步骤，这样可以缩短等待的时间。

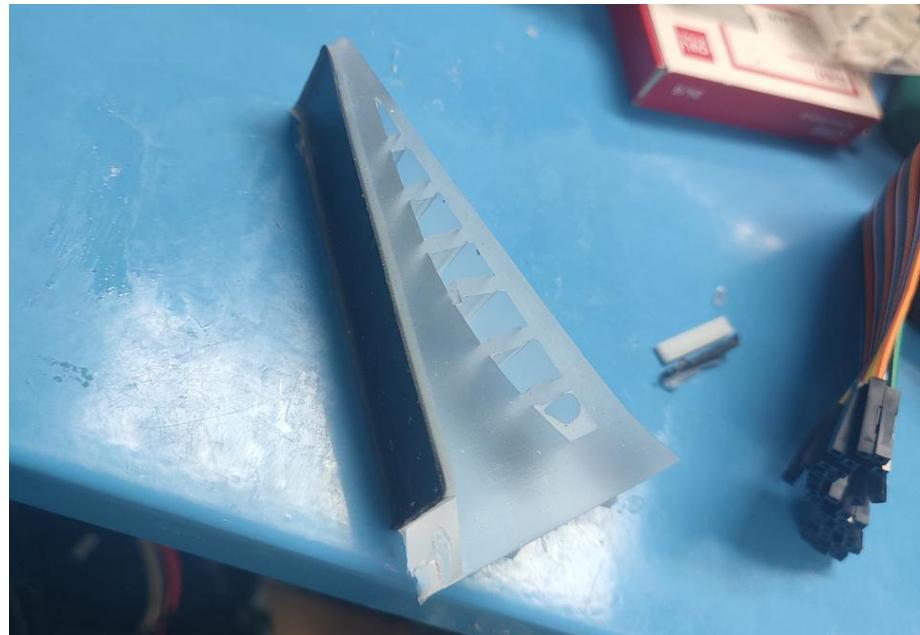
2. 半透明层凝固后，配制同样的半透明硅胶，并且加入黑色颜料混合为黑色硅胶(颜料来自 SILC PIG<sup>®</sup>，BLACK)，将黑色硅胶摊平涂在在半透明层之上成为不透明层。**同时**，由于凝固的半透明层此时已经封死了浇不到的孔隙，还要再配制一遍透明硅胶，从补浇孔浇入。二者同时凝固，节省等待时间。这两步所用的硅胶量都不大，在5g以内。

配制黑色硅胶要加的颜料量很微妙，加多了容易变成一万年都固化不了的史莱姆，加少了又不够黑，请自行拿捏，一般来说，一个拇指指甲盖大小的量至少能染10g硅胶。

同样，可考虑优化步骤，去掉补浇孔。



3. 在所有材料凝固后将手指脱模。由于接触面直接浇铸在手指本体上，因此在凝固时会形成牢固的连接，这对于手指受力发生较大变形而两相硅胶不发生脱离相当重要。

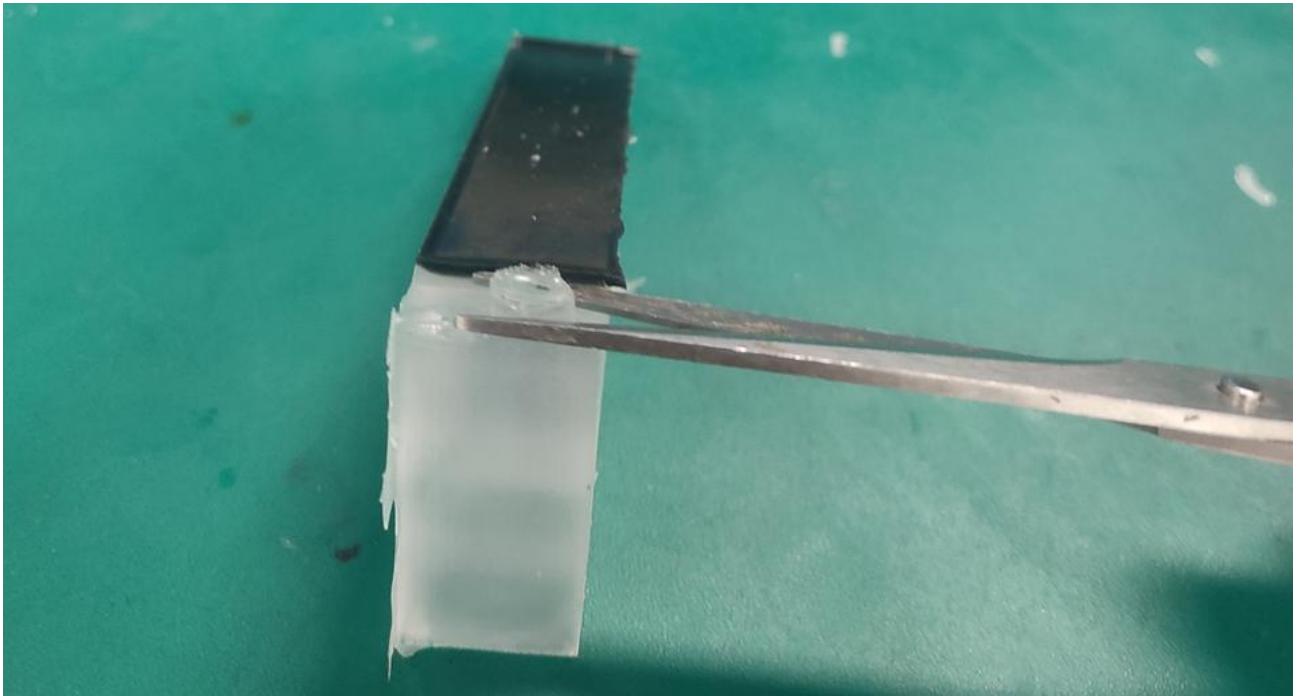


制作Fin Ray手指用过的硅胶，从左到右依次为：透明ELASTOSIL® RT 601 A, B; 透明Solaris A, B; 半透明POSILICONE® A, B. 其中，Solaris是旧版手指的硅胶材料，因为太软被弃用了。



黑颜料

4. 脱模之后，用剪刀修一修手指边缘的硅胶皮，以及，剪掉补浇孔附带出来的小圆柱。

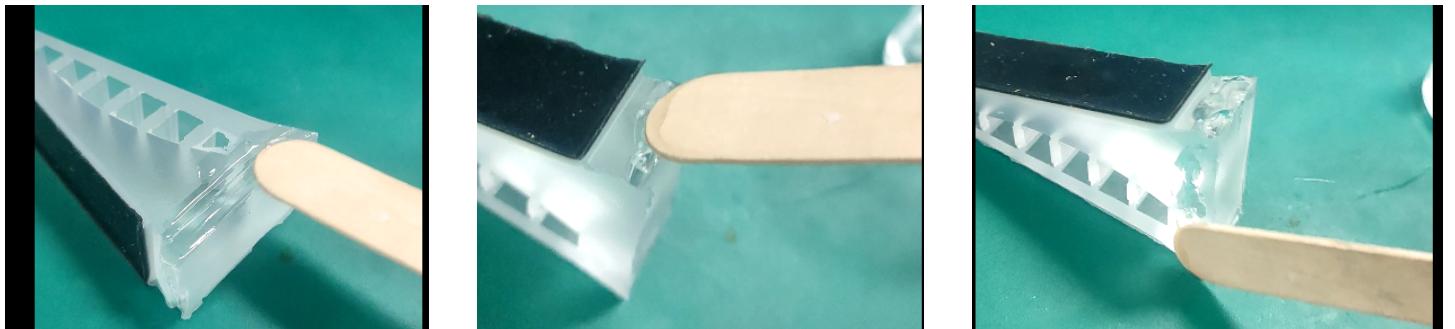


实际操作会发现，小圆柱剪掉之后总是不平整，要么剪多要么剪少，再加上内部产生的气泡，手指的底部角落处往往是不完美的。此处，推荐修剪底部的时候宁多勿少，因为接下来的步骤还会再补浇一次，详见下节。

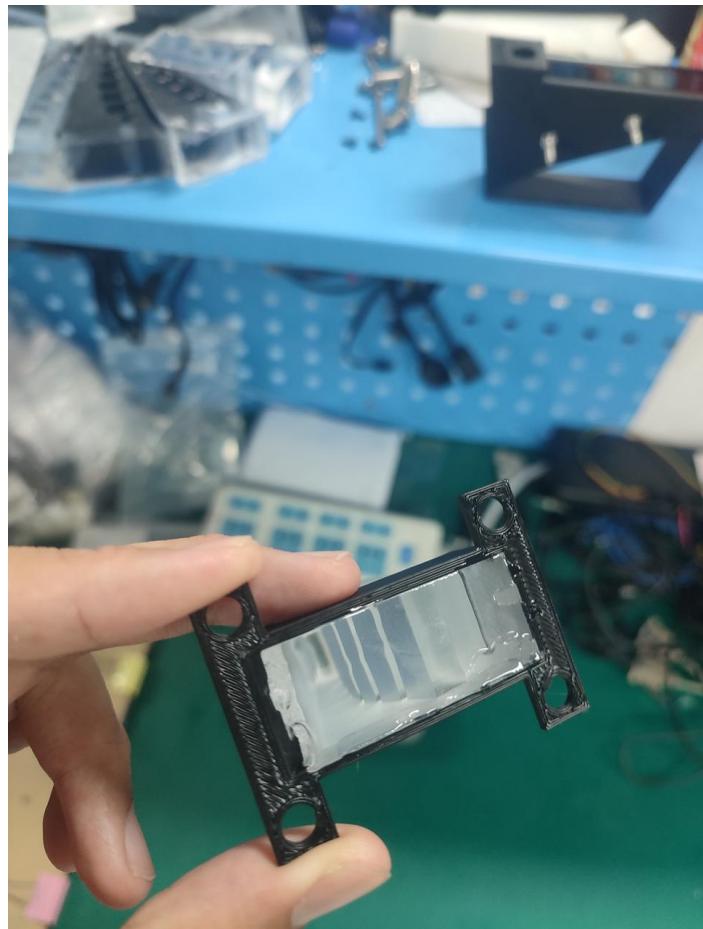
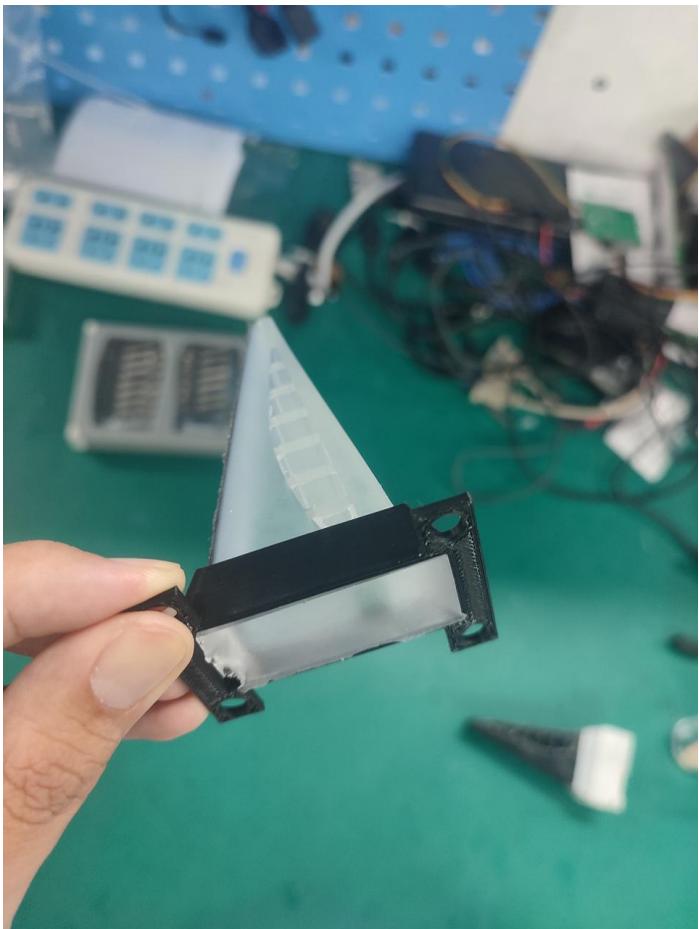
当然，更好的办法是，优化掉补浇孔。

## 组装

1. 脱模出手指本体，就可将手指本体与传感器部件组合起来。手指与手指底座的固结方式是粘接，可直接**再配制5g以内的透明硅胶当做胶水**，在手指底部四个面都涂上新配制的透明硅胶，如图所示。



然后将手指插进底座，用合适的方法让手指底面朝上平放，并在底面再次涂一层透明硅胶。所用模具未经过打磨，因此内壁很粗糙，脱模的手指表面也很粗糙，看不清接触面，因此要再涂一层。如下图为手指底面没涂和涂了硅胶的观察效果。

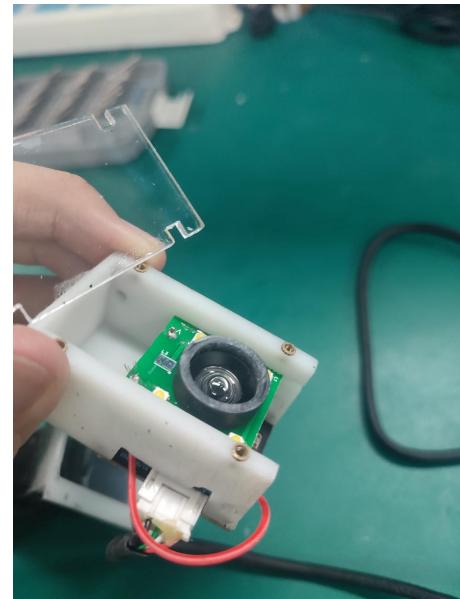
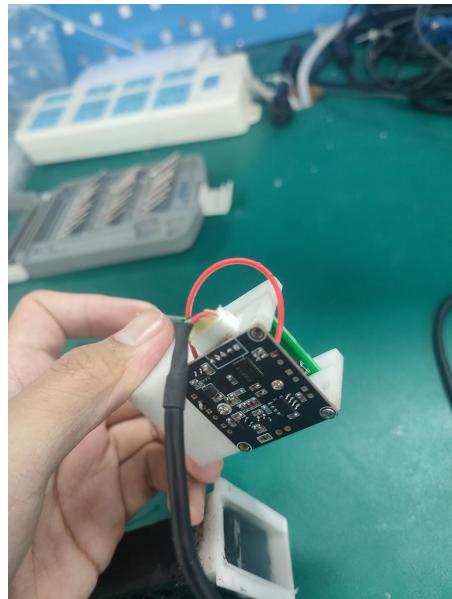


将手指底面朝上平放的方法推荐使用一个旧版本的电机箱，如下图放置。



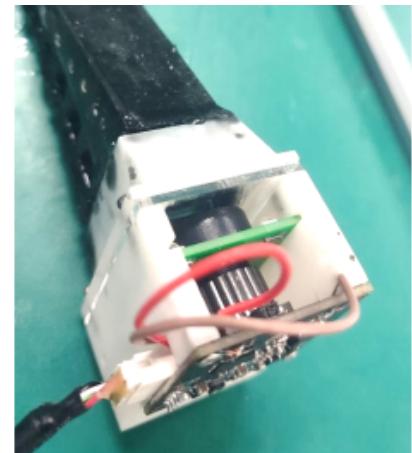
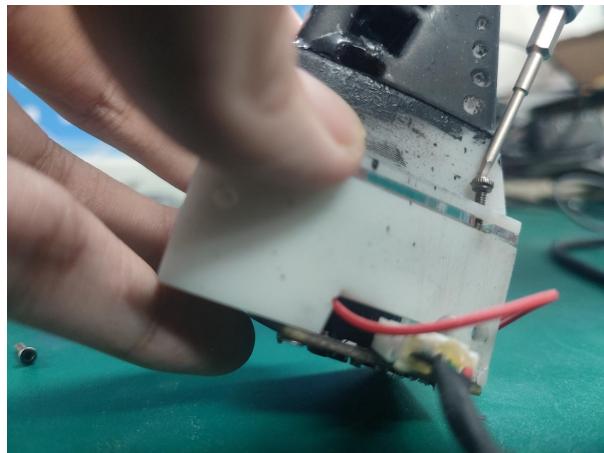
涂抹和放置完成后等待硅胶完全固化，手指就固定在底座上了，其间新配制的硅胶充当了胶水的作用，而且，对于底部由于补浇孔而导致的结构缺陷，我们可以利用手指底座朝上放置以及和手指紧密贴合的特点，即时地完成一次浇铸，此间手指底座相当于一个模具。

2. 手指固定在底座上，等待固化期间，可以先组装传感器外壳。将灯板先插进外壳，然后将相机插进灯板上的圆孔，并用螺钉固定，然后把隔离环套在相机上。



注意，设计隔离环的时候往往其高度留了一定的裕量，可能会导致隔离环太高而组装不起来，此时应用锉刀将其锉矮。

3. 涂抹的硅胶完全固化之后，就可以把亚克力板和底座一起拧到传感器外壳上，此间，由于浇铸出的手指底面不平，可能在与亚克力板之间产生气隙，这是正常的，只要不要阻挡在相机视野内干扰接触面观察即可，若实在干扰，可以考虑调整四个锁紧螺钉的松紧，以及用小刀削掉附着在底座上多余的硅胶。



值得一提的是，本人也尝试过在硅胶还是液态的时候直接把亚克力板贴上去直接完成组装，液态硅胶会充盈在亚克力板和手指底部之间，因此不会有气隙，观察效果也很好。然而这样装会更难拆，因为亚克力板和手指底部变为一体了，使用时请自行考虑。

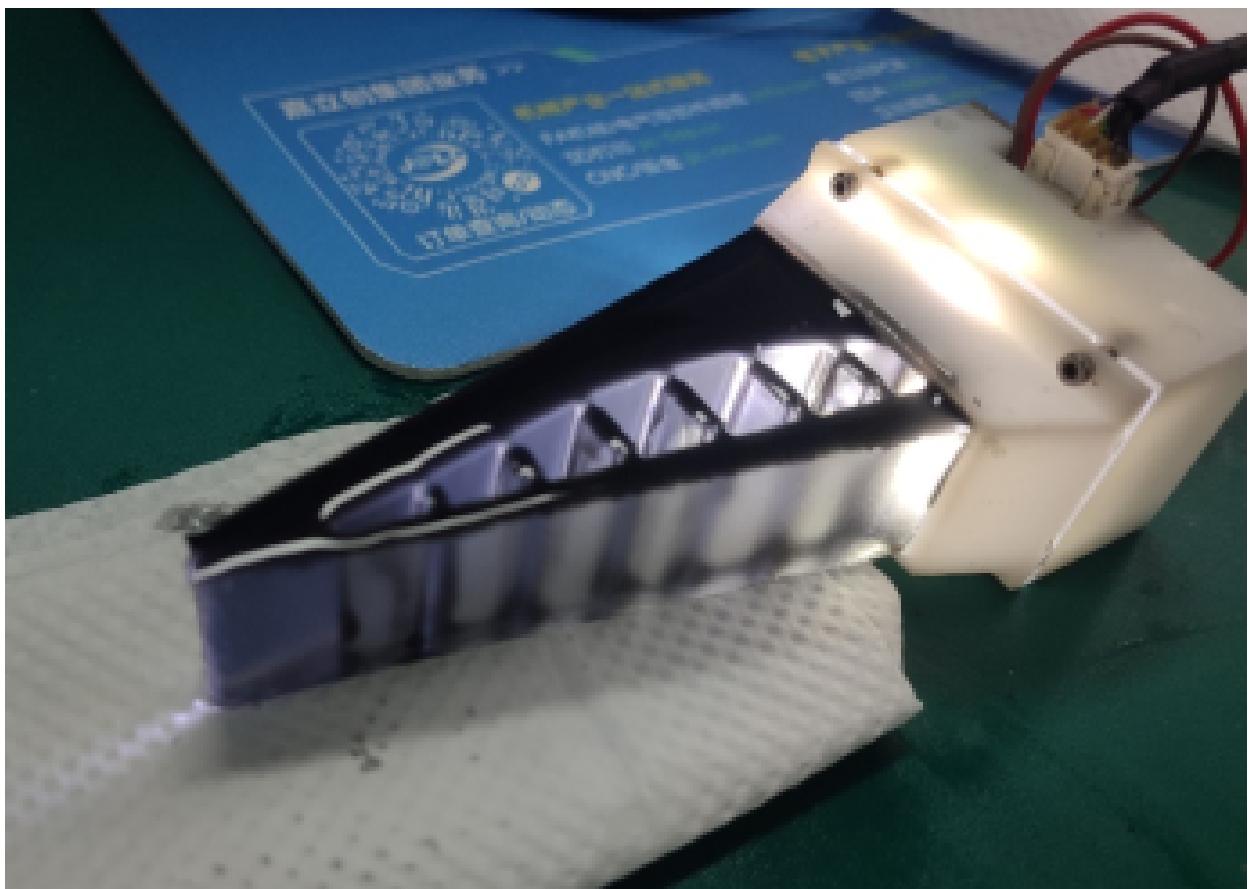
## 涂黑和打点

### 涂黑

1. 组装完成之后，再再再配制**3次透明硅胶**，用黑颜料染黑，并在手指指体表面全部涂上，阻挡环境光干扰重建。硅胶用量也在5g左右。涂黑每个表面时，应该使用合适的方法，将这个表面垫平，否则，液态硅胶会流动到重力势能最低的地方并且聚成一坨。

因为除了接触面还有三个面要涂黑，所以默认认为要配置三次，因为你一次性涂三个面，那么只有平放的那个面硅胶会留下来，其他面的都会流走。然而，如果你对时间把握得足够好，你可以在合适的时机同时涂两个甚至三个面，节省等待固化的时间。但是该操作**容易翻车，请酌情使用**。

从浇铸指体到最终涂黑，总共要配置**6~8次**硅胶，这是相当繁琐的操作，请在熟悉当前操作之后尽情发挥你的创造力，改进制作的流程。



事实上，手指的外表面除了包括四个大特征面，也包括鳍条之间的面，这些面不容易涂黑，你可以在涂其中两个大面的时候顺便涂黑这些面，或是在特征面都涂完固化之后，使用**黑色喷漆**喷黑他们。但是黑色喷漆最致命的问题在于干了之后没有任何柔性，所以当手指变形的时候，很容易就会皲裂脱落，所以还是建议使用硅胶简单涂抹即可，因为这些部分不是主要的进光区域，所以要求没有那么严格。

或者你也可以想想别的办法。

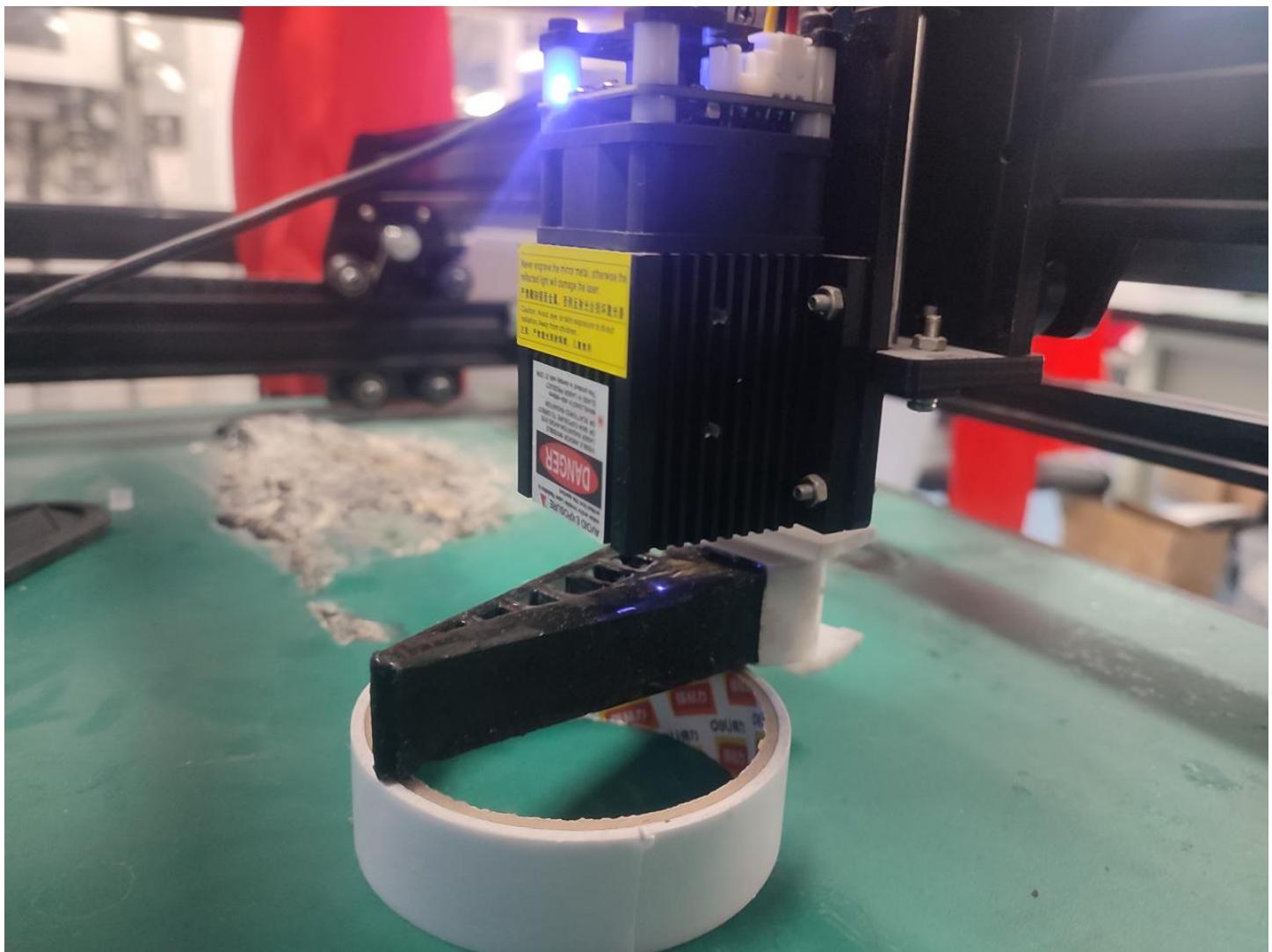
手指的指尖也是极难用硅胶涂黑的部位，不管怎么涂总是会流走，由于这个部分接触物体时并不发生柔性变形，所以很适合用黑色喷漆直接喷黑。

使用黑色喷漆的时候记得到阳台等没人的地方，味道很大。

## 打点

在如图所示的激光雕刻机上打出手指侧面所用的标记点，打点时请保证表面平放，对好焦。一般来说，每个侧面打6-8个标记点。

虽然在设计中，标记点是尺寸间距递增的，初期的版本确实也是按照如此图案去雕刻的，然而实际测试下来激光雕刻机的功率不大，熔深浅，烧出的碎屑很容易堵塞孔位，导致如果想要烧出可见的孔，必须将标记点烧得很大；如果雕刻一次，取出来剃掉碎屑，再重新雕刻，对准又成了一个问题，因为定位方法借助于传感器外壳上的两个销轴孔，并不足够准确。所以在后期的制作中，都是**手动打点**，即把机器停在原地，手动移动手指的位置，让其对准激光光点，然后启动烧蚀，并且边烧边用相机即时观察图像，观察到标记点出现即可停止。



## 总结

经过以上步骤，你已经制作完成了一只AllTact Fin Ray 手指。现在，尝试再做一只，然后将它们组装成一台机械爪，并开始调试传感器和开始后续的抓取测试吧！

不报错就算成功。

