

摘 要

制造业在不断向着智能化、自动化发展,计算机在工业中的应用极大提高了生产效率,而其中最重要的应用之一就是 CAD\CAE。计算机能够直接用于计算或生产的模型通常为包含若干线或若干面信息的文件。因此将实物变成三维模型的过程(也称逆向工程)不仅需要采集离散的空间位置信息,还需要将这些离散信息“补全”成面。

本文涉及一套激光扫描系统,该系统通过拍摄激光在物体表面所成的像来获取物体表面信息数据,仅需较为低成本的硬件便能完成数据采集。随后使用开源视觉库 OpenCV 和科学计算库 NumPy 来对摄像头采集到的图像进行处理和计算,输出点云。在得到包含物体表面信息的点云文件后再将其进行去噪、重建等处理后得到通用的 CAD 文件。

该系统可作为一种较为通用的、廉价的“桥梁”--从实物到三维模型的桥梁--应用在透平行业则可以用于批量扫描叶片,生成叶片资料库,方便后继的流体分析及力学分析。此外,本文还与其他主流的逆向工程方法进行了对比,分析了各自的优缺点。

关键词: 逆向工程; 计算机视觉; OpenCV; 点云; 单片机; 激光扫描; python

Reconstruction of 3D Complex Structure Based on Image Data

Abstract

Manufacturing industry is developing towards intellectualization and automation. The involvement of computer in industry raises productivity greatly, and one of the most important applications is CAD\CAE. The files that computer can handle usually contain information of lines and faces, so reverse engineering needs to get discrete position information and convert it in faces.

This paper deals with a laser scanning system that obtains object surface information data by taking the image of the laser on the surface of the object, with cheap hardware. Then the open source visual library OpenCV and science compute library NumPy are used to process the images and get point cloud file. After obtaining the point cloud file which contains the object surface information, the point cloud data will be denoised and reconstructed to obtain the common CAD file.

This system can be a general-purpose and cheap bridge that concatenate realistic object and virtual 3D model file. Applications in the turbine industry can be scanning the blades, generating database, or facilitating the subsequent analysis of the fluid and mechanical analysis. In addition, this article also compares with other reverse engineering methods, and analyzes their advantages and disadvantages.

Keyword: Reverse Engineering; Computer Vision; OpenCV; Point Cloud; Single-chip Microcomputer; Scanning; python

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
引 言.....	1
1 常见三维扫描原理简介.....	4
1.1 时差测距 (Time-of-Flight)	5
1.2 三角测量 (Triangulation)	6
1.3 结构光 (Structured Light)	8
2 扫描系统硬件组成.....	10
2.1 结构件.....	12
2.2 光学部件.....	14
2.3 单片机 (Single-chip Microcomputer) 系统.....	16
3 扫描系统软件组成.....	20
3.1 计算机视觉.....	20
3.1.1 激光光斑的提取.....	21
3.1.2 获取激光中心.....	24
3.1.3 被测表面的光学性质对算法的影响.....	28
3.1.4 透视对生成点云的影响.....	30
3.1.5 相机标定.....	31
3.2 单片机与 PC 的通信.....	34
3.3 点云与 CAD.....	35

结 论.....	39
参考文献.....	40
附录 A 扫描的 python 程序.....	43
附录 B 相机标定源程序.....	46
致 谢.....	48

引 言

叶片作为汽轮机里唯一的能量转化部件极其重要，其工作条件极其恶劣，然而由于叶片表面复杂，叶片的加工和检测一直是重点和难点。传统检测工序中使用的三坐标测量仪虽然精度高，但检测工时长^[1]。而激光因其发散度小、亮度高的特点广泛应用于逆向工程中。基于三角测量原理^[2]的三维激光扫描仪可以兼顾低成本^[2]和高速^[1]，相比三坐标测量仪具有很大优势^[1]，因此开展三维激光扫描的相关研究十分重要。

本文试图结合激光、快速成型技术与计算机视觉库来完成一套用于获取三维实体的表面数据的测量系统。在激光扫描的原理中，激光为固定三角测量的固定点，摄像头采集激光打在物体上的光斑得到角度信息，再加上摄像头与激光的偏移量为已知固定值，被测物体的表面信息就可以解算出来。其中，摄像头采集得到的图像的处理需要依赖计算机视觉库。好在开源的计算机视觉库 OpenCV 内置了丰富的视频、图片处理函数^[3]，大大降低了图像信息的处理难度（OpenCV 英文全称是 Open Source Computer Vision Library。它是一个开源的计算机视觉库，由一系列 C 函数和少量 C++ 类构成，实现了图像处理和计算机视觉方面的很多通用算法）。本文中的程序语言选择的是 python，一种可扩充的高级动态编程语言，其优雅、简单、明确的设计理念使得它易于上手，并且可以快速修改迭代功能^[4]。经过一系列计算视觉的函数变换后，激光光斑被分离出来，然后通过灰度权重法获得激光中心，进而解算出反射激光的位置。按照三角测量的关系就可得到激光光斑的实际空间信息（实际上这一位置通常为相对坐标，本文中使用的为极坐标，参考位置即为步进电机的旋转轴，然后将极坐标变成点云文件通用的笛卡尔坐标）。

每一帧将得到若干点的空间位置，扫描完成后会得到一个包含许多点的空间坐标的文件，称为点云。再将点云通过若干重建算法即可得到通用的 CAD 格式，然后便可以方便地进行各做操作了，如导入到 Fluent 等 CFD 软件或进行有限元分析。

常见的非接触式测量除了本文中使用的三角测量原理的激光扫描仪外，还有结构光、时差测距法等。本文也将在第一节做简单介绍和比较。

早在 1988 年，Modjarrad 就已经把激光应用到非接触式测量中了^[5]，他还讨论了其不同材质表面的精度区别。不过激光在这里被当作一种坐标测量仪的非接触式探针使用，没能发挥激光高速扫描的特点。

同年，J. P. Moss 等人发明了一种扫描病人面部轮廓的三维扫描仪^[6]，在 180 度的范围内扫描 70 次需要 30s。其结构简单可靠、适用于对一般尺寸的物体（该系统扫描对象为人体面部轮廓）进行表面数据采集。限于当时的硬件水平，其结果分辨率不能够满足

现在的需求。他们采用的减速电机做旋转轴动力使得其对角度的控制不够精确，而且他们的校正过程也没考虑到摄像头的镜头畸变、反复移动带来的误差。

1992 年, Visa Koivunen 和 Ruzena Bajcsy 论述了一套用计算机视觉(Computer Vision, 下简称 CV)的数据得到 CAD 模型的系统^[7], 讨论了消除噪声和 B 样条拟合。但分辨率和效果不太令人满意。

2004 年, Josep Forest 等人在第十七届国际模式识别会议上发表了一篇有关激光光斑图像中峰值检测的文章, 他们对激光在各种光学性质表面上反射到摄像头的有着各种噪声水平的图像进行了分析^[8], 他们分析了噪声来源, 分析了激光亮度的分布, 然后比较高斯逼近、重心法、线性逼近、BR 检测器、抛物线估计算法以及他们自己的算法(PM)的各自优缺点。结论是 PM 算法在信噪比很低的时候能够更好的估计峰值位置(相比于其他五种算法), 计算复杂度与 BR 检测器差不多。

2008 年, Kurt Konolige 等人在 IEEE 国际机器人与自动化大会上发布了一篇低成本激光雷达的报告^[2], 仅用\$30 的成本做出了扫描范围为 0.2 到 6m(且在 6m 上达到 3cm 精度)、采样速度为 4000 点/秒(最高扫描频率为 10Hz)、角分辨率达 1°的激光扫描仪(见图 1)。他们讨论了校正误差、物体表面反光导致的光斑追踪误差沿距离的变化情况。遗憾的是, 他们采用的点激光使得采样范围大大降低, 应用场景受限。

图 1 Kurt 等人制作的 Revo LDS 低成本激光雷达
(图来自原文 Figure I-1 Revo LDS)



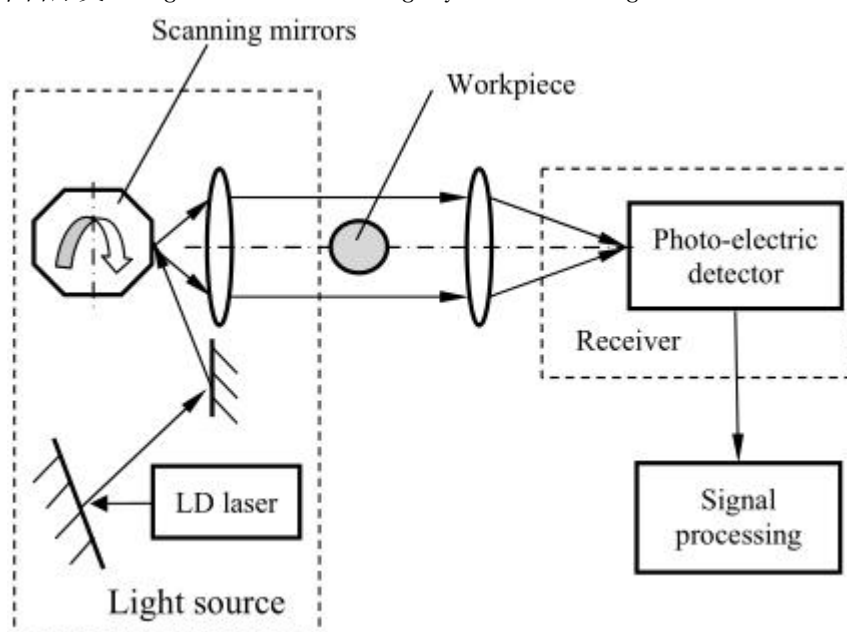
同年, 平雪良等人提出了使用 BP 神经网络来对激光扫描误差进行补偿的算法^[9], 他们将倾斜角度和工件的焦距设置输入 BP 神经网络模型得到不同角度和距离下的误差, 然后将其分解到正交方向, 分别进行误差补偿。他们的算法据称简单、易行、计算量小、对圆柱的补偿效果良好(原文称“通过该 BP 神经网络模型的试验验证, 结果表明,

此模型有效地将误差控制在接近机器的机械误差 0.03 mm ，大大提高了测量精度。”），但缺点是没测试更复杂轮廓下该算法的效果，因而实用性有限。

2009 年，Chen 等人在国际光学仪器与技术会议上提出的硬件电路来进行去噪和激光探测，他们的扫描系统采用振镜式扫描，结构见图 2。他们的扫描系统中检测电路的应用将 150 mm 直径检测上的线性误差从 $20\text{ }\mu\text{ m}$ 减小到了 $5\text{ }\mu\text{ m}$ ^[10]。但还只限于单点测量，并没有使用线激光快速扫描。

图 2 Chen 等人的大尺寸激光扫描系统

(来自原文^[10]Fig1. Laser scanning system for large diameter measurement)



2011 年，Daniel Duke 等人提出了一个检测高速液滴照片中亚像素边缘的算法^[11]，可以帮助解决激光扫描中激光光斑的问题。

2015 年，Matache 等人对 3D 扫描和坐标测量（CMM）应用在小型燃气轮机叶片上的可行性进行了比较^[1]。结论是 CMM 在叶片前缘处较 3D 扫描精度要高，且在点坐标的后处理上消耗更少的计算资源；但 3D 扫描易于使用，操作者经验对其扫描效果影响较少、获取表面信息点数更多、工时更少、便于携带、造价低。因此 3D 扫描还是有其独特优势的。

以上前人工作从硬件可用性、原理可行性、成本、精度等方面论证了激光扫描在透平的应用是完全可行的，但其广泛应用的关键在于成本与性能的权衡。

1 常见三维扫描原理简介

在调研方案的过程中，笔者发现业内将常见的三维扫描方法分为接触式和非接触式两大类^[12]。其中接触式的主要代表为三坐标测量仪，非接触类又可分为非接触主动式扫描和非接触被动式扫描。笔者将其特点列表如表 1.1 所示：

表 1.1 常见三维扫描方法的比较

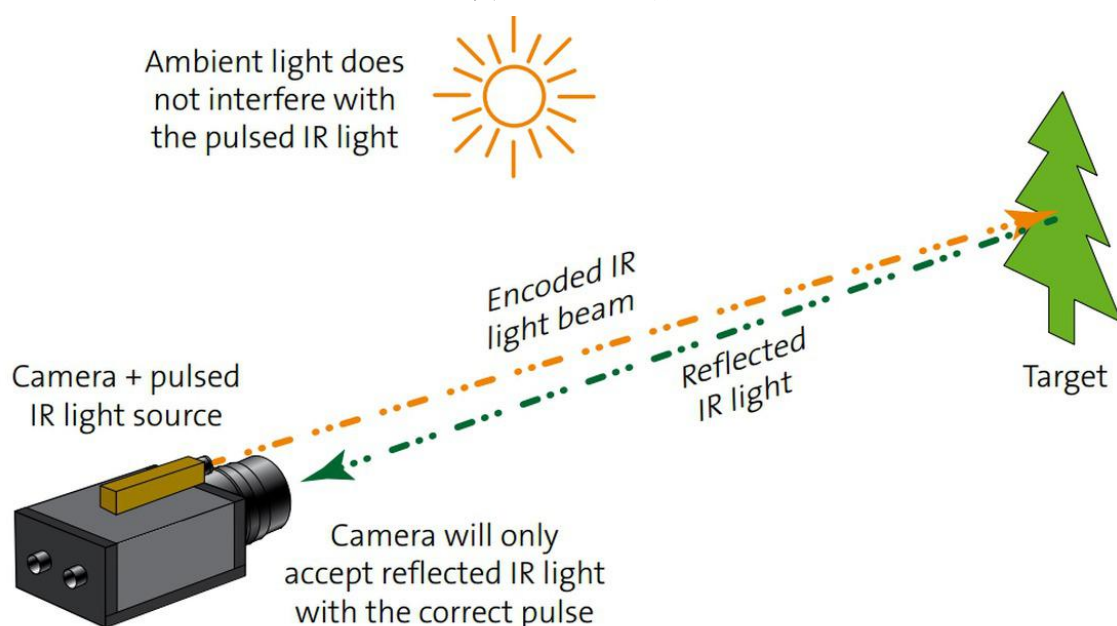
类别	接触式扫描	非接触式	
		主动扫描	被动扫描
特点	通过直接接触物体表面获得深度信息	投射能量高度集中的电磁波/声波，测量其反射能量的特性来计算空间信息	观测物体表面反射的环境光线来计算物体的空间位置
优势	可以达到很高精度	兼顾精度和速度，具体性能由原理决定	硬件相对便宜
缺点	获得数据点的速度较慢	成本和系统复杂度较高	重建算法计算量相对较大，精度低，受环境影响大
典型代表	坐标测量机（CMM，Coordinate Measuring Machine）	时差测距、三角测量、结构光等	双目视觉

考虑到透平行业的应用特点和成本因素，本文中的扫描方法为非接触式主动扫描，但仍介绍下各扫描方式的特点。

1.1 时差测距 (Time-of-Flight)

时差测距（下简称 ToF）的测距原理是测量发射能量波脉冲与接收脉冲的间隔 t ，将间隔 t 乘以该能量在该环境下的波速再除 2 即得所需距离，原理见图 1.1。ToF 相机不仅能如普通相机一样分辨二维轮廓，还记录下了视场中的距离信息（也称深度信息）。

图 1.1.1 ToF 原理



ToF 的难度在于其分辨率越高难度越大，其灵敏度受限于波长和时间分辨率：

可见光的波长在 390 到 700nm 左右，对于大部分应用而言其分辨率已经足够了。但由于光速约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，要达到 1mm 的分辨率，设备对时间的分辨率需要在 6.67ns 以下，对接收端要求很高^[13]；

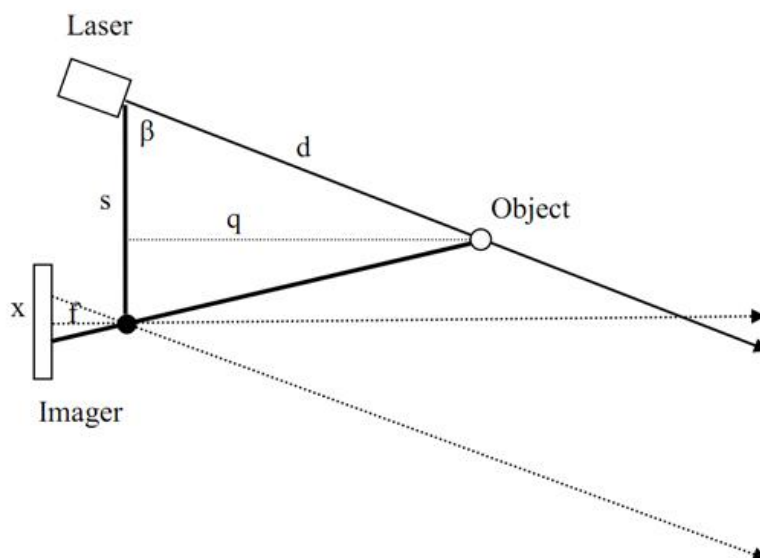
而若选择机械波，常温下声速大概 340m/s，达到 1mm 空间分辨率只要求 5.88 μs 的时间分辨率。但问题在于声波难以被高效地集中，同时波长太长（从米级到毫米级），其空间分辨率并不令人满意。声呐和 B 超属于常见的机械波 ToF 设备，但它们很少应用于空气中，都是应用在有液体的环境中（电磁波在水中衰减太快，因此只能采用分辨率不那么高的机械波了）。

Daniël Van Nieuwenhove 详细讨论了光学 ToF 的局限性^[13]，如相机的动态范围、带宽要求，光源的频率，物体表面的散射等问题。微软开发的 Kinect2 就采用 ToF 技术，但造价相对较高。

1.2 三角测量 (Triangulation)

三角测量指测量过程中已知点与位置点的关系成三角形，通过测量该三角形的几何量（如边的长度、夹角）即可得到被测点的位置信息，其原理如图 1.2.1 所示：

图 1.2.1 三角测量原理



有关系：

$$\frac{f}{x} = \frac{q}{s - q * \tan(\beta)} \quad (1.1)$$

进而可求得

$$q = \frac{f * s}{f * s * \tan(\beta) + x} \quad (1.2)$$

其中， f 表示针孔相机模型中摄像头的焦距，实际测量中为固定值，单位为像素。

x 表示激光光斑投在感光元件上的位置距感光元件中心的距离，实际测量中为固定值，单位为像素。

β 表示激光与相机光轴所成角的补角，实际测量中为固定值，单位为弧度。

s 为激光器出口到相机光轴的间距，实际测量中为固定值，单位为毫米。

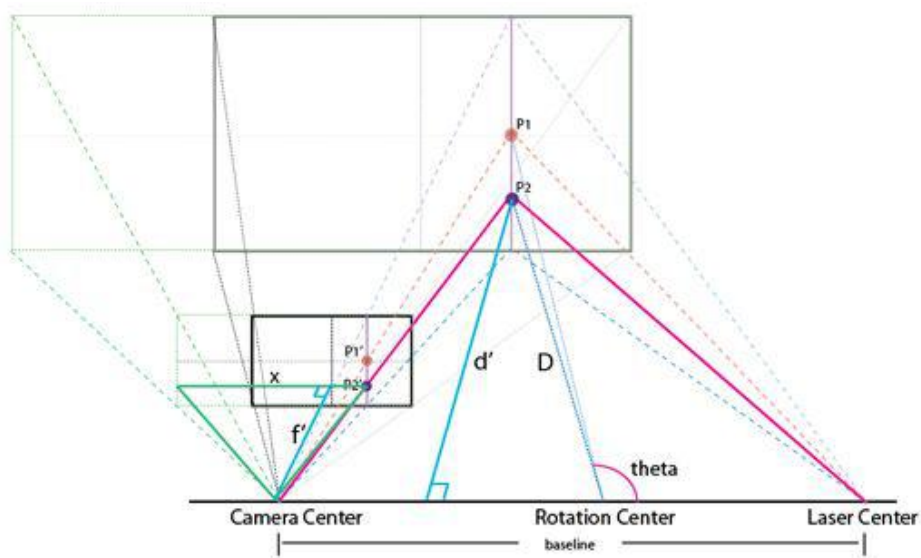
q 表示物体距上述连线的距离，为所求值，单位为毫米。

类似的， d 也可由 f, x, β, s 求得，

(1.3)

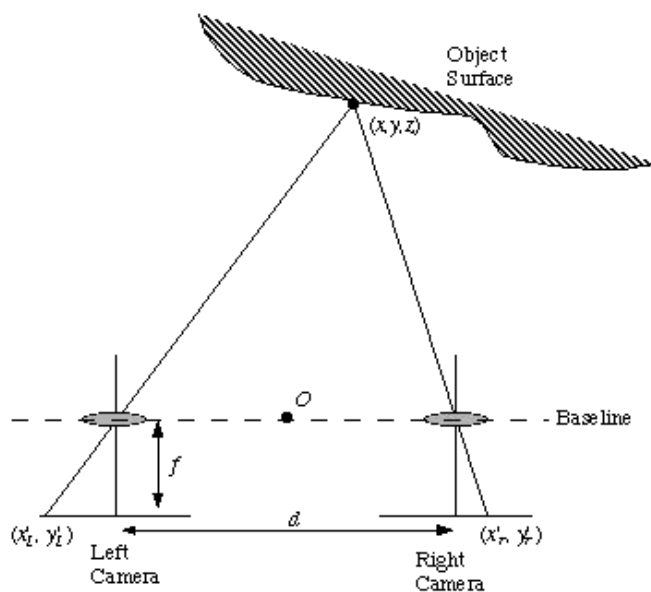
空间中的三角测量则是多了一个俯仰角，原理如图 1.2.2 所示：

图 1.2.2 空间中的三角测量



此外，非接触式被动扫描类别中的双目视觉也是三角测量的原理，见图 1.2.3

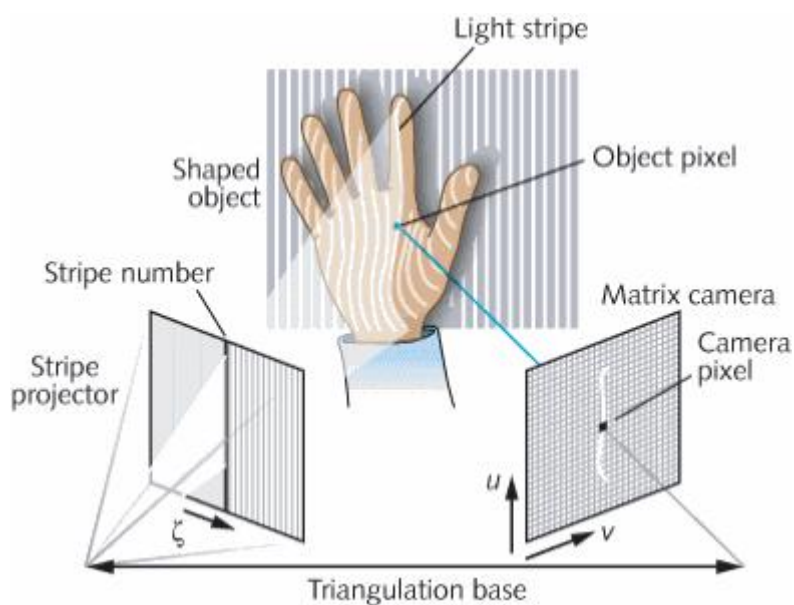
图 1.2.3 双目视觉原理示意图



1.3 结构光 (Structured Light)

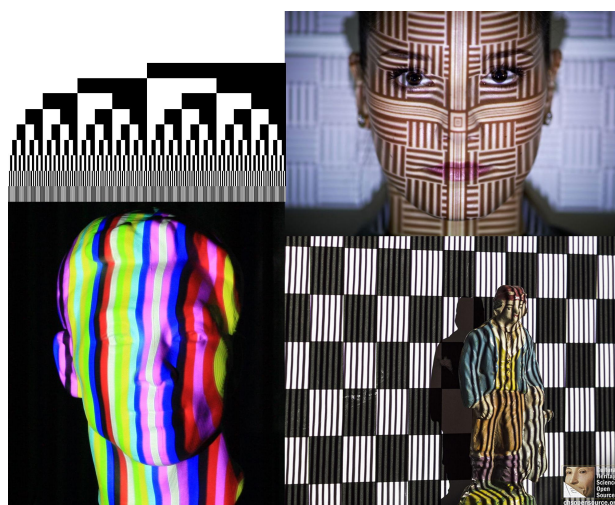
结构光的基本原理其实也是三角测量，然而把它与三角测量并列的原因是其投射的是图案已知、可控的光栅，这使得结构光方法能从一帧图像中获取整个可见表面的深度信息，其原理见图 1.3.1。

图 1.3.1 结构光扫描原理图



投射的光栅可以是普通自然光，也可以是经过调制的携带时间、空间、频率等信息的编码光。此种方式在要求较高测量精度时，需要采用复杂的编码方式（见图 1.3.2）。

图 1.3.2 不同编码光的比较



微软公司开发的可以捕捉玩家全身动作的装置 Kinect 即使用的该种原理，见图 1.3.3。

图 1.3.3 Kinect 外形图



Kinect 使用了一个红外线发射器、一个 RGB 彩色相机、一个红外线 3D 结构光深度感应器，其中红外线发射器与结构光深度感应器完成对物体深度信息的采集，彩色相机用于对物体表面颜色信息的采集。其使用的光栅为点状，见图 1.3.4。

图 1.3.4 Kinect 的点状光栅

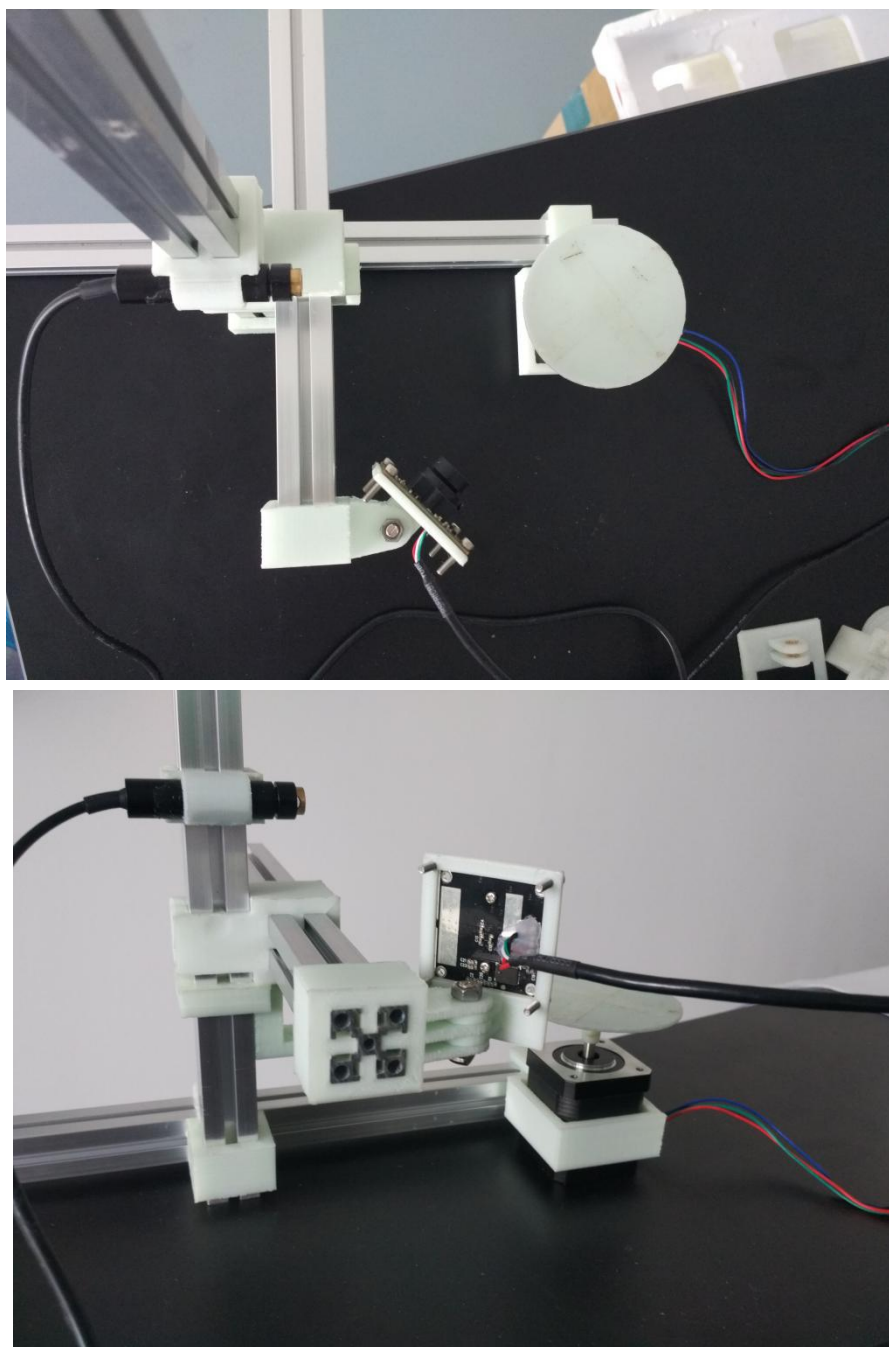


本文中所述扫描系统原理为 1.2 节的三角测量，其硬件组成与软件原理分别在第 2 章、第 3 章示出。

2 扫描系统硬件组成

扫描系统的实物图见图 2.1。图中出现的有铝型材、固定件、激光器、摄像头、步进电机、托盘。单片机与 PC 等未出现在图中。

图 2.1 扫描系统实物图



该扫描系统软硬件组成见表 2.1。

表 2.1 扫描系统的软硬件组成

软件组成	硬件组成
计算机视觉	结构件: 2020 铝型材
	3D 打印得到的连接件
	光学部件: 1080p 摄像头
单片机-PC 通信	5mW 氦氖激光器
	两相四线步进电机
点云与 CAD	单片机系统: Arduino Uno 单片机
	A4988 步进电机驱动模块

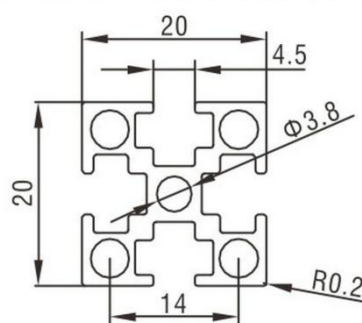
工作流程见图 2.1: 激光持续发出线激光, 投射到被测物体上。激光在物体表面的反光被摄像头采集, 并通过 USB 线传向 PC。PC 上的 python 对图像进行处理, 分离出激光光斑, 得到激光位置后通过三角测量计算光斑 (即物体表面) 的空间位置。得到一帧中线激光扫到的部分的表面信息后, python 通过串口给单片机发送移动指令。单片机收到移动指令后翻转其引脚电平, 控制 A4988 模块操作步进电机四个相线上的电平, 使步进电机旋转所需的角速度。单片机完成操作后通过串口给 PC 发送完成指令, PC 在接到完成指令后继续采集、处理下一帧的表面信息。完成一整圈的采集后, python 将获得的极坐标形式的点坐标数组变成笛卡尔坐标形式的数组, 并按一定格式写入到硬盘文件上, 至此, 采集部分结束。

使用 meshlab 打开得到的点云文件, 计算表面法向量、去噪点、重采样、构建三角面, 就得到了通用格式的 CAD。

2.1 结构件

本文中采用 2020 型铝型材，其截面图如图 2.1.1.1 所示。

图 2.1.1 2020 型材截面图



该型材尺寸合适，截面惯量大，相对较轻且替代性良好。因此是本文中扫描系统的骨架。连接件由 3D 打印制成。

2009 年美国 ASTM 成立了 F42 委员会，将 AM 定义为：“Process of joining materials to make objects from 3d model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies.” 即：“一种与传统的材料去处加工方法截然相反的，通过增加材料、基于三维 CAD 模型数据，通常采用逐层制造方式，直接制造与相应数学模型完全一致的三维物理实体模型的制造方法”。本文中采用了挤出成型技术（used Deposition Modeling, FDM）来制作各种固定件和托盘，其建模得到的模型文件预览见图 2.1.2，实物见 2.1.3。

Sean Poole 等人使用 FDM 制造了一个 1.4 米长的小型风机叶片，在 5 到 7 天内完成了 3 只叶片的加工，并在 9m/s 的风速下达到 500rpm 以上的转速。他们的研究说明了 FDM 做结构件的可行性^[14]。而 DORIAN NEDELCU 等人用商业 3D 打印机来制造传统加工方法（CNC）难以加工的水轮机转轮（runner），列举了所用材料的力学性能后又用有限元作了力学分析，有限元和实验结果都说明 FDM 技术加工实验用转轮能够满足要求^[15]。

本文中的部分连接件可以通过标准件代替，但是步进电机与型材的连接，在使用 FDM 后变得方便可靠。在整个扫描流程结束后得到 CAD，同样可以使用了 FDM 技术来制造到一个实体，完成定性比较。

图 2.1.2 本文使用的部分 CAD 模型

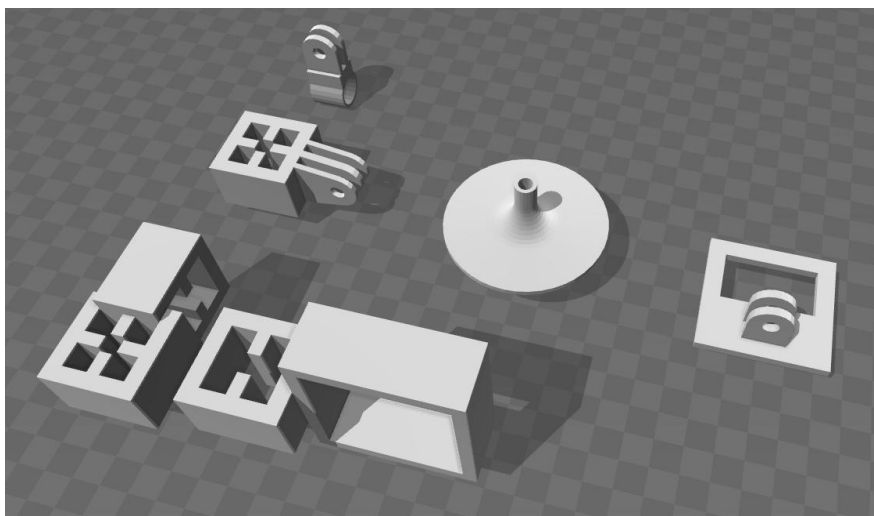


图 2.1.3 使用 FDM 打印出的实物照片（部分）



图 2.1.2 和 2.1.3 中有摄像头固定座、激光固定座（2.1.2 中为可动式，2.1.3 中为固定式）、电机固定座，还有两种 90 度型材连接件和托盘。

2.2 光学部件

摄像头采用 JY05029 型摄像头模块，核心技术参数列表如 2.2.1 所示。

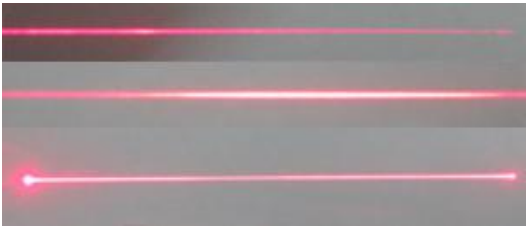
表 2.2.1 JY05029 的部分关键技术参数

接口	USB 2.0
传感器像素	1920*1080
感光尺寸	1/2.7'
视角	100 度无畸变
帧率	30fps@1920*1080 60fps@1280*720 120fps@640*480
输出格式	UYU/MJPG

在 1080p 的分辨率下最高帧率可达 30fps，但实测根据光线强度不同，其帧率在 18~28fps 不等，详细的帧率/性能讨论将在第 3.2.2 节讨论。

激光采用的是 M-12A635-(5-80)-L 型半导体电激励式连续可见激光器，输出功率 5mW，波长 635nm，光学部分为 pvc 聚焦镜片+玻璃柱状镜片，焦距连续可调。值得一提的是，激光器的透镜种类对激光线的均匀性和亮度分布有着重要影响。质量较好的透镜为鲍威尔透镜（Powell Lens），但成本较高（约¥200）；一字玻璃柱面镜质量一般，成本适中（约¥20）；树脂波浪透镜质量较差，但成本低廉（¥1~¥10），三者的对比图见图 2.2.1。

图 2.2.1 三种透镜效果的对比
（从上到下依次为树脂波浪镜、一字玻璃柱面镜、鲍威尔透镜）



其中 Powell 透镜的光路图见图 2.2.2 所示，亮度分布见图 2.2.3。

图 2.2.2 Powell 透镜光路图

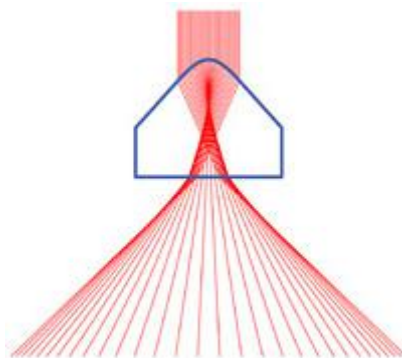
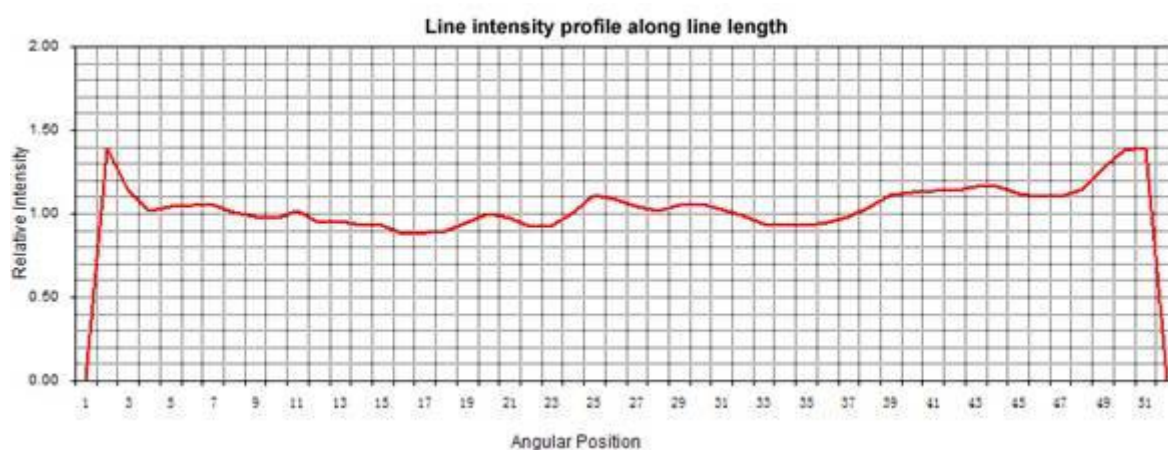


图 2.2.3 某款 Powell 透镜的亮度分布



可以看到，树脂波浪镜在激光边缘有断断续续的现象；而一字玻璃柱面镜的激光中间亮度较高，边缘低；鲍威尔透镜的均一性较好，但会在两端附近出现光点。

无疑，Powell 透镜效果是最好的，但考虑到成本因素，本文中的激光为一字玻璃柱面镜。柱面镜的激光亮度分布不均匀带来的问题将在 3.1 节进行讨论。

2.3 单片机（Single-chip Microcomputer）系统

本文中采用 Arduino Uno 和 A4988 步进电机驱动块来实现对两相四线步进电机的控制。图像处理和点云处理均是在 PC 上进行，采集过程则是 PC 指挥单片机控制步进电机转动。

Arduino Uno 搭载 ATmega328P 型芯片，拥有 14 个数字量 I/O 针脚、6 个模拟量输入针脚，操作电压 5V。驱动 A4988 需要占用 5 个针脚（分别用于 MS1~3 调节步进角、STEP 控制步进、ENABLE 控制启用）。

本文中使用 A4988 型驱动块，其主要技术参数见图 3.3.1 所示。它支持 8~35V 的两相四线步进电机，最大驱动电流根据板上一个可调电阻的阻值决定，最大支持 2A。本文中的电机及均为 1.4A，可以正常工作。

图 2.3.1 A4988 主要技术参数

（来源：A4988 技术手册）

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ¹ at T _A = 25°C, V _{BB} = 35 V (unless otherwise noted)						
Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. ²	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V _{BB}	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V _{DD}	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R _{DS(ON)}	Source Driver, I _{OUT} = –1.5 A	–	320	430	mΩ
		Sink Driver, I _{OUT} = 1.5 A	–	320	430	mΩ
Body Diode Forward Voltage	V _F	Source Diode, I _F = –1.5 A	–	–	1.2	V
		Sink Diode, I _F = 1.5 A	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I _{BB}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I _{DD}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	V _{IN(1)}		V _{DD} ×0.7	–	–	V
	V _{IN(0)}		–	–	V _{DD} ×0.3	V
Logic Input Current	I _{IN(1)}	V _{IN} = V _{DD} ×0.7	–20	<1.0	20	μA
	I _{IN(0)}	V _{IN} = V _{DD} ×0.3	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R _{MS1}	MS1 pin	–	100	–	kΩ
	R _{MS2}	MS2 pin	–	50	–	kΩ
	R _{MS3}	MS3 pin	–	100	–	kΩ
Logic Input Hysteresis	V _{HYS(IN)}	As a % of V _{DD}	5	11	19	%
Blank Time	t _{BLANK}		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t _{OFF}	OSC = VDD or GND	20	30	40	μs
		R _{OSC} = 25 kΩ	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V _{REF}		0	–	4	V
Reference Input Current	I _{REF}		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error ³	err _I	V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 38.27%	–	–	±15	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 70.71%	–	–	±5	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 100.00%	–	–	±5	%
Crossover Dead Time	t _{DT}		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold ⁴	I _{OC PST}		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T _{TSD}		–	165	–	°C
Thermal Shutdown Hysteresis	T _{TSDHYS}		–	15	–	°C
VDD Undervoltage Lockout	V _{DDUVLO}	V _{DD} rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	V _{DDUVLOHYS}		–	90	–	mV

¹For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

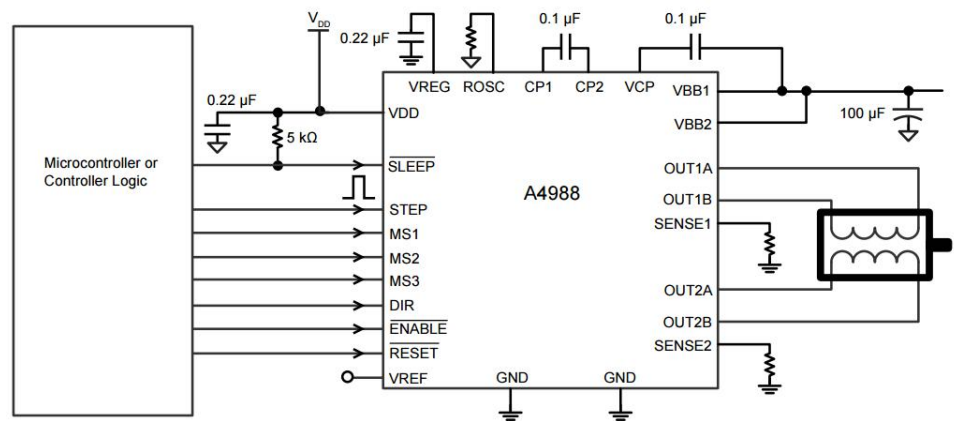
²Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

³V_{ERR} = [(V_{REF/8}) – V_{SENSE}] / (V_{REF/8}).

⁴Overcurrent protection (OCP) is tested at T_A = 25°C in a restricted range and guaranteed by characterization.

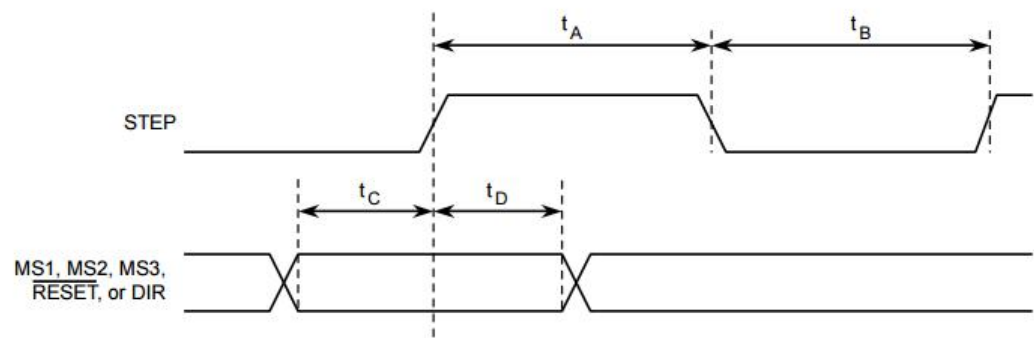
其典型应用连线图见图 2.3.2 所示，实际连线图见图 2.3.2。

图 2.3.2 A4988 典型连线图
(来源: A4988 技术手册)



时序图如图 2.3.3 所示, 可以看到该电路能提供较快的操作速度 (但实际使用中因为步进电机的转子惯性, 只能达到 20Hz 左右的操作频率, 这对于本文中的应用来说已经足够了)。

图 2.3.3 A4988 操作时序图
(来源: A4988 技术手册)



Time Duration	Symbol	Typ.	Unit
STEP minimum, HIGH pulse width	t_A	1	μs
STEP minimum, LOW pulse width	t_B	1	μs
Setup time, input change to STEP	t_C	200	ns
Hold time, input change to STEP	t_D	200	ns

步进电机的步进角为 1.8° ，而 A4988 可以根据其 MS1~3 上的电平值来提供 $1/1 \sim 1/16$ 的步进细分（见图 2.3.4，H 表示高电平，L 表示低电平），因此可以设置采集步进角在 1.8° 、 0.9° 、 0.45° 、 0.225° 、 0.1125° 中选择。

图 2.3.4 步进细分真值表
(来源: A4988 技术手册)

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

对于常见场景， $0.45 \sim 1.8^\circ$ 的步进角采集的密度已经够用了。步进角选择带来的影响列表如表 2.3.1 所示：

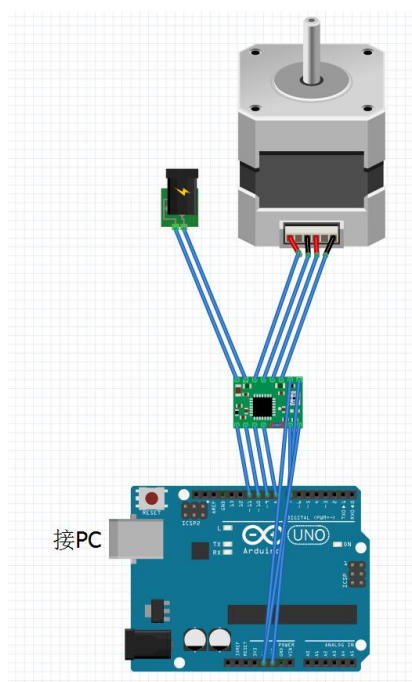
表 2.3.1 步进角对性能的影响

步进角/ $^\circ$	完整扫描一圈 所需帧数	总扫描时间 (不计 I/O 用时) /s	点云理论最大 规模/point
1.8	200	38	384,000
0.9	400	76	768,000
0.45	800	152	1,536,000
0.225	1600	304	3,072,000
0.1125	3200	608	6,144,000

较密的扫描会增加扫描时间，同时增加点云处理的难度和点云文件的大小。如，包含 115,971 个点的点云文件约 2.04MB，写入文件需要 2.3 s；六百万点的点云文件将达到一百万，读取和写入时间也将大大变长。如果不是对物体表面精度要求特别高，一般 1.8° 或 0.9° 的步进角就能满足要求了。

单片机系统接线示意图 2.3.2 所示。

图 2.3.2 接线示意图

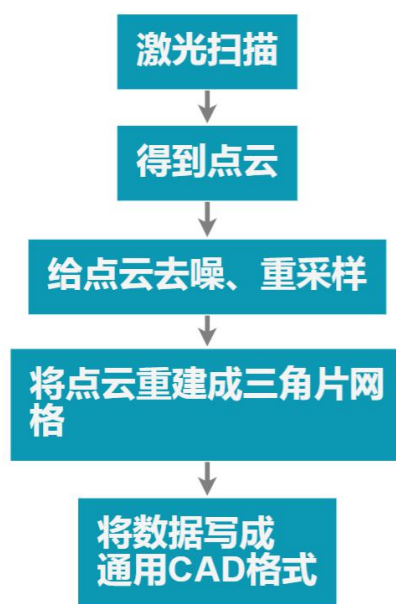


该系统从 3.5mm 接头中获取用于驱动步进电机的 12V 电压（220V 市电到 12V 直流电适配器未在图中画出），逻辑供电为 PC 上 USB 端口提供给 Arduino Uno 的 5.0V 电压。

3 扫描系统软件组成

扫描过程包括扫描和点云处理两大部分，总流程图见图 3.1 所示。

图 3.1 扫描过程总流程图



3.1 计算机视觉

计算机视觉系统通常包括：图像获取、预处理、图像分割、图像分类、分析与描述这五部分^[16]。对计算机来说，采集来的视觉信息全是以矩阵形式储存的图像 RGB 值或其他更多信息，因此计算机视觉中的图像处理通常伴随着矩阵运算。而当今微电子的发展使得获取的图像分辨率大大提高，图像处理需要对庞大的矩阵（对于 1920×1080 分辨率的普通摄像头来说，一帧包含 $1920 \times 1080 \times 3 \times 8\text{bit}$ 的信息，矩阵规模为 $1920 \times 1080 \times 3$ ）进行运算。而各种因素导致的低频、工频、高频噪声又使得提取所需信息难上加难。因此，优秀的视觉系统需要兼顾算法开销和提取效果。

业内常用的做法是使用 C++ 和 C 来编写相关程序，并把它们打包成库，对外提供 API 接口。这样的做法保留了 C 系列语言的性能优势，同时封装化使得使用者能将精力集中在解决问题而非底层算法上，也便于使用其他语言来进行调用。目前使用率最高的计算机视觉库是 OpenCV。本文也采用 OpenCV 来进行图像处理。

3.1.1 激光光斑的提取

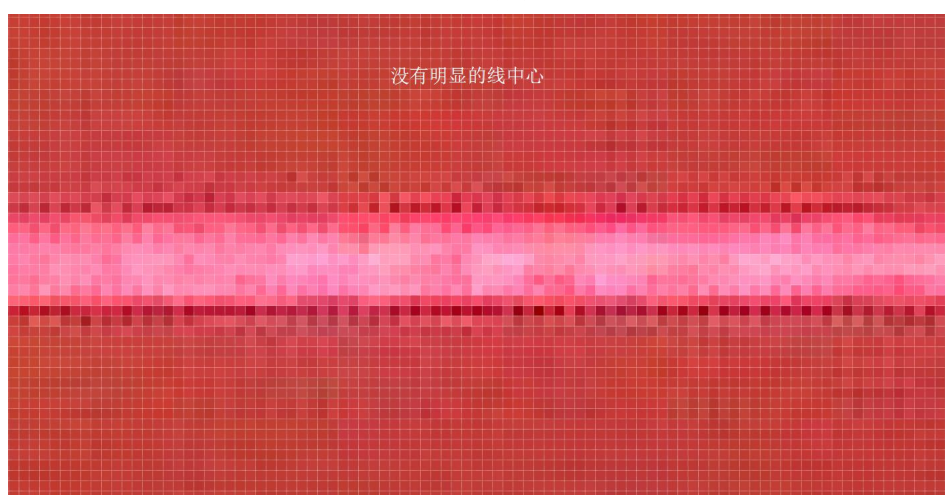
要想计算激光的中心，首先得将激光从背景中分离出来。而分离前景与背景需要两者有较强的反差。可以看出，激光与背景的区别主要在颜色和亮度上，因此后文尝试从这两者入手。本文中采用的激光器，考虑到成本的因素采用玻璃柱镜，因此激光线上亮度分布在横向（较细的那个方向）和纵向（较长的方向）不均匀，如图 3.1.1.1 所示：

图 3.1.1.1 激光在暗处亮度分布示意图



此外，由于摄像头的噪声，激光光斑的图像并非是一条清晰且细的亮线，其放大图如图 3.1.1.2 所示：

图 3.1.1.2 激光光斑照片放大图



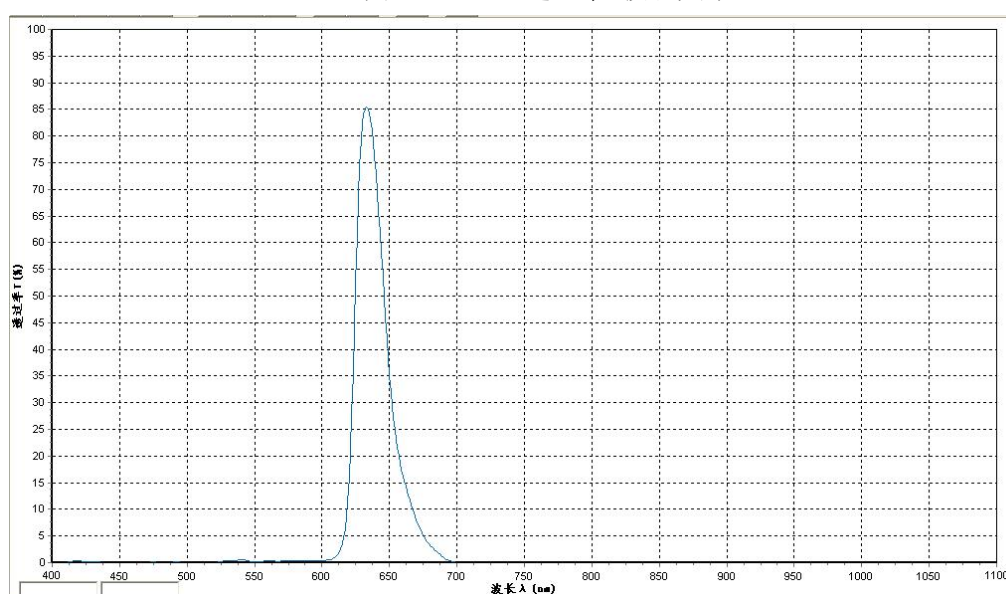
由于感光元件并非只有 R 通道会对激光敏感，因此简单的通道分离不可行。由于感光元件的动态范围有限，过亮的中心会呈白色，边缘呈红色，此外还有较大范围的光晕弥散（见图 3.1.1.1）加上会让激光亮度沿纵向衰减，因此颜色识别中常用的 RGB-HSV 色彩空间变换也不能直接进行。

但由于噪声的存在，获得的激光线经常不连续。而且逐一求夹角运算量较大，因此处理一帧 1920×1080 大小的图像需要约 5 秒，这是该算法的致命缺陷。激光扫描的最大优势就是其表面数据获取的高效性，如此大的计算量伴随如此长的处理时间，使得这一算法几乎没有使用价值。

Kurt Konolig 在他们的工作^[2]中提到了滤光片。滤光片是一种选择性透过某一波长范围内电磁波的光学元件，这样能按照频率区分来完成激光和背景环境的分离。

本文中采用的滤波片型号为 ZL-635ZDLGP-Y12.5，卖家提供的透过率-波长性能图如图 3.1.1.4 所示。

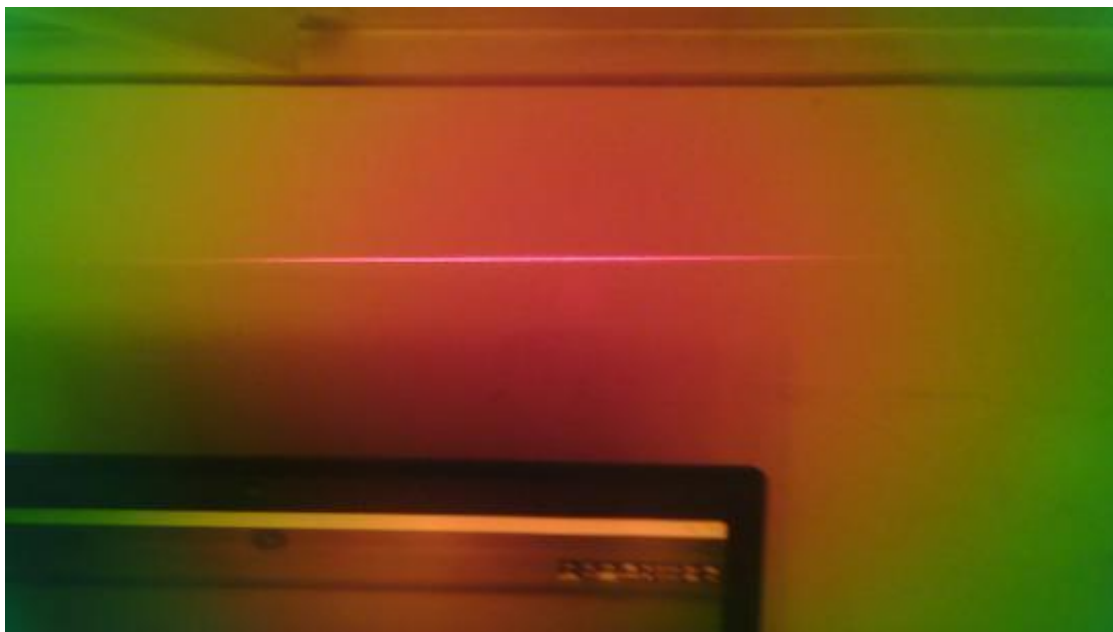
图 3.1.1.4 透过率-波长关系



可见按照技术文档，该滤波片在 635nm 的波长上有 85% 的透过率，然后随波长变化迅速衰减，仅有 600nm-700nm 的光可以透过。但是在实际应用中，由于不同波长的光在玻璃中的折射率略有不同，仅有中心部分是严格带通的，因此从滤波片边缘射入的光反而由于折射其通过频率会向短波长移动。激光光斑是由漫反射形成的，同样的，环境中的“白”光也会在被测表面上漫反射。漫反射的白光中的红色成分仍然能透过滤波片，起不到滤除的效果。结果加滤光片会缩短激光的有效探测长度，而且也没起到滤除背景的作用，见图 3.1.1.5。因此滤光片需要应用在全黑的环境中（但这种情况下简单的灰度阈值就可以分离激光），而对于 CMOS 摄像头来说，暗光会增加单帧所需的曝光时间，进而导致采集时间延长。因此权衡利弊后，滤光片的方案也没有可行性。

与 Kurt Konolig 的应用^[2]不同的是，本文中的测距基于可见光，波长范围相对较窄。而 Kurt 采用的是红外光和带通滤波片，其通过红外光的范围相对较大。因此折射对通过率的影响对可见光影响更大，这导致本文中的应用场景将无法使用 ZL-635ZDLGP-Y12.5 型滤波片，推测其他型号的滤波片也无法满足要求。

图 3.1.1.5 加滤光片后的效果



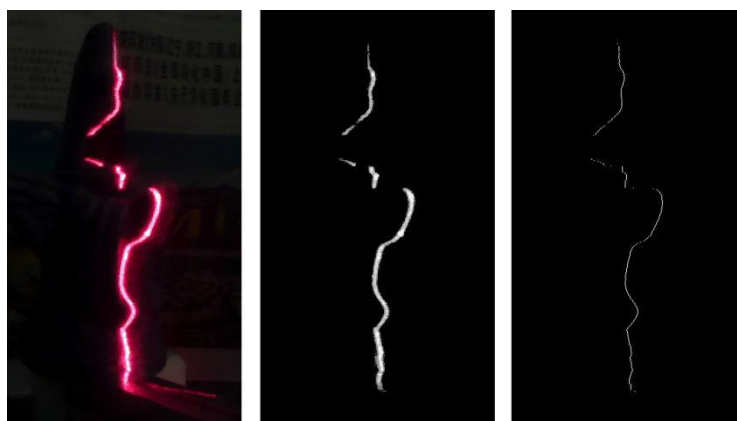
通过以上分析我们可以看出，只考虑色彩将激光从背景中分离出来难度高、可靠性低，因此我们也考虑下激光的亮度特征。

从图 3.1.1 可以看到，在较暗的环境中激光线是全图中最亮的部分。在 3.1.1.2 的放大图中也可以看到，即使是不那么亮的尾部（即激光线较长方向上的边缘），其中心亮度还是要比环境亮度高的。OpenCV 提供了许多阈值分割的函数，因此将图像中亮和暗的部分分开是比较容易的。但单纯的阈值分割的抗干扰性较弱（见 3.1.2.2），需要做改善才能较好地完成激光分离工作。

3.1.2 获取激光中心

从图 3.1.1.2 中可以看到，激光并非是单像素宽的。而获取激光中心的精度关系到点云的精度，因此我们需要计算出一条单像素甚至亚像素的激光中心线。值得一提的是，如果我们直接对 3 中提取出的二值化图片进行处理，我们实际上求的是形心，激光亮度的分布携带的信息被丢弃了。如果将灰度（也就是亮度）作为权值来求每行的加权平均，系统误差应该跟小。因此我们使用 OpenCV 的 THRESH_TOZERO 参数来进行阈值处理。至此，效果如图 3.1.2.1 所示。

图 3.1.2.1 阈值处理+灰度加权效果
(从左向右依次为原图、阈值处理、加权平均)



实际操作中，发现该算法在黑暗的环境中表现良好，然而它对环境亮光十分敏感，效果如图 3.1.2.2 所示。

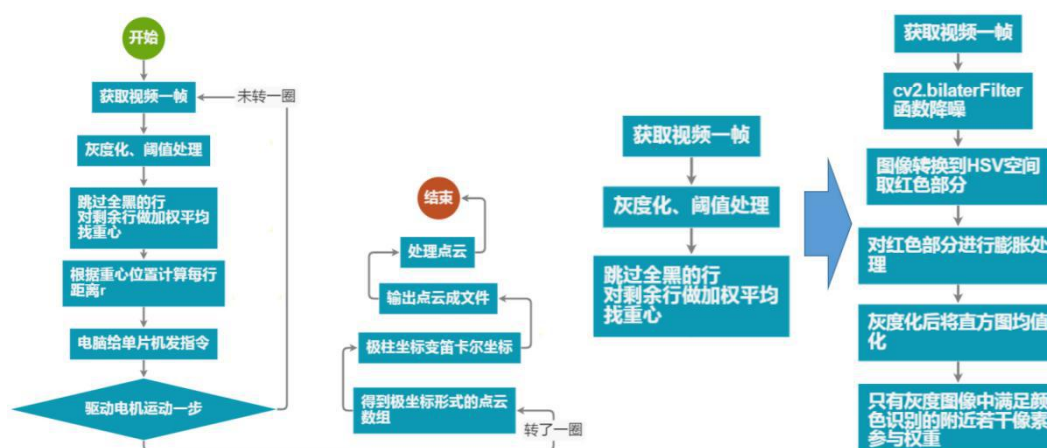
图 3.1.2.2 环境亮光的影响
(从左向右依次为原图、阈值处理、加权平均)



加权法计算激光中心对较亮的环境干扰十分敏感，可以看到上图中基本得不到原来激光的位置了。因此有必要对该算法进行改进。

经过若干尝试后，将原流程图（图 3.1.2.3 左侧）改成图 3.1.2.3 右侧。

图 3.1.2.3 原算法流程图（左）与改动部分（右）



新算法的改进在于如下几点：

- 1.使用 OpenCV 内置函数 `bilateralFilter` 对原始彩色图像进行降噪处理，使得获得的中心平滑、更接近原始图片。
- 2.使用 HSV 提取红色部分后再进行膨胀操作，这样能兼顾色彩分析的高专一度，又能将中心的高亮区域纳入权重，同时提高抗干扰性和准确性。
- 3.直方图均值化，使得图像对比度提高，这样亮部拥有更高权值，防止被大量较暗区域带“偏”，同时有了颜色识别，环境光并不会参与到均值化中。

其效果如图 3.1.2.4 所示：

图 3.1.2.4 改良后的效果图



如图，该算法可以很好地抑制环境光的影响。

算法总是有开销的。该改良算法在提高进光量（进而减少单帧曝光时间）的同时，也增加了图像处理时间。图 3.1.2.5 显示了改进前后各项的用时统计（所有时间使用 Python 内置库函数 `time.clock()` 测得，比较的是处理一百帧时各流程的平均用时）。

图 3.1.2.5 改进前后用时统计

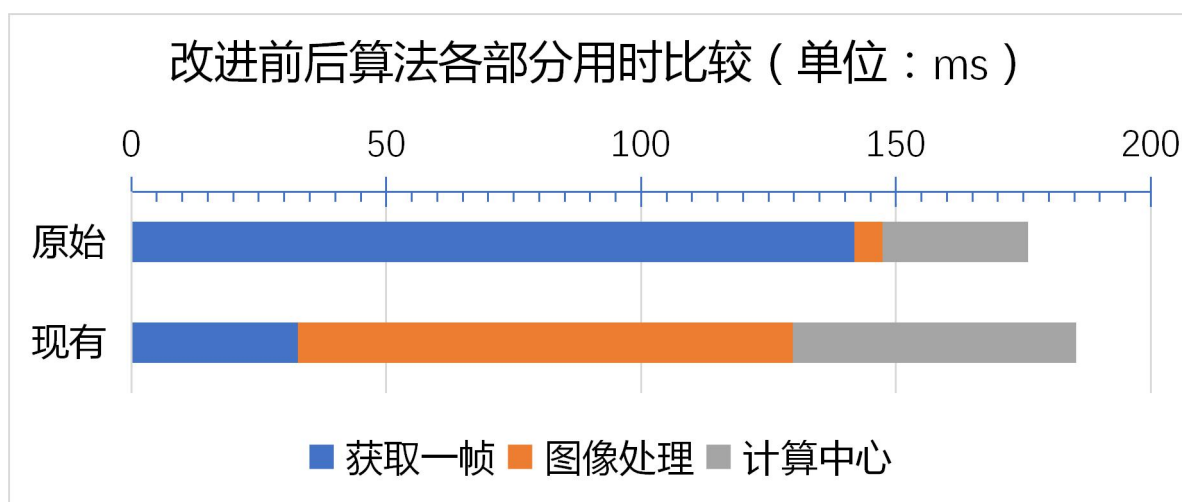
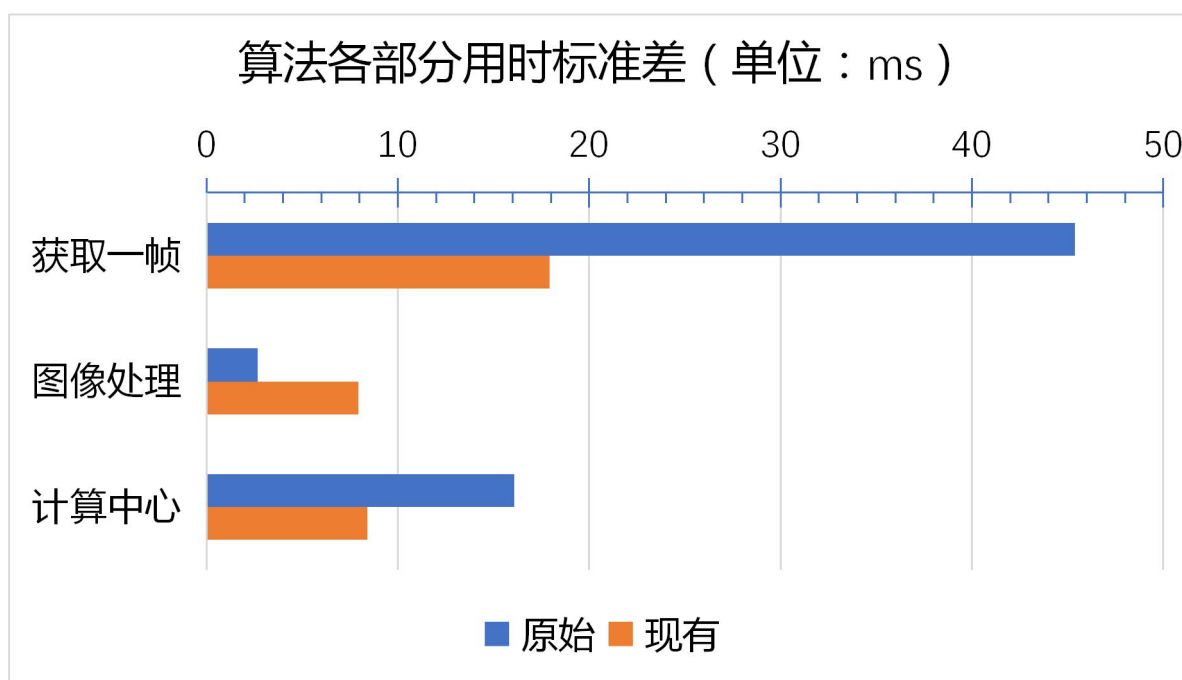


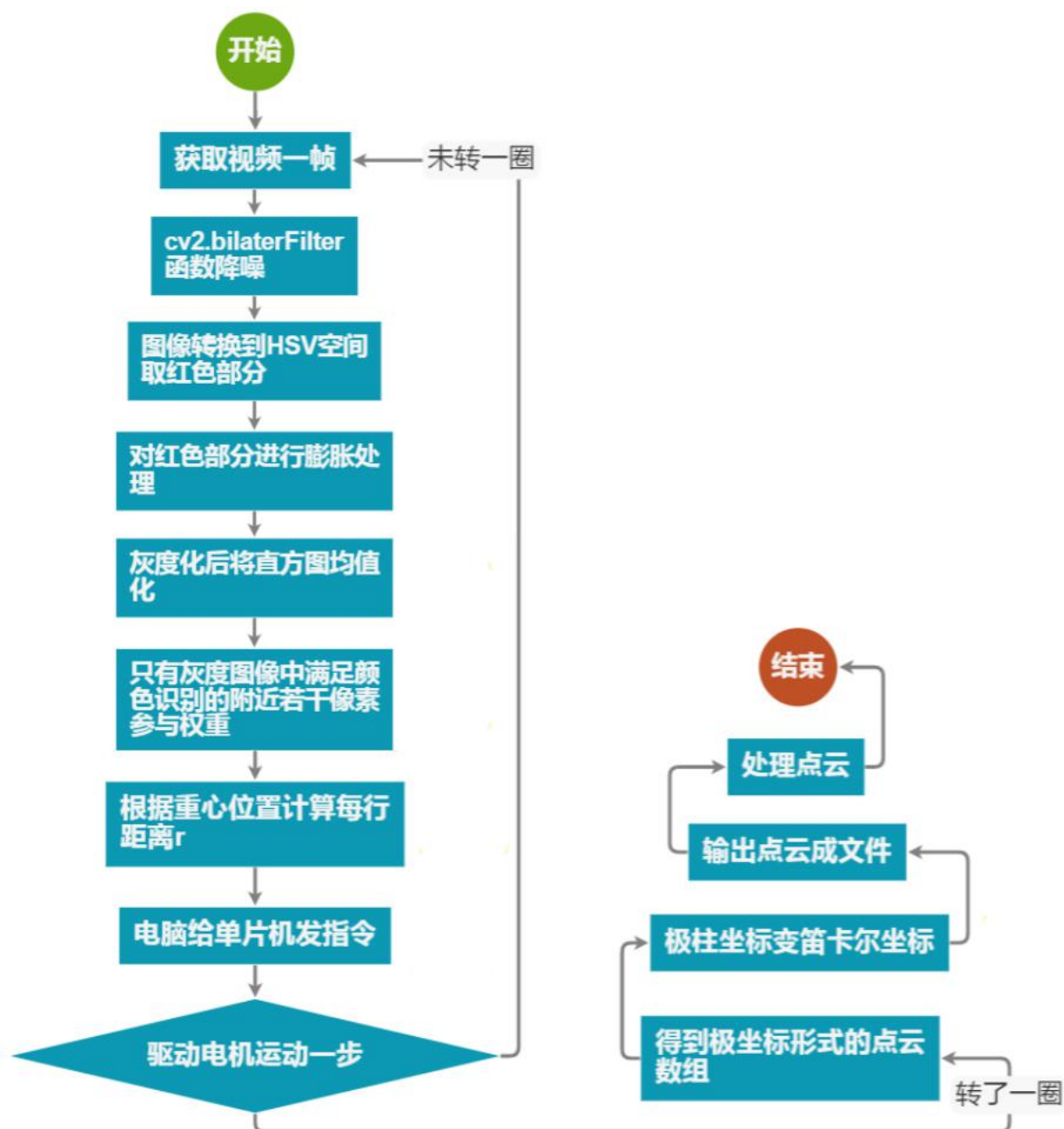
图 3.1.2.6 改进前后各部分用时标准差



可以清晰地看到改进后的算法大大缩短了获取一帧的时间，图像处理所用的时间也略有加长，为了减少随机误差的影响，改进算法也增加了取权值的范围。以整个单帧处理用时增加了约 10ms 的代价换来鲁棒性大大提高。

总算法流程图见图 3.1.2.7 所示。

图 3.1.2.7 流程图



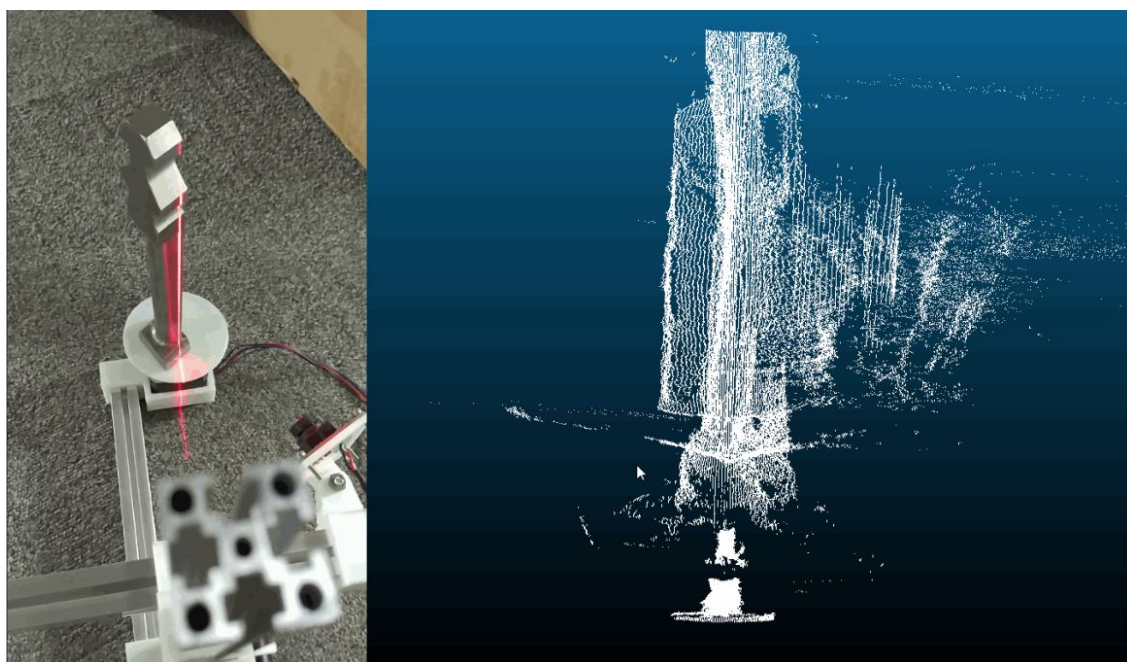
3.1.3 被测表面的光学性质对算法的影响

透平行业中广泛使用的金属叶片通常有较高的表面粗糙度要求，因此其表面会出现严重的镜面反射，干扰算法对激光中心的计算，如图 3.1.3.1 所示。

图 3.1.3.1 激光反光的影响



图 3.1.3.2 反光导致的点云失真



可见镜面反射会导致测距严重失准，导致点云严重失真。因此需要采用技术手段克服其影响。

业内常用的应对技术是涂层，在叶片表面涂上一层很薄的、容易去除的漫反射材质的涂层，但其配方和具体工艺很难被公开查到。受限于本文撰写的时间，这部分尚无较好的解决方案。

一种软件抑制措施是当检测到反光时，只采用较高亮度的部分计算中心。但反光有时会产生伪影（即观察到有两条光斑，一条为激光漫反射形成的光斑，另一条微激光镜面反射投到叶片表面再漫反射到摄像头形成的光斑），两条线亮度十分接近，不容易区分（见 3.1.3.2 左图）。

3.1.4 透视对生成点云的影响

在较大视场中（本文中采用的摄像头标称视角 100° ），透视带来的影响将不能忽略，见图 3.1.4.1。

图 3.1.4.1 透视的影响

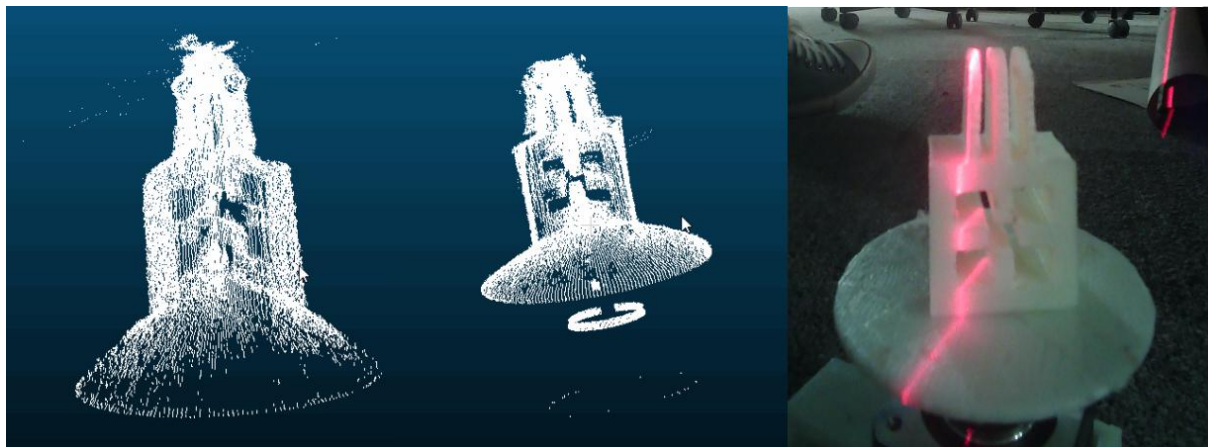


图 3.1.4.1 中，左图和中图对同一个物体（右图）的扫描，调整摄像头垂直高度后水平线产生了不同程度的失真，在点云中就表现为水平圆盘变成不同角度的圆锥面、方形变成平行四边形。受限于时间，本文尚无较好的应对措施，只能通过调节摄像头高度来尽可能减少透视带来的影响。

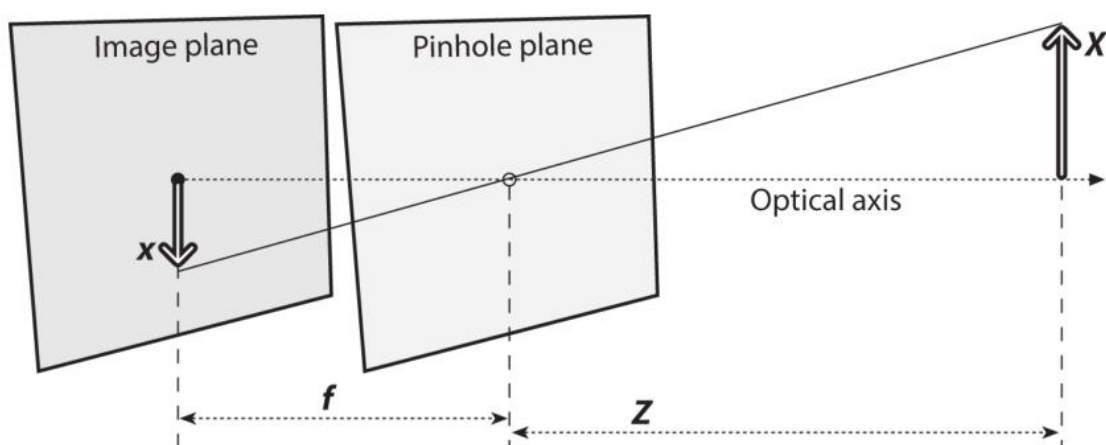
3.1.5 相机标定

在三角测量中，我们对摄像头的处理是将其简化为一个针孔相机模型（见图 3.1.5.1），满足：

$$X \cdot f = x \cdot Z \quad (3.1)$$

如果实际的相机并不严格满足 3.1 式，则扫描结果会出现失真。

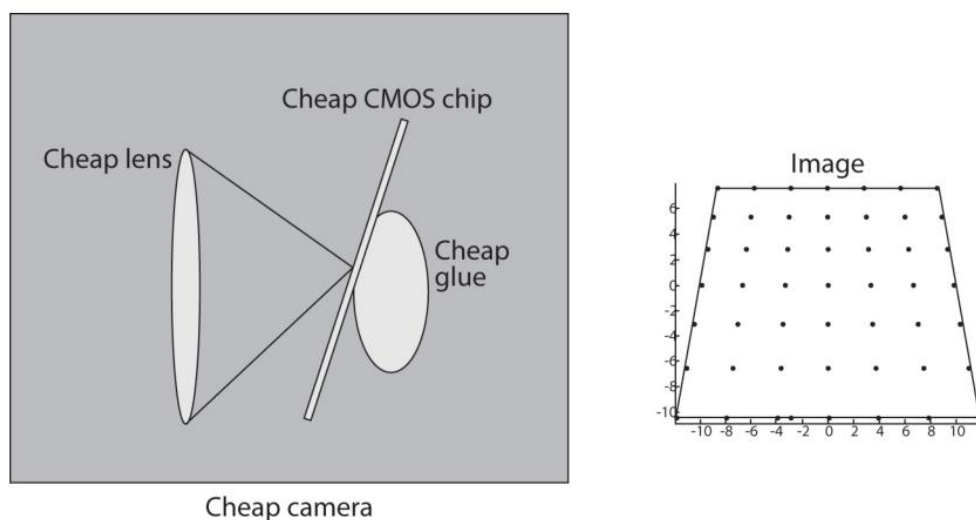
图 3.1.5.1 针孔相机模型



注：图 3.1.5.1 和 3.1.5.2 均来自于 Adrian Kaehler & Gary Bradski 所著的《Learning OpenCV 3》；本图来自 Figure 18-1

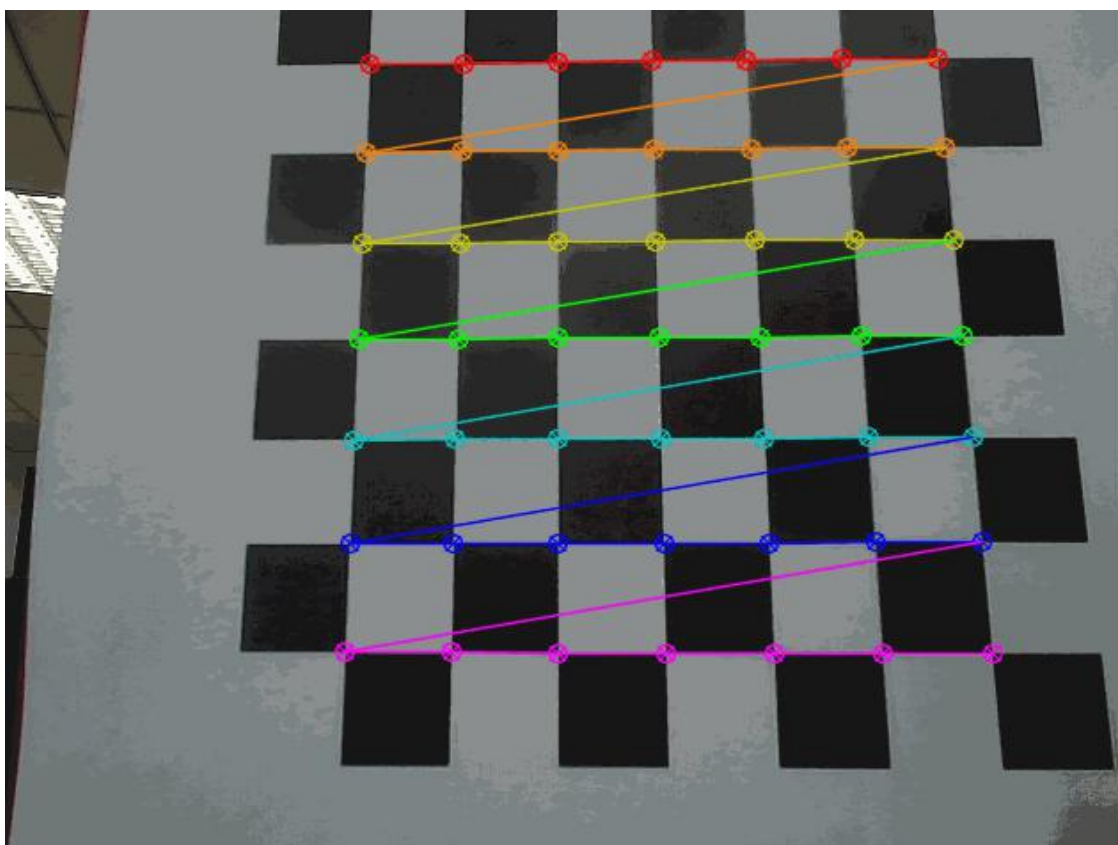
然而由于透镜加工、安装误差，成像通常会产生畸变，如图 3.1.5.2 所示。

图 3.1.5.2 便宜摄像头中常见的导致畸变的因素（来自 Figure 18-5）



正确的激光位置的计算依赖于摄像头正确的成像，因此如果摄像头有畸变需要校正后使用。校正摄像头畸变常用的方法是张正友于 1998 年提出的基于单平面棋盘格的标定法^[27]。该标定法只需要一张打印出的棋盘格，贴在平整的板上做标定板，能达到很高的精度。张正友标定已经作为封装好的函数被广泛使用。OpenCV 中内置的 `cv2.calibrateCamera()` 函数即是使用的张正友标定法。其详细实现原理超出本文范围，因此本文只介绍标定的流程和原理，标定过程的程序见附录 B。此外，跟结构光的编码光一样，标定板上的图案可以有很多种，最常见的为棋盘格（Chessboards）。本文中的标定见图 3.1.5.3。

图 3.1.5.3 相机标定过程



图中彩色的点为 `cv2.findChessboardCorners()` 检测到的棋盘角点，根据棋盘实际边长和图像中的坐标来计算相机内参数矩阵和扩散矩阵。经标定后发现，卖家宣称的无畸变摄像头确实几乎无畸变，可直接使用。《Learning OpenCV 3》中给出的标定效果见图 3.1.5.4。可见在摄像头分辨率较低的时候校正仍不能完全弥补其失真，且会引入新的噪声。

图 3.1.5.4 文献中给出的标定效果
(来自 Figure 18-17)

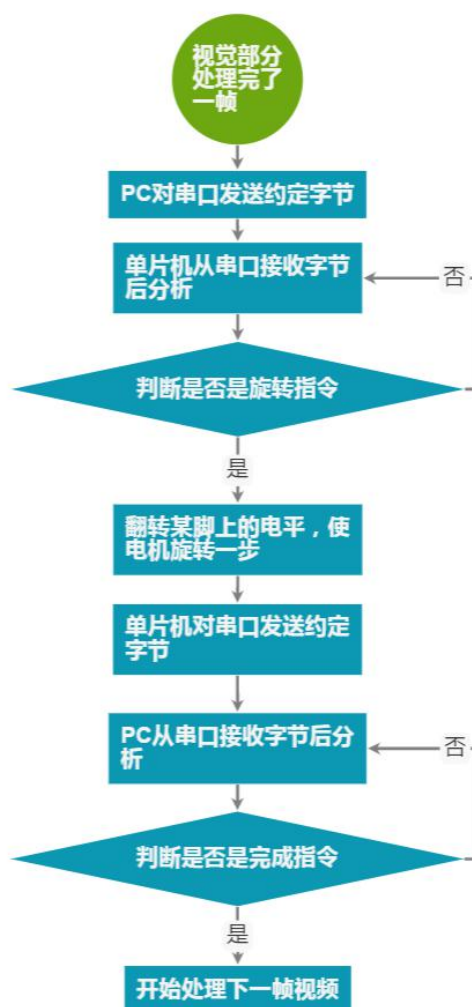


虽然标定可能会引入新的噪声，但它能大大减少摄像头引入的非线性失真。因此标定过程对畸变明显的相机来说是必要的。无畸变镜头要比有畸变镜头要贵，本文中采用的摄像头成本约¥220，同等配置下换成有畸变的镜头只需¥180。

3.2 单片机与 PC 的通信

单片机与 PC 通信采用 Arduino 上 USB-B 型接口与 PC 进行串口通信，Arduino Uno 对波特率的支持从 9600 到 112800bps。对 Arduino 烧写程序后实现如下通信流程（见图 3.2.3）

图 3.2.3 单片机与 PC 的通信流程



通信过程中，接受端对传来的数据进行判断后再进行操作，防止外来电磁波对通信质量进行干扰，因此理论上该系统有较强的电磁污染抵抗力。

3.3 点云与 CAD

点云是许多有空间坐标的点形成的“云”，是一种存储扫描仪采集得到的包含物体表面信息的文件。“云”的大小从数千点到数百万点，因此点云的编辑和可视化也是十分消耗计算资源的。

在 3.1 节中获取激光线中心坐标后（摄像头二维坐标），根据公式 1.2.2 和 1.2.3 能够分别求出扫描仪三维相对坐标下的柱坐标和笛卡尔坐标。将柱坐标变成笛卡尔坐标后，将所得的若干点的坐标按一定顺序写入文件，便得到了可以编辑的点云文件。

CAD 是 Computer Aid Design 的简称，其在工业中的地位已经是无可取代的了。将扫描得到的点云变成通用的 CAD 格式才方便后继的比较和指导加工。而将点云与 CAD 结合在一起的技术成为曲面重建，这一步可以说是整个逆向工程的最后一步。按曲面重构的实现方法不同，曲面重构技术可以分为以下五类^[17]：

3.3.1 分片线性曲面重构

又称三角网格曲面重构，其核心原理是利用大量细小三角片来逼近曲面。如 Lee 和 Schachter 的 Delaunay 三角网的分割合并法和逐点插入法^[18]、Brassel 和 Reif 的基础三角网生长法^[19]、Hoppe 的零集法^[20]等。

3.3.2 参数曲面重构

1991 年，国际标准化组织（ISO）颁布的工业产品数据交换标准 STEP 把非均匀有理样条（Non uniform rational B-spline, NURBS）作为定义工业产品几何形状的唯一数学方法。此后便有了各种使用 B 样条来逼近、拟合点云的研究工作^[21-22]。

3.3.3 隐式曲面重构

指用隐函数表示待重构曲面的方法，在表示封闭曲线曲面和多值曲线曲面上较有优势。如 Muraki 用分片隐式曲面进行曲面重构^[23]、Carr 等的基于 RBF 的曲面重构方法^[24]等。

3.3.4 细分曲面重构

将一个初始多面体网格开始细分，递归地计算得到新网格的方法。随着细分次数的增加，网格将逐渐收敛到与点云轮廓接近的一个光滑曲面，优点在于能保留尖锐特征。如 Loop 细分、Butterfly 细分、 $\sqrt{3}$ 细分等。

3.3.5 变形曲面重构

将一个简单的初始多面体以点云为约束进行变形得到的曲面。如 Ruprecht 等^[25]的工作。

由于采集时的噪声和物体表面粗糙度的影响，点云不能直接用于曲面重建。而且点云的规模也使得所有点全部参与运算代价太高。因此我们需要在曲面重建前删除一些点。在这一过程中我们需要兼顾噪声和细节：一方面，我们需要剔除点云中的异常点；另一方面，“异常点”其实也可能是携带有物体细节信息的特征点。这方面也有相关研究^[26]。

本文所述方法得到的点云如图 3.3.1 和图 3.3.2 所示，原始模型见图 3.3.3。

图 3.3.1 某复杂形状实体扫描所得点云预览图

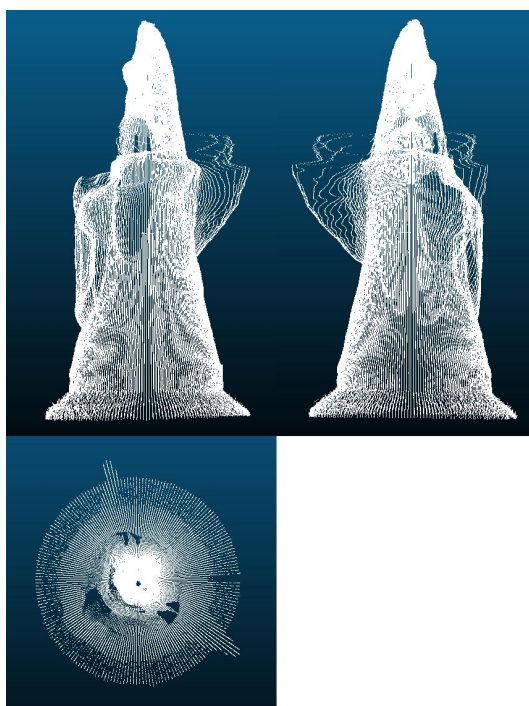
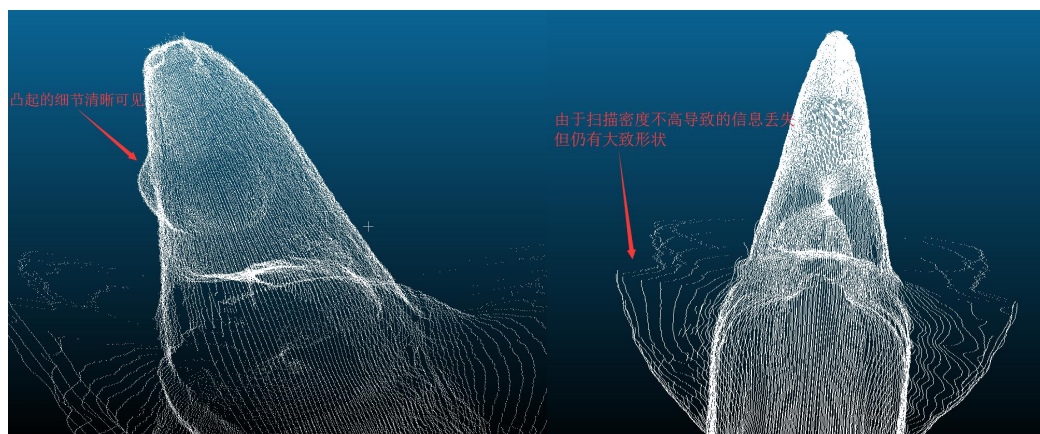


图 3.3.2 点云放大图



从图中可以看到，本扫描仪对物体表面大部分细节的捕捉还是比较可靠的（如模型中“眼部”的凸起），但对于“翅膀”的信息捕捉精度却不够。除了采样点较少之外还有形状失真的问题，这些是需要再做深入研究的。

受限于时间，本文中得到的点云的处理是通过开源软件 meshlab 实现的。首先，我们需要根据点来计算表面法向量，meshlab 的 Filters 功能页下 Normals, Curvatures and Orientation 下的 Compute normals for point sets 项可完成此功能，原理是根据某点附近若干点的位置来计算该点处的表面法向量。得到法向量后可进行表面重建工作，meshlab 中的操作为 Filters 功能页下 Remeshing, Simplification and Reconstruction 下的 Surface Reconstruction 功能。Meshlab 提供了 Poisson、Ball Pivoting、VCG 三个重建算法，其效果根据所输入参数不同而异。在完成三角片化后还需要填补未封闭的孔洞，通常是根据临近部分的曲率来生成三角片填补孔洞，填补前见图 3.4.4，原始模型见图 3.4.5。

最终生成的 CAD（.obj 文件）如图 3.4.6 所示。

图 3.4.4 局部采样过少与法向量反向导致的空洞

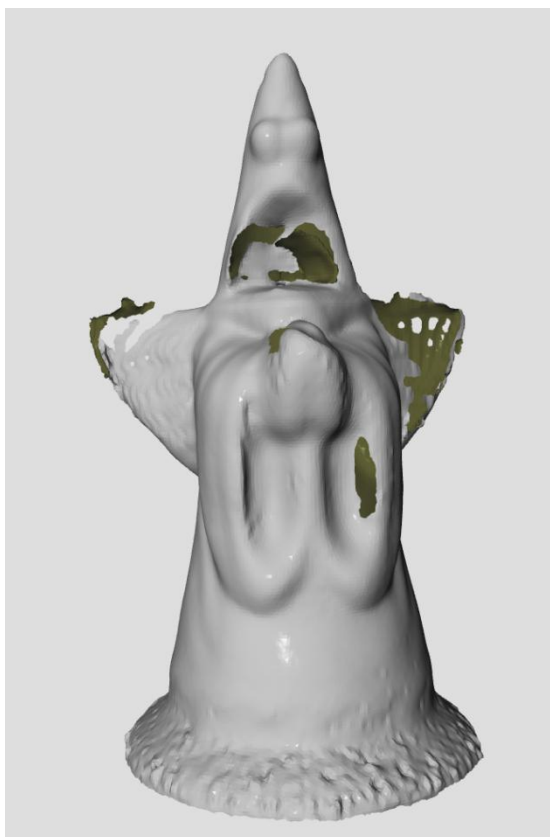
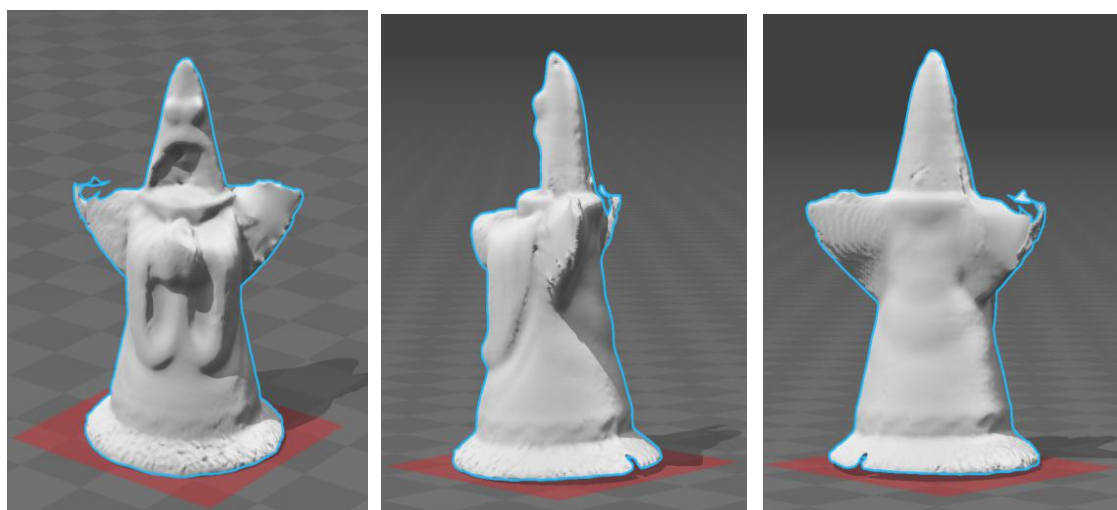


图 3.4.5 原始模型照片



图 3.4.6 根据本文所述方法生成的 CAD 文件截图



由于右翅膀处采样较少,原始点云直接封闭成三角片网格时会产生空洞(见图 3.4.4),采用附近曲率光滑填补后还是会丢失一些信息。左翅膀由于点云质量不高,计算法向量时反向,导致缺失一块。模型“眼部”与“衣襟”处质量较好,跟该处采样率高有关。但实际上原始点云大部分区域密度较高导致计算不稳定,反而还需要重采样来降低点云密度。因此局部的欠采样与总体的过采样需要权衡,这也是许多点云重建算法着力解决的问题。此外,模型的底部(裙部)将托盘的一部分也扫描进点云中去了,导致该模型比实际物体多了一层裙状物。这部分是需要与 3.1.4 节中所述透视问题一同处理的。

但该模型对“衣襟”、“眼部”、模型表面的纹理还原还是比较好的,这说明本文研究的总体方向是没错的,但还需要针对出现的各种问题进行深入研究。

结 论

本文开发了一个低成本、对环境光干扰有高鲁棒性的复杂结构三维扫描系统。该扫描系统结构简单可靠、造价低（不计 FDM 定制件成本的话造价<¥400），其精度可以通过提高结构刚度和校准精度来提高。从实验中可以看到，它对大部分区域（非反光材质、凸起较小不至于遮挡激光）的扫描的效果还是较好的。作为一代开源扫描原型机还是有其研究价值的。点云重建得到三角网格的过程还需要对各种重建参数熟练掌握，这一步对最终得到的模型质量有很重大的影响。

与前人工作相比，本文的创新之处在于开源项目的大量应用、标准件与 FDM 快速成型的定制件的使用：

开源视觉库 OpenCV 的应用可以在减少工作量的同时提高程序效果和通用性，因此能让使用者把精力放在对结果的分析上，如本文中对代码各部分的性能分析可以帮助改进效率。OpenCV 的应用还提高了代码的跨平台通用性，如本文中的 PC 可以换成树莓派等微型计算机，从而使扫描仪能够小型化、实现脱机扫描。

开源硬件 Arduino 让单片机成本降低的同时可用性大大提高，如增加网络载板后通过简单调用库函数即可给扫描仪增加远程操作功能。

开源程序语言 Python 使得各种库枝繁叶茂，如在本文的程序开发中使用过的库就有 NumPy、Matplotlib、Pymcubes、Cython。还有 py2exe 等工具可以将编写的 python 程序打包成可执行文件，便于使用。

而铝型材、步进电机作为标准件，具有较好的可更换性。标准件结构合理、造价低，FDM 定制的连接件可以快速可靠地完成设计制造，两者结合起来使得本文中的扫描仪能够方便的被他人制造出来，而非仅仅停留在研究用的原型上。

参考文献

- [1] Matache, Gheorghe, Dragan, et al. A Comparison between 3D Scanning and CMM Dimensional Inspection of Small Size Gas Turbine[J]. Advanced Materials Research. 2015, Oct: 347-352.
- [2] Kurt Konolige, Joseph Augenbraun, Nick Donaldson, et al. A Low-Cost Laser Distance Sensor[R]. IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008
- [3] "OpenCV library" [online]. Available: <http://www.OpenCV.org> [Accessed:10-May-2017].
- [4] "Python" [online]. Available: <https://www.python.org> [Accessed:10-May-2017]
- [5] Modjarrad, A. Non-Contact Measurement Using A Laser Scanning Probe [J]. In-Process Optical Measurements. 229 (March 10, 1989):229-239.
- [6] Moss J P, Linney A D, Grindrod S R, et al. A laser scanning system for the measurement of facial surface morphology[J]. Optics & Lasers in Engineering, 1989, 10(3):179-190.
- [7] Koivunen, V., and Bajcsy, R. Rapid Prototyping Using Three-Dimensional Computer Vision[R]. Technical Reports (CIS). August 1992
- [8] Forest, J., et al., Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach[R]. IEEE:646 - 649. Vol. 3, 2004
- [9] 平雪良等, 基于BP算法的激光扫描测量误差补偿[J]. 机械科学与技术, 2008(10):第1127-1131页.
- [10] Chen, L., Zhang, S., Ji, S., et al. Laser scanning system for large diameter measurement[R]. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments. 2009
- [11] Duke, D., Honnery, D., and Soria, J. A Comparison of Subpixel Edge Detection and Correlation Algorithms for the Measurement of Sprays[J]. International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2011(3):93 - 109.

- [12] Tamás Várady, Ralph R Martin and Jordan Coxt. Reverse engineering of geometric models – an introduction[J]. Computer-Aided Design. 1997, Vol. 29 (No. 4) :255-268
- [13] Daniël Van Nieuwenhove. Interactive Displays[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, Chapter 7: 233-249
- [14] Poole, S. & Phillips, R. Rapid prototyping of small wind turbine blades using additive manufacturing. [R] Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics International Conference (PRASA-RobMech), Port Elizabeth, South Africa, 2015:189 - 194.
- [15] NEDELCU, D., COJOCARU, V., GHICAN, A., et al. Considerations Regarding the Use of Polymers for the Rapid Prototyping of the Hydraulic Turbine Runners Designed for Experimental Research on the Model[J], Mat. Plast. 2015, 52 (No. 4) :475
- [16] 朱淼良. 计算机视觉[M]. 杭州, 浙江:浙江大学出版社, 1997: p11 .
- [17] 钟纲. 曲线曲面重建方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- [18] Lee D T, Schacher B J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation [J]. International Journal of Computer and Information Sciences ,1980(9):219-242.
- [19] Brasse K E, Reif D. A procedure to generate thiessen polygons [J]. Geographical Analysis ,1979,11:289-303.
- [20] Hoppe H, DeRose T, McDonald J, et al. Surface reconstruction from unorganized points [J]. Computer Graphics ,1992,26:71-78.
- [21] 来新民. 基于计算机视觉的逆向工程关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 1997.
- [22] 程仙国, 刘伟军与张鸣. 特征点的 B 样条曲线逼近技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011(10): 1714-1718.

- [23] Muraki S. Volumetric shape description of range data using “blobby model” [C]. Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1991:227-235.
- [24] Carr J C, Beatson R K, Cherrie J B, et al. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions [C]. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001:67-76.
- [25] Ruprecht D, Nagel R, Muller H. Spatial free-form deformation with scattered data interpolation methods [J]. Computers & Graphics, 1995, 19(1):63-71.
- [26] 金伟, 刘志杰与景凤宣, 基于最小二乘法逼近的 B 样条曲线插值法[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2015(01): 第 98-102 页.
- [27] Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.