

Intel杯嵌入式大赛设计文档

便携式三维重建系统

Portable Three-Dimensional Profiler

郭明宇 张波 邹润



南京大学

2010年6月

摘要: 本作品设计实现了一种嵌入式的便捷实时的非接触三维重建系统, 以英特尔Atom处理器为核心。运用结构光以及图像处理相结合的方法, 将二维信息转换到三维空间中。对点云进行拼接、融合、精简、三维Delaunay三角剖分, 在OpenGL中显示。系统成像细节丰富, 可交互操作, 在传统以及新兴的3D技术领域有广泛应用前景, 与时下的三维重建系统相比, 克服了体积大、功耗高、成本昂贵、操作复杂等缺陷。采用Intel C++编译库编译, 并采用IPP、OpenMP优化, CPU利用率高, 速度快, 实时性良好。

关键词: 三维测量, 三维重建, 结构光, 点云拼接, 便携式

Abstract: This work designs a convenient non-contact three-dimensional reconstruction programs based on embedded technology which depends on Intel Atom processor . Using the combination of structured light and the method of image processing , the two-dimensional information can be transformed into the three-dimensional space. Through the accesses of splicing the point cloud, integration, streamlined, three-dimensional Delaunay triangulation, it can be displayed by the OpenGL. Richly detailed imaging system may be interoperable, in traditional and new, 3D technology has extensive application prospect, and compared to the recent product, ours can overcome the defects of large size, high power consumption, expensive cost, the complexity of operation. programs are compiled through Intel C + + compiler libraries and optimized by using IPP, OpenMP to CPU's full utilization and a higher speed.

Keywords: 3D Measurement, 3D Reconstruction, Structural Light, Point Clouds Registration, Portable

1 系统概述

1.1 开发背景

随着人类认识世界需求和信息科学的不断发展, 光学非接触测量技术成为获取物体三维信息的重要手段之一, 其中编码结构光又以较高的测量精度、分辨力和易于实现的优点成为三维测量领域的研究热点。但是目前大多数三维重建测量产品体积巨大, 集成性不高, 更重要的是价格非常昂贵, 动辄数十万、甚至百万以上。另外也有一些三维重建技术只是导出点云后在相应的软件中做后续处理, 这无疑增加了开发的难度, 更增长了产品开发的周期, 使得该技术难以走向市场得到更广泛的应用。

本作品在硬件上加以改进, 最重要的是选择基于嵌入式开发, 使得在仍然保持较高精度并且符合工业要求的情况下, 不仅提高产品便携性和集成度, 更大大地降低其成本, 同时保持良好的实时性, 并且可以交互式傻瓜式操作, 提高了产品的适用度。

1.2 应用前景

该系统除了能在工业汽车设计领域、文物修复等传统领域得到应用，还能在如下领域发挥作用：

1. 正在兴起的3D动漫及其电影技术，阿凡达等3D电影的拍摄需要基于现实物体获取3D模型，以便于后期的加工、制作。
2. 世博馆、博物馆、甚至一些电视台和商场里对于的一些贵重物品以及远程人物3D模型的全息展示。
3. 高档商场以及网络B2C正在蓬勃兴起的基于真人的模拟3D试衣系统的开发。
4. 医学方面，在美容整形整容、隐形牙套矫治器的制作以及颌面、口腔牙齿修复方面，基于真实部位的3D模型的获取。

1.3 产品设计概貌

本设计提出的基于格雷码投影光栅的实时三维重建系统，目标物体放在转台上，可交互式选择对目标物体的几个面进行采集、并自动对不同角度的3D数据信息将实时拼接、融合、精简通过英特尔Atom处理器运算得到目标物体完整的三维信息。

在此基础上可以触控选择Delaunay三角剖分重建物体表面显示。本系统集双屏显示、触摸控制、通信于一体，具备可交互化，人性化的设计，操作灵活简便。对于操作人员无相关专业技术要求，同时也能够满足高级用户获取不同格式的的点云数据，方便其使用多款3D建模软件进行后续的处理和艺术加工品能够和场景渲染。在硬件上，结构简单，集成度高，封装性好，采用高分辨率工业相机和微型投影仪联合工作，实时采集、分析图像，充分发挥了英特尔Atom本款处理器超线程的优越性能。

在硬件上，结构简单，集成度高，封装性好，采用高分辨率工业相机和微型投影仪联合工作，实时采集、分析图像，充分发挥了英特尔Atom本款处理器超线程的优越性能。

在软件上，程序通过英特尔C++编译库编译，优化代码效率。并采用英特尔IPP优化处理数据处理速度和OpenMP线程优化均衡CPU负载。

2 系统方案

2.1 功能与指标

1. 实时获取目标物体一面的三维信息

工业相机的最高帧率是7fps，投影仪结构光栅图案共20张，为了投影仪与工业相机能协调工作，实验选取共同工作频率5fps，在4s内完成投影以及采集工作。图像处理在3s内获取三维信息并在屏幕上显示点云。

2. 转台变换角度

可以根据用户意愿选择镜面式选择另一角度获取目标物体的三维信息，实时拼接。拼接速度根据点云大小而定，但是一次拼接时间控制在10s左右。

3. 实时拼接、融合、精简

对不同视点的三维信息进行实时拼接，并对点云数据融合使其光顺，并在保留细节的前提下对点云进行精简。

4. 不同的三维显示模式

根据用户意愿触控选择点云显示、frame wirey格式以及三维delaunay显示。

5. 导出不同格式的的点云数据。

满足高级用户触控选择导出不同格式的的点云数据，方便专业人员在常用的例如PolyWorks和Geomagic等三维建模软件中做后续的加工和重建工作。可导出6种不同的数据格式：DXF,STL,IGS,OBJ,3DS,ASCII。

系统能达到的性能表2.1所示。

测量精度	0.1mm
测量点间距	0.55mm
单视点测量数据量	5s
拼接	实时

表 1: 系统性能参数

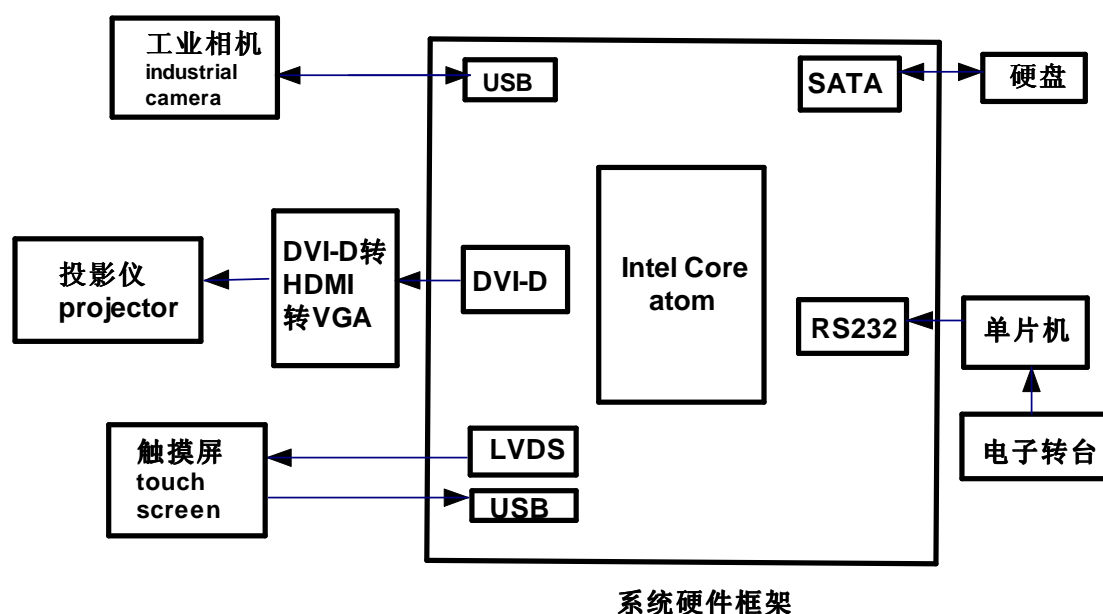


图 1: 系统硬件框架

2.2 系统硬件结构

硬件核心： 英特尔Atom处理器是英特尔历史上体积最小和功耗最小的处理器，专门为小型设备设计，旨在降低产品功耗，产品还支持超线程处理。各个外围模块通过系统的通信接口与之连接，如投影仪、触摸屏、工业相机等。



图 2: 图像采集模块

三维测量模块： 进行此款产品设计之时，在追求充分利用嵌入式开发平台的硬件资源的同时，也需要在产品性能、成本、稳定性、精度等几个性能指标上寻求一个较理想的平衡点，因此我们首先需要对硬件资源作出合理明智的选择。

首先，为了获取真实物体丰富的细节信息、降低测量误差，我们的光学

传感器件需要有较高的分辨率，本系统选用的工业相机分辨率最高可达 2048×1536 ，在此分辨率下，数据传输速率为7fps。工业相机与开发平台通过USB接口通信。



图 3: 投影仪模块

为了使系统集成度更高，便携性良好，我们选用的投影仪是Benq型号为GP1的DLP微型投影仪，分辨率为 800×600 ，亮度为100流明。这就大大提高了便携性。并且通过选用高清的工业相机来弥补其微型投影仪流明度普遍不高的缺陷。并且当下，微型投影仪大部分是VGA接口，所以通过一个转接口（DVI-D转接HDMI转VGA）来实现对微投的控制。

用户交互模块： 用户与系统交互通过触摸屏进行，屏幕是通过LVDS接口扩展的。触摸屏通过开发板的USB接口与其通信。

电子罗盘模块： 转台是普通的美工雕塑用，直径为25cm。点云粗拼接以及交互模式需要转台反馈转动的绝对角度。

2.3 系统软件结构

系统软件框架如图4所示。分为以下几个子系统：

1. 用户交互界面，基于OpenGL库实现。
2. 图像采集、处理以及格雷码的编解码模块是一项关键工作，此模块的处理直接影响后续工作中产生点云质量。
3. 获取三维信息模块是精华部分，是将物体的平面信息转化到实际世界的步骤，该过程通过严格的数学推导，保证三维信息精准。

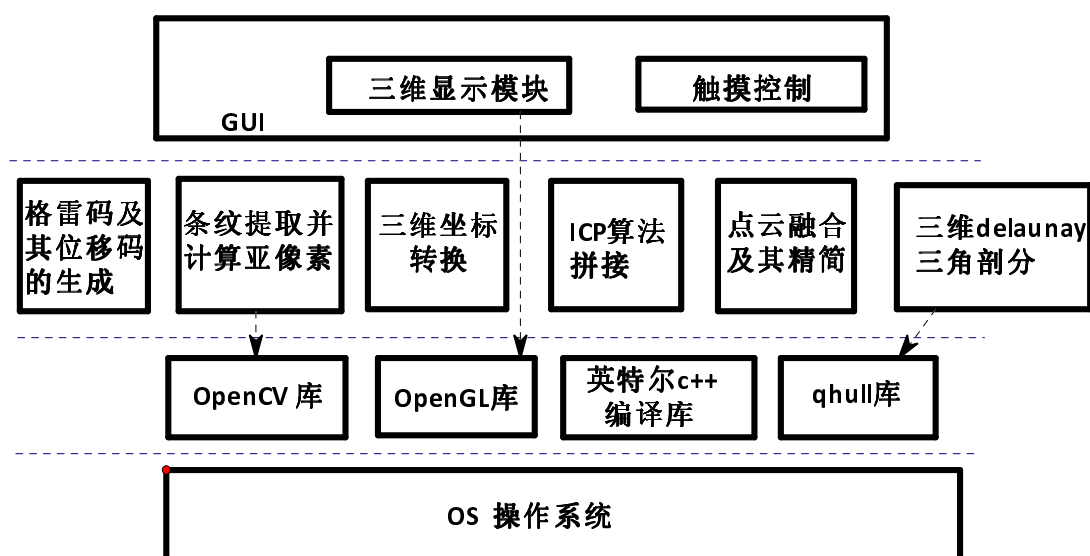


图 4: 系统软件框架

4. ICP拼接算法及点云数据的融合、精简模块，涉及大量理论分析和数学论证，模块耗时较大，在整个系统工作量中占有很大比重，此外，对算法的优化我们完成了大量的工作，并通过超线程编程使得效率得以提升。
5. 三维Delaunay三角剖分重建模块，是该系统重建效果可视化部分，Delaunay三角剖分是公认的最好的三角表面重建的算法，其最大的不足在于算法运算量过高，该系统采用的crust算法是目前较为优秀的表面重建算法，其算法虽然难度高，但是速度却比大部分传统Delaunay算法快。

3 功能模块

3.1 摄像机的畸变校正

相机结构与人眼不同，在同样具有透镜的结构中，相机的CCD接受影像是平面结构，而人眼的视网膜是半球状结构。这样就会使得在相机上成像发生形变，也就是相机的畸变。

对一个相机的校正过程可以用以下四个参数来描述：

- (x_0, y_0) 表示图像的中心点；
- f 畸变因子；

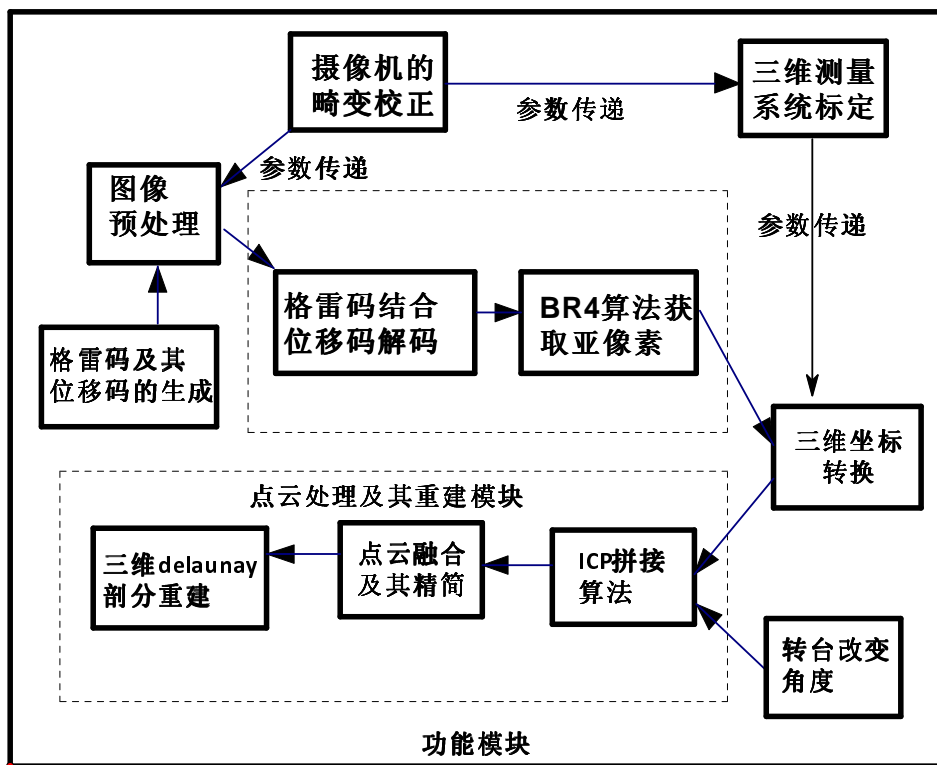


图 5: 功能模块

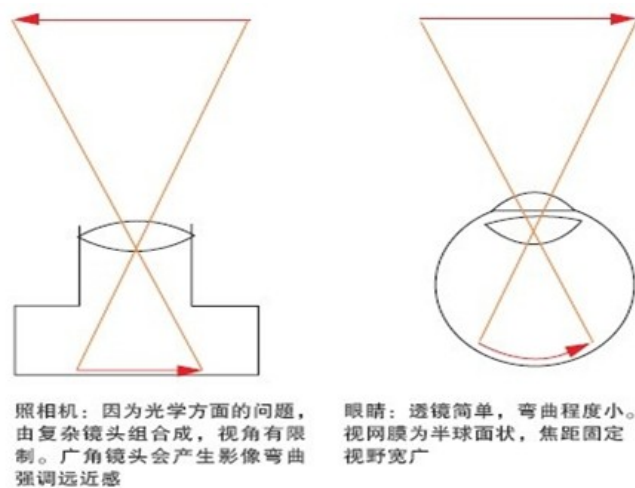


图 6: 广角镜头与人眼视网膜的区别

- 用于描述发生畸变的程度；
- a 膨胀系数，用于描述校正发生过程中图像缩小的程度

一副图像的畸变和校正过程可用如下过程描述：

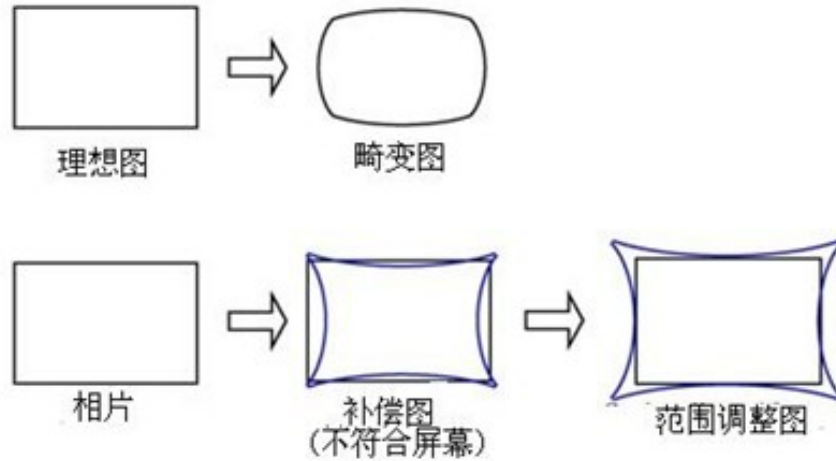


图 7: 畸变的产生以及恢复

算法与具体操作

上面四个参数可用如下数学关系描述：

$$\begin{cases} d^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ p = (1 - fd^2) \\ x_2 = p(x_1 - x_0) - x_0 \\ y_2 = p(y_1 - y_0) - y_0 \end{cases} \quad (1)$$

(x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 分别表示校正前与校正后的对应点的位置，于是就可以用一幅已知位置关系的图像，通过参数的遍历，得到最小误差的参数，也就完成了校正。

Factor的遍历

- 遍历经验阈值内的中心点
 - a. 遍历经验阈值内的
 - b. 提高 f 精度
- 提高遍历的精度

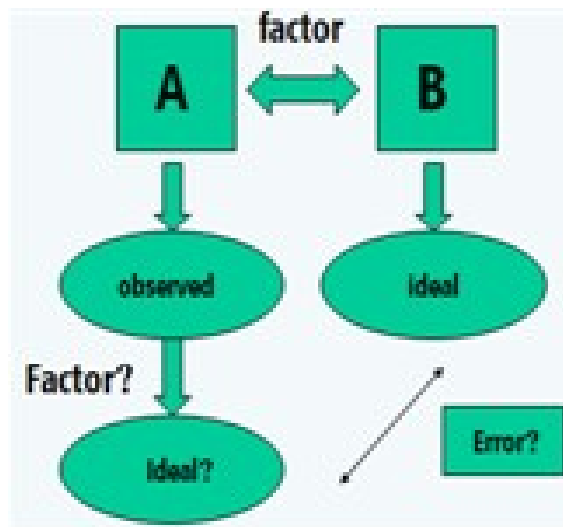


图 8: 畸变校正算法描述

– 重复a,b

通过这样的遍历与拟合误差的判断，得到一组最小畸变误差参数。再将这组参数带入公式对每个像素点进行畸变校正，就可完成畸变校正图9为校正效果：

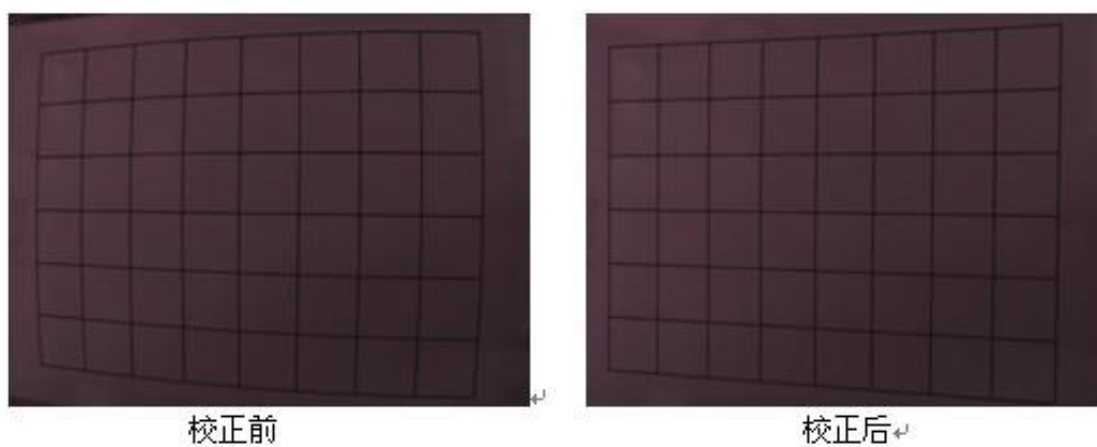


图 9: 校正前后的比较

3.2 三维测量系统的标定

在实际应用中，由于物体，摄像机和投影机并非像数学模型抽象的那样理想化，各种因素都可能影响最终的成像和测量结果，因此对整个成像系统的标定时十分重要和必要的。

常用的系统标定有显示标定和隐式标定两种，显示标定就是要根据系统的数学模型，计算出系统中所有相关参数的精确值（具体有哪些举几个例子），并由这些参数直观的描述系统的表现性能；而隐式标定不需要标定出相关参数，只要回复出系统的输入-输出关系数学描述即可。

在实际测量中，投影系统和成像系统的光学误差以及结构几何参数的误差都直接影响着测量精度，采用显式和隐式相结合的标定法标定该系统，就可以大大减少这些误差对结构的综合影响。需要测得的参数有：

- 需要使得摄像机与投影仪光轴的相交，并找到交点的位置。
- 摄像头距离交点的距离 $camera_distance$ 。
- 投影仪距离交点的距离 $projector_distance$ 。
- 投影仪的虚焦距 $e_projector$ 。
- 摄像机相平面的宽度 a ，高度 b 。
- 摄像机虚焦点距离相平面的距离 e 。

标定过程如下：

在固定好仪器后， $camera_distance$ ， $projector_distance$ 这两个外部距离参数就可以通过直接测量得到结果。而相机内部参数， a, b, e 之间具有如下关系：

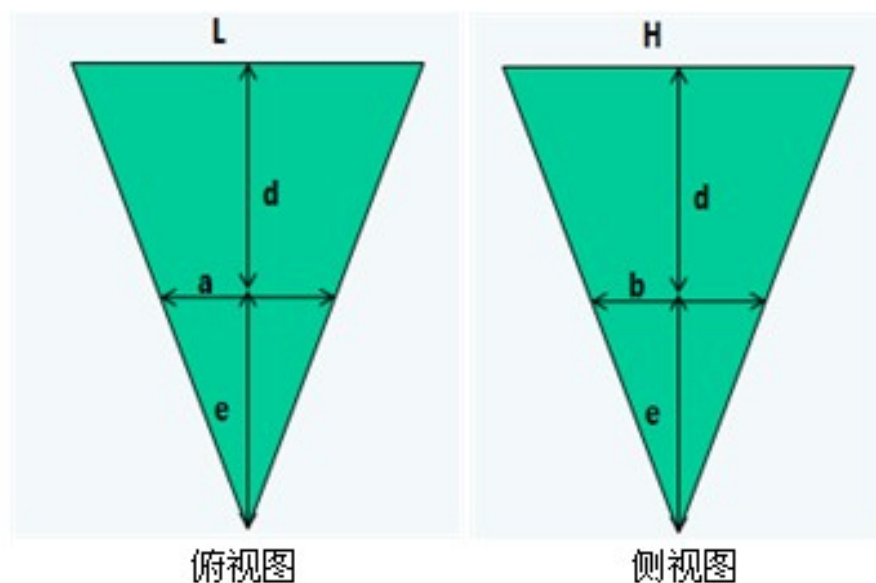


图 10: 镜头与外围世界的几何关系

由于光线直线传播，因此摄像机入射光线与投影仪出射光线皆可视作交于虚焦点的直线，以 L 和 H 分别为相机观测到的图像的实际宽和高， d 为相机镜头到实际物体的距离，这样通过测量多组的 L ， H ， d ，以及几何关系：

$$\frac{a}{L} = \frac{e}{e+d} \quad (2)$$

$$\frac{b}{H} = \frac{e}{e+d} \quad (3)$$

在求解过程中，我们通过利用相机的内部参数矩阵 C ，来拟合误差数据通过迭代使得误差最小的时候记录下： a 、 b 、 e 三个参数的值。

摄像机内部参数是 f_x, f_y, u_0, v_0 ， C 矩阵为：

$$C = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其核心意义为相机坐标和屏幕坐标之间的映射关系。

我们采取如图11所示的方法：

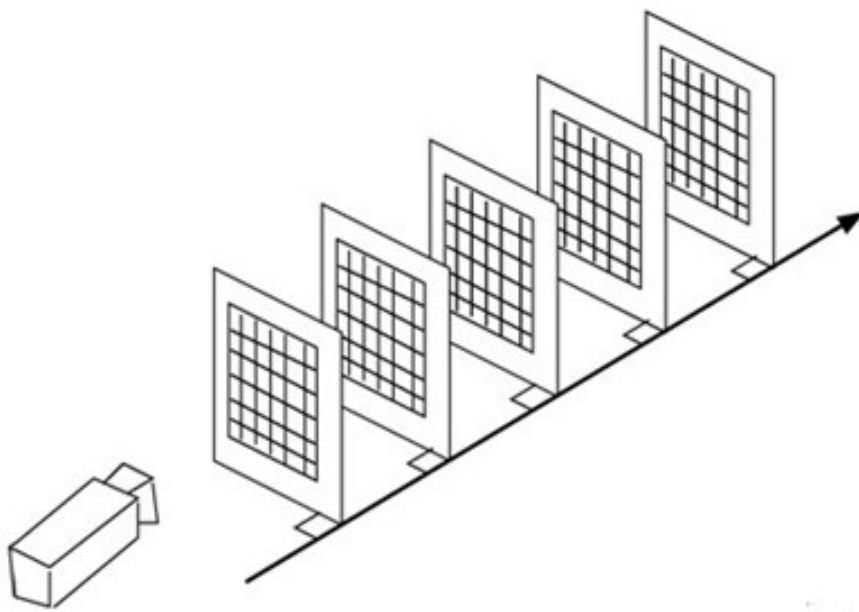


图 11: 标定方法图

方格板中的各交点的位置信息及其它它们之间的关系，是提前设计好的，用现实

中已知的二维信息通过在相片上得到的像素信息，通过计算出三维点云信息与实际物体的误差，迭代求解a、b、e的值。

现在的工作就是人工构造了一个相机坐标系A，而屏幕坐标系又可以轻松的和此坐标系对应B，A与B上的点是一一对应的，所以可以通过最小2乘法算得出C矩阵。

计算出相机的内部参数a,b,e. 投影仪内部的参数e_projector的测量方法与上述参数测量类似。

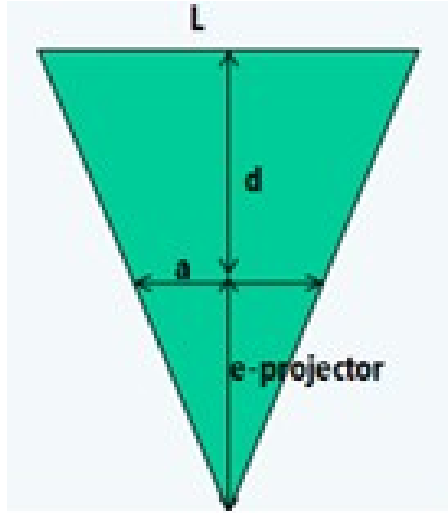


图 12: 投影仪的镜头参数图

L是投影仪射出的光覆盖区域的宽度，可直接测量。这样就可通过上面的几何关系：

$$\frac{a}{L} = \frac{e_{projector}}{e_{projector} + d} \quad (5)$$

多次测量d和L，即可求出相机的焦距e_projector。

通常CCD摄像机镜头上有增透膜，增透膜的作用是减少光在进入镜头时的反射，增加进入镜头的光强。因为人眼对偏绿的颜色敏感，大多数镜头都选择增强绿光的入射，因为采用厚度为绿光波长一半的增透膜。这样就造成由CCD摄像机获取图像时颜色的不均匀性，所以我们使用的结构光最好选择绿色。

经实验验证，绿色确实比红色光等其他光在相同条件下得到的点云噪点更少且正确点更多。

3.3 投影格雷码光栅

结构光法包括点、线、多线。或编码法。点、线结构光法存在测量效率低的缺

点；投射重复图案的多线法存在事变过程复杂的问题；而编码法则可以保证测量效率的同时又使识别简化，编码主要分为时间编码、空间编码两类。

时间编码是将多个不同的编码图案按时序先后投射到物体表面，得到相应的编码图像序列，将编码图案序列组合起来进行解码，从而解决投射图案和采集图像的对应问题，是目前分辨力最高、测量误差最小的编码方法，在这其中格雷编码又是错误最小化的编码，任意两相邻码之间只有一位不同且各位权重相同，因此其码值最多只有一位被误判，且任意位被误判引起的解码误差只有一位。同时，由于格雷码较之二进制编码其明暗光间隔要高出一倍，因此可以有效减少明暗光线间的干扰。

以投射三幅二进制格雷码图案为例，如图13所示：

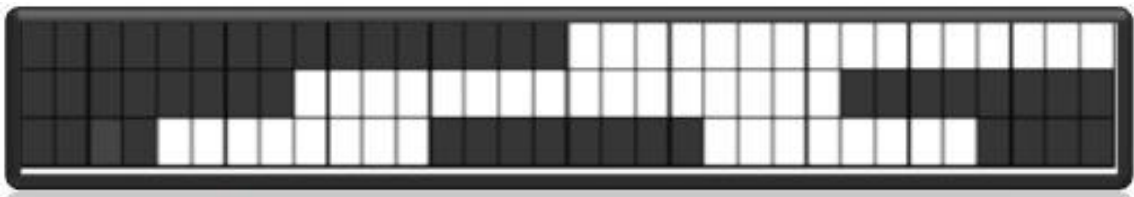


图 13: 以3张为例的格雷码图案

如图，格雷编码图案把测量空间分成8个区域，如果某一点在其中一幅图的编码图案中处于黑白交界处，那么在其他几幅编码图案中该点必然不出在黑白交界处，也就是说，在投射的几幅格雷编码图案中任意一点作为边界的机会最多只有一次，这样在解码的时候能够大大减少出现解码错误的机会，图中，设暗处为0，亮处为1，按从上往下的顺序投影，则A点的格雷编码为001，所以它对应的二进制编码或者十进制数可以按表3.3查得：

十进制	格雷码	二进制码
0	000	000
1	001	001
2	011	010
3	010	011
4	110	100
5	111	101
6	101	110
7	100	111

表 2: 格雷码与十进制、二进制码的对应关系

就是说A点属于第二个条纹。

在该系统中，我们选择的微型投影仪是分辨率 800×600 的，理论限制能编码的条纹数最大是800， $2^9 = 512 < 800 < 1024 = 2^{10}$ ，所以我们选择投射10幅格雷编码图。

针对于最细的一幅格雷码条纹图，即每像素一变的，亮的部分会由于漫反射以及衍射等因素影响到暗条纹，导致明暗变化不明显，在图像处理上会很难区分清楚，从而造成较大误差。最细的图案如果不能使用，编码数会立即降到400。为了获取理论最高精度，即编码800，设计一组间隔为8像素亮条纹图案、并且每次投射时向一个方向平移一个像素周期为8幅的一组图案投射于物体。

如图14所示：

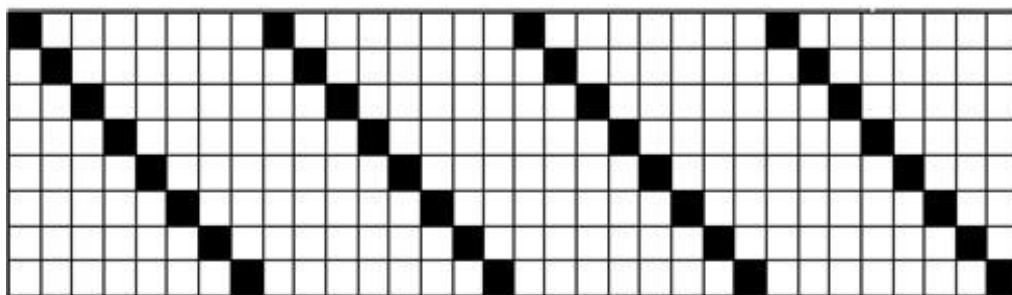


图 14: 位移码图

可以根据图片的顺序编号以及当前最亮位置等信息，经图像处理就可以得到完整的800条编码，现在编码的条纹编号是格雷码，为了编码有权重意义，将格雷码转换成对应的二进制码，关于整幅图的点云信息就是按二进制编码信息被重新组织和索引的。

通过调整摄像机的曝光率，结合上述编解码方法得到的点云信息只有少数噪点，通过简单滤波便可以消除。也为后续重建工作打下坚实基础。

3.4 BR4算法获取峰值亚像素

到此，每个二维点信息包含三个信息：像素信息 i 、 j 以及编码信息 $code$ 。可以看出，这三个量均是整数，在一个二维转换成三维的系统中，三维坐标的精度直接受限于现在精度较低的二维信息。

由于投影仪位置以及摄像机位置的摆放，条纹信息在摄像机中的成像近乎是一条垂直的曲线，而能表征物体特征形状特征变化的是条纹水平方向的形变，如图所示，水平方向即 x 方向。所以当我们提到计算更精确的亚像素信息值时，其实就是求解的在底片中的水平的 i 像素的精细值。

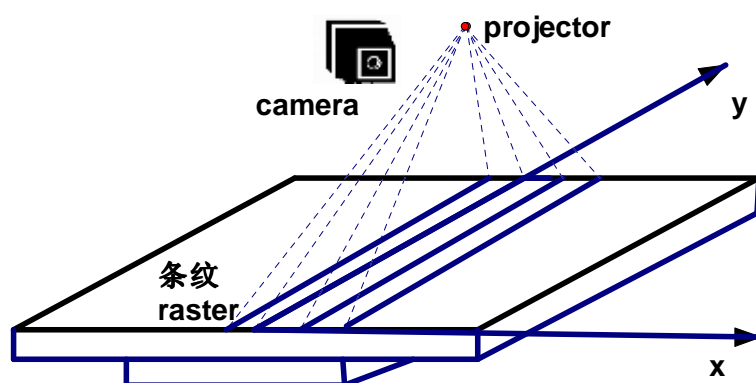


图 15: 投影仪、摄像机以及参考面的摆放关系

由于光传感器CCD获得的图像中一个条纹可能同时占据几个像素，为了使其细化成一个像素值，普通的算法一般是在几个相邻的位置检索出的（颜色）的最大的，从而用这个位置代表这个条纹。举例，如图16所示：

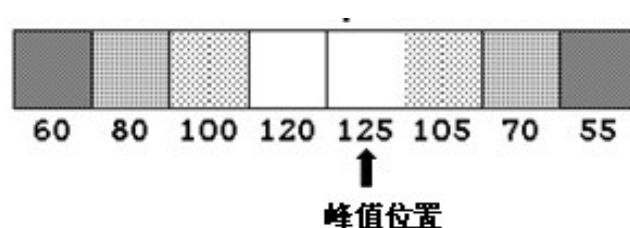


图 16: 例示条纹的光强分布

可以从图中分析得出，此条纹的实际中心位置其实应该偏移左边一些，而并非图示中的峰值位置 x ，定义 $x + \delta$ 为条纹的实际中心位置，为了计算出偏移量 δ ，在此我们采用BR4算法。

BR4算法有以下几个假设、前提及其定义：

1. 光传感器件接收到的条纹光强量分布并非随机，而是按高斯分布。
2. 我们提到的条纹光强值是将背景光强相减过后的光强值，即不受自然光强影响。
3. 光传感器件接收到的每个条纹宽度在相片上占据至少超过一个像素。

定义：

1. 峰值位置即为该位置的条纹光强比左右两个相邻位置的条纹光强量大，用 x 来表征峰值的位置，用 $f(x)$ 来表征该峰值位置处条纹光强量的大小。

$$2. g(x) = f(x-1) - f(x+1)$$

3. δ 即为在基于峰值位置的偏移量，其范围是 $\delta \in (-0.5, +0.5)$ 。

BR4算法描述如下：

$$\delta = \begin{cases} \frac{g(x)}{g(x)-g(x+1)}, g(x) < 0 \\ \frac{g(x-1)}{g(x-1)-g(x)} - 1, g(x) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.5 坐标转换获取三维信息

上述工作都可谓是为了能从二维的图像信息能精准地转换到三维信息做的铺垫，所以三维信息的获取可谓是精华部分，选取怎么样的坐标参考点以及计算公式也直接影响着重建的精度。我们给出三维测量的几何关系：如图17所示

由图15的一个物体遮挡点J来举例计算，

我们选择的三维坐标中心为摄像机的光轴和投影仪的光轴的交点O，x轴和摄像机光轴重合，yz平面垂直于摄像机光轴，如图17所示。所以我们需要计算J点的三维信息为：

$$\begin{aligned} X &= OA \\ Y &= AB \\ Z &= JB \end{aligned} \quad (7)$$

由上面的标定工作可以得到以下参数信息：

$$\begin{aligned} X &= FO - FC + AC \\ Y &= BC \times \sin \angle ACB \\ Z &= \frac{\Delta y \times (FC - BC \times \cos \angle ACB + e) \times b}{e \times height} \end{aligned} \quad (8)$$

其中：

$$\begin{aligned} FC &= FO - (PO + PI) \times \cos \angle POF - \frac{(PO + PI) \times \sin \angle POF}{\tan \angle ACB} \\ BC &= \frac{a \times (D + e) \times \Delta x}{weight \times \sin \angle ACB \times e + \Delta x \times \cos \angle ACB \times a} \\ AC &= BC \times \tan \angle ACB \\ \angle ACB &= \angle POF + \angle OIH \\ x &= i - \frac{width}{2} \\ y &= j - \frac{height}{2} \\ width &= 2048, \text{ 即为底片宽度像素值} \\ height &= 1536, \text{ 即为底片高度像素值} \end{aligned} \quad (9)$$

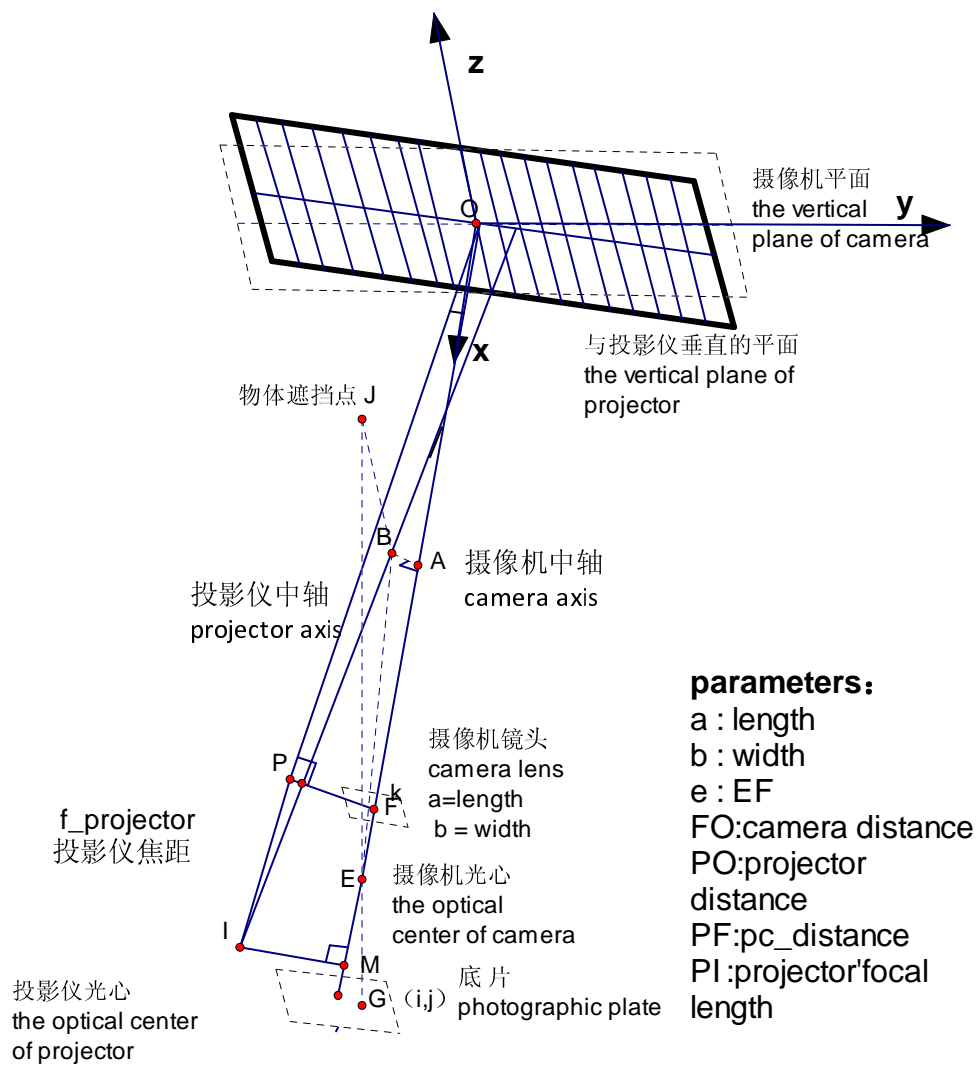


图 17: 测量系统的几何位置关系

将8、9式带入到上述方程组7式进行求解，便可以得到一个点的三维信息。

3.6 ICP算法拼接

数据配准（Data Registration）是将两个或两个以上坐标系中的大量三维空间数据点集转换到同一坐标系统中的数学计算过程。

1992年，计算机视觉研究者Besl和Mckay[3]介绍了一种高层次的基于自由形态曲面的配准方法，也称为迭代最近点法ICP（Iterative Closest Point）。以点集对点集（PSTPS）配准方法为基础，他们阐述了一种曲面拟合算法，该算法是基于四元数的点集到点集配准方法。从测量点集中确定其对应的最近点点集后，运用Faugera和Hebert提出的方法计算新的最近点点集。用该方法进行迭代计算，直到残差平方和所构成的目标函数值不变，结束迭代过程。ICP配准法主要用于解决基于自由形态曲面的配准问题。

迭代最近点算法基本原理

三维空间 R^3 存在两组含有 n 个坐标点的点集 P_L 和 P_R ，分别为： $P_L = \{p_{l1}, p_{l2}, \dots, p_{ln} \in R^3\}$ 和 $P_R = \{p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rn} \in R^3\}$ 。三维空间点集 P_L 中个点经过三维空间变换后与点集 P_R 中点一一对应，其单点变换关系式为：

$$P_L = \mathbf{R} \cdot P_{li} + \mathbf{t} \quad (10)$$

其中， \mathbf{R} 为三维旋转矩阵， \mathbf{t} 为平移向量。

在ICP配准方法中，空间变换参数向量 \mathbf{X} 可表示为：

$$\mathbf{X} = [q_0, q_x, q_y, q_z, t_x, t_y, t_z]^T \quad (11)$$

参数向量中四元数参数满足约束条件为：

$$q_0^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 = 1 \quad (12)$$

根据迭代的初值 X_0 ，由式10计算新点集 P_i 为：

$$P_i = P_0(X_0) = R(X_0)P + t(X_0)$$

式中， P 表示原始未修改过的点集， P_i 的下标 i 表示迭代次数，参数向量 \mathbf{X} 的初始值 X_0 。

根据以上数据处理方法，ICP配准算法可以概括为五个步骤：

1. 初始化带拼接的点云 P_{lk} 和 P_{rk}
2. 遍历 P_{rk} 点云中的每个点，找到该点在点云 P_{lk} 中与其距离最近的点，构成对应点对。
3. 根据对应点对，用SVD方法计算旋转矩阵和平移矩阵。
4. 对data点云进行旋转和平移。
5. 迭代进行以上几步，直到对应点对的平均距离几乎不再减小，则停止迭代。

ICP搜索最近点的算法：

我们采用的是point to point 的最近点搜索法，并辅助以KD-Tree算法来实现。

“海量”已经成为点云数据处理的瓶颈，因此选用高效的索引储存结构不仅可以提高空间查询速度，还可以节省存储空间。而且在后续点云数据融合以及点云精简都依存于这种高效的索引存储结构。

该算法是一种由二叉树搜索树推广而来的用于多维检索的树的结构形式K即为空间的维数。它与二叉树搜索树不同的是它的每个节点表示k 维空间的一个点，并且每一层都根据该层的分辨器（discriminator）对相应对象做出分枝决策。顶层结点按由分辨器决定的一个维度进行划分，第二层则按照该层的分辨器决定的一个维进行划分，以此类推在余下各维之间不断地划分。直至一个结点中的点数少于给定的最大点数时，结束划分。

简言之，Kd-tree要么是一颗空树，要么是一颗具有下列性质的二叉树：

1. 若他的左子树不空，则左子树上所有节点的第d维的值均小于它的根结点的第d维的值，其中d为根节点的分辨器值。
2. 若它的右子树不空，则右子树上所有结点的第d维的值均大于或者等于它的根结点的第d维德值。
3. 它的左右子树也分别为kd-tree。

关于经典的ICP拼接算法，在我们编程实现的基础上，也发现这个算法想当耗时，所以对其进行多线程编程优化，使得效率提高近30

图18是用英特尔测试软件VTune测试拼接过程中，CPU处在Fully Utilized状态。



图 18: VTune软件测试ICP算法部分

3.7 电子罗盘转台

由于在实际操作中，为了得到目标物体的完整三维信息，所以需要通过旋转物体所在的平台，通过调整角度来获得还没有采集的面，知道采集的面能够覆盖整个物体。方便后续的拼接工作。

自行设计一块电子罗盘贴附于转台上，由于ICP拼接工作足够精细，所以提供精度为一度的装置已然能达到要求，通过电刷的通与断得到高低电平经滤波电路，将电信号传回单片机并进行计数，单片机通过串口将当前转台角度传回给处理器，修改程序中的参数信息，使之三维显示的点云也做相应的转动，就好像镜面操作一样，所以用户能够根据屏幕当前显示的情况选择合适的角度，并通过按键控制选择对这个面的信息进行采集，并将当前绝对角度值记录下来传回嵌入式开发板，并改变程序中的相关参数，系统自动进行匹配拼接。

3.8 点云的融合及其精简

由于多个视角多次定位测量，而模型重建时则需要多视数据定位匹配。由于存在着测量误差和匹配误差，经过精确匹配的点云往往也存在着局部多层的现象，如果直接用这些数据构造三角网络模型，就会产生大量冗余面片、匹配拼接痕迹明显等缺点，所以需要点对云数据进行融合；又由于最后点云数据量的大小对后续的重建工作所耗费的时间有很大的影响，所以对数据进行精简有着很大的必要，并且在此基础上要尽可能保持丰富的细节信息。

我们选用基于重心约束的点云融合算法，该算法主要有以下三个步骤：检测计算重叠点云区域、计算融合初始核、计算融合点。

3.8.1 检测计算重叠点云区域

对于第一片点云和一幅精确匹配过的新点云，如果两幅点云存在公共的重叠区域，自新点云上一点 P_{inew} 寻找老点云中的最近点 P_{iold} ，如果欧拉距离小于给定的阈值 T ，则判定这两个点构成重叠区域的对应点对。如果点的法向用 N 表示， d 表示 P_{inew} 到 P_{iold} 的矢量， $d = \overrightarrow{P_{inew}P_{iold}}$ ，则重叠区域中的各点沿各自法向向相近的

方向移动，移动距离为矢量 \mathbf{d} 与矢量 \mathbf{Ni} 点积的一半，得到移动点：

$$\begin{aligned} P_{inew'} &= P_{inew} + \frac{\mathbf{d}}{2} \cdot \mathbf{Ni} \\ P_{iold'} &= P_{iold} + \frac{\mathbf{d}}{2} \cdot \mathbf{Ni} \end{aligned} \quad (13)$$

重复上述过程，将所有的最近点距离小于阈值的点标记为重叠点。重叠点的集合构成重叠屈戌，移动过的点的集合构成粗糙的单面点云 S_{mid} 。

3.9 计算融合初始核

进行融合计算需要预先确定初始核点，初始核点的位置和数量直接影响最终的结果。首先把第一片点云中移动过的点 $P_{iold'}$ 作为初始核。其次以该店为核心，搜寻 S_{mid} 中 k -距离邻域。邻域半径为 r ，对于落入此球内的移动点，其对应的原始点为 P_{iold} 和 P_{inew} ，调整融合点的法向：

$$N_{fusion} = \text{normalize}(\sum(N_{iold} + N_{inew})) \quad (14)$$

最后，计算初始融合点的位置：

$$P_{ifusion} = P_{iold'} + \vec{D} \cdot N_{fusion} \quad (15)$$

式中

$$\vec{D} = \frac{\sum(P_{inew} + P_{iold'})}{\text{numb}} - P_{iold'} \quad (16)$$

其中 numb 为邻域球内 S_{mid} 上的点数量。

初始融合点的位置为该点邻域中心再点法向上的投影点。

3.9.1 计算融合点

为了使融合点尽量接近实际表面形状，需要对融合点进行修正。假设点的法向方向与摄像头光轴方向相反，则点的法向方向与摄像头光轴方向相反，则点的法向与摄像头光轴的夹角 θ 反映了该点的可信度， θ 越大可信度越高。引入置信度系数 $w = \frac{\theta}{\pi} 0 < w \leq 1$ ，则点的法向为：

$$N_{fusion} = \text{normalize}(\sum(N_{iold}w_{iold} + N_{inew}w_{inew})) \quad (17)$$

点的位置调整

$$P_{ifusion} = P_{iold'} + \vec{D} \cdot N_{fusion} \quad (18)$$

其中

$$\vec{D} = \frac{\sum(P_{iold}w_{iold} + P_{inew}w_{inew})}{\sum((w_{iold} + w_{inew}))} - P_{iold'} \quad (19)$$

算法描述：

1. 给定两幅点云的先后顺序，以及各点的法向。
2. 寻找重叠区域，在第二片点云上取一点离第一片点云最近的且小于阈值的点。
3. 点云上的点作移动，计算移动点坐标。
4. 建立初始核点。
5. 计算融合点的位置。
6. 计算下一个点，直至所有点检索到完成。
7. 删除所有重叠点，新点作为融合后的点。

k-阶邻域是k个到点p的欧式距离最近的点所组成的集合。如图19所示：

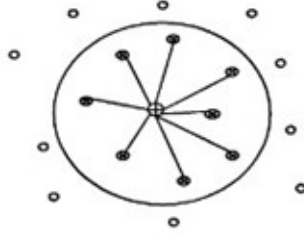


图 19: k-阶邻域

通常，计算某点的k个最近邻域的方法就是求出候选点与其余n-1个点的欧式距离，并按从小到大的顺序排列，前面的k个点即为候选点的k最近邻域。这种方法直观，然而对于海量的点云数据而言，采用这种方法想当耗时，效率十分低下。

采用kd-tree的结点为i，每一个结点都对应一个区域，那么结点i所对应的区域为Reg(i)；R表示所要查找的区域范围。范围查询算法如下：

1. 首先i=root，即表示从根结点开始搜索；

2. 如果*i*是叶子结点，那么返回该叶子结点中处于*R*中的点；
3. 如果*R*包含Reg(*i*)，那么返回*v*的所有子树结点；
4. 否则，如果Reg(left(*i*))和*R*相交，那么从左结点开始找，否则从右结点开始找。

算法中*R*式由点云中给定的点*p*和搜索的半径决定的，所有落在以*p*为圆心中的点便是*p*点的最近的邻域点。执行一次邻域搜索的时间复杂度为 $O(\sqrt{n} + k)$ 。*k*是落入区域的点的个数。

点云精简的算法描述：在点云中随机置一个种子点，线搜寻用kd-tree的方法搜索其*k*阶邻域，可以知道这个点的邻域分布在一个三维的半径小于*r*的空间中，邻域 $N_k(p)$ ，将其空间 R^3 按PCA协方差分析法分解成： $R^3 = N + R^2$ ，其中*N*为邻域在该邻域中心处张成的椭球最短轴的指向。

用 $\sigma = \frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3}$ 来表示该聚类的变化值，其中 φ_1 是由PCA协方差分析该聚类得到一个3*3矩阵的三个特征值中最小的一个。所以 $0 < \sigma < 1/3$ ，为该参数值设定一个阈值，如果 σ 超过该阈值则，减小*k*这个参数，如果没超过则继续增大，以至于最接近该阈值，那么用该聚类的重心点来代表这个聚类中的所有点则可以达到精简的目的。经实验验证，将阈值设定为0.05效果最佳。

3.10 三维delaunay重建

三角剖分算法可以分为针对二维的局部剖分和三维的全局剖分算法。在二维情况下建立的基于简单的三角形构面的方式，而三维情况下则是需要建立基于四面体的方式构造空间曲面。在遇到三维空间散乱点的构面问题时，可以直接采用三维Delaunay剖分，亦可先将三维坐标预处理转换到二维坐标系中，间接的采用二维Delaunay剖分算法。

在计算几何领域，qhull 是个很强大的程序，它可以计算2 维、3 维，以及4 维以上维度点集的凸包、Delaunay 网格、Voronoi 图，并且Matlab 和Octave 都基于它来提供计算几何功能，Mathematica 使用它实现Delaunay 网格构造。我们在使用三维Delaunay计算其凸包以及支撑线的时候就是调用了qhull这个强大的工具箱。使得程序跑起来要比普通根据算法编写出来的程序效率高很多。

4 系统优化

主要对系统进行了以下几个方面的优化：

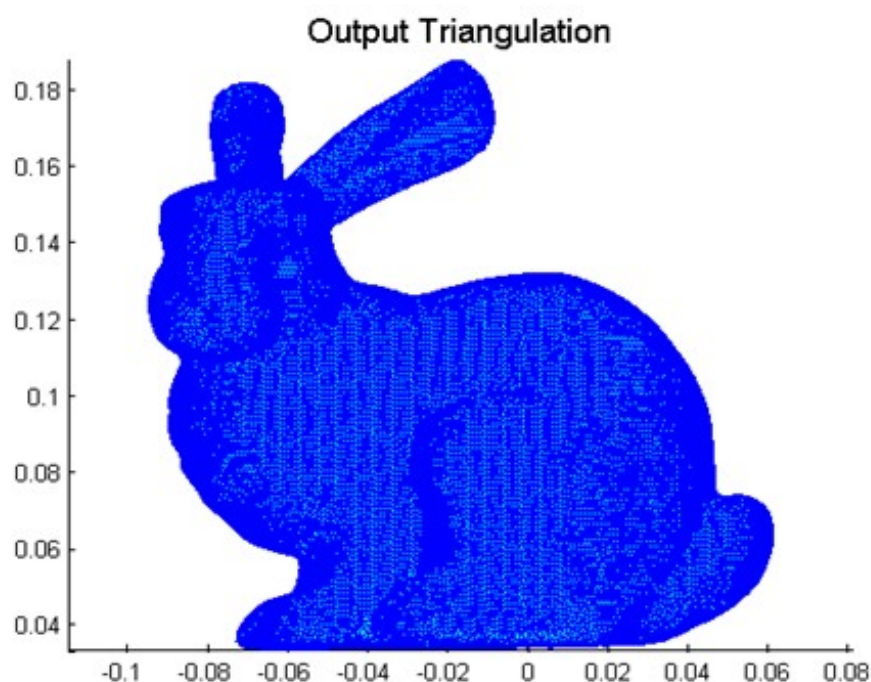


图 20: 用三维delaunay在matlab里的重建效果

1. IPP性能优化

本系统的图像处理算法涉及大量浮点运算。IPP性能库能提供丰富的图像处理解决方案，经过独立测试，经由IPP性能库优化后算法速度提高80

2. OpenMP优化

CPU负载均衡一直都是发挥英特尔处理器性能的关键，本系统的软件按照超线程进行设计。在实现上主要采用并行的算法结构及OpenMP自动线程优化。进行测试，软件整体速度有20

3. VTune辅助分析利用英特尔VTune性能分析器，可以得到很好的线程优化支持。在实现系统功能后，进行了闭环的线程优化处理。

5 系统测试

在头像上投影格雷码图案，如图21所示。

位移码结果如图22所示。

经算法获取一面的三维点云信息如图23所示。

重复上述操作后，经拼接后点云如图24所示。

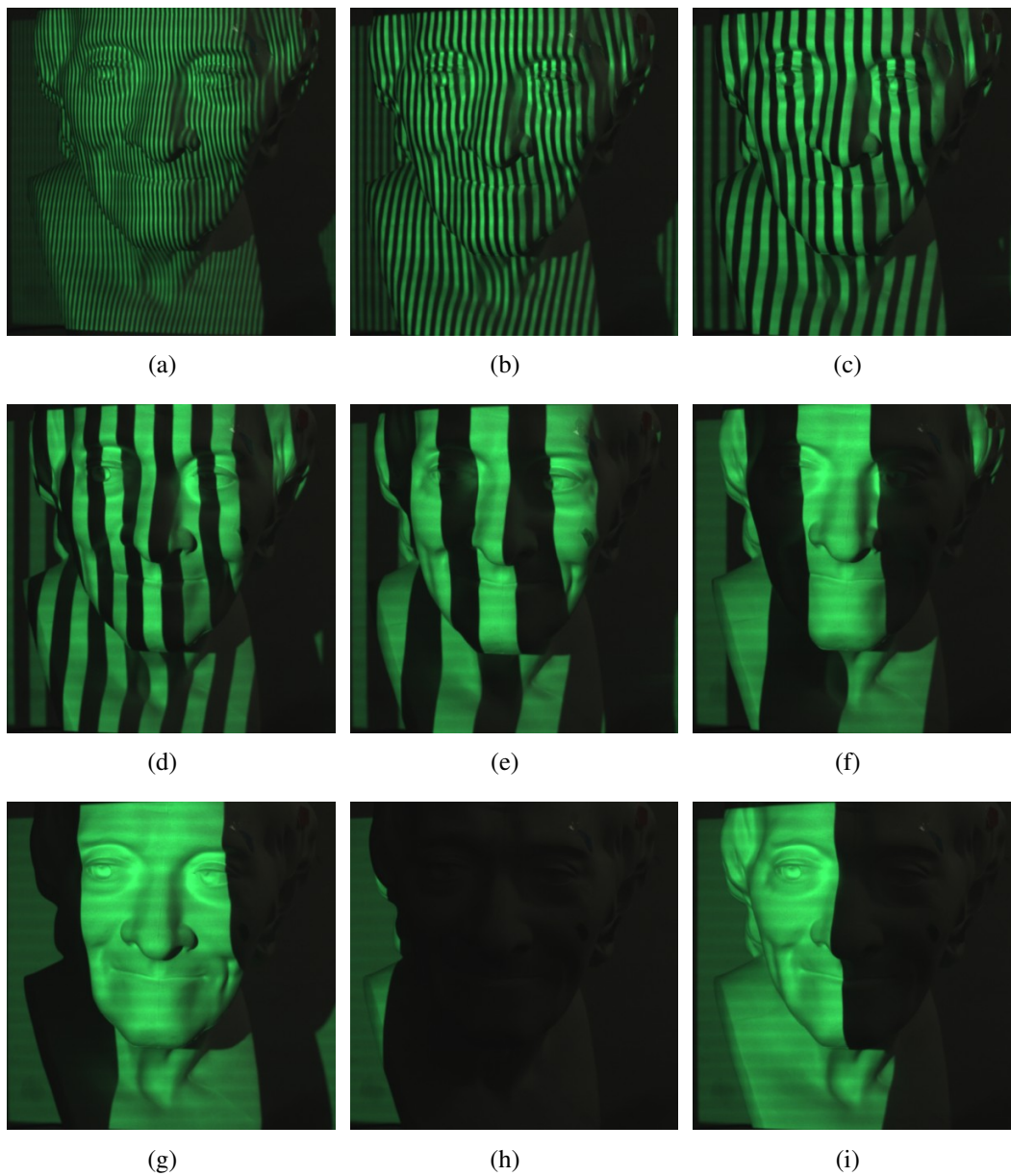


图 21: 在伏尔泰头像上投影格雷码图案

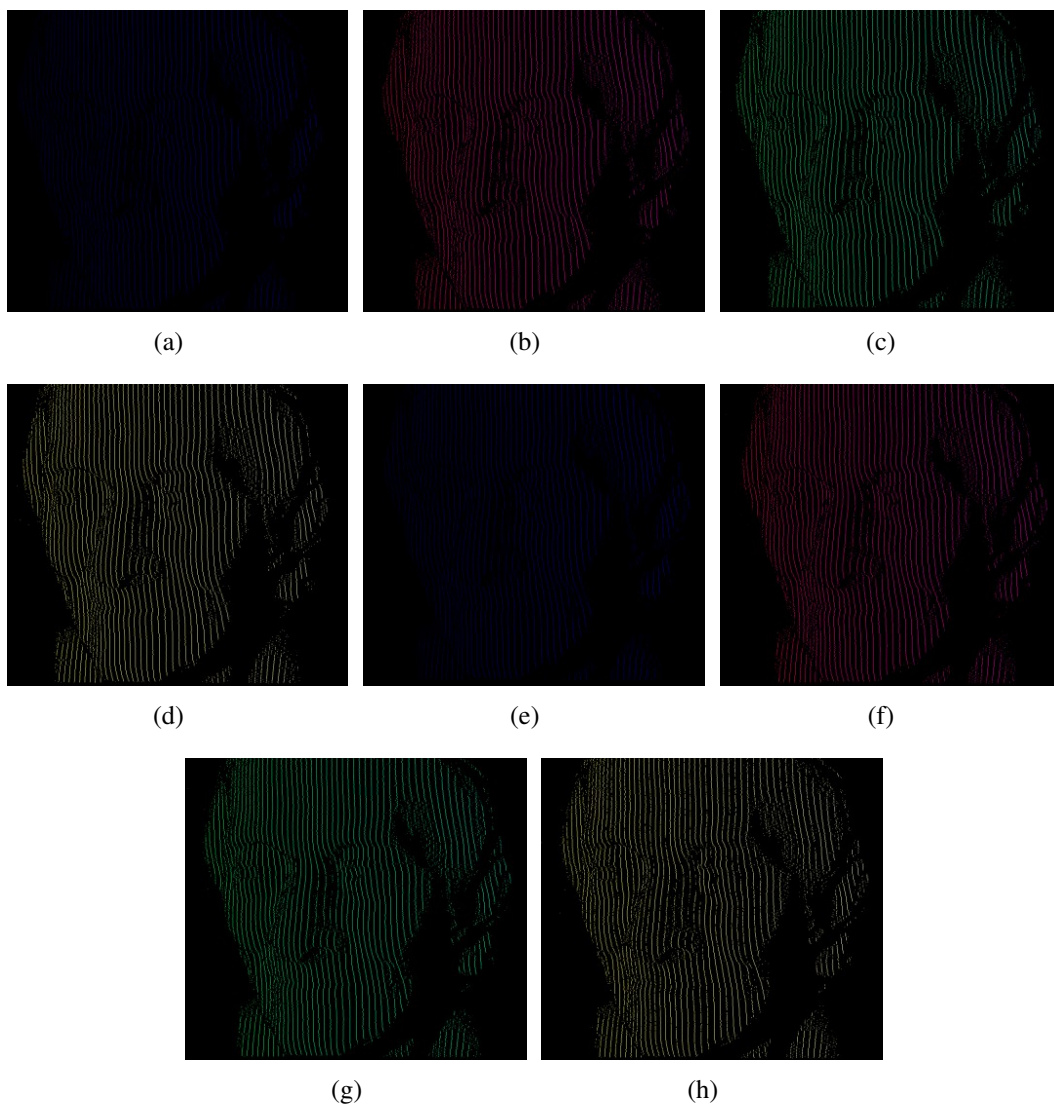


图 22: 图像处理后的经不同颜色表示的8张位移码结果图

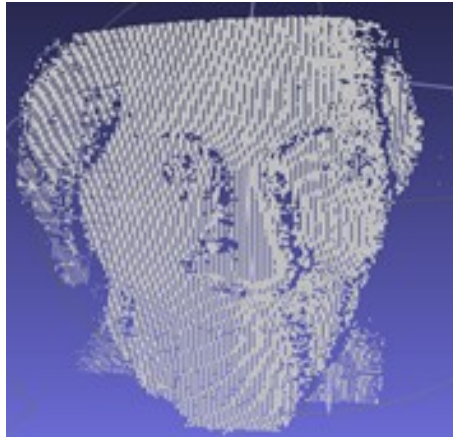


图 23: 一面点云的显示

6 特色与创新

本系统在软硬件设计、成本控制、性能优化、操作便利、以及应用的社会意义上综合考虑，都有着突出的特点与创新。

1. 多技术与前沿算法的融合：

将该三维重建技术选在基于嵌入式开发，将基于格雷码结构光的编解码、三维坐标转换、ICP拼接算法、以及三维delaunay三角剖分算法融合到一个系统中。作为一个完整的三维重建产品，在现在3D概念热炒的年代里，有着极其广泛的应用，切合当下的潮流。

2. 基于嵌入式开发、硬件简单、成本低廉、：

与当下最前沿的三维重建产品相比，比较常见的基于激光的单目或者双目，或者基于结构光的双目或单目，基于激光的产品虽然在精度上有着绝对的优势，但是由于重建时间长以及会对生物体以及文物有着不可逆的伤害而限制了其应用的范围。基于结构光的单、双目产品的投影仪往往体积庞大，只能摆在实验室中，很难走向市场，从而使产品应用领域大大受限。

而本款系统设计采取基于嵌入式平台的开发，英特尔这款凌动平台更是本着“轻便、低耗能”的核心思想开发出的一款高性能产品，在外围硬件的选择上也围绕高性能、低成本、轻便性的思想去选择，使得本款产品能带着三维重建的技术走向市场，服务大众。与现在动辄上百万的三维重建产品的成本有着天壤之别。

3. 操作简便，无技术门槛

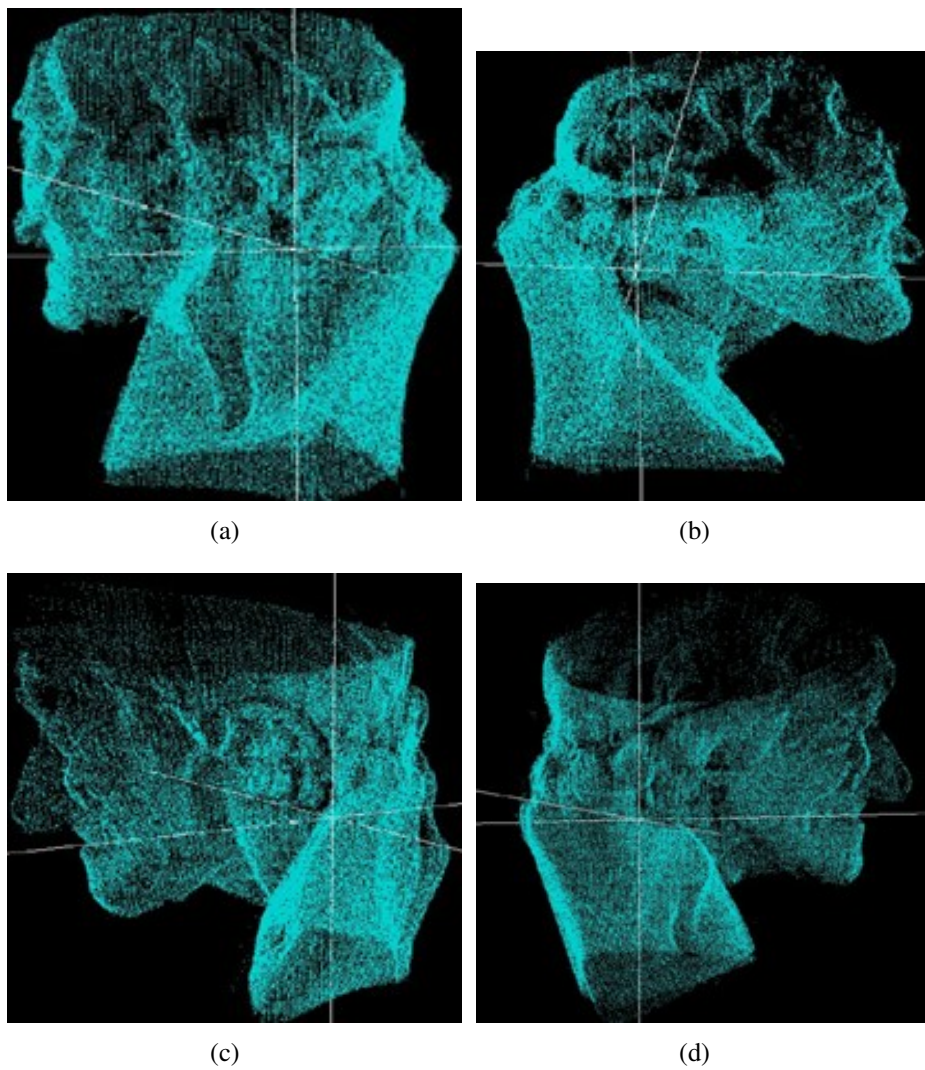


图 24: 拼接后点云显示

传统的三维重建系统，往往只输出点云后宣告结束，此后的工作便是由专业人员采用相关三维建模软件，例如PolyWorks和Geomagic等，虽然功能强大，但是操作起来比较麻烦，从实际应用角度出发，不利于产品的应用范围的多大。所以集成了对于点云后续处理的算法以及重建曲面的算法，是一款完整的三维重建产品，人性化的触控操作界面。

7 特色与创新

本系统实现了一个基于英特尔超线程atom处理器开发平台的三维重建系统，基于格雷编码的结构光获得精确地编码信息，经过投影仪以及摄像机的标定和畸变校正，再通过严密推算的三维坐标转换公式，获取低噪且包含目标物体丰富细节的点云数据，然后通过ICP拼接算法、聚类融合精简算法、三维delaunay三角剖分等算法重建3D图像。系统在算法经过反复测试完善以外。还进行了针对于英特尔超线程处理器的软件优化，利用IPP性能库以及OpenMP进行了深入的线程优化，使得系统的CPU负载平衡，CPU利用高，大大地发挥了atom这款处理器的运算性能，使得软硬件资源得到了良好的结合。此外系统充分地利用了开发板的外围硬件资源，扩展了大量外设，使得系统功能丰富。系统经过夜以继日的调试、深入的完善和一步步的改进，运行稳定，拥有着广阔的应用前景，基于嵌入式的开发思想是三维重建技术走向市场的强大推动力。

（指导老师：李扬 参赛学校：南京大学）

参考文献

- 1.Paul J.Besl,Membei,IEEE,and Neil D.MaKay.A Method for Registration of 3-D Shapes[J].IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE,VOL 14 NO.2,FEBRUARY 1992
- 2.中国海洋大学，许尚.三维点云数据拼接与精简技术的研究SS09222.2009.6
- 3.西安职业技术学院 张文革 河南科技大学 梁新合 重心约束的多幅点云数据融合技术 Product & Technology. CMTM 2009.1
- 4.中国科技大学，邱茂林 中国科学院，马颂德，李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述.自动化学报Vol.26.No.1 Jan.,2000
- 5.华东师范大学，方子毅，关于三维人脸成像系统的研究.09届研究生硕士学位论文.2008.8
- 6.哈尔滨理工大学，尹丽萍.格雷码与相移法相结合的三维测量方法及其仿真研究.2007.3