

项目编号 201610486092

# 武汉大学国家大学生创新创业训练计划项目科研总结

## 多旋翼垂直多层全景影像拼接

院（系）名 称：测绘学院

专 业 名 称 ： 测绘工程

学 生 姓 名 ： 潘元欣 张可可

陈宇晗 柯磊

指 导 教 师 ： 詹总谦 副教授

二〇一七年九月

## 摘要

全景拼接是指将一组具有重叠区域的小视角影像进行拼接处理，融合成一幅高分辨率、大视角的新影像，它包含拼接前所有影像的信息。全景拼接技术降低了获取宽视角图像的设备成本和人工成本，解决了图像宽视角和高分辨率间的矛盾，使单幅影像包含更丰富的信息、更具有应用价值。

现有的全景拼接技术所处理的影像序列主要是通过定点环视拍摄的方式获取，故其存在以下两方面的局限性：首先，在狭窄、纵深大的受限环境中，因相机的视场角有限，故无法获取场景的全方位影像，且由于相机镜头成像存在畸变，通过俯仰相机的方式所获取的影像变形严重，无法供实际使用；其次，定点拍摄的影像序列具有近似投影中心，由摄影测量的知识可知，在没有基线的情况下无法进行立体量测。因而现有的全景拼接技术能处理的影像序列受限，且只具有视觉效果，限制了其更进一步的应用

本项目研究的全景影像拼接技术有望解决上述问题，通过在纵深方向上获取多层影像，解决相机视角受限的问题，并对多层影像进行拼接以获取受限环境的全景影像。此外，由于不同层的影像之间存在平移量，所以能够基于全景影像进行前方交汇，实现可量测，大大的扩展了全景影像的应用范围。

本项目组由武汉大学 14 级的四名本科生组成，分别是来自测绘学院测绘工程专业的潘元欣、张可可、陈宇晗，以及来自国际软件学院的柯磊。项目指导老师为测绘学院的詹总谦副教授，他是摄影测量与遥感、计算机视觉领域的专家，具有丰富的教学和项目指导经验

## 一、研究背景

全景影像拼接技术是将同一场景 360 度全方位的图像序列通过配准、融合等步骤拼接成一张无失真、高清晰、全方位的影像。该技术能够解决照相机宽视角和高分辨率之间的矛盾，降低获取宽视角影像的设备成本和人工成本，且全景影像含有更丰富、更全面的信息，因而全景影像也在社会各领域产生了广泛的应用，产生了极大的经济效益和社会效益，有力地促进了有关领域的发展和革新。其中较为知名的应用有：街景地图，该项应用由谷歌公司率先开发，使用户可在网页中进行三维现实场景的浏览，刷新了人们对于地图原有的认识，而如今国内百度、腾讯等公司也正致力于开发自己的街景地图；虚拟现实，该项技术主要采用现实场景的全景影像来构建虚拟的三维场景，用户借助配套的设备即可在虚拟场景中身临其境地进行全方位浏览。由此可见，全景影像的应用促进了许多新兴产业的发展，带来了许

多行业的革新，且可以预见，在未来全景影像会应用于更多领域、产生更大的效益。

但是，现有的全景影像拼接技术依然存在着一些局限性，由于处理的影像序列主要是定点 360 度环视拍摄的场景的全方位影像，在狭窄、纵深大的受限环境下（如城市的高楼之间），因相机的视场角有限，故无法获取场景的全方位影像，即便通过俯仰相机的方式，由于存在相机镜头成像的畸变，所获取的影像变形严重，无法供实际使用；另一方面，定点拍摄的影像序列具有近似投影中心，由摄影测量的知识可知，无法由此进行立体量测，因而现有的全景影像在一定程度上只具有定性的视觉效果，限制了其更进一步的实际应用。

本项目的研究成果有望解决现有的全景影像拼接技术在这两方面的局限性，即实现受限环境下全景影像的获取和全景影像的可量测。由此，全景影像的应用价值将由定性的视觉效果上升到定量的可量测效果，可广泛运用于三维数字城市建模、街景地图、虚拟现实、移动测量等实际应用。

本科研项目由测绘学院和国际软件学院的同学合作参与，能够实现图像拼接、摄影测量的理论知识和编程实践的有效结合。小组成员对图像编程和摄影测量有着浓厚的兴趣，并具有较高的创新精神与合作意识。小组成员英语基础均较好，勤于钻研并有着较强的学习能力和实践能力，抱着认真严谨的态度和锲而不舍的精神与勇气，渴求能在提高自身科研能力的同时，为之后的学习和工作进行技术积累。指导老师詹总谦老师主要从事摄影测量与遥感、计算机视觉等方面的教学、研究和人才培养工作。近年来，在相机高精度标定、近景三维重建、无人机低空遥感数据处理等方面取得了多项创新性成果，并对本次科技创新项目给予了高度的重视与支持。

## 二、研究团队

本研究团队由测绘学院的 3 位同学以及国际软件学院的 1 位同学组成。指导老师为测绘学院的詹总谦副教授，他是摄影测量与遥感和计算机视觉领域的专家，具有丰富的教学科研和项目指导经验。下面对项目成员及其主要分工进行介绍：

潘元欣，男，2014 级测绘工程卓越工程师班，学习委员。对摄影测量以及计算机视觉具有浓厚的兴趣，C/C++编程语言基础扎实，乐于动手实践，具备探索精神。在本项目中担任负责人，对团队工作的开展进行组织协调，提出项目实施中遇到的关键问题，并集中大家的力量解决之；此外还负责实现底层的全景影像拼接和平差优化。

张可可，女，2014 级测绘工程卓越工程师班，学生。系统掌握摄影测量理论知识，同时对于科技创新具有极大的兴趣和热情，热爱探索，善于思考和沟通，有着良好的合作精神和

集体意识。在本次项目中负责部分算法的优化与文案整理。

陈宇晗，男，2014 级测绘工程大地测量与卫星导航方向，学生。学习态度认真，擅于理论推导，熟悉摄影测量基本理论，在本项目中主要负责阅读文献和理论知识学习。

柯磊，男，2014 级国际软件学院卓越工程师班，学生。学习态度认真，编程动手能力强，具备丰富的软件项目经验，熟悉计算机数据结构及算法，对于图像拼接算法研究充满兴趣。在本项目中负责软件的界面及具体功能模块的编码实现。

在本次创新项目中，技术路线首先由项目组成员共同研究、讨论，形成初步的研究方案与指导老师进行沟通。在项目实施过程中，项目组成员积极沟通、默契配合，在各个阶段可以陆续完成各自的分工任务，并定期进行会议讨论并阶段性的向指导老师汇报项目进展。指导老师根据研究进展给予方向上的指引，而大部分技术内容由学生自主完成。

### 三、 技术创新

#### (一) 特征点提取方法性能对比

特征点提取和匹配是整个全景影像拼接过程中最基础的工作，在影像中提取出特征点是影像配准的前提，特征点的数量和质量直接决定了后续影像配准的效果。只有在影像中找到同名点，才能够求解影像之间的变换关系、实现影像配准。目前已有的且成熟的特征点提取算法主要有 SURF，SIFT，ORB，为了选取最适合本项目的特征点提取算法，我们对三者进行了一系列的实验，分析比较了这三种特征点提取算法各自的性能和稳定性。

实验中采用一张旋转 45 度角的图像与原图分别采用三种算法进行特征点提取并进行匹配，提取的点数以及匹配的结果如下表所示

表 1 特征点提取及匹配结果

方法	时间(s)	左影像点数	右影像点数	匹配点数	匹配率
SIFT	0.16	248	260	166	65.4%
SURF	0.03	162	271	110	50.8%
ORB	0.03	261	423	158	46.2%

表 2 匹配率随旋转角的变化

角度 (°)	0	45	90	135	180	225	270
SIFT	100	65	93	67	92	65	93
SURF	99	51	99	52	96	51	95
ORB	100	46	97	46	100	46	97

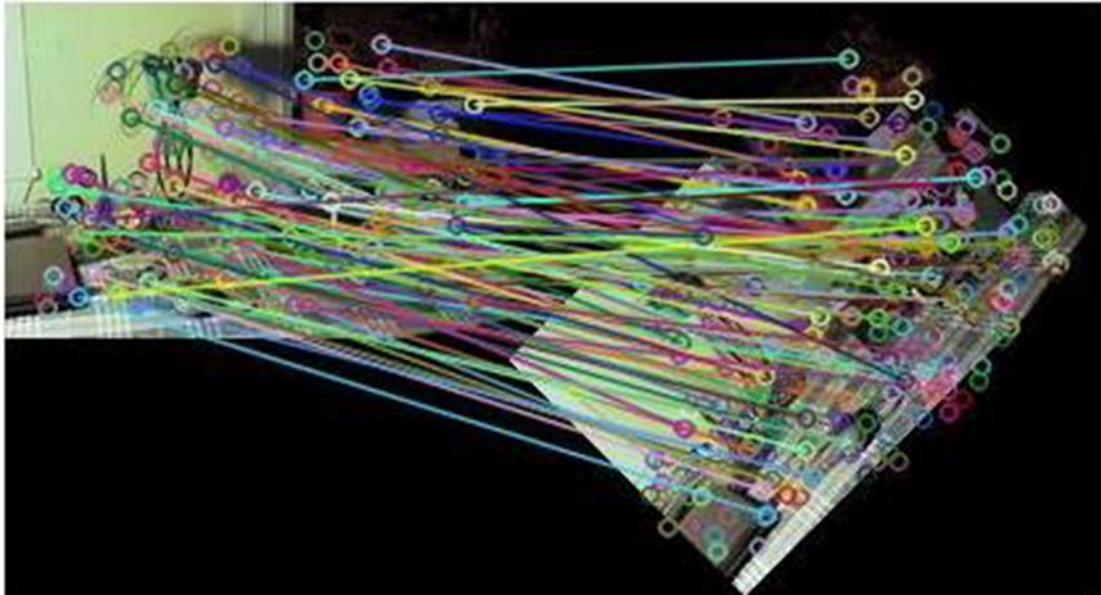


图 1 SURF 匹配结果

可以发现 SURF 和 ORB 算法用时较少，而且提取出的特征点数量较多，但是匹配率较 SIFT 差。SIFT 算法提取的特征点数量较少，匹配率较高，但耗时远远多于 ORB 和 SURF。而本项目处理的是多层影像，涉及的特征点数量巨大，对运算速度要求较高，且需要特征点具有较高的正确性和稳定性。综合实验结果和项目需求，本项目最终采用 SURF 作为特征点提取算法。

## (二) 平差优化

经特征点匹配后，我们可以直接使用两张影像间的匹配特征点对计算两者直接的相对姿态，遍历所有的匹配影像对并且通过不断的传递相对姿态，最后可以得到所有影像在同一坐标基准下的位置和姿态，即摄影测量中常见的影像的六个外部定向参数。但是由此得到的影像的位置和姿态只是两两影像对间局部最优的，而非所有影像间全局最优的。倘若直接使用这些初始的位置和姿态参数进行后续的投影和融合，那么由此得到的全景影像难以达到预期

视觉效果，图像整体的位置关系会出现明显的错位。

为了解决上述问题，平差优化的操作是不可或缺的。所谓平差优化，是指将每张影像在基准坐标下的位置和姿态参数作为待求参数，以匹配点对间的重投影误差的大小作为衡量指标，使用最小二乘求解器进行解算，经迭代优化后便可以得到全局最优的位置和姿态参数。

本项目实施的过程中，经指导老师推荐，我们使用 Google 公司开发的 Ceres Solver 作为实现平差优化的主要工具。这主要在于 Ceres 相对于其他第三方库具有以下三点优势：

1. 易用性。Ceres 求解不同非线性最小二乘问题具有一致性，即用户只需要提供残差的计算函数，并将观测数据以自定义的方式依次输入以构建最小二乘问题，而不需要关心具体的求解过程，最后调用统一的 API 接口即可完成问题的求解。
2. 高效性。Ceres 的代码采用 C++ 模板进行优化，使用了其它如 SuiteSparse 等专业的矩阵运算库，并利用 OpenMP 并行计算雅克比矩阵，大大提高了求解的速度。
3. 可靠性。Ceres 已使用于 Google 公司的开发的产品中超过四年，故其求解非线性最小二乘问题的可靠性有充分的保障。

表 3 Ceres 平差优化效果

迭代次数	残差平方和	残差平方和的减小值
0	629218.7	0
1	1437.5	627781.2
2	1290.1	147.4
3	824.0	466.1
4	709.1	114.9
5	700.4	8.7
6	693.1	7.3
7	688.9	4.2
8	688.7	0.2

上表展示的是使用 Ceres 进行单层影像整体平差的结果，可以明显的看到：

1) 影像间匹配点对的重投影误差的平方和随着迭代次数的增加而显著的减小；2) 随着迭代次数的增多，残差减小的量级逐渐降低，最终趋于稳定。这也表明，平差优化迭代的过程结束后，我们最终得到了各幅影像在全局最优的位置和姿态参数。

### (三) 多层拼接

本项目最核心的创新在于：我们处理的待拼接影像是无人机在垂直方向上具有一定重叠

度的多个高度上水平环视拍摄的，即多层影像。相对于常规的全景拼接，多层影像全景拼接具有其特殊性，主要存在一下一些问题：

1. 影像数量多。相比于传统全景拼接技术处理的定点环视拍摄的影像而言，多层全景拼接处理的影像数目是传统全景拼接的 3 至 5 倍，在采用相同算法的情况下，多层全景拼接对运行时间的需求以及对计算机内存的要求要高得多。直接使用现有技术进行大批量多层影像拼接的效率并不高，因而需要进行关键算法的优化。

2. 数学模型改变。常规的全景影像拼接所处理的影像序列一般由定点旋转相机拍摄的方式获取，具备近似投影中心，因而影像之间符合单应性矩阵约束，即符合纯旋转模型。根据这一特殊性，可以较为方便的由影像间的匹配点对计算出相机的相对姿态，此时的相对位置关系只有三个自由度。而垂直多层全景影像拼接所处理的影像序列在竖直方向上存在位移，即相对位置关系需要使用六个自由度进行描述，此时不再符合旋转模型，因而计算相对位置关系的算法需要进行调整。

3. 投影输出模型改变。全景投影输出不再符合球面投影模型。

针对以上所述的技术问题，项目组成员经过持续一段时间的理论学习、数次的组会讨论以及多次的编程实验，最终制定了如下的解决方法：

1. 层内影像仍然采用单应矩阵约束计算相机姿态，最大化的使用现有的拼接技术。

2. 层间影像的相对平移关系只使用一个平移向量进行描述，而相对姿态关系使用重叠度最大的两张影像作为媒介进行传递和统一。具体估计旋转矩阵和平移向量的方法为，根据层间影像间的特征点匹配数量，找出重叠度最大的两张影像作为基准影像，并计算两者间的本质矩阵。根据多视几何的原理，分解该本质矩阵，我们可以得到若干可能的候选解。根据物点纵深方向的坐标必定大于零的条件，我们可以对候选解进行筛选，最终可得到两张基准影像间的平移向量以及旋转矩阵。其中关键的原理如下进行阐释：

本质矩阵：本质矩阵是归一化图像坐标系下的基本矩阵的特殊形式，一般用  $E$  表示，对于归一化图像坐标系下的同名像点，存在本质矩阵  $E$  使得如下关系成立：

$$\hat{x}^T E \hat{x} = 0 \quad (1)$$

其中  $K$  矩阵为摄像机的内参数矩阵  $\hat{x}'$  表示左影像中，同名点在归一化坐标系下的坐标， $\hat{x}$  表示右影像同名点在归一化坐标系下的坐标。

通过解求姿态不同的两个相机所拍摄的影像之间的本质矩阵，并利用奇异值分解的方法对所得的本质矩阵进行分解，可以解求出两相机之间的相对旋转矩阵  $R$  和平移量  $t$ 。实际

计算中采用两张竖直方向上的重叠度最大的相片进行匹配，并计算其本质矩阵，通过对其分解得到平移矢量，作为两层之间所有影像的平移矢量。

3. 将原有的球面投影改为带有竖直位移的柱面投影。

考虑到多层拼接影像序列的特殊性，我们将各层影像间的全景拼接看成是将多个同轴柱面的拼接，不同柱面间存在竖直位移关系以及水平旋转关系。

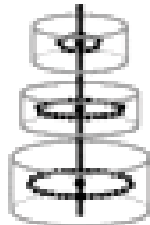


图 2 同轴柱面全景图

若获取影像时相机焦距的变化量可以忽略不计，那么每层影像的柱面半径是近似相等的，此时只需考虑各层影像间的相对平移关系和旋转关系，因而柱面投影是最适合多层全景影像输出的投影方式。在完成影像配准后，采用逆向投影的方式即可将所有待拼接影像逐像素的投影至坐标基准统一的圆柱面之上，最终获得所需的多层全景影像。

四、 实施成果

(一) 拼接材料及结果

我们使用多旋翼无人机获取了武汉大学信息学部南门广场垂直方向的多层影像，共包含 3 层，且每层水平共旋转拍摄 6 张影像，作为实验的测试材料。每张影像在拍摄时姿态都接近正视，即不存在大倾角拍摄的情况。具体获取的影像序列如下图所示：



图 3 无人机拍摄的多层影像

我们首先输入其中的两层影像，使用本项目编写的全景拼接软件进行处理，软件能较快的完成整个拼接流程，具体输出的全景影像如下图所示。





图 4 两层影像全景拼接效果

接着我们输入全部三层图像进行拼接实验，效果如下图所示。



图 5 三层影像全景拼接效果

## (二) 结果分析

采用本项目最终编写的垂直多层全景拼接软件按设计方案对上述采集的多层影像进行全景拼接，分别输入两层及三层影像进行测试，拼接结果如图 4、图 5 所示。实验结果表明，程序已经可以实现多层影像的全景拼接，输出的全景影像质量较优，整体的拼接准确性较高，达到了此次科研项目的基本目标和要求。但仍存在以下一些问题：

1. 本项目编程实现全景输出采用柱面投影模型，而实际相机的物理成像面为平面，故原始影像上的水平方向的直线经投影后，在柱面上会产生形变，且越远离投影中线形变越大。故图 4 及图 5 拼接所得的全景影像中建筑的边线等本应为直线的物体在全景影像中呈现为向内部弯曲的曲线。但是该形变由投影模型固有的性质造成，暂时无法消除。

2. 目前我们仅在不同层影像间估计一组相对姿态  $R$ 、 $t$ ，尽管按此方案进行全景拼接仍然可以输出较为理想的全景影像，但是不同层影像间没有进行整体平差，因而影像序列整体的空间位置和姿态并不是全局最优的。随着拼接层数的增多，不同层之间累计的误差会逐渐增大，最终会影响输出的全景影像的质量。

3. 本项目尚未实现基于全景影像的立体量测，而该技术的关键在于不同层影像之间位移向量的获取，即获取摄影基线。本项目当前基于层间影像间的本质矩阵已经估计得到了层间的  $t$  向量，但是我们假定同一层影像间的相对位移可以忽略不计，因而同一层的影像共用一个  $t$  向量，因而全景量测不能达到较高的精度。

### (三) 软件成果

软件基于 C++ 开发，运行在 windows 环境下，采用 QT Designer 设计界面、VS 2013 编写内部交互逻辑，初始界面如下所示：

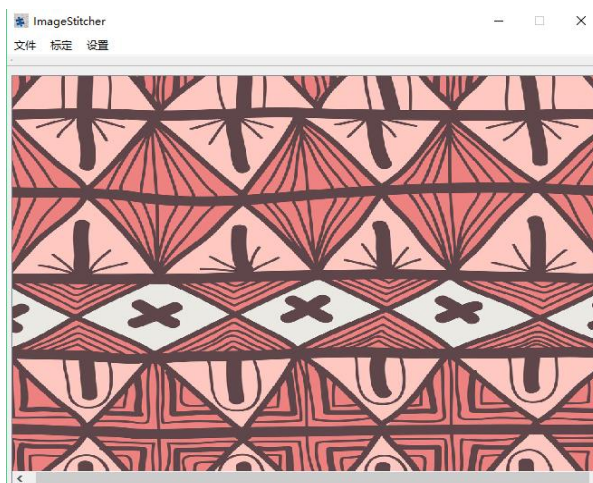


图 6 软件初始界面

以下图 7 和图 8，分别对应软件在运行过程中计算进度以及计算完成后的软件内部的效果预览截图：

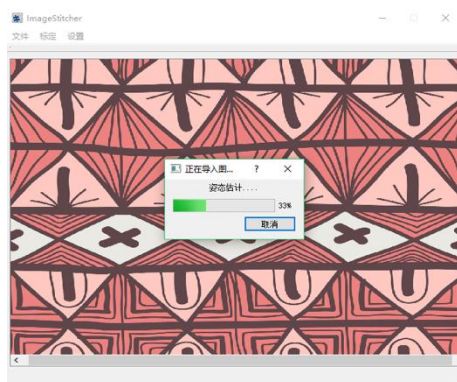


图 7 软件运行过程

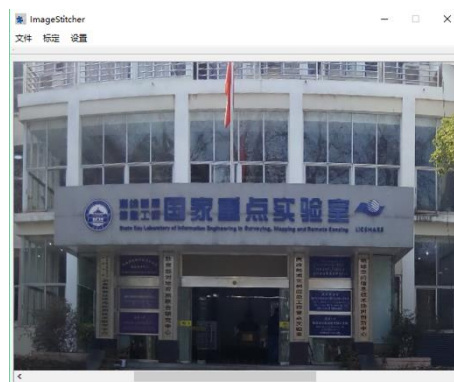


图 8 软件拼接效果预览

## 五、 心得体会

大学生科研是一个提高大学生综合能力的经历和机会，从科研选题、申请、实施一直到最后的成果展示，每一步都需要付出许多的努力。在参与多旋翼垂直多层全景拼接的科研训练项目的过程中，我们从科学研究、团队配合写作、文案制作和项目组织管理等方面切实地提高了自己的综合能力。总的来说，参与这次国家级大学生创新实践项目，不仅丰富了自己

的科学研究经验，锻炼了综合的素质，更让我们收获了知识技能，并收获了充实而美好的回忆和真挚的友谊。

在项目实施的过程中，每个人都有各自的主要分工，包括算法研究、系统研发、文案制作和项目管理等等，不同的工作都有着不同的心得体会。

对于算法研究，我们在项目过程中发现了之前所学知识的欠缺，但是也在学习过程中了解了一些时兴的，前沿的理论和算法，拓宽了眼界。学习过程中阅读了大量关于图像拼接算法的文献，也掌握了一些查阅筛选文献的方法。同时也在项目实施的过程中认识到了理论和实践之间的差距，从理论到实践并没有之前想象中的那么简单自然，从算法的理论到具体到程序中实现对组员的数学、外语阅读、代码水平都有较高的要求，只有通过实践中不断的摸索和反复尝试才能够真正的深入理解一个理论并运用到具体的产品中，在以后的学习生活中也应该更多的注重实践与理论相结合，减少纸上谈兵的情况。

对于系统研发，首先要根据开发需求及特点，查阅现有的相关文献及资料，明确具体的编程语言、开发框架及系统环境，在这次项目中我们选用 C++ 编码，QT+VS 2013 联合开发，在算法依赖库选用成熟主流的 OpenCV；其次，对系统的具体功能模块、数据流读取、界面展现、模块间通信、文件结构进行讨论及设计，结合底层算法模块将软件的核心功能编码实现并调通，完成一个初始版本；紧接着，选用多组具体图片进行测试，查找编码潜藏的 bug 并不断优化代码效率，完善整个代码的架构方式；最后，在整个小组展示软件功能并共同多次讨论优缺点及改进意见，反复迭代开发，不断改进软件的交互方式。在软件开发的流程中，一方面要熟悉 OpenCV 内置的数据结构及 API，另一方面要熟练掌握 QT 自身包含的函数及界面设计方式，并完整的将两块结合在一起，这让我们在软件设计及拼接算法上均有一定的收获。整个软件开发经历了较长的周期，团队的合作带来了不同的思想碰撞和优势互补，但也使得组内的交流讨论及分工协作成为此次项目的关键。一个软件产品从设计到顺利完成，既需要每个组员做到认真投入，也需要整个团队的凝聚力和良好的协作组织，两者是缺一不可的。

对于文案制作，除了最基本的细心和耐心，更需要在对项目有深刻理解的基础上恰当地体现和展示项目的过程和结果，做到逻辑上连贯，思路统一，表达上流畅。在文案制作的工作中，不仅要通过查阅资料来学习专业的表达方式、逻辑结构，从而能更好地将项目的核心内容、技术细节和进展状态合理并详尽地表达成文字、图表；更要掌握不同文案的排版格式要求，合理结合文字和图表，制作成美观并满足要求的文案成果。在文案制作的工作过程中，表达能力和办公软件的使用能力都得到了极大的锻炼和提升，这对将来进行编辑出版和

论文写作等有极大的帮助。

对于项目管理，在有着明确分工、各司其职的基础上，团队协作尤为重要。团队协作和成员间密切配合是项目实施各部分协调进行的根本保障。在整个项目进行过程中，从研究目标的确定、技术方案的确定、项目申请到技术细节的设计与实现、技术困难的解决等，都需要团队成员的密切配合，并提出不同的想法和观点进行交流，这样才能互相取长补短、发挥团队的力量。团队的沟通与交流非常重要。项目初期有一些交流问题，造成了一定程度上的延误，但是随后还是顺利解决掉了，这也让我们深刻地体会到了沟通交流的重要性，一个大型的项目需要成员同心协力，有效的交流与沟通可以减少无用功，提高团队效率。在本次项目的进行过程中，对项目团队的团队协作有着极大的锻炼，大家逐渐懂得如何进行表达个人想法，如何在技术细节上和项目组其他成员沟通、协同前进，如何与其他成员的成果进行有机整合等，团队协作配合能力得到了很大的提升，这也使得团队更加默契、工作效率有所提升。

此外，在整个项目的进行过程中，认真负责的态度非常重要。团队中每一名成员都需要很认真地完成自己的部分任务，不管任务的难易如何，必须要保质保量，因为项目是一个整体，一旦一个环节出现问题，就会影响到其他同学的进程。因此，只有每个人都认真负责的做好自己所负责的事情，工作的效率才会有所保证，项目的成果才能保证质量。

总的来说，通过本次创新实践项目，我们在不同的方面都得到了锻炼，更体会到了团队协作、认真负责态度的重要性。与此同时，在通过团队协作去完成一个有一个阶段的任务和工作、取得一个又一个令人满意的阶段成果和目标的过程中，项目团队中每个人都收获了体验与成长，更收获了一段难忘的经历和深厚而真挚的友谊。