



# 《数字摄影测量学》 课间实习报告

学 院: 遥感信息工程学院

班 级: 20F10

学 号: 2020302131201

姓 名: 常耀文

指导教师: 曹辉

2022 年 10 月 22 日

## 目录

1.	实习概述.....	3
1.1	特征点提取算法概述.....	3
1.1.1	点特征与特征算子.....	3
1.1.2	本次实习采用的算子.....	3
1.2	影像匹配方法概述.....	8
1.2.1	基于相关系数的影像匹配方法.....	8
1.2.2	基于最小二乘法的影像匹配方法.....	9
1.2.3	基于 sift 的影像匹配方法.....	9
1.3	实习目的.....	9
1.4	实习所使用的编程语言与头文件使用.....	9
1.3.1	编程语言.....	9
1.3.1	使用的头文件.....	9
1.5	编程 IDE.....	10
1.6	实习数据.....	10
2.	程序设计与编程实现.....	11
2.1	思路流程.....	11
2.2	思维流程设计.....	11
2.3	编程实现.....	12
2.3.1	Moravec 算子程序设计.....	12
2.3.2	Fronstner 算子程序设计.....	13
2.3.2	基于相关系数的影像匹配程序设计.....	14
3.	实验分析.....	15
3.1	Moravec 算子提取窗口分析与阈值分析.....	15
3.1.1	不同兴趣窗口对于提取点数的影响.....	15
3.1.1	不同提取阈值对于结果的影响.....	16
3.2	Forstner 算子提取窗口分析与阈值分析.....	18
3.2.1	不同兴趣窗口对于提取点数的影响.....	18
3.2.2	不同抑制窗口对于结果的影响.....	19
3.3	特征点提取分析总结.....	20
3.4	随机分布与均匀分布实验分析.....	20
3.5	相关系数法匹配分析.....	20
3.5.1	阈值分析.....	20
3.5.2	窗口大小分析.....	20
3.5.3	搜索范围分析.....	21
4.	结果展示.....	21
4.5.1	Moravec 灰度阈值分析结果.....	21
4.5.2	Moravec 提取兴趣窗口大小分析结果.....	23
4.5.3	Forstner 兴趣窗口大小分析结果.....	24
4.5.4	灰度阈值相关系数匹配分析结果.....	25
4.5.4	窗口大小相关系数匹配分析结果.....	25
4.5.4	搜索范围对相关系数匹配分析结果.....	26

5.	实习心得.....	26
----	-----------	----

## 1. 实习概述

### 1.1 特征点提取算法概述

在进行本次数字摄影测量实习之前，需要理解关于摄影测量的相关概念，明确何为点特征与各种点特征算子的详细概念。

#### 1.1.1 点特征与特征算子

**点特征**主要是指明显点，如角点，圆点等。具体是指在影像曲面上具有特殊性质的点或者亮度特别明显的小区域，边缘的交点及区域或轮廓的角点。一般角点的类型如下：

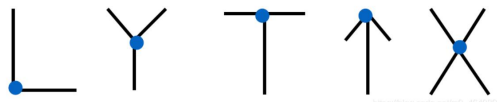


Fig1.角点类型

提取点特征的算子称为**兴趣算子**或**有利算子**，即用某种算法从影像中提取我们所感兴趣的即有利于某种目的的点。现在已提出了一系列算法各异，具有不同算子的兴趣算子，比较知名的有 **Moravec 算子**与 **Forstner 算子**等。

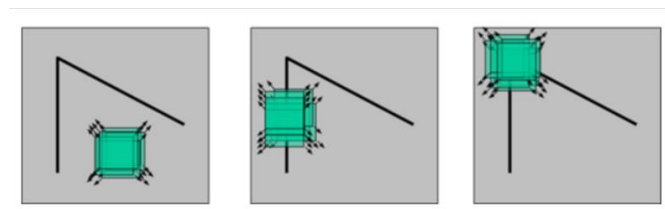


Fig2.点特征检测

#### 1.1.2 本次实习采用的算子

本次实习是以曹老师的数字摄影测量课程实习作业为基本作业，依托于《摄影测量学》（张剑清，潘励编著）的教材进行实习，所以依据教材使用的方法，采用了 **Moravec 算子**，**Forstner 算子**进行特征点提取。

### 1.1.2.1 Moravec 算子

#### 1.1.2.1.1 算法原理

**Moravec 算子**计算待处理图像每一个像素四个主要方向(水平、垂直、两对角线,即 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ )上的灰度方差,并选择灰度方差符合最大-最小条件的像素点作为待处理图像的特征点。

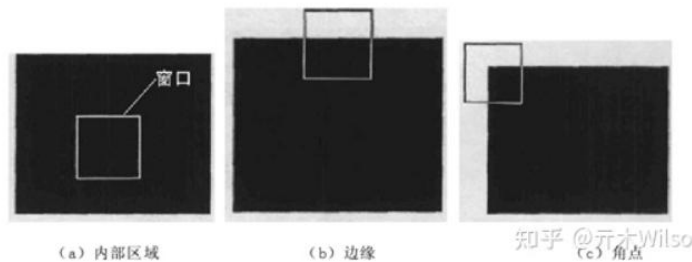


Fig3.角点检测原理

首先以像素四个主要方向上的最小灰度方差表示该像素与邻近像素的灰度变化情况,即像素的兴趣值;然后在图像的局部选择具有最大兴趣值的点作为特征点,即灰度变化明显的点。通过图,我们可以看出在平移小窗口时会出现三种情况:

- (1) 在内部区域,沿各个方向平移灰度变化量都很小;
- (2) 在边缘处,垂直边缘平移灰度变化较大,平行边缘平移灰度变化量较小;
- (3) 在角点处,沿各个方向平移灰度变化量都很大。

另外,需要注意对由噪声产生的孤立的像素点,窗口沿各个方向平移也会产生较大的变化,因此,Moravec 算子对噪声比较敏感。Moravec 角点检测算子可以简单描述为:在角点的某个邻域内,灰度的变化在任意一条通过该点的直线上都很大。对每一个待检测的像素点取窗口,从各个方向来计算这个像素的非正则化自相关值,并且选择最小值作为这个像素点的角点响应函数。

#### 1.1.2.1.2 算法步骤

**Moravec 算子**是基于灰度方差提取点特征的算子,步骤如下:

- (1) 计算图像中各像素的兴趣值 IV (Interest Value)。在以像素  $(c, r)$  为中心的  $W \times W$  的影像窗口中(如  $5 \times 5$  的窗口),计算下列式子公式所展示的四个方向相邻像素灰度差的平方和:

$$V_1 = \sum_{i=-k}^{k-1} (g_{x+i,y} - g_{x+i+1,y})^2$$

$$V_2 = \sum_{i=-k}^{k-1} (g_{x+i,y+i} - g_{x+i+1,y+i+1})^2$$

$$V_3 = \sum_{i=-k}^{k-1} (g_{x,y+i} - g_{x,y+i+1})^2$$

$$V_4 = \sum_{i=-k}^{k-1} (g_{x+i,y-i} - g_{x+i+1,y-i-1})^2$$

其中  $k=\text{INT}(w/2)$ 。取其中最小者作为该像素  $(c, r)$  的兴趣值：

$$IV_{c,r} = \min\{V_1, V_2, V_3, V_4\}$$

- (2) 给定一经验阈值，将兴趣值大于该阈值的点（即兴趣值计算窗口的中心点）作为候选点，阈值的选择应以候选点中包括所需要的特征点而又不含过多的非特征点为原则。
- (3) 选取候选点中的极值点作为特征点。在一定大小的窗口内（可不同于兴趣值计算窗口，例如  $5 \times 5$  像元， $7 \times 7$  像元， $9 \times 9$  像元），将候选点中兴趣值不是最大者均去掉，仅留下一个兴趣值最大者，该像素即为一个特征点（抑制非局部最大）。
- (4) 综上所述，Moravec 算子是在四个主要方向上，选择具有最大-最小灰度方差的点作为特征点。

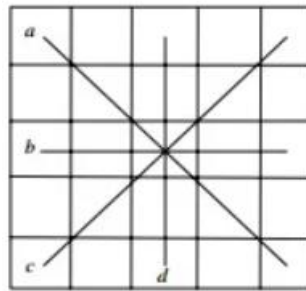


Fig4.Moravec 算子

### 1.1.2.2 Forstner 算子

#### 1.1.2.2.1 算法原理

**Forstner 算子**，其特点是速度快、精度较高。其基本思想是：对于角点,对最佳窗口内通过每个像元的边缘直线(垂直于梯度方向)进行加权中心化，得到角点的定位坐标；对于圆状点，对最佳窗口内通过每个像元的梯度 直线进行加权中心化，得到圆心的坐标。

#### 1.1.2.2.2 算法步骤

**Forstner 算子**通过计算各像素的 Robert 梯度和像素  $(c, r)$  为中心的一个窗口（如  $5 \times 5$ ）的灰度协方差矩阵，在影像中寻找具有尽可能小而接近于圆的误差椭圆的点作为特征点。其步骤为：

- (1) 计算各像素的 Robert 梯度如下图

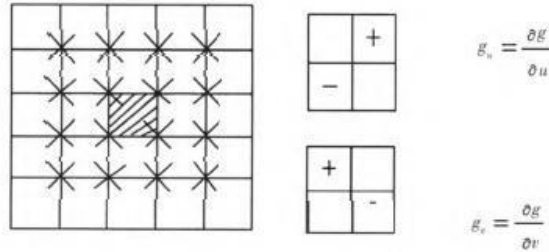


Fig5.Forstner 算子

$$\begin{cases} g_u = \frac{\partial g}{\partial u} = g_{i+1,j+1} - g_{i,j} \\ g_v = \frac{\partial g}{\partial v} = g_{i,j+1} - g_{i+1,j} \end{cases}$$

Fig6.Robert 梯度

- (2) 计算  $1 \times 1$  (如  $5 \times 5$  或者更大) 窗口的灰度协方差矩阵。

$$Q = N^{-1} = \begin{bmatrix} \sum g_u^2 & \sum g_u g_v \\ \sum g_v g_u & \sum g_v^2 \end{bmatrix}^{-1}$$

Fig7.协方差矩阵

其中:

$$\begin{aligned} \sum g_u^2 &= \sum_{i=c-k}^{c+k-1} \sum_{j=r-k}^{r+k-1} (g_{i+1,j+1} - g_{i,j})^2, \\ \sum g_v^2 &= \sum_{i=c-k}^{c+k-1} \sum_{j=r-k}^{r+k-1} (g_{i,j+1} - g_{i+1,j})^2, \\ \sum g_u g_v &= \sum_{i=c-k}^{c+k-1} \sum_{j=r-k}^{r+k-1} (g_{i+1,j+1} - g_{i,j})(g_{i,j+1} - g_{i+1,j}) \end{aligned}$$

Fig8.协方差元素值

- (3) 计算兴趣值  $q$  与  $w$

$$w = \frac{1}{\text{tr}Q} = \frac{\text{Det}N}{\text{tr}N}$$

$$q = \frac{4\text{Det}N}{(\text{tr}N)^2}$$

Fig9.兴趣值  $w$  与  $q$

其中  $\text{Det}N$  代表矩阵  $N$  的行列式;  $\text{tr}N$  代表矩阵  $N$  的迹。

可证明,  $q$  即像素  $(c, r)$  对应误差椭圆的圆度:

$$q = 1 - \frac{(a^2 - b^2)^2}{(a^2 + b^2)^2}$$

Fig10.误差椭圆的圆度

其中  $a, b$  为椭圆的长, 短半轴。如果  $a, b$  中任意一个为 0, 则  $q=0$ , 表明该点可能位于边缘上; 如果  $a=b$ , 则  $q=1$ ; 表明为 1 个圆。W 为该像元的权。

- (4) 确定待选点

如果兴趣值大于给定的阈值, 则该像元为待选点。阈值为经验值, 可以参考以下的值:



$$\begin{cases} T_q = 0.5 \sim 0.75 \\ T_w = \begin{cases} f\bar{w} \\ cw_c (c = 5) \end{cases} (f = 0.5 \sim 1.5) \end{cases}$$

Fig11.阈值选取

w 为权的平均值；W 为权的中值。当  $q > t$ ，且  $W > T_w$  时，该像元为待选点。

- (5) 以权值 W 为依据选择极值点，即在一个适当窗口中选择 W 最大的待选点，而去掉其余的点。

### 1.1.2.2.3 算法实现

还有简单的算法实现 Forstner 算子，本次实习简化与标准的 Forstner 算子都实现了相关的功能

### 1.1.2.3 Harris 算子

#### 1.1.2.3.1 算法原理

##### (1)灰度梯度近似

相比于 Moravec 算子固定方向上的梯度感知，Harris 算子在数学上对灰度变化进行了更为精确的逼近，与 Moravec 算子中灰度变化不同的是通过合理的选择 (u, v) 可以对任何方向的灰度变化进行测度。

##### (2)高斯权重

相较于 Moravec 的方形窗口，Harris 通过采用二维高斯分布的权重，使得形成了一个圆形窗口。离中心越近的像素权重越大，而离中心越远，权重越小。一个二维高斯分布的示意图如下所示。

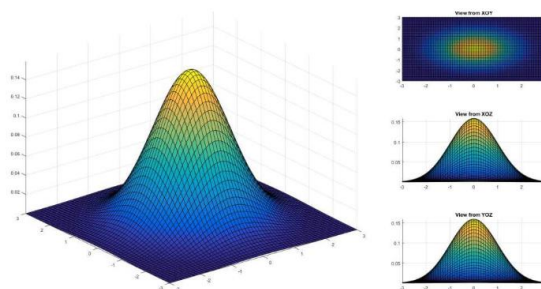


Fig12.二维高斯分布

##### (3)改进的角点测度函数

为了减轻 Moravec 算子中对边缘的强响应，Harris 提出了一个全新的角点测度方法。通过将灰度变化写成矩阵形式进而从矩阵运算角度提出了方案。由于 M 是对称阵，所以主对角线元素即为特征值，通过比较两个特征值之间的关系对角点进行判断。

### 1.1.2.3.2 算法步骤

- (1) 首先确定一个  $n \times n$  大小的影像窗口，对窗口内的每一个像素点进行一阶差分运算，求得在  $x, y$  方向的梯度  $g_x, g_y$
- (2) 对梯度值进行高斯滤波，高斯卷积模板的标准差取  $0.3 \sim 0.9$ ;
- (3) 根据公式，计算强度值  $M$
- (4) 选取局部极值点，在窗口内选择最大值。局部极值点的数目往往很多，也可以根据特征点数提取的数目要求，对所有的极值点进行排序，根据要选取的兴趣点最大的若干个点作为最后的结果。

## 1.2 影像匹配方法概述

本次实习的影像匹配部分实现了基于相关系数的影像匹配方法和基于最小二乘法的影像匹配方法以及用 python 实现 sift 算法（C++ 的 sift 算法实现太过复杂，因此没有利用 C++ 实现 sift）。

### 1.2.1 基于相关系数的影像匹配方法

#### 1.2.1.1 算法原理

利用与目标窗口大小相等的搜索窗口在搜索影像的搜索区域内连续滑动，并计算目标窗口与搜索窗口的相关系数，相关系数最大的窗口所对应的中心像素点即为与目标窗口相匹配的同名点。

#### 1.2.1.2 算法步骤

相关系数算法就是以相关系数作为匹配测度，判断左右两张影像中一定大小的像素窗口间的相似性。选取相关系数最大且大于设定阈值的一对像素窗口的中心像素作为提取的同名点。 $g(x, y)$  与  $g'(x', y')$  的相关系数定义为：

$$\rho(p, q) = \frac{C(p, q)}{\sqrt{C_{gg} C_{g'g'}(p, q)}}$$

Fig13.相关系数定义

$$\rho(c, r) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j} \cdot g'_{i+r, j+c} - \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'_{i+r, j+c}}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}^2 - \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j} \right)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i+r, j+c}^2 - \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'_{i+r, j+c} \right)^2 \right]}}$$

Fig14.相关系数简化算法



## 1.2.2 基于最小二乘法的影像匹配方法

### 1.2.1.1 算法原理

生成一个理想的小块边缘模板；将该模板与测量图像进行匹配，精确提取特征的边缘位置

### 1.2.1.2 算法步骤

- (1) 给定模板灰度  $f(x,y)$ ，对应点为  $f(x_f, y_f)$ ；
- (2) 测量图像的匹配窗口灰度  $g(x,y)$ ，对应点为  $g(x_f, y_f)$
- (3) 模板与测量图像存在仿射变换：
- (4) 匹配的目的是：解算出变换参数，结合 边缘点在给定模板上的精确坐标，可以得到边缘点的精确位置。
- (5) 最小二乘是一个迭代过程，第一步的粗提取结果作为变换参数的迭代初值，代入矩阵方程求变形参数；
- (6) 利用改正后的参数对测量图像重采样，计算模板与匹配子图的相关系数。若大于预定阈值，迭代结束。

## 1.2.3 基于 sift 的影像匹配方法

Sift 是当下比较热门的算子，因为篇幅限制，这里对于 sift 算子的原理与算法步骤就不过多赘述了。

## 1.3 实习目的

编写特征点提取算法与影像匹配的程序，藉此检测学生对于所学知识的了解程度，同时与实践动手的过程中锻炼代码能力，提升编程技能，为了后续的科研发展奠定基础。

## 1.4 实习所使用的编程语言与头文件使用

### 1.3.1 编程语言

由于本次实习要求使用 C 或 C++ 编程语言进行实现相关的代码的内容，因此采用的主要编程语言是 C 与 C++，混合 python 编程。

### 1.3.1 使用的头文件

编程使用了包含 opencv 库的头文件以及正常 C++ 中常见的头文件，如 iostream 等头文

件的使用。

```
#include<stdlib.h>
#include<opencv2/core.hpp>
#include<opencv2/imgcodecs.hpp>
#include<opencv2/highgui/highgui.hpp>
#include<opencv2/imgproc/imgproc.hpp>
#include<iostream>
#include<Windows.h>
#include<time.h>
#include <algorithm>
using namespace std;
using namespace cv;
```

Fig15.程序使用的头文件

## 1.5 编程 IDE

为了实现编程任务，本次实习采用的编译器是 Microsoft Visual Studio 2022，Microsoft Visual Studio（简称 VS）是美国微软公司的开发工具包系列产品。VS 是一个基本完整的开发工具集，它包括了整个软件生命周期所需要的大部分工具，如 UML 工具、代码管控工具、集成开发环境(IDE)等等。所写的目标代码适用于微软支持的所有平台，包括 Microsoft Windows、Windows Mobile、Windows CE、.NET Framework、.NET Compact Framework 和 Microsoft Silverlight 及 Windows Phone。



Fig16.Microsoft Visual Studio 2022

## 1.6 实习数据

本次实习所采用的数据是一张运动场的左右全色影像，有 bmp 格式与 raw 格式，本次实习主要使用 bmp 格式的数据



u0367\_panRight.tif/bmp

Fig17.右图



u0369\_panLeft.tif/bmp

Fig18.左图

## 2. 程序设计与编程实现

### 2.1 思路流程

本次实习的总体流程是通过以下的方法来实现的，先利用已有的特征点提取算子，如Moravec, Frongstner 提取影像的特征点，然后利用提取到的左右特征点影像进行匹配，最终获取最后的结果，本次实验的流程图设置如下：

### 2.2 思维流程设计

通过对于本次数字摄影测量实习的研究与分析，可以设计出以下的程序设计流程框图：

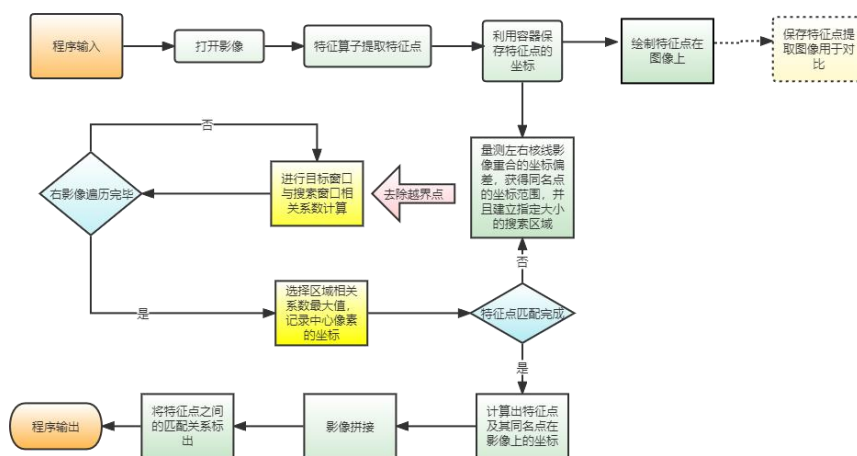


Fig19.程序设计流程图

## 2.3 编程实现

由于本次实习使用了 C++ 等相关语言，本次实习采用了类的设计方式，将本次实习的模块分为 IPoint 类，matchPoint 类与类，，并设计了相应的 UML 图，本次程序设计的 UML 图如下：

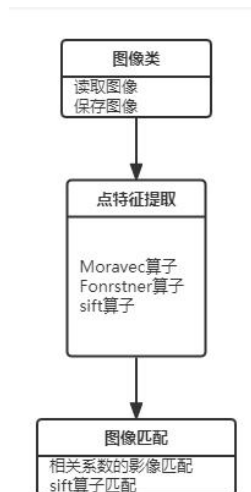


Fig20.程序设计 UML 图

### 2.3.1 Moravec 算子程序设计

本算法通过 Moravec(string Imgpath, int winSize, int threshold, int restrainWinSize, vector<IPoint>& featurePt)函数实现，其中参数为：需要提取特征点的图像路径，winsize：兴趣窗口大小，restrainWinSize：抑制窗口大小，vector<IPoint>&eaturePt：存储所提取的特征点。

Moravec 算子是利用灰度方差来提取点特征的算法，提取均匀的特征点，顾名思义，就是将随机分布的提取算法中阈值设置为 0，抑制窗口设置为较大的数字，以达到将图像分割为许许多多的规则小图像，然后在小图像中选取一个特征点。但是，如果仅仅是修改上述代码参数，阈值设置为 0，算法会做大量的无用计算，大大延长计算时间，因此我设计一种新的思路来应对特征点的均匀提取：

- 1.将图像按照抑制窗口的大小分块，逐个遍历每个小图像；
- 2.在该小图像内逐像素遍历，以该像素为中心建立兴趣窗口，根据公式计算每个像素四个方向相邻像素灰度差的平方和；
- 3.选取四个方向相邻像素灰度差的平方和中的最小值作为本像素的兴趣值；
- 4.筛选该小图像中兴趣值最大的点，作为本小图像的特征点；
- 5.对每个小图像重复 2-4 操作。

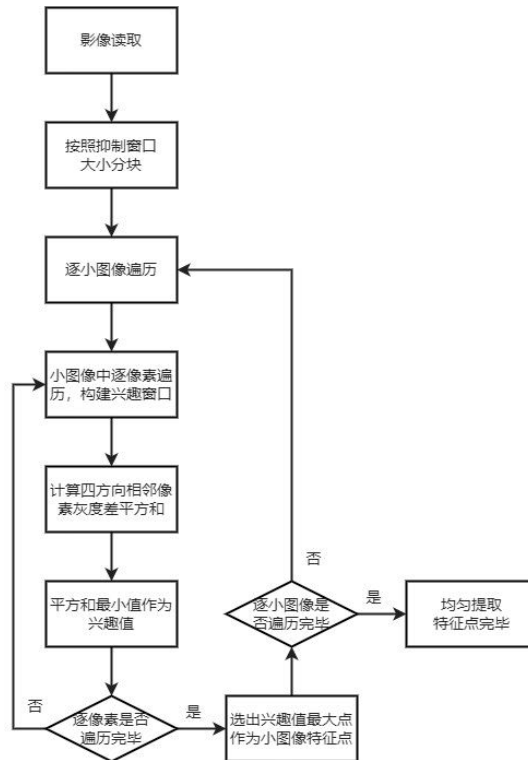


Fig21.Moravec 算子程序流程

## 2.3.2 Frongstner 算子程序设计

本算法通过函数 `Mat Forstner(InputArray image, vector<IPoint>& keypoints, int ksize, int threshold, double Tq, int restrainWinsize)` //输入图像, 关键点列, 窗口大小, 阈值大小, 用于选择初选点, `ksize` 是我的窗口大小, 简化算子里窗口大小使用为 3, `restrainWinsize` 为抑制窗口的大小 Forstner 算子通过计算各像素的 Robert 梯度和像素  $(c,r)$  为中心的一个窗口的灰度协方差矩阵, 在影像中寻找具有尽可能小而接近圆的误差椭圆的点作为特征点。其具体实现思路如下:

1. 遍历影像中的每个像素, 构建兴趣窗口, 计算该窗口中灰度的协方差矩阵;
2. 根据灰度协方差矩阵计算兴趣值  $q$  与  $w$ ;
3. 计算兴趣值阈值。经过实验, 如果使用课本给的参考公式计算, 则所得阈值偏小, 导致获得无效待选点太多, 大大增加计算量, 所以我在本处视阈值为经验值处理, 多次实验获取最佳阈值;
4. 通过兴趣值阈值筛选出候选点;
5. 抑制局部非最大: 遍历每个候选点, 以该候选点为中心建立抑制窗口, 搜索在本抑制窗口中的点在函数内加入判断矩阵, 若点  $b$  在以点  $a$  为中心, `restrainWinsize` 大小的抑制窗口中, 则存取抑制矩阵的值为 1), 以权值  $w$  为依据, 比较其兴趣值大小, 筛选出兴趣值最大的点作为兴趣点, 其他点都去掉。根据实验经验, 抑制窗口大小应大于兴趣值计算窗口;
6. 剔除重复点: 由于抑制局部非最大时, 一个兴趣点可能同时出现在多个抑制窗口中, 这就造成兴趣点的重复记录, 故本步需要剔除重复点, 同样通过标志判断该兴趣点是否在之前的操作中保存, 若标志数组为 1 则保存过, 为 0, 则未保存;



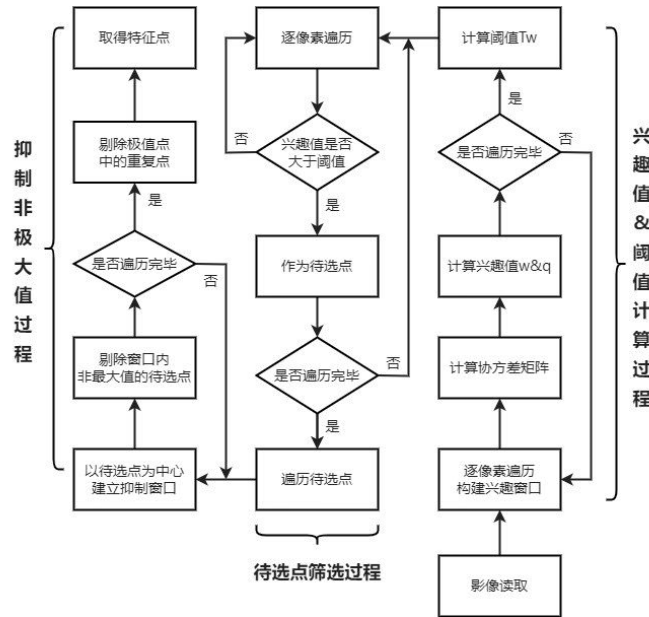


Fig22. Frongstner 算子程序流程

### 2.3.2 基于相关系数的影像匹配程序设计

本算法通过函数 `void ImageMatch(Mat left, Mat right, vector<IPoint>IPt, int winsize_target, int search_area, double thre, int deltax, int deltay, vector<MatchPt>& HomonyPt)` 实现，本函数根据特征点对左右影像进行基于相关系数的影像匹配，同名像点存储于HomonyPt数组。参数依次为：left: 左灰度图，right: 右灰度图，vector<IPoint>IPt: 特征点数组，winsize\_target: 目标窗口大小，search\_area: 搜索范围大小，thre: 相关系数匹配法阈值，deltax: x方向视差，deltay: y方向视差，vector<MatchPt>& HomonyPt: 同名像点数组。

利用与目标窗口大小相等的搜索窗口在影像的搜索范围内连续滑动，并记录目标窗口与该搜索范围内每个搜索窗口的相关系数，相关系数最大的窗口所对应的中心点即与目标窗口相匹配的同名点。算法具体实现思路如下：

1. 以灰度图像的形式读入两幅核线影像，通过上述 Moravec 或 Forstner 算法获取一幅影像（左影像）的特征点；
2. 使用 PS 软件获取左右影像的大致视差，用以后续左图特征点对应右图搜索范围的确定，并确定搜索范围和搜索窗口的大小（搜索窗口在搜索范围内滑动）；
3. 进行特征点的剔除：第一步，剔除运动员特征点，在影像上对特征点编号显示，记录运动员编号后删除；第二步，结合左右核线影像大小、上下左右视差以及搜索范围大小，剔除越界点。
4. 对左影像中的每一个特征点，获取其在右影像中的搜索范围，通过在搜索范围内移动搜索窗口，计算每个搜索窗口与左影像目标窗口的相关系数，存储相关系数大于阈值的搜索窗口中心点坐标。本步通过函数 `CorrCoefficientMethod(Mat leftTarget, Mat rightSearch, MatchPt center, int winsize_target, int search_area, double thre)` 记录左图目标窗口和右图搜索范围在左右图中的中心点坐标，winsize\_target: 目标窗口大小，search\_area: 搜索范围大小，thre: 相关系数法限差。本函数具体实现过程为：通过移动右图搜索范围内的搜索窗口，调用 dealCC 函数计算其与左图目



- 标窗口相关系数  $CC$ ，若  $CC_{max} > thre$  返回搜索窗口中心点坐标，反之返回  $(-1, -1)$ 。其中涉及的具体计算相关系数的函数为 `double dealCC(Mat leftTarget, Mat rightMove, int winsize_target)`，参数为：`leftTarget`：左图目标窗口，`rightMove`：右图搜索范围中小搜索窗口，`winsize_target`：目标窗口大小；
- 若特征点在搜索范围内无大于阈值的相关系数，则判定该特征点在右图无同名像点；反之筛选出最大的相关系数，其所对应的搜索窗口中心点即该左影像特征点对应的同名像点；
  - 对每一个左影像特征点重复 4、5 操作，获取同名像点完毕
  - 将左右核线影像在同一张图中拼接展示；
  - 在 7 所获得的拼接影像中绘制同名像点并连线显示。

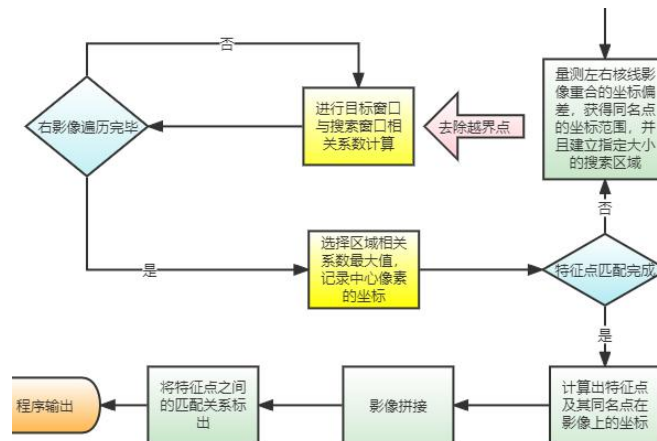


Fig23. 影像匹配程序流程

### 3. 实验分析

#### 3.1 Moravec 算子提取窗口分析与阈值分析

在本次实习作业中,我使用了 Moravec 算子提取的特征点进行后续的基于相关系数的特征匹配,而且 Forstner 算子和 Moravec 算子的阈值设定分析过程大同小异,因此,在本节我仅对 Moravec 算子的阈值进行设定分析。

在 Moravec 特征点提取算法中,当兴趣窗口的兴趣度>阈值时,兴趣窗口中心点视为兴趣点记录保存,阈值的选择与窗口的选择对兴趣点个数以及最终特征点的个数都有很大的影响。

##### 3.1.1 不同兴趣窗口对于提取点数的影响

为了分析本次实验窗口对于提取特征点的影响,选取了  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  的兴趣窗口进行分析,抑制窗口设置为  $20 \times 20$ 。阈值统一设定为之前实验获得的最佳阈值

兴趣窗口大小 (左影像)	特征点数	兴趣窗口大小 (右影像)	特征点数
5×5	56	5×5	156
7×7	73	7×7	232
9×9	96	9×9	306
3×3	23	3×3	56

Fig24. 不同窗口大小对特征点提取结果影响

可以发现在，兴趣窗口大小变大时，可以发现左右影像的特征点数提取数量增加，在同一阈值下，兴趣窗口越大，可提取的特征点越多。

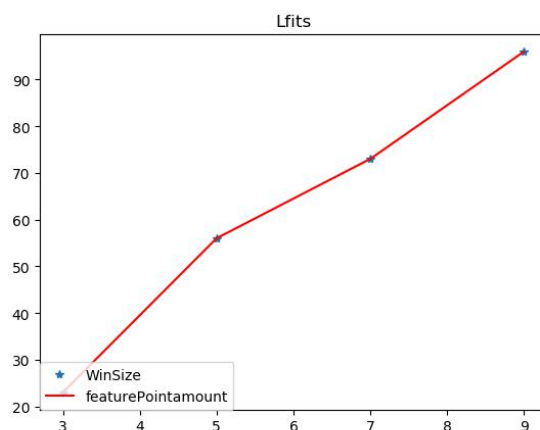


Fig25. 不同窗口大小对左影像特征点提取结果影响

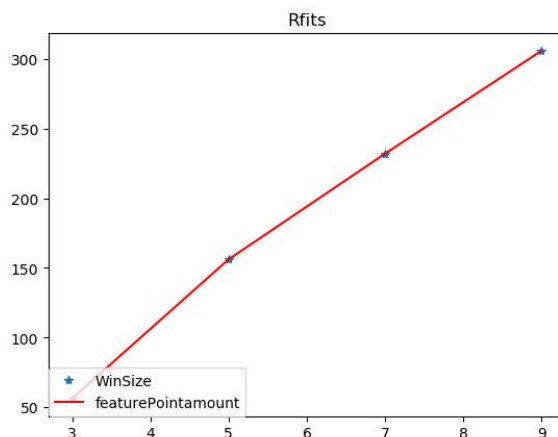


Fig26. 不同窗口大小对右影像特征点提取结果影响

### 3.1.1 不同提取阈值对于结果的影响

在 Moravec 特征点提取算法中，当兴趣窗口的兴趣值>阈值时，兴趣窗口中心点视为兴趣点记录保存，阈值的选择对兴趣点个数以及最终特征点的个数都有很大的影响。设兴趣值窗口为  $7 \times 7$ ，抑制窗口为  $21 \times 21$ ，进行如下阈值设定分析  
选取阈值 500-2100 进行阈值分析，间隔为 100，得到数据如下表所示：

阈值	兴趣点数	兴趣点关于阈值的一阶导数绝对值	特征点数
800	11588	29.14	821
900	8652	19.13	646
1000	6532	14.32	542
1100	5320	10.12	431
1200	4487	7.40	355
1300	3963	5.56	284
1400	3022	4.47	244
1500	2644	3.42	261
1600	2165	2.87	175
1700	2000	2.25	154
1800	1689	2.11	136
1900	1572	1.46	125
2000	1364	1.34	112
2100	1231		104

阈值过低，导致兴趣点过多，提取兴趣点非必要，所以这里使用在阈值 800 的时候开始计数，选取合理的阈值区间，利用曲线拟合结果如下：

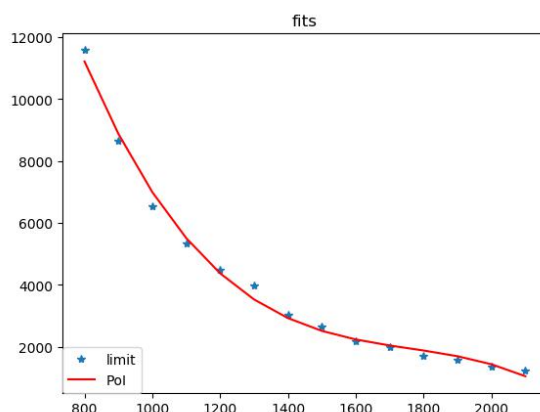


Fig26. 不同阈值选择对特征点结果影响

我们可以观察到，在阈值 800-2000 的区间内，随着阈值的均匀增大，兴趣点数大幅减小，且减小的幅度逐渐变小。尤其在曲线的后半段（阈值 1600-2000 部分），兴趣点数目维持在 1300-2300 间，数目理想，且兴趣点数目关于阈值一阶导数的绝对值均大于 1 小于 3，变化趋势较小。因此，判断阈值就在 1600-2000 之间。

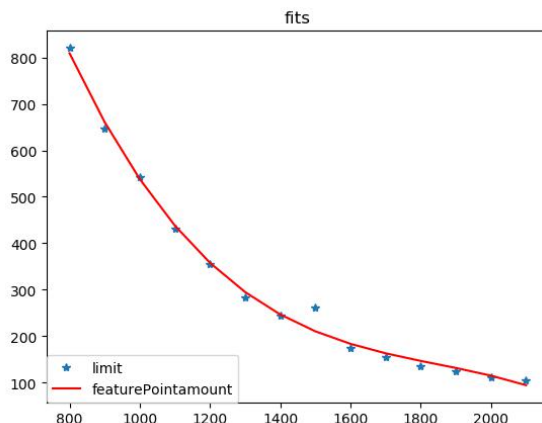


Fig27. 不同阈值选择对兴趣点结果影响

由本图像我们可以观察到,特征点数目随阈值的变化趋势和兴趣点数目随阈值的变化趋势基本相同,在阈值 1600-2000 之间,特征点数目维持在 180-110,较为稳定,同样可以分析出阈值在 1600-2000 间。

### 3. 2Forstner 算子提取窗口分析与阈值分析

在本次实习作业中,我使用了 Moravec 算子提取的特征点进行后续的基于相关系数的特征匹配,而且 Forstner 算子和 Moravec 算子的阈值设定分析过程大同小异,因此,在本节我仅对 Forstner 算子的阈值进行设定分析。

在 Forstner 特征点提取算法中,当兴趣窗口的兴趣值>阈值时,兴趣窗口中心点视为兴趣点记录保存,阈值的选择与窗口的选择对兴趣点个数以及最终特征点的个数都有很大的影响。

#### 3. 2. 1 不同兴趣窗口对于提取点数的影响

为了分析本次实验窗口对于提取特征点的影响,选取了 5×5, 7×7, 9×9 的兴趣窗口进行分析,抑制窗口设置为 20×20。阈值统一设定为之前实验获得的最佳阈值

兴趣窗口大小 (左影像)	特征点数	兴趣窗口大小 (右影像)	特征点数
5×5	72	5×5	145
7×7	127	7×7	300
9×9	178	9×9	356
3×3	25	3×3	72

Fig24. 不同窗口大小对特征点提取结果影响

可以发现在,兴趣窗口大小变大时,可以发现左右影像的特征点数提取数量增加,在同一阈值下,兴趣窗口越大,可提取的特征点越多。

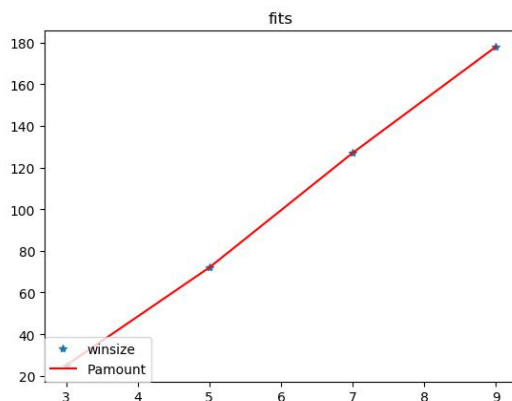


Fig25. 不同窗口大小对左影像特征点提取结果影响

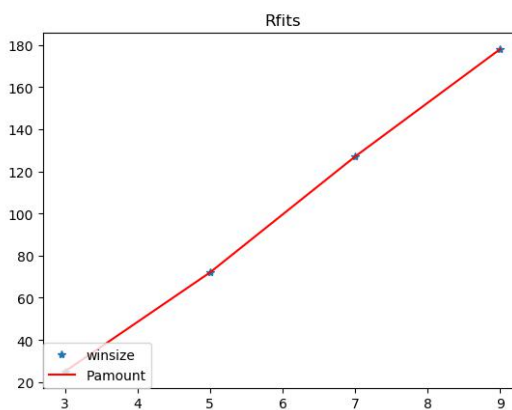


Fig26. 不同窗口大小对右影像特征点提取结果影响

### 3.2.2 不同抑制窗口对于结果的影响

抑制窗口的大小主要影响特征点的密度和数目，抑制窗口的大小应该大于兴趣窗口，否则抑制非极大值点的效果会大大削弱；同时，抑制窗口大小不能太大，因为在图像中，部分优质特征点的间距并不大，抑制窗口选择过大会造成优质特征点的缺失。我选取兴趣窗口大小为 9，阈值为 1600，随着抑制窗口大小变化，特征点数目变化如下：最终，我选择了抑制窗口大小为 21。

抑制窗口	兴趣点数	特征点数
11	2186	235
13	2186	210
15	2186	198
17	2186	186
19	2186	175
21	2186	172

Fig27. 不同抑制窗口大小对特征点提取结果影响

### 3.3 特征点提取分析总结

因为在特征点提取算法的分析过程中，对于在本次实习中用到的两种算子，我们均有涉及，因此分别对两个实验算子从不同的方面进行了分析，得出了兴趣窗口，抑制窗口，提取阈值对于特征点提取算法都有着影响，因此需要在实际应用中根据经验或多次尝试，选取适合的窗口与灰度阈值，解决实际相关的问题。达到较好的特征点实现效果。

### 3.4 随机分布与均匀分布实验分析

本人在实习操作这部分的内容时，没有较好地理解，通过与同学分析交流，发现是划分窗口大小不同导致的，如果采用均匀窗口，需要较大的抑制窗口，这样得到的特征点在图像中分布较为均匀，如果设置较小的抑制窗口，得到的特征点分布随机性高，计算速率高于均匀分布的计算速率。实验结果展示将会展示在结果展示一栏中。

### 3.5 相关系数法匹配分析

#### 3.5.1 阈值分析

为了获取左右影像的视差，在和同学讨论后，决定在 PS 我中进行重叠测量，获得 x 方向视差为 176px，y 方向视差为 8px。对影像进行对比分析发现两幅影像在下方两个网球场的重叠效果较好，在上方网球场重叠时有重影，通过理论发现，同名点猜测可能位于球下方。随机特征点提取算法（阈值为 1800，兴趣窗口为 9，抑制窗口大小为 21）获取了特征点，在进行相关系数匹配时，左影像目标窗口大小设定为 10，右影像搜索范围大小设定为 15，分析在此条件下不同阈值对于同名点对数的影响。

相关系数匹配法阈值	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7
同名点对数	3	20	41	49	62	72

Fig28. 不同匹配阈值影响同名点对数

随着阈值的不断增大，同名像点的数量与分布都在发生变化。可以观察到，当阈值在 [0.7,0.85] 区间内时，左右影像在影像上半部分产生同名像点，但细看这部分同名像点，都或多或少的存在偏差，质量不理想，影像下半部分同名像点匹配十分精准。当阈值大于 0.85 时，同名像点的数量大大减少，但质量较佳。因此，对于本对像对，最佳的相关系数阈值应在 [0.85,0.90] 区间内。

#### 3.5.2 窗口大小分析

我通过 Moravec 随机特征点提取算法（阈值为 1800，兴趣窗口为 9，抑制窗口大小为 21）获取了特征点，相关系数匹配时，右影像搜索范围大小设定为 15，相关系数阈值设定为 0.85，在此分析目标窗口为 5~9（间隔 2）时，不同目标窗口大小对于同名点数量、质量的影响



相关系数匹配法目标窗口	5	7	9
同名点对数	96	69	61

Fig29. 不同窗口大小影响同名点对数

随着目标窗口的不断增大，至接近搜索范围的大小，同名像点的数量与分布都在发生变化。这是容易理解的，只有特征点及其周围的像素与同名像点及其周围像素具有强相关性，当目标窗口不断增大，相关性就会下降，表现为相关系数减小，同名像点对数减少。结合图像分析，目标窗口在取 7、9 时，同名像点对数适中，且同名像点质量较好，因此我选择目标窗口大小为 9。

### 3.5.3 搜索范围分析

相关系数匹配时，右影像目标窗口大小设定为 15，相关系数阈值设定为 0.85，在此分析搜索范围为 11~21（间隔 2）时，不同搜索范围大小对于同名点数量、质量的影响：

相关系数匹配法搜索范围	11	13	15	17	19	21
同名点对数	3	16	40	62	71	87

Fig30. 不同搜索范围对同名点对数影响

通过对结果的分析，实际情况后，可以发现，在选择搜索范围为 15，较为符合实际情况，获得的同名点对于真实场景是有用可行的。

## 4. 结果展示

### 4.5.1 Moravec 灰度阈值分析结果

通过老师传授的知识，上课时曹老师说运动员不算做特征点，不是所要的特征点，但在算子并不构成巨大的影响，因此选择未作处理，在影像匹配中，需要完成较为复杂的操作，将相关的特征点去掉。

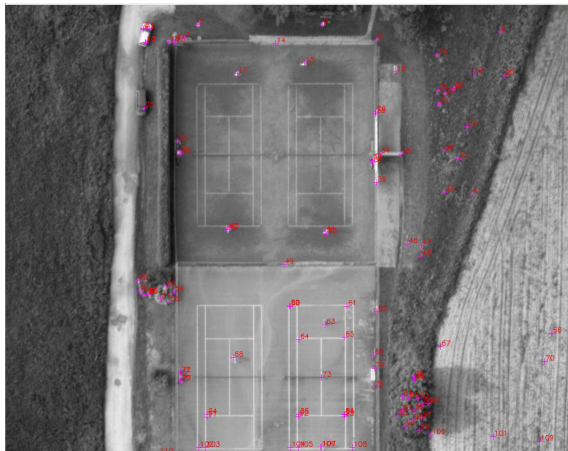


Fig31. 灰度阈值为 1600

Fig32. 灰度阈值为 1700



Fig33. 灰度阈值为 1800

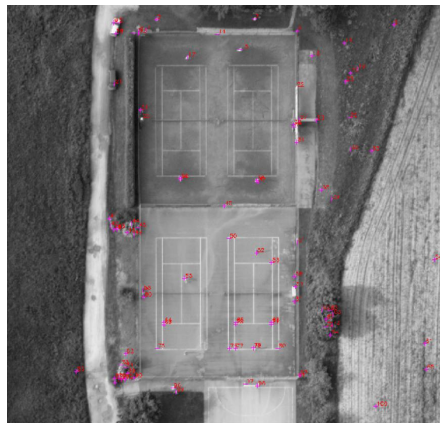


Fig34. 灰度阈值为 1900



Fig35. 灰度阈值为 2000

## 4.5.2 Moravec 提取兴趣窗口大小分析结果



Fig36. 窗口大小为 3



Fig37. 窗口大小为 5





Fig38.窗口大小为 7



Fig39.窗口大小为 9

## 4. 5. 3 Forstner 兴趣窗口大小分析结果



Fig40.窗口大小为 3



Fig41.窗口大小为 5



Fig42.窗口大小为 7



Fig42.窗口大小为 9

#### 4.5.4 灰度阈值相关系数匹配分析结果

由于分析阈值较多，这里仅展示部分值

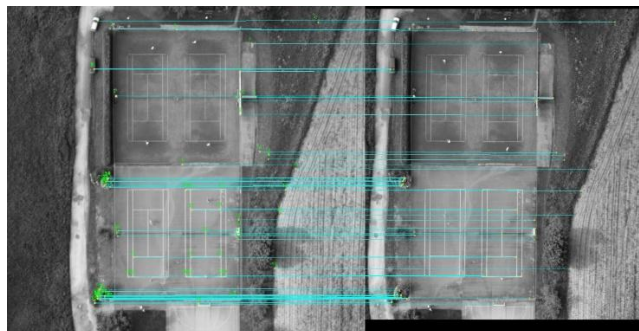


Fig43.阈值为 0.7

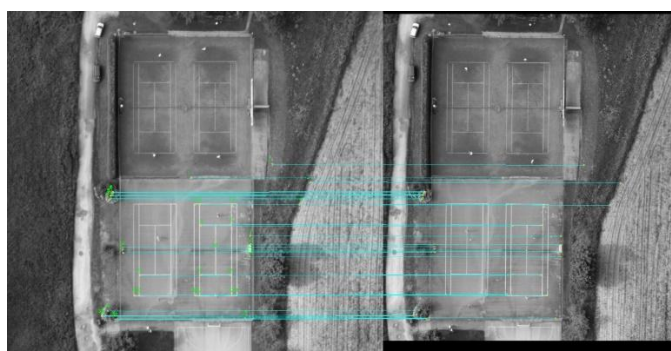


Fig44.阈值为 0.85

#### 4.5.4 窗口大小相关系数匹配分析结果

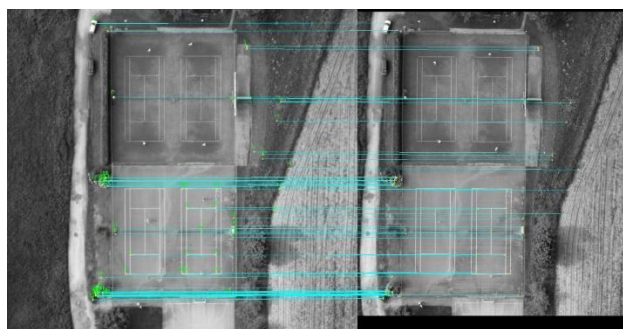


Fig45.窗口为 7

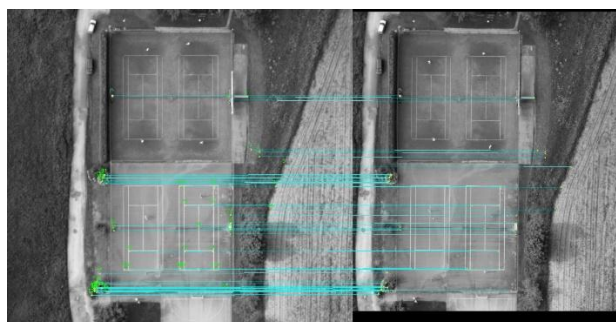


Fig45.窗口为 9

#### 4.5.4 搜索范围对相关系数匹配分析结果

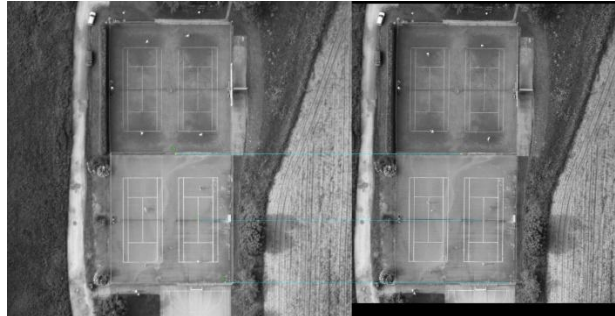


Fig46.搜索范围为 11

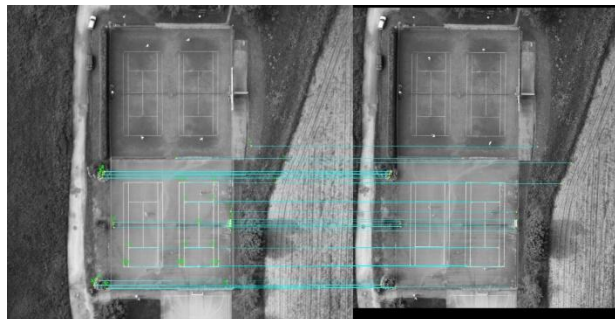


Fig47.搜索范围为 15

### 5. 实习心得

本次数字摄影测量实习使用面向对象语言 C++ 进行程序设计,编写了一个完整的特征点提取及相关系数法匹配程序对实验数据进行计算,输出特征点提取后图片以及影像匹配的窗口影像。深入理解了特征点提取与影像匹配的原理,通过自我编程加强动手能力的培养,对实验结果的分析,增强综合运用所学知识解决实际问题的能力。并在实习过程中有不断试错、不断探究的过程,是一次完整而有收获的实习,并且在实习过程中,及时使用了老师教授的知识,丰满了摄影测量的知识体系,对于接下来的课程学习具有重要的意义。

综上,本次实习兼顾了理论与实践,做到了实践体现真知,对于我有极大的裨益。