从零开始一起学习SLAM | 掌握g2o边的代码套路

小白：师兄，g2o框架《从零开始一起学习SLAM | 理解图优化，一步步带你看懂g2o代码》，以及顶点《从零开始一起学习SLAM | 掌握g2o顶点编程套路》我都学完啦，今天给我讲讲g2o中的边吧！是不是也有什么套路？

师兄：嗯，g2o的边比顶点稍微复杂一些，不过前面你也了解了许多g2o的东西，有没有发现g2o的编程基本都是固定的格式（套路）呢？

小白：是的，我现在按照师兄说的g2o框架和顶点设计方法，再去看g2o实现不同功能的代码，发现都是一个模子出来的，只不过在某些地方稍微改改就行了啊

师兄：是这样的。我们来看看g2o的边到底是咋回事。

初步认识g2o的边

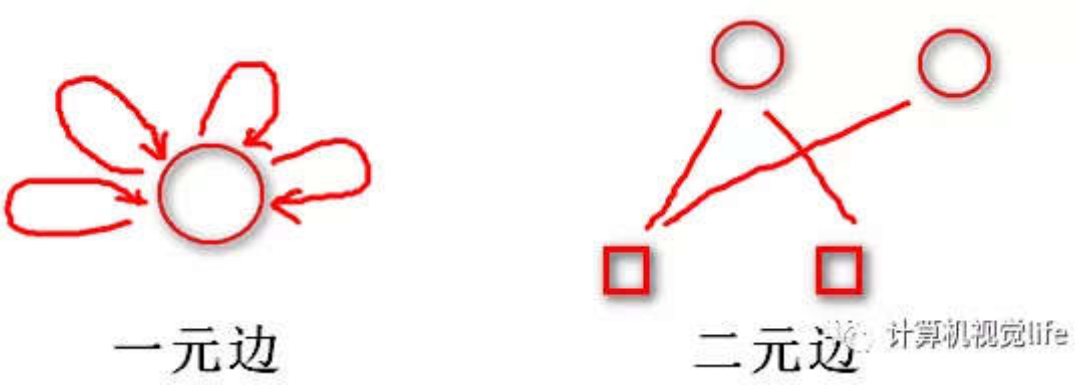
师兄：在《g2o: A general Framework for (Hyper) Graph Optimization》这篇文档里，我们找到那张经典的类结构图，里面关于边（edge）的部分是这样的，重点是下图中红色框内。

上一次我们讲顶点的时候，还专门去追根溯源查找顶点类之间的继承关系，边其实也是类似的，我们在g2o官方GitHub上这些
g2o/g2o/core/hyper_graph.h
g2o/g2o/core/optimizable_graph.h
g2o/g2o/core/base_edge.h

头文件下就能看到这些继承关系了，我们就不像之前顶点那样一个个去追根溯源了，如果有兴趣你可以自己去试试看。我们主要关注一下上面红框内的三种边。

BaseUnaryEdge，BaseBinaryEdge，BaseMultiEdge 分别表示一元边，两元边，多元边。

小白：他们有啥区别啊？
师兄：一元边你可以理解为一条边只连接一个顶点，两元边理解为一条边连接两个顶点，也就是我们常见的边啦，多元边理解为一条边可以连接多个（3个以上）顶点



一个比较丑的示例

下面我们来看看他们的参数有什么区别？你看主要就是 几个参数：D, E, VertexXi, VertexXj，他们的分别代表：

D 是 int 型，表示测量值的维度 （dimension）
E 表示测量值的数据类型
VertexXi，VertexXj 分别表示不同顶点的类型

比如我们用边表示三维点投影到图像平面的重投影误差，就可以设置输入参数如下：

```
BaseBinaryEdge<2, Vector2D, VertexSBAPointXYZ, VertexSE3Expmap>
```

你说说看 这个定义是什么意思？
小白：首先这个是个二元边。第1个2是说测量值是2维的，也就是图像像素坐标x,y的差值，对应测量值的类型是Vector2D，两个顶点也就是优化变量分别是三维点 VertexSBAPointXYZ，和李群位姿VertexSE3Expmap？

师兄：对的，就是这样~当然除了输入参数外，定义边我们通常需要复写一些重要的成员函数
小白：听着和顶点类似哦，也是复写成员函数，顶点里主要复写了顶点更新函数oplusImpl和顶点重置函数setToOriginImpl，边的话是不是也差不多？
师兄：边和顶点的成员函数还是差别比较大的，边主要有以下几个重要的成员函数

```
virtual bool read(std::istream& is);
virtual bool write(std::ostream& os) const;
virtual void computeError();
virtual void linearizeOplus();
```

下面简单解释一下
read，write：分别是读盘、存盘函数，一般情况下不需要进行读/写操作的话，仅仅声明一下就可以
computeError函数：非常重要，是使用当前顶点的值计算的测量值与真实的测量值之间的误差
linearizeOplus函数：非常重要，是在当前顶点的值下，该误差对优化变量的偏导数，也就是我们说的Jacobian

除了上面几个成员函数，还有几个重要的成员变量和函数也一并解释一下：

```
_measurement：存储观测值
_error：存储computeError() 函数计算的误差
_vertices[]：存储顶点信息，比如二元边的话，_vertices[] 的大小为2，存储顺序和调用setVertex(int
setId(int)：来定义边的编号（决定了在H矩阵中的位置）
setMeasurement(type) 函数来定义观测值
setVertex(int, vertex) 来定义顶点
setInformation() 来定义协方差矩阵的逆
```

后面我们写代码的时候回经常遇到他们的。

如何自定义g2o的边?

小白：前面你介绍了g2o中边的基本类型、重要的成员变量和成员函数，那么如果我们要定义边的话，具体如何编程呢?
师兄：我这里正好有个模板给你看看，基本上定义g2o中的边，就是如下套路：

```
class myEdge: public g2o::BaseBinaryEdge<errorDim, errorType, Vertex1Type, Vertex2Type>
 {
     public:
     EIGEN_MAKE_ALIGNED_OPERATOR_NEW
     myEdge(){}
     virtual bool read(istream& in) {}
     virtual bool write(ostream& out) const {}
     virtual void computeError() override
     {
         // ...
         _error = _measurement - Something;
     }
     virtual void linearizeOplus() override
     {
         _jacobianOplusXi(pos, pos) = something;
         // ...
         /*
         _jocobianOplusXj(pos, pos) = something;
         ...
         */
     }
     private:
     // data
 }
```

我们可以发现，最重要的就是computeError()，linearizeOplus()两个函数了

小白：嗯，看起来好像也不难啊
师兄：我们先来看一个简单例子，地址在

https://github.com/gaoxiang12/slambook/blob/master/ch6/g2o_curve_fitting/main.cpp
这个是个一元边，主要是定义误差函数了，如下所示，你可以发现这个例子基本就是上面例子的一丢丢扩展，是不是感觉so easy?

```
// 误差模型 模板参数：观测值维度，类型，连接顶点类型
class CurveFittingEdge: public g2o::BaseUnaryEdge<1,double,CurveFittingVertex>
{
public:
    EIGEN_MAKE_ALIGNED_OPERATOR_NEW
    CurveFittingEdge( double x ): BaseUnaryEdge(), _x(x) {}
    // 计算曲线模型误差
    void computeError()
    {
        const CurveFittingVertex* v = static_cast<const CurveFittingVertex*> (_vertices[
        const Eigen::Vector3d abc = v->estimate();
        _error(0,0) = _measurement - std::exp( abc(0,0)*_x*_x + abc(1,0)*_x + abc(2,0) )
    }
    virtual bool read( istream& in ) {}
    virtual bool write( ostream& out ) const {}
public:
    double _x;  // x 值， y 值为 _measurement
};
```

小白：嗯，这个能看懂
师兄：下面是一个复杂一点例子，3D-2D点的PnP 问题，也就是最小化重投影误差问题，这个问题非常常见，使用最常见的二元边，弄懂了这个基本跟边相关的代码也差不多都一通百通了

代码在g2o的GitHub上这个地方可以看到
g2o/types/sba/types_six_dof_expmap.h
这里根据自己理解对代码加了注释，方便理解

```
//继承了BaseBinaryEdge类，观测值是2维，类型Vector2D,顶点分别是三维点、李群位姿
class G2O_TYPES_SBA_API EdgeProjectXYZ2UV : public  BaseBinaryEdge<2, Vector2D, VertexSE
  public:
    EIGEN_MAKE_ALIGNED_OPERATOR_NEW;
    //1. 默认初始化
    EdgeProjectXYZ2UV();
    //2. 计算误差
    void computeError()  {
      //李群相机位姿v1
      const VertexSE3Expmap* v1 = static_cast<const VertexSE3Expmap*>(_vertices[1]);
      // 顶点v2
      const VertexSBAPointXYZ* v2 = static_cast<const VertexSBAPointXYZ*>(_vertices[0]);
      //相机参数
      const CameraParameters * cam
        = static_cast<const CameraParameters *>(parameter(0));
     //误差计算，测量值减去估计值，也就是重投影误差obs-cam
     //估计值计算方法是T*p,得到相机坐标系下坐标，然后在利用camera2pixel()函数得到像素坐标。
      Vector2D obs(_measurement);
      _error = obs-cam->cam_map(v1->estimate().map(v2->estimate()));
    }
```

```
    //3. 线性增量函数，也就是雅克比矩阵J的计算方法
    virtual void linearizeOplus();
    //4. 相机参数
    CameraParameters * _cam;
    bool read(std::istream& is);
    bool write(std::ostream& os) const;
};
```

有一个地方比较难理解

```
_error = obs - cam->cam_map(v1->estimate().map(v2->estimate()));
```

小白：我确实看不懂这一句。。
师兄：其实就是：误差 = 观测 - 投影

下面我给你捋捋思路。我们先来看看cam_map 函数，它的定义在
g2o/types/sba/types_six_dof_expmap.cpp
cam_map 函数功能是把相机坐标系下三维点（输入）用内参转换为图像坐标（输出），具体代码如下所示

```
Vector2  CameraParameters::cam_map(const Vector3 & trans_xyz) const {
  Vector2 proj = project2d(trans_xyz);
  Vector2 res;
  res[0] = proj[0]*focal_length + principle_point[0];
  res[1] = proj[1]*focal_length + principle_point[1];
  return res;
}
```

然后看 .map函数，它的功能是把世界坐标系下三维点变换到相机坐标系，函数在
g2o/types/sim3/sim3.h
具体定义是

```
      Vector3 map (const Vector3& xyz) const {
        return s*(r*xyz) + t;
      }
```

因此下面这个代码

```
v1->estimate().map(v2->estimate())
```

就是用V1估计的pose把V2代表的三维点，变换到相机坐标系下。

小白：原来如此，以前我都忽视了这些东西了，没想到里面是这样的关联的。
师兄：嗯，我们继续，前面主要是对computeError() 的理解，还有一个很重要的函数就是

linearizeOplus()，用来定义雅克比矩阵
我摘取了相关代码（来自：g2o/g2o/types/sba/types_six_dof_expmap.cpp），并进行了标注，相信会更容易理解

十四讲第169页中的雅克比矩阵完全是按照书上 式子（7.45）、（7.47）来编程的，不难理解
小白：后面就是直接照抄书上就行，哈哈

如何向图中添加边?

师兄：前面我们讲过如何往图中增加顶点，可以说非常easy了，往图中增加边会稍微多一些内容，我们还是先从最简单的 例子说起：一元边的添加方法

下面代码来自GitHub上，仍然是前面曲线拟合的例子
slambook/ch6/g2o_curve_fitting/main.cpp

```
// 往图中增加边
for ( int i=0; i<N; i++ )
{
    CurveFittingEdge* edge = new CurveFittingEdge( x_data[i] );
    edge->setId(i);
    edge->setVertex( 0, v );                // 设置连接的顶点
    edge->setMeasurement( y_data[i] );      // 观测数值
    edge->setInformation( Eigen::Matrix<double,1,1>::Identity()*1/(w_sigma*w_sigma)
    optimizer.addEdge( edge );
}
```

小白：setMeasurement 函数的输入的观测值具体是指什么?
师兄：对于这个曲线拟合，观测值就是实际观测到的数据点。对于视觉SLAM来说，通常就是我们我们观测到的特征点坐标，下面就是一个例子。这个例子比刚才的复杂一点，因为它是二元边，需要用边连接两个顶点
代码来自GitHub上
slambook/ch7/pose_estimation_3d2d.cpp

```
index = 1;
for ( const Point2f p:points_2d )
{
    g2o::EdgeProjectXYZ2UV* edge = new g2o::EdgeProjectXYZ2UV();
    edge->setId ( index );
    edge->setVertex ( 0, dynamic_cast<g2o::VertexSBAPointXYZ*> ( optimizer.vertex (
    edge->setVertex ( 1, pose );
    edge->setMeasurement ( Eigen::Vector2d ( p.x, p.y ) );
    edge->setParameterId ( 0,0 );
    edge->setInformation ( Eigen::Matrix2d::Identity() );
    optimizer.addEdge ( edge );
```

```
        index++;
    }
```

小白：这里的setMeasurement函数里的p来自向量points_2d，也就是特征点的图像坐标(x,y)了吧！
师兄：对，这正好呼应我刚才说的。另外，你看setVertex有两个一个是 0 和VertexSBAPointXYZ 类型的顶点，一个是1 和pose。你觉得这里的0和1是什么意思？能否互换呢?

小白：0，1应该是分别指代哪个顶点吧，直觉告诉我不能互换，可能得去查查顶点定义部分的代码
师兄：你的直觉没错！我帮你 查过啦，你看这个是setVertex在g2o官网的定义：

```
// set the ith vertex on the hyper-edge to the pointer supplied
void setVertex(size_t i, Vertex* v) { assert(i < _vertices.size() && "index out of bounc
```

这段代码在
g2o/core/hyper_graph.h
里可以找到。你看 _vertices[i] 里的i就是我们这里的0和1，我们再去看看这里边的类型：
g2o::EdgeProjectXYZ2UV
的定义，前面我们也放出来了，就这两句

```
class G2O_TYPES_SBA_API EdgeProjectXYZ2UV
.....
 //李群相机位姿v1
const VertexSE3Expmap* v1 = static_cast<const VertexSE3Expmap*>(_vertices[1]);
// 顶点v2
const VertexSBAPointXYZ* v2 = static_cast<const VertexSBAPointXYZ*>(_vertices[0]);
```

你看 _vertices[0] 对应的是 VertexSBAPointXYZ 类型的顶点，也就是三维点，_vertices[1] 对应的是VertexSE3Expmap 类型的顶点，也就是位姿pose。因此前面 1 对应的就应该是 pose，0对应的 应该就是三维点。

小白：原来如此，之前都没注意这些，看来g2o不会帮我区分顶点的类型啊，以后这里编程要对应好，不然错了都找不到原因呢！谢谢师兄，今天又是收获满满的一天！

编程练习

题目：用直接法Bundle Adjustment 估计相机位姿。给定3张图片，两个txt文件，其中poses.txt中存储3张图片对应的相机初始位姿（Tcw），格式为：timestamp, tx, ty, tz, qx, qy, qz, qw ，分别对

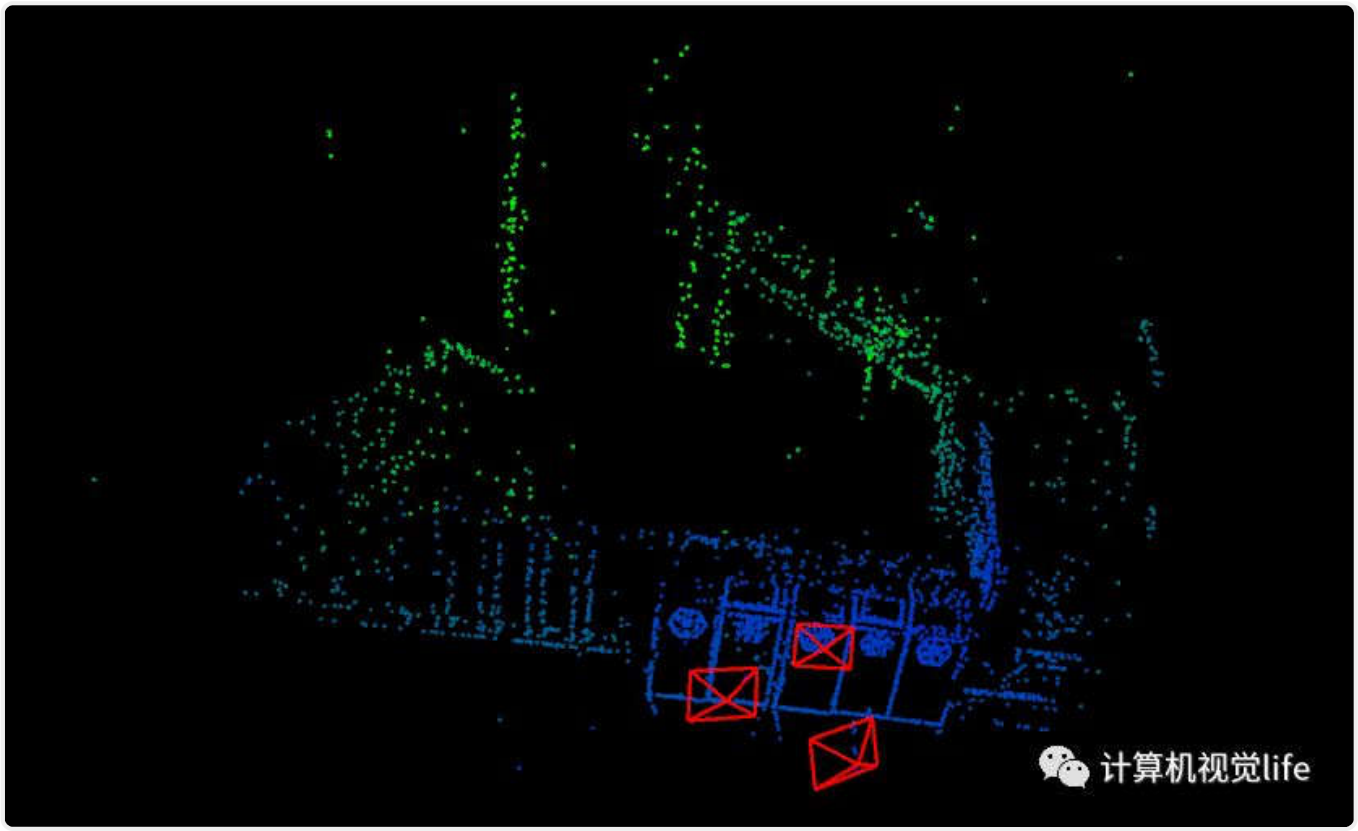
应时间戳、平移、旋转（四元数），而points.txt中存储的是3D点集合以及该点周围 4x4 窗口的灰度值，记做 I(p)i，格式为：

x, y, z, 灰度1，灰度2…，灰度16

我们把每个3D点投影到对应图像中，用投影后点周围的灰度值与原始窗口的灰度值差异作为待优化误差。

请使用g2o进行优化，并绘制结果（绘制函数已经写好）。

代码框架中需要你填写顶点、边的定义。如果正确，输出结果如下图所示：



参考：

高翔《视觉 SLAM十四讲》
https://blog.csdn.net/try_again_later/article/details/81813639