

ORB-SLAM

一、System.h

整体流程图：

1、概况讲解

跟踪函数

有三个：Stereo、RGBD、Monocular。其返回值为相机位姿，若跟踪失败则为空(empty)。

```
// Process the given stereo frame. Images must be synchronized and rectified.
// Input images: RGB (CV_8UC3) or grayscale (CV_8U). RGB is converted to
// grayscale.
// Returns the camera pose (empty if tracking fails).
cv::Mat TrackStereo(const cv::Mat &imLeft, const cv::Mat &imRight, const double
&timestamp);

// Process the given rgbd frame. Depthmap must be registered to the RGB frame.
// Input image: RGB (CV_8UC3) or grayscale (CV_8U). RGB is converted to
// grayscale.
// Input depthmap: Float (CV_32F).
// Returns the camera pose (empty if tracking fails).
cv::Mat TrackRGBD(const cv::Mat &im, const cv::Mat &depthmap, const double
&timestamp);

// Process the given monocular frame
// Input images: RGB (CV_8UC3) or grayscale (CV_8U). RGB is converted to
// grayscale.
// Returns the camera pose (empty if tracking fails).
cv::Mat TrackMonocular(const cv::Mat &im, const double &timestamp);
```

私有变量(SLAM系统中需要用到的部分)

1. ORB词典：用于位置识别和特征点匹配

```
// ORB vocabulary used for place recognition and feature matching.
ORBVocabulary* mpVocabulary;
```

2. 关键帧数据库：用于重定位以及闭环检测

```
KeyFrameDatabase* mpKeyFrameDatabase;
```

3. 地图：存储所有地图点以及关键帧

```
Map* mpMap;
```

4. 跟踪线程：接到图片后计算相机位姿，并且负责插入关键帧、地图点。当跟踪失败时负责重定位方式跟踪估计位姿。

```
Tracking* mpTracker;
```

5. 局部地图：负责局部建图和局部地图BA

```
LocalMapping* mpLocalMapper;
```

6. 闭环检测：对每个新关键帧都搜索闭环，若有闭环，则启动位姿图优化和一个完整全局BA

```
LoopClosing* mpLoopCloser;
```

其余部分变量不太重要，后续遇到问题再讲。

构造函数

初始化一些变量，后续讲解。

```
// Initialize the SLAM system. It launches the Local Mapping, Loop Closing and
Viewer threads.
System(const string &strVocFile, const string &strSettingsFile, const eSensor
sensor, const bool bUseViewer = true);
```

我们现在看一下构造函数：

首先：选择我们想要的传感器(单目、RGBD、双目)、其次，读取配置文件以及ORB词典(ORB Vocabulary)。

词典初始化

```
mpVocabulary = new ORBVocabulary();
bool bVocLoad = mpVocabulary->loadFromTextFile(strVocFile);
```

其中调用了DBow2库函数。判定若词典读取失败则退出程序。

初始化一系列SLAM模块

```
//Create KeyFrame Database
mpKeyFrameDatabase = new KeyFrameDatabase(*mpVocabulary);

//Create the Map
mpMap = new Map();

//Create Drawers. These are used by the Viewer
mpFrameDrawer = new FrameDrawer(mpMap);
mpMapDrawer = new MapDrawer(mpMap, strSettingsFile);

//Initialize the Tracking thread
//(it will live in the main thread of execution, the one that called this
constructor)
mpTracker = new Tracking(this, mpVocabulary, mpFrameDrawer, mpMapDrawer,
                        mpMap, mpKeyFrameDatabase, strSettingsFile, mSensor);

//Initialize the Local Mapping thread and launch
mpLocalMapper = new LocalMapping(mpMap, mSensor==MONOCULAR);
```

```

mptLocalMapping = new thread(&ORB_SLAM2::LocalMapping::Run, mpLocalMapper);

//Initialize the Loop Closing thread and launch
mpLoopCloser = new LoopClosing(mpMap, mpKeyFrameDatabase, mpVocabulary,
mSensor!=MONOCULAR);
mptLoopClosing = new thread(&ORB_SLAM2::LoopClosing::Run, mpLoopCloser);

```

这里，我们后续必须详细研究跟踪、局部地图以及闭环检测线程。

之后，我们还要设置三个线程之间的指针，用途目前未知。

2、跟踪线程

我们在ROS模块的ros_mono.cc中可以看到：回调函数中每次执行的是函数TrackMonocular

```

mpSLAM->TrackMonocular(cv_ptr->image, cv_ptr->header.stamp.toSec());

```

因此，我们要研究这个函数(跟踪系列函数)。这个函数中，先包含了模式转换部分(目前不看)，之后就**是GrabImageMonocular函数**，这个函数中包含了跟踪线程。

//而跟踪线程结束后，

二、跟踪线程Tracking.h

1、概述

主要函数：GrabImageXX(以单目举例GrabImageMonocular)，返回值为当前相机位姿。

```

cv::Mat GrabImageStereo(const cv::Mat &imRectLeft, const cv::Mat &imRectRight,
const double &timestamp);
cv::Mat GrabImageRGBD(const cv::Mat &imRGB, const cv::Mat &imD, const double
&timestamp);
cv::Mat GrabImageMonocular(const cv::Mat &im, const double &timestamp);

```

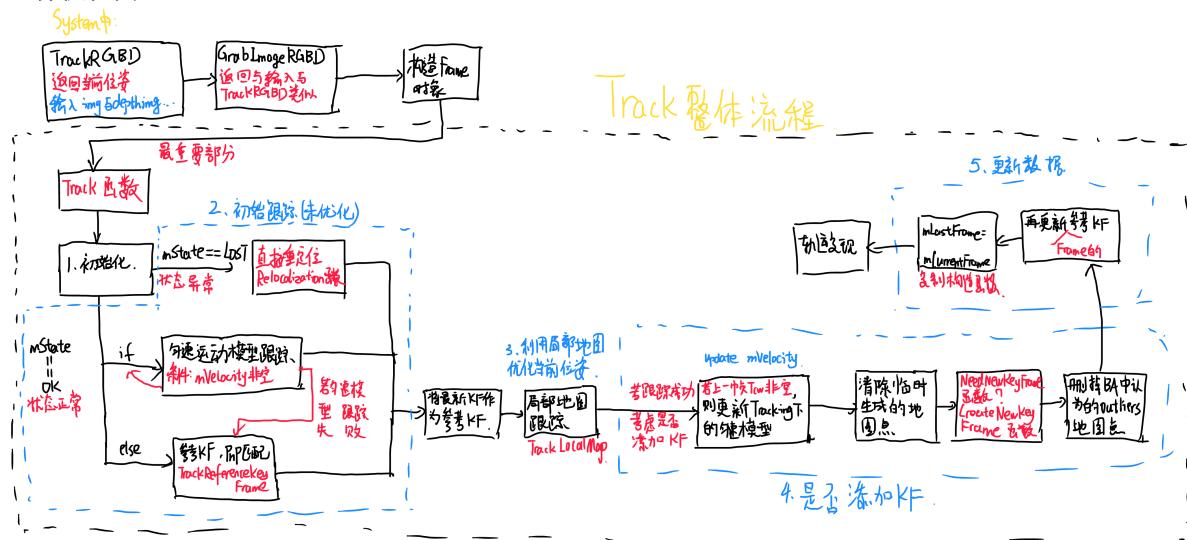
跟踪线程状态：

```

enum eTrackingState{
    SYSTEM_NOT_READY=-1,
    NO_IMAGES_YET=0,
    NOT_INITIALIZED=1,
    OK=2,
    LOST=3
};

```

整体流程图



2、成员

| 主要成员 | 用处 |
|---------------------|---------|
| Frame mCurrentFrame | 当前帧 |
| cv::Mat mImGray | 当前帧的灰度图 |
| | |
| | |
| | |

3、Track()函数

流程：获取当前帧，转化为灰度图后调用Track()函数。

Track函数中，先根据匀速运动模型估计相机位姿，若不行则根据关键帧匹配估计当前位姿。结束本过程后，更新参考关键帧，这个参考关键帧根据论文：为局部地图中与当前帧共享最多地图点的关键帧。后与局部地图进行匹配。这个过程算是跟踪过程，若成功，则跟踪线程状态为OK；否则为LOST。

```

if(mState==OK)
{
    // Local Mapping might have changed some MapPoints tracked in last frame
    // 检查并更新上一帧被替换的MapPoints
    // 更新Fuse函数和SearchAndFuse函数替换的MapPoints
    CheckReplacedInLastFrame();

    // 步骤2.1: 跟踪上一帧或者参考帧或者重定位

    // 运动模型是空的或刚完成重定位
    // mCurrentFrame.mnId<mnLastRelocFrameId+2这个判断不应该有
    // 应该只要mVelocity不为空，就优先选择TrackWithMotionModel
    // mnLastRelocFrameId上一次重定位的那一帧
    if(mVelocity.empty() || mCurrentFrame.mnId<mnLastRelocFrameId+2)
    {
        // 将上一帧的位姿作为当前帧的初始位姿
        // 通过Bow的方式在参考帧中找当前帧特征点的匹配点
        // 优化每个特征点都对3D点重投影误差即可得到位姿
    }
}

```

```

        bOK = TrackReferenceKeyFrame();
    }
    else
    {
        // 根据恒速模型设定当前帧的初始位姿
        // 通过投影的方式在参考帧中找当前帧特征点的匹配点
        // 优化每个特征点所对应3D点的投影误差即可得到位姿
        bOK = TrackWithMotionModel();
        if(!bOK)
            // TrackReferenceKeyFrame是跟踪参考帧，不能根据固定运动速度模型预测当前帧的位
            姿态，通过bow加速匹配 (SearchByBow)
            // 最后通过优化得到优化后的位姿
            bOK = TrackReferenceKeyFrame();
    }
}
else
{
    // BOW搜索，PnP求解位姿
    bOK = Relocalization();
}

```

```

mCurrentFrame.mpReferenceKF = mpReferenceKF;

// If we have an initial estimation of the camera pose and matching. Track the
local map.
if(!mbOnlyTracking)
{
    if(bOK)
        bOK = TrackLocalMap();
}

```

若跟踪成功，我们检查是否需要插入关键帧。首先更新mVelocity：若上一帧位姿非空，按照如下方式计算模型速度；若上一帧位姿为空，则速度也为空。

```

cv::Mat LastTwc = cv::Mat::eye(4,4,CV_32F);
mLastFrame.GetRotationInverse().copyTo(LastTwc.rowRange(0,3).colRange(0,3));
mLastFrame.GetCameraCenter().copyTo(LastTwc.rowRange(0,3).col(3));
mVelocity = mCurrentFrame.mTcw*LastTwc;
//这里的速度为两帧位姿间的李代数增量

```

$$p_{c1} = T_{cw1}p$$

$$p_{c2} = T_{cw2}p$$

$$p_{c2} = T_{cw2}T_{cw1}^{-1}p_{c1}$$

速度我们可以视为pc1到pc2相机位姿之间的李代数增量。

计算完速度后，检查是否需要关键帧，根据需求添加关键帧。后存储当前帧位姿信息来复原整个相机运动轨迹。

```

// Store frame pose information to retrieve the complete camera trajectory
afterwards.
if(!mCurrentFrame.mTcw.empty())
{
    cv::Mat Tcr = mCurrentFrame.mTcw*mCurrentFrame.mpReferenceKF-
>GetPoseInverse();
}

```

```

        mRelativeFramePoses.push_back(Tcr);
        mlpReferences.push_back(mpReferenceKF);
        mFrameTimes.push_back(mCurrentFrame.mTimeStamp);
        mlbLost.push_back(mState==LOST);
    }
    else
    {
        // This can happen if tracking is lost
        mRelativeFramePoses.push_back(mRelativeFramePoses.back());
        mlpReferences.push_back(mlpReferences.back());
        mFrameTimes.push_back(mFrameTimes.back());
        mlbLost.push_back(mState==LOST);
    }
}

```

I. TrackReferenceKeyFrame()函数

主要功能，通过比对关键帧来跟踪。

```

if(mVelocity.empty() || mCurrentFrame.mnId<mnLastRelocFrameId+2)
{
    // 将上一帧的位姿作为当前帧的初始位姿
    // 通过Bow的方式在参考帧中找当前帧特征点的匹配点
    // 优化每个特征点都对应3D点重投影误差即可得到位姿
    bOK = TrackReferenceKeyFrame();
}

```

*详细实现

步骤1:

```
mCurrentFrame.ComputeBow(); //将当前帧的描述子转化为Bow向量
```

步骤2:

```

// We perform first an ORB matching with the reference keyframe
// If enough matches are found we setup a PnP solver
//vpMapPointMatches初步认为是当前帧(mCurrentFrame)中与关键帧(mpReferenceKF)中地图点匹配的地图点
ORBmatcher matcher(0.7,true);
vector<MapPoint*> vpMapPointMatches;

// 步骤2: 通过特征点的Bow加快当前帧与参考帧之间的特征点匹配
// 特征点的匹配关系由MapPoints进行维护
int nmatches =
matcher.SearchByBow(mpReferenceKF,mCurrentFrame,vpMapPointMatches);
//若匹配点太少, 则返回false
if(nmatches<15)
    return false;

```

步骤3:

```
// 步骤3:将上一帧的位姿态作为当前帧位姿的初始值
//mvpMapPoints:与当前帧中的关键点与地图点关联的点(地图点)
//原版注释: MapPoints associated to keyPoints
mCurrentFrame.mvpMapPoints = vpMapPointMatches;
mCurrentFrame.SetPose(mLastFrame.mTcw); // 用上一次的Tcw设置初值, 在PoseOptimization
可以收敛快一些
```

步骤4:

```
// 步骤4:通过优化3D-2D的重投影误差来获得位姿
Optimizer::PoseOptimization(&mCurrentFrame);
```

步骤5:

```
// Discard outliers
// 步骤5: 剔除优化后的outlier匹配点 (MapPoints)
int nmatchesMap = 0;
for(int i =0; i<mCurrentFrame.N; i++)
{
    if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i])
    {
        if(mCurrentFrame.mvbOutlier[i])
        {
            MapPoint* pMP = mCurrentFrame.mvpMapPoints[i];
            mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]=static_cast<MapPoint*>(NULL);
            mCurrentFrame.mvbOutlier[i]=false;
            pMP->mbTrackInView = false;
            pMP->mnLastFrameSeen = mCurrentFrame.mnId;
            nmatches--;
        }
        else if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]->Observations(>0)
            nmatchesMap++;
    }
}
```

*SearchByBoW()函数

整个匹配过程, 没有使用OpenCV自带的函数, 使用的是DBoW2加速, 具体方法有待学习。输出结果中如何查看匹配关系: 每个当前帧中都含有参考关键帧, 也包含地图中相应地图点, 这其中按照位置(每行一一对应)与参考关键帧中地图点匹配, 未能匹配成功的当前帧地图点为空(NULL)。

匹配:

Ref KF:

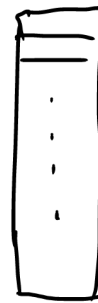
mp:



一行一个 Mp.

Cur Frame.

N个
Key
Point



N维.

我们想要找出 CurFrame 中 Key Point (2D)
与哪个 MapPoint (3D) 对应

```
//输入: (参考)关键帧, 当前帧, vpMapPointMatches为输出  
//输出: vpMapPointMatches当前帧与输入关键帧匹配成功的地图点  
int ORBmatcher::SearchByBow(KeyFrame* pKF, Frame &F, vector<MapPoint*>  
&vpMapPointMatches)
```

步骤一: 获取需要的数据

```
//vpMapPointsKF:输入(参考)关键帧关联的地图点  
const vector<MapPoint*> vpMapPointsKF = pKF->GetMapPointMatches();  
//初始化vpMapPointMatches, vector长度为F.N(当前帧关键点数量)  
vpMapPointMatches = vector<MapPoint*>(F.N, static_cast<MapPoint*>(NULL));  
//?  
const DBoW2::FeatureVector &vFeatVecKF = pKF->mFeatVec;  
//匹配数量  
int nmatches=0;  
//?  
vector<int> rotHist[HISTO_LENGTH];  
for(int i=0; i<HISTO_LENGTH; i++)  
    rotHist[i].reserve(500);  
const float factor = HISTO_LENGTH/360.0f;
```

步骤二: 进行ORB特征匹配(利用DBoW2加速)

```
// We perform the matching over ORB that belong to the same vocabulary node (at a  
certain level)  
// 将属于同一节点(特定层)的ORB特征进行匹配  
DBoW2::FeatureVector::const_iterator KFit = vFeatVecKF.begin();  
DBoW2::FeatureVector::const_iterator Fit = F.mFeatVec.begin();  
DBoW2::FeatureVector::const_iterator KFend = vFeatVecKF.end();  
DBoW2::FeatureVector::const_iterator Fend = F.mFeatVec.end();
```

步骤三: 加速匹配过程

```
while(KFit != KFend && Fit != Fend)  
{  
    if(KFit->first == Fit->first) //步骤1: 分别取出属于同一node的ORB特征点(只有属于同一  
node, 才有可能匹配点)
```



```

{
    const vector<unsigned int> vIndicesKF = KFit->second;
    const vector<unsigned int> vIndicesF = Fit->second;

    // 步骤2: 遍历KF中属于该node的特征点
    for(size_t iKF=0; iKF<vIndicesKF.size(); iKF++)
    {
        const unsigned int realIdxKF = vIndicesKF[iKF];

        MapPoint* pMP = vpMapPointsKF[realIdxKF]; // 取出KF中该特征对应的
MapPoint

        if(!pMP)
            continue;
        if(pMP->isBad())
            continue;

        const cv::Mat &dKF= pKF->mDescriptors.row(realIdxKF); // 取出KF中该特征
对应的描述子

        int bestDist1=256; // 最好的距离（最小距离）
        int bestIdxF =-1 ;
        int bestDist2=256; // 倒数第二好距离（倒数第二小距离）

        // 步骤3: 遍历F中属于该node的特征点，找到了最佳匹配点
        for(size_t iF=0; iF<vIndicesF.size(); iF++)
        {
            const unsigned int realIdxF = vIndicesF[iF];

            if(vpMapPointMatches[realIdxF])// 表明这个点已经被匹配过了，不再匹配，
加快速度

                continue;

            const cv::Mat &dF = F.mDescriptors.row(realIdxF); // 取出F中该特征
对应的描述子

            const int dist = DescriptorDistance(dKF,dF); // 求描述子的距离

            if(dist<bestDist1)// dist < bestDist1 < bestDist2, 更新bestDist1
bestDist2

            {
                bestDist2=bestDist1;
                bestDist1=dist;
                bestIdxF=realIdxF;
            }
            else if(dist<bestDist2)// bestDist1 < dist < bestDist2, 更新
bestDist2

            {
                bestDist2=dist;
            }
        }

        // 步骤4: 根据阈值 和 角度投票剔除误匹配
        if(bestDist1<=TH_LOW) // 匹配距离（误差）小于阈值
        {
            // trick!
            // 最佳匹配比次佳匹配明显要好，那么最佳匹配才真正靠谱
            if(static_cast<float>(bestDist1)<mfNNratio*static_cast<float>
(bestDist2))

```

```

    {
        // 步骤5: 更新特征点的MapPoint
        vpMapPointMatches[bestIdxF]=pMP;
        const cv::KeyPoint &kp = pKF->mvKeysUn[realIdxKF];

        if(mbCheckOrientation)
        {
            // trick!
            // angle: 每个特征点在提取描述子时的旋转主方向角度, 如果图像旋转
            // 了, 这个角度将发生改变

            // 所有的特征点的角度变化应该是一致的, 通过直方图统计得到最准确的角度变化值

            float rot = kp.angle-F.mvKeys[bestIdxF].angle;// 该特征点的角度变化值

            if(rot<0.0)
                rot+=360.0f;
            int bin = round(rot*factor);// 将rot分配到bin组
            if(bin==HISTO_LENGTH)
                bin=0;
            assert(bin>=0 && bin<HISTO_LENGTH);
            rotHist[bin].push_back(bestIdxF);
        }
        nmatches++;
    }

}

}
KFit++;
Fit++;
}
else if(KFit->first < Fit->first)
{
    KFit = vFeatVecKF.lower_bound(Fit->first);
}
else
{
    Fit = F.mFeatVec.lower_bound(KFit->first);
}
}
}

```

步骤四：剔除误匹配的点

```

// 根据方向剔除误匹配的点
if(mbCheckOrientation)
{
    int ind1=-1;
    int ind2=-1;
    int ind3=-1;
    // 计算rotHist中最大的三个的index
    ComputeThreeMaxima(rotHist,HISTO_LENGTH,ind1,ind2,ind3);

    for(int i=0; i<HISTO_LENGTH; i++)
    {
        // 如果特征点的旋转角度变化量属于这三个组, 则保留
        if(i==ind1 || i==ind2 || i==ind3)
            continue;
        // 将除了ind1 ind2 ind3以外的匹配点去掉
    }
}

```

```

        for(size_t j=0, jend=rotHist[i].size(); j<jend; j++)
        {
            vpMapPointMatches[rotHist[i][j]]=static_cast<MapPoint*>(NULL);
            nmatches--;
        }
    }
}

```

最后返回nmatches(成功匹配点数)。

*PoseOptimization()函数

简介：

```

/**
 * @brief Pose Only Optimization
 *
 * 3D-2D 最小化重投影误差  $e = (u,v) - \text{project}(T_{cw} * P_w)$  \n
 * 只优化Frame的Tcw, 不优化MapPoints的坐标
 *
 * 1. Vertex: g2o::VertexSE3Expmap(), 即当前帧的Tcw
 * 2. Edge:
 *     - g2o::EdgeSE3ProjectXYZOnlyPose(), BaseUnaryEdge
 *       + Vertex: 待优化当前帧的Tcw
 *       + measurement: MapPoint在当前帧中的二维位置(u,v)
 *       + InfoMatrix: invSigma2(与特征点所在的尺度有关)
 *     - g2o::EdgeStereSE3ProjectXYZOnlyPose(), BaseUnaryEdge
 *       + Vertex: 待优化当前帧的Tcw
 *       + measurement: MapPoint在当前帧中的二维位置(u1,v,ur)
 *       + InfoMatrix: invSigma2(与特征点所在的尺度有关)
 *
 * @param   pFrame Frame
 * @return  inliers数量
 */
/**使用currentFrame和MapPoints进行优化*/
int Optimizer::PoseOptimization(Frame *pFrame);

```

步骤一：构造g2o优化器

```

// 步骤1: 构造g2o优化器
//这个不是最新版g2o优化器构建方法, 但是无所谓
g2o::SparseOptimizer optimizer;//优化器
g2o::BlockSolver_6_3::LinearSolverType * linearSolver;//线性方程求解器

linearSolver = new g2o::LinearSolverDense<g2o::BlockSolver_6_3::PoseMatrixType>
();

g2o::BlockSolver_6_3 * solver_ptr = new g2o::BlockSolver_6_3(linearSolver);
//求解方法
g2o::OptimizationAlgorithmLevenberg* solver = new
g2o::OptimizationAlgorithmLevenberg(solver_ptr);
optimizer.setAlgorithm(solver);
//?
int nInitialCorrespondences=0;

```

步骤二：添加顶点

```

// Set Frame vertex
// 步骤2: 添加顶点: 待优化当前帧的Tcw
// 顶点类型为相机位姿节点
g2o::VertexSE3Expmap * vSE3 = new g2o::VertexSE3Expmap();
// 设置初始值, 为输入Frame(当前帧)的位姿
vSE3->setEstimate(Converter::toSE3Quat(pFrame->mTcw));
// 零号节点
vSE3->setId(0);
vSE3->setFixed(false);
// 添加节点
optimizer.addVertex(vSE3);

```

步骤三: 添加边

由于只优化一个相机位姿节点, 因此边全是一元边

```

// 步骤3: 添加一元边: 相机投影模型
unique_lock<mutex> lock(MapPoint::mGlobalMutex); // 线程同步锁
// N为当前帧关键点个数
for(int i=0; i<N; i++)
{
    // 直接获取当前帧地图点
    MapPoint* pMP = pFrame->mvpMapPoints[i];
    if(pMP) // 非空
    {
        // Monocular observation
        // 单目情况, 也有可能在双目下, 当前帧的左兴趣点找不到匹配的右兴趣点
        if(pFrame->mvuRight[i]<0)
        {
            nInitialCorrespondences++;
            pFrame->mvbOutlier[i] = false;
            // 像素坐标点 obs
            Eigen::Matrix<double, 2, 1> obs;
            // 当前帧中拿出特征点(KeyPoint)
            const cv::KeyPoint &kpUn = pFrame->mvKeysUn[i];
            // 给obs赋值
            obs << kpUn.pt.x, kpUn.pt.y;
            // 边: 投影一元边
            g2o::EdgeSE3ProjectXYZOnlyPose* e = new
g2o::EdgeSE3ProjectXYZOnlyPose();
            // 设置边的节点, 为0号节点
            e->setVertex(0, dynamic_cast<g2o::OptimizableGraph::Vertex*>
(optimizer.vertex(0)));
            // 设置观测值, 为obs(关键点像素坐标uv)
            e->setMeasurement(obs);
            // 设置信息矩阵
            const float invSigma2 = pFrame->mvInvLevelSigma2[kpUn.octave];
            e->setInformation(Eigen::Matrix2d::Identity()*invSigma2);
            // 核函数(LM优化)
            g2o::RobustKernelHuber* rk = new g2o::RobustKernelHuber;
            e->setRobustKernel(rk);
            rk->setDelta(deltaMono);
            // 设置K矩阵
            e->fx = pFrame->fx;
            e->fy = pFrame->fy;
            e->cx = pFrame->cx;
            e->cy = pFrame->cy;

```

```

//获取地图点3D位置(x,y,z)
cv::Mat Xw = pMP->GetWorldPos();
e->Xw[0] = Xw.at<float>(0);
e->Xw[1] = Xw.at<float>(1);
e->Xw[2] = Xw.at<float>(2);
//添加边
optimizer.addEdge(e);

vpEdgesMono.push_back(e);
vnIndexEdgeMono.push_back(i);
}
else // Stereo observation 双目
{
    nInitialCorrespondences++;
    pFrame->mvbOutlier[i] = false;

    //SET EDGE
    Eigen::Matrix<double,3,1> obs;// 这里和单目不同
    const cv::KeyPoint &kpUn = pFrame->mvKeysUn[i];
    const float &kp_ur = pFrame->mvuRight[i];
    obs << kpUn.pt.x, kpUn.pt.y, kp_ur;// 这里和单目不同

    g2o::EdgeStereoSE3ProjectXYZOnlyPose* e = new
g2o::EdgeStereoSE3ProjectXYZOnlyPose();// 这里和单目不同

    e->setVertex(0, dynamic_cast<g2o::OptimizableGraph::Vertex*>
(optimizer.vertex(0)));
    e->setMeasurement(obs);
    const float invSigma2 = pFrame->mvInvLevelSigma2[kpUn.octave];
    Eigen::Matrix3d Info = Eigen::Matrix3d::Identity()*invSigma2;
    e->setInformation(Info);

    g2o::RobustKernelHuber* rk = new g2o::RobustKernelHuber;
    e->setRobustKernel(rk);
    rk->setDelta(deltaStereo);

    e->fx = pFrame->fx;
    e->fy = pFrame->fy;
    e->cx = pFrame->cx;
    e->cy = pFrame->cy;
    e->bf = pFrame->mbf;
    cv::Mat Xw = pMP->GetWorldPos();
    e->Xw[0] = Xw.at<float>(0);
    e->Xw[1] = Xw.at<float>(1);
    e->Xw[2] = Xw.at<float>(2);

    optimizer.addEdge(e);

    vpEdgesStereo.push_back(e);
    vnIndexEdgeStereo.push_back(i);
}
}
}

```

步骤四：开始优化

```

// We perform 4 optimizations, after each optimization we classify observation as
inlier/outlier
// At the next optimization, outliers are not included, but at the end they can
be classified as inliers again.
// 步骤4: 开始优化, 总共优化四次, 每次优化后, 将观测分为outlier和inlier, outlier不参与下次优
化
// 由于每次优化后是对所有的观测进行outlier和inlier判别, 因此之前被判别为outlier有可能变成
inlier, 反之亦然
// 基于卡方检验计算出的阈值 (假设测量有一个像素的偏差)
const float chi2Mono[4]={5.991,5.991,5.991,5.991};
const float chi2Stereo[4]={7.815,7.815,7.815, 7.815};
const int its[4]={10,10,10,10}; // 四次迭代, 每次迭代的次数

int nBad=0;
for(size_t it=0; it<4; it++)
{

    vSE3->setEstimate(Converter::toSE3Quat(pFrame->mTcw));
    optimizer.initializeOptimization(0); // 对level为0的边进行优化
    optimizer.optimize(its[it]);

    nBad=0;
    for(size_t i=0, iend=vpEdgesMono.size(); i<iend; i++)
    {
        g2o::EdgeSE3ProjectXYZOnlyPose* e = vpEdgesMono[i];

        const size_t idx = vnIndexEdgeMono[i];

        if(pFrame->mvbOutlier[idx])
        {
            e->computeError(); // NOTE g2o只会计算active edge的误差
        }

        const float chi2 = e->chi2();

        if(chi2>chi2Mono[it])
        {
            pFrame->mvbOutlier[idx]=true;
            e->setLevel(1); // 设置为outlier
            nBad++;
        }
        else
        {
            pFrame->mvbOutlier[idx]=false;
            e->setLevel(0); // 设置为inlier
        }

        if(it==2)
            e->setRobustKernel(0); // 除了前两次优化需要RobustKernel以外, 其余的优化都
不需要
    }

    for(size_t i=0, iend=vpEdgesStereo.size(); i<iend; i++)
    {
        g2o::EdgeStereoSE3ProjectXYZOnlyPose* e = vpEdgesStereo[i];

        const size_t idx = vnIndexEdgeStereo[i];

```

```

        if(pFrame->mvbOutlier[idx])
        {
            e->computeError();
        }

        const float chi2 = e->chi2();

        if(chi2>chi2Stereo[it])
        {
            pFrame->mvbOutlier[idx]=true;
            e->setLevel(1);
            nBad++;
        }
        else
        {
            e->setLevel(0);
            pFrame->mvbOutlier[idx]=false;
        }

        if(it==2)
            e->setRobustKernel(0);
    }

    if(optimizer.edges().size()<10)
        break;
}

// Recover optimized pose and return number of inliers
g2o::VertexSE3Expmap* vSE3_recov = static_cast<g2o::VertexSE3Expmap*>
(optimizer.vertex(0));
g2o::SE3Quat SE3quat_recov = vSE3_recov->estimate();
cv::Mat pose = Converter::toCvMat(SE3quat_recov);
pFrame->SetPose(pose);

```

步骤五：设置优化位姿与返回值

```

// Recover optimized pose and return number of inliers
g2o::VertexSE3Expmap* vSE3_recov = static_cast<g2o::VertexSE3Expmap*>
(optimizer.vertex(0));
g2o::SE3Quat SE3quat_recov = vSE3_recov->estimate();
cv::Mat pose = Converter::toCvMat(SE3quat_recov);
pFrame->SetPose(pose);

return nInitialCorrespondences-nBad;

```

II. TrackWithMotionModel()函数

若速度不为空或者刚刚进行重定位时，我们根据匀速模型跟踪

```

else
{
    // 根据恒速模型设定当前帧的初始位姿
    // 通过投影的方式在参考帧中找当前帧特征点的匹配点
    // 优化每个特征点所对应3D点的投影误差即可得到位姿
    bOK = TrackWithMotionModel();
    if(!bOK)
        // TrackReferenceKeyFrame是跟踪参考帧，不能根据固定运动速度模型预测当前帧的位姿态，
        通过bow加速匹配（SearchByBow）
        // 最后通过优化得到优化后的位姿
        bOK = TrackReferenceKeyFrame();
}

```

与4中不同的是，匀速模型是先利用速度给出一个当前位姿初始值，从这个初始值中找到周围与参考帧匹配的特征点，进行BA优化(优化投影误差)。

*详细实现

步骤1：首先调用UpdateLastFrame()函数，并根据速度模型，直接估计出当前位姿

```

// Update last frame pose according to its reference keyframe
// Create "visual odometry" points
// 步骤1：对于双目或rgb-d摄像头，根据深度值为上一关键帧生成新的MapPoints
// （跟踪过程中需要将当前帧与上一帧进行特征点匹配，将上一帧的MapPoints投影到当前帧可以缩小匹配范围）
// 在跟踪过程中，去除outlier的MapPoint，如果不及时增加MapPoint会逐渐减少
// 这个函数的功能就是补充增加RGBD和双目相机上一帧的MapPoints数
UpdateLastFrame();

// 根据Const Velocity Model(认为这两帧之间的相对运动和之前两帧间相对运动相同)估计当前帧的位姿
//注意：UpdateLastFrame函数中，更新了上一帧的位姿
mCurrentFrame.SetPose(mVelocity*mLastFrame.mTcw);

```

接下来调用fill，将当前帧的地图点设置为NULL

```

fill(mCurrentFrame.mvpMapPoints.begin(),mCurrentFrame.mvpMapPoints.end(),static_cast<MapPoint*>(NULL));

```

步骤2：

```

// 步骤2：根据匀速度模型进行对上一帧的MapPoints进行跟踪
// 根据上一帧特征点对应的3D点投影的位置缩小特征点匹配范围
int nmatches =
matcher.SearchByProjection(mCurrentFrame,mLastFrame,th,mSensor==System::MONOCULAR);
//通过投影关系找到匹配点

// If few matches, uses a wider window search
// 如果跟踪的点少，则扩大搜索半径再来一次
if(nmatches<20)
{
    //fill全赋值为NULL，再尝试一次

    fill(mCurrentFrame.mvpMapPoints.begin(),mCurrentFrame.mvpMapPoints.end(),static_cast<MapPoint*>(NULL));
}

```



```

    nmatches =
matcher.SearchByProjection(mCurrentFrame,mLastFrame,2*th,mSensor==System::MONOCUL
AR); // 2*th
}
//点太少, 则匀速运动模型失效, 返回false
if(nmatches<20)
    return false;

```

步骤3:

```

Optimizer::PoseOptimization(&mCurrentFrame); //优化位姿

```

步骤4:

```

// 步骤4: 优化位姿后剔除outlier的mvpMapPoints
int nmatchesMap = 0;
for(int i =0; i<mCurrentFrame.N; i++)
{
    if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i])
    { //地图点非空
        if(mCurrentFrame.mvbOutlier[i])
        { //地图点为outlier
            MapPoint* pMP = mCurrentFrame.mvpMapPoints[i];
            mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]=static_cast<MapPoint*>(NULL);
            mCurrentFrame.mvbOutlier[i]=false;
            pMP->mbTrackInView = false;
            pMP->mnLastFrameSeen = mCurrentFrame.mnId;
            nmatches--;
        }
        else if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]->Observations()>0)
            nmatchesMap++;
    }
}
...
return nmatchesMap>=10;

```

*UpdateLastFrame()函数

概述:

```

/**
 * @brief 双目或rgb摄像头根据深度值为上一帧产生新的MapPoints
 *
 * 在双目和rgb情况下, 选取一些深度小一些的点 (可靠一些) \n
 * 可以通过深度值产生一些新的MapPoints
 */

```

步骤一:

```

// 步骤1: 更新最近一帧的位姿
KeyFrame* pRef = mLastFrame.mpReferenceKF;
//mRelativeFramePoses:
// Lists used to recover the full camera trajectory at the end of the execution.
// Basically we store the reference keyframe for each frame and its relative
transformation

```

```
//Tlr 参考关键帧到上一帧坐标系的位姿变换(ref -> last)
cv::Mat Tlr = mRelativeFramePoses.back();

//pRef->GetPose() 获取关键帧的位姿
mLastFrame.SetPose(Tlr*pRef->GetPose()); // Tlr*Trw = Tlw 1:last r:reference
w:world

// 如果上一帧为关键帧, 或者单目的情况, 则退出
if(mnLastKeyFrameId==mLastFrame.mnId || mSensor==System::MONOCULAR)
    return;
```

步骤二(针对RBGD和双目):

*SearchByProjection()函数

概述:

```
/**
 * @brief 通过投影, 对上一帧的特征点进行跟踪
 *
 * 上一帧中包含了MapPoints, 对这些MapPoints进行tracking, 由此增加当前帧的MapPoints \n
 * 1. 将上一帧的MapPoints投影到当前帧(根据速度模型可以估计当前帧的Tcw)
 * 2. 在投影点附近根据描述子距离选取匹配, 以及最终的方向投票机制进行剔除
 * @param CurrentFrame 当前帧
 * @param LastFrame 上一帧
 * @param th 阈值
 * @param bMono 是否为单目
 * @return 成功匹配的数量
 * @see SearchByBow()
 */
int ORBmatcher::SearchByProjection(Frame &CurrentFrame, const Frame &LastFrame,
const float th, const bool bMono);
```

步骤一: 获取需要数据(位姿), (非单目情况)并判断是前进还是后退

这里是通过投影跟踪, 我们的目的是找到与当前帧关键点匹配的(在上一帧中的)地图点。方法就是将上一帧地图点投影到当前帧中, 在当前帧中与在一定半径范围内的关键点描述子进行匹配。这样做的目的是减小了搜索范围, 使得匹配速度快、结果准确。(因为时间间隔较小, 关键点一般不会跑太远; 若这么做无法匹配成功, 则代表运动模型失效(强旋转可能会导致这种情况))。

```
// Rotation Histogram (to check rotation consistency)
vector<int> rotHist[HISTO_LENGTH];
for(int i=0;i<HISTO_LENGTH;i++)
    rotHist[i].reserve(500);
const float factor = HISTO_LENGTH/360.0f;

const cv::Mat Rcw = CurrentFrame.mTcw.rowRange(0,3).colRange(0,3);
const cv::Mat tcw = CurrentFrame.mTcw.rowRange(0,3).col(3);

const cv::Mat twc = -Rcw.t()*tcw; // twc(w)

const cv::Mat Rlw = LastFrame.mTcw.rowRange(0,3).colRange(0,3);
const cv::Mat tlw = LastFrame.mTcw.rowRange(0,3).col(3); // tlw(l)

// vector from LastFrame to CurrentFrame expressed in LastFrame
const cv::Mat tlc = Rlw*twc+tlw; // Rlw*twc(w) = twc(l), twc(l) + tlw(l) = tlc(l)
```

```
// 判断前进还是后退
const bool bForward = tlc.at<float>(2)>CurrentFrame.mb && !bMono; // 非单目情况, 如果Z大于基线, 则表示前进
const bool bBackward = -tlc.at<float>(2)>CurrentFrame.mb && !bMono; // 非单目情况, 如果Z小于基线, 则表示前进
```

步骤二：还原上一帧MapPoints在当前图像中的像素坐标uv

```
// 对上一帧有效的MapPoints进行跟踪
// Project
//x3Dw 地图点的世界3D坐标
cv::Mat x3Dw = pMP->GetWorldPos();
//x3Dc 当前帧坐标系下其坐标(当前帧位姿已经利用匀速模型估计完毕)
cv::Mat x3Dc = Rcw*x3Dw+tcw;

const float xc = x3Dc.at<float>(0);
const float yc = x3Dc.at<float>(1);
const float invzc = 1.0/x3Dc.at<float>(2);

if(invzc<0)
    continue;
//image pixel coordinate(u,v)
//投影至像素坐标系
float u = CurrentFrame.fx*xc*invzc+CurrentFrame.cx;
float v = CurrentFrame.fy*yc*invzc+CurrentFrame.cy;
//若超出图像范围, 则该点舍弃 continue
if(u<CurrentFrame.mnMinX || u>CurrentFrame.mnMaxX)
    continue;
if(v<CurrentFrame.mnMinY || v>CurrentFrame.mnMaxY)
    continue;
```

步骤三：在一定范围内(2D)搜索

```
// Search in a window. Size depends on scale
float radius = th*CurrentFrame.mvScaleFactors[nLastOctave]; // 尺度越大, 搜索范围越大

vector<size_t> vIndices2;

// NOTE 尺度越大, 图像越小
// 以下可以这么理解, 例如一个有一定面积的圆点, 在某个尺度n下它是一个特征点
// 当前进时, 圆点的面积增大, 在某个尺度m下它是一个特征点, 由于面积增大, 则需要在更高的尺度下才能检测出来
// 因此m>=n, 对应前进的情况, nCurOctave>=nLastOctave。后退的情况可以类推
if(bForward) // 前进, 则上一帧兴趣点在所在的尺度nLastOctave<=nCurOctave
    vIndices2 = CurrentFrame.GetFeaturesInArea(u,v, radius, nLastOctave);
else if(bBackward) // 后退, 则上一帧兴趣点在所在的尺度0<=nCurOctave<=nLastOctave
    vIndices2 = CurrentFrame.GetFeaturesInArea(u,v, radius, 0, nLastOctave);
else // 在[nLastOctave-1, nLastOctave+1]中搜索
    vIndices2 = CurrentFrame.GetFeaturesInArea(u,v, radius, nLastOctave-1, nLastOctave+1);
```

步骤四：遍历满足条件的特征点，取得最好的匹配

```
// 遍历满足条件的特征点
for(vector<size_t>::const_iterator vit=vIndices2.begin(), vend=vIndices2.end(); vit!=vend; vit++)
```

```

{
    // 如果该特征点已经有对应的MapPoint了,则退出该次循环
    const size_t i2 = *vit;
    if(CurrentFrame.mvpMapPoints[i2])
        if(CurrentFrame.mvpMapPoints[i2]->Observations(>0)
            continue;

    if(CurrentFrame.mvuRight[i2]>0)
    {
        // 双目和rgbd的情况, 需要保证右图的点也在搜索半径以内
        const float ur = u - CurrentFrame.mbf*invzc;
        const float er = fabs(ur - CurrentFrame.mvuRight[i2]);
        if(er>radius)
            continue;
    }

    const cv::Mat &d = CurrentFrame.mDescriptors.row(i2);

    const int dist = DescriptorDistance(dMP,d);

    if(dist<bestDist)
    {
        //更新最佳(描述子匹配)距离
        bestDist=dist;
        bestIdx2=i2;
    }
}
}

```

步骤五：根据阈值和角度投票剔除误匹配，并为当前帧添加地图点

```

// 详见SearchByBow(KeyFrame* pKF,Frame &F, vector<MapPoint*> &vpMapPointMatches)函数
数步骤4

//与上一帧中的地图点进行最佳匹配
//我们依然通过代码可以得知：当前帧的KeyPoints容器 和 MapPoints容器是通过匹配关系对应的
//例如：第二个KeyPoint 和 第二个MapPoints 是对应的(即被认定为是一个点)
//优化过程中，直接就可以使用匹配关系

```

III. Relocalization()函数

若跟踪失败，则启用：

```

else
{
    // BOW搜索, PnP求解位姿
    bOK = Relocalization();
}

```

*详细讲解

步骤1：

```
// Compute Bag of Words Vector
// 步骤1: 计算当前帧特征点的Bow映射(向量)
mCurrentFrame.ComputeBow();
```

步骤2:

```
// Relocalization is performed when tracking is lost
// Track Lost: Query KeyFrame Database for keyframe candidates for relocalisation
// 步骤2: 找到与当前帧相似的候选关键帧
vector<KeyFrame*> vpCandidateKFs = mpKeyFrameDB->
DetectRelocalizationCandidates(&mCurrentFrame);
//无相似候选关键帧, 重定位失败, 返回false
if(vpCandidateKFs.empty())
    return false;
//nKFs为与当前帧相似的候选关键帧数量
const int nKFs = vpCandidateKFs.size();
```

步骤3:

我们将当前帧与候选关键帧进行ORB特征点匹配, 若有足够的特征点, 则使用PnP算法重定位当前位姿。(此部分因为涉及到PnP算法以及EPnP算法, 待续未完)

```
// We perform first an ORB matching with each candidate
// If enough matches are found we setup a PnP solver
ORBmatcher matcher(0.75,true);

vector<PnP solver*> vpPnP solvers;
vpPnP solvers.resize(nKFs);

vector<vector<MapPoint*> > vvpMapPointMatches;
vvpMapPointMatches.resize(nKFs);

vector<bool> vbDiscarded;
vbDiscarded.resize(nKFs);

int nCandidates=0;

for(int i=0; i<nKFs; i++)
{
    KeyFrame* pKF = vpCandidateKFs[i];
    if(pKF->isBad())
        vbDiscarded[i] = true;
    else
    {
        // 步骤3: 通过Bow进行匹配
        int nmatches =
matcher.SearchByBow(pKF,mCurrentFrame,vvpMapPointMatches[i]);
        if(nmatches<15)
        {
            vbDiscarded[i] = true;
            continue;
        }
        else
        {
            // 初始化PnP solver
```

```

        PnP solver* pSolver = new
PnP solver(mCurrentFrame, vvpMapPointMatches[i]);
        pSolver->SetRansacParameters(0.99,10,300,4,0.5,5.991);
        vpPnP solvers[i] = pSolver;
        nCandidates++;
    }
}
}

```

此部分待续未完

IV. TrackLocalMap()函数

```

// We have an estimation of the camera pose and some map points tracked in the
frame.
// We retrieve the local map and try to find matches to points in the local map.

```

这是在当前帧位姿得到初始值(经过一次仅优化位姿的BA)后进行的操作。跟踪局部地图。在这之前，程序中会将当前帧的参考关键帧进行设置：

```

// 将最新的关键帧作为reference frame
mCurrentFrame.mpReferenceKF = mpReferenceKF;
//论文中也讲到了参考关键帧的定义：
//我们设定一个局部地图，关键帧集合K1为与当前帧共享地图点的关键帧；K2为集合K1的共视图
//邻居(neighbors)。局部地图也有参考关键帧，属于集合K1，其与当前帧共享最多地图点。
//参考关键帧的建立我们后续讲解

```

这时候，我们就进行TrackLocalMap()函数

```

// If we have an initial estimation of the camera pose and matching. Track the
local map.
// 步骤2.2: 在帧间匹配得到初始的姿态后，现在对local map进行跟踪得到更多的匹配，并优化当前位姿
// local map:当前帧、当前帧的MapPoints、当前关键帧与其它关键帧共视关系
// 在步骤2.1中主要是两两跟踪（恒速模型跟踪上一帧、跟踪参考帧），这里搜索局部关键帧后搜集所有局部
MapPoints,
// 然后将局部MapPoints和当前帧进行投影匹配，得到更多匹配的MapPoints后进行Pose优化
if(!mbOnlyTracking)
{
    if(bOK)
        bOK = TrackLocalMap();
}

```

在这之后，当前帧的位姿估计加优化到此结束，接下来判定跟踪是否成功，并且将其可视化，如下：

```

//判断跟踪状态
if(bOK)
    mState = OK;
else
    mState=LOST;

// Update drawer
mpFrameDrawer->Update(this);
mpFrameDrawer->LK = LKimg;

```

*详细讲解

步骤1:

```
// Update Local KeyFrames and Local Points
// 步骤1: 更新局部关键帧mvpLocalKeyFrames和局部地图点mvpLocalMapPoints
UpdateLocalMap();
```

步骤2:

```
// 步骤2: 在局部地图中查找与当前帧匹配的MapPoints
SearchLocalPoints();
```

步骤3:

```
// Optimize Pose
// 在这个函数之前, 在Relocalization、TrackReferenceKeyFrame、TrackWithMotionModel中都有位姿优化,
// 步骤3: 更新局部所有MapPoints后对位姿再次优化
Optimizer::PoseOptimization(&mCurrentFrame);
//这里调用的PoseOptimization函数, 仍然是只对位姿进行优化, 只是在局部地图中
//多了更多的与当前帧关联的地图点, 使得当前位姿更加准确
mnMatchesInliers = 0;
```

步骤4:

```
// Update MapPoints Statistics
// 步骤3: 更新当前帧的MapPoints被观测程度, 并统计跟踪局部地图的效果
//更改地图的被观测程度:IncreaseFound()
//统计局部地图跟踪效果:mnMatchesInliers
for(int i=0; i<mCurrentFrame.N; i++)
{
    if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i])
    {
        // 由于当前帧的MapPoints可以被当前帧观测到, 其被观测统计量加1
        if(!mCurrentFrame.mvbOutlier[i])
        {
            //IncreaseFound(int i=1)函数
            //增加该地图点被观测到的次数, 增加个数为n(默认为1)
            //这里加1是因为此地图点可以被当前帧观测
            mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]->IncreaseFound();
            if(!mbOnlyTracking)
            {
                // 该MapPoint被其它关键帧观测到过
                if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]->Observations()>0)
                    mnMatchesInliers++;
            }
            else
                // 记录当前帧跟踪到的MapPoints, 用于统计跟踪效果
                mnMatchesInliers++;
        }
        else if(mSensor==System::STEREO)
            mCurrentFrame.mvpMapPoints[i] = static_cast<MapPoint*>(NULL);
    }
}
```

步骤4:

```
// Decide if the tracking was succesful
// More restrictive if there was a relocalization recently
// 步骤4: 决定是否跟踪成功
//若当前帧id 小于 最近一次重定位帧id+最大间隔帧数(含义未懂) 且 有效的地图点小于50个
//可以翻译为 最近才进行重定位
if(mCurrentFrame.mnId<mnLastRelocFrameId+mMaxFrames && mnMatchesInliers<50)
    return false;
//有效地图点小于30个
if(mnMatchesInliers<30)
    return false;
else
    return true;
```

*UpdateLocalMap()函数

概况:

```
/**
 * @brief 更新LocalMap
 *
 * 局部地图包括: \n
 * - K1个关键帧、K2个临近关键帧和参考关键帧
 * - 由这些关键帧观测到的MapPoints
 * - 更新局部地图 包括 更新局部关键帧(见论文) 和 局部地图点(局部关键帧中的地图点)
 */
void Tracking::UpdateLocalMap()
{
    // This is for visualization
    // 这行程序放在UpdateLocalPoints函数后面是不是好一些
    mpMap->SetReferenceMapPoints(mvpLocalMapPoints);

    // Update
    // 更新局部关键帧和局部MapPoints
    UpdateLocalKeyFrames();
    UpdateLocalPoints();
}
```

步骤一: SetReferenceMapPoints(mvpLocalMapPoints)

设置参考地图点, 用于DrawMapPoints画图

步骤二: 更新局部地图关键帧

我们根据论文可以知道局部地图的管理包括: 局部关键帧、局部地图点。

这里更新局部地图关键帧, 详见论文部分。

```
/**
 * @brief 更新局部关键帧, called by UpdateLocalMap()
 *
 * 遍历当前帧的MapPoints, 将观测到这些MapPoints的关键帧和相邻的关键帧取出, 更新
 mvpLocalKeyFrames
 */
void Tracking::UpdateLocalKeyFrames()
{
}
```



```

// Each map point vote for the keyframes in which it has been observed
// 步骤1: 遍历当前帧的MapPoints, 记录所有能观测到当前帧MapPoints的关键帧
map<KeyFrame*,int> keyframeCounter;
for(int i=0; i<mCurrentFrame.N; i++)
{
    if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i])
    {
        //取出当前帧地图点
        MapPoint* pMP = mCurrentFrame.mvpMapPoints[i];
        if(!pMP->isBad())
        {
            // 能观测到当前帧MapPoints的关键帧    我们保存这些关键帧
            const map<KeyFrame*,size_t> observations = pMP-
>GetObservations();
            for(map<KeyFrame*,size_t>::const_iterator
it=observations.begin(), itend=observations.end(); it!=itend; it++)
                keyframeCounter[it->first]++;
        }
        else
        {
            //对应地图点是不好的, 删除
            mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]=NULL;
        }
    }
}
//若没有能观测到当前帧地图点的关键帧
if(keyframeCounter.empty())
    return;

int max=0;
KeyFrame* pKFmax= static_cast<KeyFrame*>(NULL);

// 步骤2: 更新局部关键帧 (mvpLocalKeyFrames), 添加局部关键帧有三个策略
// 先清空局部关键帧
mvpLocalKeyFrames.clear();
mvpLocalKeyFrames.reserve(3*keyframeCounter.size());

// All keyframes that observe a map point are included in the local map. Also
check which keyframe shares most points
// V-D K1: shares the map points with current frame
// 策略1: 能观测到当前帧MapPoints的关键帧作为局部关键帧
for(map<KeyFrame*,int>::const_iterator it=keyframeCounter.begin(),
itEnd=keyframeCounter.end(); it!=itEnd; it++)
{
    KeyFrame* pKF = it->first;

    if(pKF->isBad())
        continue;

    if(it->second>max)
    {
        max=it->second;
        pKFmax=pKF;
    }

    mvpLocalKeyFrames.push_back(it->first);
    // mnTrackReferenceForFrame防止重复添加局部关键帧
    pKF->mnTrackReferenceForFrame = mCurrentFrame.mnId;
}

```

```

}

// Include also some not-already-included keyframes that are neighbors to
already-included keyframes
// V-D K2: neighbors to K1 in the covisibility graph
// 策略2: 与策略1得到的局部关键帧共视程度很高的关键帧作为局部关键帧
for(vector<KeyFrame*>::const_iterator itKF=mvpLocalKeyFrames.begin(),
itEndKF=mvpLocalKeyFrames.end(); itKF!=itEndKF; itKF++)
{
    // Limit the number of keyframes
    if(mvpLocalKeyFrames.size()>80)
        break;

    KeyFrame* pKF = *itKF;

    // 策略2.1:最佳共视的10帧
    const vector<KeyFrame*> vNeighs = pKF->GetBestCovisibilityKeyFrames(10);
    for(vector<KeyFrame*>::const_iterator itNeighKF=vNeighs.begin(),
itEndNeighKF=vNeighs.end(); itNeighKF!=itEndNeighKF; itNeighKF++)
    {
        KeyFrame* pNeighKF = *itNeighKF;
        if(!pNeighKF->isBad())
        {
            // mnTrackReferenceForFrame防止重复添加局部关键帧
            if(pNeighKF->mnTrackReferenceForFrame!=mCurrentFrame.mnId)
            {
               .mvpLocalKeyFrames.push_back(pNeighKF);
                pNeighKF->mnTrackReferenceForFrame=mCurrentFrame.mnId;
                break;
            }
        }
    }

    // 策略2.2:自己的子关键帧
    const set<KeyFrame*> spChilids = pKF->GetChilids();
    for(set<KeyFrame*>::const_iterator sit=spChilids.begin(),
send=spChilids.end(); sit!=send; sit++)
    {
        KeyFrame* pChildKF = *sit;
        if(!pChildKF->isBad())
        {
            if(pChildKF->mnTrackReferenceForFrame!=mCurrentFrame.mnId)
            {
               .mvpLocalKeyFrames.push_back(pChildKF);
                pChildKF->mnTrackReferenceForFrame=mCurrentFrame.mnId;
                break;
            }
        }
    }

    // 策略2.3:自己的父关键帧
    KeyFrame* pParent = pKF->GetParent();
    if(pParent)
    {
        // mnTrackReferenceForFrame防止重复添加局部关键帧
        if(pParent->mnTrackReferenceForFrame!=mCurrentFrame.mnId)
        {

```

```

        mvpLocalKeyFrames.push_back(pParent);
        pParent->mnTrackReferenceForFrame=mCurrentFrame.mnId;
        break;
    }
}

// V-D Kref: shares the most map points with current frame
// 步骤3: 更新当前帧的参考关键帧, 与自己共视程度最高的关键帧作为参考关键帧
if(pKFmax)
{
    mpReferenceKF = pKFmax;
    mCurrentFrame.mpReferenceKF = mpReferenceKF;
}
}

```

步骤三：更新局部关键点

```

/**
 * @brief 更新局部关键点, called by UpdateLocalMap()
 *
 * 局部关键帧mvpLocalKeyFrames的MapPoints, 更新mvpLocalMapPoints
 */
void Tracking::UpdateLocalPoints()
{
    // 步骤1: 清空局部MapPoints
    mvpLocalMapPoints.clear();

    // 步骤2: 遍历局部关键帧mvpLocalKeyFrames
    for(vector<KeyFrame*>::const_iterator itKF=mvpLocalKeyFrames.begin(),
        itEndKF=mvpLocalKeyFrames.end(); itKF!=itEndKF; itKF++)
    {
        KeyFrame* pKF = *itKF;
        const vector<MapPoint*> vpMPs = pKF->GetMapPointMatches();

        // 步骤2: 将局部关键帧的MapPoints添加到mvpLocalMapPoints
        for(vector<MapPoint*>::const_iterator itMP=vpMPs.begin(),
            itEndMP=vpMPs.end(); itMP!=itEndMP; itMP++)
        {
            MapPoint* pMP = *itMP;
            if(!pMP)
                continue;
            // mnTrackReferenceForFrame防止重复添加局部MapPoint
            if(pMP->mnTrackReferenceForFrame==mCurrentFrame.mnId)
                continue;
            if(!pMP->isBad())
            {
                mvpLocalMapPoints.push_back(pMP);
                pMP->mnTrackReferenceForFrame=mCurrentFrame.mnId;
            }
        }
    }
}

```

*SearchLocalPoints()函数

在局部地图更新完毕后，我们在局部地图中找到当前帧视野范围内的地图点，并且用这些点与当前帧关键点(KeyPoints)进行匹配。

步骤一：先遍历当前帧中的地图点

当前帧中的地图点不需要匹配，这必是可以被当前帧观测到的。节约时间。

```
// Do not search map points already matched
// 步骤1: 遍历当前帧的mvpMapPoints, 标记这些MapPoints不参与之后的搜索
// 因为当前的mvpMapPoints一定在当前帧的视野中
for(vector<MapPoint*>::iterator vit=mCurrentFrame.mvpMapPoints.begin(),
vend=mCurrentFrame.mvpMapPoints.end(); vit!=vend; vit++)
{
    MapPoint* pMP = *vit;
    if(pMP)
    {
        if(pMP->isBad())
        {
            *vit = static_cast<MapPoint*>(NULL);
        }
        else
        {
            // 更新能观测到该点的帧数加1
            pMP->IncreaseVisible();
            // 标记该点被当前帧观测到
            pMP->mnLastFrameSeen = mCurrentFrame.mnId;
            // 标记该点将来不被投影, 因为已经匹配过
            pMP->mbTrackInView = false;
        }
    }
}
```

步骤二：将局部地图点投影到当前帧，在范围之内搜索最佳匹配

```
// Project points in frame and check its visibility
// 步骤2: 将所有局部MapPoints投影到当前帧, 判断是否在视野范围内, 然后进行投影匹配
for(vector<MapPoint*>::iterator vit=mvpLocalMapPoints.begin(),
vend=mvpLocalMapPoints.end(); vit!=vend; vit++)
{
    MapPoint* pMP = *vit;

    // 已经被当前帧观测到MapPoint不再判断是否能被当前帧观测到
    if(pMP->mnLastFrameSeen == mCurrentFrame.mnId)
        continue;
    if(pMP->isBad())
        continue;

    // Project (this fills MapPoint variables for matching)
    // 步骤2.1: 判断LocalMapPoints中的点是否在在视野内
    if(mCurrentFrame.isInFrustum(pMP, 0.5))
    {
        // 观测到该点的帧数加1, 该MapPoint在某些帧的视野范围内
        pMP->IncreaseVisible();
        // 只有在视野范围内的MapPoints才参与之后的投影匹配
        nToMatch++;
    }
}
```

```

    }
}

```

步骤三：投影匹配

```

if(nToMatch>0)
{
    //有除了自身地图点的其他地图点可以被观测到
    ORBmatcher matcher(0.8);
    int th = 1;
    if(mSensor==System::RGBD)
        th=3;
    // If the camera has been relocalised recently, perform a coarser search
    // 如果不久前进行过重定位，那么进行一个更加宽泛的搜索，阈值需要增大
    if(mCurrentFrame.mnId<mnLastRelocFrameId+2)
        th=5;

    // 步骤2.2：对视野范围内的MapPoints通过投影进行特征点匹配
    matcher.SearchByProjection(mCurrentFrame,mvpLocalMapPoints,th);
}

```

V. 新关键帧的建立

新建关键帧的条件：跟踪成功(**bOK == true**)。

首先，跟踪匀速运动模型，为了下帧关键帧跟踪。

```

if(!mLastFrame.mTcw.empty())//上一帧位姿非空
{
    //这里的速度更新上面讲过了
    // 步骤2.3：更新恒速运动模型TrackWithMotionModel中的mVelocity
    cv::Mat LastTwc = cv::Mat::eye(4,4,CV_32F);
    mLastFrame.GetRotationInverse().copyTo(LastTwc.rowRange(0,3).colRange(0,3));
    mLastFrame.GetCameraCenter().copyTo(LastTwc.rowRange(0,3).col(3));
    mVelocity = mCurrentFrame.mTcw*LastTwc; // Tc1
}
else
    mVelocity = cv::Mat();

```

$$\begin{aligned}
 p_{c1} &= T_{cw1}p \\
 p_{c2} &= T_{cw2}p \\
 p_{c2} &= T_{cw2}T_{cw1}^{-1}p_{c1}
 \end{aligned}$$

接下来，清除临时地图点

```

// Clean VO matches
// 步骤2.4：清除UpdateLastFrame中为当前帧临时添加的MapPoints
for(int i=0; i<mCurrentFrame.N; i++)//mCurrentFrame.N为当前帧的关键点数量
{
    MapPoint* pMP = mCurrentFrame.mvpMapPoints[i];
    if(pMP)
        // 排除UpdateLastFrame函数中为了跟踪增加的MapPoints
        if(pMP->Observations()<1)//可以被多少关键帧观测到
        {
            //不能被关键帧观测到，则删除地图点

```

```

        mCurrentFrame.mvbOutlier[i] = false;
        mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]=static_cast<MapPoint*>(NULL);
    }
}

```

继续清除

```

// Delete temporal MapPoints
// 步骤2.5: 清除临时的MapPoints, 这些MapPoints在TrackWithMotionModel的UpdateLastFrame
函数里生成 (仅双目和rgb)
// 步骤2.4中只是在当前帧中将这些MapPoints剔除, 这里从MapPoints数据库中删除
// 这里生成的仅仅是为了提高双目或rgb摄像头的帧间跟踪效果, 用完以后就扔了, 没有添加到地图中
for(list<MapPoint*>::iterator lit = mlpTemporalPoints.begin(), lend =
    mlpTemporalPoints.end(); lit!=lend; lit++)
{
    MapPoint* pMP = *lit;
    delete pMP;
}
// 这里不仅仅是清除mlpTemporalPoints, 通过delete pMP还删除了指针指向的MapPoint
mlpTemporalPoints.clear();

```

检测是否需要关键帧: **NeedNewKeyFrame()**和**CreateNewKeyFrame()**

```

if(needNewKF)
    CreateNewKeyFrame();

```

最终, 删除BA中检测为outlier的3D mapPoints

```

// We allow points with high innovation (considered outliers by the Huber
Function)
// pass to the new keyframe, so that bundle adjustment will finally decide
// if they are outliers or not. We don't want next frame to estimate its position
// with those points so we discard them in the frame.
// 删除那些在bundle adjustment中检测为outlier的3D map点
for(int i=0; i<mCurrentFrame.N;i++)
{
    if(mCurrentFrame.mvpMapPoints[i] && mCurrentFrame.mvbOutlier[i])
        mCurrentFrame.mvpMapPoints[i]=static_cast<MapPoint*>(NULL);
}

```

*详细讲解: **NeedNewKeyFrame()**和**CreateNewKeyFrame()**

***NeedNewKeyFrame()**

VI. 跟踪失败且重定位也失败的情况

这里对应初始化的if(是否初始化), 也就是跟踪的最大框。当 当前帧位姿估计失败, 重定位也失败了, 只能重启(Reset)。

```

if(mState==LOST)
{
    if(mpMap->KeyFramesInMap()<=5)
    {
        //关键帧小于5的情况重启
        //否则还可以通过全局优化挽救
        cout << "Track lost soon after initialisation, resetting..." << endl;
        mpSystem->Reset();
        return;
    }
}
}

```

VII. 更新数据

如同两两帧间视觉里程计，我们更新数据。

```

//若当前帧的参考关键帧为空，则设定参考关键帧
//Tracking类中的mpReferenceKF成员就可以认为mCurrentFrame成员(当前帧)的参考关键帧
//当然，在更新关键帧的部分，是要检查与当前帧最多共视点的帧，将其设定为参考关键帧

//Frame类的参考关键帧论文中已经定义
if(!mCurrentFrame.mpReferenceKF)
    mCurrentFrame.mpReferenceKF = mpReferenceKF;

// 保存上一帧的数据，使用复制构造函数
mLastFrame = Frame(mCurrentFrame);

```

VIII. 轨迹复现

```

// Store frame pose information to retrieve the complete camera trajectory afterwards.
// 步骤3: 记录位姿信息，用于轨迹复现
if(!mCurrentFrame.mTcw.empty())
{
    // 计算相对姿态T_currentFrame_referenceKeyFrame
    cv::Mat Tcr = mCurrentFrame.mTcw*mCurrentFrame.mpReferenceKF-
>GetPoseInverse();
    mRelativeFramePoses.push_back(Tcr);
    mlpReferences.push_back(mpReferenceKF);
    mFrameTimes.push_back(mCurrentFrame.mTimeStamp);
    mlbLost.push_back(mState==LOST);
}
else
{
    // This can happen if tracking is lost
    // 如果跟踪失败，则相对位姿使用上一次值
    mRelativeFramePoses.push_back(mRelativeFramePoses.back());
    mlpReferences.push_back(mlpReferences.back());
    mFrameTimes.push_back(mFrameTimes.back());
    mlbLost.push_back(mState==LOST);
}

```

```
}
```

至此，Track()函数全部结束。

三、Local Mapping线程
