

靶标设计方案：

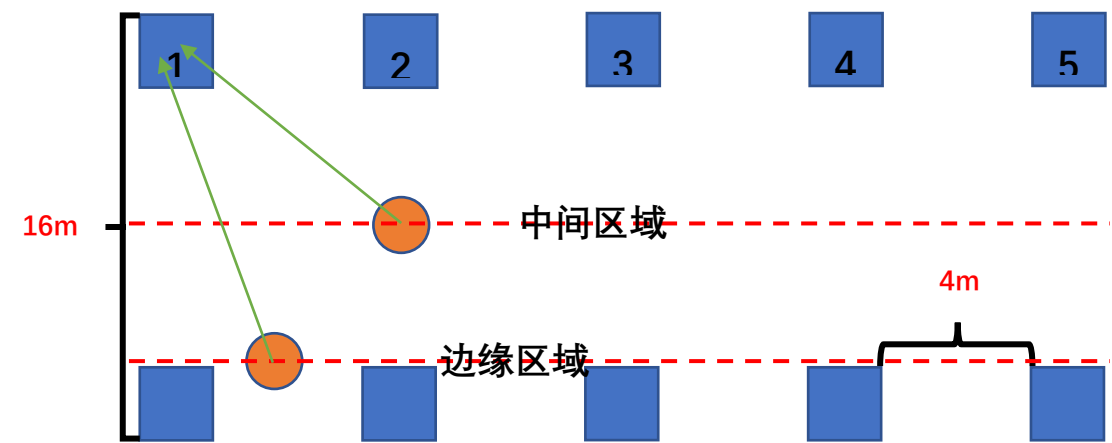


图 1 激光 SLAM 定位示意图

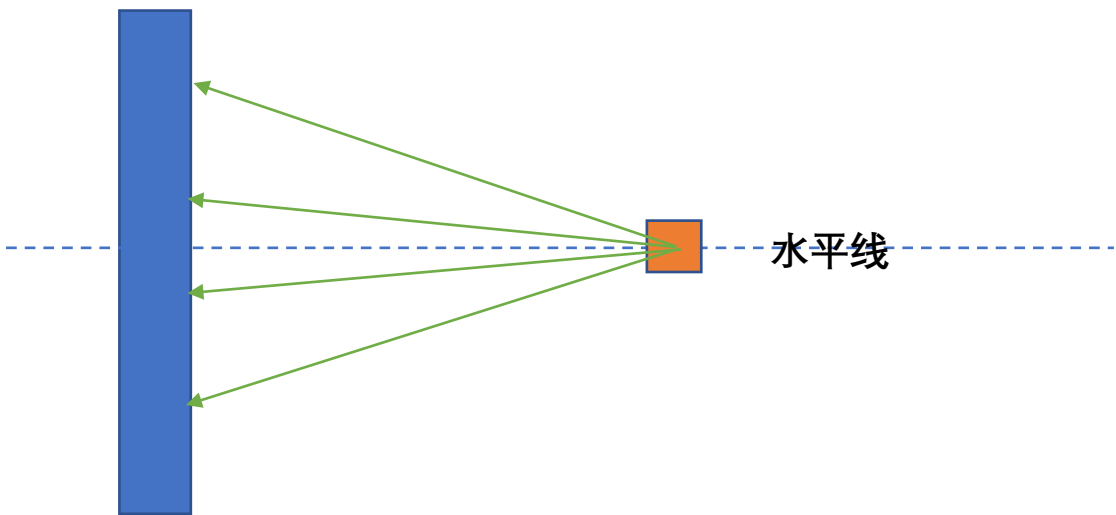


图 2 雷达激光束与靶标之间的几何关系

根据 velodyne16 线激光雷达的硬件特性和参数，以及考虑到定位精度的要求和鲁棒性，本定位算法决定利用激光雷达的 2-4 根激光束，其分别为距离激光雷达坐标系水平面最近的四根激光束，靶标的大小及形状也将依据雷达线束进行决定。

下面以靶标的最大间隔为 4 米进行标靶尺寸的制定：

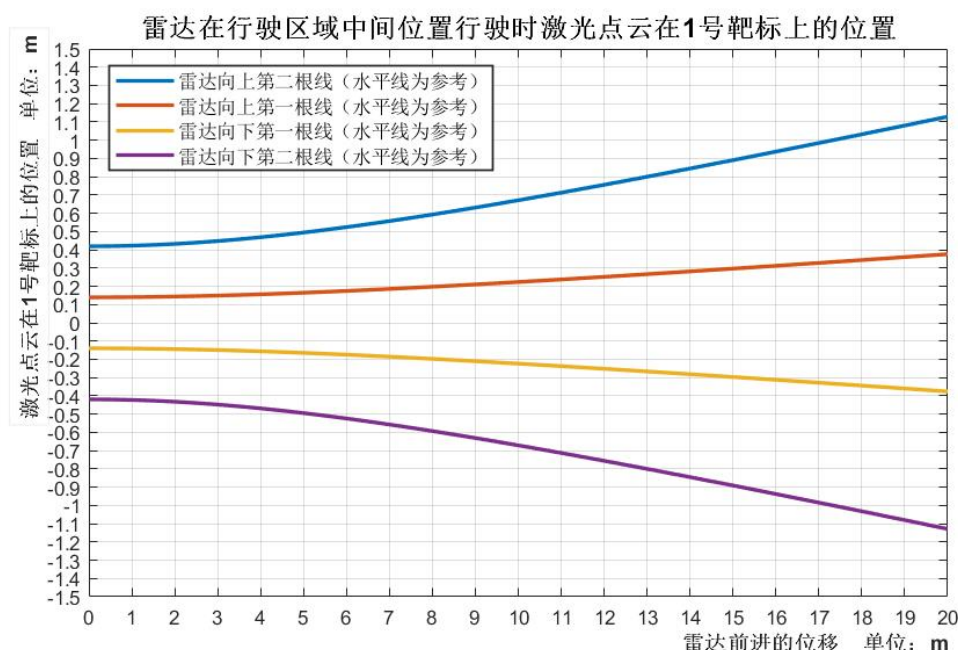


图 3 雷达在中间区域行驶时激光点云在 1 号靶标上的位置

如图 1 所示，若雷达在中间区域行驶，为保证定位精度及鲁棒性，激光雷达在行驶过程中，要求其在道路两侧时刻能检测到三个或者三个以上的靶标（两侧各三个或者三个以上），由于靶标间隔最大为 4m，即要求雷达在行驶方向上距离靶标（以 1 号靶标为例）6 米时，雷达的四根激光束依然能打到 1 号靶标。从图 3 中可以看出，此时上下两根线的最大距离为 1m，小距离为 0.4 米。

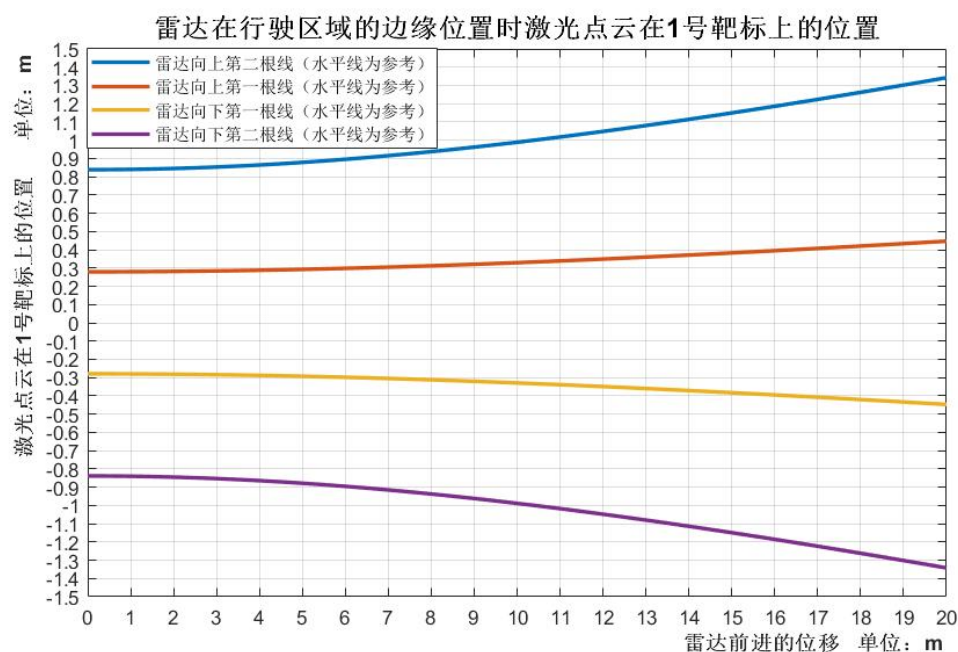


图 4 雷达在行驶区域的边缘位置时激光点云在 1 号靶标上的位置

考虑到车辆有时候不一定在中间区域行驶，为了保证算法在所有行驶区域的可靠性，则需要考虑雷达在边缘区域（最靠近一侧靶标，见图 1）时是否能有 2-4 根激光束打到三

个或者三个以上靶标，同样从图 4 中可以看出，上下两根线的最大距离是 1.8 米，最小距离为 0.6 米。

综合以上两种最佳和极限情况，考虑到靶标的可移动性，决定靶标高度为 1.2 米。

靶标整体形状为三面矩形，由于算法采用是通过反光贴提供的反射强度信息进行点云前处理，而反光贴的反射强度又与激光束的照射角度有关，角度越小（最小即正射，最大即激光束与反光贴平行），其反射强度越大。这就要求激光雷达在运动的过程中，其激光束与反光贴之间的角度不能过大，否则将出现点云提取失败的情况。由于该项目使用的是条状反光贴，不是全覆盖反光贴，为了算法的可靠性，不仅需要在靶标的每一个面上（即三个面）都布置一条反光贴，另外还需要在两个直角处各布置一条反光贴，见图 5：白色为反光贴



图 5 靶标形状与反光贴位置设计

算法初步调试结果：

建图：

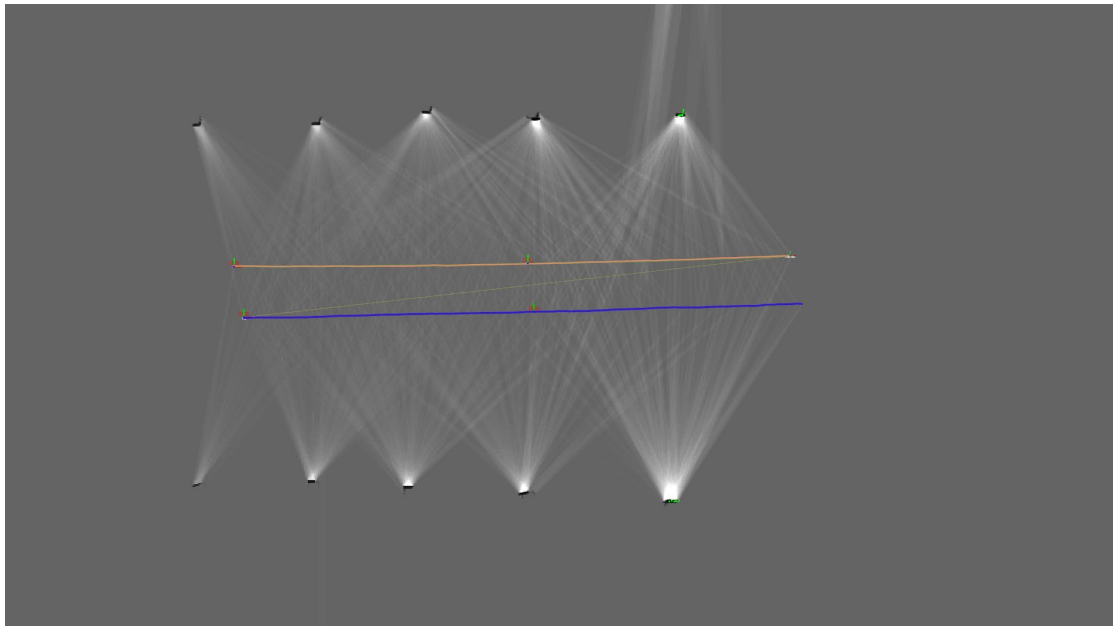


图 6 建图效果

在靶标试验的过程中，靶标做了两次改进，后期在前期靶标的下方增加了靶标的整体高度，增加的部分没有侧板，导致建图的过程中，侧板在地图中的效果不明显甚至消失，如图 6 所示。在最后靶标的定型过程中已经对该问题进行改进。

**定位：**定位精度的标定通过将激光 SLAM 的定位结果与惯性组合导航的定位结果进行比较

实验 1：

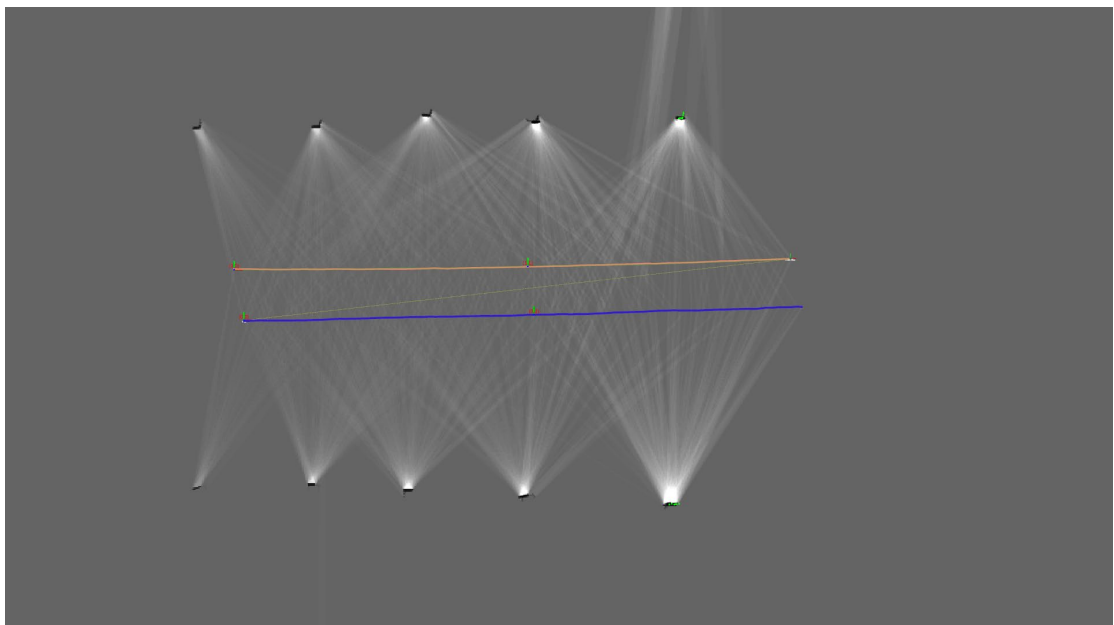


图 7 实验 1 的定位轨迹

从定位轨迹图 7（蓝色为建图轨迹，定位过程中不考虑）中可以看出惯性组合导航的轨迹（黄色）和激光雷达的轨迹（绿色，由于其和惯性组合导航的轨迹重合，无法清晰识别）基本重合，定位结果良好。

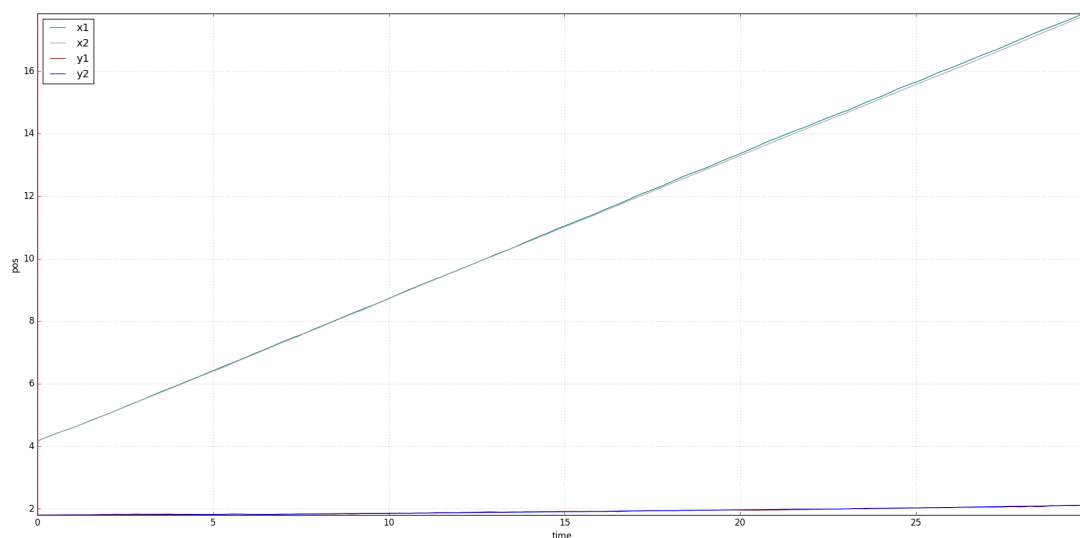


图 8 实验 1 的定位结果

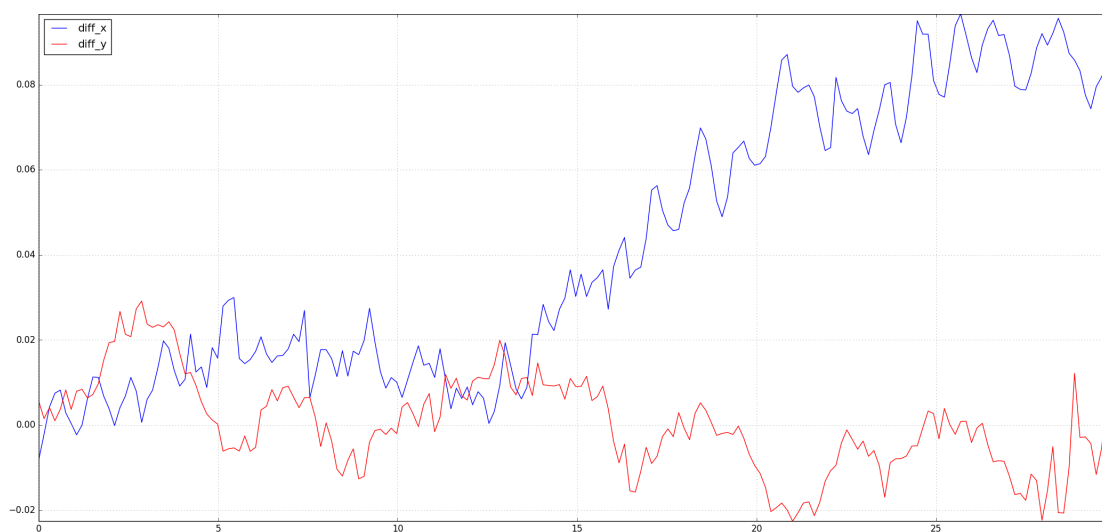


图 9 实验 1 的定位误差

对定位结果进行量化分析，从图 9 中可以看出横向（红色，diff\_y）的定位精度保持在 4cm 以内，纵向（蓝色，diff\_x）的定为精度总体保持在 10cm 以内，在 15 秒以前，纵向定位精度保持 4cm 以内，随着时间的推移，定位精度定位误差逐渐增大，这是由于靶标数量越来越少，环境丰富度下降造成的。

## 实验 2:

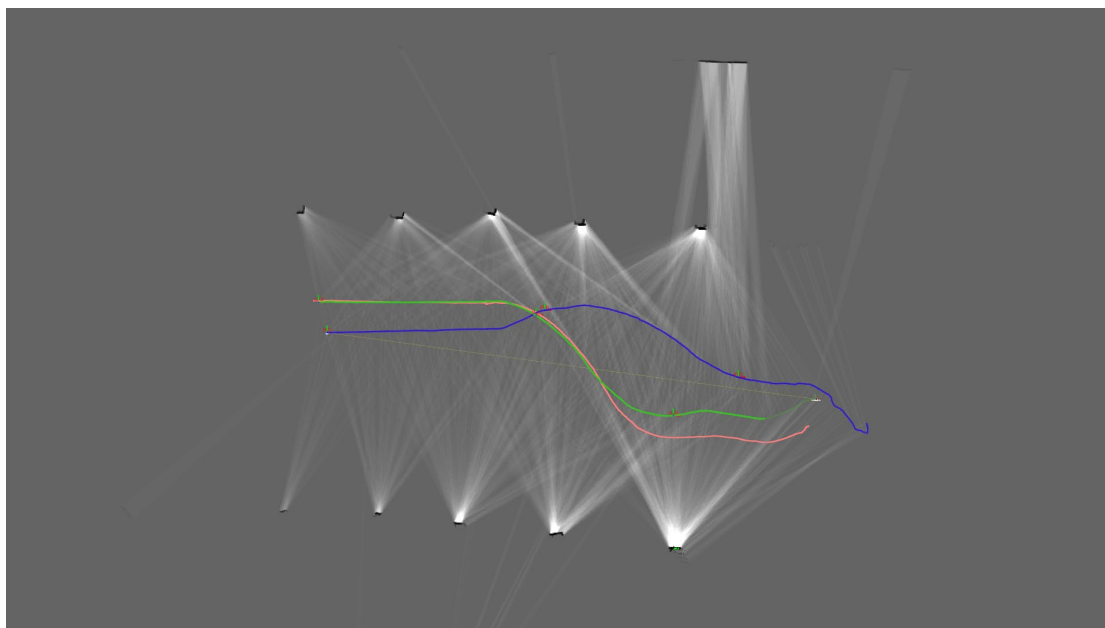


图 10 实验 2 的定位轨迹

从实验 2 的定位轨迹图 10 中可以看出前期惯性组合导航的定位轨迹（红色）和激光 SLAM 的定位轨迹（绿色）重合度较高，在最后一根靶标处发生较大偏移，初步判定是惯性组合导航的信号被遮挡（因为此区域非常接近岸桥），具体原因需要通过进一步实验确定。

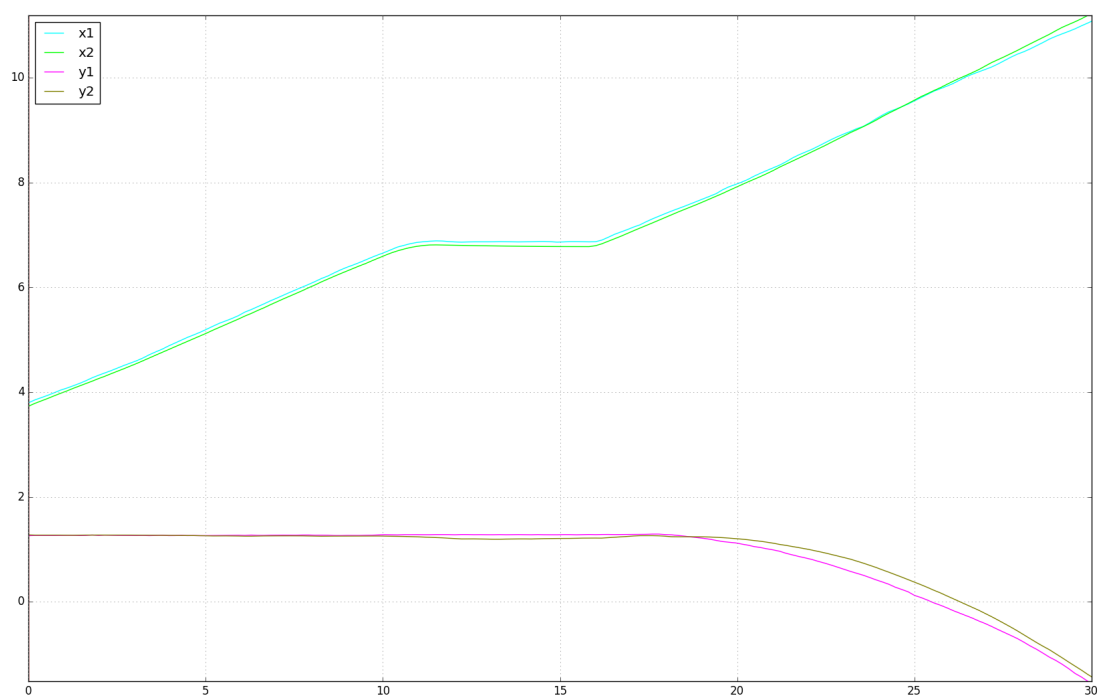
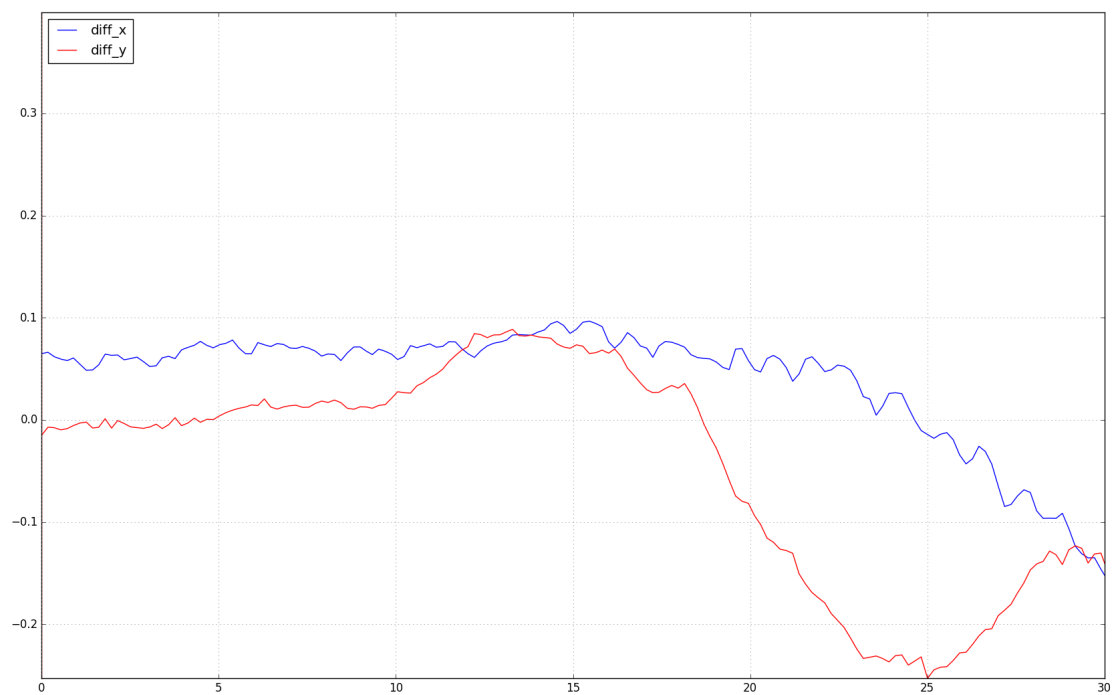


图 11 实验 2 的定位结果



**图 12 实验 2 定位误差**

对实验 2 定位结果进行量化分析，从图中可以看出横向（红色，diff\_y）的定位精度保持在 10cm 以内，纵向（蓝色，diff\_x）的定位精度总体保持在 10cm 以内，后期定位误差较大，初步判断为组合导航信号被遮挡，具体原因需要通过进一步实验确定。