«*In The Name Of GOD*»

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

[Project-03-Report]

[3D COMPUTER VISION]

Hasan Masroor | [403131030] | April 5, 2026

Project #3: Point Cloud Registration & SLAM Basics

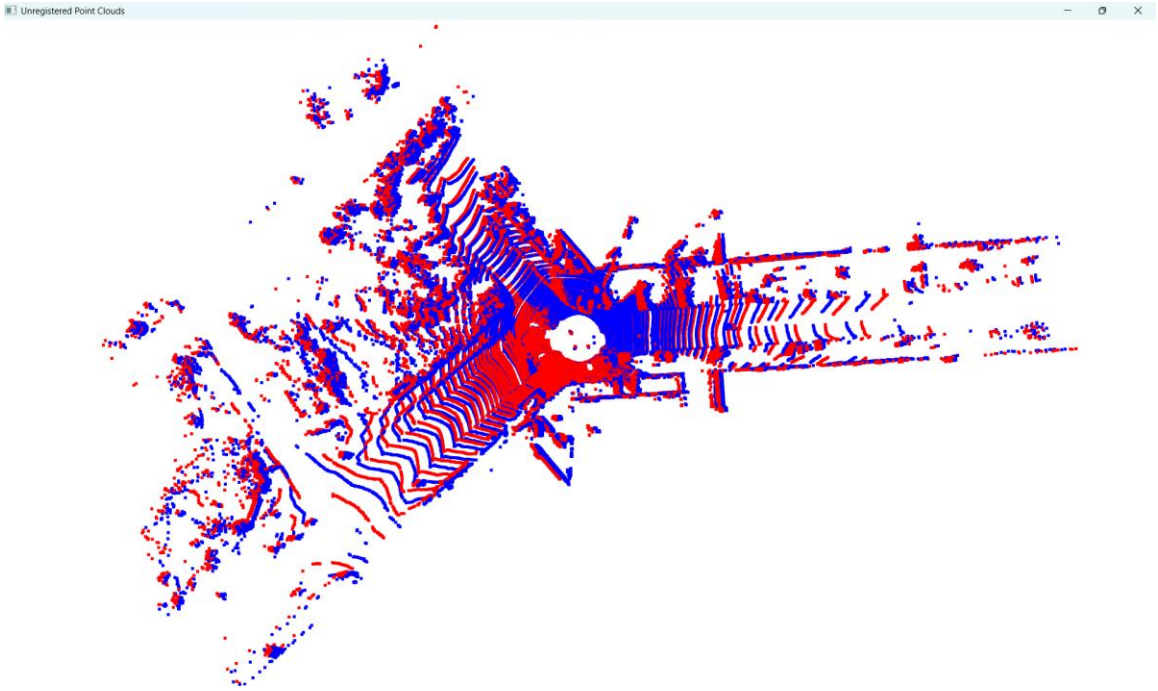
1. Point Cloud Registration Using ICP

ابتدا کتابخانه‌های موردنیاز را ایمپورت کردیم و بعد از اینکه دیتاست مربوط به پروژه (کیتی) را لود کردیم، باید در پارت a دو ابرنقطه را که بیشتر از ۱۰ فریم از هم فاصله نداشته باشند را انتخاب کنیم و به همین منظور ابرنقاط 0 و 1 را انتخاب کردیم:

Source frame (1): 31465 points

Target frame (0): 31828 points

در ادامه و قبل از اعمال الگوریتم نزدیک‌ترین نقطه تکراری، دو ابرنقطه انتخاب‌شده در مرحله قبلی را نمایش خواهیم داد و نقاط سورس به رنگ قرمز و نقاط تارگت نیز به رنگ آبی نمایش داده شده‌اند:



در بخش c باید الگوریتم ICP را اعمال کنیم که معروف‌ترین روش برای همترازی است و به صورت مرحله‌به‌مرحله نقاط را به هم نزدیک می‌کند؛ هدف این روش یافتن پارامترهای تبدیل است که بهترین شکل، نقاط متناظر در دو مجموعه را بر هم منطبق کند. به همین منظور از دو مجموعه سورس و تارگت که بالاتر توضیح دادیم استفاده می‌کنیم و سپس حد آستانه را تعریف کردیم و بعد با ماکسیمم تکرار 10000 قطعه کد مربوطه را اجرا کردیم.

Transformation Matrix:

[[9.99994937e-01 -3.11831873e-03 -6.34031741e-04 6.83747521e-01]

[3.11712729e-03 9.99993390e-01 -1.87154581e-03 2.22298065e-03]

[6.39863627e-04 1.86955998e-03 9.99998048e-01 8.31956424e-03]

[0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 1.00000000e+00]]

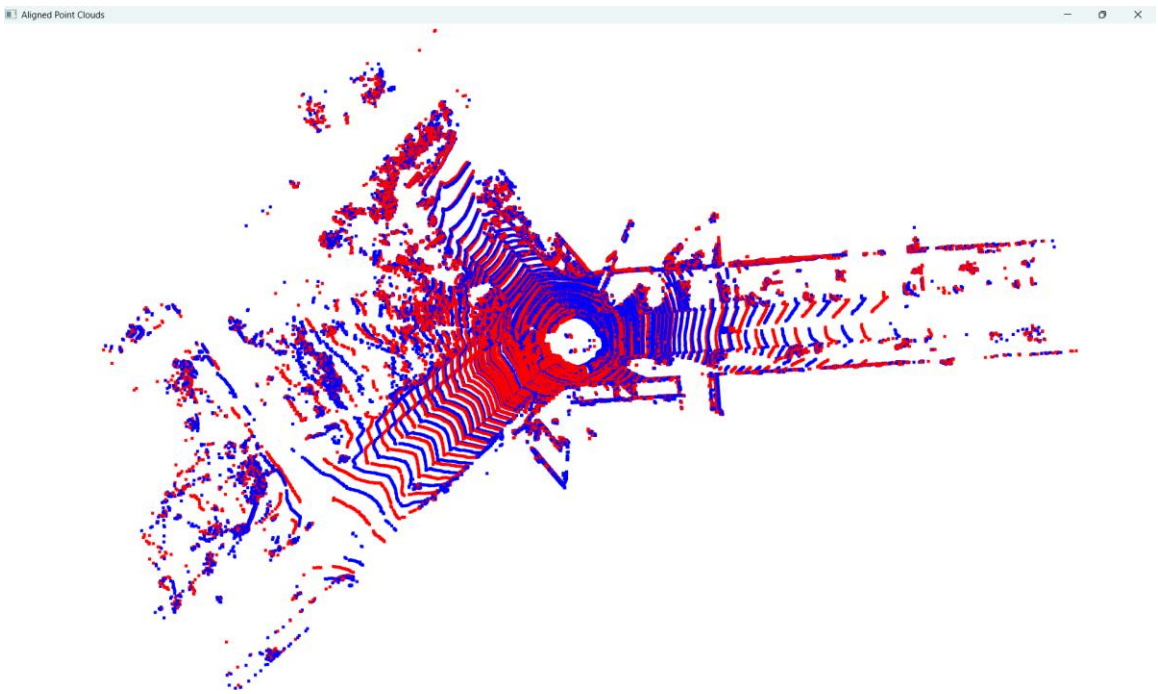
Fitness: 0.8699

Inlier RMSE: 0.1240

Time: 0.093 sec

نتایج حاصل این بخش را در بالا مشاهده می‌کنیم و علاوه بر ماتریس تبدیل معیارهای فیتنس، RMSE و زمان را داریم و می‌بینیم که از نظر اجرا، این الگوریتم در زمان کوتاه و مناسبی پیش رفته و همینطور مقدار RMSE پایینی داشته است و نشان می‌دهد عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. معیار فیتنس هم که حدود 0.87 شده است نشان می‌دهد که همترازی دو فریم صفر و یک نسبتا خوب بوده و این معیار هرچه نزدیک به 1 باشد نشان‌دهنده عملکر بهتر و بهتر است.

سپس همترازی ابرنقاط پس از اعمال الگوریتم نزدیک‌ترین نقطه تکراری را برای درک بهتر به صورت بصری نمایش داده‌ایم و همانطور که در صفحه قبلی گفتیم، برای نمایش نقاط سورس به رنگ قرمز و نقاط تارگت نیز به رنگ آبی انتخاب شدند که بتوان تمایز بهتری داشت و خروجی این بخش را در ادامه مشاهده می‌کنیم:



2. Incremental Registration of Multiple Point Clouds Using ICP

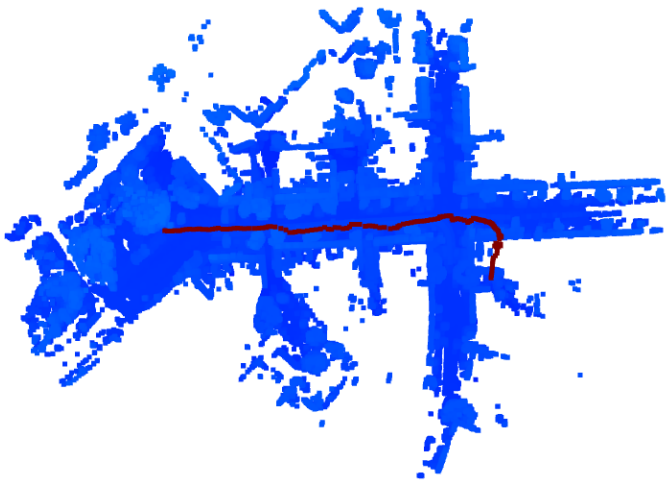
حالا که رجیستریشن دو پوینت کلاد را انجام دادیم و درکی از الگوریتم ICP و Visualization آن پیدا کردیم؛ در این بخش قرار هست که ساخت نقشه رو پیش ببریم و به همین منظور، از نتایج جفت هم‌ترازشده از بخش قبلی به عنوان base map یا نقشه پایه اولیه استفاده کردیم و سپس به صورت تکراری ابرنقاط و فریم‌های بعدی را یکی‌یکی با استفاده از الگوریتم ICP به این نقشه در حال رشد چسباندیم (تمام ابرنقاط ثبت‌شده را ترکیب کردیم) و در نهایت یک نقشه سه‌بعدی واحد ساختیم. در ادامه نقشه نهایی بدست‌آمده را مشاهده می‌کنیم:

نمونه‌ای از خروجی پارت a از بخش 2 را نیز در ادامه می‌بینیم و همچنین خروجی هر کدام از 142 فریم را می‌توان در فایل پایتون پیوست مشاهده کرد؛ مانند تحلیل صفحه قبل نیز می‌توان خروجی زیر را تجزیه و تحلیل کرد.

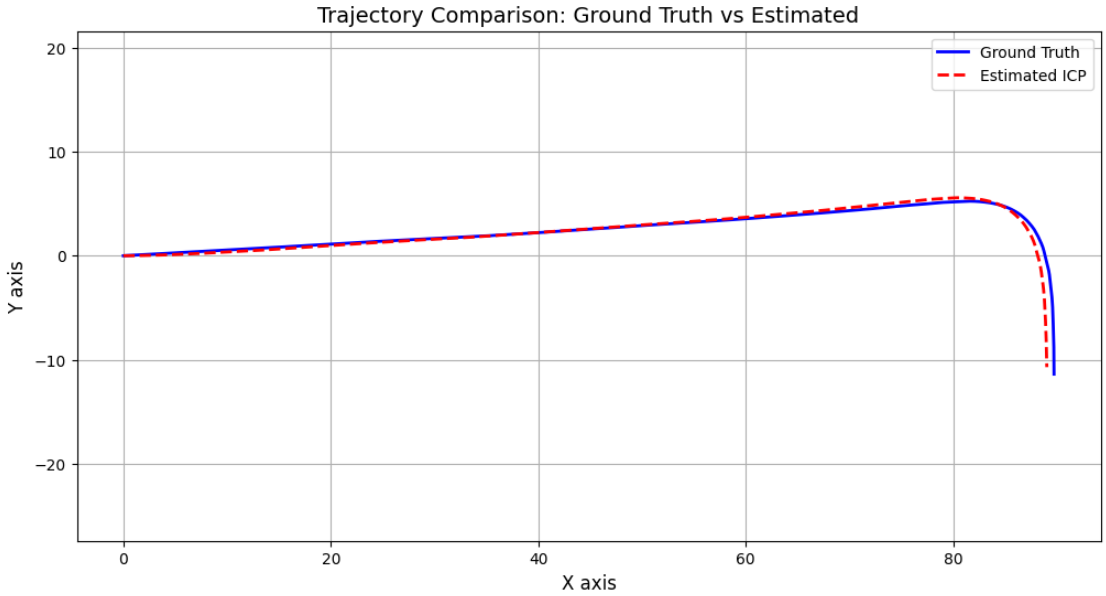
```
[Registering Frame 141]

Transformation Matrix:

 [[ 9.99999733e-01  6.62141516e-04  3.08320816e-04  6.78027264e-01]

 [-6.61171555e-04  9.99994866e-01 -3.13549158e-03 -6.95813676e-03]

 [-3.10395372e-04  3.13528689e-03  9.99995037e-01  6.59030601e-03]

 [ 0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00  1.00000000e+00]]

Fitness: 0.8975

Inlier RMSE: 0.1183

Time: 0.055 sec
```

3. Path Evaluation Using FDE and ADE

حال برای اینکه بتوانیم تحلیل و بررسی عمیق‌تر و بهتری از پیاده سازی داشته باشیم؛ در این بخش ابتدا مسیر تخمینی را کنار مسیر حقیقی در طول زمان نمایش می‌دهیم که از نظر بصری نسبت به عملکرد الگوریتم یک دیدی داشته باشیم و بعد هم از نظر خطای نهایی و خطای میانگین مسیر عملکرد ICP را مورد بحث قرار می‌دهیم و به تجزیه و تحلیل آن خواهیم پرداخت.



همانطور که قابل مشاهده است مسیر کلی حرکت خودرو کاملا درست بدست آورده شده است؛ دلیل اندکی خطا در انتهای مسیر می‌تواند دلایل متعددی نظیر انباشتگی خطا در تبدیل‌های متوالی، عدم قرارگیری مختصات لایدار در وسط خودرو و... باشد. برای مقایسه نتیجه بدست آمده، مسیر طی‌شده که با رنگ قرمز مشخص است را با مسیر حقیقی (ground truth) با رنگ آبی رسم می‌کنیم. نمودار زیر مسیرهای حرکتی را نمایش می‌دهند و همانطور که قابل مشاهده است؛ با وجود انباشتگی‌های خطا، مسیر حرکتی حاصل با مسیر حرکتی ground truth تطابق معنایی تقریبا کامل داشته و یکسان استخراج شده است.



در ادامه برای ارزیابی دقیق‌تر و بهتر مسیر، در بخش‌های b و c خطای نهایی (FDE) و همچنین خطای میانگین مسیر (ADE) را پیاده‌سازی و بدست آوردیم. نتایج این خطاها به شرح زیر می‌باشند.

Final Displacement Error (FDE): 0.9684 meters

Average Displacement Error (ADE): 1.1279 meters

همانطور که از نام دو خطای بالا مشخص است، ADE میانگین خطای مسیر را محاسبه می‌کند و به تبع هر خطایی که در طول مسیر هم وجود داشته باشد تجمیع می‌شوند و قابل انتظار است که از خطای قبلی مقداری بیشتر داشته باشد اما FDE خطای نهایی و انتهای مسیر را در نظر می‌گیرد و به همین دلیل ممکن است اگر خطایی در طول مسیر حرکت اولیه تا توقف نهایی خودرو داشته باشیم در نظر گرفته نشده و مقدار کوچک‌تری از ADE داشته باشد. نتایجی که در پیاده‌سازی کسب کردیم نیز همین استدلال را نشان می‌دهد و FDE مقدار 0.9684 متر شده و ADE هم به دلیل در نظرگرفتن خطاهای در طول مسیر همانطور که انتظار داشتیم مقدار بزرگتری شده است و مقدار 1.1279 را دارد.

اگر به نموداری که کمی بالاتر نمایش دادیم توجه کنیم؛ انتهای مسیر واضح و مبرن است که مسیر تخمینی با مسیر ground truth تفاوت اندکی دارد اما اگر کمی قبل‌تر از نمودار را ببینیم مشاهده می کنیم در طول مسیر هم خطاهایی داشته‌ایم و یکسری جاها ground truth کمی بالاتر از مسیر تخمینی ما قرار دارد و جای دیگری کمی پایین مسیر طی‌شده می‌باشد. با توجه به اینکه در نمودار هم مشاهده می‌کنیم خودرو نزدیک به 100 متر حرکت داشته، ICP توانسته عملکردی معقول و بالایی از خود نشان دهد و با وجود انباشتگی‌های خطا، مسیر حرکتی حاصل با مسیر حرکتی ground truth تطابق معنایی تقریبا کامل داشته و یکسان استخراج شده است؛ همچنین مقادیر خطاهای FDE و ADE با توجه به طول مسیری که خودرو پیموده است بسیار پایین هستند و استدلال‌های مطرح‌شده و نتایجی که بررسی کردیم همگی حاکی از عملکرد بالای ICP می‌باشند.