سامانه هم‌ترازی و هم‌پوشانی «نقشه□ قطعه» بر روی تصویر واقعی

(نام نویسنده)
(وابستگی سازمانی/دانشگاه)
(ایمیل)

۲۴ بهمن ۱۴۰۴

چکیده

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۳

۲ نمادگذاری و تعاریف ۳
۱.۲ نمادها ۳
۲.۲ مفهوم مختصات همگن ۳
۳.۲ اختصارات ۳
۴.۲ فرض کلیدی (اعتبار مدل) ۳

۳ نمای کلی سامانه ۴
۱.۳ خلاصه□ خط لوله ۴
۲.۳ ساختار پوشه‌ها (پیشنهادی) ۴
۳.۳ چرایی انتخاب روش مبتنی بر ویژگی ۴

۴ کارهای مرتبط ۴
۱.۴ ثبت تصویر و تبدیل‌های هندسی ۴
۲.۴ ویژگی‌های محلی و توصیف‌گرها ۴
۳.۴ برازش مقاوم و RANSAC ۵
۴.۴ ابزارهای عملی ۵

۵ روش‌شناسی ۵
۱.۵ فرمول‌بندی مسئله ۵
۲.۵ استخراج ویژگی با ORB ۵
۳.۵ تطبیق توصیف‌گرها ۵
۴.۵ تخمین هموگرافی با RANSAC ۵
۵.۵ خطای بازفرافکنی (تعریف ریاضی و تفسیر) ۶
۶.۵ وارپ و هم‌پوشانی ۶
۷.۵ شاخص‌های اطمینان (Confidence Proxies) ۶

۶ داده‌ها و پروتکل آزمایش ۶
۱.۶ توصیف داده ۶
۲.۶ ملاحظات جمع‌آوری داده ۶
۳.۶ تقسیم‌بندی تنظیم/آزمون ۷
۴.۶ زمین‌حقیقت برای معیارهای کمی ۷
۵.۶ هدف پیش‌پردازش ۷
۶.۶ گام‌های استاندارد ۷
۷.۶ توجیه علمی ۷
۸.۶ هدف آزمایش‌ها ۷
۹.۶ پارامترهای کلیدی و بازه‌ها ۸
۱۰.۶ روش اجرای آزمایش ۸
۱۱.۶ خروجی‌های الزامی برای گزارش ۸

۷ پیاده‌سازی ۸
۱.۷ اصول طراحی پیاده‌سازی ۸
۲.۷ ماژول‌های اصلی (سطح مفهومی) ۹
۳.۷ خروجی‌های دیباگ (برای تشخیص علت شکست) ۹
۴.۷ فایل‌های خروجی و نقش آنها ۹
۵.۷ الزامات ثبت (Logging) برای گزارش علمی ۱۰
۶.۷ پیچیدگی محاسباتی و عملکرد عملی ۱۰
۷.۷ درج کُد در گزارش (اختیاری) ۱۰

۸ ارزیابی و معیارها ۱۱
۱.۸ هدف ارزیابی ۱۱
۲.۸ معیارهای کمی اصلی ۱۱
۳.۸ شکل‌های لازم برای گزارش ۱۱
۴.۸ حداقل ابلیشن علمی ۱۲

۹ نتایج و تحلیل ۱۲

۱۰ بحث ۱۲
۱.۱۰ جمع‌بندی علمی از یافته‌ها ۱۲
۲.۱۰ محدودیت‌ها ۱۲
۳.۱۰ کارهای آینده ۱۲

۱۱ بازتولیدپذیری ۱۲
۱.۱۱ مشخصات محیط اجرا ۱۲
۲.۱۱ کنترل عدم‌قطعیت (Determinism) ۱۳
۳.۱۱ ثبت فرمان‌های اجرا ۱۳

۱۲ اخلاق، حریم خصوصی و ایمنی ۱۳
۱.۱۲ حریم خصوصی و مدیریت داده ۱۳
۲.۱۲ ایمنی عملیاتی ۱۳
۳.۱۲ پوشش‌پذیری و تعمیم ۱۳

۱۳ نتیجه‌گیری ۱۳

آ پیوست ۱۴
آ.۱ فرمان‌های پیشنهادی اجرا (نمونه) ۱۴
آ.۲ توضیح انتخاب آستانه‌ها ۱۴

۱ مقدمه

این گزارش چارچوب پیاده‌سازی، ارزیابی و تحلیل نتایج پروژه را ارائه می‌کند. تمرکز اصلی بر بازتولیدپذیری، مستندسازی دقیق روش‌ها و ارائه شواهد تصویری از خروجی‌ها است.

۲ نمادگذاری و تعاریف

این بخش نمادها، تعاریف و مفاهیم ریاضی مورد استفاده را به‌صورت دقیق مشخص می‌کند.

۱.۲ نمادها

- $\mathcal{I}_T$: تصویر الگو (Template)؛ می‌تواند نقشه□ قطعه، شماتیک یا طرح مرجع باشد.
- $\mathcal{I}_Q$: تصویر پرسش/عکس واقعی (Query) (Photo از قطعه در محیط واقعی.
- $\mathbf{x} = [x, y]^T$: یک نقطه دوبعدی در مختصات کارتزین (پیکسلی).
- $\tilde{\mathbf{x}} = [x, y, 1]^T$: نمایش همگن نقطه؛ برای اعمال تبدیل‌های پرسپکتیو استفاده می‌شود.
- $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{3\times 3}$: هموگرافی؛ نگاشت پرسپکتیو بین صفحه□ الگو و صفحه□ عکس.
- $\pi([u, v, w]^T) = [u/w,\ v/w]^T$: عملگر پروجکشن از مختصات همگن به کارتزین.
- τ: آستانه□ RANSAC برای خطای بازفرافکنی (واحد: پیکسل).
- α: پارامتر هم‌پوشانی (Blend) با $0 \le \alpha \le 1$.

۲.۲ مفهوم مختصات همگن

در هندسه□ تصویر، تبدیل‌های پرسپکتیو را نمی‌توان با یک ماتریس 2×2 و بردار انتقال ساده توصیف کرد؛ به همین دلیل از مختصات همگن استفاده می‌شود. برای هر نقطه $\mathbf{x} = [x, y]^T$، نسخه□ همگن $\tilde{\mathbf{x}} = [x, y, 1]^T$ تعریف می‌شود. سپس هموگرافی اعمال می‌گردد:

$$\tilde{\mathbf{x}}' = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} = [u, v, w]^T, \quad \mathbf{x}' = \pi(\tilde{\mathbf{x}}') = [u/w,\ v/w]^T.$$

بنابراین خروجی کارتزین با تقسیم بر مولفه□ سوم (w) به دست می‌آید.

۳.۲ اختصارات

- ORB: الگوریتم سریع استخراج ویژگی و توصیف‌گر دودویی [۱].
- RANSAC: الگوریتم مقاوم برای برازش مدل در حضور داده‌های پرت [۲].
- IoU: معیار اشتراک بر اجتماع برای ماسک‌ها (در صورت وجود زمین‌حقیقت).

۴.۲ فرض کلیدی (اعتبار مدل)

فرض اصلی این گزارش این است که ناحیه□ مورد نظر روی قطعه یا الگو تقریباً صفحه‌ای است؛ در این حالت هموگرافی مدل مناسبی برای نگاشت بین دو تصویر است [۳]. اگر سطح به‌شدت سه‌بعدی باشد یا خمیدگی قابل توجه داشته باشد، یک هموگرافی واحد ممکن است نتواند کل ناحیه را دقیق توصیف کند.

۳ نمای کلی سامانه

۱.۳ خلاصه□ خط لوله

سامانه با یک خط لوله□ استاندارد ثبت تصویر مبتنی بر ویژگی کار می‌کند:

۱. پیش‌پردازش $\mathcal{I}_T$ و $\mathcal{I}_Q$ (خاکستری‌سازی، کنترل اندازه، و در صورت نیاز افزایش کنتراست).

۲. استخراج ویژگی (نقاط کلیدی و توصیف‌گر) با ORB [۱].

۳. تطبیق توصیف‌گرها با فاصله□ همینگ و پالایش تطبیق‌ها Cross-check) و/یا فیلتر فاصله).

۴. تخمین هموگرافی $\mathbf{H}$ به کمک RANSAC برای حذف پرت‌ها [۲].

۵. وارپ کردن الگو به چارچوب عکس با $\mathbf{H}$ و تولید خروجی هم‌پوشانی.

۶. خروجی‌گیری از معیارهای کمی و تصاویر دیباگ برای ارزیابی علمی.

۲.۳ ساختار پوشه‌ها (پیشنهادی)

گزارش فرض می‌کند پروژه ساختار زیر را دارد:

```
report/
  main.tex
  *.tex
  references.bib
src/
  (        )
data/
  templates/
  photos/
  annotations/   (    )
results/
  overlays/
  figures/
  metrics/
  matches/       (    )
```

۳.۳ چرایی انتخاب روش مبتنی بر ویژگی

این رویکرد بدون آموزش و با هزینه□ محاسباتی پایین اجرا می‌شود و اگر تصویر حاوی ساختار/بافت کافی باشد، ORB+RANSAC می‌تواند هم‌ترازی قابل قبولی ارائه کند [۱، ۲].

۴ کارهای مرتبط

۱.۴ ثبت تصویر و تبدیل‌های هندسی

ثبت تصویر معمولاً به‌معنای یافتن نگاشت هندسی بین دو تصویر است. در حالت صفحه‌ای، هموگرافی مدل کلاسیک و استاندارد محسوب می‌شود و در منابع مرجع هندسه□ چندنما به‌طور کامل تشریح شده است [۳].

۲.۴ ویژگی‌های محلی و توصیف‌گرها

روش‌های کلاسیک مانند SIFT [۴] در برابر تغییر مقیاس و چرخش مقاوم‌اند اما سنگین‌تر هستند. ORB [۱] به‌عنوان جایگزینی سریع‌تر، نقاط را با FAST استخراج کرده و توصیف‌گر دودویی BRIEF) چرخش‌یافته) تولید می‌کند. توصیف‌گر دودویی امکان استفاده از فاصله□ همینگ و تطبیق سریع را فراهم می‌کند.

۳.۴ برازش مقاوم و RANSAC

در تطبیق ویژگی‌ها، همواره درصدی از تطبیق‌ها غلط هستند .(Outliers) RANSAC [۲] یک چارچوب برازش مقاوم است که با نمونه‌گیری تصادفی و ارزیابی مجموعه□ درون‌نهشتی‌ها (Inliers) مدل را در حضور پرت‌ها پایدار می‌کند. ترکیب «ویژگی‌ها + «RANSAC ستون فقرات بسیاری از سامانه‌های ثبت تصویر کلاسیک است.

۴.۴ ابزارهای عملی

کتابخانه OpenCV [۵] پیاده‌سازی‌های استاندارد و بهینه‌ای برای ،ORB تطبیق‌گرها، و `findHomography` با RANSAC و `warpPerspective` ارائه می‌دهد و بنابراین انتخاب مناسبی برای یک سامانه□ مهندسی قابل بازتولید است.

۵ روش‌شناسی

۱.۵ فرمول‌بندی مسئله

هدف یافتن هموگرافی $\mathbf{H}$ است که نقاط الگو را به نقاط متناظر در عکس نگاشت کند. اگر $\mathbf{x}_k^T$ نقطه‌ای در الگو و $\mathbf{x}_k^Q$ نقطه□ متناظر در عکس باشد:

$$\tilde{\mathbf{x}}_k^Q \sim \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}_k^T.$$

هموگرافی ۸ درجه آزادی مؤثر دارد (زیرا ضرب کل ماتریس در یک عدد غیرصفر همان نگاشت را می‌دهد). بنابراین برای تعیین $\mathbf{H}$ حداقل به ۴ تطبیق نقطه‌ای غیرهم‌خط نیاز داریم [۳].

۲.۵ استخراج ویژگی با ORB

ORB [۱] دو کار انجام می‌دهد:

- آشکارسازی نقاط کلیدی: معمولاً بر مبنای FAST (گوشه‌ها).
- توصیف‌گر دودویی: بردار بیتی که با مقایسه شدت پیکسل‌ها در الگوهای مشخص ساخته می‌شود BRIEF) چرخش‌یافته).

مزیت توصیف‌گر دودویی این است که شباهت با فاصله□ همینگ (تعداد بیت‌های متفاوت) سنجیده می‌شود که سریع و مناسب برای کاربرد عملی است.

۳.۵ تطبیق توصیف‌گرها

فرض کنید برای هر تصویر مجموعه توصیف‌گرهای دودویی داریم. برای هر توصیف‌گر در الگو، نزدیک‌ترین همسایه در عکس را با فاصله□ همینگ پیدا می‌کنیم. سپس برای کاهش تطبیق‌های غلط:

- Cross-check: فقط تطبیق‌هایی حفظ می‌شوند که دوطرفه نزدیک‌ترین همسایه باشند.
- فیلتر فاصله: تطبیق‌هایی که فاصله□ آنها از یک حد بیشتر است حذف می‌شوند (حد می‌تواند مطلق یا درصدی باشد).

۴.۵ تخمین هموگرافی با RANSAC

به دلیل وجود تطبیق‌های غلط، اگر مستقیماً $\mathbf{H}$ را با همه□ تطبیق‌ها برازش کنیم، مدل منحرف می‌شود. RANSAC [۲] این مشکل را حل می‌کند:

۱. چند بار، ۴ تطبیق به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود و یک $\mathbf{H}$ کاندید ساخته می‌شود.

۲. برای هر تطبیق، خطای بازفرافکنی محاسبه می‌شود. اگر خطا کمتر از τ باشد، آن تطبیق درون‌نهشتی (Inlier) محسوب می‌شود.

۳. مدلی که بیشترین درون‌نهشتی را دارد انتخاب می‌شود و در نهایت روی مجموعه□ درون‌نهشتی‌ها دوباره برازش می‌شود.

۵.۵ خطای بازفرافکنی (تعریف ریاضی و تفسیر)

برای یک نقطه□ الگو $\mathbf{x}^T = [x, y]^T$، ابتدا همگن می‌کنیم $\tilde{\mathbf{x}}^T = [x, y, 1]^T$ و سپس:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}^T = [u, v, w]^T, \quad \mathbf{y} = \pi(\tilde{\mathbf{y}}) = [u/w,\, v/w]^T.$$

اگر $\mathbf{x}^Q$ نقطه□ متناظر در عکس باشد، خطا:

$$e = \|\mathbf{x}^Q - \mathbf{y}\|_2$$

است که همان فاصله□ اقلیدسی (ریشه□ جمع مربعات اختلاف مؤلفه‌ها) بر حسب پیکسل است. هرچه e کوچک‌تر باشد، هم‌ترازی هندسی بهتر است.

۶.۵ وارپ و هم‌پوشانی

پس از تخمین $\mathbf{H}$، الگو به چارچوب عکس وارپ می‌شود (تبدیل پرسپکتیو). سپس خروجی هم‌پوشانی با آلفا-بلندینگ ساخته می‌شود:

$$\mathcal{I}_{\text{out}} = \alpha \mathcal{I}_{\text{warp}} + (1 - \alpha)\mathcal{I}_Q.$$

در اینجا:

- α بزرگ‌تر یعنی الگو پررنگ‌تر دیده می‌شود،
- α کوچک‌تر یعنی عکس واقعی غالب است.

۷.۵ شاخص‌های اطمینان (Confidence Proxies)

در کاربرد عملی، بهتر است یک شاخص اطمینان گزارش شود:

- تعداد تطبیق‌های معتبر،
- نسبت درون‌نهشتی‌ها N_i/N_m،
- (در صورت زمین‌حقیقت) میانه/میانگین خطای بازفرافکنی.

این شاخص‌ها برای «پرچم‌گذاری» موارد مشکوک جهت بازبینی انسانی مفید هستند.

۶ داده‌ها و پروتکل آزمایش

۱.۶ توصیف داده

داده□ آزمایشی شامل زوج‌های $(\mathcal{I}_T, \mathcal{I}_Q)$ است که در آن $\mathcal{I}_T$ تصویر الگو/نقشه و $\mathcal{I}_Q$ تصویر واقعی قطعه است.

۲.۶ ملاحظات جمع‌آوری داده

برای نتیجه‌گیری علمی معتبر، داده باید تغییرپذیری‌های زیر را پوشش دهد:

- تغییر دید ،(Tilt/Rotation/Perspective)
- تغییر نور (سایه، بازتاب، نور داخل/خارج)،
- شلوغی پس‌زمینه و عناصر مزاحم،
- انسداد جزئی (Occlusion) و قطع شدن قاب .(Truncation)

۳.۶ تقسیم‌بندی تنظیم/آزمون

اگرچه مدل یادگیری وجود ندارد، اما تنظیم پارامترها می‌تواند باعث «بیش‌برازش تنظیمات» شود. بنابراین توصیه می‌شود:

- یک زیرمجموعه برای تنظیم پارامترها ،(tuning)
- یک زیرمجموعه□ مجزا برای گزارش نهایی (test)

در نظر گرفته شود.

۴.۶ زمین‌حقیقت برای معیارهای کمی

برای ارزیابی عددی دقیق، لازم است زمین‌حقیقت تعریف شود:

- نقاط متناظر :(Landmarks) چند نقطه□ مشخص روی الگو و عکس به‌صورت دستی نشانه‌گذاری شود.
- ماسک‌ها (اختیاری): اگر هدف بررسی همپوشانی ناحیه‌ای باشد، ماسک دودویی قطعه می‌تواند IoU را ممکن کند.

در نبود زمین‌حقیقت، باید صراحتاً بیان شود که معیارهای جایگزین (مثل نسبت درون‌نهشتی‌ها) «نماینده□ مستقیم خطای واقعی» نیستند و صرفاً شاخص‌های تقریبی‌اند.

۵.۶ هدف پیش‌پردازش

پیش‌پردازش برای کاهش تغییرپذیری‌های غیرضروری و افزایش تکرارپذیری ویژگی‌ها انجام می‌شود:

- کنترل مقیاس تصویر برای پایداری زمان اجرا،
- تبدیل به خاکستری برای استخراج ویژگی،
- در صورت نیاز، بهبود کنتراست محلی برای بافت کم یا نور نامناسب.

۶.۶ گام‌های استاندارد

برای هر تصویر $\mathcal{I}$:

۱. تغییر اندازه به‌گونه‌ای که $\max(\text{عرض}, \text{ارتفاع}) \leq M$ پیکسل باشد.

۲. تبدیل به تصویر خاکستری.

۳. اختیاری: اعمال CLAHE برای افزایش کنتراست محلی در شرایط نور نامطلوب.

۷.۶ توجیه علمی

ویژگی‌های محلی بر پایه□ گرادیان و ساختار موضعی کار می‌کنند. کوچک‌سازی بیش از حد باعث از دست رفتن جزئیات و کاهش نقاط کلیدی می‌شود، و بزرگ نگه‌داشتن تصویر زمان اجرا را بدون سود متناسب افزایش می‌دهد. بنابراین M و سیاست تغییر اندازه باید به‌عنوان پارامتر آزمایشی ثبت و گزارش شوند.

۸.۶ هدف آزمایش‌ها

آزمایش‌ها برای پاسخ به سه سؤال طراحی می‌شوند:

۱. سامانه در شرایط معمول تا چه حد هم‌ترازی صحیح می‌دهد؟

۲. پایداری آن در برابر تغییرات نور، زاویه دید و شلوغی پس‌زمینه چقدر است؟

۳. هزینه□ زمانی آن برای اجرا در کاربرد واقعی چه میزان است؟

۹.۶ پارامترهای کلیدی و بازه‌ها

برای ارزیابی حساسیت و انتخاب رژیم پایدار، حداقل مجموعه□ زیر پیشنهاد می‌شود:

- تعداد ویژگی‌های ORB: `nfeatures` $\in \{500, 1000, 2000, 4000\}$،
- آستانه□ RANSAC: $\tau \in \{2, 3, 5, 8\}$ پیکسل،
- Cross-check: روشن/خاموش،
- CLAHE (اختیاری): روشن/خاموش.

۱۰.۶ روش اجرای آزمایش

برای هر زوج تصویر:

۱. اجرای پیش‌پردازش و استخراج ویژگی،
۲. تطبیق و پالایش تطبیق‌ها،
۳. تخمین $\mathbf{H}$ با RANSAC،
۴. تولید هم‌پوشانی و خروجی‌های دیباگ،
۵. ثبت معیارهای کمی در `per_image.csv`.

۱۱.۶ خروجی‌های الزامی برای گزارش

حداقل خروجی‌های زیر باید تولید شوند:

- تصاویر هم‌پوشانی نمونه‌های نماینده،
- هیستوگرام خطای بازفرافکنی (اگر زمین‌حقیقت موجود است)،
- نمودار توزیع زمان اجرا (یا خلاصه□ آماری مثل میانه و صدک ۹۵)،
- نمونه‌های شکست و تحلیل علت.

۷ پیاده‌سازی

۱.۷ اصول طراحی پیاده‌سازی

پیاده‌سازی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که:

- ماژولار باشد (هر مرحله مستقل و قابل تست)،
- بازتولیدپذیر باشد (ثبت کامل پیکربندی و خروجی‌ها)،
- قابل مشاهده و قابل تحلیل باشد (ذخیره خروجی‌های میانی و دیباگ).

۲.۷ ماژول‌های اصلی (سطح مفهومی)

(۱) ورودی/خروجی و پیکربندی این بخش زوج‌های تصویر را می‌خواند و پارامترها را از فایل تنظیمات دریافت می‌کند. یک پیکربندی علمی باید شامل موارد زیر باشد:

- سقف اندازه تصویر M،
- پارامترهای ORB (مثل `nfeatures` و تعداد سطوح هرم)،
- نوع تطبیق‌گر و قواعد پالایش تطبیق‌ها،
- پارامترهای RANSAC مثل آستانه τ،
- ضریب هم‌پوشانی α،
- آستانه‌های ارزیابی (مثل تحمل موفقیت δ).

(۲) استخراج ویژگی ORB [۱] نقاط کلیدی و توصیف‌گر دودویی را می‌سازد. انتخاب ORB به دلیل سرعت و کارایی مناسب در کاربردهای مهندسی است.

(۳) تطبیق و پالایش توصیف‌گرهای دودویی با فاصله□ همینگ تطبیق می‌شوند. سپس با Cross-check و فیلتر فاصله، تطبیق‌های مبهم یا غلط حذف می‌شوند. این کار معمولاً «دقت» را افزایش می‌دهد اما ممکن است «بازخوانی» را کاهش دهد؛ به همین دلیل باید در آزمایش‌های ابلیشن بررسی شود.

(۴) تخمین هموگرافی هموگرافی با RANSAC [۲] تخمین زده می‌شود تا اثر پرت‌ها کاهش یابد. اگر نسبت درون‌نهشتی‌ها پایین باشد، RANSAC باید تکرار بیشتری انجام دهد و هزینه زمانی افزایش می‌یابد؛ بنابراین پالایش تطبیق‌ها هم برای صحت و هم برای سرعت مهم است.

(۵) وارپ و هم‌پوشانی الگو با $\mathbf{H}$ به فضای عکس وارپ می‌شود (پرسپکتیو). سپس ترکیب آلفا:

$$\mathcal{I}_{\text{out}} = \alpha \mathcal{I}_{\text{warp}} + (1-\alpha)\mathcal{I}_Q$$

خروجی نهایی را می‌سازد.

۳.۷ خروجی‌های دیباگ (برای تشخیص علت شکست)

برای اینکه گزارش علمی «قابل دفاع» باشد، پیاده‌سازی بهتر است موارد زیر را ذخیره کند:

- تصویر تطبیق خام: نمایش بهترین K تطبیق قبل از RANSAC.
- تصویر تطبیق درون‌نهشتی: نمایش تطبیق‌هایی که با $\mathbf{H}$ سازگارند.
- تصویر وارپ‌شده: فقط الگوی وارپ‌شده بدون هم‌پوشانی برای بررسی اعوجاج‌ها.
- نمایش گوشه‌ها: فرافکنی چهار گوشه□ الگو روی عکس (تشخیص «وارپ اشتباه اما منسجم»).

۴.۷ فایل‌های خروجی و نقش آنها

هم‌پوشانی‌ها

- `../results/overlays/*.png`: خروجی اصلی کیفی.

معیارها

- `../results/metrics/per_image.csv`: معیارهای نمونه‌به‌نمونه (تعداد تطبیق، تعداد درون‌نهشتی، نسبت درون‌نهشتی، خطا، زمان).
- `../results/metrics/summary.csv`: خلاصه□ سطح داده (میانگین/میانه/صدک‌ها).
- `../results/metrics/config.json`: ثبت دقیق پارامترها برای بازتولید.

شکل‌های گزارش

- `../results/figures/overlay_grid.png`: شبکه‌ای از هم‌پوشانی‌های نماینده.
- `../results/figures/reproj_error_hist.png`: هیستوگرام خطای بازفرافکنی.
- `../results/figures/runtime_breakdown.png`: تحلیل گلوگاه زمانی.
- `../results/figures/ablation_plot.png`: حساسیت به پارامترها.
- `../results/figures/failure_case_*.png`: نمونه‌های شکست.

۵.۷ الزامات ثبت (Logging) برای گزارش علمی

برای نتیجه‌گیری علمی، باید حتماً ثبت شود:

- سیاست تغییر اندازه و رزولوشن نهایی،
- تعداد نقاط کلیدی در الگو و عکس،
- تعداد تطبیق‌ها N_m و تعداد درون‌نهشتی‌ها N_i،
- نسبت درون‌نهشتی N_i/N_m،
- (در صورت زمین‌حقیقت) توزیع خطای بازفرافکنی،
- زمان اجرا (میانه و صدک ۹۵ توصیه می‌شود).

۶.۷ پیچیدگی محاسباتی و عملکرد عملی

اگر n_T و n_Q تعداد نقاط کلیدی باشند، تطبیق خام در بدترین حالت می‌تواند $O(n_T n_Q)$ باشد. در عمل با کنترل `nfeatures` و اندازه تصویر M زمان اجرا مدیریت می‌شود. هزینه RANSAC نیز به تعداد تکرارها وابسته است و با کاهش نسبت درون‌نهشتی‌ها افزایش می‌یابد [۲]. بنابراین انتخاب پارامترها باید هم «دقت» و هم «زمان» را همزمان لحاظ کند.

۷.۷ درج کُد در گزارش (اختیاری)

اگر قصد دارید کُد پایتون را داخل PDF نمایش دهید، فایل‌ها را در `../src/` قرار دهید و از دستور زیر استفاده کنید:

```
\SafeListing{../src/alignment.py}{(.)}{lst:alignment}
```

۸ ارزیابی و معیارها

۱.۸ هدف ارزیابی

ارزیابی باید سه بُعد را پوشش دهد:

۱. درستی هندسی: آیا $\mathbf{H}$ واقعاً الگو را روی عکس درست قرار می‌دهد؟

۲. پایداری: عملکرد تحت تغییر نور/زاویه/شلوغی چقدر افت می‌کند؟

۳. کارایی: زمان اجرا برای کاربرد عملی مناسب است یا خیر؟

۲.۸ معیارهای کمی اصلی

خطای بازفرافکنی (پیکسل). اگر نقاط زمین‌حقیقت $(\mathbf{p}_k^T, \mathbf{p}_k^Q)$ موجود باشد:

$$e_k = \left\| \mathbf{p}_k^Q - \pi(\mathbf{H}\tilde{\mathbf{p}}_k^T) \right\|_2 .$$

اینجا $\|\cdot\|_2$ همان نرم اقلیدسی است:

$$\|[a,b]^T\|_2 = \sqrt{a^2+b^2}.$$

تفسیر: e_k یعنی نقطه□ پیش‌بینی‌شده توسط هموگرافی چند پیکسل با نقطه□ واقعی فاصله دارد.

میانه/میانگین خطا در هر تصویر. برای هر تصویر، از مجموعه خطاها (مثلاً ۱۰ نقطه) یک خلاصه مثل میانه یا میانگین گرفته می‌شود. میانه نسبت به نقاط پرت مقاوم‌تر است.

نسبت درون‌نهشتی‌ها. اگر N_m تعداد تطبیق‌ها و N_i تعداد درون‌نهشتی‌ها باشد:

$$\text{InlierRatio} = \frac{N_i}{N_m}.$$

تفسیر: اگر نسبت درون‌نهشتی بالا باشد، تطبیق‌ها از نظر هندسی سازگارترند و احتمال درست بودن $\mathbf{H}$ بیشتر است.

نرخ موفقیت. برای آستانه□ تحمل δ (پیکسل):

$$\text{Success}(\delta) = \mathbb{I}(\text{MRE} < \delta),$$

که در آن MRE می‌تواند «میانگین خطای بازفرافکنی» یا «میانه» باشد و $\mathbb{I}$ تابع نشانگر (۰/۱) است.

۳.۸ شکل‌های لازم برای گزارش

ارزیاب باید شکل‌های زیر را تولید کند:

- `overlay_grid.png`: بررسی کیفی هم‌پوشانی‌ها.
- `reproj_error_hist.png`: توزیع خطا (کشف دنباله‌های سنگین و شکست‌ها).
- `runtime_breakdown.png`: گلوگاه‌های زمانی.
- `ablation_plot.png`: حساسیت به پارامترها.
- `failure_case_*.png`: مرزهای اعتبار و تحلیل علت شکست.

۴.۸ حداقل ابلیشن علمی

برای ادعای پایداری، حداقل این ابلیشن‌ها پیشنهاد می‌شود:

- `nfeatures` در چند مقدار،
- τ در چند مقدار،
- cross-check روشن/خاموش،
- CLAHE روشن/خاموش.

نتیجه‌گیری علمی باید بر «ناحیه‌های پایدار» تکیه کند، نه صرفاً یک نقطه□ بهینه.

۹ نتایج و تحلیل

۱۰ بحث

۱.۱۰ جمع‌بندی علمی از یافته‌ها

یافته‌ها باید بر اساس شواهد کیفی (هم‌پوشانی‌ها) و شواهد کمی (جدول معیارها، توزیع خطا، تحلیل زمان) تفسیر شوند. نسبت درون‌نهشتی بالا معمولاً نشانه□ سازگاری هندسی است، اما تضمین قطعی «درستی» نیست؛ زیرا ممکن است تطبیق‌های غلط به‌صورت منسجم نیز یک هموگرافی غلط بسازند. بنابراین، ترکیب چند شاخص (InlierRatio + تعداد تطبیق + خطای بازفرافکنی در صورت وجود زمین‌حقیقت) برای قضاوت قابل‌اعتمادتر است.

۲.۱۰ محدودیت‌ها

- وابستگی به بافت/ساختار: روش‌های ویژگی‌محور در سطوح بسیار یکنواخت عملکرد ضعیف‌تری دارند.
- حساسیت به بازتاب و نور شدید: تغییرات شدید نور می‌تواند نقاط کلیدی را ناپایدار کند.
- نقض فرض صفحه‌ای: در سطوح سه‌بعدی پیچیده، هموگرافی یکپارچه کافی نیست.
- تکرار الگوها: الگوهای تکراری باعث تطبیق‌های غلط منسجم می‌شوند.

۳.۱۰ کارهای آینده

- افزودن تخمین «کیفیت/اعتماد» صریح و آستانه‌گذاری برای ارجاع به بازبینی انسانی،
- استفاده از روش‌های ترکیبی (مثلاً ویژگی + قیود هندسی اضافی یا شناسایی ،(ROI
- در صورت نیاز به دقت بالاتر، بررسی روش‌های یادگیری (با داده□ کافی و زمین‌حقیقت).

۱۱ بازتولیدپذیری

۱.۱۱ مشخصات محیط اجرا

برای بازتولید دقیق نتایج، باید موارد زیر ثبت شوند:

- سیستم‌عامل و سخت‌افزار ،(CPU RAM و در صورت وجود ،(GPU
- نسخه ،Python
- نسخه OpenCV و نحوه□ نصب،
- فایل وابستگی‌ها (`requirements.txt`).

۲.۱۱ کنترل عدم‌قطعیت (Determinism)

حتی در روش‌های کلاسیک، برخی منابع عدم‌قطعیت ممکن است وجود داشته باشد (چندریسمانی و ...). توصیه می‌شود:

- Seed ثابت برای Python و NumPy تنظیم شود،
- تعداد هایOpenCV Thread ثابت شود،
- تمام پارامترها در `config.json` ذخیره شوند.

۳.۱۱ ثبت فرمان‌های اجرا

برای شفافیت علمی، فرمان‌های اجرا (مسیر داده، مسیر خروجی، مسیر تنظیمات) باید در پیوست ذکر شوند تا هر شخص دیگری بتواند همان خروجی‌ها را تولید کند.

۱۲ اخلاق، حریم خصوصی و ایمنی

۱.۱۲ حریم خصوصی و مدیریت داده

اگر عکس‌ها شامل اطلاعات حساس باشند (چهره، اشیای شخصی، شماره سریال)، باید:

- رضایت جمع‌آوری اخذ شود،
- داده‌ها ایمن و محدود به افراد مجاز نگهداری شوند،
- تا حد امکان با برش ،ROI اطلاعات غیرضروری حذف شود.

۲.۱۲ ایمنی عملیاتی

اگر سامانه در بازرسی صنعتی به‌کار رود، هم‌ترازی اشتباه ممکن است به قضاوت غلط منجر شود. بنابراین:

- باید شاخص اطمینان گزارش شود (نسبت درون‌نهشتی، تعداد تطبیق‌ها، خطاها)،
- موارد کم‌اطمینان باید «رد» یا «برای بازبینی انسانی» علامت‌گذاری شوند.

۳.۱۲ پوشش‌پذیری و تعمیم

اگرچه مدل یادگیری وجود ندارد، اما عملکرد می‌تواند با نوع دوربین، نور، سطح براق/مات، و شلوغی پس‌زمینه تغییر کند. گزارش علمی باید شکست‌ها را صریح بیان کند و از ادعاهای کلی بدون آزمایش نماینده اجتناب نماید.

۱۳ نتیجه‌گیری

در این گزارش، یک سامانه□ هم‌ترازی و هم‌پوشانی الگو بر روی عکس واقعی ارائه شد که بر پایه□ ویژگی‌های محلی ORB و تخمین مقاوم هموگرافی با RANSAC بنا شده است. چارچوب ریاضی هموگرافی و خطای بازفرافکنی به‌صورت دقیق تعریف شد و معیارهای کمی برای ارزیابی و شاخص‌های اطمینان برای کاربرد عملی پیشنهاد گردید. همچنین، خروجی‌های دیباگ و پروتکل‌های بازتولیدپذیری برای تحلیل علمی شکست‌ها و امکان تکرار نتایج تشریح شد. در نهایت، محدودیت‌های روش (وابستگی به بافت، حساسیت به نور، و فرض صفحه‌ای) و مسیرهای توسعه□ آینده مطرح گردید.

قدردانی

نویسنده از (استاد/شرکت/تیم) برای راهنمایی و فراهم‌کردن سناریوها و نمونه‌های ارزیابی تشکر می‌کند. همچنین از ادبیات علمی و منابع کلاسیک هندسه چندنما، برازش مقاوم و ویژگی‌های محلی که مبنای این کار هستند قدردانی می‌شود [۳، ۲، ۱].

آ پیوست

آ.۱ فرمان‌های پیشنهادی اجرا (نمونه)

این بخش را مطابق نام فایل‌های اجرایی خودتان تکمیل کنید. نمونه:

- اجرای تولید هم‌پوشانی‌ها:

```
results/ -out- data/ -data- configs/default.json -config- src.run_alignment -m python
```

- اجرای ارزیابی و تولید شکل‌ها:

```
results/ -results- data/ -data- configs/default.json -config- src.run_eval -m python
```

آ.۲ توضیح انتخاب آستانه‌ها

اگر τ (آستانه RANSAC) بزرگ انتخاب شود، ممکن است تطبیق‌های غلط به‌عنوان درون‌نهشتی پذیرفته شوند و هموگرافی منحرف شود. اگر خیلی کوچک باشد، تعداد درون‌نهشتی کم می‌شود و RANSAC ناپایدار می‌گردد. بنابراین انتخاب τ باید با ابلیشن و با توجه به رزولوشن تصاویر انجام شود.

مراجع

[۱] Bradski، G. and Konolige، K. Rabaud، V. Rublee، E. "Orb: An efficient alternative to sift or surf،" in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)، ۲۰۱۱.

[۲] Bolles، C. R. and Fischler A. M. "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography،" Communications of the ACM، vol. ۲۴، no. ۶، pp. ۳۸۱–۳۹۵، ۱۹۸۱.

[۳] Zisserman، A. and Hartley R. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press، ۲ ed.، ۲۰۰۴.

[۴] Lowe، G. D. "Distinctive image features from scale-invariant keypoints،" International Journal of Computer Vision، vol. ۶۰، no. ۲، pp. ۹۱–۱۱۰، ۲۰۰۴.

[۵] Bradski، G. "The opencv library،" Dr. Dobb's Journal of Software Tools، ۲۰۰۰.