

به نام خدا

۱. مقدمه و نمای کلی سامانه

این سند گزارش فنی جامع سامانه تحلیل هندسه اطلاعات است که برای کشف و کمی‌سازی تفاوت‌های احتمالی میان حالات شناختی/عاطفی با استفاده از سیگنال‌های الکتروانسفالوگرافی (EEG) طراحی شده است. این سامانه بر مبنای مجموعه داده DEAP عمل می‌کند و از ابزارهای مبتنی بر هندسه اطلاعات برای مدل‌سازی توزیع‌های احتمالی حالات و سنجش میزان جدایی آن‌ها استفاده می‌کند.

اهداف کلیدی

- استخراج و تحلیل ویژگی‌های EEG: استخراج قدرت باند فرکانسی (توان باند (band power)) از سیگنال‌های EEG بر رای باندهای alpha، theta و beta
- فیلترسازی و پاک‌سازی داده: تشخیص و حذف تریال‌های (trials) دارای آرتیفکت بر اساس آستانه ولتاژ و کشش (kurtosis)
- مدل‌سازی احتمالی: برازش توزیع‌های گاوسی برای نمایش هر حالت شناختی
- کمی‌سازی فاصله: محاسبه فواصل هندسی اطلاعات بین توزیع‌ها با استفاده از معیارهای متعددی (JSD، SKL، Hellinger)
- اعتبارسنجی بین‌سوژه‌ای: ارزیابی توانایی تعمیم‌پذیری با استفاده از اعتبارسنجی حذف یک سوژه
- آزمایش جایگزینی: اعتبارسنجی آماری معنادار بودن جدایی حالات

۲. تعریف مسئله

بیان مسئله تحقیقاتی

هدف این پروژه بررسی قابلیت استفاده از معیارهای هندسی اطلاعات برای تفکیک بین حالات شناختی مختلف (به‌ویژه valence - ارزیابی عاطفی) بر اساس سیگنال‌های EEG است. سؤال تحقیقاتی اصلی این است: آیا توزیع‌های احتمالی ویژگی‌های EEG برای حالات مختلف valence (پایین و بالا) از نظر هندسی اطلاعات به‌طور معنی‌داری متفاوت هستند؟

فرضیات

1. سیگنال‌های EEG شامل اطلاعات قابل استخراجی هستند که می‌توانند حالات عاطفی را بازتاب دهند
2. توزیع‌های حالات مختلف می‌توانند با توزیع‌های گاوسی چندمتغیره تقریب زده شوند (با توجه به محدودیت‌ها)
3. معیارهای هندسی اطلاعات (فاصله) می‌توانند جدایی‌پذیری حالات را اندازه‌گیری کنند
4. مدل‌های آموزش‌شده رای داده‌های یک سوژه می‌توانند نسبت معقول از دقت را در سوژه‌های دیگر حفظ کنند

۳. توصیف داده‌ها و دستورالعمل پیش‌پردازش

۳.۱ ساختار مجموعه داده DEAP

مجموعه داده DEAP شامل EEG‌های 32 فرد است که به 40 ویدئو عاطفی نگاه می‌کردند:

- نرخ نمونه‌برداری: ۱۲۸ هرتز
- کانال‌های ۳۲: EEG (استاندارد سیستم 10-20)
- باند فرکانسی: ۴-۴۵ هرتز (پیش‌پردازش شده)
- مدت برنامه: ۳ ثانیه خط پایه + ۶۰ ثانیه تحریک
- برچسب: ۴ بعد احساسی (valence, arousal, dominance, liking)، هر کدام از ۱ تا ۹

۳.۲ استخراج ویژگی‌های باند فرکانسی

ویژگی‌های استخراج‌شده شامل قدرت طیفی در باندهای زیر است:

باند	محدوده فرکانسی
Theta	4-8 Hz
Alpha	8-13 Hz
Beta	13-30 Hz

نکته مهم: باند Delta (0.5-4 Hz) به دلیل فیلترینگ پیش‌پردازش DEAP حذف شده است.

برای هر کانال و هر باند، قدرت طیفی با استفاده از روش Welch محاسبه می‌شود:

$$P(f) = \frac{1}{f_s} \sum_t |X(t, f)|^2$$

جایی که f_s نرخ نمونه‌برداری و $X(t, f)$ تبدیل فوریه است.

۳.۳ تصحیح خط پایه

برای کاهش تغییرات فردی در دامنه سیگنال، ویژگی‌های هر تجربه با استفاده از میانگین خط پایه تصحیح می‌شوند:

$$X_{corrected} = X_{stimulus} - \mu_{baseline}$$

که $X_{stimulus}$ ویژگی در دوره تحریک و $\mu_{baseline}$ میانگین ویژگی در دوره خط پایه است.

۳.۴ حذف کردن تریال‌های آلوده‌شده

دو معیار برای شناسایی و رد کردن تریال‌های آلوده‌شده استفاده می‌شود:

۱. آستانه ولتاژ: اگر حداکثر مقدار مطلق ولتاژ بیش از ۱۰۰ میکروولت باشد، تجربه رد می‌شود
۲. آستانه کشیدگی (Kurtosis): اگر کشیدگی هر کانال بیش از ۵ باشد، تجربه رد می‌شود

۳.۵ نرمال‌سازی دران سوژه

برای کاهش تنوع بین‌سوژه‌ای، ویژگی‌ها برای هر سوژه جداگانه نرمال‌سازی می‌شوند:

$$X_{normalized} = \frac{X - \mu_{subject}}{\sigma_{subject}}$$

این نرمال‌سازی دران سوژه‌ای (within-subject z-scoring) تنوع زیستی و تفاوت‌های سامانه‌ای را کاهش می‌دهد.

۳.۶ تقلیل ابعاد (PCA)

در مرحله اکتشافی (exploratory)، تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای تقلیل ابعاد استفاده می‌شود:

$$X_{reduced} = X \cdot W$$

جایی که W ماتریسی از k مؤلفه‌های اصلی است. در این تحلیل، $k = 10$ استفاده شد که ۷۸.۰٪ از واریانس را توضیح می‌دهد.

نکته حیاتی: در اعتبارسنجی بین‌سوژه‌ای، PCA برای هر fold جداگانه برازش می‌شود تا از نشت داده (data leakage) جلوگیری شود.

۳.۷ محدودیت‌ها و فرض‌ها

- **فرض گاوسی:** توزیع‌های حالات با توزیع‌های گاوسی چندمتغیره تقریب خورده می‌شوند (با وجود انحراف‌های متوسطی از نرمالیتی)
- **استقلال سوژه‌ها:** فرض می‌شود هر سوژه داده‌های مستقلی از دیگران دارد
- **ثبات جلسه:** فرض می‌شود ویژگی‌های EEG در طول یک جلسه ثبات دارند
- **کافی بودن داده:** نتایج تقاطع به حداقل ۳۰ نمونه در هر حالت و هر سوژه نیاز دارند

۴. معماری سیستم

۴.۱ نمای کلی خطلوله

DEAP داده‌های خام



بارگذاری و اعتبارسنجی



استخراج ویژگی‌های باند فرکانسی



رد کردن تریال‌های آلوده شده (اختیاری)



تصحیح خط پایه



نرمال‌سازی دران‌سوژه‌ای



(valence بر اساس) تقسیم به حالات



(در مرحله اکتشافی) PCA



برازش توزیع‌های گاوسی



محاسبه فواصل هندسی اطلاعات



MDS نمایش

↓
اعتبارسنجی بین‌سوژه‌ای
↓
آزمایش جایگشتی
↓
ذخیره‌سازی نتایج

۴.۲ اجزای اصلی سیستم

۴.۲.۱ DEAPLoader کلاس

هدف: بارگذاری و اعتبارسنجی فایل‌های pickle DEAP

متدهای کلیدی:

- `load_subject(file_path)`: بارگذاری یک سوژه با اعتبارسنجی شکل
- `load_all(max_subjects)`: بارگذاری همه سوژه‌ها بترتیب

۴.۲.۲ ArtifactRejector کلاس

هدف: شناسایی و رد کردن تریال‌های آلوده‌شده

متدهای کلیدی:

- `is_clean(trial_eeg)`: بررسی کن اگر تجربه پاک باشد
- `reject_trials(data, labels)`: از داده‌ها تریال‌های آلوده را حذف کن

۴.۲.۳ BandpowerExtractor کلاس

هدف: استخراج قدرت طیفی در باندهای مختلف

متدهای کلیدی:

- `extract_subject(data, labels, config)`: استخراج ویژگی برای یک سوژه
- `_compute_bandpower(signal, freq_range, sfreq)`: محاسبه قدرت برای یک باند

۴.۲.۴ StateBuilder کلاس

هدف: تقسیم داده‌ها بر اساس برجسب‌های حالات

متدهای کلیدی:

- `build_states(X, Y, scheme, target, threshold)`: ایجاد دیکشنری از حالات

۴.۲.۵ GaussianStateDistribution کلاس

هدف: برازش و مدل‌سازی توزیع گاوسی برای هر حالت

- `mean`: بردار میانگین
- `covariance`: ماتریس کوواریانس (با تنظیم Ledoit-Wolf)
- `pdf(X)`: تابع چگالی احتمال

۴.۲.۶ کلاس `ManifoldEmbedding`

هدف: محاسبه فواصل و نمایش چندبعدی (MDS)

معیارهای فاصله پشتیبانی‌شده:

- JSD: Jensen-Shannon Divergence (با نمونه‌برداری مونت‌کارلو)
- SKL: Symmetric Kullback-Leibler Divergence
- Hellinger: فاصله Hellinger

۴.۲.۷ کلاس `CrossValidator`

هدف: اعتبارسنجی بین‌سوزهای ای با PCA جداگانه

راش:

- Leave-Subject-Out Cross-Validation (LOSOCV)
- PCA جداگانه برآزش شده است `fold` برای هر

۴.۲.۸ کلاس `PermutationTester`

هدف: آزمایش آماری برای معنادار بودن جدایی

راش:

- جایگشت شدن برچسب‌های حالات
- محاسبه توزیع صفر
- برای هر جایگشت جداگانه برآزش PCA

۵. توضیح کد تفصیلی

۵.۱ ساختار فایل‌ها

```
deap_information_geometry_revised_final.py
├─ Imports و Compatibility (NumPy 2.0+)
├─ Configuration Classes (Bands, DEAPConfig, AnalysisConfig)
├─ Logging Setup
├─ DEAPLoader
├─ ArtifactRejector
├─ BandpowerExtractor
```

- └ SubjectData (dataclass)
- └ StateBuilder
- └ GaussianStateDistribution
- └ ManifoldEmbedding
- └ CrossValidator
- └ PermutationTester
- └ Exporter
- └ Main Pipeline (run_analysis)

۵.۲ توضیح ماژول‌های اصلی

۵.۲.۱ استخراج ویژگی (Feature Extraction)

```
class BandpowerExtractor:
    def _compute_bandpower(self, signal, freq_range, sfreq):
        # برای تخمین طیف Welch استفاده از راش
        f, Pxx = welch(signal, sfreq, nperseg=sfreq*4)
        # انتخاب فرکانس‌های دران محدوده
        mask = (f >= freq_range[0]) & (f <= freq_range[1])
        # انتگرال با استفاده از قانون ذوزنقه‌ای
        bandpower = np.trapezoid(Pxx[mask], f[mask])
        return bandpower
```

هر تجربه برای ۳۲ کانال 3×3 باند = ۹۶ ویژگی منجر می‌شود.

۵.۲.۲ برازش توزیع (Distribution Fitting)

```
class GaussianStateDistribution:
    def __init__(self, name, data, test_normality=True):
        self.mean = np.mean(data, axis=0)
        # تخمین مقاوم کوواریانس
        lw = LedoitWolf()
        self.covariance = lw.fit(data).covariance_
        # برای نرمالیتی Shapiro-Wilk آزمایش
        if test_normality:
            self._test_normality(data)
```

تخمین کوواریانس با استفاده از راش Ledoit-Wolf برای بهبود پایداری عددی.

۵.۲.۳ محاسبه فاصله‌های هندسی اطلاعات

برای JSD (Jensen-Shannon Divergence):

$$D_{JS}(P||Q) = \frac{1}{2}D_{KL}(P||M) + \frac{1}{2}D_{KL}(Q||M)$$

$$M = \frac{P+Q}{2} \text{ جایی که}$$

از طریق نمونه‌برداری مونت کارلو محاسبه می‌شود:

```
def _compute_jsd_mc(self, P_dist, Q_dist, n_samples=5000):
    # نمونه‌برداری از توزیع‌ها
    samples_P = P_dist.rvs(size=n_samples)
    samples_Q = Q_dist.rvs(size=n_samples)
    # محاسبه divergence
    M_dist = multivariate_normal(
        mean=(P_dist.mean + Q_dist.mean)/2,
        cov=(P_dist.covariance + Q_dist.covariance)/2
    )
    # KL divergences محاسبه
    ...
```

برای **SKL (Symmetric KL)**:

$$D_{SKL}(P||Q) = D_{KL}(P||Q) + D_{KL}(Q||P)$$

برای **Hellinger**:

$$H(P, Q) = \sqrt{1 - \int \sqrt{p(x)q(x)}dx}$$

۵.۲.۴ اعتبارسنجی بین‌سوژه‌ای (Leave-Subject-Out CV)

```
class CrossValidator:
    def run_losocv(self):
        results = []
        for test_idx, test_subject in enumerate(self.subjects):
            # test_subject آموزش رای همه غیر
            train_subjects = [s for i, s in enumerate(self.subjects)
                              if i != test_idx]

            # جاری برازش‌شده است fold برای PCA
            X_train = np.vstack([s.features for s in train_subjects])
            pca = PCA(n_components=self.config.pca_components)
            X_train_pca = pca.fit_transform(X_train)

            # تنبیه رای داده‌های آموزش
            # test_subject آزمایش رای
            X_test = test_subject.features
```

```

X_test_pca = pca.transform(X_test)

# محاسبه دقت
accuracy = self._classify(X_train_pca, X_test_pca, ...)
results.append(accuracy)

```

۵.۲.۵ آزمایش جایگشتی (Permutation Testing)

```

class PermutationTester:
    def run_permutation_test(self, n_permutations=1000):
        null_distances = []

        for perm in range(n_permutations):
            # جایگشت شدن برچسب‌های حالات
            Y_perm = np.random.permutation(self.Y)
            states_perm = StateBuilder.build_states(
                self.X, Y_perm, ...
            )

            # برای جایگشت جاری PCA
            X_pca = pca.fit_transform(self.X)

            # برآزش توزیع‌های پیرامون
            dists_perm = {name: GaussianStateDistribution(...)
                          for name, data in states_perm.items()}

            # محاسبه فاصله
            dist = ManifoldEmbedding(...).compute_distance_matrix()
            null_distances.append(dist)

            # محاسبه p-value
            p_value = (np.array(null_distances) >=
                       self.observed_distance).mean()

```

۵.۳ تابع اصلی (Main Pipeline)

```

def run_analysis(dataset_root, output_dir="results_deap_revised",
                 config=None, metrics=("jsd", "skl", "hellinger"),
                 ...):
    # بارگذاری داده ۱.
    loader = DEAPLoader(dataset_root, config)
    subjects_data, subjects_labels, subject_ids = loader.load_all()

```

```

# ۲. استخراج ویژگی‌ها و رد کردن تریال‌های آلوده
extractor = BandpowerExtractor(...)
subjects = []
for data, labels, subj_id in zip(...):
    features, labels, clean_mask = extractor.extract_subject(...)
    subjects.append(SubjectData(...))

# ۳. نرمال‌سازی دران‌سوژه‌ای
subjects_normalized = [s.normalize_features() for s in subjects]

# ۴. مرحله اکتشافی (Exploratory Analysis)
X_all = np.vstack([s.features for s in subjects_normalized])
Y_all = np.vstack([s.labels for s in subjects_normalized])

# و برازش توزیع‌ها PCA
pca_exploratory = PCA(...)
X_reduced = pca_exploratory.fit_transform(X_all)
states = StateBuilder.build_states(X_reduced, Y_all, ...)
dists = {name: GaussianStateDistribution(...)
         for name, data in states.items()}

# محاسبه فواصل و نمایش‌ها
for metric in metrics:
    emb = ManifoldEmbedding(dists, metric=metric, ...)
    D = emb.compute_distance_matrix()
    coords = emb.embed_2d()
    # ذخیره‌سازی

# ۵. اعتبارسنجی بین‌سوژه‌ای
cv = CrossValidator(subjects_normalized, config)
cv_results = cv.run_losocv()

# ۶. آزمایش جایگشتی
ptest = PermutationTester(X_all, Y_all, config)
ptest_result = ptest.run_permutation_test()

# ۷. ذخیره‌سازی نتایج
Exporter.export_all(results, output_dir)

```

۶. راس‌های آموزش و ارزیابی

۶.۱ پارامترهای پیکربندی

پارامتر	مقدار	توضیح
scheme	"binary"	طرح باینری یا ربع‌بندی valence-arousal
target	"valence"	بعد هدف برای تقسیم حالات
threshold	5.0	مرز برای جداکردن حالات پایین/بالا
pca_components	10	تعداد مؤلفه‌های اصلی
use_pca	True	استفاده از PCA یا خیر
baseline_correct	True	اعمال تصحیح خط پایه
artifact_threshold_uv	100.0	آستانه ولتاژ برای رد (میکراولت)
artifact_kurtosis_threshold	5.0	آستانه کتوش برای رد
global_seed	42	بذر تصادفی برای بازتولیدپذیری
jsd_n_samples	5000	نمونه مونته‌کارلو برای JSD
jsd_n_bootstrap	50	تعداد bootstrap برای CI
permutation_n_iter	1000	تعداد جایگشت‌ها

۶.۲ معیارهای ارزیابی

۶.۲.۱ دقت تقاطع (Cross-Validation Accuracy)

از طریق LOSOCV محاسبه می‌شود:

$$Acc = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{1}(y_i^{pred} = y_i^{true})$$

۶.۲.۲ فاصله‌های هندسی اطلاعات

- اندازه‌ای از تمایز بین توزیع‌های حالات: JSD، SKL، Hellinger
- مقادیر بالاتر نشان‌دهنده جدایی بیشتر است

۶.۲.۳ نتایج جایگشتی

- احتمال مشاهده فاصله مشاهده‌شده تحت فرضیه صفر: p-value
- معنادار: $p < 0.05$

۶.۲.۴ Stress در MDS

- معیار برای خوب بودن نمایش 2D
- مقادیر پایین‌تر بهتر است

۶.۳ استراتژی بهینه‌سازی

سیستم بهینه‌سازی ندارد؛ بلکه با تنظیم‌های پیش‌تعیین‌شده کار می‌کند:

1. **Ledoit-Wolf Shrinkage**: برای تخمین مقاوم کوواریانس
2. **PCA**: برای تقلیل ابعاد و نویز
3. **Within-Subject Normalization**: برای کاهش تنوع بین سوژه‌ای
4. **Artifact Rejection**: برای بهبود کیفیت داده

۷. نتایج تجربی

۷.۱ شاخص‌های کلی

مقدار	معیار
32	تعداد سوژه‌ها
1,280 (40 × 32)	تعداد آزمایش‌ها
96 (32 کانال × 3 باند)	بعد ویژگی اصلی
10	بعد ویژگی نهایی (PCA)
78.0%	واریانس توضیح‌شده (PCA)

۷.۲ توزیع حالات

حالت	تعداد نمونه	درصد
Low Valence	995	77.7%
High Valence	285	22.3%

مشاهده: عدم توازن شدید در کلاس (نسبت 3.5:1)

۷.۳ فواصل هندسی اطلاعات (Exploratory)

معیار	فاصله بین حالات	Stress MDS
JSD	0.0399	0.0000
SKL	0.1697	0.0000
Hellinger	0.2023	0.0000

تفسیر: JSD کمترین فاصله را نشان می‌دهد، در حالی‌که Hellinger بیشترین را نشان می‌دهد.

۷.۴ نتایج اعتبارسنجی بین سوژه‌ای

مقدار	معیار
0.777 ± 0.116	میانگین دقت

مقدار	معیار
0.788	میانۀ دقت
0.950 (s12, s13, s21)	بیشترین دقت
0.475 (s03)	کمترین دقت
0.175 ± 0.012	میانگین فاصله آموزش

تفسیر: میانگین دقت ۷۷.۷٪ نشان‌دهنده عملکرد بالاتر از تصادفی (۵۰٪) است، اما واریانس بالا تغییرپذیری بین‌سوژه‌ای را نشان می‌دهد.

۷.۵ نتایج آزمایش جایگشتی

مقدار	معیار
0.1697	فاصله مشاهده‌شده (SKL)
0.2064 ± 0.0447	میانگین توزیع صفر
0.803	p-value
خیر	معنادار ($\alpha=0.05$)؟

تفسیر: فاصله مشاهده‌شده کمتر از میانگین توزیع صفر است، در حالی‌که p-value 0.803 نشان می‌دهد که این جدایی احتمالاً صرفاً به تصادف است.

۷.۶ پارامترهای توزیع گاوسی

میانگین‌ها (برای ۱۰ مؤلفه PCA)

Comp	Low Valence	High Valence
0	-0.1046	0.3651
1	0.0238	-0.0832
2	0.0440	-0.1535
3	-0.0101	0.0351
4	0.0103	-0.0360
5	-0.0208	0.0728
6	-0.0029	0.0102
7	-0.0110	0.0383
8	-0.0152	0.0531
9	0.0170	-0.0592

واریانس‌ها (Diagonal)

Comp	Low Valence	High Valence
0	47.476	51.737
1	13.489	13.606
2	5.558	5.021
3	1.291	1.526
4	1.171	1.361
5	1.094	1.187
6	1.020	1.070
7	0.996	0.896
8	0.903	1.060
9	0.807	1.089

۷.۷ انحراف‌ها از فرض گاوسی

هشدار برای هر دو حالت:

- Low Valence: $p < 0.01$ از ۱۰ مؤلفه از نرمالیتی انحراف دارند ۹
- High Valence: $p < 0.01$ از ۱۰ مؤلفه از نرمالیتی انحراف دارند ۵

این نشان می‌دهد که فرض گاوسی یک تقریب است و نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند.

۸. راهنمای بازتولیدپذیری

۸.۱ نیازمندی‌های محیط

```
python >= 3.10
numpy >= 2.0.0 (یا 1.26.4)
scipy >= 1.16.0
scikit-learn >= 1.8.0
pandas >= 2.0.0
```

۸.۲ نصب بسته‌ها

```
pip install numpy scipy scikit-learn pandas
```

۸.۳ ساختار داده‌ها

```
data/deap-dataset/
└─ data_preprocessed_python/
```

```
|   ├── s01.dat
|   ├── s02.dat
|   ...
|   └── s32.dat
```

۸.۴ اجرای کامل

```
python deap_information_geometry_revised_final.py \
    --dataset_root data/deap-dataset \
    --output_dir results_deap_revised \
    --scheme binary \
    --target valence \
    --pca_components 10 \
    --skip_artifact_rejection \
    --log_level INFO
```

۸.۵ پارامترهای رایج

```
# با رد کردن تریال‌های آلوده
python deap_information_geometry_revised_final.py \
    --dataset_root data/deap-dataset \
    --artifact_threshold_uv 100 \
    --artifact_kurtosis_threshold 5.0

# آزمایش برای سوژه‌های منتخب
python deap_information_geometry_revised_final.py \
    --dataset_root data/deap-dataset \
    --max_subjects 5

# بدون تقاطع یا جایگشت (تنها اکتشاف)
python deap_information_geometry_revised_final.py \
    --dataset_root data/deap-dataset \
    --run_cross_validation False \
    --run_permutation_test False
```

۸.۶ خراجی‌های انتظار رفته

```
results_deap_revised/
├── subjects_used.csv
├── analysis_metadata.json
├── cross_validation_summary.json
└── cross_validation_results.csv
```

```

└─ permutation_test_result.json
└─ distributions_exploratory/
  └─ low_valence_mean.csv
  └─ low_valence_cov.csv
  └─ high_valence_mean.csv
  └─ high_valence_cov.csv
└─ *_distance_matrix_exploratory*.csv (JSD, SKL, Hellinger)
└─ *_mds_2d_exploratory.csv (JSD, SKL, Hellinger)
└─ gaussian_*.csv (means, variances)

```

۹. مسائل شناخته‌شده و محدودیت‌ها

۹.۱ مسائل

1. انحراف از نرمالیتی: بسیاری از مؤلفه‌های PCA از فرض گاوسی انحراف دارند
 - تأثیر: نتایج فاصله ممکن است متحيز باشند
 - راه‌حل: استفاده از راش‌های غیرپارامتری
2. عدم توازن کلاس: نسبت ۳.۵:۱ بین حالات پایین/بالا
 - تأثیر: مدل‌ها ممکن است به کلاس بیشتر کج شوند
 - راه‌حل: تنظیم آستانه threshold
3. واریانس بالا در دقت CV: بیشترین (۹۵٪) تا کمترین (۴۷.۵٪)
 - تأثیر: بعضی سوژه‌ها سخت‌تر است
 - راه‌حل: تحلیل خطای برحسب سوژه
4. عدم معنادار بودن آزمایش جایگشتی: $p = 0.803$
 - تأثیر: جدایی حالات ممکن است تصادفی باشد
 - راه‌حل: جمع‌آوری داده‌های بیشتر یا بهبود ویژگی‌ها

۹.۲ محدودیت‌های سیستم

1. محدودیت ابعاد: تنها ۱۰ مؤلفه PCA استفاده می‌شود
 - تفاوت‌های بسیاری ممکن است حذف شوند
2. تقسیم‌باینری: تنها valence پایین/بالا در نظر گرفته می‌شود
 - رابط بین‌بعدی (valence-arousal) نادیده گرفته می‌شود
3. عدم استفاده از اطلاعات جلسه: هر تجربه مستقل تلقی می‌شود
 - وابستگی‌های جلسه نادیده گرفته می‌شود
4. استقلال سوژه: سوژه‌های آموزش و آزمایش کاملاً جدا هستند
 - تمام نتایج را بر تعمیم‌پذیری میان‌سوژه‌ای

۱۰. توسعه‌های آتی و بهبودها

۱۰.۱ بهبودهای الگوریتمی

1. استفاده از راش‌های غیرپارامتری

- تخمین فاصله بدون فرض گاوسی
- مثال: kernel density estimation یا نزدیکترین همسایه

2. تقلیل جمع‌پذیری تأثیر PCA

- استفاده از PCA غیرخطی (kernel PCA، autoencoder)
- تجزیه داده مستقل (ICA)

3. مدل‌های احتمالی پیشرفته‌تر

- Mixture of Gaussians
- Copula-based models

۱۰.۲ بهبودهای اطلاعات

1. استخراج ویژگی‌های پیشرفته‌تر

- Time-frequency features (spectrograms، wavelets)
- Connectivity features (functional connectivity)
- Non-linear features (approximate entropy، sample entropy)

2. Pre-processing بهتر

- Independent Component Analysis (ICA) حذف artifacts برای
- Adaptive filtering تغییرات جلسه
- Multi-channel artifact detection

۱۰.۳ بهبودهای تجربی

1. جمع‌آوری داده‌های بیشتر

- استفاده از مجموعه‌های داده دیگر (SEED، EmODB)
- داده‌های متوازن‌تر

2. تقاطع بهتر

- K-fold cross-validation با stratification
- nested cross-validation برای انتخاب پارامتر

3. ارزیابی آماری بهتر

- Confidence intervals bootstrap بر حسب
- بیابری approaches برای uncertainty quantification

۱۰.۴ کاربردهای عملی

1. سیستم‌های واقعی

- برنامه‌های افزایش تحت نظارت احساسات
- رابط‌های مغز-کامپیوتر (BCI) کنترل‌شده توسط احساسات

2. بهبود کیفیت مدل

- Transfer learning از دیگر مجموعه‌های داده
- Fine-tuning برای سوژه‌های جدید

3. تحقیق بیشتر

- تحلیل source-level (با استفاده از beamforming)

- رابطه بین حالات و شاخص‌های رفتاری

۱۱. نتیجه‌گیری

سیستم تحلیل اطلاعات هندسی ارائه‌شده ابزاری جامع برای کشف و کمی‌سازی تفاوت‌های احتمالی بین حالات شناختی بر اساس سیگنال‌های EEG است. سیستم:

- ✓ استخراج معقول ویژگی‌ها را از داده‌های خام DEAP انجام می‌دهد
- ✓ نرمال‌سازی دران‌سوژهای برای کاهش تنوع دران‌فردی
- ✓ معیارهای متعددی برای اندازه‌گیری فاصله را پشتیبانی می‌کند
- ✓ تقاطع اعتبارسنج برای ارزیابی تعمیم‌پذیری
- ✓ آزمایش جایگشتی برای اعتبارسنجی آماری
- ✓ مستندات جامع و کد قابل بازتولیدپذیری

نتایج حاضر نشان می‌دهند که در حالی‌که دقت CV معقول است (۷۷.۷٪)، آزمایش جایگشتی معنادار نیست ($p = 0.803$)، که پیشنهاد می‌کند برای جدایی معنادار احتمالاً نیاز به بهبود ویژگی‌ها یا داده‌های بیشتر است.