

تحلیل داده‌های اندازه‌گیری چهار کیوبیت و ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین

هدف؛ بررسی مجموعه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری چهار کیوبیت است. تلاش شد تا با استفاده از روش‌های مختلف آموزش ماشین و مهندسی داده، قابلیت تفکیک‌پذیری (Separability) کlassen‌های تعریف شده در داده ارزیابی شود.

داده‌ها در قالب ۱۶ فایل متнی با نام‌هایی از 0000.txt تا 1111.txt ارائه شده. نام فایل‌ها به عنوان برچسب کلاس (label) استفاده شده و هر فایل شامل چهار خط (چهار کیوبیت) و هزار مقدار مختلط برای هر خط است. هدف کشف الگو یا وابستگی میان خروجی اندازه‌گیری‌ها و این برچسب‌های چهاربیتی.

این نوشتار شامل مراحل تحلیل داده، اعمال مدل‌های مختلف، مهندسی داده، بررسی نتایج و در نهایت طرح پرسش‌های فیزیکی کلیدی است.

بررسی اولیه داده‌ها

هر فایل شامل چهار خط که هر خط مربوط به یک کیوبیت است. هر خط شامل هزار مقدار مختلط به صورت $(a + bj)$ است. برای هر اندازه‌گیری، چهار مقدار مختلط مربوط به چهار کیوبیت به عنوان یک نمونه در نظر گرفته شد. در نتیجه پس از ادغام ۱۶ فایل، در مجموع ۱۶۰۰۰ نمونه ایجاد شد.

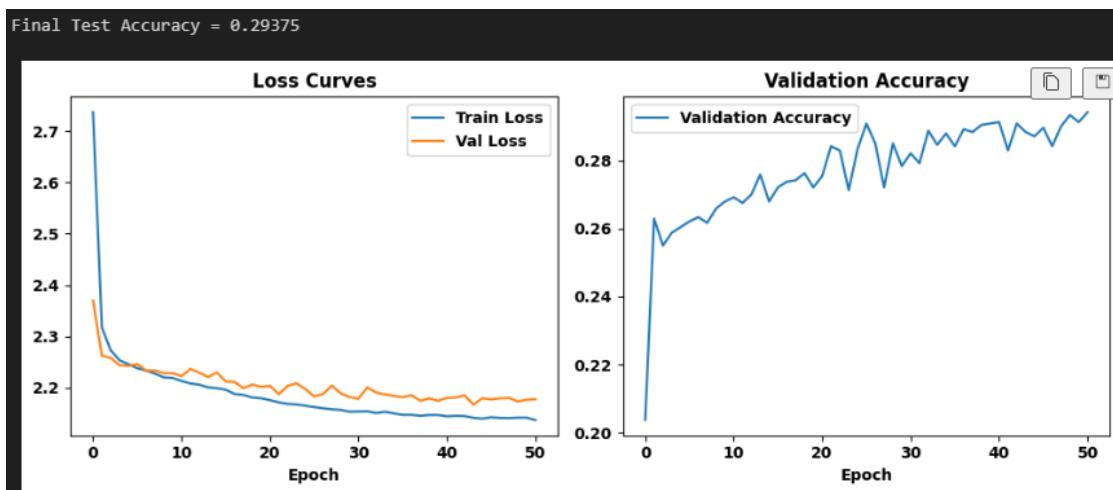
برای هر مقدار مختلط، ابتدا ویژگی‌های پایه استخراج شد:

- بخش حقیقی (real)

- بخش موهومی (imag)

- اندازه (magnitude)

- فاز (phase)

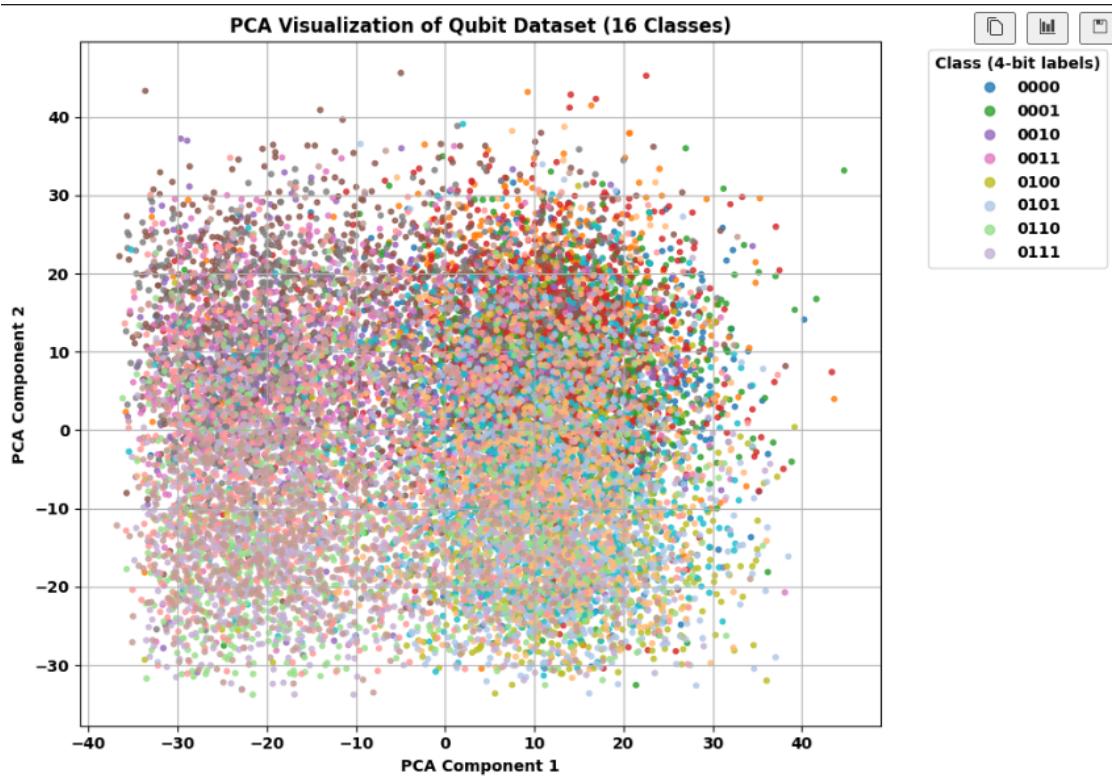


شکل ۱ : مدل برای ورودی چهار کیوبیت و در نظر گرفتن تنها اندازه - بزرگی - هر داده این فرایند در نسخه های بعدی داده ها منجر به ۱۶ ویژگی برای هر نمونه شد.

نمایش داده ها در فضای دو بعدی

برای بررسی بصری توزیع داده ها، از نگاشت های کاهش بعد مانند PCA، t-SNE و UMAP استفاده شد. انتظار می رفت که اگر بین داده ها و برچسب ها رابطه قابل تشخیصی وجود دارد، کلاس ها در این فضاهای تا حدی از یکدیگر جدا شوند.

اما کلاس ها تقریباً کاملاً روی یکدیگر افتاده اند و جداسازی روشنی مشاهده نشد. این اولین نشانه بود که وابستگی میان خروجی اندازه گیری و برچسب های چهار کیوبیتی ضعیف است.



شکل ۲: نمایش بر حسب برچسب های در فضای دو بعدی

آزمایش مدل MLP با ورودی ۱۶ ویژگی

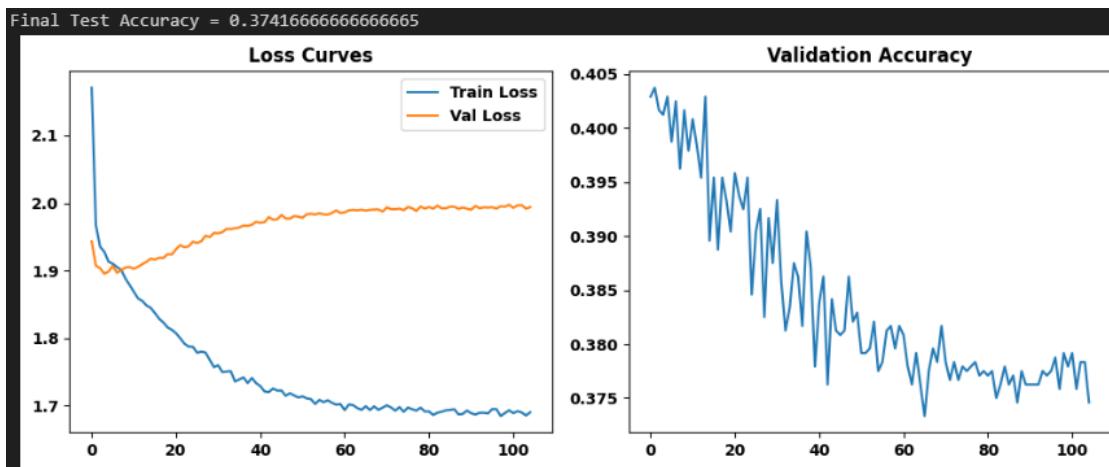
در این مرحله یک شبکه عصبی چندلایه با ورودی ۱۶ تایی آزمایش شد. مدل شامل لایه های Linear و تابع فعال سازی ReLU و تابع BatchNorm بود.

نتایج:

- دقت آموزش حدود ۴۰ درصد
- دقت اعتبارسنجی حدود ۳۸ تا ۴۰ درصد
- دقت تست حدود ۳۷ درصد

نکته مهم اینجاست که:

- دقت آموزش فقط کمی بالاتر از دقت تست بود.



شکل ۳: مدل برای ورودی چهار کیوبیت و در نظر گرفتن ۱۶ ویژگی برای هر داده.

- مدل بیشبرازش (Overfitting) نداشت.

- مدل مقدار قابل توجهی از الگو را یاد نگرفت.

این نتایج نشان می‌دهد که داده‌ها تنها مقدار اندکی اطلاعات درباره برچسب‌ها حمل می‌کنند، ولی این اطلاعات ضعیف است.

مهندسی ویژگی پیشرفته

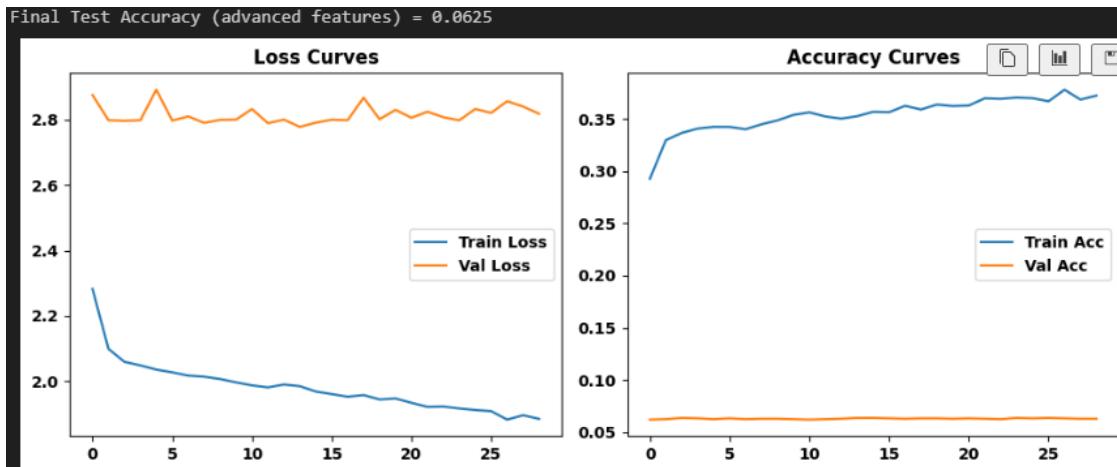
برای افزایش عمق اطلاعات مدل، مجموعه‌ای از ویژگی‌های مهندسی شده اضافه شد، شامل:

- اختلاف بزرگی‌ها: $|q_i| - |q_j|$
- اختلاف فازها
- ضرب بخش حقیقی بین جفت کیوبیت‌ها
- ضرب بخش موهومی
- نسبت بزرگی‌ها: $|q_i|/|q_j|$
- ضرب داخلی مختلط: $\text{Re}(q_i q_j^*)$

- فاصله اقلیدسی در صفحه مختلط

. این ویژگی‌ها مجموعاً حدود ۶۴ ویژگی برای هر نمونه ایجاد کردند (dataset_X_advanced).

نتایج مدل MLP روی داده‌های پیش‌رفته



شکل ۴: مدل برای ورودی چهار کیوبیت و در نظر گرفتن ۶۴ ویژگی برای هر داده. مثلا اختلاف فاز، اختلاف قسمت حقیقی، اختلاف قسمت موهومی، ضرب داخلی و ... نتایج تقریباً نامید کننده بود:

- دقیق اعتبارسنجی نزدیک به ۶ درصد (برابر حد تصادفی برای ۱۶ کلاس)
- دقیق تست نیز حدود ۶ درصد

یعنی مدل هیچ الگویی قابل استفاده در داده پیدا نکرد. افزایش تعداد ویژگی‌ها به جای کمک، نویز را بیشتر کرده و سیگنال داده کاملاً از بین رفت.

تحلیل نتایج

سه یافته مهم:

یافته اول: داده نسخه ۷۲ شامل کمی اطلاعات بود

مقدار دقیق نزدیک به ۳۷٪ نشان می‌دهد که یک الگوی بسیار ضعیف ولی واقعی در داده وجود دارد. بنابراین داده‌ها کاملاً تصادفی نیستند. با این حال مقدارهای مختلف در هر فایل تقریباً از توزیع مشابه هستند.

یافته دوم: داده مهندسی شده سیگنال را از بین برد

ظاهر شدن دقیق حدود ۶٪ (دقیق تصادفی ۱۶ کلاس) نشان می‌دهد که:

- ویژگی‌های جدید هم‌بستگی موردنظر را تقویت نکردند.
- داده دارای ساختار بسیار حساس بوده و نسبت به تغییر فضای شکننده است.
- افزایش بعد باعث غرق شدن مدل در نویز شده است.

یافته سوم: احتمالاً مشکل از مدل نیست، مشکل از خود داده است

چون:

- مدل‌های مختلف آزمایش شد.
- شبکه عصبی دچار بیش‌برازش نشد.
- دقیق آموزش و تست بسیار نزدیک بود.
- روش‌های کاهش بعد هیچ تفکیکی را نشان ندادند.

این نشان می‌دهد:

وابستگی میان خروجی اندازه‌گیری و برچسب کلاس بسیار ضعیف یا تقریباً صفر است.

جدول مقایسه مدل‌ها

| دقیقت تست | دقیقت آموزش | تعداد ویژگی‌ها | روش |
|-----------|-------------|----------------|-------------------|
| ۳۰% | ۲۹% | ۴ | MLP |
| ۴۰%–۳۵ | — | ۱۶ | XGBoost |
| ۶% | ۳۶% | ۶۴ | Advanced Features |

جدول ۱ : مقایسه عملکرد مدل‌ها روی سه نسخه از داده‌ها

جمع‌بندی و پرسش‌های کلیدی برای گروه آزمایش

با توجه به نتایج، چند پرسش اساسی مطرح می‌شود:

۱. برچسب‌های چهاربیتی (مثالاً 0001، 1010) دقیقاً چه معنای فیزیکی دارند؟
۲. انتظار فیزیکی از اندازه‌گیری‌های کیوبیتی چیست؟ آیا خروجی باید بتواند این برچسب‌ها را بازسازی کند؟
۳. آیا اندازه‌گیری تک‌کیوبیتی برای بازسازی یک حالت چندکیوبیتی کافی است؟
۴. آیا اندازه‌گیری‌ها تحت نویز شدید بوده‌اند؟
۵. آیا ممکن است بین اندازه‌گیری و برچسب‌گذاری، عدم انتظام یا اشتباه وجود داشته باشد؟
۶. آیا لازم است به جای اندازه‌گیری مستقیم دامنه‌ها، از اندازه‌گیری‌های چندکیوبیتی یا همبستگی‌ها استفاده شود؟

پیشنهادها برای بهبود

- بررسی فیزیکی دقیق‌تر کیفیت داده و نوع اندازه‌گیری
- تحلیل همبستگی‌ها بین کیوبیت‌ها و ارتباط فیزیکی احتمالی بین آن‌ها
- استفاده از اندازه‌گیری‌های مربوطه به چندکیوبیت مانند درهم تنیدگی کیوبیت‌ها، پاریته آن‌ها و ...

- بازتعریف برچسب‌ها در صورت نیاز

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که اگرچه داده نسخه اولیه دارای ساختار بسیار ضعیف برای یادگیری بود، اما ویژگی‌های پیشرفته نتوانستند این سیگنال ضعیف را تقویت کنند، که احتمالاً به دلیل نویز بالا یا عدم سازگاری ماهوی اندازه‌گیری با برچسب‌های کلاس است.

بنابراین لازم است پیش از ادامه تحلیل‌های یادگیری ماشین، ارتباط فیزیکی دقیق میان برچسب‌ها و خروجی‌های اندازه‌گیری بازبینی شود.