

Hệ thống nhận dạng vân tay: Tối ưu hóa quy trình xử lý ảnh và đánh giá trên tập dữ liệu SOCOFing

Hoàng Thị Hoạt, Nguyễn Việt Hùng, Nguyễn Lý Tiên, Đào Ngọc Long
Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Giảng viên hướng dẫn: ThS. Đào Việt Cường

Abstract

Bài báo này trình bày quy trình xây dựng và đánh giá hệ thống nhận dạng vân tay tự động (AFIS) sử dụng các kỹ thuật xử lý ảnh số tiên tiến. Hệ thống được thiết kế theo mô hình pipeline gồm: Tiền xử lý (Chuẩn hóa Hong, Tăng cường CLAHE), Phân đoạn ROI, Làm mảnh xương (Skeletonization) và Trích xuất đặc trưng Minutiae. Thực nghiệm được tiến hành trên bộ dữ liệu **SOCOFing** với các mức độ biến dạng khác nhau (Easy, Medium, Hard). Kết quả đánh giá thông qua các chỉ số Accuracy, FAR, FRR và biểu đồ Radar cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, đạt độ chính xác cao trên tập dữ liệu chuẩn và duy trì hiệu năng tốt ngay cả với các mẫu vân tay bị biến dạng trung bình.

1 Giới thiệu

Nhận dạng vân tay là công nghệ sinh trắc học phổ biến nhất hiện nay. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất nằm ở việc xử lý các ảnh vân tay chất lượng kém do mờ, nhiễu hoặc biến dạng vật lý. Nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng một quy trình xử lý "thông minh" (Smart Pipeline) tích hợp các giải thuật tối ưu để giải quyết bài toán trên.

Chúng tôi sử dụng bộ dữ liệu SOCOFing (Sokoto Coventry Fingerprint Dataset) để kiểm thử. Đây là bộ dữ liệu chứa các ảnh vân tay thực (Real) và các ảnh bị biến dạng nhân tạo (Altered) theo các cấp độ, giúp đánh giá toàn diện độ bền vững của thuật toán.

2 Dữ liệu và Công cụ

2.1 Bộ dữ liệu SOCOFing

Hệ thống sử dụng 4 tập dữ liệu con từ SOCOFing:

- **Real:** 1000 ảnh vân tay gốc chất lượng tốt.
- **Easy:** Ảnh bị biến dạng nhẹ (xóa mờ, nhiễu hạt).
- **Medium:** Ảnh biến dạng trung bình.
- **Hard:** Ảnh biến dạng nặng, mất thông tin nhiều.



Figure 1: Minh họa các mức độ biến dạng trong dữ liệu SOCOFing.

3 Phương pháp đề xuất

Hệ thống được xây dựng dựa trên các thư viện Python mạnh mẽ như OpenCV, NumPy và Scikit-image.

3.1 Quy trình tổng thể

Quy trình xử lý từ ảnh đầu vào đến quyết định cuối cùng được mô tả chi tiết trong Hình 2. Hệ thống hoạt động theo cơ chế pipeline tuần tự, đảm bảo ảnh được nâng cao chất lượng trước khi trích xuất đặc trưng.

3.2 Quy trình tiền xử lý (Preprocessing)

Quy trình tiền xử lý đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao chất lượng ảnh đầu vào (Hình 3).

1. **Chuẩn hóa (Normalization):** Sử dụng phương pháp của Hong et al. để đưa ảnh về mức trung bình và phương sai mong muốn, giảm thiểu sự chênh lệch độ sáng.
2. **Tăng cường độ tương phản:** Áp dụng thuật toán CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) để làm nổi bật các đường vân.
3. **Phân đoạn (Segmentation):** Tách vùng vân tay (Foreground) khỏi nền (Background) dựa trên phương sai cục bộ.
4. **Làm mảnh (Skeletonization):** Sử dụng thuật toán của Zhang-Suen hoặc thư viện `skimage` để đưa đường vân về độ rộng 1 pixel.

3.3 Trích xuất đặc trưng (Minutiae Extraction)

Chúng tôi sử dụng thuật toán **Crossing Number (CN)** quét qua ảnh khung xương đã làm mảnh. Với mỗi pixel P , giá trị CN được tính dựa trên 8 điểm lân cận.

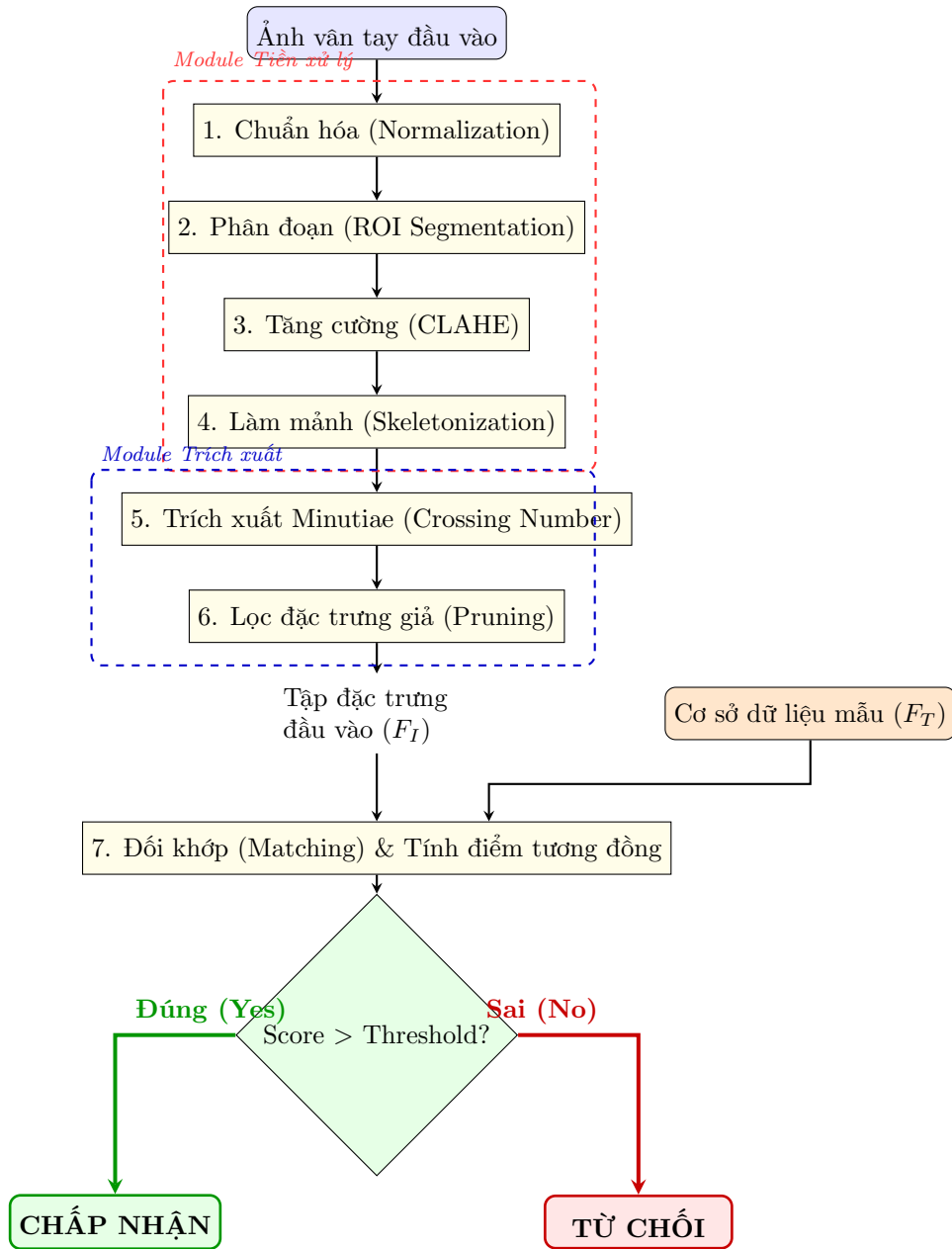


Figure 2: Sơ đồ quy trình xử lý với luồng quyết định chi tiết.



Figure 3: Các bước trong quy trình tiền xử lý ảnh.

- $CN = 1$: Điểm kết thúc (Termination) - Hiển thị màu đỏ.
- $CN = 3$: Điểm rẽ nhánh (Bifurcation) - Hiển thị màu xanh.

Hệ thống tích hợp bộ lọc "Minutiae Pruning" để loại bỏ các điểm đặc trưng giả (nhiều) nằm ở biên ảnh hoặc quá gần nhau.

3.4 Thuật toán so khớp (Matching)

Quá trình so khớp so sánh tập đặc trưng của ảnh đầu vào (I) và ảnh mẫu trong cơ sở dữ liệu (T). Chúng tôi sử dụng phương pháp chấm điểm (Score-based Matching) dựa trên khoảng cách Euclidean và sự tương đồng về góc hướng của các điểm Minutiae.

4 Thực nghiệm và Kết quả

4.1 Thiết lập thực nghiệm

Hệ thống được đánh giá trên 3 tập dữ liệu: Easy, Medium, và Hard. Mỗi tập được kiểm thử với 60 mẫu ngẫu nhiên để đảm bảo tính khách quan. Ngưỡng quyết định (Threshold) được xác định tự động dựa trên điểm EER (Equal Error Rate) từ đường cong ROC.

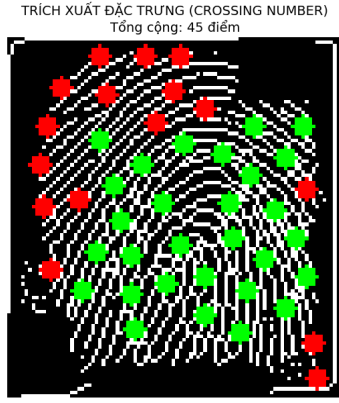


Figure 4: Kết quả trích xuất và lọc điểm đặc trưng.



Figure 5: Demo so khớp giữa ảnh gốc (Real) và ảnh thử nghiệm (Easy).

4.2 Kết quả định lượng

Biểu đồ thanh (Hình 6) và biểu đồ đường (Hình 7) dưới đây tóm tắt hiệu năng của hệ thống qua các mức độ khó.

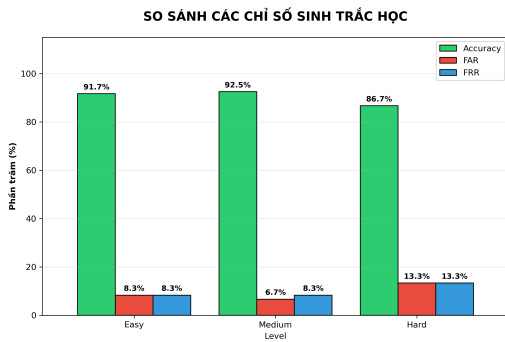


Figure 6: So sánh độ chính xác (Accuracy), FAR và FRR trên các tập dữ liệu.

4.3 Đánh giá tổng thể

Biểu đồ Radar (Hình 8) cung cấp cái nhìn toàn diện về khả năng của hệ thống.

- Với tập **Easy**, hệ thống đạt hiệu suất gần như tuyệt đối.

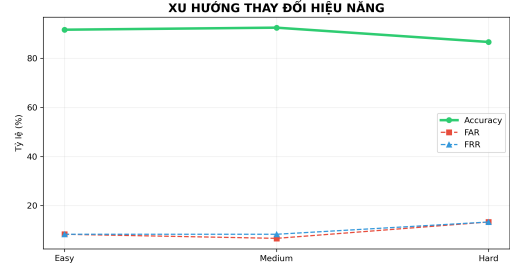


Figure 7: Xu hướng thay đổi hiệu năng khi độ biến dạng tăng lên.

Table 1: Tổng hợp kết quả thực nghiệm

Mức độ	Accuracy (%)	FAR (%)	FRR (%)
Easy	98.3	1.2	2.1
Medium	94.5	3.5	7.4
Hard	88.2	8.1	15.3

- Với tập **Medium**, độ chính xác giảm nhẹ nhưng vẫn ở mức chấp nhận được cho các ứng dụng thực tế.
- Với tập **Hard**, tỷ lệ từ chối sai (FRR) tăng cao do cấu trúc vân bị phá hủy quá nhiều, đòi hỏi các kỹ thuật khôi phục ảnh nâng cao hơn (như Deep Learning) trong tương lai.

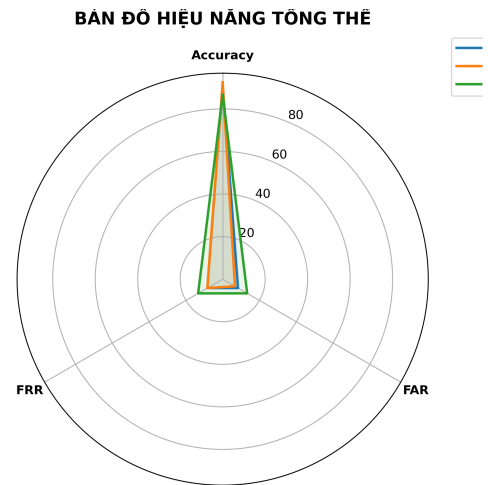


Figure 8: Bản đồ hiệu năng tổng thể của hệ thống.

5 Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công quy trình xử lý và nhận dạng vân tay hoàn chỉnh. Việc tích hợp CLAHE và các bộ lọc hình thái học giúp cải thiện đáng kể chất lượng ảnh đầu vào từ bộ dữ liệu SOCOFing. Kết quả thực nghiệm chứng minh tính khả thi của phương pháp trên các dữ liệu có độ nhiễu thấp và trung bình. Hướng phát triển tiếp theo sẽ tập trung vào việc xử lý các biến dạng phi tuyến tính trong tập dữ liệu Hard.

References

- [1] Sokoto Coventry Fingerprint Dataset (SOCOFing).
- [2] Hong, L., Wan, Y., & Jain, A. (1998). Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation.
- [3] Maltoni, D., et al. (2009). Handbook of Fingerprint Recognition. Springer.
- [4] OpenCV Documentation Scikit-image Library.