

JAN STOLAREK
Instytut Informatyki Politechniki Łódzkiej

NEW MINUTIAE DETECTION CRITERIA IN FINGERPRINT RECOGNITION ALGORITHM

NOWE KRYTERIA WYKRYWANIA MINUCJI W ALGORYTMIE ROZPOZNAWANIA ODCISKÓW PALCÓW

Streszczenie

W artykule przedstawiono ulepszenie algorytmu rozpoznawania użytkownika na podstawie analizy odcisków palców. Algorytm polega na śledzeniu przebiegu linii papilarnych w celu wykrycia minucji, czyli miejsc w których linie papilarne kończą się lub rozgałęziają. Autor prezentuje nowe kryteria pozwalające stwierdzić istnienie minucji. Układ minucji pozwala na jednoznaczne rozpoznanie osoby.

Słowa kluczowe

odciski palców, rozpoznawanie obrazu, biometria

1. Wstęp

Od wielu lat rośnie zapotrzebowanie na systemy rozpoznające osoby w oparciu o cechy biometryczne. Największą popularność zyskała metoda rozpoznawania oparta o analizę linii papilarnych. Wynika to z ich całkowitej unikalności, niezmienności, obecności u każdego człowieka [7] oraz względnej łatwości pobierania i analizowania. Doprowadziło to do rozwoju licznych metod automatycznego rozpoznawania odcisków palców. Może się wydawać, że jest to zagadnienie w pełni zbadane, ponieważ było to jedno z pierwszych zadań automatycznego rozpoznawania wzorców już kilkadziesiąt lat temu. Pogląd ten jest jednak błędny, gdyż zagadnienie automatycznego rozpoznawania odcisków palców wciąż jest dużym wyzwaniem [1].

Wyróżnia się kilka rodzajów cech, które pozwalają na odróżnianie odcisków palców od siebie [4], [7]. Cechy globalne to ogólny wzór tworzony przez linie papilarne (np. łuk albo pętla) oraz rozlokowanie punktów charakterystycznych (ang. *singularities*) takich jak delta (punkt, w którym zbiegają się linie z trzech kierunków) czy rdzeń (ang. *core*, punkt otoczony naokoło przez linie). Te cechy nie są jednak wystarczające do jednoznacznego opisanie i rozpoznania odcisku. Dlatego analizuje się także minucje, czyli charakterystyczne zmiany w przebiegu linii papilarnych. Minucja opisana jest przez położenie, kierunek oraz rodzaj. W automatycznym rozpoznawaniu odcisków palców uwzględnia się jedynie dwa rodzaje: rozwidlenia i zakończenia linii papilarnych. Dopiero wzajemny układ minucji pozwala na jednoznaczne rozpoznanie odcisku, a tym samym użytkownika.

2. Metody i algorytmy rozpoznawania odcisków palców

W literaturze dotyczącej automatycznego rozpoznawania odcisków palców zaproponowano wiele metod i algorytmów ekstrakcji minucji (np. [1], [2]) oraz dopasowywania dwóch odcisków do siebie (np. [5], [6], [9]). Algorytmy te mają kluczowe znaczenie, ponieważ od ekstrakcji minucji i porównania ich wzajemnego układu na dwóch odciskach zależy poprawność rozpoznawania użytkownika.

2.1. Metody oparte o operacje morfologiczne

Wiele początkowo proponowanych metod ekstrakcji minucji opierało się na złożonym przetwarzaniu wstępnym. Wymagało ono w pierwszym kroku przekształcenia obrazu ze skali szarości na postać binarną. Drugi krok polegał na ścienianiu linii papilarnych do szerokości jednego piksela poprzez stosowanie na obrazie operacji morfologicznych. W tak uzyskanym obrazie analizowano przebieg linii, by wykryć minucje. Metoda ta jest obciążona dużym kosztem obliczeniowym na etapie przetwarzania wstępnego oraz znacznym ryzykiem wystąpienia błędów. Powstają one w trakcie binaryzacji, zwłaszcza w przypadku obrazów o niskim kontraście, oraz podczas stosowania operacji morfologicznych. Błędy prowadzą do utraty części istniejących oraz powstawania fałszywych minucji.

2.2. Metody oparte o analizę przebiegu linii papilarnych

Niedogodności metod opartych o binaryzację i operacje morfologiczne spowodowały potrzebę zaprojektowania metod działających z większą skutecznością i bez potrzeby stosowania złożonego przetwarzania wstępnego. Doprowadziło to do powstania algorytmów, które wykrywają minucje poprzez śledzenie przebiegu linii papilarnych na obrazie w skali szarości. W tym artykule wybrano jako punkt wyjścia algorytm należący do tej grupy.

Pierwszym etapem działania algorytmu, jest segmentacja odcisku palca z tła. Metoda segmentacji zależy od postaci obrazu dostarczanego przez czytnik linii papilarnych. Następnym etapem jest obliczenie mapy kierunków (ang. *directions map, orientation image*). Określa ona lokalny zwrot linii papilarnych. Informacja ta jest wymagana na późniejszym etapie ekstrakcji cech. Większość algorytmów wyznaczania kierunku krawędzi opartych jest o metody gradientowe. Zdecydowano się na wykorzystanie metody omówionej w [8]. Mając przygotowaną mapę kierunków oraz znając obszar zajmowany przez odcisk palca można rozpocząć główny etap algorytmu, który analizuje wszystkie linie papilarne znajdujące się na obrazie.

Algorytm rozpoczyna działanie w punkcie (x_s, y_s) , w którym lokalny kierunek linii papilarnych wynosi φ_0 . W każdym kolejnym kroku śledzona linia przecinana jest prostopadłą sekcją (oznaczymy Ω) o długości $2\sigma+1$. Następnie znajdujemy minimum (x_m, y_m) tej sekcji. Na podstawie lokalnego kierunku φ_m linii papilarnych w znalezionym punkcie, algorytm przemieszcza się wzdłuż linii z punktu (x_m, y_m) o μ pikseli do punktu (x_i, y_i) . Przebyty kawałek linii jest oznaczany, aby zapobiec jego ponownemu przechodzeniu w przyszłości oraz aby umożliwić wykrywanie przecięć z innymi liniami. Wszystkie powyższe kroki są powtarzane iteracyjnie.

2.2.1. Warunki stopu zaproponowane w literaturze

Śledzenie linii kończy się po spełnieniu jednego z warunków stopu. W [2] zaproponowano następujące kryteria:

- Wyjście linii papilarnej poza obszar odcisku palca wyznaczony w procesie segmentacji. Oznacza to brak minucji.
- Minimum nowej sekcji Ω tworzy zbyt duży kąt względem kierunku linii w punkcie (x_m, y_m) . Oznacza to, że linia się kończy, a więc wykryto minucję.
- Dojście w trakcie śledzenia przebiegu linii do drugiej linii, już wcześniej przeanalizowanej. Oznacza to, że te dwie linie papilarne się łączą, a więc wykryto minucję.
- W trakcie śledzenia linii zapamiętywane są kierunki, w których przemieszczano się w kilku ostatnich krokach. Jeśli nowy kierunek odbiega za bardzo od średniego kierunku, w którym poruszano się w ostatnich krokach, śledzenie linii zostaje przerwane.

2.2.2. Warunki stopu zaproponowane przez autora

W niniejszym artykule proponuje się zastąpienie kryteriów stopu, zaproponowanych w literaturze, następującymi kryteriami:

- Wyjście linii papilarnej poza obszar odcisku palca wyznaczony w procesie segmentacji. Oznacza to brak minucji.
- Wyjście poza obszar aktualnie śledzonej linii papilarnej. Oznacza to, że wystąpiło jej zakończenie albo doszło do błędnego przeskoczenia między dwoma sąsiednimi liniami papilarnymi. W obu przypadkach zapamiętuje się znalezienie minucji kończącej linię.
- Dojście w trakcie śledzenia przebiegu linii do drugiej linii, już wcześniej przeanalizowanej. Oznacza to, że te dwie linie papilarne się łączą, a więc wykryto minucję.

2.2.3. Wykrywanie fałszywych minucji

Część wykrytych minucji może okazać się fałszywa. Do wykrycia błędnego zakończenia linii może dojść w wyniku przeskoczenia pomiędzy dwoma sąsiednimi liniami. Do wykrycia błędnego rozgałęzienia może dojść w wyniku natrafienia na linię, której śledzenie zostało wcześniej przerwane z powodu wykrycia błędnego zakończenia linii. W takim przypadku mamy do czynienia aż z dwoma fałszywymi minucjami w jednym miejscu.

Proponowane w literaturze kryterium wykrywania fałszywych minucji oparte jest o analizę wzajemnej odległości minucji. Wynika ono z tego, że na rzeczywistym odcisku palca dwie minucje nie mogą się na siebie nakładać. Jeśli więc dochodzi do sytuacji, w której dwie minucje znajdują się w odległości mniejszej od pewnego zdefiniowanego progu, zostają one uznane za fałszywe i usunięte.

W niniejszym artykule proponuje się kryterium wykrywania fałszywych minucji oparte o analizę odległości minucji od krawędzi obszaru odcisku palca wysegmentowanego z tła. Jeśli minucja znajduje się zbyt blisko brzegu odcisku, zostaje usunięta. Na obrzeżach odcisku jakość linii często jest słabsza niż w centrum, co wynika ze słabszej siły nacisku palca na czujnik. W wyniku zmniejszenia się kontrastu pomiędzy liniami papilarnymi a tłem, dochodzi do błędów w procesie śledzenia linii, a tym samym do wykrywania błędnych minucji, w szczególności zakończeń linii.

2.3. Dopasowywanie odcisków palców

Zadaniem algorytmu dopasowującego odciski palców do siebie jest porównanie odcisku zapisanego w bazie danych jako szablon (oznaczymy przez T), z odciskiem uzyskanym z czytnika (oznaczymy przez I) i określenie stopnia ich podobieństwa, jako liczbę pomiędzy 0 a 1 lub jako binarną decyzję – zaakceptowany/odrzucony. Większość metod dopasowywania odcisków palców operuje na reprezentacji odcisku w postaci wektora cech (np. minucji), a tylko nieliczne opierają się bezpośrednio na obrazie zeskanowanego odcisku palca. W tym artykule zdecydowano się na algorytm wykorzystujący wektor cech.

W celu dopasowania do siebie dwóch odcisków należy najpierw wyrównać je względem siebie, czyli znaleźć ich wzajemne przesunięcie oraz obrót. Szukamy więc takich parametrów przekształcenia geometrycznego, które pozwolą na dopasowanie do siebie jak największej ilości minucji.

Minucję m'_j należącą do I uznaje się za pasującą do minucji m_i należącej do T, jeżeli ich odległość jest mniejsza od ustalonego progu r_0 oraz różnica ich kierunków jest mniejsza od ustalonego kąta tolerancji θ_0 :

$$sd(m'_j, m_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0, \quad (1)$$

$$dd(m'_j, m_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360^\circ - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0. \quad (2)$$

Wprowadzenie pewnych zakresów tolerancji jest konieczne do zrównoważenia błędów w procesie ekstrakcji cech oraz zniekształceń odcisku palca powstających w trakcie skanowania.

Niech $map(\cdot)$ oznacza funkcję, która realizuje mapowanie minucji m'_j z I na minucję m''_j . Mapowanie odpowiada przekształceniu geometrycznemu realizującemu obrót o kąt θ oraz przesunięcie o wektor $[\Delta x, \Delta y]$:

$$map_{\Delta x, \Delta y, \theta}(m'_j = \{x'_j, y'_j, \theta'_j\}) = m''_j = \{x''_j, y''_j, \theta'_j + \theta\} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{bmatrix} x''_j \\ y''_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (4)$$

Niech $mm(\cdot)$ będzie funkcją, która zwraca 1, jeśli minucje m''_j i m_i pasują do siebie w sensie równań (1) i (2):

$$mm(m''_j, m_i) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } sd(m''_j, m_i) \leq r_0 \text{ i } dd(m''_j, m_i) \leq \theta_0 \\ 0 & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases} \quad (5)$$

Ostatecznie problem dopasowania wzorców może zostać zapisany jako zadanie optymalizacyjne, którego celem jest maksymalizacja równania:

$$\max_{\Delta x, \Delta y, \theta, P} \sum_{i=1}^m mm(map_{\Delta x, \Delta y, \theta}(m'_{P(i)}), m_i) \quad (6)$$

gdzie $P(i)$ jest nieznaną funkcją określającą dopasowanie między poszczególnymi minucjami, taką że:

- $P(i) = j$ oznacza, że minucja m_i z T została przypisana do minucji m'_j z I. Nie jest to równoznaczne ze spełnieniem przez przypisane minucje równań (1) i (2).
- $P(i) = \text{null}$ oznacza, że minucja m_i z T nie ma odpowiednika w I
- minucja m'_j z I, taka że $\forall_{i=1 \dots m} P(i) \neq j$ nie ma odpowiednika w T

- $\forall_{i=1\dots m, k=1\dots m} i \neq k \Rightarrow P(i) \neq P(k) \vee P(i) = P(k) = null$ (oznacza to, że każda minucja z I jest przypisana do co najwyżej jednej minucji z T)

W celu wyznaczenia parametrów transformacji geometrycznej wybrano algorytm oparty o transformatę Hough'a. Idea tego algorytmu opiera się o proces głosowania, w wyniku którego wyznaczane jest przekształcenie pozwalające dopasować do siebie największą liczbę minucji:

dla każdej minucji $m_i \in T, i=1, \dots, m$

dla każdej minucji $m'_j \in I, j=1, \dots, n$

dla każdego kąta $\theta^+ \in \{\theta_1^+, \theta_2^+, \dots, \theta_c^+\}$

jeśli $dd(\theta'_j + \theta^+, \theta_i) < \theta_0$ {

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos(\theta^+) & -\sin(\theta^+) \\ \sin(\theta^+) & \cos(\theta^+) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix};$$

$\Delta x^+, \Delta y^+ = \text{dyskretyzacja } \Delta x, \Delta y;$

$A[\Delta x^+, \Delta y^+, \theta^+]++;$

}

Po wyznaczeniu optymalnego przekształcenia geometrycznego jakiemu trzeba poddać dwa odciski palców, aby najlepiej je do siebie dopasować, należy zdecydować czy są one identyczne czy też nie. Proponuje się zastosowanie algorytmu, który próbuje znaleźć na dwóch odciskach określoną liczbę pokrywających się minucji. Jeśli liczba pokrywających się minucji okaże się większa od pewnej ustalonej ilości, odciski zostaną uznane za identyczne. W przeciwnym wypadku uznaje się, że pochodzą one z dwóch różnych palców.

3. Badania eksperymentalne

Do badań eksperymentalnych użyto odcisków palców pobranych ze strony FVC 2004 [10]. Stworzono bazę testową składającą się z ośmiu odcisków palców. Każdy odcisk zeskanowany jest czterokrotnie, przy czym poszczególne ujęcia różnią się pomiędzy sobą przesunięciem i obrotem.

Za najważniejsze mierniki skuteczności rozpoznawania uznano wskaźniki FNMR – ilość błędnych niedopasowań – oraz FMR – ilość błędnych dopasowań. Wskaźnik FNMR oblicza się poprzez porównanie każdego obrazu odcisku palca z innymi ujęciami tego samego odcisku. W przypadku użytej bazy każdy odcisk jest porównywany z trzema innymi ujęciami. Na podstawie stosunku ilości niedopasowań do całkowitej liczby porównań obliczana jest wartość FNMR. Wskaźnik FMR oblicza się dokonując porównania każdego obrazu odcisku palca z wszystkimi pozostałymi ujęciami innych odcisków. W przypadku użytej bazy jest to 28 innych obrazów. Wartość FMR wyznacza się na podstawie stosunku ilości dopasowań do całkowitej liczby porównań odcisków palców.

W Tabelach 1 i 2 przedstawiono wartości wskaźników FMR i FNMR uzyskane po przeprowadzeniu badań. Widać, że zaproponowane kryteria wykrywania minucji przyniosły poprawę FMR o 2.9% i FNMR o 31.25% w stosunku do kryteriów zaproponowanych w [2].

Tabela 1

Skuteczność weryfikacji użytkowników przy zastosowaniu kryteriów wykrywania minucji zaproponowanych przez autora

Wskaźnik	Wartość
FNMR	16.67%
FMR	3.91%

Tabela 2

Skuteczność weryfikacji użytkowników przy zastosowaniu kryteriów wykrywania minucji zaproponowanych w [2]

Wskaźnik	Wartość
FNMR	47.92%
FMR	6.81%

W Tabeli 3 pokazano wartości wskaźników FNMR i FMR uzyskane w przypadku wyłączenia, zaproponowanego w artykule, kryterium wykrywania fałszywych minucji, polegającego na usuwaniu minucji położonych zbyt blisko krawędzi odcisku palca. Prowadzi to do spadku FNMR o 14.59%, przy jednoczesnym wzroście FMR o 15.62%. Tak wysoka wartość FMR jest całkowicie nie do zaakceptowania. Jest ona równoważna z dopuszczeniem do systemu nieuprawnionego użytkownika średnio przy co piątej próbie, na co, pod żadnym pozorem, nie można pozwolić.

Tabela 3

Skuteczność weryfikacji użytkowników przy nieusuwaniu minucji znajdujących się na obrzeżu odcisku palca

Wskaźnik	Wartość
FNMR	2.08%
FMR	19.53%

Rezultat z Tabeli 1 porównano z już istniejącymi algorytmami. W tym celu skorzystano z publicznie opublikowanych wyników konkursu Fingerprint Verification Competition 2004 [10].

Tabela 4

Wyniki uzyskane przez algorytmy zgłoszone do konkursu FVC 2004

Algorytm	FMR
P047	2.86%
P101	3.86%
P097	5.54%
P009	5.54%
P049	7.11%
P004	5.64%
P103	6.36%

Tabela 4 przedstawia wyniki uzyskane na wybranej bazie danych przez kilka najlepszych algorytmów biorących udział w konkursie. Widać, że wartość FMR na poziomie 3.91%, uzyskana przez aplikację autora artykułu, jest porównywalna z wynikami uzyskanymi przez algorytmy wystawione do konkursu.

3. Podsumowanie

Zaprezentowano algorytm rozpoznawania odcisków palców. Zaproponowano własne kryteria wykrywania minucji oraz rozpoznawania fałszywych minucji. Pokazano, że zastosowane modyfikacje przynoszą poprawę skuteczności rozpoznawania odcisków palców oraz, że osiągnięte wyniki są zbliżone do rezultatów uzyskanych przez algorytmy biorące udział w konkursie Fingerprint Verification Competition w roku 2004. Dalsze prace w kierunku ulepszenia metod rozpoznawania mogą obejmować stworzenie algorytmu umożliwiającego dopasowywanie jedynie fragmentów odcisków palców oraz opracowanie metody wyliczania stopnia podobieństwa uwzględniającej nie tylko minucje, które do siebie pasują, ale także te, które do siebie nie pasują.

Literatura

- [1] Davide Maltoni, Dario Maio, Anil Jain, Salil Prabhakar: *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer 2003
- [2] Dario Maio, Davide Maltoni: *Direct Gray-Scale Minutiae Detection In Fingerprints*, 1997
- [3] Dario Maio, Davide Maltoni: *Neural Network Based Minutiae Filtering in Fingerprints*, 1998
- [4] Marie Sandström: *Liveness Detection in Fingerprint Recognition Systems*, 2004
- [5] Tsai-Yang Jea, Venu Govindaraju: *A minutia-based partial fingerprint recognition system*
- [6] Yi Chen, Sarat Dass, Arun Ross, Anil Jain: *Fingerprint deformation models using minutiae locations and orientations*, 2005
- [7] Czesław Grzeszyk: *Daktyloskopia*, PWN 1992
- [8] M. J. Donahue, S. I. Rokhlin: *On the use of level curves in image analysis*, 1993
- [9] P. B. Van Wamelen, Z. Li, S. S. Iyengar: *A fast expected time algorithm for point pattern matching problem*

[10] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>

JAN STOLAREK

Wólczańska 215, 90-924 Łódź, e-mail: stolarek@ics.p.lodz.pl