Adam Czajka, Andrzej Pacut, "Biometria tęczówki oka", *Techniki Komputerowe, Biuletyn Informacyjny*, nr 1/2002, str. 5-18, Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa, 2002

Biometria tęczówki oka

Adam Czajka i Andrzej Pacut

Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Pracownia Biometrii
Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa NASK
ul. Wąwozowa 18, 02-796 Warszawa

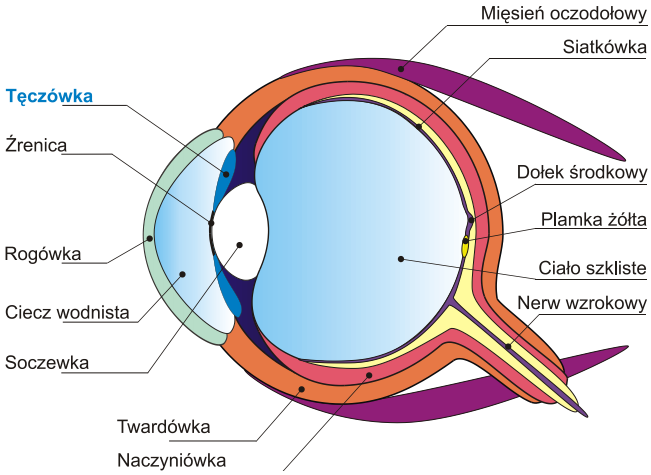
{A.Czajka,A.Pacut}@ia.pw.edu.pl
www.ia.pw.edu.pl/~{aczajka,pacut}

Streszczenie

Artykuł opisuje biometryczny system weryfikacji tożsamości na bazie wzoru tęczówki oka skonstruowany przez autorów. Pokazano pełny proces tworzenia unikalnego kodu od momentu sfotografowania ludzkiego oka, poprzez wyszukanie w obrazie istotnej informacji do zastosowania transformaty Zaka-Gabora w celu wyodrębnienia unikalnych cech tekstury tęczówki. W pracy zwrócono uwagę na najważniejsze aspekty implementacyjne mające wpływ na jakość konstruowanego systemu. Artykuł rozpoczyna krótki opis rozwoju tekstury tęczówki, całość natomiast wzbogaca prezentacja istniejących systemów, w tym również komercyjnych.

Wprowadzenie

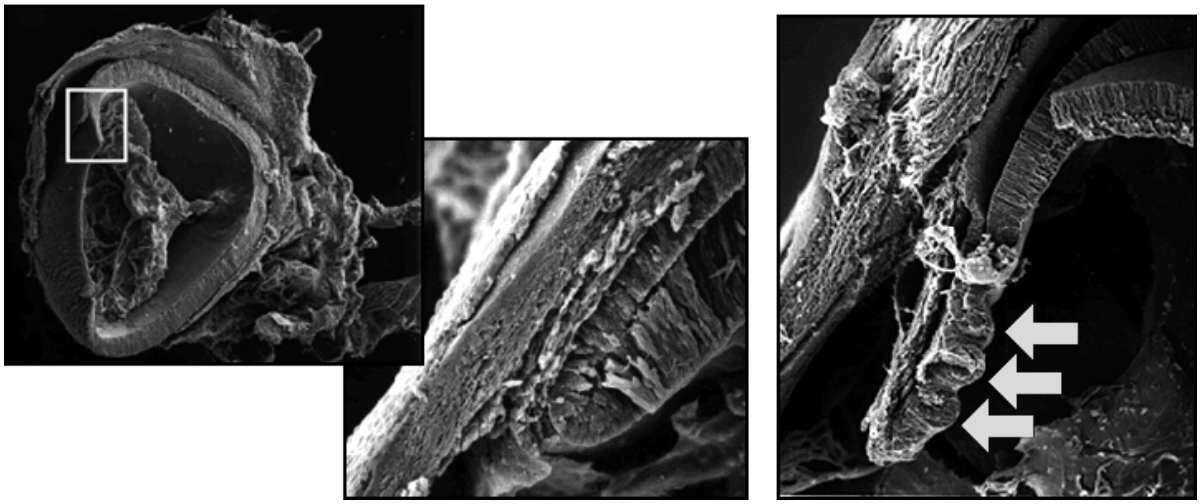
Twórcy systemów biometrycznych poszukują biometrii idealnej, czyli takiej która bezbłędnie weryfikuje tożsamość osób przy zachowaniu dużego komfortu użytkowania, jest odporna na wszelakie próby oszustwa, jest nieinwazyjna a koszt jej wdrożenia plasuje się zdecydowanie poniżej sum astronomicznych. Dotyczy to zarówno samych metod przetwarzania danych biometrycznych jak i wyboru obiektu, który jest obserwowany. Aktualnie biometria tęczówki idealną nie jest, głównie za sprawą braku zabezpieczeń rozróżniających oko prawdziwe od imitacji. Jednakże obserwacja samego obiektu, czyli tęczówki wydaje się być bardzo trafnym wyborem a same wyniki weryfikacji otrzymywane przez badaczy działających w niezależnych ośrodkach są bardzo obiecujące.



Rysunek 1. Uproszczony schemat budowy oka ludzkiego

Tęczówka jest umięśnioną przednią częścią błony naczyniowej (rys. 1), której część obwodowa przechodzi w ciało rzęskowe utrzymujące soczewkę. Tęczówka chroniona jest z zewnątrz przez przeźroczystą rogówkę. Narząd ten reguluje natężenie strumienia światła, który poprzez otwór zwany źrenicą a następnie soczewkę przedostaje się do wnętrza oka i tworzy obraz na warstwie receptorowej – siatkówce. Za kolor tęczówki bezpośrednio odpowiedzialny jest brunatny barwnik – *melanina* obecna w komórkach barwnikowych –

melanocytach umieszczonych na beleczkach mięśniowych tęczówki (duże stężenie melaniny daje oczy piwne, małe stężenie – oczy niebieskie). Tęczówka zaczyna kształtować się w trzecim miesiącu życia płodowego (rys. 2). O ile stężenie melaniny regulowane hormonem stymulujących melanocyty – *intermedyną* jest uwarunkowane genetycznie i może zmieniać się nieznacznie w trakcie życia, o tyle sama struktura mięśnia tęczówki tworzona jest dzięki *procesom rzęskowym* (rys. 2), zostaje ukończona w ósmym miesiącu życia płodu i pozostaje już niezmienna [2].



Rysunek 2. Zdjęcia oka płodu. Zdjęcia lewe i środkowe: początek procesu tworzenia tęczówki – 3 miesiąc życia płodowego, tęczówka zaczyna się kształtować z warstwy siatkówki bogatej w melaninę; zdjęcie prawe: procesy rzęskowe, kształtowanie się mięśni – 5 miesiąc życia płodu

Struktura tęczówki wykazuje wysoką różnorodność i niepowtarzalność wśród osobników danej populacji [1]. W samej strukturze możemy odnaleźć doliny, bruzdy, piegi a nawet zmarszczki. Włókna mięśniowe zwieracza tęczówki mają układ okrężny natomiast włókna mięśnia rozwierającego źrenicę rozmieszczone są wewnątrz tęczówki promieniście, co wiąże się z trudnościami budowy matematycznego modelu procesu kurczenia się i rozkurczania źrenicy. Szczegółowe informacje nt. budowy i rozwoju tak oka jak i samej tęczówki można znaleźć w [12,13,14].

Istniejące propozycje systemów weryfikacji tęczówki

Pierwsze informacje o zastosowaniu tęczówki do weryfikacji tożsamości pochodzą z roku 1885. Tęczówkę wykorzystano wtedy do identyfikacji więźniów jednego z paryskich zakładów karnych, i choć sama weryfikacja przeprowadzana była przez człowieka i bazowała głównie na kolorze tęczówki, zauważono iż tekstura wykazuje wysoką różnorodność i niepowtarzalność [19]. Obserwacja ta została potwierdzona w pracach Adlera prowadzonych w latach 60-tych [12]. Natomiast możliwość zastosowania fotografii tęczówki do jednoznacznej identyfikacji jako pierwsi zaproponowali Flom i Safir w roku 1987, co stało się przedmiotem pierwszego patentu z tej dziedziny [1]. Nie wskazano tutaj jednak żadnej metody pozwalającej na jednoznaczną konstrukcję unikalnego identyfikatora bazującego na wzorze tęczówki.

John Daugman jako pierwszy zaproponował, przebadał i opatentował metodę transformacji obrazu tęczówki do przestrzeni cech [2]. Metoda oparta jest na analizie falkowej Gabora. System wyszukuje automatycznie wycinek tęczówki nie zasłonięty powiekami a następnie przekształca go do dziedziny współczynników rozwinięcia Gabora. Znaki części rzeczywistej oraz urojonej każdego z powstałych współczynników są kodowane za pomocą 1 bitu każdy. Długość kodu zależy od liczby współczynników rozwinięcia Gabora, a ta od liczby i szerokości falek pokrywających obraz tęczówki. Wybór Daugmana prowadzi do kodów o długości 2048 bitów i z racji ich jednakowej długości dla dowolnej tęczówki, mogą one być porównywane ze sobą za pomocą operacji XOR, przy czym względna częstość zgadzających się bitów dla zdjęć tej samej tęczówki powinna dążyć do 100% natomiast dla różnych tęczówek częstość ta powinna dążyć – przy założeniu niezależności każdego bitu kodu – do zgodności około 50%. Daugman zgromadził 4.258 zdjęć różnych tęczówek, w tym dla 70 tęczówek

zgromadzono po 10 zdjęć a dla pozostałych po dwa, oraz 324 pary zdjęć różnych tęczówek należących do bliźniąt jednojajowych, co w rezultacie daje około 9.1 mln porównań par kodów pochodzących z różnych tęczówek oraz 7.070 porównań par kodów różnych zdjęć tej samej tęczówki. W przeprowadzonym eksperymencie otrzymano odpowiednio: najmniejszą zgodność dla porównań zdjęć tych samych tęczówek – 67.3%, średnią 89.0% i odchylenie standardowe 6.5%; największą zgodność dla porównań zdjęć różnych tęczówek – 67.1%, średnią 54.2% i odchylenie standardowe 3.17%. Jak widać z powyższych wyników dla bazy danych zastosowanej przez Daugmana nie zaobserwujemy żadnej fałszywej akceptacji ani też żadnego fałszywego odrzucenia tęczówki, ustalając minimalny próg zgodności bitów kodu wymagany do akceptacji danego zdjęcia na np. 67.2%.

Średnia zgodność bitów różnych kodów dla 9.1 mln porównań wskazuje, iż nie wszystkie bity kodu są wzajemnie niezależne (dla przypadku idealnej wzajemnej niezależności zgodność powinna wynosić 50%). Istotnie, jeśli p oznacza prawdopodobieństwo zgodności dwóch bitów pochodzących z dwóch kodów różnych tęczówek, natomiast σ oznacza odchylenie standardowe, to wiadomo, że dla N niezależnych prób Bernouliego zachodzi równość

$$\sqrt{p(1-p)/N} = \sigma$$

Korzystając z wyników otrzymanych przez Daugmana (p=0.542, σ=0.0317) dostajemy

$$N = p(1-p)/\sigma^2 = 247 \neq 2048$$

co odpowiada 247 niezależnym próbom Bernouliego, (np. rzut monetą) i oznacza, że jedynie około 10% bitów w kodzie Daugmana niesie w pełni niezależną statystycznie informację. Biorąc pod uwagę typowe rozmiary tęczówki ludzkiego oka (średnica tęczówki około 11mm, średnica źrenicy około 5mm) dostajemy w ten sposób gęstość informacji uzyskanej w opisywanej metodzie 3.2 bit/mm^2 (przy założeniu zakodowania całej tektury tęczówki). Gęstość ta jest często błędnie interpretowana i utożsamiana z rzeczywistą gęstością informacji wynikającą z biologicznej natury tęczówki. Musimy natomiast pamiętać, iż owe oszacowanie jest jedynie wynikiem zastosowania takiej a nie innej metody wyznaczania kodu, i może być diametralnie inna przy zastosowaniu innych algorytmów kodowania obrazu.

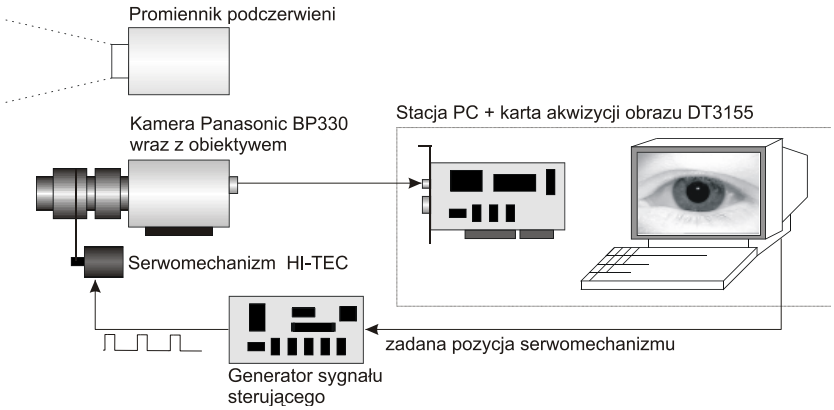
Właścicielem praw patentowych Daugmana jest obecnie brytyjska firma Iridian Technologies, która jest producentem i głównym dostawcą komercyjnego systemu IrisAccess wykorzystującego metodę Daugmana.

Richard P. Wildes jest autorem kolejnego patentu z dziedziny weryfikacji tęczówki [3]. W przeciwieństwie do Daugmana nie używa on światła podczerwonego do oświetlania oka a spolaryzowanego okrężnie i rozproszonego dyfuzorem światła z zakresu fal widzialnych (polaryzacja wygasza m.in. odbicia źródła światła od szklistej rogówki). Do wyszukania interesującego obszaru tęczówki oraz granic ewentualnych powiek zastosowano transformatę Hough'a. Wildes *et al.* zastosował następnie laplasjan gaussowski – jeden ze standardowych wielorozdzielczych filtrów graficznych – do konstrukcji 4 obrazów różnicowych dla 4 kolejnych rozdzielczości obrazu tęczówki poczynając od rozdzielczości pierwotnej. W celu weryfikacji tęczówki liczona jest korelacja z próby małych podobszarów (8 x 8 pikseli) każdego obrazu różnicowego pochodzącego od tęczówki odniesienia i tęczówki przeznaczonej do weryfikacji co prowadzi do szeregu korelacji dla każdej z 4 rozdzielczości. Dla każdego z czterech zbiorów korelacji wybierana jest jedna wartość przy zastosowaniu filtru medianowego, co prowadzi finalnie do czterech wartości reprezentujących wynik porównania dwóch tęczówek. Wildes zastosował następnie liniowy aproksymator funkcji klasyfikującej wyniki porównań różnych tęczówek oraz wyniki porównań różnych zdjęć tej samej tęczówki. Dla zbioru 60 różnych tęczówek algorytm ten poprawnie aproksymował funkcję klasyfikującą czego efektem była bezbłędna weryfikacja na podanym zbiorze danych. Z racji relatywnie małej bazy zdjęć tęczówek Wildes pominął interpretację statystyczną wyników. Jak dotąd nie istnieje wersja komercyjna tego systemu.

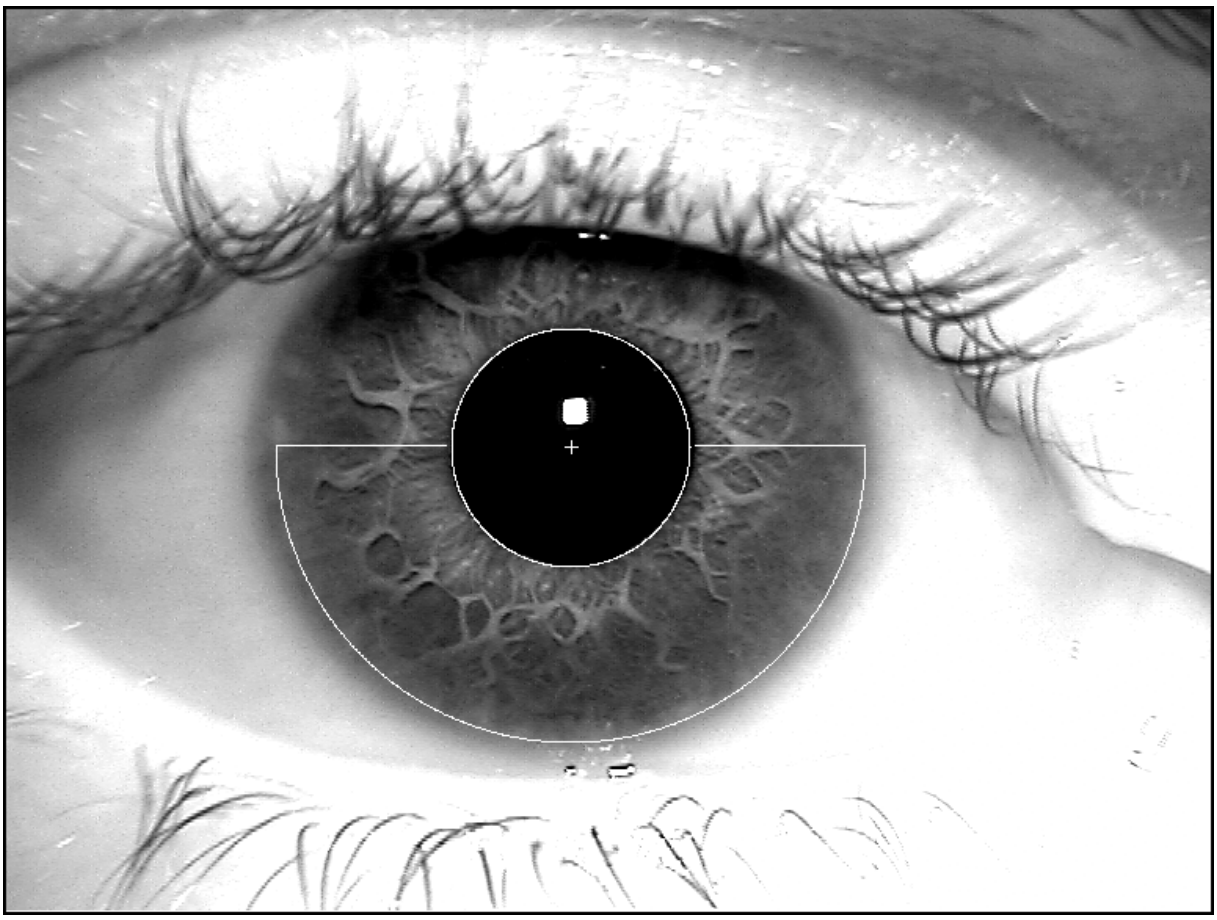
Jedynym dziś komercyjnym konkurentem systemu Daugmana jest produkt kalifornijskiej firmy IriTech [4]. Właścicielem patentu jest dyrektor firmy IriTech dr Daehoon Kim. W systemie tym zastosowano analizę falkową Haar'a a do weryfikacji osoby używana jest para oczu. Analizę falkową zastosował w swojej pracy również W. W. Boles [21]; tym razem użyto falek Malat'a a konstrukcja kodu tęczówki bazowała na położeniu miejsc zerowych transformaty falkowej. Przedstawione wyniki bazują niestety jedynie dwóch tęczówkach, trudno więc wyciągać jakiekolwiek wnioski o jakości zaproponowanej metody.

Akwizycja obrazu tęczówki

W ramach prac prowadzonych w IAiIS PW oraz w Pracowni Biometrii NASK skonstruowano stanowisko doświadczalne przedstawione na rys. 3. Oko fotografowane jest w podczerwieni (długość fali 840nm) z odległości około 40cm. Z racji małej głębi ostrości (tu wynoszącej około 1cm), która towarzyszy fotografowaniu małych obiektów z niewielkiej odległości, pobieranych jest automatycznie 25 kolejnych klatek dla płynnie zmienianej ogniskowej obiektywu (za pomocą serwomechanizmu połączonego z obiektywem) a następnie automatycznie wybierany jest obraz o najlepszej ostrości, mierzonej w prostokącie o ustalonych rozmiarach w obrębie tęczówki zlokalizowanym bezpośrednio pod źrenicą.



Rysunek 3. System weryfikacji tęczówki skonstruowany przez autorów pracy w ramach prac prowadzonych w IAiIS i Pracowni Biometrii NASK



Rysunek 4. Przykładowe zdjęcie oka wykonane w podczerwieni przez system skonstruowany przez autorów. Na zdjęciu zaznaczono automatycznie wyszukany obszar tęczówki przekazywany do dalszych obliczeń

Obraz rejestrowany jest przez kamerę przemysłową pracującą w trybie wybierania międzyliniowego z rozdzielczością telewizyjną 570 linii. Zdjęcia wykonywane są w taki sposób, aby średnica tęczówki stanowiła co najmniej 25% wysokości obrazu, co prowadzi do minimalnej dokładności na poziomie około 12 linii na 1 mm tęczówki. Zdjęcia tęczówki są dyskretyzowane przez kartę akwizycji obrazu DataTranslation DT3155 do rozdzielczości 768 × 572 z ośmiobitową głębią poziomów szarości. Rysunek 4 przedstawia przykładowe zdjęcie wykonane przez system z zadawalającą jakością i ostrością.

Lokalizacja tęczówki

Kolejnym krokiem w scenariuszu konstrukcji kodu jest wyszukanie interesującego obszaru tęczówki, wolnego od powiek, rzęs oraz innych zakłóceń. W naszych badaniach wykorzystujemy dolną połowę tęczówki, jednakże następnym krokiem w rozwoju systemu jest modyfikacja algorytmu tak aby możliwe było wykorzystanie w pełni części tekstury nie zasłoniętej przez powieki.

Rysunek 5. Obraz kierunkowy wyznaczony dla zdjęcia oka z Rys. 4. Widoczny jest wyraźny okrąg reprezentujący granicę pomiędzy źrenicą i tęczówką.

Do dokładnego wyszukania granicy źrenicy i tęczówki konstruujemy obraz kierunkowy (rys. 5) reprezentujący informację o lokalnym gradiencie funkcji jasności obrazu. Jeden z czterech założonych kierunków gradientu (0°, 45°, 90° i 135°) estymujemy w małych obszarach 4x4 piksele, przy czym zwrot gradientu nie jest dla nas istotny, stąd kierunek 0° traktowany jest tożsamo z kierunkiem 180°, 45° tożsamo z 225°, itd. Każdy element obrazu kierunkowego wyznacza dyskretny kierunek krawędzi oraz lokalną wartość gradientu. Największe wartości gradientu spodziewane są na granicy źrenicy i tęczówki. Następnie konstruujemy zbiór **C** potencjalnych środków źrenicy, rozpatrując elementy obrazu o jasności poniżej ustalonego progu (z racji tego, iż źrenica jest jednym z najciemniejszych elementów obrazu). Niech **D** oraz **V** oznaczają odpowiednio macierze dyskretnego kierunku i wartości gradientu, $\mathbf{R}(r, x_k, y_k)$ oznacza okrąg o środku (x_k, y_k) i promieniu r a $\mathbf{d_R}(x, y)$

oznacza funkcję wyznaczającą jedną z czterech dyskretnych wartości kąta nachylenia stycznej do okręgu $\mathbf{R}(r, x_k, y_k)$ w punkcie (x, y). Wykonujemy następujące kroki algorytmu

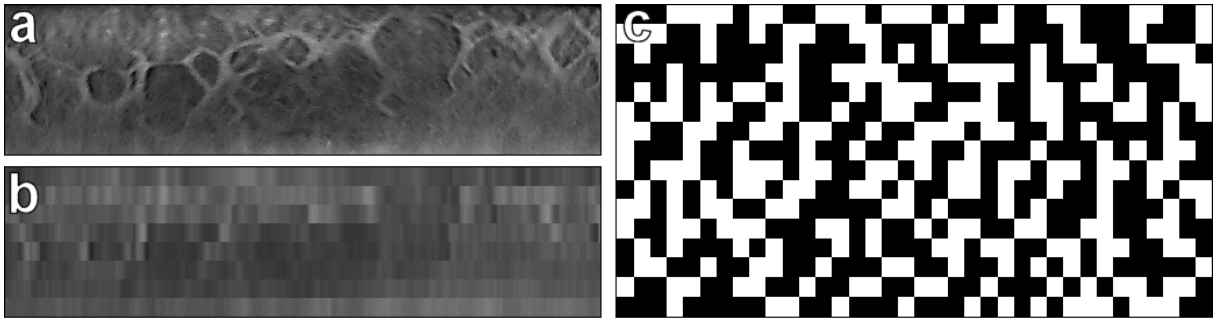
```
dla każdego punktu (xk,yk) ∈ C
{
   dla każdego r ∈ <rmin;rmax>
   {
      S(r,xk,yk) ← 0
      dla każdego x,y ∈ R(r,xk,yk)
      {
         jeśli D(x,y) ≡ dR(x,y) to S(r,xk,yk) ← S(r,xk,yk) + V(x,y)
      }
   }
}
```

Element maksymalny tablicy $\mathbf{S}(r, x_k, y_k)$ wyznacza jednoznacznie i z dokładnością do jednego punktu środek (x_k, y_k) oraz promień r źrenicy. Wartości r_{min} i r_{max} ograniczają nam promienie branych pod uwagę okręgów.

Zewnętrzny promień tęczówki (granicę pomiędzy tęczówką i białkówką) możemy również wyznaczyć korzystając z powyższego algorytmu, zmieniając na odpowiednio większe wartości r_{min} i r_{max}. Na rysunku 4 zaznaczono obszar tęczówki wyszukany automatycznie przez powyższą procedurę w czasie około 1 sek.

Reprezentacja tęczówki w postaci jednowymiarowych sygnałów

Wyszukany obszar tęczówki przekształcony zostaje do układu polarnego (prostokąt o stałych wymiarach $P_y \times P_x$ punktów – rys. 6A, gdzie P_y=128, P_x=512). Należy zdawać sobie sprawę iż przekształcenie to nie daje takiego samego mapowania punktów tęczówki w układzie polarnym dla różnego stopnia zwężenia źrenicy z powodu wysokiej nieliniowości procesu kurczenia i rozszerzania się mięśni tęczówki.



Rysunek 6. (A) wyszukany obszar tęczówki w układzie polarnym; (B) jednowymiarowe sygnały powstałe z uśrednienia informacji na ograniczonym horyzoncie wzdłuż promienia tęczówki; (C) wyznaczony kod tęczówki (576 bitów)

Obserwacja wzorów różnych tęczówek wskazuje na fakt większej różnorodności struktury w kierunku okrężnym w porównaniu do kierunku radialnego. Dlatego też obraz tęczówki zostaje przekształcony do *K* jednowymiarowych ciągów, każdy o długości P_x. Każdy element tak powstałego sygnału powstaje z uśrednienia informacji na pewnym horyzoncie wzdłuż promienia tęczówki (rys. 6B). Sygnały te posłużą do konstrukcji kodu tęczówki na bazie rozwinięcia Gabora i transformaty Zaka i dla skrócenia opisu nazywać je będziemy *pierścieniami*.

Adam Czajka, Andrzej Pacut, "Biometria tęczówki oka", *Techniki Komputerowe, Biuletyn Informacyjny*, nr 1/2002, str. 5-18, Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa, 2002

Zastosowanie transformaty Zaka do efektywnego wyznaczania współczynników rozwinięcia Gabora

Rozwinięcie Gabora

Rozważmy dyskretny gaussowski sygnał g o długości P elementów, symetryczny względem siatki dyskretyzującej, mianowicie

$$g[n] = 2^{\frac{1}{4}} e^{-\pi([n+\frac{1}{2}]/N)^2}, \quad (N \text{ parzyste}) \tag{1}$$

Elementarną funkcję Gabora (ang. *GEF – Gabor Elementary Function*) definiuje się w postaci przesuniętych i modulowanych realizacji okna gausowskiego, mianowicie

$$g_{mk}[n] = g[n - mN] e^{ikn2\pi/N} \tag{2}$$

gdzie m oraz k oznaczają odpowiednio przesunięcia w dziedzinie położenia i częstotliwości, przy czym zachodzą zależności $m = 0, 1, ..., M\text{-}1$ oraz $k = 0, 1, ..., N\text{-}1$ i $MN=P$. Transformata Gabora wyrażona jest za pomocą zbioru zespolonych współczynników a_{mk} spełniających zależność *rozwinięcia Gabora* o następującej postaci

$$f[n] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} a_{mk} g_{mk}[n] \tag{3}$$

Współczynniki a_{mk} stanowią bazę metody Daugmana, prezentowanej we wcześniejszym rozdziale. Jednakże wyznaczenie tych współczynników wymaga konstrukcji funkcji ortonormalnych do funkcji Gaussa [18] i jest złożone obliczeniowo. Współczynniki rozwinięcia Gabora mogą być jednak wyznaczone niezwykle efektywnie przy zastosowaniu transformaty Zaka [18].

Transformata Zaka

Dyskretna skończona transformata Zaka $Zf[r,\phi;N,M]$ dyskretnego sygnału f o długości P definiuje się jako jednowymiarową dyskretną transformatę Fouriera sygnału $f[r+kN]$, mianowicie

$$\mathcal{Z} f[r, \phi; N, M] = \sum_{k=0}^{M-1} f[r + kN] e^{-ik\phi 2\pi/M} \tag{4}$$

Przyjmujemy $MN = P$. Ponieważ transformata Zaka wykazuje okresowość zarówno w dziedzinie częstotliwości ϕ (z okresem równym $2\pi/M$) jak i w dziedzinie położenia r (z okresem równym N), możemy rozpatrywać wartości r oraz ϕ w granicach *podstawowego interwału Zaka* (ang. *fundamental Zak interval*), czyli $r = 0, 1, ..., N\text{-}1$ oraz $\phi = 0, 1, ..., M\text{-}1$.

Transformata Zaka jest odwracalna, tzn. możemy jednoznacznie odtworzyć sygnał znając jego transformatę. Do tego celu konstruujemy odwrotną dyskretną i skończoną transformatę Zaka o postaci

$$f[r + kN] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \mathcal{Z} f[r, \phi; N, M] e^{ik\phi 2\pi/M} \tag{5}$$

Połączenie transformaty Zaka i rozwinięcia Gabora

Stosując transformatę Zaka daną wzorem (4) do obu stron wyrażenia (3) otrzymujemy

$$\mathcal{Z} f[r, \phi; N, M] = \sum_{l} \left[\sum_{m} \sum_{k} a_{mk} g[r + lN - mN] e^{ikr2\pi/N} \right] e^{-il\phi 2\pi/M} \tag{6}$$

Porządkując czynniki prawej strony wyrażenia (6) w następujący sposób

$$\begin{aligned} \mathcal{Z}f[r,\phi;N,M] &= \sum_{l=0}^{M-1}\left[\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1} a_{mk} g[r+lN-mN] e^{ikr2\pi/N} e^{-im\phi 2\pi/M} e^{im\phi 2\pi/M}\right] e^{-il\phi 2\pi/M} \\ &= \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1} a_{mk} e^{-i2\pi(m\phi/M-kr/N)}\left[\sum_{l=0}^{M-1} g[r+(l-m)N] e^{-i2\pi(l-m)\phi/M}\right] \end{aligned} \tag{7}$$

otrzymujemy ostatecznie

$$\mathcal{Z}f[r,\phi;N,M] = \mathcal{F}a[r,\phi;N,M]\mathcal{Z}g[r,\phi;N,M] \tag{8}$$

Należy zwrócić uwagę, iż transformata Zaka bazuje na dyskretnej transformacie Fouriera. Jeśli długość dyskretnego sygnału poddawanego tej transformacie jest potęgą dwójki, to złożoność obliczeń jest porównywalna do złożoności FFT. Stąd w naszym przypadku pierścienie tęczówki celowo mają długość 512 punktów.

Przeanalizujmy wyrażenie (8). Lewa strona oznacza transformatę Zaka sygnału dla którego chcemy znaleźć reprezentację w dziedzinie współczynników a_{mk} dyskretnego rozwinięcia Gabora; u nas sygnałem tym jest każdy z K pierścieni tęczówki. Prawa strona jest iloczynem dwuwymiarowej dyskretnej transformaty Fouriera poszukiwanych współczynników oraz transformaty Zaka okna gaussowskiego określonego wyrażeniem (1), którą to transformatę wykonujemy tylko raz dla danego zestawu parametrów funkcji bazowych rozwinięcia Gabora. Stąd widać, iż aby wyznaczyć szukane współczynniki a_{mk} należy wykonać transformatę Zaka sygnału (złożoność porównywalna ze złożonością FFT), wynik podzielić przez wcześniej wyznaczoną transformatę Zaka okna gaussowskiego a następnie wykonać dwuwymiarową dyskretną odwrotną transformatę Fouriera otrzymanego ilorazu. Algorytm ten jest najszybszym i najdokładniejszym sposobem wyznaczania współczynników rozwinięcia Gabora [17] a w literaturze określany jest mianem *transformaty Zaka-Gabora*.

Wyznaczenie kodu tęczówki

Korzystając z wyżej przytoczonego algorytmu wyznaczamy współczynniki rozwinięcia Gabora dla każdego pierścienia tęczówki. Z reprezentacji odrzucamy następnie współczynniki reprezentujące składowe stałe sygnałów oraz składowe wysokoczęstotliwościowe. Pozostałe współczynniki kodujemy zgodnie z zasadą Daugmana, tzn. znak zarówno części urojonej jak i rzeczywistej zostaje zakodowany za pomocą jednego bitu. Wartości N w wyrażeniu (1) są większe dla pierścieni zlokalizowanych bliżej źrenicy, natomiast dla pierścieni leżących bliżej białkówki są mniejsze, co prowadzi – w przybliżeniu – do stałej rozdzielczości kątowej. Przykładowy kod tęczówki wyznaczony dla zdjęcia przedstawionego na rys. 4 zaprezentowano na rys. 6C.

Wyniki

Do obliczeń wykorzystano zdjęcia 25 różnych tęczówek. Jedno ze zdjęć posłużyło jako zdjęcie referencyjne, drugie ze zdjęć przeznaczone było do weryfikacji. Dolna połowa wszystkich wybranych tęczówek była wolna od zakłóceń (powiek, rzęs, itp.). Niektóre ze zdjęć zostały wykonane w okularach lub soczewkach kontaktowych. Z racji stosunkowo małej liczby próbek pomijamy tu analizę statystyczną wyników. Ze względu na tę samą długość kodów dla wszystkich tęczówek (576 bitów), do porównania użyta została operacja XOR, podobnie jak w systemie Daugmana. Dla naszej bazy danych nie zaobserwowaliśmy fałszywej akceptacji tęczówki (1740 porównań), natomiast dla 7 osób wynik porównania kodów był minimalnie mniejszy od założonego progu 74% co dało fałszywe odrzucenia. Należy podkreślić jednak iż nie przeprowadzaliśmy w naszym eksperymencie zaawansowanej fazy wprowadzania użytkownika do bazy, tak jak np. jest to robione w systemie Daugmana, gdzie wykonywanych jest 10 zdjęć oka na horyzoncie 30 sek., dla każdego z nich wyznaczany jest kod tęczówki, wykonywane są wzajemne porównania kodów a do bazy (jako zdjęcie referencyjne) trafia to ze zdjęć, którego kod tęczówki daje najlepsze wyniki porównań z pozostałymi kodami. Sam proces weryfikacji w naszym systemie jest również uproszczony. Wiadomo, iż orientacja oka w momencie fotografowania ma duży wpływ na wynik weryfikacji. Dlatego też, mając zdjęcie tęczówki przeznaczone do weryfikacji, powinniśmy sztucznie

wykonać kilka jego obrotów o mały kąt, np. 8 obrotów (tak jest to robione w systemie Daugmana) i jako wynik weryfikacji wybrać najwyższy z otrzymanych wyników porównań tęczówki referencyjnej i 8 obróconych wersji zdjęcia tęczówki przeznaczonej do weryfikacji.

Tabela 1 prezentuje czasy obliczeń dla każdej operacji składającej się na pełny scenariusz tworzenia kodu (rys. 6C) tęczówki pokazanej na rys. 4. W pracy wykorzystano kompilator Microsoft Visual C++ i nie optymalizowano kodu implementowanych procedur. Na uwagę zasługuje fakt wyznaczania kodu dla danych pierścieni tęczówki (transformata Zaka-Gabora) w niespełna 10 ms. Całkowity czas weryfikacji użytkownika plasuje się w granicach 5 sek.

Tabela 1. Czasy przetwarzania obrazu tęczówki i wyznaczania kodu.
Wykorzystano stację PC z PIII 600 MHz, 128MB RAM, kod w języku C++ nie był optymalizowany

	czas średni [s]	czas maksymalny [s]
akwizycja obrazu (25 klatek)	1.000	1.142
wybór klatki o najlepszej ostrości	2.383	2.413
wyznaczenie obrazu kierunkowego	0.059	0.080
lokalizacja tęczówki	1.116	1.763
wyznaczenie 8 obręczy tęczówki	0.069	0.082
wyznaczenie kodu (576 bitów)	0.007	0.010
suma	**4.634**	**5.490**

Aktualne badania

Otrzymane wyniki traktowane są jako punkt wyjściowy do dalszych badań. Obecnie modyfikowany jest algorytm lokalizujący tęczówkę tak aby w konstrukcji kodu wykorzystać pełny obszar tekstury tęczówki wolny od zakłóceń a nie jedynie dolną część oka.

Aktualne badania skupione są również wokół statystycznej analizy obszarów tekstury tęczówki. Wyniki takiej analizy pośrednio służyć będą dwóm celom: pierwszy to konstrukcja algorytmu traktującego tęczówkę jako zbiór pewnych obiektów i kodującego wzajemne ich położenie; drugi to konstrukcja metody pozwalającej na zastosowanie kodu tęczówki w identyfikacji/weryfikacji w sieci Internet poprzez dynamiczną modyfikację kodu i bez wykorzystywania znanych algorytmów szyfrujących. Takie postępowanie zapobiega atakom polegającym na wysłaniu nielegalnie przechwyconego kodu biometrycznego (być może w niewielkim stopniu zmienionego) w celu weryfikacji (ang. *replay attacks*). Do dzisiaj nie są znane systemy czy nawet propozycje dynamicznego kodowania danych biometrycznych i użycia ich do konstrukcji identyfikatora osoby.

Przy zastosowaniu kodowania obiektowego tekstury tęczówki spodziewana jest bardzo oszczędna i bardzo odporna na wszelkie zakłócenia metoda kodowania wzoru, zbliżona w założeniach do interpretacji obrazu przez człowieka i praktycznie niewrażliwa na poziom jasności, kontrast, szum z kamery a nawet rzęsy i odbicia źródła światła od rogówki.

Bibiliografia

APLIKACJE PATENTOWE

[1] Flom and Safir, "Iris recognition system", United States Patent 4.641.349, February 3, 1987
[2] John Daugman, "Biometric identification system based on iris analysis", United States Patent 5.291.560, March 1, 1994
[3] Richard P. Wildes *et al.*, "Automated, non-invasive iris recognition system and method", United States Patent 5.572.596, November 5, 1996
[4] Daniel Daehoon Kim *et al.*, "Iris identification system and method of identifying a person through iris recognition", United States Patent 6.247.813, June 19, 2001
[5] Y. Zhu, T. Tan, Y. Wang, "Iris image acquisition system", Chinese Patent Application No. 99217063.X, 1999
[6] Y. Zhu, T. Tan, Y. Wang, "Biometric Personal Identification System Based on Iris Pattern", Chinese Patent Application No. 9911025.6, 1999
[7] Matsushita *et al.*, „Iris identification system and iris identification method", United States Patent 5.901.238, May 4, 1999
[8] Doster *et al*., „Iris recognition apparatus and method",United States Patent 5.956.122, September 21, 1999
[9] Mann, *et al.*, „System and method for aircraft passenger check-in and boarding using iris recognition", United States Patent 6.119.096, September 12, 2000
[10] McHugh, *et al*., "Handheld iris imaging apparatus and method", United States Patent 6.289.113, September 11, 2001
[11] Musgrave *et al.,* "Iris imaging telephone security module and method", United States Patent 6.377.699, April 23, 2002

FIZJOLOGIA I STRUKTURA OKA

[12] F. H. Adler, "Physiology of the Eye" St. Louis, MO: Mosby, 1965
[13] H. Davson, "The Physiology of the Eye", 2nd ed. Boston, MA: Little, Brown & Co., 1963
[14] Czesław Jura i Halina Krzanowska (Ed.), „Leksykon biologiczny", Wiedza Powszechna, Warszawa 1992
[15] James P. Ivins, John Porrill, "A deformable model of the human iris for measuring small three-dimensional eye movements", Machine Vision and Applications, vol. 11, str. 42-51, 1998

ANALIZA CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA GABORA

[16] Denis Gabor, "Theory of communication", Proc. Inst. Electr. Eng., vol. 93 (III), str. 429-457, 1946
[17] Troy T. Chinen and Todd R. Reed, "A Performance Analysis of Fast Gabor Transform Methods", Graphical Models And Image Processing, vol. 59, nr 3, str. 117-127, maj 1997
[18] Martin J. Bastiaans, "Gabor's Expansion and the Zak Transform for Continuous-Time and Discrete-Time Signals", w Josh Zeevi and Ronald Coifman (Ed.), *Signal and Image Representation in Combined Spaces*, str. 1–43, Academic Press, Inc., 1995

INNE SYSTEMY WERYFIKACJI TĘCZÓWKI

[19] A. Bertillon, "La couleur de l'iris," *Rev. Sci.*, vol. 36, nr 3, str. 65–73, 1885
[20] Adam Czajka, Andrzej Pacut, „Zak's transform for automatic identity verification", Proceedings of 4th International Conference on Recent Advances in Soft Computing RASC2002, Nottingham, United Kingdom, 12-13 December, 2002, str. 374-379
[21] W. W. Boles, "A Security System Based on Human Iris Identification Using Wavelet Transform", Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, KES'97. Proceedings. First International Conference on, Adelaide, Australia, str. 533-541, vol. 2, 1997