

Analiza obrazów w automatycznym systemie identyfikacji ziaren pyłku roślin

**PIOTR RAPIEJKO¹, ZBIGNIEW M. WAWRZY尼亚K²,
RYSZARD S. JACHOWICZ², DARIUSZ JURKIEWICZ¹**

¹ Klinika Otolaryngologii CSK MON Wojskowego Instytutu Medycznego,
ul. Szaserów 128, 00-909 Warszawa

² Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska,
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

ENT Department, Military Institute of Medicine, Szaserów 128, 00-909 Warsaw, Poland
Faculty of Electronics and Information Technology, Warsaw University of Technology,
00-665 Warsaw

Image analysis in automatic system of pollen recognition

(Otrzymano: 1.09.2005)

S u m m a r y

In allergology practice and research, it would be convenient to receive pollen identification and monitoring results in much shorter time than it comes from human identification. Image based analysis is one of the approaches to an automated identification scheme for pollen grain and pattern recognition on such images is widely used as a powerful tool.

The goal of such attempt is to provide accurate, fast recognition and classification and counting of pollen grains by computer system for monitoring.

The isolated pollen grain are objects extracted from microscopic image by CCD camera and PC computer under proper conditions for further analysis.

The algorithms are based on the knowledge from feature vector analysis of estimated parameters calculated from grain characteristics, including morphological features, surface features and other applicable estimated characteristics. Segmentation algorithms specially tailored to pollen object characteristics provide exact descriptions of pollen characteristics (border and internal features) already used by human expert. The specific characteristics and its measures are statistically estimated for each object. Some low level statistics for estimated local and global measures of the features establish the feature space. Some special care should be paid on choosing these feature and on constructing the feature space to optimize the number of subspaces for higher recognition rates in low-level classification for type differentiation of pollen grains.

The results of estimated parameters of feature vector in low dimension space for some typical pollen types are presented, as well as some effective and fast recognition results of performed experiments for different pollens. The findings show the evidence of using proper chosen estimators of central and invariant moments (M21, NM2, NM3, NM8 NM9), of tailored characteristics for good enough classification measures (efficiency > 95%), even for low dimensional classifiers (≥ 3) for type differentiation of pollens grain.

Key words: pollen grains, recognition, aeroallergens, image analysis, monitoring system

WSTĘP

Monitorowanie stężenia ziaren pyłku roślin jest jednym z zasadniczych elementów wykorzystywanych w diagnostyce, profilaktyce i ocenie skuteczności terapii schorzeń alergicznych (W e r y s z k o - C h m i e l e w s k a i in., 2001).

Ziarna pyłku roślin i zarodniki grzybów mikroskopowych stanowią największą część bioaerozolu znajdującego się w powietrzu (L i p i e c, 2000). Uczulenie na alergeny pyłku roślin jest jednym z najczęstszych schorzeń atopowych i dotyczy obecnie co najmniej 15% populacji. Ocenia się, iż liczba osób z alergią podwaja się co 10 lat i do 2020 roku przekroczy 50% populacji (P ł u s a, 2002).

Charakterystyczną cechą schorzeń alergicznych wywołanych przez alergeny pyłku roślin jest sezonowość występowania objawów, a nasilenie symptomów jest ściśle zależne od stopnia ekspozycji, która może być monitorowana w ustalonych obszarach miejskich i pozawiejskich poprzez system urządzeń pomiarowych (S a m o l i Ń s k i i G o t l i b, 2003). Dzięki znajomości stężeń ziaren pyłku i ewolucji właściwości klimatycznych możliwe jest prognozowanie stężeń, a więc określenie zagrożeń z tego tytułu na danym obszarze (P u c, 2003). Daje to praktyczne możliwości zaplanowania terapii schorzeń alergicznych, w tym immunoterapii swoistej oraz pozwala na ocenę wyników leczenia i monitorowanie naturalnego przebiegu choroby alergicznej z uwzględnieniem jej wielopostaciowej manifestacji (R a p i e j k o i in., 2004).

Aktualnie stosowana metoda pomiaru stężeń ziaren pyłku roślin w pierwszym etapie polega na pozyskaniu reprezentatywnej dla danego środowiska próbki przy użyciu aparatów objętościowych, których budowa oparta jest na konstrukcji sprzed ponad 50 lat (H i r s t, 1952). Drugi etap żmudnej analizy badanej próbki pod mikroskopem o dużej rozdzielczości polega na wizualnym porównaniu kształtów oglądanych ziaren pyłku z preparatami porównawczymi lub obrazami z atlasów ziaren pyłku, dokonaniu ich kwalifikacji i zliczeniu każdego rodzaju ziaren pyłku ze znanej powierzchni analizowanego obszaru bez użycia cyfrowej analizy i technik przetwarzania obrazów (S z c z e p a n e k, 1994, W e r y s z k o - C h m i e l e w s k a i in., 2001).

Efektywność i jakość monitorowania stężenia aeroalergenów jest w dużym stopniu ograniczona przez stosowane obecnie tradycyjne techniki zbierania próbek i ich analizę przez wykwalifikowany personel (palinologzy, botanicy).

Wszystkie te czynniki powodują, że do poprawy sposobu monitorowania stężeń ziaren pyłku wymagany jest inny, automatyczny sposób zbierania i rozpoznawania ziaren pyłku. Techniki przetwarzania i analizy obrazu zastosowano w wielu naukach doświadczalnych (medycyna, biologia), a także innych, w których analiza obiektów lub zjawisk odbywa się wizualnie lub może być, po przetworzeniu przez odpowiedni przetwornik, traktowana jako informacja wizualna (van der Heijden, 1994).

Celem pracy było automatyczne rozpoznawanie, klasyfikacja i zliczanie ziaren pyłku roślin dla monitorowania stężeń aeroalergenów z obrazów pochodzącym np. z osadzonych na taśmie pomiarowej obiektów w systemie komputerowym, który daje pomiar szybki, prosty i o większym poziomie ufności w stosunku do analizy prowadzonej przez obserwatora za pomocą mikroskopu optycznego.

MATERIAŁ I METODY

System pomiarowy (ryc. 1) składa się w zasadzie z dwóch funkcjonalnych bloków sprzętowych: pozyskiwania ziaren pyłku metodami mechanicznymi (na bazie aparatu VST 2000 Lanzoni) oraz akwizycji obrazu (mikroskop + kamera CCD). Zawarte w strumieniu powietrza ziarna pyłku przyklejają się do taśmy klejącej. Umieszczona nad taśmą klejącą kamera wizyjna typu CCD, monitoruje z dużą rozdzielczością obraz przyklejonych do taśmy ziaren pyłku. Kamera przesyła w sposób cyfrowy obraz do komputera klasy PC, który dokonuje analizy obrazu (klasyfikacja ziaren pyłku) oraz ich zliczanie, a następnie monitoruje wyniki statystycznie. Komputer PC może być dołączony poprzez sieć Internet do systemu monitoringu o zasięgu krajowym lub międzynarodowym. Rozpoznawanie ziaren pyłku odbywa się w bloku komputerowego rozpoznawania obrazów i analizy statystycznej. Wymagało to opracowywania skutecznych algorytmów numerycznych i ich sprawdzenia na dwóch bazach: testowej i uczącej, zbudowanej dla kilku do kilkunastu rodzajów ziaren pyłku.

WYNIKI

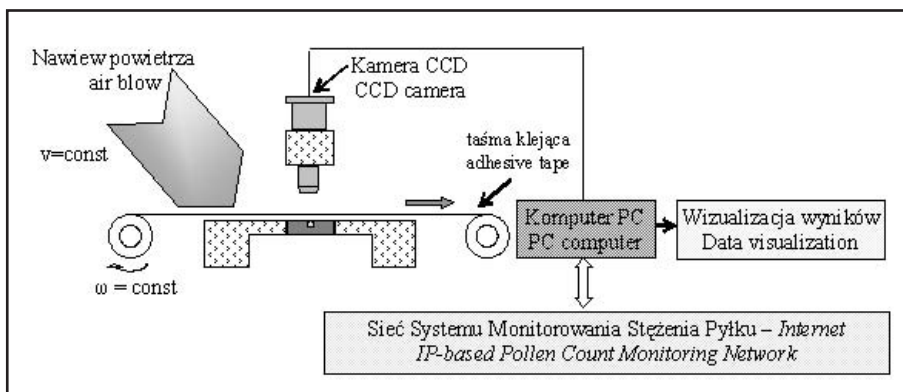
Informacja obrazowa ziaren pyłku roślin w postaci pojedynczych elementów obrazu (pikseli), uzyskana z odczytu obrazu taśmy, jest przekształcana w inną reprezentację symboliczną – zbiór rozłącznych obiektów, które są ograniczone brzegiem ziarna. Wydziela się je podczas przetwarzania właściwości pojedynczych pikseli w kontekście zdefiniowanym lokalnie (podobieństwo cech) lub globalnie (funkcje przynależności). Analiza obiektów pyłkowych w celu rozpoznania sprowadza się do określenia brzegu i podania specyficznych cech opisujących obiekt (kształt, teksturę itp.). Położenie i cechy obiektów w obrazie, opisane przez ustalone miary zdefiniowane jako operacje punktowe (pikselowe), operacje lokalne lub przekształcenia filtrujące, pozwala dokonać oceny tych obiektów i przyporządkować je do pewnych klas obiektów.

Rozpoznanie obiektów ziaren pyłku w obrazie z taśmy stanowi określenie przynależności funkcyjnej do klas obiektów zdefiniowanych dla typów ziaren w trakcie procesu klasyfikacji. Klasy obiektów, uzyskiwanych w procesie segmentacji, zbudowano dla cech podobieństwa zdefiniowanych w oparciu o różne właściwości obrazu. W przypadku identyfikacji ziaren pyłku, klasy obiektów są zdefiniowane *a priori* przez charakterystyczne cechy ziaren pyłku różnych gatunków roślin. Zgromadzona wiedza, w formie cyfrowych wzorców wraz z opisem funkcyjnym, pozwoliła: w ogólności na uproszczenie zagadnienia klasyfikacji, a w szczególności na automatyzację rozpoznawania i generowania decyzyjnych sygnałów wyjściowych po klasyfikacji, nawet w stosunkowo krótkim czasie.

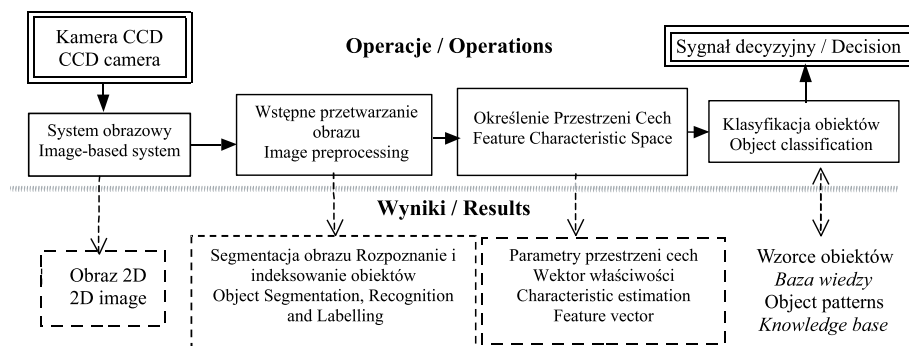
Opis cech charakterystycznych klas (typów ziaren pyłku) uzyskano w procesie *uczenia się pod nadzorem* (z ekspertem) ze zbioru wzorców obrazowych ziaren pyłku. Obiekty w analizowanych obrazach, opisane funkcyjnie w przestrzeni cech w trakcie segmentacji, zostały następnie użyte w procesie klasyfikacji. Podejmowanie decyzji o przynależności obiektu do danej klasy opierały się na wyborze klasyfikatorów, zdefiniowanych dla estymowanych wartości wybranych parametrów przestrzeni cech. Przestrzeń cech została utworzona na bazie estymatorów właściwości, uzyskiwanych ze statystyk różnego rzędu dla cech opisujących różne typy właściwości (kształt, kolor, tekstura, momenty geometryczne i lokalne, widmowe obrazy przekształceń, morfologia itp.). W procesie optymalizacji dla danego kryterium błędu klasyfikacji, wymiar przestrzeni cech został ograniczony do podprzestrzeni o możliwie niskim wymiarze. Natomiast ilość klas, zależnych od pory roku, wynika z liczby typów ziaren pyłku roślin występujących w tym samym czasie i waha się od kilku do kilkunastu. Rozpoznawanie poszczególnych obiektów na obrazie musi być powtarzane dla kolejnych części obrazu preparatu mikroskopowego i/lub odcinków taśmy. Wynika to z przyjętego standardu identyfikacji i zliczania ilości obiektów w systemach monitoringu na świecie, w przeliczeniu na stężenia robocze ziaren pyłku w objętości powietrza.

Stworzono wzorce obrazowe posiadające odpowiedni zbiór estymowanych parametrów (*bazę wiedzy*) dla wszystkich typów ziaren pyłku roślin uznanych za mające znaczenie w alergologii w celu masowego monitoringu (wymagającego analizy i rozpoznania około kilkudziesięciu rodzajów ziaren). Wymagało to szczegółowej analizy obrazów tych ziaren pyłku, z koniecznością modyfikacji istniejących algorytmów pod kątem nowych cech ziaren pyłku (dotychczas nieujawnionych) i zwiększenie szybkości działania algorytmów (analizy próbek).

Proces przetwarzania informacji obrazowej na sygnał decyzyjny identyfikacji (ryc. 2) przekształcił ziarnisty obraz w zbiór jednorodnych obiektów, opisanych różnymi cechami z pewnych założonych kategorii (grup cech) – właściwości kształtu, parametry jasności, koloru, momenty (zwykłe i centralne), parametry teksturowe i widmowe (FFT). Każda z cech miała swoje miary jakościowe, a ich wzajemne relacje miały znaczenie dla procesu segmentacji, a następnie w procesie rozpoznawania i klasyfikacji obiektów. Estymatory parametrów opisujących właściwości cech dla różnych statystyk posłużyły do zdefiniowania reguł klasyfikacji i klasyfikatorów



Ryc. 1. Poglądowy schemat funkcjonalny identyfikacji ziaren pyłku do monitorowania aeroalergenów.
Fig. 1. Functional scheme of pollen grain identification system for aeroallergens monitoring purpose.



Ryc. 2. Proces przetwarzania informacji przy rozpoznawaniu obiektów.
Fig. 2. Information processing in object recognition.

decydujących o przynależności do określonych klas obiektów. Procesy segmentacji i budowy wektora właściwości w przestrzeni cech nie były wyraźnie rozdzielone, a metody morfologii matematycznej były stosowane gdy w lokalnym otoczeniu obiektu były one połączone (stykały się brzegiem). Wielowymiarowy wektor właściwości w przestrzeni cech był transformowany w przestrzeń cech poprzez estymację właściwości cech określonymi parametrami ilościowymi. Rozmiar przestrzeni obrazu wejściowego uległ zmniejszeniu, a uzyskany wektor właściwości był przetwarzany metodami probabilistycznymi i technikami logiki rozmytej.

Znajomość *a priori* przestrzeni cech dla typów ziaren pyłku eliminowała proces uczenia pod nadzorem, a w procesie rozpoznawania określono wartości tych parametrów (estymatorów cech tworzących bazę wiedzy), które użyto do budowy reguł klasyfikacji, określenia ich ilości oraz wyboru klasyfikatora. Przy założonej wartości błędu klasyfikacji (<5%) określano możliwy do uzyskania

Tabela 1

Wartości znormalizowanych estymowanych parametrów momentów centralnych i inwariantnych używanych do budowy klasyfikatorów.

Table 1

Results for normalized parameters of central and invariant moments used for classifier composing.

| Ziarna pyłku Pollen grains | Wartości momentów Moment estimations | | | | |
|-------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| | M21 | NM2 | NM3 | NM8 | NM9 |
| <i>Alnus sp.</i> | 1,5% | 15,1% | 2,3% | 2,0% | 0,7% |
| <i>Betula sp.</i> | 22,5% | 146,1% | 128,4% | 130,5% | 132,5% |
| <i>Corylus sp.</i> | 91,2% | 26,9% | 81,2% | 82,1% | 50,6% |

rząd klasyfikatora w celu różnicowania ziaren pyłku – rozdzielenia obiektów do przyjętych *a priori* typów ziaren. Prawidłowy wybór cech charakterystycznych różnicujących typy, określenie miar tych cech i obliczenie estymatorów umożliwił stworzenie niskowymiarowych klasyfikatorów (2- i 3-rzędu), szczególnie przydatnych dla oprogramowania do analizy w wersji przenośnej dla komputerów instalowanych bezpośrednio w punktach zbierania próbek. Wyniki analizy estymowanych parametrów i doboru różnicujących parametrów dla wybranych wektorów przestrzeni cech przedstawiono dla kilku typowych rodzajów roślin o dużym znaczeniu w alergologii: leszczyna, olsza, brzoza (tab. 1). Wektor cech dla poszczególnych typów ziaren w minimalizowanej, w poprzednich krokach analizy, przestrzeni (wiersz) przedstawia wartości estymatorów momentów centralnych (M21) i inwariantnych (NM2, NM3, NM8, NM9); dla każdego estymatora wartość znormalizowano względem wartości średniej dla wszystkich typów ziaren naszej bazy wiedzy. Do budowy klasyfikatora niskowymiarowego niezbędny jest taki wybór estymatorów miar z przestrzeni cech, aby każdy z nich (lub ich suma ważona) miał zdolność rozdzielczą, czyli dla wybranego estymatora poprzez porównanie jego wartości dla badanego ziarna z odpowiadającymi wartościami wynikającymi z bazy wiedzy (kolumny w tab.1 pokazujące wartości dla wybranych estymatorów), można było je jednoznacznie klasyfikować do typu ziarna pyłku. Pokazane wartości wskazują na znaczące różnice pomiędzy znormalizowanymi momentami dla różnych typów ziaren (w każdej pokazanej kolumnie), co determinuje budowę klasyfikatorów, która nie jest tu dyskutowana. Pozornie zbliżone znormalizowane wartości w kolumnach NM3 i NM8 pozwalają dla tych trzech wymienionych typów ziaren (leszczyna, olsza, brzoza) na jednoznaczną klasyfikację, również klasyfikatorem jedynie 1 rzędu, ponieważ normalizowane są inną wartością bezwzględną. Można je rozpatrywać w aspekcie badania korelacji cech przy ustalonym rzędzie klasyfikatora. W tym przypadku każdy z momentów, pokazanych w kolumnach Tab.1 dla 3 wybranych typów ziaren, pozwala jednoznacznie rozróżnić typy ziaren, przy czym pomiędzy momentem M21 a innymi momentami współczynniki korelacji wynoszą $-0,215$ (dla NM2), $0,358$ (dla NM8) i $0,086$ (dla NM9).

DYSKUSJA

Opracowanie metod szybkiego automatycznego rozpoznawania i klasyfikacji ziaren pyłku roślin, przy zastosowaniu optymalizowanych klasyfikatorów w celu ograniczenia czasu przetwarzania, było zagadnieniem trudnym, pracochłonnym i wymagało indywidualnego podejścia do klas wzorców obiektów, jakimi są ziarna pyłku. Poszukiwanie reguł klasyfikatorów niskowymiarowych przy klasyfikacji obiektów pyłkowych rozwiązuje ten problem w sensie globalnym i daje możliwość wprowadzenia zaawansowanych metod rozpoznawania i klasyfikacji do analizy np. obiektów komórek, obszarów o innych cechach w preparatach biologicznych.

Tradycyjna wizualna metoda identyfikacji ziaren pyłku i określenia na tej podstawie stężenia jest niedoskonała i obciążona dużym błędem subiektywnym (Levetin i Van der Water, 2003). Tak małe objekty (o średnicy od 5 do 100 μm), o dużej różnorodności typów w danym terenie (od kilku do kilkudziesięciu typów) trudno jest nawet najlepszemu specjalście klasyfikować w sposób bezbłędny przez dłuższy okres czasu (wybieranie kolejnych pól widzenia w preparacie). Ze względu na dużą liczbę ziaren jednego rodzaju i jednoczesne występowanie kilku lub kilkudziesięciu rodzajów ziaren, trudno jest prowadzić bezbłędną analizę i identyfikację statystyczną, przy natężeniu uwagi i w wyniku znużenia operatora łatwo jest o błędy (Levetin i Van der Water, 2003).

Szczegółowa analiza problemów związanych z opracowaniem algorytmów identyfikacji w zakresie rozpoznawania i klasyfikacji wymagała opracowania algorytmów wydzielenia obiektu, algorytmów segmentacji i rozpoznawania oraz algorytmów klasyfikacji. Wydzielanie obiektów poprzez określenie brzegu technikami funkcji morfologicznych, aktywnego konturu i filtracją brzegową, uwzględniającą cechy lokalne takie, jak „miękki” brzeg, spory, przerwy i „podwójny” brzeg, modelowanie właściwości rozkładu brzegu dla różnych typów ziaren pyłku. Segmentacja obrazu w objekty i proces indeksowania obiektów oraz tworzenie przestrzeni cech opisujących właściwości dla wybranych cech i tworzenie nadmiarowych wektorów właściwości z redukcją wymiarów wektorów posłużyły wyborowi klasyfikatorów przy zadanym kryterium błędu rozpoznania (Wawrzyniak, 2002, Wawrzyniak i Rapiejko, 2004).

Zainicjowane procedury opracowania baz wzorców cyfrowych obrazów ziaren pyłku dla poszczególnych rodzajów roślin i warunków akwizycji obrazu będą kontynuowane wraz z testowaniem bazy danych, bazy wiedzy i systemu identyfikacji ziaren pyłku. Uzyskane wyniki, prezentowane jako wartości estymatorów wybranych miar cech w wektorze właściwości dla momentów centralnych (M21) i inwariantnych (NM2, NM3, NM8, NM9), pokazują dobre właściwości różnicujące do zastosowania przy budowie niskowymiarowych klasyfikatorów (do przenośnych stanowisk) zgodnie z założonym błędem klasyfikacji, akceptowanym w procesie rozpoznawania.

WNIOSKI

Opracowano specyficzne metody i algorytmy rozpoznawania i klasyfikowania ziaren pyłku roślin o znaczeniu alergennym oraz optymalizowano zagadnienia szybkiego rozpoznawania i klasyfikacji obiektów o cechach charakterystycznych wizualnie zbliżonych. Poprzez stosowanie algorytmów morfologicznych i odpowiednio dobranych klasyfikatorów, opracowano oprogramowanie aplikacyjne do zbierania danych pomiarowych, ich przetwarzania i wizualizacji, klasyfikacji i tworzenia, zorganizowanych ze względu na te cechy, baz danych.

Opracowano algorytmy do komputerowej analizy i klasyfikacji obrazów mikroskopowych preparatów osadzonych ziaren do rozpoznawania ziaren pyłku poszczególnych rodzajów roślin ze zbioru wzorców zbudowanego dla 60 rodzajów roślin. Zastosowano metody zaawansowanego przetwarzania obrazów (w celu uwypuklenia cech charakterystycznych dla każdego rodzaju ziaren pyłku), klasyfikacji tych cech, opracowania wzorców cech charakterystycznych, klasyfikatorów z uwzględnieniem szybkości działania tych procedur wraz z testami weryfikacyjnymi.

Zasadniczym zagadnieniem analizy jest prawidłowy wybór cech charakterystycznych różnicujących typy, określenie miar tych cech i obliczenie estymatorów. Wykazano eksperymentalnie, że odpowiednio dobrane parametry cech pozwalają na uzyskanie wysokiego poziomu ufności (> 95%) rozpoznania nawet dla niskowymiarowej przestrzeni (≥ 3) w celu ich wykorzystania w budowie automatycznego analizatora do rozpoznawania i klasyfikacji ziaren pyłku roślin.

LITERATURA

- van der Heijden F., 1994. Image Based Measurement Systems, John Wiley & Sons, Chichester. pp: 235-237.
- Hirst J. M., 1952. An automatic volumetric spore trap. *Ann Appl. Biol.* 39:257-265.
- Levetin E., Van der Water P., 2003. Pollen count forecasting. *Immunol Allergy Clin N Am.* 23: 423-442.
- Lipiec A., 2000. Nadwrażliwość na grzyby pleśniowe u chorych na alergiczne zapalenie błony śluzowej nosa. *Otolaryngol. Pol.* 54: 89-90.
- Plusa T., 2002. Allergic diseases over the world. *Int. Rev. Allergol. Clin. Immunol.* 8:55-60.
- Puc M., 2003. Characterisation of pollen allergens. *Ann Agric Environ Med.* 10:143-149.
- Rapiejko P., Lipiec A., Wojdas A., Jurkiewicz D., 2004. Threshold pollen concentration necessary to evoke allergic symptoms. *Int Rev. Allergol. Clin. Immunol.* 2:91-94.
- Samoliński B., Gotlib T., 2003. Swoiste donosowe testy prowokacyjne w rozpoznawaniu alergii. *Pol. Merkurusz Lek.* 84, 14: 548-552.
- Schalkoff R., 1992. Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches, John Wiley & Sons, New York: 132.
- Szczepanek K., 1994. Pollen calendar for Cracow (southern Poland), 1982-1991. *Aerobiologia*, 10:65-70.
- Wawrzyniak Z., Rapiejko P., 2004. Estimations of feature space parameters for aerobiological analysis of pollen grains. *Polen, Cordoba*, 14: 65.

- W a w r z y n i a k Z., 2002. Analiza wektora właściwości w rozpoznawaniu obrazów pomiarowych. IV Sympozjum Naukowe Techniki Przetwarzania Obrazu, 21-23 listopada 2002, Serock k/Warszawy: 287-292.
- W e r y s z k o - C h m i e l e w s k a E., P u c M., R a p i e j k o P., 2001. Comparative analysis of pollen counts of Corylus, Alnus and Betula in Szczecin, Warsaw and Lublin (2000-2001). Ann Agric Environ Med. 8:1-5.

Streszczenie

W praktyce alergologicznej oraz badaniach dogodne jest uzyskanie identyfikacji ziaren pyłku i wyników monitoringu w krótszym czasie niż potrzeba na taką identyfikację przez człowieka. Analiza obrazowa jako jedna z metod automatycznego sposobu identyfikacji ziaren pyłku i rozpoznawanie obiektów w takich obrazach jest szeroko używana jako skuteczne narzędzie analizy.

Celem pracy było automatyczne rozpoznawanie, klasyfikacja i zliczanie ziaren pyłku roślin w monitorowaniu stężeń aeroalergenów z obrazów pochodzącym np. z osadzonych na taśmie pomiarowej obiektów przez system komputerowy, który daje pomiar szybki, prosty i o wyższym poziomie ufności w stosunku do analizy prowadzonej przez obserwatora za pomocą mikroskopu optycznego. Ziarna pyłku wyizolowano z obrazu mikroskopowego przez układ kamery i komputera PC w warunkach odpowiednich do dalszej analizy.

Algorytmy oparte zostały na wiedzy pochodzącej z analizy przestrzeni wektorów cech estymowanych charakterystyk ziaren pyłku: właściwości morfologicznych, cech powierzchni i kształtu oraz odpowiednich innych właściwości. Algorytmy segmentacji specjalnie dobrane do cech charakterystycznych dostarczyły dokładnego opisu brzegu i wnętrza ziaren pyłku, takiego jak używał ekspert. Specyficzne cechy i ich miary były obliczane dla każdego obiektu. Część z estymowanych miar lokalnych i globalnych niskiego rzędu utworzyła przestrzeń cech. Szczególną uwagę poświęcono wyborowi właściwości cech i tworzeniu przestrzeni cech w taki sposób, aby optymalizować jej rząd dla zadanej wartości poziomu rozpoznania dla niskowymiarowego klasyfikatora przy różnicowaniu ziaren.

Przedstawiono uzyskane wyniki estymowanych parametrów momentów wektora w niskowymiarowej przestrzeni cech dla trzech typowych ziaren pyłku, jak również rezultaty szybkiego i skutecznego rozpoznania dla przeprowadzonych doświadczeń. Pokazują one, że używając estymatorów odpowiednio dobranych właściwości momentów centralnych i inwariantnych można uzyskać rozróżnienie ziaren pyłku dla odpowiednich miar klasyfikacji nawet dla niskowymiarowych klasyfikatorów przy uzyskaniu wysokiego poziomu ufności (> 95%) rozpoznania nawet dla niskowymiarowej przestrzeni (≥ 3).

