

Jan CYCHNERSKI, Adam BRZESKI, Adam BŁOKUS,
Tomasz DZIUBICH, Mateusz JĘDRZEJEWSKI
Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki,
Katedra Architektury Systemów Komputerowych

KONSTRUKCJA BAZY DANYCH DLA SYSTEMU WSPOMAGANIA DIAGNOSTYKI CHORÓB PRZEWODU POKARMOWEGO

Streszczenie. W artykule krótko przedstawiono charakterystykę procesu diagnostyki chorób przewodu pokarmowego oraz istniejące techniki wspomaganie go na bazie analizy zdjęć z badań endoskopowych. Szczegółowo opisano proces tworzenia specjalistycznej bazy danych medycznych, której przeznaczeniem jest wspomaganie procesu uczenia klasyfikatorów chorób przewodu pokarmowego. Na koniec przedstawiono zebrane w bazie dane oraz uzyskane efekty.

Słowa kluczowe: baza danych medycznych, rozpoznawanie obrazów, endoskopia kapsułkowa

DATABASE DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR A DIGESTIVE TRACT DIAGNOSTICS SUPPORT SYSTEM

Summary. The article briefly presents the process of diagnosing gastrointestinal diseases and discusses existing techniques of supporting it with automatic analysis of video from gastrointestinal examinations. Further, the process of designing a specialized medical database is described. The main goal of the created database is to provide data for the training of automatic classifiers of gastrointestinal diseases. Finally, the collected data and acquired results are presented.

Keywords: medical database, image recognition, wireless capsule endoscopy

1. Wspomaganie diagnostyki przewodu pokarmowego

Badania endoskopowe są bardzo istotnym zabiegiem medycznym w procesie diagnostyki chorób układu pokarmowego człowieka. Umożliwiają badanie wnętrza narządów układu

pokarmowego, pozwalają na wczesne wykrywanie m.in. chorób nowotworowych, co daje duże szanse na skuteczne leczenie. Silnie rozwijającą się w ostatniej dekadzie dziedziną endoskopii jest tzw. endoscopia kapsułkowa (ang. WCE – *Wireless Capsule Endoscopy*). Badanie to polega na połknięciu przez pacjenta kapsułki o wymiarach ok. 9 x 26 mm, wyposażonej w kamerę oraz źródło światła. Zarejestrowane obrazy przesyłane są bezprzewodowo do odbiornika umieszczonego na pasie wokół bioder pacjenta. Rezultatem badania jest film, który następnie poddawany jest analizie przez lekarza specjalistę. Niestety, specyfika takich filmów czyni analizę bardzo czasochłonną – dla typowego, ośmiogodzinnego, filmu trwa ona zwykle ok. 1 – 2 godzin. Jest to zadanie tym trudniejsze, że wymaga od lekarza pracy w ciągłym skupieniu i nieustannej koncentracji na obrazie. Jedyne wskazówki dla niego są informacje udzielone przez pacjenta podczas wywiadu lekarskiego.

Istnieje więc zapotrzebowanie na system wspierający lekarza w procesie analizy, który pozwoliłby również na skrócenie tego procesu i zaoszczędzenie czasu specjalisty. System wspomagający powinien przeprowadzić wstępną analizę badanego materiału filmowego w celu wskazania fragmentów filmu przedstawiających podejrzenia zmian chorobowych. W literaturze opisano kilka technik wspomagających ten proces (całościowy ich przegląd zawarty jest w [1]), jednakże żadna z wymienionych tam metod nie została skomercjalizowana. Komercyjne rozwiązania producentów endoskopów i kapsuł bazują na określeniu wskaźnika SBI (*Suspected Blood Indicator* – poziomu nasycenia kolorem czerwonym, który odpowiada obecności krwi na zdjęciu). W projekcie MAYDAY EURO 2012¹, realizowanym na Politechnice Gdańskiej, podjęto próbę utworzenia specjalizowanego klasyfikatora obrazów pochodzących z nagrań badań endoskopowych. Klasyfikator ten, stanowiący część aplikacji MedEye, oparty na sztucznych sieciach neuronowych, wykorzystuje cechy kolorów, kształtów oraz tekstur, zwiększając tym samym spektrum rozpoznawanych schorzeń.



Rys. 1. Przykładowe obrazy pozyskane przez kapsułkę endoskopową
Fig. 1. Sample images collected by an endocapsule

¹ <http://mayday2012.gda.pl/>.

Do skutecznego działania systemu wspomagania badań medycznych MedEye oraz rozpoznawania chorób niezbędny jest obszerny i dobry jakościowo zbiór danych wejściowych, pozwalających zarówno na wytrenowanie algorytmów rozpoznawania, jak i na ich testowanie, tj. precyzyjne określenie faktycznej skuteczności już wyuczonych algorytmów. Typowe systemy wspomagania diagnostyki w endoskopii kapsułkowej, tworzone wcześniej, nie posiadały takiej bazy – zwykle dane dotyczyły zaledwie jednej choroby (np. polip, krwawienie), przy czym niewielka liczność zbioru (100 – 400 obrazów [2, 3], ale też mniej) w wielu przypadkach poddawała w wątpliwość wyniki testów zaprezentowanych przez twórców [1].

W tworzonym przez nas systemie wspomagania diagnostyki MedEye niezbędne było utworzenie bazy danych medycznych o możliwie jak największym rozmiarze. Z tego względu zdecydowano się na ścisłą współpracę z Kliniką Gastroenterologii i Hepatologii Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego.

Klinika ta dysponuje systemem rekomendacji dla badań endoskopowych ERS (*Endoscopy Recommender System*) [4]. Architektura jego bazy danych została potraktowana jako punkt wyjścia. W bazie tej znajdują się dane pacjenta, dane z przeprowadzonych wywiadów medycznych, dane o wynikach badań specjalistycznych oraz opisy rozpoznań. Mimo możliwości przechowywania obrazów z badań w odpowiednich tabelach, personel nie archiwizował zdjęć z badań bezpośrednio w bazie danych systemu ERS. Dla celów projektu, oprócz samych obrazów, istotne są również zaznaczenia obszarów chorobowych na poszczególnych klatkach – funkcjonalność ta nie była w ogóle dotąd realizowana. Stąd, aby spełnić przyjęte wymagania, przyjęto następujący sposób konstrukcji bazy danych:

- a) określenie dostępnych źródeł danych medycznych i wybór cech potrzebnych do prawidłowej klasyfikacji,
- b) określenie docelowej struktury bazy danych,
- c) implementacja aplikacji do importu i akwizycji danych,
- d) proces gromadzenia danych medycznych i ich oceny.

W kolejnych podpunktach każdy z etapów projektu został opisany bardziej szczegółowo.

2. Proces budowy bazy danych przypadków medycznych

2.1. Źródła danych medycznych

Klinika Gastroenterologii i Hepatologii Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego (*GUMed*) przeprowadza ok. 10 badań endoskopowych dziennie. Wszystkie badania dokumentowane są w systemie ERS – gromadzone są w nim dane personalne każdego pacjenta oraz opis wszystkich przeprowadzonych badań endoskopowych wraz z opisem lekarskim dokonanych rozpo-

znań. Ponadto baza danych systemu ERS zawiera informacje o istniejących chorobach i bardziej szczegółowych elementach diagnostycznych.

Drugim rodzajem danych przechowywanych przez Klinikę są nagrania wideo z wybranych badań endoskopowych, magazynowane na płytach DVD – charakterystyka nagrań przedstawiona została w tabeli 1. Pobocznym źródłem informacji są lekarze i pracownicy Kliniki oraz dokumentacja specjalistyczna.

Tabela 1

Analiza bazy filmów DVD z badań endoskopowych

Liczba płyt	około 200
Liczba badań na płycie	5 – 15
Długość pojedynczego nagrania	10 – 50 minut
Czy badania nagrane są w całości?	zwykle tak
Rodzaj nagranych badań	przypadki chorobowe (plus znikomy procent przypadków zdrowych)
Format zapisu na płycie	DVD, MPEG2, 720x576i, 25 fps
Informacje identyfikacyjne	lista nazwisk badanych pacjentów na okładce oraz (nie zawsze) w menu DVD

Integrację z systemem ERS przeprowadzono przez import części jego bazy danych odpowiedzialnej za listę pacjentów i opisów badań do aplikacji *ErsCutter* (patrz: podpunkt 2.3). Fragment importowanego schematu bazy danych przedstawiono na ry. 2.

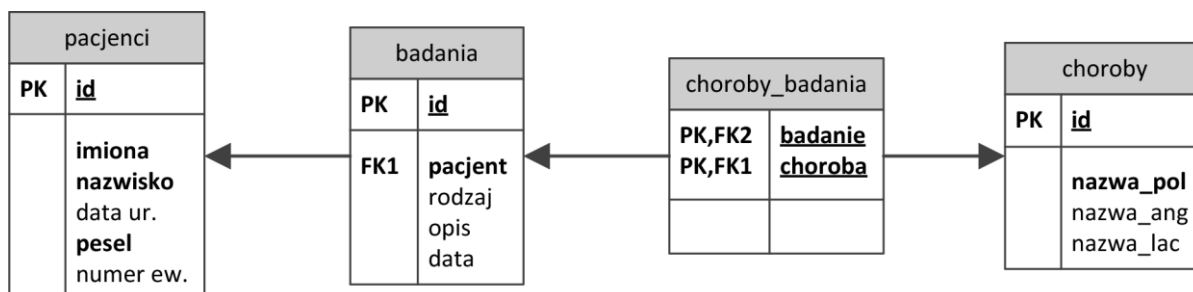
Rys. 2. Baza danych pacjentów i badań – wycinek bazy danych systemu *ERS2005*

Fig. 2. ERS2005 database fragment: patients, exams and diseases

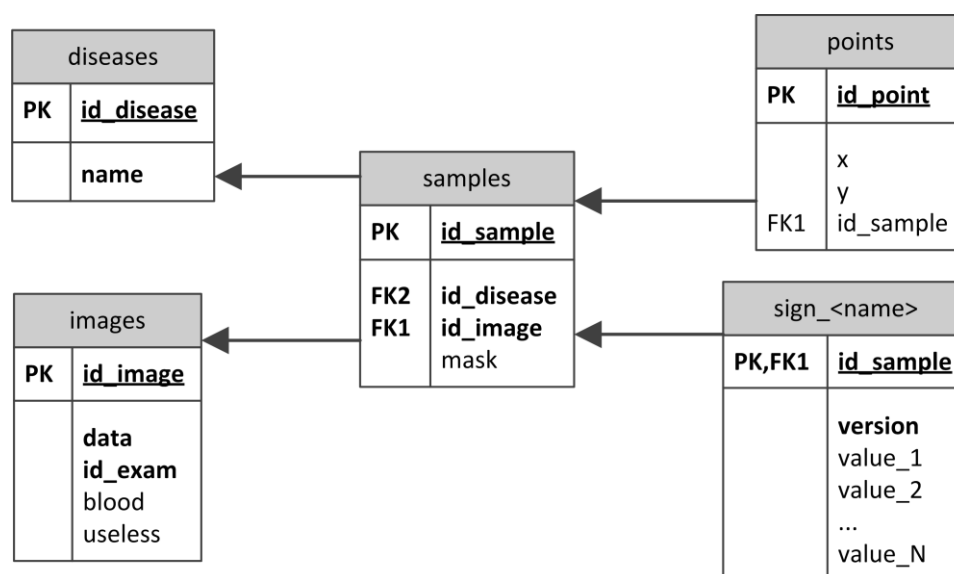
2.2. Struktura bazy przypadków chorobowych

Do skutecznego działania każdego systemu sztucznej inteligencji, do jakich zalicza się budowany system rozpoznawania chorób, niezbędna jest jak najpełniejsza, jak największa i najdokładniejsza baza przykładowych przypadków chorobowych – umożliwiających wytrenowanie systemu oraz jego późniejsze przetestowanie. Z tego względu konieczne było stworzenie bazy przypadków chorobowych, nazwanej *bazą przykładów*, o własnościach opisanych poniżej:

- zdjęcia – baza ma zawierać zdjęcia w formacie bezstratnym, z odnośnikiem do badania/pacjenta;

- choroby – baza ma zawierać choroby z Minimal Standard Terminology 3.0 (MST 3.0 [5]), zsynchronizowane z bazą ERS i bazą plikową;
- przykłady – baza ma zawierać wszystkie zaznaczenia (przykłady) z określoną chorobą, obrazem i wielokątem zaznaczenia;
- łatwe umieszczenie dodatkowych danych wyjściowych algorytmów rozpoznawania – baza musi być na tyle elastyczna, aby można było łatwo dodać nowe tabele z dodatkowymi danymi przypisanymi do przykładów.

Gotowy schemat EER bazy przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat EER bazy przypadków chorobowych (bazy przykładów)

Fig. 3. *Samples database* – EER scheme

Do umieszczania danych w *bazie przykładów* konieczne było wytworzenie specjalnego importera, integrującego bazę plikową (wynik działania programu *ErsCutter*) oraz *bazę przykładów*. Do tego celu stworzono dedykowane narzędzie *ErsDBImporter*. Może ono zaimportować do *bazy przykładów* definicje chorób, zdjęcia z opisami oraz oznaczenia lekarza wraz z zależnościami między nimi. Program pomija dostępne tylko dla lekarza dane wrażliwe (informacje personalne). Tak przetworzone i przechowywane dane są gotowe do bezpośredniego wykorzystania w budowanym systemie rozpoznawania chorób.

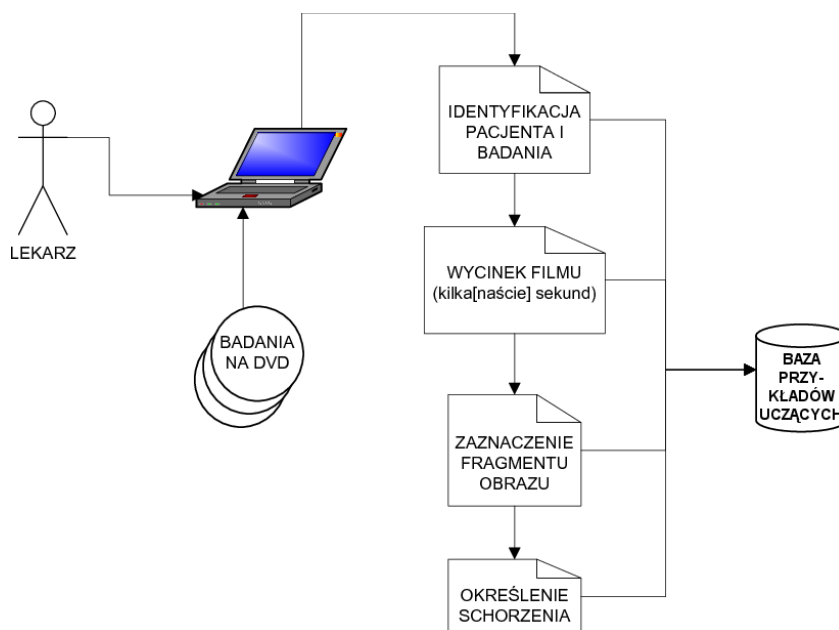
2.3. Gromadzenie danych medycznych do celów systemu wspomagania diagnostyki

Z punktu widzenia budowy bazy danych służącej wspomaganie diagnostyki, większość z danych Kliniki jest nieprzydatna lub wręcz niemożliwa do wykorzystania ze względów prawnych (np. dane personalne pacjentów chronione tajemnicą lekarską) – dostęp do tych wrażliwych danych może mieć jedynie lekarz prowadzący. Ponadto, danych tych jest zbyt dużo, gdyż większość materiałów filmowych nie niesie zróżnicowanych i istotnych informa-

cji diagnostycznych bądź są to dane niepełne – np. filmy mają przypisanego jedynie pacjenta, a nie schorzenie. Opisy badań w bazie ERS są pisane językiem naturalnym, zwykle specjalistycznym żargonem i z częstymi skrótami myślowymi, co praktycznie uniemożliwia ich skuteczne wykorzystanie w systemie komputerowym.

Z powyższych powodów konieczne było odrzucenie danych nieistotnych oraz uzupełnienie ich przez specjalistę w taki sposób, aby można było użyć ich w systemie diagnostycznym. W tym celu stworzono specjalne narzędzie *ErsCutter*, pozwalające lekarzowi wykonać opisane poniżej i przedstawione na rys. 4 czynności:

- powiązanie ze sobą nagrań z badań oraz pacjenta i jego historii choroby z bazy ERS,
- szybkie przeglądanie nagrań wideo z badań,
- oznaczanie na nich „ciekawych” (z medycznego punktu widzenia) fragmentów i ich ekstrakcja do pliku,
- oznaczanie i kopiowanie pojedynczych klatek zawierających konkretne przypadki chorobowe, dokładne zaznaczenie na nich miejsc wystąpienia zmian chorobowych oraz przypisanie im rozpoznania z bazy MST 3.0.

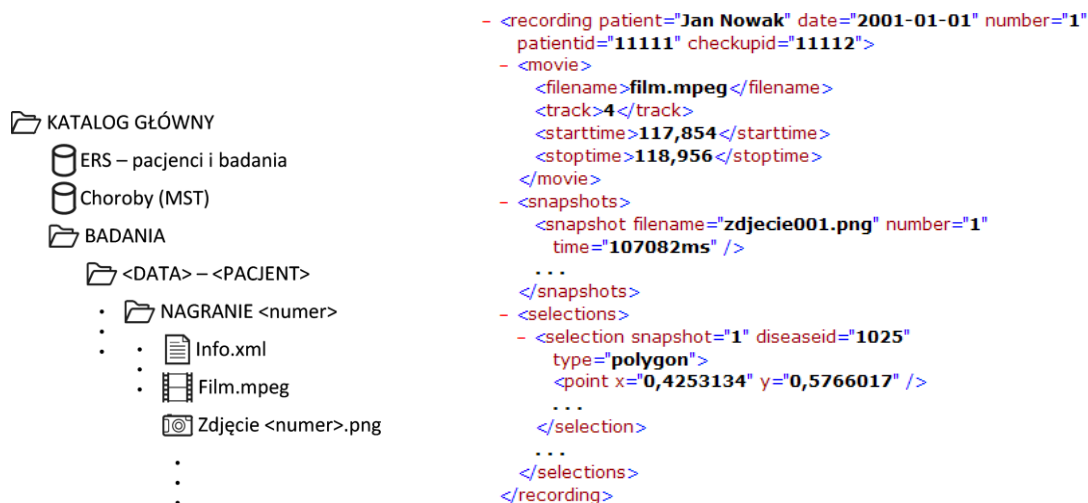


Rys. 4. Przepływ danych w aplikacji *Ers Cutter*

Fig. 4. Data flow in *ErsCutter*

Z punktu widzenia potrzeb systemu wspomagania diagnostyki, najistotniejsze jest wyjście programu – jak najłatwiejsze do użytkowania, łatwo przenośne, niezależne od platformy i modyfikowalne. Z punktu widzenia użytkownika programu (lekarza), istotna jest łatwa edycja już zapisanych danych. Za najlepsze do tego zastosowania uznano połączenie bazy plikowej oraz opisów w formacie XML.

Dane w bazie plikowej przechowywane są w ustandaryzowanej strukturze katalogów, z podziałem na pacjentów, badania i zaznaczone przez lekarza fragmenty filmów. Każdy katalog z nagraniem zawiera opis (jako plik info.xml) rozpoznań dokonanych przez lekarza, plik filmu (MPEG) oraz wybrane przez lekarza pojedyncze klatki z niego (PNG, kompresja bezstratna). Strukturę bazy plikowej oraz plików info.xml przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Struktura bazy plikowej *ErsCutter* oraz plików *info.xml*

Fig. 5. File database structure in *ErsCutter*

Działanie programu *ErsCutter* podobne jest do zwykłego odtwarzacza filmów DVD z wyborem scen. Po wczytaniu płyty automatycznie rozpoczyna się tworzenie miniatur klatek filmu (jednak klatka na 20 sekund filmu). Do każdego filmu z badania lekarz wyszukuje jego opis (z uproszczonej bazy *ERS2005*), a na podstawie miniatur wybiera miejsce w filmie, które warto jest dokładniejszego obejrzenia, po czym automatycznie rozpoczyna się jego odtwarzanie. W trakcie odtwarzania lekarz ma możliwość zatrzymania go i dokonania zaznaczeń miejsc ze zmianami chorobowymi oraz opisanie ich (wybór z listy chorób MST 3.0). Wszystkie dane wprowadzone przez lekarza (film, zdjęcia, zaznaczenia, dane pacjenta i badania) są automatycznie zapisywane w bazie plikowej.

Oprócz przypadków chorobowych konieczne było zgromadzenie porównywalnej liczby przykładów tkanek zdrowych. W tym celu poproszono lekarza o wycięcie z filmów jak najdłuższych fragmentów w całości przedstawiających zdrowe tkanki. Takie fragmenty zostały rozdzielone na poszczególne klatki (przy odrzuceniu klatek identycznych lub bardzo podobnych, rozmazanych, niewyraźnych, z zakłóceniami itp.) i umieszczone w bazie plikowej wraz z oznaczeniem, z jakiego odcinka przewodu pokarmowego pochodzą.

3. Dane medyczne zebrane w *bazie przykładów*

Dane w *bazie przykładów* były na bieżąco uzupełniane przez lekarza w trakcie tworzenia systemu wspomaganie diagnostyki. W tabeli 2 przedstawiono stan bazy na listopad 2011 roku (przykłady, których licznosc wynosiła mniej niż 20, ujęto sumarycznie w ostatnim wierszu).

Tabela 2

Zawartość bazy przykładów – listopad 2011


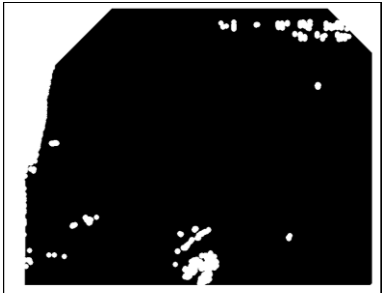
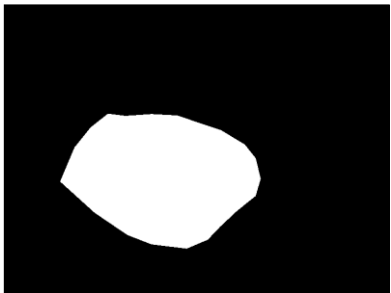


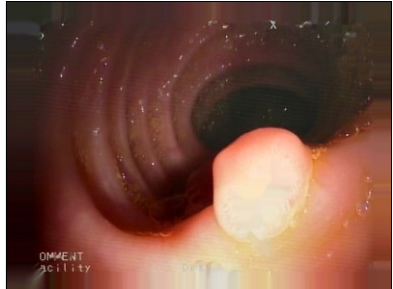

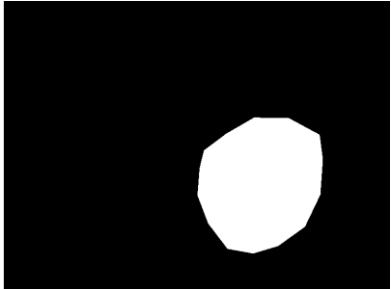


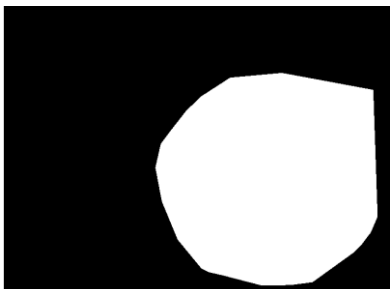
Nazwa	Zaznaczeń	Obrazów	Badań
Zdrowy przełyk	668	668	7
Polip	564	548	204
Zdrowe jelito grube	437	437	12
Zdrowy żołądek	271	271	4
Rak jelita grubego	268	244	81
Wrzód żołądka	188	179	75
Polip(y) żołądka	188	171	59
Aktywne wrzodziejące zapalenie jelita grubego	180	160	32
Żylaki przełyku	166	139	50
Aktywna choroba Leśniowskiego-Crohna	158	122	15
Cały górny odcinek przewodu pokarmowego	138	138	1
Gastropatia wrotna	120	92	39
Krew	117	117	46
Wrzód dwunastnicy	114	100	39
Zapalenie przełyku - inne	103	90	33
Uchyłkowatość jelita grubego	95	76	25
Gastropatia nadżerkowa	90	70	27
Żylaki żołądka	85	70	19
Nieaktywne wrzodziejące zapalenie jelita grubego	84	79	31
Rak żołądka	77	76	28
Angiodysplazja	73	58	12
Rak przełyku	48	46	15
Refluksowe zapalenie przełyku	46	37	17
Zdrowa dwunastnica	40	40	1
Gastropatia rumieniowa	33	31	16
Duodenopatia nadżerkowa	29	20	7
Krwawiący wrzód dwunastnicy	25	25	11
Przełyk Barretta	25	20	8
Zwężenie przełyku	23	23	9
Wrzód odbytnicy	22	22	8
Stan po skleroterapii	22	18	8
Zwężenie odźwiernika	21	21	6
Krwawiący wrzód żołądka	21	20	7
POZOSTAŁE – SUMARYCZNIE	517	484	202
RAZEM	5056	4712	1154

3.1. Przykładowe obrazy z bazy przykładów

W tabeli 3 przedstawiono wybrane obrazy z bazy przykładów. W pierwszej kolumnie – obraz znajdujący się w bazie. W drugiej – oznaczenie obszarów usuniętych przez algorytm anonimizacji (biały kolor oznacza piksele usunięte). Ostatnia kolumna przedstawia wykonane przez lekarza oznaczenia obszarów wystąpienia zmian chorobowych (w przykładach tkanek zdrowych brak jest takowego).

Tabela 3

Przykładowe obrazy z bazy przykładów

		
a) zmiana chorobowa: polip	a) elementy usunięte	a) zaznaczenie lekarza
		brak
b) zdrowe jelito grube	b) elementy usunięte	b) zaznaczenie lekarza
		
c) zmiana chorobowa: polip	c) elementy usunięte	c) zaznaczenie lekarza
		
d) zmiana chorobowa: rak	d) elementy usunięte	d) zaznaczenie lekarza

3.2. Wybór zbiorów testowych dla systemu wspomaganie diagnostyki

Po analizie zawartości bazy danych, w konsultacji z lekarzem, wyodrębniono 11 największych zbiorów chorób i tkanek zdrowych, które mogłyby posłużyć w systemie wspomaganie diagnostyki jako przykłady testowe. Przedstawiono je w tabeli 4.

Tabela 4

Zbiory testowe				
	Opis	Zaznaczeń	Obrazów	Badań
Dolny odcinek przewodu pokarmowego	Zdrowe jelito grube	437	437	12
	Choroba Leśniowskiego-Crohna	173	137	23
	Polipy jelita grubego	580	563	210
	Rak jelita grubego	268	244	81
	Wrzody jelita grubego	299	273	78
	Zapalenie jelita grubego	208	186	40
Górny odcinek przewodu pokarmowego	Zdrowy GOPP	1117	1117	13
	Polipy w GOPP	220	203	73
	Wrzody w GOPP	366	340	141
	Żylaki w GOPP	251	209	69
	Rak w GOPP	143	140	47

4. Zastosowanie praktyczne

Równoległe do procesu budowania powyższej bazy danych tworzono wspomniany system wspomaganie diagnostyki chorób przewodu pokarmowego. System ten oparto na algorytmach sztucznej inteligencji, m.in. takich jak zaproponował Kodogiannis [2] czy Li [6]. W miarę powiększania zbioru chorób i liczby obrazów w bazie danych, prowadzono badania nad uzyskaniem jak najwyższej możliwej skuteczności systemu w rozpoznawaniu stanów normalnych oraz patologicznych (chorobowych).

Podczas testów skuteczności systemu na zgromadzonych w *bazie przykładów* obrazach osiągnięto bardzo obiecujące wyniki w rozpoznawaniu tkanki zdrowej, sięgające nawet 95 – 99% (zarówno czułość, jak i swoistość). Zadaniem znacznie trudniejszym okazało się rozróżnianie chorób między sobą – skuteczność żadnego zastosowanego algorytmu nie przekraczała 80%. Mimo tego, wysokie wyniki osiągnięte w identyfikacji stanu patologicznego rodują nadzieję na późniejsze wykorzystanie w rzeczywistych systemach wspomaganie diagnostyki układu pokarmowego. W [7] zawarty jest szczegółowy opis zastosowanych algorytmów rozpoznawania chorób, przeprowadzonych testów oraz uzyskanych wyników.

Badania zostały dofinansowane w ramach projektu POIG.02.03.03-00-008/08, zatytułowanego: „MAYDAY EURO 2012: Superkomputerowa platforma kontekstowej analizy strumieni danych multimedialnych do identyfikacji wyspecyfikowanych obiektów lub niebez-

piecznych zdarzeń”. Projekt dofinansowany przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego oraz z budżetu Państwa Polskiego.

BIBLIOGRAFIA

1. Karargyris A., Bourbakis N.: Wireless capsule endoscopy and endoscopic imaging: a survey on various methodologies presented. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, Vol. 29(1), 2010, s. 72÷83.
2. Kodogiannis V. S., Boulougoura M.: An Adaptive Neurofuzzy Approach for the Diagnosis in Wireless Capsule Endoscopy Imaging. *International Journal of Information Technology*, Vol. 13, No. 1, 2007.
3. Vilarino F., Spyridonos P., Pujol O., Vitria J., Radeva P.: Automatic detection of intestinal juices in wireless capsule video endoscopy. *Proc. 18th Int. Conf. Pattern Recognition*, Vol. 4, Universitat Autònoma de Barcelona, Spain 2006, s. 719÷722.
4. Krawczyk H., Betlej L., Pielaszkiewicz T., Rutkowski Sz.: Design problems of endoscopy recommendation system. *J. of Medical Informatic Technologies*, 5:IT3 – IT11, 2000.
5. Minimal Standard Terminology for gastrointestinal endoscopy. *Organization Mondiale Endoscopia Digestive*, www.worldendo.org/assets/downloads/pdf/resources/mst/mst30.pdf.
6. Li B., Meng M.: Small Bowel Tumor Detection for Wireless Capsule Endoscopy Images Using Textural Features and Support Vector Machine. *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
7. Cychnerski J.: Artificial intelligence support for disease detection in wireless capsule endoscopy images of human large bowel. *5th International Academic Conference of Students, Ph.D. Students and Young Scientists Computer Science & Engineering*, 2011.

Wpłynęło do Redakcji 23 stycznia 2012 r.

Abstract

A brief description of the process of diagnosing gastrointestinal diseases is presented in the introduction of the article. Existing techniques for supporting the diagnosing process by automatic video analysis are discussed. It is stated, that current research results and commercial applications had not been based on big and diversified data sets, as they are concentrated

on single diseases or anomalies [1]. Therefore, the article justifies the need to develop a more general system, like the MedEye application currently developed as part of the Mayday Euro 2012 project.

The next section describes the process of designing and implementing a specialized medical database for the aforementioned system. The process of data acquisition from such sources as the ERS system [4] and DVD archives is described. Further, the structure of the designed database and the tools for filling it with data are presented. The taken approach involves the usage of the ErsCutter application and a file-based database.

The data that was gathered in the database is presented in Section 3. It contains video, images and descriptions of over one thousand cases that have been collected until November 2011. Sets of data suitable for training automatic classifiers have been singled out in Table 4.

Basing on the created database, tests of disease recognition algorithms have been carried out. Their results seem to be very promising, with sensitivity and specificity values reaching up to 95 – 99% in some cases [7].

Adresy

Jan CYCHNERSKI: Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Architektury Systemów Komputerowych, Polska, jan.cychnerski@eti.pg.gda.pl.

Adam BRZESKI: Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Architektury Systemów Komputerowych, Polska, brzeski@eti.pg.gda.pl.

Adam BLOKUS: Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Architektury Systemów Komputerowych, Polska, adam.blokus@eti.pg.gda.pl.

Tomasz DZIUBICH: Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Architektury Systemów Komputerowych, Polska, dziubich@eti.pg.gda.pl.

Mateusz JĘDRZEJEWSKI: Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Architektury Systemów Komputerowych, Polska, mateusz.jedrzejewski@eti.pg.gda.pl.