

Marek R. Ogiela , Ryszard Tadeusiewicz**

METODY SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W ANALIZIE MORFOLOGII WYBRANYCH NARZĄDÓW NA OBRAZACH MEDYCZNYCH**

1. Wstęp

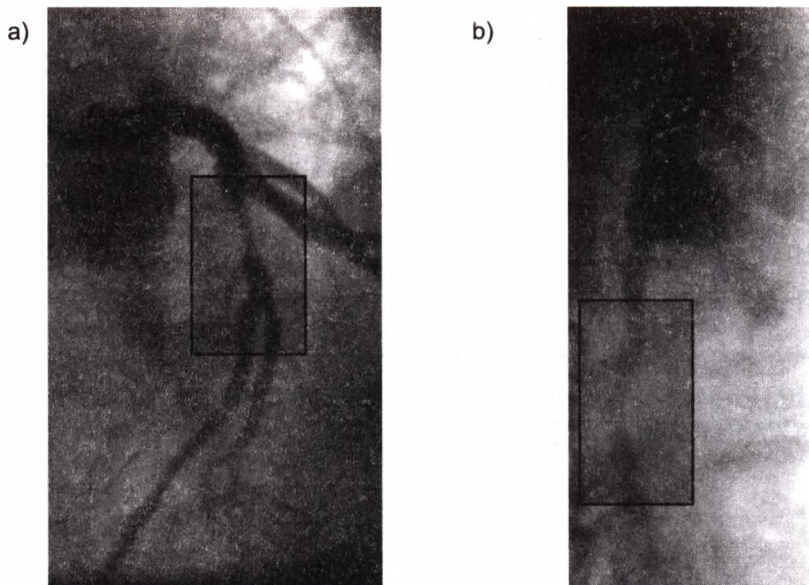
Tematem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania ciągowych i drzewowych metod z grupy syntaktycznych metod rozpoznawania obrazów do opisu zmian morfologicznych oraz analizy cech kształtów wybranych narządów klatki piersiowej i jamy brzusznej, uwidocznionych na obrazach rentgenowskich. W szczególności przedstawiono nowe metody komputerowego wspomaganie diagnostyki i rozpoznawania morfologicznych zmian naczyń wieńcowych oraz analizy kształtów górnych odcinków dróg moczowych tj. moczowodów i miedniczek nerkowych.

Rozpoznawanie patologicznych zmian w przypadku analizy obrazów koronarograficznych tętnic wieńcowych jest niezwykle ważne z punktu widzenia prawidłowej diagnostyki stanów niedokrwienia serca, wywołanych zmianami miażdżycowymi tych naczyń, a powodujących przewężenia światła tętnic, które w konsekwencji prowadzą do choroby niedokrwiennej serca. Choroba taka może objawić się w postaci: dławicy stabilnej lub niestabilnej bądź zawału mięśnia sercowego. Celem analizy koronarogramów jest zatem wykrywanie przewężeń światła tętnic wieńcowych, a w szczególności tzw. zwężeń istotnych, które przekraczają 50% i występują w pniu lewej tętnicy wieńcowej oraz zwężeń ponad 70% w pozostałych odcinkach naczyń wieńcowych. O znaczeniu prawidłowego rozpoznania takich zmian może świadczyć chociażby fakt, że zamknięcie światła jednej z gałęzi lewej tętnicy wieńcowej, czyli np. tętnicy międzykomorowej przedniej może stanowić zagrożenie dla życia, gdyż prowadzi do niedotlenienia lub martwicy ponad 50% mięśnia lewej komory serca. Przykładowy obraz tętnicy wieńcowej z przewężeniami został przedstawiony na rysunku 1a.

W przypadku analizy radiogramów nerek głównym celem jest rozpoznanie lokalnych przewężeń lub poszerzeń górnych odcinków moczowodów (rys. 1b) oraz próba określenia prawidłowości morfologii miedniczki i kielichów nerkowych.

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Praca realizowana w ramach badań własnych AGH nr 10.10.120.39



Rys. 1. Obrazy: a) koronograficzny tętnicy wieńcowej z przewężeniem; b) RTG miedniczki nerkowej lewej z przewężonym moczowodem

Symptomy takie mogą wskazywać na istnienie kamieni nerkowych lub złożeń powodujących niedrożność dróg moczowych i prowadzących do takich schorzeń jak: ostra mocznica pozanerkowa (mechaniczna) czy wodonercze.

W celu prawidłowego rozpoznania wymienionych zmian oraz określenia stopnia ich zaawansowania zaproponowane zostały: bezkontekstowa gramatyka atrybutowana typu LR(1) oraz gramatyka drzewowa typu EDT [11]. Gramatyki takie pozwalają w sposób niezwykle efektywny na wykrywanie tego rodzaju nieprawidłowości zarówno w przypadku analizy obrazów koronarograficznych, jak i urogramów. Metody te wywodzą się z lingwistyki matematycznej i zostały zastosowane do wykrywania zmian widocznych na wykresach szerokości poszczególnych struktur. Wykresy takie otrzymano dzięki zastosowaniu na etapie wstępnego przetwarzania obrazów transformacji prostującej, pozwalającej otrzymać wykresy wyprostowanych struktur z zachowaniem występujących w nich zmian morfologicznych.

Główną zaletą zastosowania gramatyk bezkontekstowych jest możliwość wykrywania na uzyskanych profilach szerokości zarówno przewężeń koncentrycznych – objawiających się na przekroju poprzecznym jednostajnym przewężeniem całego światła, jak i przewężeń ekscentrycznych – występujących tylko na jednej ze ścian naczynia. Własność ta jest szczególnie przydatna z punktu widzenia diagnostyki tętnic wieńcowych, gdyż pozwala na rozpoznanie: czy wykryty symptom jest charakterystyczny dla dławicy stabilnej w przypadku rozpoznania przewężenia koncentrycznego, czy też dławicy niestabilnej w przypadku wykrycia przewężenia ekscentrycznego.

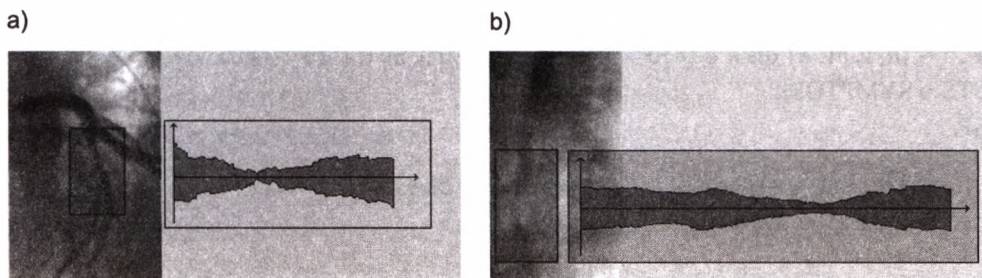
2. Operacje wstępnego przetwarzania obrazów medycznych

Przed przystąpieniem do właściwego rozpoznawania poszukiwanych zmian konieczne jest zastosowanie sekwencji operacji wchodzących w skład etapu wstępnego przetwarzania obrazów. Celem takiej analizy będzie uzyskanie wykresów szerokości, uwidaczniających patologiczne zmiany chorobowe występujące w tych strukturach.

W trakcie wstępnej analizy badanych obrazów wykonywane są poniższe operacje.

- Segmentacja i szkieletyzacja badanych struktur. Do segmentacji i wykrywania krawędzi może zostać użyta metoda subtrakcyjnego łączenia obrazów oryginalnych z obrazami poddanymi filtracji górnoprzepustowej. Następnie wynik substrakcji poddawany jest metodom analizy gradientowej, służącej do wykrywania krawędzi [2]. Innym możliwym podejściem jest wykorzystanie do segmentacji specjalistycznego algorytmu progowania opisanego w pracy [3], zaproponowanego do binaryzacji przewodów trzustkowych na obrazach ERCP.
- Usunięcie potencjalnych rozgałęzień, mogących wystąpić w szkielecie badanej struktury [4].
- Zastosowanie transformacji prostującej przekształcającej zewnętrzny kontur badanej struktury w przestrzeni dwuwymiarowej do postaci jednowymiarowego wykresu, przedstawiającego profil wyprostowanej tętnicy wieńcowej lub moczowodu. Szczegóły działania i zalety wynikające z zastosowania tej transformacji przedstawione zostały w pracy [5], a otrzymane za jej pomocą wykresy stanowią punkt wyjścia do rozpoznawania zmian morfologicznych przy użyciu proponowanych przez autorów gramatyk bezkontekstowych.

Przykładowe rezultaty otrzymywania wyprostowanych wykresów szerokości dla rozważanych w tej pracy obrazów wraz z występującymi na nich zmianami morfologicznymi przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wykresy przedstawiające profile szerokości: a) tętnicy wieńcowej z przewężeniem; b) moczowodu

3. Syntaktyczna analiza i wykrywanie przewężeń tętnic wieńcowych

Wykrywanie poszukiwanych zmian występujących w postaci różnego rodzaju przewężeń światła tętnic wieńcowych przeprowadzone zostało na wykresach szerokości, uzyskanych w trakcie wstępnego przetwarzania angiogramów wieńcowych. Wykresy te przedstawiają wyprostowane profile badanych naczyń wieńcowych. Do właściwej analizy i rozpoznawania patologicznych przewężeń zaproponowana została gramatyka atrybutowana, pozwalająca zdefiniować wszystkie potencjalne kształty oczekiwanych zmian morfologicznych. Definicję tej klasy gramatyk, a także prezentację możliwości ich zastosowania w analizie i rozpoznawaniu patologicznych zmian chorobowych innych narządów, zwłaszcza jamy brzusznej, można znaleźć w pracach [7, 8, 9].

W celu prawidłowego określenia składowych pierwotnych w obrazie, które w sposób pełny pozwolą na utworzenie lingwistycznego opisu poszukiwanych zmian, uzyskane wykresy profili tętnic wieńcowych poddawane są liniowej aproksymacji metodą wcześniej wypróbowaną przez autorów [4], a znaną w literaturze pod nazwą *Fast Polygonal Approximation*. W rezultacie takiej operacji, każdy z badanych wykresów otrzymuje reprezentację w postaci ciągu odcinków aproksymujących, które następnie są przyporządkowywane kolejnym symbolom terminalnym tworzącym nową reprezentację lingwistyczną. Reprezentacja ta stanowi informację wejściową do analizatora składniowego, bazującego na opracowanej przez autorów gramatyce. Analizator taki stanowi właściwy program rozpoznający poszukiwane zmiany światła tętnic wieńcowych.

W celu rozpoznania różnego rodzaju kształtów przewężeń zaproponowana została następująca gramatyka atrybutowana

$$G_{CA} = (V_N, V_T, SP, STS),$$

gdzie:

- V_N – zbiór symboli nieterminalnych,
- V_T – zbiór symboli terminalnych,
- SP – zbiór produkcji,
- STS – symbol startowy gramatyki.

$$V_N = \{\text{SYMPTOM}, \text{STENOSIS}, H, V, NV\},$$

$$V_T = \{h, v, nv, \lambda\} \text{ dla } h \in (-10^\circ, 10^\circ), v \in (11^\circ, 90^\circ), nv \in (-11^\circ, -90^\circ), \lambda - \text{symbol pusty}$$

$$\text{STS} = \text{SYMPTOM}.$$

SP:

1. SYMPTOM \rightarrow STENOSIS
2. STENOSIS $\rightarrow NVHV$,
3. $V \rightarrow v \mid v V$
4. $NV \rightarrow nv \mid nv NV$
5. $H \rightarrow h H \mid \lambda$

Symptom = Stenosis,

$$w_{\text{sym}} := w_{\text{sym}} + w_v; h_{\text{sym}} := h_{\text{sym}} + h_v,$$

$$w_{\text{sym}} := w_{\text{sym}} + w_{nv}; h_{\text{sym}} := h_{\text{sym}} + h_{nv},$$

$$w_{\text{sym}} := w_{\text{sym}} + w_h; h_{\text{sym}} := h_{\text{sym}} + h_h.$$

W przedstawionej gramatyce druga z zaproponowanych produkcji definiuje potencjalne kształty przewężeń światła naczyń wieńcowych. Kolejne kroki wyprowadzające w tej gramatyce określoną formułę lingwistyczną określają części: zstępującą i wstępującą analizowanego przewężenia, a ostatnia z produkcji definiuje odcinek poziomy mogący wystąpić pomiędzy tymi częściami. Zmienne semantyczne h_e i w_e określają wysokość i długość odcinka terminalnego o etykiecie e . Mają one pomocnicze znaczenie przy konkretyzowaniu diagnozy i prezentowaniu jej lekarzowi. Znaczna prostota przedstawionej gramatyki wynika z niewielkiej liczby zmian morfologicznych, jakie ta gramatyka opisuje, ale jest też dowodem dużej mocy generacyjnej gramatyk bezkontekstowych w zastosowaniu do analizy i rozpoznawania obrazów medycznych. Wykorzystanie atrybutów ma na celu wyznaczenie parametrów numerycznych wykrytego przewężenia, co pozwoli na określenie procentowego stopnia zwężenia światła tętnicy wieńcowej, istotnego dla prognozy stanu pacjenta.

4. Syntaktyczna analiza i wykrywanie przewężeń moczowodów

Wykrywanie zmian morfologicznych w postaci przewężeń i poszerzeń moczowodów przeprowadzono z wykorzystaniem następującej gramatyki atrybutowanej

$$G_u = (V_N, V_T, SP, STS),$$

gdzie:

- V_N – zbiór symboli nieterminalnych,
- V_T – zbiór symboli terminalnych,
- SP – zbiór produkcji,
- STS – symbol startowy gramatyki.

$$V_N = \{\text{SYMPTOM, STENOSIS, DILATATION, } H, V, NV\},$$

$$V_T = \{h, v, nv\} \text{ dla } h \in (-8^\circ, 8^\circ), v \in (9^\circ, 180^\circ), nv \in (-9^\circ, -180^\circ),$$

$$STS = \text{SYMPTOM.}$$

SP:

- | | |
|--|---|
| 1) SYMPTOM \rightarrow STENOSIS | Symptom = Stenosis, |
| 2) SYMPTOM \rightarrow DILATATION | Symptom = Dilatation, |
| 3) STENOSIS $\rightarrow NV H V \mid NV V \mid NV H,$ | |
| 4) DILATATION $\rightarrow V H NV \mid V NV \mid V H,$ | |
| 5) $V \rightarrow v \mid v V$ | $w_{\text{sym}} := w_{\text{sym}} + w_v; \quad h_{\text{sym}} := h_{\text{sym}} + h_v,$ |
| 6) $NV \rightarrow nv \mid nv NV$ | $w_{\text{sym}} := w_{\text{sym}} + w_{nv}; \quad h_{\text{sym}} := h_{\text{sym}} + h_{nv},$ |
| 7) $H \rightarrow h \mid h H$ | $w_{\text{sym}} := w_{\text{sym}} + w_h; \quad h_{\text{sym}} := h_{\text{sym}} + h_h.$ |

Gramatyka ta pozwala wykrywać różnej postaci przewężenia i poszerzenia, mogące charakteryzować różne jednostki chorobowe. Wykorzystanie atrybutów – podobnie, jak wcześniej – pozwala na wyznaczenie numerycznych parametrów wykrytej zmiany morfologicznej.

5. Zastosowanie gramatyk drzewowych do analizy kształtu miedniczek nerkowych

Ponieważ metody drzewowe syntaktycznego rozpoznawania obrazów generalnie służą do analizy nieco bardziej złożonych obiektów, dlatego w przypadku analizy nefrogramów wykorzystane zostały do sprawdzania prawidłowości morfologii miedniczki i kielichów nerkowych. Pomimo tego, że struktury te – nawet w warunkach prawidłowych – charakteryzują się niezwykle zmiennością kształtów jest jednak możliwe wyróżnienie pewnych cech wspólnych, charakteryzujących wszystkie prawidłowe takie struktury. Cechy te to liczebność występujących w zatoce nerkowej kielichów mniejszych i większych. Do prawidłowej miedniczki nerkowej uchodzą zazwyczaj tylko 2 lub 3 kielichy większe, a te z kolei są utworzone przez uchodzące do nich kielichy mniejsze, występujące w liczbie od 8 do 10. Kielichy mniejsze są zakończone wklęsłymi brodawkami nerkowymi stanowiącymi wierzchołki piramid nerkowych. Do analizy takich struktur zaproponowana zostanie ekspansywna gramatyka drzewowa, zdefiniowana w celu analizy morfologii szkieletów badanych miedniczek i kielichów nerkowych. Do szkieletyzacji wykorzystano algorytm szkieletyzacji Pavlidisa. Otrzymany szkielet jest poddawany analizie w ten sposób, że pierwszy punkt rozgałęzienia szkieletu stanowi początek szkieletów kielichów większych, zatem określenie liczby odgałęzień rozpoczynających się w tym punkcie pozwala na wyznaczenie liczby kielichów większych. Wyznaczenie w każdym z kielichów większych odgałęzień kolejnego rzędu pozwala na określenie liczby wychodzących z niego kielichów mniejszych.

W kielichach mniejszych analiza punktów końcowych w szkielecie pozwala na stwierdzenie, czy rozgałęziają się one w dalszym stopniu, co w tym momencie świadczy o tym, że brodawka nerkowa nie jest wklęsła do wnętrza kielicha, lecz ma kształt wypukły w stronę piramidy nerkowej. Sytuacja taka występuje np. w przypadku wodonercza lub może być spowodowana wystąpieniem cyst w przypadku procesów nowotworowych. Gramatyka drzewowa opisująca prawidłowe szkielety miedniczek i kielichów nerkowych zostanie zdefiniowana w ten sposób, że korzeń drzewa będzie określony położeniem punktu rozgałęzienia kielichów większych, zaś jego następniki zostaną wyznaczone przez punkty odgałęzienia drugiego stopnia, czyli początki kielichów mniejszych. Ostatnia warstwa wierzchołków jest zdefiniowana przez punkty odgałęzień 3. stopnia, czyli odgałęzienia występujące w przypadku, gdy brodawka nerkowa ma kształt wklęsły.

Do określenia składowych pierwotnych wykorzystywanych w gramatyce drzewowej można zastosować algorytm aproksymacji odgałęzień szkieletowych w miedniczce i kielichach nerkowych pozwalający utożsamiać każde odgałęzienie z pojedynczym odcinkiem, którego końce wyznaczone są przez końce aproksymowanego odgałęzienia. Następnie każdemu z wyznaczonych odcinków zostają przyporządkowane krawędziowe etykiety terminalne w zależności od kąta jego nachylenia.

Do rozpoznawania zmian morfologicznych występujących w miedniczkach nerkowych zaproponowano następującą gramatykę drzewową

$$G_{edt} = (\Sigma, \Gamma, r, P, Z),$$

gdzie:

- $\Sigma = \Sigma_T \cup \Sigma_N$ – zbiór terminalnych i nieterminalnych etykiet wierzchołkowych,
- r – funkcja przyporządkowująca wierzchołkowi drzewa liczbę jego następników,
- Z – skończony zbiór drzew startowych,
- Γ – zbiór etykiet krawędziowych,
- P – zbiór produkcji.

$$\Sigma_T = \{\text{pelvis, calyx_b, calyx_s, l}\},$$

$$\Sigma_N = \{\text{RENAL_PELVIS, B, C}\},$$

$$\Gamma = \{x, y, z\} \text{ dla } y \in (-30^\circ, 30^\circ), x \in [30^\circ, 180^\circ), z \in [-30^\circ, -180^\circ),$$

$$Z = \{\text{RENAL_PELVIS}\}.$$

P:

1. RENAL_PELVIS \rightarrow pelvis (xB yB zB),
2. RENAL_PELVIS \rightarrow pelvis (xB yB),
3. RENAL_PELVIS \rightarrow pelvis (xB zB),
4. RENAL_PELVIS \rightarrow pelvis (yB zB),
5. B \rightarrow calyx_b (xC yC zC),
6. B \rightarrow calyx_b (xC yC),
7. B \rightarrow calyx_b (xC zC),
8. B \rightarrow calyx_b (yC zC),
9. C \rightarrow calyx_s (xl),
10. C \rightarrow calyx_s (yl),
11. C \rightarrow calyx_s (zl),
12. C \rightarrow calyx_s (xl yl),
13. C \rightarrow calyx_s (xl zl),
14. C \rightarrow calyx_s (yl zl).

Pierwsza grupa produkcji definiuje różne postacie prawidłowej miedniczki nerkowej, tzn. mogącej posiadać dwa lub trzy kielichy większe. Kolejne produkcje definiują postać kielichów większych, utworzonych z 2 lub większej liczby kielichów mniejszych. Ostatnia grupa definiuje postać prawidłowej brodawki nerkowej, która podczas szkieletyzacji przyjmuje formę widelcowatą, czyli kończy się krótkimi odgałęzieniami powstającymi tylko wtedy,

gdy jest ona wklęsła do wnętrza kielicha mniejszego. Postacie wypukłe są podczas szkieletyzacji ścienne do linii bez odgałęzień końcowych, co wynika z własności algorytmów szkieletyzacji.

6. Rezultaty rozpoznawania otrzymane przy użyciu gramatyki bezkontekstowej

Dzięki zastosowaniu przedstawionych w pracy gramatyk bezkontekstowych możliwe jest niezwykle dokładne wykrywanie różnego rodzaju nieprawidłowości w postaci przewężeń lub poszerzeń badanych struktur.

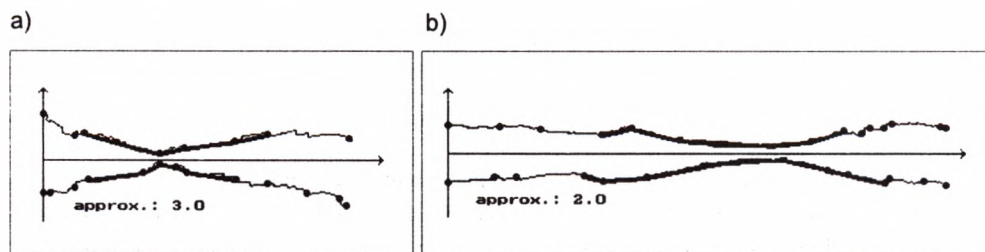
W przypadku analizy syntaktycznej z wykorzystaniem takich gramatyk mamy do czynienia z sytuacją, w której program rozpoznający dostarcza praktycznie pełnej informacji dotyczącej morfologicznych nieprawidłowości badanych tętnic i moczowodów.

Wykrywanie nieprawidłowości występujących w zbiorze danych testowych zostało przeprowadzone przez analizatory składniowe, wygenerowane na podstawie formalnego opisu gramatyk podanych w tej pracy przy użyciu kompilatora gramatyk YACC. Utworzony w ten sposób program analizujący poddany został szeregowi prób, których celem było rozpoznanie przewężeń tętnic wieńcowych na kilku reprezentatywnie wybranych obrazach koronarograficznych. Analizę zmian morfologicznych w górnych drogach moczowych przeprowadzono w oparciu o zbiór kilkunastu urogramów i rentgenogramów nerek, zawierających obrazy ukazujące zarówno wrodzone zmiany w morfologii miedniczek i moczowodów, jak i zmiany nabyte świadczące o istnieniu procesów chorobowych.

Dla przedstawionej gramatyki drzewowej skonstruowano automat z wyjściem nad zbiorem etykiet wierzchołkowych, który służy do analizy składniowej języków drzewowych definiowanych przez gramatyki tego typu.

Uzyskane dzięki zastosowaniu opisanych metod rezultaty potwierdziły ogromną przydatność metod syntaktycznych w diagnostyce choroby niedokrwiennej serca.

Na rysunku 3 przedstawiono przykład rozpoznania poszukiwanych zmian dla rozwiązanych w pracy obrazów tętnic wieńcowych (rys. 3a) i obrazu dróg moczowych (rys. 3b). Rozpoznane symptomy oznaczone zostały linią pogrubioną.



Rys. 3. Rezultaty rozpoznawania symptomów chorobowych z wykorzystaniem syntaktycznych metod rozpoznawania obrazów w przypadku: a) tętnicy wieńcowej; b) górnego odcinka moczowodu

7. Wnioski

Przeprowadzone przez autorów badania nad możliwościami rozpoznawania patologicznych zmian morfologii tętnic wieńcowych i miedniczek nerkowych z początkowymi odcinkami moczowodów potwierdziły uniwersalność zastosowania metod lingwistyki matematycznej w rozpoznawaniu i analizie morfologicznych zmian na obrazach medycznych. Syntaktyczne metody rozpoznawania obrazów, a w szczególności bezkontekstowe gramatyki atrybutowane, mogą stanowić dodatkowe narzędzie wykorzystywane do wspomagania wczesnej diagnostyki chorób narządów klatki piersiowej i jamy brzusznej. Wysoka efektywność prezentowanych algorytmów stwarza również z tych metod niezwykle użyteczne – z praktycznego punktu widzenia – narzędzie w dziedzinie inżynierii wiedzy, pozwalające na wydobywanie i rozpoznawanie istotnych cech diagnostycznych w analizie obrazów medycznych.

Jak dotychczas, we wcześniejszych pracach autorów, metody te były wykorzystywane do wykrywania zmian morfologicznych w głównych przewodach trzustkowych [6, 7]. Niniejsza praca dowodzi, że podane metody mają zastosowanie także w kardiologii i nefrologii. Jednak z uwagi na niewielki rozmiar danych testowych metody te są wciąż udoskonalane, a konieczność prowadzenia dalszych badań dotyczy głównie rozpoznawania patologii miedniczek nerkowych analizowanych za pomocą gramatyk drzewowych. Uzyskane dotychczas rezultaty takiej analizy przeprowadzone na kilku reprezentatywnych obrazach są bardzo obiecujące i zapowiadają wysoką skuteczność rozpoznania przy analizie dużej liczby danych testowych.

Możliwości szerokiego wykorzystania tego rodzaju metod w analizie obrazów medycznych sprawiają, że mogą one również odgrywać ważną rolę w systemach archiwizacji i przesyłania obrazów medycznych (*Picture Archiving and Communication Systems – PACS*), zwłaszcza jako moduły wspomagające rozpoznawanie i diagnostykę zmian chorobowych. Metody te mogą być również wykorzystywane do indeksacji i archiwizacji obrazów uwidaczniających poszczególne jednostki chorobowe w multimedialnych lub wysoko wyspecjalizowanych medycznych bazach danych.

Literatura

- [1] Khan M.G.: *Heart Disease Diagnosis and Therapy*. Baltimore, Williams & Wilkins 1996
- [2] Mancini G.B.J. (Eds): *Clinical Applications of Cardiac Digital Angiography*. New York, Raven Press 1988
- [3] Mikrut Z. et al.: *A Method of Linear Star-Sections Applied for Object Separation in ERCP Images*. Proceedings of International Conference on Image Processing, Lausanne, 1996, 363–366
- [4] Ogiela M.R., Tadeusiewicz R.: *Computer Recognition of X-ray Images for Medical Diagnosis*. Lecture Notes of the ICB Seminars; 2nd Japan-Polish Seminar on Contribution of Electrical and Electronic Engineering to Biology and Medicine, Togawa T., & Nałęcz M., (Eds), Warsaw, International Center of Biocybernetics, 1998, 263–282
- [5] Ogiela M.R.: *Geometric transformations in the shape analysis of selected biomedical structures*. Image Processing & Communications, 4, No. 3–4, 1998, 27–36

- [6] Ogiela M.R., Tadeusiewicz R.: *Syntactic Analysis and Languages of Shape Feature Description in Computer Aided Diagnosis and Recognition of Cancerous and Inflammatory Lesions of Organs in Selected X-Ray Images*. Journal of Digital Imaging, 12, No. 2, Suppl 1, 1999, 4–27
- [7] Ogiela M.R.: *The Applications of Syntactic Pattern Recognition to the Recognition and Analysis of Abdominal Lesions in Picture Archiving and Communications System (PACS)*. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, Blanc-Talon J. & Popescu D. (Eds), Windsor, The International Institute for Advanced Studies in Systems Research and Cybernetics, 1999, 56–61
- [8] Ogiela M.R., Tadeusiewicz R.: *Syntactic Methods of Shape Feature Description and Its Application in Analysis of Medical Images, in Visual Data Exploration and Analysis VII*. Robert F. Erbacher, Philip C. Chen, Jonathan C. Roberts, Craig M. Wittenbrink (Eds), Proceedings of SPIE, San Jose, USA, 2000, Photonics West-Electronic Imaging 2000, vol. 3960, 326–333
- [9] Ogiela M.R., Tadeusiewicz R.: *Application of Syntactic Methods of Pattern Recognition for Data Mining and Knowledge Discovery in Medicine in Data Mining and Knowledge Discovery: Theory, Tool, and Technology II*. Dasarathy B.V., (Ed.), Proceedings of SPIE, Orlando, USA, AeroSense 2000, vol. 4057, 2000, 308–318
- [10] Roquebrune J.P.: *96 Synopsis: Special Cardiological Investigations*. Lippincott-Raven, ISBN 0-397-58732-5
- [11] Tadeusiewicz R., Flasiński M.: *Rozpoznawanie obrazów*. Warszawa, PWN 1991
- [12] Taylor G.J.: *Kardiologia w praktyce*. Warszawa, PZWL 1997