

MAREK R. OGIELA*, MIROSŁAW TRZUPEK**

GRAFOWE JĘZYKI OBRAZOWE W ZNACZENIOWYM OPISIE PRZESTRZENNYCH STRUKTUR NACZYŃ WIEŃCOWYCH

W niniejszej pracy zaproponowano sposób stworzenia nowego syntaktyczno – semantycznego opisu znaczeniowego przestrzennych struktur naczyń wieńcowych serca. Dzięki takiemu opisowi możliwe jest dokonywanie merytorycznie ukierunkowanej interpretacji znaczeniowej morfologii poszczególnych odcinków tętnic wieńcowych, co pozwala na szybką oraz automatyczną identyfikację istotnych miejsc przewężeń ich światła. W tym celu wykorzystane zostały grafowe języki obrazowe, oparte na gramatykach ekspansywnych typu edNLC. Gramatyki takie umożliwiają stworzenie uniwersalnego i informatywnego opisu znaczeniowego przestrzennych struktur naczyń wieńcowych. Wykorzystanie takich opisów semantycznych w zintegrowanych modułach inteligentnych systemów diagnostyki medycznej umożliwia wspomaganie zadań wczesnego wykrywania patologicznych przewężeń tętnic utrudniających przepływ utlenowanej krwi do danego obszaru mięśnia sercowego.

Słowa kluczowe: rozpoznawanie obrazów medycznych, sztuczna inteligencja, diagnostyka chorób serca, inżynieria biomedyczna, rozumienie obrazów

GRAPH IMAGE LANGUAGES IN SEMANTIC DESCRIPTION OF SPATIAL CORONARY ARTERIES STRUCTURE

In this paper has been proposed developing the new syntactic – semantic meaning description of spatial coronary arteries structure. Thanks such description will be possible to make essentially steered semantic interpretation of section coronary arteries morphology, what will allow us fast identification and automatisation of lumen stricture detection. In this aim has been used graph image languages based on the expansive graph grammars of edNLC type, enabling creation the universal and informative meaning description of spatial coronary arteries structure. Application of such semantic description in the integrated modules of intelligent systems medical diagnosis, supporting the early detection stricture which defect the flow of oxidizing blood to given area of cardiac muscle.

Keywords: Medical pattern recognition, artificial intelligence, heart disease diagnosis, bio-medical engineering, image understanding

*Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, mogiela@agh.edu.pl

**Doktorant, Wydział EAIiE, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, mtrzupek@agh.edu.pl

1. Wstęp

Zaopatrzenie mięśnia sercowego w tlen i środki odżywcze oraz usuwanie końcowych produktów metabolizmu i dwutlenku węgla odbywa się za pośrednictwem krążenia wieńcowego [8]. Poszczególne odgałęzienia tętnic wieńcowych ułożone są na powierzchni serca wężykowato, aby nie spowodować wzrostu oporów przepływu podczas fazy skurczu i rozkurczu oraz unaczyniają określone jego obszary, oddając tylko niewielkie gałązki do aorty i pnia płucnego [15].

Na powierzchni przeponowej serca możemy wyróżnić trzy zasadnicze typy przebiegu tętnic wieńcowych, przechodzące bez widocznej granicy jeden w drugi. Typ pierwszy występuje przeciętnie w około 60–70% przypadkach i charakteryzuje się zrównoważonym rozkładem tętnic, z których żadna nie jest dominująca. W typie drugim gałąź okalająca tętnicy wieńcowej lewej jest silnie uwsteczniiona, natomiast tętnica wieńcowa prawa jest bardzo rozwinięta i ona głównie zaopatruje powierzchnię tylną komory lewej. Taki stan występuje średnio w granicach 20–24%, ale mogą wystąpić różne formy przejściowe. W typie trzecim, występującym w około 10–14% przypadkach, tętnica wieńcowa prawa jest mocno osłabiona, a tylną powierzchnię komory prawej unaczynia głównie tętnica wieńcowa lewa, której dodatkowo gałąź międzykomorowa przednia może zachodzić na powierzchnię przeponową [2].

W przypadku powierzchni mostkowo-żebrowej nie spotyka się znaczących odmian tętnic wieńcowych. Wyjątkiem jest zmienność gałęzi międzykomorowej przedniej, która może dzielić się na dwie gałęzie podobnej grubości i to zarówno w początkowej, jak i w końcowej fazie przebiegu [2].

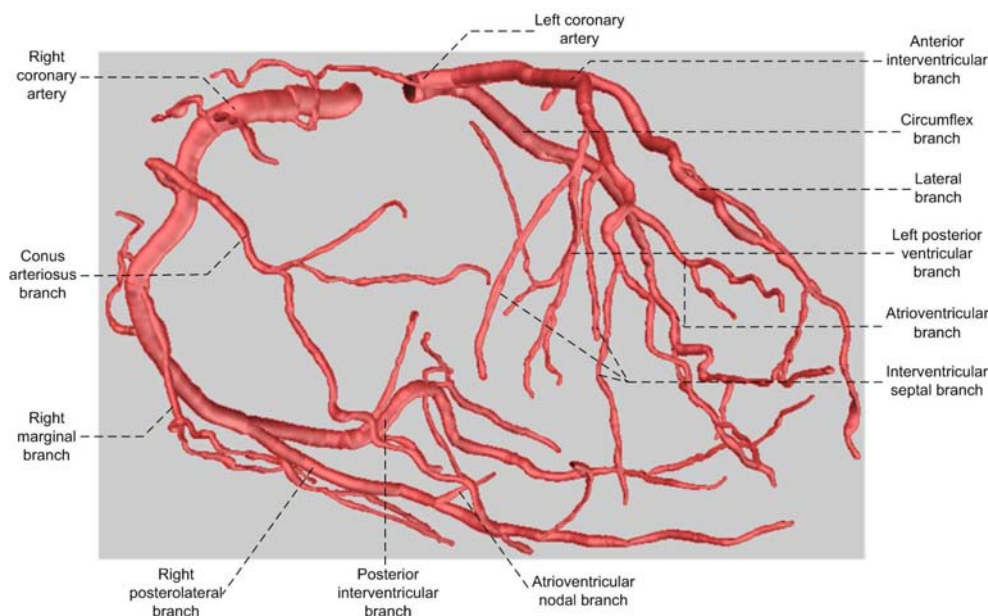
Choroba wieńcowa i jej następstwo – dusznica bolesna spowodowane są z reguły rozwojem zmian miażdżycowych, czego konsekwencją jest zmniejszanie się światła tętnic. Powoduje to upośledzenie przepływu utlenowanej krwi do danego obszaru mięśnia serca. Jeśli jedna z większych gałęzi naczyń wieńcowych zostanie nagle zamknięta, spowoduje to całkowite zatrzymanie dopływu odżywczej krwi i dochodzi do zawału mięśnia sercowego, który w polu zaopatrzenia odpowiedniej tętnicy jest odcięty od prądu krwi, ulegając martwicy. Jeżeli natomiast utrudnienie przepływu jest mniejsze lub mniej nagłe, wówczas występować mogą przejściowe zaburzenia czynności serca, związane zwykle z silnymi bólami (dusznica bolesna), ale mogą nie być śmiertelne [2, 15]. Dusznica bolesna może mieć postać stabilną, charakteryzującą się atakami występującymi z przewidywalną regularnością, zwykle po napięciu fizycznym lub stresie oraz odmiana drugą – dusznica bolesna niestabilna, mogąca mieć nieprzewidywalny przebieg. Cechuje się powtarzającymi i często nieoczekiwanymi bólami, które mogą wystąpić przy bardzo małym wysiłku, a nawet w chwilach odpoczynku, co wymaga szczególnie wnikliwego leczenia.

Na przestrzeni ostatnich lat, dzięki gwałtownemu rozwojowi technologii informatycznych nastąpił znaczący postęp w obszarze pozyskiwania, wizualizacji oraz analizy danych diagnostycznych. Zwiększenie szybkości analizy dużej ilości danych i precyzji w ich interpretacji zaowocowało wzrostem sprawności oraz prawidłowości stawianej diagnozy, a szerokie możliwości przestrzennego modelowania badanych struktur umożli-

liwiły nie tylko przestrzenną rekonstrukcję wybranego narządu, ale również obserwowanie zmian wewnętrznych oraz zewnętrznych w jego morfologii. Takie zaawansowane techniki przetwarzania obrazów wykorzystywane są obecnie praktycznie we wszystkich rodzajach diagnostycznych badań obrazowych opartych na technice cyfrowej, a także w wielu innych zadaniach, jakie stawia przed nami współczesna diagnostyka medyczna. Pomimo szerokiego spektrum możliwości pozyskiwania danych, w tym także możliwości otrzymania przestrzennych rekonstrukcji, jakie daje nam współczesna technika wizualizacyjna, szereg problemów związanych z automatyczną interpretacją tak uzyskanego obrazu pozostaje nierozwiązanych. Spowodowane jest to głównie trudnościami pojawiającymi się przy modelowaniu skomplikowanych procesów wnioskowania, w tym także trudnych do naśladowania myślowych procesów, jakie zachodzą w umyśle człowieka, a które pozwalają mu uzyskać znaczeniową interpretację otrzymanych zobrazowań medycznych.

Niniejsza praca, w której zostanie zaprezentowane rozwinięcie lingwistycznego podejścia do modelowania wybranych struktur przestrzennych, z wykorzystaniem grafowych języków opisu cech kształtów, ma szansę zapełnić tę znaczącą lukę badawczą [9–11, 16]. Wykorzystanie zaawansowanych formalizmów językowych umożliwi dokonanie automatycznej identyfikacji istotnych punktów informatywnych w obrazie danego narządu (np. punktów umożliwiających dokonanie rekonstrukcji naczyń wieńcowych), a po wprowadzeniu odpowiednich relacji przestrzennych, umożliwi także lokalizację oraz określenie stopnia zaawansowania zmian o charakterze patologicznym, (czyli np. liczby oraz miejsca istotnych przewężeń naczyń wieńcowych). Metody lingwistyczne sztucznej inteligencji znacząco wpływają na podniesienie możliwości cybernetycznego modelowania procesów analizy znaczeniowej i rozumienia obrazów. W dalszej części pracy, na takie właśnie zadania będą ukierunkowane zaproponowane metody opracowane w celu semantycznego modelowania naczyń wieńcowych serca (rys. 1).

W chwili obecnej najbardziej rozwiniętym obszarem zastosowań metod przetwarzania i analizy obrazów kardiologicznych jest identyfikacja i lokalizowanie miejsc przewężeń oraz zatorów w tych naczyniach. Zadania takie bardzo często wykonywane są w sposób manualny, np. poprzez ingerencję operatora we wskazany obszar zainteresowania, a nie w sposób automatyczny [4, 7, 10]. W badaniach diagnostycznych serca wykonywanych za pomocą angiografii tętnic wieńcowych, angiografii wieńcowej metodą rezonansu magnetycznego, tomografii komputerowej czy wreszcie ultrasonografii wewnątrznaczyniowej (IVUS), ich kluczowym składnikiem jest wykorzystanie wielu rozbudowanych algorytmów ukierunkowanych na wstępne przetwarzanie i analizę tego rodzaju obrazów [5, 7]. Metody takie pozwalają na zminimalizowanie niepożądanych efektów występujących w otrzymanych obrazach, np. w postaci szumów czy artefaktów pomiarowych, wyszczególniając cechy najbardziej istotne z medycznego punktu widzenia. Dzięki wszystkim takim zobrazowaniom diagnosta otrzymuje ogromną ilość informacji, które stanowią podstawę formułowania odpowiedniej diagnozy. Pewne z tych danych umożliwiają także w różnym stopniu szczegółowości odtworzenie informacji na temat trójwymiarowej struktury naczyń wieńcowych.



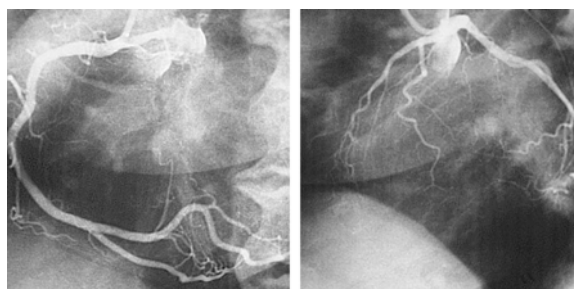
Rys. 1. Przestrzenna rekonstrukcja naczyń wieńcowych

W zakresie technik komputerowego odtwarzania struktury trójwymiarowej, stosuje się metody geometryczne wraz z algorytmami służącymi do wyznaczania wzajemnych odpowiedników w wykorzystywanej grupie „płaskich” obrazów (tzw. matching) oraz techniki tzw. renderingu, czyli wizualizacji struktury trójwymiarowej w postaci płaskiego obrazu, wyświetlanego na ekranie komputera [1, 4, 6, 13]. Wykorzystanie tych technik, umożliwia otrzymanie materiału diagnostycznego, mogącego zawierać istotne informacje dotyczące występowania lub stanu zaawansowania poszukiwanych schorzeń i patologii. Nie ma niestety możliwości ich automatycznej interpretacji takiej, jaka jest przeprowadzana przez fachowe oko specjalisty. Z tego też powodu w dalszej części opisany zostanie sposób tworzenia lingwistycznej reprezentacji znaczeniowej dla struktur naczyń wieńcowych wykazujących pewne zmiany chorobowe. Opis taki umożliwi wspomaganie zadań interpretacyjnych występującej patologii wraz z określeniem semantyki wykrytych zmian.

2. Przestrzenny opis naczyń wieńcowych z wykorzystaniem gramatyk obrazowych

Do prawidłowego zdefiniowania grafowej gramatyki obrazowej, umożliwiającej określenie lokalizacji oraz wyznaczenie liczby i wielkości zmian chorobowych (np. w postaci przewężenia światła jednej lub kilku odgałęzień tętnic), zostało wykorzystane kilkanaście sekwencji DICOM (*Digital Imaging and Communication in Machine*) pochodzących z tomograficznych, bezinwazyjnych badań angiograficznych.

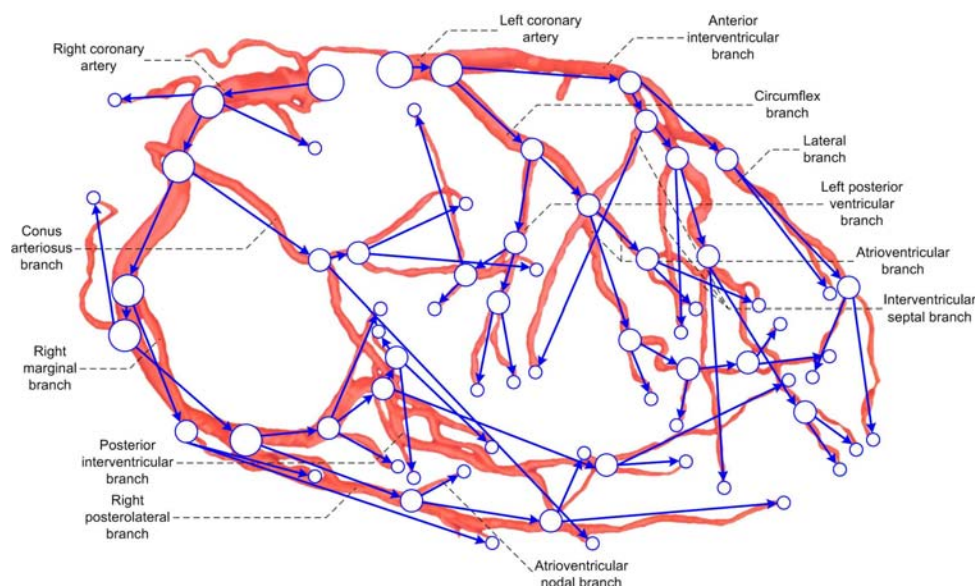
Zawierają one obrazy tętnic wieńcowych otrzymywanych w trakcie wykonywania badań koronarograficznych, ukazujących dynamikę przepływu kontrastu w badanych naczyniach (rys. 2).



Rys. 2. Obrazy koronarograficzne prawej i lewej tętnicy wieńcowej

Angiografia tętnic wieńcowych i otrzymane w jej wyniku obrazy koronarograficzne (wykonywane zwykle w dwóch przeciwstawnych projekcjach) pozwalają na wykonanie przestrzennego renderingu naczyń wieńcowych ukazując jednocześnie zmiany ich morfologii. Dodatkowo podczas badania, gdy zapisuje się odpowiednie ciśnienia, możliwa jest precyzyjna ocena parametrów czynnościowych serca.

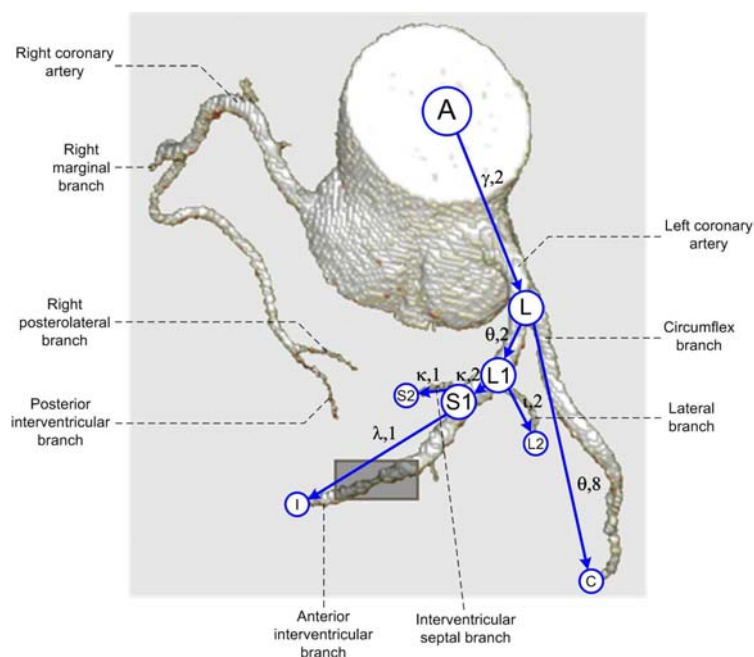
Na rysunku 3 została przedstawiona trójwymiarowa wizualizacja, utworzona na bazie obrazów koronarograficznych uzyskiwanych w trakcie badań diagnostycznych z wykorzystaniem cyfrowej tomografii 64-spiralnej.



Rys. 3. Przestrzenna rekonstrukcja naczyń wieńcowych opisana strukturalnie jako drzewo

Obrazy takie po wstępnym ich przetworzeniu eksponują arterie, uwidocznione na obrazach binarnych, tj. ukazujących tylko wyekstrahowane naczynia bez tkanki mięśnia sercowego.

Do utworzenia lingwistycznego opisu semantyki poszukiwanych zmian wykorzystana została okrojona postać przestrzennej struktury naczyń wieńcowych, ograniczona tylko do naczyń głównych i ważniejszych naczyń drugiego i trzeciego rzędu (rys. 4). Przykład struktury tętnic zawierający widoczne przewężenie w końcowym przebiegu gałęzi międzykomorowej przedniej został pokazany na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat przestrzennego etykietowania tętnic oraz relacji pomiędzy nimi
Objaśnienia w tekście

Gramatyka grafowa opisująca takie naczynia została zdefiniowana w ten sposób, że poszczególne węzły grafu identyfikują wszystkie punkty początkowe oraz końcowe części naczyń, a także wszystkie punkty odgałęzień i przejścia naczyń głównych w naczynia niższego rzędu. Tak powstała struktura grafowa będzie tworzyła elementy języka definiującego strukturę prawidłowego unaczynienia serca i jego przestrzenną topologię oraz możliwe zmiany morfologiczne.

Zbiór etykiet krawędziowych, opisujących wzajemne relacje przestrzenne pomiędzy elementami struktury naczyniowej reprezentowanej w postaci grafu, zdefiniowano w ten sposób, że zostały określone odpowiednie relacje przestrzenne, tj. pionowe definiowane zbiorem etykiet $\{1, 2, \dots, 24\}$ i poziome definiowane zbiorem etykiet $\{\alpha, \beta, \dots, \lambda\}$, określonych na sferze otaczającej serce. Etykiety te oznaczają kolejne

przedziały kątowe każdy o rozpiętości 15 stopni. Następnie każdemu z odgałęzień, wyznaczonemu przez początki i końce odpowiednich odcinków tętnic wieńcowych w zależności od położenia, zostają przyporządkowane krawędziowe etykiety terminalne, ze zbioru zdefiniowanego w gramatyce zamieszczonej w dalszej części pracy. Uwzględnienie tych relacji oraz etykietowanie wierzchołków grafu rozpinającego arterie, pozwala na utworzenie lingwistycznego opisu semantyki poszukiwanych zmian i rozpoznawania (lokalizacji) patologicznych przewężeń oraz otrzymanie reprezentacji w postaci grafu dla analizowanego obiektu (rys. 4). Dzięki temu możliwe jest np. przeprowadzanie komputerowej analizy otrzymanej struktury ukierunkowanej na automatyczną detekcję miejsca przewężenia, jego rodzaju (koncentryczne lub ekscentryczne), a także jego stopnia.

Przy takiej reprezentacji otrzymuje się zwięzły oraz jednoznaczny opis wszystkich elementów struktury naczyniowej (np. w postaci szkieletów określających linie środkowe poszczególnych odcinków tętnicznych), co pozwala na ściśle określenie kierunku analizy w poszukiwaniu miejsc patologii np. w postaci istotnych przewężeń naczyń wieńcowych (pokazanych np. na rys. 4). Poszukiwanie miejsc z występującymi zmianami morfologii naczyń jest wykonywane w trakcie analizy składniowej badanych reprezentacji grafowych (otrzymywanych dla kolejnych przypadków diagnostycznych) utworzonych z wykorzystaniem gramatyk typu edNLC. Wykrycie takiej zmiany jest możliwe dzięki zastosowaniu metod gradientowych lub gramatyk ciągowych wykrywających istotne przewężenia [13, 16]. Ich dokładna lokalizacja wymaga jednak dokonania parsingu przestrzennej reprezentacji naczyń wieńcowych określonej przez rozważane w tej pracy gramatyki edNLC.

Poniżej przytoczono formalną definicję tego typu gramatyki. Warto jednak zaznaczyć, że klasa tych gramatyk posiada bardzo efektywne analizatory składniowe działające w czasie wielomianowym.

Definicja 1. *Krawędziowo-etykietowaną, skierowaną, sterowaną etykietą wierzchołką gramatyką grafową (gramatyką G_{edNLC} , edge-labelled directed Node-Label Controlled graph grammar) nazywamy zbiór pięciu elementów definiowanych w następujący sposób (1) [16, 18]:*

$$G_{edNLC} = (\Sigma, \Delta, \Gamma, P, Z) \quad (1)$$

gdzie:

- Σ — skończony, niepusty zbiór etykiet wierzchołkowych,
- Δ (podzbiór Σ) — zbiór terminalnych (końcowych) etykiet wierzchołkowych,
- Γ — skończony, niepusty zbiór etykiet krawędziowych,
- P — skończony zbiór produkcji o postaci (l, D, C) , gdzie $l \in \Sigma$, D — graf EDG, $C: \Gamma \times \{in, out\} \rightarrow 2^{\Sigma \times \Sigma \times \Gamma \times \{in, out\}}$ — transformacja osadzenia,
- Z — startowy graf, od którego rozpoczyna się proces generacji wszystkich postaci grafowych dla tętnic wieńcowych.

W celu określenia miejsca występowania patologii naczyń, w grafie tętnic wieńcowych (rys. 4), zaproponowano gramatykę następującej postaci (2):

$$G_{edNLC} = (\Sigma, \Delta, \Gamma, P, Z) \quad (2)$$

gdzie $\Sigma = \Sigma_N \cup \Sigma_T$ jest zbiorem zarówno terminalnych jak i nieterminalnych etykiet wierzchołkowych opisujących badane grafy i zdefiniowanych w następujący sposób.

Zbiór terminalnych etykiet wierzchołkowych (rys. 4):

$\Sigma_T = \{\text{anterior interventricular branch, circumflex branch, lateral branch, interventricular septal branch}\}$

Zbiór nieterminalnych etykiet wierzchołkowych:

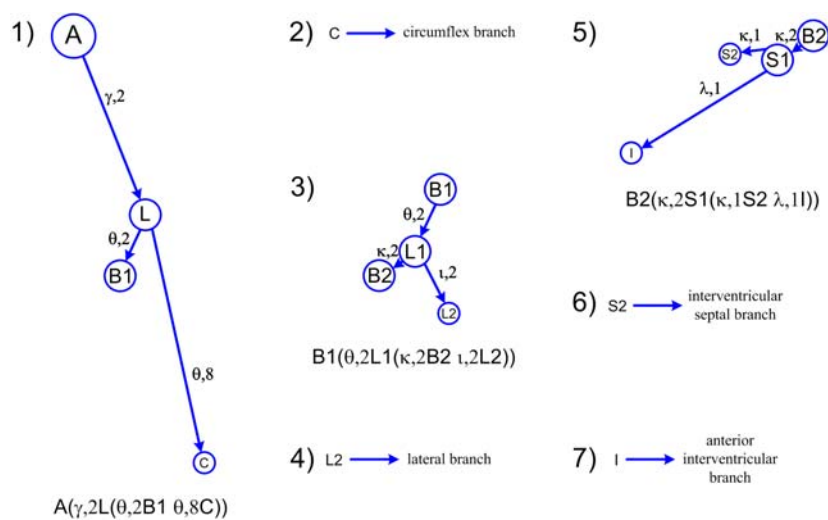
$\Sigma_N = \{A, B1, B2, C, I, L, L1, L2, S1, S2\}$,

$\Delta = \Sigma_T$ zbiór terminalnych etykiet wierzchołkowych,

$\Gamma = \{\gamma, 2; \theta, 2; \theta, 8; \iota, 2; \kappa, 1; \kappa, 2; \lambda, 2\}$ zbiór etykiet opisujących krawędzie grafu,

P — skończony zbiór produkcji zapisanych w postaci nawiasowej oraz przy użyciu schematycznej notacji grafowej (rys. 5),

$Z = \{A\}$ pierwotny graf startowy.



Rys. 5. Zbiór produkcji gramatyki G_{edNLC}
Objaśnienia w tekście

3. Wybrane rezultaty

Zastosowanie przedstawionej w pracy gramatyki grafowej, umożliwia przestrzenne modelowanie morfologii naczyń wieńcowych oraz wykrywanie symptomów choroby niedokrwiennej serca w postaci precyzyjnej lokalizacji miejsc istotnych przewężeń świa-

tła tętnic wieńcowych. W przypadku analizy strukturalnej takich reprezentacji, składniowy analizator rozpoznający (tzw. parser), stanowiący właściwy element analizy syntaktyczno-semantycznej, w sposób automatyczny dostarcza pełnej informacji określającej przestrzenną topologię badanego grafu opisującego naczynia wieńcowe oraz jego poszczególnych składników. Informacja taka jest wykorzystywana następnie do analizy strukturalnej i semantycznej poszczególnych odcinków tętnic, wyznaczanych przez terminalne etykiety wierzchołkowe. Uzyskujemy w ten sposób dokładne określenie poszukiwanych nieprawidłowości morfologicznych, występujących pod postacią różnego rodzaju przewężeń, co może stanowić dodatkowe narzędzie służące do wspomaganie wczesnej diagnostyki choroby niedokrwiennej [12, 17].

Przeprowadzone badania wykazały, że dzięki wykorzystaniu możliwości semantycznej interpretacji przestrzennych rekonstrukcji naczyń wieńcowych z użyciem opisanych gramatyk, możliwa jest analiza prawidłowej morfologii poszczególnych odcinków i odgałęzień tętnic. Pozwala to na poszerzenie spektrum zastosowań metod sztucznej inteligencji w kierunku określania medycznego znaczenia badanych patologii, a także w kierunku metod komputerowego rozumienia obrazów medycznych. Mogą one zatem odgrywać ważną rolę w systemach wspomagających rozpoznawanie i diagnostykę zmian chorobowych.

4. Podsumowanie

Dzięki zastosowaniu grafowych metod syntaktycznej analizy i rozpoznawania obrazów, a w szczególności gramatyk grafowych, możliwa jest analiza prawidłowej morfologii światła tętnic wieńcowych. Zaprezentowane w pracy podejście wykorzystania grafowych języków obrazowych w przestrzennym modelowaniu struktur wieńcowych do określania semantyki występujących tam zmian, stanowi nową jakość w zadaniach komputerowej diagnostyki medycznej. Stwarza to szerokie możliwości ukierunkowania jej na dokonanie automatycznej analizy oraz detekcji zmian w sposób percepcyjny, wpływając na rozwój nowej klasy kognitywnych, medycznych systemów informacyjnych, bazujących na grafowych językach obrazowych oraz zaawansowanych formalizmach sztucznej inteligencji.

Wprowadzenie takich technik ma doniosłe znaczenie, gdyż pozwala nie tylko na wykrywanie zmian patologicznych, ale również (w pewnym zakresie) na określenie ich semantyki, co w przypadku zobrazowań medycznych może prowadzić do komputerowego „rozumienia” ich medycznego znaczenia oraz określenia optymalnych możliwości terapeutycznych. Udoskonalenie i ustandaryzowanie takich metod, może stanowić podstawowe narzędzie wykorzystywane do wspomaganie wczesnej diagnostyki chorób serca. Z punktu widzenia mechanizmów biocybernetyki, bardzo istotnym faktem jest głęboka analogia funkcjonowania prezentowanego modelu analizy strukturalnej do interpretacyjnych mechanizmów kognitywnych zachodzących w umyśle człowieka, a która polega na wykorzystaniu interferencji pomiędzy oczekiwaniami (tutaj wiedzą gromadzoną w postaci grafowych reguł gramatycznych), a strumieniem danych płynącym z systemu analizującego badane zobrazowanie (dane morfometryczne i struk-

turalne uzyskiwane dla kolejno analizowanych wizualizacji). Pomimo niejednokrotnie skomplikowanego procesu wnioskowania gramatycznego, syntaktyczne metody rozpoznawania obrazów dostarczają niemalże całości informacji mówiącej o morfologicznych zmianach naczyń wieńcowych, świadczących o postępujących procesach chorobowych.

Literatura

- [1] Bankman I. (Ed.): *Handbook of Medical Imaging: Processing and Analysis*. Academic Press 2002
- [2] Bochenek A., Reicher M.: *Anatomia człowieka t. III. Układ naczyniowy*. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL 1998
- [3] Davis L. S. (Eds.): *Foundations of image understanding*. Norwell, Kluwer Academic Publishers 2001
- [4] Higgins W. E., Karwoski R. A., Ritman E. L., Spyra W. J. T.: *System for analyzing true three-dimensional angiograms*. IEEE Trans. Med. Imag, vol. 15, 1996, 377–385
- [5] Higgins W. E., Reinhardt J. M.: *Cardiac image processing, 789-804, in Handbook of Video and Image Processing*. A. Bovik (Ed.) Academic Press 2000
- [6] Hoffman K. R., Sen A., Lan Li, Chua Kok-Gee, Esthappan J., Mazzucco M.: *A system for determination of 3D vessel tree centerlines from biplane images*. The International Journal of Cardiac Imaging, vol. 16, 2000, 315–330
- [7] Khan M. G.: *Heart Disease Diagnosis and Therapy*. Baltimore, Williams & Wilkins 1996
- [8] Konturek S.: *Fizjologia człowieka t. II. Układ krążenia*. Kraków, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego 2000
- [9] Meyer-Baese A.: *Pattern Recognition in Medical Imaging*. Elsevier-Academic Press, 2003
- [10] Ogiela M. R., Tadeusiewicz R.: *Syntactic reasoning and pattern recognition for analysis of coronary artery images*. Artificial Intelligence in Medicine, vol. 26, 145–159
- [11] Ogiela M. R., Telejko K.: *Grafowe języki obrazowe w percepcyjnej analizie zjawisk chorobowych i wspomaganii diagnostyki medycznej*. Przegląd Lekarski, vol. 61, 121–123
- [12] Ogiela M. R., Tadeusiewicz R.: *Picture Languages in Intelligent Retrieval of Visual Data Semantic Information*. LNAI 3336, 389–396
- [13] Ogiela M. R.: *Strukturalne metody rozpoznawania obrazów w kognitywnej analizie zobrażeń medycznych*. Kraków, UWND AGH 2004
- [14] Robb R. A.: *Biomedical Imaging Visualization, and Analysis*. Wiley-Liss 2000
- [15] Sokolowska-Pituchowa J. (red.): *Anatomia człowieka*. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL 2003
- [16] Tadeusiewicz R., Ogiela M. R.: *Medical Image Understanding Technology*. Berlin-Heidelberg, Springer Verlag 2004

- [17] Tadeusiewicz R., Ogiela M. R.: *Structural Approach to Medical Image Understanding*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, vol. 52(2), 131–139
- [18] Tadeusiewicz R., Flasiński M.: *Rozpoznawanie obrazów*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1991