

Komputerowe wspomaganie obrazowej diagnostyki medycznej – wyzwania i szanse rozwoju

Computer-aided diagnosis based on medical imaging – challenges and development perspectives

Artur Przelaskowski

Instytut Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, tel. +48 (22) 234 73 32, e-mail: arturp@ire.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono problem komputerowego wspomagania diagnozy CAD (*computer-aided diagnosis*), wyjaśniono pojęcia i definicje, przedstawiono rozwój koncepcji wspomagania oraz najnowsze trendy i wizje przyszłości. Problem błędów w diagnostyce obrazowej istnieje od kilkudziesięciu lat. Stale udoskonalane technologie obrazowania, postęp w doświadczeniach i formach obiektywizacji wiedzy radiologicznej, gwałtowny rozwój metod sztucznej inteligencji, inteligencji obliczeniowej, a także prowadzone od lat próby komputerowego wspomagania procesu interpretacji wyników badań nie przynoszą spodziewanych efektów poprawy skuteczności diagnozy. Niewątpliwym osiągnięciem w niektórych obszarach zastosowań towarzyszą istotne ograniczenia. Wskazano istotne elementy procesu doskonalenia koncepcji wspomagania, realne sukcesy, ale i wątpliwości dotyczące dalszego rozwoju. Zwrócono wreszcie uwagę na kluczowe warunki, od spełnienia których zależy szansa znacznego ograniczenia liczby błędów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: komputerowe wspomaganie diagnozy, diagnostyka obrazowa, błędy diagnostyczne

Abstract

In this paper computer-aided diagnosis (CAD) is presented from historical perspectives, spectacular important challenges and development capabilities. Basic concepts and important definitions were explained, including CADx, CAD-CBIR, ICAD. Radiological errors occurring in daily practice were analyzed. Stable level of errors rate is observed over decades, mainly due to reported human mistakes in medical image perception and interpretation. Therefore, possible ways to decrease errors number, were outlined. New methods and methodologies of computational intelligence, information theory and semantic technologies, approximation theory, computer vision and pattern recognition create empowered CAD capabilities. However, objectified specificity of diagnostic tasks including observer performance, diagnostic protocols, respective ontology, and formalized assessment criteria defines real challenges of computational assistance. These factors result from the fact that the final diagnosis is essentially made by the radiologist who uses the output from a computerized analysis of medical images as a second opinion in detecting lesions or reviews probably abnormal exams indicated by CAD in prescreening procedure.

Key words: computer-aided diagnosis, medical imaging, diagnostic errors

Wprowadzenie

Diagnostyka medyczna to rozpoznawanie chorób na podstawie stwierdzonych objawów. Obrazowa diagnostyka medyczna, inaczej diagnostyka obrazowa, bazuje przede wszystkim na symptomach pozyskanych w badaniach obrazowych, na podstawie danych obrazowych pochodzących z różnych systemów obrazowania medycznego.

Współczesne systemy obrazowania medycznego to także rozbudowane oprzyrządowanie towarzyszące, związane np. z intensywnym rozwojem badań dynamicznych i stosowaniem cieniujących środków kontrastowych, oraz teleinformatyka – połączenie w sieci medycznego systemu informacyjnego poprzez interfejsy zgodne ze standardem DICOM, protokoły transmisji, archiwizacja na serwerach, gdzie gromadzone są duże ilości szybko rejestrowanych obrazów, zarządzanie wymianą informacji, zabezpieczenia dostępu itp.

Skuteczna diagnostyka obrazowa zależy zarówno od jakości obrazowania medycznego, tj. metod akwizycji, rekonstrukcji i prezentacji obrazów, jak i od efektywności samego procesu diagnozy. Doskonalenie systemów obrazowania dokonuje się także dzięki wykorzystaniu nowoczesnych technologii komputerowych. Przykładowo, rekonstrukcja obrazów przestrzennych w tomografii komputerowej czy rezonansu magnetycznego w dużym stopniu zależy od jakości wykorzystanych algorytmów, mocy obliczeniowej i zasobów pamięciowych sprzętu komputerowego. Rozwój rentgenografii cyfrowej warunkowany jest odpowiednią wydajnością systemów teleinformatycznych, umożliwiających efektywne zarządzanie cyfrową informacją obrazową (informatyczne systemy medyczne RIS-PACS, telediagnostyka). Z drugiej strony możliwy jest rozwój różnych koncepcji wspomagania, które komplementarnie uzupełniają możliwości detektorów cyfrowych. Diagnoza, inaczej rozpoznanie, to potwierdzenie zmian chorobowych (i ewentualna ich identyfikacja) lub zaprzeczenie występowania zmian na podstawie objawów stwierdzonych w badaniu podmiotowym (wywiad chorobowy) i przedmiotowym (fizykalnym – oględziny, obmacywanie, opukiwanie, osłuchiwanie) oraz na podstawie wyników badań laboratoryjnych i obrazowych (dawniej nazywane badaniami dodatkowymi). Prawidłowe postawienie diagnozy umożliwi zastosowanie odpowiedniego leczenia.

Szczególnie interesujące jest określenie, na czym polega wspomniany proces diagnozowania, czyli potwierdzenia i identyfikacji choroby lub jej zaprzeczenia. Jest to przede wszystkim proces selektywnego pozyskiwania informacji o pacjencie, interpretowania tej informacji, zgodnie z posiadaną wiedzą dziedzinową, oraz formułowania decyzji diagnostycznej (inaczej oceny choroby). Schematyzacja procesu dia-

gnozy jest trudna, istnieje wiele szkół, indywidualnych metod i sposobów, nawyków i intuicyjnych przyzwyczajzeń, a próby standaryzacji napotykają spory opór. Zrozumienie istoty tego procesu jest jednak niezbędne w rozwoju koncepcji diagnozy wspomaganą komputerowo.

Poprzez percepcję użytecznej treści obrazowej, zakładając odpowiednie rozumienie znaczenia (semantyki) danych, następuje odbiór (wydobywanie, rozpoznanie) informacji diagnostycznej, czyli stwierdzenie (detekcja) potencjalnych objawów chorobowych, bądź ich braku. Istotną jest przy tym detekcja wszystkich nieprawidłowości, anormalności, zmian podejrzanych, które mogą mieć wpływ na końcową decyzję diagnostyczną.

Interpretacja to wyjaśnienie zgromadzonej informacji, symptomów czy określenie ich przyczyny. Ważną rolę odgrywa właściwa ocena dostępnej informacji na bazie własnych doświadczeń, posiadanej wiedzy, a niekiedy także intuicji. Korzysta się też z konsultacji, dostępnych źródeł, najbardziej aktualnej wiedzy, dodatkowych obserwacji itp. Bardziej formalnie można mówić o wykorzystywaniu wiedzy z odpowiedniej dziedziny medycznej, przydatnej w diagnozie. Skutkiem procesu interpretacji jest potwierdzenie i identyfikacja choroby lub jej zaprzeczenie. Przy podejmowaniu decyzji diagnostycznych wykorzystywane są także wszystkie inne, dostępne informacje dotyczące danego przypadku, pozwalające lepiej zinterpretować informację obrazową.

Zagadnienie interpretacji obrazów medycznych można rozumieć szerzej. Według Ericksona i Bartholomai zadanie interpretacji obrazów można podzielić na trzy zasadnicze części: detekcja anormalności w badaniach przesiewowych, opis oraz diagnoza. Historycznym celem komputerowego wspomaganie jest zwiększenie trafności diagnostycznej poprzez skuteczniejszą detekcję zmian podejrzanych, dokładniejszy, obiektywizowany obliczeniowo opis ich cech oraz odpowiedź sformalizowanej klasyfikacji zmian w kategoriach diagnostycznych, stosowanych przez radiologów [1].

Opis obrazów wymaga dużych umiejętności, predyspozycji i wiedzy specjalistycznej. Zajmują się nim zazwyczaj radiolodzy, przy czym obrazy medyczne interpretowane są też przez innych specjalistów. Nie jest to jednak zadanie łatwe – wymaga oprócz wiedzy i doświadczenia – umiejętności obserwacji i kojarzenia drobnych faktów obrazowych, interpretacji czynników nieoczywistych, kreatywnego i sprawnego formułowania oceny nowych sytuacji, zdecydowania i odpowiedzialności, bazującej niekiedy jedynie na intuicyjnej ocenie. Ważną jest również umiejętność gromadzenia i integracji informacji pochodzących z dostępnych źródeł, a niekiedy planowania nowych sposobów pozyskania informacji dodatkowej. Opis, interpretacja, ocena treści obrazowej bazuje więc niewątpliwie na ludzkich zdolnościach, dostępnych zasobach, inteligentnym wnioskowaniu, ale i intuicyjnej roli intelektu, nie wyłączając związanych z tym ograniczeń.

Ze względu na ograniczenia wynikające z ludzkiej natury oraz wielu czynników dodatkowych, przekładające się na określony procent błędnych decyzji diagnostycznych, poszukiwane są różne sposoby komputerowego wspomaganie procesu diagnozy, zakładające podmiotową, zasadniczą rolę decyzyjną lekarza.

Detekcja zmian czy innych anormalności jest zwykle zadaniem ukierunkowanym na określony rodzaj patologii. Tak jest w badaniach przesiewowych, np. raka sutka czy płuc, gdy poszukiwane są określone symptomy zmian chorobowych, a zadaniem radiologa jest detekcja wszystkich obszarów i cech podejrzanych w dużej masie wykonywanych badań. Przeglądane obrazy zawierają patologie w stosunkowo małym procencie (średnio 3-4 przypadki zmian rakowych na 1000), co jest dodatkowym czynnikiem utrudniającym utrzymanie pełnej koncentracji przez radiologów. Zastosowanie technik komputerowych, śledzących określone, specyficzne cechy po-

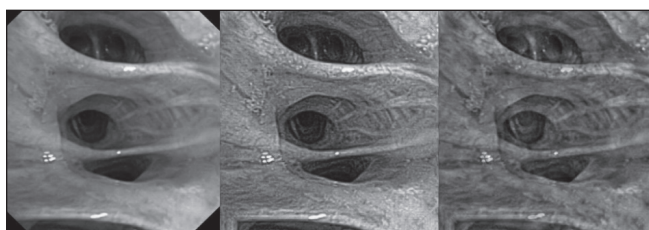
tencjalnych patologii i sygnalizujących obszary podejrzane z zadowalającą czułością, jest w tym przypadku bardzo pożądane. Im dokładniej zdefiniowany, bardziej charakterystyczny problem diagnostyczny, tym zwykle większa skuteczność obliczeniowych algorytmów detekcji.

Detekcja zmian podejrzanych uruchamia kolejne etapy opisu i diagnozy. Świadczy o tym m.in. konieczność przeprowadzenia tzw. badania diagnostycznego, które ma wyraźniej inny charakter niż badanie przesiewowe. Wykryta zmiana opisywana jest za pomocą wielu cech, zaczynając od morfologii zmiany, anatomicznego zasięgu, rozmiaru i kształtu, poprzez cechy obrazowe typu tekstura, średni poziom jasności, charakter krawędzi (zarys zmiany), kontrast lokalny, zróżnicowanie w stosunku do otoczenia.

Obliczeniowy opis zmian jest niewątpliwie niezależny, dokładniejszy, bardziej czuły i jednoznaczny, łatwiej porównywalny (np. w ocenie progresji zmian, skutków terapii) od subiektywnego. Pozwala skonstruować przejrzyste kryteria porównawcze. Niestety, nie zawsze opis ten jest kompletny i zbieżny z wymogami zadania diagnostycznego, a bazujący na nim proces automatycznego rozpoznawania w kategoriach diagnostycznych daje ograniczoną efektywność. Niedoskonałość opisu obliczeniowego związana jest przede wszystkim z trudnościami w ustaleniu wiarygodnych, numerycznych odpowiedników cech różnicujących w sposób decydujący zmiany łagodne i złośliwe. Dodatkowo pojawia się problem ich normalizacji przy ograniczonej precyzji ich wyznaczenia, wobec zmiennych uwarunkowań technicznych, jakie występują w realiach dostępnych systemów obrazowania. Diagnoza rozumiana jako potwierdzenie/identyfikacja choroby jest w tak definiowanym zadaniu interpretacji etapem najtrudniejszym, bo odwołującym się do całego zgromadzonego zasobu informacji dotyczących danego przypadku, pozwalających nierzadko lepiej zrozumieć i ocenić informację obrazową, a także wymagającym ustalenia ścisłych reguł klasyfikacji w zakresie rozważanych kategorii diagnostycznych. Wybór kategorii skutkuje istotnymi konsekwencjami diagnostycznymi i terapeutycznymi. Brakuje także wiarygodnych wzorców patologii oraz ustandaryzowanych referencyjnych obrazów zmian, niezależnych od warunków akwizycji obrazów.

Pomysł wykorzystania technologii komputerowych do poprawy skuteczności diagnozy ingerują w obszar pierwotnie zarezerwowany dla lekarza, szczególnie wrażliwy, bo dotyczących zadań trudnych, o ogromnym znaczeniu, których nie sposób opisać za pomocą sformalizowanych reguł. Mogą być więc przez niektórych traktowane jako próba ingerencji techniki w subtelną sferę czysto medyczną, jako naruszenie fundamentalnego *status quo*. Takie zagrożenie w pewnym stopniu istnieje i wymaga precyzyjnego ustalenia statusu komputerowych narzędzi oraz procedur ich skutecznego wykorzystania w praktyce klinicznej.

Niewątpliwie komputerowe wspomaganie diagnozy jest zagadnieniem fascynującym, pełnym wyzwań, dużych oczekiwań, ale również obaw i nieoczekiwanych trudności. Realizacji tego pomysłu służą rozwijane od lat metody komputerowej analizy danych obrazowych, naśladujące obserwatorów w rozpoznawaniu treści i detekcji określonego rodzaju obiektów. Niezwykle ważny jest także rozwój metod inteligencji obliczeniowej, doskonalenie reguł wnioskowania, projektowanie skutecznych deskryptorów cech semantycznych, algorytmów przetwarzania obrazów i poprawy percepcji treści obrazowej (zobacz rys. 1). Równoległe prowadzone są badania nad obiektywizacją wiedzy medycznej, modelowaniem procesu diagnostycznego, doskonaleniem protokołów badań, integracją informacji o różnych charakterze diagnostycznym, dostępnych z wielu źródeł, sposobem weryfikacji narzędzi wspomagających w warunkach klinicznych itp. Historycznie rzecz biorąc, w pierwszej kolejności przedmiotem zainteresowania stał się etap diagnostycznej interpretacji obrazów, aczkolwiek



Rys. 1 Przykład działania metod poprawy percepcji treści diagnostycznej, zwiększających wartość diagnostyczną obrazów z badania bronchoskopowego (uzyskały pozytywne oceny lekarzy w teście subiektywnym). Od lewej do prawej kolejno: oryginalna ramka wideo, ramka przetworzona metodą filtracji wyostrzającej szczegóły oraz ramka po nieliniowej modyfikacji rozkładu współczynników w dziedzinie falkowej (opracowanie własne [2])

najnowsze rozwiązania ingerują zarówno w etap akwizycji całej dostępnej informacji, jak i końcowego formułowania decyzji diagnostycznych.

Metody komputerowego wspomaganie – rozwój koncepcji

Koncepcja komputerowo wspomaganie obrazowej diagnostyki medycznej kształtowała się przez dziesiątki lat, odnosząc sukcesy w wielu praktycznych zastosowaniach. Niemniej jednak zanotowano też bardzo dużo niepowodzeń.

ACD versus CAD

Pierwsze metody komputerowej analizy obrazów medycznych opracowano już w latach 60. i 70. ubiegłego wieku [3-7]. Optymistyczną wizją tych prac było zastąpienie radiologa przez komputer w detekcji podejrzanych zmian. Wizja ta wynikała w dużym stopniu z entuzjazmu towarzyszącemu rozwojowi nowych technik komputerowych, w tym obiecujących metod sztucznej inteligencji, w duchu teorii kognitywnych. Podejmowano próby w pełni automatycznego wykrycia, a nawet interpretacji potencjalnie istotnych cech obrazu, jedynie z wykorzystaniem algorytmów obliczeniowych. Przykładem może być koncepcja pełnej automatyzacji badań klatki piersiowej [8]. Chodziło o alternatywne w stosunku do radiologa podejmowanie decyzji diagnostycznych, czyli *de facto* w pełni automatyczną, komputerową diagnozę (ACD – *automated computer diagnosis*) lub w wersji nieco złagodzonej, dopuszczającej interakcję. Uzyskiwane wyniki nie przewyższały jednak ocen specjalistów pod względem trafności, algorytmy automatycznej diagnozy nierzadko zawodziły, przy czym trudno było jednoznacznie określić przyczyny ograniczonej ich skuteczności. Uzyskiwane wskazania nie zawsze miały przewidywalny charakter, zależały od całej gamy nie do końca zdefiniowanych czynników. Entuzjazm towarzyszący tym pracom stopniowo malał, podobnie jak nadzieja związana z możliwościami zastąpienia człowieka przez komputer w coraz bardziej ambitnych zadaniach, na bazie doskonalonych koncepcji sztucznej inteligencji. Powodem był także, oprócz rozczarowania z organicznych efektów automatycznych diagnoz, także realny opór środowiska medycznego przed komputerowym „zastępstwem”.

Ograniczenia metod automatycznej diagnozy powodowane były między innymi:

- ograniczoną mocą obliczeniową komputerów,
- niską jakością obrazów medycznych – ogólnie dużą zmiennością uwarunkowań technologicznych wpływających znacząco na właściwości obrazowanych struktur,
- dużą złożonością informacji obrazowej, brakiem odpowiednio zaawansowanych, a jednocześnie uniwersalnych algorytmów przetwarzania i analizy obrazów,

- brakiem regularnych wzorców patologii oraz stabilnych zbiorów ich cech specyficznych,
- brakiem zobiektywizowanej, uzgodnionej, sformalizowanej wiedzy radiologicznej i medycznej.

Możliwość zastosowania narzędzi ACD w praktyce klinicznej wydawała się mało prawdopodobna, gdyż dopiero przy trafności wskazań porównywalnej lub przewyższającej możliwości radiologów, przy niewielkiej liczbie wskazań fałszywych i odpowiednio wysokiej czułości byłoby to w niektórych przypadkach dopuszczalne. Konkluzja, sformułowana przez R. Engle w 1992 r. była jednoznaczna: powinniśmy zaprzestać wysiłków zmierzających do zastąpienia diagnostów komputerami [9, 10].

Ograniczenia metod ACD wpłynęły na zmianę dominującej koncepcji wspomaganie. Poprawę efektywności interpretacji badań uzyskano nie poprzez zastąpienie ocen radiologów wskazaniami narzędzi komputerowych, ale poprzez wyposażenie specjalistów w dodatkowe narzędzia, sugerujące zmiany podejrzane tj. odbiegające od normy – anormalne, generujące różne formy podpowiedzi, wskazań pomocniczych, uzupełniających, a jednocześnie poprawiające percepcję treści obrazowej. Wskazówkom tym nadano status drugiej opinii, weryfikowanej ostatecznie przez lekarza. Według powyższego schematu to radiolodzy korzystający wariantowo z komputerowych podpowiedzi, uwzględniając je bądź pomijając, zawsze podejmują końcowe decyzje diagnostyczne, ponosząc za nie pełną odpowiedzialność. Daje to efekt jedynie komputerowego wspomaganie pracy radiologów, nazywany ogólnie komputerowo wspomaganą diagnozą CAD (*computer-aided diagnosis*). Termin ten sformułowano po raz pierwszy w pracy G.S. Lodwicka z 1966 r. [11].

Pewien koncepcyjny spór pomiędzy ACD i CAD jest echem dyskusji, która rozgrzewa kolejne pokolenia naukowców od końca lat czterdziestych XX wieku, kiedy to komputery okazały się zdolne do wykonania niektórych z zadań właściwych jak dotąd tylko ludzkiej inteligencji.

Charakterystyczne właściwości narzędzi CAD, które zdecydowały o ich przydatności w pracy diagnostycznej, to przede wszystkim:

- skuteczne przetwarzanie informacji o ograniczonym poziomie trudności – w dużym stopniu niezawodna analiza danych na ograniczonym poziomie abstrakcji, służąca rozwiązaniu w sposób automatyczny lub półautomatyczny podstawowych zagadnień dotyczących procesu diagnozy, np. określenie modalności zobrazowania, wyznaczenie ogólnych cech danych obrazowych, segmentacja dominujących struktur z obliczeniem ich parametrów, liczbowa ocena progresji analizowanych zmian w kolejnych badaniach, detekcja zmian czy obiektów łatwiejszych w rozpoznaniu itp. Efektem tego jest redukcja prostych, naturalnych ludzkich błędów, wynikających z naturalnych ograniczeń, będących skutkiem m.in. braku automatyzmu i precyzyjnej powtarzalności działań diagnosty;
- użyteczność w przypadkach trudnych czy trudniejszych, przy braku pełnej informacji diagnostycznej, wobec mniejszej pewności radiologa oceniającego obrazy. Dostarczając dodatkowe informacje, ukazując efekty obliczeniowych analiz, potencjalnie zwiększa się możliwości właściwej interpretacji, rozszerza perspektywę dokonywanych ocen;
- komplementarność wskazań w stosunku do ocen radiologów; komputerowe podpowiedzi mają charakter uzupełniający prawidłowe interpretacje lekarzy, na zasadzie synergii kompetencji radiologów i możliwości algorytmiczno-obliczeniowych komputerów. Powoduje to, że nawet przy ograniczonej efektywności algorytmów można uzyskać pozytywne efekty wspomaganie. Miarą efektywności jest więc skuteczność diagnozy radiologów, korzystają-

cych z podpowiedzi generowanych przez narzędzia wspomagania;

- kompleksowość i specyfika stosowanych metod; polega przede wszystkim na uwzględnieniu w przyjętej metodologii opracowywania narzędzi zarówno określonej roli radiologa, jak i możliwie dokładnej oraz kompleksowej charakterystyki medycznych uwarunkowań podejmowanego problemu diagnostycznego. Prowadzi to do większej obiektywizacji procesu interpretacji badań obrazowych.

Ważnym elementem zmiany strategii działań w obszarze komputerowego wspomaganie diagnozy był wybór zasadniczych obszarów zastosowań systemów CAD, dobrze rokujących w kontekście realiów praktyki klinicznej. Przy tym wyborze kierowano się z jednej strony dużą wagą i skalą problemu medycznego, z drugiej zaś możliwościami algorytmów i metod obliczeniowych w kontekście ograniczeń uwarunkowaniami stosowanych metod obrazowania oraz formami manifestacji opisywanych zmian chorobowych.

Oba podejścia do zastosowań komputerów w obrazowej diagnostyce medycznej są obecne w prowadzonych badaniach, przy czym CAD znalazł zdecydowanie więcej potwierdzeń użyteczności klinicznej, owocując rozwiązaniami komercyjnymi, m.in. szeroko stosowanymi w diagnostyce mammograficznej. Niekiedy różnice pomiędzy ACD i CAD się zacierają, szczególnie na poziomie analiz obliczeniowych, opracowań algorytmicznych i teoretycznych podstaw stosowanych technologii. Wobec rosnącej niezawodności systemów CAD rodzą się sugestie wykorzystania uzyskanych rezultatów obliczeniowych jako początkowej diagnozy w tzw. preskriningu. Chodzi o skuteczne wyeliminowanie we wstępnej fazie badań przesiewowych tych przypadków, które nie zawierają żadnych zmian podejrzanych. Dzieje się to w sposób w pełni automatyczny. Radiolog przystępuje do opisu jedynie tych obrazów, które w ocenie komputerowej budzą jakiegokolwiek podejrzenia.

Uzasadniona wydaje się następująca hipoteza. Gdyby nawet, wskutek stale udoskonalanych metod komputerowej obróbki obrazów, udało się uzyskać wyraźnie większą poprawność wskazań komputerów w stosunku do trafności decyzji radiologów, to i tak wykorzystanie tych wskazań przez radiologów, przy zachowaniu odpowiedniej procedury, pozwoli osiągnąć jeszcze wyższą skuteczność diagnozy. Świadczą o tym chociażby wyniki eksperymentu, jakie uzyskano w pracy [12]. Wartość pola pod krzywą ROC (powszechnie uznana miarą weryfikacji skuteczności diagnozy), uzyskaną na podstawie decyzji radiologów, udało się zwiększyć o 5,8% metodą komputerowego wspomaganie diagnozy z automatycznym rozpoznaniem złośliwości guzków w płucach. Jednak wykorzystanie automatycznych wskazań przez radiologów przy podejmowaniu decyzji diagnostycznych dało dodatkowy wzrost o kolejne 3%. Wykorzystanie CAD do preskriningu, wiarygodne rezultaty uzyskane w automatycznej interpretacji wskazanych wcześniej zmian są tylko zdobywaniem kolejnych obszarów przedpola. Pozwala to wyręczyć radiologów, by ze zwiększoną siłą mogli podjąć walkę tam, gdzie żadna maszyna ich nie wyręczy.

Podstawowe definicje CAD

Rozwój koncepcji wspomaganie diagnozy doprowadził do następującego rozumienia podstawowych zagadnień z tego obszaru.

Komputerowo wspomaganie diagnoza (CAD) na podstawie badań obrazowych oznacza podejmowanie decyzji diagnostycznych przez radiologa, który wykorzystuje efekty działania komputerowych narzędzi wspomaganie. Narzędzia te mogą być stosowane na etapie analizy obrazów medycznych jako druga opinia w detekcji zmian, do opisu, oceny właściwości i interpretacji zaawansowania choroby (np. rozległość proce-

su rozrostowego) oraz przy podejmowaniu decyzji diagnostycznych.

Wyróżnia się kilka specjalizowanych odmian systemów CAD, przy czym podstawową formą takich systemów, zatwierdzoną do zastosowań klinicznych, jest system detekcji zmian podejrzanych lub regionów z podejrzeniem patologii. W terminologii angielskiej systemy te nazywane są CADE – od *Computer-Aided Detection*.

System CADE to zestaw metod automatycznej detekcji obszarów, struktur czy zmian podejrzanych w obrazie. Na podstawie obliczeniowej analizy rozkładu globalnych i lokalnych cech obrazowych wskazywane są miejsca o zwiększonej podatności na zmiany chorobowe, z możliwością podejrzeniem wystąpienia takiej zmiany. Miejsca te, wydzielone obiekty o określonej lokalizacji, podlegają w następnym etapie ocenie i interpretacji w kategoriach diagnostycznych.

Rozszerzenia podstawowej wersji CAD zmierzają w kierunku numerycznego opisu obszarów/zmian podejrzanych za pomocą zestawu różnicujących cech, które pozwalają na klasyfikację ROI (*Region of Interest* – obszar zainteresowania) w kategoriach diagnostycznych, najczęściej różnicowanie zmiany: złośliwa/lagodna. Podejmowane są także próby automatycznych określeń kategorii diagnostycznych, odpowiadających finalnym decyzjom radiologów (przykładowo w mammografii są to kategorie 0-5 według skali BI-RADS). Poniżej zdefiniowano kilka rodzajów tych rozszerzeń.

CADx to systemy interpretacji diagnostycznej wcześniej wskazanych przez radiologa lub wykrytych za pomocą CADE podejrzanych zmian. Są to bardziej zaawansowane metody weryfikujące i różnicujące zmiany chorobowe, zazwyczaj w kategoriach złośliwe/lagodne lub innych specyficznych dla danego badania, przy jednoczesnym określeniu stopnia złośliwości zmian (wartości prawdopodobieństwa złośliwości).

CAD2 to kompletny system detekcji i diagnozy z automatyczną oceną zmian w kategoriach diagnostycznych (złośliwy/lagodny/stopień złośliwości zmian); *de facto* jest to złożenie CADE i CADx.

CAD-CBIR to połączenie CADE służącego do wyznaczenia podejrzanych zmian (ROI) z systemem indeksowania i wyszukiwania obrazów po zawartości CBIR (*Content-Based Image Retrieval*)¹. Wskazane ROI stanowią zapytanie (przez przykład) do bazy obrazów referencyjnych z pełnym opisem klinicznym, potwierdzoną diagnozą; w odpowiedzi wyszukiwane są obrazy najbardziej podobne w sensie treści diagnostycznej – rodzaju patologii, cech patologii, ogólnych cech regionu itp. CBIR ułatwia diagnozę przypadków trudnych poprzez wyszukanie obrazów mających podobne zmiany podejrzane – o zbliżonych cechach wizualnych oraz obliczeniowych właściwościach tkanki, istotnych w rozpoznaniu patologii – o jednoznacznej, potwierdzonej interpretacji klinicznej. Przypadki podobne narzucają więc interpretację trudnej w rozpoznaniu zmiany; CBIR stanowi w tym rozwiązaniu alternatywny do CADx sposób realizacji fazy interpretacji diagnostycznej zmian.

ICAD to interaktywny system diagnozy, dopuszczający interakcję z radiologiem przy formułowaniu komputerowych wskazań diagnostycznych; mogą to być wskazania regionów zainteresowania do dalszej oceny w konwencji CADx, podpowiedzi służące optymalizacji automatycznej interpretacji zmian (rodzaj ICADx) lub formułowanie i korygowanie zapytań oraz weryfikacja odpowiedzi do bazy referencyjnej indeksowanej zawartością.

Kolejne rozszerzenia CAD służą większej integracji samej koncepcji wspomaganie diagnozy z możliwymi do wykorzystania technologiami teleinformatycznymi oraz metodami

¹ CBIR jest rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do typowych zapytań tekstowych w konwencji TBIR (*Text-Based Image Retrieval*), polegającej na wyszukiwaniu obiektów po opisach tekstowych, indeksujących obiekty bazy; CBIR bazuje na deskryptorach numerycznych uwzględniających semantykę opisywanych struktur (tzw. deskryptory semantyczne).

widzenia maszynowego, inteligencji obliczeniowej, teorii informacji, aproksymacji, rozpoznawania obrazów itp.

Komercjalizacja CAD

Pionierskie prace w tym kierunku rozpoczęto w Laboratorium Kurta Rossmanna na Uniwersytecie w Chicago na początku lat osiemdziesiątych. Podjęto próbę opracowania systemów detekcji oraz różnicującej diagnozy obrazów radiologicznych, przede wszystkim w zakresie:

- radiografii płuc – rozpoznanie guzków nowotworowych [13],
- mammografii – rozpoznanie klastrow mikrozwapnień oraz guzów sutka [14],
- angiografii – analiza zmian zwężeniowych oraz wyznaczanie przestrzennych struktur naczyniowych [15],
- radiografii kości – ilościowa ocena osteoporozy oraz ryzyka złamań [16].

W następnych latach ośrodek ten, uznawany dzisiaj za jeden z wiodących w rozwoju systemów CAD, określił trzy kierunki priorytetowe swoich badań nad wspomaganie diagnostyki obrazowej: nowotwory płuc, nowotwory sutka oraz choroby sercowo-naczyniowe. W pierwszej kolejności rozważano możliwość zastosowań w badaniach przesiewowych (skriningu) do detekcji stosunkowo niewielkiej liczby przypadków podejrzanych w dużym zbiorze badań bez znamion patologii.

Trzy zasadnicze idee przyświecające badaniom prowadzonym przez Laboratorium Kurta Rossmanna nad doskonaleniem systemów CAD to: zrozumienie procesów zachodzących w pracy radiologa opisującego badania, komercjalizacja rozwiązań znajdujących zastosowanie w praktyce klinicznej oraz promocja i doskonalenie narzędzi w skali globalnej [9].

Doświadczenia, związane z wieloletnimi badaniami, prowadzonymi w celu uzyskania możliwie dużej efektywności, a w dalszej kolejności integralności i wydajności narzędzi wspomaganie, pozwalają dodatkowo sformułować dwie istotne zasady pracy:

1. Zrozumienie fizjologicznych, morfologicznych oraz technologicznych uwarunkowań form manifestacji treści diagnostycznej w obrazach.
2. Różnicujące modelowanie semantyki obrazów metodami numerycznymi, przede wszystkim z wykorzystaniem wieloskalowych przekształceń charakteryzujących lokalne właściwości obrazów [17].

Poważne realizacje koncepcji CAD, mające szanse zastosowań klinicznych, przypadają na połowę lat dziewięćdziesiątych. Pierwszy prototyp CAD do mammografii opracowano w roku 1994. Stosowane metody dotyczyły przede wszystkim detekcji anormalności, pozostawiając lekarzom ich interpretację oraz ocenę w kategoriach diagnostycznych. Wyróżnikiem intensywnie rozwijanych dziś technologii wspomaganie diagnozy jest komplementarność komputerowych wskazań w stosunku do analiz i ocen radiologa w celu uzupełnienia interpretacji o dodatkowo wydobyte informacje, niedostępne dla zmysłów człowieka, oraz obiektywne, referencyjne zestawienie wszystkich istotnych danych, mogących mieć wpływ na ostateczne rozpoznanie (np. dotyczących progresji zmiany, liczbowych zależności opisujących morfologię struktur). Dążeniem twórców takich systemów jest połączenie kompetencji radiologów z obliczeniowymi możliwościami komputerów.

Pierwszym narzędziem CAD, które w 1998 r. uzyskało aprobatę US FDA (Food and Drug Administration – amerykański komitet standaryzacyjny dopuszczający urządzenia, narzędzia i procedury do zastosowań medycznych), był ImageChecker formy R2 Technology. Bazował on na skanowanych kliszach mammografów, znajdując skupiska mikrozwapnień oraz guzy. W kolejnych latach certyfikat FDA uzyskało kilka kolejnych systemów do mammografii, m.in.

SecondLook firmy CADx Medical Systems (2002 r.), MammoReader firmy iCAD (2002), KODAK Mammography Computer-Aided Detection System – zaproponowany przez Carestream Health do mammografii analogowej (2004). Doskonalone systemy miały coraz większą czułość i specyficzność automatycznych podpowiedzi obszarów podejrzanych, algorytmy dostosowano do coraz doskonalszych detektorów cyfrowych stosowanych w mammografach (ImageChecker do mammogramów cyfrowych zyskał akceptację FDA w 2001 r.). Wśród innych systemów komercyjnych dopuszczonych do zastosowań klinicznych wymienić można:

- w obszarze diagnostyki raka sutka: B-CAD firmy Medipattern do sonomammografii (FDA-2005) – detekcja i opis przede wszystkim guzów, systemy MRI-CAD: CADstream firmy Confirma, AuroraCAD firmy Aurora Imaging Technology, SpectraLook firmy iCAD;
- rentgenografia klatki piersiowej – detekcja i pomiary guzków: IQQA-Chest firmy EDDA Technologies/Philips (FDA – 2004), xLNA firmy Philips Medical Systems (wykrywa guzki o średnicy od 5 mm), Rapid Screen CAD firmy Riverain Medical (pierwszy system CAD do rentgenografii płuc zatwierdzony przez FDA w 2001 roku), Lung VCAR firmy GE Healthcare;
- tomografia komputerowa płuc: Syngo Lung CAD firmy Siemens Medical Solutions (zatwierdzony przez FDA, wykrywa guzki poniżej 3 mm), CAD-Lung firmy Median Technologies, CADLung firmy Medicsight, ImageChecker Lung CT firmy Hologic/R2 Technology (zatwierdzony przez FDA w 2001 r.);
- tomografia wątroby: IQQA-Liver firmy EDDA Technology;
- echokardiografia: Axis Auto EF CAD firmy Siemens Medical Solutions;
- kolonografia tomografii komputerowej: firma iCAD, Medicsight ColonCT firmy Medicsight, CAD firmy Philips Medical Systems, CAD Colon firmy iMED, CAD-Colon firmy Median Technologies;
- badania MR prostaty: VividLook firmy iCAD i wiele innych.

Przykładowo, efektywność narzędzi wspomaganie przesiewowej diagnostyki mammograficznej osiąga w niektórych testach czułość 98% (najwyższa w przypadku mikrozwapnień, nieco gorsza dla guzów, zaś zaburzenia architektury wykrywane są z czułością zwykle mniejszą niż 50%) kosztem nawet 2-3 wskazań fałszywych na przypadek. Czułość detekcji zmian przez radiologa rośnie w przypadku wykorzystywania narzędzi CAD o dwadzieścia kilka procent.

Jednak zwiększeniu czułości metody automatycznego wykrywania patologii w obrazach nie zawsze towarzyszy wzrost czułości metody diagnostycznej. Głównym powodem jest ograniczone zaufanie radiologów do automatycznych podpowiedzi, ze względu na pojawiające się wskazania fałszywe. Trwa więc poszukiwanie odpowiedniego sposobu wykorzystania koncepcji CAD w decyzjach diagnostycznych. Obok wielu optymistycznych wyników, wskazujących na wyraźną poprawę czułości badań diagnostycznych przy zachowaniu tolerowanej wartości specyficzności, opisywane są także rezultaty wnikliwych obserwacji przeprowadzonych na dużej grupie przypadków, które wskazują na brak statystycznie istotnej poprawy czułości przesiewowych badań diagnostycznych przy jednoczesnym obniżeniu swoistości podejmowanych decyzji [18]. Pojawiają się więc opinie, że problem klinicznej użyteczności CAD jest nadal otwarty.

Wyzwania CAD

Użyteczność udoskonalanych systemów CAD, wspomagających diagnostykę obrazową, dla entuzjastów inżynierii biome-

dycznej oraz zwolenników rozwiązywania ambitnych zadań metodami inteligencji obliczeniowej jest oczywista. W diagnostyce obrazów wysokiej rozdzielczości, bogatych w treść wolumenów danych obrazowych, zestawień bazodanowych historii choroby czy odniesień do referencyjnej bazy wzorców patologii, ludzka zdolność percepcji oraz właściwej oceny subtelnych rozproszonych, wielorakich i złożonych informacji staje się coraz bardziej ograniczona. Komputerowe wspomaganie wydaje się więc naturalną konsekwencją rozwoju diagnostyki obrazowej w dobie intensywnego rozwoju technologii teleinformatycznych oraz procedur inteligencji obliczeniowej.

Kluczowym warunkiem skutecznej interpretacji badań medycznych jest trafne rozpoznanie – odczytanie pełnej treści diagnostycznej poprzez zrozumienie całego przekazu obrazowego, w tym niekiedy nawet najdrobniejszych jego szczegółów. Potem następuje właściwa ocena tej treści oraz sformułowanie konkretnej decyzji. Przy skutecznym opracowaniu narzędzi KWODM (komputerowe wspomaganie obrazowej diagnostyki medycznej) na plan pierwszy wysunął się problem integracji cech wizualnych oraz obliczeniowych opisujących obrazy i ich fragmenty w kontekście odpowiednich znaczeń rozpoznanych obiektów, struktur, drobnych detali oraz synerгии tych znaczeń w postaci odczytanej treści diagnostycznej. Zwrócono uwagę na dobrze opisującą ten problem koncepcję rezonansu poznawczego w diagnostyce obrazowej [19, 20]. Tradycyjne pytanie stawiane w metodologii technik analizy obrazów: jak policzyć to, co widać, w przypadku dzisiejszego KWODM, coraz częściej przyjmuje formę odwrotną: jak zobaczyć i rozumieć to, co pojawia się w warstwie numerycznego opisu danych. Często pojawiają się rzeczy na tyle istotne, że wpływają w znaczącym stopniu na przekaz obrazu.

Komputerowo wspomagana diagnoza zakłada ograniczenia w zakresie odczytanej przez radiologa treści diagnostycznej, ale też w umiejętności właściwej oceny i interpretacji tej treści oraz przełożenia obserwacji, ocen i wniosków na odpowiednie kategorie finalnych ocen diagnostycznych i wybór zestawu właściwych działań, będących konsekwencją konkretnej oceny diagnostycznej. Na przykładzie diagnostyki mammograficznej są to kolejne problemy z detekcją wszystkich obiektów/obszarów podejrzanych i właściwą oceną cech tych obiektów oraz ich interpretacją w sensie określenia znaczenia diagnostycznego – dany zestaw cech struktury pozwala ją opisać najpierw jako określony obiekt, np. guz dobrze odgraniczony, potem zaś wnioskować na wyższym poziomie semantyki diagnostycznej, np. jako zmianę w przeważającym stopniu łagodną. Pozostaje jedynie przypisać określonej zmianie kategorii BI-RADS (*Breast Imaging Reporting and Data System*), np. trzecią, i zdecydować o ewentualnych następstwach wykonanego badania kontrolnego, np. o potrzebie powtórzenia badania mammograficznego za pół roku, bądź też wykonaniu w najbliższym czasie uzupełniającego badania sonomammografii.

Dowodem występujących w tym procesie opisu badań ograniczeń efektywności jest chociażby sama liczba popełnianych błędów rozpoznania patologii (raportowane w wielu rzetelnych publikacjach liczby wskazań fałszywych, zarówno ujemnych, jak i dodatnich). Powody mogą być różne, zarówno obiektywne, czyli niewynikające z ludzkiego błędu, jak i subiektywne, będące skutkiem pomyłki radiologa lub też subiektywizmu stosowanych kryteriów i stawianych granic decyzyjnych. Każdy z tych powodów jest przedmiotem analiz, w których poszukuje się możliwości poprawy poprzez wykorzystanie różnych form wspomagania komputerowego. Na każdym etapie procesu interpretacji badań obrazowych można stworzyć narzędzia, które odpowiednio stosowane, przy pełnym zrozumieniu ich potencjału i zakresu użyteczności, mogą służyć redukcji wspomnianych ograniczeń, większej obiektywizacji przynajmniej niektórych etapów. Pozwoli to zwiększyć zgodność ocen radiologów oraz zredukować konieczny nakład ich pracy, ograniczając go do decydujących elementów procesu diagnostycznego.

Poprawę skuteczności diagnozy uzyskuje się poprzez uwydatnianie, ekstrakcję treści diagnostycznej oraz wsparcie procesów właściwej oceny istotnych zmian, ale też redukcję maskujących treść artefaktów i kompensację ograniczeń metody obrazowania lub specyficznych cech pacjenta. Dalej koncepcja CAD koncentruje się na automatycznych wskazaniach wszystkich podejrzanych zmian, a następnie liczbowo opisując właściwości obiektów zainteresowania, pomaga w ich trafnej ocenie. Zrozumienie charakteru obiektów, odkrycie na podstawie obrazu natury obserwowanych zmian, pozwoli przypisać im odpowiednie znaczenie w opisie diagnostycznym analizowanej sceny. Wspierając ten proces, można generować szacunkowe sugestie dotyczące chorobowego charakteru interpretowanych treści. Automatyczne wyznaczenie położenia, kształtu, także innych parametrów charakteryzujących badane zmiany (np. pole powierzchni, długość konturu, deskryptor tekstury obiektu) uzasadnia wynik klasyfikacji i pozwala lekarzowi na własną interpretację liczbowo opisanych obiektów. Także na ostatnim etapie formułowania decyzji diagnostycznych i dalszych procedur diagnozy czy terapii możliwe jest korzystanie przez radiologa z podpowiedzi w postaci sugerowanych reguł decyzyjnych czy też efektów automatycznej klasyfikacji całej dostępnej cyfrowej informacji. Możliwe jest też zaproponowanie określonego protokołu badań diagnostycznych, wykorzystanie narzędzi informatycznych wspierających tworzenie protokołu badania, śledzących na bieżąco konsekwencję i logiczną spójność tworzonego opisu badania, sugerujących na kolejnym etapie oceny skorzystanie z innych możliwości technologii teleinformatycznych (jak np. z podpowiedzi przeszukiwanej bazy referencyjnej) [21].

Ograniczona skuteczność diagnostyki obrazowej

Nawet najwięksi profesjonaliści w medycynie, a także w radiologii popełniają błędy. Pół wieku temu L.H. Garland pisał, że wielu klinicystów wierzy, że ich obserwacje są trafne, a przez to są nieświadomi potrzeby redukcji liczby popełnianych błędów [22]. Radził, że warto nie tylko rozpoznać własne błędy, ale warto się przede wszystkim do nich przyznać. Garland wskazywał na znaczny poziom błędów w diagnostyce radiologicznej. Według przeprowadzonych badań liczba błędów fałszywie ujemnych (pominięte patologie) w ocenie radiografii płuc sięgnęła 30% w odniesieniu do wszystkich badań z patologią, przy liczbie błędów fałszywie dodatnich (nadrozpoznań) około 2% w odniesieniu do wszystkich badań bez patologii. Brak zgodności opinii radiologów w detekcji gruźlicy płuc na podstawie badań radiograficznych oszacował na około 30%, podczas gdy zróżnicowanie ocen własnych (to samo badanie w ocenie wcześniejszej i późniejszej) sięgało 21%. Wzywał do wyjaśnienia przyczyn występujących błędów oraz podjęcia prób ich eliminacji.

Postulaty Garlanda odbijały się echem w późniejszej literaturze, ale nie przyniosły oczekiwanych efektów. Niestety, okazało się, że pięćdziesiąt lat to za mało, by zrealizować postawione przez Garlanda cele – szacowany dziś poziom błędów diagnostycznych zasadniczo nie uległ zmianie [23, 24]. Rozwiązywaniem problemu redukcji błędów były także próby opracowania efektywnych metod analizy obrazów medycznych, a w późniejszym okresie – narzędzi CAD. Stosowanie skomercjalizowanych rozwiązań na coraz większą skalę od kilku, a niekiedy nawet kilkunastu lat nie przyniosło jak dotąd przełomowych rezultatów. Formułowane w pracy wyzwania oraz wnioski z dotychczasowych doświadczeń są więc nadal bardzo aktualne.

Ograniczenia CAD

Metody analizy obrazów medycznych oraz próby komputerowego wsparcia procesu diagnostyki obrazowej przyniosły

wiele pozytywnych rezultatów. Z analizy wielu doniesień wynika ogólna tendencja, że w różnych diagnostycznych zastosowaniach CAD charakteryzuje się większą czułością interpretacji obrazów i mniejszą zmiennością efektów interpretacji kosztem niekiedy nieznacznej utraty swoistości podejmowanych decyzji. Wykazano redukcję liczby popełnianych błędów interpretacji, w niemałej liczbie przypadków znacząca.

Jednak rzeczywiste przełożenie tych wyników na realną, zauważalną redukcję poziomu błędów interpretacji w warunkach klinicznych nie jest jak dotąd oczywiste. Pojawiają się wyniki analiz, cząstkowe obserwacje i opinie radiologów, komentarze i wnioski, wskazujące na ograniczoną użyteczność metod komputerowych albo wręcz ich nieprzydatność. Przykładowo, wnikliwe i szeroko zakrojone badania nad stosowaniem narzędzi CAD w przesiewowych badaniach mammograficznych raka sutka, historycznie pierwszym, najbardziej zwycięskim polu zastosowań, doprowadziły do negatywnej oceny ich przydatności klinicznej [18]. Ocena pracy diagnostycznej w 43 ośrodkach w ciągu blisko 5 lat (1998-2002), gdzie zinterpretowano blisko 430 tys. mammogramów, wykazała brak statystycznie istotnej poprawy czułości badań przesiewowych, przy jednoczesnym obniżeniu swoistości podejmowanych decyzji. Ogólna trafność interpretacji badań przesiewowych, mierzona wartością pola pod krzywą ROC, spadła w sposób istotny statystycznie ($p = 0,005$).

Realna ocena wpływu metod komputerowych na poprawę interpretacji obrazów jest zagadnieniem złożonym, trudnym, prowadzącym do niejednoznacznych wniosków ogólnych. Być może jest jeszcze za wcześnie, by w sposób wiążący przeanalizować dostępne dane empiryczne i sformułować wiarygodne wnioski. Nie ma obserwacji prowadzonych w odpowiedniej skali i zakresie zastosowań, by generalnie zweryfikować CAD jako metodę przynoszącą pozytywny efekt kliniczny. Właściwie jedynie w przypadku mammografii narzędzia CAD stosowane są konsekwentnie od ponad 10 lat, w coraz większej skali i zakresie. Jak wspomniano, trudno jednak i w tym przypadku rozstrzygnąć jednoznacznie ich rolę i znaczenie.

Realną ocenę użyteczności metod CAD utrudniają różne czynniki. Podstawowa przeszkoda związana jest z samą koncepcją CAD, alternatywą w stosunku do ACD, bazującej na zastąpieniu kluczowej roli obserwatora interpretującego badania obrazowe automatycznym generowaniem wniosków z analizy komputerowej danych dostępnych w diagnozie. Efektywność ACD można znacznie prościej zweryfikować, oceniając równoległe efekty działań algorytmów i porównując je ze skutecznością pracy radiologów.

CAD zakłada wspomaganie pracy radiologa, który w sposób podmiotowy formułuje końcowe decyzje diagnostyczne, weryfikując komputerowe podpowiedzi. Nie sposób więc zbadać przydatności CAD bez udziału człowieka, a zasadniczy wpływ czynnika ludzkiego na finalne efekty stanowi główną przeszkodę w jednoznacznej weryfikacji komputerowych narzędzi wspomagania. Udział obserwatora w tak złożonym procesie, jakim jest interpretacja obrazów, wymyka się wszelkim modelom, formalizmom, szacunkom. Mimo podejmowanych od dziesięcioleci prób, nie sposób przewidzieć i opisać zmienności ludzkich zachowań w procesie diagnostycznym, nie mówiąc już o pełnym ich zrozumieniu i kontrolowaniu [32].

Nowe technologie, w tym komputerowe, zasadniczo nie rozwiązują problemu błędów percepcji, ale niejako je przemieszczają w inny, nowy obszar nieznannej dziedziny, gdzie mogą pojawić się nowe, nawet liczniejsze pomyłki [24]. Likwidacji dotychczasowych przyczyn błędów towarzyszy pojawienie się nowych źródeł błędów, a proces ten wydaje się nieuchronny. Korzystanie z nowych, doskonalszych narzędzi nie powoduje, że człowiek staje się doskonały.

Podsumowanie

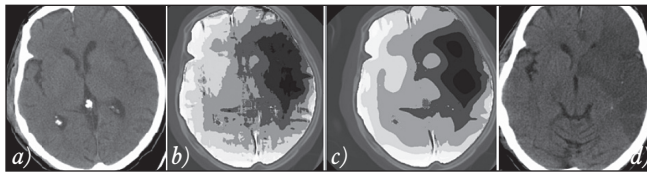
Wyzwania, stojące przed twórcami systemów CAD, są duże. Sukcesem są przede wszystkim rozwiązania komercyjne, klinicznie przydatne, coraz powszechniej stosowane. Wraz z rozwojem technologii teleinformatycznych powstają nowe możliwości aplikacji mobilnych, globalnych, rozproszonych. Pomimo ograniczeń, rozwój obliczeniowej inteligencji rodzi nowe rozwiązania algorytmiczne i implementacyjne itd. Przedstawione w artykule rozważania są próbą rekapitulacji dotychczasowych doświadczeń, w tym także doświadczeń własnych. Zawarte sugestie mają charakter ogólny i nie gwarantują sukcesu w rozwiązywaniu każdego problemu metodą CAD. Są przede wszystkim próbą postawienia orientacyjnych drogowskazów, by pójść dalej.

Pojawia się paradoks natury ogólnej: nie sposób komputerowo doścignąć ludzkiej natury, która z natury jest omylna; mimo że omylna, przewyższa jednak zdecydowanie nieomylny komputer. Twórcy systemów CAD wydają się jednak wierzyć, że doskonalenie narzędzi udoskonala człowieka w jego pracy jako diagnosty.

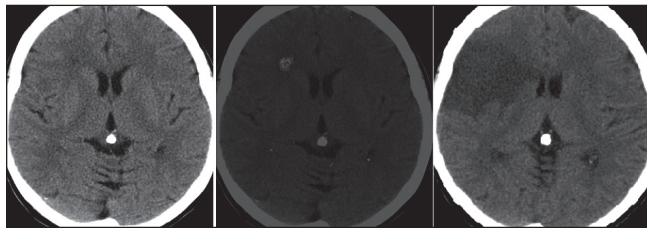
Dość paradoksalnie, zamiarem stosowania technik komputerowych jest humanizacja medycyny, a nie odczłowieczona automatyzacja. Rutyna doświadczonych specjalistów i brak doświadczenia młodych lekarzy, przyzwyczajenie, monotonia usypiająca czujne postrzeganie, zwyczajne zmęczenie, znużenie, zmniejszają skuteczność procedur medycznych. Celem komputerowego wspomagania diagnostyki obrazowej jest zapewnienie efektywnych narzędzi, które pozwolą w większym stopniu wykorzystać niezastąpiony potencjał specjalisty. Można to uzyskać poprzez:

- wzmocnienie ludzkich zdolności oceny poprzez zwiększenie czułości postrzegania, wskazywanie wszystkich cech odbiegających od normy, bardziej wyrazistą prezentację cech wizualnych, selekcję treści, dodatkową wizualizację rozkładu cech, które mają kluczowe znaczenie diagnostyczne itp. – rys. 2;
- koncentrację zaangażowania specjalistów na rozwiązywaniu kluczowych problemów interpretacji obrazów poprzez oszczędne dysponowanie czasem ich pracy, teleinformatyczny automatyzm w dostarczaniu wszystkich niezbędnych w ocenie informacji oraz ułatwienie zapisu efektów interpretacji (przyjazne interfejsy użytkownika ułatwiające formalizację ocen i formułowanie wskazań, generację raportów, kontrolę protokołu badań itp.);
- wspomaganie procesu interpretacji zmian i cech poprzez automatyczne wskazania obszarów podejrzanych, ekstrakcję numerycznych deskryptorów i zobiektywizowany opis przypadków w kategoriach diagnostycznych, z całym dostępnym ontologicznym kontekstem uporządkowanych zasobów wiedzy – zobacz przykład na rys. 3;
- pomoc na etapie podejmowania decyzji diagnostycznych poprzez dostarczenie zintegrowanych sugestii, bazujących na mechanizmach wnioskowania dostępnych ontologii dziedzinowych, weryfikujących wskazany zasób treści oraz wynik jej interpretacji, a także klasyfikatorach kategorii diagnostycznej, analizie referencyjnych przypadków diagnostycznie podobnych itp.

Radiolog, oceniając badanie i formułując diagnozę, wykonuje bardzo trudne i złożone zadanie, które tylko w części podlega formalizacji obowiązujących reguł. Warto szukać odpowiedzi na pytania: jak przebiega proces analizy obrazu, w jakiej kolejności, na ile należy uwzględnić określony zestaw cech ogólnych i szczególnych, dlaczego pomijane są niektóre anormalności, co decyduje o nadinterpretacji konkretnej struktury, jak odróżnić zmianę złośliwą od łagodnej, gdzie postawić subiektywną granicę wzorca zmiany itp. W ocenie wykorzystywane są niekiedy własne doświadczenia lekarza,



Rys. 2 Przykład zwiększenia czułości postrzegania zmian ukrytych poprzez wizualizację kluczowych cech diagnostycznych, potwierdzonej w wielu testach klinicznych [45]. Od lewej do prawej kolejno: a) warstwa wczesnego badania TK osoby z objawami udaru, bez widocznych symptomów choroby, b-c) dwa obrazy, będące efektem przetwarzania badania wczesnego, z wydobytym obszarem hipodensyjnym (czarna plama), świadczącym o występowaniu udaru niedokrwiennego, d) follow-up tego pacjenta, z widocznymi objawami udaru (opracowanie własne – metoda szerzej opisana w [17])



Rys. 3 Przykładowe wskazania wspomagające interpretację wczesnych badań udarowych, bazujące na analizie cech teksturowych tkanki mózgowej. Od lewej: wybrana warstwa badania wczesnego, automatyczne wskazanie obszarów podejrzanych (na zielono) oraz rozpoznanych obszarów hipodensyjnych (na czerwono) oraz follow-up potwierdzający wystawienie udaru. Rys. 3 w kolorze – str. 253

dające specyficzne skojarzenia, poza tym intuicja, heurystyka w ocenie nietypowych cech obrazowych itd. Warto to zrozumieć, by trafniej formułować podpowiedzi.

Sukcesem jest zastosowanie systemu CAD w codziennej praktyce klinicznej, potwierdzenie jego użyteczności w powszechnym wykorzystaniu klinicznym. Pomyślne testy wskazujące na konkretne korzyści zastosowań, certyfikacja, także komercjalizacja rozwiązań czy patentowa ochrona własności intelektualnej pozwalają na możliwie szerokie wykorzystanie potencjału tych metod. Nie mogą one jednak ograniczać otwartości prowadzonych badań.

Niezwykle ważna jest bowiem współpraca, wymiana doświadczeń, gromadzenie wzorców patologii w skali globalnej, wykorzystywanie najnowszych technologii szybkiego dostępu oraz wymiany danych obrazowych, wyszukiwanie po treści danych itp. Problem jest na tyle trudny i złożony, że wymaga wysiłków i współpracy wielu ośrodków, integracji działań wyspecjalizowanych zespołów interdyscyplinarnych, wydobywania wiedzy rozproszonej w skali całego świata, zarówno medycznej, jak i technicznej. Potrzebne są referencyjne bazy danych – statystycznie istotne i reprezentatywne, dostępność implementacji narzędzi z fazy badawczej, warunki realnej analizy porównawczej algorytmów, metod i koncepcji.

Perspektywy rozwoju CAD to przede wszystkim określone zasady, przychylne środowisko współpracy, otwartość i integracja, dająca na różnych poziomach efekt synergii medycyny i techniki. ■

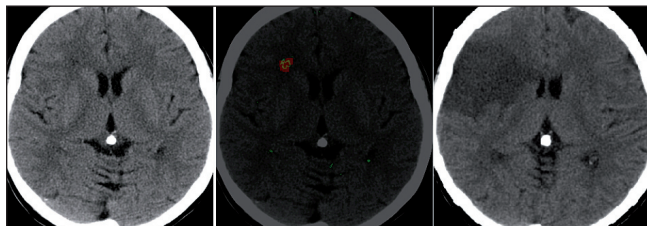
Literatura

1. B.J. Erickson, B. Bartholmai: *Computer-aided detection and diagnosis at the start of the third millennium*, J Dig Imag, vol. 15(2), 2002, s. 59-68.
2. G. Ostrek, A. Przelaskowski, A. Duplaga, A. Ruczyńska: *Perception enhancement of bronchoscopic video, advances in soft computing, information technologies in biomedicine*, Springer 2010, in press.
3. G.S. Lodwick, C.L. Haun, W.E. Smith et al.: *Computer diagnosis of primary bone tumor*, Radiology, vol. 80, 1963, 273-275.
4. H. Becker, W. Nettleton, P. Meyers, J. Sweeney, C. Nice Jr.: *Digital computer determination of a medical diagnostic index directly from chest X-ray images*, IEEE Trans Biomed Eng BME-11, 1964, s. 67-72.
5. P.H. Myers, C.M. Nice, H.C. Becker i in.: *Automated computer analysis of radiographic images*, Radiology, vol. 83, 1964, s. 1029-1034.
6. R.P. Kruger, J.R. Towns, D.L. Hall, i in.: *Automated radiographic diagnosis via feature extraction and classification of cardiac size and shapedescriptors*, IEEE Trans Biomed Eng BME-19(3), 1972, s. 174-186.
7. R.P. Kruger, W.B. Thompson, A.F. Turner: *Computer diagnosis of pneumoconiosis*, IEEE Trans Syst Man Cybernetics SMC-4(1), 1974, s. 44-47.
8. R. Conners, C. Harlow, S. Dwyer: *Radiographic image analysis: past and present*, In Proc. 6th. Int. Conf. Pattern Recognition, Munich, Germany, 1982, s. 1152-1168.
9. K. Doi: *Computer-aided diagnosis in medical imaging: Historical review, current status and future potential*, Comp Med Imag Graph, vol. 31, 2007, s. 198-211.
10. R. Engle: *Attempts to use computers as diagnostic aids in medical decision making: A thirty-year experience*, In Perspectives Biol. Med., vol. 35, 1992, s. 207-217.
11. G.S. Lodwick: *Computer-aided diagnosis in radiology. A research plan*. Invest Radiol., vol. 1(1), 1966, s. 72-80.
12. F. Li, M. Aoyama, J. Shiraishi i in.: *Radiologists' performance for differentiating benign from malignant lung nodules on high-resolution CT by using computer-estimated likelihood of malignancy*, AJR, vol. 183, 2004, s. 1209-1215.
13. M.L. Giger, K. Doi, H. MacMahon: *Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography*, Med Phys, vol. 15, 1988, s. 158-166.
14. H.P. Chan, K. Doi, S. Galhotra, C.J. Vyborny, H. MacMahon, P.M. Jokich: *Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography*, Med Phys, vol. 14, 1987, s. 538-548.
15. K.R. Hoffmann, K. Doi, H.P. Chan, L. Fencil, H. Fujita, A. Muraki: *Automated tracking of the vascular tree in DSA images using a double-square-box region-of-search algorithm*, Proc SPIE, vol. 626, 1986, s. 326-333.
16. P. Caligiuri, M.L. Giger, M. Favus, H. Jia, K. Doi, L.B. Dixon: *Computerized radiographic analysis of osteoporosis*, Radiology, vol. 186, 1993, s. 471-474.
17. A. Przelaskowski, K. Sklina, B. Ciszek: *Modelowanie subtelnych zmian chorobowych mózgowia wspomagające neurodiagnostykę*, [w:] *Neurocybernetyka teoretyczna*, pod red. R. Tadeusiewicza, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2009, s. 215-268.
18. J.J. Fenton, S.H. Taplin, P.A. Carney i in.: *Influence of computer-aided detection on performance of screening mammography*, N Engl J Med, vol. 356(14), 2007, s. 1399-1409.
19. R. Tadeusiewicz, M.R. Ogiela: *Medical image understanding technology*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2004.
20. M.R. Ogiela, R. Tadeusiewicz: *Modern computational intelligence methods for the interpretation of medical images, Studies in Computational Intelligence 84*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2008.
21. J.H.W. Pexman, P.A. Barber, M.D. Hill i in.: *Use of the Alberta stroke program early CT score (ASPECTS) for assessing CT scans in patients with acute stroke*, Am J Neuroradiol, vol. 22, 2001, s. 1534-1542.
22. L.H. Garland: *Studies on the accuracy of diagnostic procedures*, Am J Roentgenology, vol. 82, 1959, s. 25-38.



23. D.L. Renfrew, E.A. Franken i in.: *Error in radiology: classification and lessons in 182 cases presented at a problem case conference*, Radiology, vol. 183, 1992, s. 145-150.
24. L. Berlin: *Accuracy of diagnostic procedures: has it improved over the past five decades?*, Am J Roentgenology, vol. 188, 2007, s. 1173-1178.
25. R.L. Siegle, E.M. Baram i in.: *Rates of disagreement in imaging interpretation in a group of community hospitals*, Acad Radiol, vol. 5, 1998, s. 148-154.
26. J.P. Borgstede, R.S. Lewis, M. Bhargavan, J.H. Sunshine: *RADPEER quality assurance program: a multifacility study of interpretive disagreement rates*, J Am Coll Radiol, vol. 1, 2004, s. 59-65.
27. L. Berlin: *Radiologic errors and malpractice: a blurry distinction*, Am J Roentgenology, vol. 189, 2007, s. 517-522.
28. J.R. Muhm, W.E. Miller i in.: *Lung cancer detected during a screening program using four-month chest radiographs*, Radiology, vol. 148, 1983, s. 609-615.
29. J.A. Harvey, L.L. Fajardo, C.A. Innis: *Previous mammograms in patients with impalpable breast carcinoma: retrospective vs. blinded interpretation*, Am J Roentgenology, vol. 161, 1993, s. 1167-1172.
30. K.S. Berbaum: *Difficulty of judging retrospectively whether a diagnosis has been "missed"*, Radiology, vol. 194, 1995, s. 582-583.
31. C. Caldwell, E.R. Seamone: *Excusable neglect in malpractice suits against radiologists: a proposed jury instruction to recognize the human condition*, Ann Hlth Law, vol. 16, 2007, s. 43-77.
32. P. Goddard, A. Leslie i in.: *Error in radiology*, Brit J Radiol, vol. 74, 2001, s. 949-951.
33. H.L. Kundel: *Perception errors in chest radiography*, Semin Respir Med, vol. 10, 1989, s. 203-210.
34. J.W. Oestmann, R. Greene i in.: *Lung lesions: correlation between viewing time and detection*, Radiology, vol. 166, 1988, s. 451-453.
35. L. Kan, I.A. Olivotto i in.: *Standardized abnormal interpretation and cancer detection ratios to assess reading volume and reader performance in a breast screening program*, Radiology, vol. 215, 2000, s. 563-567.
36. C.T. Loy, L. Irwig: *Accuracy of diagnostic tests read with and without clinical information: a systematic review*, JAMA, vol. 292, 2004, s. 1602-1608.
37. U.O. Aideyan, K. Berbaum, W.L. Smith: *Influence of prior radiologic information on the interpretation of radiographic examinations*, Acad Radiol, vol. 2, 1995, s. 205-208.
38. B.J. Hillman, S.J. Hessel, R.G. Swenson, P.G. Herman: *Improving diagnostic accuracy: a comparison of interactive and Delphi consultations*, Invest Radiol, vol. 12(2), 1977, s. 112-115.
39. B.J. Hillman, R.G. Swenson i in.: *The value of consultation among radiologists*, Am J Roentgenology, vol. 127, 1976, s. 807-809.
40. E.A. Franken, K.S. Berbaum: *Subspecialty radiology consultation by interactive telemedicine*, J Telemed Telecare, vol. 2, 1996, s. 35-41.
41. D.B. Kopans: *Double reading*, Radiol Clin North Am, vol. 38, 2000, s. 719-724.
42. L.E. Duijm, J.H. Groenewoud, J.H. Hendriks, H.J. de Koning: *Independent double reading of screening mammograms in the Netherlands: effect of arbitration following reader disagreements*, Radiology, vol. 231, 2004, s. 564-570.
43. F.M. Hall: *Opinions about mammographic double reading*, Am J Roentgenol, vol. 168, 1997, s. 846.
44. M.J. Smith: *Error and variation in diagnostic radiology*, [w:] C.C. Thomas: *Springfield*, vol. 3, 1967.
45. A. Przelaskowski, J. Walecki, K. Sklinda, G. Ostrek: *Improving diagnostic value of CT examinations in hyperacute ischemic stroke*, Acta Neurochirurgica Supplementum, vol. 106, 2009, s. 165-170.

otrzymano / received: 12.12.2009 r.
zaakceptowano / accepted: 04.05.2010 r.



Rys. 3 Przykładowe wskazania wspomagające interpretację wczesnych badań udarowych, bazujące na analizie cech teksturowych tkanki mózgowia. Od lewej: wybrana warstwa badania wczesnego, automatyczne wskazanie obszarów podejrzanych (na zielono) oraz rozpoznanych obszarów hipodensyjnych (na czerwono) oraz follow-up potwierdzający wystawienie udaru

