

Jak informatyka pomaga zajrzeć do wnętrza ludzkiego ciała

Ryszard Tadeusiewicz

Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica

Kraków

rtad@agh.edu.pl



Streszczenie

Obok wielu zadań, jakie dziś spełniają komputery w różnych dziedzinach techniki i gospodarki, mogą one także rejestrować, prezentować i analizować sygnały z wnętrza ludzkiego ciała. Dawniej kontakt lekarza z organizmem pacjenta kończył się na powierzchni skóry. Można było chorego obserwować i badać, ale to, co się działo we wnętrzu jego ciała pozostawało tajemnicą. Dziś tomografia komputerowa, metody ultradźwiękowe, obrazowanie magnetyczne, techniki izotopowe, termowizja i wiele innych technik medycznych pozwalają zwiedzać wnętrze ciała człowieka tak, jak się ogląda wnętrze budynku. Możemy wejść, gdzie chcemy, widzieć to, co chcemy i pomagać ludziom przezwyciężać choroby tak skutecznie, jak nigdy dotąd. A wszystko dzięki temu, że nauczyliśmy się zamieniać różne sygnały na liczby, a liczby na obrazy.

Na wykładzie przedstawione będą różne urządzenia służące do pozyskiwania obrazów medycznych oraz pokazane będą efekty komputerowej obróbki tych obrazów. Omówiona będzie także możliwość automatycznego rozpoznawania obrazów przez komputer wraz z dyskusją, jaką rolę taki system automatycznego rozpoznawania powinien pełnić: Czy ma zastępować lekarza, czy być tylko jego inteligentnym doradcą?

Spis treści

1. Cyfrowa reprezentacja obrazów 113

2. Komputerowe metody obrazowania medycznego 117

3. Komputerowa obróbka obrazów rentgenowskich 121

4. Automatyczne rozpoznawanie obrazów medycznych 124

Zakończenie 128

Literatura 129

1 CYFROWA REPREZENTACJA OBRAZÓW

Komputery są dziś powszechnie stosowane do przechowywania, przetwarzania i przesyłania także obrazów. Napisano „także”, bo obraz nie jest naturalnym obiektem, którym komputer może się posługiwać ze względu na swoją budowę i pierwotne przeznaczenie. Komputery miały operować tylko liczbami i do tego przystosowany jest ich element przetwarzający informacje (mikroprocesor), pamięć oraz urządzenia komunikacyjne. Te stwierdzenia wydają się oczywiste, ale często uczniowie nie zastanawiają się nad tym i warto im to od razu na początku uświadomić.

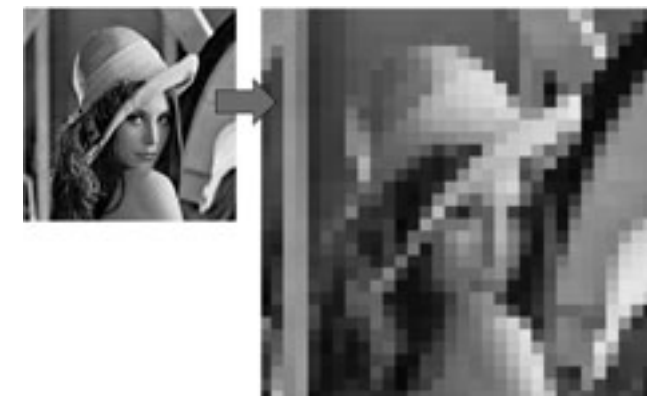
To, że dzisiaj komputery służą również do pisania tekstów albo odtwarzania muzyki wynika z faktu, że teksty i sygnały (na przykład dźwięki) mogą być zamienione na serie liczb. Komputer operuje liczbami, a my widzimy litery na ekranie albo słyszymy ulubioną melodię. W taki sam sposób „oswojono” komputery z obrazami, które też są zamieniane na liczby, a zbiorowość tych liczb po odpowiednim przedstawieniu może być podziwiana jako rysunek albo cyfrowe zdjęcie.

W systemie komputerowym obraz jest zawsze reprezentowany w postaci **próbkiwanej** (to znaczy jasność albo barwa są podawane tylko w niektórych punktach) oraz **skwantowanej** (czyli jego jasność oraz barwa może przyjmować wyłącznie niektóre, z góry zadane wartości – rys. 1).



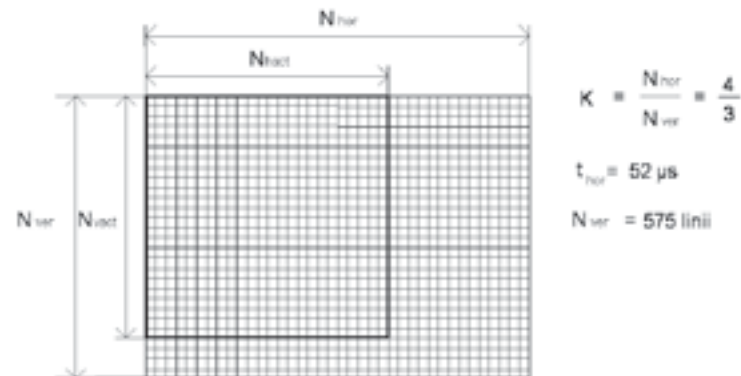
Rysunek 1. Sposób tworzenia obrazu cyfrowego poprzez dyskretyzację i kwantyzację

Niewątpliwie technika obrazów cyfrowych jest bardzo zaawansowana i ma bardzo duże znaczenie, niemniej trzeba pamiętać, że obraz cyfrowy jest zawsze zubożony w stosunku do obrazu analogowego, z którego powstał, chociaż to zubożenie może uczynić dowolnie małym. Porównanie obrazu analogowego i cyfrowego (celowo bardzo niedoskonałego) można obejrzeć na rysunku 2. Na tej ilustracji widać (w sposób karykaturalnie wyolbrzymiony) różnicę między obrazem analogowym i obrazem cyfrowym.



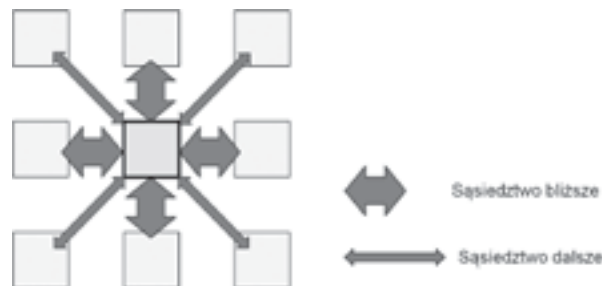
Rysunek 2. Obraz analogowy i cyfrowy [źródło: 4]

Poznajmy teraz kilka szczegółów na temat cyfrowej reprezentacji obrazów. Przy każdej cyfrowej reprezentacji obrazu jego powierzchnia dzielona jest na rozłączne obszary, zwane **pikselami**. Najczęściej stosowany jest układ pikseli prostokątny lub kwadratowy (rys. 3).

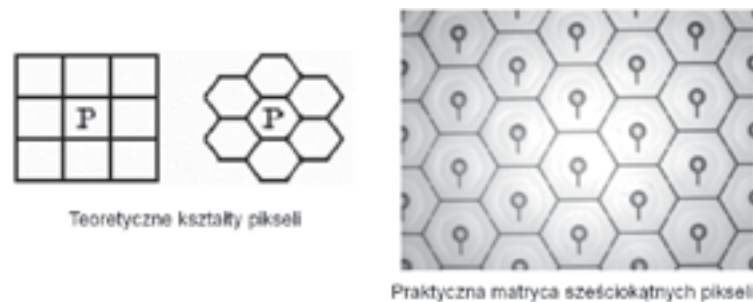


Rysunek 3. Prostokątny lub kwadratowy układ pikseli [źródło: 4]

Przy pikselach kwadratowych lub prostokątnych jest jednak pewien problem. Otóż podczas operacji wykonywanych przez komputer na obrazie trzeba uwzględnić, że dystans od danego piksela do pikseli sąsiednich zależy od tego, czy jest mierzony w pionie, w poziomie czy po przekątnych. Na obrazie występuje więc dwojaki rodzaj sąsiedztwo: bliższe i dalsze (rys. 4). Sprawia to kłopot przy wielu obliczeniach, dlatego w użyciu jest także niekiedy podział obrazu (raster), przy którym każdy piksel jest heksagonalny (sześciokątny) – rysunek 5. Raster z sześciokątnymi pikselami gwarantuje, że wszystkie piksele sąsiednie są tak samo odległe od piksela centralnego. Mimo licznych zalet nie jest on jednak szczególnie popularny.

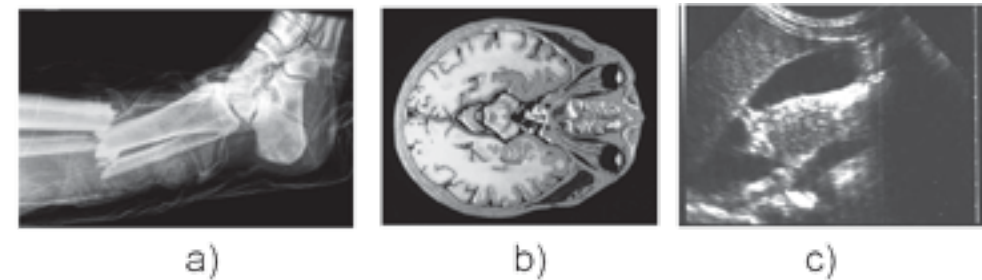


Rysunek 4. Dwojaki rodzaj sąsiedztwo: bliższe i dalsze przy pikselach kwadratowych



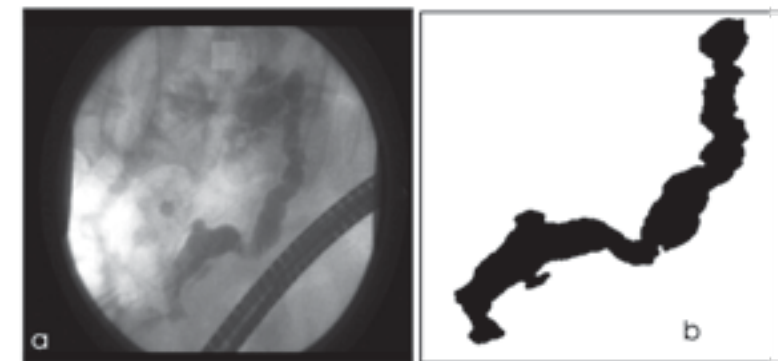
Rysunek 5. Wykorzystanie sześciokątnych pikseli [źródło: 4]

Niniejsze opracowanie dotyczy obrazów medycznych. Istnieje ich wiele rodzajów, ale dla potrzeb tego opracowania wyróżniamy trzy typy cyfrowych obrazów medycznych (rys. 6): a) rentgenogram (z tradycyjnego aparatu rentgenowskiego wykorzystującego promienie X przenikające przez ciało człowieka), b) tomogram (z tomografu komputerowego wykorzystującego zjawisko rezonansu magnetycznego), c) ultrasonogram (z ultrasonografu sondującego wnętrze ciała człowieka wiązkami ultradźwięków). Każdy z nich powstaje w wyniku wykorzystania innego zjawiska fizycznego, inaczej wygląda i wymaga nieco odmiennych sposobów reprezentacji w pamięci komputera oraz innych metod przetwarzania i analizy.



Rysunek 6. Trzy typy cyfrowych obrazów medycznych

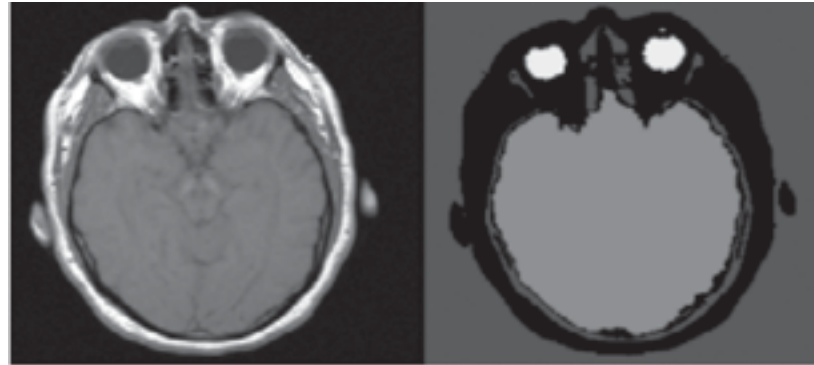
Obrazy (zwłaszcza medyczne) zawierają zwykle bardzo wiele szczegółów, co utrudnia ich interpretację (zwłaszcza gdy ta interpretacja ma być przeprowadzana automatycznie przez komputer). Dlatego obok obrazów prezentujących narządy wnętrza ciała człowieka w pełnej skali stopni szarości (lub rzadziej barw) stosuje się tak zwane obrazy binarne. Na **obrazach binarnych** do zapisu wartości wszystkich pikseli wystarczą wyłącznie symbole 0 i 1. Obrazy binarne są wykorzystywane przy zaawansowanych analizach, gdy obraz został już wstępnie przetworzony do takiej postaci, że można na nim wyróżnić punkty należące do rozważanego obiektu (tym przypisuje się wartość 1) oraz punkty traktowane jako nieistotne elementy (tym przypisuje się wartość 0). Wygląd przykładowego obrazu binarnego przedstawiono na rysunku 7.



Rysunek 7. Wygląd obrazu binarnego (b) oraz obrazu oryginalnego, z którego ten obraz binarny wydobyto (a). Obraz przedstawia wypełniony kontrastem przewód trzustkowy uwidoczniony w badaniu rentgenowskim nazywanym ERCP

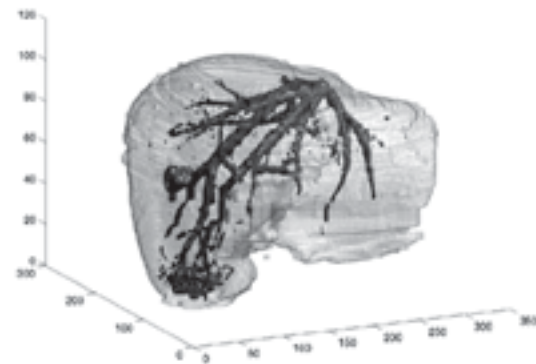
Przy **cyfrowej reprezentacji obrazu szarego** najczęściej przeznaczona jest jedna bajt na jeden piksel (rys. 6). W istocie jest to kodowanie trochę rozrzucone, gdyż cały bajt pozwala rozróżnić 256 poziomów szarości, podczas gdy ludzki wzrok potrafi odróżnić maksymalnie około 60 poziomów szarości. Jednak ze względu na organizację pamięci komputera nie opłaca się „upychać” kilku pikseli w jednym bajcie. Natomiast jeśli na obrazie

wyodrębni się (metodą automatycznej komputerowej segmentacji) kilka rodzajów interesujących nas obiektów – to można każdemu z tych obiektów przypisać inną wartość, którą można potem na obrazie prezentować jako inną barwę. Są to barwy umowne, niemające nic wspólnego z rzeczywistymi kolorami odpowiednich narządów wewnątrz ciała człowieka, ale są one przydatne do tego, żeby uwidocznic i uwypuklic budowę anatomiczną badanej części ciała. Taki sposób prezentacji obrazu medycznego pokazano na rysunku 8.



Rysunek 8. Wygląd obrazu szarego (po lewej) oraz obrazu ze sztucznie wprowadzonymi barwami dla poszczególnych wykrytych struktur anatomicznych

Obrazy pozyskiwane z pomocą technik obrazowania medycznego są z reguły płaskie. Jednak stosując metody grafiki komputerowej można z szeregu takich płaskich obrazów zrekonstruować widok narządów wewnętrznych tak prezentowanych, jakby badający widział je jako obiekty trójwymiarowe. Na rysunku 9 można zobaczyć taką trójwymiarową rekonstrukcję narządu uzyskaną za pomocą komputera na podstawie serii płaskich obrazów z tomografu komputerowego.



Rysunek 9. Wygląd trójwymiarowej rekonstrukcji narządu (wątroby) [źródło: http://www.vislab.uq.edu.au/research/liver/images/3D_liver_model.jpg]

Zaletą cyfrowej reprezentacji obrazów jest to, że obrazy przedstawione cyfrowo można niezwykle sprawnie przetwarzać (rys. 10). Pokazane na rysunku 10 przekształcenia obrazu znanego pod nazwą Lena (najczęściej używanego we wszystkich książkach i artykułach naukowych do przedstawienia efektów działania różnych algorytmów komputerowej obróbki obrazu) nie mają żadnego zastosowania i są czystą ciekawostką. Jednak w przypadku wielu obrazów rzeczywistych (w tym między innymi medycznych) modyfikacje takie mogą mieć istotne znaczenie praktyczne.



Rysunek 10. Cyfrowe obrazy można dowolnie przetwarzać za pomocą komputerów [źródło: 4]

2 KOMPUTEROWE METODY OBRAZOWANIA MEDYCZNEGO

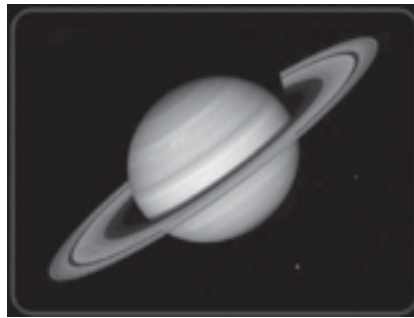
Przejdziemy teraz do zagadnień **wykorzystania** komputerowych zdolności manipulowania obrazami.

Wcześniej komputery wykorzystywały swoją zdolność zamieniania zbiorów liczb na obrazy tylko w obszarach grafiki komputerowej (rys. 11). W tym przypadku ich rola sprowadzała się wyłącznie do rozrywki. Komputerowe przetwarzanie obrazów stosowane jest też do cyfrowej obróbki zdjęć i filmów (nagrań wideo) i jego rola głównie wiąże się z dostarczaniem wiadomości (obrazy odległych miejsc i zdarzeń – rys. 12).

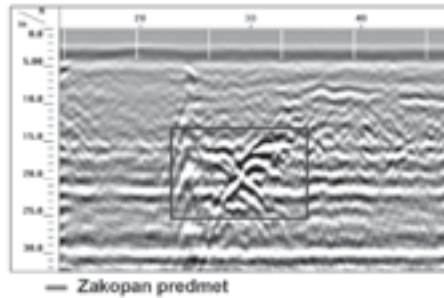


Rysunek 11. Cyfrowa reprezentacja obrazu jest podstawą grafiki komputerowej, ale te zastosowania służą głównie rozrywce [źródło: http://extra-bajki.pl/wp-content/uploads/2010/07/760_the_shrek.jpg – dostęp lipiec 2011]

Komputery potrafią jednak coś więcej. Mogą przedstawiać jako obrazy liczby, które powstały z rejestracji i odpowiedniego przetwarzania różnych sygnałów (rys. 13). Mogą to być niedostrzegalne dla naszych zmysłów sygnały z kosmosu i dzięki temu poznajemy wszechświat. Mogą to być sygnały z wnętrza Ziemi i w ten sposób odkrywamy prawa fizyki – znajdujemy pod ziemią złoża surowców mineralnych, zabytki archeologiczne albo prawa geofizyki – na przykład mechanizmy wędrówki kontynentów. Ale najciekawsze jest to, że mogą to być sygnały z wnętrza ludzkiego ciała i w ten sposób widzimy, jak są zbudowane i jak działają nasze narządy (rys. 14).



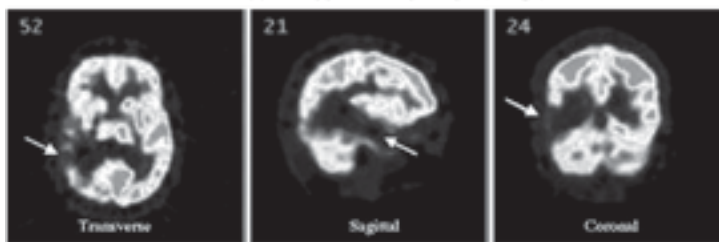
Rysunek 12.
Przetwarzaniu komputerowemu podlegają też obrazy ilustrujące różne wiadomości. Widoczny obraz planety Saturn z sondy kosmicznej po przesłaniu na Ziemię był bardzo zniekształcony, ale został oczyszczony metodą komputerową [źródło: <http://jaas.blox.pl/resource/saturn.jpg>]



Rysunek 13.
Obrabiane komputerowo obrazy będące przedmiotem badań naukowych. Pokazano obraz z tak zwanego georadaru ujawniający różne obiekty ukryte pod ziemią, który wymaga obróbki komputerowej [źródło: <http://geounda.com/wp-content/uploads/2010/12/forenzika22.jpg>]



Obrazy pokazujące budowę narządu (mózgu)



Obrazy pokazujące funkcjonowanie narządu [mózgu]

Rysunek 14.
Sygnały z wnętrza ludzkiego ciała przedstawione jako obrazy

Wyjaśnijmy, dlaczego wspomagane komputerowo metody obrazowania medycznego są takie ważne. Dawniej kontakt lekarza z organizmem pacjenta kończył się na powierzchni skóry. Można było chorego obserwować i badać, ale to, co się działo we wnętrzu jego ciała, pozostawało tajemnicą, chociaż zdolny i dobrze wykształcony lekarz potrafił odtwarzać obrazy narządów wewnętrznych oraz ich patologicznych zmian, korzystając ze swojej wiedzy i wyobraźni (rys. 15).



Rysunek 15.
Bezpośrednie oglądanie wnętrza ciała pacjenta było przez całe stulecia niemożliwe. Lekarz na podstawie badania wyobrażał sobie jedynie chory narząd

Bezpośrednie oglądanie wnętrza ciała pacjenta było jednak przez całe stulecia niemożliwe. Ogólna wiedza na temat budowy wewnętrznych narządów człowieka (anatomia) powstała wprawdzie wcześniej, gdyż żądni wiedzy naukowcy i lekarze prowadzili tysiące sekcji zwłok dla zbadania, jak wygląda i jak funkcjonuje ten niewiarygodnie wspaniały mechanizm, jakim jest ludzkie ciało. Na rysunku 16 przedstawiono zaczerpnięte z Wikipedii obrazy anatomiczne pochodzące odpowiednio z XIII i z początku XIX wieku.



Rysunek 16.
Obrazowanie wnętrza ciała człowieka przez dawnych anatomów [źródło: http://pl.wikipedia.org/wiki/Grafika:13th_century_anatomical_illustration.jpg, <http://pl.wikipedia.org/wiki/Grafika:John-bell-II-B-6.jpg>]

Jak widać lekarze usiłovali poznać (zobaczyć!) wnętrze ciała człowieka, ale tylko w wyjątkowych przypadkach było to możliwe w odniesieniu do działających narządów żywych ludzi. Na rysunku 17 pokazano taką właśnie wyjątkową sytuację.

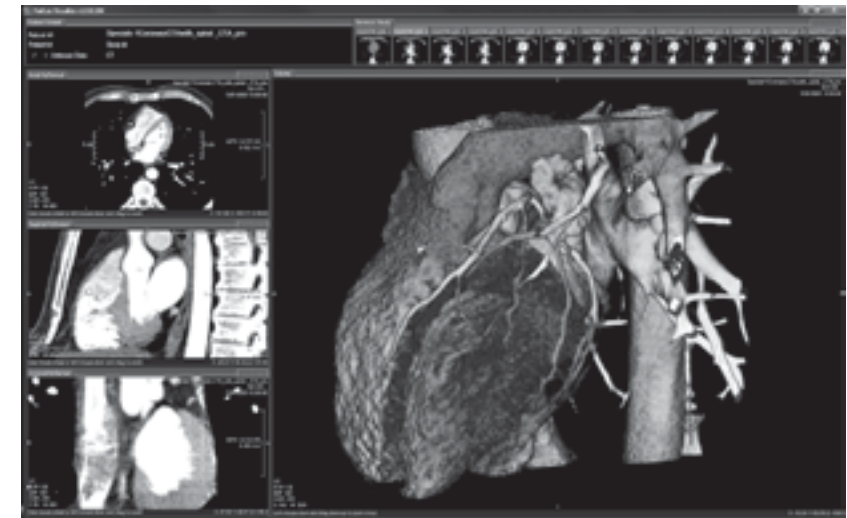


Rysunek 17. Przypadek kobiety z otworem w klatce piersiowej umożliwiającym między innymi oglądanie pracującego serca [źródło: <http://impaedcard.com/issue/issue27/aquilinao2/AquilinaO.htm>]

Porównanie tego, o czym marzyli dawni anatomicy, z tym, co jest dzisiaj osiągalne za sprawą komputerów, ilustrować może zestawienie znanego obrazu „Lekcja anatomii profesora Tulpa”, który namalował Rembrandt Harmenszoon van Rijn (1606-1669) (rys. 18) ze współczesną wizualizacją wnętrza ciała pacjenta (rys. 19).



Rysunek 18. Poznawanie wnętrza ciała człowieka w średniowieczu [źródło: <http://bi.gazeta.pl/im/7/4610/z4610417X.jpg>]



Rysunek 19. Poznawanie wnętrza ciała człowieka współcześnie za pomocą tomografii komputerowej [źródło: <http://rsna2008.rsna.org/exbdata/1947/images/heart01.jpg>]

Pokazany na rysunku 19 obraz (będący cyfrową rekonstrukcją) powstał w następstwie komputerowej obróbki serii obrazów pochodzących z tomografii komputerowej. Zanim jednak przejdziemy do tak wyrafinowanych obrazów, przedstawimy i przedyskutujemy kilka uwag o roli komputerów we współczesnym obrazowaniu medycznym.

3 KOMPUTEROWA OBRÓBKA OBRAZÓW RENTGENOWSKICH

Osoby, które niewiele słyszały o metodach pozyskiwania obrazów narządów wewnątrz ciała człowieka, mogą twierdzić, że rola informatyki nie jest tu taka ważna, bo najważniejsze odkrycia zrobili fizycy. Jest to jednak prawda wysoce niepełna. Istotnie, jest prawdą, że jako pierwszy wnętrze ciała żywego człowieka zobaczył Wilhelm C. Röntgen, fizyk, odkrywca promieni X (rys. 20). Było to wielkie, wręcz przełomowe odkrycie, za które Röntgen otrzymał nagrodę Nobla (w 1901 roku).



Rysunek 20. Wilhelm C. Röntgen i kopia jego dyplomu Nagrody Nobla z 1901 roku [źródło: <http://www.roentgen-museum.de/>]

Jednak samo zastosowanie metody fizycznej, odkrytej przez Röntgena, dostarcza obrazów o bardzo złej jakości, często trudnych do interpretacji i z tego powodu mniej przydatnych w medycynie. Dopiero zastosowanie obecnie komputerowej obróbki obrazu spowodowało, że obraz z aparatu rentgenowskiego stał się prawie tak samo czytelny, jak ilustracja w atlasie anatomicznym. Popatrzmy na rysunek 21. Przedstawiono na nim dwukrotnie ten sam obiekt anatomiczny – rękę kobiety z obrączką. Zdjęcie po lewej przedstawia obraz uzyskany z pomocą samego tylko obrazowania fizycznego (w istocie jest to historyczne pierwsze zdjęcie w promieniach X ręki żony Röntgena, zamieszczone w artykule naukowym ilustrującym istotę jego metody), zdjęcie po prawej przedstawia taki sam obiekt zobrazowany za pomocą aparatu, w którym obraz uzyskany z pomocą promieni X jest dodatkowo polepszany komputerowo.



Rysunek 21.

Historyczne zdjęcie ręki żony Röntgena [po lewej – źródło http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/6/6e/Anna_Berthe_Roentgen.gif] oraz współczesna fotografia rentgenowska dłoni polepszona za pomocą komputera [po prawej – źródło <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/hand.gif>]

Inny przykład pokazano na rysunku 22. Na nieprzetworzonym komputerowo obrazie (po lewej stronie) nie widać szeregu szczegółów badanego obiektu, które ujawniają się dopiero po komputerowej obróbce rentgenogramu. Po prawej stronie rysunku na zdjęciu komputerowo przetworzonym widać wyraźnie raka w płucach pacjenta (w obszarze zaznaczonym kwadratem), podczas gdy ta sama zmiana nowotworowa na oryginalnym zdjęciu rentgenowskim (po lewej stronie) była prawie niewidoczna i mogłaby być przez lekarza niezauważona. Rola techniki komputerowej we wczesnej diagnostyce raka jest tu ewidentna.

Jeszcze jeden przykład z tej samej serii przedstawia rysunek 23. Jest tam pokazany obraz mammograficzny w postaci oryginalnej oraz komputerowo poprawionej. Pokazano po lewej stronie obraz oryginalny, uzyskany przy użyciu samej tylko techniki rentgenowskiej, a po prawej ten sam obraz po zastosowaniu obróbki komputerowej. Widać, że komputer pomaga lepiej widzieć obrazowane szczegóły anatomiczne.

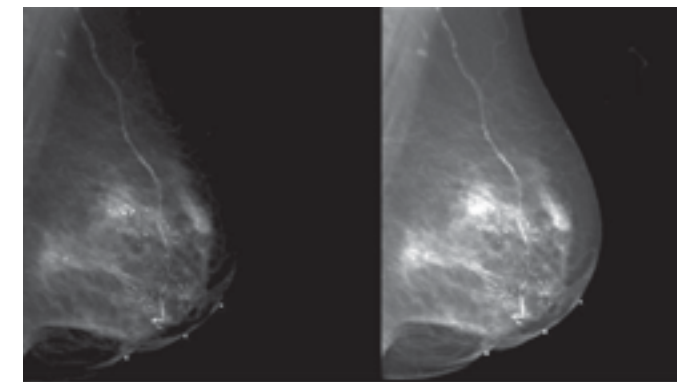
Badanie mammograficzne prowadzone jest w celu wczesnego wykrycia zmian nowotworowych w piersi kobiety, więc dokładna ocena struktur widocznych wewnątrz piersi jest niesłychanie ważna. Jak bardzo ważna jest jakość zobrazowania medycznego pokazuje przykład (zaczerpnięty z prezentacji udostępnionej przez prof. Artura Przelaskowskiego z Politechniki Warszawskiej) na rysunku 24. Na tym rysunku przedstawiono po lewej stronie obraz mammograficzny uzyskany podczas badania pewnej kobiety w 1996 roku. Obraz był doskonalony komputerowo,

ale technika ta w latach 90. była jeszcze bardzo niedoskonała. Diagnoza (postawiona przez doświadczonego lekarza!) brzmiała: wszystko w porządku. Niestety był to błąd. Kolejne badanie wykonane w 1998 roku, którego wynik widoczny jest po prawej stronie, nie pozostawiało żadnych wątpliwości: w piersi był groźny rak. Niestety wykryto go zbyt późno i mimo natychmiast podjętego leczenia kobieta zmarła.



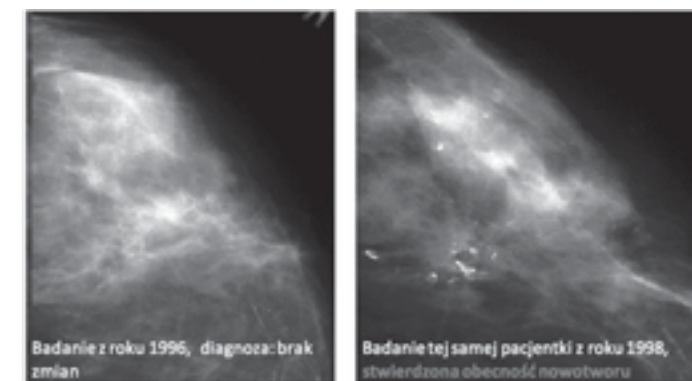
Rysunek 22.

Wpływ komputerowej obróbki obrazu rentgenowskiego na możliwość analizy szczegółów. Po lewej obraz w takiej formie, w jakiej go zarejestrował aparat rentgenowski, po prawej ten sam obraz po obróbce komputerowej



Rysunek 23.

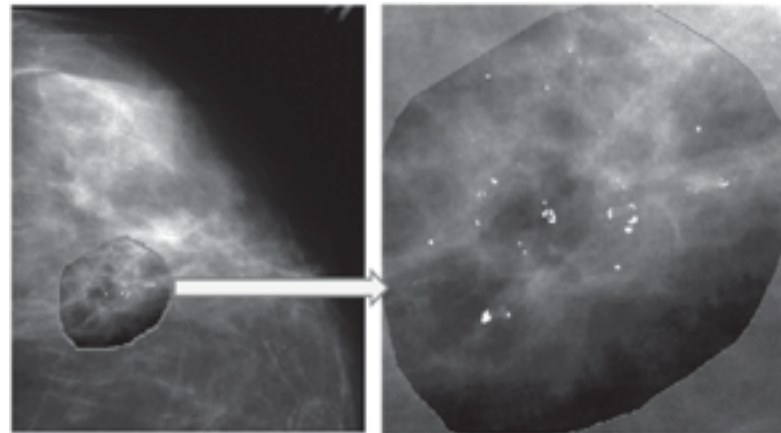
Polepszanie jakości obrazu rentgenowskiego (mammograficznego) przy użyciu technik komputerowych [źródło: http://www.eradimaging.com/cffm/custom/V1_2/Figure-3.jpg]



Rysunek 24.

Przykład pomyłki diagnostycznej spowodowanej niską jakością obrazu

Gdyby obraz z 1996 roku analizowały komputery tak oprogramowane, jak to jest dzisiaj stosowane, na obrazie pojawiłoby się ostrzeżenie (rys. 25), że komputer widzi tu nieprawidłowości. Powiększenie rejonu z zaznaczeniem podejrzanych zmian (po prawej stronie rysunku) spowodowałoby wykrycie raka na etapie, kiedy jego usunięcie było łatwe i bezpieczne. Kobieta pewnie by żyła do dziś...



Rysunek 25. Nowoczesny system komputerowy nie tylko polepsza jakość obrazu medycznego, ale dodatkowo także ostrzega lekarza o automatycznie wykrywanych zmianach patologicznych

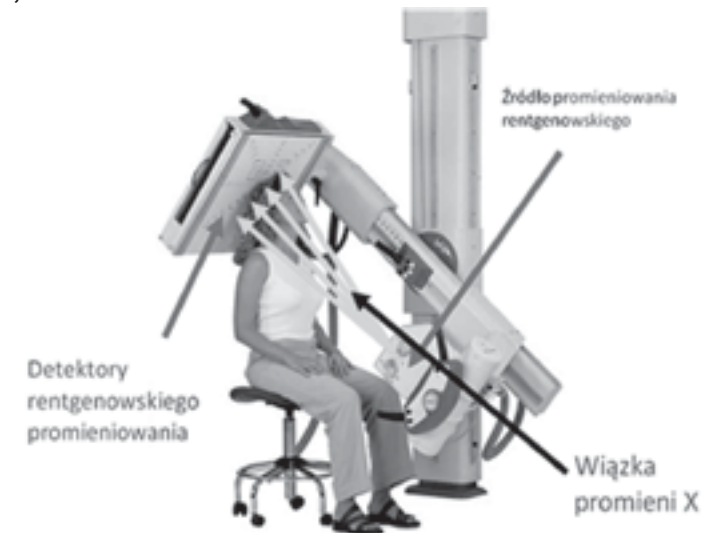
4 AUTMATYCZNE ROZPOZNAWANIE OBRAZÓW MEDYCZNYCH

W kontekście ostatniego omawianego tu przykładu interesująca jest możliwość automatycznego rozpoznawania obrazów medycznych przez komputer. Jest to przedmiot prowadzonych od ponad 20 lat badań naukowych autora wykładu. Otwarty jest także problem, jaką rolę taki system automatycznego rozpoznawania powinien pełnić: czy ma zastępować lekarza, czy być tylko jego inteligentnym doradcą? O tym wszystkim można poczytać między innymi w popularnej, przystępnej dla uczniów szkół średnich książce [3]. Rysunek 26 przedstawia etapy pozyskiwania, przetwarzania, analizy i diagnostycznego wykorzystania obrazów medycznych.



Rysunek 26. Etapy pozyskiwania, przetwarzania, analizy i diagnostycznego wykorzystania obrazów medycznych. Strzałka wskazuje obszar, którym się obecnie zajmujemy

Angażowanie komputerów także do automatycznej interpretacji obrazów medycznych, a nie tylko ich ulepszonej prezentacji (w stosunku do oryginalnego obrazu uzyskanego za pomocą przenikających ciało pacjenta promieni X) jest uzasadnione jeszcze jedną okolicznością. Otóż komputer może widzieć na obrazie medycznym znacznie więcej niż człowiek!



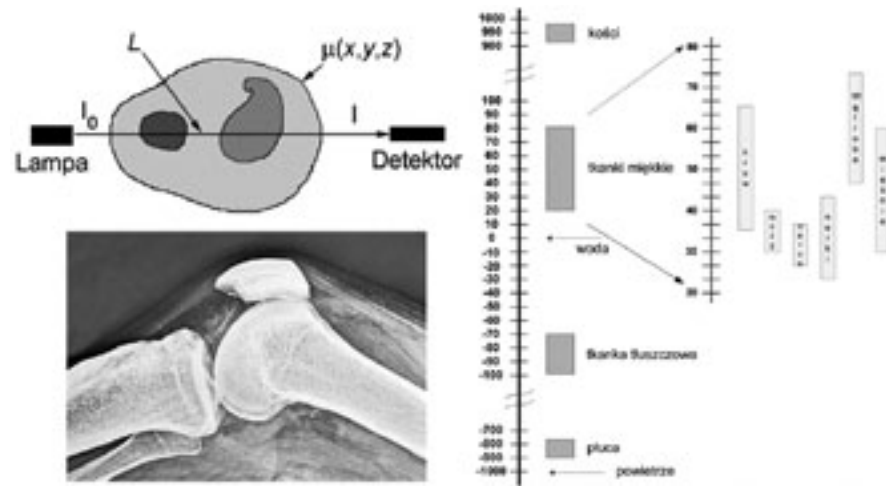
Rysunek 27. Budowa aparatury rentgenowskiej [źródło: 1]

Żeby to wyjaśnić, przypomnijmy, jak działa aparat rentgenowski (rys. 27). Promieniowanie rentgenowskie wytwarzane jest w specjalnej lampie. Budowy lampy nie będziemy tu omawiać, natomiast warto poczytać o niej np. w Internecie, bo jest ciekawym osiągnięciem sztuki inżynierskiej, które naukowe odkrycie Röntgena zamieniła na technologię użyteczną w codziennej praktyce medycznej. Promieniowanie lampy przechodzi przez ciało pacjenta i jest po drugiej stronie mierzone przez detektory (rys. 28). Detektorów jest dużo, bo każdy z nich tworzy jeden piksel cyfrowego obrazu rentgenowskiego. Detektory te zastępują kliszę rentgenowską, z którą można się jeszcze spotkać w starszych aparatach rentgenowskich. Zdjęć rentgenowskich robionych na kliszach nie można komputerowo doskonalić, a ponadto trudno je gromadzić, wyszukiwać, przesyłać, zdalnie konsultować itd., więc wychodzą one z użycia.



Rysunek 28. Za pomocą takich matryc detektorów CCD rejestruje się obecnie zdjęcia rentgenowskie [źródło: <http://suncityhospital.com/images/naomi-tech.png>]

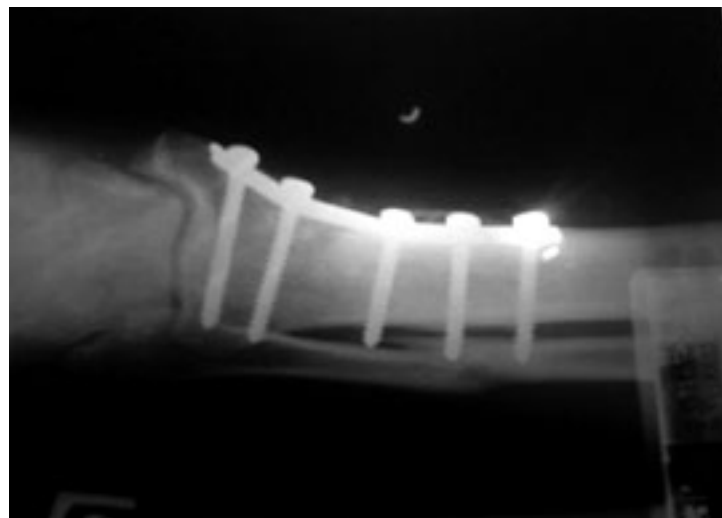
Promieniowanie lampy przechodzi przez ciało pacjenta i jest po drugiej stronie mierzone przez detektory. Obserwowane zmniejszenie natężenia promieniowania zależy od stopnia jego pochłaniania w tkankach. Dla uzyskania obrazu rentgenowskiego istotne jest, że różne tkanki pochłaniają promieniowanie w różnym stopniu. Przedstawiając w formie obrazu natężenie promieniowania, które przeszło przez ciało pacjenta w różnych miejscach, otrzymujemy **cienie** narządów wewnętrznych, szczególnie widoczne wtedy, gdy narządy te bardzo silnie pochłaniają promieniowanie (kości).



Rysunek 29.

Na zdjęciu rentgenowskim widać cienie narządów, które pochłaniają promienie X [źródło: 5]

Stopień pochłaniania promieniowania rentgenowskiego określa tzw. **skala Hounsfielda** pokazana na rysunku 29. Warto zauważyć, że skala ta rozciąga się od wartości -1000 jednostek Hounsfielda (dla powietrza) do $+1000$ jednostek Hounsfielda (dla kości). Na zdjęciach rentgenowskich skala jest jeszcze szersza, bo bywają na nim ujawniane także obiekty metalowe, których zdolność pochłaniania sięga nawet 4000 jednostek Hounsfielda (rys. 30).

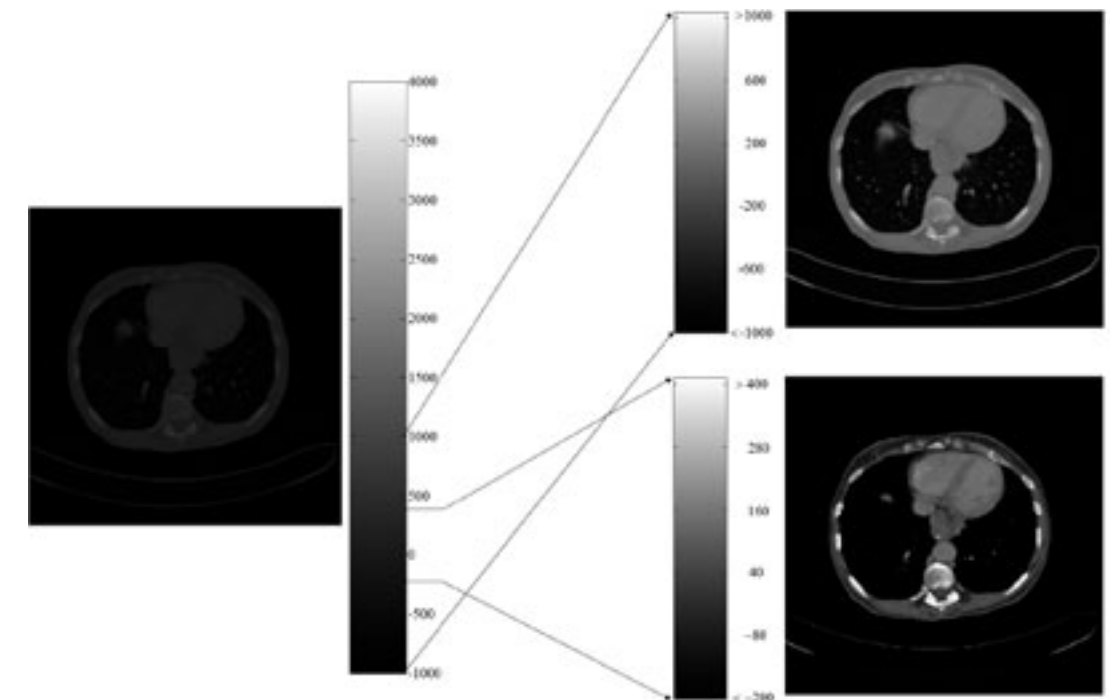


Rysunek 30.

Zdjęcie rentgenowskie uwidaczniające śruby zespalające kości po skomplikowanym złamaniu [źródło: <http://images46.fotosik.pl/72/419f7b19982d40d0m.jpg>]

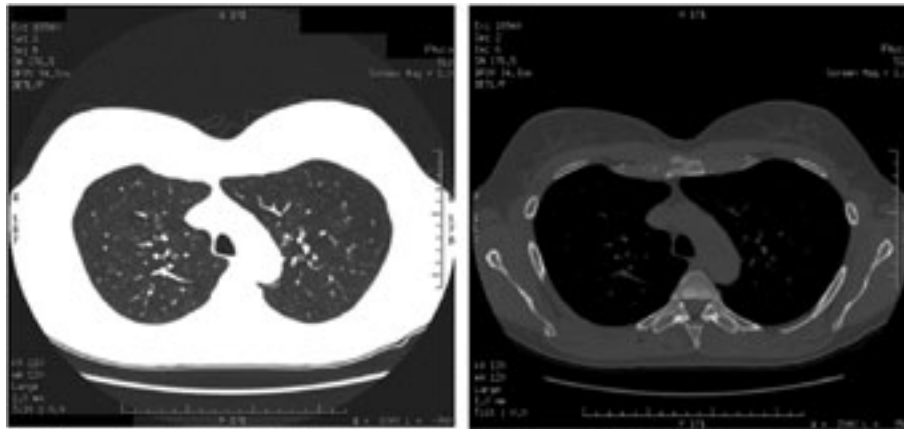
Zakładając, że detektory mierzą promieniowanie w sposób zapewniający określenie nawet pojedynczych jednostek Hounsfielda (a są aparaty zdolne do mierzenia ułamkowych wartości w tej skali!), na zdjęciu rentgenowskim możliwe jest wyróżnienie 5000 różnych poziomów jasności. Tymczasem człowiek rozróżnia wzrokiem najwyżej 60 poziomów szarości! W związku z tym dobrze zrobione zdjęcie rentgenowskie zawiera o wiele więcej informacji, a człowiekowi (lekarzowi) pokazuje się obrazy w tzw. oknach – wybierając pewien fragment skali Hounsfielda, który (po odpowiednim skalowaniu) jest odwzorowywany w postaci rozróżnialnych ludzkim okiem szarości (rys. 31). Cała reszta informacji zawartej w jednostkach Hounsfielda poniżej i powyżej okna – jest przy tym tracona. Taki sposób postępowania sprawia, że możliwa jest całkiem odmienna wizualizacja tego samego obrazu rentgenowskiego w zależności od dobranych parametrów okna (rys. 32). W efekcie lekarz zawsze widzi tylko jeden, wybrany aspekt badanego zjawiska, podczas gdy komputer może widzieć wszystko, bez żadnych ograniczeń. Stąd automatyczna (komputerowa) interpretacja obrazów medycznych może być głębsza i dokładniejsza, niż prowadzona przez ludzi.

Jednak nawet pozostawiając decyzje w rękach lekarzy stwierdzić trzeba, że komputery mogą się posunąć znacznie dalej w doskonaleniu obrazów medycznych, niż to było pokazane na rysunkach 21–25. Najnowsze systemy tego typu łączą w sobie elementy analizy obrazu i grafiki komputerowej (rys. 33). Seria zdjęć rentgenowskich (pokazana po lewej stronie rysunku), ujawniająca budowę badanego narządu (w pokazanym przypadku jest to łokieć), dostarcza informacji o rozmiarach, proporcjach i wzajemnym ułożeniu elementów anatomicznych u konkretnego pacjenta. Sam narząd jest potem modelowany komputerowo, a efekt tego modelowania jest wizualizowany za pomocą metod grafiki komputerowej, co umożliwia oglądanie obrazu czytelniejszego niż źródłowe zdjęcia rentgenowskie, a ponadto możliwy do oglądania w dowolnym położeniu i pod dowolnym kątem.

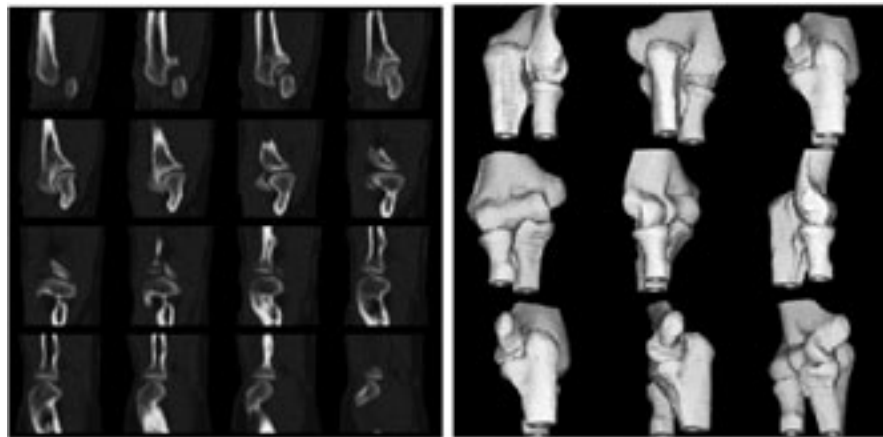


Rysunek 31.

Prezentacja obrazu rentgenowskiego z pomocą wybieranych okien w skali jednostek Hounsfielda przedstawianych w dostępnej dla człowieka skali szarości [źródło: 1]



Rysunek 32. Wizualizacja tego samego obrazu rentgenowskiego w zależności od dobranych parametrów okna [źródło: 1]



Rysunek 33. Doskonalenie obrazu rentgenowskiego przed jego prezentacją z wykorzystaniem modelowania komputerowego i grafiki komputerowej [źródło: 1]

ZAKOŃCZENIE

W tym wykładzie skupiono uwagę na jednej tylko metodzie obrazowania medycznego (klasycznej radiologii rentgenowskiej), pokazując, że także w przypadku tej ponad sto lat liczącej techniki obrazowania medycznego komputery znacząco polepszają możliwości penetracji wnętrza ciała człowieka dla potrzeb nowoczesnej diagnostyki i terapii.

Nieporównywalnie bogatsze i ciekawsze (ale i trudniejsze) są zastosowania komputerów w kontekście innych metod obrazowania medycznego, które tylko wymienimy:

- tomografia komputerowa rentgenowska (CT)
- wizualizacja za pomocą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR, MRI)
- tomografia emisji pozytronowej (PET)

- tomografia emisyjna pojedynczych fotonów (SPECT)
- obrazowanie radioizotopowe
- termowizja medyczna
- ultrasonografia

Omówienie tych metod badawczych wraz ze wskazaniem roli komputera w każdym z tych badań musi być jednak przedmiotem oddzielnych wykładów.

LITERATURA

1. Tadeusiewicz R., Śmietański J., *Pozyskiwanie obrazów medycznych oraz ich przetwarzanie, analiza, automatyczne rozpoznawanie i diagnostyczna interpretacja*, Wydawnictwo STN, Kraków 2011
2. Tadeusiewicz R., Augustyniak P. (red.), *Podstawy inżynierii biomedycznej – Tom 1 i 2.*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2009
3. Tadeusiewicz R. (red.), *Inżynieria Biomedyczna – Księga współczesnej wiedzy tajemnej w wersji przystępnej i przyjemnej*, UWND AGH, Kraków 2008
4. Tadeusiewicz R., Korohoda P., *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997; <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty2/0098/>
5. Tadeusiewicz R., *Problemy biocybernetyki*, PWN, Warszawa 1993, (II wydanie poprawione); <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty2/0262/>