

2. Tomografia komputerowa

Bogdan Pruszyński

Podstawy fizyczne. Tomografia komputerowa (TK) podobnie jak rentgenodiagnostyka konwencjonalna wykorzystuje zjawisko osłabienia promieniowania X przenikającego przez ciało człowieka.

Całkowicie odmienny jest natomiast sposób badania pacjenta oraz prezentacja wyników badań. Leżącego na plecach na ruchomym stole pacjenta wprowadza się do otworu okola (patrz rycina 2.1). Stanowi ono zamkniętą przestrzeń, w której znajdują się między innymi lampa rentgenowska wirująca w płaszczyźnie prostopadłej do długiej osi pacjenta oraz układ detektorów rejestrujących osłabienie promieniowania X po przejściu przez ciało pacjenta. Wybrana warstwa ciała w czasie obrotu lampy eksponowana jest zatem z wielu stron, pod różnymi kątami. W tym czasie detektory rejestrują olbrzymią ilość wartości pomiarowych odpowiadających liniowym współczynnikom pochłaniania. Są one niezbędne do drugiego etapu, jakim jest rekonstrukcja obrazu.

Uproszczonym przykładem rekonstrukcji jest rycina 2.2. Wyobraźmy sobie, że mamy do czynienia z czterema prostopadłościanami o nieznanym współczynniku pochłaniania. Mierząc osłabienie wiązki promieniowania przebiegającej w dwóch różnych kierunkach, otrzymuje się kolejno wartości, które stanowią układ czterech równań z czterema niewiadomymi. Po rozwiązaniu otrzymuje się wartości części składowych. W rzeczywistości badana warstwa podzielona jest na tysiące takich prostopadłościanów (wokseli), a liczba pomiarów jest odpowiednio większa. Zamiast układów algebraicznych trzeba zatem stosować inne, bardziej efektywne techniki obliczeniowe wspomagane komputerem.

Po procesie skanowania i rekonstrukcji obraz zostaje zapisany w postaci cyfrowej w układzie pamięciowym komputera, a równocześnie prezentowany jest na monitorze konsoli operacyjnej.

W pierwszym okresie stosowania tomografii komputerowej badanie polegało na wykorzystaniu kolejnych, następujących po sobie poprzecznych przekrojów ciała o różnej grubości i różnym odstępie między warstwami. Podstawą wniosków rozpoznawczych były wyłącznie obrazy dwuwymiarowe. Spiralna tomografia komputerowa stanowi istotny postęp polegający na ciągłej rotacji lampy z równoczesnym stałym przesuwem stołu wzdłuż

długiej osi pacjenta (oś Z). Badania można zaplanować w ten sposób, aby kolejne warstwy częściowo nakładały się na siebie. Pozwala to na trójwymiarową prezentację obrazu. Jednak ze względu na odwrotnie proporcjonalną zależność między długością skanu w osi Z a przestrzenną zdolnością rozdzielczą obrazy nie były zadowalające.

Problem ten został rozwiązany po opracowaniu zestawów do tomografii komputerowej z wielorzędowym układem detektorów. System ten w zależności od ukształtowania wiązki promieni X, a szczególnie od jej szerokości (kolimacji), pozwala w czasie jednego obrotu lampy uzyskać wiele przekrojów ciała, teoretycznie tyle, ile rzędów aktywnych detektorów ma zestaw.

Najważniejsze zalety tomografii komputerowej to:

- skrócenie czasu badania – około 10 sekund wystarczy do oceny wybranego obszaru ciała,
- zwiększenie zakresu skanu wzdłuż długiej osi pacjenta – pozwala w czasie jednego krótkiego badania uwidocznić duże obszary ciała,
- poprawa jakości wyników badań, szczególnie narządów ruchomych niezależnie od woli pacjenta (serce, jelita) – czas jednego, pełnego obrotu lampy został skrócony do około 0,33 sekundy, rozdzielczość czasowa przy wykorzystaniu specjalnego algorytmu uwzględniającego dane z połowy obrotu lampy wynosi 165 ms, a rozdzielczość przestrzenna 0,5 mm,
- rutynowe stosowanie cienkich warstw przekroju i prawie izotropowej akwizycji obrazu – umożliwia wielokierunkową rekonstrukcję obrazu, np. objętościową, wielopłaszczyznową lub endoskopową.

W czasie tomografii komputerowej uwidocznienie struktur anatomicznych (kości, części miękkich, płuca) oraz zmian morfologicznych i zaburzeń czynnościowych (zjawisko wzmocnienia kontrastowego, ocena perfuzji krwi) w dużej mierze zależy od programu badania. Uwzględnia on między innymi:

- obszar anatomiczny, który ma być uwidoczniiony,
- grubość warstwy, szybkość przesuwu stołu i czas obrotu lampy,
- poziom średnich kontrastów,
- zakres przenoszonych przez układ kontrastów (okno),
- liczbę faz badania (badanie jednofazowe przed podaniem środka cieniującego, badanie dwufazowe – przed podaniem środka cieniującego i po jego podaniu oraz badanie wielofazowe – wykonane w różnych okresach po podaniu środka cieniującego).

Istotne znaczenie ma zatem możliwie dokładne przedstawienie celu badania przez lekarza prowadzącego pacjenta.

Możliwości rozpoznawcze. Tomografia komputerowa odgrywa istotną rolę w diagnostyce obrazowej, konkurując z magnetycznym rezonansem i ultrasonografią. Należy do metod obiektywnych i powtarzalnych. Dobrze odzwierciedla anatomie i topografię narządów, a także patologie z dokładnością zbliżoną do makroskopowych badań anatomopatologicz-

nych. Dzięki temu jest metodą powszechnie akceptowaną przez lekarzy niebędących radiologami. Badanie pozwala określić zarysy, wielkość i strukturę wewnętrzną większości narządów miękkich.

Spośród typów patologii, w których skuteczność rozpoznawcza tomografii komputerowej charakteryzuje się wysokimi wskaźnikami, można wymienić: odmiany rozwojowe, uszkodzenia urazowe, torbiele, guzy łebe i krwaki, zapalenia (wirusowe, bakteryjne, pasożytnicze i grzybicze), choroby układu naczyniowego (tętniaki, naczyniaki, przetoki tętniczo-żylnie, zatory, zespoły niedokrwienne), choroby układu chłonnego (powiększone węzły chłonne), zmiany degeneracyjne i patologiczne zwapnienia.

Przedmiotem badania najczęściej są: mózg, narządy jamy brzusznej (wątroba, trzustka, śledziona, układ naczyniowy, przewód pokarmowy), przestrzeń zaotrzewnowa, układ kostny, szczególnie struktury o złożonej budowie (kość skroniowa, twarzoczaszka, kręgosłup, miednica) oraz klatka piersiowa (płuca, opłucna, śródpiersie).

Spośród badań czynnościowych w pierwszym rzędzie należy wymienić ilościową ocenę perfuzji krwi w obszarze zainteresowania (np. w mózgu lub sercu) i dynamikę wzmocnienia kontrastowego.

Nowe osiągnięcia techniczne dają nadzieję na możliwość przeprowadzania badań profilaktycznych w celu wczesnego rozpoznawania nowotworów jelita grubego (endoskopia wirtualna) i niemych klinicznie guzków płucnych oraz oceny zaawansowania miażdżycy tętnic wieńcowych (ilościowa ocena zwapnień w blaszkach miażdżycowych).

Różnicowanie struktur anatomicznych i patologicznych ułatwia pomiar liniowego współczynnika pochłaniania promieni X. Przyjęto, że w czasie tomografii komputerowej współczynnik pochłaniania powietrza wynosi -1000 jednostek Hounsfielda (jH.), wody 0 jH., a tkanki kostnej $+1000$ jH.

Bezpieczeństwo pacjenta. Ryzyko badania związane jest z dwoma czynnikami:

- stosunkowo wysoką dawką promieniowania jonizującego, jaką otrzymuje pacjent – w zależności od celu badania i okolicy anatomicznej średnia dawka wynosi $3,0$ – $10,0$ mSv, co odpowiada dawce otrzymywanej w czasie 150 do 500 zdjęć klatki piersiowej lub dawce z tła naturalnego otrzymywanej w czasie od 16 miesięcy do $4,5$ roku. Najniższe dawki otrzymuje pacjent w czasie badania głowy i szyi. Wzrastają one w czasie badania klatki piersiowej i jamy brzusznej;
- dożylnym podaniem jodowego środka cieniującego (patrz rozdział: Środki cieniujące i kontrastowe stosowane w diagnostyce obrazowej).

Przeciwwskazania. Nie istnieją bezwzględne przeciwwskazania do badania. Spośród względnych przeciwwskazań wymienia się ograniczenia, jakich należy przestrzegać w czasie stosowania jodowych środków cieniujących (patrz rozdział: Środki cieniujące i kontrastowe stosowane w diagnostyce obrazowej). Badanie jest przeciwwskazane u kobiet w ciąży (patrz rozdział: Ochrona pacjenta przed promieniowaniem jonizującym).

Przygotowanie pacjenta. Badania metodą tomografii komputerowej nie wymagają szczególnego przygotowania. Ze względu na niemal rutynowo-

we stosowanie jodowych środków cieniujących podawanych pacjentowi dożylnie zaleca się, aby pacjent do badania planowego zgłosił się na czczo lub przynajmniej 6–8 godzin po ostatnim posiłku, dobrze nawodniony. W dniu poprzedzającym badanie należy wypić co najmniej 2–3 litry płynów, najlepiej wody niegazowanej lub herbaty.

Skierowanie do badania, oprócz rutynowych informacji, powinno uwzględniać przebyte choroby, które stanowią względne przeciwwskazania do podania środka cieniującego (uprzednie reakcje uczuleniowe po dożylnym podaniu preparatu, niewydolność nerek, cukrzyca, szpiczak) oraz stężenie kreatyniny w surowicy krwi. Pacjent powinien być poinformowany o możliwości wystąpienia powikłań i podpisać zgodę na podanie środka cieniującego.

Podstawy interpretacji wyników. Fizyczne podstawy tworzenia obrazów są identyczne jak w czasie rentgenodiagnostyki konwencjonalnej. Podstawowe znaczenie w różnicowaniu tkanek ma współczynnik pochłaniania promieni X (tab. 2.1).

Tabela 2.1

Średni współczynnik pochłaniania promieni X przez różne tkanki

Rodzaj tkanki	Współczynnik pochłaniania (jH.)
Kości	od 300 do 1000
Tarczycza	70 ± 10
Wątroba	65 ± 5,0
Śledziona	50 ± 5,0
Nerka	30 ± 10
Trzustka	40 ± 10
Tkanka tłuszczowa	-65 ± 10
Płuca	od -600 do -800
Płyny ustrojowe:	
• Krew wynaczyniona (do 6–8 dnia po krwotoku)	80 ± 10
• Krew żylna	55 ± 5,0
• Wysiłek	>18 ± 2,0
• Przesiłek	<18 ± 2,0

Różnice w pochłanianiu promieni X przez tkanki o odmiennej budowie, a także korzystne stosunki anatomiczne polegające na rozdzielaniu narządów powięziami, ograniczeniu ich torebką włóknistą, otoczeniu tkanką tłuszczową lub płynem pozwalają uwidocznić w czasie tomografii komputerowej struktury, które nie były dostępne do badania za pomocą radiografii konwencjonalnej (np. mózg, tarczycza, wątroba, śledziona, trzustka, nerki, nadnercza i rdzeń kręgowy). Tomografia komputerowa pozwala zatem ocenić ich zarysy, wielkość, kształt i budowę wewnętrzną. Teoretycznie metoda pozwala odzwierciedlić 2000 stopni szarości od -1000 jH. (współczynnik pochłaniania powietrza) do +1000 jH. (współczynnik pochłaniania kości). Niestety oko ludzkie odróżnia zaledwie 15–20 stopni szarości. Rozwiązaniem tego problemu jest możliwość wyboru odpowiedniego poziomu i pasma (okna) przenoszenia kontrastów w zależności od współczynnika pochłaniania

promieni X przez badaną strukturę. Obszary o wzmożonym współczynniku pochłaniania promieni X w stosunku do otoczenia (jasne) nazywane są hiperdensyjnymi, o niższym współczynniku pochłaniania (ciemne) hipodensyjnymi, natomiast struktury niewyróżniające się z otoczenia izodensyjnymi.

Interpretacja wyniku. W ułatwieniu interpretacji pomagają informacje znajdujące się na obrzeżu każdego zarejestrowanego zdjęcia. Uwzględniają one między innymi dane osobowe pacjenta, datę badania oraz podstawowe informacje dotyczące programu badania.

Oprócz poprzecznych przekrojów ciała obecnie coraz częściej wykorzystuje się obrazy przetworzone, które zwykle są łatwiejsze do interpretacji przez lekarzy niebędących radiologami. Spośród rekonstrukcji tego typu wykorzystywanych według standardowych algorytmów należy w pierwszym rzędzie wymienić:

- obrazy wielopłaszczyznowe umożliwiające prezentację wyniku badania w dowolnej płaszczyźnie, zwykle czołowej i/lub strzałkowej, ale także wzdłuż linii zakrzywionych,
- prezentację trójwymiarową (3D),
- prezentację maksymalnej intensywności (MIP), szczególnie przydatną w angiografii metodą tomografii komputerowej – pozwala uwidocznć naczynia wypełnione krwią cieniującą bez towarzyszących cieni kości i części miękkich,
- technikę obrazowania powierzchni badanych struktur z uwzględnieniem ich położenia przestrzennego (volumen rendering),
- wirtualną endoskopię, która uwidacznia wewnątrz narządów rurowych: układ tchawiczo-oskrzelowy, przewód pokarmowy, duże i średnie tętnice (patrz rycina 2.3).

Przed podaniem środka cieniującego znaczenie rozpoznawcze mają następujące objawy:

- ogniska silnie hiperdensyjne o charakterze zwapnień – mogą one odpowiadać zwapniałym węzłom chłonnym, złogom wapnia w ścianie tętnic (miażdżycy), flebolitom, złogom w drogach moczowych, w przewodzie trzustkowym lub układzie żółciowym, zwapnieniom w zmianach bliznowatych pozapalnych (gruźlica, przewlekłe zapalenie trzustki, torbiele pasożytnicze, histoplazmoza, bruceloza) oraz w niektórych nowotworach (kostniaki, mięsaki kościotwórcze, raki wytwarzające śluz, mięśniaki macicy), a także w tkankach miękkich (zwapniałe krwinki, przewlekła niewydolność nerek, choroby gruczołów przytarczycznych);
- ogniska hiperdensyjne w stosunku do otoczenia – ze względu na szczególną budowę płuc znaczna większość procesów patologicznych ujawnia się jako obszary hiperdensyjne na tle powietrznych pęcherzyków płucnych (nowotwory pierwotne i przerzutowe, zmiany zapalne, niedodma, obrzęk płuc);

- świeżo wynaczyniona krew – niezależnie od umiejscowienia w okresie pierwszych 7–8 dni również ujawnia się jako obszar hiperdensyjny (krwiak);
- obszary hipodensyjne w stosunku do otoczenia – są najczęściej występującymi objawami, które mogą odpowiadać naciekom zapalnym lub nowotworowym; na pograniczu 20 jH. znajduje się ropień, zwykle otoczony różnej grubości torebką;
- ogniska hipodensyjne o współczynniku pochłaniania zbliżonym do wody ograniczone od otoczenia cienkościennej torebką – najczęściej odpowiadają różnego typu torbielom.

Dożylnie podanie jodowego środka cieniującego znacznie rozszerza możliwości rozpoznawcze tomografii komputerowej. Otrzymane obrazy zależą od protokołu badania, a przede wszystkim od szybkości wstrzyknięcia preparatu i okresu między początkiem wstrzyknięcia a rozpoczęciem akwizycji danych. We wczesnej fazie trwającej 15–20 sekund widoczne są wypełnione krwią cieniującą tętnice. W okresie późniejszym (50–70 sekund) wzmocnieniu kontrastowemu ulegają narządy mięśnizowe i żyły. Po około 5 minutach wypełniają się moczem cieniującym miedniczki nerkowe, moczowody i pęcherz moczowy. Korzyści rozpoznawcze uzyskiwane po podaniu środka cieniującego można sprowadzić do następujących zasadniczych punktów:

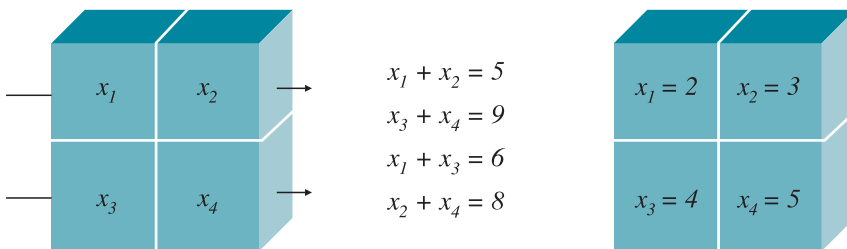
- faza tętnicza pozwala rozpoznać różne rodzaje patologii układu naczyniowego (tętniaki, upośledzona drożność tętnic, przetoki tętniczo-żylnie), różnicować ogniska patologiczne bogato i skąpo unaczynione, a także ułatwia różnicowanie powiększonych węzłów chłonnych i naczyń;
- wzmocnienie kontrastowe narządów (faza mięśnizowa) sprzyja bardziej precyzyjnej ocenie wielkości, granic i struktury wewnętrznej procesu patologicznego, a także dynamiki jego wzmocnienia w stosunku do tkanki prawidłowej. Ułatwia również rozpoznanie zmian izodensyjnych, które nie były widoczne przed podaniem preparatu;
- zachowanie się struktury patologicznej w fazie tętnicznej i mięśnizowej po dożylnym podaniu środka cieniującego odgrywa istotną rolę w procesie różnicowania jej charakteru. Krzywa ilustrująca przepływ krwi cieniującej przez obszar zainteresowania w funkcji czasu jest podstawą oceny perfuzji tkankowej.

Wyniki tomografii komputerowej wybranych przypadków patologii głowy, szyi, brzucha, naczyń i układu kostnego przedstawiono na rycinach 2.4–2.51.

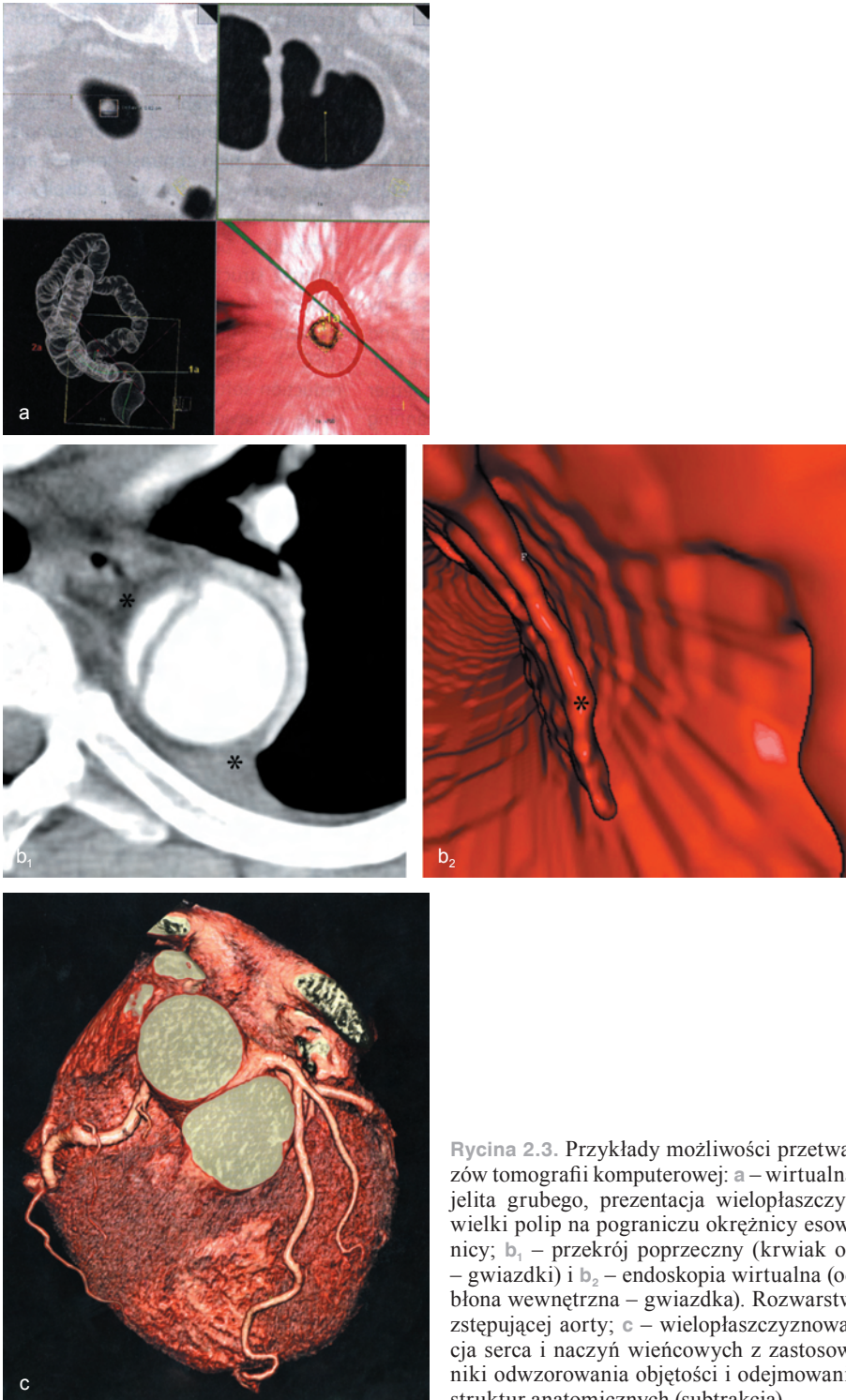
Wybór rycin



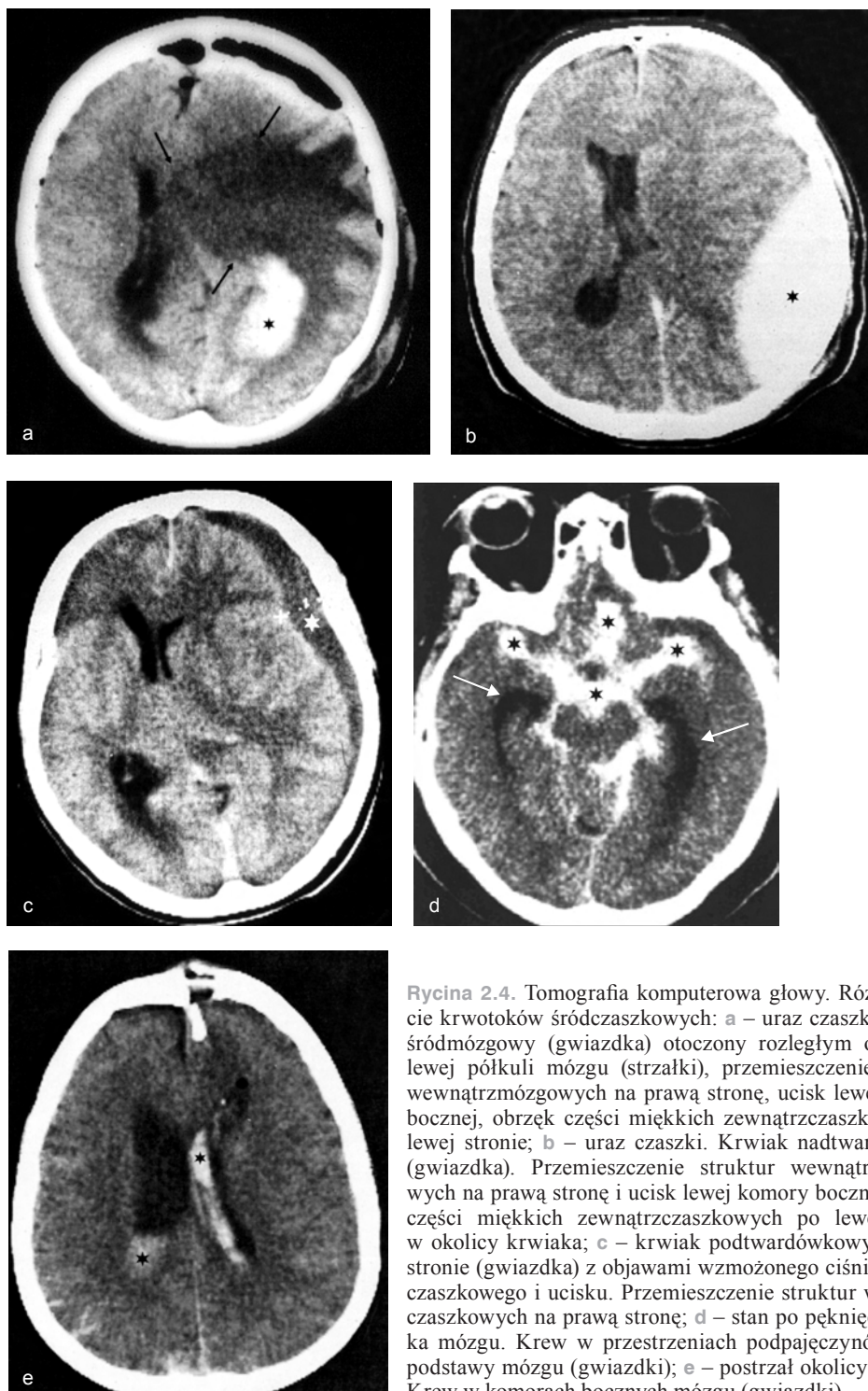
Rycina 2.1. Zestaw do tomografii komputerowej. 1 – okole (gantry) (w obudowie okola znajduje się między innymi lampa rentgenowska wirująca wokół pacjenta i zespół detektorów rejestrujących osłabienie promieni X przechodzących przez badaną warstwę ciała pacjenta), 2 – stół ruchomy we wszystkich kierunkach, na którym umieszcza się pacjenta, a następnie wprowadza do otworu okola, 3 – strzykawka automatyczna do dożylnego podawania środka cieniującego. Urządzenia zasilające, umożliwiające programowanie i kontrolę przebiegu badania oraz rejestrację obrazu, znajdują się w innych pomieszczeniach.



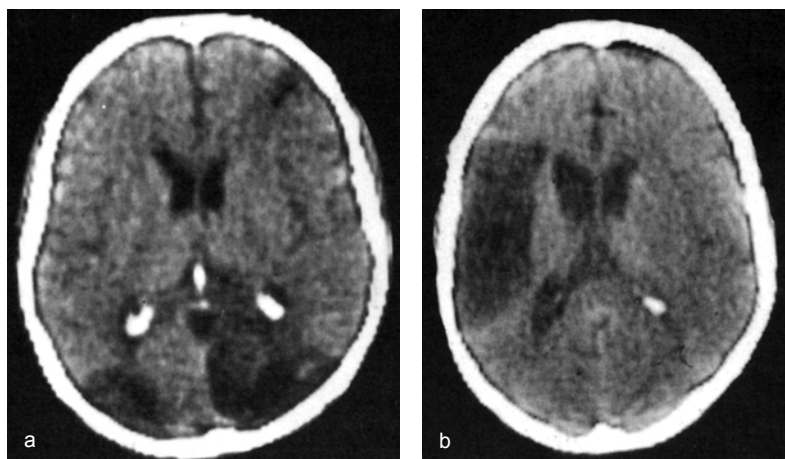
Rycina 2.2. Uproszczona zasada rekonstrukcji obrazu. Cztery prostopadłościany reprezentują woksele badanej warstwy. Ich współczynniki pochłaniania promieni X można obliczyć za pomocą czterech równań. W rzeczywistości badana warstwa podzielona jest na znacznie większą ilość wokseli. Stosuje się zatem inne, bardziej efektywne metody obliczeniowe wspomagane komputerami.



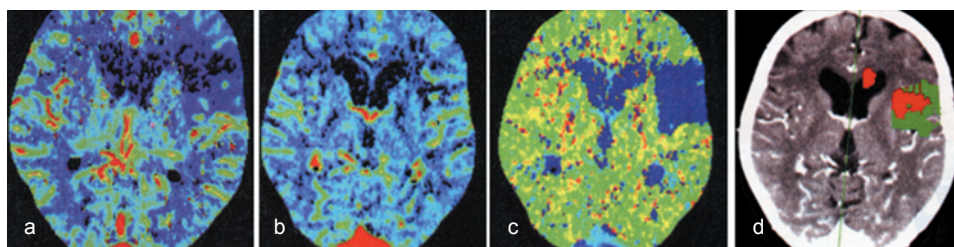
Rycina 2.3. Przykłady możliwości przetwarzania obrazów tomografii komputerowej: **a** – wirtualna endoskopia jelita grubego, prezentacja wielopłaszczyznowa. Nie-wielki polip na pograniczu okrężnicy esowatej i odbytnicy; **b₁** – przekrój poprzeczny (krwiak okołoaortalny – gwiazdki) i **b₂** – endoskopia wirtualna (odwarstwiona błona wewnętrzna – gwiazdka). Rozwarstwienie części zstępującej aorty; **c** – wielopłaszczyznowa rekonstrukcja serca i naczyń wieńcowych z zastosowaniem techniki odwzorowania objętości i odejmowania sąsiednich struktur anatomicznych (subtrakcja).



Rycina 2.4. Tomografia komputerowa głowy. Różne postacie krwotoków śródczaszkowych: **a** – uraz czaszki. Krwíak śródmózgowy (gwiazdka) otoczony rozległym obrzękiem lewej półkuli mózgu (strzałki), przemieszczenie struktur wewnątrzmoźgowych na prawą stronę, ucisk lewej komory bocznej, obrzęk części miękkich zewnątrzczaszkowych po lewej stronie; **b** – uraz czaszki. Krwíak nadwardówkowy (gwiazdka). Przemieszczenie struktur wewnątrzczaszkowych na prawą stronę i ucisk lewej komory bocznej, obrzęk części miękkich zewnątrzczaszkowych po lewej stronie w okolicy krwíaka; **c** – krwíak podwardówkowy po lewej stronie (gwiazdka) z objawami wzmożonego ciśnienia śródczaszkowego i ucisku. Przemieszczenie struktur wewnątrzczaszkowych na prawą stronę; **d** – stan po pęknięciu tętniaka mózgu. Krew w przestrzeniach podpajęczynówkowych podstawy mózgu (gwiazdki); **e** – postrzał okolicy czołowej. Krew w komorach bocznych mózgu (gwiazdki).



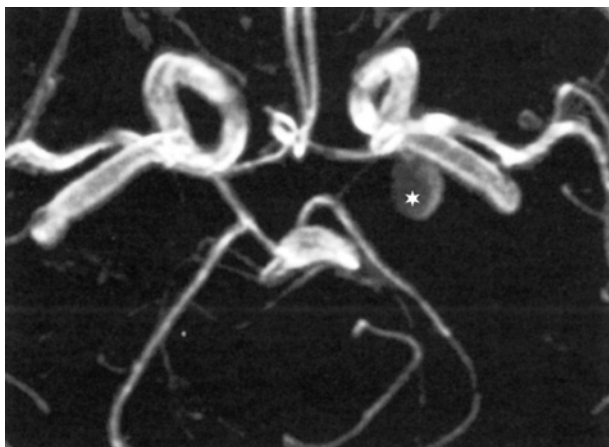
Rycina 2.5. Tomografia komputerowa głowy. Udar niedokrwienny mózgu: **a** – rozległy zawał płata potylicznego po lewej stronie i mniejszy w obrębie tylnej części płata potylicznego po prawej stronie; **b** – duże ognisko zawału w płacie skroniowym prawym.



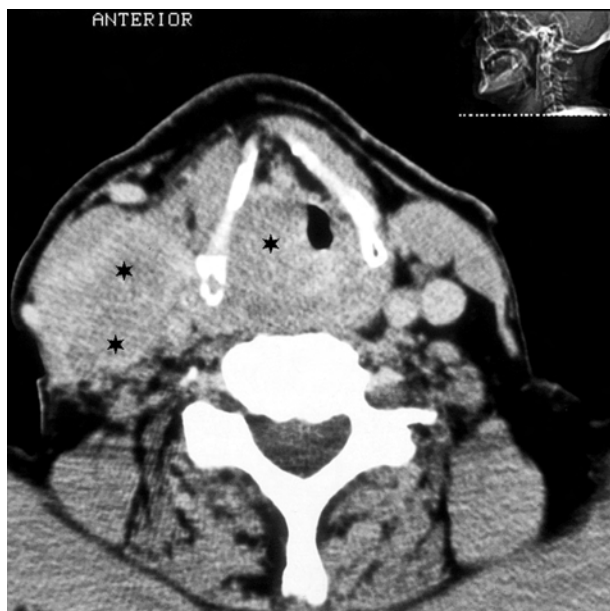
Rycina 2.6 a–d. Tomografia komputerowa głowy. Kolorowe mapy odzwierciedlające ukrwienie mózgu (**a–c**). Mapa przepływu krwi (CBF) umożliwiającą różnicowanie obrazu martwicy (kolor czerwony) i penumbry, czyli obszaru upośledzonego przepływu zagrożonego martwicą (**d**).



Rycina 2.7. Tomografia komputerowa głowy po dożylnym podaniu środka cieniującego. Dobrze ograniczone, okrągłe ognisko w okolicy czołowej przyszczątkowej po lewej stronie z objawami obrzęku w otoczeniu i przemieszczeniem sierpa mózgu. Obraz odpowiada guzowi o typie oponiaka.



Rycina 2.8. Arteriografia TK tętnic mózgowych po dożylnym podaniu środka cieniującego. Tętniak częściowo wypełniony skrzepliną (gwiazdka).



Rycina 2.9. Tomografia komputerowa szyi. Rak krtani (gwiazdka) z przerzutami do węzłów chłonnych szyi po prawej stronie (gwiazdki).