

# Nowe metody testowania produktów aerozolowych do zastosowań w radiografii przemysłowej

## The novel testing methods of aerosol products for industrial radiography

Witold Rzodkiewicz (Główny Urząd Miar)

W pracy zaprezentowano nowe metody wyznaczania objętości produktów aerozolowych w oparciu o radiografię cyfrową z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego. Dla potrzeb nowych metod stworzono system wizyjny CCD-DR (charge coupled device – digital radiography) z lampą rentgenowską. Do celów porównawczych została przetestowana pod względem zawartości objętości duża liczba puszek o określonych pojemnościach. W przyszłości zamierza się wykorzystać algorytm do tomografii komputerowej dla zastosowań radiografii przemysłowej. Umożliwi to przeprowadzenie dokładniejszych pomiarów określania objętości zarówno w testowanych produktach aerozolowych, jak i w innych obiektach.

In the paper, new methods related to the determination of the volumetric content of canister filled with aerosol products are presented. The new methods are based on direct digital radiography (DR) with using X-ray radiation. For the needs of new methods, the X-ray CCD-DR imaging system was built and developed. For comparison purposes, with regard to the volumetric content, a lot of metal cans of specific capacities were inspected. In the future, computed tomography (CT) for industrial radiography in our laboratory will be used. It will give us possibility for very accurate measurements to determine volumetric content of examined canisters and other various mechanical elements.

### Wstęp

Jakość produktów odgrywa bardzo istotną rolę zarówno w przemyśle, jak i nauce. Jakość ta ma zapewnić zadowolenie klientowi oraz zmniejszyć ryzyko i koszty wymiany wadliwych produktów. W szczególności, testowanie produktów powinno być przeprowadzane w sposób bardzo dokładny, zanim produkt ten zostanie dostarczony do klienta. Zatem, zawartość takiego produktu aerozolowego powinna być identyczna jak podana na etykiecie. W szczególności dotyczy to nominalnej wartości objętości podanej przez producenta na puszcze produktu aerozolowego. Produkty aerozolowe wytwarzane są obecnie z różnych materiałów o różnorodnych kształtach, stosownie do potrzeb klientów. Wyroby te znajdują zastosowanie w przemyśle kosmetycznym, motoryzacyjnym, leczniczym itp.

W związku z powyższym, dla określenia objętości powinna zostać użyta nieniszcząca metoda testująca

do zastosowań w radiografii przemysłowej. Obecnie, istnieje kilka technik obrazowania z użyciem promieni rentgenowskich, które okazały się być jednym z najwartościowszych narzędzi w testowaniu zawartości produktu. Do najbardziej znanych i podstawowych metod rejestracji obrazów rentgenowskich zalicza się:

- radiografię (układ błona/folia wzmacniająca),
- fluoroskopię (elektronowe wzmacnianie obrazu);
- radiografię cyfrową pośrednią (CR),
- radiografię (i fluoroskopię) cyfrową bezpośrednią (DR).

Badania te, zwane radiograficznymi, wykorzystują zjawisko pochłaniania promieniowania przenikliwego przez obiekty poddane jego działaniu. Źródłami promieniowania w badaniach radiograficznych są nie tylko aparaty rentgenowskie, lecz także źródła izotopowe, takie jak  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  czy  $^{60}\text{Co}$ . Po przejściu jednorodnej wiązki promieniowania przez badany obiekt, skutkiem wewnętrznego

zróznicowania struktury lub kształtu tego obiektu, następuje zróznicowanie natężenia w strumieniu promieniowania proporcjonalne do stopnia pochłaniania przy przechodzeniu przez obiekt. Różnice te rejestrowane są przez detektor, którym może być: w radiografii tradycyjnej błona srebrowa, w radiografii komputerowej (CR) luminoforowa płyta obrazowa lub bezpośredni detektor cyfrowy w radiografii bezpośredniej (DR). Badania radiograficzne umożliwiają wykrywanie wad wewnętrznych, powierzchniowych oraz podpowierzchniowych badanych obiektów.

Głównym zadaniem radiografii cyfrowej jest rekonstrukcja parametrów fizycznych, które określają techniczne cechy monitorowanych obiektów poddawanych testom [1, 2].

Jednym z takich ważnych parametrów struktury jest efektywna liczba atomowa  $Z_{eff}$  [1-4]. W gruncie rzeczy ta wielkość może dać początkową ocenę składu chemicznego materiału. Duża wartość  $Z_{eff}$  ( $Z_{eff} \geq 20$ ) odpowiada związkom nieorganicznym i metalom. Podczas gdy mała wartość  $Z_{eff}$  ( $Z_{eff} \leq 10$ ) wskazuje na obecność związków organicznych, efektywna liczba atomowa ma decydujące znaczenie w wielu zastosowaniach. Efektywną liczbę atomową  $Z_{eff}$  określa się na podstawie niżej przedstawionej zależności:

$$Z_{eff} = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N a_k A_k Z_k^{p+1}}{\sum_{k=1}^N a_k A_k Z_k} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

gdzie  $a_k$  – koncentracja molowa, tj. liczba atomów każdego rodzaju w jednej molekułe,  $Z_k$  i  $A_k$  są to odpowiednio liczby atomowe i masowe w molekułe [2];  $N$  – całkowita liczba substancji prostych (pierwiotków);  $p$  – indeks zależny od wybranego mechanizmu absorpcji kwantu promieniowania (zjawisko fotoelektryczne, rozproszenie Comptona, tworzenie się par jonów).

W pracy tej celowe wydawało się opracowanie nowej metody określenia objętości produktów aerozolowych z zastosowaniem bezpośredniej radiografii cyfrowej. Ze względu na wysokie koszty sprzętu do radiografii, celem było stworzenie stanowiska pomiarowego do testowania produktów aerozolowych dla zastosowania nowych metod pomiaru objętości. Zatem, w pracy tej głównym celem jest zaprezentowanie systemu wizyjnego CCD-DR (charge coupled

device – digital radiography) z lampą rentgenowską zbudowanego w naszym laboratorium oraz skoncentrowanie się na przedstawieniu nowych metod określania objętości produktów aerozolowych z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego.

## Metody określania objętości produktów aerozolowych

W tym rozdziale omówione zostały metody podstawowe (w tym metoda wagowa i metoda zaproponowana przez FEICA) oraz nowe metody określania objętości produktów aerozolowych.

### Metody bez zastosowania promieni X

#### a) Referencyjna metoda wagowa

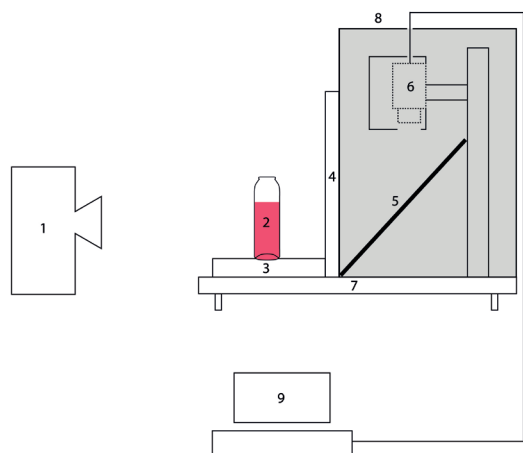
Ilość produktu, np. pianki poliuretanowej w puszcze, można oszacować na podstawie zważonej puszki wypełnionej ww. substancją. Następnie waży się identyczną pustą puszkę dostarczoną równocześnie przez danego producenta i bierze się różnicę z powyższych pomiarów masy. Stąd, mamy masę netto składników w puszcze. W oparciu o określoną masę i gęstość składnika zawartego w puszcze, obliczamy objętość danego składnika lub składników. Metoda ta, zwana „wagową”, posłużyła jako metoda referencyjna w badaniu metalowych puszek. Opis innych metod określania objętości można znaleźć w pracach [5, 6].

### Metody z zastosowaniem promieni X

#### a) Układ wizyjny CCD-DR z lampą rentgenowską

Koszty zakupu systemu wizyjnego do pracy z lampą rentgenowską do zastosowań w radiografii przemysłowej są bardzo wysokie. [7, 8]. W posiadaniu naszego laboratorium są zarówno źródła promieniowania X, jak i gamma. Zatem, zdecydowano się na stworzenie w naszym laboratorium układu wizyjnego CCD-DR z lampą rentgenowską (rys. 1).

Zasada pomiaru polega na użyciu ekranu fluorescencyjnego (4), którego rolą jest zamiana niewidzialnego promieniowania rentgenowskiego na światło widzialne. Ekran taki umocowany jest prostopadle w stosunku do osi wiązki promieniowania i równoległe do prześwietlanego przedmiotu. W tym przypadku ekran ten ustawiony jest pionowo w specjalnie zaprojektowanej ramie. Za ekranem fluorescencyjnym umiejscowione jest płaskie lustro (5) pod kątem 45 stopni do niej. Na statywie zamocowany jest aparat cyfrowy (6) w ołowianej obudowie (8). Obiektowy



Rys. 1. Diagram zaproponowanego układu wizyjnego CCD-DR z lampą rentgenowską: 1 – lampa rentgenowska z wyposażeniem (generator wysokiego napięcia, panel sterowania etc.), 2 – testowany przedmiot, 3 – stolik obrotowy, 4 – ekran fluorescencyjny, 5 – lustro, 6 – aparat cyfrowy, 7 – stolik, 8 – obudowa, 9 – komputer osobisty PC

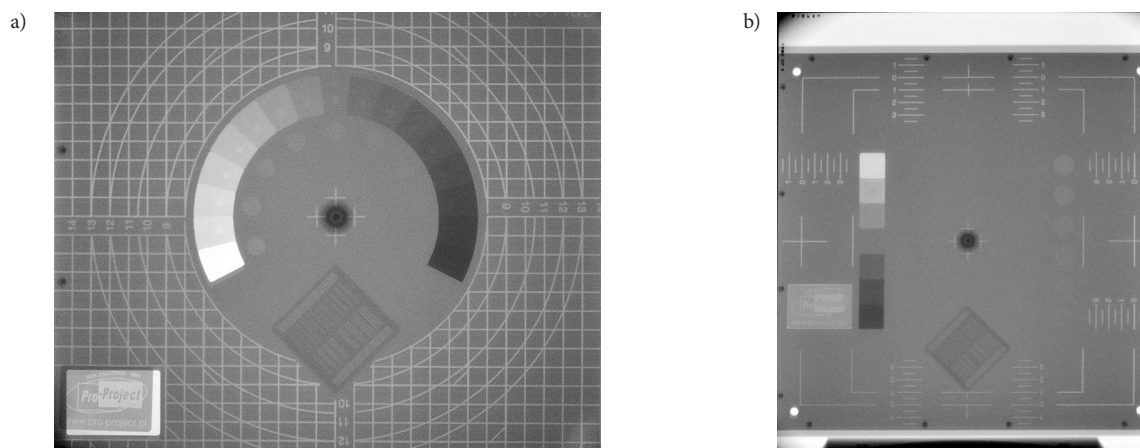
aparatu ustawiony jest w ten sposób, aby widział całą powierzchnię lustra. Należy nadmienić, że przed ekranem fluorescencyjnym pełniącym rolę folii wzmacniającej, zamontowany jest stolik obrotowy (3). Przechodząc przez badany obiekt (2) promieniowanie rentgenowskie jest częściowo w nim pochłaniane. Na podstawie różnicy w pochłanianiu promieniowania rentgenowskiego przez różne substancje, możliwe jest obserwowanie prześwieatanych obiektów. Na ekranie fluorescencyjnym powstaje obraz monochromatyczny, który jest następnie rzutowany na powierzchnię lustra. Aparat cyfrowy wykonuje zdjęcie powierzchni lustra i wysyła je za pośrednictwem kabla USB do komputera PC. W komputerze następuje przetwarzanie obrazu i jego analiza. Zaproponowany układ wizyjny CCD-DR z lampą rentgenowską powstał w oparciu o założenia obrazowania portalowego (portal imaging) zaczerpnięte z pracy [9].

Dla walidacji stanowiska pomiarowego, zgodnie z procedurami dla urządzeń medycznych, wykonano testy zdjęć rentgenowskich dla dwóch fantomów dla fluoroskopii i radiografii cyfrowej. Wyniki przedstawiono na rys. 2. Potwierdziły one wysoką jakość obrazu uzyskanego przy pomocy zaproponowanego w tej pracy układu wizyjnego CCD-DR z lampą rentgenowską.

#### b) Metoda OCF (one component foam) FEICA

W pracy tej do określenia objętości zastosowano metodę firmy FEICA. Szczegółowy sposób określania tą metodą rzeczywistej objętości ciekłych składników w metalowej puszcze zaprezentowano w pracy [10]. Wywzorcowane puszki są przygotowywane poprzez wypełnianie ich wodą o tej samej nominalnej objętości, co puszka testowana (wykonywane jest to każdorazowo przed badaniem nowej partii wyrobu aerozolowego). Kształt obu wywzorcowanych puszek (średnice, ugięcie u dołu) musi być taki sam jak puszki testowanej. Jakość wody jest dokładnie mierzona poprzez ważenie i temperatura wody powinna wynosić  $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ . Zawartość puszek wywzorcowanych powinna zależeć od nominalnej objętości puszki, która będzie poddana testom [10].

Zdjęcie rentgenowskie jest wykonywane dla każdej testowanej puszki, z puszką wywzorcowaną nr 1 po jednej stronie i z puszką wywzorcowaną nr 2 po drugiej stronie. Jeśli istnieje taka konieczność to można ustawić więcej puszek testowanych pomiędzy te dwie wywzorcowane. Należy zapewnić, aby puszki stały na takiej samej powierzchni, która powinna być doskonale wypoziomowana. Zdjęcie rentgenowskie powinno być wykonane w ten sposób, aby lampa rentgenowska znajdowała się mniej więcej na tej samej



Rys. 2. Obrazy rentgenowskie fantomów a) „Pro-alfa” firmy ProProject dla fluoroskopii i b) Pro-Digi firmy ProProject radiografii cyfrowej

wysokości co spodziewany poziom cieczy testowanej puszkki, tj. pomiędzy dwoma poziomami cieczy we wywzorcowanych puszkach. Odpowiedni poziom napełnionej testowanej puszkki jest obliczany zgodnie z równaniem [10]:

$$V_x = V_2 + \frac{x}{y} \cdot (V_1 - V_2) \quad (2)$$

gdzie  $x$  i  $y$  są odległościami zmierzonymi na podstawie obrazu rentgenowskiego z zastosowaniem wywzorcowanego przymiaru liniowego,  $V_1$  – objętość wywzorcowanej puszkki nr 1 i  $V_2$  – objętość wywzorcowanej puszkki nr 2. Im większa jest skala obrazu rentgenowskiego, tym dokładniej mogą być zmierzone wielkości  $x$  i  $y$ . Należy zauważyć, że w przypadku, gdy poziom napełnionej cieczy w testowanej puszcze jest mniejszy niż we wywzorcowanej puszcze nr 2, powinno się przyjąć znak ujemny dla odległości  $x$  [13]. Błąd wyznaczenia objętości aerozolu w pojemniku, przy zastosowaniu opisanej metody pomiarowej, nie przekracza 0,4 %, a główną tego przyczyną jest m.in. subiektywna ocena osoby wykonującej pomiar, jakość monitora komputera PC czy zdolność rozdzielcza stosowanego układu wizyjnego.

c) Nowe metody testujące

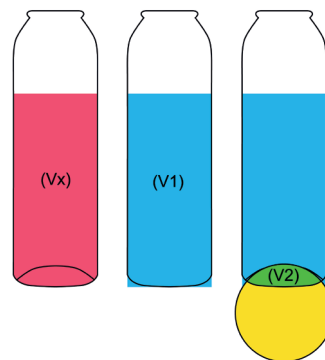
Metoda wspomniana wcześniej jest bardzo prosta w użyciu pod warunkiem, że pusta puszkka, identyczna do testowanej, zostanie dostarczona przez producenta. Aby uniknąć spełnienia ww. warunku stworzono nową metodę (pierwszą metodę testującą). Można więc zauważyć, że puszkka produktu aerozolowego składa się ze wzajemnie siebie przenikających brył: walca i kuli (rys. 3-5).

W związku z powyższym, objętość spreju (np. cieczy, pianki) w puszcze jest wyrażona w postaci różnicy pomiędzy walcem a wycinkiem kuli:

$$V_x = V_1 - V_2 = (\pi \cdot R^2 \cdot H) - \left( \frac{\pi \cdot h}{6} \cdot (3r^2 + h^2) \right) \quad (3)$$

gdzie  $R$  – promień walca,  $H$  – wysokość walca,  $r$  – promień wycinka kuli,  $h$  – wysokość wycinka kuli.

Zatem, gdy dysponuje się danym przedmiotem o znanych właściwościach fizycznych wysokości, szerokości (średnicy), np. wywzorcowanym stalowym walcem (rys. 5 po prawej stronie puszkki) i obrazem rentgenowskim tego walca, to rozmiar pikselu można łatwo skonwertować do rozmiaru w milimetrach:



Rys. 3. Graficzna reprezentacja pierwszej nowej metody testującej

$$k = \frac{a}{b} \quad (4)$$

gdzie  $k$  – współczynnik kalibracyjny dla obrazu,  $a$  – uśredniona wartość szerokości (średnicy) i wysokości referencyjnego przedmiotu w mm,  $b$  – średnia wartość szerokości (średnicy) i wysokości referencyjnego przedmiotu w pikselach. Znając wartości  $T$ ,  $H$ ,  $r$ ,  $h$ , można obliczyć objętość spreju.

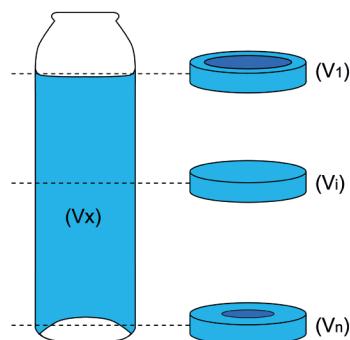
Szczegółowa analiza obrazu rentgenowskiego została przeprowadzona z zastosowaniem programu GIMP [11]. Dla wzmocnienia kontrastu obrazu zastosowano filtr Laplace'a o masce:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ z opcją normalizacyjną i trzema kanałami kolorów: R,G,B.}$$

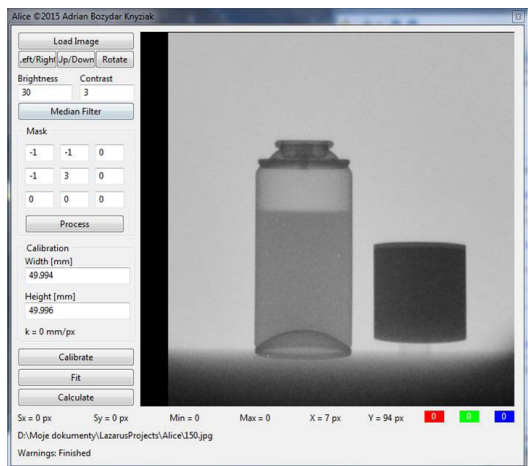
Graficzna reprezentacja drugiej nowej metody testującej jest przedstawiona na rys. 4.

Pierwsza metoda testująca została udoskonalona i w większości zautomatyzowana.

Pierwszy krok nowej drugiej metody testującej stanowi wstępne przetworzenie obrazu rentgenowskiego. Szum jest redukowany oraz krawędzie są wyostrzane. W następnym kroku, próbka aerozolu jest wybierana w obrazie rentgenowskim przez operatora.



Rys. 4. Graficzna reprezentacja drugiej nowej metody testującej



Rys. 5. Oprogramowanie do obliczania objętości puszek z zastosowaniem drugiej nowej metody testującej

Cały obszar substancji jest wypełniony jednolitym kolorem, np. czerwonym. Następnym krokiem jest skanowanie obrazu rentgenowskiego wzdłuż jego wysokości. Krok skanowania wynosi jeden piksel. Podczas skanowania zaznaczone piksele są znajdowane i zliczane. Istnieją dwie możliwe sytuacje znajdowania i zliczania pikseli:

- piksele w danej linii zachowują ciągłość, wskutek czego objętość walca jest obliczana;
  - piksele w danej linii nie zachowują ciągłości, wskutek czego objętość pierścienia jest wyznaczana.
- Pojedyncze objętości  $V_i$  są sumowane i objętość produktu aerozolowego wyrażona jest wzorem:

$$V_x = \sum_{i=0}^N V_i \quad (5)$$

W celu zaimplementowania powyższej metody napisano program w Delphi w środowisku Lazarus. Zrzut ekranu tego programu zilustrowano na rys. 5.

## Wyniki przeprowadzonych testów

Temperatura pomiaru dla każdego pomiaru objętości dla każdej metody była taka sama  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wyniki pomiarów objętości zostały przedstawione w tabelach 1-3.

Na podstawie wyników podanych w tab. 3 można zauważyć, że nie ma znacznej różnicy pomiędzy wartościami otrzymanymi dla puszek o objętości 140 ml i 700 ml. W tych dwóch metodach menisk nie został uwzględniony w obliczeniach objętościowych. W przypadku metody nr 3 menisk został wzięty pod uwagę, co uprawdopodobnia uzyskanie rzeczywistych wyników objętości tą metodą.

Tabela 1. Obliczone wartości objętości  $V_x$  metodą FEICA na tle metody wagowej  $V_{ref}$ .

$V_{ref}$ (ml)	$V_1$ (ml)	$V_2$ (ml)	$V_x$ (ml)	$V_{ref} - V_x$ (ml)	$V_{ref}/V_x$
139,940	149,907	129,967	139,937	0,003	-0,002 %
185,005	199,936	169,944	185,404	-0,399	0,215 %
449,931	499,957	399,986	450,656	-0,725	0,161 %
699,960	749,980	649,940	699,960	0,000	0,000 %

Tabela 2. Obliczone wartości objętości  $V_x$  pierwszą nową metodą testującą na tle metody wagowej  $V_{ref}$ .

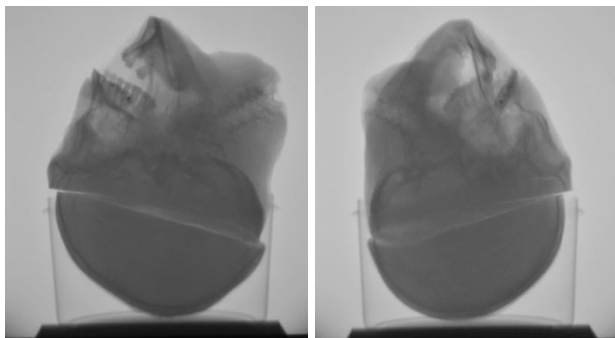
$V_{ref}$ (ml)	$V_1$ (ml)	$V_2$ (ml)	$V_x$ (ml)	$V_{ref} - V_x$ (ml)	$V_{ref}/V_x$
139,940	148,291	8,666	139,625	0,315	-0,226 %
185,005	192,126	6,443	185,683	-0,678	0,365 %
449,931	466,355	14,760	451,595	-1,664	0,368 %
699,960	709,746	12,105	697,641	2,319	-0,332 %

Tabela 3. Obliczone wartości objętości trzema metodami (metoda nr 1 – referencyjna metoda wagowa, metoda nr 2 – metoda FEICA OFC, metoda nr 3 – pierwsza nowa metoda testująca).

Metoda nr	140 (ml)	185 (ml)	450 (ml)	700 (ml)
1	139,940	185,005	449,931	699,960
2	139,937	185,404	450,656	699,960
3	139,625	185,683	451,595	697,641

Ponadto, oprócz testów produktów aerozolowych badano także jedną z komór jonizacyjnych o objętości ok.  $4,11 \text{ cm}^3$ . Na podstawie zdjęć rentgenowskich takiej komory dokonano obliczenia objętości komory, której średnia wyniosła  $4,115 \text{ cm}^3$ . Zatem różnica w objętości pomiędzy wartością wyliczoną przez zawodowego grafika, stosującego nową metodę testującą a wartością z raportu wynosiła  $0,0055 \text{ cm}^3$  (ok. 0,13 %). Niepewność pomiaru była mniejsza niż 0,2 %. Należy zaznaczyć, że wartości objętości komór jonizacyjnych obliczane są zazwyczaj za pomocą maszyn współrzędnościowych.

Obecnie trwają prace nad trzecią metodą testującą. Prace te są związane z opracowywaniem algorytmu dla tomografii komputerowej. Część wyników z tej pracy przedstawiona została na rys. 6. Najnowsza metoda pozwoli bardzo dokładnie wyznaczyć objętości badanych nie tylko puszek, ale też innych obiektów o skomplikowanych kształtach.



Rys. 6. Zdjęcia rentgenowskie czaszki ludzkiej dla dwóch wybranych klatek filmu z zastosowaniem stolika obrotowego dla tomografii komputerowej

## Podsumowanie i perspektywy na przyszłość

Dwie pierwsze metody: wagowa i FEICA nie uwzględniały menisku cieczy w obliczeniach objętościowych. Zaobserwowano widoczną różnicę pomiędzy wynikami objętości przedstawionymi przez pierwsze dwie metody a metodą trzecią tj. pierwszą metodą testującą. W określeniu objętości badanego przedmiotu, w nowych metodach testujących uwzględnia się istnienie menisku cieczy. W związku z powyższym wydaje się, że wyniki otrzymane z zastosowaniem nowych metod są najbardziej prawdopodobne. Aktualnie trwają prace nad opracowaniem algorytmu dla tomografii komputerowej. Najnowsza metoda ma posłużyć do bardzo dokładnego wyznaczenia objętości badanych nie tylko puszek, ale też innych elementów o skomplikowanych kształtach. Posiadanie tak bardzo dokładnej metody stworzy możliwość uzyskania wyników o dobrej jakości metrologicznej oraz pozwoli stosować ją nie tylko w radiografii przemysłowej, ale również w ochronie radiologicznej i radioterapii.

W niedalekiej przyszłości zamierza się także użyć zaawansowanych procedur w przetwarzaniu obrazów. Wzorując się m.in. na pracy [12], planuje się zastosować następujące procedury w przetwarzaniu obrazów rentgenowskich: 1) pobieranie oryginalnego obrazu DR, 2) wykonanie korekcji płaskiego pola, 3) wykonanie korekcji gamma obrazu, 4) zastosowanie filtra mediany, 5) wykonanie wzmocnienia kontrastu obrazu.

Wykonane obrazy radiografii cyfrowej w większości charakteryzują się małym kontrastem i/bądź prześwieceniem, które trudno wówczas przetworzyć. Chodzi tu przede wszystkim o pozbycie się szumu i wzmocnienie kontrastu. W przeszłości wykorzystywane były wieloskalowe techniki wzmacniania kontrastu, takie jak MUSICA (multiscale image contrast

amplification) [13], czy metody oparte na transformatach falkowych [14], które potwierdziły, że są bardzo efektywnymi metodami w poprawianiu jakości obrazów rentgenowskich. Zatem, aby uzyskiwać wyniki wystarczające dla naszych celów, planuje się użycie filtra mediany i transformacji konturów (contourlet transform) [15] po korekcjach płaskiego pola i korekcji gamma. W przyszłości, wybrany algorytm wzmocnienia kontrastu pozwoli na uzyskanie satysfakcjonujących wyników w wyodrębnieniu w sposób bardzo dokładny znaczących cech na obrazie rentgenowskim, takich jak krzywe, linie krawędzie czy kontury.

## Literatura

- [1] Naydenov S.V., Ryznikov V.D., Smith C.F., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B215, 552 (2004).
- [2] Naydenov S.V., Ryznikov V.D., Smith C.F., Wood D., arXiv:physics/0504170v2, 1 (2006).
- [3] Manohara S.R., Hanagodimath S.M., Thind K.S., Gerward L., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B266, 3906 (2008).
- [4] Singh V.P., Badiger N.M., Kucuk N., Journal of Nuclear Chemistry, 2014, Hindawi Publishing Corporation, 1 (2014).
- [5] Czechowski A., Knyziak A.B., Metrologia i Probiernictwo – Biuletyn Głównego Urzędu Miar 1-2 (8-9)/2015.
- [6] Webb P.A., Bulletin of Micromeritics Instrument Corporation. Volume and density determinations for particle technologists, 2/16/01, 1 (2001).
- [7] Liang L., Zhi-ping C., Xing Y.X., Zhang L., Kang K., Wang G., Physics in Medicine and Biology, 51, 5643 (2006).
- [8] Liang L., Ke-jun K., Zhi-qiang C., Li Z., Yuxiang X., Journal of X-ray Science and Technology, 17, 135 (2009).
- [9] Golnik N., Radioterapia, skrypt (pdf), międzywydziałowy kierunek „INŻYNIERIA BIOMEDYCZNA”, Politechnika Gdańska.
- [10] FEICA, Determination of the volumetric content of an OCF canister, Brussel, 2013.
- [11] Whitt P., Beginning photo retouching and restoration using GIMP, Apress, New York, 2014.
- [12] Ren Y., Wu S., Wang M., Cen Z., Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2014, Hindawi Publishing Corporation, 1 (2014).
- [13] Vuylsteke P., Shoeters E., Medical Imaging 1994: Image Processing. Proceedings of SPIE, 2167, 551, Newport Beach, Calif, USA 1994.
- [14] Stahl M., Aach T., Dippel S., Medical Physics, 27, 56 (2000).
- [15] Do M.N., Vetterli M., IEEE Transactions on Image Processing, 14, 2091 (2005).