

Paweł Sztuka*, Krzysztof Grudzień*, Andrzej Romanowski*

Oprogramowanie wspomagające analizę i przetwarzanie obrazów tomograficznych

1. Wprowadzenie

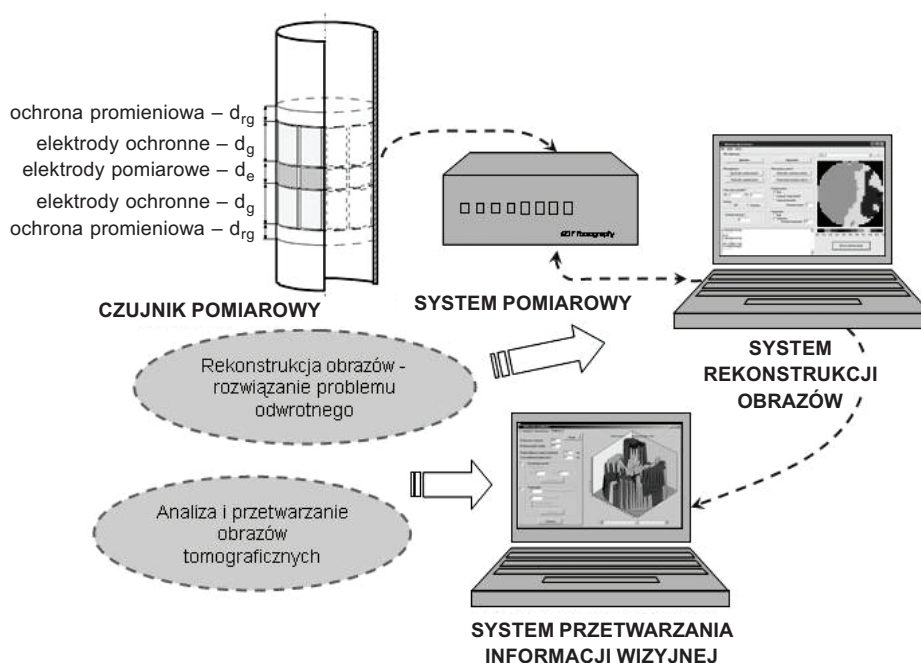
W systemach kontroli i sterowania procesami przemysłowymi opartych na tomografii procesowej można wyróżnić pięć głównych modułów [1, 2]:

- 1) czujnik pomiarowy,
- 2) system pomiarowy wchodzący w skład części sprzętowej systemu,
- 3) moduł rekonstrukcji obrazu,
- 4) moduł przetwarzania i analizy obrazów stanowiący implementację algorytmów numerycznych,
- 5) moduł generujący sygnał sterujący procesem (w pętli sprzężenia zwrotnego).

Na rysunku 1 został przedstawiony schemat systemu kontroli i sterowania z poszczególnymi elementami. Dla niniejszego artykułu najistotniejszy jest moduł przetwarzania i analizy obrazów.

W większości zastosowań technik tomograficznych pierwszym etapem pozyskiwania informacji na temat stanu procesu przemysłowego jest rekonstrukcja obrazu tomograficznego. W przypadku tomografii pojemnościowej przedstawia on rozkład przenikalności dielektrycznej materiału wewnątrz przestrzeni czujnika [1–4]. Rozkład znormalizowanej przenikalności rozważany jest zazwyczaj jako względna dystrybucja koncentracji komponentów mieszaniny procesu przemysłowego w przekroju poprzecznym naczynia. Odcienie szarości pikseli obrazu reprezentują względną koncentrację materiału (materiału o wyższej przenikalności dielektrycznej w stosunku do materiału o niższej przenikalności dielektrycznej) w każdym elemencie przekroju poprzecznego czujnika. Dla tak określonego obrazu są stosowane i szeroko rozwijane metody analizy i przetwarzania informacji wizyjnej. Celem tych prac jest ekstrakcja charakterystycznych parametrów procesu przemysłowego, umożliwienie przewidzenia niepożądanych zjawisk występujących w procesie przemysłowym oraz możliwość wnikliwego przebadania dynamicznych zjawisk czasowo-przestrzennych, zachodzących w badanym procesie przemysłowym. Informacja otrzymana z obrazów tomograficznych może stanowić sygnał monitorujący czy kontrolujący badany proces przemysłowy.

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka



Rys. 1. Moduły kontroli i monitorowania procesu przemysłowego na podstawie systemu pomiarowego tomografii procesowej

2. Stochastyczny model przepływu

W opisywanym w niniejszym artykule oprogramowaniu zaimplementowane zostały metody analizy sekwencji obrazów tomograficznych opracowane w pracach [5– 7], pozwalające na wyznaczenie jednorodnych struktur przepływu poprzez zastosowanie dekompozycji (segmentacji) sekwencji obrazów tomograficznych zarówno z jednej płaszczyzny, jak i dwóch płaszczyzn czujnika pomiarowego. Celem dekompozycji przepływu jest klasyfikacja przestrzennego obszaru objętego czujnikiem pomiarowym względem czasowo-przestrzennego zachowania się badanego procesu przemysłowego.

Analiza danych w niniejszej rozprawie opiera się na zrekonstruowanych obrazach tomograficznych. Pojedynczy zrekonstruowany obraz tomograficzny zapisywany jest w postaci macierzy X o liczbie elementów $M = 32 \times 32$

$$X_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,32} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{32,1} & \cdots & x_{32,32} \end{bmatrix}_{32 \times 32} \quad (1)$$

gdzie i, j – indeksy elementów obrazu, $i = 1, \dots, 32, j = 1, \dots, 32$.

Każdy element macierzy $x_{i,j}$ oznacza wartość koncentracji materiału dla piksela obrazu położonego w punkcie o indeksach (i, j) . Na potrzeby implementacji opracowanej metody analizy obrazów tomograficznych wygodniejszym jest posłużenie się poniższym zapisem l -tego obrazu tomograficznego (w artykule nazywany jako l -ta ramka) w określonej sekwencji

$$X_i(l) = [x_{1,l} \quad x_{2,l} \quad \cdots \quad x_{1024,l}]_{1 \times 1024} \quad (2)$$

gdzie i – numer elementu obrazu, $i = 1, \dots, 1024$.

Sekwencje obrazów tomograficznych w czasie, ze względu na kwantowy charakter pomiaru i przetwarzania, można zapisać jako $X(t_l)$, gdzie l oznacza numer obrazu (ramki) i jest powiązany z czasem t zależnością $t = \Delta T \cdot l$, ΔT oznacza czas próbkowania. Sekwencja 2D obrazów tomograficznych rozważana jest jako stochastyczny M -wymiarowy wektor obrazu (M -liczba procesów stochastycznych, odpowiadająca liczbie pikseli w obrazie tomograficznym). Wektor obrazu $X(t) = [X_i(t_j)]_{N \times M}$ można przedstawić w postaci:

$$\mathbf{X}(t) = [X_i(t_j)]_{\substack{i=1,\dots,M \\ j=1,\dots,N}} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & \cdots & x_{M,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} & \cdots & x_{M,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{1,N} & x_{2,N} & \cdots & x_{M,N} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{obraz 1} \\ \text{obraz 2} \\ M \\ \text{obraz } N \end{matrix} \quad (3)$$

gdzie:

- i – numer piksela w obrazie, $i = 1, \dots, M$;
- j – numer obrazu, $j = 1, \dots, N$;
- M – liczba elementów (pikseli) w obrazie;
- N – liczba obrazów poddanych analizie.

Każdy z elementów wektora X_i w opracowanej metodzie analizy obrazów tomograficznych jest rozważany jako elementarny proces stochastyczny EP_i , który określony jest przez probabilistyczne wartości i -tego piksela w sekwencji obrazów tomograficznych.

Dla tak zdefiniowanego stochastycznego modelu przepływu opracowane zostały metody dekompozycji przepływu, których wynikiem jest rozkład przepływu na jednorodne składowe. Metody te zostały następnie zaimplementowane w aplikacji *Tomograf*, opisanej w niniejszym artykule.

3. Metody segmentacji czasowo-przestrzennej obrazów tomograficznych

Z punktu widzenia zastosowania tomografii pojemnościowej do pomiaru parametrów przepływu, które mogą zostać użyte do scharakteryzowania procesu przemysłowego, najważniejsze z nich to:

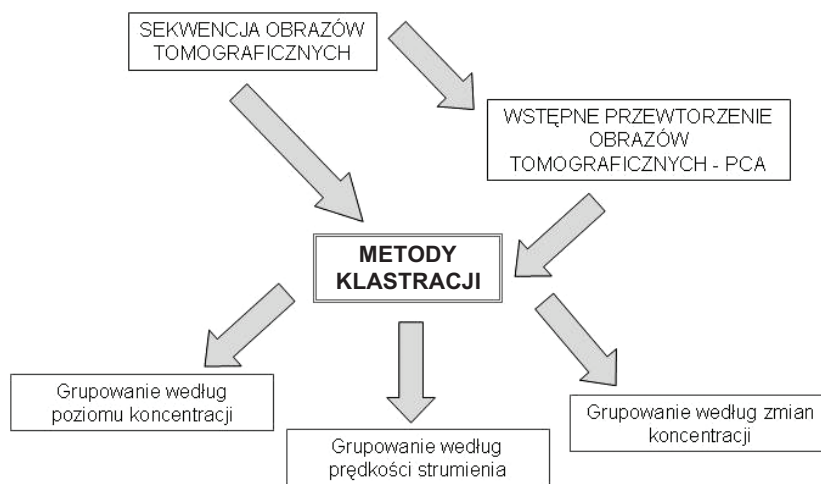
- profil prędkości przepływu materiału (prędkość określona dla każdego piksela obrazu);
- profil koncentracji materiału (koncentracja określona dla każdego piksela obrazu).

Zarówno prędkość, jak i koncentracja materiału są inne dla różnych lokalizacji w przekroju poprzecznym czujnika pomiarowego. Prowadzone badania [3, 4, 8] pozwalają wysnuć wniosek, że strumień przepływającego materiału przedstawia się jako komplet niezależnych zmiennych, które odzwierciedlają jego dynamiczny charakter (prędkość, masa przepływu, koncentracja itd.). Wyznaczanie jednorodnych struktur strumienia pozwala na badanie i analizę zachowania się zmiennych strumienia dla poszczególnych struktur jako alternatywa dla analizy całego strumienia. W celu wyznaczenia jednorodnych struktur przepływu zaproponowane zostały metody grupowania oparte na segmentacji czasowo-przestrzennej obszaru objętego czujnikiem pomiarowym. Jednorodne struktury (składowe), jako rezultat dekompozycji przepływu, powstają poprzez grupowanie procesów elementarnych zdefiniowanych przez losowe wartości pikseli w określonym przedziale czasu.

Do grupowania pikseli w jednorodne obszary zaimplementowane zostały w aplikacji *Tomograf* dwie metody zaadaptowane z metod rozpoznawania obrazów [9–11]:

- 1) algorytm grupowania przez podział (metoda k -średnich),
- 2) algorytm grupowania hierarchicznego.

Zaimplementowane algorytmy do wyznaczenia jednorodnych struktur w sekwencji obrazów tomograficznych dla przepływającej substancji pozwalają na wybór cech, według których dokonywany jest podział czasowo-przestrzenny przestrzeni czujnika pomiarowego. Cechą tą może być poziom bądź czasowe zmiany koncentracji materiału w każdym elemencie, na jakie został podzielony przekrój poprzeczny przestrzeni pomiarowej, lub prędkość przepływu materiału dla każdego elementu (rys. 2).



Rys. 2. Podział metod dekompozycji wielofazowego przepływu

3.1. Grupowanie metodą k -średnich

Głównym zadaniem metody k -średnich jest podział obiektów na k -grup, w których poszczególne elementy różnią się od siebie jak najmniejszą liczbą cech [9, 10]. W metodzie

użytej w programie *Tomograf*, centra wybierane są losowo. Następnie poprzez wybraną liczbę iteracji poszukiwane jest rozwiązanie, czyli przyporządkowywanie kolejnych cząsteczek do grupy. W algorytmie k -średnich, obliczenia rozpoczynamy ze zbiorem elementów X_i ($i = 1, \dots, M$) i liczbą grup k , które chcemy znaleźć, oraz podaną funkcją odległości d określoną na zbiorze obiektów (w przypadku obrazów tomograficznych na zbiorze pikseli). Użytkownik aplikacji *Tomograf* ma możliwość wyboru jednej z wielu zaimplementowanych funkcji odległości (rys. 3). Wybór odpowiedniej z nich uzależniony jest od spodziewanego rodzaju podobieństwa w jednorodnych obszarach. Ze względu na losowe przyporządkowanie elementów do grup, wartości końcowe dla kilku przebiegów grupowania metodą k -średnich mogą być różne. Aby uzyskać najlepszy efekt działania tej metody, należy wykonać grupowanie wiele razy, dokonać wielu iteracji, zaczynając od różnych przyporządkowań początkowych elementów. Do porównywania rozwiązań używana jest suma przebiegów (suma odległości centrów grup), użytych do uzyskania tego rozwiązania. Rozwiązanie do uzyskania, którego użyto najmniejszej odległości, jest uznane za końcowe rozwiązanie grupowania.

Liczba iteracji powinna być uzależniona od tego, jaki jest poziom trudności w dążeniu do uzyskania optymalnego rozwiązania. W oknie aplikacji wyświetlana jest średnia odległość przebyta w poszukiwaniu rozwiązania, oraz ilość uzyskanych rozwiązań, jak zostało wcześniej wspomniane. Jeżeli optymalne rozwiązanie zostało znalezione tylko raz, niewykluczone, że została wykonana zbyt mała liczba przebiegów do sprawdzenia wszystkich możliwych odległości lub zadana zbyt duża liczba grup. Należy wtedy powtórzyć algorytm k -średnich z większą liczbą iteracji lub mniejszą liczbą grup. Jeżeli optymalne rozwiązanie zostało znalezione wiele razy, oznacza, że to rozwiązanie jest najprawdopodobniej najlepszym możliwym rozwiązaniem z najmniejszą sumą przebiegów.

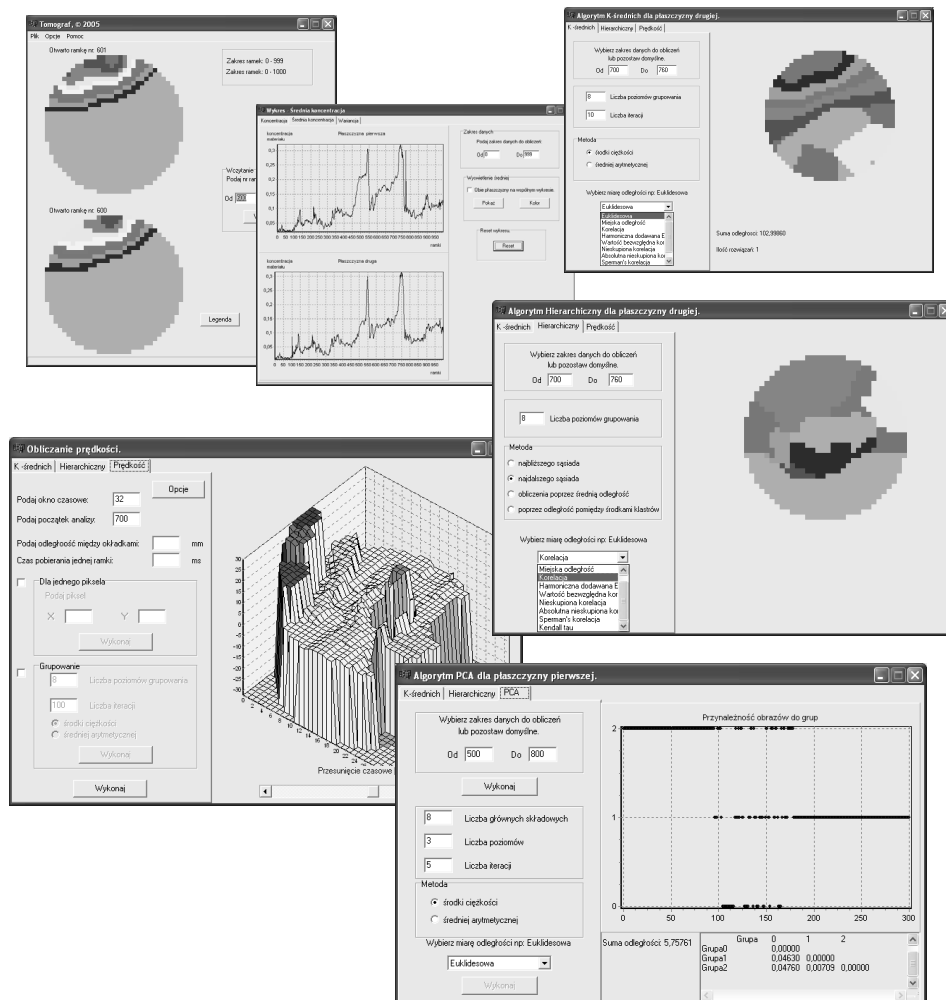
3.2. Hierarchiczna metoda grupowania

Głównym zadaniem hierarchicznej metody grupowania [10, 11] jest ułożenie elementów (w przypadku obrazów tomograficznych pikseli) w strukturę drzewiastą w taki sposób, aby gałęzie pomiędzy nimi były jak najkrótsze i tym dłuższe, im podobieństwa pomiędzy elementami są mniejsze. Pierwszym krokiem w grupowaniu hierarchicznym jest obliczenie tablicy odległości pomiędzy elementami. Po obliczeniu wartości odległości, algorytm przechodzi w fazę grupowania. Działanie metody hierarchicznej opiera się na odnajdywaniu w tablicy dwóch elementów lub pseudoelementów (elementów składających się z połączenia wielu elementów w jedną gałąź), których odległość jest najmniejsza. Łączone są one za pomocą gałęzi. Następnie oba elementy zastępowane są jednym elementem (pseudoelementem), będącym wartością reprezentującą daną gałąź. Proces ten jest powtarzany do momentu, kiedy wszystkie elementy tablicy zostaną połączone w żadaną liczbę gałęzi.

W aplikacji *Tomograf* użyte zostały cztery metody wiązania wartości:

- 1) metoda najbliższego sąsiada;
- 2) metoda najdalszego sąsiada;
- 3) metoda maksymalnego wiązania;
- 4) metoda średniej odległości.

Na rysunku 3 zostały pokazane zrzuty ekranu aplikacji z wynikami obliczeń.



Rys. 3. Elementy aplikacji *Tomograf*, wspomagającej analizę i przetwarzanie obrazów tomograficznych

4. Wyznaczenie jednorodnych struktur przepływu

Wyodrębniona jednorodna składowa (struktura) przepływu stanowi region przekroju poprzecznego rurociągu, który charakteryzuje się podobnymi własnościami strumienia. Proces wyznaczania jednorodnych składowych przeprowadzany jest cyklicznie w określonej sekwencji obrazów tomograficznych [5, 6]. Pozwala to na śledzenie zmian położenia składowych przepływu w czasie i określenia np. poziomu turbulencji podczas przepływu.

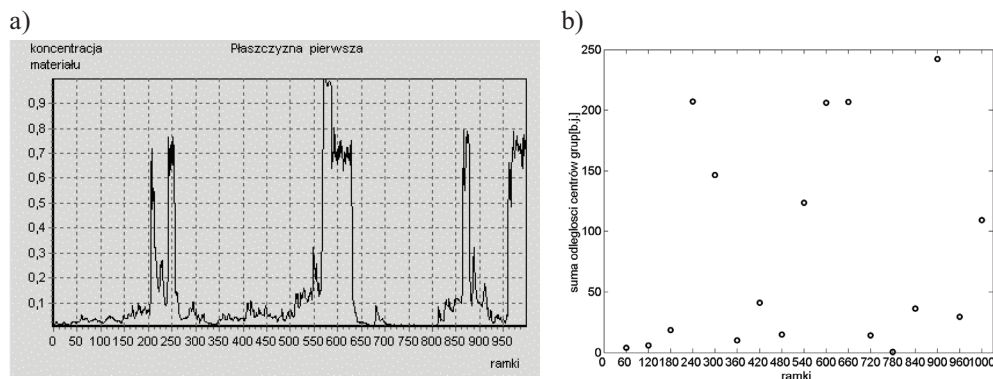
Głównym zadaniem w procesie wyznaczania jednorodnych składowych staje się wybór kryterium jednorodności, według którego wyznaczane są homogeniczne składowe prze-

pływu. Aplikacja *Tomograf* umożliwia dokonanie grupowania ze względu na koncentrację oraz zmiany koncentracji materiału w oparciu o dane pomiarowe z jednej płaszczyzny czujnika pomiarowego oraz prędkość przepływu materiału na podstawie danych z dwóch płaszczyzn czujnika pomiarowego. Wybór odpowiedniego kryterium jednorodności, według którego dokonywana jest segmentacja przepływu, warunkuje inną interpretację i analizę uzyskanych wyników. W celu uzyskania dekompozycji przepływu, należy zdefiniować podobieństwo, według którego dokonana zostanie segmentacja obszaru czujnika.

Przed wszystkim zostaną omówione metody segmentacji przepływu dla danych pochodzących z jednej płaszczyzny elektrod, oparte na podobieństwie zdefiniowanym przez poziom koncentracji materiału i interpretacja ich wyników.

4.1. Podział przestrzeni pomiarowej czujnika ze względu na poziom koncentracji

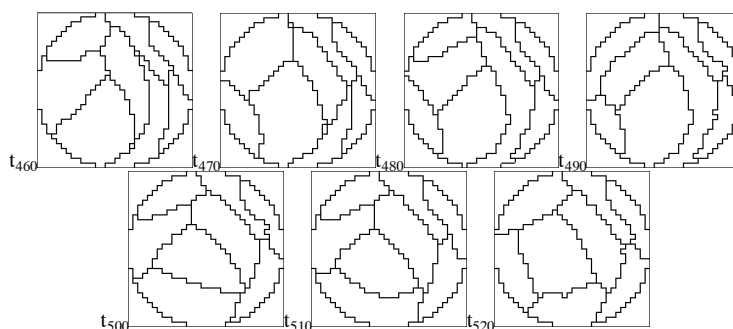
Wyznaczone jednorodne regiony przekroju poprzecznego charakteryzujące się podobnym poziomem koncentracji materiału mogą posłużyć jako informacja o liczbie szukanych grup. Stosując metodę k -średnich należy, jako daną wejściową, podać liczbę skupień, na ile ma zostać podzielony zbiór procesów elementarnych. Liczba skupień k w pewnym stopniu określa stan jednorodności przepływu, kiedy liczba skupień jest mała, można stwierdzić, że przepływ jest jednorodny, natomiast duża liczba skupień przepływu determinuje jego niejednorodność. Wyznaczona liczba grup jest parametrem, który może mieć duży wpływ na wynik analizy skupień i jego interpretację. W niniejszej artykule sposób określenia liczby skupień opiera się na analizie sumy odległości centrów grup. Duża wartość tej sumy wskazuje dużą niejednorodność przepływu. Ma to miejsce np. podczas pojawiającej się dużej partii materiału podczas przepływającego korka materiału (rys. 4).



Rys. 4. Określenie stopnia jednorodności na podstawie sumy odległości centrów grup: a) zmiany średniej koncentracji materiału w czasie; b) zmiany sumy odległości centrów grup w czasie. Oś czasu reprezentowana jest jako numer obrazu – numer ramki¹⁾

¹⁾ Jednostkę czasu na zamieszczonych wykresach stanowi ramka, odpowiadająca czasowi próbkowania 0,01s.

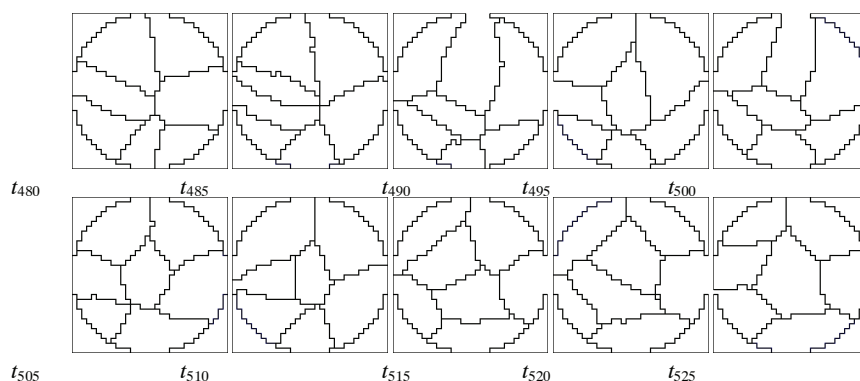
Na rysunku 5 została pokazana przykładowa sekwencja obrazów grup przy zastosowaniu metody k -średnich przy $k = 8$. Każdy z nich powstał dla sekwencji 60 ramek, a przesunięcie pomiędzy kolejnymi obrazami wynosiło 10 ramek. Odnalezienie odpowiadających sobie jednorodnych regionów przekroju poprzecznego czujnika na kolejnych obrazach grup polega na znalezieniu par regionów, które pokrywają się jak największą liczbą pikseli.



Rys. 5. Sekwencja obrazów grup (jednorodnych regionów przekroju poprzecznego czujnika) powstałych w wyniku cyklicznej dekompozycji danych tomograficznych na podstawie poziomu koncentracji, t_{460} oznacza początek sekwencji 60 obrazów wziętych do wyznaczenia obrazów grup

4.2. Podział przestrzeni pomiarowej czujnika ze względu na zmiany koncentracji

Analiza zdefiniowanych w rozdziale 2 procesów elementarnych (rozważanych jako procesy stochastyczne) pozwala wyodrębnić jednorodne składowe przepływy ze względu na ich stochastyczny charakter. Istniejące związki stochastyczne pomiędzy procesami elementarnymi pozwalają wnioskować o możliwości podziału procesów elementarnych na kilka jednorodnych grup, zgodnie z ich statystycznym charakterem.



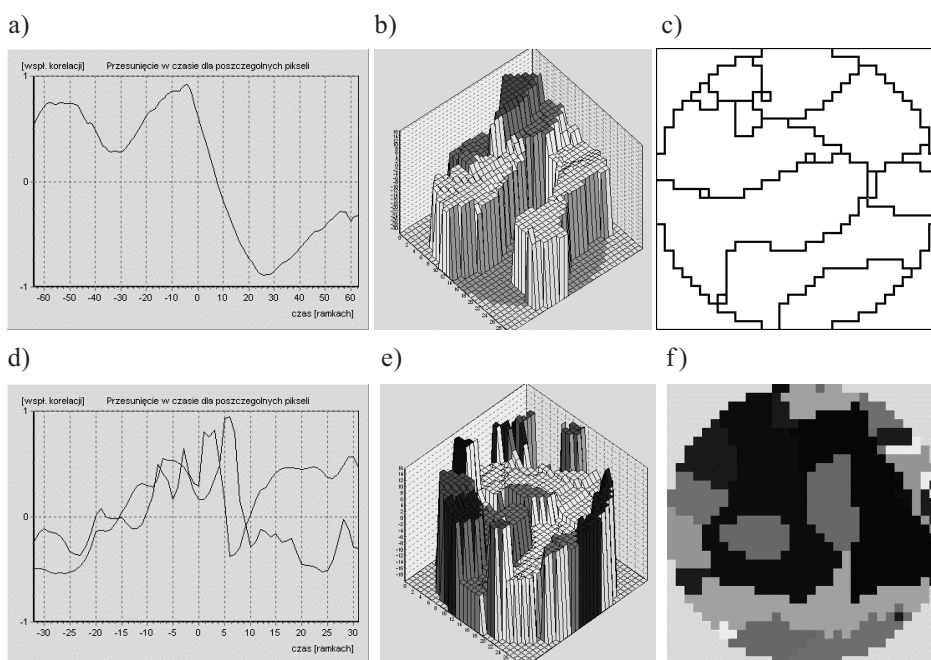
Rys. 6. Sekwencja obrazów grup (jednorodnych regionów przekroju poprzecznego czujnika) powstałych w wyniku cyklicznej dekompozycji danych tomograficznych ze względu na zmiany koncentracji materiału dla danych z rysunku 4a

Przynależność poszczególnych procesów elementarnych do kolejnych składowych przepływu określana jest na podstawie informacji zawartej w macierzy korelacji procesów elementarnych [5]. W jednej grupie znajdują się procesy elementarne, których piksele charakteryzują się podobnymi zmianami koncentracji w określonym przedziale czasu.

Proces grupowania danych z jednej płaszczyzny tomografu może być dokonywany cyklicznie, czego rezultatem jest sekwencja 2D obrazów grup. Pozycja i kształt każdej grupy nie są statyczne, ale ulegają dynamicznym zmianom, co można zaobserwować właśnie w sekwencji obrazów grup (rys. 6).

4.3. Podział przestrzeni pomiarowej czujnika ze względu prędkość przepływu

Inne kryterium zastosowane przy wyznaczaniu jednorodnych regionów obszaru poprzecznego rurociągu jest oparte na analizie czasowej obrazów tomograficznych pozwalającej wyznaczyć prędkość przepływu.



Rys. 7. Podział przekroju poprzecznego na wirtualne kanały dla sekcji pionowej (a, b, c) oraz sekcji poziomej (d, e, f) instalacji przepływu pneumatycznego materiałów sypkich: a) i d) wyznaczenie przesunięcia czasowego sygnału pomiędzy dwoma płaszczyznami czujnika dla różnych pikseli; b) i e) profile prędkości; c) i f) jednorodne obszary przekroju poprzecznego wyznaczone na podstawie profilu prędkości (c – detekcja krawędzi). Oś czasu reprezentowana jest jako numer obrazu – numer ramki²⁾

²⁾ Jednostkę czasu na zamieszczonych wykresach stanowi ramka, odpowiadająca czasowi próbkowania 0,01s.

Na szeroką skalę w tomografii procesowej stosowane są techniki korelacyjne do oszacowania prędkości strumienia w wielofazowym przepływie [8, 12]. Rozwinięciem tych metod przetwarzania obrazów jest opracowana idea wirtualnych kanałów [7]. Polega on na przestrzennej i zmiennej w czasie segmentacji obszaru 3D ujętego między dwoma płaszczyznami czujników pomiarowych w jednorodnych obszarach, przy czym każdy z wydzielonych obszarów zwanych wirtualnym kanałem charakteryzuje się jednorodnością przepływu. Kryterium jednorodności oparte jest na wyznaczonej prędkości przepływu dla każdego elementu przekroju poprzecznego rurociągu (rys. 7).

5. Wnioski

Opisana aplikacja z zaimplementowanymi metodami dekompozycji przepływu na jednorodne struktury oparta na segmentacji czasowo-przestrzennej zrekonstruowanych danych tomograficznych może posłużyć jako kompleksowe narzędzie do badania dynamiki, jak również do pomiaru procesów transportu nie tylko materiałów sypkich. Pozwala ono na analizę off-line danych pomiarowych, która dostarcza szczegółowej informacji na temat zjawisk fizycznych zachodzących podczas przepływów wielofazowych. Zebrane informacje pozwolą lepiej zrozumieć zachowanie się przepływającego materiału i zaprojektować lepsze systemy kontroli i sterowania dynamicznym przepływem materiałów sypkich.

Aplikacja *Tomograf* jest w ciągłym rozwoju. Przyszłe prace dotyczyć będą przede wszystkim implementacji algorytmu automatycznego wyznaczania liczby szukanych jednorodnych składowych przepływu. Pozwoli to na badanie takich zjawisk jak rozpad i połączenie się składowych itp.

Podziękowania

Prace prowadzone przez Andrzeja Romanowskiego są współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego oraz Budżetu Państwa w ramach programu Mechanizm WIDDOK (numer umowy Z/2.10/II/2.6/04/05/U/2/06).

Literatura

- [1] Williams R.A., Beck M.S. (ed): *Process Tomography: Principles, Techniques and Applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995, 1995, 581
- [2] Neuffer D., Alvarez A., Owens D.H., Ostrowski K.L., Luke S.P., Williams R.A.: *Control of Pneumatic Conveying Using ECT*. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, 14–17 April, 1999, 71–76
- [3] Jaworski A.J., Dyakowski T.: *Tomographic Measurements of Solids Mass Flow in Dense Pneumatic Conveying. What Do We Need to Know About the Flow Physics?* 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, Germany, 29th–31st August 2001, 353–361
- [4] Ostrowski K., Luke S.P., Bennett M.A., Williams R.A.: *Application of capacitance electrical tomography for on-line and off-line analysis of flow pattern in horizontal pipeline of pneumatic conveyor*. Chemical Engineering Journal, 3524, 1999, 1–8
- [5] Mosorow W., Grudzień K.: *Analiza procesów mieszania w transporcie pneumatycznym materiałów sypkich*. Półrocznik AGH Automatyka, t. 7, z. 3, 2003, 587–896

- [6] Sankowski D., Mosorow W., Grudzień K.: *Statistical Method for Analysis of Multidimensional Tomographic Data*. In Proc. IEEE VII-th CADSM, Lviv-Febr, 2003, 110–112
- [7] Dyakowski T., Mosorow W., Sankowski D., M. Seaton, Mazurkiewicz Ł., Grudzień K., Jaworski A.: *Virtual Channel Concept for Measuring Solids Mass Flow Rate*. 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, The Rockies Alberta Canada, 2003, 535–540
- [8] Plaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T.: *Imaging Industrial Flows*. Institute of Physics Publishing Ltd., 1995
- [9] Cheung Y.M.: *K-Means: A new generalized k-means clustering algorithm*. Pattern Recognition Letters 24, 2003, 2883–2893
- [10] Jain A.K., Murty M.N., Flynn P.J., Data Clustering: A Review, ACM Computing Surveys; 31, 3, 1999, 264–323.
- [11] Kucharczyk J.: *Algorytmy analizy skupień w języku ALGOL 60*. Warszawa, PWN 1982, 275
- [12] Mosorow V., Sankowski D., Mazurkiewicz Ł., Dyakowski T.: *The application of electrical capacitance tomography for solids mass flow measurements*. Measurement Science and Technology, 13(12), 2002, 1810–1814

