

Jacek STELMACH, Andrzej OBRANIAK

e-mail: jacek.stelmach@p.lodz.pl

Katedra Aparatury Procesowej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Pewne problemy analizy obrazu pojedynczej kropli wody podczas opadania swobodnego

Wstęp

Zagadnienie dostarczania cieczy w postaci kropli do innych mediów dotyczy wielu technologii i procesów, takich jak: absorpcja gazu lub jego odpylanie w skrubkach, nawilżanie powietrza, suszenie rozpryskowe [Serwiński, 1982]. W szczególności ma on decydujący wpływ na granulację. Rozproszenie dostarczanej cieczy przez dysze ma wpływ na parametry nawilżonego surowca i jest związane z metodą jej dostarczania oraz wpływa na skład granulometryczny produktu [Obraniak i Gluba, 2011].

Kształt kropli wpływa na prędkość opadania oraz wielkość powierzchni międzyfazowej. Jeżeli kształt kropli da się opisać funkcją ciągłą to jej powierzchnię i objętość można obliczyć stosując rachunek całkowy. Komputerowa analiza obrazu umożliwia określenie rozmiarów kropli lub pęcherzyków w układach dwufazowych ciecz-gaz. Jednak pomimo rozwoju algorytmów do rozpoznawania kształtów nadal, nawet w prostych przypadkach, można napotkać problemy mogące być źródłem błędów.

W przypadku analizowania obrazów z jednym obiektem wyraźnie zróżnicowanym względem tła (różniącym się tonalnie od tła) analiza wielkości i kształtu nie powinna sprawiać większych trudności. Jednak nawet taki prosty przypadek analizy obrazu jednej kropli może sprawiać problemy. Na przykład do określenia sferyczności (czynnika kształtu) wymagana jest znajomość pola powierzchni rzutu kropli A oraz obwodu obrazu kropli P . Jednak w przypadku map bitowych dokładność pozycjonowania wynosi 1 piksel, co jest przyczyną błędów pomiarowych. Na przykład w programie *Sigma Scan Pro* dla koła narysowanego zgodnie z algorytmem *Bresenhama* [Kennedy, 2012] sferyczność wynosi około 0,9, podczas gdy powinna mieć wartość 1 (Tab. 1). Warto też zwrócić uwagę, że średnica określana jest z około dziesięciokrotnie mniejszym błędem

Jak wspomniano, w wielu procesach inżynierii chemicznej stosuje się i wytwarza krople cieczy o różnych wielkościach. Rozmiar, masa oraz prędkość opadania takich kropli wpływa na przebieg procesu, jego sprawność oraz ekonomię. Dlatego poprawne określenie wielkości powierzchni międzyfazowej jest ważnym czynnikiem procesowym. To z kolei prowadzi do pierwszego celu niniejszej pracy, którym jest analiza źródeł potencjalnych błędów podczas analizy rozmiaru i kształtu pojedynczej kropli wody podczas opadania swobodnego. Drugim celem jest określenie postaci funkcji najlepiej opisującej kształt obrazu (rzutu) kropli.

Tab. 1. Porównanie rzeczywistych d_a i zmierzonych d_m wartości średnicy i czynnika kształtu Ψ dla okręgów

d_a [px]	d_m [px]	Δ [%]	ψ	Δ [%]
10	11,11	11,13	1,017	1,66
20	21,08	5,40	0,960	4,02
30	30,88	2,94	0,931	6,64
40	40,89	2,22	0,925	7,48
50	50,78	1,55	0,917	8,22
60	60,86	1,43	0,918	8,13
70	70,83	1,20	0,917	8,35
80	80,94	1,17	0,902	9,82
90	90,92	1,03	0,902	9,78
100	100,97	0,96	0,903	9,67

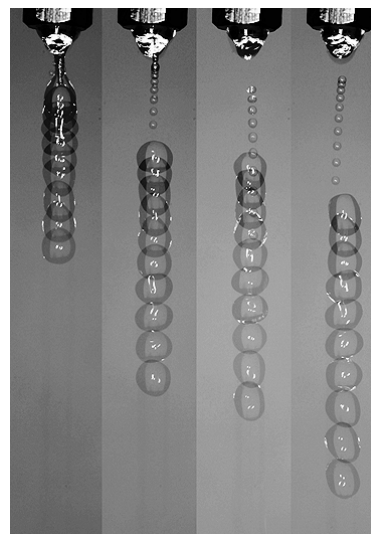
Badania doświadczalne

Aparatura. Badania wykonano dla wykonanych z mosiądzu dysz o średnicach otworów wypływowych: $d_{otw} = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ i 3,5 mm z zakończeniem płaskim i stożkowym. Dla dysz z zakończeniem płaskim długość kalibrowanego kanału/otworu wynosiła 7,5 mm, a dla dysz z zakończeniem stożkowym 14 mm. Przepływ wody wodociągowej przez dyszę zapewniała pompa perystaltyczna VERDERFLEX 2010 tłocząca wodę z otwartego zbiornika.

Metodyka. Krople wypływające z dyszy fotografowano aparatem *Canon EOS 5D Mk II* z obiektywem *Canon Macro Lens EF* o ogniskowej $f = 100$ mm. Skala odwzorowania wynosiła około 1/3. W celu uzyskania nieporuszonych obrazów kropli zastosowano frontalne oświetlenie pierścieniową lampą błyskową *Yongnuo YN14EX* pracującą z 1/64 mocy maksymalnej. Liczba przysłony wynosiła 11, co zapewniało uzyskanie ostrych konturów obrazów kropli, gdyż głębia ostrości w tych warunkach wynosi kilkanaście milimetrów [Tölke i Tölke, 1981; Kreyser, 1988]. Rozmiary zarejestrowanych kropli zawierały się w przedziale od 50 do 380 pikseli.

Analiza obrazów i opis kształtu kropli

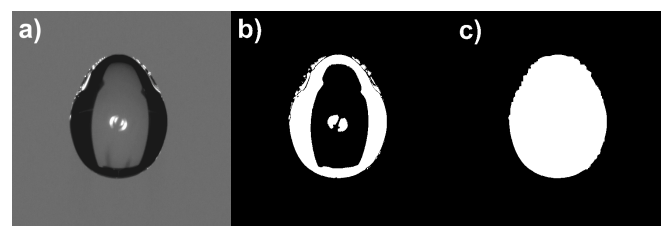
Odrywanie kropli od dyszy i jej opadanie jest procesem dynamicznym, a obserwacje w świetle stroboskopowym (Rys. 1) pokazują, że kształt kropli ulega zmianom.



Rys. 1. Zmiany kształtu opadającej kropli po oderwaniu od dyszy

Ze względu na falowanie powierzchni kropli mogą powstawać odbicia/refleksy światła od powierzchni międzyfazowej (Rys. 2a). W omawianym przypadku tło jest jednolite i można podczas binaryzacji zastosować zasadę: *co nie jest tłem jest obiektem*. Prowadzi to wówczas do powstania małych obszarów, które przez program zostaną zinterpretowane jako małe kropelki (rys. 2b). Pewnym rozwiązaniem problemu jest użycie operacji morfologicznych (np. wypełniania dziur, dylatacji, erozji) do otrzymania jednego obiektu (Rys. 2c). Należy

jednak zwrócić uwagę, że automatyzacja tego procesu jest trudnym zagadnieniem. W przedstawionym przykładzie do dalszej analizy brany jest jeden końcowy obiekt.



Rys. 2. Odblaski na krawędzi obrazu kropli i w jej wnętrzu

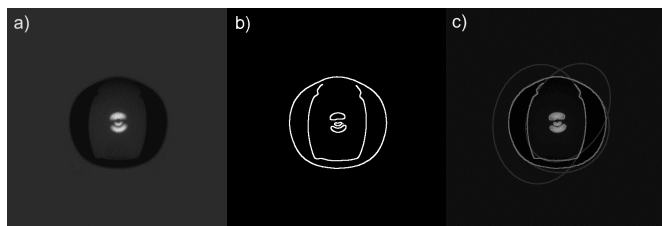
Na rys. 2c widoczne są postrzępione (schodkowe) krawędzie obrazu kropli, wymagające dalszej obróbki, gdyż ich pozostawienie zwiększa licznik obwod.

W tym przypadku można również wykorzystać uśredniające działanie metody najmniejszych kwadratów [Prasad i Leung, 2012; Kanatani i Rangarajan, 2011]. Przy jej pomocy można określić parametry elipsy aproksymującej kształt obrazu kropli. Metoda ta daje obiecujące wyniki. Możliwe jest jej rozwinięcie do opisu kształtów owalnych (jajowatych) przez wprowadzenie funkcji korygującej $t(x)$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} t(x) = 1 \quad (1)$$

Funkcja $t(x)$ może mieć postać: $1 + c \cdot x$ lub $1/(1 - c \cdot x)$ lub $\exp(c \cdot x)$. Jednak, niezależnie od postaci funkcji, wartość współczynnika c musi być wyznaczana iteracyjnie, co wprowadza element niejednoznaczności dla otrzymywanych wyników, gdyż wartość końcowa może zależeć od zadanej wartości początkowej (startowej).

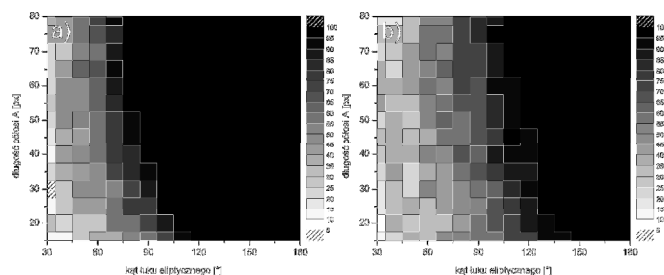
W metodzie najmniejszych kwadratów wykorzystywane są punkty brzegowe. Mogą one być wyznaczane bez stosowania binaryzacji, np. przez użycie metody Canny'ego [Malina i Smiatacz, 2008; Kuncewicz i Stelmach, 2009]. Jednak wówczas wykrywane są nie tylko zewnętrzne krawędzie obrazu kropli (Rys. 3b). Może to prowadzić do utworzenia dodatkowych obiektów (Rys. 3c), które muszą być usunięte w wyniku dalszej analizy obrazu. Ich automatyczne usuwanie jest proste jedynie w przypadku gdy uzyskane w ten sposób obiekty są całkowicie zawarte w większym obiekcie.



Rys. 3. Błędna interpretacja krawędzi wewnętrznych

W przypadku określania kształtu w oparciu o linię krawędziową nie musi ona być krzywą zamkniętą (Rys. 3b i 3c). Implikuje to kolejny problem: jaka musi być minimalna liczona w pikselach długość krawędzi, aby poprawnie odtworzyć kształt, co w omawianym przypadku oznacza ile pikseli powinna liczyć krawędź, aby poprawnie obliczyć parametry elipsy. W dziedzinie liczb rzeczywistych współrzędne trzech punktów jednoznacznie wyznaczają okrąg. Jednak współrzędne pikseli obrazu określane są liczbami całkowitymi.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki symulacji poprawności określania parametrów elipsy w zależności od kąta rozwarcia łuku eliptycznego i długości półosi dla nachylenia osi 0° przy losowym określaniu położenia początku łuku.

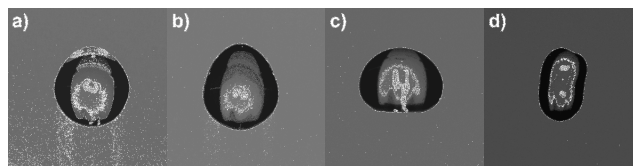


Rys. 4. Odsetek poprawnie rozpoznanych elips

Dla elips o mniejszym spłaszczeniu (stosunek długości osi równy $a/b = 0,8$ – rys. 4a) do poprawnego rozpoznania potrzeba $1/4$ elipsy. Zwiększenie spłaszczenia ($a/b = 0,5$) powoduje, że poprawnie rozpoznawane są elipsy na podstawie $1/3$ obwodu (Rys. 4b). Można również zauważyć, że dokładniej rozpoznawane są duże obiekty.

W omówionej symulacji do rysowania łuków eliptycznych użyto algorytmu Bresenhama [Racheja, 2009]. W przypadku obiektów rzeczywistych należy się liczyć z większymi błędami.

Dalsza analiza danych literaturowych [Pruppacher i Pitter, 1971; Beard i Chuang, 1987] i uzyskanych zdjęć wykazuje, że oprócz kropli o kształtach elipsoidalnych (Rys. 5a) i owalnych (Rys. 5b) występują też krople spłaszczone (Rys. 5c) i wydłużone (Rys. 5d).



Rys. 5. Najczęściej obserwowane kształty kropli wody

Opis matematyczny staje się w takich przypadkach jeszcze trudniejszy. Przeprowadzone próby wskazują, że można w tym celu posłużyć się równaniem superelipsy z wartością $n > 2$ [Zhang i Rosin, 2003] oraz ze wspomnianą wcześniej funkcją korygującą.

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n + \left(\frac{y}{b}\right)^n t(x) = 1 \quad (2)$$

Wnioski

Analiza obrazów pojedynczych kropli wody mająca na celu opisanie ich kształtu funkcją ciągłą nadal może sprawiać trudności, szczególnie gdy na powierzchni kropli występują odbłaski światła.

Metoda najmniejszych kwadratów pozwala wyznaczyć parametry elipsy aproksymującej kontur kropli. Parametry te mogą stanowić wartości startowe dla metod iteracyjnych stosowanych w celu wyznaczenia współczynników korygujących dla kształtów odbiegających od eliptycznych.

Wydaje się, że równanie superelipsy z funkcją korygującą najdokładniej opisuje kształt konturu większości kropli podczas opadania swobodnego.

LITERATURA

- Beard K.V., Chuang C., (1987). A new model for the equilibrium shape of raindrops. *J. Atm. Sci.*, 44, 1509-1524. DOI: 10.1175/1520-0469(1987)<1509:ANMFTE>2.0.CO;2
- Kennedy J., (2012). *Bresenham's Integer Only Line Drawing Algorithm*, (Downloadable Math Papers). (8.2018): <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.616.2235&rep=rep1&type=pdf>
- Kanatani K., Rangarajan P., (2011). Hyper least squares fitting of circles and ellipses. *Computational Statistics and Data Analysis*, 55, 2197-2208. DOI: 10.1016/j.csda.2010.12.012
- Kreyser R., (1988). *Fotografujemy z bliska male obiekty*. WNT, Warszawa
- Kuncewicz Cz., Stelmach J., (2009). Wykrywanie krawędzi obrazów pęcherzyków. *Inż. Ap. Chem.*, 48(6), 113-114
- Malina W., Smiatacz M., (2008). *Cyfrowe przetwarzanie obrazów*, EXIT, Warszawa
- Obraniak A., Gluba T., (2011). A model of granule porosity changes during drum granulation. *Physicochem. Probl. Mineral Proc.*, 46, 219-228
- Prasad D., Leung M., (2012). *Methods for ellipse detection from edge maps of real images*. Chapter 7, 135- 162 [In:] Solari F.(Ed.) *Machine vision*, Intech Open Limited, London, UK. DOI: 10.5772/35150
- Pruppacher H.R., Pitter R.L., (1971). A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. *J. Atmosph. Sci.*, 28, 86-94. DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<0086:ASEDOT>2.0.CO;2
- Racheja A., (2009). *Midpoint Ellipse Algorithm*. Computer graphics (Lecture notes), California State Polytechnic Uni., Pomona, CA (8.2018): <http://www.cpp.edu/~raheja/CS445/MEA.pdf>
- Serwiński M., (1982). *Zasady inżynierii chemicznej i procesowej*, WNT, Warszawa
- Tölke A., Tölke I., (1981). *Fotografujemy i filmujemy obiekty makroskopowe*, WNT, Warszawa
- Zhang X., Rosin P.L., (2003). Superellipse fitting to partial data. *Pattern Recognition*, 36(3), 743-752. DOI: 10.1016/S0031-3203(02)00088-2

Praca powstała w ramach projektu Dz.St. 501/10-34-1-7118