

**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej



PRACA MAGISTERSKA

KRZYSZTOF NARLOCH

**KOMPUTEROWY SYSTEM WIZYJNY DO SZACOWANIA
PARAMETRÓW W PROCESIE WYTOPU SZKŁA**

PROMOTOR:
dr inż. Paweł Rotter

Kraków 2013

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZĄ PRACĘ DYPLOMOWĄ WYKONAŁEM OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE, I NIE KORZYSTAŁEM ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMIENIONE W PRACY.

.....

PODPIS

AGH
University of Science and Technology in Krakow

Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Biomedical
Engineering



MASTER OF SCIENCE THESIS

KRZYSZTOF NARLOCH

**COMPUTER VISION SYSTEM FOR PARAMETERS
ASSESSMENT IN THE GLASS MELTING PROCESS**

SUPERVISOR:
Paweł Rotter Ph.D

Krakow 2013

Spis treści

1. Wstęp	7
1.1. Proces technologiczny produkcji opakowań szklanych.....	7
1.1.1. Przygotowanie zestawu szklarskiego - surowca do produkcji szkła.....	8
1.1.2. Topienie, klarowanie i stabilizacja termiczna	8
1.1.3. Porcjowanie wsadu szklarskiego.....	9
1.1.4. Formowanie produktu	10
1.1.5. Odprężanie szkła.....	10
1.1.6. Zakończenie procesu produkcyjnego.....	10
1.1.7. Schemat procesu produkcji opakowań szklanych.....	10
1.2. Cel i założenia systemu wizyjnego.....	11
1.2.1. Wpływ jakości kropli szkła na przebieg procesu produkcyjnego.....	12
1.2.2. Założenia, wymagania i funkcjonalność systemu wizyjnego	13
2. Zastosowane techniki przetwarzania obrazu	15
2.1. Segmentacja	15
2.1.1. Model opisu koloru i przestrzenie barw.....	15
2.1.2. Progowanie.....	17
2.1.3. Segmentacja kropeł szkła.....	18
2.2. Operacje morfologiczne.....	18
2.2.1. Filtracja medianowa	19
2.2.2. Dylatacja	19
2.2.3. Erozja	20
2.2.4. Otwarcie.....	20
2.2.5. Zamknięcie.....	21
2.2.6. Złożenie operacji otwarcia i zamknięcia.....	21
2.3. Wykrywanie krawędzi	23
2.3.1. Operacje konwolucyjne.....	23
2.4. Podsumowanie rozdziału	24
3. Mierzone cechy kropli i odpowiadające im parametry	25
3.1. Zgodność rozmiaru	25
3.1.1. Motywacja.....	25
3.1.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania.....	25
3.1.3. Przykład	26
3.2. Zgodność wypełnienia prostokąta opisanego	27
3.2.1. Motywacja.....	27
3.2.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania.....	27
3.2.3. Przykład	28

3.3. Zakrzywienie bananowe	29
3.3.1. Motywacja.....	29
3.3.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania.....	29
3.3.3. Przykład	31
3.4. Równomierność jasności świecenia.....	32
3.4.1. Motywacja.....	32
3.4.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania.....	33
3.4.3. Przykład	34
3.5. Podsumowanie rozdziału	36
4. Aplikacja.....	37
4.1. Graficzny interfejs użytkownika.....	37
4.2. Dostarczone funkcjonalności opisane na zasadzie przypadków użycia	38
4.2.1. Wczytywanie danych źródłowych	39
4.2.2. Filtrowanie listy kropeł po statusie	39
4.2.3. Otwarcie podglądu wybranej kropli.....	40
4.2.4. Eksport wyników do pliku tekstowego.....	40
4.2.5. Przegląd zbiorczych danych statystycznych	41
4.2.6. Podgląd zdjęcia kropli.....	41
4.2.7. Resetowanie obrazu kropli.....	42
4.2.8. Podgląd obrazu kropli szkła w alternatywnych przestrzeniach barw	43
4.2.9. Podgląd segmentacji	44
4.2.10. Podgląd analizy zakrzywienia kropli	45
4.2.11. Podgląd analizy równomierności świecenia kropli.....	46
4.2.12. Edycja parametrów algorytmu	46
4.2.13. Filtry segmentujące	49
4.2.14. Zapis i odczyt parametrów aplikacji	50
4.2.15. Porównanie kropeł w kilku oknach.....	50
5. Testy i analiza wyników	52
5.1. Dane wejściowe	52
5.1.1. Charakterystyka danych wejściowych	52
5.1.2. Założenia dotyczące formatu danych wejściowych.....	54
5.2. Testy parametrów kropli szkła.....	54
5.2.1. Zgodność rozmiaru	54
5.2.2. Zgodność wypełnienia prostokąta opisanego	56
5.2.3. Zakrzywienie bananowe.....	61
5.2.4. Równomierność jasności świecenia.....	63
5.3. Wnioski dotyczące zaproponowanych parametrów.....	66
6. Uwagi końcowe.....	69
6.1. Trudności zrealizowanego projektu i ocena rezultatów.....	70
6.2. Dalsze kierunki rozwoju pracy	71
Bibliografia	73

1. Wstęp

W pracy przedstawiono prototypowy system wizyjny służący do wyznaczania parametrów istotnych dla procesu wytopu szkła opakowaniowego. Parametry te szacowane są dla jednego z etapów produkcyjnych - podziału stopionego szkła na krople, czyli porcje służące do produkcji pojedynczej sztuki gotowego produktu. Ponieważ temat pracy ściśle dotyczy konkretnego, dość złożonego, procesu przemysłowego, konieczne jest jego przedstawienie w celu ułatwienia zrozumienia omawianego zagadnienia. W rozdziale 1 przybliżono rolę tworzonego systemu wizyjnego, jego miejsce w całym procesie i możliwe zastosowania oraz najważniejsze wymagania.

1.1. Proces technologiczny produkcji opakowań szklanych

Przedstawiony opis procesu technologicznego ma charakter poglądowy i skupia się głównie na całości procesu obróbki pomijając istotne szczegóły chemiczne i fizykochemiczne zagadnienia. Przedstawiony proces produkcyjny jest typowy dla produkcji szkła opakowaniowego i wykorzystuje się go między innymi w Hucie Szkła Orzesze w Orzeszu będącej częścią grupy CAN-PACK S.A., w której wykonano zdjęcia wykorzystane do testowania systemu.

Wyróżnia się wiele gatunków szkła [14]. Do najważniejszych należą:

- Szkło sodowo-wapniowe
Stosowane do produkcji szkła opakowaniowego, gospodarczego i okiennego.
- Szkło kryształowe
Szkło ołowiowe lub inne rodzaje szkła kryształowego, w których ołów zastąpiono tlenkami baru, cynku lub potasu.
- Szkło borokrzemianowe
Szkło zawierające trójtlenek boru i większą zawartość dwutlenku krzemu, służące do wyrobu szkieł specjalnych.
- Inne szkła o specjalnym przeznaczeniu

Zasady produkcji wszystkich rodzajów szkła są do siebie podobne. W wysokiej temperaturze dochodzi do stopienia składników w jednorodną masę, która następnie jest odpowiednio formowana i schładzana. W większości przypadków do topienia składników używa się specjalnych pieców zwanych wannami szklarskimi, lub czasami wannami topliwnymi [4].

Piece szklarskie najczęściej ogrzewane są gazem ziemnym, choć istnieją również inne metody dostarczania niezbędnej energii. Najczęściej stosowane typy wanień szklarskich to wanny U-płomienne, w których płomień układa się w kształt litery „U” ponad taflą szkła oraz wanny poprzeczno-płomienne.

Piece szklarskie można podzielić również ze względu na sposób odzyskiwania energii spalin wydostających się z pieca.

Piece regeneracyjne wyposażone są w zdublowane zestawy palników i specjalnych komór umieszczonych przed przewodem kominowym. Komora ta gromadzi energię spalin, ogrzewając się do odpowiedniej temperatury. Po pewnym czasie, kierunek przepływu spalin zostaje odwrócony tak, że zimne

powietrze odbiera ciepło od jednej komory regeneracyjnej, podczas kiedy druga ogrzewana jest poprzez wydostające się spaliny. Kierunek przepływu powietrza i spalin zwykle odwracany jest co dziesięć do trzydziestu minut.

Instalacje rekuperacyjne posiadają stały kierunek obiegu powietrza i spalin, a ogrzewanie powietrza ciepłem spalin ma miejsce w wymienniku. Niestety technologia ta jest mniej wydajna od technologii regeneracyjnej.

Produkcja wyrobów szklanych ma charakter ciągły - raz uruchomiony piec pracuje nieustannie przez okres kilkunastu lat, po którym musi zostać wygaszony i przebudowany. Oczywiście, koszt takiej konserwacji jest ogromny.

Poniżej przybliżono najważniejsze etapy procesu produkcji opakowań szklanych.

1.1.1. Przygotowanie zestawu szklarskiego - surowca do produkcji szkła

Etap ten ma miejsce w zestawiarni. Dostarczone surowce są odmierzone i dokładnie mieszane w celu osiągnięcia żądanego składu szkła. Należy zauważyć, że skład chemiczny zestawu szklarskiego różni się od składu gotowego szkła. Wynika to z faktu użycia związków, które pod wpływem wysokiej temperatury rozpadają się tworząc pęcherzyki gazu. Zjawisko to jest pożądane i zostało szerzej omówione w kolejnych podpunktach. Tak przygotowany zestaw szklarski podawany jest wraz ze stłuczką szklaną przez kieszeń zsypową do pieca. Ilość stłuczki szklanej we wsadzie może wynosić nawet do 80% i jest głównie zależna od jej dostępności - stłuczka ta musi być odpowiedniej jakości i czystości. Zastosowanie stłuczki, oprócz oczywistych korzyści wynikających z zastosowania surowców wtórnych, pozwala również zmniejszyć ilość energii zużywanej w procesie. Skład chemiczny gotowego szkła opakowaniowego zamieszczono w tabeli 1.1.

Składnik	zawartość
Tlenek krzemu (SiO_2)	71-73%
Tlenek sodu (Na_2O)	12-14%
Tlenek wapnia (CaO)	9-12%
Tlenek magnezu (MgO)	0.2-3.5%
Tlenek glinu (Al_2O_3)	1-3%
Tlenek potasu (K_2O)	0.3-1.5%
Tlenek siarki VI (SO_3)	0.05-0.3%
Barwniki	śladowa

Tablica 1.1: Skład szkła opakowaniowego

1.1.2. Topienie, klarowanie i stabilizacja termiczna

Kolejny etap produkcji szkła ma miejsce w piecu szklarskim. Pod wpływem wysokiej temperatury dochodzi do stopienia dostarczonych surowców. Temperatura pieca szklarskiego u jego sklepienia wynosi 1600-1650 °C, aczkolwiek należy pamiętać że temperatura wsadu jest niższa i wynosi 1300-1550°C.

Oprócz stopienia wsadu, w wannie szklarskiej dochodzi również do jego homogenizacji. Proces ten polega na rozmieszaniu stopionego surowca w celu uzyskania jednorodnej masy szklanej. W skład zestawu szklarskiego wchodzić związki chemiczne rozpadające się w wysokiej temperaturze i tworzące pęcherzyki gazów. Przykładami takich substancji może być soda oraz wapień. W tabeli 1.2 zamieszczono omawiane reakcje rozpadu zachodzące na skutek wysokiej temperatury. Wydzielające się pęcherzyki gazu unoszą się ku powierzchni, jednocześnie mieszając wsad szklarski.

Wsad szklany poddawany jest następnie procesowi stabilizacji temperaturowej, w której dochodzi do wyrównania rozkładu temperatury wsadu oraz jego częściowego wystudzenia do osiągnięcia temperatury wyrobowej wynoszącej 900-1350°C. Proces ten jest konieczny ponieważ lepkość szkła spada bardzo mocno wraz ze wzrostem jego temperatury. Podczas topienia i homogenizacji wsadu lepkość powinna

Nazwa substancji	Reakcja chemiczna
soda	$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O + CO_2$
wapień	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

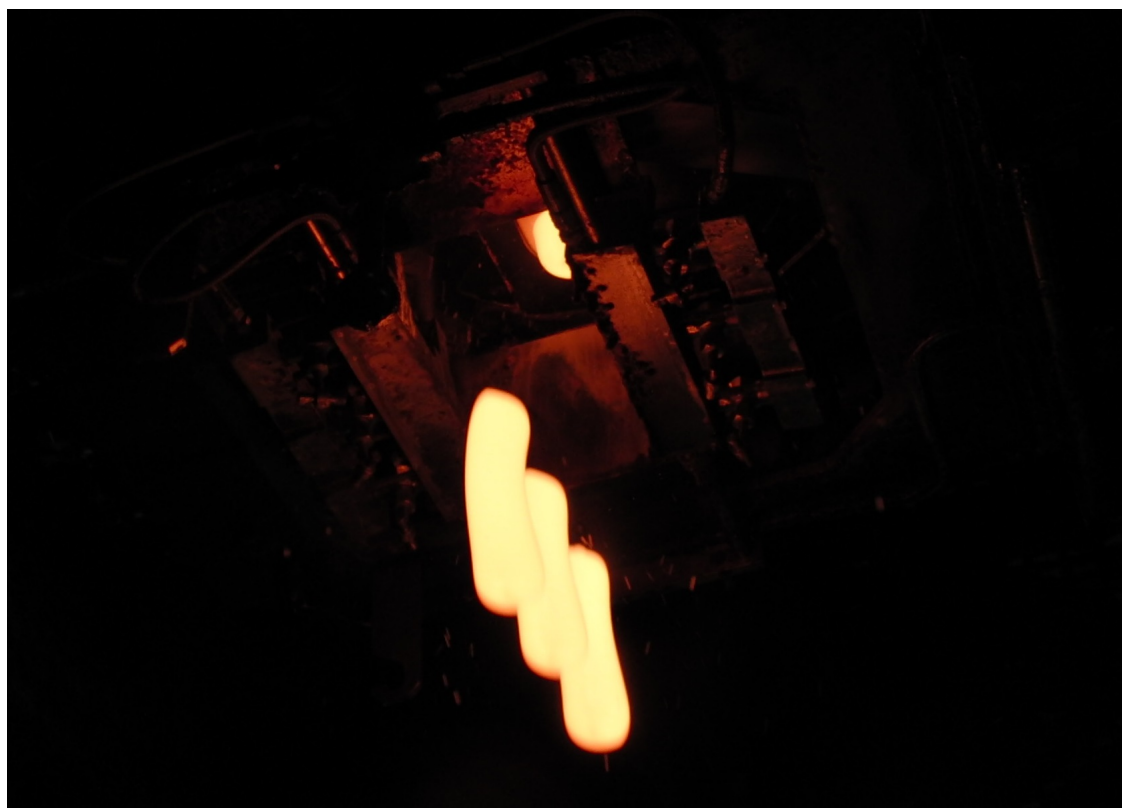
Tablica 1.2: Homogenizacja wsadu szklarskiego

być niewielka aby ułatwić mieszanie, jednakże podczas dalszej obróbki i nadawania kształtu wyrobowi jej wartość powinna być dokładnie kontrolowana, aby ułatwić formowanie i wydmuchiwanie produktu.

Procesy zachodzące w piecu szklarskim, podobnie jak większość przemysłowych procesów termicznych, są powolne i długotrwałe. W przypadku produkcji szkła opakowaniowego wynoszą łącznie około jednej doby.

1.1.3. Porcjowanie wsadu szklarskiego

Odpowiednio przygotowany wsad szklarski wypływa z wanny poprzez zasilacz do misy głowicy [9]. Głowica jest urządzeniem służącym do formowania szkła w strugi grawitacyjnie wypływające przez otwory w misie. Głowica wyposażona jest w specjalny mechanizm wytłocznika regulujący zarówno szybkość i ilość wypływającego szkła, jak i jego temperaturę i jej rozkład [7]. Zagadnienie rozkładu temperatury w głowicy, z uwagi na silną zmienność lepkości szkła w funkcji temperatury stanowi istotny problem techniczny, gdyż wzrost temperatury wsadu powoduje zmniejszenie lepkości, a co za tym idzie, zwiększenie szybkości wypływu szkła przez środkowe otwory w stosunku do otworów zewnętrznych. Na zdjęciu 1.1 przedstawiono krople u wyjścia głowicy. Na zdjęciu da się zaobserwować zarówno gotowe, spadające krople, jak i strugi szkła wyciekające z otworów głowicy przed ucięciem kropel.



Rysunek 1.1: Krople szkła u wylotu głowicy. Zdjęcie wykonane przez autora w Hucie Szkła Orzesze

Szkło wypływające grawitacyjnie przez otwory w misie głowicy rozcinane jest za pomocą mechanizmu mechanicznych nożyc na krople o konkretnej objętości i masie, dobranej odpowiednio do rozmiaru

produkowanego opakowania [10]. Opisywany w pracy system wizyjny szacuje właśnie parametry kropli szkła na podstawie jej obrazu uchwyconego na zdjęciu podczas spadania.

1.1.4. Formowanie produktu

Krople spadają wprost do odpowiedniej prowadnicy, przypominającej rynnę. Ilość prowadnic jest zwielokrotniona tak, aby każda kropla wpadała do niezależnej rynny.

Prowadnica ta kieruje krople do przed-formy, gdzie kropla formowana jest w bańkę szklaną. Bańka taka przypomina miniaturę gotowego produktu. Podczas formowania bańki, do przed-formy zawierającej szkło wchodzi specjalna igła. Dzięki niej szkło szczelnie wypełnia przed-formę, przyjmując jej kształt. Igła ta jest integralną częścią przenośnika, który oprócz tego składa się ze swego rodzaju chwytaka, który łapiąc bańkę jednocześnie formuje sam czubek szyjki butelki [12].

Miniaturowe bańki przenoszone są następnie do drugiej, większej formy [13]. Forma ta jest negatywem gotowego produktu i to w niej dochodzi do nadania ostatecznego kształtu i rozmiaru wyrobu, oczywiście pomijając wpływ efektu rozszerzalności termicznej. Po umieszczeniu bańki w formie, jest ona wydmuchiwana za pomocą igły na którą wcześniej była nabita podczas przenoszenia. Sprężone powietrze powoduje, że szkło szczelnie wypełnia większą formę przyjmując jej kształt. Dochodzi tutaj do schłodzenia produktu do takiego poziomu, aby nie był już podatny na deformację.

Ponieważ czas potrzebny na nadanie kształtu kropli w obu formach, wydmuchanie i zastygnięcie jest zdecydowanie większy niż czas produkcji kolejnych serii kropeł, każda prowadnica kierująca krople do forem posiada niezależną, ruchomą część do której wpadają krople. Część ta obraca się rozdzielając krople do poszczególnych rynien, z których każda prowadzi do osobnej formy. W ten sposób dochodzi do zwielokrotnienia i przyspieszenia produkcji.

1.1.5. Odprężanie szkła

Uformowane butelki mogą być poddane procesowi uszlachetniania na gorąco, np. za pomocą parów cyny.

Są one również stopniowo schładzane - po wyjściu z zestawu forem wciąż mają temperaturę rzędu kilkuset stopni Celsjusza i gwałtowne ich ochłodzenie mogłoby spowodować popękanie wyrobu z powodu naprężeń spowodowanych zjawiskiem rozszerzalności termicznej. Opakowania przemieszczane są za pomocą taśmociągu [5] do odprężarki, gdzie zachodzi proces odprężania - stopniowego wychładzania produktu w kontrolowanych warunkach.

W zależności od przeznaczenia opakowań, schłodzony produkt może być poddany procesowi uszlachetniania na zimno.

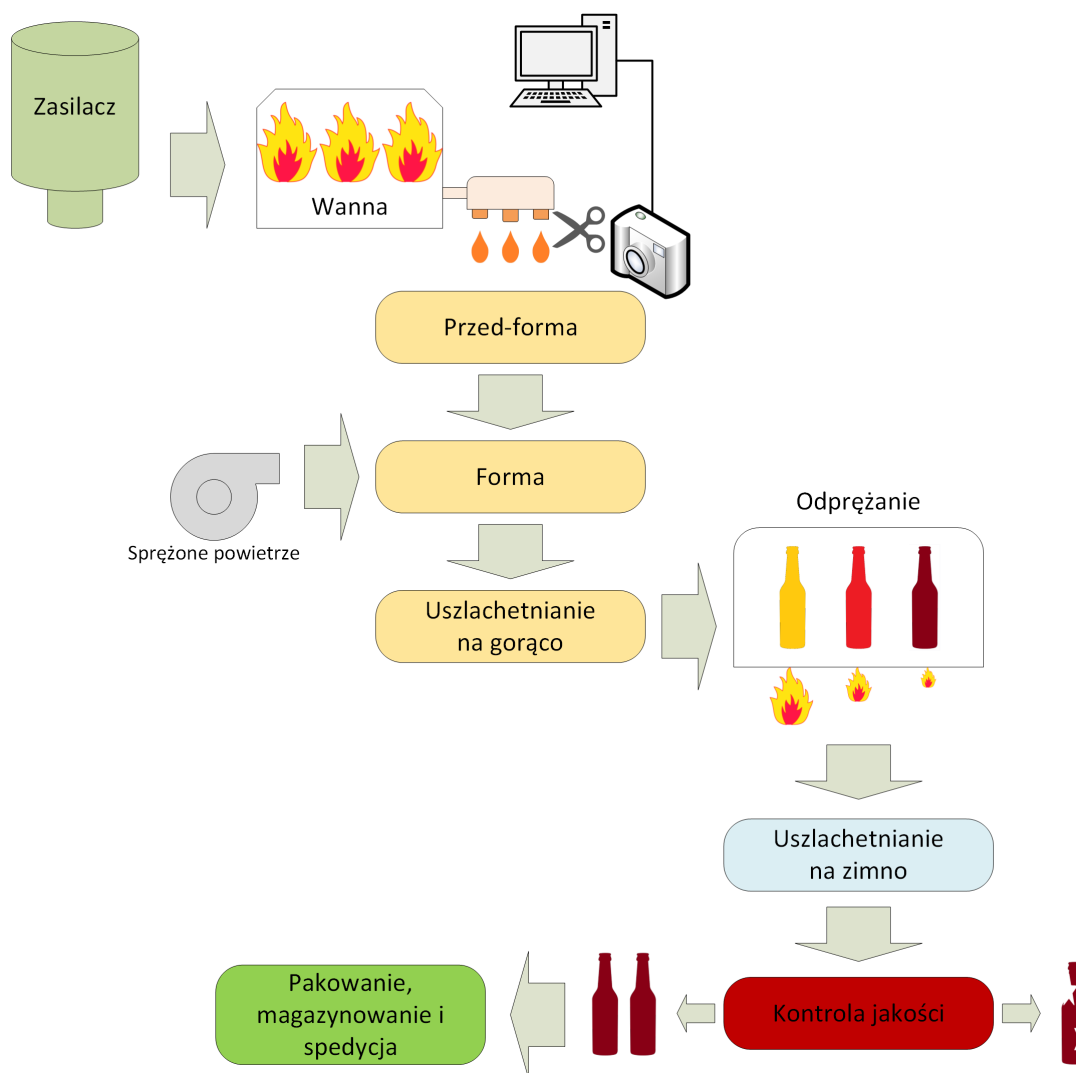
1.1.6. Zakończenie procesu produkcyjnego

Jak niemal w każdym procesie produkcyjnym, ostatni etap składa się z kontroli jakości gotowego wyrobu oraz jego spedycji. Opakowania szklane kontrolowane są pod względem poprawności nadanego kształtu, równomierności rozłożenia szkła na ściankach opakowania i obecności pęknięć lub zanieczyszczeń. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem są komputerowe systemy wizyjne wsparte przez dodatkową kontrolę dokonywaną przez ludzi.

Po przejściu kontroli jakości gotowe opakowania są pakowane, magazynowane i wysyłane do odbiorcy.

1.1.7. Schemat procesu produkcji opakowań szklanych

Omówiony proces produkcyjny został schematycznie przedstawiony na rysunku 1.2. Symbolem aparatu fotograficznego oznaczono pozycję proponowanego komputerowego systemu wizyjnego w całym procesie produkcyjnym.



Rysunek 1.2: Schemat procesu produkcji opakowań szklanych

1.2. Cel i założenia systemu wizyjnego

Podczas produkcji szkła opakowaniowego występuje bardzo dużo zmiennych i parametrów technologicznych, których odpowiednia wielkość może mieć decydujący wpływ na wynik końcowy procesu. Fakt ten wynika zarówno z samej wielkości i ilości kroków niezbędnych podczas przetwarzania surowca do gotowego produktu, jak i ich złożoności. Aby utrzymać taki wielkoskalowy proces i zapewnić jego ciągłość i powtarzalność, niezbędne jest jego opomiarowanie i znaczna automatyzacja. Różnorodne wielopoziomowe komputerowe systemy sterowania wykorzystywane są na różnych etapach produkcji tak, aby zapewnić poprawne działanie każdego z nich. Jako przykłady takich systemów sterowania można wymienić:

- Sterowanie temperaturą i jej rozkładem w piecu szklarskim
Regulacji temperatury można dokonywać na przykład poprzez zmianę ilości dostarczanego paliwa, a rozkład temperatury w piecu poprzez częstotliwość odwracania ciągu pieca regeneracyjnego.
- Sterowanie aparaturą służącą do formowania produktu
Maszyna kształtująca opakowania z roztopionego szkła to duże urządzenie mechatroniczne składające się z zestawu elementów wykonawczych. Sterowanie tego typu urządzeniem to typowe zagadnienie automatyki.

- Sterowanie szybkością i temperaturą odprężania
Regulacja szybkości stygnięcia ma istotny wpływ na przebieg procesu odprężania gorącego szkła.
- Automatyczna kontrola jakości
Wykorzystanie komputerowych systemów wizyjnych pomaga podnieść standardy jakości gotowego produktu zmniejszając ryzyko niedopatrzenia kontrolera.
- Zarządzanie magazynem i spedycją wyrobu
Zagadnienia zarządzania końcem linii produkcyjnej to typowy rodzaj problemów z pogranicza automatyki i zarządzania zaliczanych do klasy ERP.

1.2.1. Wpływ jakości kropli szkła na przebieg procesu produkcyjnego

Parametry kropli szkła mają bardzo duży wpływ na całość procesu produkcyjnego. Jakość produkcji kropel i jej powtarzalność jest warunkiem koniecznym osiągnięcia wysokiej jakości całego procesu produkcyjnego i zapewnienia niewielkiej liczby defektów. Z drugiej strony, nieprawidłowo uformowana kropla może spowodować zatrzymanie fragmentu instalacji formującej butelki, a w skrajnym przypadku doprowadzić do jej uszkodzenia.

Na charakter formowanej kropli wpływ ma bardzo wiele czynników, często zależnych od pozostałych fragmentów instalacji.

Jakość surowca i obecność zanieczyszczeń

Obecność zanieczyszczeń w surowcu, zestawie szklarskim lub stłuczce szklanej, ma przede wszystkim wpływ na ilość emisji szkodliwych substancji do środowiska. Obecność w stłuczce szklanej szkła kryształowego, na przykład ołowiowego, znacząco podnosi poziom emisji do środowiska ołowiu, a przedostanie się fragmentów świetlówek może mieć wpływ na ilość wydzielanych par rtęci.

Drugim niepożądanym rodzajem zanieczyszczeń mogą być ciała obce, które nie ulegną stopieniu w piecu szklarskim. Jako przykład można tutaj wymienić metale o wysokiej temperaturze topnienia, na przykład wolfram oraz zanieczyszczenia mineralne - drobiny minerałów o wyjątkowo wysokiej temperaturze topnienia lub też stłuczka szkła specjalistycznego czy ceramiki. Niestopione odłamki takich materiałów dostając się do głowicy, w przypadku gdy natrafią na nie nożyce rozcinające krople, mogą spowodować nieprawidłowe rozdzielanie kropli powodujące ciągnięcie się strugi szkła. Zjawisko to może spowodować wydostanie się gorącego materiału poza przeznaczony dla niego obszar powodując zagrożenie i szkody materialne. W przypadku dostania się ciała obcego do formy, może ono uniemożliwić ukształtowanie gotowego wyrobu, a w ostatnim etapie produkcji - kontroli jakości - spowodować odrzucenie wyrobu i ponowne przerobienie go na stłuczkę.

Praca głowicy zasilacza

Strugi szkła formowane są w głowicy. Często najlepszym sposobem na zwiększenie wydajności instalacji jest zwiększenie liczby równoległe produkowanych opakowań, a co za tym idzie, zwielenokrotnienie ilości strug szkła tworzących krople. Rozwiązanie takie pociąga za sobą jednakże istotne trudności techniczne. Głowica oddaje ciepło do otoczenia, co powoduje że szkło znajdujące się na jej obrzeżach ma niższą temperaturę niż szkło znajdujące się w samym jej środku. Dla instalacji produkujących jednocześnie wiele kropel szkła efekt ten ma bardzo istotne znaczenie, z uwagi na bardzo silną zależność lepkości roztopionego szkła od jego temperatury. Niejednakowa lepkość szkła w otworach formujących wpływa na różną szybkość wyciekania przez nie szkła. Ponieważ krople rozdzielane są jednocześnie, zjawisko to skutkuje różną masą kropel w zależności od ich położenia - krople wewnętrzne będą większe niż krople zewnętrzne.

Wpływ niejednakowego rozmiaru i masy kropel na proces produkcyjny jest bardzo znaczny i oczywisty - produkowane opakowania nie będą jednakowe. W przypadku dużych różnic i odchyłek od normy, zjawisko to może uniemożliwić prawidłowe wydmuchanie opakowania powodując jego pozostanie w formie, lub też wycieknięcie szkła poza nią. Forma, w której pozostanie część szkła musi zostać

manualnie oczyszczona. Wiąże się to z koniecznością wstrzymania produkcji w tym fragmencie instalacji na czas usuwania usterki i konserwacji.

Z powyższych powodów stosuje się złożone rozwiązania technologiczne mające na celu chłodzenie wewnętrznych części głowicy, aby wyrównać rozkład temperatury. Głowica formująca strugi wyposażona jest również w mechaniczny system wytłocznika tworzący swego rodzaju zawór pozwalający regulować szybkość wypływu szkła z otworu formującego strugę.

Praca nożyc

Ostatnim elementem instalacji formującym krople są mechaniczne nożyce. Rozcinają one strugę na krople szkła. Od ich niezawodnej pracy zależy między innymi powtarzalność produkowanych kropeł. Regulacja częstotliwość cyklu pracy nożyc, wraz ze zmianą nastaw wytłocznika umieszczonego w głowicy umożliwia sterowanie rozmiarem kropli. Regulując częstotliwość odcinania kropli należy mieć na uwadze zarówno rozmiar produkowanych kropli, jak i szybkość z jaką pracuje instalacja - okres ten powinien dobrany być tak, aby dostarczać prawidłowego rozmiaru krople z częstotliwością dopasowaną do optymalnej szybkości pracy urządzenia formującego butelki. Zbyt duża szybkość produkcji kropeł powodowałaby nienadążanie tego urządzenia, podczas gdy zbyt mała szybkość wpłynęłaby na obniżenie wydajności całej instalacji.

Odrzutnik kropeł i pomiar objętości

Instalacja wyposażona jest w pneumatycznie sterowany odrzutnik umieszczony powyżej prowadnic kierujących krople do forem. Pozwala on przekierować krople z głównej linii produkcyjnej na przyrządy pomiarowe służące do bezkontaktowego, pojemnościowego wyznaczania objętości kropli. Krople, które zostały wykorzystane do pomiarów pracy instalacji zostają przerobione na słuczkę szklaną i ponownie użyte jako surowiec wtórny w procesie produkcyjnym. Na rysunku 1.3 przedstawiono odrzutnik podczas pracy - widać jak krople uderzając w odrzutnik zmieniają kierunek lotu.



Rysunek 1.3: Odrzutnik kropeł. Zdjęcie wykonane przez autora w Hucie Szkła Orzesze

1.2.2. Założenia, wymagania i funkcjonalność systemu wizyjnego

Choć produkcja kropeł szkła przebiega w sposób całkowicie automatyczny, to właśnie ten fragment instalacji hutniczej jest najgorzej oczyjnikowany i oprzyrządowany, głównie z uwagi na trudność dostępu

do swobodnie spadających, rozgrzanych do bardzo dużej temperatury, roztopionych kropeł szkła. Rozwój technik wizyjnych i komputerowych systemów sterowania pozwala na próby tworzenia wydajnych systemów mogących poprawić jakość i wydajność procesu produkcyjnego [16]. Opisany w pracy komputerowy system wizyjny przeznaczony jest do wyznaczania zdefiniowanych parametrów spadających kropeł szkła. Wyznaczone parametry pozwalają ocenić jakość i powtarzalność kropeł w sposób nie wymagający istotnej ingerencji w sam przebieg procesu produkcyjnego. Aspekt ten jest szczególnie istotny z uwagi na prototypowy charakter systemu, który mógłby narażać instalację na wystąpienie poważnych usterek.

Zadanie budowy kompletnego, zintegrowanego systemu sterującego jednocześnie wieloma procesami w instalacji tak dużej jak huta szkła jest bardzo trudne i kosztowne. Jego rozbudowa i poszerzenie o dodatkowe funkcjonalności pozornie wydaje się być dużo łatwiejsze, jednakże należy pamiętać, że integracja systemów jest procesem mogącym wymagać wprowadzenia koniecznych przestojów, a także wprowadzającym duże ryzyko nieprzewidzianych komplikacji. Z drugiej strony, obszar wnioskowania i sterowanie na podstawie obrazu kropli nie posiada gotowych, sprawdzonych i popularnych rozwiązań. Pionierski charakter systemu dodatkowo podnosi poziom złożoności projektu.

Z tego powodu zdecydowano się w pierwszej kolejności zaprojektować system o charakterze prototypowo-laboratoryjnym. Nie ma on służyć do bezpośredniego sterowania procesem przemysłowym w czasie rzeczywistym, natomiast wymaga się jak najmniejszej ingerencji w istniejącą aparaturę. Głównym celem stworzonego systemu jest ocena praktycznych możliwości realizacji i przydatności rozbudowanego systemu, który wykorzystywałby rozwiązania z dziedziny przetwarzania obrazów i systemów wizyjnych zaproponowane w omawianym systemie prototypowym.

Wiedza na temat informacji o przebiegu procesu zawartych w obrazie kropli wynika z praktyki i doświadczenia techników i operatorów instalacji hutniczej. Stworzony system ma za zadanie wyciągać wnioski na podobnej zasadzie jak doświadczony operator, dodatkowo łącząc obiektywność maszyny w podawaniu konkretnych, porównywalnych wyników liczbowych. Tak pozyskiwana informacja mogłaby służyć operatorom instalacji jako pomoc w dobieraniu akcji korygujących pracę maszyny.

Wyznaczenie progowych wartości parametrów kropli szkła może posłużyć do generacji ostrzeżeń i alarmów przyciągających uwagę operatora. Odpowiednio wczesne zaobserwowanie dewiacji od pożądanego przebiegu procesu pozwala na wcześniejsze wprowadzenie akcji korygujących, a przez to skrócenie i zmniejszenie produkcji wyrobu niespełniającego norm jakości. Dostatecznie wcześnie przeprowadzona korekta może również uchronić system przed usterką lub awarią i związaną z nią przerwą w produkcji przekładając się na zwiększenie wydajności systemu.

Zebranie danych referencyjnych podczas prawidłowego działania systemu i stworzenie odpowiedniej bazy może mieć zastosowanie podczas przestawiania produkcji pomiędzy rodzajami wyrobu. W przypadku powrotu do uprzednio wytwarzanego produktu, dane historyczne pomogłyby w weryfikacji poprawności dokonanego przestrojenia maszyny lub ewentualnym poszukiwaniu przyczyn nienormalnej pracy instalacji.

2. Zastosowane techniki przetwarzania obrazu

Obróbka i przetwarzanie obrazu to bardzo szeroka dziedzina cechująca się bardzo dużą, jak na naukę ścisłą, dowolnością implementacji. Choć istnieje ogólnie przyjęty kanon znanych i skutecznych algorytmów, to jednak konkretnych implementacji i wynikających z nich różnic może być bardzo wiele. Fakt ten spowodowany jest wieloma czynnikami. Pierwszym takim czynnikiem jest bardzo szerokie pole zastosowań komputerowych technik analizy obrazu, a co za tym idzie ogromna dowolność i różnorodność obrabianych danych wejściowych. Drugim zasadniczym czynnikiem jest fakt, iż do analizy obrazu używana jest maszyna, a zatem urządzenie nie obdarzone inteligencją i zdolnością uczenia się, którą posiadają zwierzęta i ludzie. Brak technicznych możliwości realizacji i tak bardzo mało poznanych procesów zachodzących w układach nerwowych powoduje, że dobór konkretnych technik obróbki do zadanego problemu analizy obrazu opiera się na doświadczeniu i pomysłowości projektanta w sposób uznaniowy i eksperymentalny. Tym niemniej, pomimo wyżej wymienionych trudności, dzięki rozwojowi mocy obliczeniowej komputerów, systemy wizyjne w doskonały sposób potrafią radzić sobie z konkretnymi zadaniami, do realizacji których zostały zaprojektowane. Znajdują one zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach życia, takich jak medycyna, rozwój elektroniki przemysłowej, motoryzacji, zarządzaniu infrastrukturą drogową, a także w przemyśle i sterowaniu procesami.

W rozdziale 2 przybliżono wykorzystane algorytmy i techniki przetwarzania obrazu. Zamieszczony tutaj opis ma charakter teoretyczny, to znaczy przedstawiono ideę każdego algorytmu oraz przykładowe działanie każdej z technik. Szczegółowy opis wykorzystania wymienionych technik przedstawiono w rozdziale 3 wraz z odpowiednim kontekstem i uzasadnieniem ich wykorzystania.

2.1. Segmentacja

Segmentacja to podstawowa technika przetwarzania obrazu znajdująca zastosowanie w większości systemów prowadzących wnioskowanie na podstawie obrazu [17]. Jej głównym zastosowaniem jest rozróżnienie interesującego obiektu od tła obrazu, w którym nie ma zawartych istotnych informacji. Składa się ona z dwóch podstawowych kroków, którymi są:

- Klasyfikacja pikseli na podstawie ich wartości, a czasem też sąsiedztwa
- Zastosowanie konkretnych operacji dla pikseli które spełniły (albo nie spełniły) warunki z poprzedniego kroku

2.1.1. Model opisu koloru i przestrzenie barw

Na obrazie cyfrowym, każdy jego najmniejszy fragment, czyli piksel, zawiera informację przedstawioną w formie wektora liczb. W zależności od formatu zdjęcia, wektor może ten być różnej długości, jednakże najczęściej spotyka się obrazy w skali szarości opisane wektorem jednoelementowym, czyli liczbą lub też obrazy kolorowe opisane wektorem trzech liczb. Fakt ten wynika z konstrukcji doskonałej większości matryc cyfrowych, które rejestrują obraz w skali szarości, lub trzech kolorach. Istnieją również modele barw o czterech składowych, gdzie jedna z nich oznacza przezroczystość koloru, jednakże są one stosowane głównie do grafiki komputerowej z uwagi na niemożliwość rozpoznania przezroczystości na obrazie wykonanym aparatem fotograficznym. Efekt ten można łatwo

zilustrować częściowym nałożeniem na siebie dwóch kolorów częściowo przezroczystych, które na zdjęciu będą sprawiały wrażenie występowania trzech kolorów nieprzezroczystych.

Występowanie trzech barw podstawowych oznacza, że wektor liczb opisujących kolor posiada trzy niezależne składowe. Istnieje wiele przyjętych modeli barw, to znaczy sposobu interpretacji każdej z liczb, jednakże omówione zostaną tylko te dwa modele, które znalazły zastosowanie w tej pracy. Warto wspomnieć, że choć większość modeli barw jest równoznaczna, to jednak istnieją barwy których nie da się opisać za pomocą jednego modelu barw, a za pomocą innego już tak.

Skala szarości

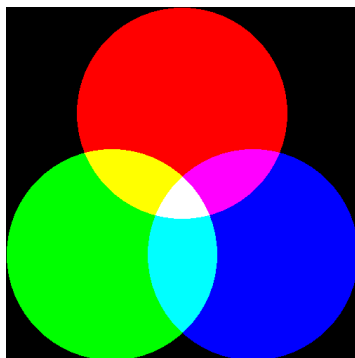
Obrazy monochromatyczne najczęściej reprezentowane są w skali szarości, gdzie liczba odpowiadająca pikselowi określa ilość światła padającego na dany fragment matrycy podczas wykonywania zdjęcia, a co za tym idzie, jasność danego punktu w kadrze aparatu. Obrazy w skali szarości są często wykorzystywane w systemach wizyjnych z uwagi na łatwość i szybkość ich obróbki w stosunku do obrazów kolorowych, a także z uwagi na dużą popularność przemysłowego sprzętu rejestrującego obraz monochromatyczny. Istotną wadą obrazów w skali szarości może być zmniejszenie ilości informacji zawartych w każdym pikselu zdjęcia.

Przestrzeń barw RGB

Najbardziej naturalną dla człowieka reprezentacją koloru jest przestrzeń barw RGB, która w prosty sposób odpowiada barwom podstawowym i addytywnemu mieszanii barw. Stąd też bierze się nazwa tej przestrzeni barw:

- R - czerwony (red)
- G - zielony (green)
- B - niebieski (blue)

Rysunek 2.1 przedstawia trzy barwy składowe przestrzeni RGB i addytywny model barw.



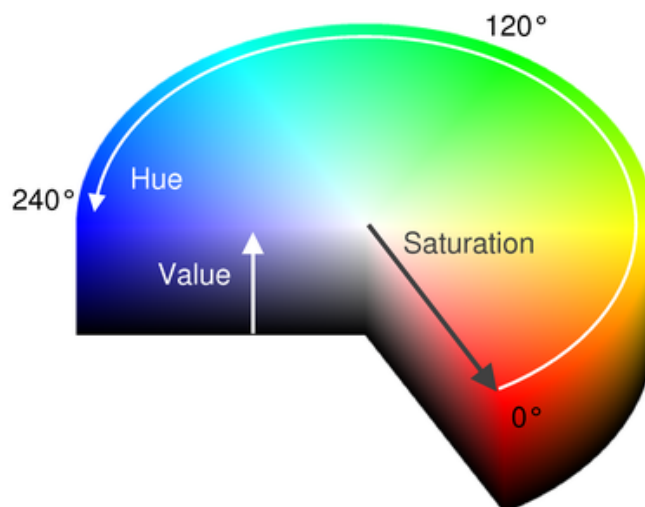
Rysunek 2.1: Addytywny model barw i przestrzeń RGB

Przestrzeń barw HSV

Szczególnie istotną dla automatycznego rozpoznawania obrazu przestrzenią barw jest przestrzeń HSV, czyli:

- Odcień (Hue)
- Nasycenie (Saturation)
- Wartość (Value)

Model ten można wyobrazić sobie jako walec, dla którego kąt na kole kolorów określony jest przez odcień, nasycenie określa promień, a wartość odpowiada wysokości. Przyjmuje się, że wartość odcienia równa 0 lub 2π oznacza kolor czerwony. Składowa Wartość (Value) przyjmuje wartość największej ze składowych R,G lub B. Rysunek 2.2 przedstawia cylindryczną interpretację przestrzeni barw HSV [2].



Rysunek 2.2: Przestrzeń barw HSV

Oprócz stosunkowo łatwej interpretacji fizycznej, ta przestrzeń barw cechuje się istotną cechą, która sprawia, iż jest ona szczególnie przydatna podczas tworzenia komputerowych systemów wizyjnych. Zastosowanie przestrzeni barw HSV pozwala w znacznym stopniu wyeliminować problemy związane ze zmienną ilością światła, jakim oświetlony jest obiekt. W przypadku przestrzeni barw RGB ilość światła wpływa na wszystkie trzy składowe, podczas gdy w przestrzeni barw HSV jest ona zawarta tylko w jednej z nich. Często spotykanym rozwiązaniem jest pominięcie składowej Wartość (Value), co prowadzi do zwiększenia odporności systemu na zakłócenia spowodowane zmiennymi warunkami oświetleniowymi, jakie mogą panować podczas wykonywania zdjęć.

2.1.2. Progowanie

Na podstawie wartości piksela w danej przestrzeni barw można zbudować zestaw filtrów, to znaczy warunków logicznych, których spełnienie spowoduje wykonanie pewnej operacji przypisania, albo jej zaniechanie [1]. Przykładem takiego progowania może być założenie, że minimalna jasność obiektu będzie wynosić nie mniej niż 0.5 w skali szarości i przypisanie wszystkim pikselom o wartości mniejszej niż 0.5 zera, aby wyeliminować je z dalszej obróbki, która mogłaby podnieść ich wartość. Najczęściej spotykanymi strategiami progowania są:

- Usunięcie pikseli tła (przypisanie im zera), pozostawienie pikseli obrazu niezmiennymi
- Binarizacja, czyli przypisanie „0” pikselom tła i „1” pikselom obrazu
- Ograniczenie maksymalnej lub minimalnej wartości pikseli
- Przypisanie pikselom z danego zakresu określonej wartości
- Kombinacja powyższych strategii.

Progowanie pozwala na rozróżnienie obiektu od tła i wyeliminowanie zbędnych informacji z obrazu w celu ułatwienia dalszej obróbki, analizy i wnioskowania.

2.1.3. Segmentacja kropli szkła

W stworzonym systemie wizyjnym zastosowano segmentację na podstawie zarówno przestrzeni barw RGB, jak i HSV. Zastosowanie dwóch przestrzeni barw pozwala w łatwy sposób zdefiniować konkretne cechy, które musi zawierać każdy piksel kropli. Segmentacja polega na usunięciu z obrazu wszystkich pikseli zaliczonych do tła. Możliwość zmiany wartości progu dla każdej składowej zarówno przestrzeni barw RGB, jak i HSV opisano szerzej w sekcji 4.2.12.

Przykład segmentacji, dla której każdy piksel obrazu musi spełniać zależności 2.1 przedstawiono na rysunku 2.3. Wartości składowych należą do przedziału $[0, 255]$.

$$x \in K \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_x \geq 178 \\ S_x \geq 89 \\ V_x \geq 216 \\ B_x \leq 249 \end{array} \right\} \quad (2.1)$$



Rysunek 2.3: Segmentacja kropli szkła

2.2. Operacje morfologiczne

Przekształcenia morfologiczne to cała grupa algorytmów służących do przetwarzania obrazu [18]. Choć operacje morfologiczne zdefiniowane są również dla obrazów w skali szarości i kolorowych, najczęściej wykorzystuje się je do obróbki obrazów binarnych. Wspólną cechą wszystkich przekształceń morfologicznych jest obecność elementu strukturalnego inaczej zwanego jądrem przekształcenia. Jest to macierz o nieparzystej liczbie kolumn i wierszy zawierająca zera i jedynki. Każde jądro przekształcenia posiada również element centralny, którego wartość wynosi 1. W zależności od zastosowania mogą one przyjmować różne kształty, jednakże zazwyczaj w celu filtracji i obróbki obrazu obiektów nie posiadających wyraźnej i szczególnie istotnej kierunkowości, stosuje się elementy strukturalne będące przybliżeniem kuli w wybranych metrykach. Przykłady takich elementów strukturalnych zamieszczono w macierzach 2.2. Element centralny oznaczono jako x , warto pamiętać że jego wartość również wynosi 1.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & x & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & x & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & x & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Element centralny najczęściej jest umieszczony w środkowym wierszu i środkowej kolumnie. Łatwo zauważyć, że dla każdego elementu strukturalnego z przesuniętym elementem centralnym istnieje równoznaczne jądro przekształcenia o większym rozmiarze, co zilustrowano relacją 2.3.

$$\begin{bmatrix} x & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \iff \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Ogólny schemat operacji morfologicznych składa się z nałożenia na fragment obrazu elementu strukturalnego (mnożenie wartości piksela i elementu jądra przekształcenia) i wykonania przypisania do piksela obrazu wynikowego znajdującego się pod elementem centralnym, oznaczonym x . Aby otrzymać obraz wynikowy takiego przekształcenia, należy wykonać je dla każdego z pikseli obrazu źródłowego, podobnie jak w przypadku operacji konwolucyjnych omówionych w sekcji 2.3.1. Rodzaj przypisania zależy od rodzaju wykonywanej operacji.

2.2.1. Filtracja medianowa

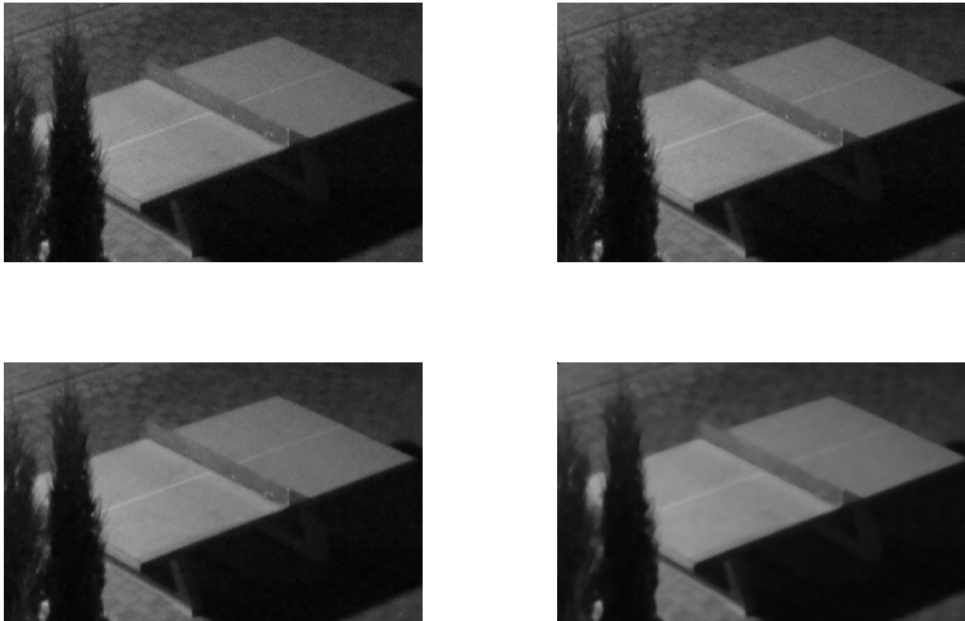
W przypadku filtracji medianowej, do każdego z pikseli obrazu wynikowego zostanie przypisana mediana zbioru stworzonego z ciągu liczb powstałych po wymnożeniu każdego z elementów jądra przekształcenia przez odpowiadający mu element przekształcenia.

W praktyce filtracja medianowa doskonale nadaje się do usuwania z obrazu źródłowego szumów typu „pieprz i sól”, które pojawiają się na skutek pracy matrycy cyfrowej, zwłaszcza dla wyższych ustawień czułości (ISO). Istotną zaletą tej operacji jest również fakt, iż nie powoduje ona rozmycia krawędzi obiektów. Usunięcie szumu przy jednoczesnym niewielkim zniekształceniu krawędzi sprawia, że jest to doskonały algorytm obróbki stosowany przed wykorzystaniem operacji naśladujących działanie gradientu, czyli różnego rodzaju algorytmów wykrywających krawędzie. Najistotniejszą wadą filtracji medianowej jest fakt, iż w przypadku dostatecznie dużej maski potrafi ona całkowicie usunąć pewne obiekty oraz często powoduje zaokrąglenie narożników obiektu. Przykład działania filtracji medianowej zamieszczono na rysunku 2.4. Działanie filtracji medianowej przedstawiono na przykładzie obrazu o rozmiarach 1271×787 pikseli. Obraz oryginalny zamieszczono w lewym górnym rogu. Na prawo od niego znajduje się obraz, dla którego zastosowano element strukturalny składający się z jedynek o rozmiarze 3×3 , a poniżej obrazy wynikowe dla elementu strukturalnego o rozmiarze 7×7 i 17×17 .

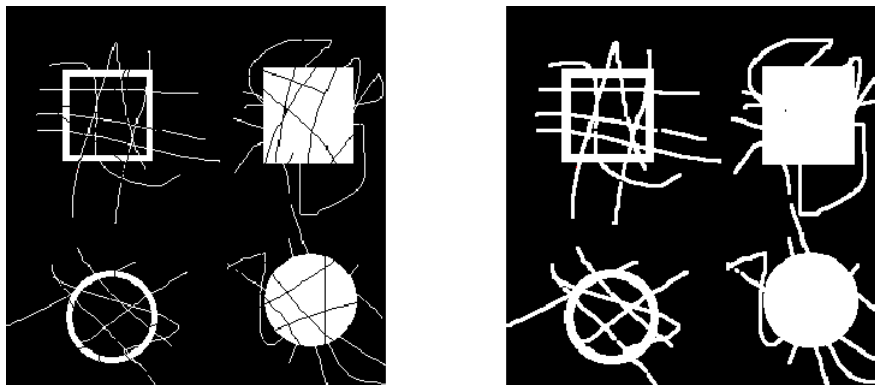
2.2.2. Dylatacja

Dylatacja to operacja podczas której do piksela znajdującego się pod elementem centralnym jądra przekształcenia wpisywana jest maksymalna wartość ze zbioru liczb powstałego przez nałożenie elementu strukturalnego na otoczenie tego piksela. Dylatacja powoduje charakterystyczne „puchnięcie” jasnych obiektów na obrazie. Rysunek 2.5 przedstawia dylatację obrazu binarnego. Zastosowany element

strukturalny to macierz $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & x & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Po lewej przedstawiono obraz źródłowy, podczas gdy po prawej znajduje się obraz wynikowy.



Rysunek 2.4: Przykład filtracji medianowej



Rysunek 2.5: Przykład dylatacji

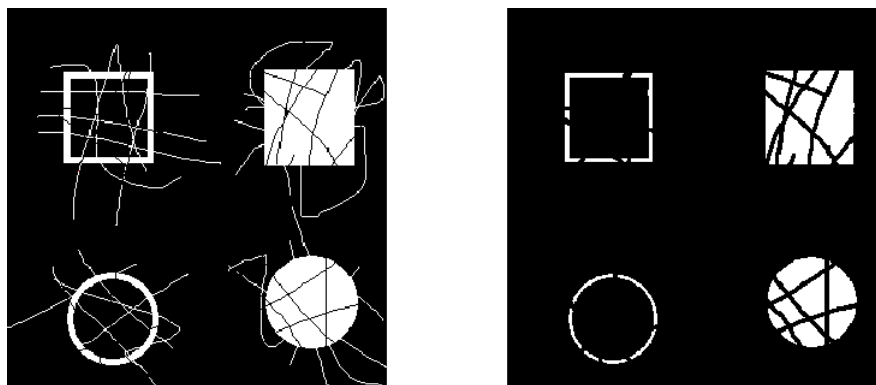
2.2.3. Erozja

Erozja jest operacją niemalże odwrotną do dylatacji, podczas której do piksela znajdującego się pod elementem centralnym jądra przekształcenia wpisywana jest wartość minimalna ze zbioru liczb powstałego przez nałożenie elementu strukturalnego na otoczenie tego piksela. Erozja powoduje zmniejszenie się jasnych obiektów na obrazie. Rysunek 2.6 przedstawia erozję obrazu binarnego. Zastosowany ele-

ment strukturalny to macierz $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & x & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Po lewej przedstawiono obraz źródłowy, podczas gdy po prawej znajduje się obraz wynikowy.

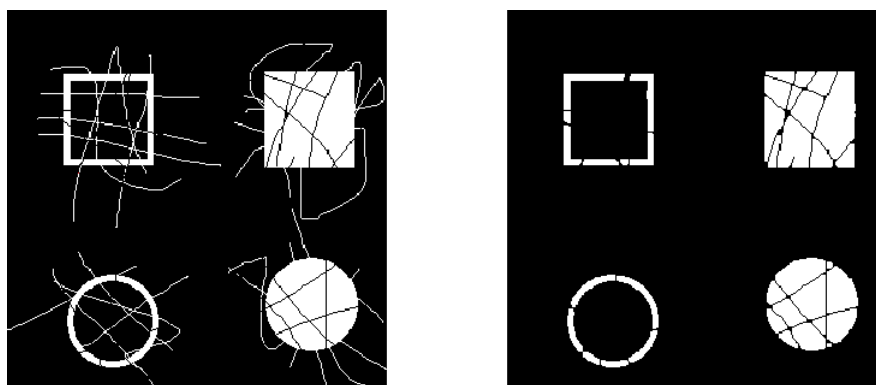
2.2.4. Otwarcie

Otwarcie to złożenie operacji erozji i dylatacji. Erozja wykonywana jest jako pierwsza, co powoduje całkowite wyeliminowanie obiektów mniejszych niż jądro przekształcenia, lub fragmentów większych obiektów o dostatecznie małej średnicy. Następnie wykonywana jest dylatacja, aby zachować przybliżony rozmiar pozostałych obiektów. Otwarcie szczególnie przydatne jest do usunięcia pojedynczych pikseli tła, które mogły zostać zaklasyfikowane jako obraz podczas segmentacji. Rysunek 2.7 przedstawia



Rysunek 2.6: Przykład erozji

otwarcie obrazu binarnego. Zastosowany element strukturalny to macierz $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & x & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Po lewej przedstawiono obraz źródłowy, podczas gdy po prawej znajduje się obraz wynikowy.



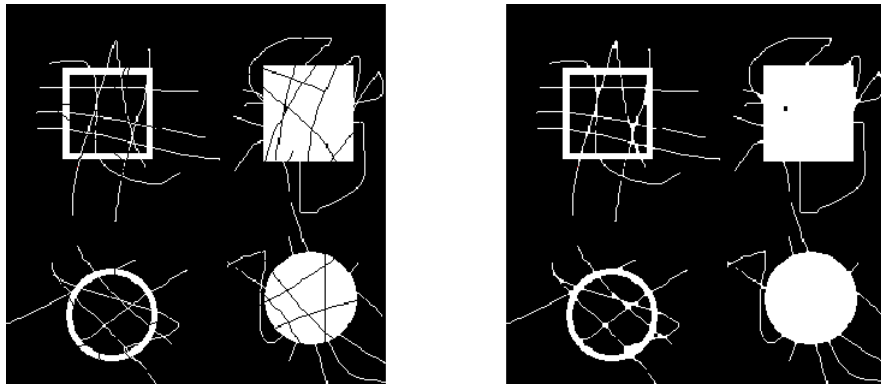
Rysunek 2.7: Przykład otwarcia

2.2.5. Zamknięcie

Zamknięcie jest przeciwieństwem otwarcia. Tak samo jak w przypadku otwarcia, wykonywane są operacje erozji i dylatacji, jednakże w odwrotnej kolejności - najpierw wykonywana jest dylatacja, co powoduje „wypełnienie ubytków” obiektu. W celu zapewnienia podobnego rozmiaru obiektów na obrazie wynikowym, przeprowadzana jest erozja. Zamknięcie może być wykorzystane zamiast otwarcia w przypadku gdy to obiekt jest ciemny, a tło obrazu jasne. Rysunek 2.8 przedstawia zamknięcie przeprowadzone na obrazie binarnym. Zastosowany element strukturalny to macierz $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & x & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Po lewej przedstawiono obraz źródłowy, podczas gdy po prawej znajduje się obraz wynikowy.

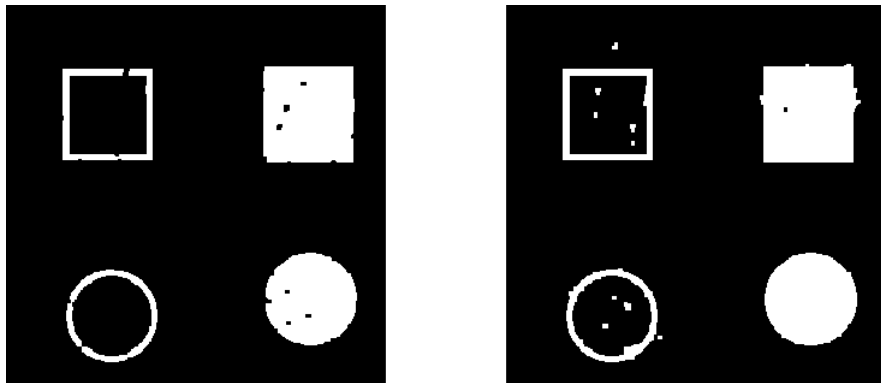
2.2.6. Złożenie operacji otwarcia i zamknięcia

Wykonanie sekwencji operacji otwarcia i zamknięcia pozwala usunąć bardzo znaczną ilość deformacji obrazu, jednakże należy pamiętać, iż choć otrzymane obrazy będą podobne, będą one posiadały pewne różnice spowodowane kolejnością wykonywania operacji. Wybór odpowiedniej kolejności powinien być podyktowany konkretną implementacją i celem, na którym najbardziej zależy projektantowi. W przypadku chęci odtworzenia ciągłości i spójności obiektów jasnych na ciemnym tle, pierwsze powinno zostać wykonane zamknięcie. W przypadku gdy nie da się tak dobrać progu segmentacji, aby



Rysunek 2.8: Przykład otwarcia

zagwarantować odfiltrowanie wszystkich fragmentów tła, należy w pierwszej kolejności wykonać otwarcie. Na rysunku 2.9 przedstawiono złożenie operacji otwarcia i zamknięcia dla obrazów wykorzystanych w sekcjach 2.2.4 i 2.2.5. Dla obrazu lewego pierwsze wykonane zostało otwarcie, podczas gdy dla obrazu prawego jako pierwsze wykonano zamknięcie.



Rysunek 2.9: Złożenie operacji otwarcia i zamknięcia

2.3. Wykrywanie krawędzi

Bardzo często najistotniejszą informacją na obrazie jest kształt obiektu, który z kolei najłatwiej analizować na podstawie jego konturu. Z drugiej strony, często operacje służące do wykrycia krawędzi pozwalają wyostrzyć obraz ukazując na nim więcej istotnych szczegółów. Jest to bardzo ważne zagadnienie z dziedziny przetwarzania obrazów, dla którego opracowano wiele algorytmów. Algorytmy te można najłatwiej podzielić na grupę wykorzystującą konwolucję - działające na oryginale obrazu oraz na grupę wykorzystującą dwuwymiarową transformatę Fouriera. Ponieważ w pracy wykorzystano jedynie metody konwolucyjne, opis metod częstotliwościowych zostanie pominięty.

2.3.1. Operacje konwolucyjne

Operacje konwolucyjne to operacje liniowe, które mogą mieć bardzo wiele zastosowań w przetwarzaniu obrazu. Podobnie jak w przypadku operacji morfologicznych, kluczowym elementem operacji konwolucyjnych jest pewna macierz, która określa otoczenie danego punktu rozpatrywane podczas obliczeń. W przeciwieństwie do operacji morfologicznych, elementy macierzy mogą mieć dowolne wartości, jednakże z uwagi na szybkość obliczeń najczęściej stosuje się liczby całkowite o dowolnym znaku. Wykonanie operacji konwolucyjnych jest równoznaczne z dwukierunkowym splotem, to znaczy oblicza się iloczyn elementu maski i odpowiadającego jej piksela, a następnie tak otrzymany ciąg liczb jest sumowany. Często praktyką jest również stosowanie macierzy unormowanych, to znaczy takich, że suma jej elementów wynosi 1 w przypadku filtrów dolnoprzepustowych lub 0 dla filtrów górnoprzepustowych. Dzięki takiej praktyce, można zapewnić odporność programu na przepełnienie typów liczbowych. Przykładowe maski, które można wykorzystać do filtracji dolnoprzepustowej przedstawiono we wzorze 2.4.

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Maski stosowane do filtracji górnoprzepustowej, a więc do wykrywania krawędzi obrazu, posiadają elementy o wartości ujemnej i zazwyczaj również zerowej. Warto również zwrócić uwagę na fakt, iż często da się w nich wyróżnić zauważalną kierunkowość, która stosowana jest zdecydowanie rzadziej dla filtracji dolnoprzepustowej. Przykładem maski stosowanych do filtracji górnoprzepustowej może być maska Prewitta zamieszczona ww wzorze 2.5. Lewa maska wykryje krawędzie horyzontalne, środkowa wertykalne, podczas gdy prawa - ukośne.

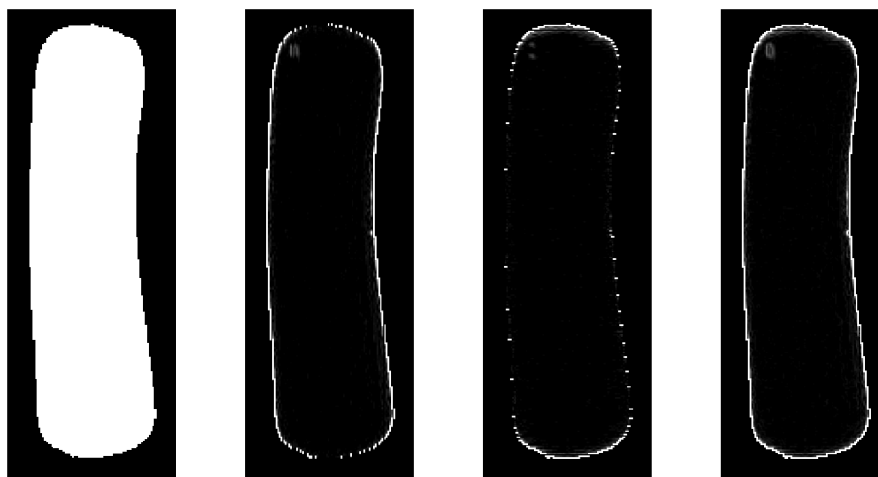
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Filtracja Sobela to rodzaj filtracji konwolucyjnej, która wykorzystuje maski przedstawione na 2.6. Oczywiście, można również zastosować maski o kierunkowości ukośnej [11].

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

Ponieważ zastosowanie tylko jednej z masek powoduje wykrycie krawędzi poziomych albo pionowych, w celu wykrycia wszystkich krawędzi najczęściej stosuje się złożenie obu obrazów. Metodą dokładną, lecz rzadko stosowaną z uwagi na poziom komplikacji obliczeń jest obliczenie pierwiastka sumy kwadratów obrazów powstałych na skutek filtracji prostopadle zorientowanymi maskami. Dobrym przybliżeniem, które zdecydowanie skraca czas operacji obliczeniowych, jest obliczenie sumy wartości bezwzględnej obu obrazów.

Przykład zastosowania filtracji Sobela przedstawiono na rysunku 2.10. Idąc od lewej strony na obrazie przedstawiono kolejno obraz źródłowy kropli, gradient poziomy, gradient pionowy oraz ich złożenie.



Rysunek 2.10: Wykrycie krawędzi metodą Sobela

2.4. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale 2 przedstawiono od strony teoretycznej najważniejsze aspekty wykorzystanych algorytmów przetwarzania obrazu. W opisie skupiono się przede wszystkim na aspektach praktycznych i ich wykorzystaniu w zbudowanej aplikacji, przez co w dużej części zredukowano formalny opis matematyczny szeroko dostępny w literaturze. Wykorzystane techniki przetwarzania obrazu bardzo dobrze realizują swoje zadanie w stworzonym systemie wizyjnym tworząc kluczowe fragmenty programu. Ich rola została opisana wraz z należnym kontekstem i konkretnym celem zastosowania w rozdziale 3 przy okazji opisu algorytmu obliczania parametrów kropli szkła.

3. Mierzone cechy kropli i odpowiadające im parametry

Pomiar parametrów kropli roztopionego wsadu szklanego wymaga zdefiniowania algorytmów przetwarzających obraz kropli na liczbowe wartości odzwierciedlające charakterystyczne cechy kropli. Cechy te posiadają rzeczywistą interpretację i da się określić ich jakościowy wpływ na proces produkcji opakowań szklanych. W tym rozdziale omówiono zaproponowane deskryptory cech charakterystycznych. Każdemu z nich poświęcono osobny podrozdział zawierający sekcję poświęconą opisowi teoretycznemu wpływu danego parametru kropli na proces produkcyjny oraz jego intuicyjnej interpretacji. Kolejna sekcja przedstawia w sposób schematyczny algorytm obliczeniowy każdego deskryptora. Opis deskryptora cechy charakterystycznej zamykany jest przez przykład dobrany tak, by eksponować specyfikę omawianego parametru kropli szkła.

3.1. Zgodność rozmiaru

3.1.1. Motywacja

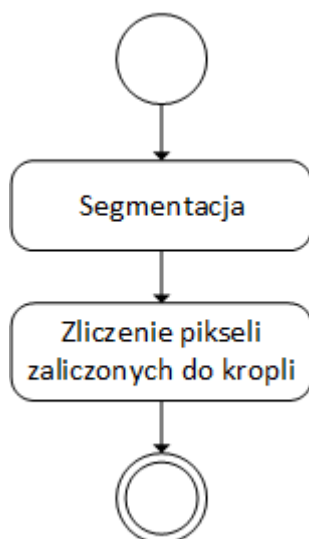
Ilość szkła wykorzystanego do produkcji sztuki wyrobu odmierzana jest na etapie formowania spadającej kropli poprzez nożyce rozcinające strugi wsadu szklanego. Z punktu widzenia procesu produkcyjnego jest to bardzo istotna wielkość, gdyż określa ona ilość szkła dostającego się do formy. Gdy objętość ta jest zbyt mała, szkło nie wypełni całej formy, a w szczególności jej górnej części. Kształt wsadu szklanego w górnej części formy jest bardzo istotny, gdyż to za ten fragment wstępnie uformowany wyrób jest chwytny podczas przenoszenia między formą nadającą kształt a formą wykorzystywaną do wydmuchiwania szkła. Jeżeli objętość użytego szkła będzie zbyt mała, maszyna nie będzie w stanie uchwycić wstępnie uformowanej miniaturowej butelki, a ta utknie w formie zatrzymując proces produkcyjny w tym fragmencie instalacji. Z drugiej strony, jeżeli odmierzona ilość wsadu szklanego będzie zbyt duża, może się on wylać górną formą lub też uniemożliwić dokładne spasowanie jej elementów. Dokładniejszy opis procesu produkcyjnego opakowań szklanych zamieszczono w sekcji 1.2.1.

Zgodność rozmiaru to parametr kropli roztopionego szkła odzwierciedlający powtarzalność i dokładność odmierzania objętości szkła użytego do uformowania pojedynczej sztuki wyrobu, na przykład butelki. Choć obliczenie objętości kropli szkła na podstawie zdjęcia jest skomplikowanym zagadnieniem z uwagi na dużą ilość zmiennych parametrów, takich jak na przykład położenie kamery lub też skomplikowany i nie do końca regularny kształt kropli, nie jest ono konieczne. W stosunkowo łatwy sposób da się określić relację między rozmiarem kropli na zdjęciu wyrażonym w pikselach a akceptowalną objętością szkła. Taki parametr, choć nie określa ilości szkła w danej kropli w sposób bezpośredni i obiektywny, jest w zupełności wystarczający aby kontrolować istotniejszą wielkość - powtarzalność odmierzanej objętości i masy kropel.

3.1.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania

Schemat blokowy algorytmu obliczającego zgodność rozmiaru przedstawiono na rysunku 3.1. Algorytm ten jest stosunkowo prosty, a jego relatywnie najbardziej złożonym elementem jest segmentacja obrazu. Więcej informacji na temat algorytmu segmentującego obraz i rozpoznawania kropli zamiesz-

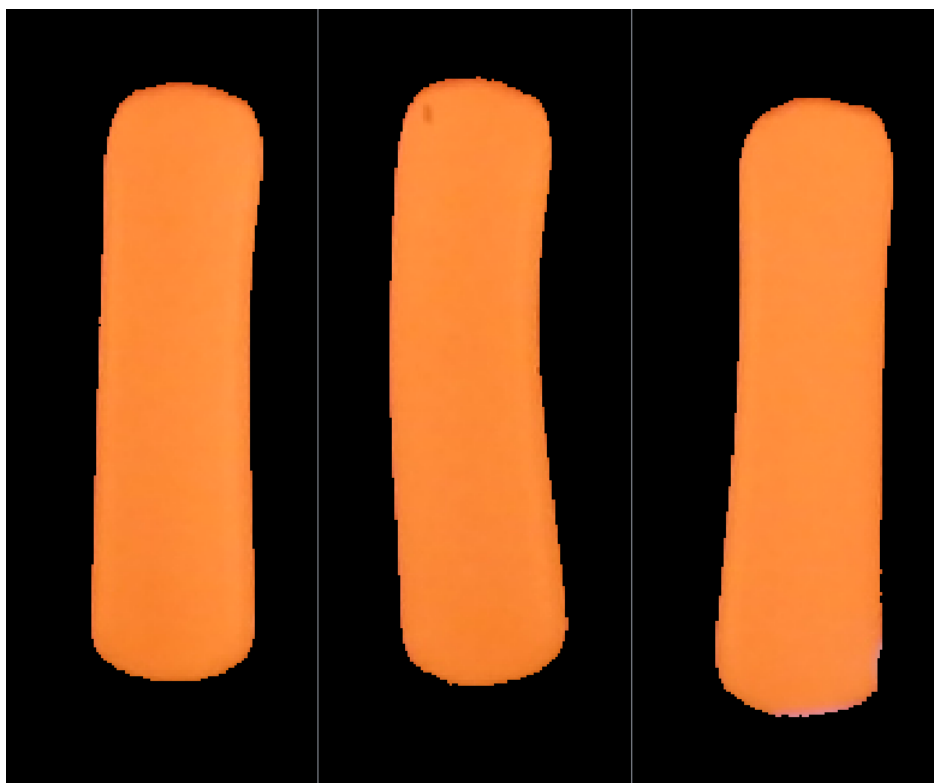
czono w sekcji 2.1.3. Wynik działania algorytmu to liczba pikseli zaliczonych do kropli będąca dla danego położenia kamery funkcją rzeczywistego rozmiaru kropli.



Rysunek 3.1: Schemat blokowy obliczania zgodności rozmiaru

3.1.3. Przykład

Na rysunku 3.2 przedstawiono trzy przykładowe krople. Odpowiadające im wartości deskryptora zamieszczono w tabeli 3.1.



Rysunek 3.2: Zgodność rozmiaru

	Kropla lewa	Kropla środkowa	Kropla prawa
Rozmiar	13290	13188	13487

Tablica 3.1: Przykładowe wartości deskryptora rozmiaru

3.2. Zgodność wypełnienia prostokąta opisanego

3.2.1. Motywacja

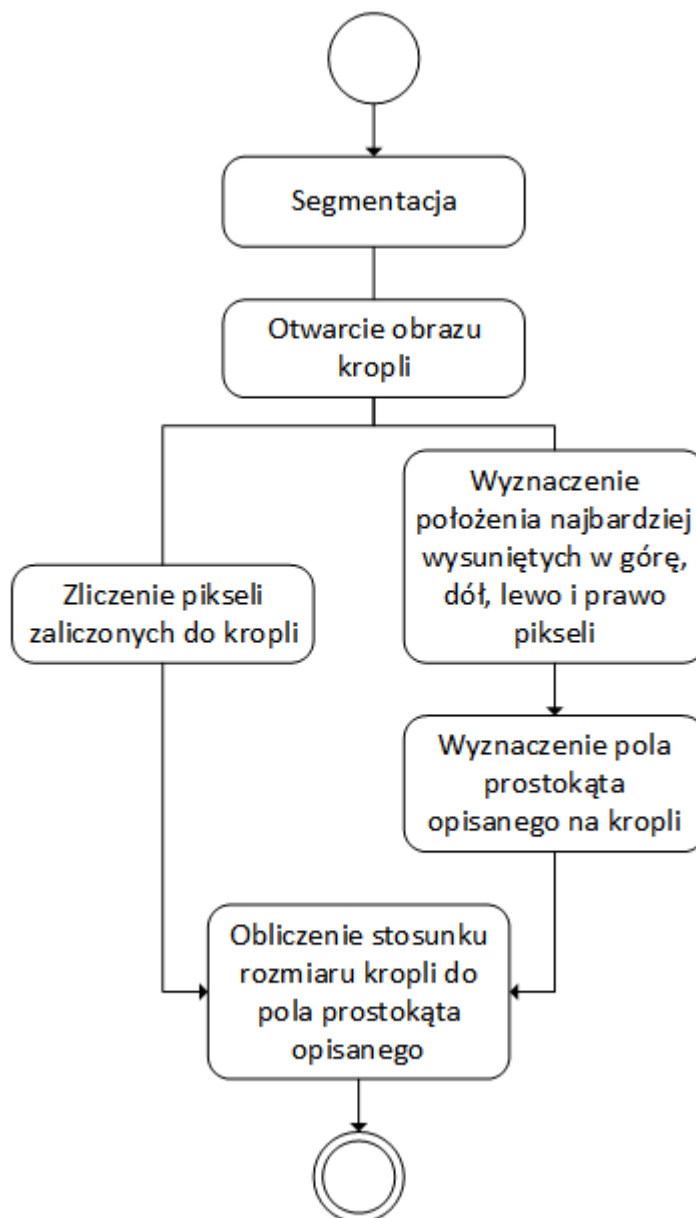
Roztopiony wsad szklany grawitacyjnie wycieka przez otwory, które formują strugi. Strugi te rozcinane są za pomocą specjalnych nożyc, będących częścią instalacji. Krople wsadu początkowo mają kształt zbliżony do walca. Wsad szklany ma charakter cieczy o stosunkowo dużej lepkości, więc choć podlega on prawom fizyki powodującym formowanie się klasycznego kształtu spadającej kropli, to procesy te zachodzą powoli i są obserwowalne w niewielkim stopniu dla prawidłowo wyprodukowanych kropli.

Dostanie się ciała obcego do wsadu szklanego może uniemożliwić prawidłowe rozcięcie strugi szkła. Przykładowym ciałem obcym może być kamień, fragment metalu o wysokiej temperaturze topnienia, słuczka ceramiki bądź też inny rodzaj szkła cechujący się podwyższoną temperaturą topnienia. Nieprawidłowo rozcięta kropla nie będzie przypominała prostokąta, a bardziej ciągnącą się kroplę jaką formują ciecze o dużej lepkości, na przykład miód. W takiej sytuacji prostokąt opisany na kropli będzie miał dużo większy rozmiar, a jego wypełnienie znacznie zmaleje.

Choć parametr wypełnienia prostokąta opisanego można wykorzystać do mierzenia ogólnej powtarzalności wytwarzania kropli roztopionego szkła, to jego głównym zastosowaniem jest identyfikacja poważnych zakłóceń w pracy maszyny. Na chwilę obecną można go wykorzystać do poszukiwań i identyfikacji kropli będącej bezpośrednią przyczyną zatrzymania części instalacji, jednakże w przyszłości w wypadku implementacji systemu wizyjnego pracującego w trybie on-line, będzie on wykorzystywany do wykrywania błędów grubych i sterowania odrzutnikiem w czasie rzeczywistym, tak aby nieprawidłowo wytworzone krople nie dostawały się do dalszych etapów procesu produkcyjnego i nie powodowały zatrzymania pracy fragmentu instalacji hutniczej.

3.2.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania

Schemat blokowy algorytmu obliczania zgodności wypełnienia prostokąta opisanego zamieszczono na rysunku 3.3. Algorytm ten jest bardziej rozbudowaną wersją algorytmu obliczającego zgodność rozmiaru kropli szkła, gdyż dodatkowo konieczne jest wyznaczenie prostokąta opisanego na kropli. Zastosowanie operacji morfologicznej otwarcia ma na celu usunięcie z obrazu kropli wody i oleju służących do chłodzenia i smarowania instalacji. Krople te przedstawiono na zdjęciach 5.7 i 5.16. Odbijają one światło kropli szkła i mogą zostać zakwalifikowane jako fragment kropli szkła znacząco pogarszając jakość otrzymanych wyników. W celu obliczenia zgodności wypełnienia prostokąta opisanego wyznaczane są najbardziej wysunięte punkty kropli. Na podstawie tych 4 punktów da się określić pozycję i rozmiar prostokąta opisanego na kropli. Wynikiem algorytmu jest liczba zmiennoprzecinkowa zawierająca się w przedziale $(0 : 1]$ określająca iloraz rozmiaru kropli do pola prostokąta opisanego na danej kropli. Liczbę tę można interpretować jako miarę podobieństwa nieregularnej kropli wsadu szklanego do idealnego prostokąta.



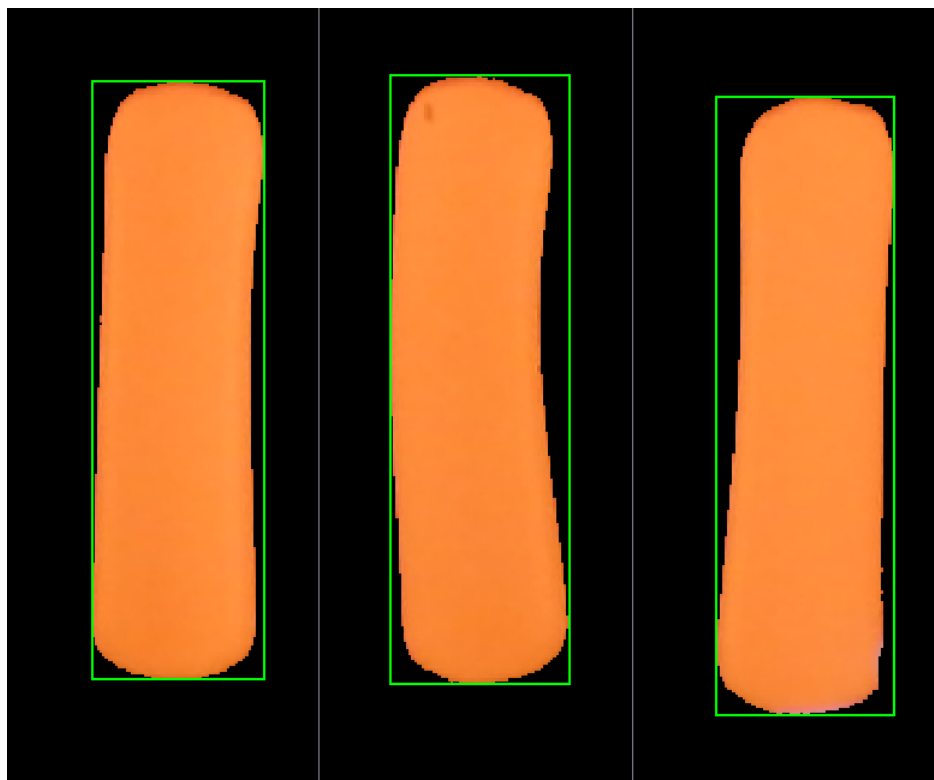
Rysunek 3.3: Schemat blokowy obliczania zgodności wypełnienia prostokąta opisanego

3.2.3. Przykład

Na rysunku 3.4 przedstawiono trzy przykładowe krople. Odpowiadające im wartości deskryptora zamieszczono w tabeli 3.4.

	Kropla lewa	Kropla środkowa	Kropla prawa
Wypełnienie prostokąta opisanego	0.892845	0.852103	0.849361

Tabela 3.2: Przykładowe wartości wypełnienia prostokąta opisanego



Rysunek 3.4: Wypełnienie prostokąta opisanego

3.3. Zakrzywienie bananowe

3.3.1. Motywacja

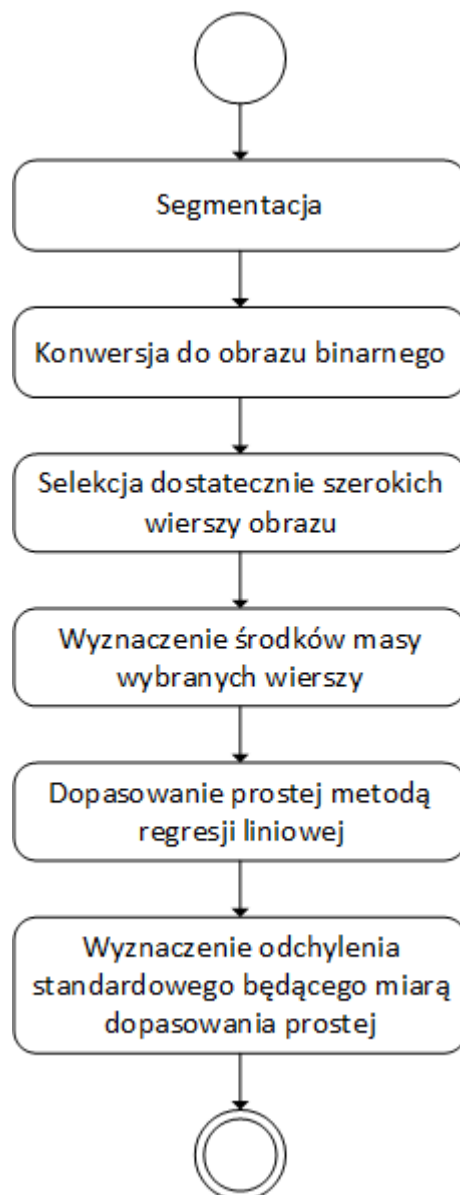
Charakterystycznym, choć niepożądanym zjawiskiem mającym miejsce w procesie dzielenia wsadu na krople, jest utrata symetrii kropeł. Krople wyginają się w określonym kierunku, przez co zaczynają przypominać banan - stąd nazwa tego deskryptora cechy charakterystycznej. Choć zakrzywienie kropeł może mieć wiele przyczyn, to jednak najczęściej jest ono spowodowane nierównomiernym rozkładem temperatury wsadu w piecu. Ponieważ lepkość szkła jest bardzo silnie związana z jego temperaturą, już nawet niewielkie jej różnice mogą powodować duże zmiany lepkości roztopionego szkła, które skutkują różnym tempem wyciekania wsadu przez otwory formujące strugę następnie rozcinaną na krople. Efekt ten można zaobserwować na zdjęciach spadających kropeł w formie charakterystycznego zakrzywienia.

Nierówny rozkład temperatury wsadu szklanego może mieć istotne negatywne skutki w dalszej części procesu produkcyjnego oraz niekorzystnie przekładać się na jakość gotowego produktu. Niejednorodność szkła w formie może utrudnić wydmuchiwanie opakowań, a nawet spowodować popełnienie wady podczas wychładzania lub w samej formie. W takim wypadku konieczne może okazać się częściowe wstrzymanie produkcji w dotkniętej części instalacji. Zmiany lepkości wywołane niejednorodnym rozkładem temperatury mogą również wpłynąć na trudności z prawidłowym odmierzaniem rozmiaru kropli. Wcześniejsze wykrycie tego niekorzystnego zjawiska pozwala operatorom na wprowadzenie odpowiednich korekt w nastawach i usunięcie przyczyn zanim spowodują one wystąpienie istotnych problemów.

3.3.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania

Schemat blokowy algorytmu obliczającego zakrzywienie bananowe przedstawiono na rysunku 3.5.

Tak jak w przypadku pozostałych algorytmów, pierwszym korkiem jest segmentacja, czyli rozróżnienie kropli od tła zdjęcia. Dalsze obliczenia przeprowadzane są dla obrazu binarnego, gdyż informacja



Rysunek 3.5: Schemat blokowy obliczania zakrzywienia bananowego

zawarta w kolorze i jasności każdego piksela nie ma wpływu na kształt całej kropli, a zatem konwersja nie powoduje utraty żadnych istotnych informacji.

Kolejnym etapem algorytmu jest wyznaczenie wierszy obrazu biorących udział w dalszych obliczeniach. Krok ten jest niezbędny, gdyż wiersze obrazu tworzące czubek i podstawę (górze i dół) kropli mogą być wyjątkowo nieregularne i niesymetryczne, przez co uwzględnienie ich mogłoby wprowadzić znaczne błędy w obliczeniach. Selekcja dostatecznie szerokich wierszy odbywa się na podstawie porównania szerokości danego wiersza ze średnią szerokością wiersza pomnożoną przez arbitralnie określony współczynnik. Jako wartość domyślną przyjęto 0.8, jednakże wartość tą można zmienić tak samo jak wiele innych parametrów obliczeniowych algorytmu. Dobór parametrów algorytmu został szerzej omówiony w sekcji 4.2.12.

Następny etap algorytmu to wyznaczenie środków masy wyselekcjonowanych w poprzednim kroku wierszy. Krok ten pozwala wyznaczyć ciąg punktów o współrzędnych (x, y) będącymi danymi wejściowymi algorytmu dopasowania prostej metodą regresji liniowej.

Do tak wybranego ciągu punktów następnie dopasowywana jest prosta i obliczane jest odchylenie standardowe będące miarą błędu dopasowania. Dużym atutem zastosowania dopasowywania prostej za-

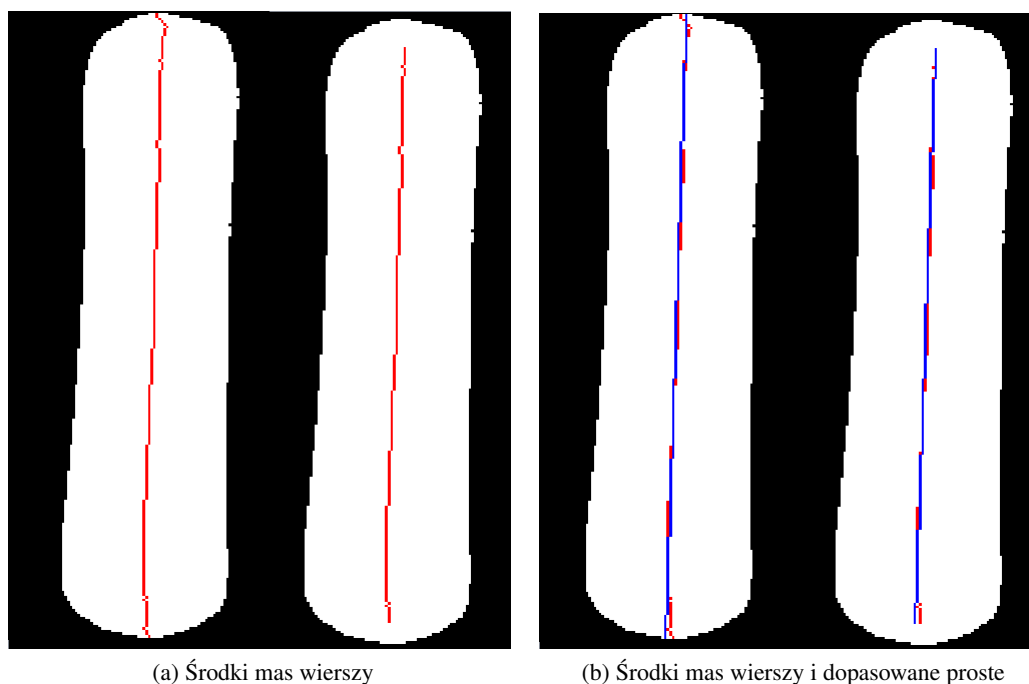
miast odchyłki od pionowej prostej przechodzącej przez środek masy kropli jest nieczułość na orientację kropli w przestrzeni, w szczególności na możliwe niewielkie odchylenie od pionu.

W przypadku idealnie symetrycznej kropli, przez ciąg punktów określających środki mas wierszy przechodziłaby dokładnie jedna prosta, będąca prostą symetrii a odchylenie standardowe byłoby równe zeru. Im większe zakrzywienie kropli, tym gorsza jej symetria i większy rozrzut środków mas wierszy, a co za tym idzie większa wartość odchylenia standardowego, które jest wartością wynikową algorytmu bardzo dobrze odzwierciedlającą zakrzywienie kropel.

3.3.3. Przykład

W tej sekcji zamieszczono dwa porównania. Pierwsze z nich ma na celu zilustrować istotę selekcji dostatecznie szerokich wierszy i jej wpływ na poprawność obliczeń i jakość wyników. Drugie porównanie przedstawia dwie krople, z których jedna jest wyraźnie zakrzywiona podczas gdy druga cechuje się prawie symetrycznym kształtem, wraz z wartościami odpowiadającego im parametru zakrzywienia bananowego.

Działanie algorytmu przedstawiono na rysunku 3.6 dla wyłączonej (krople lewe) i włączonej (krople prawe) funkcji selekcji dostatecznie szerokich wierszy obrazu na tej samej kropli szkła. W tabeli 3.3 zamieszczono wartości zakrzywienia bananowego dla obu nastaw parametrów algorytmu.

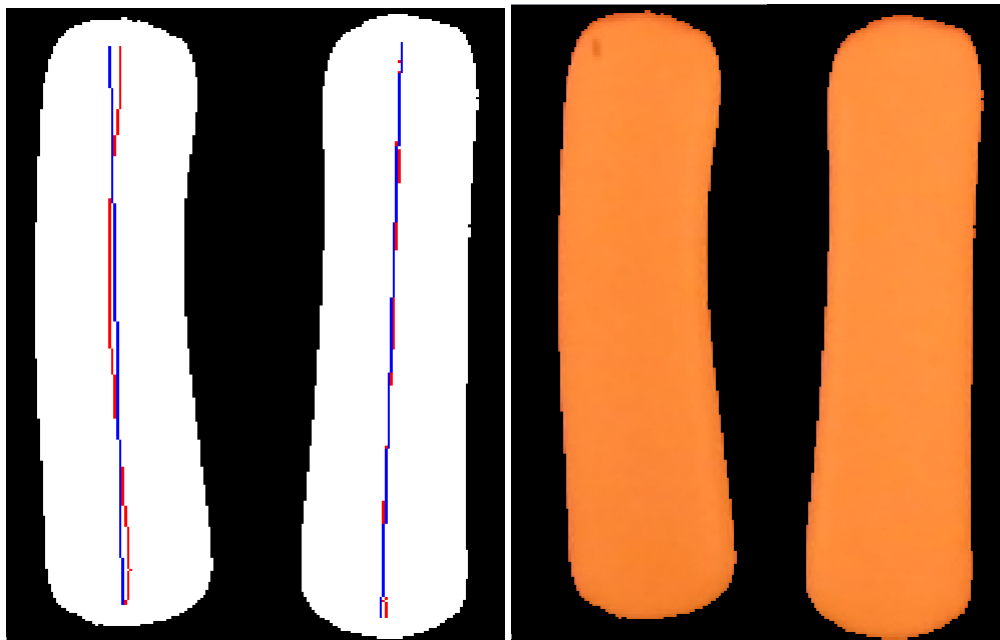


Rysunek 3.6: Selekcja dostatecznie szerokich wierszy obrazu

	Wyłączona selekcja dostatecznie szerokich wierszy, <i>Banana row width</i> = 0.0	Włączona selekcja dostatecznie szerokich wierszy, <i>Banana row width</i> = 0.9
Zakrzywienie bananowe	0.597043	0.450151

Tablica 3.3: Wpływ selekcji dostatecznie szerokich wierszy obrazu na wartość zakrzywienia bananowego

Rysunek 3.7 przedstawia dwie krople, z których jedna jest wyraźnie bardziej zakrzywiona niż druga. Odpowiadające im wartości parametru kropli zamieszczono w tabeli 3.4.



Rysunek 3.7: Zakrzywienie bananowe

	Kropla lewa	kropla prawa
Zakrzywienie bananowe	2.05846	0.450151

Tablica 3.4: Przykładowe wartości zakrzywienia bananowego

3.4. Równomierność jasności świecenia

3.4.1. Motywacja

Roztopione szkło świeci światłem własnym będącym wynikiem emisji promieniowania, dlatego właśnie na podstawie analizy jasności kropli można wywnioskować wiele interesujących informacji. Choć teoretycznie możliwe jest również wyznaczenie absolutnej temperatury na podstawie barwy obiektu, to jednak nie zdecydowano się tutaj na takie rozwiązanie z uwagi na konieczność posiadania kolorowego obrazu, jak i dysponowania aparatem fotograficznym o konkretnych właściwościach matrycy i procesora graficznego, aby nie dochodziło do przekłamania barw [15]. Zdecydowanie bardziej niezależną od użytej aparatury metodą jest wykrywanie różnic w jasności i dalsze wnioskowanie na tej podstawie. Na zdjęciach kropli można zaobserwować pewne obszary cechujące się nieco inną jasnością lub nasyceniem niż reszta obrazu. Różnice te mogą wynikać z różnych powodów, lecz jako najważniejsze można wymienić:

- Nierówny rozkład temperatury wsadu szklanego w piecu

Negatywne konsekwencje tego zjawiska zostały przybliżone w sekcji 3.3.1. Ponieważ krople szkła świecą światłem własnym, którego moc zależy od temperatury, na podstawie jasności lub barwy można monitorować rozkład temperatury w ramach danej kropli szkła.

- Obecności ciał obcych w kropli szkła

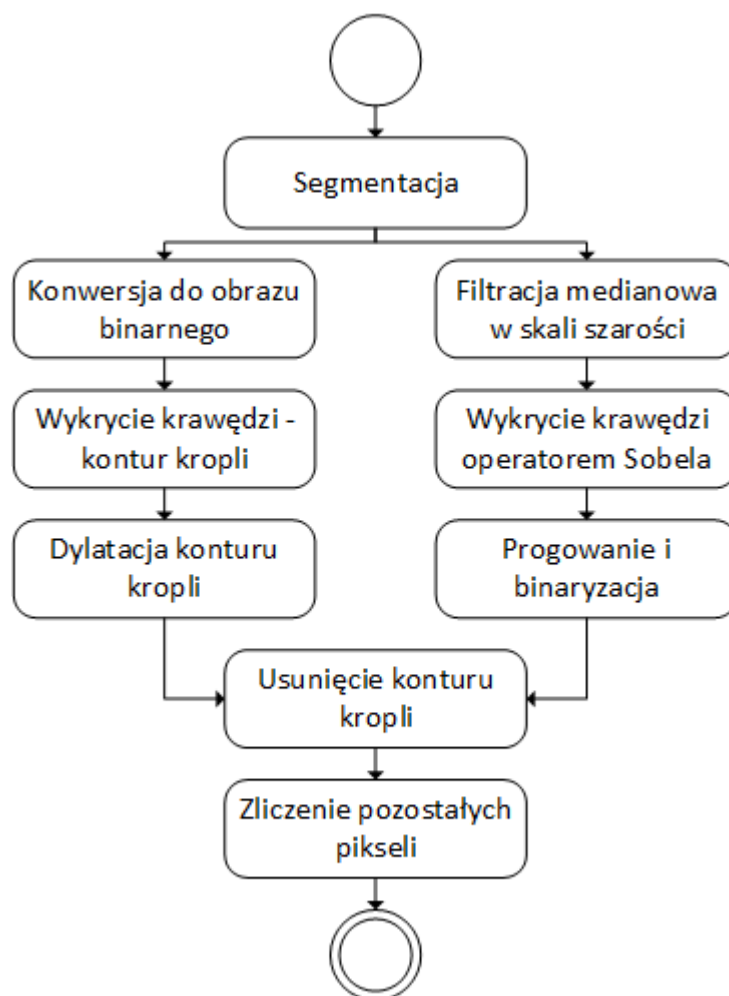
Ilość emitowanego promieniowania zależy zarówno od temperatury obiektu, jak i od jego właściwości fizykochemicznych. Ciała cechujące się różną emisyjnością pomimo tej samej temperatury będą świeciły nieco inaczej niż reszta kropli. Warto również wspomnieć, że metoda ta może być wykorzystana do wykrywania nierównomiernego rozmieszczenia roztopionego wsadu w piecu, które może prowadzić do lokalnych różnic w składzie chemicznym szkła.

Wyznaczenie obecności i wielkości obszarów kropli o zmienionej jasności może być bardzo pomocne w wykrywaniu wyżej wymienionych niekorzystnych zjawisk.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że ponieważ kropla szkła ma w przybliżeniu kształt walca, na jej rzucie głównym w okolicach krawędzi obrazu w rzeczywistości obserwujemy emisję świetlną z mniejszej objętości szkła. Dodatkowo, krawędzie kropli najszybciej stygną oddając ciepło do powietrza, w którym porusza się kropla. Oba te zjawiska powodują, że krawędzie obrazu kropli zawsze cechują się inną jasnością świecenia niż jej wnętrze i przez to nie mogą być brane pod uwagę podczas obliczania równomierności jasności świecenia.

3.4.2. Parametr kropli i algorytm jego obliczania

Na rysunku 4.7 przedstawiono schemat blokowy algorytmu obliczającego parametr równomierności jasności świecenia. Schemat algorytmu rozdziela się na dwie gałęzie, w których obliczane są niezależne fragmenty algorytmu. W lewej gałęzi algorytmu obliczany jest kontur kropli, a w prawej dochodzi do wykrycia krawędzi zarówno kropli, jak i krawędzi obszarów kropli różniących się jasnością.



Rysunek 3.8: Schemat blokowy algorytmu obliczania równomierności jasności świecenia

Tak jak w przypadku pozostałych algorytmów służących do obliczania wartości deskryptorów cech charakterystycznych, pierwszym krokiem jest segmentacja mająca na celu rozróżnienie kropli szkła od tła obrazu.

Kolejne etapy obliczania wartości równomierności jasności świecenia można podzielić na dwie oddzielne części. W jednej z nich dochodzi do faktycznego rozpoznania obszarów o zmienionej jasności, podczas gdy w drugiej przygotowana jest maska, która użyta będzie do eliminacji otoczenia krawędzi kropli podczas finalnego etapu obliczeń.

Maska ta uzyskiwana jest poprzez wykrycie krawędzi metodą Sobela na binarnym obrazie kropli. Wynikiem tej operacji jest cienki kontur kropli. Za pomocą operacji morfologicznej dylatacji, kontur ten jest powiększany tak, aby był w stanie zakryć cały obszar wzdłuż krawędzi kropli. Rozmiar jądra przekształcenia dylatacji określony jest jako *Smoothness kernel*, jeden z parametrów obliczeniowych określanych przez użytkownika szerzej opisanych w sekcji 4.2.12.

Wykrycie obszarów o zmienionej jasności jest zagadnieniem nieco bardziej skomplikowanym. W pierwszym kroku obraz konwertowany jest do obrazu w skali szarości, a następnie aplikowana jest filtracja medianowa o jądrze przekształcenia k , opisanym równaniem 3.1.

Filtr ten pozwala usunąć zdecydowaną większość szumów wynikający z pracy matrycy w aparacie cyfrowym jednocześnie nie rozmywając niezbędnych w dalszych etapach obliczeń krawędzi. Filtracja medianowa została szerzej omówiona w sekcji 2.2.1.

$$k = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Na obrazie pozbawionym szumów matrycy następnie przeprowadzane jest wykrycie krawędzi metodą Sobela opisaną w sekcji 2.3.1. Tak powstały obraz następnie jest progowany, aby otrzymać obraz binarny. Próg, powyżej którego uznawane jest pozytywne wykrycie obszaru o zmienionej jasności dobierany jest przez użytkownika i określony jako parametr obliczeniowy *Smoothness threshold*.

Ostatni etap obliczeń składa się z usunięcia z powstałego obrazu krawędzi kropli za pomocą uprzednio przygotowanej maski oraz zliczenia pozostałych na obrazie pikseli. Wartość ta określa ilościowo długość obwodu obszarów znajdujących się wewnątrz kropli o zmienionej w stosunku do reszty kropli jasności świecenia.

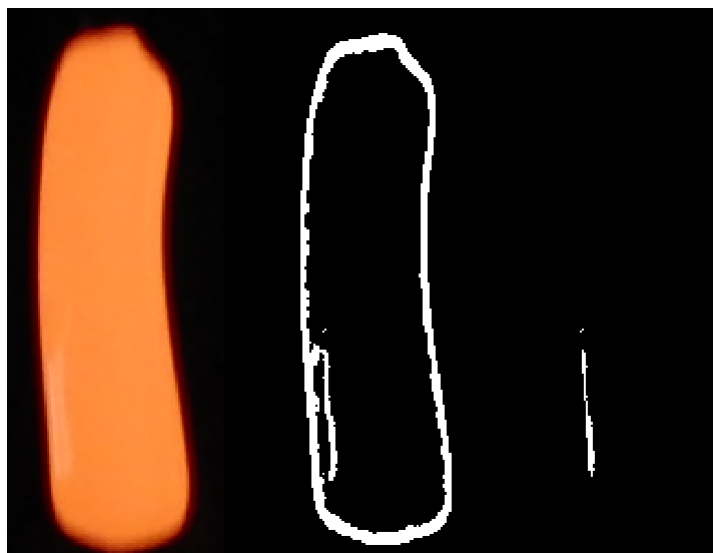
3.4.3. Przykład

Na rysunku 3.9 zamieszczono przykładowe krople o niezerowym parametrze równomierności jasności świecenia. W lewej części każdego z obrazów zamieszczono oryginalne zdjęcie kropli. W środkowej części zamieszczono binarny obraz kropli po wykryciu krawędzi i obszarów o zmienionej jasności, a w prawej części zamieszczono ten sam obraz z usuniętym konturem kropli i jego otoczeniem. W tabeli 3.5 zamieszczono wartości omawianego deskryptora dla przedstawionych kropli.

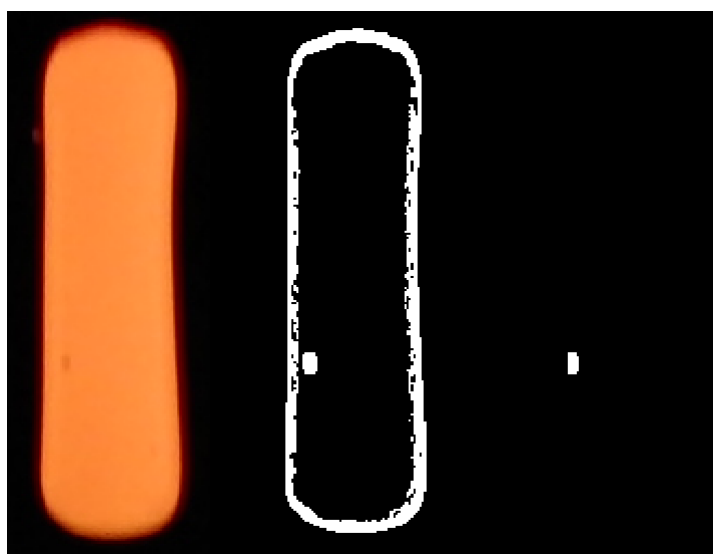
Krople zostały wybrane tak, aby jedna z nich zawierała obszar o większej jasności od reszty kropli (kropla 1, rysunek a), a druga - ciemniejszy (kropla 2, rysunek b)

	Kropla 1	Kropla 2
Równomierność jasności świecenia	110	47

Tablica 3.5: Przykładowe wartości równomierności jasności świecenia



(a) Kropla 1 - obszar jaśniejszy



(b) Kropla 2 - obszar ciemniejszy

Rysunek 3.9: Równomierność jasności świecenia

3.5. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale 3 omówiono proponowane deskryptory cech charakterystycznych mających odzwierciedlać istotne z punktu widzenia procesu produkcyjnego parametry kropli roztopionego wsadu szklanego. Każdy z proponowanych wskaźników jakości nastawiony jest na mierzenie i określanie wymiaru konkretnej cechy kropli, mającej interpretację fizyczną. Zaproponowano cztery deskryptory mające opisywać pewne cechy procesu produkcyjnego, takie jak:

- Powtarzalność rozmiaru i objętości kropel
- Regularność kształtu kropli
- Równomierność rozkładu temperatury wsadu w piecu
- Obecność ciał obcych we wsadzie

Określane są one poprzez ich unikalne oddziaływania na wygląd grawitacyjnie spadającej kropli szkła.

Rozdział 3 w pierwszej kolejności skupia się na przybliżeniu podstaw teoretycznych, a w szczególność przesłanek wynikających z praktyki przemysłowej, stosowanych do określania konkretnych parametrów kropli. Parametry te są względne i bezwymiarowe z uwagi na fakt, iż zostały one zaprojektowane tak aby mierzyć subtelną informację zawartą w szczegółach obrazu kropli. Z tego powodu próby nadania im wymiernych wartości w jednostkach absolutnych obarczone byłyby dużym błędem i nie wniosłyby dodatkowych istotnych informacji. Schemat blokowy każdego z algorytmów obliczających wartości cech charakterystycznych wraz z komentarzem ma na celu przybliżyć konkretną implementację zastosowanych technik przetwarzania obrazu. Opis każdego z deskryptorów cechy charakterystycznej zakończony jest krótkim przykładem przedstawiającym obraz kropli, który eksponuje mierzoną cechę wraz z wartością wskaźnika jakości.

Interfejs użytkownika pozwalający wykorzystać omówione metody mierzenia parametrów kropli szkła zamieszczono w rozdziale 4. Analizę praktyczną wraz z wyszczególnieniem zalet i wad każdego z deskryptorów zamieszono w rozdziale 5 poświęconym testom aplikacji.

4. Aplikacja

W niniejszym rozdziale zostaną omówione najważniejsze cechy i możliwości stworzonej aplikacji. Program ten pisany był zarówno pod kątem możliwie dużej elastyczności, zwłaszcza jeżeli chodzi o jakość i rozmiar zdjęć będących danymi wejściowymi, jak i wygodę użytkownika niezbędną do praktycznego użytkowania. Ma on stanowić formę narzędzia, które pozwoli dokonać analizy pracy aplikacji na podstawie zdjęć, a następnie zaprezentować użytkownikowi wyniki i umożliwić mu ich dalszą obróbkę bądź archiwizację.

Skonstruowany program ma formę aplikacji okienkowej działającej pod systemem operacyjnym Windows. Kod źródłowy napisano w języku C++ [3, 8]. Graficzny interfejs użytkownika oparty jest o framework Qt - rozbudowany projekt dostarczający narzędzi do tworzenia interfejsów graficznych na różnych platformach [19]. Biblioteka Qt dostarcza również klasy bazowe i interfejsy pozwalające na wygodne rozwiązanie typowych problemów związanych z tworzeniem aplikacji, takich jak m. in. wielowątkowość. Istotną zaletą projektu Qt jest fakt, iż jest on dostarczany na licencji GPL do użytku niekomercyjnego.

Implementacja zastosowanych w aplikacji techniki przetwarzania obrazu dostarczana jest przez bibliotekę OpenCV [6]. Jest to otwarty i nieustannie rozwijany projekt dostarczający algorytmów o zróżnicowanym stopniu złożoności i specjalizacji niezbędnych do tworzenia aplikacji przetwarzających obraz i komputerowych systemów wizyjnych.

4.1. Graficzny interfejs użytkownika

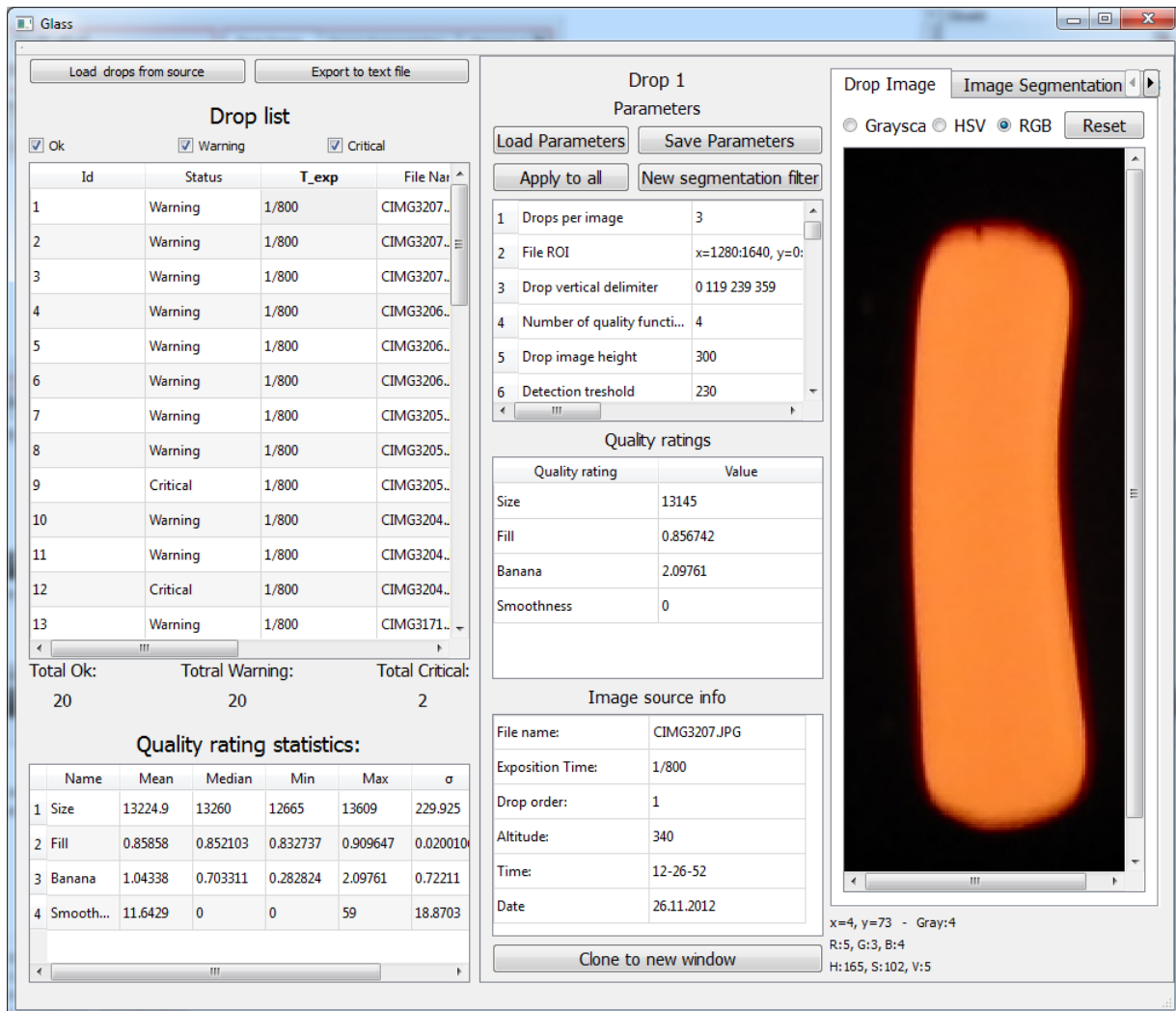
Zaprojektowany interfejs użytkownika składa się z dwóch części. Lewa część okna aplikacji umożliwia sterowanie zbiorem przeglądanych danych. Pozwala ona na przeglądanie listy obrabianych kropeł szkła oraz podgląd zbiorczych danych statystycznych. Dostępny jest również przycisk służący do wczytywania zdjęć kropeł oraz przycisk służący do eksportu danych wyjściowych do pliku tekstowego.

Prawa strona okienka pozwala na podgląd wszystkich danych dotyczących konkretnej kropli. Znajduje się w niej podgląd obrazu kropli oraz kilka zakładek poświęconych obrazom ilustrującym sposób wyliczania parametrów kropli. Dodatkowo umieszczono informacje i kontrolki sterujące wartościami parametrów algorytmu przetwarzania obrazu wykorzystanych podczas obliczeń wskaźników opisujących cechy danej kropli. W dolnej części zamieszczona jest tabelka przedstawiająca dane na temat pliku źródłowego oraz rozmieszczenia kropli na danym zdjęciu.

W dalszej części niniejszego rozdziału omówione zostaną funkcjonalności dostarczane przez zaprojektowaną aplikację. Ponieważ dostęp do znakomitej większości z dostarczonych funkcji odbywa się poprzez graficzny interfejs użytkownika, jego szczegółowy opis zostanie w tej sekcji pominięty. Działanie aplikacji zostanie zaprezentowane na zasadzie opisu fragmentu interfejsu dostarczającego konkretną funkcjonalność, gdyż taka metoda tworzenia dokumentacji najbardziej obrazowo przedstawia sposób działania i możliwości programu jednocześnie pomijając wiele szczegółów mogących niepotrzebnie zdominować przedstawiony opis.

Projekt okna aplikacji został stworzony za pomocą formularzy Qt z wykorzystaniem Qt Creator'a - zintegrowanego środowiska deweloperskiego dostarczanego wraz z frameworkiem Qt. Środowisko to nastawione jest właśnie na tworzenie aplikacji okienkowych w środowisku Windows lub Linux, w zależności od wersji. Dostarczony wraz z pakietem Qt Creator program Qt Designer umożliwia projek-

towanie interfejsu metodą „przeciągnij i upuść” zgodnie z ideą WYSIWYG. Drugim istotnym atutem Qt Designer’a jest obecność wygodnych menu kontekstowych pozwalających w łatwy sposób utworzyć powiązania między kontrolkami graficznego interfejsu użytkownika a kodem źródłowym aplikacji realizującym faktyczną funkcjonalność, na przykład wczytywanie plików.



Rysunek 4.1: Graficzny interfejs użytkownika

4.2. Dostarczone funkcjonalności opisane na zasadzie przypadków użycia

Stworzony program ma charakter prototypu i nie jest przeznaczony do sterowania faktycznym procesem produkcyjnym. Ponieważ głównym celem stworzonego programu jest umożliwienie wygodnego zaprojektowania i przetestowania algorytmów obliczania proponowanych deskryptorów charakterystycznych cech kropli szkła, najważniejsze funkcje aplikacji to:

- Wczytanie danych źródłowych
- Automatyczna segmentacja kropli szkła
- Wyznaczenie wartości wskaźników opisujących charakterystykę kropli
- Zebranie danych statystycznych dotyczących wartości wskaźników

- Eksport danych wynikowych

Aby umożliwić dokonanie wyżej wymienionych operacji w wygodny i zrozumiały sposób, a także zwiększyć elastyczność i przydatność programu, aplikacja dodatkowo zapewnia:

- Podgląd danych na temat pliku źródłowego
- Podgląd i edycję parametrów algorytmów obliczeniowych
- Uzależnienie wartości parametrów od właściwości danych wejściowych. Cecha ta jest szczególnie przydatna w przypadku segmentacji obrazów pochodzących ze zdjęć o różnych poziomach jasności.
- Podgląd i odczyt nieobrobionych danych źródłowych
- Podgląd obrazów zawierających istotne informacje na temat działania algorytmów obliczających wartości parametrów kropeł
- Łatwość porównywania otrzymywanych wyników w zależności od danych wejściowych i wartości parametrów

4.2.1. Wczytywanie danych źródłowych

Danymi źródłowymi aplikacji są zdjęcia przedstawiające spadające krople szkła. Szczegółową dyskusję na temat formatu i wpływu charakteru danych wejściowych na otrzymywane wyniki przeprowadzono w sekcji 5.1.

Aby wczytać zdjęcia kropeł, należy nacisnąć przycisk „Load drops from source” opisany czerwoną cyfrą „1” na rysunku 4.2. Spowoduje to otwarcie standardowego okienka systemowego służącego do wyboru otwieranego pliku. Szczególnie praktyczną własnością jest możliwość jednoczesnej selekcji wielu plików, na przykład całej zawartości folderu, co znacząco ułatwia wczytywanie większych ilości danych. Domyślnie ustawiony filtr powoduje, iż do wyświetlania do wyboru są jedynie pliki graficzne z rozszerzeniem „*.png”, „*.xpn” lub „*.jpg”.

Potwierdzenie wyboru powoduje wczytanie danych. Na wybranych obrazach rozpoznane zostaną krople nadające się do dalszej analizy, to znaczy nie uwzględnione zostaną krople, które nie zmieściły się całkowicie w wybranym obszarze zdjęcia. Rozpoznane krople po obliczeniu wartości deskryptorów cech charakterystycznych zostaną dodane do listy wszystkich dostępnych kropli. Jako ostatnie aktualizacji ulegną statystyki parametrów kropeł szkła.

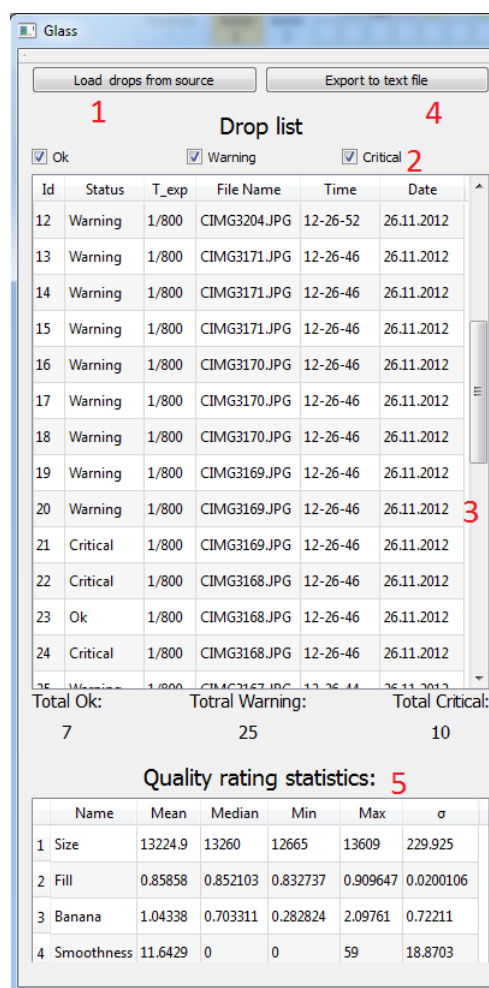
4.2.2. Filtrowanie listy kropeł po statusie

Dla wszystkich kropeł wprowadzono trzy możliwe statusy:

- „Ok”
- „Warning”
- „Critical”

Określają one czy wartości parametrów kropeł mieszczą się w arbitralnie założonym przedziale. Krople cechujące się prawidłowymi wartościami deskryptorów cech charakterystycznych otrzymują status „Ok”, podczas gdy krople odbiegające od normy uzyskują status „Warning”, lub w przypadku dużej odchyłki status „Critical”. Wartości progowe określające normy wartości parametrów charakterystycznych kropli dobierane są arbitralnie na podstawie ekspertyzy operatora. .

Aby na liście kropeł ukazały się krople o żądanym statusie, należy zaznaczyć bądź odznaczyć odpowiednie kratki opisane na rysunku 4.2 czerwoną cyfrą „2”.



Rysunek 4.2: Lewa część graficznego interfejsu użytkownika

4.2.3. Otwarcie podglądu wybranej kropli

Tabela przedstawiająca listę kropli pozwala w wygodny sposób odczytać część atrybutów pliku źródłowego, takich jak np. czas ekspozycji, data i czas utworzenia czy w końcu oryginalną nazwę pliku wygenerowaną przez aparat. Najważniejszą rolą listy kropli bez wątpienia jest uruchamianie szczegółowego podglądu kropli, udostępniającego wiele istotnych funkcji. Szczegółowy opis prawej części graficznego interfejsu użytkownika zawierającego podgląd kropli znajduje się w sekcji 4.2.6.

Aby otworzyć podgląd konkretnej kropli, należy wybrać dowolną część wiersza odpowiadającego danej kropli w tabeli zawierającej listę kropli, oznaczonej na rysunku 4.2 czerwoną cyfrą „3”. Aby wybrać podgląd innej kropli, wystarczy zmienić zaznaczony wiersz za pomocą myszki bądź też strzałek klawiatury.

4.2.4. Eksport wyników do pliku tekstowego

Możliwość dalszej obróbki i archiwizacji wyników zapewnia eksport otrzymanych wyników w formie pliku tekstowego. Początek wygenerowanego pliku zawiera wiersz nagłówkowy z opisem kolejnych kolumn oraz jeden pusty wiersz. Kolejne wiersze zawierają dane liczbowe w kolejności zgodnej z opisem w nagłówku. W ramach wiersza dane rozdzielone są tabulatorami. Regularny format pliku ułatwia jego parsowanie i import do zewnętrznych programów, na przykład arkuszy kalkulacyjnych lub też własnych skryptów służących do analizy danych liczbowych.

Aby wyeksportować otrzymane wyniki w formie pliku tekstowego, należy nacisnąć przycisk oznaczony na rysunku 4.2 przycisk opisany czerwoną cyfrą „4”. Spowoduje to otwarcie standardowego sys-

temowego okienka służącego do wyboru położenia i nazwy pliku do zapisu. Po wprowadzeniu żądanej nazwy i zatwierdzeniu wyboru nastąpi generacja pliku tekstowego.

4.2.5. Przegląd zbiorczych danych statystycznych

Tabela opisana czerwoną cyfrą „5” zamieszczona w lewej dolnej części graficznego interfejsu użytkownika zawiera najistotniejsze dane statystyczne na temat wszystkich obliczonych wartości deskryptorów cech charakterystycznych kropeł. Podczas gdy wiersze odpowiadają kolejnym parametrom kropeł, kolumny zawierają kolejno:

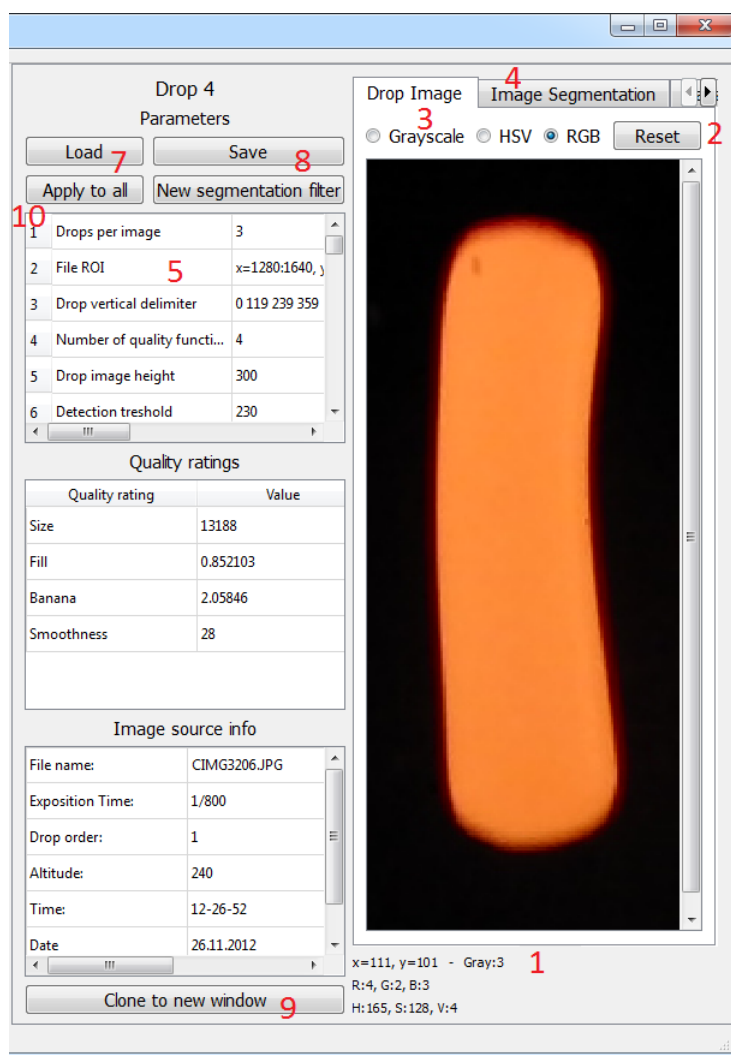
- Nazwę parametru kropli
- Wartość średnią
- Medianę
- Wartość minimalną
- Wartość maksymalną
- Odchylenie standardowe

4.2.6. Podgląd zdjęcia kropli

Otwarcie podglądu wybranej kropli opisane w sekcji 4.2.3 uruchamia prawą część graficznego interfejsu użytkownika przedstawioną na rysunku 4.3. Pierwszym rzucającym się w oczy elementem podglądu kropli jest jej zdjęcie, oznaczone na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą „1”. Podgląd zdjęcia kropli został uzupełniony interfejsem pozwalającym na:

- Powiększanie i pomniejszanie obrazu za pomocą rolki myszy. Pozycja kursora wyznacza jądro przekształcenia, to znaczy że piksel znajdujący się pod kursorem nie przesuwają się na skutek zmiany rozmiaru obrazu.
- Podgląd wartości numerycznych piksela pod kursorem poniżej obrazu kropli. Wyświetlane informacje to:
 - Położenie względne, liczone od lewego górnego rogu obrazu
 - Jasność, czyli wartość piksela w skali szarości (zakres 0-255)
 - Wartości składowych koloru wyrażone w przestrzeni barw RGB (zakres 0-255)
 - Wartości składowych koloru wyrażone w przestrzeni barw HSV (zakres 0-255)

Kliknięcie lewego przycisku myszy przełącza blokadę podglądu wartości numerycznych. W ten sposób można zamrozić je tak, aby pokazywały wartość wybranego piksela i uniknąć przypadkowych przesunięć myszką.



Rysunek 4.3: Prawa część graficznego interfejsu użytkownika

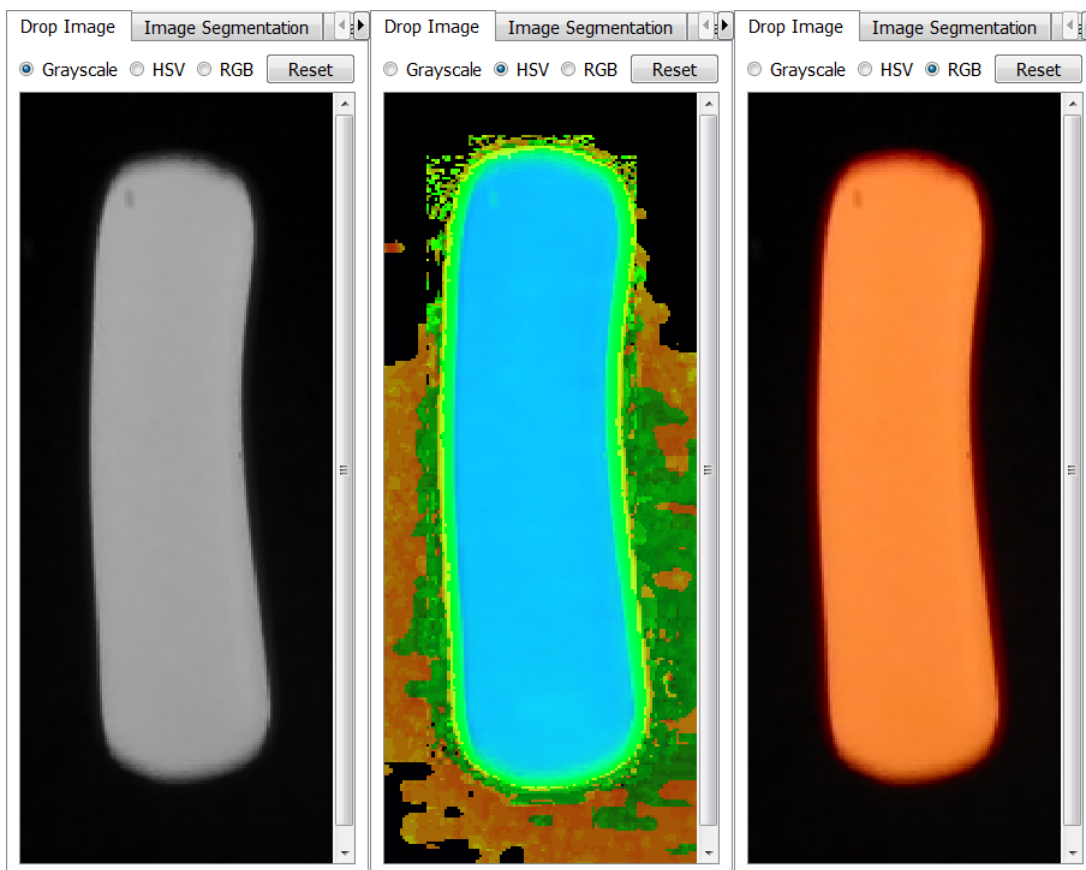
4.2.7. Resetowanie obrazu kropli

Istnieje możliwość ustawienia podstawowego widoku kropli, to znaczy ustawienia reprezentacji w przestrzeni barw RGB i domyślnego powiększenia ukazującego cały obraz kropli. Resetowanie obrazu kropli następuje po naciśnięciu przycisku opisanego na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą „2”

4.2.8. Podgląd obrazu kropli szkła w alternatywnych przestrzeniach barw

Możliwy jest również podgląd obrazu kropli w odcieniach szarości oraz przestrzeni barw HSV, której odpowiednie składowe reprezentowane są w przestrzeni barw RGB. Na takim obrazie kolor czerwony odpowiada odcieniowi (hue), kolor zielony nasyceniu (saturation), a niebieski - wartości (value). Taki sposób przedstawienia obrazu pozwala uwidocznić niektóre szczegóły i może okazać się pomocny przy dobieraniu wartości filtrów służących do segmentacji obrazu. Rysunek 4.4 przedstawia obraz kropli reprezentowany w wyżej wymienionych przestrzeniach barw.

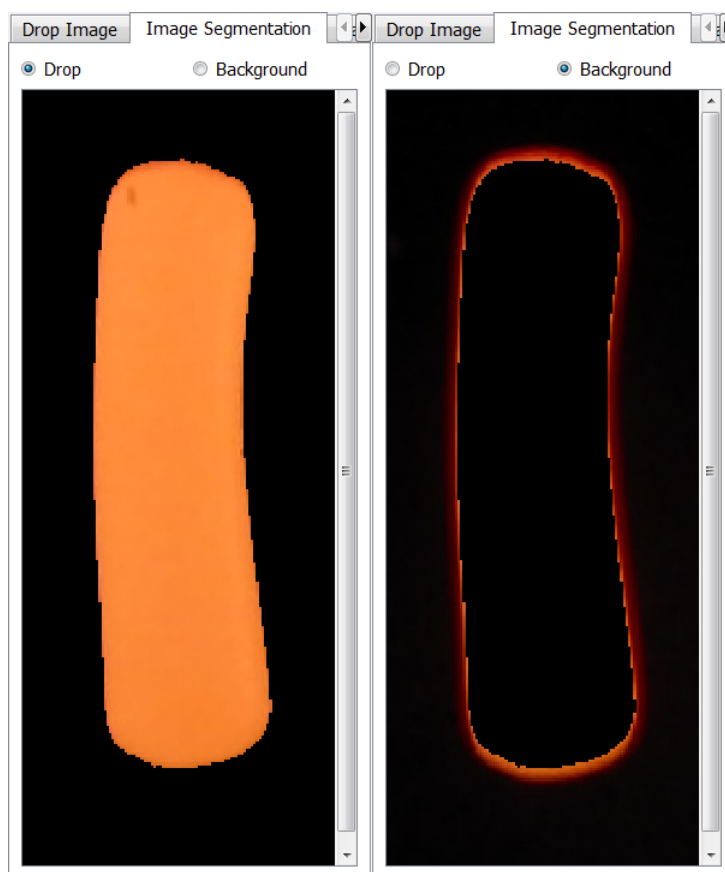
Aby przełączyć przestrzeń barw, w której wyświetlany jest obraz kropli szkła, należy zaznaczyć jedno z odpowiednich pól opisanych na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą „3”.



Rysunek 4.4: Reprezentacja obrazu kropli w odcieniach szarości oraz przestrzeniach barw HSV i RGB

4.2.9. Podgląd segmentacji

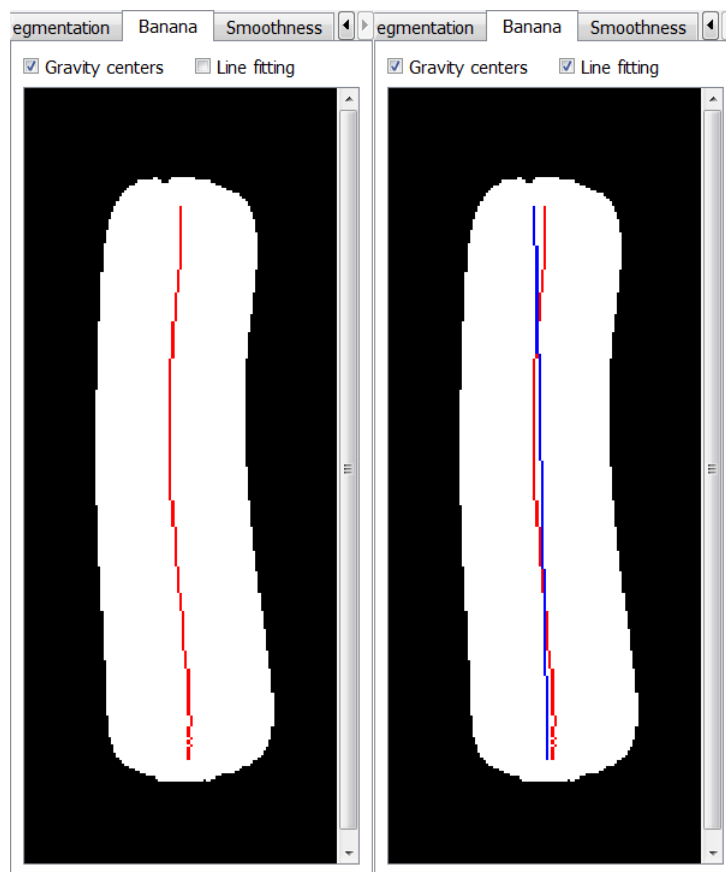
Powyżej zdjęcia kropli (rysunek 4.3, czerwona cyfra „4”) umieszczono kilka zakładek zawierających obrazy, które mogą posłużyć do analizy i sprawdzenia poprawności działania zastosowanych algorytmów przetwarzania obrazu. Pierwszą zakładką zawiera sam obraz kropli, podczas gdy druga przedstawia działanie algorytmu segmentacji i może posłużyć do weryfikacji i ewentualnej korekty wartości progowych. Wygląd omawianej zakładki przedstawiono na rysunku 4.5. Zakładka ta posiada przełącznik odpowiedzialny za wybór między widokiem kropli, czyli tych pikseli, które zostały zakwalifikowane jako część kropli, a widokiem tła.



Rysunek 4.5: Podgląd segmentacji obrazu

4.2.10. Podgląd analizy zakrzywienia kropli

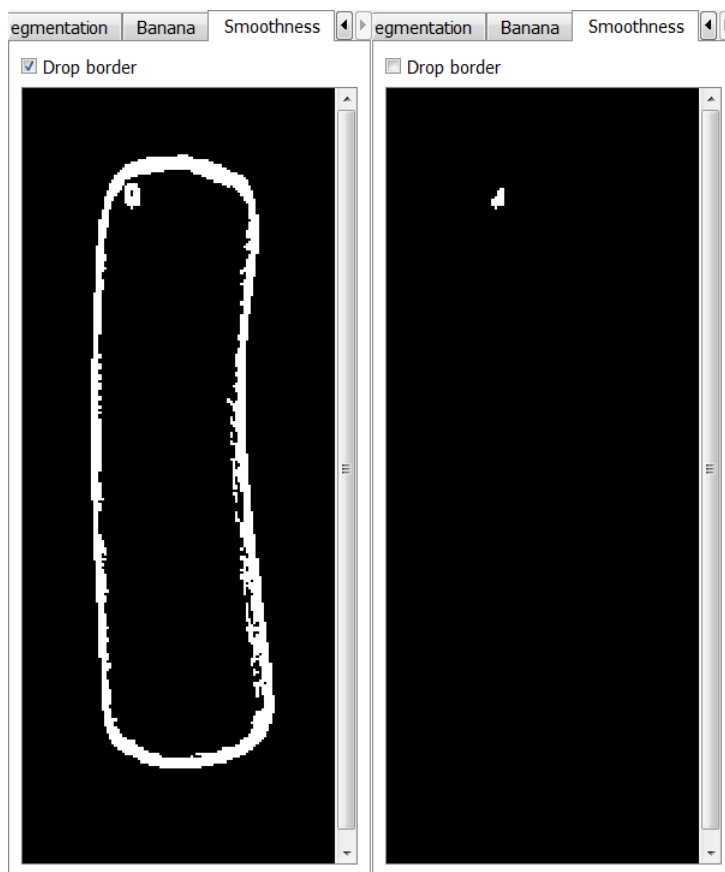
Kolejna z zakładek opisanych na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą „4” służy do wyświetlania obrazu, który powstaje podczas obliczeń zakrzywienia bananowego - jednego ze zdefiniowanych parametrów kropli. Zakrzywienie bananowe szerzej omówiono w sekcji 3.3. Przedstawiony obraz kropli jest czarno-biały, gdyż informacja zawarta w kolorze kropli nie jest brana pod uwagę podczas obliczeń tego deskryptora cech charakterystycznych. Zakładka ta została wyposażona w dwa przełączniki umożliwiające niezależne włączenie podglądu rozkładu środków ciężkości wierszy kropli wziętych pod uwagę podczas obliczeń (czerwona krzywa) oraz prostą dopasowaną metodą regresji liniowej (niebieski odcinek). Widok analizy zakrzywienia kropli przedstawiono na rysunku 4.6.



Rysunek 4.6: Podgląd zakrzywienia bananowego

4.2.11. Podgląd analizy równomierności świecenia kropli

Ostatnia z zakładek oznaczonych czerwoną cyfrą „4” na rysunku 4.3 służy do podglądu równomierności jasności świecenia kropli. Parametr ten szerzej omówiono w sekcji 3.4. Podobnie jak w przypadku analizy zakrzywienia kropli, źródłowy obraz obliczeń jest czarno-biały. Zakładkę wyposażono w przełącznik służący do włączenia bądź wyłączenia widoku krawędzi kropli. Informacja ta może okazać się szczególnie przydatna podczas doboru rozmiaru jądra przekształceń morfologicznych, których celem jest usunięcie krawędzi kropli, dokonywanych podczas obliczeń. Widok omawianej zakładki przedstawiono na rysunku 4.7.



Rysunek 4.7: Podgląd równomierności świecenia kropli

4.2.12. Edycja parametrów algorytmu

Istotnym założeniem gwarantującym poprawność działania aplikacji jest dobór parametrów wykorzystywanych podczas obliczeń. W systemach wizyjnych, w tym również w stworzonej aplikacji, istnieje bardzo duża dowolność wyboru takich wartości przy jednoczesnym braku ścisłych reguł. Ostatecznie, bardzo często najlepszym lub jedynym sposobem kalibracji działania programu jest eksperymentalne dobranie wartości metodą prób i błędów popartą intuicją i doświadczeniem operatora.

Program może pracować dla różnych danych wejściowych, to znaczy zdjęć, które choć przedstawiają podobny obiekt znacznie różnią się szczegółami, na przykład jasnością. Podczas tworzenia programu nie ma możliwości dokładnie przewidzieć jakie wartości atrybutów będą najlepsze dla wszelkich zestawów danych źródłowych, przez co aktualizacja niektórych parametrów może okazać się niezbędna podczas pracy.

Powyższe stwierdzenia uświadamiają potrzebę istnienia wygodnego i elastycznego interfejsu umożliwiającego edycję parametrów, jak również możliwość zachowania poprawnie dopasowanego zestawu wartości. Interfejs ten dostarczono w formie edytowalnej tabeli opisanej na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą

„5”. Tabela ta zawiera trzy kolumny: nazwę parametru, wartość oraz opis mający ułatwić zrozumienie znaczenia danego parametru. Przejście do trybu edycji parametrów odbywa się poprzez dwukrotne kliknięcie danego pola, lub poprzez zaznaczenie pola i naciśnięcie przycisku „F2”. Odświeżenie wyników następuje automatycznie po wprowadzeniu zmian dla większości parametrów, jednakże zmiana niektórych wymaga restartu aplikacji. Zmiana parametrów wpływa jedynie na obliczenia przeprowadzane dla obecnie podglądanej kropli, przez co można dowolnie eksperymentować z wartościami parametrów bez obawy o wcześniej otrzymane wyniki. Zmiana parametrów odpowiedzialnych za wczytywanie obrazów, takich jak ilość kropli na zdjęciu, region poszukiwań (*Region of Interest*) kropeł na zdjęciu czy też położenie linii rozdzielających krople, nie jest możliwa w po wczytaniu zdjęć i wymaga edycji parametrów domyślnych i restartu aplikacji. Zagadnienie to zostało szerzej opisane w sekcji 4.2.14. Poniższa tabela przedstawia przykładowe wartości parametrów aplikacji wraz z ich opisem. Ponieważ aplikacja została napisana w języku angielskim, zdecydowano się pozostawić oryginalne nazewnictwo i składnię parametrów, jednakże przetłumaczono komentarze.

	Nazwa parametru	Wartość	Opis
1	Drops per image	3	Liczba kropeł szkła na każdym zdjęciu
2	File ROI	x=1280:1640, y=0:1400	Przeszukiwany obszar zdjęcia wyrażony w pikselach
3	Drop vertical delimiter	0 119 239 359	Położenie pionowych linii rozdzielających krople w obszarze poszukiwań
4	Number of quality functions	4	Wartość tylko do odczytu
5	Drop image height	300	Wysokość zdjęcia kropli, wraz z marginesami poziomymi
6	Detection treshold	230	Próg jasności, którego przekroczenie oznacza wykrycie kropli. Zakres 0-255.
7	Banana row width	0.9	Minimalna szerokość wiersza obrazu kropli, aby został on wykorzystany do obliczenia zakrzywienia bananowego. Wyrażony w stosunku do średniej szerokości wiersza danej kropli. Zakres 0-1.
8	Smoothness kernel	15x15 ones	Rozmiar jądra przekształceń morfologicznych. Istotny głównie dla wyznaczania równomierności jasności świecenia kropli.
9	Smoothness threshold	10	Próg wykrycia krawędzi równomierności jasności kropli. Stosowany do binaryzacji obrazu po wykryciu krawędzi metodą Sobela.
10	Size critical min	12500	Przekroczenie minimalnej wartości rozmiaru kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
11	Size warning min	13000	Przekroczenie minimalnej wartości rozmiaru kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.
12	Size warning max	13500	Przekroczenie maksymalnej wartości rozmiaru kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.
13	Size critical max	14000	Przekroczenie maksymalnej wartości rozmiaru kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
14	Fill critical min	0.75	Przekroczenie minimalnej wartości wypełnienia prostokąta opisanego powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
15	Fill warning min	0.84	Przekroczenie minimalnej wartości wypełnienia prostokąta opisanego powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.

16	Fill warning max	0.97	Przekroczenie maksymalnej wartości wypełnienia prostokąta opisanego powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.
17	Fill critical max	1	Przekroczenie maksymalnej wartości wypełnienia prostokąta opisanego powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
18	Banana critical min	0	Przekroczenie minimalnej wartości zakrzywienia bananowego powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
19	Banana warning min	0.1	Przekroczenie minimalnej wartości zakrzywienia bananowego powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.
20	Banana warning max	2	Przekroczenie maksymalnej wartości zakrzywienia bananowego powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.
21	Banana critical max	3	Przekroczenie maksymalnej wartości rozmiaru kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
22	Smoothness critical min	-1	Przekroczenie minimalnej równomierności jasności kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”. Wartość ujemna sugeruje błąd w działaniu aplikacji.
23	Smoothness warning min	-1	Przekroczenie minimalnej wartości jednorodności jasności kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”. Wartość ujemna sugeruje błąd w działaniu aplikacji.
24	Smoothness warning max	1	Przekroczenie maksymalnej wartości równomierności jasności kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Warning”.
25	Smoothness critical max	20	Przekroczenie maksymalnej wartości równomierności jasności kropli powoduje ustawienie statusu kropli na „Critical”.
26	Segm. filter 1 exposition time	1/800	Czas ekspozycji zdjęcia, dla którego zostanie wykorzystany filtr segmentacyjny 1. Więcej informacji na temat filtrów segmentujących w sekcji 4.2.13.
27	Segm. filter 1 Bmin	0	Minimalna wartość składowej niebieskiej dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
28	Segm. filter 1 Gmin	0	Minimalna wartość składowej zielonej dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
29	Segm. filter 1 Rmin	178	Minimalna wartość składowej czerwonej dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
30	Segm. filter 1 Hmin	0	Minimalna wartość odcienia (Hue) dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
31	Segm. filter 1 Smin	89	Minimalna wartość nasycenia (Saturation) dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
32	Segm. filter 1 Vmin	216	Minimalna wartość jasności (Value) dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
33	Segm. filter 1 Bmax	249	Maksymalna wartość składowej niebieskiej dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
34	Segm. filter 1 Gmax	255	Maksymalna wartość składowej zielonej dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.

35	Segm. filter 1 Rmax	255	Maksymalna wartość składowej czerwonej dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
36	Segm. filter 1 Hmax	255	Maksymalna wartość odcienia (Hue) dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
37	Segm. filter 1 Smax	255	Maksymalna wartość nasycenia (Saturation) dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.
38	Segm. filter 1 Vmax	255	Maksymalna wartość jasności (Value) dla piksela zaliczonego do kropli. Zakres 0-255.

4.2.13. Filtry segmentujące

Zdjęcia przedstawiające krople mogą różnić się od siebie w znaczny sposób. Oprócz oczywistych czynników takich jak rodzaj kropli, ich ilość na zdjęciu czy też umieszczenie aparatu, różnice mogą wynikać z ustawień aparatu lub też charakteru otoczenia. Do takich cech mogą należeć:

- Jasność zdjęcia
- Nasycenie kolorów
- Odcień lub też przekłamanie kolorów

W tak zmiennych warunkach znaczącym zagadnieniem jest zatem zapewnienie dużej możliwości adaptacji programu do danych źródłowych. Z drugiej strony, możliwość porównania i wyboru prawidłowych ustawień aparatu, zapewnia jednoczesna analiza zdjęć wykonanych dla różnych ustawień aparatu, przy różnych parametrach obliczeniowych programu.

Ponieważ wymienione powyżej cechy zdjęcia mają największy wpływ na segmentację obrazu, to znaczy rozróżnienie kropli od tła, właśnie ta technika przetwarzania obrazu została wyposażona w możliwość zastosowania specyficznych ustawień per zdjęcie, to znaczy wprowadzono możliwość stworzenia kilku filtrów segmentujących. Filtr segmentujący to zbiór parametrów biorących udział podczas procesu segmentacji zdjęcia. W sekcji 5.1.1 stwierdzono, iż czas ekspozycji jest najważniejszym ustawieniem aparatu i to właśnie on powoduje największą zmienność jasności i nasycenia kolorów. Z tego właśnie powodu dobór odpowiedniego filtru segmentującego odbywa się na podstawie porównania czasu ekspozycji zdjęcia i czasu ekspozycji będącego własnością charakterystyczną samego filtru. Taki filtr, oprócz czasu ekspozycji będącego swego rodzaju kluczem głównym, zawiera zestaw wartości, z którymi porównywane są składowe każdego piksela, aby został zaliczony do kropli. Ponieważ niektóre zależności między wartościami pikseli są zdecydowanie łatwiejsze do zaobserwowania w przestrzeni barw HSV, składowe każdego piksela porównywane są zarówno w przestrzeni barw RGB, jak i HSV. Filtr segmentujący można opisać zależnością 4.1.

$$p \in K \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_{min} \leq R_p \leq R_{max} \\ G_{min} \leq G_p \leq G_{max} \\ B_{min} \leq B_p \leq B_{max} \\ H_{min} \leq H_p \leq H_{max} \\ S_{min} \leq S_p \leq S_{max} \\ V_{min} \leq V_p \leq V_{max} \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Gdzie:

p - piksel obrazu

K - zbiór pikseli tworzący kroplę

W praktyce powyższe rozwiązanie pozwala wczytać zdjęcia o bardzo różnym wyglądzie i jednocześnie poddać je analizie zapewniając prawidłowe rozpoznanie kropli, co jest pierwszym i najważniejszym

warunkiem poprawnego działania aplikacji. W przypadku braku filtra o czasie naświetlania równym czasowi naświetlania zdjęcia, jako wartości domyślne zostaną wykorzystane wartości ostatniego na liście filtra.

Aby edytować wartości filtra segmentującego, należy postępować zgodnie z procedurą opisaną w sekcji 4.2.12. Aby dodać nowy filtr segmentujący, należy nacisnąć przycisk opisany na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą „6”. Spowoduje to utworzenie na liście parametrów programu kolejnego filtra segmentującego o zerowych wartościach minimalnych, wartościach maksymalnych równych 255 i czasie ekspozycji wynoszącym 1/1. Warunek ten spełnia każdy piksel obrazu, więc zanim filtr zostanie faktycznie wykorzystany w analizie obrazu, należy go odpowiednio zmodyfikować.

4.2.14. Zapis i odczyt parametrów aplikacji

Dobrze dobrany zestaw parametrów gwarantujących poprawne wyniki można zapisać do pliku w celu późniejszego wykorzystania. W tym celu, należy posłużyć się przyciskami zaznaczonymi na rysunku 4.3 czerwonymi cyframi „7” i „8”. Powoduje to otwarcie się standardowych okienek systemowych służących do wyboru pliku do zapisu/odczytu.

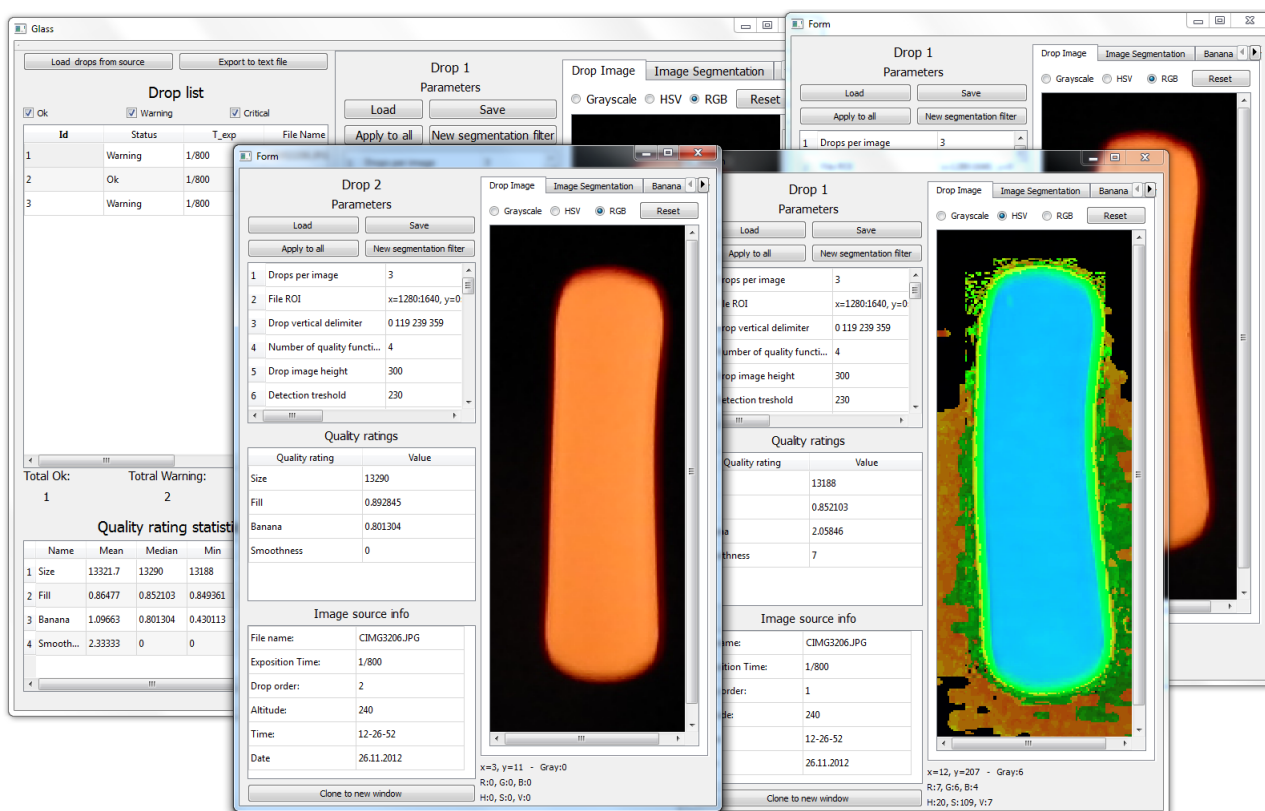
Zapis parametrów jako parametry domyślne - *defaultParams.gp* w folderze aplikacji pozwala na edycję parametrów odpowiedzialnych za wczytywanie zdjęć, takich jak:

- Ilość kropeł na zdjęciu
- Położenie interesującego obszaru zdjęcia (ROI)
- Położenie linii oddzielających krople, parametr ten określa również szerokość obrazu kropli wraz z marginesami
- Wysokość obrazu kropli wraz z marginesami.

Zaleca się wykonanie kopii zapasowej pliku *defaultParams.gp* przed dokonaniem w nim zmian.

4.2.15. Porównanie kropeł w kilku oknach

Ponieważ dobór wielu parametrów odbywa się manualnie na podstawie oceny i ekspertyzy użytkownika aplikacji, zapewniono możliwość jednoczesnego porównania kilku kropeł i otrzymywanych dla nich wartości cech charakterystycznych. Podgląd różnych kropeł może zwrócić uwagę na charakterystyczne cechy (np. znacznie odbiegających od normy) niektórych z nich, podczas gdy podgląd tej samej kropli na kilku obrazach pozwala w wygodny sposób dobierać parametry. Opisany na rysunku 4.3 czerwoną cyfrą „9” przycisk „Clone to new window” klonuje aktualny widok kropli do nowego okienka zawierającego prawą część interfejsu użytkownika. Tak utworzone okienko jest niezależną kopią fragmentu aplikacji - można zmieniać jego parametry nie zmieniając jednocześnie parametrów użytych dla innych kropeł, a zmiana globalnych parametrów kropeł nie wpływa na zmianę parametrów użytych w już istniejących niezależnych okienkach podglądu kropeł. Istnieje możliwość klonowania niezależnych okienek, przez co można stopniowo poprawiać wartości parametrów bez obaw o wcześniej otrzymane rezultaty przy jednoczesnym porównaniu ze starszymi wartościami. Aby zaaplikować parametry ustanowione w takim niezależnym okienku do obliczeń wykonywanych dla wszystkich kropeł których lista znajduje się w lewej części interfejsu użytkownika, należy nacisnąć przyciski „Apply to all” opisany na rysunku 4.3 jako „10”, przy czym należy pamiętać iż konieczność nagłego odświeżenia wartości i ponownego przeprowadzenia wszelkich obliczeń może chwilowo spowolnić pracę programu. Rysunek 4.8 przedstawia działanie programu z kilkoma otwartymi oknami podglądu kropeł.



Rysunek 4.8: Działanie programu z kilkoma otwartymi oknami podglądu kropeł

5. Testy i analiza wyników

5.1. Dane wejściowe

Danymi źródłowymi aplikacji są zdjęcia uciętych, spadających kropeł szkła. Maszyny w Hucie Szkła Orzesze produkują jednocześnie trzy krople szkła, które spadają niemal równocześnie. Delikatne różnice w fazie spadających kropeł mogą wynikać z nastaw gilotyn rozcinających trzy niezależne strugi szkła. Na rysunku 5.1 zamieszczono powiększony fragment zdjęcia przedstawiającego rzeczywiste ułożenie kropeł.

Zdjęcia wykonane zostały aparatem fotograficznym Casio Exilim HS EX-F1. Aparat ten udostępnia możliwość ręcznego ustawienia wielu parametrów, takich jak czułość matrycy, ustawienie przesłony czy też czas naświetlania zdjęcia. Dużym atutem zastosowanego aparatu jest matryca typu CMOS połączona z elektroniczno-mechaniczną migawką pozwalającą na wykonywanie fotografii z bardzo krótkim czasem naświetlania, dochodzącym do 1/40000s. Dodatkowo, aparat ten umożliwia kręcenie filmów w zwolnionym tempie, cechujących się bardzo dużą ilością klatek na sekundę. Zastosowany aparat pozwala na kręcenie filmów w rozdzielczości 512x384 w tempie 300 kl./s i aż 1200 kl./s w rozdzielczości 336x96 pikseli. Obiektyw aparatu posiada maksymalną jasność przesłony f/2.7, co pozwala uzyskać jasne zdjęcia przy małej ilości światła.

Zdjęcia spadających kropeł szkła wykonano w Hucie Szkła Orzesze w Orzeszu dnia 26.11.2013. Zdjęcia wykonywane były ze statywu umieszczonego w odległości około 2.5m od płaszczyzny tworzonej przez spadające krople, a kamera była ustawiona tak, aby orientacja jej osi optycznej była jak najbardziej zbliżona do normalnej płaszczyzny spadania kropeł. Taka orientacja aparatu pozwoliła uzyskać zdjęcia zawierające wiele szczegółów i pozbawione istotnego wpływu dystorsji. Wykonano łącznie 3585 zdjęć korzystając z różnych ustawień aparatu. Do testów wykorzystano jedynie część zdjęć, ponieważ zdjęcia wykonane dla bardzo niekorzystnych ustawień kamery lub przedstawiające niekompletne krople zostały odrzucone już po wstępnej analizie. Zakres zmian najważniejszych parametrów zdjęcia przedstawiono w tabeli 5.1.

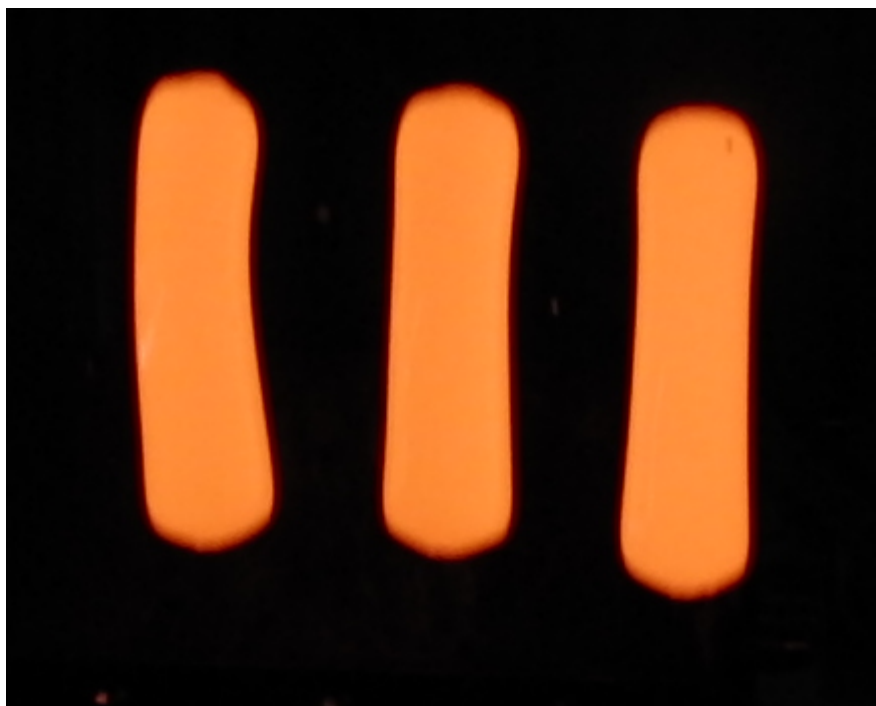
Parametr	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
Czułość ISO	100	400
Czas ekspozycji	1/3200s	1/250s
Przysłona	f/3.0	f/2.7

Tablica 5.1: Zakres zastosowanych ustawień kamery

5.1.1. Charakterystyka danych wejściowych

Zdjęcia będące danymi wejściowymi mogą znacznie się od siebie różnić. Najważniejsze cechy wpływające na przydatność zdjęcia w dalszej analizie i trudność obróbki to:

- Kąt, pod jakim ustawiony był aparat w stosunku do płaszczyzny kropeł
Optymalne ustawienie aparatu to takie, w którym oś optyczna obiektywu jest normalną płaszczyzny wyznaczonej przez ruch spadających kropeł.



Rysunek 5.1: Spadające krople szkła. Zdjęcie wykonane przez autora w hucie szkła Orzesze

- Ustawienia aparatu

Najistotniejszym parametrem aparatu jest czas ekspozycji. Ma on wpływ na jasność zdjęcia, a przede wszystkim na rozmycie kropeł. Należy pamiętać, że zdjęcia wykonywane są podczas gdy krople spadają swobodnie, a zatem są w ruchu z istotną prędkością. Rozmycie zdjęcia jest efektem bardzo niepożądanym, gdyż:

- Utrudnia segmentację

Dolna i górna krawędź kropli cechuje się inną jasnością niż pozostała część kropli. Krawędzie te są zdecydowanie mniej ostre.

- Powiększa rozmiar kropli

Jest to efekt pochodny utrudnionej segmentacji. Nie ma arbitralnej metody umożliwiającej znalezienie takiej wartości progowej, dla której segmentacja dokładnie przywróci rzeczywisty rozmiar kropli. Z tego powodu część rozmytych pikseli zawsze zostanie rozpoznana jako obraz, co wpłynie na powiększenie rozmiaru kropli.

Czas naświetlania ma również istotny wpływ na jasność zdjęcia. Ustawienie zdecydowanie zbyt krótkiego czasu ekspozycji może zmniejszyć ilość szczegółów widocznych na zdjęciu. Ponieważ jednak rozgrzane szkło intensywnie świeci światłem własnym, praktyka pokazała iż trudniejsze w obróbce są zdjęcia ze zbyt dużym czasem ekspozycji, tzn. zbyt jasne. Dochodzi wówczas do prześwietlenia zdjęcia. Krople na takim zdjęciu są zdecydowanie większe, a wszelkie szczegóły stają się zupełnie niewidoczne gdyż cała kropla świeci równomiernie z maksymalną jasnością. Innymi ustawieniami aparatu wpływającymi na jakość danych wejściowych są czułość matrycy i ustawienia przesłony. Podczas gdy oba te parametry mają wpływ na jasność zdjęcia, to zwiększenie czułości matrycy może mieć negatywny wpływ na ilość szumów na zdjęciu.

- Tło zdjęcia

Obecność obiektów w tle jest zjawiskiem niekorzystnym, gdyż utrudnia rozpoznanie kropeł na obrazie. Ponieważ otoczenie hali produkcyjnej nie charakteryzuje się silnym oświetleniem,

ustawienie krótkiego czasu ekspozycji nie dość że pozwala zmniejszyć wpływ ruchu kropeł, to dodatkowo istotnie zmniejsza jasność tła tym samym niemal eliminuje większość niepożądanych obiektów ułatwiając rozpoznanie i segmentację kropeł. Sprawiającym trudności wyjątkiem od tej zasady jest obecność innych źródeł światła, na przykład świetlówek w tym samym obszarze zdjęcia co krople.

5.1.2. Założenia dotyczące formatu danych wejściowych

Dane źródłowe dostarczane są do aplikacji w formie zestawu plików graficznych, na przykład w formacie JPG. Zdjęcia powinny przedstawiać spadające krople szkła, lub też puste tło obrazu. Rozpoznanie kropeł na zdjęciu zachodzi w sposób automatyczny, a zdjęcia nie zawierające kropeł zostają pominięte.

Wprowadzono istotne założenia dotyczą formatu nazewnictwa plików, ponieważ część informacji na temat zdjęcia uzyskiwana jest właśnie na podstawie nazwy plików. Nazwa powinna zawierać następujące pola rozdzielone znakiem podkreślenia „_”:

- Czas ekspozycji wyrażony jako wartość mianownika ułamka zakończony literą „s”
- Datę wykonania zdjęcia
- Godzinę wykonania zdjęcia
- Unikalny fragment nazwy, najczęściej oryginalną nazwę pliku nadaną przez aparat podczas wykonywania fotografii

Przykładem takiej nazwy może być: „1600s_26.11.2012_12-20-28_CIMG2843.JPG”.

Data i godzina wykonania zdjęcia nie mają wpływu na proces analizy danych, jednakże określony czas ekspozycji może decydować o zastosowaniu odpowiednich wartości filtra segmentującego użytego do rozróżnienia kropli od szkła.

Wszystkie te informacje zawarte są w metadanych pliku graficznego stworzonego przez kamerę. Aby ułatwić przepisanie tych informacji do nazwy pliku został stworzony specjalny skrypt programu Matlab.

5.2. Testy parametrów kropli szkła

W sekcji 5.2 przedstawiono wyniki przeprowadzonych testów parametrów kropli szkła. Wykorzystane zostały zarówno takie same testy dla wszystkich deskryptorów cech charakterystycznych opierające się na przeglądzie danych statystycznych, jak i specyficzne testy mające szczególne znaczenie w kontekście problemów i niuansów specyficznych dla danego parametru kropli szkła. Wyniki każdego z testów zostały poddane analizie i komentarzowi, mającemu na celu zwiększyć ilość zaprezentowanych informacji praktycznych wynikających z doświadczenia zdobytego podczas rozwoju projektu. Zamieszczone w tabelach wyniki wyrażone w procentach obliczane są względem wartości średniej i prezentowane są w celu lepszego oddania charakteru wyników liczbowych.

5.2.1. Zgodność rozmiaru

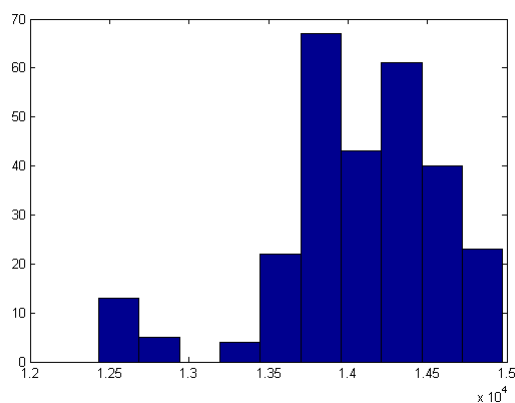
Analiza statystyczna wartości parametru

Test został przeprowadzony dla zestawu 278 kropeł. Zdjęcia zostały wykonane z jednakowym czasem naświetlania wynoszącym 1/1000 sekundy, jednakże dla różnych pozostałych ustawień aparatu - otwarcia przesłony i czułości matrycy. W tabeli 5.2 umieszczono statystyczne podsumowanie wyników, a na obrazie 5.3 przedstawiono największą, medianę i najmniejszą z kropeł. Dodatkowe informacje mogące mieć wpływ na otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 5.3.

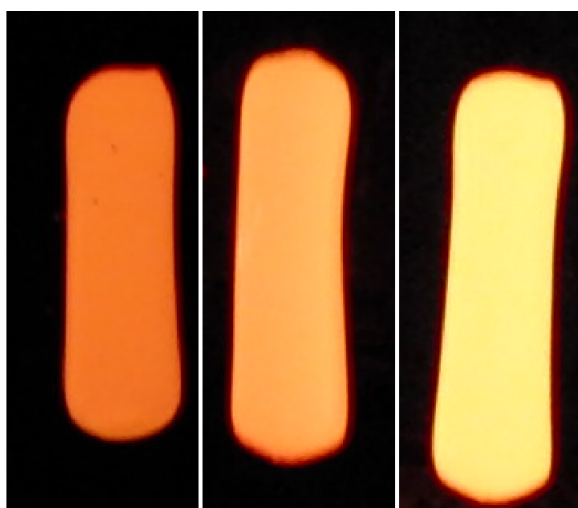
Najmniejsza z kropeł różni się znacząco od wartości średnich. Analiza histogramu pokazuje, że niewielka część testowanych kropeł ma wyraźnie mniejszy rozmiar niż pozostałe krople. Da się również zauważyć wyraźne różnice w jasności kropeł, jednakże nie mają one większego wpływu na rozmiar

	Minimum	Średnia	Mediana	Maksimum	σ
Wartość bezwzględna	12432	14073.8	14150	14974	535
Wartość względem średniej	-11.7%	0	+0.5%	+6.4%	

Tablica 5.2: Statystyczne zestawienie wartości zgodności rozmiaru.



Rysunek 5.2: Histogram rozmiaru kropeł



Rysunek 5.3: Najmniejsza, mediana i największa z kropeł

	Najmniejsza kropla	Mediana	Największa kropla
Czas ekspozycji	1/1000s	1/1000s	1/1000s
Czułość ISO	ISO-100	ISO-200	ISO-400
Położenie kropli na zdjęciu	Prawa	Środkowa	Lewa
Pułap kropli	20	1120	860
Czas wykonania zdjęcia	11:36:28	11:05:14	11:03:08

Tablica 5.3: Poszczególne informacje na temat kropeł

kropli, co przedstawiono w tabeli 5.4. Warto zauważyć, że zdjęcie najmniejszej z kropeł zostało wykonane ponad 30 minut później niż zdjęcia pozostałych kropeł, a zatem najprawdopodobniejszą przyczyną znacznej odchyłki części kropeł od normy jest zmiana parametrów pracy maszyny produkującej krople. Tezę tę wydaje się potwierdzać fakt, że zauważalnie mniejszy rozmiar występuje jedynie dla części kropeł wykonanych w okresie, gdy zrobiono zdjęcie najmniejszej z kropeł, podczas gdy pozostałe wartości

nie odbiegają znacząco od pozostałych. Odchylenie standardowe dla zdjęć wykonanych z czułością ISO-100 ma zdecydowanie większą wartość niż w pozostałych grupach, co oznacza że zmniejszenie jasności poprzez zmianę czułości ma niewielki wpływ na rozmiar kropeł na zdjęciu - mniejsza była tylko część kropeł, przez co zostało wprowadzone większe zróżnicowanie danych.

Czułość ISO	Minimum	Średnia	Mediana	Maksimum	σ			
ISO-100	12432	-9.3%	13706.6	13886	+1.3%	14499	+5.8%	612
ISO-200	13538	-4.6%	14183.5	14205	+0.15%	14698	+3.6%	307
ISO-400	13599	-4.9%	14295.6	14368	+0.4%	14974	+4.7%	383

Tablica 5.4: Niewielki wpływ jasności zdjęcia na zgodność rozmiaru dla stałego czasu naświetlania

Wpływ czasu naświetlania zdjęcia i pułapu kropli na zgodność rozmiaru

W tabeli 5.5 przedstawiono statystyczne wartości rozmiaru kropeł dla różnego czasu ekspozycji. Test przeprowadzono na 1036 kroplach szkła. Negatywny wpływ czasu ekspozycji omówiono w sekcji 5.1.1. Przegląd danych zawartych w tabeli wyraźnie pokazuje efekt pozornego zwiększenia się rozmiaru obiektu w ruchu. Im dłuższy czas ekspozycji, tym obiekt zdąży pokonać większą drogę podczas wykonywania zdjęcia, przez co pozornie wydaje się większy. Warto również zauważyć odwrotną zależność czasu ekspozycji na wartość odchylenia standardowego, która jest wyraźnie większa dla czasu ekspozycji wynoszącego 1/320s i 1/400s, pomimo iż zdjęcia wykonane dla czasu ekspozycji 1/1000s i 1/3200s zawierają krople, które faktycznie zostały wyprodukowane zdecydowanie mniejsze na skutek niedokładności pracy maszyny.

Czas ekspozycji	Minimum	Średnia	Mediana	Maksimum	σ			
1/320s	14973	-8.1%	16299.1	16208	-0.6%	18807	+15.4%	966
1/400s	14057	-9.7%	15571.2	15499	-0.5%	17016	+9.3%	702
1/1000s	12432	-11.7%	14073.8	14150	+0.5%	14974	+6.4%	535
1/3200s	12253	-6.9%	13159.8	13286	+1%	13970	+6.2%	484

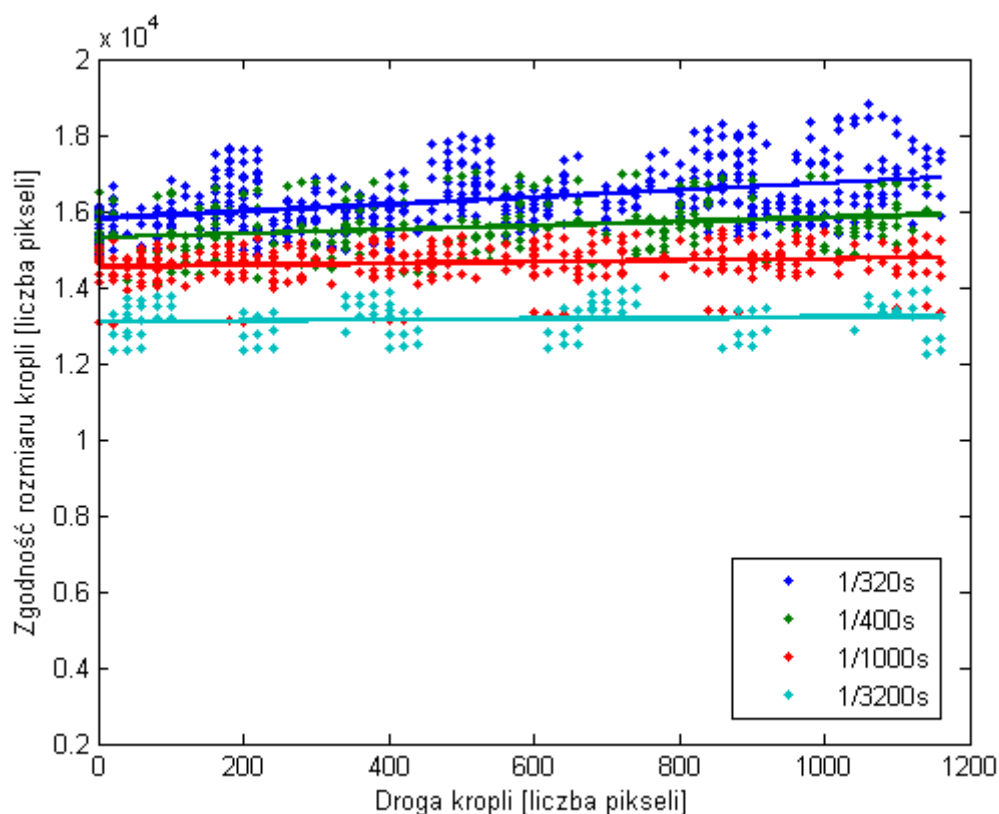
Tablica 5.5: Wpływ czasu ekspozycji na zgodność rozmiaru kropli

Krople podczas wykonywania fotografii są w stanie spadku swobodnego, czyli poruszają się ruchem niemalże jednostajnie przyspieszonym. Zdjęcia kropeł robione są na różnej wysokości, co oznacza że krople obserwowane na zdjęciach pokonały różną drogę i poruszają się z różną prędkością. Dla większych wartości parametru czasu ekspozycji przekłada się to na zwiększenie się wpływu pozornego powiększenia rozmiaru na zdjęciu obiektów w ruchu. Zależność tę przedstawiono na rysunku 5.4 ilustrującym wpływ przebytej przez kroplę drogi na zgodność rozmiaru kropli dla kilku wartości parametru czasu ekspozycji. Kropkami przedstawiono punkty pomiarowe, czyli wartość parametru zgodności rozmiaru, a linią ciągłą dopasowanie do tego zbioru wielomianu pierwszego stopnia.

Rysunek 5.4 wyraźnie pokazuje istotny wpływ czasu naświetlania na zgodność rozmiaru kropli. Po pierwsze powoduje on powiększenie się rozmiaru kropli. Po drugie, ruch kropli powoduje, iż krople wykonane dla większego czasu naświetlania mogą istotnie różnić się od siebie tylko z powodu ich prędkości podczas robienia zdjęcia. Efekt ten jest zdecydowanie niekorzystny i niepotrzebnie wprowadza istotny błąd do dalszych obliczeń. Oprócz zmniejszenia czasu ekspozycji, innym rozwiązaniem mogłoby być robienie zdjęć kropeł, gdy te są zawsze na tej samej wysokości, jednakże z praktycznego punktu widzenia rozwiązanie to jest zdecydowanie trudniejsze w realizacji.

5.2.2. Zgodność wypełnienia prostokąta opisanego

Wszystkie testy parametru zgodności wypełnienia prostokąta opisanego przeprowadzono na próbie składających się z 586 kropeł, których zdjęcia zostały wykonane z czasem naświetlania wynoszącym



Rysunek 5.4: Wpływ czasu naświetlania zdjęcia i drogi kropli na zgodność rozmiaru

1/400s, 1/1000s i 1/3200s.

Analiza statystyczna wartości parametru

W tabeli 5.6 zamieszczono istotne z punktu widzenia analizy statystycznej wartości parametru wypełnienia prostokąta opisanego. Rozkład tych wartości zamieszczono na histogramie 5.5, a krople o najmniejszej, medianie i największej wartości parametru zamieszczono na rysunku 5.6.

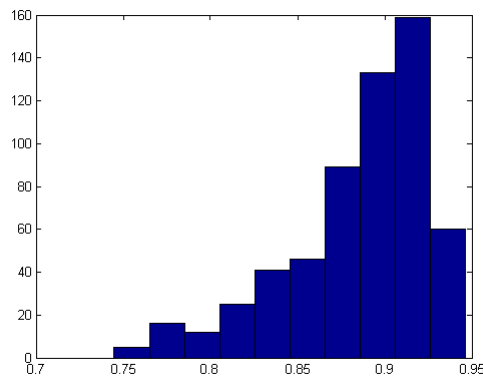
	Minimum	Średnia	Mediana	Maksimum	σ
Wartość bezwzględna	0.7448	0.8851	0.8935	0.9464	0.0399
Wartość względem średniej	-15.85%	0	+0.95%	+6.92%	

Tablica 5.6: Statystyczne zestawienie wartości zgodności wypełnienia prostokąta opisanego

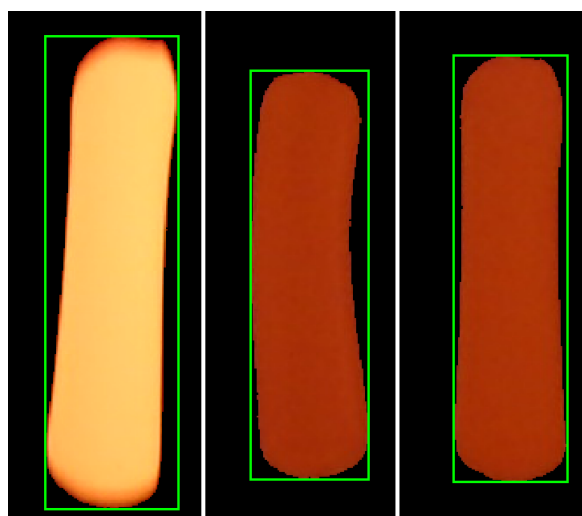
	Kropla o najmniejszym wypełnieniu	Mediana	Kropla o największym wypełnieniu
Czas ekspozycji	1/1000s	1/3200s	1/3200s
Czułość ISO	ISO-200	ISO-100	ISO-100
Położenie kropli na zdjęciu	Prawa	Lewa	Prawa
Pułap kropli	1020	620	800
Czas wykonania zdjęcia	11:02:18	11:35:16	11:34:28

Tablica 5.7: Poszczególne informacje na temat kropeł

Zdecydowana większość kropli szkła posiada wysoką wartość parametru odzwierciedlającego podobieństwo do prostokąta. Takie zachowanie tego parametru kropli szkła jest zgodne z oczekiwaniami



Rysunek 5.5: Histogram zgodności rozmiaru kropli



Rysunek 5.6: Kropla o najmniejszej, medianie i największej wartości wypełnienia

i pozwala sądzić, że znaczna odchyłka mogłaby prowadzić do prawidłowego rozpoznania niewłaściwie wyprodukowanych kropli. Z drugiej strony, da się zaobserwować wrażliwość tego deskryptora na odchyłkę osi głównej kropli od pionu, co jest wyraźnie widoczne dla kropli o najmniejszej wartości wypełnienia oraz wrażliwość na zakrzywienie kropli.

Zmienność parametru dla jednej kropli i wpływ otwarcia

Test przeprowadzony dla odpowiednio wyselekcjonowanego obrazu pojedynczej kropli pozwala zaobserwować wpływ zakłóceń na wartość parametru. Dla deskryptora zgodności wypełnienia prostokąta opisanego istotnym problemem są odbłaski światła kropli szkła odbite od kropli wody używanej do chłodzenia i zapobiegania zwilżania przez płynne szkło różnych części instalacji mających z nim bezpośredni kontakt. Często dobranie takich parametrów segmentacji może sprawiać znaczne trudności w eliminacji tego typu zakłóceń, tym samym prowadząc do nieprawidłowego rozpoznania obrazu kropli i powodując nieprawidłowe określenie pozycji i rozmiaru prostokąta opisanego. Omawianą sytuację przedstawiono na rysunku 5.7.

Z uwagi na zdecydowanie mniejszy rozmiar zakłóceń spowodowanych obecnością odbić kropli szkła w kroplach wody, zastosowano operację otwarcia mającą na celu zwiększenie odporności na zakłócenia procedury wyznaczania prostokąta opisanego. W tabeli 5.8 zamieszczono statystyczne wyniki otrzymane dla różnego rozmiaru jądra operacji morfologicznej otwarcia. Jądro to składa się z macierzy kwadratowej elementów o wartości 1, a jego rozmiar określa siłę działania operacji otwarcia. W tabeli 5.9 zamieszczono wartości deskryptora cech charakterystycznych dla tej samej kropli, przedstawionej na rysunku

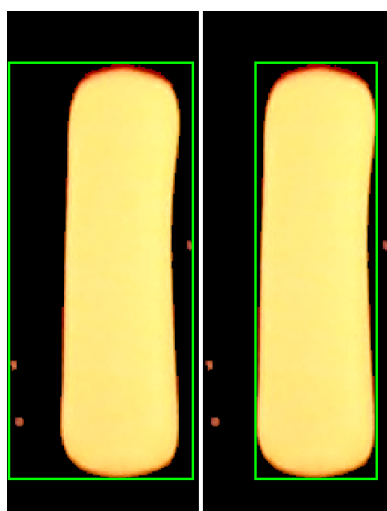


Rysunek 5.7: Odbicia w kroplach wody spadających wraz z kroplą wsadu. Zdjęcie wykonane przez autora w Hucie Szkła Orzesze

5.8 dla różnych rozmiarów jądra operacji otwarcia.

Rozmiar jądra	Minimum		Średnia	Mediana		Maksimum		σ
3x3	0.5982	-30.96%	0.8664	0.8784	+1.38%	0.9364	+8.08%	0.0506
15x15	0.7448	-15.85%	0.8851	0.8935	+0.95%	0.9464	+6.92%	0.0399

Tablica 5.8: Wpływ operacji otwarcia na zgodność wypełnienia prostokąta opisanego dla zestawu kropli



Rysunek 5.8: Wpływ operacji otwarcia na zgodność wypełnienia prostokąta opisanego dla pojedynczej kropli

Przedstawiony przykład wyraźnie dowodzi celowości zastosowania otwarcia i jego skuteczności. W omawianym przykładzie całkowicie eliminuje ono istotny problem praktyczny spowodowany procesem technologicznym obróbki szkła. Statystyczne podsumowanie otrzymanych wyników wskazuje na

Jądro przekształcenia otwarcia	Zgodność wypełnienia prostokąta opisanego
3x3	0.5982
15x15	0.9208

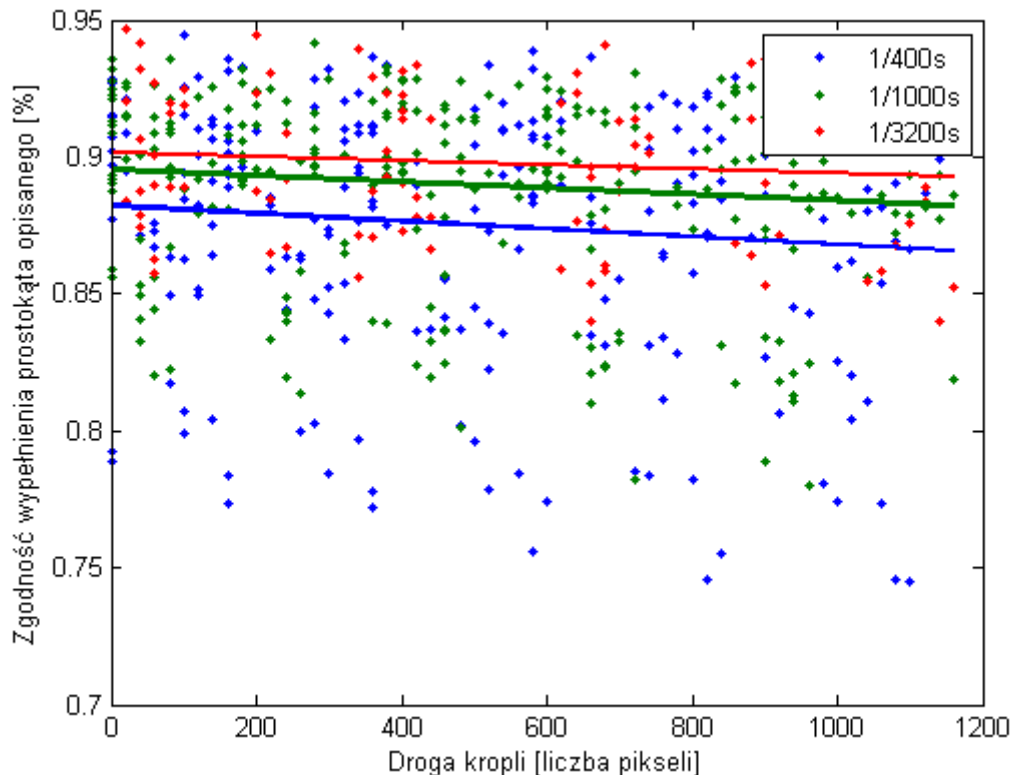
Tablica 5.9: Wpływ operacji otwarcia na zgodność wypełnienia prostokąta opisanego dla pojedynczej kropli

wyraźną poprawę wyników poprzez eliminację grubych błędów spowodowanych zakłóceniami nie tylko dla przykładu z rysunku 5.8, ale również całego zestawu innych kropli.

Zwiększenie niezawodności proponowanego parametru kropli szkła pozwala sądzić, iż może on być z powodzeniem wykorzystany do wykrywania poważnych błędów podczas produkcji kropli, takich jak niecałkowite i nieprawidłowe rozcięcie strugi szkła powodujące ciągnięcie się jej w miarę spadania.

Wpływ pułapu kropli i czasu naświetlania na wartość wypełnienia prostokąta opisanego

Pułap kropli oznacza wysokość, na jakiej znajdowała się kropla podczas wykonywania zdjęcia. Podczas spadania, droga przebyta przez kroplę rośnie tym samym zmniejszając jej pułap. Na wykresie 5.9 przedstawiono wpływ czasu ekspozycji zdjęcia oraz przebytej przez kroplę drogi na wartość omawianego parametru. Największa różnorodność wyników występuje dla najdłuższego czasu naświetlania, wynoszącego 1/400s. Najprawdopodobniej jest to spowodowane utrudnioną segmentacją tak wykonanych fotografii. Z drugiej strony, przeprowadzone dopasowanie funkcji liniowej do punktów pomiarowych pokazuje, iż otrzymane wyniki są do siebie bardzo podobne i niemalże niezależne od drogi przebytej przez krople i ich prędkości.



Rysunek 5.9: Wpływ drogi przebytej przez kroplę na wartość zgodności wypełnienia prostokąta opisanego

5.2.3. Zakrzywienie bananowe

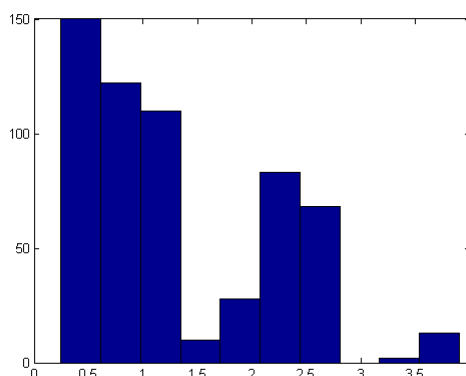
Wszystkie testy parametru zakrzywienia bananowego przeprowadzono dla próby 586 kropeł, których zdjęcia zostały wykonane z czasem naświetlania 1/400s, 1/1000s lub 1/3200s.

Analiza statystyczna wartości parametru

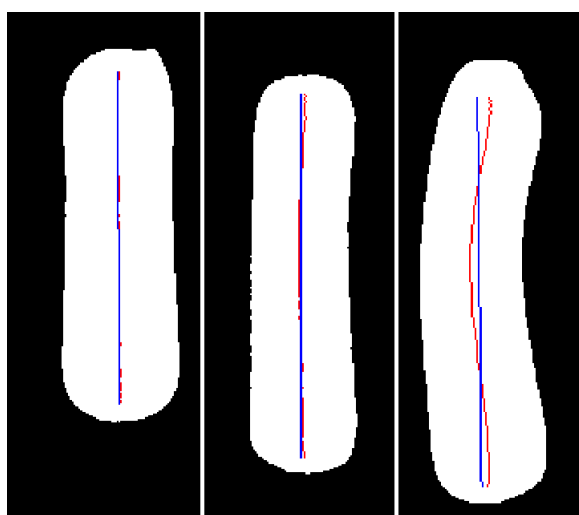
Wyniki analizy statystycznej testowanej próby kropeł przedstawiono w tabeli 5.10. Histogram przedstawiający rozkład wartości dla badanej próby zamieszczono na rysunku 5.10. Krople, które odpowiada najmniejszej, medianie i największej omawianej wartości zamieszczono na rysunku 5.11.

	Minimum	Średnia	Mediana	Maksimum	σ
Wartość bezwzględna	0.2470	1.3312	1.0165	3.9021	0.869
Wartość względem średniej	-81.45%	0	-23.64%	+193.12%	

Tablica 5.10: Statystyczne zestawienie wartości zakrzywienia bananowego



Rysunek 5.10: Histogram wartości zakrzywienia bananowego kropeł



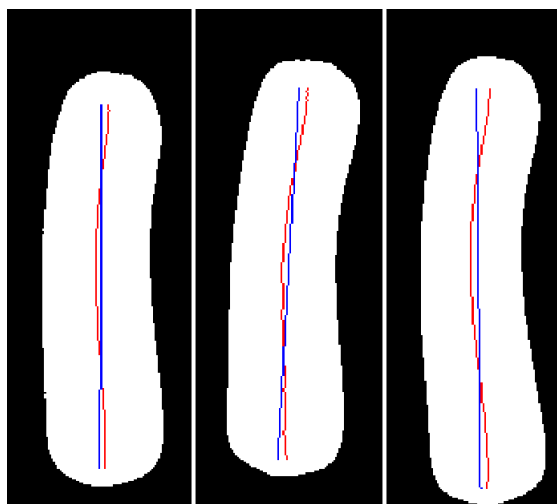
Rysunek 5.11: Kropla o najmniejszej, medianie i największej wartości zakrzywienia bananowego

Wartości parametru zakrzywienia bananowego cechują się stosunkowo szerokim zakresem wartości - wartość najmniejsza jest niemal czterokrotnie mniejsza od średniej, podczas gdy ta jest niemal czterokrotnie mniejsza od wartości największej. Z drugiej strony, analiza rysunku 5.11 wskazuje, iż krople cechujące się przeciętną wartością omawianego parametru w rzeczywistości posiadają stosunkowo niewiel-

	Kropla o najmniejszym zakrzywieniu	Mediana	Kropla o największym zakrzywieniu
Czas ekspozycji	1/3200s	1/1000s	1/3200s
Czułość ISO	ISO-100	ISO-200	ISO-100
Położenie kropli na zdjęciu	Prawa	Środkowa	Lewa
Pułap kropli	80	420	980
Czas wykonania zdjęcia	11:35:38	11:04:27	11:35:08

Tablica 5.11: Poszczególne informacje na temat kropeł

kie zakrzywienie. Zakrzywienie kropeł zaczyna być zauważalne dla kropeł, których wartość wskaźnika wynosi około 2, podczas gdy dla wartości wskaźnika większych niż 3 jest już bardzo wyraźnie widoczne, co przedstawiono na rysunku 5.12. W tabeli 5.12 zamieszczono dodatkowe informacje dotyczące kropeł przedstawionych na rysunku 5.12. Warto zwrócić uwagę, iż wszystkie zauważalnie zakrzywione krople cechują się tą samą kierunkowością zakrzywienia, oraz wszystkie powstały z rozcięcia tej samej, lewej, strugi szkła.



Rysunek 5.12: Różne wartości parametru zakrzywienia bananowego

Pozycja na rysunku 5.12	Lewa	Środkowa	Prawa
Zakrzywienie bananowe	1.0984	2.2662	3.6817
Czas ekspozycji	1/1000s	1/1000s	1/1000s
Położenie kropli na zdjęciu	Lewa	Lewa	Lewa
Pułap kropli	0	660	220
Czas wykonania zdjęcia	11:02:06	11:37:26	11:36:16

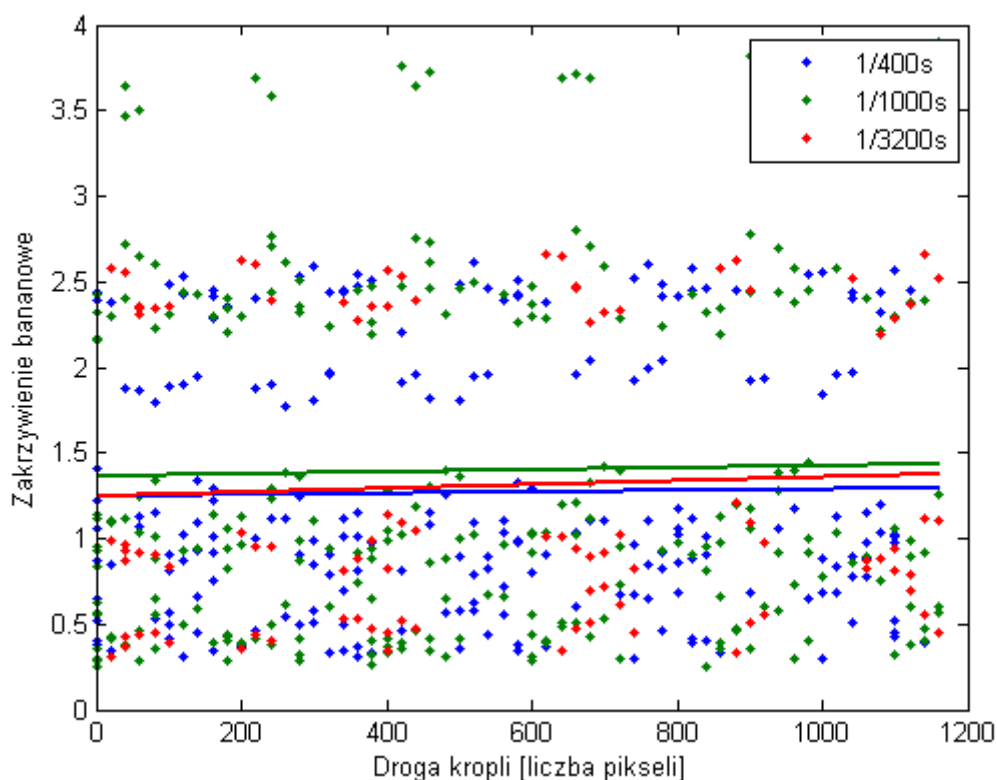
Tablica 5.12: Poszczególne informacje na temat kropeł

Parametr zakrzywienia bananowego bardzo skutecznie i niezawodnie wykrywa krople, które uległy wykrzywieniu na skutek nieprawidłowych parametrów pracy maszyny. Podczas testów nie stwierdzono szczególnej czułości parametru na obecność różnego rodzaju zakłóceń i dokładność segmentacji. Oczywiście, w przypadku zupełnie nieprawidłowego rozpoznania kropli otrzymane wyniki nie będą prawidłowe, jednakże parametr cechuje się największą tolerancją na wartość współczynników obliczeniowych i poprawność danych wejściowych. Zakrzywienie bananowe bardzo wyraźnie i intuicyjnie odzwierciedla krzywiznę kropli i jest niezależne od ewentualnej odchyłki kropli od pionu.

Wpływ pułapu kropli i czasu naświetlania na wartość zakrzywienia bananowego

Przedstawione wyniki testu bezsprzecznie pokazują, iż powstawanie wykrzywionych kropeł przypominających banana ma powtarzalny, metodyczny charakter i jest spowodowane tylko i wyłącznie problemami z pracą maszyny. Wykres 5.13 pokazuje, iż otrzymywane wyniki są właściwie niezależne od pułapu i prędkości chwilowej kropli dla wszystkich czasów naświetlania. Nie ma również większego wpływu zmienności jasności zdjęcia spowodowanych zmianą czasu naświetlania.

Na wykresie 5.13 da się natomiast zaobserwować cztery wyraźne grupy wyników, gdzie wartość parametru przyjmuje odpowiednio około 0.5, 1, 2.3 i 3.6. Zdjęcia dla których wartość parametru wynosi ok. 3.6 zostały wykonane około 30 minut później niż pozostałe zdjęcia, podczas gdy dla zdjęć wykonanych z czasem ekspozycji równym 1/1000s wartość zakrzywienia bananowego dla czasu wynosi około 2.3, tak jak dla kropeł których zdjęcia wykonano w tym samym czasie, ale z innym czasem naświetlania. Wymienione argumenty potwierdzają tezę, iż na wartość parametru zakrzywienia bananowego, przy spełnieniu elementarnych warunków, jedyny istotny wpływ ma faktyczny charakter pracy instalacji, który zmienił się w trakcie wykonywania zdjęć.



Rysunek 5.13: Wpływ pułapu kropli na wartość zakrzywienia bananowego

5.2.4. Równomierność jasności świecenia

Wszystkie testy parametru równomierności jasności świecenia przeprowadzono dla próby 586 kropeł, których zdjęcia zostały wykonane z czasem naświetlania 1/400s, 1/1000s, 1/3200s.

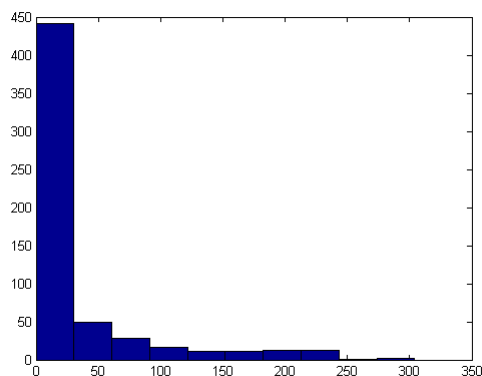
Analiza statystyczna wartości parametru

Wyniki analizy statystycznej testowanej próby kropeł przedstawiono w tabeli 5.13. Histogram przedstawiający rozkład wartości dla badanej próby zamieszczono na rysunku 5.14. Na rysunku 5.15 zrezygnowano z zamieszczania obrazu kropli cechującego się najmniejszą wartością parametru z uwagi na jego trywialny charakter. Zamiast tego, zdecydowano się zamieścić kroplę o wartości de-

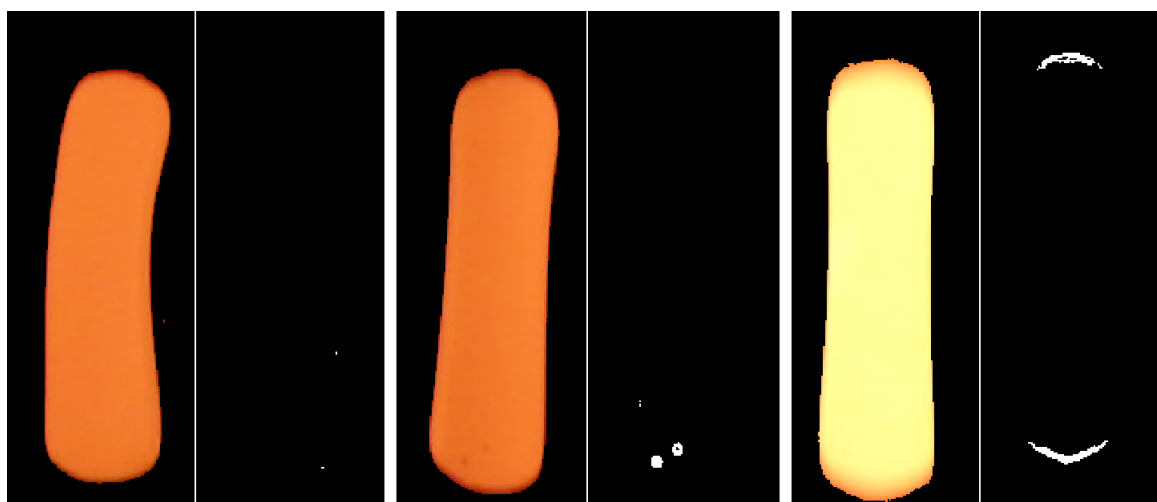
skryptora równej medianie wartości, przykładowej kropli o znacznej wartości parametru wynoszącej 75 i kroplę o największej wartości parametru.

	Minimum	Średnia	Mediana	Maksimum	σ
Wartość bezwzględna	0	30.3891	4	304	55.74
Wartość względem średniej	-100%	0	-86.84%	+900.36%	

Tablica 5.13: Statystyczne zestawienie wartości równomierności jasności świecenia



Rysunek 5.14: Histogram wartości równomierności jasności świecenia kropeł



Rysunek 5.15: Kropla cechująca się wartością równą medianie, wartości równej 75 i największej wartości zakrzywienia bananowego

Analiza histogramu rozkładu wartości parametru równomierności jasności świecenia wyraźnie pokazuje, iż zdecydowana większość kropeł cechuje się bardzo jednorodnym obrazem, na którym nie da się zaobserwować obszarów o zmiennej jasności świecenia. Obraz kropli cechującej się największą wartością parametrów wyraźnie pokazuje wpływ utrudnionej segmentacji spowodowanej zbyt długim czasem naświetlania. Dla takiego obrazu górna i dolna krawędź kropli ulega poszerzeniu, a jej jasność zmniejsza się. Powoduje to występowanie znacznych obszarów, gdzie występuje duży gradient jasności. Choć krawędzie kropli usuwane są z obliczeń za pomocą specjalnie przygotowanej maski, to jednak w omawianym przypadku nie zostaną one usunięte całkowicie, co powoduje wprowadzenie znacznego błędu do otrzymywanych wyników. Z drugiej strony, metodę tą można wykorzystać do doboru odpo-

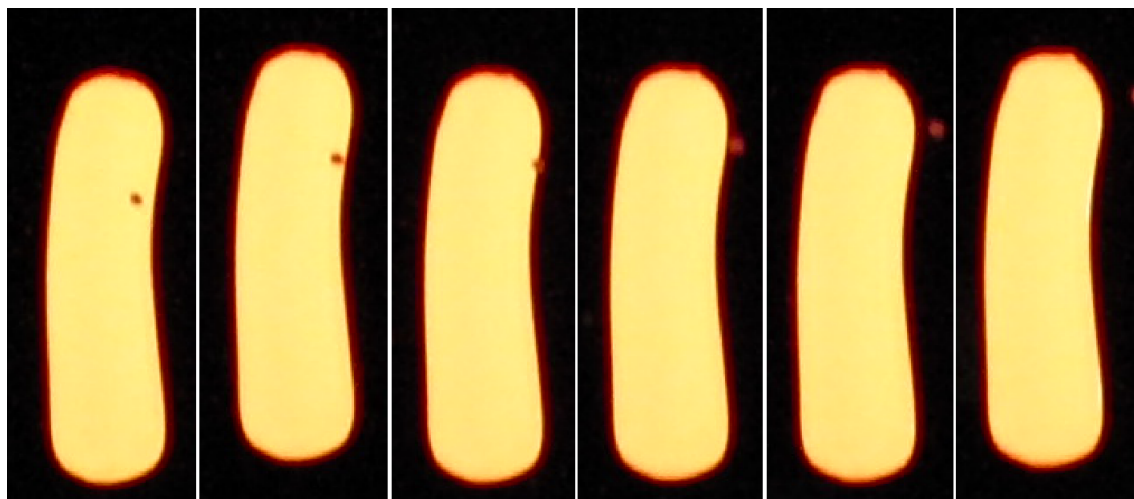
	Mediana	Kropla o wartości równomierności jasności świecenia równej 75	Kropla o największej wartości równomierności jasności świecenia
Czas ekspozycji	1/1000s	1/1000s	1/400s
Czułość ISO	ISO-100	ISO-100	ISO-400
Położenie kropli na zdjęciu	Lewa	Środkowa	Prawa
Pułap kropli	240	560	1060
Czas wykonania zdjęcia	11:08:56	11:10:14	11:03:15

Tablica 5.14: Poszczególne informacje na temat kropli

wiedniego czasu naświetlania zdjęć kropli, gdyż stanowi ona sposób mierzenia negatywnego wpływu ruchu kropli na jakość zdjęć.

Zmienność parametru dla jednej kropli

Poniższy test przeprowadzono dla serii zdjęć wykonanych dla pojedynczej kropli. Zdjęcia zostały wykonane z czasem ekspozycji wynoszącym 1/1000s i czułością ISO wynoszącą ISO-400. Na rysunku 5.16 przedstawiono krople wody używanej do chłodzenia instalacji przesuwaną się na tle spadającej kropli szkła. Inne ujęcie takiej sytuacji przedstawiono na zdjęciu 5.7. Podczas gdy kropla wody przesuwa się na tle kropli szkła, cechuje się ona zdecydowanie mniejszą jasnością i jest mylnie interpretowana jako nierównomierność jasności świecenia. Jest to drugi istotny dla tego parametru kropli szkła rodzaj zakłóceń. W momencie gdy kropla wody przestaje przesłaniać kroplę szkła, odbija ona częściowo jej światło i może stanowić zakłócenie dla parametru zgodności wypełnienia prostokąta opisanego, co opisano szerzej w sekcji 5.2.2. W tabeli 5.15 zamieszczono wartości parametru równomierności jasności świecenia. Wyniki otrzymane dla pozornie równomiernie świecących kropli mają niezerowe wartości z uwagi na zastosowanie innych wartości zmiennych konfiguracyjnych algorytmu obliczeniowego.



Rysunek 5.16: Obecność kropli wody lub oleju nałożonego na obraz kropli

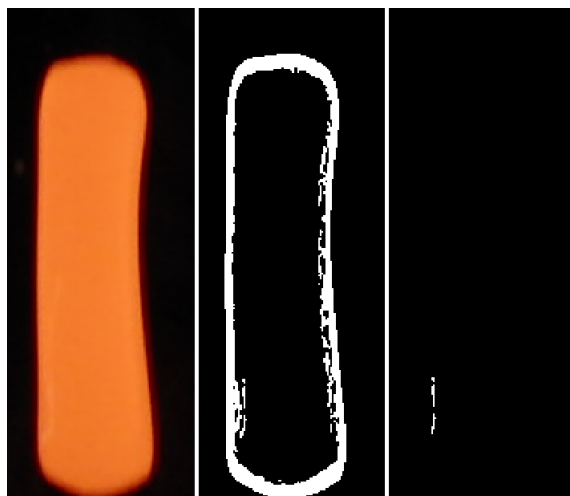
Równomierność jasności świecenia	108	34	8	15	20	22
----------------------------------	-----	----	---	----	----	----

Tablica 5.15: Wartości równomierności jasności świecenia dla kropli przedstawionej na rysunku 5.16

Działanie parametru dla obszarów o zwiększonej jasności

Na rysunku 5.17 przedstawiono działanie algorytmu obliczającego równomierność jasności świecenia dla obszaru o zwiększonej jasności. Przedstawiony przykład dowodzi, że dla odpowiednio dobranych

parametrów proponowany algorytm potrafi wykryć nawet stosunkowo niewielkie zmiany jasności kropli, a co za tym idzie spełnia swoje zadanie.



Rysunek 5.17: Równomierność jasności świecenia dla kropli z obszarem o zwiększonej jasności. Wartość parametru wynosi 38

Równomierność jasności świecenia	38
Czas ekspozycji	1/1000s
Czułość ISO	ISO-100
Położenie kropli na zdjęciu	Środkowa
Pułap kropli	940
Czas wykonania zdjęcia	11:37:26

Tablica 5.16: Dodatkowe informacje dotyczące kropli przedstawionej na rysunku 5.17

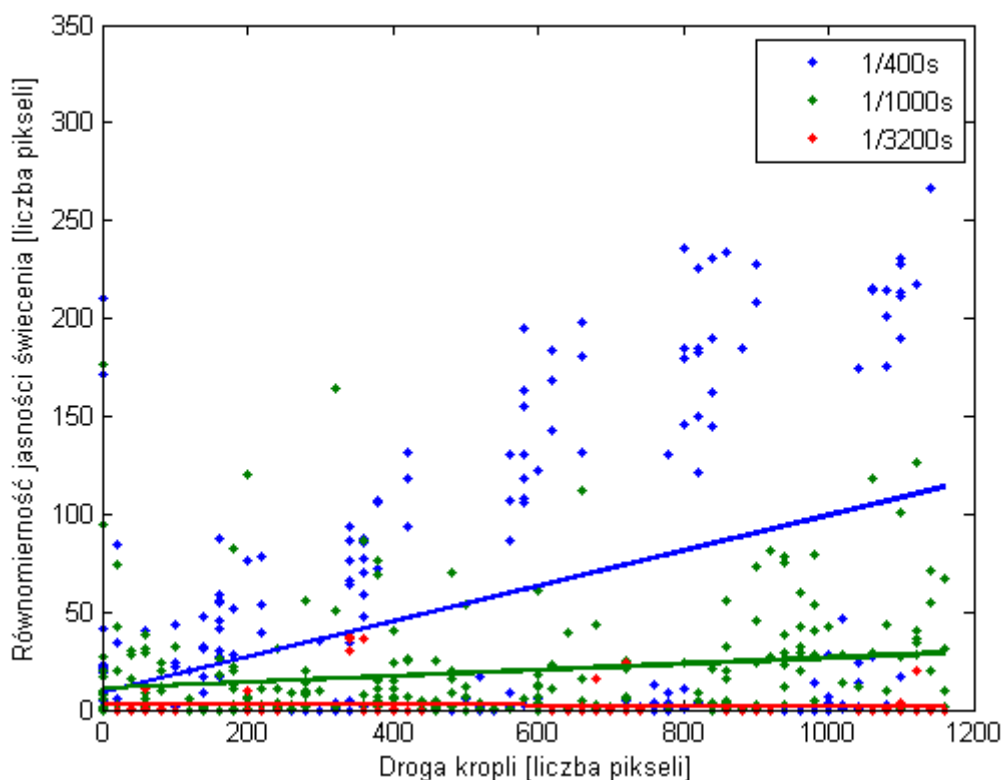
Wpływ czasu ekspozycji i drogi przebytej przez kroplę na deskryptor równomierności świecenia

Na rysunku 5.18 przedstawiono wpływ czasu naświetlania i drogi przebytej przez kroplę na wartość deskryptora równomierności jasności świecenia. Dla zdjęć wykonanych z dużym czasem naświetlania da się wyróżnić istotną zależność wartości deskryptora od prędkości kropli. Rozmycie górnej i dolnej krawędzi powoduje jej niedoświetlenie, co wprowadza różnice jasności kropli na zdjęciu, podczas gdy nie występują one w rzeczywistości. Wykres 5.18 potwierdza wnioski wyciągnięte na podstawie testu 5.2.4.

Zbyt krótki czas ekspozycji również ma niekorzystny wpływ na wartość parametru, gdyż zdjęcie może okazać się niedoświetlone i pozbawione część szczegółów niezbędnych do pracy algorytmu. Efekt ten obrazują w większości zerowe wartości parametru dla czasu naświetlania wynoszącego 1/3200s. Należy jednakże nadmienić, że dla zdjęć o bardzo krótkim czasie naświetlania zastosowany aparat miewał kłopoty z prawidłowym uchwyceniem ostrości niezbędnej do prawidłowego oddania szczegółów obrazu kropli.

5.3. Wnioski dotyczące zaproponowanych parametrów

W rozdziale 5 przedstawiono dyskusję zastosowania zaproponowanych parametrów kropli szkła przeprowadzoną na podstawie analizy przykładowych, rzeczywistych danych wejściowych. Zdjęcia przedstawiające obraz kropli szkła wykonane zostały z różnymi nastawami aparatu fotograficznego,



Rysunek 5.18: Wpływ pułapu kropli na wartość równomierności świecenia

co pozwoliło przeprowadzić również analizę pracy deskryptorów cech charakterystycznych pod kątem wrażliwości na zakłócenia i zmianę parametrów. Przeprowadzone testy ujawniły również niektóre trudności natury praktycznej, które były niemożliwe lub bardzo trudne do przewidzenia w fazie projektowania aplikacji.

Pierwszym przetestowanym parametrem jest zgodność rozmiaru kropli szkła. Otrzymane wyniki pokazują, iż w określonych warunkach z powodzeniem może on być wykorzystany do monitorowania powtarzalności produkcji kropeł i pracy maszyny. Z drugiej strony, na wartość tego parametru bardzo istotny wpływ ma długość czasu ekspozycji zdjęcia. Krople będące w spadku swobodnym poruszają się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Zdjęcie obiektu w ruchu jest zniekształcone znanym z życia codziennego rozmazaniem, a w przypadku kropeł również pozornym powiększeniem rozmiaru obiektu i niedoświetleniem górnych i dolnych krawędzi. Zastosowanie odpowiednio krótkiego czasu naświetlenia - na przykład 1/1000s pozwala wyeliminować wpływ ruchu kropeł na ich obraz na zdjęciu, a co za tym idzie gwarantuje wiarygodne wyniki, które można wykorzystać do monitorowania pracy instalacji hutniczej.

Testy parametru zgodności wypełnienia prostokąta opisanego również pokazały istotny wpływ czasu naświetlenia na wartości otrzymanych wyników. Ujawniony został również pewien szczegół techniczny wynikający z rzeczywistego charakteru pracy instalacji i otoczenia przemysłowego. Woda służąca do chłodzenia fragmentów instalacji mających kontakt ze wsadem kapie w postaci kropeł różnego rozmiaru otaczających kroplę szkła. Kropla wody na skutek odbicia światła kropli szkła może zostać zaklasyfikowana jako fragment obiektu, zaburzając wartość parametru. Efekt ten da się w zdecydowanym stopniu wyeliminować stosując odpowiednie algorytmy przetwarzania obrazu połączone z zastosowaniem odpowiednio krótkiego czasu naświetlenia. Odbicia w kroplach wody cechują się mniejszą jasnością niż szkło, i dla dobrze dobranej jasności zdjęcia są słabo widoczne, co ułatwia zaklasyfikowanie ich jako tło zdjęcia i prawidłową segmentację kropeł szkła.

Proponowany parametr zakrzywienia bananowego pozwala w skuteczny sposób nadać mierzalną

wartość zakrzywieniu kropel. Otrzymywane wyniki są powtarzalne i odporne zarówno na różnego rodzaju zakłócenia, nastawy aparatu fotograficznego, jak i wartości parametrów numerycznych algorytmów przetwarzania obrazu. Przegląd otrzymanych wartości parametru zakrzywienia bananowego zdaje się potwierdzać fakt, iż zakrzywienie kropel jest powtarzalnym efektem spowodowanym charakterystyką pracy maszyny hutniczej. Przeprowadzone testy wskazują, iż parametr zakrzywienia bananowego z powodzeniem mógłby być wykorzystany do monitorowania pracy instalacji rozdzielającej wsad na krople szkła.

Na wartość parametru równomierności jasności świecenia istotny wpływ ma wiele czynników zewnętrznych. Tak jak w przypadku pozostałych deskryptorów cech charakterystycznych, zastosowanie zbyt długiego czasu ekspozycji zdecydowanie pogarsza otrzymywane wyniki, jednakże w przeciwieństwie do pozostałych parametrów, zastosowanie zbyt krótkiego czasu ekspozycji może ukryć zbyt wiele szczegółów obrazu kropli szkła jednocześnie negatywnie wpływając na jakość pracy proponowanego parametru. Kolejną istotną trudnością jest zjawisko przesłaniania kropli szkła przez znacznie mniejszą i ciemniejszą kroplę wody. Efekt ten rozpoznawany jest jako niejednorodność jasności kropli szkła, podczas gdy w rzeczywistości spowodowany jest zjawiskiem niezależnym i nieszkodliwym. Z drugiej strony, parametr ten pozwala wykryć subtelne zmiany jasności w obrazie kropel, co dowodzi iż implementacja praktyczna zachowuje się zgodnie z założeniami teoretycznymi.

6. Uwagi końcowe

W przedstawionej pracy omówiono prototypowy system wizyjny, którego zastosowaniem jest pomiar parametrów kropli roztopionego szkła. System ten skupia się na analizie obrazu kropli szkła powstałej w wyniku rozdzielania roztopionego wsadu szklarskiego na porcje odpowiednie do produkcji pojedynczej sztuki wyrobu, najczęściej butelki. Zdjęcie kropli wykonywane jest podczas jej spadku swobodnego z głowicy zasilanej roztopionym wsadem wypływającym z pieca, zanim zostanie ona skierowana do dalszej części procesu produkcyjnego w której dokonywane jest formowanie produktu.

Zaprojektowany system opiera się na zaproponowanych definicjach parametrów mających opisywać konkretne, charakterystyczne cechy kropli możliwe do zaobserwowania na jej obrazie. Ponieważ dla wzorcowej, idealnej kropli szkła można określić pożądane wartości parametrów, normę między wartościami wzorcowymi a wartościami otrzymanymi dla konkretnej kropli można interpretować jako wskaźnik jakości obliczany przez system wizyjny, a którego minimalizacja i utrzymywanie na dostatecznie niskim poziomie jest w gestii operatora instalacji hutniczej.

W pracy skrótowo omówiono proces technologiczny wytwarzania opakowań szklanych. Opis procesu technologicznego pomija wiele istotnych aspektów fizyczno-chemicznych, jednakże jest wystarczający aby zrozumieć rolę i pożądany efekt każdego z etapów produkcji. Pozwala on na zrozumienie procesu produkcji szkła i pozwala zlokalizować na tle całej instalacji hutniczej miejsce proponowanego systemu wizyjnego.

Wykorzystane techniki z zakresu przetwarzania obrazów zostały przedstawione w rozdziale 2. Zamieszczono tam opis zastosowanych algorytmów stanowiących podstawowe elementy tworzące funkcjonalność aplikacji. Choć wykorzystane techniki przetwarzania obrazu przedstawione są ogólnie, to jednak kluczowym elementem każdego z opisów nie są definicje matematyczne i schematy blokowe, a zobrazowanie interesujących własności wyniku algorytmu stanowiące motywacje do wykorzystania konkretnej techniki.

Przytoczone powszechnie w literaturze techniki przetwarzania obrazów wykorzystano do budowy specyficznych i zorientowanych na konkretne zastosowanie algorytmów obliczających parametry kropli. Każdy z parametrów opracowany został na podstawie informacji uzyskanych od technologów huty szkła z Huty Szkła Orzesze w Orzeszu. Algorytm obliczeniowy w formie schematu blokowego uzupełniony został opisem tak, aby stworzyć nawiązanie do informacji przytoczonych w sekcji poświęconej celowi działania każdego z parametrów charakterystycznych. Ostatecznie, opisy wszystkich proponowanych deskryptorów zakończone są przykładem w postaci kropli szkła eksponującej istotne cechy mierzone przez dany parametr.

Stworzony system wizyjny ma formę aplikacji wyposażonej w graficzny interfejs użytkownika, działającej pod systemem Windows. Jest to niezależna aplikacja przyjmująca jako dane wejściowe zdjęcia spadających kropli szkła. Ponieważ dane wejściowe mogą cechować się znaczną różnorodnością związaną z pozycjonowaniem i ustawieniami aparatu fotograficznego wykorzystanego do wykonania zdjęć, jednym z głównych priorytetów branych pod uwagę podczas tworzenia kodu źródłowego było zapewnienie jak największej elastyczności i możliwości pracy na nieokreślonym z góry formacie zdjęć. Istotne parametry obliczeniowe można zmienić w łatwy sposób bezpośrednio z poziomu aplikacji. Interfejs użytkownika został dostosowany tak, aby zapewniać łatwy podgląd zarówno źródłowego obrazu kropli, jak i obrazów pośrednich otrzymywanych w trakcie obróbki mającej miejsce podczas obliczania parametrów

kropki szkła. Otrzymane wyniki można w łatwy sposób wyeksportować w formie pliku tekstowego aby można było je poddać dalszej analizie, stworzeniu statystyk i archiwizacji w narzędziach zewnętrznych.

Wyniki przeprowadzonych testów zamieszczono w rozdziale 5. Testy przeprowadzono bezpośrednio na stworzonej aplikacji, jednakże do analizy części otrzymanych wyników wykorzystano narzędzia w formie skryptów programu Matlab. Wykonane testy pozwalają ocenić potencjał i opłacalność wykorzystania zaproponowanego systemu wizyjnego przy jego obecnym kształcie parametrów kropli szkła. Choć analiza większości rezultatów prowadzi do zadowalających wniosków, to jednak przeprowadzone testy przyczyniły się do wykrycia wielu istotnych zagadnień i problemów praktycznych obserwowanych podczas normalnej pracy rzeczywistej instalacji hutniczej, które były bardzo trudne lub niemożliwe do przewidzenia w fazie projektowania systemu. Przeprowadzone testy spowodowały wniesienie kilku ulepszeń i poprawek do opracowanych algorytmów obliczania parametrów kropli w celu odniesienia się do i eliminacji zaobserwowanych problemów. Wnioski wynikające z przeprowadzonych testów zostały opisane szczegółowo w podrozdziale 5.3.

6.1. Trudności zrealizowanego projektu i ocena rezultatów

Szacowanie parametrów kropli szkła na podstawie jej obrazu jest zagadnieniem nowatorskim, które nie ma dostępnych powszechnych, gotowych rozwiązań szeroko zaadoptowanych w przemyśle. Przedstawiona praca pozwala ocenić możliwość realizacji takiego projektu i ocenić jego potencjalne możliwości. Bez wątpienia dużą wartość badawczą stanowi identyfikacja i omówienie nieoczywistych problemów praktycznych wynikających z działania rzeczywistej instalacji przemysłowej, gdzie panujące warunki są dalekie od laboratoryjnych.

Najważniejszym czynnikiem ułatwiającym obróbkę i gwarantującym powtarzalność wyników, jest zastosowanie odpowiednio krótkiego czasu naświetlania zdjęcia. Zdjęcia wykonywane są podczas spadku swobodnego kropeł, a więc podczas ich ruchu, zazwyczaj ze znaczną prędkością, wskutek którego dochodzi do otrzymania niewyraźnych fotografii. Zastosowanie krótkiego czasu naświetlania pozwala w zdecydowanym, zadowalającym stopniu wyeliminować ten efekt, ponieważ wówczas kropla nie zdąży pokonać długiego odcinka, przez co jej obraz nie ulega istotnemu rozciągnięciu. Ponieważ krople światła świecą intensywnym światłem własnym na skutek emisji termicznej, a hala produkcyjna stanowi ciemne pomieszczenie w którym panuje niemalże półmrok, uzyskanie dostatecznie kontrastowego obrazu możliwe jest nawet dla niewielkich wartości czasu ekspozycji. Przeprowadzone testy wykazały, iż wartość tej nastawy kamery nie powinna przekraczać 1/1000s.

Wyeliminowanie efektu rozmazania zdjęcia związanego ze zbyt długim czasem ekspozycji pozwala uzyskiwać powtarzalne, miarodajne wyniki parametru zgodności rozmiaru. Choć parametr ten mierzy rozmiar kropli w pikselach, to jednak uwzględniając stosunkowo regularny kształt kropli zbliżony do cylindra, możliwe jest ustanowienie relacji rozmiaru kropli na zdjęciu do jej objętości i masy. Objętość kropli jest jej najważniejszym parametrem, a jej powtarzalność i utrzymanie na pożądanym poziomie pozwala produkować normatywne butelki.

Parametr zgodności wypełnienia prostokąta opisanego pozwala mierzyć podobieństwo rzutu kropli do prostokąta. Dla większości zaobserwowanych kropli wartość ta ma powtarzalny charakter i również pozwala mierzyć powtarzalność produkcji. Z drugiej strony, dla kropeł których nie uda się prawidłowo rozdzielić od wyciekającej z głowicy strugi szkła, wartość tego parametru będzie różniła się od normy bardzo znacznie. Nieprawidłowo rozcięta kropla będzie ciągnęła się, przez co jej podobieństwo do prostokąta ulega bardzo znacznemu pogorszeniu.

Podczas prac nad tym parametrem udało się zaobserwować negatywny wpływ spadających kropeł wody lub też smaru używanych do konserwacji wyżej umieszczonych części instalacji. Krople te, spadając w otoczeniu kropli szkła mogą odbijać światło tworząc refleksy, które mogą być nieprawidłowo rozpoznane jako kropla szkła. Podobnie, niewielka kropla wody lub smaru przesłaniając zdecydowanie większą kroplę szkła obserwowana jest jako ciemniejsza plamka na jej powierzchni pogarszając jakość danych wejściowych. Wpływ i skalę tych zjawisk można było oszacować praktycznie na podstawie prototypowej aplikacji.

Na skutek nierównomiernego rozkładu temperatury szkła w głowicy może dochodzić do zakrzywienia kropel. Zjawisko to związane jest z bardzo silną zależnością lepkości kropli szkła od temperatury. W przypadku gdy roztopione szkło w głowicy posiada niejednorodny rozkład lepkości, nie wycieka ono przez całą szerokość otworu formującego równomiernym strumieniem, co powoduje zakrzywienie kropli. Efekt ten może skutkować odmierzaniem nieprawidłowej ilości szkła nie pozwalającej na wyprodukowanie normatywnej sztuki wyrobu powodując starty, a w ekstremalnych przypadkach, usterki i awarie instalacji. Efekt zniekształcenia kropli mierzony jest za pomocą parametru zakrzywienia bananowego, pozwalającego oszacować skalę zakrzywienia kropli i jej symetrię względem osi głównej. Przeprowadzone testy wykazały, iż parametr ten pracuje w sposób bardzo powtarzalny i niezależny od większości parametrów zewnętrznych, co pozwala sądzić, iż z powodzeniem mógłby on być wykorzystywany w systemach przemysłowych.

Ponieważ kropla szkła świeci światłem własnym na skutek emisji termicznej, przy wykorzystaniu odpowiedniej aparatury, można bezdotykowo mierzyć jej temperaturę. Na podstawie zdjęcia wykonanego normalnym aparatem fotograficznym można natomiast próbować szacować równomierność temperatury kropli na podstawie różnic w jasności świecenia poszczególnych obszarów kropli, lub też próbować wykrywać przedostanie się ciał obcych cechujących się inną wartością emisyjności. W praktyce, zagadnienie to okazało się bardzo trudne w realizacji z uwagi na niewielkie różnice w obrazie kropli i bardzo istotny wpływ przesłaniania kropli szkła przez mniejsze krople wody. Choć na niektórych przykładach da się zaobserwować prawidłowe działanie proponowanego wskaźnika, to jednak biorąc pod uwagę ogół otrzymanych wyników trzeba stwierdzić, iż parametr ten cechuje bardzo dużą wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne, przez co otrzymywane wyniki nie są zadowalająco powtarzalne i miarodajne.

6.2. Dalsze kierunki rozwoju pracy

W ramach projektu udało się stworzyć wygodną, dopasowaną do potrzeb aplikację stanowiącą prototyp rozbudowanego systemu przemysłowego. System ten działa w trybie off-line, jako dane wejściowe przyjmując pliki graficzne zawierające zdjęcia kropli szkła. Wykorzystanie proponowanego systemu w przemyśle wymagałoby stworzenia aplikacji działającej w trybie on-line, wykorzystującej na stałe zamontowaną kamerę przemysłową do akwizycji danych. System taki musiałby cechować się dużą szybkością obliczeń i niezawodnością oraz posiadać możliwość automatycznej synchronizacji z instalacją przemysłową. W celu zminimalizowania wpływu na resztę instalacji, korektę częstotliwości i fazy wykonywania zdjęć można przeprowadzać tylko na podstawie położenia kropli na wykonanym zdjęciu.

Działanie systemu w trybie on-line umożliwiłoby ciągły monitoring powtarzalności produkcji i wykrywanie odchyłek w pracy instalacji. Dostatecznie wczesne wykrycie i zgłoszenie w postaci alarmu niewielkich, aczkolwiek zauważalnych niezgodności z pożądanym charakterem pracy instalacji pozwoliłoby operatorowi przedsięwziąć odpowiednie akcje korekcyjne nie dopuszczając do pojawienia się większych problemów takich jak produkcja nienormatywnego wyrobu, chwilowe zatrzymanie produkcji czy też wystąpienia niektórych usterek i awarii.

Zbieranie i zapisywanie danych statystycznych w bazie danych pozwoliłoby na tworzenie okresowych raportów pracy instalacji ułatwiając kontrolę i utrzymanie wysokich standardów jakości produkcji. Taka funkcjonalność mogłaby okazać się wyjątkowo pomocna z perspektywy zarządzania produkcją.

Wyżej zaproponowane metody nie wymagają bezpośredniej ingerencji w istniejący system sterowania, przez co nie pogorszyłyby one w żaden istotny sposób niezawodności instalacji przemysłowej. Stworzony system miałby niezależny i równoległy charakter, dlatego też w przypadku zaobserwowania jego awarii, nie byłaby konieczna natychmiastowa naprawa i zatrzymanie wciąż prawidłowo pracującego głównego procesu produkcyjnego. Argument ten może mieć kluczowe znaczenie dla osób zarządzających hutą szkła, gdyż pozwala on zmniejszyć ryzyko związane z wdrożeniem innowacyjnego projektu.

Dalszy rozwój projektu mógłby polegać na integracji systemów sterujących tak, aby w przypadku wykrycia kropli w bardzo zdecydowany sposób odbiegającej od normy i stanowiącej istotne zagrożenie dla bezawaryjnej pracy maszyn, wykorzystać istniejące elementy wykonawcze do odrzucenia jej z dalszej części procesu i przekierować ją do ponownego przetworzenia razem ze stłuczką szklaną. U wlotu

do maszyny formującej zainstalowany jest mechaniczny odrzutnik, którego działanie jest na tyle szybkie, iż prawdopodobnie możliwe okazałoby się eliminowanie serii kropeł na podstawie ich obrazu i obliczonych w czasie rzeczywistym wartości parametrów. Należy jednak zauważyć, iż taka funkcjonalność jest zdecydowanie trudniejsza w implementacji, gdyż wymaga integracji z istniejącym systemem sterującym, a co za tym idzie również spełnienia restrykcyjnych norm niezawodności.

Tak zaprojektowany, w pełni zintegrowany system mógłby ułatwić zarządzanie produkcją w hucie szkła, jednocześnie zwiększając niezawodność i wydajność produkcji. Byłoby to innowacyjne rozwiązanie technologiczne pozwalające stosunkowo niewielkim kosztem korzystnie wpłynąć na charakter i poprawność pracy całej instalacji hutniczej.

Bibliografia

- [1] *OpenCV 2.4.6.0 documentation*. <http://docs.opencv.org/modules/refman.html>.
- [2] *QtDoc 5.0: Qt Reference Pages*. <http://qt-project.org/doc/qt-5.0/qt5doc/reference-overview.html>.
- [3] *Programming languages - C++*. ISO/IEC 14882, 2003.
- [4] *Najlepsze dostępne techniki (BAT). Wytyczne dla branży szklarskiej*. Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 2004.
- [5] J. A. Bolin. *Apparatus for transferring glass articles from an is to a high speed transfer conveyor*. U.S. Patent No 5,429,651, 1995.
- [6] G. Bradski, A. Kaehler. *Learning OpenCV*. O'Reilly, Beijing-Cambridge-Farnham-Koln-Sebastopol-Taipei-Tokyo, 2008.
- [7] J. W. Donnelly, R. S. Bracken. *Triple gob glass feeder*. U.S. Patent No 3,516,812, 1970.
- [8] J. Grębosz. *Symfonia C++ Standard. Programowanie w języku C++ Orientowane Obiektowo*. Editions 2000, Kraków, 2010.
- [9] R. T. Kirkman. *Multiple gob glass feeder system and method of operation*. U.S. Patent No 4,305,747, 1981.
- [10] C. W. Kulig. *Straight line glass gob shear*. U.S. Patent No 4,813,994, 1989.
- [11] R. Laganière. *OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook*. Packt Publishing, 2011.
- [12] G. L. Miller, C. Sullivan. Machine-made glass containers and the end of production for mouth-blown bottles. *HISTORICAL ARCHAEOLOGY*, 1984, 83-96.
- [13] E. H. Mumford, J. I. Perry. *Electronic control of a glass forming machine*. U.S. Patent No 4,427,431, 1984.
- [14] C. P. Ross, G. L. Tincher. *Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment*. Glass Manufacturing Industry Council, 2004.
- [15] P. Rotter, A. Skowiniak. *Image-based analysis of the symmetry of the glass melting process*. *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A*, 2013, 54.3: 119-131.
- [16] W. H. Ryan. *Method and apparatus for measuring the volume and shape of a glass gob*. U.S. Patent No 4,205,973, 1980.
- [17] R. Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, 2010.
- [18] R. Tadeusiewicz, P. Korohoda. *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Kraków, 1997.
- [19] J. Thelin. *Foundations of Qt Development*. 2007.