

Mirosław Jabłoński*, Daniel Pocięcha**

Automatyczna anotacja znaczników sztyftowych w procesie walcowania pielgrzymowego rur na zimno

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Jednym z obszarów zastosowań współczesnych systemów wizyjnych oraz metod przetwarzania i analizy obrazu są szeroko rozumiane systemy pomiarowe. Połączenie fotogrametrii, techniki pomiarowych, obliczeniowych i metod akwizycji cyfrowego sygnału wizyjnego charakteryzuje się szeregiem pożądanych cech takich, jak bezinwazyjność, powtarzalność oraz szybkość działania. Właściwości te są szczególnie istotne zarówno w diagnostyce medycznej, geodezji, jak i w różnych gałęziach przemysłu (pomiar odkształceń i przemieszczeń obiektów, kontrola jakości).

W niniejszym artykule zostaną przedstawione wyniki prac mających na celu automatyczną detekcję i lokalizację markerów w próbce materiału poddawanego obróbce plastycznej na zimno. Ostatecznym celem pomiarów dokonywanych podczas walcowania jest jednak rekonstrukcja trójwymiarowej siatki punktów pomiarowych z sekwencji obrazów 2D za pomocą technik fotogrametrii. Powodzenie takiej metody pomiaru położenia punktu w przestrzeni 3D uzależnione jest od precyzji oraz powtarzalności lokalizacji punktów charakterystycznych na obrazach źródłowych. W przypadku manualnej lokalizacji i anotacji markerów trudne jest utrzymanie precyzji dla dużych zbiorów punktów. Założono, że proponowany automatyczny system pozwoli utrzymać stałą jakość pomiaru przy znacznie większej szybkości obróbki obrazów próbki uzyskanych na kolejnych etapach walcowania metalu.

1.2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe, szczegóły procesu technologicznego oraz model odkształceń zostały przedstawione w publikacjach [3, 4]. W procesie obróbki plastycznej rur istotną

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

** Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

rolę odgrywa walcarka pielgrzymowa składająca się z walców i ruchomego trzpienia, na którym zamocowany jest obrabiany materiał. Trzpień z próbką materiału wykonuje ruch posuwisto-zwrotny i obrotowy. Urządzenie może być zatrzymane na dowolnym etapie walcowania celem dokonania pomiaru odkształceń.

Kluczowym elementem stanowiska pomiarowego jest aparat fotograficzny wysokiej rozdzielczości umieszczony na ruchomym statywie. Obejmuje on w kadrze próbkę walcowanego materiału oraz planszę referencyjną w tle. Na planszy naniesione są znaczniki referencyjne. Po każdym etapie walcowania wykonywane są dwie fotografie w różnych położeniach statywu.

Walcowana próbka metalu ma postać grubościennego cylindra, w którym zamocowane są markery w postaci sztyftów miedzianych kontrastujących barwą w stosunku do powierzchni metalu próbki. Trójwymiarowa rekonstrukcja położenia sztyftów w oparciu o punkty na planszy referencyjnej pozwala śledzić proces odkształcania materiału, jednak konieczne jest wcześniej określenie położenia każdego z nich na dwóch zdjęciach. Łączna liczba punktów koniecznych do wyznaczenia na dwóch obrazach wynosi około 500, a czas potrzebny na ręczne wskazanie lokalizacji punktów to ok. 3 godziny. Założono pokrycie całej powierzchni próbki i 8 etapów walcowania, zatem szacowany całkowity czas anotacji punktów pomiarowych i referencyjnych na wszystkich obrazach wynosi 36 dni roboczych jednego specjalisty. Dla porównania: czas walcowania na prototypowym urządzeniu wynosi ok. 30 minut. Uzasadniona jest zatem próba automatyzacji wyznaczania punktów referencyjnych na planszy oraz punktów pomiarowych na próbce.

1.3. Akwizycja obrazów

Sekwencje obrazów do detekcji i lokalizacji znaczników zostały pobrane za pomocą aparatu fotograficznego Canon 50D. Aby umożliwić precyzyjne badanie próbek o dużym rozmiarze obrazu, mają rozdzielczość 4752×3168 pikseli. Pomimo wielu zabiegów mających na celu zagwarantowanie dobrej jakości obrazu (dedykowane oświetlenie, filtr polaryzacyjny), na zdjęciach pojawiają się zakłócenia w postaci odbłyśków od planszy kalibracyjnej. Refleksy obecne są również na metalicznej powierzchni rury. Ulega ona cyklicznym deformacjom plastycznym w procesie walcowania, a sama próbka jest przemieszczana i obracana podczas kolejnych pomiarów. Dodatkowo, następuje zmiana położenia aparatu fotograficznego. Wszystko to powoduje, że obraz obszaru próbki zawiera drastyczne zmiany jasności. Utrudniają one ręczny proces lokalizacji markerów oraz komplikują algorytmy detekcji w przypadku automatycznej lokalizacji.

2. Automatyczna detekcja znaczników

Wstępna analiza sekwencji obrazów zebranych podczas procesu walcowania pozwoliła określić kluczowe etapy procesu detekcji i lokalizacji znaczników na próbce:

- segmentacja obszaru planszy referencyjnej,
- segmentacja obszaru walcowanej próbki w obszarze planszy referencyjnej,
- segmentacja miedzianych znaczników sztyftowych w obszarze próbki.

Znaczniki referencyjne w postaci czarnych pierścieni naniesionych na planszę kalibracyjną nie ulegają odkształceniom ani przemieszczeniom w procesie walcowania metalu. Ich automatyczna lokalizacja jest możliwa z wykorzystaniem standardowych funkcji dostępnych w przyborkach pakietu Matlab [13]. Zagadnienia związane z ich wyznaczeniem zostały opisane w odrębnym opracowaniu [3].

Każdy z wymienionych rodzajów obiektów (plansza, próbka, znacznik) cechuje się odmiennymi własnościami topologicznymi, rozkładem barw i jasności. Cechy pożądane w segmentacji jednego z obiektów stanowią utrudnienie w wyznaczeniu innych. Na przykład duża jasność planszy kalibracyjnej ułatwia odrzucenie obszarów odpowiadających elementom walcarki. Jednocześnie, refleksy pojawiające się na powierzchni próbki objawiają się barwą i jasnością podobnymi do obszaru planszy. Duża rozdzielczość obrazu źródłowego jest pożądana ze względu na precyzję wyznaczania punktów pomiarowych. Z wielkim rozmiarem pliku wejściowego wiąże się jednak duża ilość obliczeń.

Z racji na duży rozmiar obrazów wejściowych (15 megapikseli) prace projektowe nad algorytmem automatycznej detekcji markerów rozpoczęto od prób zastosowania prostych operacji przetwarzania i analizy obrazów. Zastosowano filtry liniowe, operacje morfologiczne, algorytmy binaryzacji adaptacyjnej oraz indeksację. Kluczową rolę w automatyzacji segmentacji na wszystkich wymienionych etapach odrywa algorytm segmentacji. Przebadane zostały następujące metody:

- 1) binaryzacja ze stałym progiem,
- 2) binaryzacja oparta o analizę histogramu metodą Otsu,
- 3) binaryzacja lokalna z uśrednianiem,
- 4) binaryzacja lokalna z rozmyciem filtrem Gaussa.

Metoda pierwsza wymaga ręcznego ustalenia progu binaryzacji przez operatora. Dla zgromadzonych sekwencji, czynność ta powinna być wykonana dla każdego obrazu oddzielnie ze względu na zmienność poziomów jasności obrazu. Lokalne zakłócenia obrazu w postaci cieni lub refleksów dyskwalifikują tę metodę ze względu na defekty powstające z tego powodu w obiektach.

Metoda druga, opisana przez Otsu w publikacji [5], bazuje na analizie histogramu. Zastosowane tam podejście statystyczne nie uwzględnia jednak zależności topologicznych. Wiąże się z tym ryzyko segmentacji obiektów pozornych dla obszarów zawierających gradienty jasności.

Metoda trzecia i czwarta polegają na wyznaczeniu obrazu pomocniczego przez zastosowanie filtru uśredniającego lub konwolucję filtrem Gaussa o określonym rozmiarze

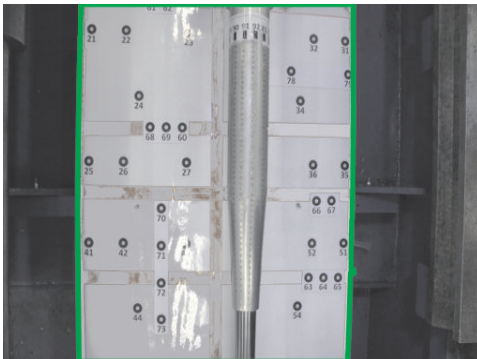
kontekstu [8]. Progowanie różnicy obrazu pomocniczego i źródłowego ze stałą wartością progu pozwala uzyskać obraz wynikowy uwzględniający nie tylko informacje o jasności pikseli, ale również ich otoczenie i topologiczne zależności. Jest to pożądane ze względu na ustalony kształt planszy i niewielką zmienność kształtu i orientacji próbki.

Nie bez znaczenia jest również dobór przestrzeni barwej do przeprowadzenia segmentacji poszczególnych typów obiektów. Szeroki przegląd różnych sposobów reprezentacji i segmentacji obrazów barwnych zamieszczono w opracowaniu [9]. Przydatność alternatywnych reprezentacji została potwierdzona praktycznie we wcześniejszych pracach [6, 7]. Wejściowy obraz kodowany jest w przestrzeni RGB (*Red Green Blue*). W detekcji obszaru planszy oraz obszaru próbki korzystna jest reprezentacja w poziomach szarości (luminancja). Duże zmiany jasności w obszarze próbki wymuszają zastosowanie reprezentacji HSV (*Hue, Saturation, Value*). Dokonano również wstępnych testów segmentacji z wykorzystaniem różnicowej reprezentacji barwej YCrCb. Rezultaty nie były jednak zadowalające ze względu na znaczący wpływ komponentu luminancji Y, który jak wspomniano, cechuje się dużą zmiennością. Konwersja obrazu RGB do reprezentacji HSV charakteryzuje się dużą złożonością obliczeniową, co utrudnia jej wykorzystanie w systemach czasu rzeczywistego o dużej przepustowości. W opisywanym systemie anotacji znaczników nie występuje jednak ograniczenie co do czasu obliczeń, ponieważ obrazy przetwarzane są po zakończonym walcowaniu.

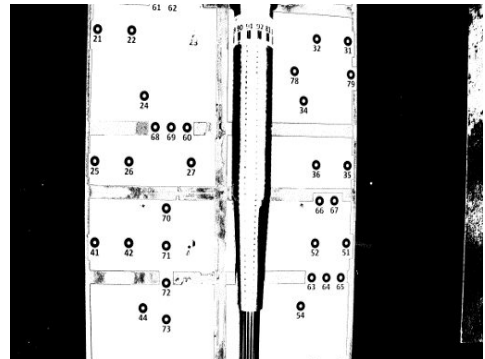
2.1. Segmentacja planszy referencyjnej

Celem tego etapu jest wydzielenie obszaru planszy kalibracyjnej, jak zaprezentowano na rysunku 1.

a)



b)



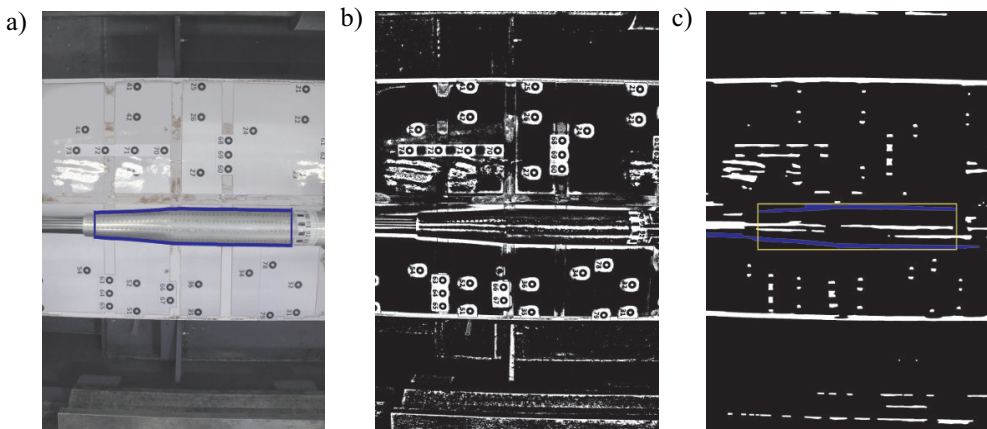
Rys. 1. Rezultaty segmentacji obszaru planszy referencyjnej z próbką na pierwszym planie:

- a) zielony kontur oznacza automatycznie wyznaczony obrys planszy referencyjnej;
- b) wynik binaryzacji adaptacyjnej z filtrem uśredniającym o rozmiarze 4097

Zajmuje ona znaczną część powierzchni obrazu. Podjęto próbę segmentacji metodą binaryzacji ze stałym progiem, jednak metoda ta nie dała dobrych efektów. Przyczyną były odbłyски i gradienty jasności oraz cienie powstające w otoczeniu próbki. Obszar maszyny walcującej pozostaje ciemny pomimo zastosowania dodatkowego oświetlenia. Dzięki temu możliwe stało się oddzielenie obszaru białej planszy od elementów walcarki za pomocą algorytmu binaryzacji lokalnej z uśrednianiem. Zastosowanie adaptacyjnej binaryzacji nie usuwa jednak znaczników naniesionych na planszy referencyjnej. Również punkty odpowiadające ciemnym obszarom powierzchni próbki w regionach brzegowych klasyfikowane są jako piksele należącego tła, a nie do planszy. Konieczne zatem okazało się dalsze przetwarzanie wyniku binaryzacji lokalnej celem zapewnienia integralności obszaru planszy. Wykorzystano tutaj operacje zamknięcia morfologicznego, które zalewa puste obszary znajdujące się wewnątrz dużych obiektów lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Dobór kształtu i rozmiaru elementu strukturalnego został dokonany w oparciu analizę defektów zaobserwowanych w wynikowym obrazie binaryzacji.

2.2. Segmentacja odkształcanej próbki

Kolejnym etapem po lokalizacji obszaru planszy referencyjnej jest segmentacja obszaru próbki przedstawiona na rysunku 2. Walcowana rura znajduje się w okolicach środka planszy dzieląc ją na dwie części. Mając wyznaczony obiekt planszy można więc zawęzić obszar poszukiwań próbki do centralnego wycinka planszy. W zgromadzonych sekwencjach wizyjnych początkowa długość próbki stanowi ok. 1/3 wysokości obrazu, zaś w końcowej fazie osiąga całkowitą wysokość obrazu. Znajomość tych proporcji ułatwia wskazanie obszaru próbki spośród wielu obiektów widocznych w obrazie binarnym.



Rys. 2. Segmentacja obszaru próbki: a) niebieski kontur opisuje obszar walcowanej próbki; b) wynik binaryzacji adaptacyjnej z filtrem uśredniającym o rozmiarze 101; c) obszary wydzielone za pomocą mediany i operacji morfologicznych – niebieskie obiekty spełniają kryteria krawędzi próbki

Podobnie jak w poprzednim przypadku zastosowano metodę binaryzacji lokalnej z uśrednianiem. Ze względu na dużą zmienność jasności w obszarze próbki metoda ta nie daje wprawdzie spójnego obszaru próbki w obrazie wynikowym, jednak pozwala na precyzyjne wydzielenie obszarów granicznych planszy, które sąsiadują z próbką. Oprócz rzeczywistych krawędzi pojawiają się obiekty spowodowane odbiciem światła od tych części próbki które są prostopadłe do osi optycznej kamery. Dlatego konieczna jest dalsza obróbka obrazu za pomocą następujących operacji:

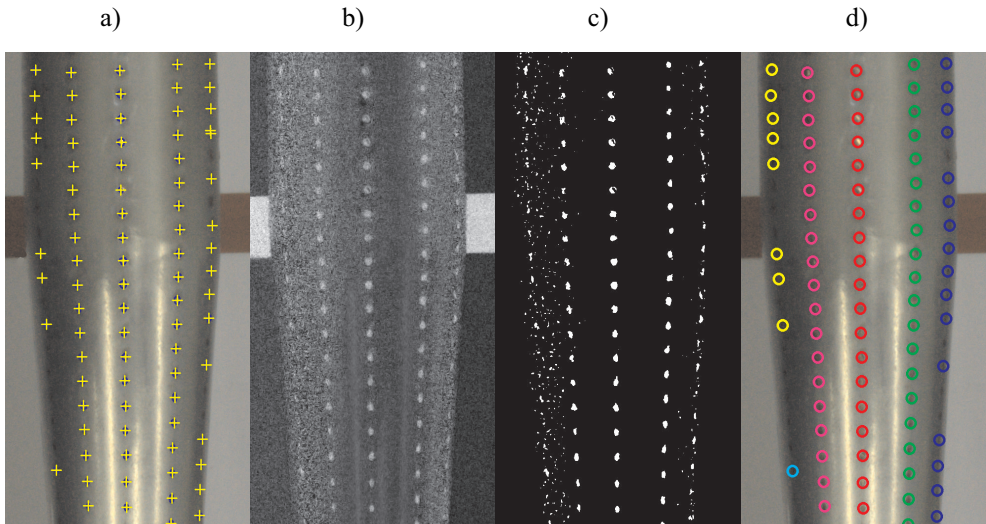
- mediana,
- erozja eliptycznym elementem strukturalnym o rozmiarach 45×9 pikseli,
- erozja i dylatacja kołowym elementem strukturalnym.

Wydzielenie obszaru próbki polega na lokalizacji dwóch najdłuższych obiektów w środkowym obszarze planszy kalibracyjnej (obszary oznaczone kolorem niebieskim na rys. 2c). Obiekty te odpowiadają podłużnym krawędziom próbki. Dla każdego obiektu wyznaczane są dwa najbardziej skrajne punkty. Na ich podstawie określany jest prostokąt opisujący (żółte linie na rys. 2c). Ostatecznie, obszar próbki określony jest poprzez prostokąt opisujący oraz kontury znajdujące się najbliżej środka prostokąta opisującego.

2.3. Segmentacja znaczników sztyftowych

W odróżnieniu od poprzednich etapów, segmentacja obszaru markerów na powierzchni próbki została przeprowadzona z wykorzystaniem reprezentacji obrazu barwnego w przestrzeni HSV. Odcień koloru miedzianego sztyftu (składowa *Hue*) kontrastuje wyraźnie z metaliczną barwą próbki o kolorze szarym. Ze względu na małą średnicę minimalną sztyftów w końcowej fazie walcowania, poziom szumów składowej H utrudnia ich segmentację przy pomocy binaryzacji ze stałym progiem. Okazuje się jednak, że zupełnie wystarczająca jest informacja o nasyceniu (składowa *Saturation*), ale pod warunkiem zastosowania binaryzacji adaptacyjnej. Wprawdzie tutaj również występują szумы, jednak mają one charakter punktowy i w obszarze znacznika są mniejsze niż na powierzchni próbki.

Zastosowanie takiej metody powoduje sporadyczną segmentację pozornych obiektów w obszarze próbki, jednak tylko w miejscach, gdzie występują refleksy świetlne lub bezpośrednio na krawędzi obszaru próbki. Niektóre z tych obiektów są automatycznie usuwane na etapie analizy kształtu i pola powierzchni. Występują również sytuacje, kiedy pojedyncze znaczniki nie pojawiają się w obrazie wynikowym, jak to widać na rysunku 3. Zdarza się to w obszarach niskiej jasności, gdzie poziom nasycenia jest bardzo mały, a znaczniki są mocno odkształcone.



Rys. 3. Wyniki analizy punktów pomiarowych: a) żółte znaczniki punktów naniesione na obraz źródłowy; b) składowa S (nasycenie) obrazu wejściowego w reprezentacji HSV; c) wynik binaryzacji adaptacyjnej składowej S z filtracją Gaussa; d) wyniki anotacji punktów pomiarowych kolory znaczników odpowiadają różnym kolumnom

2.4. Obliczanie koordynat punktów pomiarowych w obrazie źródłowym

Rezultatem działania algorytmu jest zbiór koordynat punktów pomiarowych w przestrzeni 2D. Obiekty odpowiadające miedzianym sztyftom poddane operacjom morfologicznym pojawiają się w obrazie wynikowym jako wypukłe obszary o gładkich i ciągłych krawędziach. Wzorując się na opracowaniach [1] i [11], jako miarę lokalizacji punktu pomiarowego wybrano środek ciężkości określony równaniem (1). Jest on określony poprzez momenty zerowego i pierwszego rzędu dla każdego obiektu w obrazie oddzielnie, zgodnie z definicją (2).

$$X = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad Y = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (1)$$

gdzie:

- X, Y – współrzędne punktu pomiarowego w obrazie,
- m_{01}, m_{10} – momenty pierwszego rzędu.
- m_{00} – moment zerowego rzędu, pole powierzchni obiektu.

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M x^p y^q P_{xy} \quad (2)$$

gdzie:

m_{pq} – moment rzędu pq ,

P_{xy} – wartość piksela obiektu P w obrazie dla współrzędnych (x, y) ,

N – rozmiar poziomy obrazu,

M – rozmiar pionowy obrazu.

Koordinaty rastra analizowanego obrazu są wartościami całkowitymi, jednak momenty wyznaczone są w formacie zmiennoprzecinkowym podwójnej precyzji. Współrzędne wynikowych punktów pomiarowych mają więc rozdzielczość subpikselową, przez co można się spodziewać, że bezwzględny błąd wyznaczania pozycji punktu pomiarowego w przestrzeni rastra obrazu źródłowego jest mniejszy niż rozmiar jednego piksela. Rekonstrukcja współrzędnych punktów w przestrzeni 3D dokonywana jest za pomocą dodatkowego oprogramowania, które uwzględnia korekcję zniekształceń obiektu. Wizualizacja wyznaczonych punktów pomiarowych została przedstawiona na rysunku 3a.

2.5. Anotacja punktów pomiarowych

Wykonanie rekonstrukcji położenia punktów pomiarowych w przestrzeni trójwymiarowej wymaga ich jednoznacznej identyfikacji i dopasowania [2]. W każdym obrazie zebranych po danym etapie obróbki punkty muszą mieć przypisane etykiety, które są unikatowe i niezmiennie w całym procesie plastycznej obróbki metalu. Na rysunku 3a widać, że znaczniki sztyftowe zorganizowane są w kolumny zarówno w obszarach odkształconych, jak i niezdeformowanych. Najprostszą metodą etykietowania punktów pomiarowych jest zatem przypisanie każdemu punktowi identyfikatora kolumny i wiersza, wyznaczonych za pomocą kontekstowej analizy wyznaczonych punktów pomiarowych. Na rysunku 3d przedstawiono wyniki identyfikacji kolumn punktów pomiarowych. Etykiety punktów oraz ich współrzędne zapisywane są w pliku tekstowym. Wraz z wynikami anotacji punktów referencyjnych oraz danymi kalibracyjnymi optyki aparatu fotograficznego stanowią wystarczający zbiór danych do rekonstrukcji trójwymiarowego kształtu próbki.

3. Analiza wyników

Prace projektowe i implementacyjne wykonano na komputerze klasy PC z procesorem Intel Pentium T5600 1.83GHz. Wykorzystano procedury biblioteki OpenCV [10] w wersji 2.1. Aplikacja programowa została napisana w języku C/C++. Wyniki testów wybranych algorytmów binaryzacji adaptacyjnej w trzech etapach segmentacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Wyniki filtracji adaptacyjnej

Obiekt/ rozmiar	Metoda binaryzacji	Rozmiar kontekstu	Czas w sekundach	Jakość rezultatu**	Uwagi
Plansza 2500×3000	uśrednianie	4097	5.3	dobra	
	filtr Gaussa	4097	709.9	niska	
	Otsu	–	0.2	dobra	artefakty*
Próbka 400×3000	uśrednianie	101	1.7	dobra	
	filtr Gaussa	101	17.5	niska	
	Otsu	–	0.2	niska	artefakty*
Sztyfty 15×15	uśrednianie	50	2.1	dobra	
	filtr Gaussa	50	9.2	dobra	
	Otsu	–	0.6	niska	artefakty*

* Artefakty pojawiają się dla niepoprawnego obrazu wejściowego: brak planszy w obszarze obrazu lub brak próbki obszarze planszy.

** Kryterium oceny jakości rezultatu binaryzacji stanowi liczba defektów w obiektach i liczba błędnych klasyfikacji pikseli. Jakość została określona jako niska, jeżeli za pomocą dodatkowych operacji morfologicznych lub mediany nie było możliwe poprawne odtworzenie kształtu analizowanego obiektu.

3.1. Porównanie wyników działania binaryzacji adaptacyjnej

Ze względu na czas obliczeń najbardziej korzystna wydaje się metoda Otsu, jednak istnieje ryzyko wyodrębnienia pozornych obiektów w obrazie. Dzieje się tak, gdy obraz wejściowy charakteryzuje się małym kontrastem. Taka sytuacja może zajść również, gdy w kadrze kamery nie będzie planszy. Wówczas najjaśniejsze obszary zostaną wskazane jako rezultat segmentacji. Wady tej nie wykazuje binaryzacja lokalna, lecz rodzaj uśredniania wpływa istotnie na czas realizacji obliczeń oraz jakość wyniku, która również zależy od rodzaju filtracji. Większa szybkość metody uśredniającej w stosunku do tej z filtracją Gaussa wynika z braku konieczności wykonania konwolucji. Wydaje się, że dobór rodzaju filtracji powinien być uzależniony od kształtu obiektu, który jest poddawany segmentacji. Próbka o kształcie zbliżonym do prostokątnego jest dobrze segmentowana przez binaryzację adaptacyjną z uśrednianiem w oknie kwadratowym o rozmiarze 101. Użycie filtracji Gaussa odwzorowującej kształt kolisty daje lepsze rezultaty w binaryzacji okrągłych i owalnych znaczników na próbce. Przewaga binaryzacji lokalnej nad algorytmem Otsu objawia się w wykorzystaniu kontekstu przestrzennego, który pozwala uwzględnić nie tylko właściwości statystyczne, ale również topologiczne.

Niezależnie od wydajności zastosowanej metody binaryzacji, znaczą część czasu realizacji algorytmu automatycznej anotacji punktów pomiarowych zajmują pozostałe operacje. Należą do nich głównie operacje morfologiczne z elementami strukturalnymi dużych rozmiarów (np. 51×151).

3.2. Testowanie i weryfikacja algorytmu

Sekwencja obrazów testowych została zgromadzona z wykorzystaniem tablicy referencyjnej przygotowanej do manualnej anotacji punktów charakterystycznych, przez co znajdują się na niej pasy czerwonej taśmy spinającej poszczególne części planszy. Plansza referencyjna do automatycznej segmentacji lokalizacji markerów będzie ich pozbawiona, ponieważ zakłócają one proces segmentacji obszaru próbki. Pozostałe procedury nie są wrażliwe na ten typ zakłócenia. Każdorazowa zmiana organizacji planszy, a zwłaszcza lokalizacji punktów bazowych, wymaga precyzyjnego pomiaru, który jest pracochłonny. Do celów testowania aplikacji, z sekwencji obrazów testowych ręcznie usunięto te obszary przy pomocy programu do obróbki grafiki rastrowej Gimp [12]. W okolicy próbki, kolor czerwony zastąpiono kolorem planszy za pomocą narzędzia *Wypełnienie*.

4. Podsumowanie

Z opisanych w artykule prac wynika, iż jest możliwe przeprowadzenie automatycznej detekcji i lokalizacji znaczników sztyftowych w próbce materiału odkształcanego na zimno. Pomimo zakłóceń występujących w sekwencji analizowanych obrazów wejściowych, możliwe było zaprojektowanie i zaimplementowanie algorytmu, który dokonuje automatycznej segmentacji obszaru planszy referencyjnej, powierzchni próbki oraz wskazania punktów pomiarowych na próbce. Podczas analizy zgromadzonych sekwencji obrazów nie jest wymagana modyfikacja parametrów algorytmu. Zmiana warunków akwizycji obrazu (ekspozycja, oświetlenie, ustawienia obiektywu) wymaga jednak weryfikacji i ewentualnie dostrojenia parametrów, zwłaszcza w zakresie rozmiarów okien kontekstu i rozmiarów próbki.

Wynik zaproponowanej automatycznej detekcji punktów pomiarowych nie jest wolny od błędów, a system wymaga dalszych testów. Jednostkowe punkty nie są wykrywane lub wykrywane są punkty pozorne. W końcowej fazie obróbki danych przed rekonstrukcją w przestrzeni 3D, błędy te są korygowane przez użytkownika za pomocą dedykowanej aplikacji opisanej w [3]. Największa liczba braków detekcji lub błędnych detekcji punktów pomiarowych pojawia się na zewnętrznych obszarach próbki. Rozwiązanie tego problemu będzie przedmiotem dalszych prac. Rozważane jest również pominięcie tych obszarów w analizie ze względu na duży błąd pomiaru lokalizacji punktów, które leżą na powierzchniach stycznych do osi optycznej obiektywu. Podczas zbierania sekwencji obrazów próbka jest obracana, więc istnieje możliwość ustawienia takiego ustawienia próbki, aby każda kolumna punktów pomiarowych była dobrze widoczna. Celem dalszych prac będzie weryfikacja algorytmu dla większego zbioru sekwencji obrazów i określenie warunków, w jakich daje on poprawne akceptowalne rezultaty.

Łączny czas segmentacji znaczników i lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchni próbki dla jednej pary obrazów za pomocą zaimplementowanego prototypu aplikacji programowej wynosi 150 sekund. Stanowi to niespełna 3% czasu przewidzianego na manualną anotację wykonywaną przez specjalistę.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Studentom, Panu Tomaszowi Karasiowi i Panu Robertowi Kosowi, którzy przyczynili się do powstania tej pracy przeprowadzając testy i badając wybrane metody porządkowania wykrytych znaczników. Praca była współfinansowana z umowy AGH 10.10.120.783.

Literatura

- [1] Costa L., Roberto M., *Shape analysis and classification: theory and practice*. Image processing series, CRC Press, 2001.
- [2] Hartley R., Zisserman A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge, UK: Cambridge, University Press, 2000.
- [3] Pociecha D., Jabłoński M., *Stanowisko wizyjnego śledzenia odkształceń metalu w procesie obróbki plastycznej na zimno*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 14, z. 3/1, 2010, 453–465.
- [4] Osika J., Palkowski H., Świątkowski K., Pociecha D., Kula A., *Analysis of material deformation during the new cold tube rolling process realized on the new generation of pilger mills*. Archive of Metallurgy and Materials, vol. 54, 2009, 1239.
- [5] Otsu N., *A threshold selection method from gray-level histograms*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 9, issue 1, 1979, 62–66 doi:10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [6] Mikrut Z., Dupłaga M., *Wykrywanie krwi na obrazach bronchoskopowych za pomocą sieci neuronowych*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 13 z. 3, cz. 2, 2009, 1377–1386.
- [7] Przybyło J., Jabłoński M., Wołoszyn P., *Automatyczna segmentacja twarzy dla potrzeb interfejsu człowiek-komputer*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 9, z. 3, 2005, 587–600.
- [8] Russ J., *The image processing handbook*. CRC Press, 2002.
- [9] Skarbek W., *Segmentation of colour images*. PWN, 1994.
- [10] <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>.
- [11] Tadeusiewicz R., Korohoda P., *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997.
- [12] <http://www.gimp.org>.
- [13] <http://www.mathworks.com/image-video-processing>.