

FOTOGRAMETRYCZNY POMIAR ELEMENTÓW WALCOWANYCH

PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT OF ROLLED ELEMENTS

Regina Tokarczyk¹, Katarzyna Skoczek²

¹Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²Absolwentka Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria bliskiego zasięgu, cyfrowy aparat fotograficzny, przetwarzanie obrazów, automatyczny pomiar na obrazach cyfrowych.

STRESZCZENIE: Opracowanie fotogrametrycznej metody pomiaru służącego wyznaczeniu przemieszczeń i odkształceń elementów walcowanych przeprowadzono w ramach międzynarodowego projektu prowadzonego przez Katedrę Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych AGH pt.: „Badanie płynięcia materiału w procesie walcowania pielgrzymowego na zimno”. Badania nowego procesu walcowania pielgrzymowego prowadzone są na modelu fizycznym walcarki pielgrzymowej. Doświadczenia wykonywane są na materiałach niemetalicznych (plastelina, woski), i metalicznych (ołów, aluminium). Celem pracy jest opracowanie metody pomiaru służącego wyznaczeniu odkształcenia materiału walcowanego z plasteliny, mającego przed walcowaniem kształt wydrążonego walca, a w trakcie walcowania - stożka ściętego. Jako metodę pomiaru zaproponowano wcięcie w przód z dwu zdjęć zbieżnych o znanej orientacji wewnętrznej i zewnętrznej, po procesie orientacji wzajemnej i bezwzględnej. Do rejestracji obrazów wykorzystano skalibrowaną cyfrową lustrzankę Nikon D80, z matrycą 10 megapikseli oraz stałogniskowym obiektywem Sigma EX DG 20/1,8. Wykonano próbę automatyzacji pomiaru sygnałów na elemencie walcowanym z użyciem narzędzi programu Matlab. Przetestowano dwie metody pomiaru: filtracji regionów do detekcji markerów i wagowanego środka ciężkości do pomiaru ich centrów oraz alternatywnie metodę wieloetapowego ścieniania na zbinaryzowanym obrazie.

1. WSTĘP

Wśród wielu zastosowań inżynierskich fotogrametrii często spotyka się pomiary 3D fizycznych modeli procesów przemysłowych. Bezkontaktowość pomiarów, archiwizacja danych pomiarowych, możliwość badania różnorodnych zjawisk oraz przy zastosowaniu rejestracji cyfrowej – automatyzacja i pomiar *real-time* - czynią metody fotogrametryczne bezkonkurencyjnymi w porównaniu do innych metod. W badaniach modelowych oczekiwane dokładności pomiaru są zwykle wysokie, zwłaszcza w przypadku analiz dokonywanych na podstawie modeli pomniejszych w porównaniu do rzeczywistej wielkości (Wong *et al.*, 1978), (Gutu, 1978), (Tokarczyk *et al.*, 1981), (Tokarczyk, 1990). Dokładności takie z powodzeniem są uzyskiwane przy użyciu kamer niemetrycznych, w tym aparatów fotograficznych, których zalety: relatywnie niska cena, duży zakres ogniskowania i coraz większa rozdzielczość geometryczna spowodowały,

że w fotogrametrii bliskiego zasięgu są podstawowym narzędziem rejestracji fotograficznej.

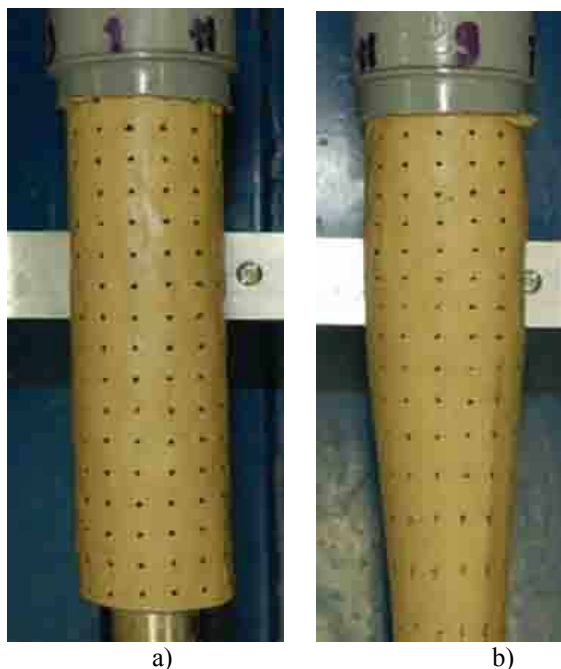
Jednym z ważniejszych problemów do pokonania na drodze uzyskania wysokich dokładności jest problem sygnalizacji mierzonego obiektu. Wystąpił on w opisanym poniżej zagadnieniu: wyznaczeniu przemieszczeń i odkształceń elementów walcowanych. Badania przeprowadzono w ramach międzynarodowego projektu prowadzonego przez Katedrę Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych AGH pt.: „Badanie płynięcia materiału w procesie walcowania pielgrzymowego na zimno”.

2. CHARAKTERYSTYKA MIERZONEGO OBIEKTU

Celem projektu jest analiza nowej koncepcji procesu walcowania pielgrzymowego rur miedzianych na zimno. Pielgrzymowanie rur na zimno jest jedną z najbardziej zaawansowanych technologii wytwarzania rur miedzianych. Metoda ta pozwala uzyskać rury o znakomitej jakości powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej oraz o bardzo dobrych właściwościach fizycznych i mechanicznych. Przy użyciu nowej metody osiąga się odkształcenia całkowitego elementu walcowanego w procesie walcowania dochodzące do 95%. Konieczne są zatem badania wpływu procesu walcowania na wielkość tych odkształceń oraz zachowanie się materiału poddanego walcowaniu.

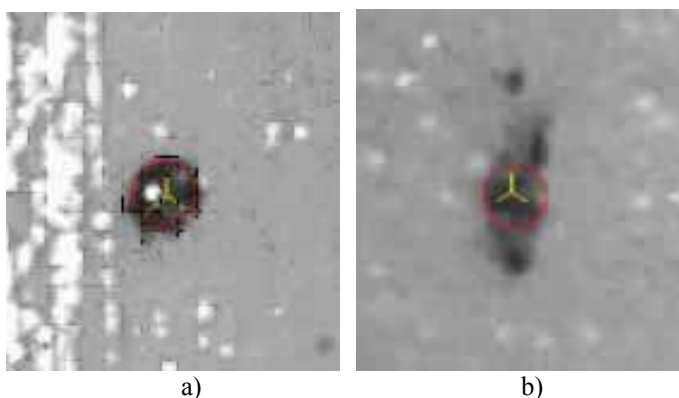
Badania te prowadzone są na modelu fizycznym walcarki pielgrzymowej nowej generacji w laboratorium Katedry Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych AGH. Pierwsze doświadczenia były prowadzone na materiałach niemetalicznych (plastelina, woski), a w końcowej fazie na materiałach metalicznych (ołów, aluminium). Zaproponowana metoda pomiaru służy do wyznaczenie odkształcenia materiału walcowanego z plasteliny, mającego przed walcowaniem kształt wydrążonego walca, a w trakcie walcowania - stożka ściętego (rys. 1).

Odształcany materiał w procesie walcowania wykonuje ruchy posuwisto-zwrotne i jest obracany dookoła osi prowadnika, na którym się znajduje. Zatem w poszczególnych fazach procesu nie tylko jest odkształcany, ale zmienia swoje położenie, co należy uwzględnić przy obliczaniu odkształceń z różnic położenia punktów na walcowanym elemencie.

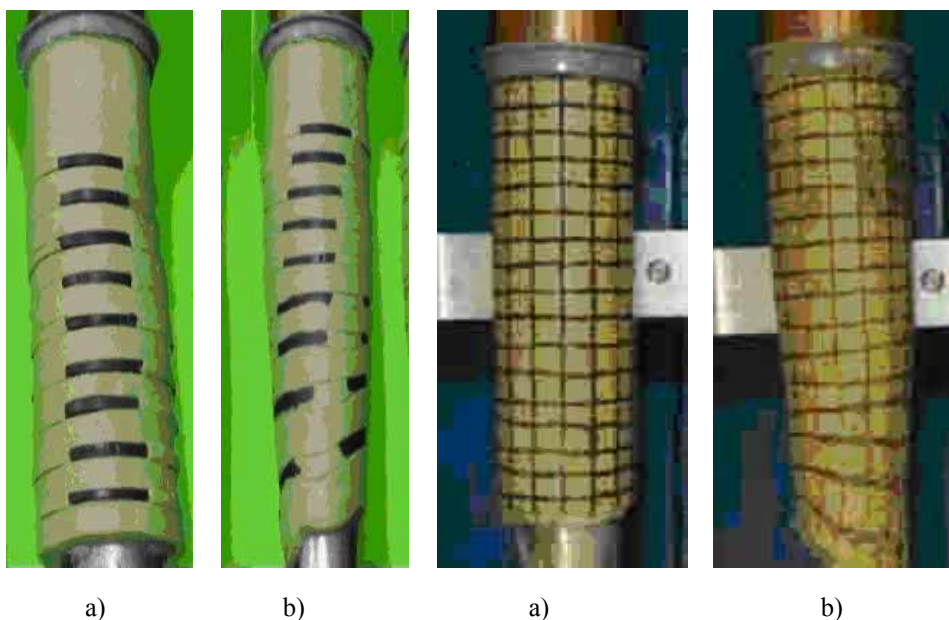


Rys.1. Materiał walcowany z sygnałami przed walcowaniem a) oraz po walcowaniu b)

Ważnym zagadnieniem w tych badaniach jest sprawa sygnalizacji punktów pomiarowych walcowanego modelu, markery bowiem nie mogą wpływać na zmianę właściwości plastycznych materiału, wobec tego muszą też podlegać odkształceniu. Wynika z tego zmienność ich kształtu (rys.2) na poszczególnych etapach pracy walcarki, co powoduje problem z identyfikacją punktów pomiarowych.



Rys.2. Wygląd sygnału przed odkształceniem a) oraz po odkształceniu b)



Rys.3. Różna sygnalizacja punktów: przed odkształceniem a) oraz po odkształceniu walcowanego modelu b)

Wykonano liczne próby sygnalizacji punktów odkształcanego materiału (rys.3). Nie zdały egzaminu grube pasy w kontrastowym kolorze, propeczne do kierunku osi walczaka, ponieważ ich narożniki po deformacji przestały być przecięciami linii prostych. Jeszcze gorsze rezultaty uzyskano stosując nacięcie plasteliny w kształcie siatki kwadratów wypełnione barwnikiem. Kierując się celem możliwie najbardziej jednoznacznej identyfikacji tego samego punktu pomiarowego na modelu odkształcanym wybrano sygnalizację za pomocą barwionych plastelinowych sztyftów (rys.1).

3. METODYKA POMIARU I CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU POMIAROWEGO

Jako metodę pomiaru wykorzystano wcięcie w przód z dwu zdjęć zbieżnych o znanej orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. Do rejestracji użyto lustrzanke Nikon D80 o rozdzielczości 10 megapikseli, o stałogniskowym obiektywie Sigma EX DG 20/1,8, ogniskowany manualnie na odległość 0,5 m, co daje wielkość piksela na obiekcie około 0,2 mm. Aparat ten skalibrowano na specjalnie przygotowanym do tego celu płaskim polu testowym (rys.4), będącym pomniejszeniem pola testowego AGH (Tokarczyk *et al.*, 2000), (Kolecki *et. al.*, 2007).



Rys.4. Pole testowe do kalibracji aparatu fotograficznego

Taka postać pola testowego umożliwiła automatyczny pomiar zdjęć kalibracyjnych za pomocą programu *Test-Field Measurement Toolbox for Matlab* (Kolecki *et al.*, 2007).

W oparciu o orientację wzajemną dwu skalibrowanych zdjęć zbudowano model, transformowany do układu odniesienia definiowanego przez fotopunkty metodą orientacji bezwzględnej. Po tych procedurach obydwie zdjęcia mają znane elementy orientacji, co pozwoliło na obliczenie przestrzennych współrzędnych dowolnego punktu zobrazowanego na obydwu zdjęciach.

Zdjęcia wykonywano ze specjalnie skonstruowanego metalowego stelażu, pozwalającego na przesuwanie aparatu w dwa (lub więcej) położenia (rys.5).



Rys. 5. Urządzenie do wykonywania zdjęć przymocowane do walcarki pielgrzymowej (fot. J. Osika, 2008).

Wokół walczaka na współpłaszczyznowych płytkach pleksi zaprojektowano fotopunkty w postaci koncentrycznych pierścieni, których współrzędne zostały wyznaczone pomiarem liniowym (w płaszczyźnie poziomej) i metodą niwelacji

(wysokości) z dokładnością około 0,1 mm (dotyczącą obydwu rodzajów pomiaru). Większa dokładność nie jest tu wymagana, ponieważ i tak ogranicza ją dokładność pomiaru sygnałów na walczaku. Wyznaczona za pomocą płaskiego testu z sygnalizowanymi precyzyjnie punktami dokładność pomiaru wynosi $m_p = \pm 0,16$ mm.

Pierwsze wyniki pomiaru fotogrametrycznego otrzymano z użyciem cyfrowego autografu VSD AGH, co pozwoliło na sprawdzenie metody i utworzenie pierwszych wykresów odkształceń. Późniejsze pomiary wykonano za pomocą specjalnie do tego celu utworzonego programu.

Pozwala on na wczytanie obrazów w dowolnym formacie, ich powiększanie, pomiar punktów, poprawienie współrzędnych tłowych o wpływ dystorsji obiektywu, przeprowadzenie orientacji wzajemnej i bezwzględnej i obliczenie współrzędnych dowolnego punktu wspólnego na obu zdjęciach, z kontrolą paralaksy poprzecznej. Wyniki – przestrzenne współrzędne punktów zapisywane są w pliku tekstowym.

Ponieważ na zdjęciach pomiarowych tworzących model widoczny jest tylko fragment górny walcowanego modelu, w celu uwidocznienia zasłoniętych dolnych partii walca prowadnik jest sukcesywnie obracany o kąt 30°. Daje to zatem 12 modeli dla każdego etapu walcowania. Modele te powinny być połączone we wspólnym układzie. Próby ich połączenia za pomocą programu Aerosys okazały się niezbyt udane; wobec braku możliwości wyrównania tworzonej sieci triangulacyjnej, „sklejenie” modeli dookoła walca dawało niezamknięcie rzędu kilku milimetrów. Rozwiązaniem tego problemu jest transformacja punktów modeli o nominalny kąt obrotu dookoła osi prowadnika, przy koniecznej eliminacji zjawiska opadania jego przedniej części.

Zaproponowano jeszcze inne rozwiązanie polegające na obliczeniu wektorów przemieszczeń dla każdego punktu w układzie pojedynczego modelu, ich transformacji o obrót nominalny oraz zaczepieniu w punktach sklejonego modelu, wyznaczonych z dokładnością mniejszą niż przemieszczenia.

4. PRÓBA AUTOMATYZACJI POMIARU

Aby prawidłowo ocenić, jakie procesy zachodzą w materiale walcowanym, należy wykonać bardzo dużo zdjęć, a co się z tym wiąże, dużą ilość pomiarów na obrazach cyfrowych. Do zobrazowania elementu walcowanego na jednym tylko etapie walcowania należy pomierzyć 12 modeli, na każdym znajduje się kilkanaście fotopunktów oraz kilkadziesiąt punktów wyznaczanych na walczaku. Zatem jeden eksperyment, obejmujący kilka etapów walcowania wymaga bardzo dużego nakładu pracy. Wymagania postawione nam w projekcie dotyczące systemu pomiarowego nie obejmowały automatyzacji pomiaru, ale zajęto się tym problemem w ramach pracy dyplomowej (Skoczek 2008).

Jak wspomniano, pomiarowi podlegają fotopunkty o kształcie koncentrycznych pierścieni oraz punkty na walcowanym materiale. Automatyzacja pomiaru sygnałów o takim kształcie jak fotopunkty została opracowana dla pomiaru punktów pola testowego AGH do kalibracji kamer (Kolecki *et al.*, 2008), zatem zajęto się pomiarem automatycznym drugiej grupy punktów.

Sygnały na elemencie walcowanym po kilku etapach walcowania charakteryzują się dużą nieregularnością kształtów. Na obecnym etapie badań został opracowany

automatyczny pomiar sygnałów przed odkształceniem, kiedy mają one kształt prawie regularnych ciemnych okręgów na jasnym tle. Są rozmieszczone w regularnej siatce o wielkości oczka około 1cm. Siatka ta ma 14 wierszy i 15 kolumn.

Do przeprowadzenia automatycznego pomiaru wykorzystano pakiet Matlab – *Digital Image Processing*. W pierwszej kolejności wykonano próbę zaadaptowania do pomiaru programu *Test Field Measurement Toolbox*, który jest dedykowany pomiarom punktów pola testowego AGH do kalibracji (Kolecki *et al.*, 2008). Było to możliwe przy zmianie parametrów dotyczących zarówno etapu pierwszego pomiaru automatycznego jakim jest przetwarzanie obrazu, jak i etapów następnych – detekcji i pomiaru sygnałów. Wstępnie ograniczono pole robocze zdjęcia do elementu walcowanego, wykorzystując segmentację obrazu na podstawie detekcji barwy. Dalsze etapy wykonywane były na obrazie monochromatycznym.

Program *Test Field Measurement Toolbox* opiera się na metodzie filtrowania regionów - grup połączonych ze sobą pikseli o podobnej jasności, różniących się między sobą określonymi cechami (geometrycznymi, topologicznymi, itd.). Punktem wyjścia do przeprowadzenia detekcji sygnałów tą metodą jest obraz, na którym usunięto filtrem morfologicznym wpływ nierównomiernego oświetlenia tła markerów i następnie poddano go binaryzacji.

W wyniku otrzymuje się obraz, którego piksele mają wartości odpowiadające numerom regionów, przy czym piksele tła posiadają wartość 0. Kolejnym etapem jest wygenerowanie N- wymiarowej tablicy struktur opisujących regiony. Każdy z elementów tablicy testowany jest pod kątem spełnienia określonych warunków przez dane regionu, który reprezentuje. Warunki te określane są przez użytkownika. Jeżeli element tablicy nie spełnia choć jednego z kryteriów selekcji, to region, który reprezentuje nie jest traktowany jako sygnał.

Do selekcji elementów tablicy struktur opisujących regiony wykorzystywane są następujące zawarte w niej dane:

- współrzędne środka ciężkości regionu,
- pole powierzchni regionu,
- długości półosi elipsy,
- liczba Eulera,
- pole powierzchni obszaru wypełnionego (z wypełnionymi dziurami).

W wyniku filtrowania regionów opartym o wyżej omówione warunki powstaje przefiltrowana tablica struktur opisujących regiony reprezentujące sygnały. Przykładowo: region odpowiada sygnałowi, jeśli pole jego powierzchni wynosi 180 pikseli z tolerancją ± 30 pikseli, stosunek długości półosi elipsy wynosi 1,5:1 z tolerancją 0,5, itd. W następnym kroku programu wyznaczane są centra sygnałów metodą ważonego środka ciężkości, a ich współrzędne są dopisywane do tablicy struktur jako dodatkowa cecha. Metoda ważonego środka ciężkości jest zasadna, jeśli sygnały mają kształt przybliżony do kół o podobnym rozmiarze.

Zaprezentowana powyżej metoda pozwoliła na wykrycie i pomiar większości sygnałów. Dla tych, które występowały w miejscach silnych odbłasków na materiale walcowanym pomiar nie mógł być zrealizowany. Program *Test Field Measurement Toolbox* pozwala też na ręczny pomiar brakujących punktów, a współrzędne będące wynikiem pomiaru automatycznego i manualnego są zapisywane w pliku tekstowym.

W ramach badań przeprowadzono również wydzielenie i pomiar sygnałów w oparciu o ścienianie, jedną z metod szkieletyzacji dostępnych w programie Matlab.

W tym przypadku próby detekcji i pomiaru sygnałów przebiegały w następujących etapach:

- wczytanie do przestrzeni zmiennych Matlaba oryginalnego obrazu w postaci macierzy.
- wyznaczenie progu dla obrazu metodą *otsu* (funkcja *graythresh*). Metoda ta polega na takim wyborze progu, aby maksymalizował on wariancję międzyklasową czyli sumę ważoną kwadratów różnic między średnimi wartościami jasności pikseli (wagi pochodzą z proporcji liczby pikseli pod progiem i nad progiem do wszystkich pikseli obrazu).
- dokonanie konwersji na obraz binarny z progiem wyznaczonym na podstawie metody *otsu*. W wyniku tej operacji otrzymano obraz, na którym widać obiekty, których współrzędne środków chcemy znaleźć.
- wykonanie negatywu obrazu i dokonanie operacji ścieniania, która polega na redukcji pikseli figury przy zachowaniu jej charakterystycznych cech za pomocą zachowania wybranych linii. Operacja ta spowodowała, że kółka na obiekcie walcowanym mały aż do pojedynczych pikseli (ścieniania dokonano 6 razy).
- znalezienie środków sygnałów jako pikseli, które otoczone są przez piksele czarne.

Porównanie wyników detekcji i pomiaru obu powyższych metod wykazało przewagę metody filtracji regionów wykorzystaną w Test Field Measurement Toolbox. Co prawda, nie wszystkie punkty pozwoliła pomierzyć automatycznie, ponieważ przeszkodą zaburzającą obraz sygnałów były odbłaski od pokrytego wazeliną materiału plastycznego, ale środki wykrytych sygnałów zostały pomierzone z dokładnością podpikselową, czego metoda ścieniania nie zapewnia.

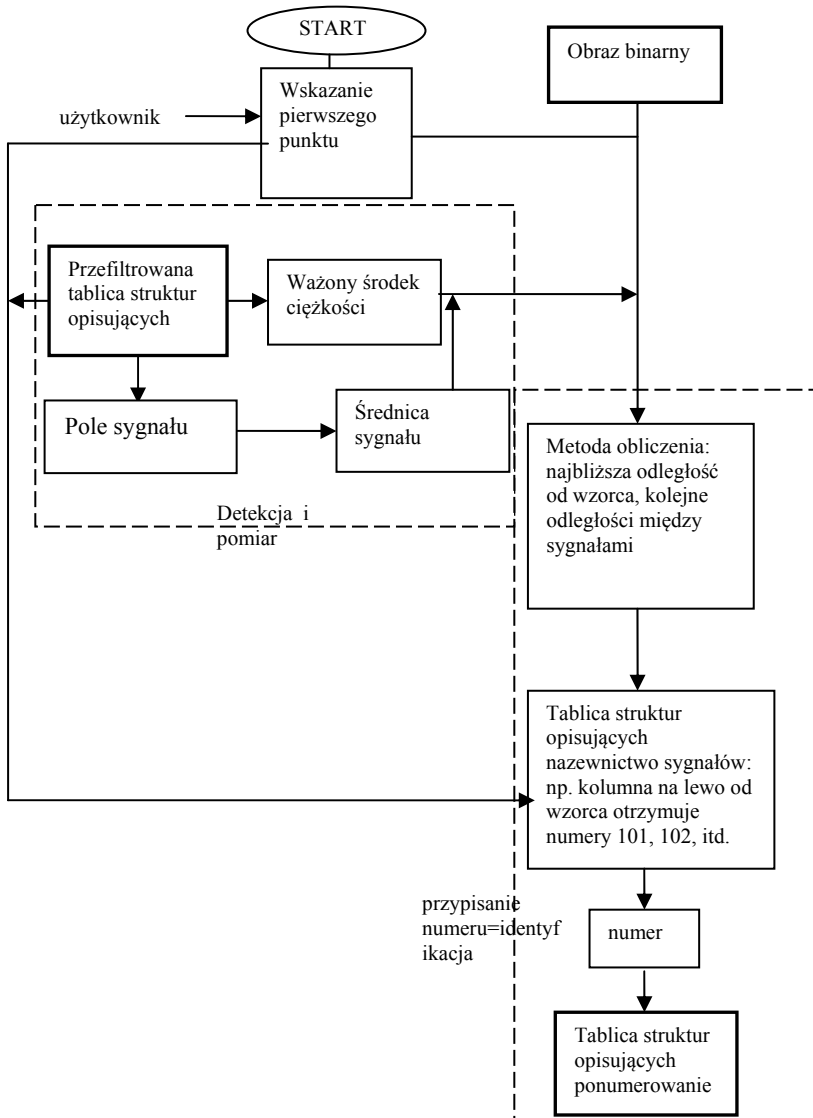
Końcowym etapem automatycznego pomiaru jest identyfikacja sygnałów. Występuje ona wtedy, gdy musimy znać oznaczenie (numer) mierzonego punktu. Niektóre pomiary fotogrametryczne nie wymagają identyfikacji mierzonych celów i kończą się wraz z wyznaczeniem ich współrzędnych. Identyfikacja mierzonych punktów jest konieczna przy pomiarze tego samego punktu na wielu zdjęciach, jak również na zdjęciach czasowych, a taki przypadek mamy w badaniach modelu walcowanego.

Identyfikacja może odbywać się na etapie detekcji, pomiędzy detekcją a pomiarem lub po dokonaniu pomiaru. Identyfikacja na etapie detekcji ma miejsce, gdy na zdjęciu szukamy obiektu niepowtarzalnego. Wtedy cechy użyte przy detekcji są jednocześnie cechami użytymi przy identyfikacji. Znajdując obiekt jednocześnie go identyfikujemy.

Identyfikację mierzonych obiektów można przeprowadzić poprzez:

- 1) identyfikację wykorzystującą zależności topologiczne,
- 2) kodowanie.

Pierwszy z wymienionych sposobów wykorzystuje relacje wynikające z wzajemnego położenia zidentyfikowanych celów na zdjęciu, natomiast drugi odwołuje się do indywidualnych cech obiektu.



Rys. 6. Schemat algorytmu detekcji, pomiaru i identyfikacji punktów walczaka

Ten pierwszy został wykorzystany do utworzenia algorytmu poszukiwania numeracji wykrytych sygnałów (rys. 6). Bazuje on na znalezieniu sygnału początkowego jako najbliższego wykrytego w pobliżu unikatowego znacznika i wykorzystuje w przybliżeniu stałe odległości między sygnałami w wierszach i kolumnach. Jest to algorytm dość prosty, a oparta na nim metoda identyfikacji jest odporna na błędy wynikające z ewentualnego niewykrycia niektórych sygnałów.

Opisane powyżej prace pozwoliły na wykonanie automatycznego pomiaru i identyfikacji markerów na modelu przed odkształceniem. Znacznie trudniejszym zadaniem jest pomiar na zdjęciach wykonanych po walcowaniu, gdzie sygnały zmieniają

znacznie swoje kształty, przemieszczają się również nieco w wierszach, ponieważ materiał ulega nie tylko rozciągnięciu, ale i skręceniu. Wydaje się, że przy narzuconej przez metalurgów koncepcji obliczania odkształceń ze współrzędnych punktów, słusze będzie w automatyzacji pomiaru wyznaczanie środków ciężkości zdeformowanych sygnałów jako odpowiedników centrów kół, mierzonych w niezdeformowanych sygnałach. Wydaje się, że pomiar automatyczny jest koniecznością, ponieważ manualny pomiar środków nieforemnych sygnałów nie jest możliwy nawet z dokładnością pikselową. Problem ten pozostaje jeszcze do rozwiązania.

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda pomiaru pozwala na bezinwazyjne, zdalne wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń modelu elementu walcowanego, w oparciu o prosty algorytm obliczeniowy, z zastosowaniem niedrogiego sprzętu do rejestracji. W trakcie pierwszych pomiarów poczyniono kilka praktycznych spostrzeżeń, ich uwzględnienie pozwala na optymalizację dalszych pomiarów:

1. Sygnalizacja punktów walcza – markery powinny być jak najmniejsze, o kołowym kształcie, należy wybrać materiał kontrastowy, pozbawiony odbłasków.
2. Sygnały fotopunktów należy rozmieścić w miarę możliwości na całej powierzchni zdjęcia, posłużą one wtedy również jako punkty do orientacji wzajemnej.
3. W celu połączenia utworzonych fotogrametrycznie modeli ze sobą, należy zagwarantować mechaniczny sposób obracania walcza o zadany kąt dookoła stałej osi.

Zastosowane do automatyzacji algorytmy przetwarzania obrazów okazały się przydatne tylko do pomiaru na obrazach przedstawiających element walcowany w pierwszych fazach deformacji. Sprawdził się w tym zastosowaniu po zmianie parametrów opisujących struktury regionów program utworzony do pomiarów zdjęć pola testowego do kalibracji kamer. Dalszych badań wymaga opracowanie automatycznego pomiaru sygnałów mocno zdeformowanych walcowaniem.

6. LITERATURA

Atkinson K. B., 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing.

Clarke T., Wang X., 2000. The Control Of A Robot End-Effector Using Photogrammetry. *International Archives ISPRS*, Amsterdam.

Claus M., 1988. Experience with InduSURF in 3D Measurement of industrial Surfaces. *International Archives ISPRS*, Kyoto

Ergün B., Kulur S., 2000. Integration of digital photogrammetric obtained data with autocad to car surface model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing - materiały kongresowe ISPRS*, Amsterdam, komisja V.

Fraser C.S., Brown D.C., 1986. Industrial Photogrammetry – New Developments and Recent Applications. *Photogrammetric Record* No. 12 (68).

Godding R., Boesemann W., Huette H., 2000. Photogrammetric Measurement Techniques For Quality Control In Sheet Metal Forming. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing - materiały kongresowe ISPRS*, Amsterdam, komisja V.

Gutu A., 1978. Industrial Photogrammetry in the investigations of technological Mining Engineering. *Proceedings Inter-Congress Symposium "Photogrammetry for Industry"*. Stockholm, Sweden.

Jachimski J., Mierzwa W., Boroń A., Tokarczyk R., Wróbel A., 1997. Możliwości wykorzystywania obrazów fotograficznych i cyfrowych w przemysłowej metrologii. *Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja*.

Kakiuchi T. Chikatsu H., 2000. Construction Of Stereo Vision System For 3d Objects Modeling. *International Archives ISPRS*, Amsterdam.

Kolecki J., Tokarczyk R., 2008. Automatyczna identyfikacja punktów pola testowego AGH z wykorzystaniem pakietu Matlab. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17.

Psaltis C., Ioannidis C., 2006. An Automatic Technique For Accurate Non-Contact Structural Deformation Measurements. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing - materiały kongresowe ISPRS*, Istambuł, komisja V.

Skoczek K., 2008. *Fotogrametryczne badanie przemieszczeń i odkształceń elementów walcowanych*. Praca dyplomowa pod kierunkiem Reginy Tokarczyk, obroniona w 2008 r. na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH.

Tan J., Ishikawa S., 2000. Method Of Modeling Deformation Of An Object Employing Surrounding Video Cameras. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing - materiały kongresowe ISPRS*, Amsterdam, komisja V.

Tokarczyk A., Tokarczyk R., 1981. Fotogrametryczny pomiar modeli i ich deformacji przy wykorzystaniu kamer niemetrycznych. *Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN*, Z.29.

Tokarczyk R., 1990. Wykorzystanie zdjęć niemetrycznych do badania deformacji modelu górotworu. *Międzynarodowe Sympozjum FIG n.t.: Pozyskiwanie danych do badania odkształceń*. Katowice 1990.

Tokarczyk R., Boroń A., 2000. Badanie cyfrowych aparatów fotograficznych dla potrzeb fotogrametrii bliskiego zasięgu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 10.

Wester-Ebinghaus W., 1990. High Precision Industrial Photogrammetry. *Photogrammetric Record* No.10.

Wong K. W., Vonderohe A. P., 1978. Measurement of displacement around tunnel models by motion parallax. *Proceedings Inter-Congress Symposium "Photogrammetry for Industry"*. Stockholm, Sweden.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.659

PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT OF ROLLED ELEMENTS

KEY WORDS: close-range photogrammetry, digital camera, digital image processing, digital image automatic measurement

Summary

Developing a photogrammetrical method of measuring displacements and deformations of rolled objects was supported by the international project "Investigations of displacements and deformation during cold rolling of tubes in pilgering process" led by the Department of Metal Forming, Cracow University of Technology.

Cold rolling of tubes in the pilgering process is one of the most advanced technologies of manufacturing copper pipes used in of water supply systems, heating systems, medical systems, etc. The method makes it is possible to increase the overall deformation by up to 95%. Research on effects of the new process on the size of deformation and behaviour of the rolled material is thus required.

The study on the new pilgering process were carried out on a physical model of a pilger mill. The first tests were conducted on non-metallic materials (plasticine, wax), the metallic materials (lead, aluminum) being tested at the last stage of trials. The aim of the proposed measurement method was to determine the deformation of a rolled wax material. Before it was rolled, the object was shaped like a hollow cylinder, a bevelled cone being produced after rolling.

Direct intersection of two convergent images, with known interior and exterior orientation, was proposed as the measurement method. For image acquisition, we used 10 Mpx. Nikon D80 digital SLR camera with Sigma EX DG 20/1.8 fixed focus lens. The photogrammetric model is based on the relative orientation of the two images. It is then transformed to the reference system defined by the ground control points using an absolute orientation. After such procedures, image orientation elements are determined. Thus, we are able to calculate 3D coordinates of arbitrary point visible on the two images.

The images were acquired from a tripod constructed especially for the needs of the project. The tripod allows moving the camera along the mill. Because the object being deformed is photographed only from the top, to assess deformations on its entire surface the object has to be rotated around its main axis. The photogrammetrical models that are thus created have to be connected into a special reference system.

The first results of photogrammetric measurements were obtained by using the VSD AGH digital stereo plotter. It allowed us to check the correctness of the method and to create the first deformation plots. Subsequently, the image measurements and the calculation of 3D coordinates were carried out by using the software developed by the authors. It allows loading image data in an arbitrary format, zooming, point measuring, taking lens distortion into consideration, carrying out the relative and absolute orientation, and computing coordinates of an arbitrary point with the control of the transverse parallax. The results, i.e., 3D coordinates of the points, are written to a text file.

To find out what processes occur during rolling, it is necessary to acquire a large number of images and, consequently, to take numerous measurements on digital images. Thus, there is a need to automate the process of measuring the markers on the rolled object. Numerous tests were carried out using the Matlab programming environment. Two methods of measurement were tested: 1) to detect markers (region filtering) and to measure the center of markers (weighted center of mass); 2) multi-staged thinning on a binarized (using the *otsu* method) image. The first method, which gave better results, forms the basis of the *Test Field Measurement Field Box* software intended as providing automatic measurement of calibration images in a test field. However, further work on automation of strongly deformed model in which the markers lose their circular shape, is recommended.

dr inż. Regina Tokarczyk
e-mail: tokarcz@agh.edu.pl
tel. 012 617 22 88

mgr inż. Katarzyna Skoczek
e-mail: kasia.skoczek@op.pl
tel. 728497769