

Sławomir ZATOR, Paweł MICHALSKIPOLITECHNIKA OPOLSKA,
Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole**Pomiar zmian topologii obiektów na podstawie wyznaczania parametrów położenia markerów****Dr hab. inż. Sławomir ZATOR**

Profesor na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Autor ponad 70 i współautor ponad 110 publikacji, w tym 4 książek. Członek Komisji Metrologii i Komisji Elektroniki Oddziału PAN w Katowicach. Jego działalność naukowa obejmuje miernictwo przemysłowe, w tym pomiary przepływów cieczy z wykorzystaniem anemometrii laserowej oraz diagnostykę instalacji przemysłowych.



e-mail: s.zator@po.opole.pl

Mgr inż. Paweł MICHALSKI

Ukończył studia w 2010 r. na Politechnice Opolskiej na kierunku informatyka o specjalności Komputerowe Wspomaganie Projektowania. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.



e-mail: p.michalski@doktorant.po.opole.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję i prototypowe rozwiązanie przeprowadzenia pomiaru zmian topologii obiektów infrastruktury przemysłowej z wykorzystaniem pomiaru odległości i pomiarów kątów. Opracowane rozwiązanie pozwala na śledzenie przemieszczenia wielu punktów oznaczonych specjalnymi markerami. Zaprezentowano wyniki niepewności wyznaczenia współrzędnych uzyskane z badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Wykonano analizę identyfikacji markera dla różnych warunków oświetleniowych. Przedstawiono model graficznej prezentacji używanych danych oraz spektrum możliwych zastosowań systemu.

Słowa kluczowe: Przemieszczenia topologii, pomiar odległości, pomiar kątów.

Measurement of object topology changes using hybrid methods**Abstract**

The concept and a prototype solution of measuring topology changes of industrial infrastructure objects with use of distance and angle measurements are presented in the paper. A scheme of diagnostic model preparation based on the available documentation material is presented in Section 2. The developed solution allows tracking the displacement of multiple points marked with special markers. The block diagram of the application logic responsible for identifying markers is shown in Fig 3. The Labview environment with implemented IMAQ modules is used for automatic image recognition. The measurement data are derived from the coupled rangefinder camera, and the markers tracking was carried out using a biaxial motor precision. The system uses a set of mirrors allowing a distance measurement to a point located exactly in the camera optical axis. The schematic arrangement is shown in Fig 2. The measurement results of angles and distances for a sample marker are shown in Figs. 4, 5 and 6. The uncertainty of determining the coordinates obtained from simulations and experimental studies is presented in the paper. Analysis of the identification marker for different lighting conditions was performed. In Section 4 there are described the data format and the model graphical visualization. The range of possible applications of the system is discussed. The presented system is relatively cheap and is a mobile solution for diagnosing changes in the installation.

Keywords: surface deformation, distance measurement, angle measurement.

1. Wstęp

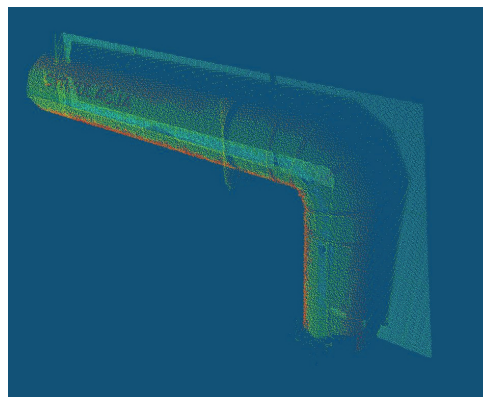
Instalacje, których specyfika wymusza powstawanie odkształceń elementów cechują się wyższą awaryjnością niż ma to miejsce tam gdzie takie odkształcenia nie występują.

Wraz ze wzrostem sił oddziaływujących na poszczególne elementy instalacji wzrasta również ryzyko wystąpienia awarii [1]. Dlatego też w tego typu instalacjach zasadnym jest stosowanie systemów diagnostycznych monitorujących zmiany zachodzące w topologii obiektów [2]. Kompleksowy system diagnostyczny pracujący online, jednocześnie monitorujący wiele punktów

instalacji, jest w stanie na czas zaalarmować operatora o sytuacjach krytycznych zachodzących na obiekcie.

2. Metodyka prowadzenia badań

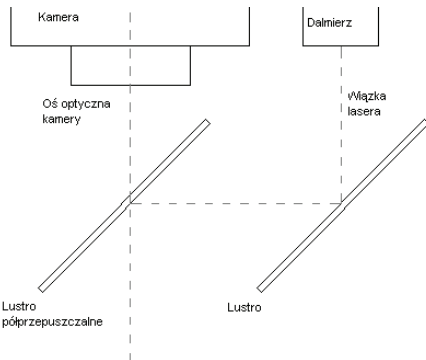
W celu wykonania diagnostyki instalacji diagnosta musi przyjąć określony stan początkowy. W przypadku, gdy diagnozowana instalacja posiada dokumentację cyfrową, operator powinien na jej podstawie opracować wirtualny model diagnostyczny przy pomocy dedykowanego oprogramowania. Na utworzonym modelu należy wskazać punkty charakterystyczne instalacji, dla których zostanie wykonany pomiar. Jeśli dokumentacja cyfrowa obiektu nie została sporządzona diagnosta powinien odtworzyć elementy będące przedmiotem pomiaru do postaci cyfrowej bazując na dokumentacji papierowej. W przypadku, gdy nie dysponuje się dokumentacją należy wykonać inwentaryzację w celu jej sporządzenia. Dla instalacji o dużej złożoności wykonanie inwentaryzacji jest czasochłonne i może być ona obciążona dużymi błędami. Aby uzyskać dużą dokładność rozległych i złożonych instalacji można skorzystać z metod skaningu laserowego [3]. Podczas wykonywania inwentaryzacji wykorzystano skaner firmy Trimble FX 3D oferujący niepewność pomiaru rzędu 0,6 mm dla odległości 28 m oraz szybkość działania, która umożliwi wykonanie skanowania dookólnego w maksymalnej dostępnej rozdzielczości w czasie ok. 45 min. Rys 1 przedstawia chmurę punktów uzyskaną w wyniku skanowania skanerem rury z kolanem.



Rys. 1. Wynik skanowania elementu
Fig. 1. Result of element scanning

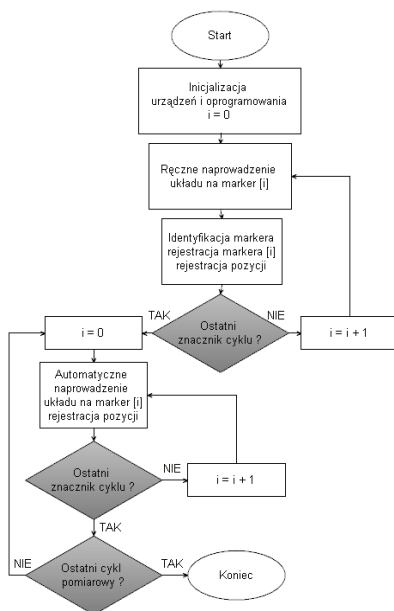
Na etapie, gdy stan początkowy instalacji zostanie określony, diagnosta wykorzystując specjalnie przygotowany zestaw markerów instalując je punktach instalacji, dla których zostanie wykonany pomiar. Miejsca rozlokowania markerów powinny charakteryzować się dużymi odkształceniami, tak aby możliwa była ich detekcja, a na podstawie pomiarów możliwe było określenie

zmian topologii w stosunku do stanu początkowego. Do pomiaru zmian położenia markerów opracowano system pomiarowy, w skład którego wchodzi: precyzyjna obrotnica dwuosiowa, kamera, dalmierz laserowy oraz zestaw lusterek. Sterowanie silnikiem krokowym, odpowiedzialnym za obrót w osi poziomej, umożliwia pracę z 1/4 kroku i posiada maksymalną rozdzielczość kątową 0.0064°. Dla osi pionowej jest możliwa praca z 1/8 kroku, co daje rozdzielczość 0.0032°. Następnym elementem jest kamera Axis Q1755, która przechwytuje obraz w rozdzielczości HD 1920x1080 pikseli. Pomiar odległości wykonywany jest za pomocą dalmierza laserowego sprzężonego optycznie z kamerą.



Rys. 2. Schemat orientacji dalmierza i kamery
Fig. 2. Schema of the rangefinder and camera orientation

Aby umożliwić pomiar odległości bezpośrednio do wybranego punktu, na który skierowana jest oś optyczna kamery, zastosowano układ 2 lusterek, tak jak to przedstawiono na rys. 2. Lustro półprzezroczyste umieszczone przed kamerą ogranicza natężenie światła docierającego się do jej obiektywu, lecz nie utrudnia znacząco identyfikacji obrazu. Oprogramowanie do analizy obrazu z kamery napisano w środowisku LabVIEW korzystając z pakietu analizy obrazu IMAQ [4]. Wykrywanie i rodzaj wykorzystywanych znaczników przedstawiono w artykule [5]. Na podstawie danych zawartych w pojedynczym cyklu pomiarowym operator może odtworzyć stan instalacji w danym momencie. Schemat działania oprogramowania przedstawiono na rys. 3.



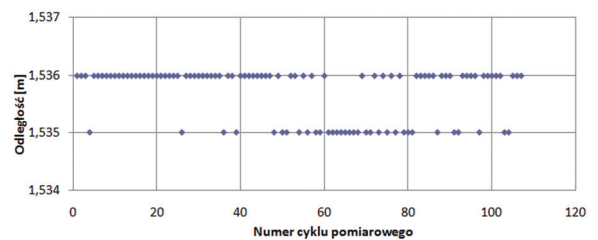
Rys. 3. Logika aplikacji identyfikowania
Fig. 3. Logic of the recognition application

Dane pozyskane z kilku cykli pozwalają odtworzyć zmiany zachodzące w instalacji podczas wykonywanych cykli pomiarowych. Czas pomiędzy poszczególnymi cyklami pomiarowymi jest zależny od ilości znaczników przypadających na pojedynczy cykl.

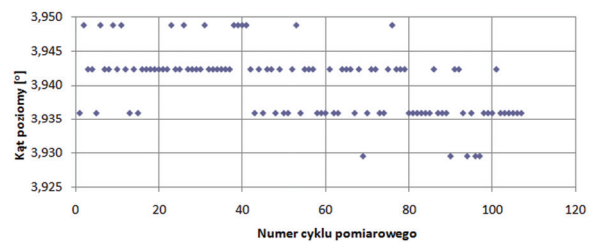
3. Wyniki pomiaru

Układ kamery i dalmierza przetestowano w warunkach rzeczywistych przy zmiennym oświetleniu. Zaprojektowane oprogramowanie jest w stanie poprawnie zidentyfikować marker przy natężeniu oświetlenia na jego powierzchni wynoszącej tylko 3 lx. Po użyciu lustra półprzezroczystego markery identyfikowane są przy natężeniu 9 lx. Poniżej tej wartości wyszukiwanie przekracza ramy czasowe określone na identyfikację markera. Układ przetestowano dla wartości natężenia oświetlenia wynoszącej 32000 lx oświetlając zarówno znacznik jak i jego otoczenia, w takich warunkach oprogramowanie również jest w stanie poprawnie zidentyfikować marker. Maksymalna różnica natężenia oświetlenia p powierzchni markera a elementami otoczenia wynosi 600 lx. Powyżej tej wartości kontrast pomiędzy otoczeniem a samymi elementami wzorca jest na tyle niski, że skutecznie uniemożliwia jego identyfikację. Kamera posiada funkcje automatycznego wyostrzenia obrazu, która w warunkach małej złożoności w otoczeniu znacznika jest w stanie poprawnie ustawić ostrość na jego powierzchni. W przypadku błędnego ustawienia ostrości obrazu operator posiada możliwość jej ręcznego ustawienia z poziomu programu. Kamera posiada 10-krotny zoom optyczny, który pozwala na identyfikację markerów o wymiarach 21 cm przy warunkach natężenia oświetlenia od 40 lx z odległości 30 m.

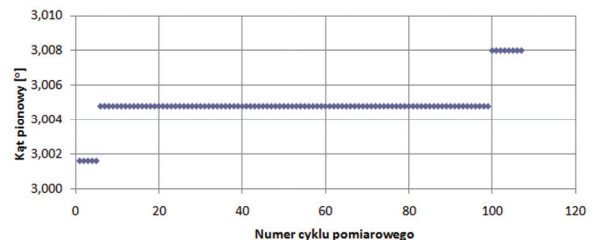
Przeprowadzono pomiar kątów oraz odległości dla losowego położenia znacznika, a wyniki powtarzalności pomiaru kątów przedstawiono na rys. 4 i 5 zaś pomiar odległości na rys. 6.



Rys. 4. Wynik pomiaru kąta dla przykładowego markera w osi poziomej
Fig. 4. Result of angle measurement for the sample marker in the horizontal axis



Rys. 5. Wynik pomiaru kąta dla przykładowego markera w osi pionowej
Fig. 5. Result of angle measurement for the sample marker in the vertical axis



Rys. 6. Wynik pomiaru odległości dla przykładowego markera
Fig. 6. Result of distance measurement for the sample marker

Współrzędne markerów w przestrzeni obliczane są przy użyciu równań (1), (2), (3) Przyjęto lokalny układ współrzędnych, w którym dalmierz wyznacza początek układu współrzędnych tj. (0,0,0), a pierwszy marker (referencyjny) leży się na osi OY. Znając odległość pomiędzy dalmierzem i pierwszym markerem możemy zapisać jego współrzędne, jako (0,d,0). Współrzędne n -tego markera zapisano jako (n_x, n_y, n_z) , w którym:

$$n_x = \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \cdot d \quad (1)$$

$$n_y = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \cdot d \quad (2)$$

$$n_z = \sin(\alpha) \cdot d \quad (3)$$

gdzie:

α - wartość kąta w osi pionowej pomiędzy pierwszym i n -tym markerem, rad

β - wartość kąta w osi poziomej pomiędzy pierwszym i n -tym markerem, rad

d - odległość zmierzona do n -tego markera, m

Niepewność wyznaczania współrzędnej X dla pojedynczego markera wyznaczono z równania (4). Podobnie wyznaczono niepewności dla pozostałych współrzędnych Y, Z .

$$\sigma_x = k \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

gdzie:

\bar{X} - średnia arytmetyczna z próby

x - wartości kolejnych pomiarów

n - liczba elementów w próbie

k - współczynnik rozszerzenia ($k=2$)

Wyniki pomiaru niepewności dla wyznaczania współrzędnych markerów dla różnych odległości przedstawiono w tabeli 1.

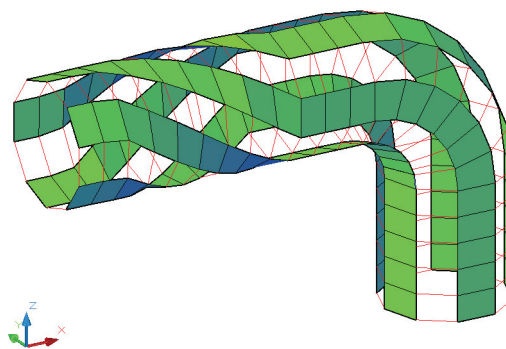
Tab. 1. Wyniki pomiaru niepewności współrzędnych badanego markera
Tab. 1. Results of the measurement uncertainty of the marker coordinates

Znaczniki	Przybliżenie kamery	Odległość	σ_x	σ_y	σ_z
	-				
Marker I	3×	0,93	0,06	0,36	0,28
Marker II	4×	1,45	0,02	0,24	0,24
Marker III	10×	2,71	0,32	0,92	0,34
Marker IV	11×	2,96	0,28	0,76	0,42
Marker V	11×	9,91	0,84	0,85	1,21

4. Prezentacja graficzna wyników pomiaru

Dane uzyskane z systemu pomiarowego formowane są w rekordy o ściśle określonej strukturze, a następnie przesyłane do środowiska CAD, w którym są wizualizowane. Wszystkie dane uzyskane z pomiaru zapisywane są w zewnętrznej bazie danych w celu ich zabezpieczenia oraz możliwości ich późniejszej analizy. Obiekty wizualizowane są w postaci siatki składającej się z grupy punktów oraz linii przedstawionej na rys. 7. Podejście takie umożliwia zobrazowanie zmiany geometrii obiektów takie jak wydłużanie, ściskanie czy skręcanie.

Istnieje również możliwość prezentacji powierzchni elementu. Prezentacja taka pozwala lepiej zorientować się w strukturze powierzchni elementu, jednak w niektórych przypadkach uniemożliwia prezentację odkształceń, np. skręcenia powierzchni.



Rys. 7. Model siatkowy elementu
Fig. 7. Element mesh model

5. Zastosowanie

System został opracowany pod kątem pracy dla instalacji rurowych znajdujących się na obiektach przemysłowych, jednak jego zastosowanie może być znacznie szersze. Jako że pozwala na śledzenie przemieszczenia zarówno pojedynczego jak i wielu punktów. Opracowany system może znaleźć zastosowanie podczas pomiaru ruchu mostów, które pod wpływem np. ruchu ulicznego wpadają w drgania. Odpowiednie rozlokowanie markerów na konstrukcji pozwoli określić lokalizację oraz skalę zachodzących przemieszczeń. Kolejnym zastosowaniem może być budownictwo wysokościowe gdzie budynki obciążone wiatrem odchylają się od ich osi pionowej. Pomiar tych odchyleń może w szybki i tani sposób sprawdzić czy mieszczą się one w normach określonych przez projektanta.

6. Wnioski

Zaprezentowany system jest stosunkowo tanim i mobilnym rozwiązaniem pozwalającym na przeprowadzanie pomiarów odkształceń instalacji z niepewnością na poziomie ± 2 mm z odległości do 20 m. Pomiar może być wykonywany ciągle bez konieczności jego nadzorowania. Prostota konstrukcji oraz mobilność układu pozwala na sprawne przeprowadzenie pomiaru.

Praca finansowana z środków NCBiR w ramach projektu rozwojowego N R06 0001 06.

Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

7. Literatura

- [1] Iluk A., Górski A., Czmochocki J., Rusiński E.: Analiza układu kompensacji termicznej połączenia kanałów powietrza pierwotnego z komorą paleniskową kotła fluidalnego. Systems 2010, Vol. 14. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej 2010.
- [2] Zator S., Kabza Z., Kwiatkowski L.: Hybrydowe techniki pomiaru przemieszczeń obiektów instalacji technicznych. Energetyka nr 2-3/2011, s.144-146.
- [3] Kamiński W., Bojarowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Trystuła J.: Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego scanstatnion firmy leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych. Czasopismo techniczne, Oficyna Wyd. Politechniki Krakowskiej 2008.
- [4] Relf C.G.: Image Acquisition and Processing with LabVIEW. CRC Press LLC, 2004.
- [5] Zator S., Żłobicki Ł.: Metoda fotogrametryczna w śledzeniu zmian położenia obiektów. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 2/2011, s. 150-152.