

Mariusz FRUKACZ, Tadeusz SZCZUTKOAGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA, KATEDRA GEOMATYKI
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków**Kalibracja wzorców liniowych do systemu fotogrametrycznego DPA Pro firmy AICON 3D Systems****Dr inż. Mariusz FRUKACZ**

W swojej działalności naukowo-badawczej zajmuje się głównie zagadnieniami związanymi z metrologią geodezyjną. Prowadzi badania w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym AGH związane z kalibracją geodezyjnych instrumentów pomiarowych. Poszukuje rozwiązań minimalizujących wpływ systematycznych błędów instrumentalnych na wyniki pomiarów. Od marca 2013 pracuje w ETH Zurych.

e-mail: frukacz@agh.edu.pl

**Dr inż. Tadeusz SZCZUTKO**

W swojej działalności naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami związanymi z metrologią geodezyjną w warunkach laboratoryjnych w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym AGH oraz polowych z wykorzystaniem polowej bazy testowej. Zajmuje się optymalizacją procedur kalibracji sprzętu geodezyjnego: niwelatorów, tachimetrów i odbiorników GNSS.

e-mail: szczutko@agh.edu.pl

**Streszczenie**

W artykule zaprezentowano unikalną metodologię i wyniki wyznaczenia współczynnika rozszerzalności termicznej oraz kalibracji pary wzorców liniowych do systemu fotogrametrycznego DPA Pro firmy AICON 3D Systems GmbH o długości 1,34 m. Stosowne badania przeprowadzono w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie na zlecenie firmy MAN Bus Sp. z o.o., Oddział w Starachowicach.

Słowa kluczowe: kalibracja, współczynnik rozszerzalności termicznej, interferometr laserowy, wzorzec pomiarowy.

Calibration of measurement standards for a DPA Pro photogrammetric system produced by AICON 3D Systems**Abstract**

The paper presents a unique methodology and results of determining the coefficient of thermal expansion and calibration of a pair of measurement standards of a DPA Pro photogrammetric system (Fig. 1) produced by AICON 3D Systems. The tests were carried out in the Geodetic Metrology Laboratory at Department of Mining Surveying and Environmental Engineering, AGH University of Science and Technology in Krakow, on behalf of MAN Bus, Branch Starachowice. Determination of the coefficient of thermal expansion was performed in a specially adapted thermal chamber (Fig. 2). The temperatures obtained in the thermal chamber during measurements of changes of the length caused by thermal factor ranged from 7 °C to 37 °C, at the average temperature of 22 °C (Fig. 3). The resulting thermal expansion coefficient was 0.31 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ with the measurement uncertainty at 95% confidence level (2 sigma) of $\pm 0.06 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. Calibration of a pair measurement standards was made in a vertical (Fig. 5) and horizontal (Fig. 6) position twice, independently. As a master of length there was used the Hewlett-Packard HP 5529 laser interferometer. A two-axis measurement system of a vertical comparator allowed simultaneous measurement of microscope inclination (Fig. 4). Length of the measurement standards in the horizontal and vertical positions differs by about 8 μm , because the pattern in the horizontal position is shorter due to sagging under its own weight (Table 1). The measurement uncertainty of the DPA Pro standard length at the 95% confidence level was $\pm 3.9 \mu\text{m}$.

Keywords: calibration, coefficient of thermal expansion, laser interferometer, measure standard.

1. Wprowadzenie

Jednym z kluczowych elementów większości systemów produkcyjnych jest metrologia przemysłowa, która zapewnia kontrolę parametrów produkcji, jej ocenę jakościową i możliwość dalszego udoskonalania procesów. System DPA (skrót od Digital Photogrammetric Analysis) firmy AICON 3D Systems GmbH umożliwia pomiar współrzędnych przestrzennych na podstawie analizy fotogrametrycznej zdjęć obiektu wykonanych z różnych stanowisk

za pomocą lekkiego ręcznego aparatu cyfrowego w miejscu ich wytwarzania, bez konieczności transportu do laboratoriów metrologicznych. W skład zestawu, przedstawionego na rysunku 1, wchodzi m.in. aparat cyfrowy Nikon D3x o rozdzielczości 24,5 mega pikseli z obiektywem 28 mm, kodowe i standardowe znaczniki celownicze, wzorce liniowe nadające skalę pomiarowi oraz wysokowydajny komputer przenośny. Proces obróbki fotogrametrycznej zdjęć, wykonywany w programie AICON 3D Studio, umożliwia m.in. automatyczną kalibrację zdjęć i nadanie im referencji, analizy deformacji i przemieszczenia oraz pomiary długości, kątów i współrzędnych na wykonanym modelu przestrzennym. Wśród zalet tego systemu należy wymienić jego mobilność, łatwość obsługi, uniwersalność (możliwość pomiaru obiektów małych i wielkogabarytowych), a także szybkość wykonywania zdjęć i ich analizy [1].



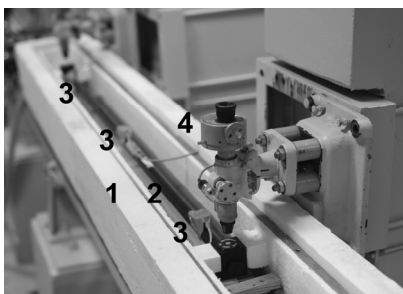
Rys. 1. Elementy systemu DPA Pro [1]
Fig. 1. Components of the DPA Pro System

Podstawą dokładności pomiarów z wykorzystaniem systemu DPA Pro, deklarowanej przez producenta jako $3 \mu\text{m} + 7 \mu\text{m}/\text{m}$ (na poziomie 3 sigma), jest znajomość długości baz (wzorców liniowych) umieszczanych w fotografowanym polu. Długości te wyznaczane są przez producenta i uwzględnianie w oprogramowaniu AICON 3D Studio do nadania skali fotografowanym obiektom. Na zlecenie MAN Bus Sp. z o.o. Oddział w Starachowicach, która wykorzystuje system DPA Pro do pomiarów kontrolnych wykonywanych konstrukcji autobusów i samochodów ciężarowych, w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym (GLM) AGH Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie wykonano badania dwóch takich wzorców liniowych. Proces badawczy został podzielony na dwa niezależne etapy – wyznaczenie dla wzorca współczynnika rozszerzalności termicznej, który umożliwia uwzględnienie poprawek termicznych do wykonywanych pomiarów, oraz kalibrację (ustalenie długości wzorców w oparciu o wskazania interferometru laserowego) w dwóch położeniach wzorca: werty-

kalnym i horyzontalnym. W celu wykonania tych pomiarów należało zmodyfikować istniejące w GLM AGH stanowiska badawcze, które są dostosowane do badań precyzyjnego sprzętu geodezyjnego, w tym inwarowych lat niwelacyjnych. W dalszej części artykułu przedstawiono stanowiska badawcze i zastosowaną metodologię pomiarów, a także skomentowano uzyskane wyniki badań.

2. Wyznaczenie współczynnika rozszerzalności termicznej wzorca systemu DPA Pro

Wyznaczenie współczynnika rozszerzalności termicznej materiału, z którego wykonany jest pręt nośny wzorca, stanowiło rozpoznanie materiału i pozwala na uzyskanie poprawnej jego długości w dowolnych warunkach pomiaru, a zatem również poprawnych rezultatów pomiaru fotogrametrycznego. Jest to istotne, ponieważ wewnątrz hali fabrycznej temperatura zmienia się znacznie w zależności od pory roku. Wyznaczanie współczynnika rozszerzalności termicznej przymiarów geodezyjnych, w tym przede wszystkim inwarowych precyzyjnych lat niwelacyjnych, wykonywane jest w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym AGH od 1999 roku. W tym celu została zbudowana specjalna komora termiczna umożliwiająca badania przymiarów o długości do 3 m, z zakresem temperatur od -10 do $+50^{\circ}\text{C}$, charakteryzująca się parametrami dokładnościowymi porównywalnymi z renomowanymi laboratoriami w Europie (Uniwersytet Techniczny w Monachium). Budowę komory termicznej i metodologię procesu wyznaczania współczynnika rozszerzalności termicznej lat inwarowych szczegółowo opisano w [2]. W związku ze znacznie krótszą długością wzorca systemu DPA Pro (poniżej 1,4 m) niż bazy pomiarowej komory termicznej (2,86 m), do wyznaczenia współczynnika rozszerzalności termicznej wzorca należało zbudować niezależną komorę, w której wykorzystano elementy systemu pomiarowego głównego stanowiska. Na rysunku 2 zaprezentowano widok zmodyfikowanej komory termicznej (przed jej zamknięciem), składającej się ze skrzyni drewnianej z kilkuwarstwową izolacją (1), w której umieszczono w pozycji poziomej wzorzec systemu DPA Pro (2) podparty w punktach Bessela. W umieszczonych w komorze rurkach miedzianych krążył płyn o regulowanej temperaturze, który podgrzewał lub schładzał powietrze w komorze, zmieniając tym samym temperaturę wzorca, mierzoną za pomocą trzech czujników temperaturowych materiału (3) firmy Hewlett Packard 10563A. Zmiany długości wzorca powodowane wpływami termicznymi mierzono za pomocą pary mikroskopów spiralnych firmy Carl Zeiss Jena (4), które umożliwiają wyznaczenie zmian długości z niepewnością standardową $\pm 0,8 \mu\text{m}$.



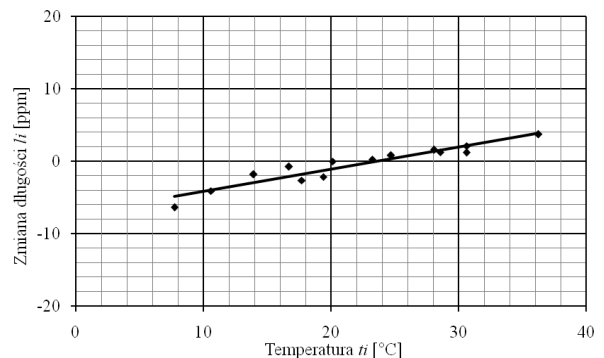
Rys. 2. Wzorzec systemu DPA Pro w komorze termicznej
Fig. 2. The DPA Pro measure standard in a thermal chamber

Stosowne pomiary przeprowadzono w dniach 23-24 kwietnia 2012 roku w cyklu obejmującym 14 niezależnych progów termicznych, według następującego schematu: 20°C » schładzanie do 7°C » podgrzewanie do 20°C » podgrzewanie do 37°C » schładzanie do 20°C . Dla każdego proggu termicznego wyznaczano średnią wartość temperatury wzorca (oznaczaną t_i) oraz względną zmianę długości wzorca przypadającą na 1 m przymiaru (oznaczaną l_i), która była obliczana jako iloraz zmiany długości zmierzonej mi-

kroskopami i obserwowanego zakresu wzorca (rozstawu mikroskopów równego 1,347 m), które przedstawiono na rysunku 3. Zakładając liniowy charakter obserwowanych zmian długości oraz normalny rozkład błędów losowych v_i możemy zapisać równanie

$$v_i = a_0 + a_1 \cdot (t_i - t_0) - l_i, \quad (1)$$

w którym $t_0=20^{\circ}\text{C}$ oznacza temperaturę odniesienia dla wyznaczenia współczynnika, a_1 jest poszukiwaną wartością współczynnika rozszerzalności termicznej (oznaczaną zazwyczaj α), natomiast a_0 określa stały parametr układu obserwacyjnego, który nie ma znaczenia dla określenia wartości współczynnika. Powyższy układ równań rozwiązano metodą najmniejszych kwadratów oraz przeprowadzono ocenę dokładności modelu (wraz z oceną jakości dopasowania, analizą resztową i testem na autokorelację składników losowych w modelu regresji).



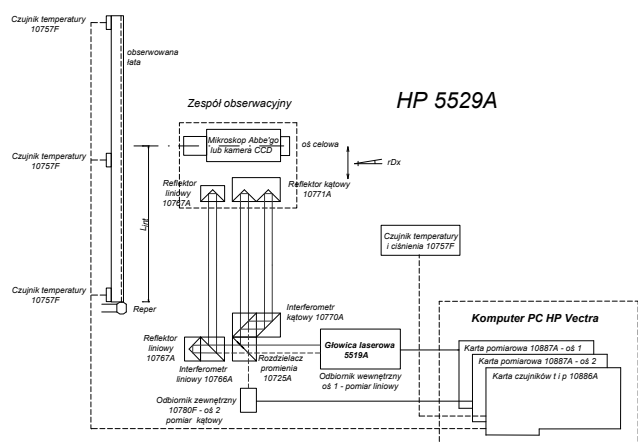
Rys. 3. Zmiany długości wzorca systemu DPA Pro w komorze termicznej
Fig. 3. Changes of the length of the DPA Pro measurement standard in a thermal chamber

Uzyskana w wyniku obliczeń wartość współczynnika rozszerzalności termicznej wyniosła $0,31 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ z niepewnością standardową pomiaru na poziomie ufności 95% (2 sigma) wynoszącą $\pm 0,06 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$, co oznacza, że wartość tego współczynnika jest niższa niż współczynnik rozszerzalności termicznej inwaru wynoszący (w zależności od partii produkcyjnej i szczegółowego składu stopu) od $0,50$ do $1,50 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$. Tak niska wartość współczynnika rozszerzalności termicznej oznacza, że przy zmianie temperatury powietrza względem temperatury odniesienia ($t_0=20^{\circ}\text{C}$) o 3°C , długość wzorca systemu DPA Pro zmieni się jedynie o $1,2 \mu\text{m}$, ale przy zmianie temperatury o 10°C długość wzorca będzie się różniła od nominalnej o $4,1 \mu\text{m}$.

3. Wyznaczanie długości wzorca

Kalibracja powinna być wykonana w ułożeniu zbliżonym do warunków pomiarowych, a ponieważ podczas wykonywania zdjęć systemem DPA Pro w płaszczyźnie pomiaru umieszczane są dwa wzorce – jeden w pionie, drugi w poziomie – dlatego też wyznaczenie ich długości wykonano w tych samych pozycjach. Jako wzorzec długości wykorzystano interferometr laserowy HP5529A z zestawem czujników temperatury i ciśnienia.

Wyznaczenie długości wzorców w pozycji pionowej wykonano na komparatorze pionowym (rys. 4) zbudowanym w celu kalibracji lat inwarowych do niwelacji precyzyjnej. Podczas pomiaru wózek zaopatrzonego w mikroskop Abbe'go przesuwa się po kolumnie, a jego przemieszczenie od punktu „RESET” do pozycji, w której przez mikroskop obserwuje się punkty wzorca, rejestruje układ liniowy interferometru. Nierównomierność przewodnic kolumny, która powoduje istotne wychylenie mikroskopu w płaszczyźnie pionowej, jest rejestrowana przez układ pomiaru pochylenia zrealizowany z wykorzystaniem równoległego toru pomiarowego interferometru. Jednoczesny pomiar dwuosiowy (liniowy i kątowy) umożliwiają zamontowane pod wózkiem pomiarowym pryzmaty odbijające promień lasera interferometru (rys. 5).



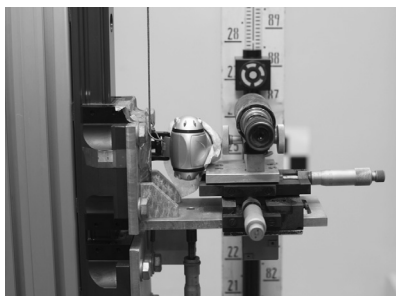
Rys. 4. Schemat dwuosioowego układu pomiarowego komparatora pionowego [3]
Fig. 4. The two-axis measurement system of a vertical comparator

Prawidłowy, poprawiony odczyt odległości uzyskany interferometrem oblicza się wg wzoru:

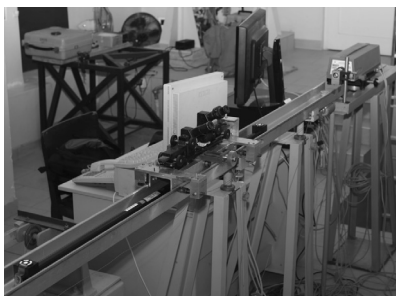
$$D = D_i + e \cdot \frac{\varphi}{\rho} \quad (2)$$

gdzie: D_i – odczyt z układu liniowego interferometru, e – odległość od środka prymatu pomiarowego do płaszczyzny obserwowanej, φ – pochylenie osi celowej mikroskopu w sekundach kątowych, $\rho = 206265''$.

Wynik pomiaru, dzięki zastosowaniu czujników ciśnienia oraz temperatury powietrza i materiału badanego wzorca, jest redukowany do temperatury odniesienia 20°C . Krążki wzorca, dla których wyznaczane jest położenie środka, obserwowane są dwukrotnie (dwa nacelowania na dół i górę krążka), a cały pomiar wykonywany jest dwukrotnie niezależnie.



Rys. 5. Kalibracja wzorca na komparatorze pionowym
Fig. 5. Calibration of the DPA Pro measure standard on the vertical comparator



Rys. 6. Kalibracja wzorca DPA Pro na komparatorze poziomym
Fig. 6. Calibration of the DPA Pro measure standard on the horizontal comparator

Na podstawie konstrukcji wzorca można wnioskować, że w pozycji poziomej pod własnym ciężarem nastąpi ugięcie pręta nośnego, co spowoduje przesunięcie znaczków końców wzorca. Znalazło to potwierdzenie w wynikach pomiaru. Wzorec ułożono

na szynie poziomej, po której przesuwiał się wózek pomiarowy zaopatrzonej również w mikroskop pomiarowy. Ponieważ wzorec znajduje się na tej samej szynie co wózek pomiarowy, dlatego pomiar pochylenia nie jest potrzebny (rys. 6).

Wyniki wyznaczeń długości dla dwóch wzorców podane są w tabeli 1. Niepewność pomiaru wyznaczono na poziomie ufności 95% (2 sigma). Prawidłową długość wzorca należy obliczać ze wzoru:

$$D = D_p + [1 + \alpha \cdot 10^{-3} \cdot (t - 20^\circ\text{C})][\text{mm}], \quad (3)$$

gdzie: D_p – długość wzorca wyznaczona w czasie kalibracji, α – współczynnik rozszerzalności termicznej wzorca równy $0,31 \mu\text{m}/\text{m}/1^\circ\text{C}$.

Tab. 1. Wyniki kalibracji wzorców systemu DPA Pro
Tab. 1. Calibration results of DPA Pro measure standards

Nr wzorca	Długość w pozycji		Średnia D_p	Niepewność pomiaru	Wyznaczenie poprzednie	Różnica wyznaczeń
	pionowej	poziomej				
	mm	mm	mm	μm	mm	mm
0221-T/106	1339,380	1339,373	1339,377	3,5	1339,396	0,019
0221-T/107	1339,902	1339,894	1339,898	3,9	1339,936	0,038

4. Podsumowanie

Różnice bieżących wyznaczeń długości wzorców w stosunku do poprzedniej kalibracji mogą mieć następujące przyczyny:

- starzenie się materiału, z którego wykonany jest nośnik wzorca,
- problemy z jednoznacznością celowaniem spowodowane ziarnistą strukturą powierzchni znaczków końcowych wzorca,
- wpływ użytkowania (np. wstrząsy).

Różnica wyznaczeń długości wzorców w stosunku do poprzedniej kalibracji wynosi odpowiednio 19 i 38 μm . Ponieważ pod mikroskopem ujawnia się ziarnista struktura materiału, z którego jest on wykonany (węgiel spiekany) o wymiarach pojedynczych elementów rzędu 20-30 μm , dlatego dokładność wynikowa wyznaczenia długości wzorca zależy od jednoznaczności celowania.

System DPA Pro opiera się na wzorcach liniowych. Lepszym teoretycznie rozwiązaniem byłby system oparty na wzorcach przestrzennych, w których każdy punkt ma wyznaczone współrzędne XYZ [4]. System taki jest jednak trudniejszy w kalibracji i mniej mobilny niż DPA Pro.

Wyznaczenie długości wzorców stanowi jedynie element kalibracji systemu DPA Pro. Pełne możliwości tego systemu pomiaru uzyska się po kalibracji aparatu fotograficznego wraz z obiektywem wykorzystywanym do pomiarów w opisanym zestawie.

Artykuł powstał w ramach badań statutowych Katedry Geomatyki WGGiŚ AGH nr 11.11.150.006

5. Literatura

- [1] AICON 3D Systems: DPA – 3D coordinate measurement with hand-held digital camera, <http://www.aicon3d.com>, stan z 07.01.2013 r.
- [2] Frukacz M.: Optymalne procedury wyznaczania współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej i wzorcowania precyzyjnych łąt niwelacyjnych. Wydawnictwa AGH, Kraków 2012.
- [3] Beluch J., Frukacz M., Mróz J., Pokrzywa A., Szczutko T.: Badania laboratoryjne niwelatorów i precyzyjnych łąt niwelacyjnych. Wydawnictwa AGH, Kraków 2008.
- [4] Sitek Z.: Fotogrametria ogólna i inżynierska. PPWK, Warszawa-Wrocław 1991.

otrzymano / received: 08.03.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2013

artykuł recenzowany / revised paper