

Michał RAK¹, Eugeniusz RATAJCZYK², Tomasz KOWALUK¹

¹ POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI, INSTYTUT METROLOGII I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

² WYŻSZA SZKOŁA EKOLOGII I ZARZĄDZANIA, ul. Wawelska 14, 02-061 Warszawa

Badania porównawcze pomiarów wykonywanych za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę sztywną i impulsową

Mgr inż. Michał RAK

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2011. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej a od stycznia 2013 doktorant również na École Polytechnique de Montréal, Département de Génie Mécanique w Kanadzie. W ramach pracy doktorskiej opracowuje metodę fuzji danych pochodzących z różnych metod pomiarowych, optycznych i stykowych.

e-mail: m.rak@mchtr.pw.edu.pl



Mgr inż. Tomasz KOWALUK

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2011. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Obszar zainteresowań naukowych - przemysłowa tomografia komputerowa, współrzędnościowe techniki pomiarowe.

e-mail: t.kowaluk@mchtr.pw.edu.pl



Prof. dr inż. Eugeniusz RATAJCZYK

Profesor zwyczajny związany z Politechniką Warszawską (Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Zakład Metrologii i Inżynierii Jakości) oraz z Wyższą Szkołą Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Wieloletni przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, od IX.2008 roku honorowy przewodniczący. Uprawiana dyscyplina: Metrologia interdyscyplinarna i techniczna - współrzędnościowa technika pomiarowa, przemysłowa tomografia komputerowa, maszyny i roboty pomiarowe.

e-mail: e.ratajczyk@mchtr.pw.edu.pl



obtained results for two probes were compared with each other. It was analyzed how the range of results for different diameters for hard and trigger probes changed. The results show the influence of other factors (besides the measuring force). To show the influence of the measuring force, tests on a cube made of different materials were also performed.

Keywords: coordinate measuring arm (portable CMM), measuring probe.

1. Wstęp

Idea pomiarów współrzędnościowych powstała w latach siedemdziesiątych XX. w. ale dopiero postęp technik komputerowych umożliwił jej pełen rozwój [1]. W przeciwieństwie do klasycznej metrologii współrzędnościowa technika pomiarowa opiera się na komputerowym przetwarzaniu informacji pomiarowych. Umożliwia także uzyskanie wysokich dokładności w krótkim czasie. Charakterystyczną cechą techniki współrzędnościowej jest wyznaczanie wymiarów przestrzennie ukształtowanych elementów na podstawie wartości współrzędnych punktów. Maszyny pomiarowe (CMM-Coordinate Measuring Machine) są podstawowymi urządzeniami pracującym w technice współrzędnościowej. Ich zespoły ruchome mogą przemieszczać się w trzech prostopadłych do siebie kierunkach. Innym typem urządzeń o charakterze mobilnym pracującym w technice współrzędnościowej są współrzędnościowe ramiona pomiarowe (Coordinate Measuring Arms; portable CMM's). Ich konstrukcja jest dużo prostsza niż współrzędnościowych maszyn pomiarowych co znajduje odbicie również w cenie. Dzięki temu mogą być stosowane w małych i średnich zakładach produkcyjnych [2]. Na rys. 1 przedstawiono ramię pomiarowe MCA II firmy Metris – Nikon, które stosowano w badaniach.

Dzięki możliwości adaptowania różnego typu głowic (1) pomiary mogą być wykonywane zarówno w sposób stykowy jak i bezstykowy [3, 4]. W odróżnieniu od maszyn współrzędnościowych w ramionach pomiarowych podczas zbierania punktów pomiarowych odczytywane są współrzędne kątowe z przetworników obrotowych (3) tzw. enkoderów. Następnie przy pomocy procedury obliczeniowej współrzędne punktu są transformowane do układu kartezjańskiego (x, y, z). Ramiona pomiarowe są urządzeniami przenośnymi przez co mogą pracować w bezpośrednim otoczeniu produkcji, a także wewnątrz elementów wielkogabarytowych. Mobilność zapewnia podstawa (4) zawierająca elementy takie jak: wewnętrzny akumulator litowo-jonowy, antenę WiFi, czy uniwersalny uchwyt mocujący. Ramiona stosowane są najczęściej w przemyśle motoryzacyjnym łącznie z warsztatami prowadzącymi naprawy, w przemyśle lotniczym oraz w zakładach produkcyjnych.

Streszczenie

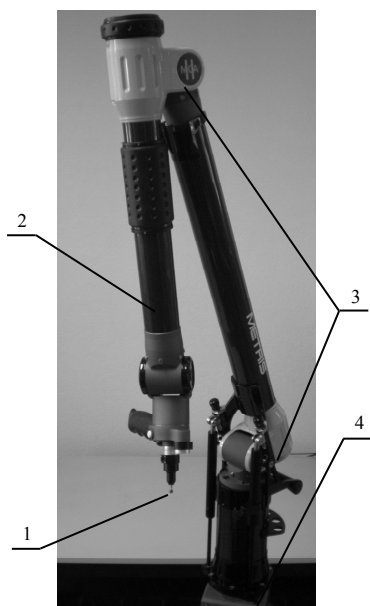
Przedstawiona jest ocena dokładności pomiarów przeprowadzonych głowicą sztywną i przelączającą za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego [1]. Ramiona współrzędnościowe są mobilnymi ręcznymi przyrządami pomiarowymi. W celu lokalizacji punktów pomiarowych wyposażone są najczęściej w głowice sztywne. Dzięki użyciu w jednym ramieniu zarówno głowicy sztywnej jak i przelączającej możliwe było porównanie ich ze sobą. Badania eksperymentalne wykonano na podstawie wybranych wymiarów elementu w postaci kostki szkoleniowej. Otrzymane wyniki badań pozwalają ocenić stopień dokładności przy stosowaniu poszczególnych rodzajów głowic.

Słowa kluczowe: współrzędnościowe ramię pomiarowe, głowica (sonda) pomiarowa.

Comparative studies of measurements made by a coordinate measuring arm equipped with hard and trigger probes

Abstract

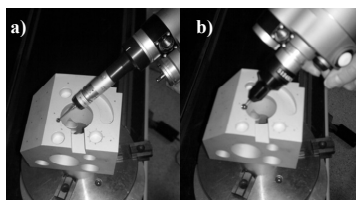
The purpose of the paper is to assess the accuracy of measurements made with hard and trigger probes on a coordinate measuring arm. In the case of hard heads the measuring force is variable and depends on an operator who decides on appearance of a contact of the stylus tip with the measured surface, while in the case of trigger probes the contact of the tip with the measured surface is independent of shaft swings, breaking the electrical contact inside the head due to deflection of the stylus and breaking the electrical contact inside the head. The study was conducted with use of the arm Metris – Nikon MCA II shown in Fig. 1. Arms are manual measuring devices equipped, in most cases, with hard probes. Through the use of hard and trigger probes in one arm, it is possible to compare two heads. The TP20 kinematic touch-trigger probe with an SF module (standard force) was used as a trigger head. The paper presents a brief description of coordinate measurements as well as construction and working principle of coordinate measuring arms. In Fig. 3 there is shown a CAD model of the training cube used as a test part. The tests were made on the basis of measurements of four cylindrical holes with different diameters. The



Rys. 1. Ramię pomiarowe Metris – Nikon serii MCA II
Fig. 1. Measuring arm MCA II Metris – Nikon

Badania zostały przeprowadzone na ramieniu MCA II, którego dokładność przestrzenna wg umownego testu C [5, 6] wynosi $\pm 0,040$ mm.

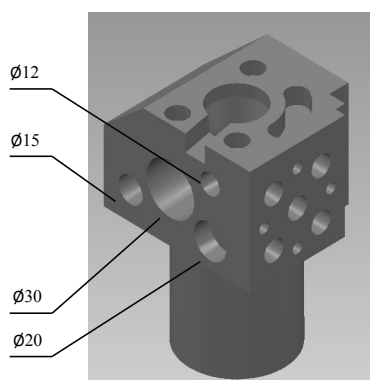
W artykule przedstawiono przebieg badań porównawczych przeprowadzonych przy użyciu dwóch typów głowic stykowych – sztywnej i impulsowej, których widok przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok obu typów głowic: a) impulsowej TP20, b) sztywnej
Fig. 2. View of both types of probes: a) trigger TP20, b) hard

2. Badany element

Jako badany element wybrano aluminiową kostkę szkoleniową, której model CAD został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Model CAD mierzonej kostki
Fig. 3. CAD model of the measured cube

Celem oceny dokładności badania przeprowadzono najpierw wybierając najpierw cztery otwory walcowe o średnicach 30 mm, 20 mm, 15 mm i 12 mm, zaznaczone na rys. 3, a następnie na innym elemencie zmierzono sferę wewnętrzną, walec i kąt między płaszczyznami.

3. Wyniki pomiarów

W rozdziale tym przedstawione zostaną wyniki badań dla obu typów głowic: głowicy sztywnej i przełączającej TP 20. Badania zostały przeprowadzone przez inż. Marzenę Zimak pod kierunkiem autorów.

3.1. Wyniki pomiarów przeprowadzonych z użyciem głowicy sztywnej

W Tab. 1. przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych głowicą sztywną dla czterech otworów walcowych zmierzonych dwudziestokrotnie zarówno głowicą sztywną jak i impulsową.

Tab. 1. Wyniki pomiarów otworów walcowych wykonanych głowicą sztywną
Tab. 1. The measurement results of cylindrical holes taken with a hard probe

	Otwór walcowy 1	Otwór walcowy 2	Otwór walcowy 3	Otwór walcowy 4
Wartość nominalna, mm	30	20	15	12
Średnia z badań, mm	30,080	20,046	15,092	12,014
Wartość maksymalna, mm	30,099	20,083	15,100	12,031
Wartość minimalna, mm	30,019	20,024	15,084	11,997
Odchylenie standardowe, μm	18,10	18,42	5,45	7,61

Warto zauważyć, że dla wszystkich mierzonych otworów zmierzona średnica jest większa od nominalnej, co może być związane z naciskiem pomiarowym. Interesujące są również wartości odchylenia standardowego z serii dwudziestu pomiarów. Dla większych wymiarów wynosi ono blisko $20 \mu\text{m}$, natomiast dla dwóch pozostałych wymiarów odchylenie jest rzędu kilku mikrometrów. Pokazuje to charakter pomiarów wykonywanych głowicą sztywną. Operatorowi dla większych wymiarów trudniej jest zachować stały nacisk pomiarowy co skutkuje większym rozrzutem wskazań.

3.2. Wyniki pomiarów przeprowadzonych z użyciem głowicy impulsowej

W tab. 2. przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych głowicą impulsową TP 20 [1] produkcji firmy Renishaw dla czterech otworów walcowych.

Tab. 2. Wyniki pomiarów otworów walcowych wykonanych głowicą impulsową
Tab. 2. The measurement results of cylindrical holes taken with a trigger probe

	Otwór walcowy 1	Otwór walcowy 2	Otwór walcowy 3	Otwór walcowy 4
Wartość nominalna, mm	30	20	15	12
Średnia z badań, mm	30,007	20,033	15,056	11,988
Wartość maksymalna, mm	30,029	20,043	15,073	12,013
Wartość minimalna, mm	29,944	20,014	15,016	11,910
Odchylenie standardowe, μm	24,27	6,57	12,5	31,41

Na podstawie danych zamieszczonych w tab. 2 można zauważyć, że mierzone wartości średnicy dla wszystkich otworów są mniejsze niż w przypadku użycia głowicy sztywnej. Związane jest to z mniejszym naciskiem pomiarowym. Porównując odchylenia standardowe z serii pomiarów można zauważyć, że są one największe dla otworów o największej i najmniejszej średnicy.

4. Porównanie wyników

W tab. 3 przedstawiono rozstępy wyznaczone jako różnice między wartością maksymalną a minimalną dla wszystkich badanych wymiarów dla obu typów głowic.

Tab. 3. Rozstępy wyników dla pomiarów otworów walcowych
Tab. 3. Range of the results for measurements of cylindrical holes

	Otwór walcowy 1	Otwór walcowy 2	Otwór walcowy 3	Otwór walcowy 4
Wartość nominalna, mm	30	20	15	12
Rozstęp dla głowicy sztywnej, mm	0,080	0,059	0,016	0,034
Rozstęp dla głowicy impulsowej, mm	0,085	0,029	0,057	0,103

Zaskakujące jest iż rozstęp wskazań dla otworów o średnicy 15 mm i 12 mm jest około trzykrotnie większy dla głowicy przełączającej niż dla głowicy sztywnej. Nie może być to tłumaczone zmiennością drogi przełączania, która dla użytego modułu SF wynosi zaledwie $\pm 0,80 \mu\text{m}$.

Dla głowicy przełączającej średnie wyniki są bardziej zbliżone do wartości nominalnych, natomiast stabilność wyznaczania badanej wielkości jest gorsza niż się spodziewano. Przypuszczano bowiem, że stały nacisk pomiarowy przy zbieraniu punktów zagwarantuje stabilność wyznaczenia mierzonego wymiaru. W celu wyjaśnienia takich wyników przeprowadzono podobne badania na innej kostce szkoleniowej, wykonanej z miększego materiału - teflonu. Dla miększych materiałów wpływ nacisku pomiarowego powinien być bardziej znaczący. W laboratorium utrzymywana była temperatura 20°C o zmienności $\pm 1^\circ\text{C}$. Wyniki badań przeprowadzonych przez inż. Karola Golańskiego pod kierunkiem autorów przedstawiono w tab. 4 dla głowicy sztywnej i dla głowicy impulsowej

Tab. 4. Wyniki pomiarów wykonanych głowicą sztywną i impulsową
Tab. 4. The measurement results taken with hard and trigger probes

	Sfera wewnętrzna, mm	Walec, mm	Kąt między płaszczyznami,
Wartość nominalna	24,000	13,002	90,000
Głowica sztywna			
Średnia z badań	23,948	13,055	89,884
Rozstęp	0,221	0,047	0,094
Odchylenie standardowe	0,055	0,016	0,027
Głowica impulsowa			
Średnia z badań	23,995	13,009	89,920
Rozstęp	0,190	0,040	0,078
Odchylenie standardowe	0,047	0,011	0,020

Przy badaniach przeprowadzonych na elemencie bardziej podatnym na nacisk pomiarowy w stałych warunkach środowiskowych można zauważyć, że rozstępy wyników są mniejsze dla

pomiarów przeprowadzonych z użyciem głowicy impulsowej. Różnice te są jednak znacznie mniejsze niż w przypadku badań przeprowadzonych na aluminiowej kostce, przy narzuceniu warunkom środowiskowym łagodniejszych wymagań.

W celu zanalizowania, czy różnice między wynikami pomiarów przeprowadzonych oboma typami głowic są statystycznie istotne przeprowadzono cztery testy: porównanie średnich, odchyłeń standardowych oraz median za pomocą testu t-studenta oraz porównanie rozkładów jednowymiarowych cech statystycznych przy użyciu testu Kołmogorowa-Smirnowa.

Wszystkie testy oprócz porównania odchyłeń standardowych wykazały, że różnice przy pomiarach objętości głowicami są statystycznie istotne (na poziomie istotności 95%) dla elementów z kostki teflonowej. Co pokazuje istotny wpływ nacisku pomiarowego na wynik.

5. Wnioski

Podczas wykonywania badań spodziewano się, że badania przeprowadzone przy użyciu głowicy sztywnej będą charakteryzowały się większym rozstępem wyników niż te przeprowadzone głowicą impulsową ze względu na niestabilność nacisku pomiarowego podczas pomiaru. Nacisk przy pomiarach głowicą sztywną jest zależny od operatora, który to ręcznie wyzwała impuls po stwierdzeniu styku głowicy z mierzoną powierzchnią. Przypuszczano przez to, że rozstęp wyników będzie znacznie większy niż w przypadku głowicy przełączającej, gdzie styk końcówki z powierzchnią jest samoistny, bowiem jest generowany przez przetwornik elektrostatyczny głowicy.

Można by szukać przyczyn takiego wyniku. Jedną z możliwych przyczyn może wynikać z warunków środowiskowych, a w szczególności zmiany temperatury [7]. W normalnych warunkach użytkowych są one nieuniknione, gdyż ramię pomiarowe jest urządzeniem, które może pracować w bezpośrednim otoczeniu produkcji.

Głowica przełączająca jest natomiast atrakcyjnym rozwiązaniem jeżeli operatorowi zależy na krótkim czasie pomiaru. Użytkownik, nie musi obserwować styku końcówki z mierzoną powierzchnią i pilnować, aby nacisk pomiarowy był stały podczas całego badania.

Wykazano, że dla elementów bardziej podatnych na nacisk pomiarowy różnice między badaniami wykonywanymi przy użyciu głowicy sztywnej i impulsowej są istotne.

6. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa Technika Pomiarowa. Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [2] Ratajczyk E.: Współrzędnościowe ramiona pomiarowe w zastosowaniach przemysłowych. PAR nr 3/2012 pp. 16-22.
- [3] www.nikonmetrology.com
- [4] Ratajczyk E.: Ramiona pomiarowe – budowa, parametry techniczne, zastosowania, Mechanik nr 12/2008.
- [5] Ratajczyk E.: Współrzędnościowe ramiona pomiarowe i ich testy dokładności. Przegląd Elektrotechniczny nr 5/2008.
- [6] Ostrowska K.: Metody oceny dokładności pomiarów realizowanych przy zastosowaniu współrzędnościowych ramion pomiarowych, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2010.
- [7] Śladek J., Ostrowska K., Gacek K., Bryndza M.: Designation of operator impact on errors of measurements realized by Coordinate Measuring Arm, Advances in Coordinate Metrology, Monograph edited by J. Śladek and W. Jakubiec, University of Bielsko-Biała, Bielsko-Biała, 2010.

otrzymano / received: 18.02.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.04.2013

artykuł recenzowany / revised paper