

Dr inż. Paweł ZMARZŁY (Politechnika Świętokrzyska):

**ANALIZA WPLYWU STOPNIA POWIĘKSZENIA UKŁADU OPTYCZNEGO  
MULTISENSOROWEJ MASZyny WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ  
WYZNACZENIA WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH**

Streszczenie

Przeanalizowano wpływ wyboru stopnia powiększenia obiektywu telecentrycznego multisensorowej maszyny współrzędnościowej na dokładność wyznaczania średnicy otworów. Do badań użyto specjalnie wykonanej próbki z otworami o różnych średnicach. Wyniki badań wykazały, że stopień powiększenia układu optycznego wpływa na dokładność wyznaczenia średnicy otworów.

*Słowa kluczowe: systemy wizyjne, multisensorowa maszyna współrzędnościowa, dokładność pomiaru*

**IMPACT ANALYSIS OF MAGNIFICATION LEVEL OF MULTISENSOR MEASURING  
MACHINE OPTICS AT THE ACCURACY OF MEASUREMENT GEOMETRICAL FEATURES**

Abstract

The paper presents an impact analysis of selection magnification level of telecentric lens used in multisensor measuring machine at the accuracy of determining holes diameter. A specially designed and manufactured specimen with different holes was used to research. Research results indicate that magnification level of lens impact at accuracy of hole diameters measurement.

*Key words: vision systems, multisensor measuring machine, measurement accuracy*

# **ANALIZA WPŁYWU STOPNIA POWIĘKSZENIA UKŁADU OPTYCZNEGO MULTISENSOROWEJ MASZyny WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ WYZNACZENIA WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH**

Paweł ZMARZŁY<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Współczesny przemysł wymaga, aby procedury pomiarowe były w pełni zautomatyzowane i sterowane komputerowo. Dlatego tak dużą popularnością cieszą się maszyny współrzędnościowe CNC, które oprócz dużej dokładności pomiarowej pozwalają na automatyczny pomiar przy użyciu głowic impulsowych lub skanujących [1,2]. Jednakże maszyny współrzędnościowe ze względu na konstrukcję oraz zasadę działania głowicy pomiarowej mają ograniczone zastosowanie w przypadku pomiaru wymiarów geometrycznych małych detali. Obecny rozwój technologii wiąże się z produkcją coraz mniejszych i bardziej skomplikowanych części, co w znaczny sposób utrudnia ich pomiar. Ma to szczególnie istotne znaczenie w przemyśle precyzyjnym oraz elektronicznym, gdzie małe elementy muszą cechować się wysoką jakością wykonania. Powszechny dostęp do drukarek 3D sprawił, że jesteśmy w stanie znacznie szybciej wytwarzać detale o zadowalających właściwościach mechanicznych [3]. W związku z tym należy poszukiwać nowych rozwiązań pomiarowych pozwalających sprostać wymaganiom nowoczesnych technologii wytwarzania.

Tradycyjnie do oceny cech geometrycznych małogabarytowych elementów mechanicznych stosuje się projektory pomiarowe lub mikroskopy warsztatowe, jednakże pomiar realizowany tymi przyrządami pomiarowymi jest czasochłonny i wymaga od operatora dużego doświadczenia.

Coraz częściej do tego typu pomiarów stosuje się systemy wizyjne [4,5], a w szczególności multisensorowe współrzędnościowe maszyny pomiarowe, które wyko-

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii.

rzystują technikę pomiaru optycznego i stykowego w ramach jednego urządzenia pomiarowego [6,7,8]. Dzięki temu jedno urządzenie pomiarowe pozwala zastąpić tradycyjnie stosowane projektory pomiarowe, mikroskopy warsztatowe oraz maszyny współrzędnościowe. Systemy takie mogą pracować w trybie automatycznym CNC, co jest szczególnie istotne w produkcji seryjnej np. podczas wykonywania elementów z tworzyw sztucznych na wtryskarkach. Pomiar optyczny pozwala na uzyskanie dużej ilości punktów pomiarowych w bardzo krótkim czasie. Właściwość ta stanowi znaczącą przewagę w stosunku do pomiarów stykowych ze względu na skrócenie czasu pomiaru. Brak nacisków pomiarowych pozwala na ocenę geometrii detali wykonanych z materiałów elastycznych, kruchych oraz delikatnych. Natomiast dodatkowe zastosowanie głowicy stykowej w systemach optycznych pozwala na realizację pomiaru w miejscach niedostępnych dla optyki. Dzięki temu możemy ocenić wiele różnych cech geometrycznych detalu w jednym zamocowaniu.

Łatwość automatyzacji, szybkość pomiaru oraz duża uniwersalność sprawiły, że systemy wizyjne znalazły swoje zastosowania w wielu gałęziach przemysłu. Zadania realizowane przez przemysłowe systemy wizyjne są bardzo różnorodne np. odczyt kodów kreskowych, ocena wymiarów i defektów wytwarzanych produktów, takich jak łożyska toczne [9].

Na dokładność wyznaczenia geometrii elementu za pomocą multisensorowych maszyn współrzędnościowych wpływa wiele parametrów pomiarowych m.in. rodzaj wybranego źródła światła (światło odbite lub przechodzące), intensywność oświetlenia, kolor użytego światła, ustawienie ostrości obrazu (autofocus), czystość oraz stan powierzchni elementu mierzonego, ilość oraz sposób pozyskiwania punktów pomiarowych, filtracja punktów nietypowych, maksymalny dopuszczalny błąd maszyny oraz rodzaj powiększenia układu optycznego. Pomimo coraz większej popularności systemów wizyjnych, nie zostały opracowane normy określające optymalne parametry pomiarowe zalecane do wyznaczenia cech geometrycznych. W związku z tym w artykule dokonano oceny wybranego parametru pomiarowego tj. wpływu stopnia powiększenia na dokładność wyznaczenia średnicy trzech otworów.

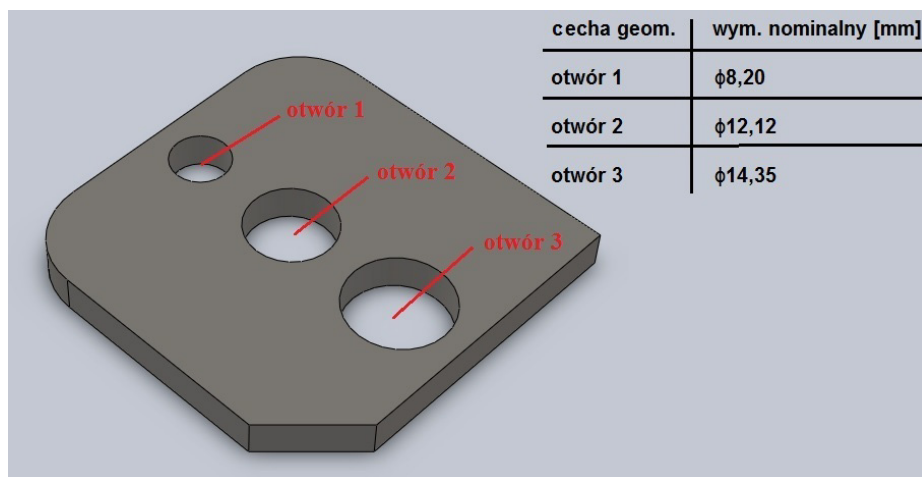
## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Aby dokonać oceny dokładności pomiaru średnic otworów w zależności od stopnia powiększenia układu optycznego tj. stopnia zoom multisensorowej maszyny współrzędnościowej przeprowadzono badania porównawcze. Badania te polegały na pomiarze średnicy trzech otworów za pomocą przyrządu wzorcowego tj. maszyny współrzędnościowej Prismo Navigator firmy Zeiss o maksymalnym błędzie granicznym wynoszącym  $0,9 + L/350 \mu\text{m}$ . Do badań użyto głowicy skanującej VAST Gold S-ACC. Następnie posiadając zmierzone wartości średnic otworów, dokonano ponownych ich pomiarów za pomocą multisensorowej maszyny współrzędnościowej O-Inspect 442. Każdy otwór został zmierzony pięciokrotnie stosując 6 różnych stopni

zoom (0,5x, 0,56x, 0,65x, 0,76x, 0,93x, 1,18x). Bazując na zmierzonych wartościach średnic obliczono wartości średnie z pomiarów ( $\bar{\phi}_o$ ), błędy średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru ( $s$ ) oraz względne błędy pomiaru średnicy otworów ( $\delta_\phi$ ). Zmianym parametrem pomiarowym było powiększenie układu optycznego, natomiast pozostałe parametry pomiarowe były stałe tj. zastosowano przechodzące źródło światła, autofocus, do wyznaczenia średnicy otworu użyto 250 punktów pomiarowych zbieranych metoda automatyczną. Uzyskane wartości średnic porównano z wartościami wzorcowymi uzyskanymi za pomocą maszyny współrzędnościowej. Celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych było określenie zalecanego stopnia zoom systemu pomiarowego O-Inspect 442 w zależności od danej średnicy otworu.

### 2.1. PRÓBKA UŻYTA DO BADAŃ

W celu realizacji badań wykonano detal z zaprojektowanymi cechami geometrycznymi. Obróbkę próbki przeprowadzono w Laboratorium Obrabiarek Sterowanych Numerycznie Politechniki Świętokrzyskiej na pionowym centrum obróbczym DMG DMU 50 [10]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat badanego detalu wraz z zaznaczonymi cechami geometrycznymi oraz wymiarami nominalnymi założonymi podczas obróbki.



Rys. 1. Schemat próbki użytej do badań

### 2.2. MULTISENSOROWA MASZYNA WSPÓLRZĘDNOŚCIOWA O-INSPECT 442

Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych wykorzystano multisensorową maszynę współrzędnościową O-Inspect 442 (rys. 2) firmy Zeiss znajdującą się na wypo-

sażeniu Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. System pomiarowy O-Inspect pozwala na realizację pomiarów kontaktowych za pomocą sondy stykowej oraz pomiarów bezkontaktowych za pomocą układu optycznego, dzięki czemu zastępuje on wiele urządzeń specjalistycznych. System optyczny wyposażony w zmienneogniskowy obiektyw telecentryczny pozwala na maksymalne powiększenie rzędu x12, co w przypadku małogabarytowych elementów jest w pełni wystarczające. Pomiar może być prowadzony przy użyciu trzech trybów oświetlenia przedmiotu mierzonego: światło przechodzące, światło odbite segmentowe, światło odbite współosiowe. System pomiarowy O-Inspect 442 został zaprojektowany do szybkich oraz dokładnych pomiarów wielu części, co ma szczególnie duże znaczenie w przemyśle medycznym, samochodowym, elektronicznym. Na rysunku 2 przedstawiono fotografię badanego systemu pomiarowego O-Inspect 442.



Rys. 2. Multisensorowa maszyna współrzędnościowa O-Inspect 442 firmy Zeiss.

Tabela 1. Parametry systemu O-Inspect 442

<b>Zakres pomiarowy</b>		
X = 400 mm	Y = 400 mm	Z = 200 mm
<b>Maksymalna masa mierzonego detalu</b>		
40 kg		
<b>Maksymalny błąd graniczny</b>		
Głowica stykowa VAST XXT	1.9 + L/250 μm (L w mm)	
Układ optyczny	1.9 + L/250 μm (L w mm)	

### 2.3. BADANIA PORÓWNAWCZE

Badania porównawcze miały na celu sprawdzenie wpływu stopnia powiększenia (zoom) układu optycznego multisensorowej maszyny współrzędnościowej O-Inspect na dokładność wyznaczenia średnicy trzech otworów. Bazując na uzyskanych wynikach pomiarowych obliczono względny błąd pomiaru średnicy otworu [11] określony poniższą zależnością (1).

$$\delta_{\phi} = \frac{\bar{\phi}_o - \phi_s}{\phi_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $\phi_s$  – średnica otworów zmierzona WMP Prismo Navigator,  $\bar{\phi}_o$  – średnia arytmetyczna pięciu pomiarów średnicy otworów za pomocą O-Inspect 442.

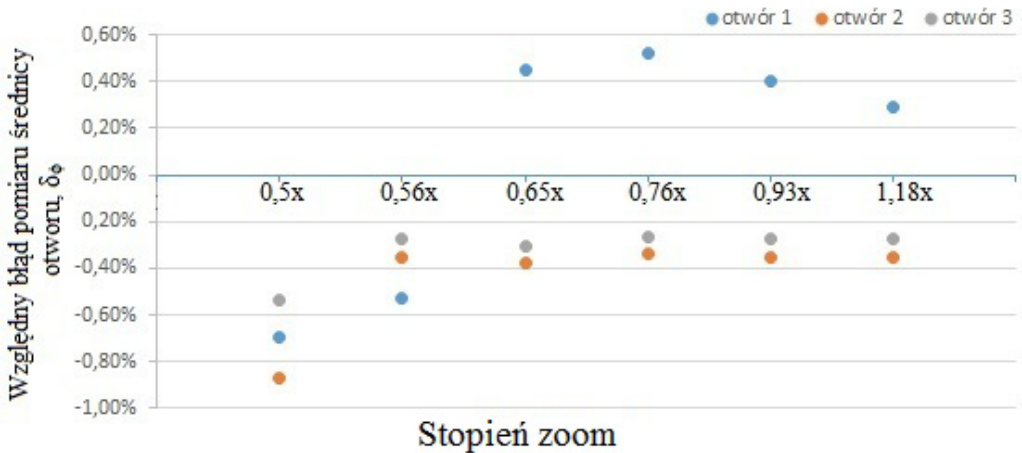
Wyniki przeprowadzonych pomiarów średnic trzech otworów wraz z obliczonymi przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań porównawczych

Cecha geom.	WMP	O-Inspect 442								
		Stopień zoom								
	$\phi_s$	0,5x			0,56x			0,65x		
		$\bar{\phi}_o$	s	$\delta\phi$	$\bar{\phi}_o$	s	$\delta\phi$	$\bar{\phi}_o$	s	$\delta\phi$
mm	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%	
otwór 1	8,234	8,176	0,0006	-0,70	8,190	0,0026	-0,53	8,271	0,0009	0,45
otwór 2	12,124	12,019	0,0005	-0,87	12,082	0,0008	-0,36	12,079	0,0037	-0,37
otwór 3	14,361	14,283	0,0019	-0,54	14,321	0,0019	-0,27	14,317	0,0013	-0,30

Cecha geom.	WMP	O-Inspect 442								
		Stopień zoom								
	$\phi_s$	0,76x			0,93x			1,18x		
		$\bar{\phi}_o$	s	$\delta\phi$	$\bar{\phi}_o$	s	$\delta\phi$	$\bar{\phi}_o$	s	$\delta\phi$
mm	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%	
otwór 1	8,234	8,277	0,0007	0,52	8,267	0,0007	0,40	8,258	0,0004	0,29
otwór 2	12,124	12,084	0,0007	-0,34	12,083	0,0011	-0,35	12,082	0,0005	-0,36
otwór 3	14,361	14,322	0,0015	-0,27	14,322	0,0006	-0,27	14,321	0,0013	-0,27

Aby uwidocznic wpływ stopnia powiększenia układu optycznego na względny błąd pomiaru średnicy otworów, dodatkowo wyniki pomiarowe zostały przedstawione w formie wykresu na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres względnego błędu pomiaru średnicy otworów w zależności od stopnia powiększenia układu optycznego systemu pomiarowego O-Inspect 442.

Analizując wyniki badań przedstawione w tabeli 1 oraz na rysunku 3 można dojść do wniosku, że stopień powiększenia układu optycznego multisensorowej maszyny współrzędnościowej O-Inspect 442 wpływa na dokładność wyznaczenia średnicy otworów. Dla wszystkich trzech badanych otworów najgorszą dokładność pomiarową uzyskano dla najmniejszego stopnia powiększenia wynoszącego 0,5x (patrz rys. 3). Analizując wyniki pomiaru średnicy najmniejszego otworu (otwór 1), można stwierdzić, że wartość średnicy uzyskana za pośrednictwem systemu pomiarowego O-Inspect 442 jest większa od średnicy zmierzonej za pośrednictwem WMP Prismo Navigator. Wyjątek stanowią wyniki uzyskane dla powiększenia 0,5x oraz 0,56x. Przeciwnie jest dla otworów o większej średnicy (otwór 1 oraz 2), gdzie średnice zmierzone za pomocą układu optycznego są mniejsze od wartości wzorcowych. Może to wynikać ze sposobu pozyskiwania punktów pomiarowych za pomocą systemu optycznego, gdzie dokonujemy pomiaru punktów najbardziej wysuniętych na całej wysokości otworu.

Dla otworu 1 o najmniejszej średnicy tj.  $\phi$  8,20 największą dokładność pomiarową uzyskano dla badanego największego stopnia powiększenia wynoszącego 1,18x. W przypadku pomiaru średnicy tego otworu, można zauważyć, że wzrost powiększenia zmniejsza wartość względnego błędu pomiaru średnicy otworu.

Natomiast rozpatrując wyniki pomiarowe uzyskane dla otworów o większych średnicach (otwór 2 oraz 3), można stwierdzić, że najlepszą dokładność pomiarową uzyskano dla powiększenia 0,76x. W tym przypadku wzrost powiększenia układu

optycznego systemu O-Inspect 442 w umiarkowany sposób powoduje obniżenie dokładności wyznaczenia średnicy otworów, jednakże wartości te są znikome.

Rozpatrując błędy średnie kwadratowe  $s$  obliczone na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych, można stwierdzić, że pomiary optyczne cechują się stosunkową wysoką powtarzalnością.

Podsumowując analizę wyników przedstawionych w tabeli 1, można stwierdzić, że w przypadku otworów o mniejszej średnicy należy stosować większe zakresy powiększenia pomiarowego. Natomiast dokonując pomiaru średnic większych otworów, zastosowanie większego stopnia powiększenia nie wpływa znacząco na dokładność pomiaru średnicy otworu, a wręcz obniża ją. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że dla wszystkich badanych otworów najmniejszą dokładność uzyskano dla najmniejszego stopnia powiększenia. W związku z tym należy unikać jego stosowania.

### 3. PODSUMOWANIE

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu stopnia powiększenia układu optycznego zastosowanego w systemie wizyjnym na dokładność wyznaczenia podstawowych cech geometrycznych tj. średnic otworów. Poprzez powiększenie układu optycznego rozumie się tutaj stopień zoom obiektywu zmiennoogniskowego Discovery systemu O-Inspect 442. Wyniki badań prezentowane w artykule wykazały, że w zależności od wartości średnicy otworu, należy odpowiednio dobrać stopień powiększenia układu optycznego multisensorowej maszyny współrzędnościowej. W przypadku mniejszych otworów należy dążyć do możliwie największego powiększenia. Natomiast dokonując pomiaru średnicy większych otworów, wzrost stopnia powiększenia nie poprawia dokładności pomiarowej lecz wydłuża czas pomiaru, co jest zjawiskiem niepożądanym. W większości przypadków wartości średnic otworów zmierzonych metoda optyczna były mniejsze od wartości uzyskanych metodą stykową za pomocą maszyny współrzędnościowej.

Należy dodać, że interpretacja wyników uzyskanych za pomocą systemów wizyjnych nie jest do końca jednoznaczna. Związane jest to z tym, że na wynik pomiarowy uzyskany za pośrednictwem multisensorowej maszyny współrzędnościowej wpływa wiele czynników np. wybór sposobu oświetlenia przedmiotu mierzonego, stopień powiększenia, jakość wykonanej powierzchni. Wybór odpowiednich parametrów pomiarowych np. stopnia powiększenia w głównej mierze zależy od decyzji operatora. Jednakże badania przedstawione w artykule mogą stanowić wskazówki dotyczące jak te parametry dobrać, aby wynik pomiarowy obciążony był możliwie jak najmniejszym błędem.



## LITERATURA

- [1] RATAJCZYK E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [2] GAPIŃSKI B., *Zalecenia dla pomiaru odchyłki okrągłości na współrzędnej maszynie pomiarowej (CMM)*. W: PAK vol. 53, nr 9bis/2007, 523–526.
- [3] ADAMCZAK S., BOCHNIA J., KACZMARSKA B., *Estimating the uncertainty of tensile strength measurement for a photocured material produced by additive manufacturing*. W: Metrol. Meas. Syst., Vol. XXI, No. 3, 2014, 53–560.
- [4] ADAMCZAK S., BŁASIAK S., BOCHNIA J., *Pomiary wielkości geometrycznych modeli kształtowanych przyrostowo z zastosowaniem skanera 3D*, W: Mechanik 8-9, 2014, 17-25.
- [5] CIESZYŃSKI W., ZIĘBA M., REINER J., *Wizyjny system pomiarowy położenia złącza dla korekcji trajektorii optycznej głowicy laserowej w procesie spawania*. W: Mechanik 8-9, 2014, 39-50.
- [6] KEFERSTEIN C. P., MARXER M., GOTTI R., THALMANN R., JORDI T., ANDRAS M., BECKER J., *Universal high precision reference spheres for multisensor coordinate measuring machines*. W: CIRP Annals - Manufacturing Technology 61, 2012, 487–490.
- [7] RAMU P., YAGUE J.A., HOCKEN R.J., MILLER J., *Development of a parametric model and virtual machine to estimate task specific measurement uncertainty for a five-axis multi-sensor coordinate measuring machine*. W: Precision Engineering 35, 2011, 431–439.
- [8] Materiały informacyjne firmy Zeiss.
- [9] HAO S., SHUXIAO L., DUOYU G., HONGXING C., *Bearing defect inspection based on machine vision*. W: Measurement 45, 2012, 719–733.
- [10] NOWAKOWSKI Ł., MIKO E., *Wpływ konstrukcji obrabiarki na dokładność wykonania przedmiotu próbnego*. W: PAK vol. 58, nr 1/2012, 2012, 123-125.
- [11] ADAMCZAK S., JANUSIEWICZ A., MAKIEŁA W., STĘPIEŃ K., *Statistical validation of the method for measuring radius variations of components on the machine tool*. W: Metrol. Meas. Syst., Vol. XVIII, No. 1, 2011, 35-46.