

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Mechaniczny
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej

mgr inż. Michał Jedynak

Praca doktorska:

*Model pomiaru współrzędnościowego realizowanego
maszynami multisensorycznymi*

Model for coordinate measurement with multisensor machines

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy A. Sładek

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Krawczyk, prof. PK

Kraków 2024

Dziękuję,

*Panu prof. dr hab. inż. Jerzemu A. Sładkowi oraz
Panu dr inż. Marcinowi Krawczykowi, prof. PK
za pomoc, cenne wskazówki i opiekę.*

*Rodzinie i przyjaciołom oraz całemu zespołowi
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej
za wsparcie i wyrozumiałość.*

Spis treści

1. Wstęp.....	3
1. Współrzędnościowa technika pomiarowa	6
1.1. Podział Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych ze względu na konstrukcję ...	8
2. Maszyny multisensoryczne.....	11
2.1. Przykłady Współrzędnościowych Systemów Multisensorycznych	12
2.1.1. Zeiss O-Inspect	12
2.1.2. Werth Scope Check.....	15
2.1.3. Hexagon OPTIV	17
2.1.4. Mitutoyo LEGEX.....	19
2.1.5. Renishaw AGILITY.....	22
3. Rodzaje systemów pomiarowych występujących w maszynach multisensorycznych.....	24
3.1. Systemy stykowe i ich rodzaje	24
3.1.1. Głowice stykowe przełączające	26
3.1.2. Głowice stykowe skaningowe.....	28
3.2. Systemy optyczne i ich rodzaje	30
3.2.1. Systemy skanujące	31
3.2.2. Systemy wyposażone w głowice optyczne	34
3.2.3. Systemy światła białego.....	35
4. Analiza stanu wiedzy z zakresu tematu pracy	37
4.1. Język programowania Prolog	37
4.2. Systemy ekspertowe w zastosowaniach metrologicznych	38
4.2.1. Programowanie WMP w oparciu o zbiory CAD	38
4.2.2. System RADSPERT i aplikacja Ekspert.....	41
4.2.3. System Spatial Analyzer	44
4.2.4. Aplikacja OPTI-U	46
4.3. Źródła błędów maszyn	48
4.4. Metody oceny dokładności pomiarów	51
4.4.1. Metoda porównawcza	51
4.4.2. Metoda wielopozycyjna	53
4.4.3. Metody symulacyjne.....	55

5. Hipoteza, cel i zakres pracy	58
6. Dobór strategii pomiarowej dla cech pomiarowych.....	60
7. Metoda Hernla w zadaniu szacowania niepewności pomiaru	65
8. Zastosowanie metod symulacyjnych w szacowaniu niepewności pomiaru	69
9. Wyznaczenie błędów multisensorycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej O-Inspect 442 firmy Zeiss.....	75
9.1. Wyznaczenie błędów głowicy stykowej VAST XXT.....	75
9.2. Wyznaczenie błędów systemów optycznych	82
9.2.1. Wyznaczenie błędów głowicy optycznej Discovery.V12	82
9.2.2. Wyznaczenie błędów interferometru światła białego ZEISS DotScan.....	93
10. Wyznaczenie błędów dla różnej konfiguracji sensorów maszyny multisensorycznej O-Inspect 442 firmy Zeiss.....	99
10.1. Głowica stykowa VAST XXT i głowica optyczna Discovery.V12	103
10.2. Głowica stykowa VAST XXT i interferometr światła białego ZEISS DotScan.	105
10.3. Głowica optyczna Discovery.V12 i interferometr światła białego ZEISS DotScan	107
11. Algorytm działania aplikacji systemu ekspertowego	109
12. Weryfikacja działania algorytmu systemu ekspertowego	117
12.1. Pomiary na wzorcu	117
12.2. Pomiary na detalu przemysłowym	120
13. Wnioski z przeprowadzonych badań i zrealizowanych prac	127
14. Kierunki dalszych badań i prac rozwojowych.....	129
15. Bibliografia.....	133
Spis ilustracji.....	140
Spis tabel.....	146
Streszczenie.....	148
Summary	150

1. Wstęp

Postęp technologiczny, który prowadzi do wzrostu automatyzacji procesów produkcyjnych, jest kluczowy dla rozwoju działów kontroli jakości. W dobie nowoczesnych zakładów produkcyjnych, które kładą nacisk nie tylko na jakość produkowanych towarów, ale także na minimalizację czasu ich produkcji, konieczne jest tworzenie zaawansowanych systemów. Systemy te powinny umożliwiać efektywną weryfikację jakości produktów, jednocześnie spełniając rygorystyczne wymagania dotyczące czasu. Powyższe założenia spełniają systemy do analizy geometrii oraz odchyłek kształtu bazujące na współrzędnościowej technice pomiarowej. Dzięki identyfikacji pojedynczych punktów w przestrzeni trójwymiarowej możliwa jest kompleksowa analiza weryfikowanych obiektów. Współrzędnościowe Maszyny Pomiarowe przez lata były dostosowywane do coraz lepiej zautomatyzowanych systemów wytwarzania, nie tylko pod kątem możliwości realizacji pomiarów, ale przede wszystkim pod względem dokładności wyników badań.

Współczesne współrzędnościowe systemy pomiarowe najogólniej można podzielić na stykowe i bezstykowe. W przypadku systemów stykowych identyfikacja punktów w przestrzeni odbywa się poprzez styk kulistej końcówki pomiarowej z obiektem mierzonym. W momencie zetknięcia następuje rozwarcie styku elektrycznego (głowice przełączające inaczej impulsowe) lub zmiana wskazania w układzie indukcyjnym (głowice skaningowe) i akwizycja punktu. Z kolei zastosowanie głowic obrotowo uchylnych pozwala na realizację pomiaru obiektu w jednym zamocowaniu pod różnymi kątami. Maszyny stykowe są powszechnie stosowane w zakładach produkcyjnych. Z uwagi na fakt, iż należą do najstarszej i najbardziej rozbudowanej grupy systemów współrzędnościowych ich konstrukcja i wynikające z niej błędy pomiarowe zostały przeanalizowane i zbadane w licznych opracowaniach i publikacjach naukowych.

Drugą grupą są systemy optyczne. W tej grupie można wyróżnić urządzenia bazujące na metodzie triangulacji z zastosowaniem światła laserowego lub strukturalnego. Badane detale są odwzorowywane w postaci chmury punktów, która następnie jest poligonizowana. Z tak uzyskanej siatki obiektu wyznacza się w oprogramowaniu poszczególne cechy geometryczne, które poddawane są analizie pomiarowej.

Kolejnym typem są maszyny wykorzystujące głowice optyczne wywodzące się od mikroskopów warsztatowych. Współczesne urządzenia tego typu, pozwalają na automatyczne rozpoznawanie krawędzi obiektów mierzonych i akwizycję dużej liczby punktów pomiarowych w krótkim czasie. Ostatnim rodzajem są urządzenia wykorzystujące głowice z chromatycznym czujnikiem światła białego. Znajdują one zastosowanie w pomiarach niewielkich i delikatnych detali w szczególności o powierzchniach refleksyjnych.

Od kilku lat coraz większą popularność zyskują maszyny multisensoryczne. Umożliwiają one integrację zalet stykowych i bezstykowych systemów pomiarowych. Szczególnie cenione są wśród zakładów produkujących detale o wysokim stopniu skomplikowania. Połączenie wyspecjalizowanych możliwości różnych metod pomiarowych czyni z nich urządzenia uniwersalne do realizacji poszczególnych zadań pomiarowych. W przypadku urządzeń tego typu problemem, szczególnie dla mniej doświadczonych kontrolerów jakości, jest dobór odpowiedniego systemu do konkretnego zadania pomiarowego. Właściwie dobrane do siebie oraz poprawnie zdefiniowana strategia pomiarowa pozwalają na optymalizację czasu niezbędnego do wykonania badań, a przede wszystkim umożliwiają uzyskanie mniejszej niepewności pomiaru.

Istotą pomiarów jest podanie wyniku wraz z dokładnością. Tylko wówczas informacja co do wyniku jest użyteczna pod kątem prowadzonej kontroli jakości. Zwyczajowo producenci określając dokładność urządzenia bazują na normach [N1, N2, N3, N4, N5] definiując dla danego systemu maksymalne błędy głowicy pomiarowej lub koncentrując się na zadaniu pomiaru długości. Podczas takich badań wykonywane są testy, najczęściej na kuli wzorcowej i wzorcach krańcowych, w wyniku których możliwe jest zdefiniowanie dokładności jako wartości stałej bądź liniowo narastającej wraz z przyrostem mierzonej długości.

Przemysłowy użytkownik końcowy realizując pomiar na maszynie do określenia niepewności pomiaru najczęściej bazuje na równaniu dokładności. Szczególnie w przypadku urządzeń multisensorycznych bardziej zasadne jest zastosowanie podejścia zadaniowego.

Przeprowadzenie racjonalnego doboru np. systemu do zadania pomiarowego wymaga bazy wiedzy, którą można przeszukać, przeanalizować i odnieść do rozważanego przypadku. W realizacji takich zadań sprawdzają się systemy ekspertowe.

Są to systemy komputerowe, które emulują proces podejmowania decyzji. Umożliwiają rozwiązywanie złożonych problemów na podstawie analizy dostępnej bazy danych i wewnętrznych procedur wnioskowania. Dzięki mechanizmowi wnioskowania i objaśniania decyzji taki system jest w stanie nie tylko przeprowadzić proces selekcji, ale również uzasadnić użytkownikowi podjętą decyzję. Obecnie zamiast tworzyć systemy ekspertowe od podstaw stosuje się gotowe szkielety takich programów, które użytkownik musi zasilić konkretną bazą danych.

Przykładowym językiem programowania logicznego przeznaczonym do tworzenia systemów ekspertowych jest Prolog, czyli język deklaratywny, w którym opisuje się problem, reguły i relacje między obiektami tak, aby system samodzielnie wywnioskował rozwiązanie rozważanego zagadnienia.

1. Współrzędnościowa technika pomiarowa

Historia współrzędnościowej techniki pomiarowej (WTP) sięga drugiej połowy XX wieku, kiedy to rozwój technologii i potrzeba precyzyjnych pomiarów oraz automatyzacja metod kontrolnych spowodowały powstanie nowych możliwości i narzędzi pomiarowych. Początki WTP związane są z rozwojem technologii komputerowej oraz potrzebą dokładnego i precyzyjnego pomiaru obiektów w zakładach produkcyjnych.

W latach 50. i 60. XX wieku pojawiły się pierwsze próby wykorzystania komputerów do kontroli jakości i pomiarów części przemysłowych. W latach 70. i 80. następował szybki rozwój technologii elektronicznych i komputerowych, co umożliwiło powstanie pierwszych maszyn pomiarowych trójwymiarowych (CMM). Pierwsze CMM wykorzystywały analogowe systemy pomiarowe, a pomiary były wykonywane z użyciem mechanicznych dalmierzy i wskaźników. Początkowo były to duże i kosztowne urządzenia, dostępne głównie dla dużych firm. W latach 90. i na początku XXI wieku następował dalszy rozwój technologii pomiarowych. Pojawiły się nowe typy CMM wykorzystujące bardziej zaawansowane systemy pomiarowe, co umożliwiło szybsze i dokładniejsze pomiary. Rozwój oprogramowania do analizy danych pozwolił na bardziej zaawansowane przetwarzanie i interpretację danych pomiarowych. W ostatnich latach zaobserwować można dynamiczny rozwój skanowania laserowego 3D pozwalających na szybkie i precyzyjne odwzorowanie powierzchni obiektów [9, 16, 37, 44].

Zadaniem WTP jest przedstawienie danych dotyczących poszczególnych elementów geometrycznych w postaci zbioru współrzędnych punktów z wykorzystaniem geometrii wektorowej. W tym celu wykorzystuje się wektor wodzący i kierunkowy. Wektory wodzące służą do określenia położenia mierzonego przedmiotu, natomiast za pomocą wektora kierunkowego wyznacza się położenie katowe w przestrzeni obiektów, które są utworzone z tych punktów (w tym prostych, płaszczyzn). Wielkość skalarna, jak promień okręgu, walca, kąt stożka, odległość, opisuje cechy wymiarowe. Pozostaje kwestia wyznaczenia powierzchni zastępczej mierzonego przedmiotu, posiadającej kształt zakładanej powierzchni nominalnej [42,43].

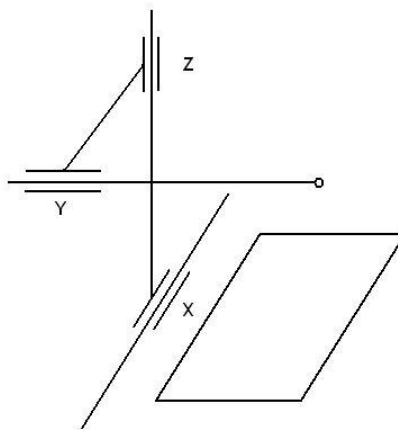
Pomiar we współrzędnościowej technice pomiarowej odbywa się przez zidentyfikowanie punktu na powierzchni mierzonej. Za pomocą współrzędnych punktów, np. styku oblicza się powierzchnię zastępczą, posiadającą kształt powierzchni nominalnej. Położenie tej powierzchni zależne jest od współrzędnych pojedynczych punktów. Aby ją wyznaczyć wymagana jest określona liczba punktów, a przy tym powierzchnia mierzona (rzeczywista) musi być opisana za pomocą zidentyfikowanych punktów na jej powierzchni według metody Gaussa (najmniejszych kwadratów). Różnica pomiędzy położeniem powierzchni zastępczych, które tworzą obraz mierzonego przedmiotu w stosunku do położenia powierzchni rzeczywistej nazywana jest błędem pomiarowym. Analizując te błędy należy koncentrować się na różnicy pomiędzy położeniem punktu pomiarowego wskazanego przez maszynę do obliczenia powierzchni zastępczej, a położeniem rzeczywistym [41, 42].

Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa (WMP) (zgodnie z definicją podaną przez normę PN-EN ISO 10360-1:2001 [N1]) jest urządzeniem, którego zespoły realizujące pomiar przemieszczają się w określonych współrzędnych. Kierunki przesuwu wyznaczają osie układu kartezjańskiego X, Y, Z i definiują przestrzenny układ współrzędnych maszyny. Przesunięcia wzdłuż osi są wskazywane przez wzorce długości i przesyłane do komputera oraz elektronicznych zespołów sterujących. Pomiar realizowany jest za pomocą głowicy pomiarowej stykowej lub bezstykowej z powierzchnią mierzoną. W literaturze przedmiotu znaleźć można wiele opracowań na temat WMP [3, 6, 37, 39, 42]. Na potrzeby pracy opisano szczegółowo maszyny multisensoryczne. W nowszych wydaniach norm sformułowanie „maszyna” zostało zastąpione przez „system”.

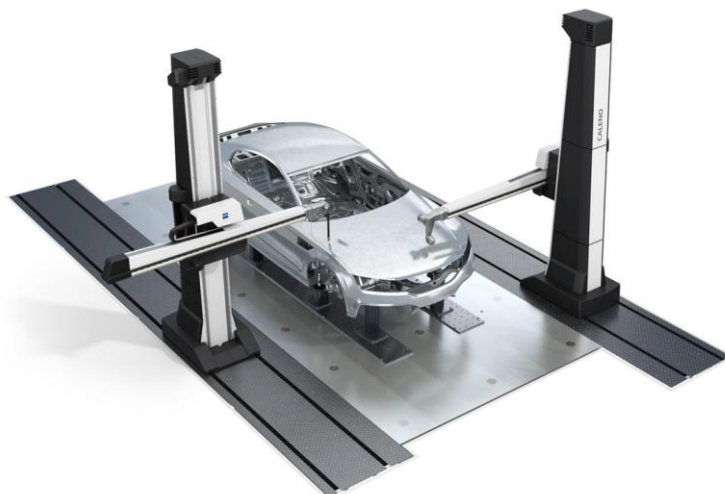


Rysunek 1.2. Maszyna Leitz PMM-G – konstrukcja zamknięta

W konstrukcjach otwartych głowica pomiarowa umocowana jest na belce poruszającej się w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny stołu roboczego. Konstrukcja ta zapewnia swobodny dostęp do badanego obiektu z różnych stron, co ułatwia umieszczenie i pomiar obiektów o nietypowych kształtach lub rozmiarach. Najczęściej są to maszyny wysięgnikowe. Podczas pomiaru na wysięgnik wraz z belką działają siły zmienne, co prowadzi do odkształceń konstrukcji. Schemat maszyny oraz konstrukcję rzeczywistą Firmy Zeiss umieszczono poniżej.



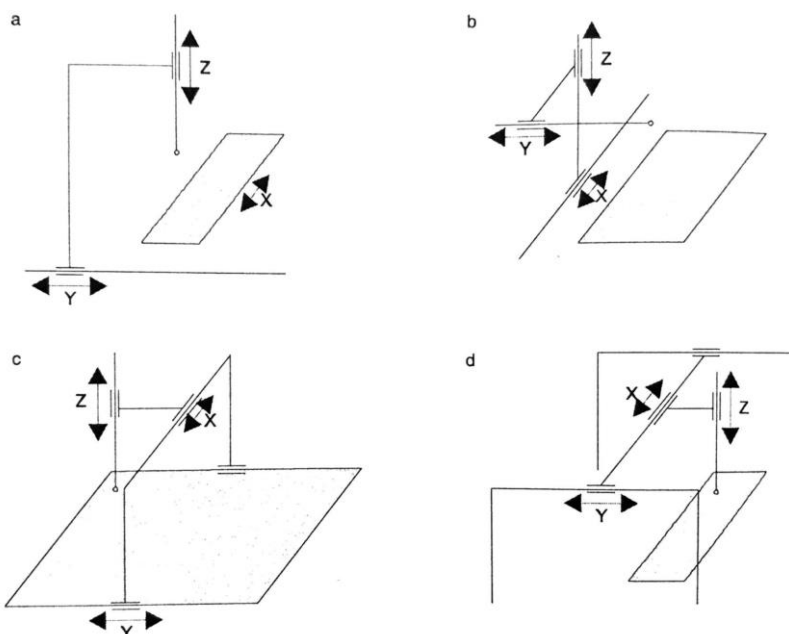
Rysunek 1.3. Schemat maszyny o konstrukcji otwartej [37]



Rysunek 1.4. Maszyna Zeiss CALENO – konstrukcja otwarta [W1]

Ze względu na zastosowane rozwiązania konstrukcji nośnej maszyny wyróżniamy cztery podstawowe rodzaje:

- wspornikowa,
- wysięgnikowa,
- portalowa,
- suwnicowa.



Rysunek 1.5. Schematy rozwiązań konstrukcyjnych WMP: a) wspornikowa, b) wysięgnikowa, c) portalowa, d) kolumnowa [42]

2. Maszyny multisensoryczne

Multisensoryczne Współrzędnościowe Systemy Pomiarowe (MWSP), to zaawansowane urządzenia pomiarowe, które łączą w sobie różnorodne sensory i techniki pomiarowe w celu uzyskania kompleksowego obrazu badanego obiektu lub procesu. Pozwalają na dokładne i jednocześnie bardziej wszechstronne pomiary.

Są to urządzenia, które integrują różne rodzaje głowic pomiarowych: głowice stykowe, kamery wizyjne, głowice laserowe, interferometry światła białego i wiele innych [8].

Dzięki temu możliwe jest jednoczesne mierzenie wielu parametrów fizycznych co pozwala na uzyskanie kompleksowego obrazu badanego obiektu. Charakteryzują się wysoką dokładnością pomiarów. Wyposażone są w zaawansowane oprogramowanie pomiarowe, które umożliwia automatyzację procesu pomiarowego, analizę danych oraz generowanie raportów. To sprawia, że są one efektywne i łatwe w użyciu.

Na rynku istnieje wiele firm, które wyspecjalizowały się w produkcji zaawansowanych maszyn multisensorycznych wykorzystywanych w metrologii, w tym:

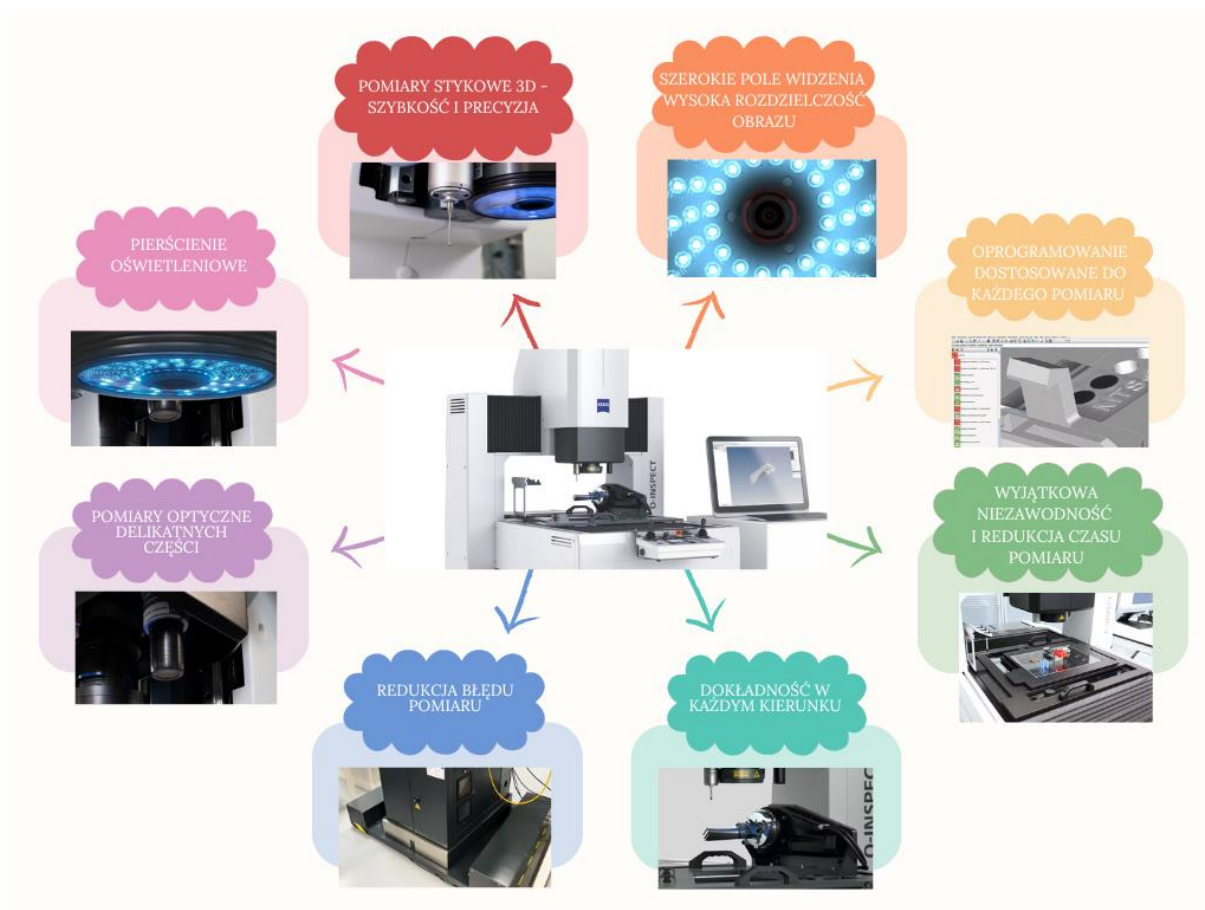
- Carl Zeiss,
- Werth Messtechnik,
- Hexagon Metrology,
- Mitutoyo,
- Renishaw.

2.1. Przykłady Współrzędnościowych Systemów Multisensorycznych

2.1.1. Zeiss O-Inspect

W ofercie firmy Carl Zeiss znajduje się multisensoryczna maszyna pomiarowa serii O-Inspect. Maszyna O-Inspect 442 firmy Zeiss to zaawansowane narzędzie do kontroli jakości i pomiarów w środowisku produkcyjnym. Dzięki swoim możliwościom pomiarowym, automatyzacji i integracji z oprogramowaniem CAD/CAM, umożliwia precyzyjne pomiary oraz analizę geometryczną elementów. Jest to maszyna multisensoryczna, która umożliwia jednoczesne pomiary przedmiotu za pomocą:

- głowicy stykowej VAST XXT,
- głowicy optycznej Discovery.V12,
- interferometru światła białego ZEISS DotScan.



Rysunek 2.1. Maszyna multisensoryczna Zeiss O-Inspect - elementy wyposażenia

Zakres pomiarowy:

- X: 0 - 400 mm,
- Y: 0 - 400 mm,
- Z: 0 - 200 mm.
- w przypadku realizacji pomiarów z jednoczesnym wykorzystaniem dostępnych systemów, przestrzeń pomiarowa maszyny jest ograniczona mniejszym zakresem.

Dostępne oprogramowanie:

- ZEISS CALYPSO: Zaawansowane oprogramowanie do analizy i pomiaru, umożliwiające szybkie i precyzyjne przeprowadzanie pomiarów oraz generowanie raportów.
- ZEISS PiWeb: Oprogramowanie do zarządzania danymi pomiarowymi i generowania raportów, umożliwiające efektywne zarządzanie danymi pomiarowymi.

Integracja i kompatybilność:

- Integracja z systemami CAD/CAM, umożliwiająca import danych projektowych do oprogramowania pomiarowego.
- Obsługa różnych formatów danych CAD, co pozwala na łatwe dostosowanie maszyny do różnych potrzeb aplikacyjnych.

Pomiary:

- Pomiar i analiza geometrii elementów, w tym wymiarów, kształtów i położeń.
- Możliwość dokładnej analizy powierzchni elementów oraz oceny zgodności z tolerancjami geometrycznymi.
- Pomiar elementów o skomplikowanych kształtach i strukturach.

Tabela 2.1 Charakterystyka sensorów Zeiss O-Inspect 442

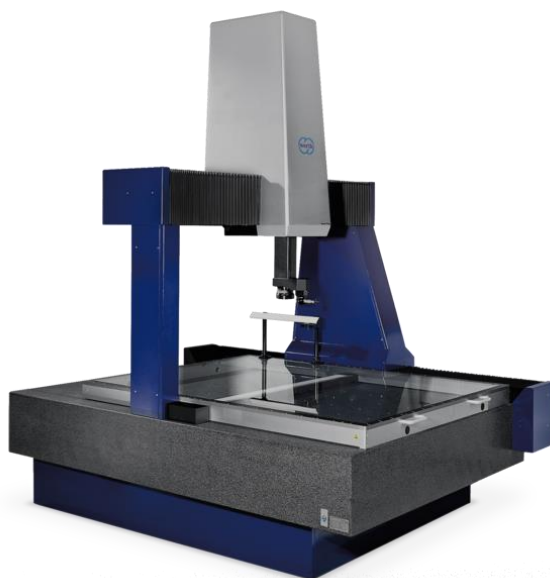
Głowica stykowa VAST XXT	Głowica optyczna Discovery.V12	Interferometr światła białego DotScan
<p>Dokładność pomiarowa</p> <p> $MPE (EO) = 0,0019 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm},$ $MPE (EUXY) = 0,0019 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm},$ $MPE (EOX) = 0,0022 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm},$ </p> <p>gdzie L to długość wyrażona w mm</p>		
<p>Umożliwia wykonanie precyzyjnych pomiarów zarówno punktowych jak i poprzez skan, dzięki temu można otrzymać informację na temat kształtu mierzonego przedmiotu.</p>	<p>Charakteryzuje się dużym polem widzenia oraz wysoką rozdzielczością obrazu. Cechy te sprawiają, że możliwy jest pomiar na przykład otworu w obiekcie mierzonym bez ruchu kamery bez konieczności składania wielu obrazów. Również pomiar obiektu ulega skróceniu i jest bardziej dokładny.</p>	<p>Umożliwia swobodne skanowanie przedmiotu mierzonego. Jeżeli przedmiot mierzony jest przezroczysty, to czujnik pozwala na pomiar jednocześnie górnej i dolnej strony obiektu. Skracza to znacznie czas pomiaru.</p>



Rysunek 2.2. Od lewej głowica stykowa VAST XXT, głowica optyczna Discovery.V12, interferometr światła białego DotScan [30]

2.1.2. Werth Scope Check

Jednym z pionierów multisensorycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych jest firma Werth Messtechnik. W swojej ofercie posiadają serię maszyn Scope Check. Firma Werth posiada pełną gamę sensorów, które mogą być zamontowane na ich maszynach.



Rysunek 2.3. Maszyna Werth Scope Check MB [W5]

Tabela 2.2. Zestawienie sensorów stykowych dla urządzeń serii Scope Check [W5]

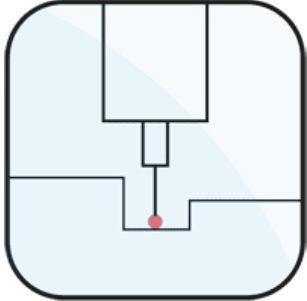
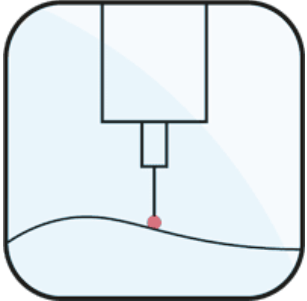
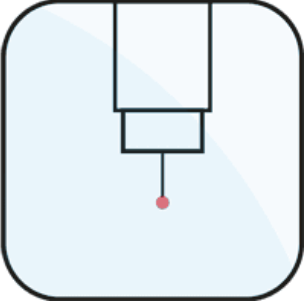
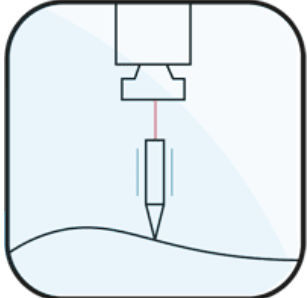
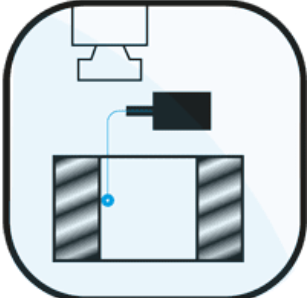

<i>Renishaw TP200</i> precyzyjne pomiary punktowe	<i>Renishaw SP25</i> stykowe pomiary skaningowe	<i>Renishaw SP80</i> precyzyjne pomiary skaningowe 3D
		
<i>Werth Contour Probe</i> profilometr	<i>Werth Fiber Probe 2D</i> mikrosonda światłowodowa 2D	<i>Werth Fiber Probe 3D</i> mikrosonda światłowodowa 3D
		

Tabela 2.3. Zestawienie sensorów optycznych dla urządzeń serii Scope Check [W5]

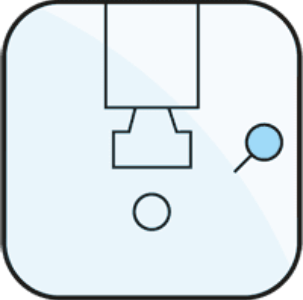

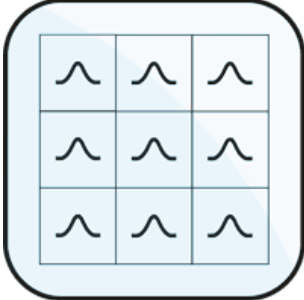
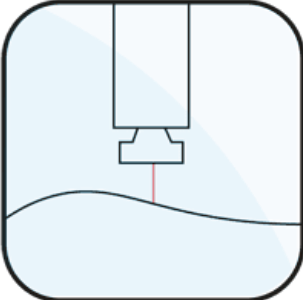

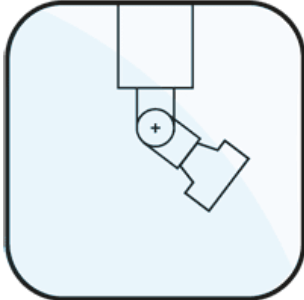


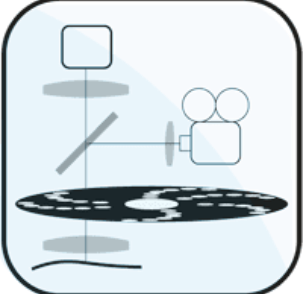

<i>Fixed optics</i> optyka stałogniskowa	<i>Werth Zoom (patent)</i> optyka zmiennoogniskowa.	<i>Autofocus</i> kontrastowy pomiar topografii
		
<i>Werth Laser Probe (WLP)</i> laserowy pomiar skaningowy w osi Z	<i>Werth Laser Probe (WLP)</i> topograficzny pomiar sondą triangulacyjną	<i>IP 40</i> sonda optyczna obrotowo-uchyłna
		

Tabela 2.4. Zestawienie sensorów optycznych do pomiarów topografii powierzchni dla urządzeń serii Scope Check [W5]

<i>Chromatic Focus Point (CFP)</i> konfokalny pomiar skaningowy w osi Z	<i>Chromatic Focus Line (CFL)</i> sonda CFP w wersji topograficznej
	
<i>Nano Focus Probe (NFP)</i> topograficzny pomiar konfokalny	<i>Werth Interferometer Probe</i> interferometryczny pomiar chropowatości
	

Maszyny serii Scope Check charakteryzują się równaniem na poziomie:

$$MPE (E0) = 0,0015 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \text{ gdzie } L \text{ to długość wyrażona w metrach.} \quad (1)$$

2.1.3. Hexagon OPTIV

Firma Hexagon oferuje maszyny multisensoryczne serii OPTIV. Zapewniają one kompleksowe rozwiązania do pomiarów wielkości geometrycznych detali wykonanych z dowolnego materiału o różnym stopniu wykończenia powierzchni. Wyróżnić można kilka modeli OPTIV M, OPTIV Reference i OPTIV Lite.

W urządzeniach tych zastosowano modułową konstrukcję. W zależności od potrzeb systemy pomiarowe mogą zostać skonfigurowane zgodnie z oczekiwaniami klienta. Oferowane systemy pomiarowe:

- sonda wizyjna z matrycą kolorową CMOS o wysokiej rozdzielczości wraz z programowalnym 10x automatycznym układem optycznym. Oświetlenie zmienne zapewnia kontrastowe podświetlenie złożonych powierzchni oraz krawędzi dzięki zastosowaniu:
 - górnego współosiowego oświetlenia w technologii LED,
 - telecentrycznego oświetlenia tylnego LED,
 - wielosegmentowego oświetlenia lampą pierścieniową (ring light) LED.
- sonda wizyjna z monochromatyczną matrycą (kamerą) CMOS o wysokiej rozdzielczości,
- dwie kamery z obiektywem stało ogniskowym (OPTIV Dual Camera) z wymiennymi soczewkami,
- chromatyczny sensor światła białego (CWS),
- sonda stykowa HP-TM (automatyczny magazynek wymiany sond HR-MP do 6 modułów),
- sonda skanująca HP-S-X1 (automatyczny magazynek wymiany trzpieni HR-X do 9 modułów),
- głowica obrotowo-uchylna HH-A-T5 1,
- stół obrotowy i stół obrotowy sztaplowany (OPTIV Dual Rotary) z łożyskami pneumatycznymi zapewniający dostęp do wszystkich pozycji pomiarowych dzięki możliwości obrotu mierzonej części, bez konieczności przeprowadzania wielu ustawień i mocowania części.

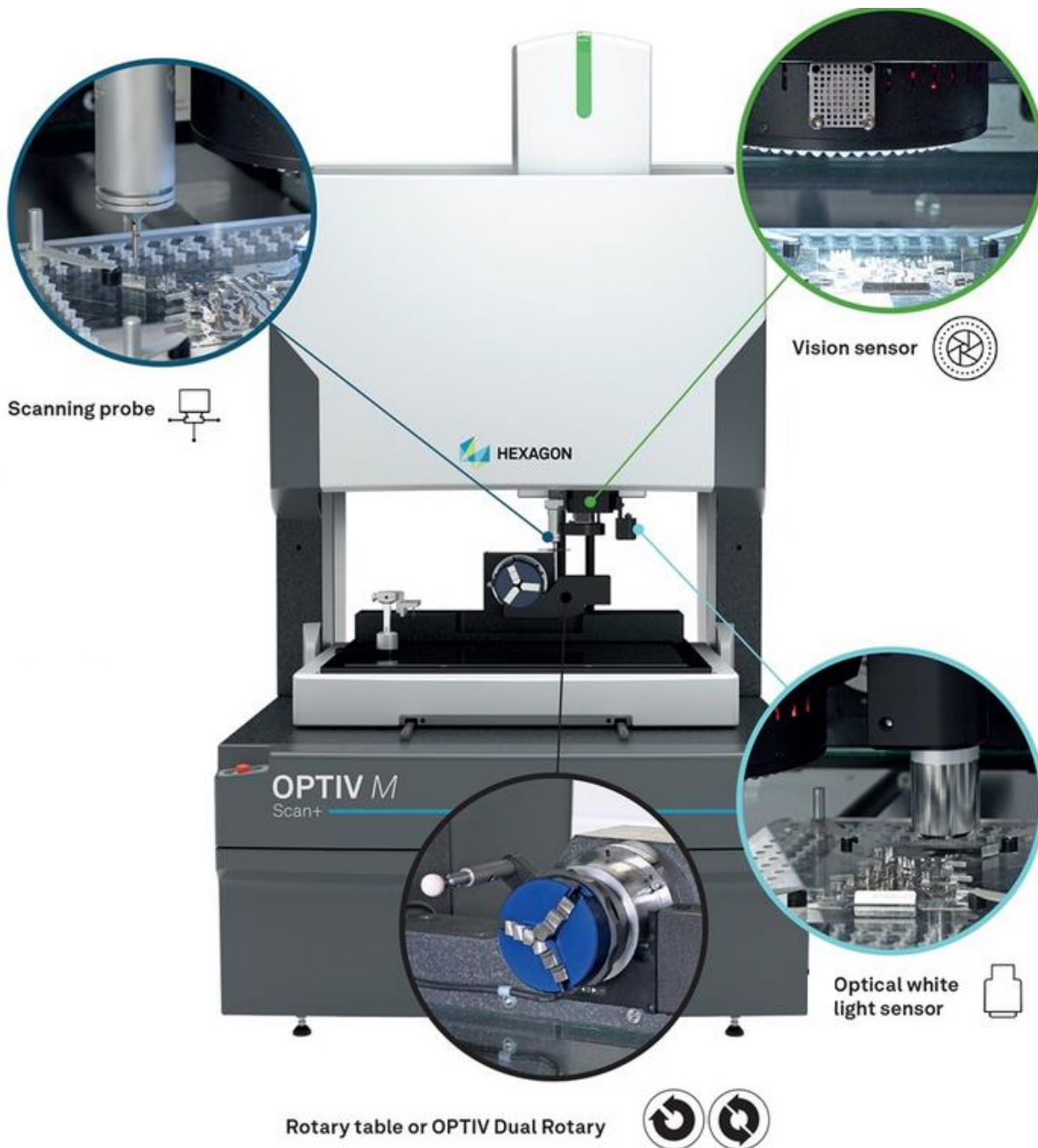
Przykładowe dokładności maszyn serii OPTIV:

- głowica stykowa skanująca:

$$MPE(E0) = 0,0029 \text{ mm}, \quad (2)$$

- głowica wizyjna

$$MPE(EXY) = 0,0019 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}. \quad (3)$$



Rysunek 2.4. Konfiguracja systemów pomiarowych w maszynie Hexagon OPTIV [W2]

2.1.4. Mitutoyo LEGEX

Firma Mitutoyo słynie z produkcji wysokiej jakości urządzeń i przyrządów pomiarowych. W swoim portfolio oferują serię multisensorycznych maszyn pomiarowych LEGEX.

Dzięki rygorystycznej analizie możliwych czynników powodujących błędy, a także dzięki eliminacji lub minimalizacji ich skutków zapewniają bardzo wysoką dokładność pomiaru. Stała konstrukcja bramy i precyzyjne łożyska powietrzne działające na mocno usztywnionych prowadnicach zapewniają doskonałą stabilność ruchu i bardzo wysoką dokładność geometryczną. Dzięki układom napędowym umieszczonym w środku ciężkości osiąga najlepszą możliwą dynamikę. Ponadto w konstrukcji jednostki napędowej zastosowano specjalną podstawę antywibracyjną. Konstrukcja została zaprojektowana pod kątem stabilności termicznej, linały szklane o niskiej rozszerzalności (współczynnik rozszerzalności $0,01 \times 10^{-6}/K$ w każdej osi).



Rysunek 2.5. Maszyna Mitutoyo LEGEX 775 [W3]

Do oferowanych maszyn można zastosować również stolik obrotowy. Dostępne systemy, które mogą zostać zaimplementowane do wybranego urządzenia:

- głowica stykowa skanująca wielotrzpieniowa SP80
- głowica PH10MQ, którą można wyposażyć w:

- sondę stykową przełączającą TP7M
- sondę stykową skanującą SP25M:

$$MPE (E0) = 0,0019 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (4)$$

- sondę Quick Vision Probe, czyli system wizyjny, który dodatkowo wykorzystuje funkcję TAF (Tracking Autofocus). Ustawia ona ostrość w sposób ciągły, dostosowując się do zmian wysokości obiektu mierzonego. Automatyczne śledzenie zmienności powierzchni w osi Z poprawia przepustowość pomiaru, eliminuje również potrzebę ustawiania ostrości podczas pomiarów ręcznych:

$$MPE (EXY) = 0,002 + 0,003 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (5)$$

$$MPE (EZ) = 0,003 + 0,005 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (6)$$

- skaner laserowy SurfaceMeasure, który w zależności od wybranego pola roboczego cechuje się następującymi wartościami błędów:

- seria 606 (60 x 60 mm) $MPE = 0,012 \text{ mm}, \quad (7)$

- seria 610 (60 x 100 mm) $MPE = 0,015 \text{ mm}, \quad (8)$

- seria 1010 (100 x 100 mm) $MPE = 0,018 \text{ mm}, \quad (9)$

- skaner laserowy SurfaceMeasure 606T pozwalający na akwizycję nawet 76 500 punktów pomiarowych na sekundę, dzięki zastosowaniu technologii 3 krzyżujących się wiązek laserowych pod kątem 120°:

$$MPE = 0,017 \text{ mm}. \quad (10)$$



Rysunek 2.6. Rodzaje głowic możliwych do zastosowania w maszynach serii LEGEX [W3]

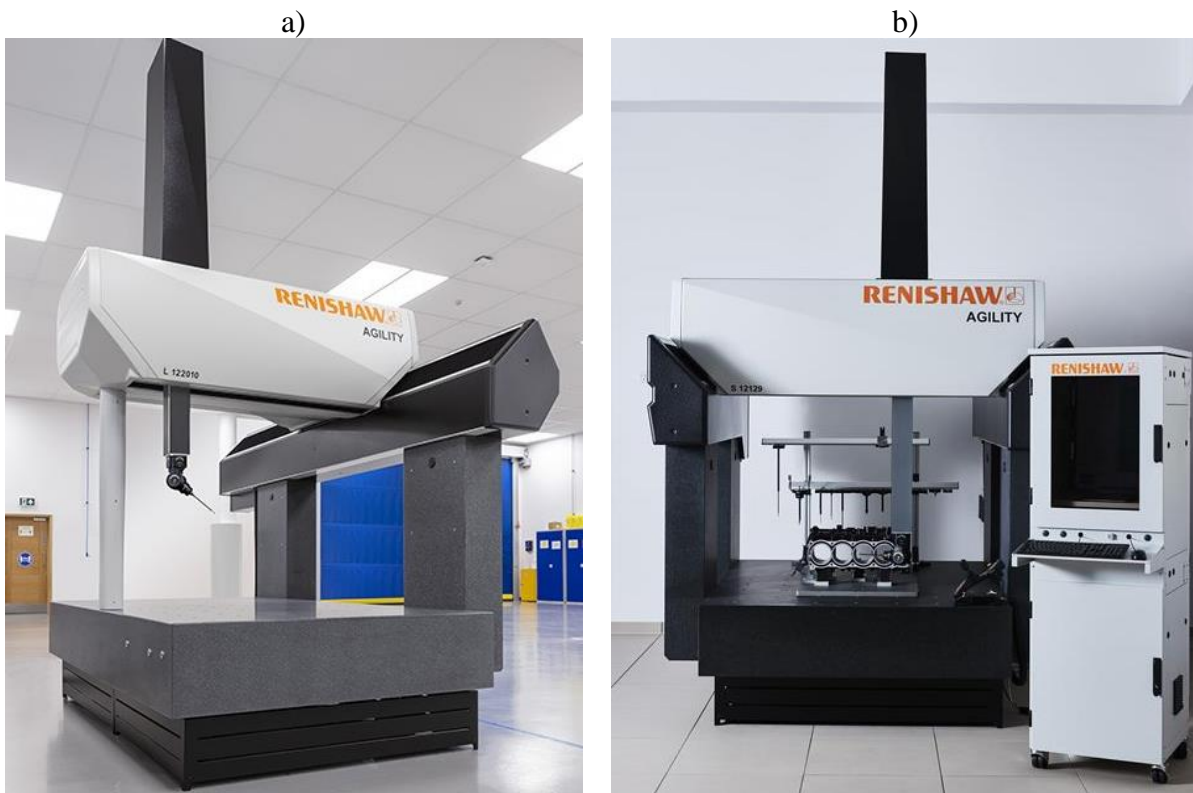
Należy również wspomnieć, że firma Mitutoyo oferuje głowice przeznaczone do pomiarów chropowatości powierzchni, umożliwiając ich automatyczną wymianę pomiędzy innymi typami sond pomiarowych. Zakres pomiarowy wynosi 25, 100 i 360 μm .



Rysunek 2.7. Sonda SurfTest firmy Mitutoyo przeznaczona do pomiarów chropowatości powierzchni [W3]

2.1.5. Renishaw AGILITY

Seria maszyn AGILITY firmy Renishaw wykorzystuje technologię 5-osiowych pomiarów REVO. Umożliwia ona skanowanie z wysoką wydajnością, pomiary bezdotykowe oraz analizę chropowatości powierzchni na jednej maszynie współrzędnościowej.



Rysunek 2.8. Maszyny Renishaw AGILITY [W6]
a) do zastosowań laboratoryjnych, b) do zastosowań na hali produkcyjnej

System REVO umożliwia zastosowanie całej gamy sond przeznaczonych do różnych zadań pomiarowych. Można wyróżnić następujące rodzaje sond współpracujące z głowicą pomiarową REVO-2:

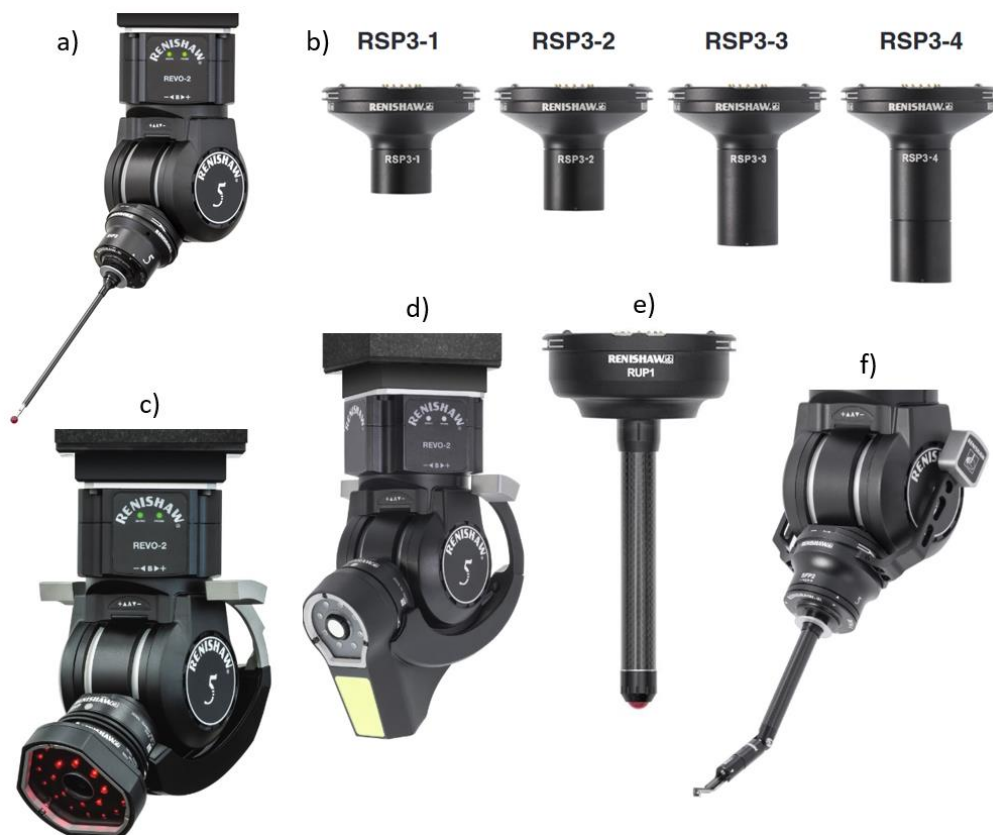
- sonda skanująca RSP2, która umożliwia skanowanie w dwóch wymiarach (w osi X i Y) oraz trójwymiarowe pomiary elektrostatyczne,
- sonda RSP3, która pozwala zarówno na pomiar stykowy jak i skanowanie 3D w osiach X, Y, Z maszyny:

$$MPE (E0) = 0,0031 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (11)$$

- sonda RVP (Revo Vision Probe) umożliwia wykonywanie pomiarów optycznych

$$MPE (PFTU) = 0,0016 \text{ mm}, \quad (12)$$

- sonda RFP1 (Revo Fringe Probe) umożliwia wykonanie bezdotykowego pomiaru przy użyciu światła strukturalnego. W porównaniu do innych systemów tego typu skaner nie wymaga dodatkowych znaczników
 $MPE (PF) = 0,0015 \text{ mm}, \quad (13)$
- sonda RUP1 (Revo Ultrasonic Probe) oferuje ultradźwiękowe pomiary grubości. Wykorzystuje innowacyjną kulkę z elastomerową końcówką, aby zapewnić doskonałe połączenie pomiędzy sondą a materiałem. W rezultacie eliminuje potrzebę interpretacji ekranów oscyloskopu przez wykwalifikowanych operatorów. Dokładność:
 $<0,025 \text{ mm}$ na powierzchniach równoległych,
 $<0,1 \text{ mm}$ na kątach klina do 10° ,
- sonda SFP2 (Surface Finish Probe) umożliwia wykonanie pomiaru chropowatości powierzchni. Jest sondą typu ślizgowego, zakończoną końcówką diamentową o promieniu $2 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ lub $10 \mu\text{m}$. Ślizgacz jest dociskany do powierzchni z przyłożeniem kontrolowanej siły równej w przybliżeniu $0,2 \text{ N}$. Umożliwia pomiary od $6,3$ do $0,05 \mu\text{m Ra}$.



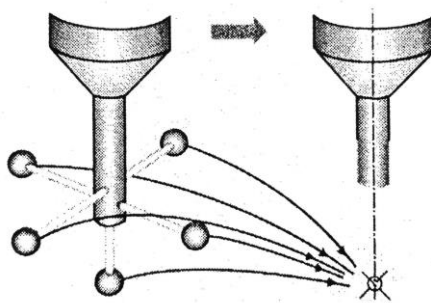
Rysunek 2.9. Sondy systemu REVO a) RSP2, b) RSP3, c) RVP, d) RFP1, e) RUP1, f) SFP2 [W6]

3. Rodzaje systemów pomiarowych występujących w maszynach multisensorycznych

3.1. Systemy stykowe i ich rodzaje

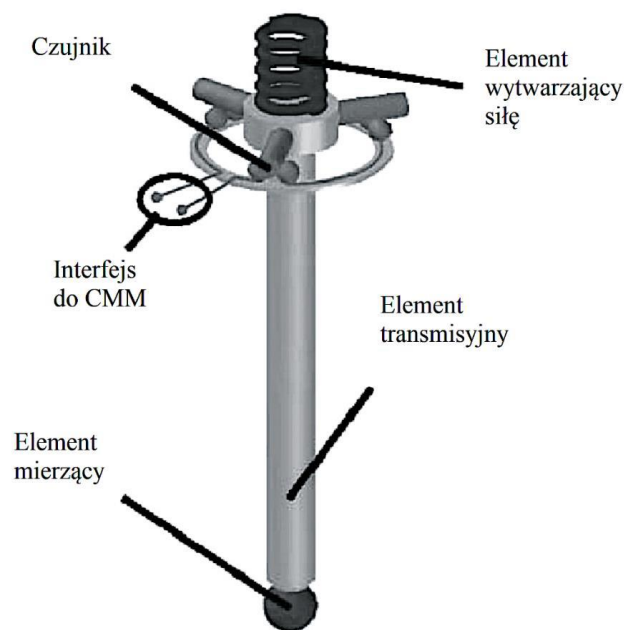
Systemy stykowe w metrologii to rodzaj technologii pomiarowych wykorzystujących bezpośredni kontakt między sondą pomiarową, a badanym obiektem do dokonywania pomiarów jego cech geometrycznych. Wśród istotnych elementów we współrzędnościowym procesie pomiarowym jest lokalizacja punktów pomiarowych na powierzchni mierzonego przedmiotu. W tym celu wykorzystywany jest czujnik stykowy lub bezstykowy zwany głowicą pomiarową lub sondą.

Sonda pomiarowa to urządzenie umieszczone na końcu ramienia lub głowicy maszyny pomiarowej. Zbliżając się do badanego obiektu naciska na jego powierzchnię, aby dokonać pomiaru punktu. Kontakt z powierzchnią odbywa się za pomocą końcówki pomiarowej najczęściej o kształcie kulistym. Przed pomiarem właściwym, wykonywana jest kalibracja, polegająca na pomiarze elementu wzorcowego (zazwyczaj kuli), by wymiar i położenie końcówek mogły być uwzględnione przy każdorazowym pomiarze. Istota tego procesu dla głowicy ze standardowym układem końcówek pomiarowych przedstawiona została na rys. 1. Ilustracja ta może posłużyć do definiowania końcówki referencyjnej inaczej odniesienia, w stosunku do której przeliczane są wszystkie dane pomiarowe zebrane przez wszystkie końcówki danego zestawu, w tym też dla innych używanych w danym programie pomiarowym zestawów końcówek będących w magazynie lub dla różnych położzeń indeksowanego uchwytu [2, 40, 44, 58].



Rysunek 3.1. Idea kalibracji głowicy pomiarowej ze standardową konfiguracją końcówek pomiarowych w układzie gwiazdy [44]

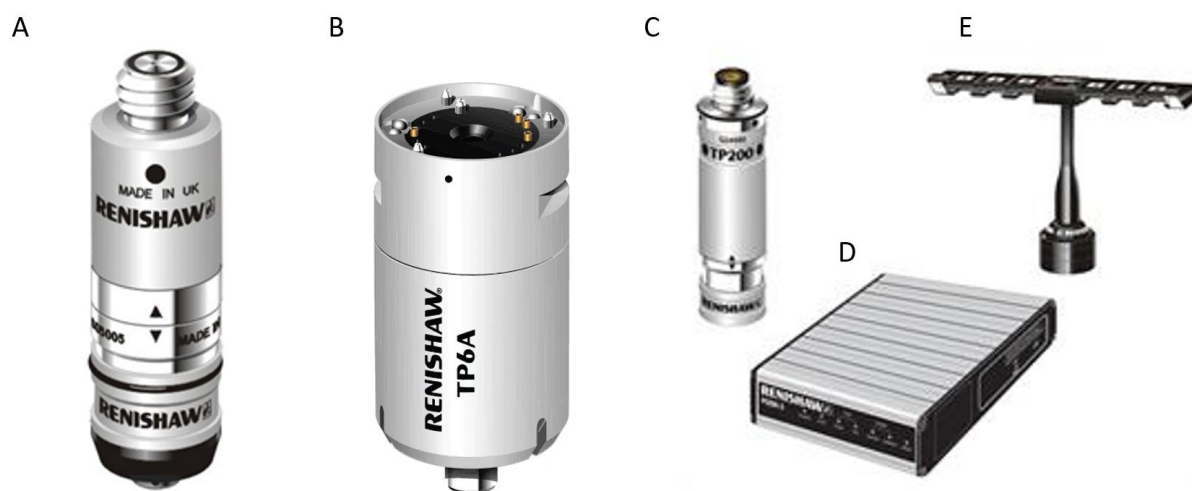
Powszechnie spotykane głowice stykowe składają się z pięciu elementów, zgodnie z rysunkiem 4, który opisano poniżej. Elementem, który jako pierwszy wykrywa punkt na powierzchni mierzonego obiektu jest element mierzący np. kulka znajdująca się na końcówce pomiarowej. Następnie znajduje się element transmisyjny, w postaci trzonka trzpienia pomiarowego, który przekazuje informację kontaktową do czujnika. Kolejną część głowicy stykowej to element generujący oraz sterujący siłą. Tutaj jest to sprężyna. Zadaniem jej jest wytworzyć odpowiednią siłę pomiarową, będącą siłą izotropową. Czujnik (przełącznik) to następny element warunkujący pomiar. Od niego zależy ocena dostarczonej informacji nie tylko dotyczącej kontaktu, ale także określającej kierunek przemieszczenia trzpienia i wielkość tego przemieszczenia. Ostatnim elementem głowicy stykowej jest interfejs do maszyny współrzędnościowej. Interfejs dostarcza informacje o kontakcie do jednostki sterującej. Po otrzymaniu tej informacji dokonywany jest pomiar położenia osi maszyny. Następuje odczyt położenia tych osi oraz dalsze przetwarzanie sygnału, a w efekcie końcowym ocena położenia mierzonego punktu w układzie współrzędnym maszyny.



Rysunek 3.2. Rysunek przedstawiający podstawową budowę głowicy stykowej [14]

3.1.1. Głowice stykowe przełączające

Najstarszą i posiadającą najprostszą konstrukcję wśród głowic stykowych przełączających jest głowica elektrostrykowa. Głowice te generują impuls w momencie styku końcówki głowicy z obiektem. Wywołuje tym samym odczyt współrzędnych punktu z układów pomiarowych maszyny, które zamontowane są na poszczególnych jej osiach oraz wpływa na napęd i sterowanie maszyną.



Rysunek 3.3. Stykowe głowice impulsowe firmy Renishaw: (A) głowica elektrostrykowa modułowa TP20, (B) głowica elektrostrykowa TP6, (C) głowica modułowa elektroniczna TP200, (D) interfejs głowicy elektronicznej, (E) magazynek do wymiany trzpieni pomiarowych [W6]

Obecnie niektóre z tych głowic mają budowę modułową, złożoną z podzespołu bazowego oraz wymiennego modułu składającego się z przetwornika elektrostrykowego i trzpienia pomiarowego. Podzespół bazowy pozwala na połączenie z głowicami obrotowo - uchylnymi za pomocą gwintu zewnętrznego. Moduł trzpienia zamocowany jest za pomocą złącza magnetycznego co pozwala uniknąć ponownej kalibracji głowicy. Może być wymieniony ręcznie lub automatycznie.

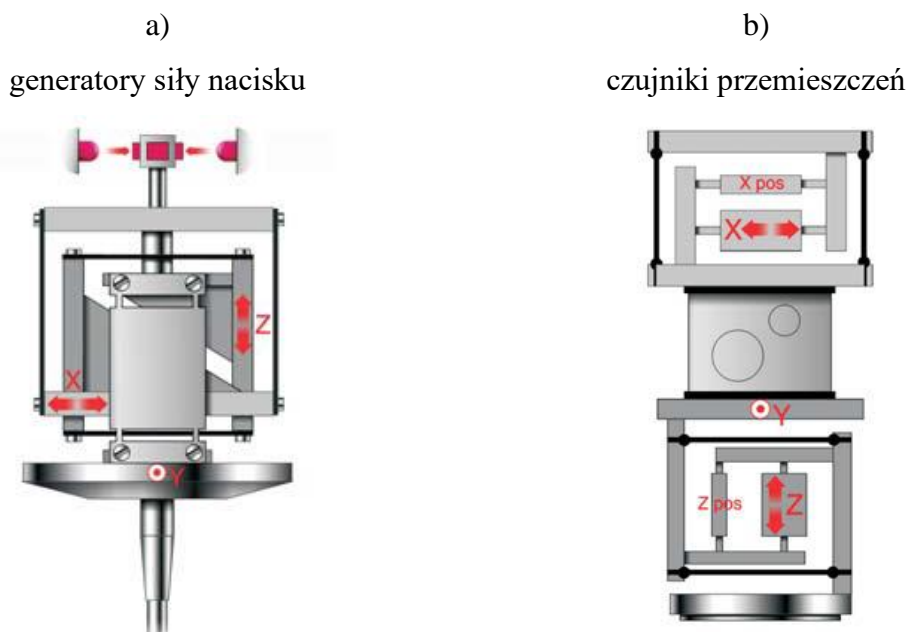
Rodzaj modułu trzpienia ma wpływ na siłę nacisku generującą sygnał oraz na konfigurację. Parametry pomiaru wykonane głowicami elektrostatycznymi charakteryzują się zbliżonymi wartościami.

Dokładność lokalizacji punktów wyrażona niestabilnością drogi przełączania wynosi od kilku do kilkunastu μm w zależności od typu głowicy i jej konfiguracji. Chcąc uzyskać dokładniejsze wyniki zastosowano w nowszych głowicach przełączających dwustopniowe przetworniki impulsowe.

Przetwornik elektrostatyczny odgrywa rolę przetwornika potwierdzającego, a przetworniki tensometryczne lub piezoelektryczne pełnią funkcję właściwego przetwornika pomiarowego. Firma Zeiss stosuje takie rozwiązania w głowicy ST-ATAC oraz Renishaw w głowicy TP200.

3.1.2. Głowice stykowe skaningowe

Do całościowego pomiaru części w jednym zamocowaniu i procesie stosuje się głowice skaningowe. Przy ich zastosowaniu możliwa jest kontrola nie tylko wymiarów, ale też odchyłek kształtu i położenia skomplikowanych geometrycznie części maszyn i urządzeń. Posiadają możliwość prowadzenia pomiaru ciągłego. Głowice skaningowe ze względu na sposób zadawania nacisku pomiarowego dzielimy na pasywne i aktywne.



Rysunek 3.4. Schemat głowicy skaningowej a) pasywnej b) aktywnej [38]

W głowicach pasywnych siła nacisku wytwarzana jest przez sprężyny przez co nacisk wzrasta wraz z wychyleniem trzpienia pomiarowego.

Aktywna głowica przekazuje informacje o położeniu końcówki pomiarowej w określonych odstępach czasu.

Skanowanie odbywa się płynnym, ciągłym ruchem, co pozwala szybko i dokładnie zmierzyć setki tysięcy punktów na ścieżce, podczas gdy trzpień przesuwana się po powierzchni. Wykorzystanie tej głowicy, poprzez zastosowanie przetworników, pozwala na wyznaczenie wartości współrzędnych w osiach X, Y, Z z rozdzielczością $0,1 \mu\text{m}$. Podczas pomiaru do wartości współrzędnych zarejestrowanych przez sterownik dodawana jest wartość sygnału z przetworników. Wartość współrzędnych położenia końcówki głowicy to suma powstała dla wszystkich trzech osi.

Wskazać tutaj można głowice Vast Gold i Vast XXT niemieckiej firmy Zeiss, MPP100 i MPP300 japońskiej firmy Mitutoyo oraz SP25 i SP80 angielskiej firmy Renishaw oraz Hexagon Metrology LSP- X3 i LSP-X5 produkowane pod marką Leitz [7, 20,21, 49].



Rysunek 3.5. Aktywna głowica skaningowa Vast XT Gold firmy Zeiss [W1]

Wybór głowicy zależy od specyfiki obiektu, który ma być zmierzony oraz wymagań dotyczących dokładności i precyzji pomiarów. Głowice stykowe pracujące w maszynach WMP mają za zadanie umożliwić pomiar na zróżnicowanej geometrii, strukturze i "wrażliwości" na naciski pomiarowe.

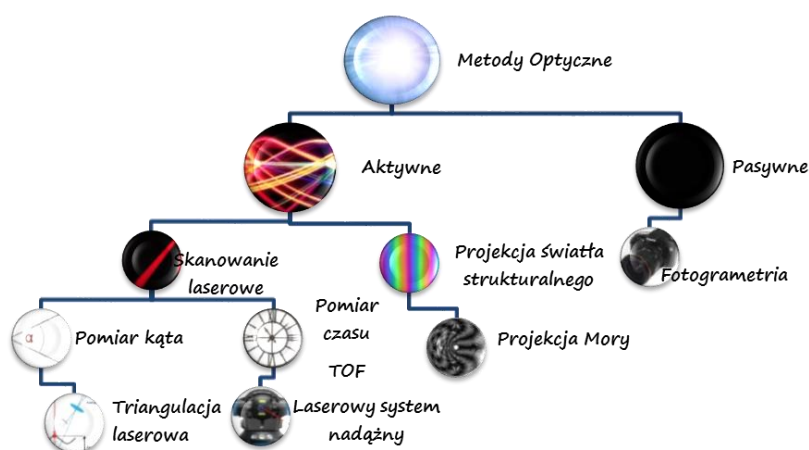
Wymagania te determinują postęp w zakresie konstrukcji przetworników głowic oraz trzpieni pomiarowych tak aby uzyskiwane wyniki były wykonane z dużą dokładnością oraz w krótkim czasie [56, 57].

3.2. Systemy optyczne i ich rodzaje

Ekspansywny rozwój techniki zwłaszcza w dziedzinie elektroniki, techniki mikroprocesorowej, a także mocy obliczeniowej komputerów przyczynił się do szybkiego rozwoju w zakresie bezstykowych metod pomiarów obiektów przestrzennych, w tym tych wykorzystujących światło do pomiaru pozycji punktów na powierzchni obiektów.

Optyczne systemy bezstykowe wykorzystują do pomiaru rozproszenie lub odbicie światła od powierzchni badanego przedmiotu. Najczęściej metody te dzielimy na aktywne i pasywne. Metody aktywne angażujące dodatkowe źródła światła, niekoherentne (projektory, rzutniki, itp.) lub koherentne (lasery). Bazują one na projekcji różnego rodzaju struktur światła tj. punktów, linii, prążków, siatki, zakodowanych wzorów. Pasywne techniki pomiarowe nie wymagają dodatkowych sztucznych źródeł światła, pracują w warunkach naturalnego, niekontrolowanego światła. W technikach tych zdarza się wykorzystywanie dodatkowego źródła światła do naświetlania punktów charakterystycznych, w celu przyspieszenia procesu pomiarowego, jednak pełnią one tutaj odmienną rolę niż w technikach aktywnych [1, 5, 24, 26, 30, 31, 54].

Istnieją różne kryteria dotyczące klasyfikacji metod optycznych. Wśród parametrów charakteryzujących metody można wyróżnić: dokładność, powtarzalność, rozdzielczość, stopień inwazyjności, odległość od mierzonego przedmiotu oraz odporność wpływ czynników środowiskowych. Na Rys. 3.13. przedstawiono klasyfikację z uwzględnieniem występowania dodatkowego źródła światła, rodzaju źródła światła oraz przedmiotu pomiaru [30].



Rysunek 3.6. Podział metod optycznych [30]

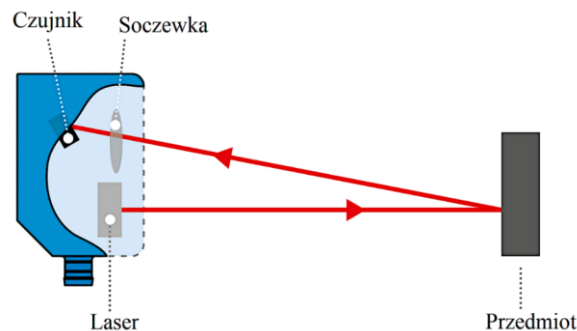
3.2.1. Systemy skanujące

Wśród systemów skanujących możemy wyodrębnić skanery światła strukturalnego oraz skanery laserowe.

Skanery światła strukturalnego to rodzaj systemów skanujących, które wykorzystują wzorec świetlny do pomiaru powierzchni obiektów. Działają one na zasadzie projekcji na badaną powierzchnię strukturyzowanego wzorca świetlnego, a następnie rejestracji deformacji tego wzorca za pomocą kamery lub innego czujnika obrazu. Skanery światła strukturalnego mogą używać różnych wzorców świetlnych, takich jak linie, kratki, siatki punktów, paski. Wybór wzorca zależy od wymagań pomiarowych oraz od charakterystyki powierzchni obiektu. Wiedza i umiejętności operatora w zakresie doboru ustawień oraz wstępnej obróbki chmury punktów to jeden z warunków uzyskania właściwych wyników. Systemy te oferują krótki czas pomiaru, co pozwala na szybkie skanowanie dużych obszarów, a tym samym szybkie uzyskanie wyników pomiarowych. Ich zaletą jest również waga oraz ułatwienia transportowe umożliwiające zmianę miejsca roboczego w zależności od potrzeb. Niestety w systemach tych obserwujemy ograniczone możliwości pomiarowe na powierzchniach mocno refleksyjnych. Konieczne może być stosowanie środków matujących [13, 23].

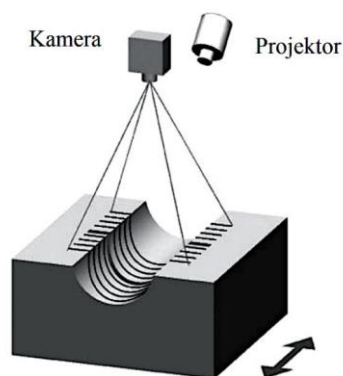
Skanery laserowe podczas skanowania przedmiotu zbierają punkty pomiarowe, które są wykorzystywane do generowania trójwymiarowego obrazu powierzchni obiektu. Wyróżnić można tutaj kilka metod. Jedną z nich jest metoda triangulacji laserowej. Ta metoda opiera się na zasadzie geometrii trygonometrycznej, w której odległość do punktu jest obliczana na podstawie kąta, pod jakim wiązka laserowa odbija się od obiektu oraz znanej długości bazy (bazowej linii) pomiędzy źródłem światła (laserem) a detektorem. W triangulacji laserowej wiązka laserowa jest emitowana ze skanera w kierunku badanej powierzchni obiektu. Po odbiciu od powierzchni obiektu wiązka laserowa jest rejestrowana przez detektor, który mierzy kąt lub przesunięcie wiązki w stosunku do pozycji wyjściowej. Na podstawie tej zmiany kąta oraz znanej długości bazowej można obliczyć odległość do punktu na powierzchni obiektu.

Tutaj ważnym wyznacznikiem określenia współrzędnych punktu jest znajomość orientacji wewnętrznej (np. długość ogniskowej, położenie punktu głównego, dystorsje obiektywów) i zewnętrznej (kąt projekcji, kąt widzenia kamery, odległość bazowa) układu kamera – laser. Do detekcji odbitej wiązki laserowej stosuje się różne rodzaje detektorów, takie jak detektory fotodiody, fotopowielacze lub kamery CCD. Pomiar z użyciem laserowych czujników optycznych, charakteryzuje duża odległość przy jednoczesnym zachowaniu małej plamki. Przy użyciu tej metody możliwe są pomiary bardzo małych części [13, 30].



Rysunek 3.7. Schemat działania głowicy laserowej triangulacyjnej [W8]

Wyróżnić możemy również głowice laserowe wielopunktowe, które także należą do systemów bezstykowych, a ich zasada działania jest zbliżona do głowic laserowych jednopunktowych. W głowicach tych stosuje się ruchome lustro do przesunięcia wiązki laserowej, w wyniku czego standardowa technika triangulacji laserowej może być rozszerzona do pomiaru 2D. Następnie dzięki zastosowaniu kamery matrycowej i techniki triangulacyjnej uzyskuje się wynik pomiaru dla wielu punktów (rysunek). Dokładając przesunięcie maszyny współrzędnościowej (prostokątny ruch do płaszczyzny przekroju) można uzyskać pomiar powierzchni 3D [14].



Rysunek 3.8. Głowica laserowa wielopunktowa [14]

Obecne systemy laserowe cechuje wysoka precyzja przy jednoczesnym zachowaniu szybkości i jakości danych. Wymienić tutaj można głowicę LC15Dx firmy Nikon (rysunek). Dokonuje tego poprzez optymalizację ustawień lasera w czasie rzeczywistym w celu dopasowania ich do rodzaju i współczynnika odbicia kontrolowanego materiału. Regulacja lasera ESP3 pozwala na inteligentne dostosowanie w czasie rzeczywistym ustawień lasera dla każdego mierzonego punktu. Dzięki temu uzyskuje się optymalną moc lasera dla każdego punktu mierzonego na powierzchni, umożliwia szeroką gamę materiałów powierzchniowych, kolorów i przejść bez konieczności interakcji z użytkownikiem, ręcznego strojenia lub natryskiwania części. Wbudowany filtr odblaskowy automatycznie odfiltrowuje wszelkie niepożądane odbicia lasera na powierzchniach błyszczących. Ponadto jest w pełni kompensowany temperaturowo. Filtr światła dziennego, który jest zintegrowany z obiektywem skanera eliminuje wpływ jasnego światła dziennego na wyniki pomiaru.



Rysunek 3.9. Głowica laserowa LC15Dx firmy Nikon [W4]

3.2.2. Systemy wyposażone w głowice optyczne

Obecnie wykorzystywane optyczne maszyny pomiarowe wyposażone w systemy wizyjne bazują na zasadzie działania klasycznych mikroskopów warsztatowych. Brak styku powoduje trudności w uzyskaniu informacji na temat wysokości mierzonego przedmiotu, dlatego pomiar z wykorzystaniem głowicy optycznej ma charakter 2D.

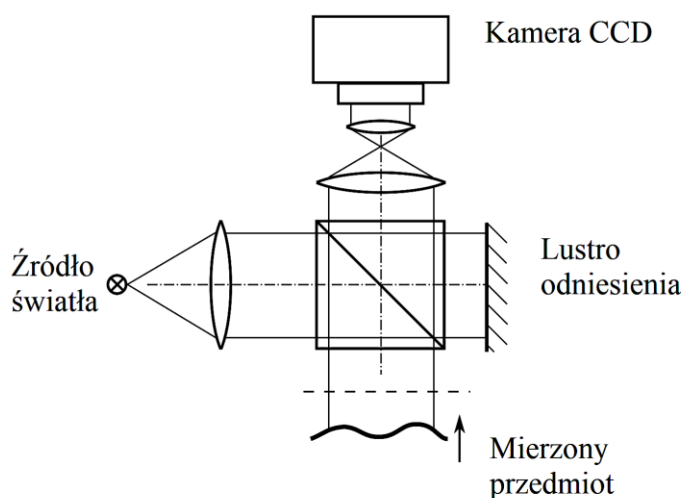
- Kamera o wysokiej rozdzielczości: Jest to główny element mierzący w mikroskopie pomiarowym. Rejestruje obraz badanego przedmiotu.
- Soczewka powiększa widok w kamerze, umożliwiając dokładniejsze pomiary.
- Liniąły pomiarowe są używane do dokładnego mierzenia wymiarów obiektu.
- Obiektyw skupia światło przechodzące umożliwiając obserwację w powiększeniu.
- Okular służy do powiększania obrazu tworzonego przez obiektyw mikroskopu.
- Tubus służy do formowania powiększonego obrazu pośredniego.
- Podświetlany stolik, na którym umieszcza się badany przedmiot.
- Reflektor dostarcza światło, które podświetla stół pomiarowy.



Rysunek 3.10. Mikroskop pomiarowy Keyence serii VHX [W9]

3.2.3. Systemy światła białego

Czujnik światła białego (interferometr) to urządzenie pomiarowe wykorzystywane do precyzyjnego pomiaru różnych parametrów fal, takich jak długość, amplituda, faza czy interferencja. Należy do bezstykowych systemów pomiarowych. Poszczególne elementy budowy przedstawiono na rysunku poniżej. Do podstawowych elementów zaliczamy źródło światła, zwyczajowo jest to dioda elektroluminescencyjna LED, kamerę CCD, która służy jako detektor, czujnik światła białego. Czujnik do prawidłowego działania potrzebuje rozdzielacza oraz dwóch luster. Jednym zwierciadłem interferometru jest lustro referencyjne, drugim przedmiot mierzony. Położenie lustra referencyjnego daje informację o położeniu płaszczyzny odniesienia. Płaszczyzna ta na rysunku przedstawiona jest jako linia przerywana i znajduje się w takiej samej odległości od rozdzielacza wiązki jak lustro referencyjne. Istotnym elementem jest też układ obrazowania [35].



Rysunek 3.11. Budowa czujnika światła białego [35]

Pomiar czujnikiem światła białego odbywa się wzdłuż osi optycznej, po której przesuwa się mierzony przedmiot. Powierzchnia przedmiotu badanego powinna przecinać płaszczyznę odniesienia. Wówczas światło odbite od powierzchni badanego przedmiotu nakłada się na światło lustra referencyjnego. Nałożone na siebie światła rejestruje kamera CCD. Różnica pomiędzy tymi wiązkami wprowadza przesunięcie fazowe, a w efekcie następuje powstanie obrazu interferencyjnego. Jeżeli punkt na powierzchni mierzonego przedmiotu przecina płaszczyznę odniesienia, to w detektorze występuje maksimum interferencji [35].

Czujniki te pozwalają na pomiar przedmiotów o różnych rodzajach powierzchni. Układ optyczny znajdujący się w interferometrze jest zogniskowany na konkretnej płaszczyźnie. Jeśli przedmiot mierzony przecina tę konkretną płaszczyznę podczas pomiaru, to powierzchnia

mierzona jest dokładnie obrazowana na detektorze co jest jego zaletą. Ma także wadę. Mierzony przedmiot musi przemieszczać się względem maszyny pomiarowej lub czujnik musi się poruszać nad nieruchomym obiektem co uniemożliwia skanowanie w części zastosowań. Na rysunku przedstawiono przykładową głowicę światła białego firmy Zeiss [35].



Rysunek 3.12. Interferometr światła białego DotScan firmy Zeiss [W1]

4. Analiza stanu wiedzy z zakresu tematu pracy

4.1. Język programowania Prolog

Prolog (z fr. *Programmation en Logique*) należy do najpopularniejszych języków programowania logicznego. Pierwsza wersja tego języka powstała w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Jest to deklaratywny język programowania składający się z klauzul oraz wzajemnych zależności pomiędzy nimi i ich hierarchicznej kolejności. Programista opisuje rozważany problem w taki sposób, aby system był w stanie samodzielnie wywnioskować jego rozwiązanie. Języki typu Prolog znajdują zastosowanie w programach sztucznej inteligencji.

```
% Definiowanie relacji sprzętów i ich właściwości
sprzet(komputer, typ, desktop).
sprzet(komputer, marka, dell).
sprzet(komputer, ram, 8).
sprzet(komputer, pojemnosc, 256).

sprzet(drukarka, typ, laserowa).
sprzet(drukarka, marka, hp).
sprzet(drukarka, kolor, czarno-biała).

sprzet(projektor, typ, multimedialny).
sprzet(projektor, marka, epson).
sprzet(projektor, rozdzielczosc, '1080p').

% Reguły: Kompatybilność sprzętu
kompatybilny(komputer, projektor).
kompatybilny(komputer, drukarka).
kompatybilny(drukarka, komputer).
kompatybilny(projektor, komputer).

% Reguła: Sprawdź, czy dany sprzęt jest kompatybilny z innym
jest_kompatybilny(X, Y) :- kompatybilny(X, Y).
jest_kompatybilny(X, Y) :- kompatybilny(Y, X).

% Reguła: Wyświetl właściwości danego sprzętu
wyswietl_wlasciowosci(Sprzet) :-
    write('Właściwości sprzętu: '), write(Sprzet), nl,
    sprzet(Sprzet, Atrybut, wartosc),
    write(' - '), write(Atrybut), write(': '), write(wartosc), nl,
    fail. % Wykorzystujemy fail, aby wygenerować wszystkie możliwe kombinacje

% Zapytania
?- jest_kompatybilny(komputer, projektor).
?- jest_kompatybilny(drukarka, komputer).
?- wyswietl_wlasciowosci(komputer).
```

Rysunek 4.1. Przykładowy kod programu w języku Prolog

4.2. Systemy ekspertowe w zastosowaniach metrologicznych

Rozwój technologii, a w szczególności takich dziedzin nauki jak uczenie maszynowe, sieci neuronowe czy szeroko pojęta sztuczna inteligencja umożliwia powstawanie i rozwijanie systemów i programów komputerowych wspomagających działania człowieka również w procesach decyzyjnych. Do takich zastosowań wykorzystywane są systemy ekspertowe. Dzięki algorytmom przeznaczonym do analizy i bazom danych znajdują zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, również w zakresie metrologii [33].

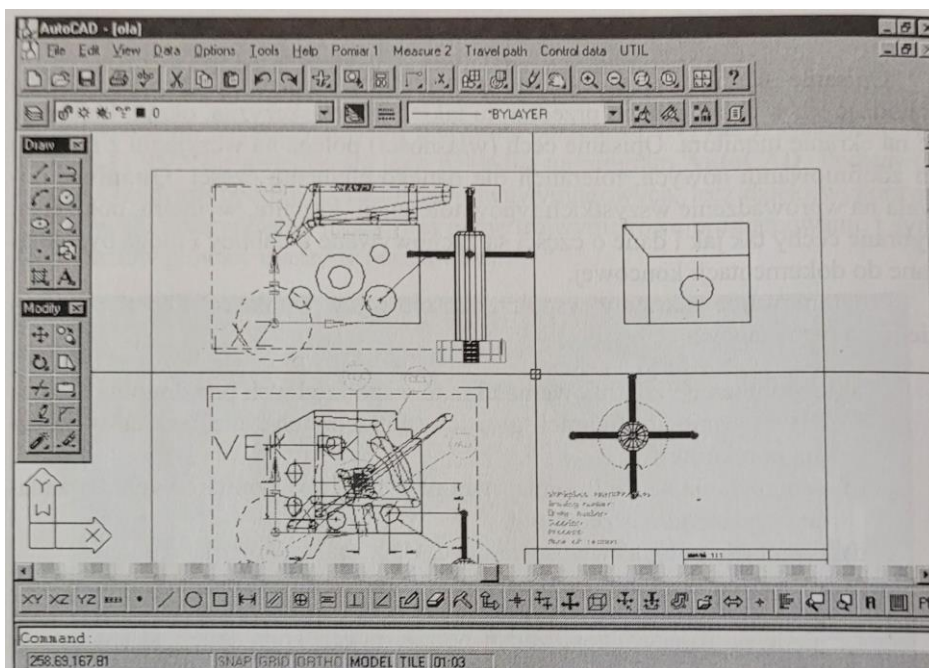
4.2.1. Programowanie WMP w oparciu o zbiory CAD

Istotnym z punktu widzenia niniejszej pracy jest zagadnienie interaktywnego programowania współrzędnościowych maszyn pomiarowych w oparciu o zbiory CAD [47]. To zagadnienie zostało poruszone w artykule wygłoszonym na VII Konferencji Naukowo-Technicznej “Metrologia w Technikach Wytwarzania” autorstwa J. Śładka oraz R. Klechy. W publikacji tej autorzy wykorzystują dokumentację CAD do automatycznego generowania programów pomiarowych wybranych części przy pomocy oprogramowania Quantum firmy ISTEK. Oprogramowanie to jest instalowane jako nakładka programu AutoCAD, operuje na rysunkach dwuwymiarowych, ale poprzez zastosowanie wielu rzutów części umożliwia trójwymiarowe programowanie wraz symulacją.

W artykule tym autorzy wskazują na możliwe dwa sposoby programowania. Pierwszym jest przesyłanie danych o części do oprogramowania WMP i tam generowanie programu pomiarowego. Drugi natomiast polega na generowaniu programu w systemie CAD na podstawie rysunku części i symulowanie pracy maszyny w trybie graficznym, co pozwala na weryfikację.

Bazując na części zaprojektowanej w systemie CAD i poprzez interaktywny dialog z użytkownikiem oprogramowanie jest w stanie wygenerować program pomiarowy. W pierwszym kroku następuje identyfikacja elementów geometrycznych, takich jak płaszczyzna, okrąg, linia, walec, wchodzących w skład badanego detalu.

Opisanie cech poprzez określenie ich własności w postaci wymiarów czy tolerancji polega na wczytaniu ich z rysunku CAD z odpowiedniej warstwy pliku. Ścieżki pomiarowe generowane są na podstawie rysunku w sposób automatyczny rozkładając równomiernie określoną przez użytkownika ilość punktów na powierzchni badanego elementu lub półautomatycznie gdzie użytkownik ma możliwość ręcznego wskazania punktów na rysunku technicznym. Pozwala to na wygodne przygotowanie strategii pomiarowych właściwych dla określonego zadania pomiarowego. Symulacja ruchów końcówki głowicy WMP umożliwia wizualizację ścieżki pomiarowej dla poszczególnych zadań pomiarowych i całego programu.



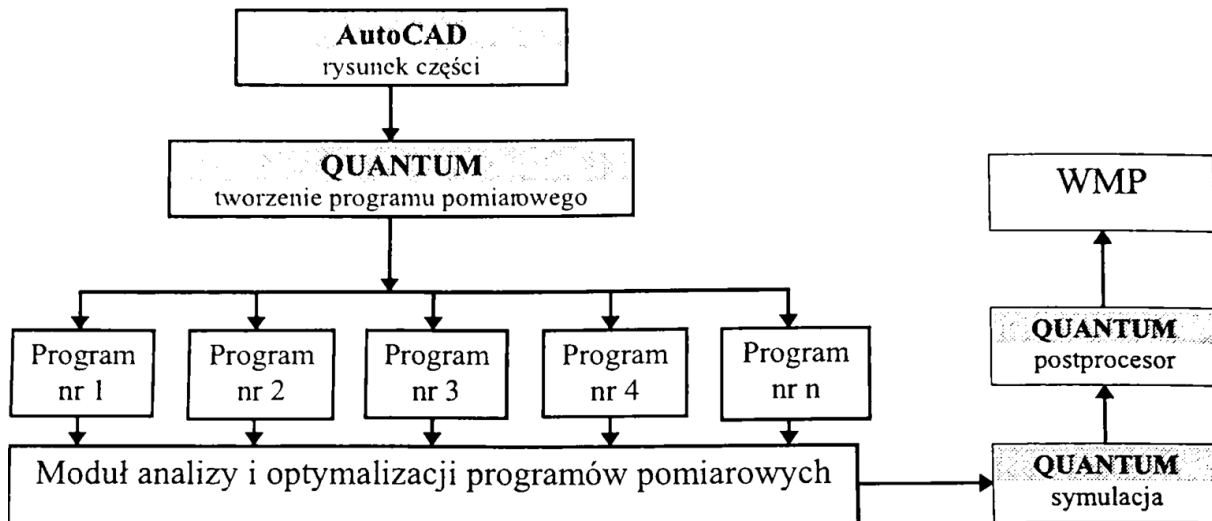
Rysunek 4.2. Programowanie i symulacja w systemie Quantum [47]

System Quantum umożliwia przeprowadzenie analizy możliwych dla danej części rozwiązań pomiarowych, do których należą:

- określenie rodzaju końcówek pomiarowych, ich ilości i konieczności zmiany,
- sposób ułożenia przedmiotu na maszynie pomiarowej,
- kolejność wykonywania operacji pomiarowych,
- dobór elementów do budowy układu współrzędnych,
- dobór strategii pomiarowej dla podstawowych elementów geometrycznych,
- określenie kierunków najazdu na poszczególne punkty pomiarowe,
- zdefiniowanie dróg przejazdu pomiędzy cechami.

Autorzy proponują koncepcję systemu, który pozwoli już na etapie rysunku CAD optymalizować programowanie WMP. Dzięki możliwości analizy czasu trwania programu

i dokładności realizacji poszczególnych zadań pomiarowych, poprzez określenie położenia głowicy pomiarowej zależnych od konfiguracji końcówek pomiarowych, ilości punktów pośrednich, doboru prędkości maszyny. Na podstawie wyników uzyskiwanych z modułu symulacyjnego zakładają zbudowanie bazy wiedzy, która posłuży do projektowania kolejnych zadań.



Rysunek 4.3. Schemat ideowy proponowanego rozwiązania [47]

Zgodnie z powyższym schematem możliwe jest wgranie różnych programów pomiarowych do modułu symulacyjnego w celu optymalizacji danych. Autorzy skupiają się na optymalnym określeniu drogi przejazdu maszyny pomiędzy punktami pośrednimi z uwzględnieniem wykrywania przeszkód w połączeniu z systemem oceny dokładności pomiarów w oparciu o model wirtualny WMP, w celu zaprojektowania kompleksowego modelu pomiarów współrzędnościowych VCMS (Virtual Coordinate Measuring System). Według autorów pozwoli to na wspomaganie realizacji pomiarów, uzyskanie maksymalnej efektywności i zapewni lepszą kontrolę nad procesem produkcyjnym.

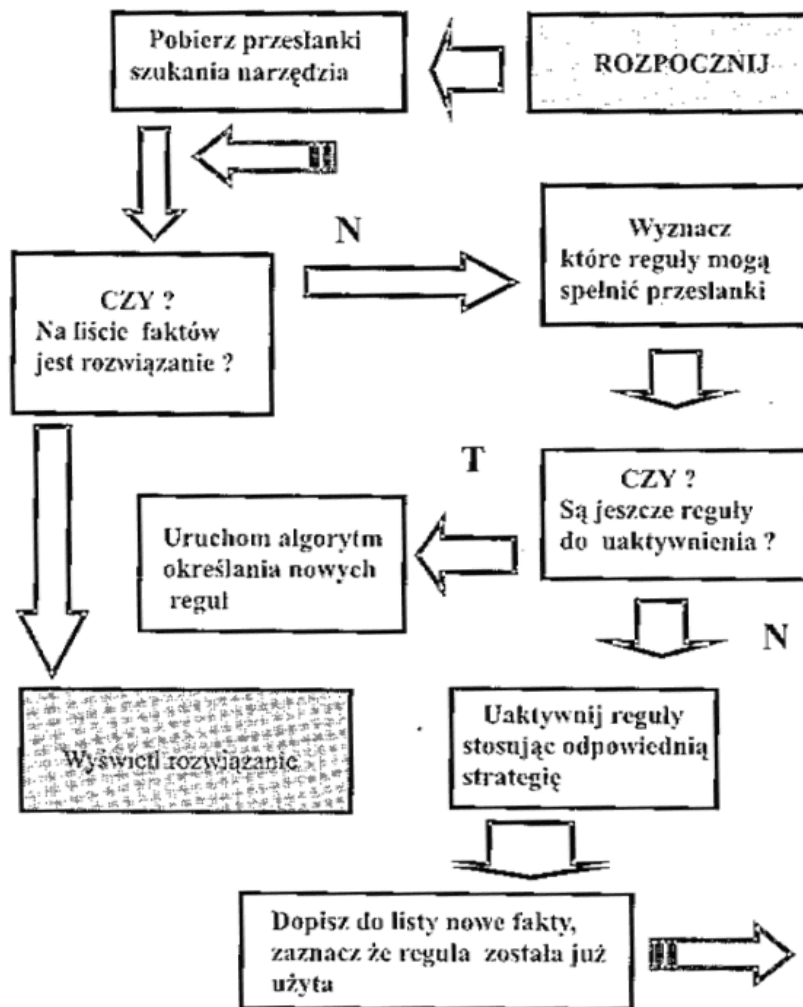
4.2.2. System RADSPERT i aplikacja Ekspert

Są to programy opracowane na Politechnice Poznańskiej R. Majchrowskiego [27]. Stosowane są w metrologii długości i kąta.

Program RADSPERT jest bazą podstawowych przyrządów pomiarowych takich jak: suwmiarka, mikrometr, średnicówka, wysokościomierz, kątownik czy poziomica. Użytkownik w oknie dialogowym definiuje jaki rodzaj pomiaru chce wykonać:

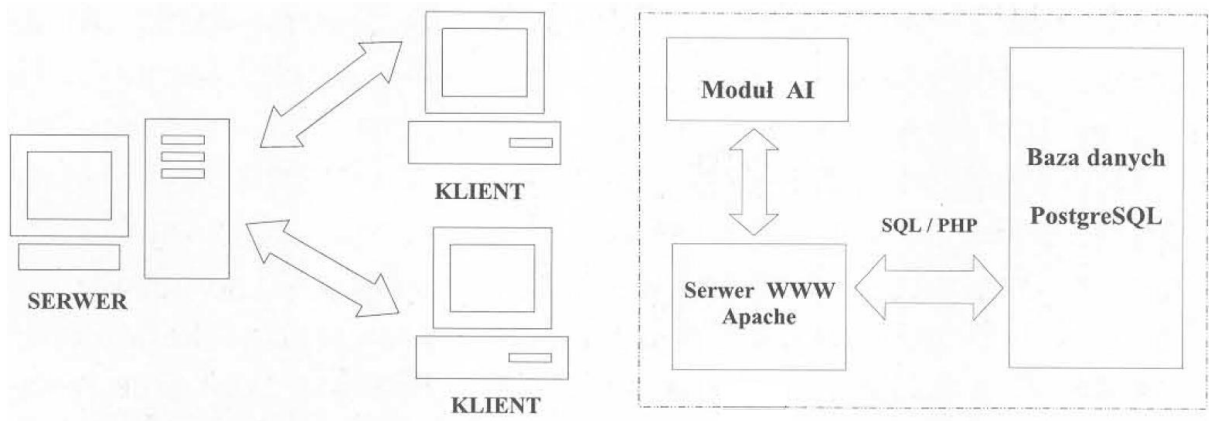
- długości,
- wysokości,
- średnicy,
- kąta,
- gwintu,
- koła zębatego,
- poziomemu.

Jaki jest zakres pomiarowy szukanego narzędzia oraz jaka jest oczekiwana niepewności pomiaru. Na podstawie tych informacji system przy pomocy prostych reguł logicznych i znanych faktów przeszukuje opracowaną bazę danych określając jakiego przyrządu należy użyć do analizowanego zadania pomiarowego. Program ten posiada również opcję dodawania nowych narzędzi do istniejącej bazy. W tym celu uruchamiany jest specjalny moduł w aplikacji, w którym użytkownik definiuje rodzaj narzędzia, zakres pomiarowy, dokładność oraz rodzaj pomiaru, który można zrealizować przy jego użyciu.



Rysunek 4.4. Algorytm wnioskujący programu RADSPERT [27]

Aplikacja Ekspert opiera się na tej samej bazie danych. Głównymi założeniami była możliwość wdrożenia niskim kosztem w zakładach przemysłowych, dzięki dostępności przez Internet oraz niskie koszty eksploatacji. Program pomaga w doborze narzędzia pomiarowego z istniejącej bazy narzędzi, dodatkowo umożliwia aktualizację danych. W projektowaniu aplikacji wykorzystano strukturę serwer-klient, co pozwala na implementację programu na serwerze. Obsługa aplikacji odbywa się poprzez przeglądarkę internetową. Takie rozwiązanie zapewnia niezależność programu od platformy systemowej i pozwala ograniczyć koszty. Baza danych została opracowana w języku SQL natomiast sama aplikacja w środowisku PHP.



Rysunek 4.5. Schemat sprzętowy i logiczny aplikacji Ekspert [27]

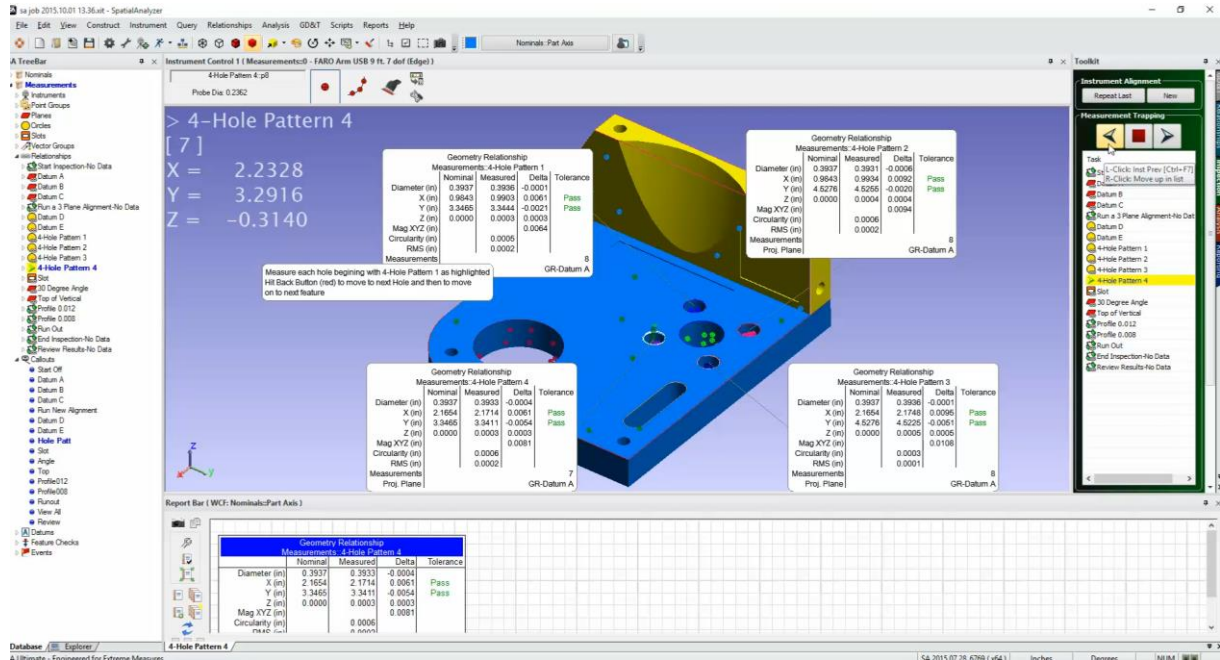
Autor wskazał w publikacji na możliwość implementacji algorytmu sztucznej inteligencji opartego na trójwarstwowej sieci neuronowej Hopfielda, która posiada sprzężenie zwrotne pomiędzy warstwami, do wspomagania przeszukiwania bazy danych. Dzięki temu możliwe byłoby uzupełnianie niekompletnych zapytań kierowanych przez użytkownika do systemu, a co za tym idzie poprawny dobór narzędzia nawet w przypadku nieprecyzyjnych zapytań.

4.2.3. System Spatial Analyzer

System Spatial Analyzer (SA) [W10] to oprogramowanie stworzone przez firmę New River Kinematics (NRK), które służy do analizy i zarządzania danymi pomiarowymi zebranymi za pomocą różnych systemów pomiarowych. To przenośne oprogramowanie metrologiczne do zastosowań na dużą skalę. SA to niezależna platforma oprogramowania ze zidentyfikowanymi wykresami 3D, która ułatwia użytkownikom integrację danych z wielu pomiarów i proste wykonywanie złożonych zadań.

SA pozwala na dokładną analizę geometrii elementów, w tym pomiar długości, kątów, promieni, krzywizn, odchyleń, a także analizę tolerancji geometrycznych. Umożliwia porównywanie danych pomiarowych z modelem CAD, co pozwala na ocenę zgodności rzeczywistych elementów z ich projektem. System ten pozwala na korektę błędów pomiarowych wynikających z niedoskonałości systemu pomiarowego, co prowadzi do poprawy dokładności pomiarów, a także umożliwia analizę ruchu i kinematyki urządzeń pomiarowych, co jest przydatne przy kalibracji i optymalizacji ich działania. Wspiera automatyzację procesu pomiarowego, umożliwiając przeprowadzanie pomiarów w sposób szybki, powtarzalny i efektywny. Oprogramowanie pozwala na generowanie szczegółowych raportów z wynikami pomiarów, co jest istotne dla procesów kontroli jakości i dokumentacji. Jest kompatybilny z różnymi systemami pomiarowymi, co pozwala na integrację danych z różnych źródeł i wykorzystanie ich w jednym narzędziu.

SA może komunikować się jednocześnie z praktycznie dowolną liczbą i typem przyrządów metrologicznych. Należą do nich m.in. trackery laserowe, radary laserowe, skanery, projekторы, teodolity, tachimetry i urządzenia fotogrametryczne – wszystkie wyposażone we wspólny interfejs dla każdej klasy sprzętu.



Rysunek 4.6. Okno dialogowe Systemu Spatial Analyzer [W10]

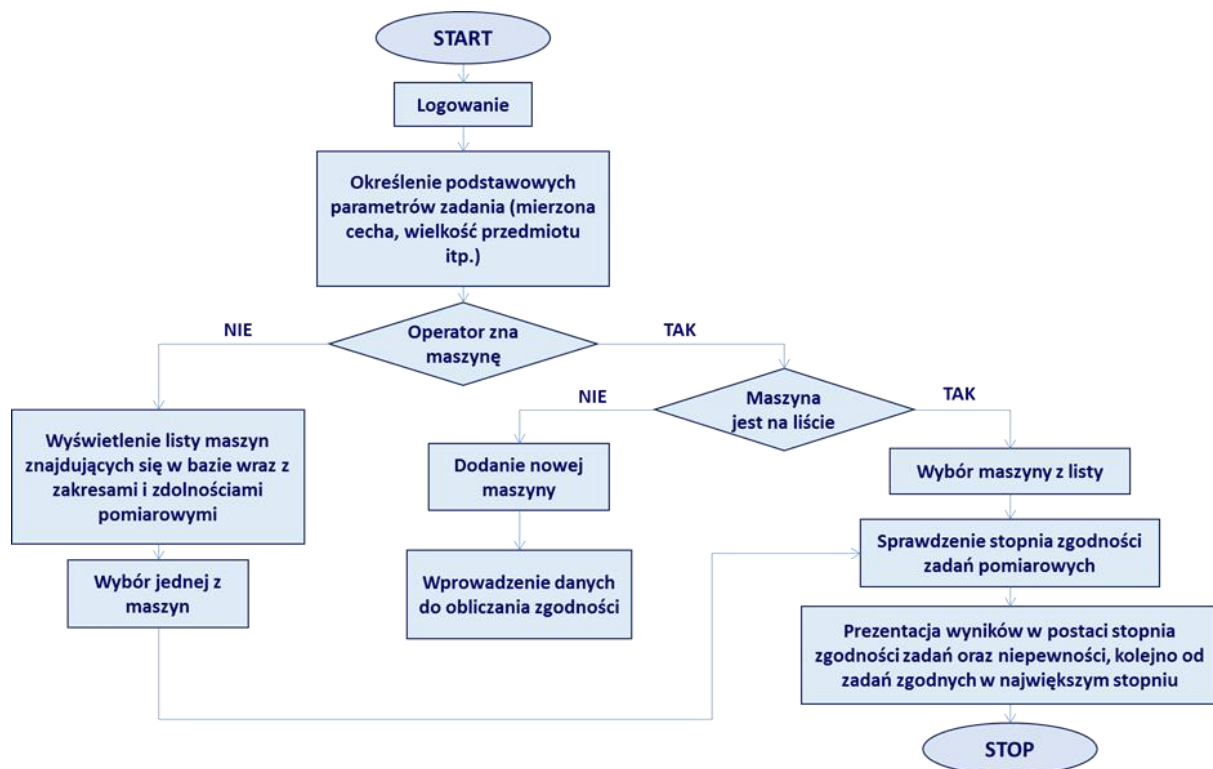
4.2.4. Aplikacja OPTI-U

Metoda OPTI-U to metoda oceny dokładności pomiarów, wykorzystująca częściowo elementy metody wielopozycyjnej, oraz metod znanych w metrologii jako R&R, a dedykowana właśnie współrzędnościowym pomiarom optycznym.

W Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej opracowano prototyp aplikacji do szacowania niepewności współrzędnościowych pomiarów optycznych pod nazwą OPTI-U Parametric. W swojej strukturze odpowiada ona metodzie parametrycznej, ale bazuje na informacjach pochodzących z metody OPTI-U. Aplikacja jest narzędziem uniwersalnym, może być stosowana zarówno podczas pomiarów stykowych, jak i innych rodzajach pomiarów, w których istotne jest wartościowanie oddziaływań składowych.

Aplikacja jest kompatybilna z systemem Windows, napisana w języku C#. Przygotowana w całkowicie darmowym, zintegrowanym środowisku programistycznym SharpDevelop 4.4., umożliwiającym opracowywanie projektów C# dla platformy .NET.

Baza danych niepewności opracowana została w programie SQLite do środowiska umożliwiającego pracę z większą ilością danych z zamiarem zsynchronizowania uporządkowanych informacji z prototypem aplikacji OPTI-U Parametric w programie SharpDevelop. Baza danych zawiera informacje dotyczące maszyn (producent, typ, rodzaj, parametry), wielkości mierzonych, wzorców, materiałów, zadań pomiarowych oraz metod szacowania niepewności wraz z wyznaczonymi niepewnościami. Dla każdego z wymienionych składników opracowano specjalną tabelę, w której zawarto podstawowe informacje. Przykładowo dla maszyn pomiarowych poszczególne rekordy zawierają informacje o nazwie maszyny, typie maszyny, zakresie pomiarowym, dokładności MPE, czy dacie kalibracji [30].

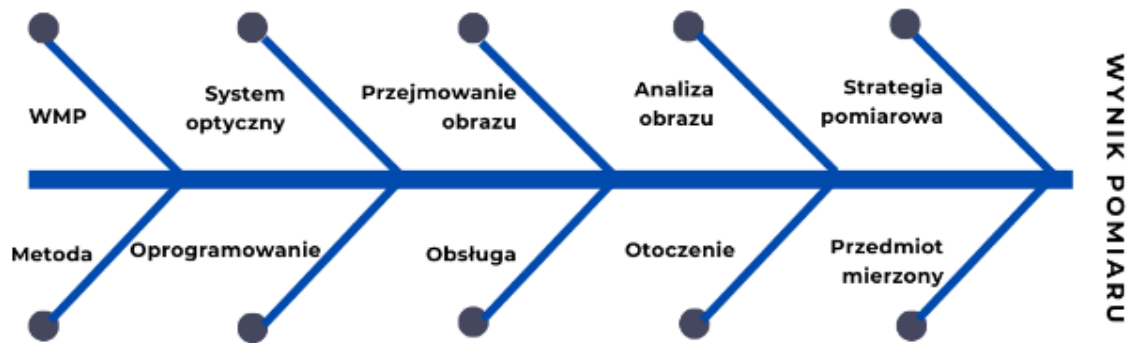


Rysunek 4.7. Algorytm aplikacji OPTI-U [30]

Użytkownik ma możliwość uzupełnienia informacji na temat maszyny, głowicy pomiarowej oraz zadania pomiarowego czy niepewności. Sposób wykorzystania tych informacji zależy od użytkownika. Może przyjąć niepewność dla najbardziej zgodnego zadania wprost (Wariant A), albo obliczyć średnią ważoną ze stopni zgodności i wybranych niepewności dla danych ścieżek, dla których uzyskał on zadowalające wyniki (Wariant B).

Jest to użyteczne narzędzie do szacowania niepewności pomiaru, niemniej warunkiem koniecznym jej funkcjonowania jest jej zasilenie o możliwie duży zbiór niezależnych danych, umożliwiającą przeprowadzenie szacowania w sposób najbardziej obiektywny.

4.3. Źródła błędów maszyn



Źródło błędu	Czynniki
Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa	<ul style="list-style-type: none"> Typ budowy układu współrzędnych i rozkład mas Układy pomiaru przemieszczeń Układ stykowy - głowica Kształt i wymiary końcówek Oprogramowanie Zastosowanie CAA Korekcja błędów
System optyczny	<ul style="list-style-type: none"> Oprogramowanie Typ układu współrzędnych Układy pomiarowe przemieszczeń Rodzaj głowicy optycznej Rozdzielczość Zadanie pomiarowe
Przejmowanie obrazu	<ul style="list-style-type: none"> Dystorsja Aberracja Kalibracja obiektywu Oświetlenie Kontrast Błędy wzorców do kalibracji
Analiza obrazu	<ul style="list-style-type: none"> Kalibracja kamery Algorytm wykrywania krawędzi Przetwarzanie obrazu Parametry obrazu Refleksyjność

Strategia pomiarowa	Wybór sposobu przejmowania punktowy / skanujący Liczba punktów lub krok skanowania Rozłożenie punktów Filtrowanie błędów zarysu Wybór elementu odniesienia Liczba pomiarów
Metoda	Dobór trzpieni Dobór filtrów Prędkość pomiaru Liczba operatorów Sposób mocowania przedmiotu
Oprogramowanie	Procedury obliczeniowe Struktura powiązań pojedynczych pomiarów Przyjazność obsługi Dobór algorytmu Prezentacja danych
Obsługa	Sposób mocowania przedmiotu Położenie przedmiotu na stole WMP Konfiguracja głowicy Doświadczenie pomiarowe Doświadczenie w programowaniu Sprawność manualna Wiedza Szkolenia
Otoczenie	Oświetlenie Zanieczyszczenia Drgania Wilgotność Temperatura i gradienty
Przedmiot mierzony	Kształt przedmiotu Falistość i chropowatość powierzchni Współczynnik rozszerzalności Twardość powierzchni Rodzaj materiału Wymiary Masa

Rysunek 4.8. Schemat ilustrujący czynniki mające wpływ na wynik pomiaru

Dokładność pomiaru współrzędnościowego jak wskazano na rysunku powyżej, jest uzależniona od wielu czynników. Wzrost niepewności pomiaru zwiększy prawdopodobieństwo możliwości popełnienia błędów ocenie jakości wyrobu. Niepewność ta jest jednym z głównych charakterystyk warunkujących akceptację metody w procesie walidacji. Dlatego ważne jest jak najdokładniejsze oszacowanie niepewności [4].

Temat ten poruszany jest w wielu opracowaniach, w tym [17, 18, 19, 28, 32]. Zawarty jest również w normie PN-EN ISO 14253- 1:2018-02 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) -- Kontrola wyrobów i wyposażenia pomiarowego za pomocą pomiarów -- Część 1: Reguły orzekania zgodności lub niezgodności ze specyfikacją.

Jeżeli mówimy o niepewności pomiaru wskazać należy także pozycje literaturowe, które wskazują na działania zwiększające dokładność pomiarów. Są to m.in. pozycje [12, 15, 22, 29, 45, 46].

4.4. Metody oceny dokładności pomiarów

4.4.1. Metoda porównawcza

Metoda porównawcza bazuje na wielokrotnym przeprowadzeniu pomiaru wykalibrowanego wzorca, który wymiarem i kształtem podobny jest do mierzonego przedmiotu, a następnie wykonanie pomiaru elementu przeznaczonego do weryfikacji. I tak np. dla określenia niepewności pomiaru średnicy otworu stosuje się pierścień wzorcowy o podobnej średnicy.

Dopuszczalne są różnice między wzorcem a przedmiotem mierzonym:

- $\pm 10\%$ długości lub 25 mm (większa z nich),
- $\pm 5^\circ$ orientacji kątowej,
- identyczna strategia pomiaru,
- kalibracja głowicy pomiarowej taka sama w obydwu przypadkach,
- materiał, z którego wykonany jest wzorzec i detal mierzony muszą być identyczne,
- nacisk pomiarowy w punkcie styku może się wahać o $\pm 20\%$.

Ideą tej metody jest założenie nieidentyfikowania przyczyny błędów, ale dokonanie ocen ich całościowych skutków w postaci zdiagnozowanych odchyłek od wymiaru wzorcowego. Niepewność rozszerzona w tej metodzie opisywana jest wzorem:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} \quad (14)$$

gdzie:

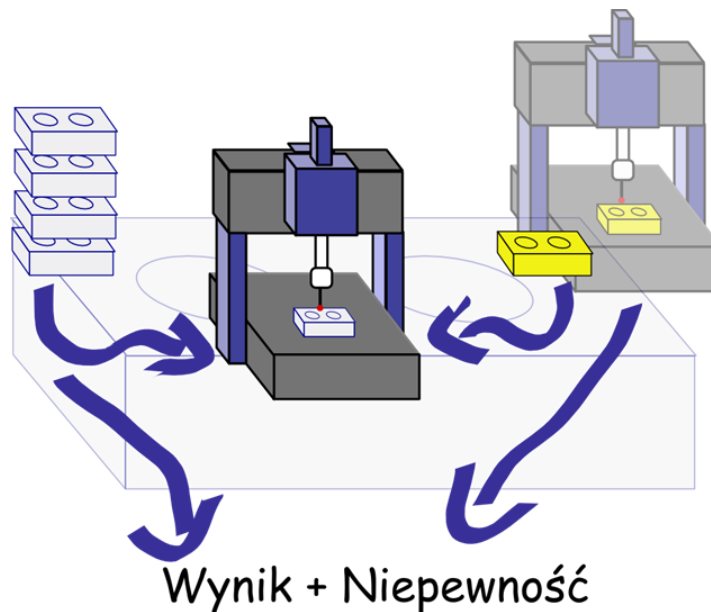
u_{cal} – niepewność standardowa przedmiotu wzorcowego,

u_p – niepewność standardowa procedury pomiarowej,

u_b – niepewność standardowa błędu systematycznego,

u_w – niepewność standardowa z procesu wytwarzania,

k – współczynnik rozszerzenia, zaleca się wybrać $k=2$ dla prawdopodobieństwa 95%.



Rysunek 4.9. Schemat wykorzystywania metody porównawczej [48]

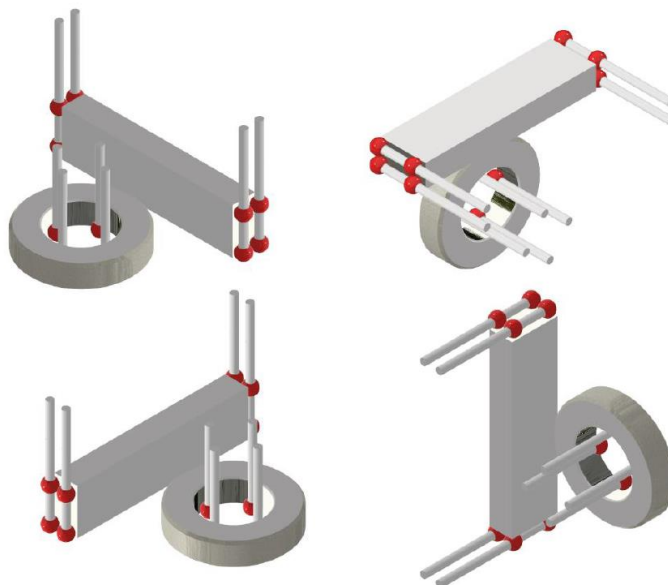
Metoda porównawcza może pozwolić, na podbicie dokładności urządzenia, poprzez przeprowadzenie korekty błędów systematycznych. Należy jednak zaznaczyć, iż w przypadku wyznaczania niepewności a posteriori (po fakcie) nie jest to możliwe i wtedy należy błąd systematyczny potraktować jako kolejną składową w bilansie niepewności

Metoda ta jest wykorzystywana głównie w masowej kontroli sprawdzianów, które realizowane są w specjalnych laboratoriach kalibracyjnych oraz w produkcji wielkoseryjnej. Należy jednak pamiętać, że również w tych przypadkach konieczny jest bardzo kosztowny proces zapewnienia wysokiej odtwarzalności warunków pomiarowych (zwłaszcza temperaturowych) [50, 51].

Wadą tej metody jest jej mała uniwersalność oraz relatywnie wysokie koszty kalibracji, a także konieczność posiadania wielu różnych wzorców, które podlegają okresowej kontroli, co dla produkcji małoseryjnej czy jednostkowej złożonych geometrycznie przedmiotów jest praktycznie nieprzydatna.

4.4.2. Metoda wielopozycyjna

Kolejną z prezentowanych metod oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych, które rozwijają się niezależnie w wielu ośrodkach [10, 50] jest metoda wielopozycyjna. Powyższa strategia opiera się na założeniu, że dla każdej cechy geometrycznej wykonywane są pomiary w czterech różnych orientacjach. Tak przeprowadzona procedura gwarantuje otrzymanie wystarczającej ilości danych do ustalenia czynników mających wpływ na niepewność pomiaru.



Rysunek 4.10. Pomiar metodą wielopozycyjną [13]

Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiane są jako:

$$y_{corr} = y - E_L - E_D, \quad (15)$$

gdzie:

y – średnia z pomiarów badanej cechy we wszystkich kierunkach przy różnym rozmieszczeniu punktów pomiarowych (5 różnych rozmieszczeń punktów, w 4 różnych kierunkach),

E_L – średni błąd pomiaru długości,

E_D – średni błąd pomiaru średnicy.

Wszystkie wielkości podawane są w mm.

Natomiast związana z nimi niepewność:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corrL}^2 + u_D^2 + u_{temp}^2}, \quad (16)$$

gdzie:

k – współczynnik korekcji,

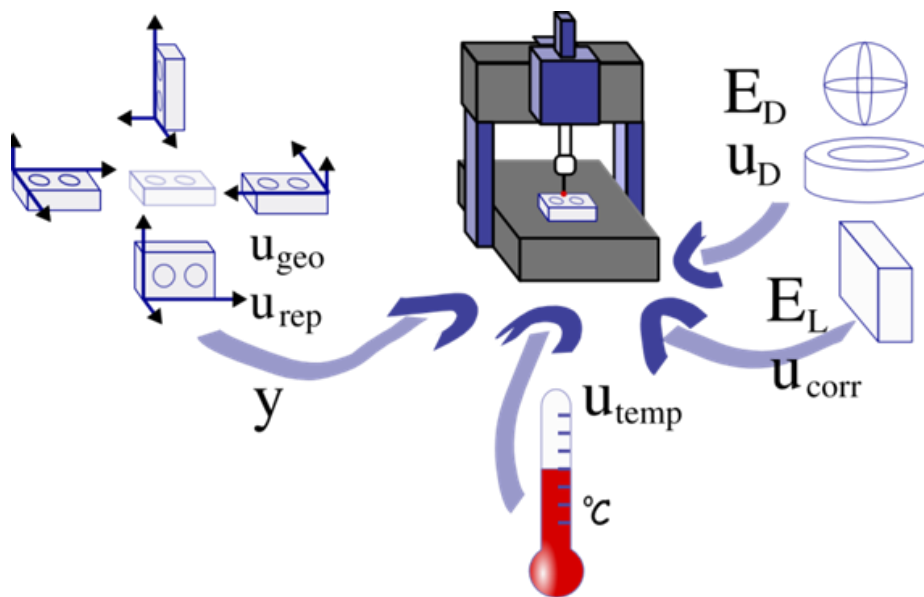
u_{rep} – powtarzalność maszyny,

u_{geo} – błędy geometryczne maszyny,

u_{corrL} – niepewność skorygowana pomiaru długości,

u_D – niepewność pomiaru średnicy,

u_{temp} – wpływ temperatury.



Rysunek 4.11. Schemat wyznaczenia niepewności pomiaru w oparciu o wzorec niewykalibrowany [48]

4.4.3. Metody symulacyjne

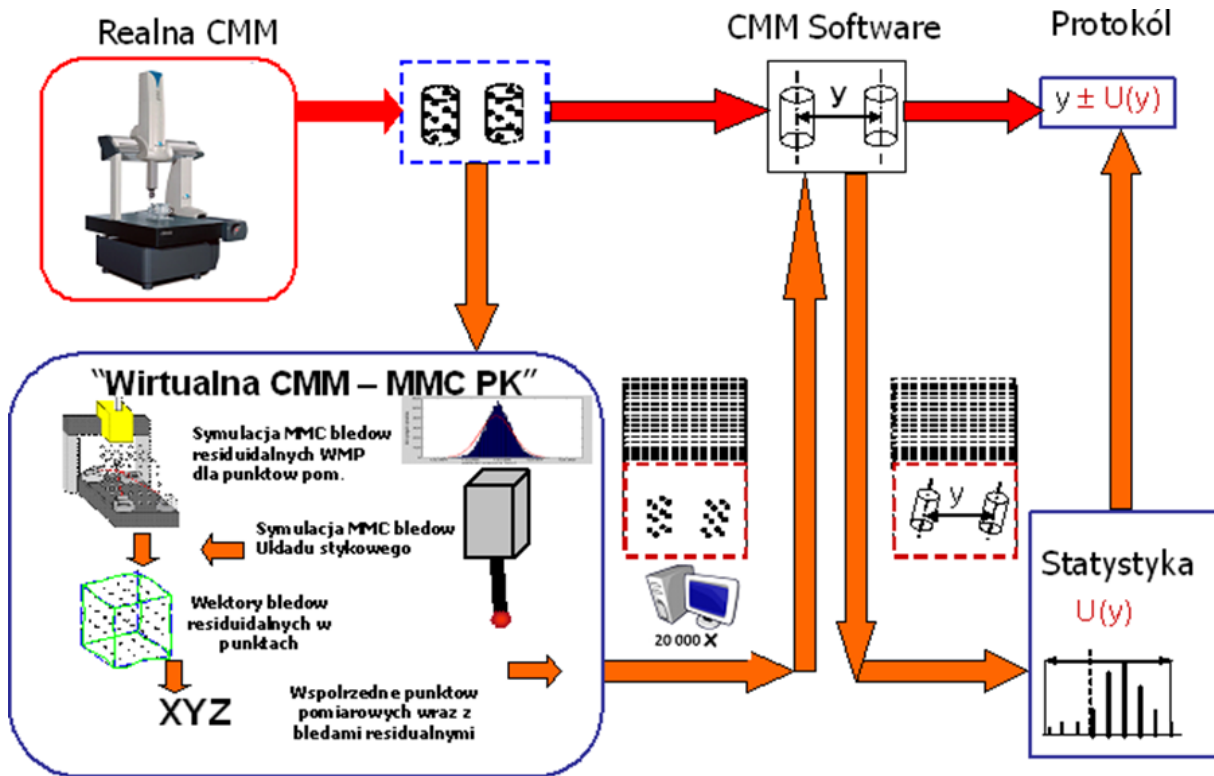
Metody symulacyjne to rozwiązania, które zyskują na popularności z uwagi na łatwość stosowania i szybkość działania. O ile samo przygotowanie wirtualnego modelu maszyny pomiarowej jest dosyć skomplikowanym zadaniem wymagającym czasu, wiedzy, odpowiednich wzorców oraz przeprowadzenia licznych pomiarów. O tyle samo zastosowanie przez użytkownika jest proste i nie wymaga specjalistycznej wiedzy.

Pierwsze działające rozwiązanie tego typu powstało w niemieckim laboratorium Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) w Braunschweigu. Polega ono na identyfikacji błędów geometrycznych i wyznaczeniu wartości niepewności przy użyciu płyt pomiarowych z kulami lub otworami. W latach 90 metoda ta została zaimplementowana w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej, gdzie była rozwijana. Przez lata w laboratorium tym powstawały różne modele wirtualnych maszyn pomiarowych.

Należy wspomnieć tutaj takie rozwiązania jak:

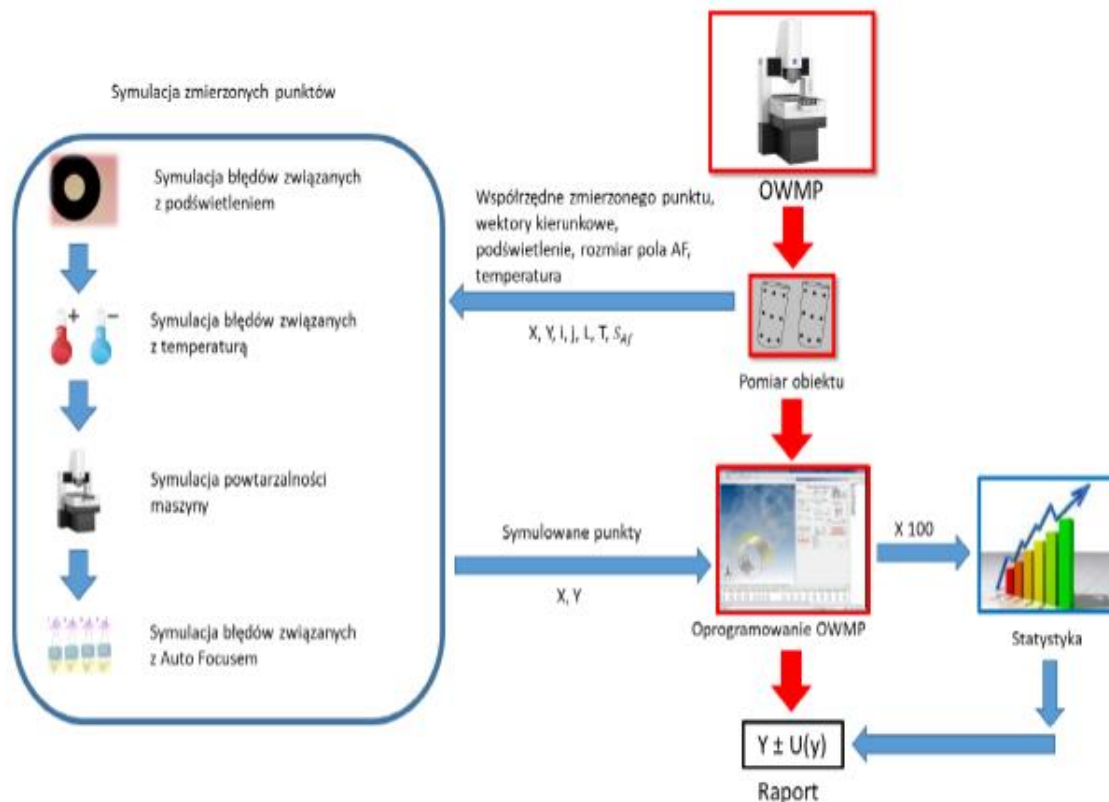
- pierwszy w Polsce model wirtualnej maszyny współrzędnościowej autorstwa prof. dr hab. inż. Jerzego Śładka [42],
- wirtualna maszyna stykowa modelująca dokładność pomiaru metodą Monte Carlo autorstwa dr hab. inż. Adama Gąski [10],
- model ramienia pomiarowego autorstwa dr hab. inż. Kseni Ostrowskiej [29],
- model pięcioosiowego systemu REVO autorstwa dr inż. Piotra Gąski [60],
- model optycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej autorstwa dr inż. Wiktora Harmatysa [13],
- model laserowego systemu nadążnego autorstwa dr inż. Macieja Gruzy [61].

Istnieje kilka podejść do zagadnienia modelowania współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Pierwszym przykładem może być opracowanie modelu poprzez opisanie przestrzeni pomiarowej siatką punktów referencyjnych. Opisanie każdego punktu na siatce rozkładem prawdopodobieństwa obrazującym rozkład błędów resztkowych dla całej przestrzeni pomiarowej oraz oddzielne modelowanie błędów głowicy pomiarowej [2].



Rysunek 4.12. Schemat algorytmu działania wirtualnej stykowej maszyny pomiarowej [10]

W uproszczeniu działanie tego typu systemu polega na wielokrotnym zasymulowaniu punktu pomiarowego wraz ze zmiennością poszczególnych błędów jakie zostały uwzględnione w modelu błędów systemu. Po wykonaniu takiego pomiaru zebrane punkty są przesyłane do modułu symulującego, następnie są one symulowane i wracają do oprogramowania pomiarowego, gdzie są zapisywane jako punkty zmierzone [5].



Rysunek 4.13. Schemat algorytmu działania wirtualnej optycznej maszyny pomiarowej [13]

Wyniki uzyskane na podstawie symulacji mogą posłużyć jako dane do szacowania niepewności pomiaru danej cechy. Duża ilość serii pomiarowych uzyskiwana w krótkim czasie pozwala na lepszą identyfikację błędów, a w konsekwencji pozwala na osiągnięcie mniejszych wartości niepewności pomiaru.

Metody symulacyjne mogą znaleźć zastosowanie szczególnie w zakładach produkcyjnych, ponieważ nie wymagają użycia specjalistycznych wzorców (poza procesem wdrożenia), nie wymagają wielokrotnych powtórzeń i zmian orientacji w procesie pomiarowym obiektu mierzonego.

5. Hipoteza, cel i zakres pracy

Dynamicznie postępująca automatyzacja produkcji i rosnące wymagania przemysłu względem optymalizacji procesów kontroli jakości wymuszają rozwój urządzeń i systemów pomiarowych. Wzrost oczekiwań co do dokładności maszyn pomiarowych i minimalizacji niepewności realizowanych pomiarów prowadzą do konieczności opracowywania rozwiązań umożliwiających dobranie systemów mierzących w taki sposób, aby możliwe było uzyskanie jak najmniejszej niepewności pomiaru. Dzięki rozwojowi techniki, mocy obliczeniowej komputerów czy deklaratywnych języków programowania możliwe jest opracowywanie systemów ekspertowych, czyli systemów bazodanowych, które pozwalają użytkownikowi dobrać właściwy przyrząd pomiarowy do konkretnego zadania.

Nad takimi rozwiązaniami pracują ośrodki badawcze, m.in. w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej, gdzie został opracowany prototyp aplikacji OPTI-U pozwalający na wyznaczenie niepewności dla wybranego zadania pomiarowego w zależności od dostępnych optycznych współrzędnościowych systemów pomiarowych.

Ze względu na rosnącą liczbę multisensorycznych maszyn pomiarowych w zakładach produkcyjnych zasadne jest opracowanie aplikacji, która pozwoli na zrealizowanie wyżej wymienionych założeń dla tego typu urządzeń i ułatwi pracę szczególnie mniej doświadczonym kontrolerom jakości właściwe korzystanie z dostępnych systemów. Powyższe czynniki pozwoliły na sformułowanie następującej hipotezy:

Możliwe jest opracowanie systemu ekspertowego przeznaczonego do doboru odpowiedniego systemu pomiarowego współrzędnościowej maszyny multisensorycznej do konkretnego zadania pomiarowego w oparciu o wcześniej opracowany model niepewności pod kątem minimalizacji wartości niepewności pomiaru dla realizowanego zadania.

Celem pracy jest opracowanie systemu ekspertowego, który umożliwi użytkownikowi dobór odpowiedniego sensora do realizowanego zadania pomiarowego. Ten etap pracy można podzielić na dwie części. Pierwszą jest opracowanie bazy wiedzy na podstawie przeprowadzonych pomiarów i analiz oraz wyników badań zrealizowanych na przestrzeni lat w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej.

Zbudowanie zależności pomiędzy dostępnymi systemami maszyny multisensorycznej, określenie wartości granicznych, dla których dany system znajduje zastosowanie. Uwzględnienie ich możliwości i ograniczeń względem poszczególnych zadań pomiarowych. Druga część to przygotowanie wizualne aplikacji dla użytkownika, aby w czytelny i prosty sposób można było korzystać z opracowanej bazy wiedzy.

Kolejnym istotnym aspektem jest opracowanie algorytmu doboru odpowiedniej strategii pomiarowej, która zapewni oczekiwaną dokładność z uwzględnieniem optymalizacji czasu potrzebnego na zrealizowanie pomiaru. W przypadku systemu stykowego przeprowadzono symulacje dla określenia minimalnej liczby punktów niezbędnej do poprawnej realizacji zadania pomiarowego.

Następnym celem jest opracowanie metody szacowania niepewności. Przyjęte zostały dwa warianty. Pierwszy zakłada szacowanie niepewności na podstawie metody Hernla. Jest to metoda bazująca na maksymalnych błędach granicznych (Maximum Permissible Error) danego urządzenia pomiarowego. W metodzie tej do wyznaczania niepewności poszczególnych zadań pomiarowych służą określone wzory. Wariant ten wymaga wyznaczenia błędów w postaci równań MPE dla poszczególnych sensorów. Wyznaczone zostały również wartości MPE dla różnych konfiguracji sensorów współpracujących ze sobą w jednym zadaniu pomiarowym. Drugi wariant bazuje na metodzie symulacyjnej. W tym przypadku wymagane jest przeprowadzenie serii badań na różnych wzorcach dla dostępnych sensorów. Określenie błędów systematycznych i przypadkowych głowicy pomiarowej oraz błędów geometrii urządzenia, a następnie opracowanie modeli maszyn wirtualnych dostępnych sensorów. Aplikację opracowano dla maszyny multisensorycznej Zeiss O-Inspect 442.

W dalszej części opracowany system podlega weryfikacji, a zatem przeprowadzenie pomiarów na obiekcie wzorcowym oraz detalu przemysłowym. Analiza uzyskanych wyników, porównanie wartości otrzymanych dla zadania szacowania niepewności pomiaru w obrębie zaproponowanych metod.

Ostatnim i najważniejszym aspektem jest sformułowanie wniosków z prac badawczych. Rozważania dotyczące zrealizowanych celów, a także wskazanie kierunku dalszych badań i prac rozwojowych z wyszczególnieniem możliwości i zaproponowaniem sposobów rozwijania opracowanego systemu.

6. Dobór strategii pomiarowej dla cech pomiarowych

Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia oceny dokładności pomiaru i szacowania niepewności jest dobór strategii pomiarowej. Temat ten jest integralną częścią współrzędnościowej techniki pomiarowej i badany od początków jej powstania. Rozważania nad strategią pomiarową można znaleźć w wielu publikacjach naukowych. Jest to bowiem kluczowy element zapewniający powtarzalność i odtwarzalność wyników pomiaru.

Pod pojęciem strategii pomiarowej rozumie się takie zagadnienia jak:

- zdefiniowanie układu współrzędnych dla mierzonego obiektu. W przypadku części przemysłowych układ określany jest z reguły przez konstruktora już na etapie projektowania. Najczęściej wynika bezpośrednio z przyjętych baz pomiarowych. Jeżeli jednak układ nie został uprzednio zdefiniowany należy dobrać go tak, aby możliwa była ocena cech podlegających weryfikacji.
- określenie ilości punktów niezbędnych do wyznaczenia poszczególnych cech pomiarowych. Właściwie dobrana ilość punktów pozwala na poprawne wyznaczenie wymiarów czy odchyłek kształtu. Zbyt mała ilość punktów może prowadzić do uzyskania błędnych wyników pomiaru, np. na skutek pominięcia ekstremów występujących w obrębie danej cechy. Natomiast zbyt duża ilość punktów może wydłużyć czas pomiaru danego detalu jednocześnie nie wpływając w sposób znaczący na jakość uzyskanych wyników i generując niepotrzebne koszty. Dla cech jak np. pomiar średnicy kuli można zdefiniować graniczną maksymalną liczbę punktów pomiarowych, po przekroczeniu której dokładność wyniku nie zwiększy się istotnie. Dlatego też tak bardzo ważny jest dobór odpowiedniej ilości punktów, aby zachować balans pomiędzy dokładnością pomiarów, a czasem niezbędnym do ich zrealizowania.
- dobranie rozkładu punktów pomiarowych to kolejny ważny aspekt wpływający na dokładność pomiaru. Podobnie jak powyżej, poprawnie rozłożone punkty dla danej cechy pozwalają wykryć defekty na powierzchniach mierzonych co przekłada się bezpośrednio na zdolność właściwego wyznaczenia wartości. Z reguły przyjmuje się zasadę, że punkty pomiarowe powinny być równomiernie rozłożone na weryfikowanej powierzchni.

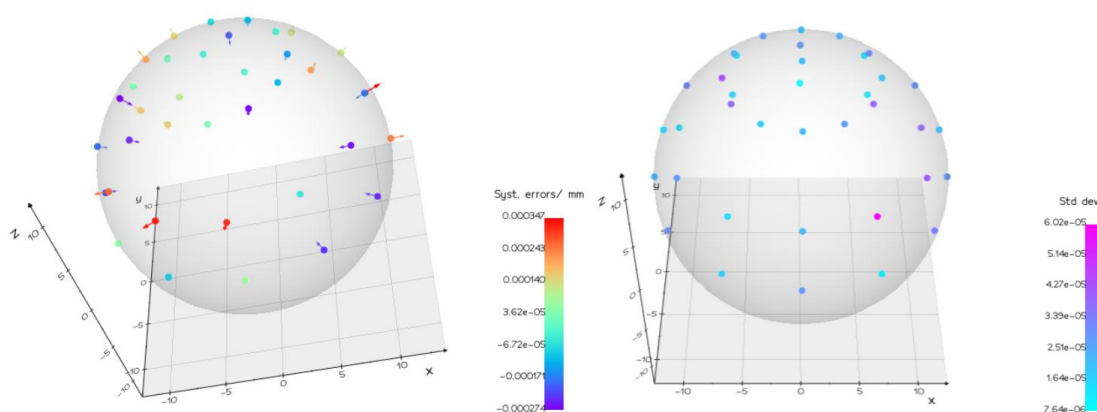
Opracowana aplikacja ma za zadanie wspomóc użytkownika również w tak ważnym zagadnieniu jakim jest dobór strategii pomiarowej.

Ze względu na to, że pomiary przy użyciu głowicy optycznej Discovery.V12 umożliwiają akwizycję dużej ilości punktów w krótkim czasie nawet przy zastosowaniu maksymalnego powiększenia przyjęto stałą ilość 250 punktów pomiarowych dla każdej mierzonej cechy.

Dla interferometru światła białego ZEISS DotScan ilość punktów przyjęto taką jak dla głowicy stykowej VAST XXT. Wynika to z tego, że pomiar interferometrem opiera się na pomiarze pojedynczych punktów, więc czas realizacji pomiaru w przypadku obydwu systemów jest zbliżony.

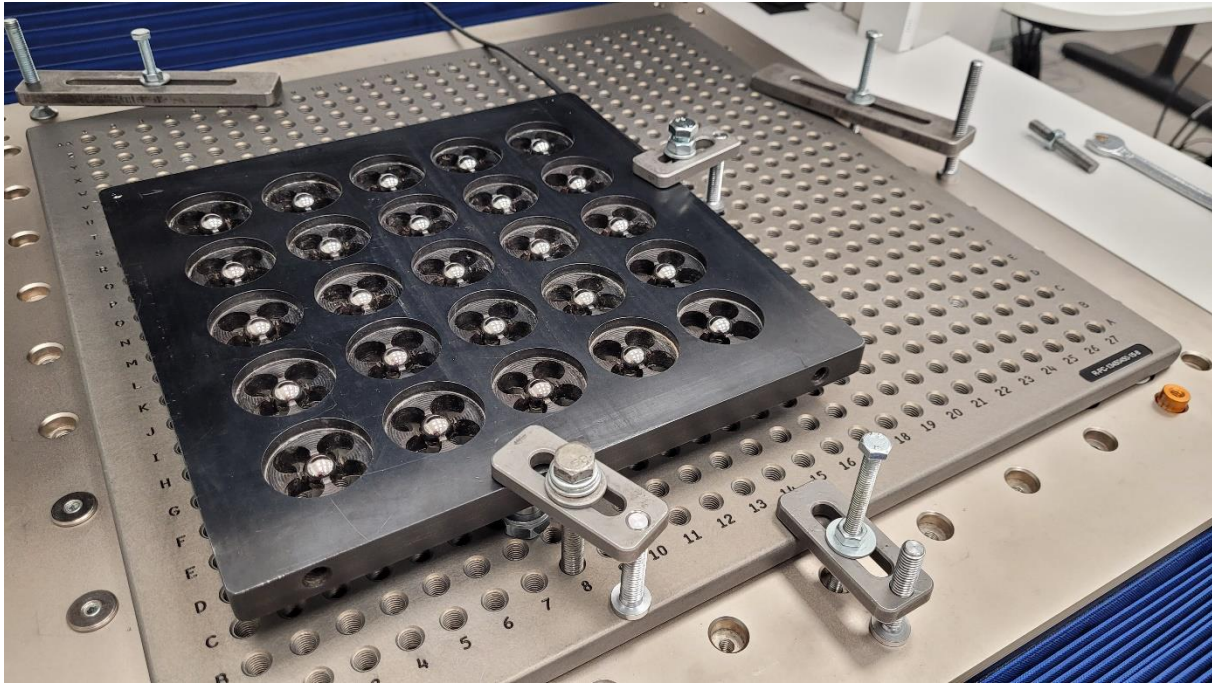
Ilość punktów dla pomiarów przy użyciu głowicy stykowej wyznaczono na podstawie symulacji. Model wirtualnej maszyny dla systemu stykowego urządzenia O-Inspect 442 firmy Zeiss został opracowany w ramach projektu PM/SP/0037/2021/1 „Opracowanie Systemu Wirtualnej Maszyny Współrzędnościowej jako narzędzia optymalizacji strategii pomiarowej oraz wyznaczania niepewności pomiaru współrzędnościowej” pod kierownictwem dr inż. Marcina Krawczyka. Możliwość zastosowania opracowanej maszyny wirtualnej do określania minimalnej liczby punktów wymaganej do określenia charakterystyki mierzonego obiektu czy cechy na podstawie pomiarów odchyłki prostoliniowości opisano również w artykule [11].

Do przygotowania modelu głowicy stykowej VAST XXT posłużyły pomiary wykonane na kuli wzorcowej. Dzięki temu możliwe było opracowanie rozkładu błędów systematycznych i odchyłeń standardowych w funkcji wektora podejścia.

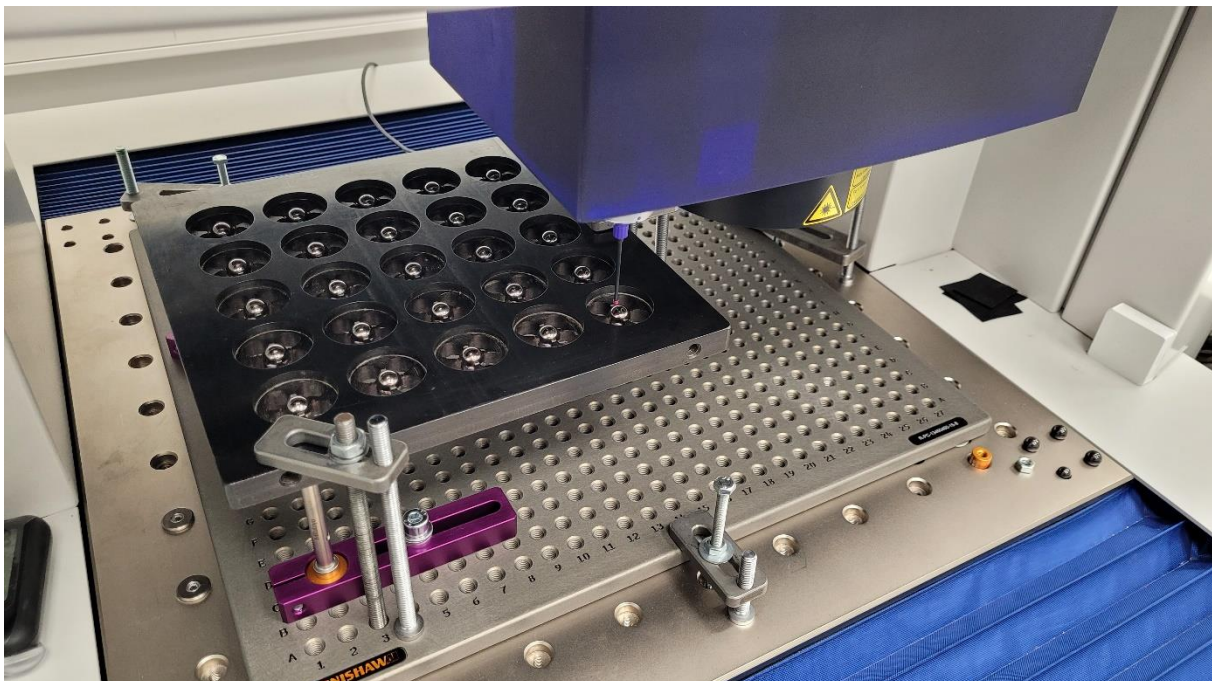


Rysunek 6.1. Rozkład błędów systematycznych i odchyłeń standardowych w funkcji wektora podejścia

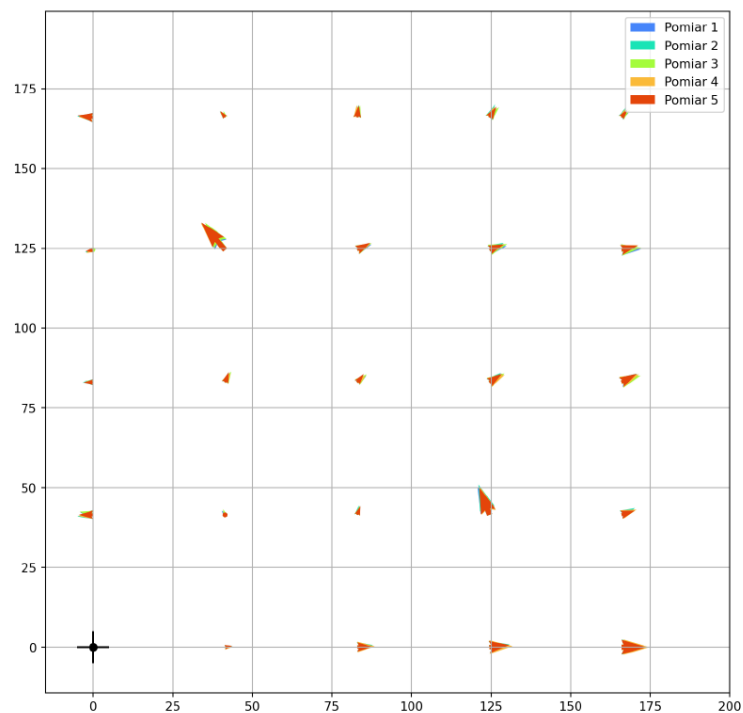
Do przygotowania modelu błędów geometrii urządzenia wykorzystano wyniki z pomiarów na wzorcu otworowo – kulowym. Pomiary zostały wykonane w dwóch położeniach na maszynie w płaszczyźnie XY.



Rysunek 6.2. Pierwsza pozycja wzorca

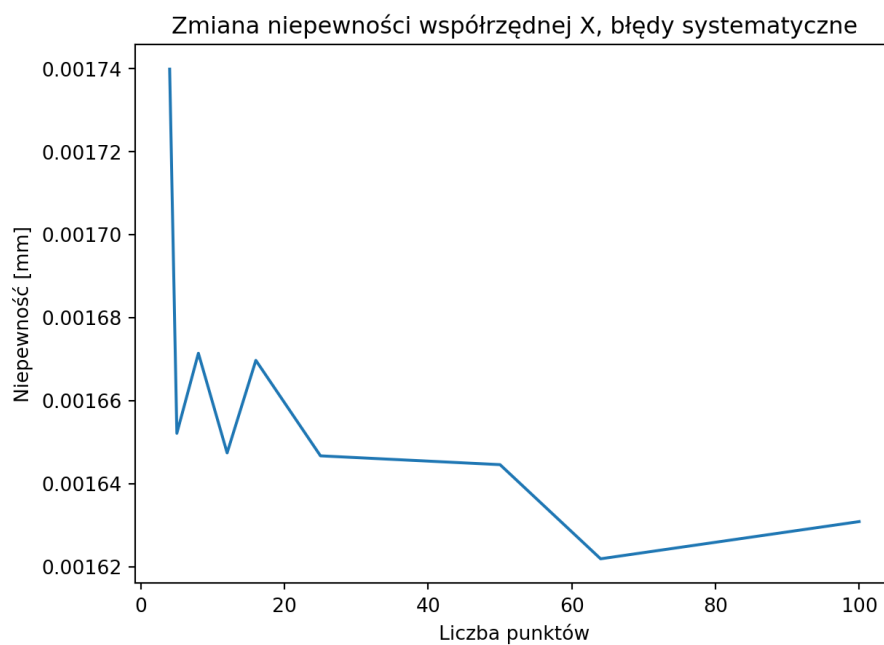


Rysunek 6.3. Druga pozycja wzorca

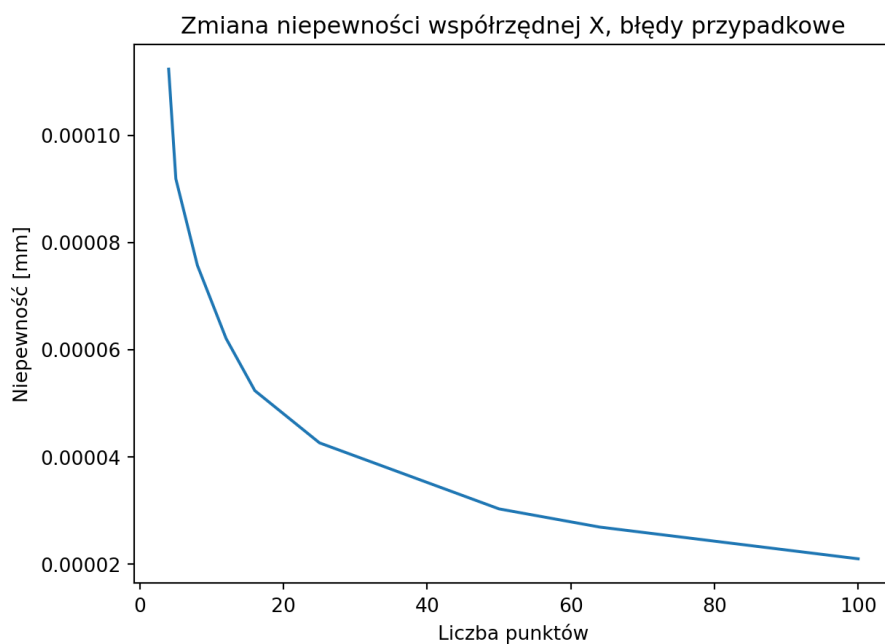


Rysunek 6.4. Błędy wektorowe

Symulacje wykonane w ramach pracy dotyczyły odchyłki okrągłości. Zasymulowano błędy przypadkowe oraz błędy systematyczne i na tej podstawie określono zmiany wartości niepewności w zależności od liczby punktów pomiarowych.



Rysunek 6.5. Zmiany niepewności w zależności od liczby punktów – błędy systematyczne



Rysunek 6.6. Zmiany niepewności w zależności od liczby punktów – błędy przypadkowe

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że niepewność pomiaru zmniejsza się, a co za tym idzie dokładność pomiaru zwiększa się wraz ze wzrostem liczby punktów pomiarowych. Wynika to z faktu, że większa liczba punktów pozwala w poprawny sposób zdefiniować jakość weryfikowanej cechy.

Znacząca poprawa co do wartości widoczna jest do 20 punktów pomiarowych dla pojedynczej cechy. Po przekroczeniu tej wartości charakterystyka niepewności w funkcji liczby punktów wykazuje przebieg zbieżny do 0, natomiast co do wartości zaobserwować można poprawę wyników o ok. 0,01 μm .

Przeprowadzone badania pokazują, że istnieje górna graniczna liczba punktów umożliwiająca poprawną weryfikację, również jakościową poszczególnych cech pomiarowych. Co z kolei przekłada się na poprawną realizację pomiaru i zmniejszenie niepewności.

7. Metoda Hernla w zadaniu szacowania niepewności pomiaru

Omawiana metoda [62] została opracowana przez dr inż. Michaela Hernla z Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Brunshwiku będącego jednym z czołowych ośrodków badawczych w dziedzinie metrologii na świecie.

Jest to analityczna metoda szacowania niepewności pomiaru we współrzędnościowej technice pomiarowej. Bazuje ona na granicznych błędach dopuszczalnych systemu pomiarowego. Według autora metody opracowane przez niego rozwiązanie może być wariantem stosowanym zamiast metod symulacyjnych.

Hernla w swoich rozważaniach zakłada, że stały składnik równania MPE reprezentuje niepewność próbkowania obiektu mierzonego, natomiast część składowa, która uzależniona jest od zmian długości wyraża błędy geometryczne współrzędnościowej maszyny pomiarowej. W opracowanych równaniach nie korzysta wprost ze stałej wartości będącej pierwszym składnikiem, wyrażonym w równaniu w postaci A , ponieważ wartość ta dotyczy pomiarów dwupunktowych pomiędzy płaszczyznami. Niepewność próbkowania w innych przypadkach może być różna, odpowiednio większa lub mniejsza. Stąd też stosuje odpowiednie modyfikacje tej składowej. Na podstawie analizy zależności błędów geometrycznych i błędów wskazań w trakcie realizacji pomiaru szacuje maksymalny wpływ wartości błędów geometrii na błędy pomiaru różnych cech. Na podstawie zrealizowanych badań sformułował wykaz równań do szacowania niepewności pomiaru dla różnych zadań pomiarowych [63].

W swojej metodzie posługuje się równaniem MPE w postaci:

$$MPE \leq \left(A + \frac{L}{K} \right) \mu m, \quad (17)$$

gdzie:

L – mierzony wymiar wyrażony w mm,

A – składowa stała,

K – składowa zależna od zmian długości.

Hernla opracowuje budżet niepewności standardowej uwzględniając takie czynniki jak ilość i rozkład punktów pomiarowych, wpływ stałego składnika A, wpływ składnika K zależnego od zmian długości i wpływ temperatury:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_K^2 + u_{temp}^2}, \quad (18)$$

gdzie:

u_A – niepewność wynikająca z wpływu składnika A,

u_K – niepewność wynikająca z wpływu składnika K,

u_{temp} – niepewność wynikająca z wpływu temperatury,

Niepewność złożoną wyznacza na podstawie równania:

$$U = u \cdot k, \quad (19)$$

gdzie:

u – niepewność standardowa,

k – wyznaczony dla efektywnego stopnia swobody współczynnik rozszerzenia dla prawdopodobieństwa 95%, określony na poziomie równym wartości 2.

Niepewność wynikająca z wpływu składnika A:

$$u_A = \frac{A}{3} \cdot b \cdot s, \quad (20)$$

gdzie:

A – składowa stała z równania MPE wyrażona w μm ,

b – bezwymiarowy współczynnik wyznaczany zgodnie z tabelą 7.1,

s – współczynnik wrażliwości, przyjmujący wartość równą 1.

Tabela 7.1 Wzory na wyznaczenie bezwymiarowego współczynnika b [62]

Parametr	Współczynnik b	Opis
środek okręgu, środek kuli, środek ciężkości walca lub stożka	$b = \sqrt{\frac{4}{n}}$	n – liczba punktów pomiarowych zebranej w obrębie danej cechy
oś walca lub stożka	$b = \sqrt{\frac{8}{n}}$	
płaszczyzna	$b = \sqrt{\frac{12(n-1)}{n(n+1)}}$	

Niepewność wynikająca z wpływu składnika K:

$$u_A = (\Delta L, \Delta \alpha, \Delta F) \cdot s, \quad (21)$$

gdzie:

$\Delta L, \Delta \alpha, \Delta F$ – maksymalny błąd dopuszczalny wyznaczany zgodnie z tabelą 7.2,

s – współczynnik wrażliwości, przyjmujący wartość równą 1.

Niepewność wynikająca z wpływu temperatury:

$$u_{temp} = L\alpha \frac{(T_{max}-20)}{\sqrt{3}}, \quad (21)$$

gdzie:

L – mierzona długość,

α – współczynnik rozszerzalności cieplnej obiektu mierzonego,

T_{max} – maksymalna wartość temperatury zanotowana podczas pomiaru.

Wyznaczenie składowej zależnej K na podstawie składowej B równania MPE:

$$K = \frac{1000}{B}, \quad (22)$$

gdzie:

K – składowa zależna,

B – składowa zależna z równania w postaci $MPE = A + B \frac{L}{1000} mm$.

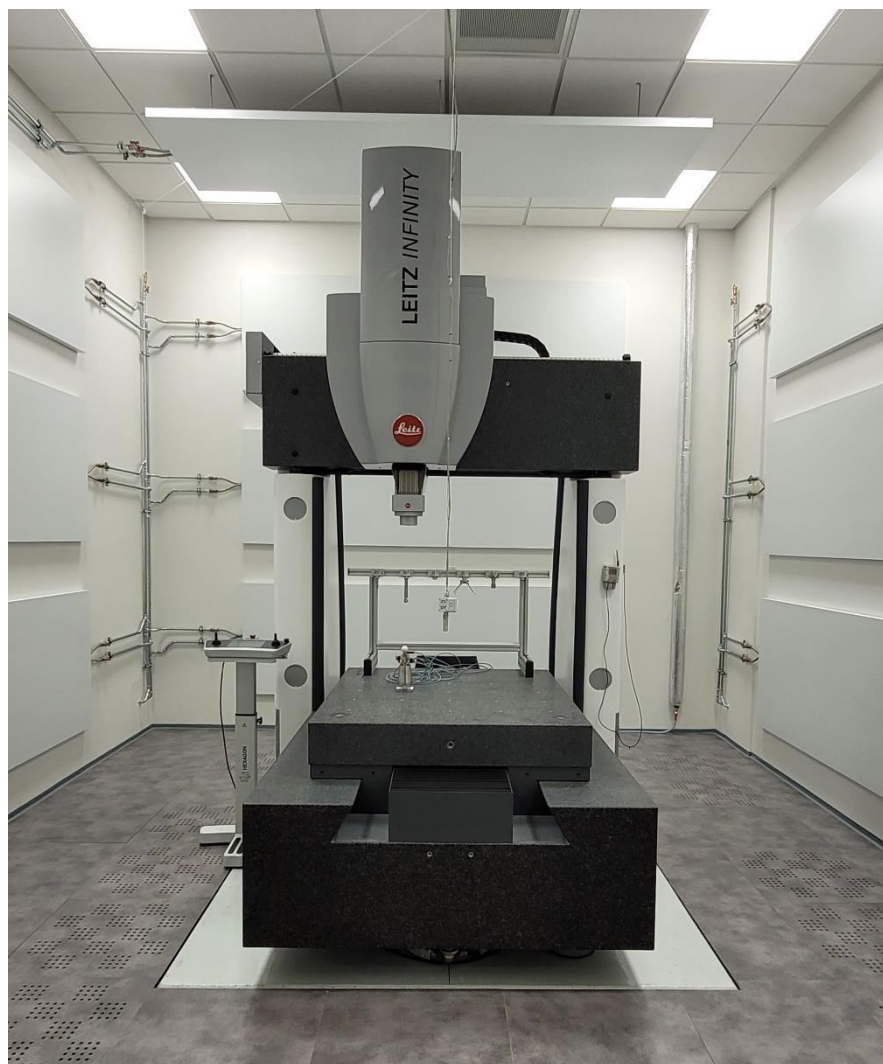
Tabela 7.2 Maksymalne dopuszczalne błędy geometryczne maszyny współrzędnościowej dla różnych własności geometrycznych w zależności od współczynnika K maksymalnego dopuszczalnego błędu wskazania dla pomiaru długości [62]

Własność geometryczna	Maksymalny błąd dopuszczalny	Opis
długość, odległość, średnica, pozycja (na płaszczyźnie)	$\Delta L \leq \frac{L}{K}$	L – wartość nominalna mierzonego wymiaru lub wymiar teoretycznie dokładny określający pozycję
pozycja (w przestrzeni)	$\Delta L \leq \frac{1}{K} \sqrt{L^2 + l^2}$	L – wymiar teoretycznie dokładny określający pozycję l – największa z wartości nominalnych określających pozycję elementu w kierunku prostopadłym do bazy
współśrodkowość, symetria między punktami	$\Delta L_K \leq \frac{D}{2K}$	D – największa wartość nominalna średnicy
współosiowość, symetria na płaszczyźnie	$\Delta L_K \leq \frac{1}{K} \sqrt{\frac{D^2}{4} + L^2}$	D – największa wartość nominalna średnicy lub długości L – wartość nominalna mniejszej długości
równoległość, nachylenie	$\Delta L_P \leq \frac{2L}{K}$	L – mniejsza z wartości nominalnych długości mierzonych elementów względem prostopadłej odległości między obydwoma elementami (dłuższy element jest elementem odniesienia)
prostopadłość	$\Delta L_R \leq \frac{2L}{K}$	L – wartość nominalna długości krótszego boku kąta (dłuższy bok kąta stanowi bazę)
nachylenie	$\Delta L_N \leq \frac{2L}{K} \sin \alpha$	L – długość nominalna boku trójkąta przeciwległego do kąta (dłuższy bok kąta stanowi bazę) α – wartość nominalna kąta
kąt	$\Delta \alpha \leq \frac{2}{10^3 K} \sin^2 \alpha$	α – wartość nominalna kąta
prostoliniowość	$\Delta F_G \leq \frac{l}{K}$	l - wartość nominalna długości odcinka prostej
płaskość	$\Delta F_E \leq \frac{1}{K} \sqrt{5l^2 + L^2}$	l, L – wartości nominalne krótszego i dłuższego boku płaszczyzny
okrągłość	$\Delta F_R \leq \frac{D}{K} \sqrt{\frac{26}{4}}$	D – wartość nominalna średnicy
walcowość	$\Delta F_Z \leq \frac{1}{K} \sqrt{\frac{26}{4} D^2 + 10L^2}$	D – wartość nominalna średnicy L – nominalna długość

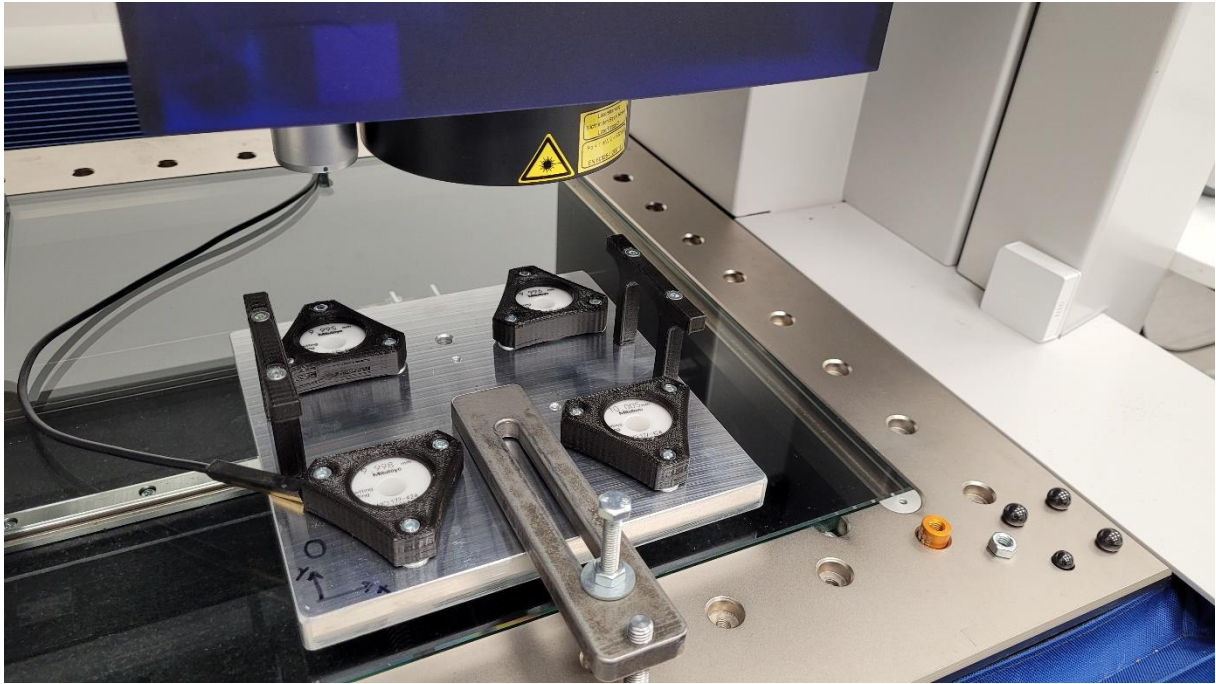
8. Zastosowanie metod symulacyjnych w szacowaniu niepewności pomiaru

W celu weryfikacji możliwości implementacji symulacyjnych metod do szacowania niepewności pomiaru wykonano badania z wykorzystaniem wirtualnej współrzędnościowej maszyny optycznej opracowanej przez dr inż. Wiktora Harmatysa opisaną w publikacji [13].

Do badań wykorzystano wzorec pierścieniowy, który można zastosować w pomiarach optycznych. Wzorec został uprzednio wywzorcowany na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Leitz Infinity znajdującej się na wyposażeniu Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej.

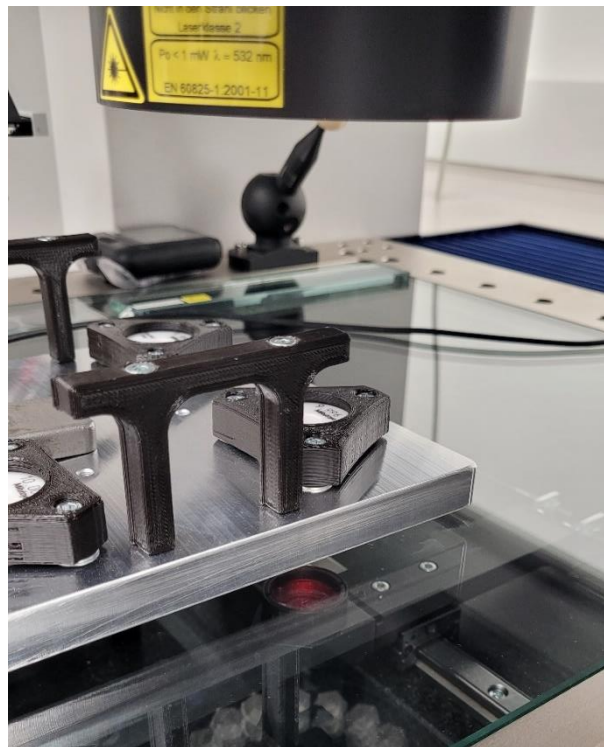


Rysunek 8.1 Maszyna pomiarowa Leitz Infinity



Rysunek 8.2. Pomiar wzorca pierścieniowego przy użyciu głowicy optycznej Discovery.V12

Na wzorcu przeprowadzono jednokrotny pomiar różnych cech. W pomiarze zastosowano podświetlenie stolika pomiarowego od spodu. Uzyskane dane zostały odniesione do wartości nominalnych z dokumentacji. Niepewności pomiaru wyznaczono na podstawie równania MPE głowicy optycznej Discovery.V12.

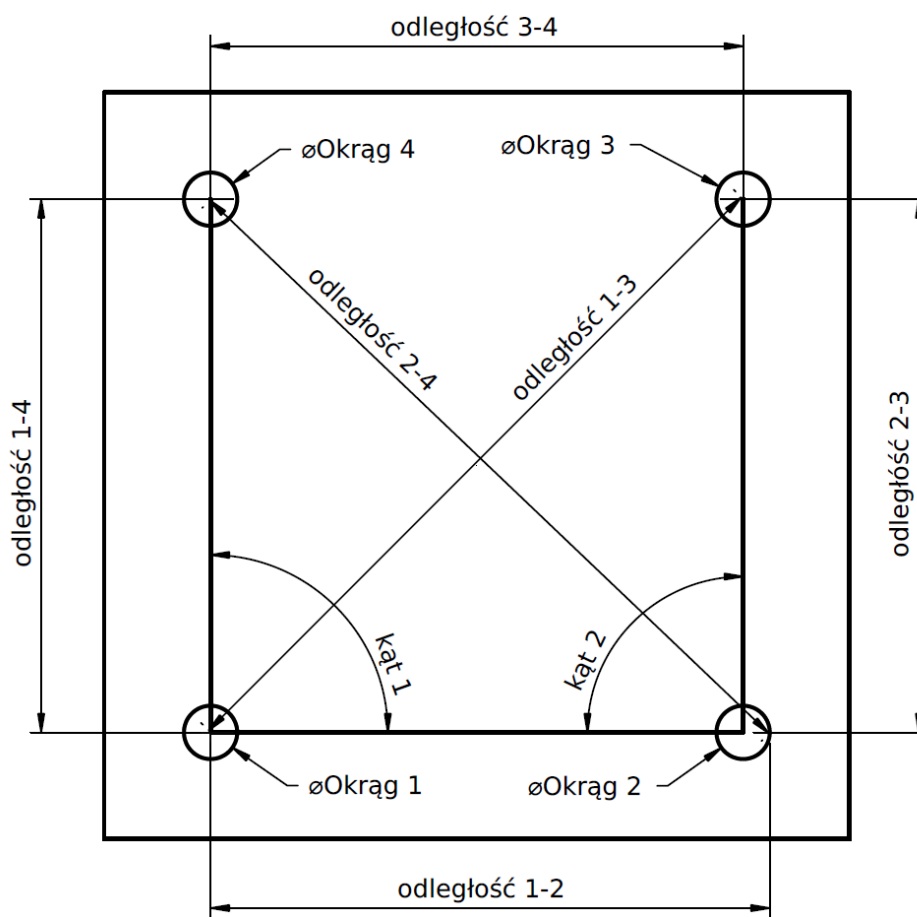


Rysunek 8.3. Pomiar wzorca pierścieniowego z podświetleniem stolika od spodu

Do wykonania symulacji pomiaru przez wirtualną współrzędnościową maszynę pomiarową niezbędne są dane wejściowe, czyli takie informacje jak:

- rozkład punktów pomiarowych dla poszczególnych cech,
- współrzędne punktów w przestrzeni pomiarowej,
- wektory najazdów pojedynczych punktów pomiarowych,
- odchyłki pomiarowe, czyli wartości uzyskanych błędów,
- warunki środowiskowe.

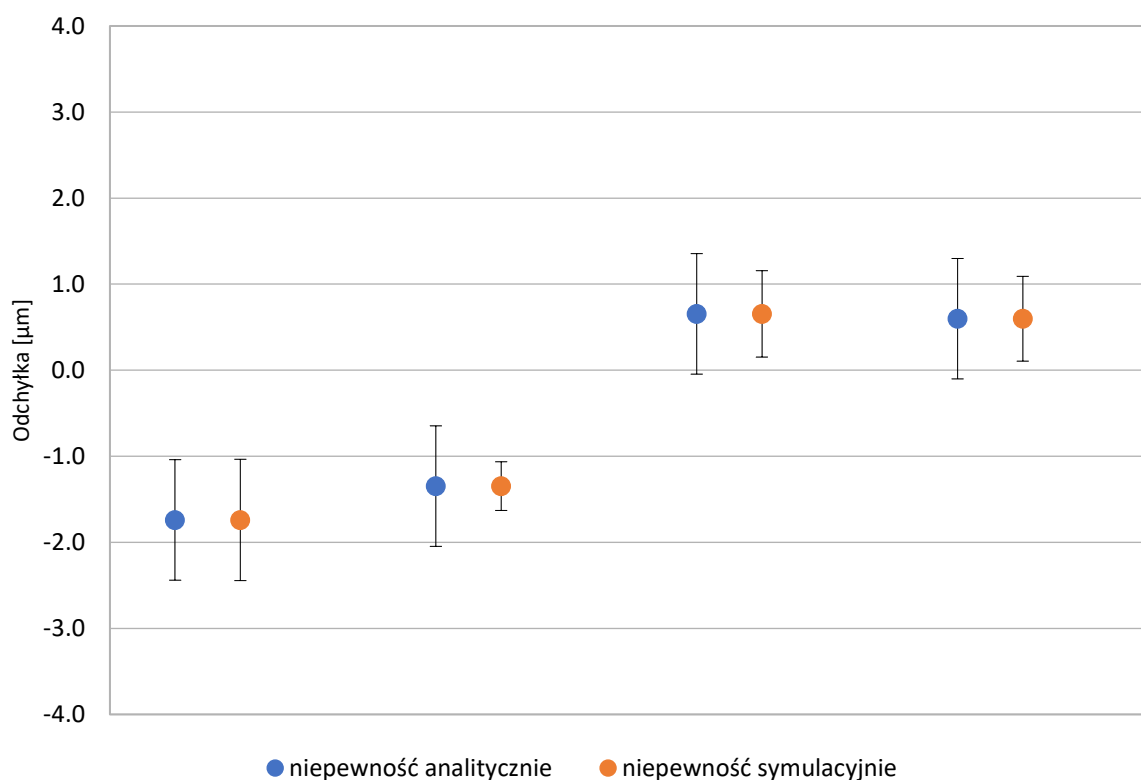
Wykonany uprzednio pojedynczy pomiar posłużył jako dane dla maszyny wirtualnej. Następnie pomiar symulowano 50 razy. Wyniki z pomiaru oraz wyniki z symulacji zestawiono ze sobą wraz z wartościami niepewności pomiaru. Na rysunku przedstawiono zmierzone cechy.



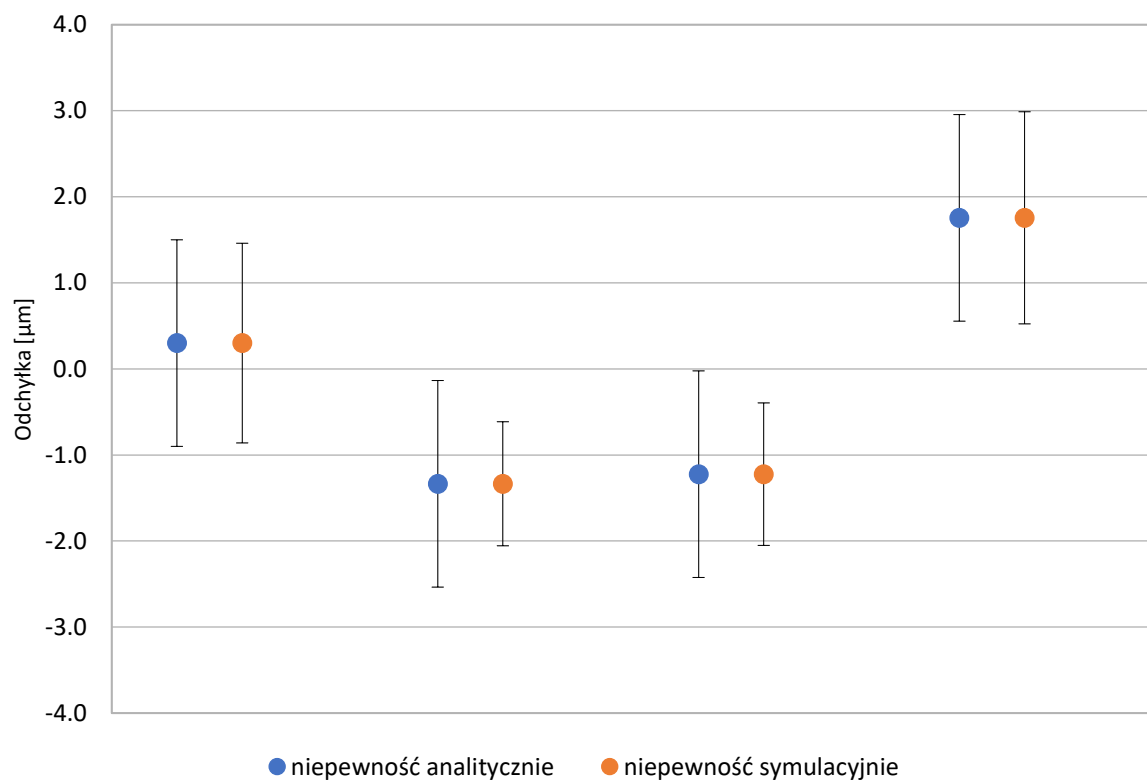
Rysunek 8.4. Oznaczenie cech zmierzonych na wzorcu pierścieniowym

Tabela 8.1. Zestawienie wyników badań z pojedynczego pomiaru i serii symulacji

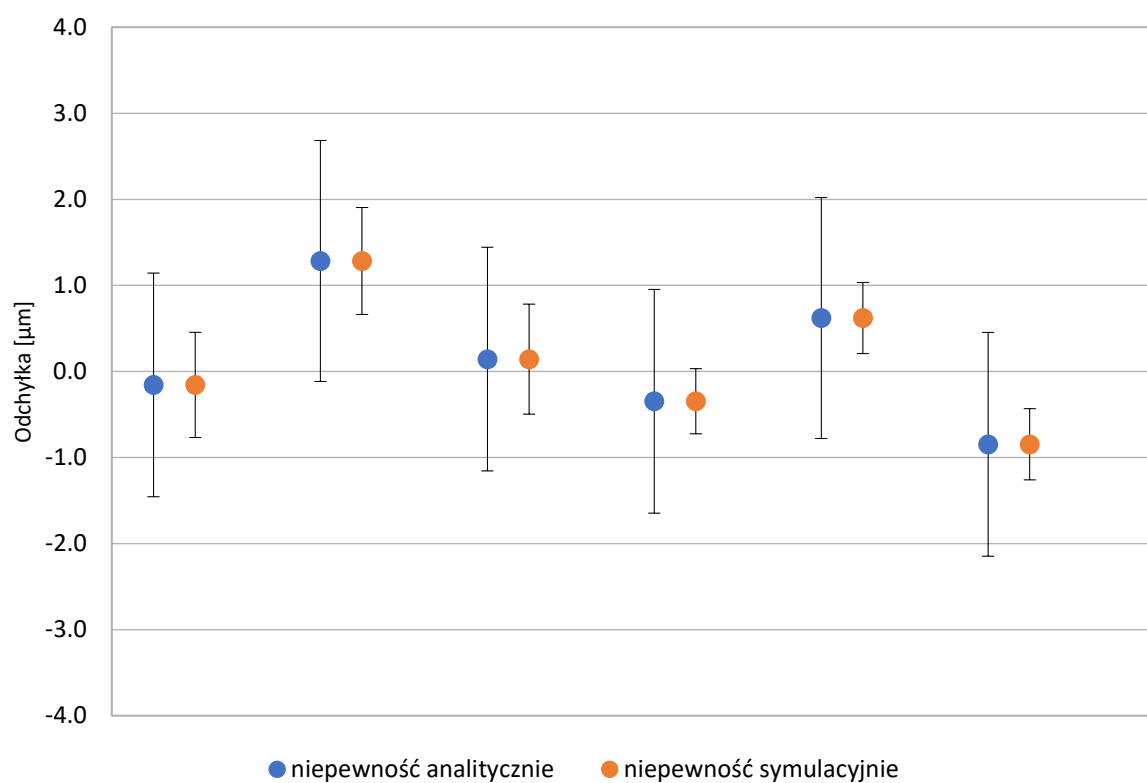
	nominal [mm]	pojedynczy pomiar		symulacja
		wynik [mm]	$U_{\text{analityczna}}$ [μm]	$U_{\text{symulacyjna}}$ [μm]
Okrąg 1 – Średnica	9,9982	9,9965	0,7	0,7
Okrąg 1 – Odchyłka kształtu	0,0036	0,0039	1,2	1,2
Okrąg 2 – Średnica	10,0035	10,0022	0,7	0,3
Okrąg 2 – Odchyłka kształtu	0,0021	0,0008	1,2	0,7
Okrąg 3 – Średnica	9,9951	9,9958	0,7	0,5
Okrąg 3 – Odchyłka kształtu	0,0018	0,0006	1,2	0,8
Okrąg 4 – Średnica	9,9974	9,9980	0,7	0,5
Okrąg 4 – Odchyłka kształtu	0,0032	0,0050	1,2	1,2
Odległość 1 – 2	100,1488	100,1486	1,3	0,6
Odległość 1 – 3	141,3090	141,3103	1,4	0,6
Odległość 1 – 4	99,9917	99,9918	1,3	0,6
Odległość 2 – 3	99,9655	99,9652	1,3	0,4
Odległość 2 – 4	141,6533	141,6539	1,4	0,4
Odległość 3 – 4	99,9660	99,9652	1,3	0,4
Kąt 1	90,1101	90,1077	1,0	0,5
Kąt 2	90,1551	90,1559	1,0	0,4
Równoległość linie 1-4 i 2-3	0,1810	0,1853	1,6	0,4



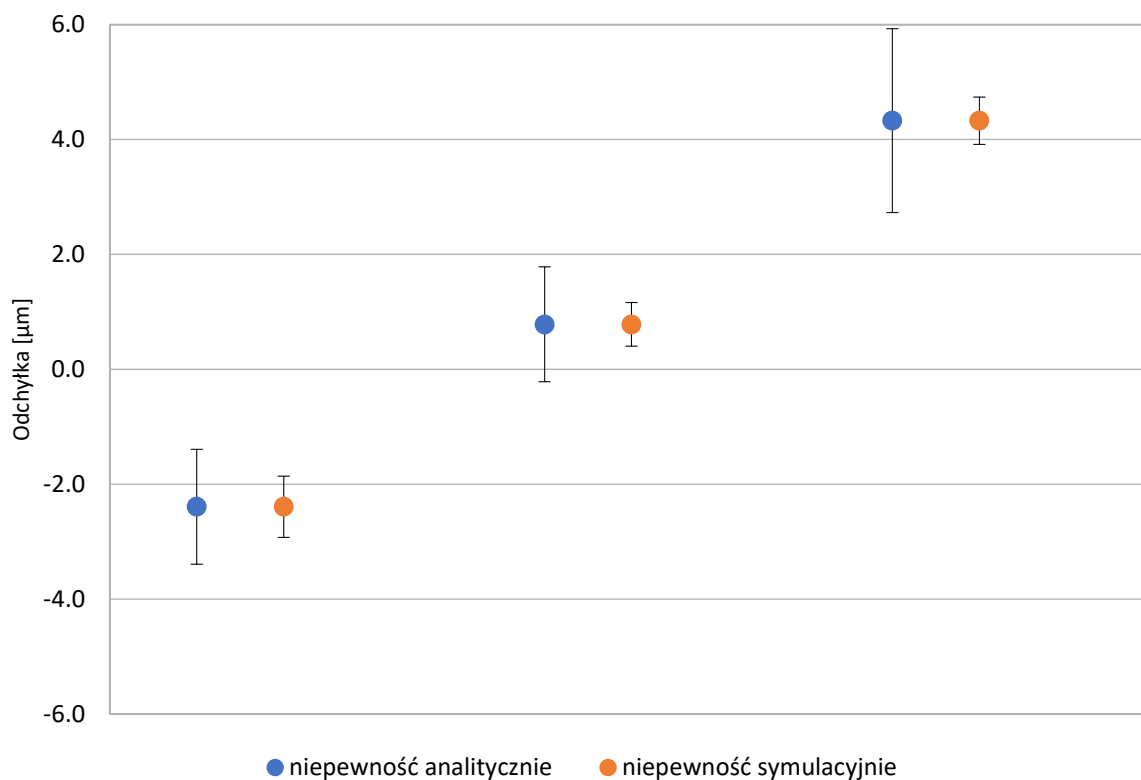
Rysunek 8.5. Wartości odchylek wraz z niepewnością dla kolejnych średnic



Rysunek 8.6. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych odchyłek kształtu



Rysunek 8.7. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych odległości



Rysunek 8.8. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kątów i równoległości

Przeprowadzona analiza pokazuje, że szacowanie niepewności pomiaru na podstawie metody Hernli dla pewnych cech, jak średnica czy odchyłka okrągłości, pozwala uzyskać wartości zbliżone do tych z metody symulacyjnej.

Wykonane porównania potwierdzają możliwość implementacji metod symulacyjnych w zadaniu szacowania niepewności pomiaru. Szczególnie istotne jest to z punktu widzenia kontroli jakości w zakładach przemysłowych gdzie najczęściej niemożliwe jest stosowanie metody porównawczej, z uwagi na brak odpowiednich wzorców odniesienia, czy też metody wielopozycyjnej, ze względu na ograniczenia czasowe.

Dlatego też prace rozwojowe nad tworzonym systemem ekspertowym zakładają wdrożenie wirtualnych maszyn pomiarowych m.in. do zadania szacowania niepewności pomiaru.

9. Wyznaczenie błędów multisensorycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej O-Inspect 442 firmy Zeiss

Wzorcowanie systemów pomiarowych pozwala wyznaczyć maksymalne dopuszczalne błędy graniczne (Maximum Permissible Errors) danego urządzenia pomiarowego. Dzięki procedurom wzorcowania możliwe jest zweryfikowanie dokładności pomiarowej badanego systemu, określenie jego charakterystyk błędów w całej przestrzeni pomiarowej, zweryfikowanie błędów głowic mierzących i geometrii maszyny. Ponadto podczas wzorcowania zaobserwować można wpływ warunków środowiskowych na uzyskiwane wyniki pomiarów. Badania odbiorcze umożliwiają weryfikację systemu po jego instalacji ze specyfikacją producenta, natomiast badania okresowe zapewniają kontrolę nad stanem maszyny podczas okresu jej eksploatacji, dając możliwość wykrycia zbyt dużych odchyłek i wprowadzenia korekt, w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu kontroli jakości procesu produkcyjnego.

Z uwagi na fakt, że w niniejszej pracy niepewność pomiaru jest szacowana na podstawie równań MPE, konieczne było przeprowadzenie procedury wzorcowania poszczególnych systemów maszyny multisensorycznej O-Inspect 442 firmy Zeiss o nr seryjnym: 156360 zgodnie z normą ISO-10360.

9.1. Wyznaczenie błędów głowicy stykowej VAST XXT

W pierwszej kolejności zweryfikowane zostały błędy głowicy stykowej. Pomiarzy zrealizowano na ceramicznej kuli referencyjnej o średnicy 25 mm o nr seryjnym K0564.

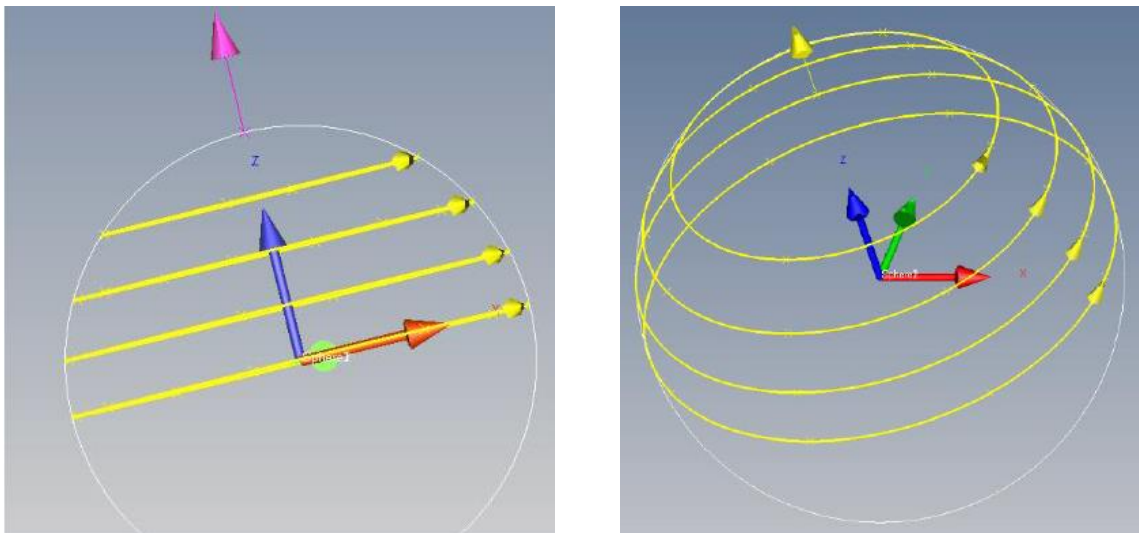


Rysunek 9.1. Kula referencyjna o nr seryjnym K0564 użyta do wzorcowania systemu stykowego

Graniczne błędy dopuszczalne wymiaru i kształtu pojedynczej końcówki pomiarowej wyznaczono na podstawie 25-ciu punktów pomiarowych równomiernie rozmieszczonych na powierzchni półsfery w trybie próbkowania pojedynczych punktów. Rozkład punktów przyjęty

zgodnie

z normą ISO 10360-5 [1]. Jeden punkt na biegunie, kolejne przekroje pod kątem 22,5°, kolejno cztery punkty, osiem punktów, cztery punkty i osiem punktów na równiku.



Rysunek 9.2. Ścieżka rozkładu punktów pomiarowych na powierzchni półsfery referencyjnej

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru pojedynczej końcówki P[Size.Sph.1×25:SS:Tact]

Tabela 9.1. Wartości błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru pojedynczej końcówki P[Size.Sph.1×25:SS:Tact]

MPE (P[Size.Sph.1×25:SS:Tact]) [μm]	P[Size.Sph.1×25:SS:Tact] [μm]	U [μm]
1,5	-0,7	0,1

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego kształtu pojedynczej końcówki P[Form.Sph.1×25:SS:Tact]

Tabela 9.2. Wartości błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru pojedynczej końcówki P[Form.Sph.1×25:SS:Tact]

MPE (P[Form.Sph.1×25:SS:Tact]) [μm]	P[Form.Sph.1×25:SS:Tact] [μm]	U [μm]
1,5	0,12	0,2

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości E0

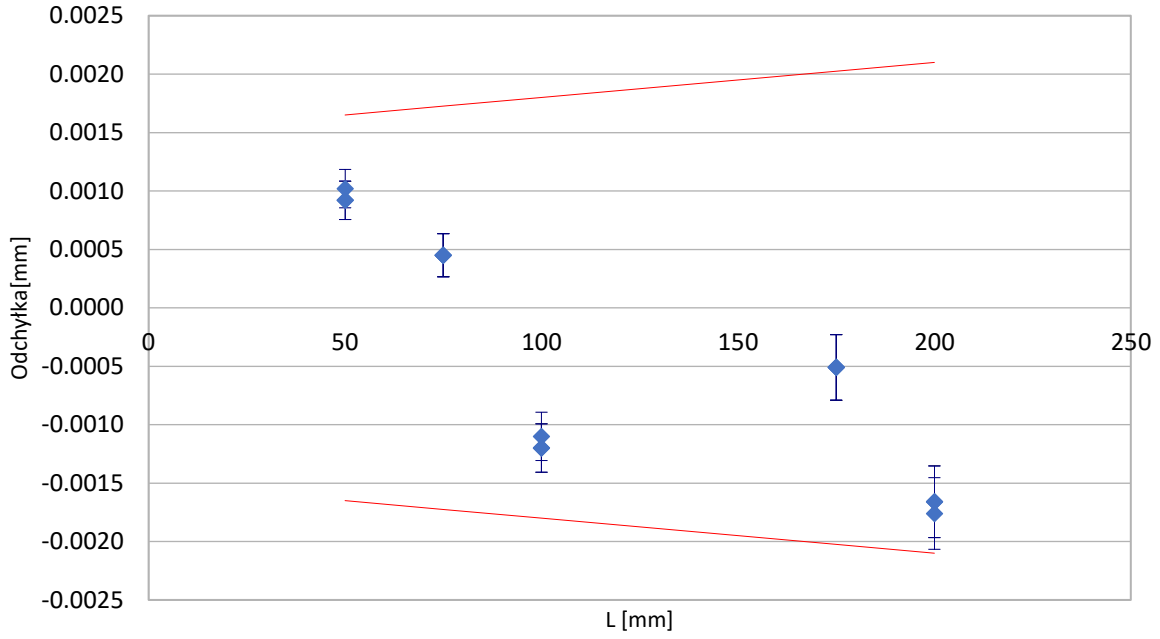
Pomiary zostały wykonane przy użyciu zestawu płytek wzorcowych o nr seryjnym LMWP1. Badania zrealizowano w osiach X i Y urządzenia oraz w dwóch przekątnych przestrzennych oznaczonych jako D1 i D2. Każdorazowo na płycie wzorcowej wyznaczany był układ lokalny. Na płaszczyznach referencyjnych zebrano po pięć punktów, cztery po obwodzie w pobliżu narożników i jeden na środku. Odległości zostały wyznaczone jako punkt-punkt. Zgodnie z normą konieczne jest, aby zbadać minimum 66% weryfikowanego zakresu pomiarowego jako pomiar pięciu długości w trzech seriach przeprowadzany na wzorcu krańcowym.



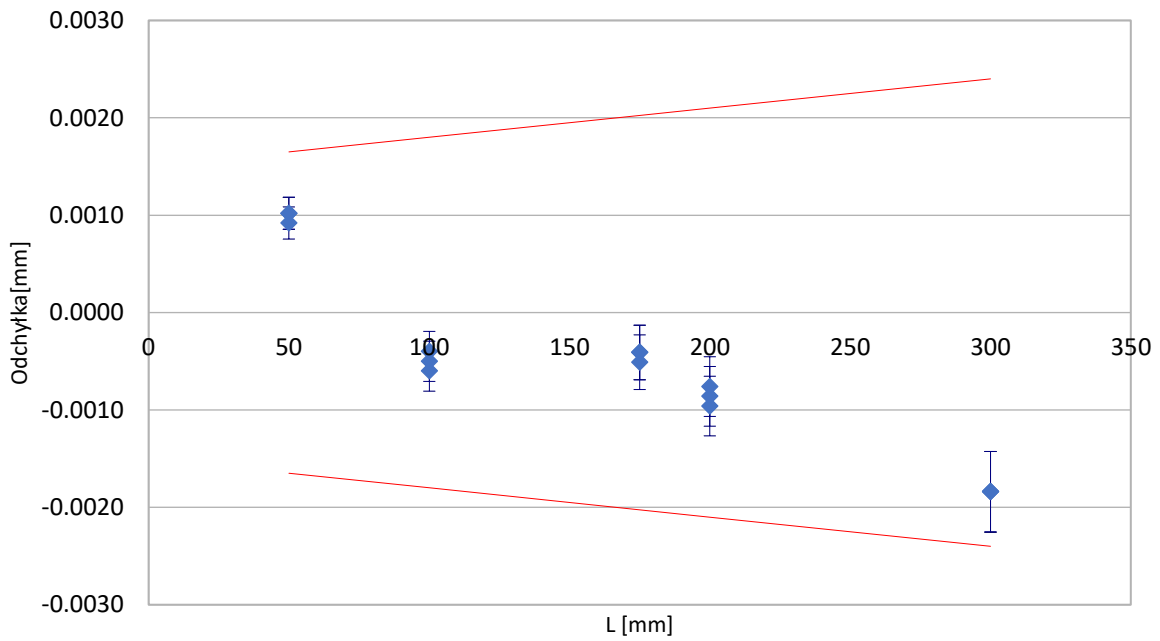
Rysunek 9.3. Poglądowy sposób zamocowania płytki wzorcowej do pomiaru

Tabela 9.3. Wartości błędów pomiaru długości systemu stykowego w osi X i Y

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
X	49,9999	1,0	0,9	0,9	0,1	1,6	0,2
	75,0001	0,5	0,5	0,5	0,0	1,7	0,2
	100,0002	-1,2	-1,2	-1,1	0,1	1,8	0,2
	175,0004	-0,5	-0,5	-0,5	0,0	2,0	0,3
	200,0008	-1,7	-1,8	-1,7	0,1	2,1	0,3
Y	49,9999	1,0	1,0	0,9	0,1	1,6	0,2
	100,0002	-0,4	-0,5	-0,6	0,2	1,8	0,2
	175,0004	-0,5	-0,4	-0,4	0,1	2,0	0,3
	200,0008	-0,8	-0,9	-1,0	0,2	2,1	0,3
	300,0009	-1,8	-1,8	-1,8	0,0	2,4	0,4



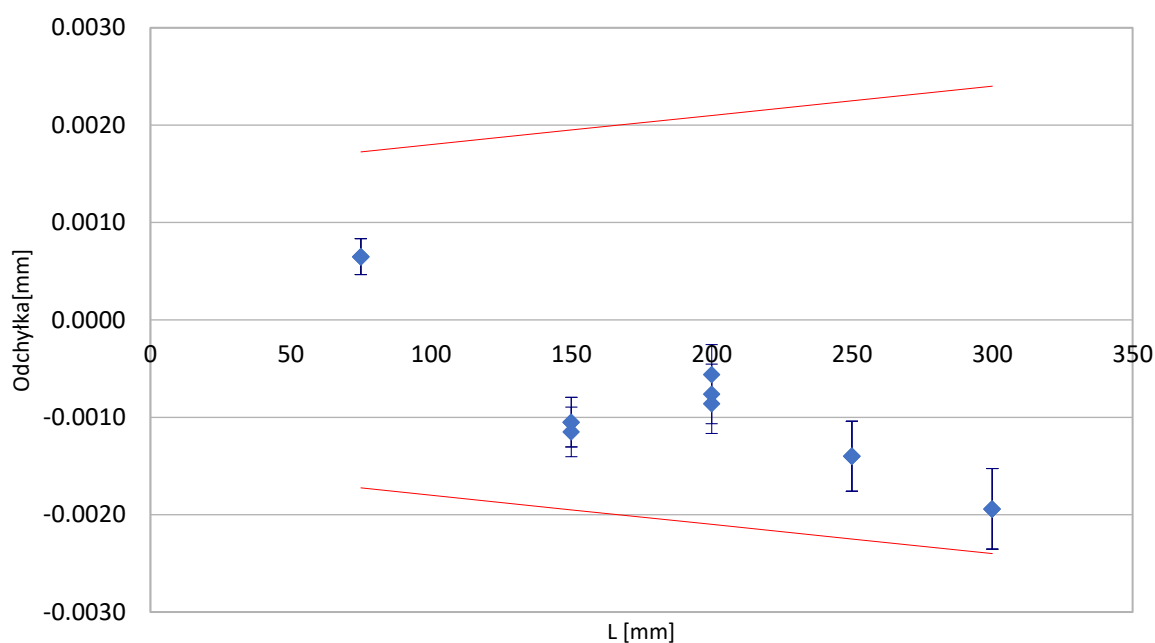
Rysunek 9.4. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w osi X



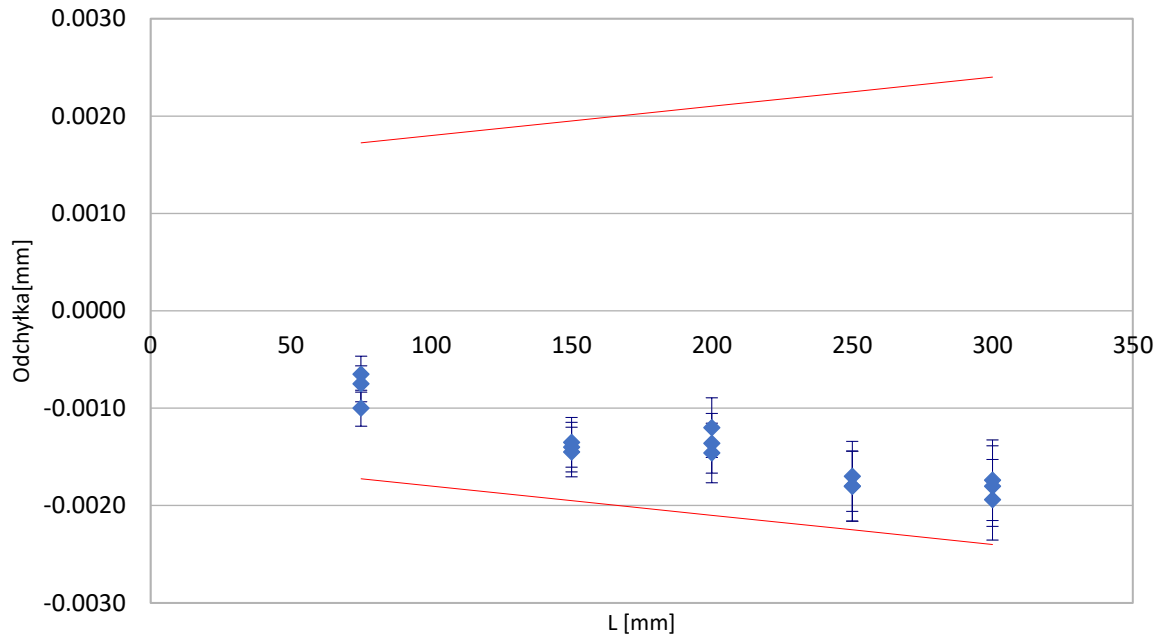
Rysunek 9.5. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w osi Y

Tabela 9.4. Wartości błędów pomiaru długości systemu stykowego w przekątnej D1 i D2

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
D1	75,0001	0,6	0,6	0,6	0,0	1,7	0,2
	150,0006	-1,0	-1,0	-1,1	0,1	2,0	0,3
	200,0008	-0,9	-0,8	-0,6	0,3	2,1	0,3
	249,9998	-1,4	-1,4	-1,4	0,0	2,2	0,4
	300,0009	-1,9	-1,9	-1,9	0,0	2,4	0,4
D2	75,0001	-0,7	-0,7	-1,0	0,2	1,7	0,2
	150,0006	-1,4	-1,5	-1,4	0,1	2,0	0,3
	200,0008	-1,5	-1,4	-1,2	0,2	2,1	0,3
	249,9998	-1,7	-1,8	-1,8	0,1	2,2	0,4
	300,0009	-1,7	-1,9	-1,8	0,2	2,4	0,4



Rysunek 9.6. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w przekątnej D1



Rysunek 9.7. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w przekątnej D2

Uzyskane wyniki wzorcowania mieszczą się wraz z wartością niepewności w równaniu dokładności zdefiniowanym przez producenta tj.:

$$MPE (E0) = 0,0019 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (17)$$

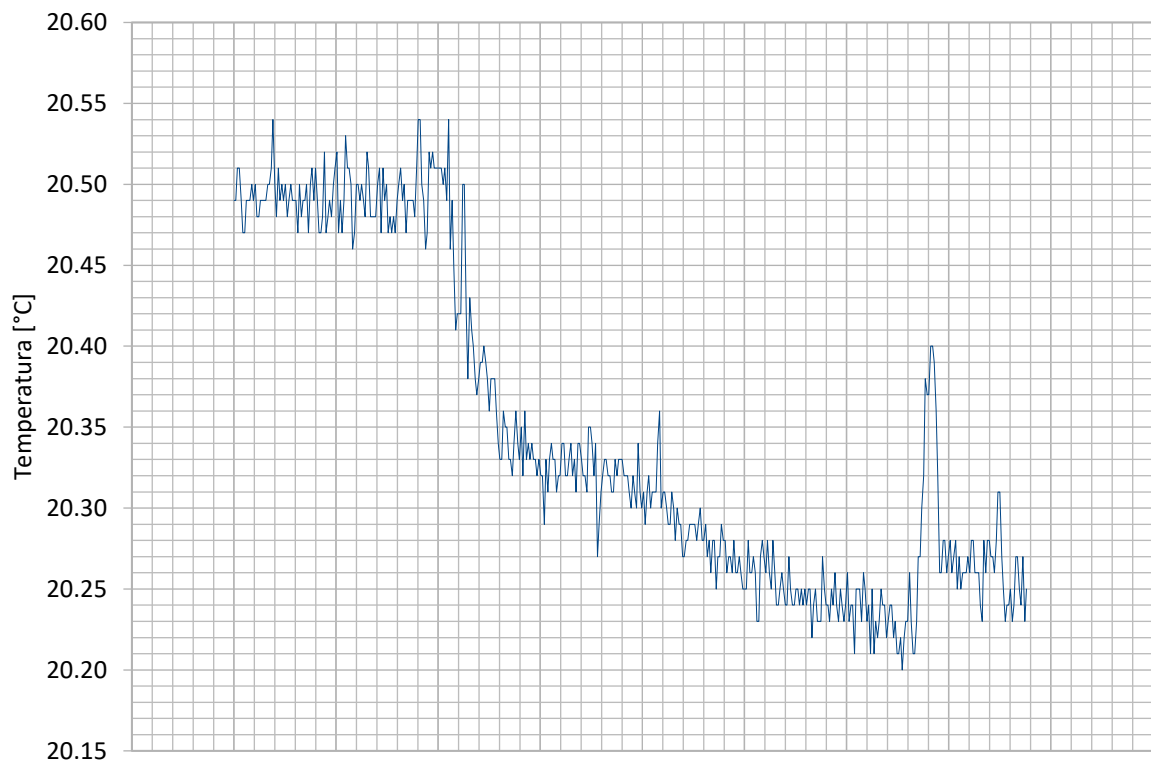
gdzie L jest długością mierzoną wyrażoną w milimetrach.

Biorąc pod uwagę zmierzone wartości błędów P[Size.Sph.1×25:SS:Tact] i P[Form.Sph.1×25:SS:Tact] oraz błędy pomiaru długości E0 możliwe jest zmniejszenie równania maksymalnych dopuszczalnych błędów granicznych do poziomu:

$$MPE (E0) = 0,0015 + 0,003 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (18)$$

dla systemu stykowego.

Podczas wzorcowania monitorowane były warunki środowiskowe. Zakres zmienności temperatury zawierał się w granicach 20,20 °C do 20,55 °C.



Rysunek 9.8. Charakterystyka zmienności temperatury podczas wzorcowania głowicy stykowej VAST XXT

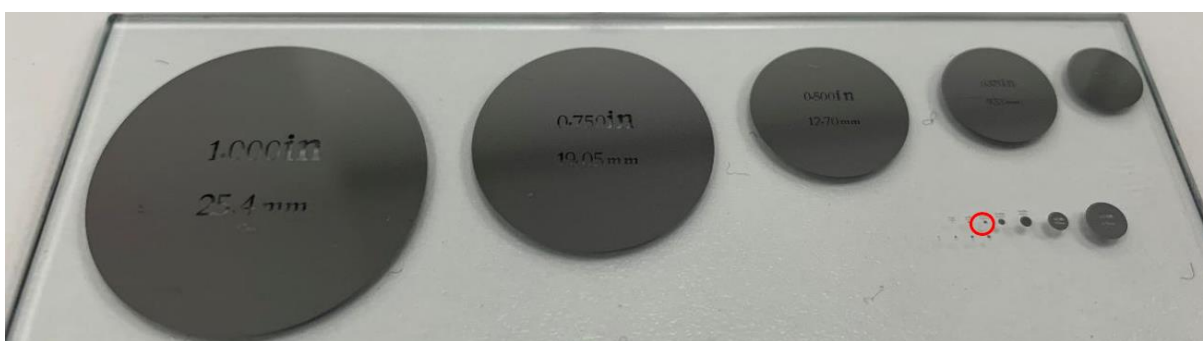
9.2. Wyznaczenie błędów systemów optycznych

9.2.1. Wyznaczenie błędów głowicy optycznej Discovery.V12

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego systemu wizyjnego PFV2D

Błąd ten wyznaczany jest dla maksymalnego powiększenia obiektywu, tak aby wszystkie mierzone punkty znajdowały się w efektywnym polu widzenia obiektywu bez ruchu współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Na materialnym wzorcu średnicy wyznaczane są równomiernie rozłożone punkty pomiarowe. Średnica zmierzona wyznaczana jest metodą najmniejszych kwadratów (metoda Gaussa). Położenie wzorca musi być równoległe do płaszczyzny ogniskowej głowicy mierzącej.

Jako wzorzec wykorzystano szklaną płytkę z okręgami przeznaczoną do pomiarów optycznych. Dla maksymalnego powiększenia obiektywu 63-krotnego do wyznaczenia błędu PFV2D wybrano okrąg o średnicy nominalnej 0,254 mm. Błąd kształt okręgu został wyznaczony na podstawie 250 punktów równomiernie rozłożonych na krawędzi pomiarowej.



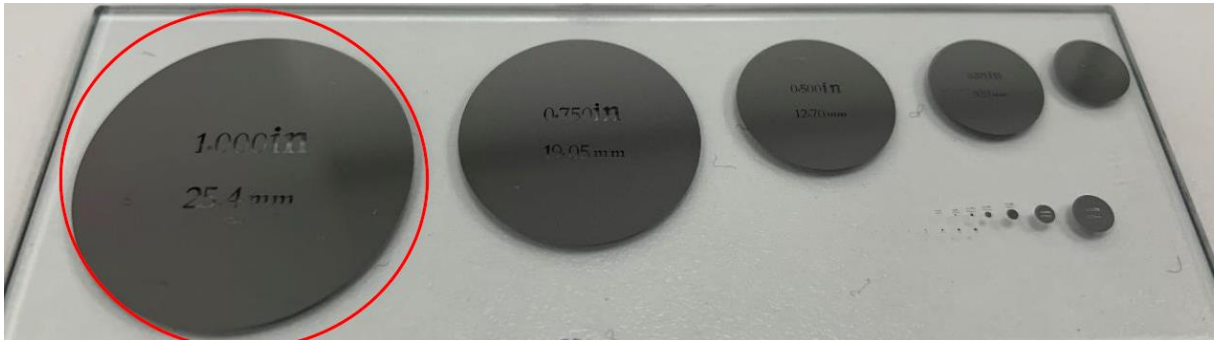
Rysunek 9.9. Okrąg odniesienia o średnicy 0,254 mm

Tabela 9.5. Wartości błędu granicznego dopuszczalnego systemu wizyjnego PFV2D

MPE (PFV2D) [μm]	PFV2D [μm]	U [μm]
1,9	0,1	0,8

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego PF2D

Błąd ten wyznaczany jest podobnie jak w przypadku błędu granicznego systemu wizyjnego, w tym wypadku podczas pomiaru uwzględniany jest ruch maszyny podczas akwizycji punktów pomiarowych. Do wyznaczenia błędu PF2D wybrano okrąg o średnicy nominalnej 25,4 mm. Błąd kształtu okręgu został wyznaczony na podstawie 250 punktów równomiernie rozłożonych na krawędzi pomiarowej.



Rysunek 9.10. Okrąg odniesienia o średnicy 25,4 mm

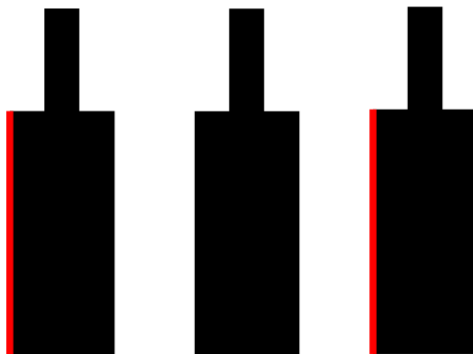
Tabela 9.6. Wartości błędu granicznego PF2D

MPE (PF2D) [μm]	PF2D [μm]	U [μm]
1,9	0,8	0,8

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości systemu wizyjnego EUVXY

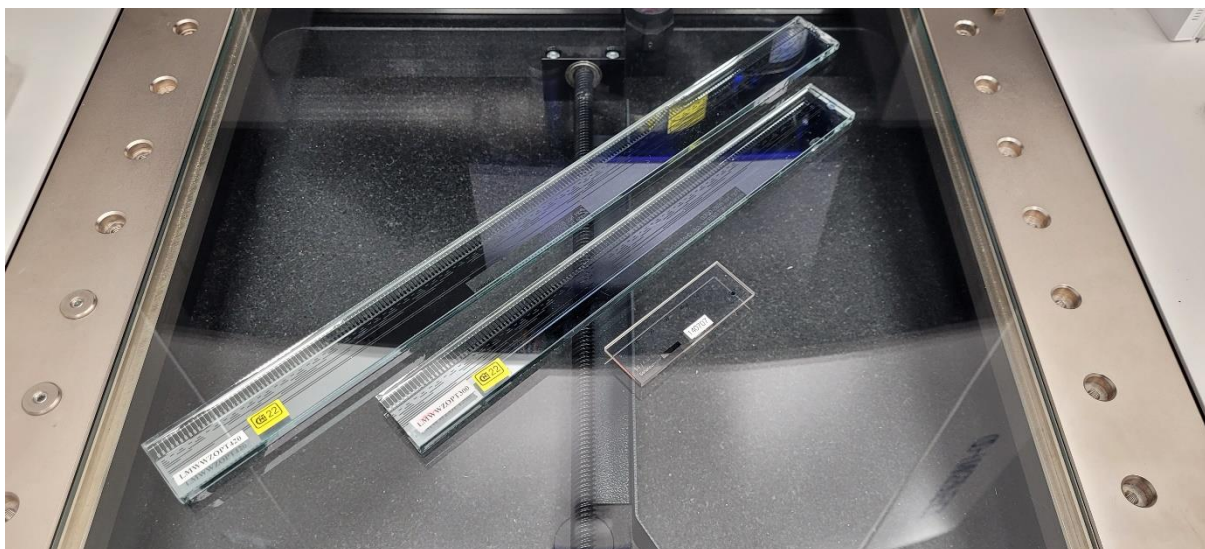
Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości systemu wizyjnego EUVXY polega na wykonaniu pomiaru pięciu długości w trzech seriach pomiarowych na wzorcu krańcowym. Istotne jest, aby mierzone wartości były równomiernie rozłożone na wzorcu.

W tym wypadku zastosowano wzorec jednokierunkowy. Oznacza to, że odległości pomiędzy poszczególnymi kresami wyznaczone były z tej samej strony.



Rysunek 9.11. Graficzne przedstawienie wzorca jednokierunkowego

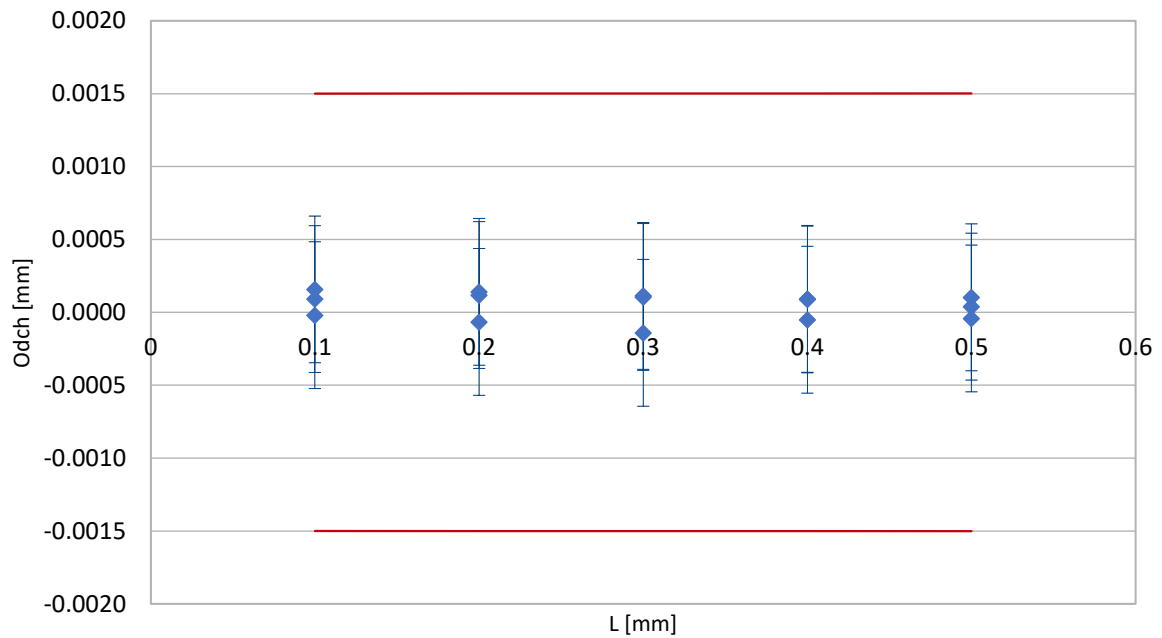
Pomiar odbywał się bez ruchu maszyny. Badania zostały wykonane zgodnie z osią X oraz Y maszyny, a także w dwóch przekątnych w przestrzeni XY. Pomiar zrealizowano na optycznym wzorcu długości o nr seryjnym 140707.



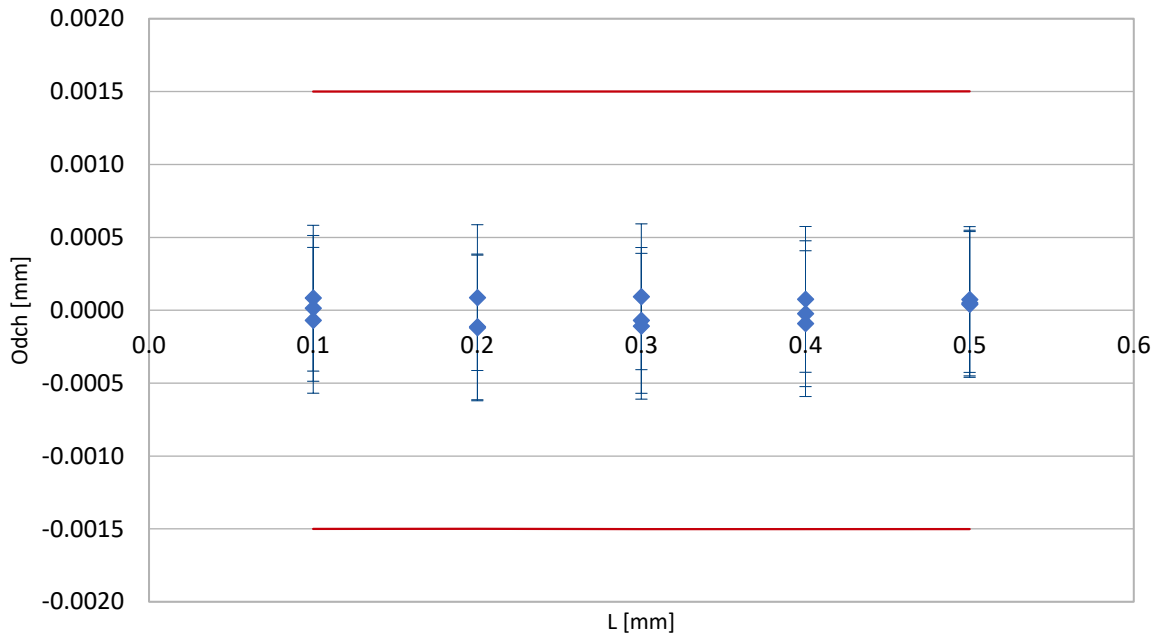
Rysunek 9.12. Wzorce optyczne krańcowe użyte do wzorcowania

Tabela 9.7. Wartości błędów pomiaru długości systemu wizyjnego EUVXY w osi X i Y

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
XV	0,1000	0,2	0,0	0,1	0,2	1,5	0,5
	0,2000	0,1	-0,1	0,1	0,2	1,5	0,5
	0,3000	0,1	-0,1	0,1	0,3	1,5	0,5
	0,4000	0,1	-0,1	0,1	0,1	1,5	0,5
	0,5000	0,0	0,0	0,1	0,1	1,5	0,5
YV	0,1000	-0,1	0,1	0,0	0,2	1,5	0,5
	0,2000	-0,1	0,1	-0,1	0,2	1,5	0,5
	0,3000	-0,1	0,1	-0,1	0,2	1,5	0,5
	0,4000	0,0	0,1	-0,1	0,2	1,5	0,5
	0,5000	0,0	0,1	0,0	0,0	1,5	0,5



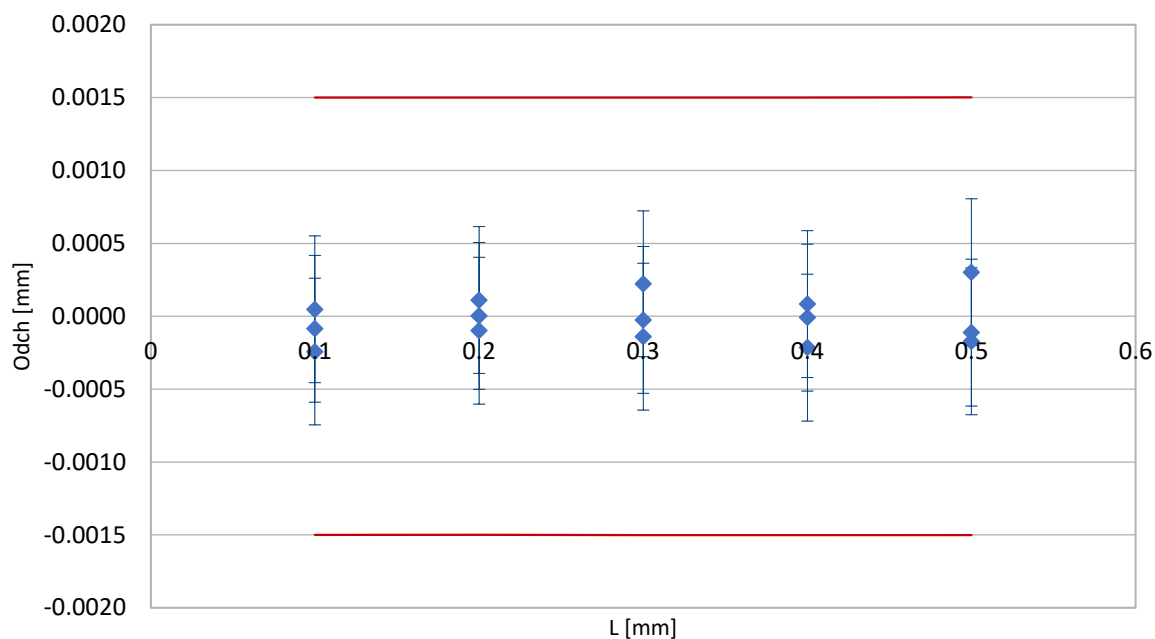
Rysunek 9.13. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w osi X



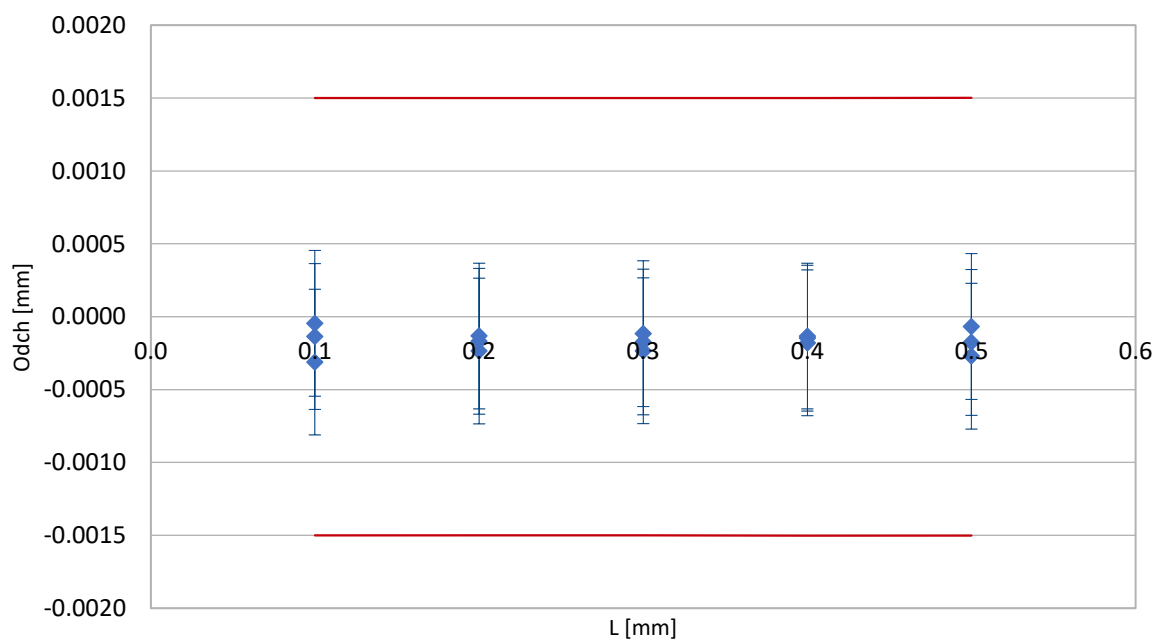
Rysunek 9.14. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w osi Y

Tabela 9.8. Wartości błędów pomiaru długości systemu wizyjnego EUVXY w przekątnej XY1 i XY2

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
XYV1	0,1000	-0,1	-0,2	0,0	0,3	1,5	0,5
	0,2000	0,1	-0,1	0,0	0,2	1,5	0,5
	0,3000	-0,1	0,0	0,2	0,4	1,5	0,5
	0,4000	0,1	-0,2	0,0	0,3	1,5	0,5
	0,5000	-0,2	-0,1	0,3	0,5	1,5	0,5
XYV2	0,1000	-0,1	-0,3	0,0	0,3	1,5	0,5
	0,2000	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	1,5	0,5
	0,3000	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	1,5	0,5
	0,4000	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	1,5	0,5
	0,5000	-0,2	-0,3	-0,1	0,2	1,5	0,5



Rysunek 9.15. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w przekątnej XY1



Rysunek 9.16. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w przekątnej XY2

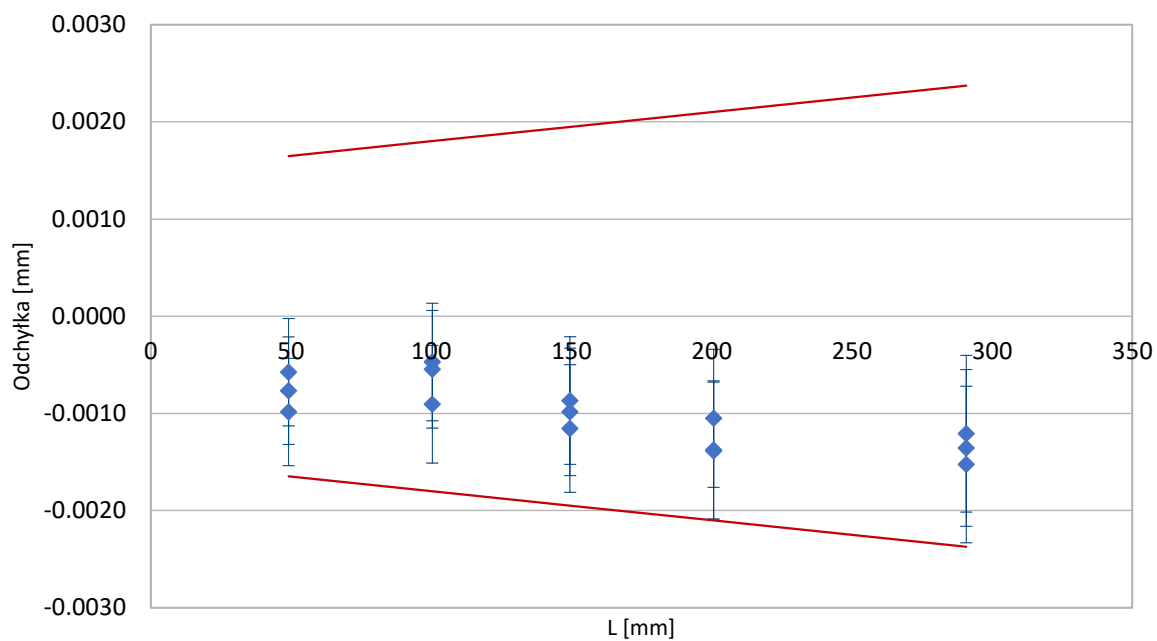
Jak widać na wykresach z rys. wszystkie mierzone wartości mieszczą się wraz z niepewnością pomiaru w zdefiniowanym przez producenta równaniu MPE dla głowicy optycznej. W przypadku systemu wizyjnego możliwe jest zmniejszenie równania błędów granicznych dopuszczalnych długości.

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości EUXY

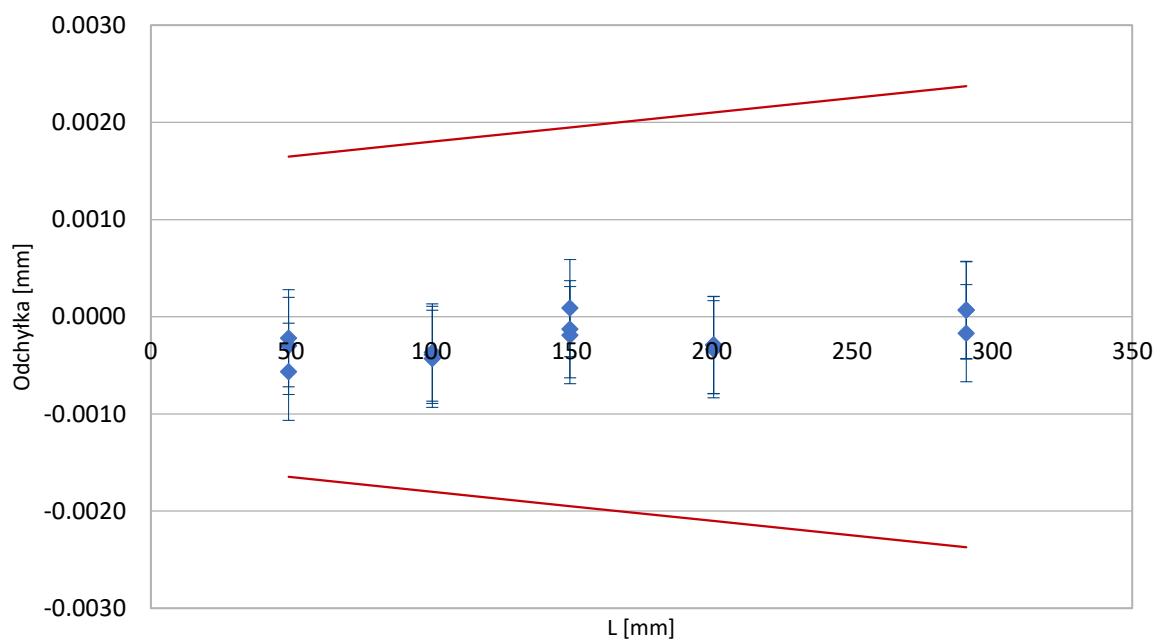
Błąd ten wyznaczany jest podobnie jak w przypadku błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości systemu wizyjnego, w tym wypadku podczas pomiaru uwzględniany jest ruch maszyny podczas akwizycji punktów pomiarowych. Zgodnie z normą konieczne jest, aby zbadać minimum 66% weryfikowanego zakresu pomiarowego. Zakres pomiarowy w osi X i Y wynosi 400 mm, a zatem największa mierzona długość musi mieć przynajmniej 264 mm. Natomiast dla przekątnych minimalna wartość to 373,35 mm. Pomiary zrealizowano na optycznych wzorcach długości o nr seryjnych LMWWZOPT300 i LMWWZOPT420.

Tabela 9.9. Wartości błędów pomiaru długości EUXY w osi X i Y

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
X	49,1524	-0,8	-1,0	-0,6	0,4	1,6	0,6
	100,3524	-0,5	-0,9	-0,5	0,4	1,8	0,6
	149,5044	-0,9	-1,2	-1,0	0,3	1,9	0,7
	200,7042	-1,1	-1,4	-1,4	0,3	2,1	0,7
	290,8172	-1,4	-1,2	-1,5	0,3	2,4	0,8
Y	49,1524	-0,6	-0,2	-0,3	0,3	1,6	0,6
	100,3524	-0,4	-0,4	-0,4	0,1	1,8	0,6
	149,5044	-0,1	0,1	-0,2	0,3	1,9	0,7
	200,7042	-0,3	-0,3	-0,3	0,0	2,1	0,7
	290,8172	-0,2	0,1	0,1	0,2	2,4	0,8



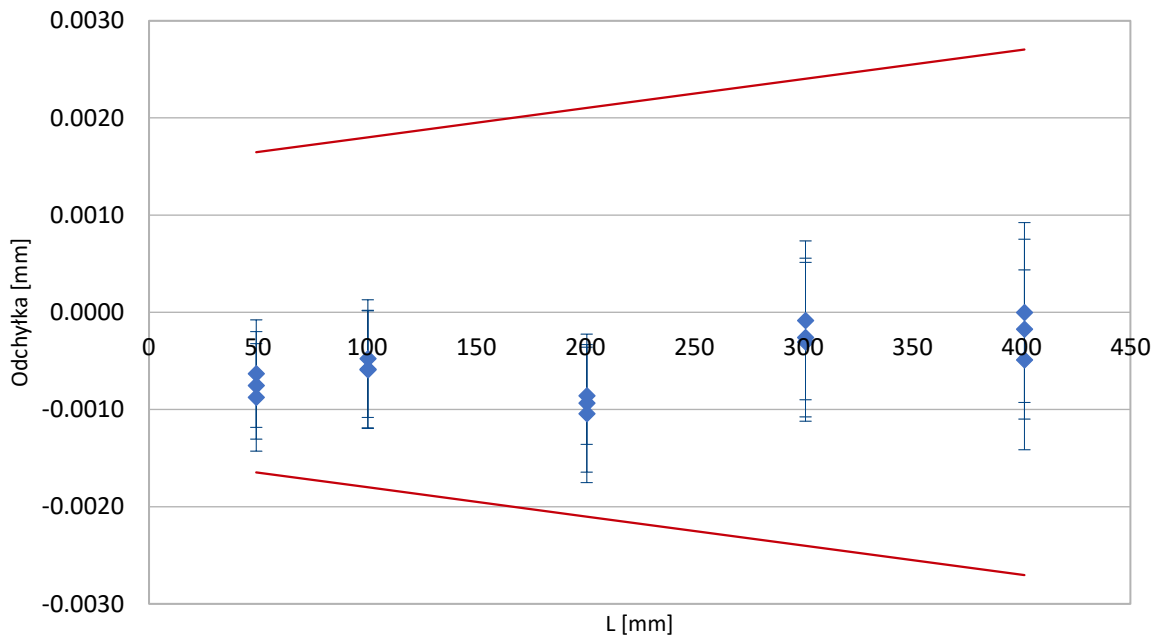
Rysunek 9.17. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w osi X



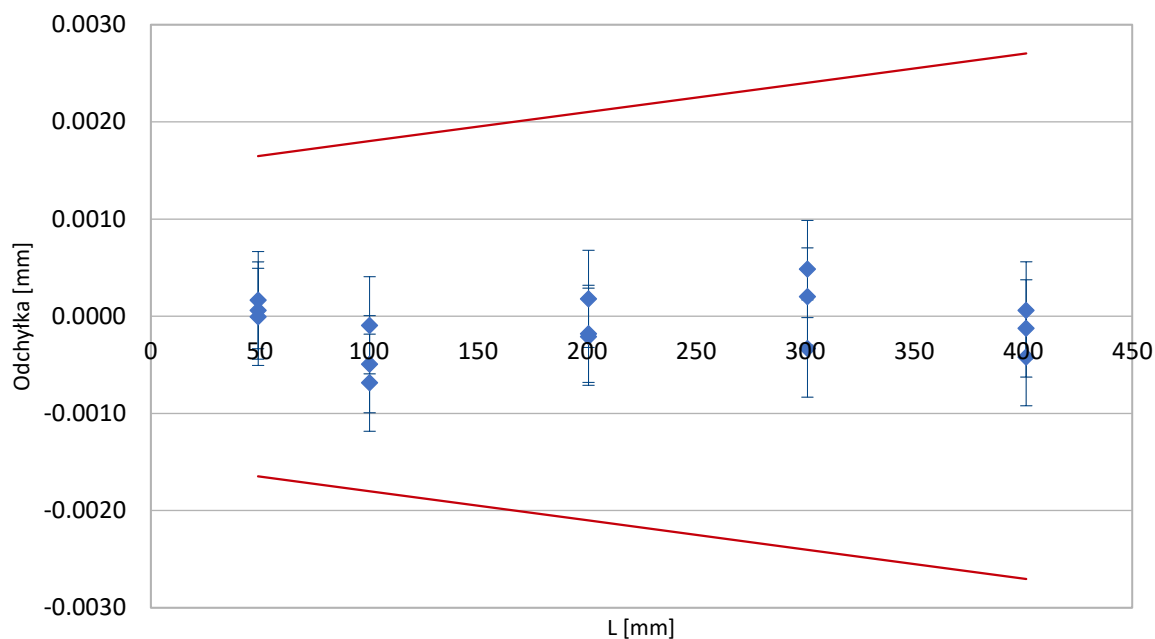
Rysunek 9.18. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w osi Y

Tabela 9.10. Wartości błędów pomiaru długości EUXY w przekątnej XY1 i XY2

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
XY1	49,1533	-0,6	-0,9	-0,8	0,2	1,6	0,6
	100,3529	-0,5	-0,6	-0,6	0,1	1,8	0,6
	200,7047	-0,9	-1,0	-0,9	0,2	2,1	0,7
	301,0587	-0,3	-0,3	-0,1	0,2	2,4	0,8
	401,4111	-0,5	-0,2	0,0	0,5	2,7	0,9
XY2	49,1533	0,2	0,1	0,0	0,2	1,6	0,6
	100,3529	-0,1	-0,7	-0,5	0,6	1,8	0,6
	200,7047	0,2	-0,2	-0,2	0,4	2,1	0,7
	301,0587	0,5	-0,3	0,2	0,8	2,4	0,8
	401,4111	0,1	-0,4	-0,1	0,5	2,7	0,9



Rysunek 9.19. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w przekątnej XY1



Rysunek 9.20. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w przekątnej XY2

Uzyskane wyniki wzorcowania mieszczą się wraz z wartością niepewności w równaniu dokładności zdefiniowanym przez producenta tj.

$$MPE (EUXY) = 0,0019 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (19)$$

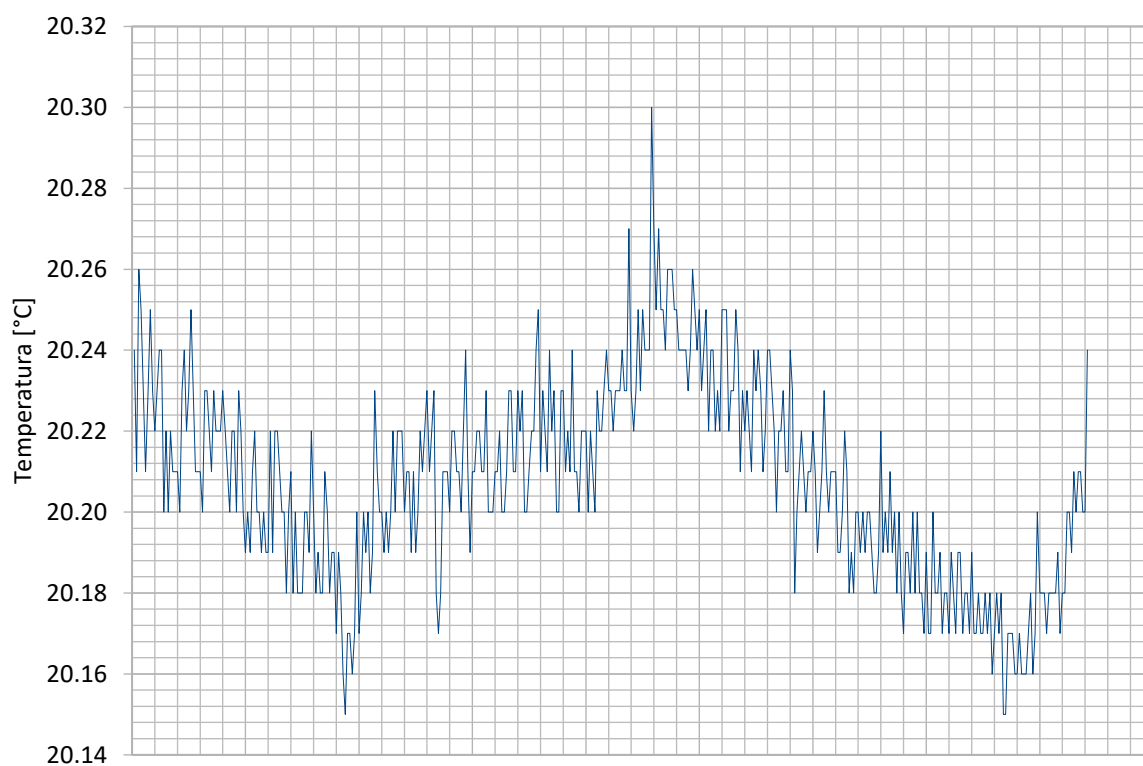
gdzie L jest długością mierzoną wyrażoną w milimetrach.

Biorąc pod uwagę zmierzone wartości błędu PF2D oraz błędu pomiaru długości EUXY, a także błędy systemu wizyjnego możliwe jest zmniejszenie równania maksymalnych dopuszczalnych błędów granicznych do poziomu:

$$MPE (EUXY) = 0,0015 + 0,003 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (20)$$

dla systemu wizyjnego.

Podczas wzorcowania monitorowane były warunki środowiskowe. Zakres zmienności temperatury zawierał się w granicach 20,15 °C do 20,30 °C.

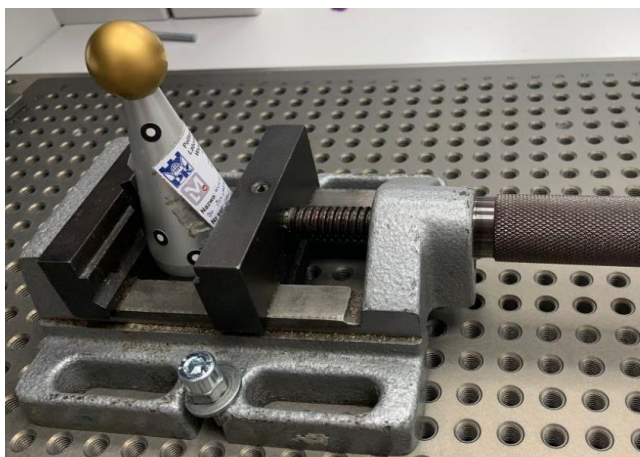


Rysunek 9.21. Charakterystyka zmienności temperatury podczas wzorcowania głowicy optycznej Discovery.V12

9.2.2. Wyznaczenie błędów interferometru światła białego ZEISS DotScan

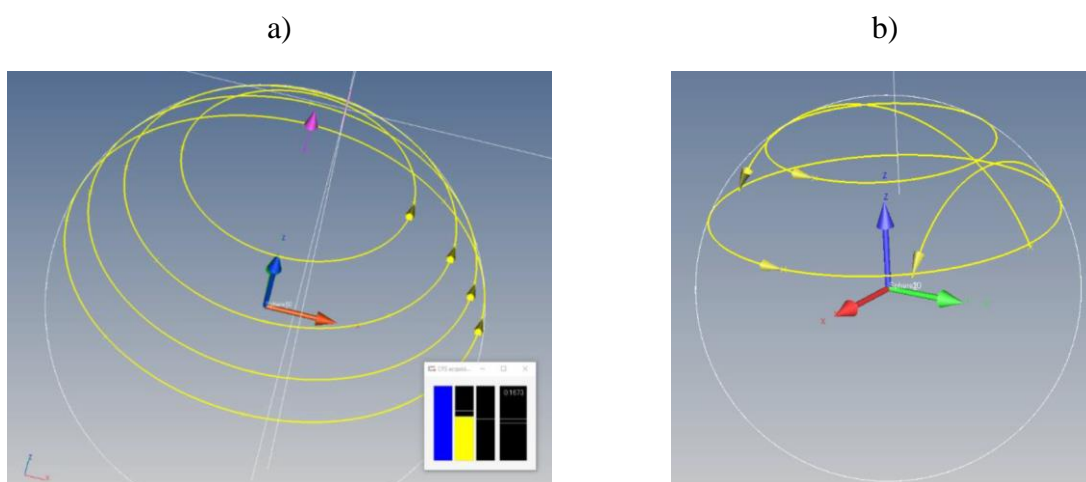
- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego PFX

Pomiary zostały przeprowadzone na kuli referencyjnej o średnicy 25 mm o nr seryjnym LMW_OPT_25 przeznaczony do pomiarów optycznych.



Rysunek 9.22. Kula referencyjna o nr seryjnym LMW_OPT_25 użyta do wzorcowania interferometru światła białego

Ze względu na fakt, iż interferometr światła białego nie jest w stanie zmierzyć punktów prostopadłych do osi Z, a więc tych znajdujących się na równiku konieczne było przesunięcie ścieżki pomiarowej dwa milimetry powyżej równika. Dla dokładniejszego zbadania systemu zastosowano dwie ścieżki pomiarowe rozmieszczone na powierzchni półsfery referencyjnej. Dane zostały zebrane trybie próbkowania pojedynczych punktów.



Rysunek 9.23. Ścieżki rozkładu punktów pomiarowych na powierzchni półsfery referencyjnej
a) rozkład zgodny z normą ISO 10360-5 [1], b) rozkład zgodny z normą ISO 10360-4 [N2]

Tabela 9.11. Wyniki dla rozkładu przedstawionego na rys., charakterystyka a)

MPE (PFX) [μm]	PFX [μm]	U [μm]
5	3,5	0,6

Tabela 9.12. Wyniki dla rozkładu przedstawionego na rys., charakterystyka b)

MPE (PFX) [μm]	PFX [μm]	U [μm]
5	4,4	0,6

- Wyznaczenie błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości E0X

Do wyznaczenia błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości E0X posłużył wzorzec typu ball-bar do pomiarów optycznych o nr seryjnym 20170412. Wzorzec ten składa się z kul o średnicy 15 mm. Podobnie jak w przypadku poprzednich systemów konieczne jest, aby zbadać minimum 66% weryfikowanego zakresu pomiarowego jako pomiar pięciu długości w trzech seriach.

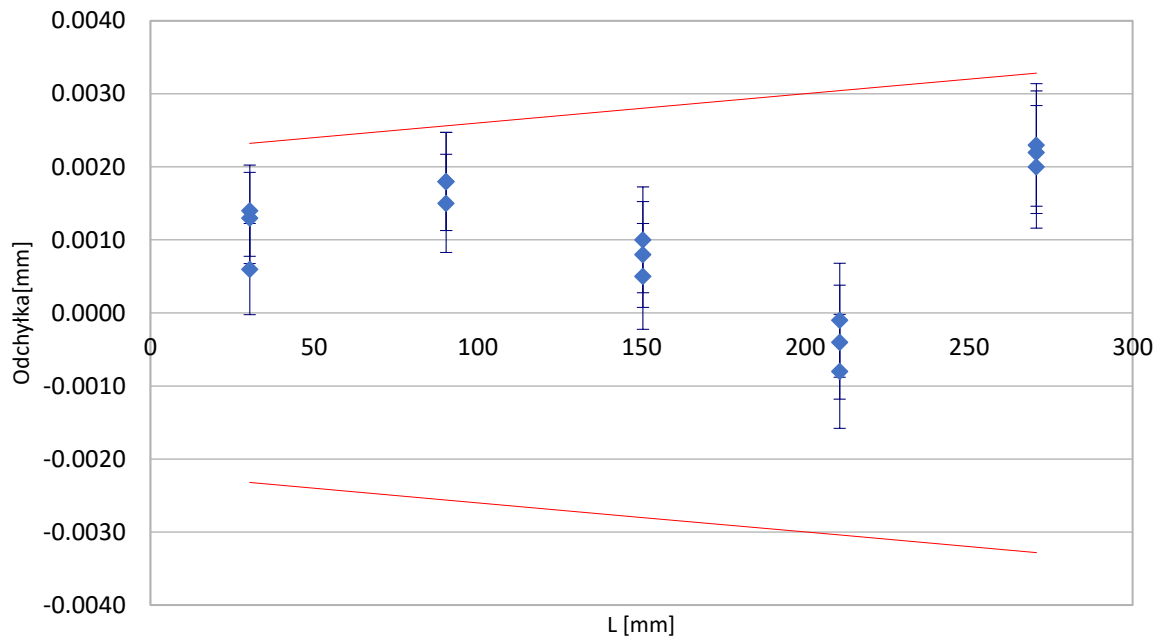


Rysunek 9.24. Wzorzec typu ball-bar wykorzystywany do pomiarów optycznych

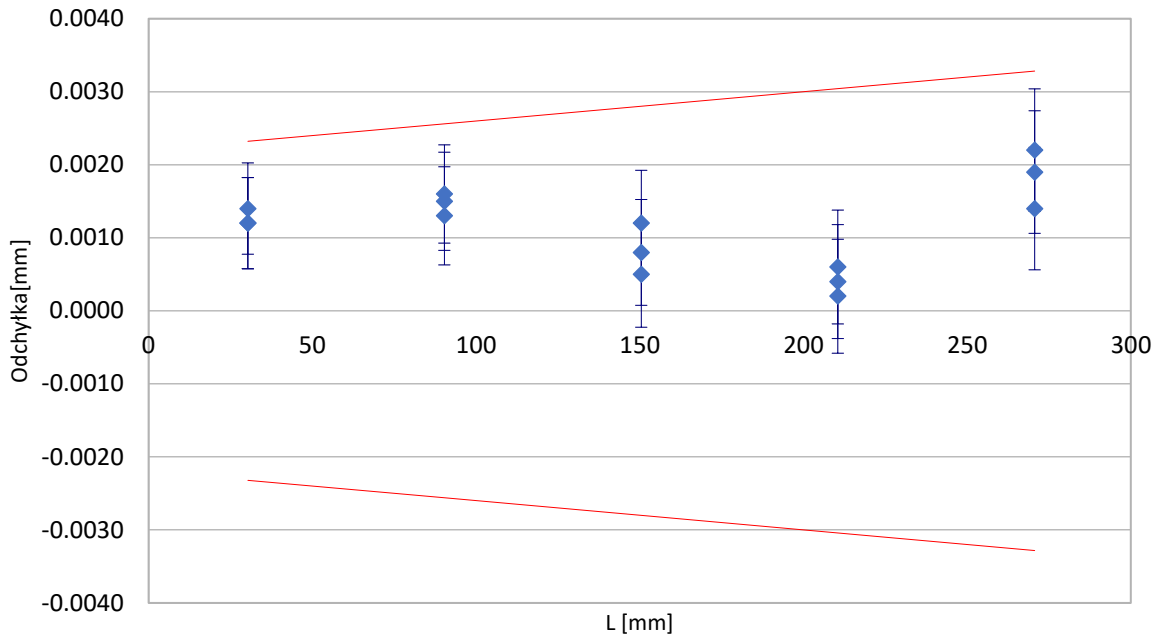
Poszczególne długości zostały wyznaczone pomiędzy kulami, na powierzchni których zebrano po pięć punktów pomiarowych. Wymiary zostały wyznaczone jako odległości 3D pomiędzy wyznaczonymi środkami kul.

Tabela 9.13. Wartości błędów pomiaru długości E0X w osi X i Y

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm			μm	μm	μm
X	30,3290	0,6	1,4	1,3	0,8	2,3	0,6
	90,3143	1,8	1,8	1,5	0,3	2,6	0,7
	150,4547	0,5	0,8	1,0	0,5	2,8	0,7
	210,5341	-0,8	-0,4	-0,1	0,7	3,0	0,8
	270,6421	2,0	2,2	2,3	0,3	3,3	0,8
Y	30,3290	1,4	1,2	1,2	0,2	2,3	0,6
	90,3143	1,6	1,5	1,3	0,3	2,6	0,7
	150,4547	0,5	1,2	0,8	0,7	2,8	0,7
	210,5341	0,4	0,6	0,2	0,4	3,0	0,8
	270,6421	2,2	1,9	1,4	0,8	3,3	0,8



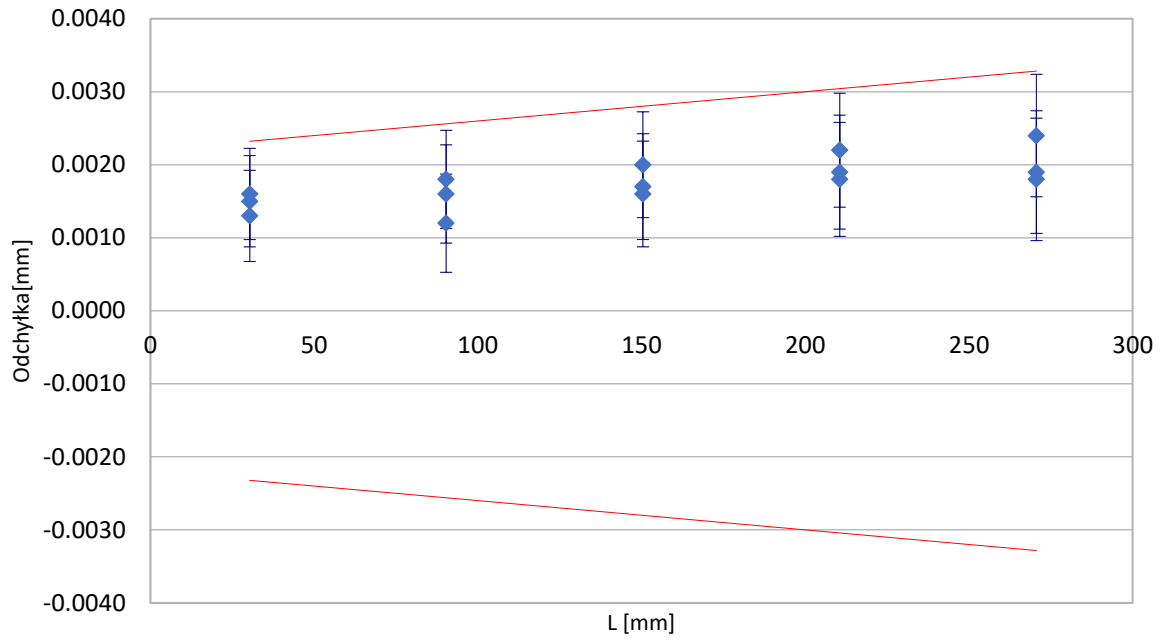
Rysunek 9.25. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w osi X



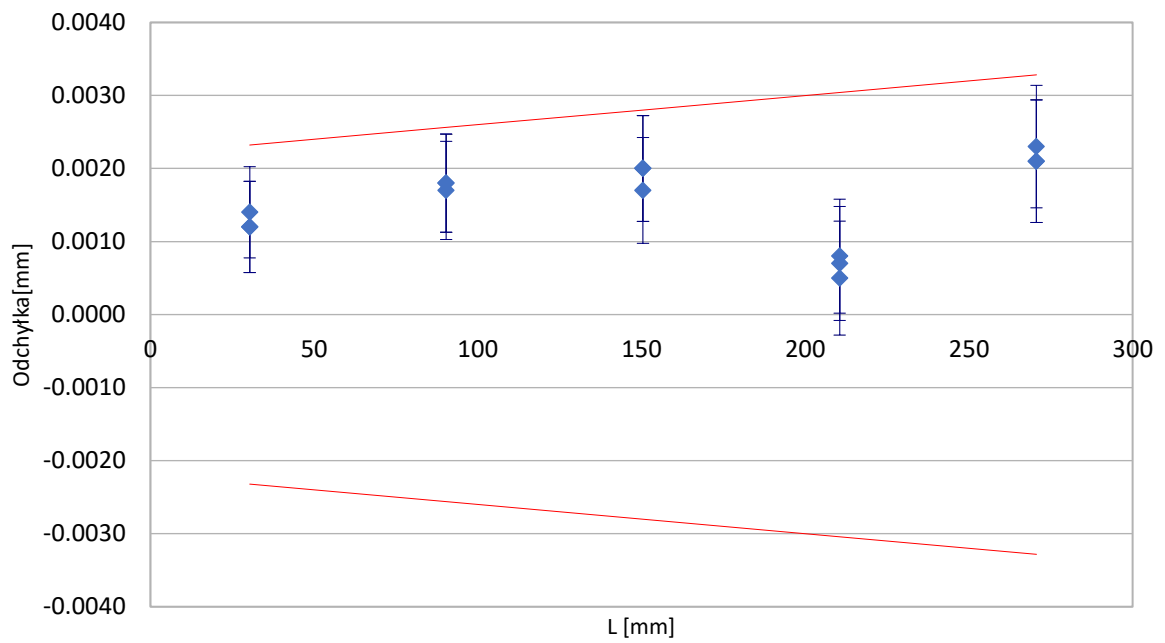
Rysunek 9.26. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w osi Y

Tabela 9.14. Wartości błędów pomiaru długości E0X w przekątnej D1 i D2

Oś	Odniesienie	Błąd			R	MPE	U
	mm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
D1	30,3290	1,6	1,5	1,3	0,3	2,3	0,6
	90,3143	1,8	1,6	1,2	0,6	2,6	0,7
	150,4547	1,7	1,6	2,0	0,4	2,8	0,7
	210,5341	1,8	2,2	1,9	0,4	3,0	0,8
	270,6421	2,4	1,9	1,8	0,6	3,3	0,8
D2	30,3290	1,4	1,2	1,2	0,2	2,3	0,6
	90,3143	1,7	1,8	1,8	0,1	2,6	0,7
	150,4547	2,0	1,7	2,0	0,3	2,8	0,7
	210,5341	0,5	0,7	0,8	0,3	3,0	0,8
	270,6421	2,1	2,3	2,1	0,2	3,3	0,8



Rysunek 9.27. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w przekątnej D1



Rysunek 9.28. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w przekątnej D2

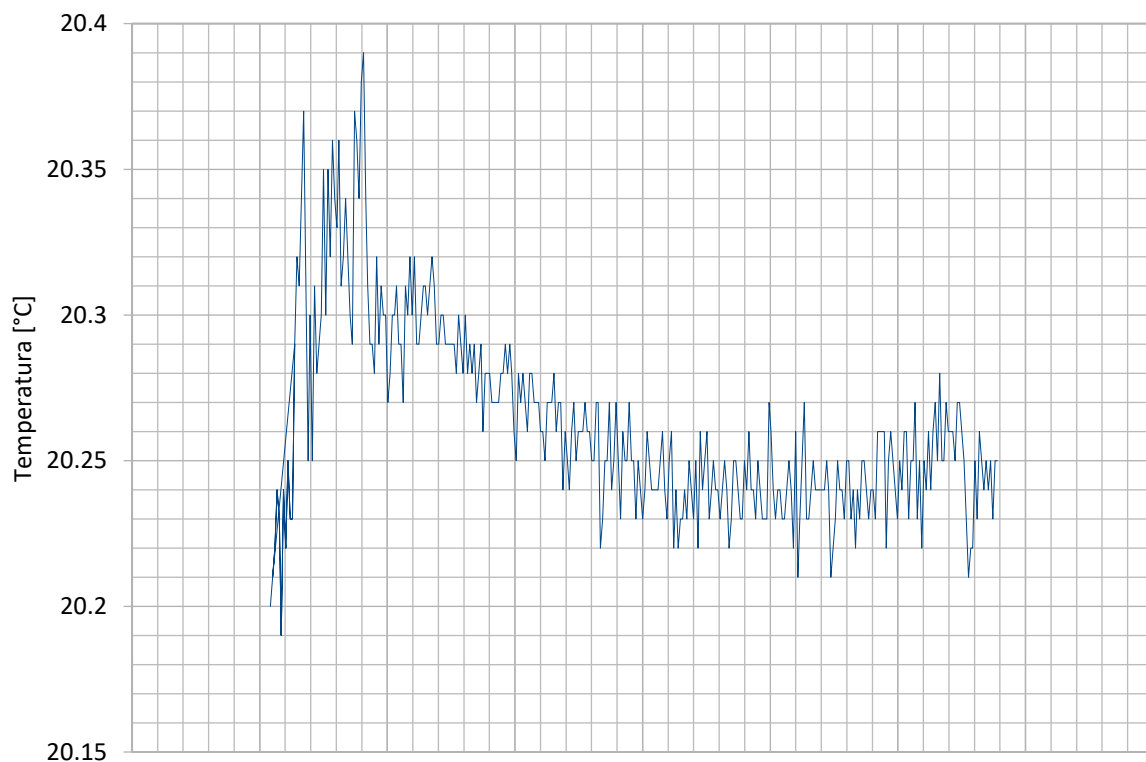
Uzyskane wyniki wzorcowania mieszczą się wraz z wartością niepewności w równaniu dokładności zdefiniowanym przez producenta tj.

$$MPE (E0X) = 0,0022 + 0,004 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (21)$$

gdzie L jest długością mierzoną wyrażoną w milimetrach,

dla interferometru światła białego.

Podczas wzorcowania monitorowane były warunki środowiskowe. Zakres zmienności temperatury zawierał się w granicach 20,19 °C do 20,40 °C.



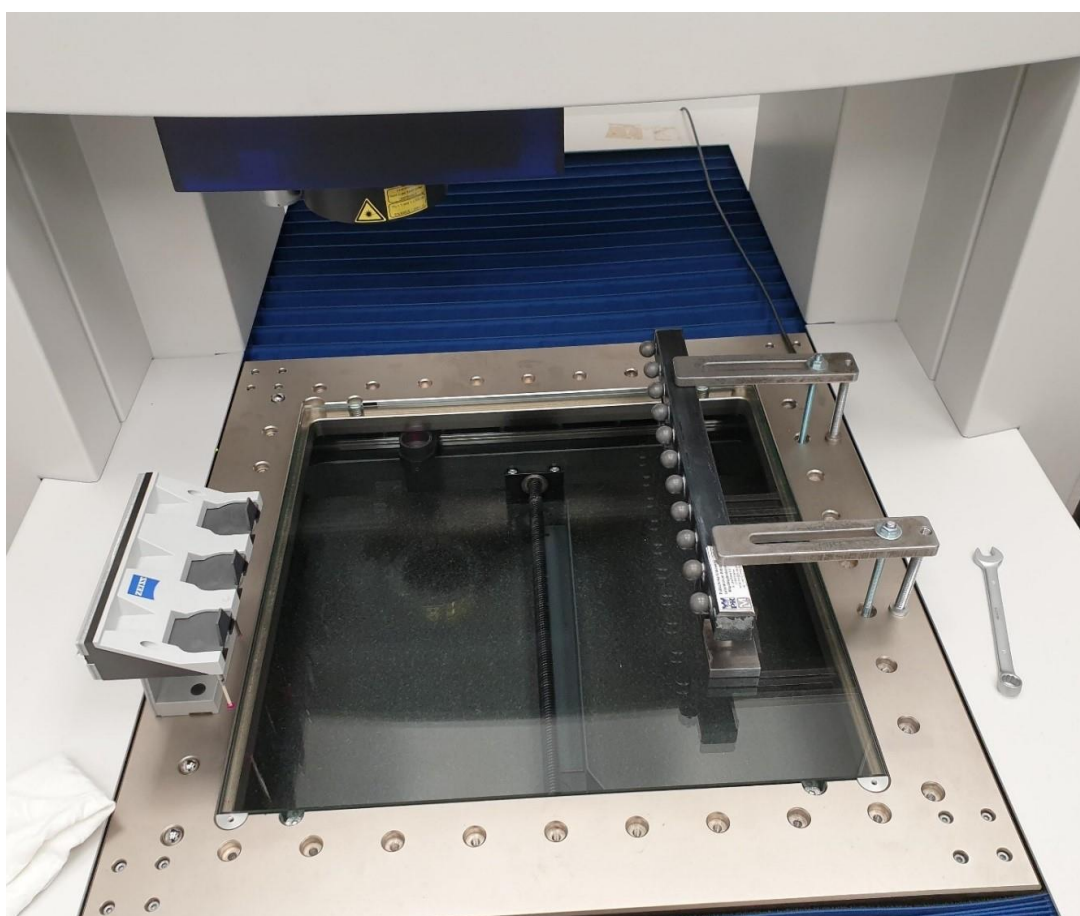
Rysunek 9.29. Charakterystyka zmienności temperatury podczas wzorcowania interferometru światła białego ZEISS DotScan

10. Wyznaczenie błędów dla różnej konfiguracji sensorów maszyny multisensorycznej O-Inspect 442 firmy Zeiss

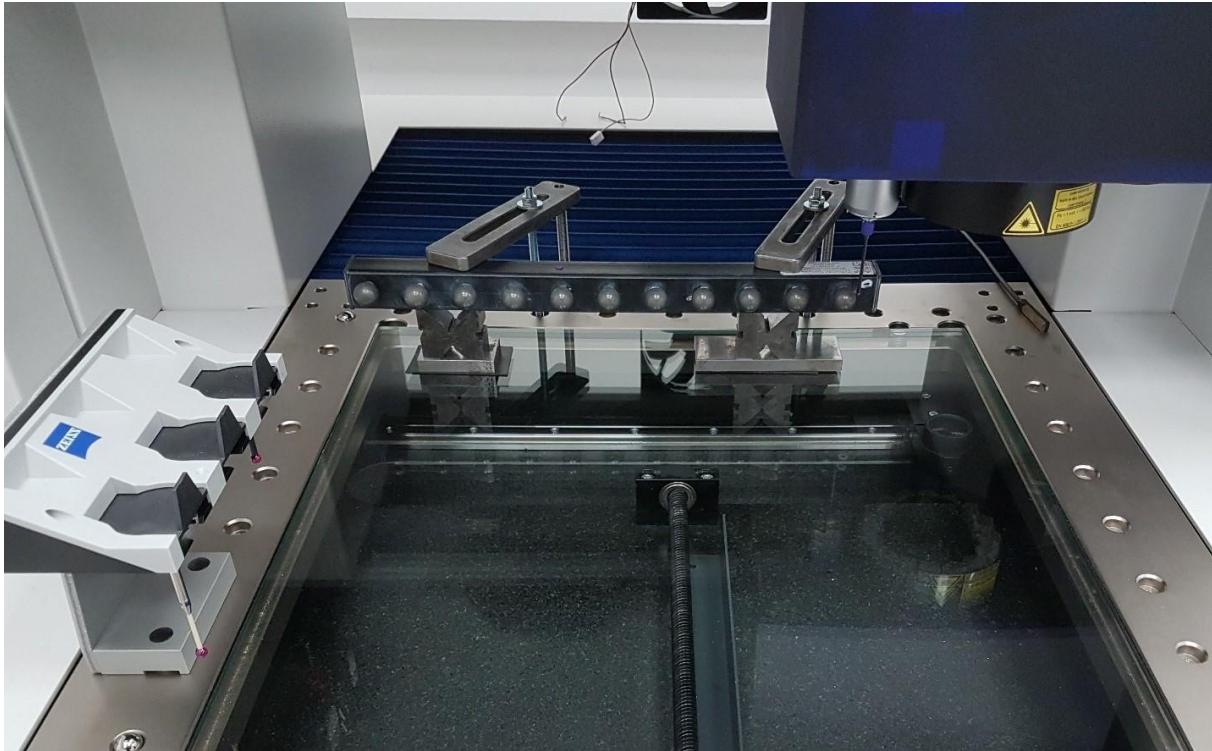
Jedną z zalet maszyn multisensorycznych jest możliwość zmiany wykorzystywanego sensora pomiarowego w zależności od potrzeb i dostępności do konkretnych cech. Ze względu na fakt, że opracowanym systemie niepewność pomiaru szacowana jest na podstawie równań MPE konieczne było określenie równań granicznych dla różnej konfiguracji sensorów.

Do badań wykorzystano wzorec typu ball-bar do pomiarów optycznych będący na wyposażeniu Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej o nr seryjnym 20170412.

Pomiar został przeprowadzony dla długości 30 mm i 180 mm w dwóch ustawieniach równoległe do osi X i Y układu współrzędnych maszyny multisensorycznej. Wymiar maksymalny został ograniczony do długości 180 mm z uwagi na zastosowanie wszystkich trzech systemów pomiarowych co znacząco ogranicza przestrzeń roboczą urządzenia.



Rysunek 10.1. Pierwsza pozycja wzorca



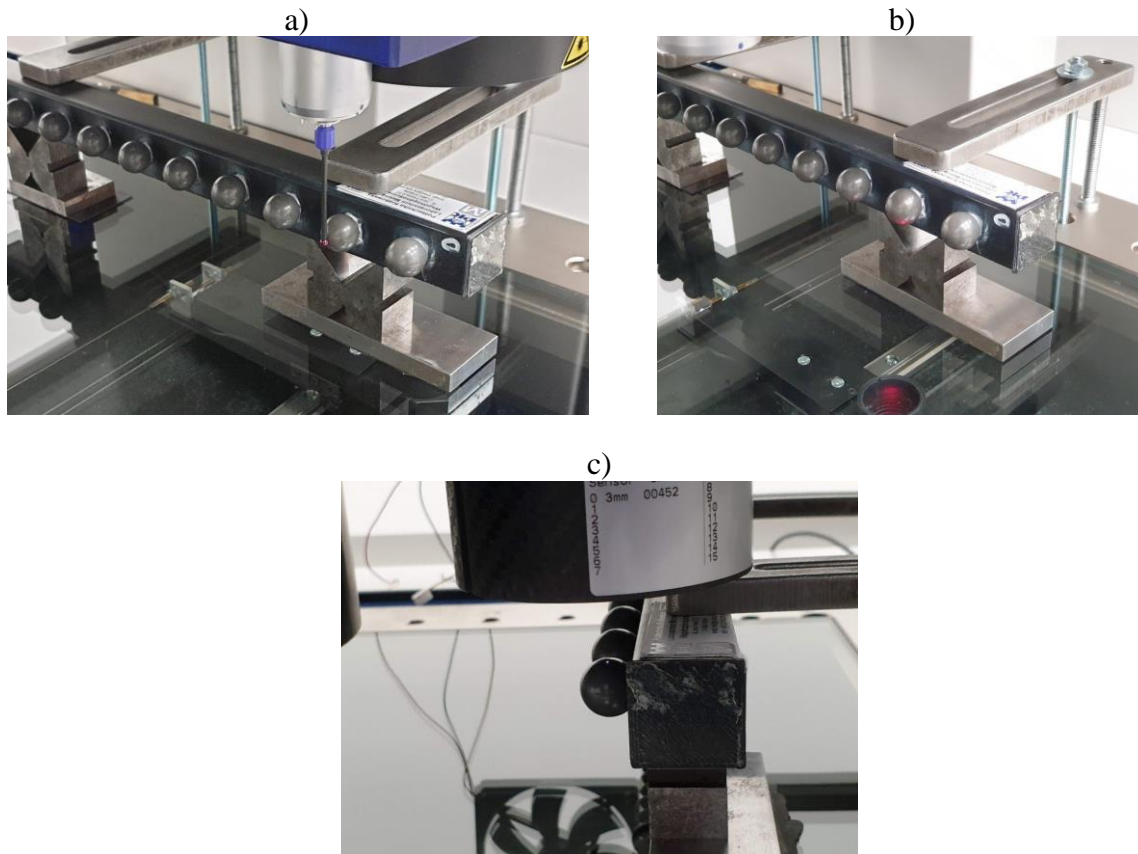
Rysunek 10.2. Druga pozycja wzorca

Strategia podczas badania zakładała pomiar wspomnianych odległości w różnych konfiguracjach dostępnych systemów maszyny multisensorycznej. Dla bardziej przystępnej analizy danych zostały przyjęte następujące oznaczenia:

- S - pomiar systemem stykowym (głowica stykowa VAST XXT),
- O - pomiar systemem optycznym (głowica optyczna Discovery.V12),
- C - pomiar przy użyciu czujnika światła białego (interferometr światła białego ZEISS DotScan).

Konfigurację zrealizowanych pomiarów zawarto w tabeli.

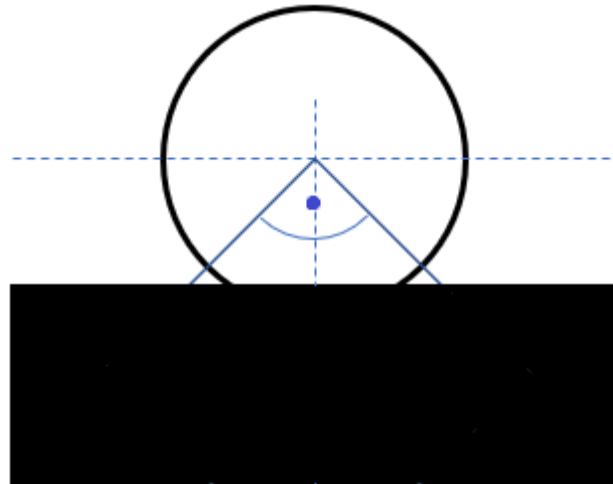
Opis	Sfera 1	Sfera 2
S-O	stykowo	optycznie
O-S	optycznie	stykowo
S-C	stykowo	interferometrem światła białego
C-S	interferometrem światła białego	stykowo
O-C	optycznie	interferometrem światła białego
C-O	interferometrem światła białego	optycznie



Rysunek 10.3. a) pomiar wzorca stykowo, b) pomiar wzorca optycznie, c) pomiar wzorca czujnikiem światła białego

Oś X układu została wyznaczona między środkami sfer pierwszą i szóstą. Obie sfery zostały zmierzone w pięciu punktach, jeden na biegunie oraz cztery na równiku. Natomiast oś Y jako normalna do płaszczyzny na której osadzone są sfery. Płaszczyzna również została zmierzona w pięciu punktach. Początek układu został określony w środku pierwszej sfery. Następnie układ ręczny został powtórzony w trybie automatycznym poprzez wygenerowanie większej liczby punktów dla poszczególnych cech do dwudziestu pięciu punktów dla sfer oraz dziesięciu punktów dla płaszczyzny wraz z nominalnymi kierunkami najazdów na poszczególne punkty pomiarowe.

Z uwagi na zastosowanie różnych systemów podczas pomiaru konieczne było przyjęcie strategii pomiarowych dla każdego z dostępnych rozwiązań. W przypadku pomiarów stykowych rozkład punktów został przyjęty w oparciu o normę PN-EN ISO 10360-5:2020, czyli 25 punktów pomiarowych równomiernie rozmieszczonych na powierzchni półsfery, która została dodatkowo ograniczona ze względu na osadzenie sfer w podstawie.



Rysunek 10.4. Ograniczenie dostępnej półsfery przy pomiarach stykowych

W przypadku pomiarów optycznych zdefiniowano dwieście pięćdziesiąt punktów pomiarowych na dostępnym łuku na równiku, zgodnie z rysunkiem. Zastosowano podświetlenie od dołu stołu maszyny, tzw. backlight.

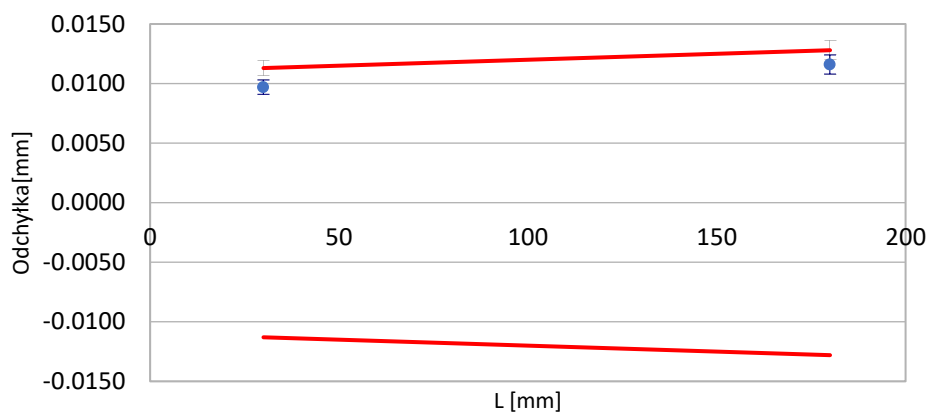
Z uwagi na fakt, że kula nie posiada krawędzi założona próba pomiarowa miała na celu zweryfikowanie z jaką dokładnością możliwe jest wyznaczenie odległości systemem optycznym na wzorcu nie przystosowanym do tego. Automatyczne fokusowanie zostało przeprowadzone w trzech punktach na równiku każdej z mierzonych sfer.

Dla sensora światła białego została przyjęta strategia analogiczna jak dla pomiarów stykowych, czyli dwadzieścia pięć punktów równo rozmieszczonych na powierzchni półsfery.

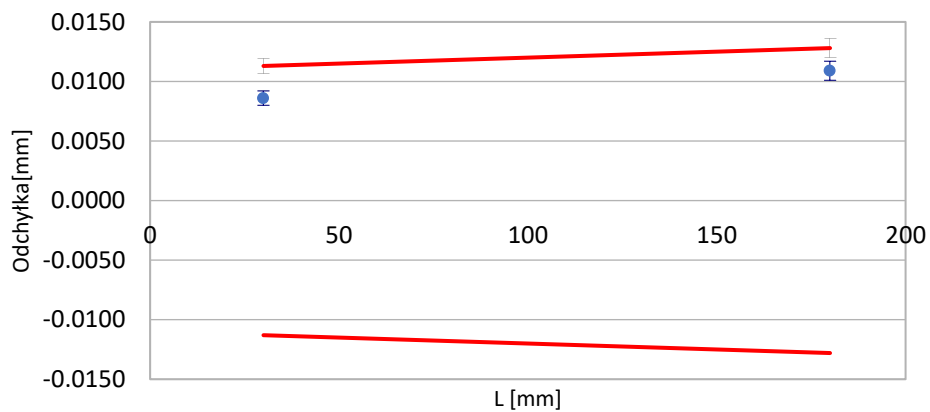
10.1. Głowica stykowa VAST XXT i głowica optyczna Discovery.V12

Tabela 10.1. Wyniki pomiarów stykowo - optycznie

Pozycja X				Pozycja Y			
Odległość	Odchyłka	MPE	U	Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm				mm			
30	0,0097	0,0113	0,0006	30	0,0086	0,0113	0,0006
180	0,0116	0,0128	0,0008	180	0,0109	0,0128	0,0008



Rysunek 10.5. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – optycznie w osi X



Rysunek 10.6. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – optycznie w osi Y

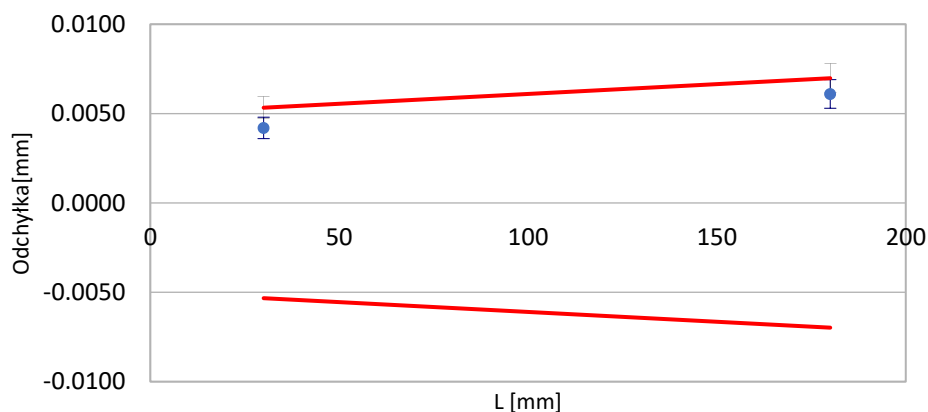
Tabela 10.2. Wyniki pomiarów optycznie - stykowo

Pozycja X

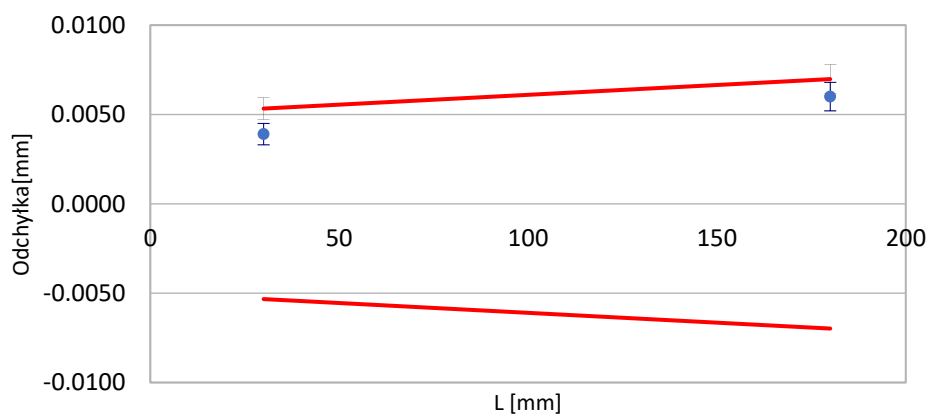
Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm			
30	0,0042	0,0053	0,0006
180	0,0061	0,0070	0,0008

Pozycja Y

Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm			
30	0,0039	0,0053	0,0006
180	0,0060	0,0070	0,0008



Rysunek 10.7. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – stykowo w osi X



Rysunek 10.8. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – stykowo w osi Y

Na podstawie zrealizowanych pomiarów równanie MPE dla pomiarów z użyciem głowicy stykowej i optycznej określono na poziomie:

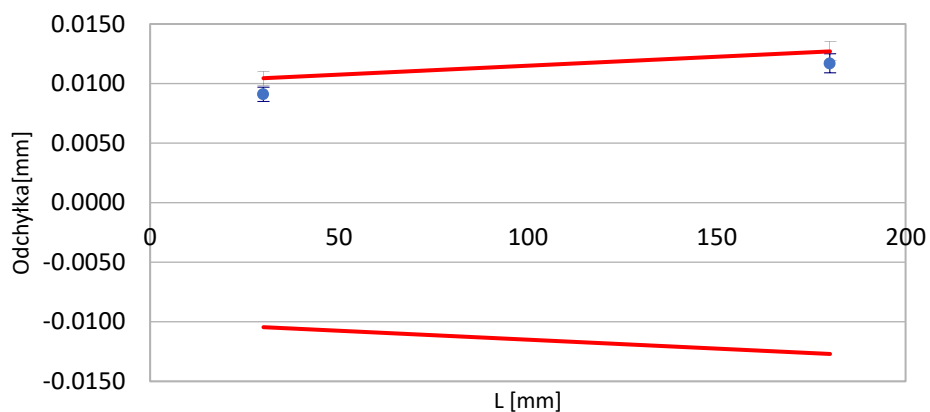
$$MPE(E) = 0,011 + 0,011 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (22)$$

gdzie L jest długością mierzoną wyrażoną w milimetrach.

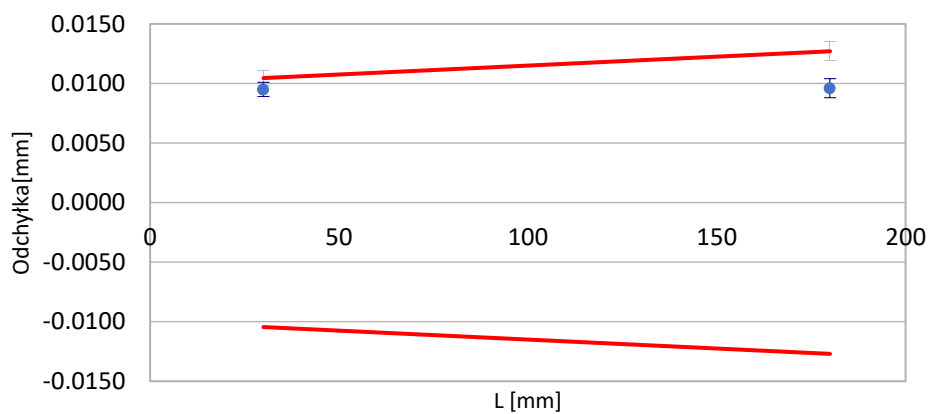
10.2. Głowica stykowa VAST XXT i interferometr światła białego ZEISS DotScan

Tabela 10.3. Wyniki pomiarów stykowo - interferometrem światła białego

Pozycja X				Pozycja Y			
Odległość	Odchyłka	MPE	U	Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm				mm			
30	0,0091	0,0105	0,0006	30	0,0095	0,0105	0,0006
180	0,0117	0,0127	0,0008	180	0,0096	0,0127	0,0008



Rysunek 10.9. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – interferometrem światła białego w osi X



Rysunek 10.10. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – interferometrem światła białego w osi Y

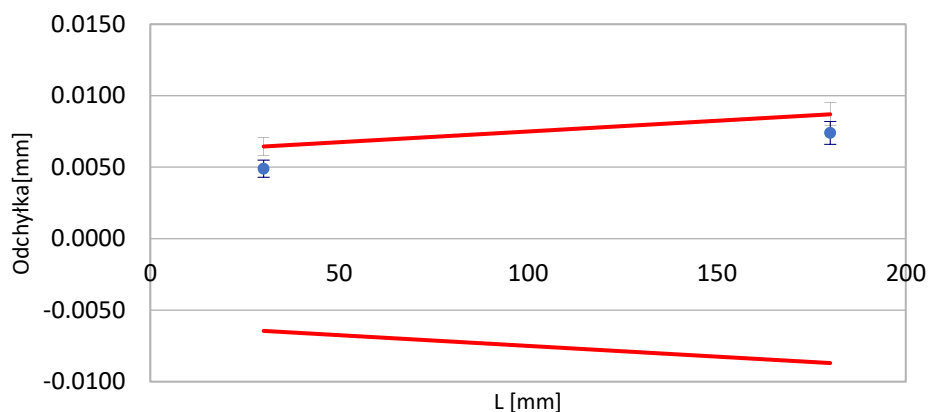
Tabela 10.4. Wyniki pomiarów interferometrem światła białego - stykowo

Pozycja X

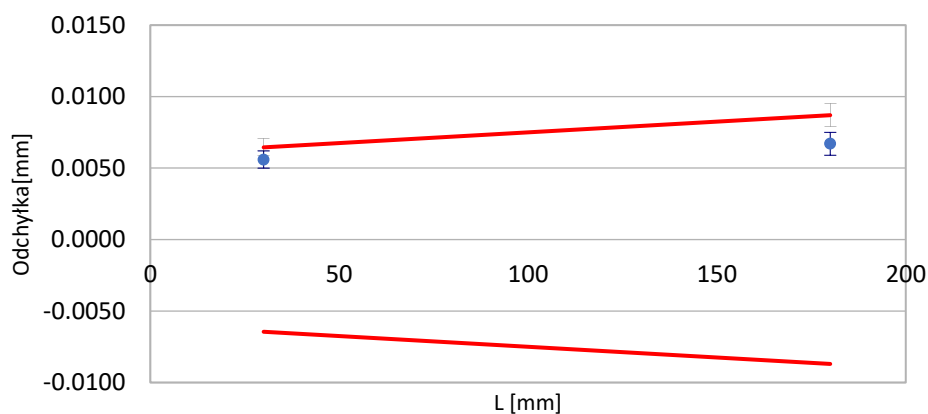
Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm			
30	0,0049	0,0065	0,0006
180	0,0074	0,0087	0,0008

Pozycja Y

Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm			
30	0,0056	0,0065	0,0006
180	0,0067	0,0087	0,0008



Rysunek 10.11. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – stykowo w osi X



Rysunek 10.12. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – stykowo w osi Y

Na podstawie zrealizowanych pomiarów równanie MPE dla pomiarów z użyciem głowicy stykowej i interferometru światła białego określono na poziomie:

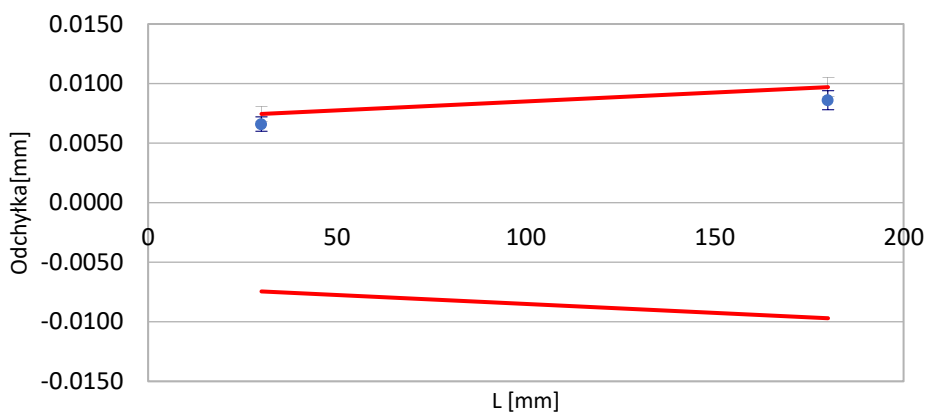
$$MPE(E) = 0,010 + 0,015 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (23)$$

gdzie L jest długością mierzoną wyrażoną w milimetrach.

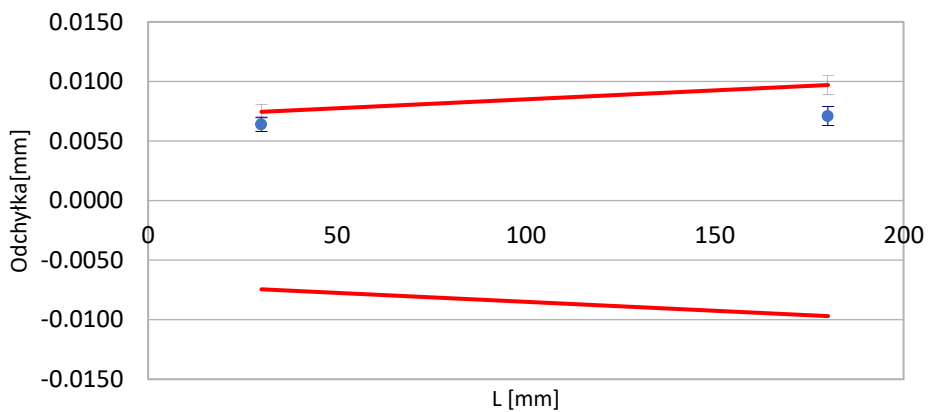
10.3. Głowica optyczna Discovery.V12 i interferometr światła białego ZEISS DotScan

Tabela 10.5. Wyniki pomiarów optycznie – interferometrem światła białego

Pozycja X				Pozycja Y			
Odległość	Odchyłka	MPE	U	Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm				mm			
30	0,0066	0,0075	0,0006	30	0,0064	0,0075	0,0006
180	0,0086	0,0097	0,0008	180	0,0071	0,0097	0,0008



Rysunek 10.13. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – interferometrem światła białego w osi X



Rysunek 10.14. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – interferometrem światła białego w osi Y

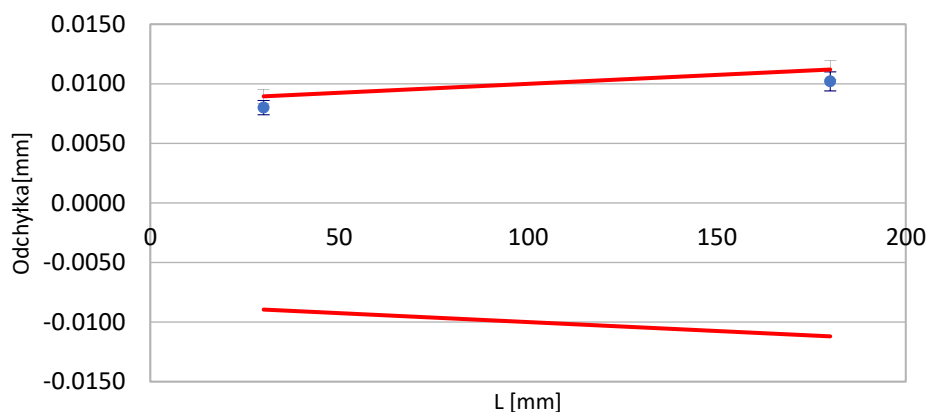
Tabela 10.6. Wyniki pomiarów interferometrem światła białego – optycznie

Pozycja X

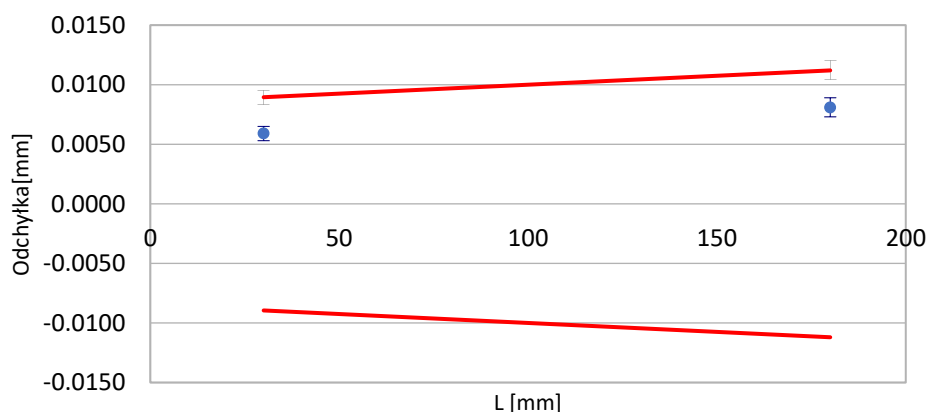
Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm			
30	0,0080	0,0090	0,0006
180	0,0102	0,0112	0,0008

Pozycja Y

Odległość	Odchyłka	MPE	U
mm			
30	0,0059	0,0090	0,0006
180	0,0081	0,0112	0,0008



Rysunek 10.15. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – optycznie w osi X



Rysunek 10.16. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – optycznie w osi Y

Na podstawie zrealizowanych pomiarów równanie MPE dla pomiarów z użyciem głowicy optycznej i interferometru światła białego określono na poziomie:

$$MPE(E) = 0,009 + 0,015 \cdot \frac{L}{1000} \text{ mm}, \quad (24)$$

gdzie L jest długością mierzoną wyrażoną w milimetrach.

11. Algorytm działania aplikacji systemu ekspertowego

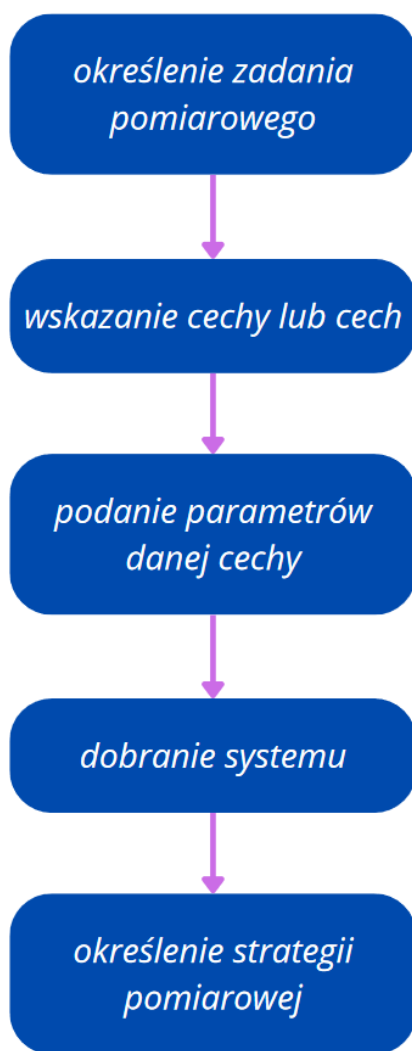
Aplikacja ma za zadanie wspomóc użytkownika w procesie doboru odpowiedniego systemu pomiarowego maszyny multisensorycznej do konkretnego zadania pomiarowego.

Opisywany, prototypowy system ekspertowy wraz z aplikacją został przygotowany dla maszyny multisensorycznej O-Inspect 442 firmy Zeiss.

Przeprowadzone wstępne badania i analizy pokazały złożoność całego systemu ekspertowego pod względem ilości danych, które należy uwzględnić. Dlatego też w opisywanej, prototypowej wersji aplikacji zastosowano pewne uproszczenia. Mają one na celu zapewnienie odpowiedniej funkcjonalności i poprawności działania.

Przyjęte założenia:

- działanie aplikacji w formie dialogowej, tzn. użytkownik podaje pewne informacje na podstawie dokumentacji technicznej,
- możliwość zastosowania tylko dla niektórych zadań i cech pomiarowych,
- ilość punktów pomiarowych w przypadku zastosowania interferometru światła białego ZEISS DotScan analogiczna jak dla głowicy stykowej VAST XXT określona na podstawie symulacji,
- stała ilość punktów pomiarowych dla głowicy optycznej Discovery.V12 wynosząca 250 punktów równomiernie rozmieszczonych dla danej cechy,
- pomiary w płaszczyźnie XY układu współrzędnych urządzenia,
- niepewność pomiaru wyznaczana na podstawie równań MPE poszczególnych systemów zweryfikowanych w procesie wzorcowania.



Rysunek 11.1. Schemat ogólny działania algorytmu

W pierwszym kroku następuje wybór zadania pomiarowego. Użytkownik określa jaki rodzaj pomiaru chce wykonać na maszynie. Wyboru dokonuje spośród dostępnych zadań takich jak pomiar średnicy, odległości, kąta czy odchyłki kształtu.



Rysunek 11.2. Wybór zadania pomiarowego

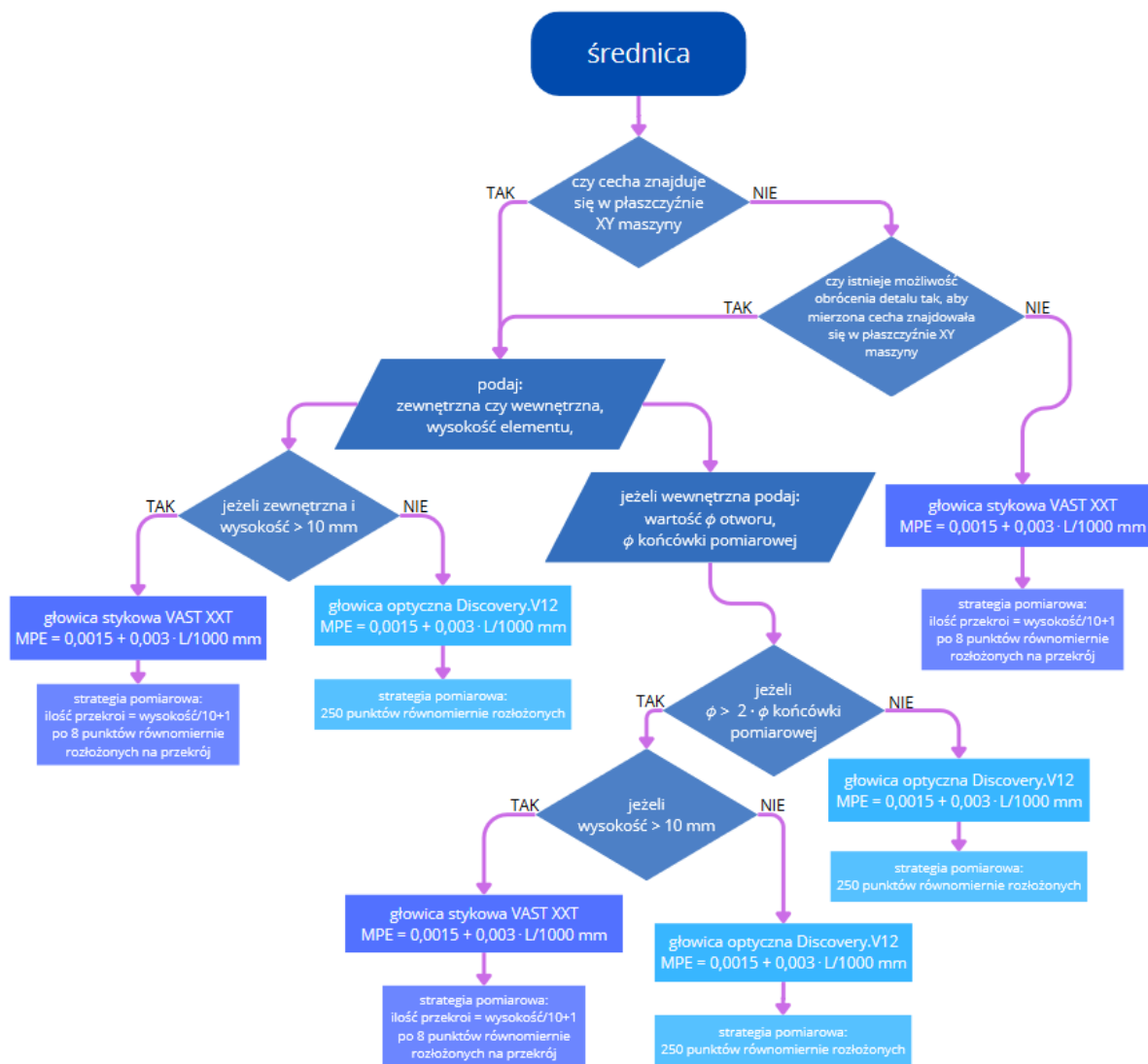
Następnie należy wskazać cechę (w przypadku pomiaru średnicy i odchyłki kształtu) lub cechy (dla zadania pomiaru odległości i kąta), dla których realizowane będzie zadanie pomiarowe.

Użytkownik określa jaką cechę chce poddać ewaluacji lub pomiędzy jakimi cechami ewaluacja będzie przeprowadzona.

Kolejnym etapem jest zdefiniowanie parametrów ewaluowanych cech. Ścieżka algorytmu decyzyjnego zależna jest od wybranego zadania pomiarowego. Na tym etapie użytkownik określa czy chce zmierzyć średnicę zewnętrzną czy wewnętrzną, jakie są wartości wymiarów, jaka jest wysokość badanej cechy, jakimi średnicami końcówek pomiarowych dysponuje, jakie są wymiary płaszczyzny mierzonej, czy istnieje możliwość zamocowania detalu, tak aby badana cecha znajdowała się w płaszczyźnie XY maszyny.

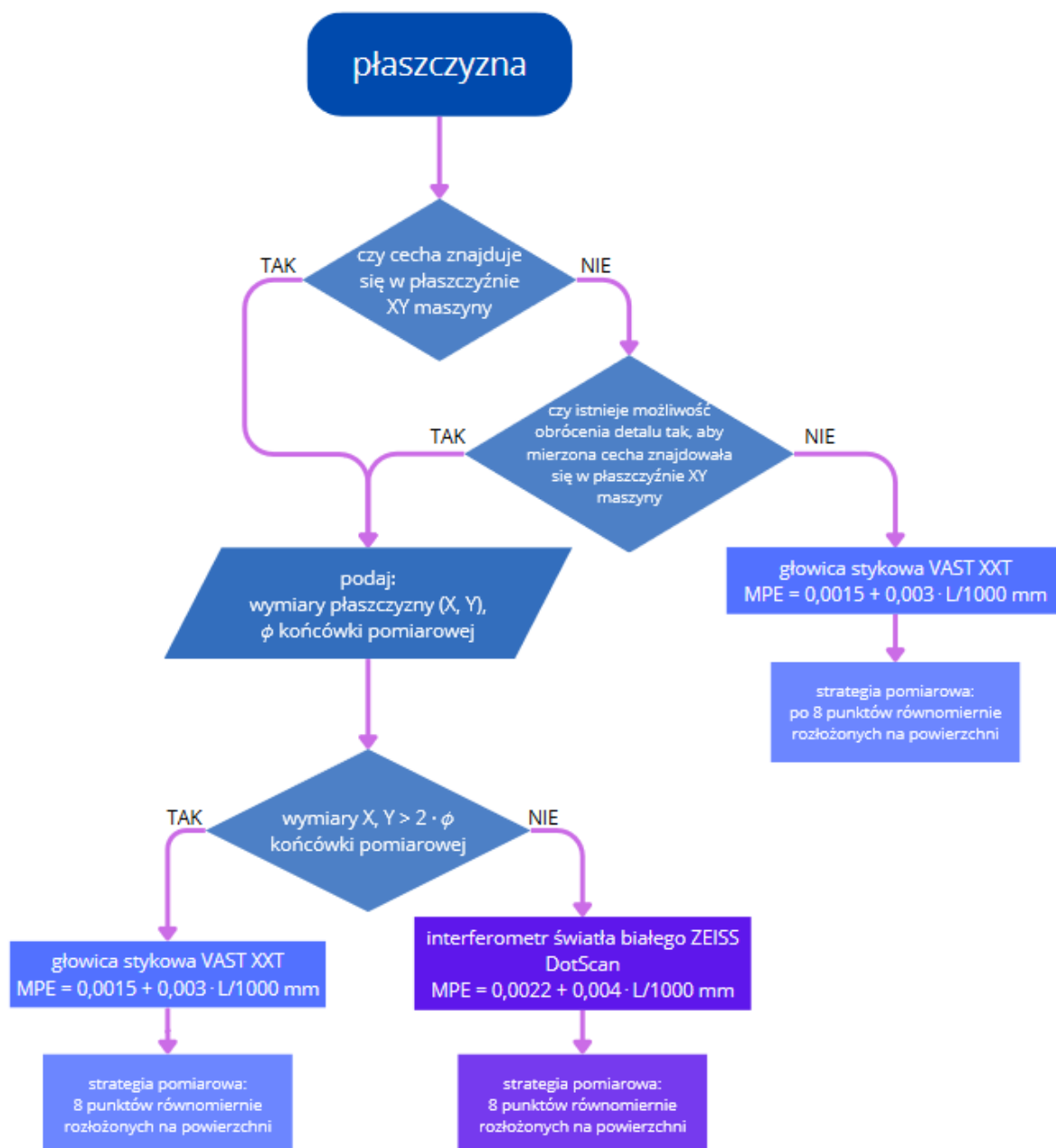
Na podstawie wprowadzonych danych algorytm stara się dobrać system do konkretnego zadania pomiarowego. Po wybraniu jednego z dostępnych sensorów lub w sytuacji pomiaru długości i kąta, gdzie mogą zostać wybrane różne systemy dla pomiaru pojedynczych cech określana jest wartość niepewności.

System wylicza niepewność pomiaru bazując na równaniach MPE poszczególnych sensorów lub ich konfiguracji oraz wartości weryfikowanego wymiaru.



Rysunek 11.3. Algorytm decyzyjny dla pomiaru średnicy

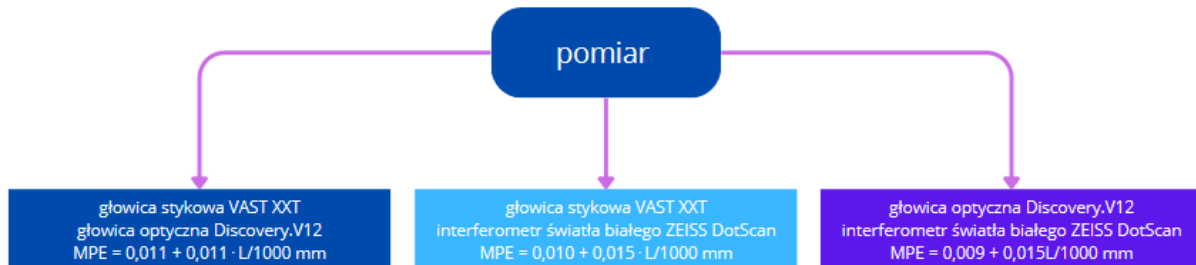
Dla średnicy algorytm weryfikuje czy cecha znajduje się w płaszczyźnie XY maszyny pomiarowej. Jeżeli nie ma możliwości zamocowania detalu w takim ustawieniu system wizyjny jak i interferometr światła białego zostają odrzucone z uwagi na konstrukcję urządzenia. Natomiast jeżeli cecha znajduje się we wspomnianej płaszczyźnie wówczas system weryfikuje czy użytkownik chce zmierzyć wymiar zewnętrzny czy wewnętrzny. Dla wymiaru zewnętrznego ograniczeniem jest wysokość cechy mierzonej, ponieważ dla wysokości większej niż 10 mm system wizyjny nie sprawdza się generując większe błędy. Dla wymiaru wewnętrznego poza ograniczeniem co do wysokości jest również wartość średnicy otworu. Jest to parametr zależny od końcówek pomiarowych jakimi dysponuje użytkownik.



Rysunek 11.4. Algorytm decyzyjny dla pomiaru płaszczyzny

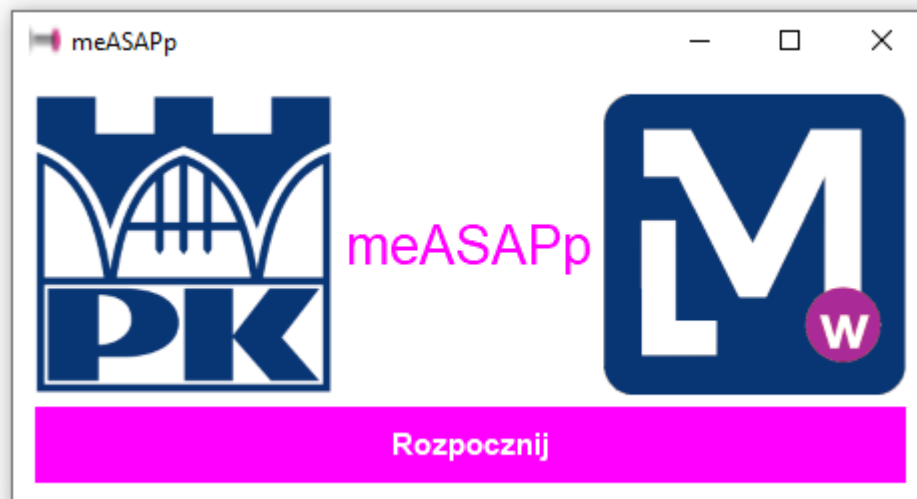
Dla pomiaru płaszczyzny również pierwszą sprawdzaną informacją jest pozycja detalu. Jeżeli nie ma możliwości zamocowania go w taki sposób ,aby znajdował się w płaszczyźnie XY maszyny to pomiar powinien zostać wykonany systemem stykowym. Następnie użytkownik podaje wielkość mierzonej płaszczyzny, ponieważ możliwość zrealizowania pomiaru zależy jest od dostępnych końcówek pomiarowych.

Wartości długości i kąta wyznaczone są z reguły pomiędzy dwiema cechami pomiarowymi. Z tego powodu istnieje możliwość, że cechy zostaną zmierzone przy pomocy różnych sensorów. Równania MPE dla poszczególnych konfiguracji przedstawiono na poniższym diagramie.



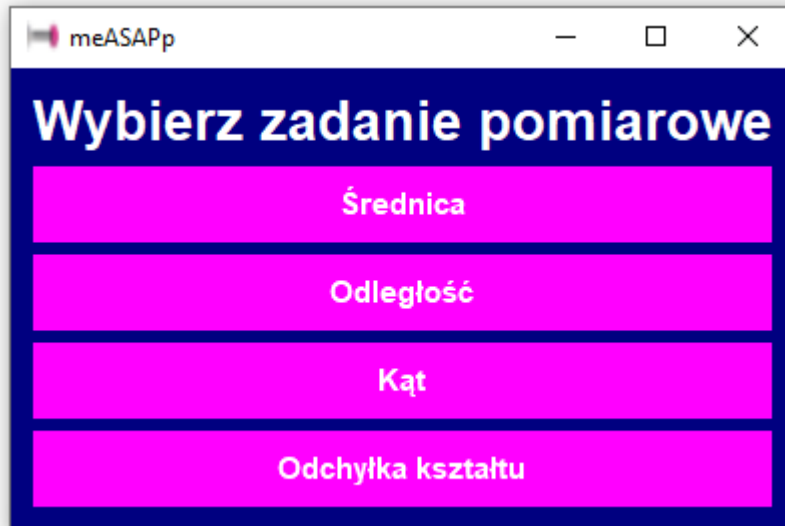
Rysunek 11.5. Niepewność dla systemów w konfiguracji

Aplikacja dla systemu została napisana w języku programowania Python. Uruchomienie aplikacji wywołuje ekran startowy.



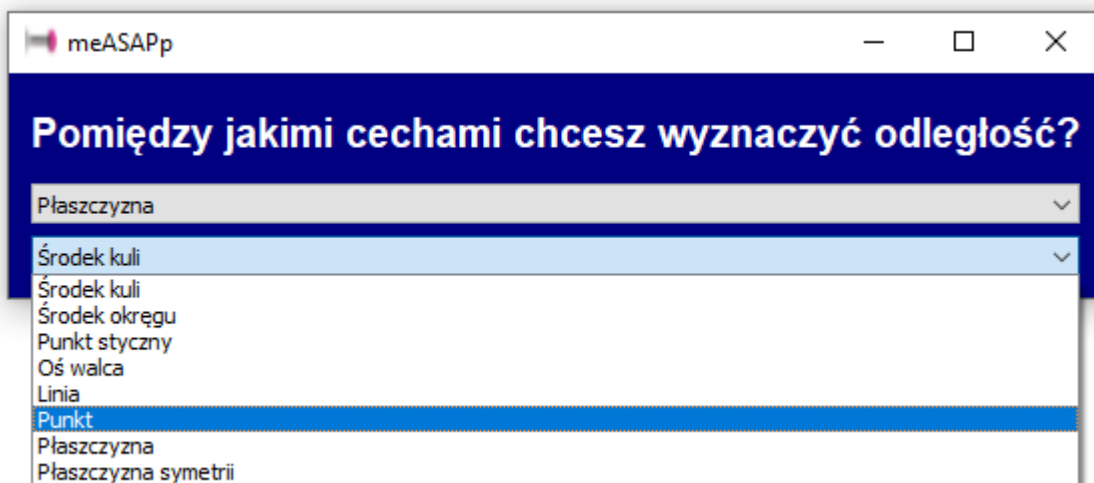
Rysunek 11.6. Ekran startowy aplikacji

Po naciśnięciu przycisku „rozpocznij” aplikacja przechodzi do kolejnego okna, w którym użytkownik może wybrać jedno z dostępnych zadań pomiarowych.



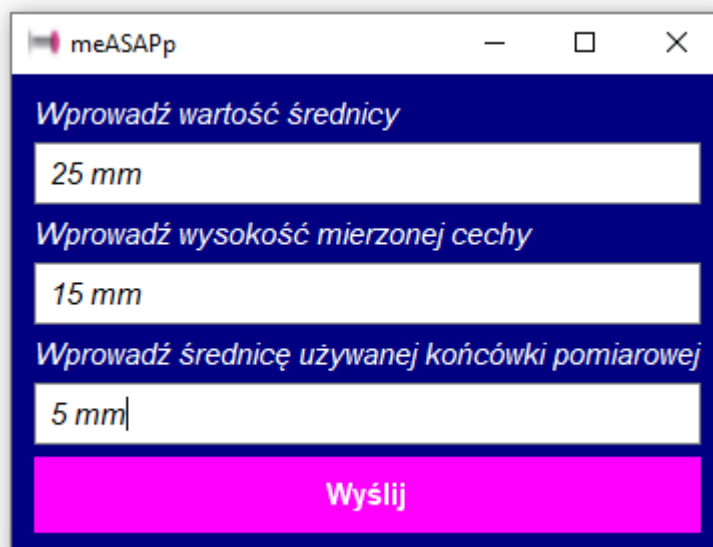
Rysunek 11.7. Okno wyboru zadania pomiarowego

W oknie tym użytkownik dokonuje wyboru zadania pomiarowego. W zależności od wyboru program przechodzi do okna z parametrami danej cechy lub do sprecyzowania pomiędzy jakimi cechami będzie wyznaczany wymiar.



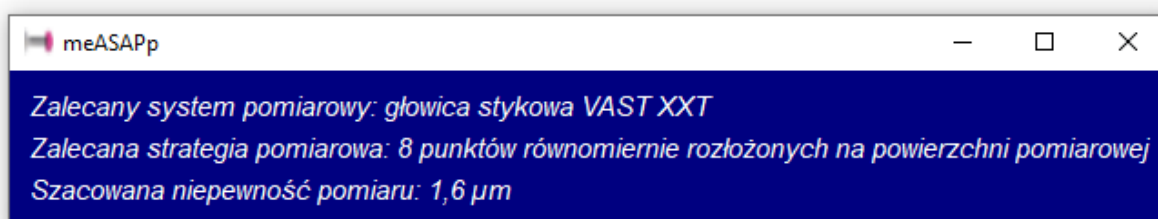
Rysunek 11.8. Okno wyboru cech pomiarowych

W oknie wyboru cech pomiarowych należy wskazać pomiędzy jakimi cechami wyznaczany będzie wymiar długości lub kąta. Cechy dostępne są z listy rozwijanej.



Rysunek 11.9. Okno parametrów danej cechy

W oknie parametrów danej cechy użytkownik określa niezbędne dane jakie potrzebne są do przeprowadzenia procesu decyzyjnego, np. wartość średnicy, która podlega ewaluacji, wysokość mierzonej cechy oraz średnica końcówki.



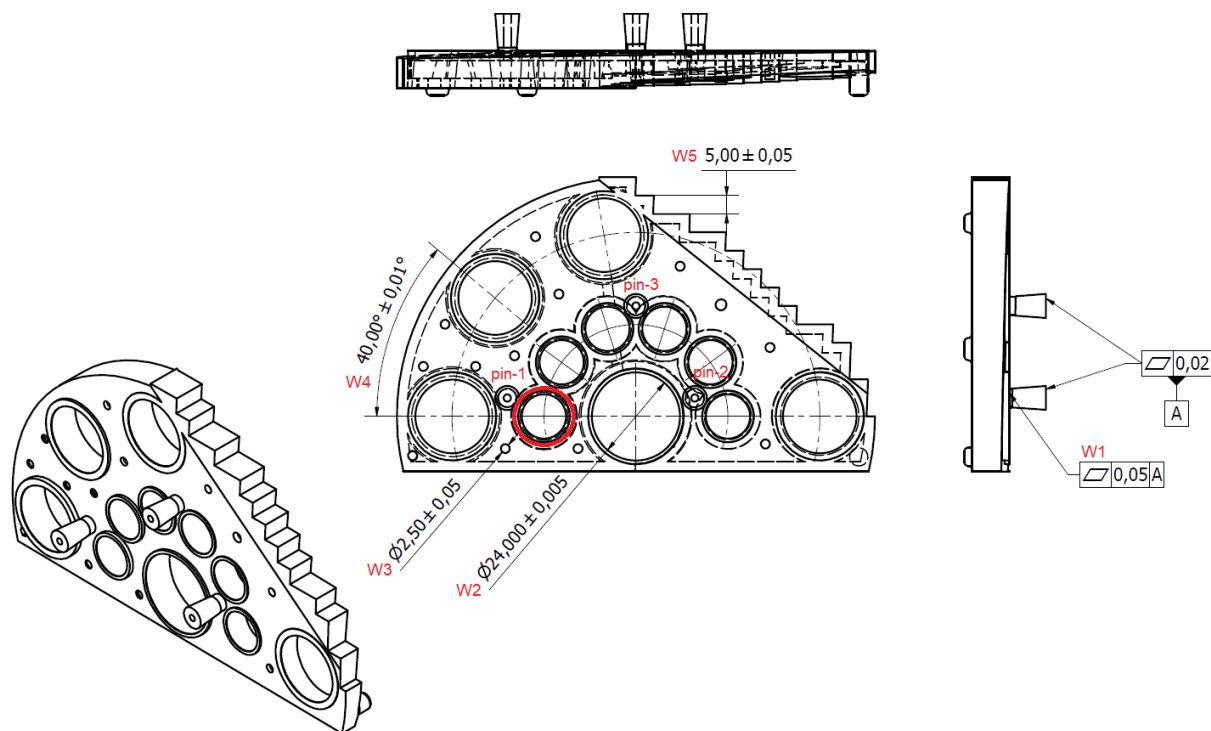
Rysunek 11.10. Okno podsumowujące system, strategię i niepewność

Ostatnie okno informuje użytkownika o zalecany systemie pomiarowym, strategii pomiarowej oraz szacowanej niepewności pomiaru.

12. Weryfikacja działania algorytmu systemu ekspertowego

12.1. Pomiary na wzorcu

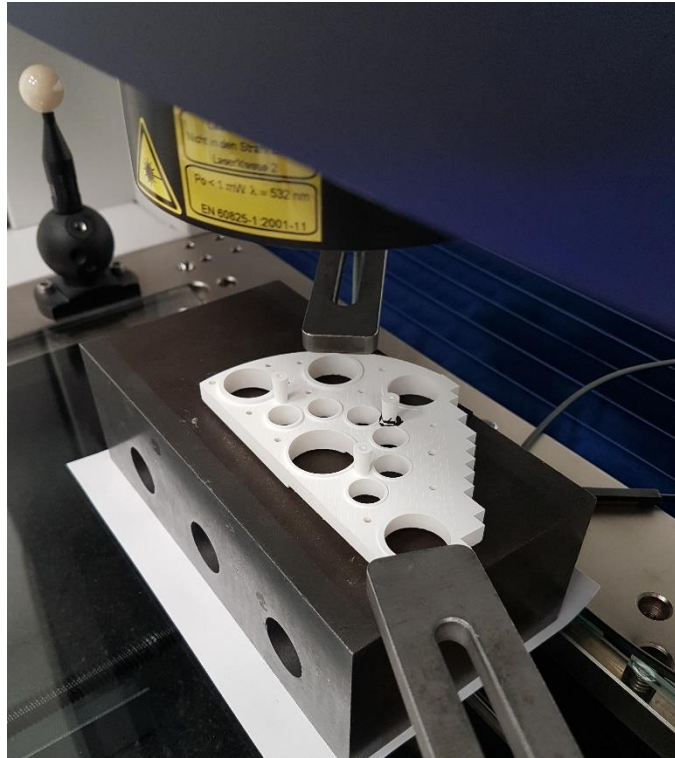
Poprawność działania aplikacji została zweryfikowana na podstawie pomiarów wzorca mającego służyć do sprawdzania multisensorycznych maszyn pomiarowych. Wzorec został opracowany na Politechnice Krakowskiej w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej przez dr inż. Wiktora Harmatysa. Obecnie trwa procedura przyznania patentu na ten wzorec.



Rysunek 12.1. Wzorec, który posłużył do weryfikacji działania aplikacji

Przed rozpoczęciem badań wzorec został wywzorcowany na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Leitz Infinity.

Układ został wyznaczony na trzech wystających trzpieniach. Kierunek główny układu (oś Z) określa normalna do płaszczyzny zbudowanej z płaszczyzn zmierzonych na poszczególnych trzpieniach. Oś X wyznaczono pomiędzy trzpieniem pierwszym i drugim znajdującymi się w jednej linii równoległej do krawędzi podstawy. Początek układu określa trzpień po lewej stronie wzorca (pin pierwszy). Układ wyznaczono sensorem stykowym. Ewaluacjom poddano wymiary zaznaczone na rysunku ilustrującym wzorec.



Rysunek 12.2. Zamocowanie wzorca do pomiaru

Pomiar płaskości trzpieni zrealizowano sensorem stykowym, ponieważ płaszczyzny trzpieni są większe niż dwukrotność średnicy zastosowanej końcówki pomiarowej (2 mm).

Tabela 12.1. Wyniki pomiaru płaskości poszczególnych trzpieni – sensor stykowy

	Tolerancja	Wynik	U
Nr pina	mm		
1	0,0200	0,0312	0,0015
2		0,0334	
3		0,0279	

Wymiar W1, czyli płaskość powierzchni wyznaczono interferometrem światła białego. Powierzchnia ta ma 2 mm szerokości, czyli jest mniejsza od dwukrotności średnicy końcówki pomiarowej, więc zgodnie z algorytmem sensor stykowy został odrzucony, na rzecz interferometru światła białego.

Tabela 12.2. Wynik pomiaru płaskości wymiaru W1 interferometrem światła białego

Tolerancja	Wynik	U
mm		
0,0500	0,0311	0,0022

Wymiar W2 to średnica otworu. Wymiar wewnętrzny, średnica jest większa niż dwukrotność średnicy końcówki, wysokość cechy przekracza 10 mm, więc zgodnie z algorytmem przyjęto sensor stykowy.

Tabela 12.3. Wyniki pomiaru W2 sensorem stykowym

<i>Nominal</i>	<i>Tolerancja</i>	<i>Wynik</i>	<i>U</i>
<i>mm</i>			
24,0000	±0,0050	24,0061	0,0015

Wymiar W3 to również średnica otworu. Wymiar wewnętrzny, średnica jest mniejsza niż dwukrotność średnicy końcówki, wysokość cechy nie przekracza 10 mm (wysokość cechy 7mm), więc zgodnie z algorytmem przyjęto sensor wizyjny.

Tabela 12.4. Wyniki pomiaru W3 sensorem wizyjnym

<i>Nominal</i>	<i>Tolerancja</i>	<i>Wynik</i>	<i>U</i>
<i>mm</i>			
2,5000	±0,0500	2,5376	0,0015

Wymiar W4 to kąt pomiędzy liniami zbudowanymi na środkach okręgów. Konieczne w tym zadaniu jest więc zmierzenie czterech otworów. Zgodnie z algorytmem wszystkie można zmierzyć sensorem stykowym.

Tabela 12.5. Wyniki pomiaru W4 sensorem stykowym

<i>Nominal</i>	<i>Tolerancja</i>	<i>Wynik</i>	<i>U</i>
<i>mm</i>			
40,0000°	±0,010°	39,9892°	0,0015

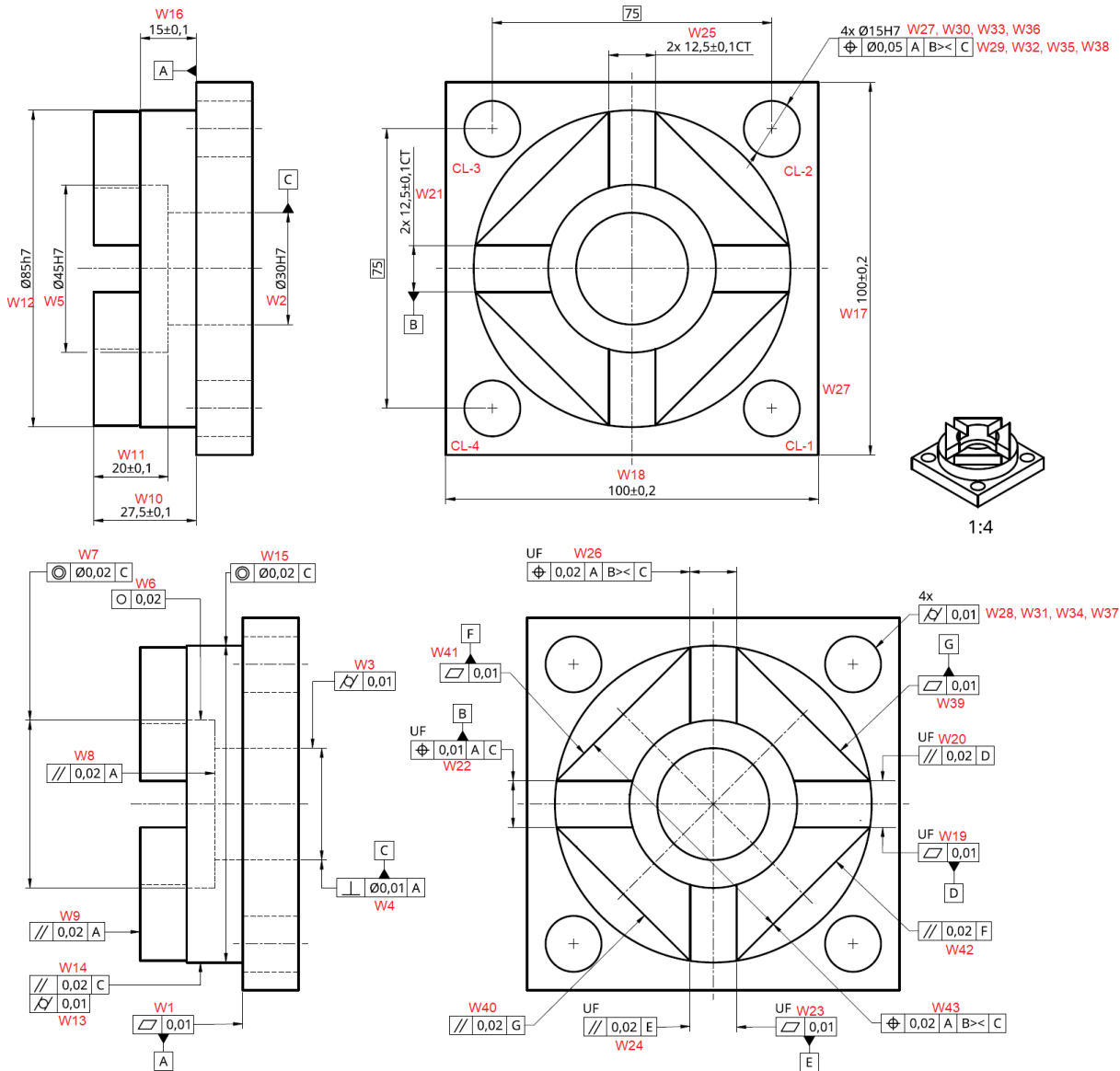
Ostatni weryfikowany wymiar W5 to odległość pomiędzy dwiema płaszczyznami. Wymiary płaszczyzn wynoszą odpowiednio 5 x 10 mm i 10 x 10 mm. Wysokość detalu przekracza 10 mm stąd dobrany sensor stykowy.

Tabela 12.6. Wyniki pomiaru W5 sensorem stykowym

<i>Nominal</i>	<i>Tolerancja</i>	<i>Wynik</i>	<i>U</i>
<i>mm</i>			
5,0000	±0,0500	5,02587	0,0015

12.2. Pomiary na detalu przemysłowym

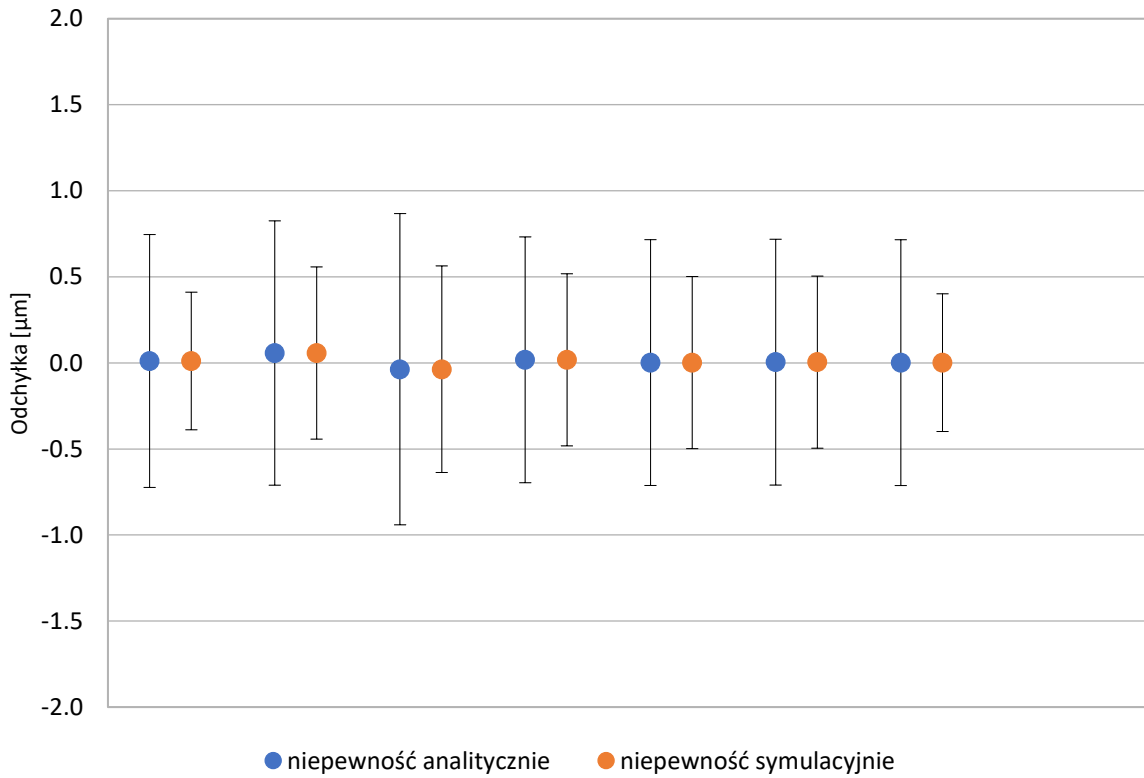
Weryfikacja została również przeprowadzona na detalu przemysłowym. Obiekt ten został zaprojektowany i wykonany w ramach projektu Polska Metrologia „Zastosowanie wirtualnej maszyny współrzędnościowej do optymalizacji ścieżki pomiarowej ze względu na dokładność pomiaru”. Element ten pozwala na weryfikację wymiarów takich jak średnica czy odległość, odchyłek kształtu, pozycji i kierunku.



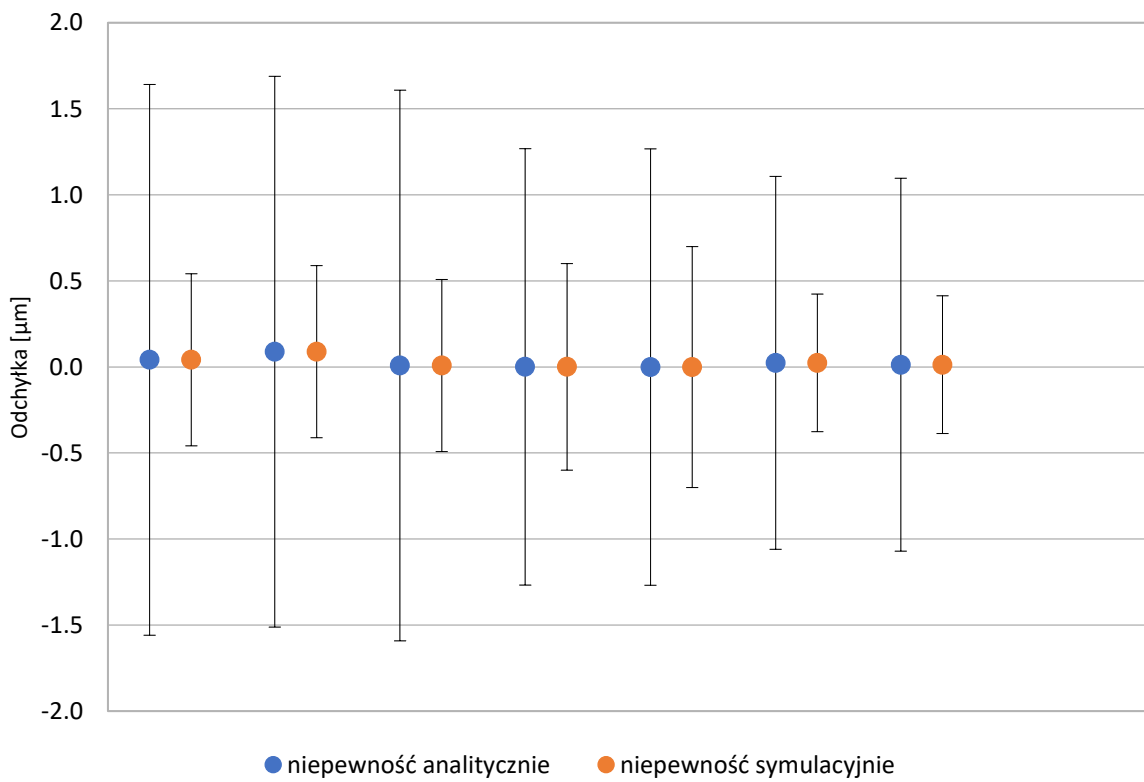
Rysunek 12.3 Detal przemysłowy, który posłużył do weryfikacji działania aplikacji

Tabela 12.7 Zestawienie wyników z pomiaru detalu przemysłowego

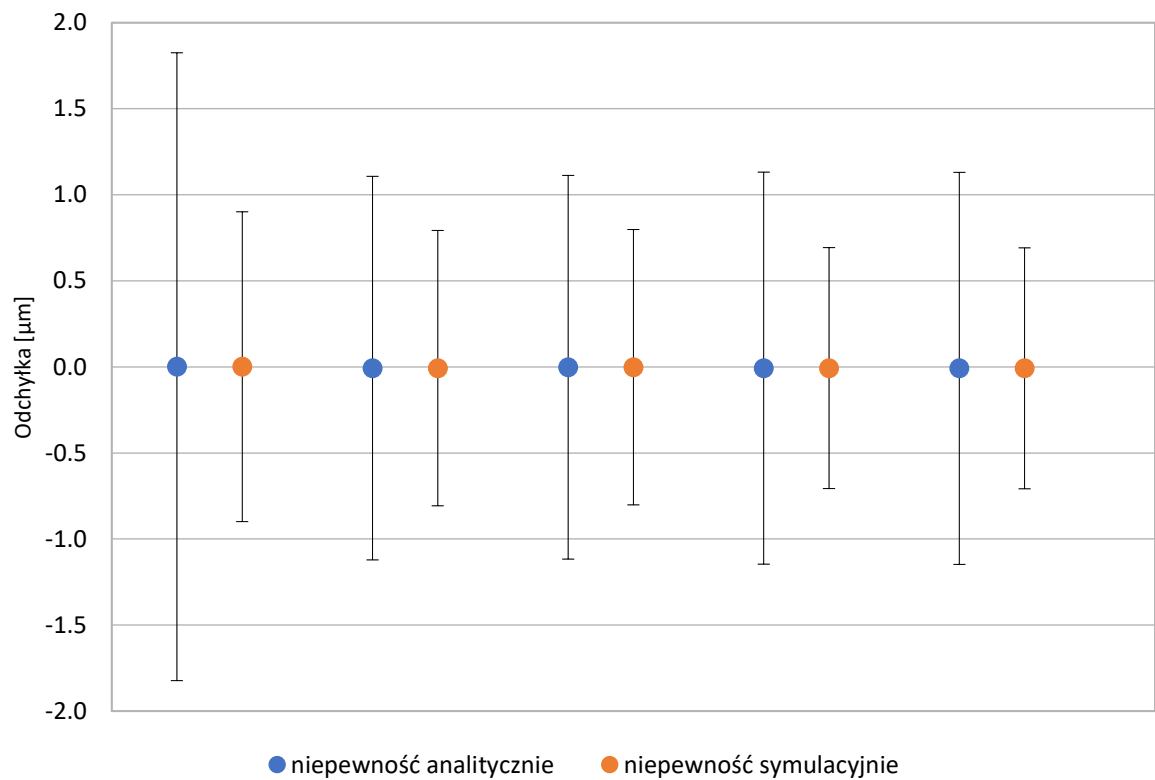
	<i>Symbol</i>	<i>Nominal [mm]</i>	<i>Wartość zmierzona [mm]</i>	<i>Odchyłka [mm]</i>	<i>U_{analityczna} [μm]</i>	<i>U_{symulacyjna} [μm]</i>
odchyłki wymiaru						
średnica	W2	30	30,0112	0,0112	0,7	0,4
	W5	45	45,0574	0,0574	0,8	0,5
	W12	85	84,9633	-0,0367	0,9	0,6
	W27	15	15,0177	0,0177	0,7	0,5
	W30	15	15,0019	0,0019	0,7	0,5
	W33	15	15,0045	0,0045	0,7	0,5
	W36	15	15,0014	0,0014	0,7	0,4
odległość	W10	27,5	27,5412	0,0412	1,6	0,5
	W11	20	20,0885	0,0885	1,6	0,5
	W16	15	15,0081	0,0081	1,6	0,5
	W17	100	100,0003	0,0003	1,3	0,6
	W18	100	99,9991	-0,0009	1,3	0,7
	W21	12,5	12,5237	0,0237	1,1	0,4
	W25	12,5	12,5131	0,0131	1,1	0,4
odchyłki kształtu						
płaskość	W1	0,01	0,0111	0,0011	1,8	0,9
	W19	0,01	0,0028	-0,0072	1,1	0,8
	W23	0,01	0,0081	-0,0019	1,1	0,8
	W39	0,01	0,0031	-0,0069	1,1	0,7
	W41	0,01	0,0016	-0,0084	1,1	0,7
walcowość	W3	0,02	0,0202	0,0002	1,1	0,6
	W13	0,02	0,0197	-0,0003	1,6	0,7
	W28	0,02	0,0097	-0,0103	1,0	0,9
	W31	0,02	0,0176	-0,0024	1,0	0,8
	W34	0,02	0,0203	0,0003	1,0	0,8
	W37	0,02	0,0052	-0,0148	1,0	0,7
okrągłość	W6	0,02	0,0118	-0,0082	1,2	0,7
odchyłki pozycji						
pozycja	W22	0,01	0,0241	0,0141	1,0	0,5
	W26	0,02	0,0150	-0,0050	1,0	0,5
	W29	0,05	0,0525	0,0025	1,0	0,6
	W32	0,05	0,0414	-0,0086	1,0	0,6
	W35	0,05	0,0364	-0,0136	1,0	0,6
	W38	0,05	0,0284	-0,0216	1,0	0,6
	W43	0,02	0,0404	0,0204	1,1	0,7
współśrodkowość	W7	0,02	0,0241	0,0041	1,0	0,4
współosiowość	W15	0,02	0,0604	0,0404	1,0	0,4
odchyłki kierunku						
prostokątowość	W4	0,01	0,0061	-0,0039	1,0	1,0
równoległość	W8	0,02	0,0103	-0,0097	1,0	0,7
	W9	0,02	0,0151	-0,0049	1,1	0,7
	W14	0,02	0,0038	-0,0162	1,1	0,6
	W20	0,02	0,0056	-0,0144	1,0	0,6
	W24	0,02	0,0100	-0,0100	1,0	0,5
	W40	0,02	0,0134	-0,0066	1,3	0,5
	W42	0,02	0,0063	-0,0137	1,3	0,7



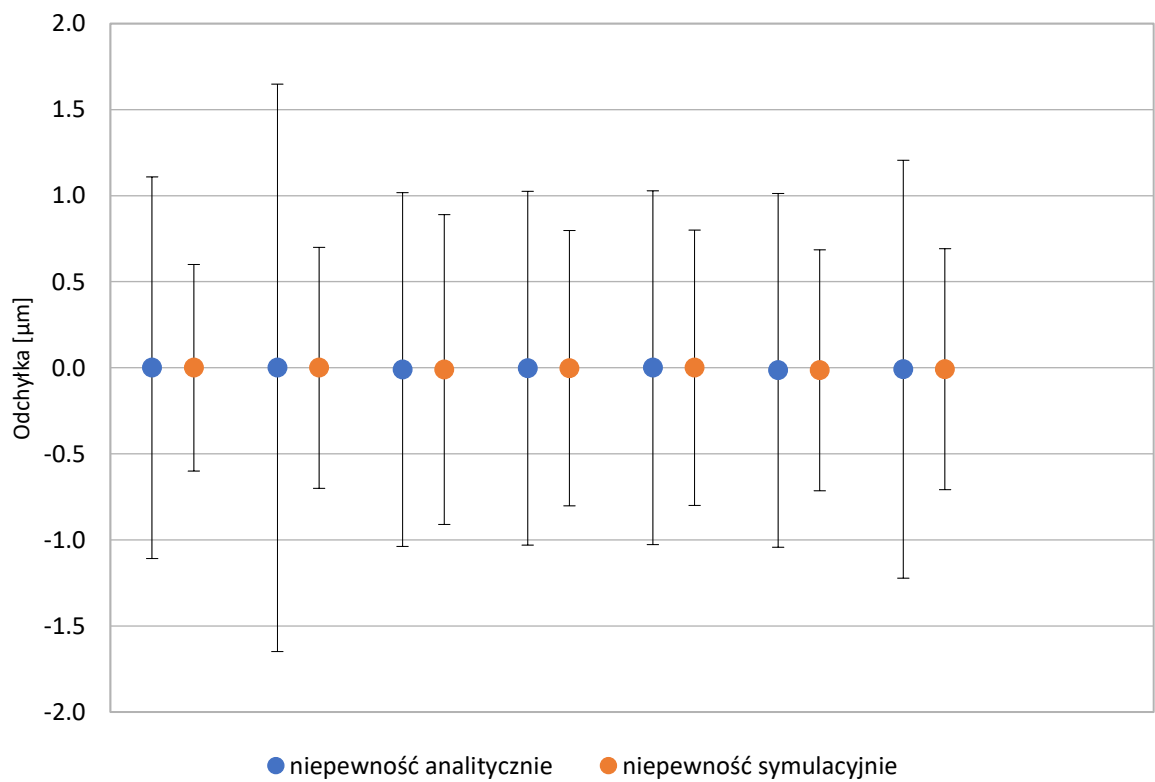
Rysunek 12.4 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych średnic (od lewej wymiary W2, W5, W12, W27, W30, W33, W36)



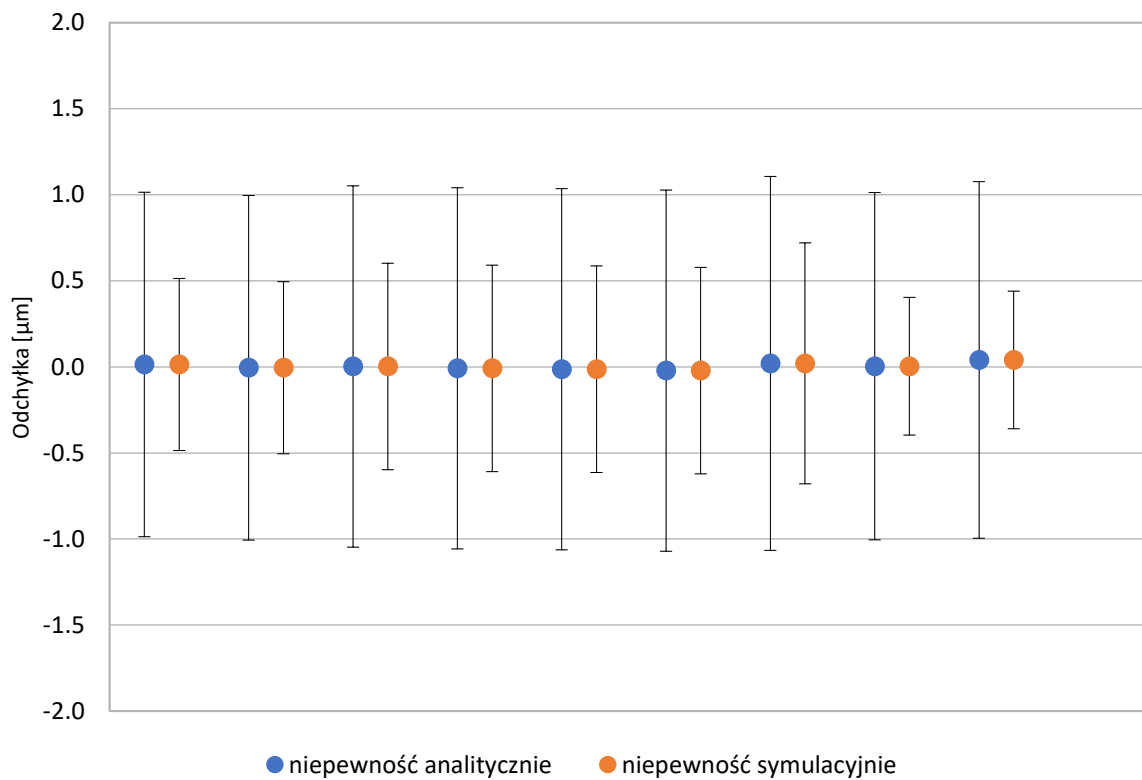
Rysunek 12.5 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych odległości (od lewej wymiary W10, W11, W16, W17, W18, W21, W25)



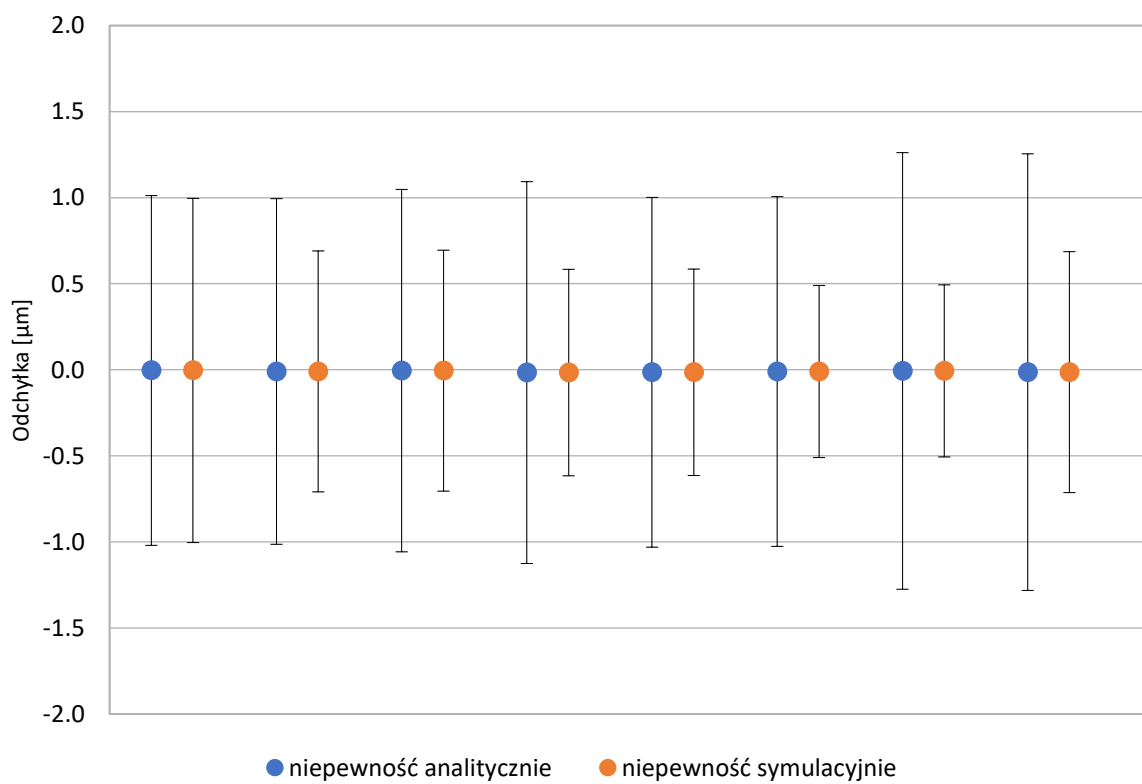
Rysunek 12.6 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych płaskości (od lewej wymiary W1, W19, W23, W39, W41)



Rysunek 12.7 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych walцовości (od lewej wymiary W3, W13, W28, W31, W34, W37) oraz okrągłości (W6)



Rysunek 12.8 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych pozycji (od lewej wymiary W22, W26, W29, W32, W35, W38, W43) oraz współśrodkowości (W7) i współosiowości (W15)

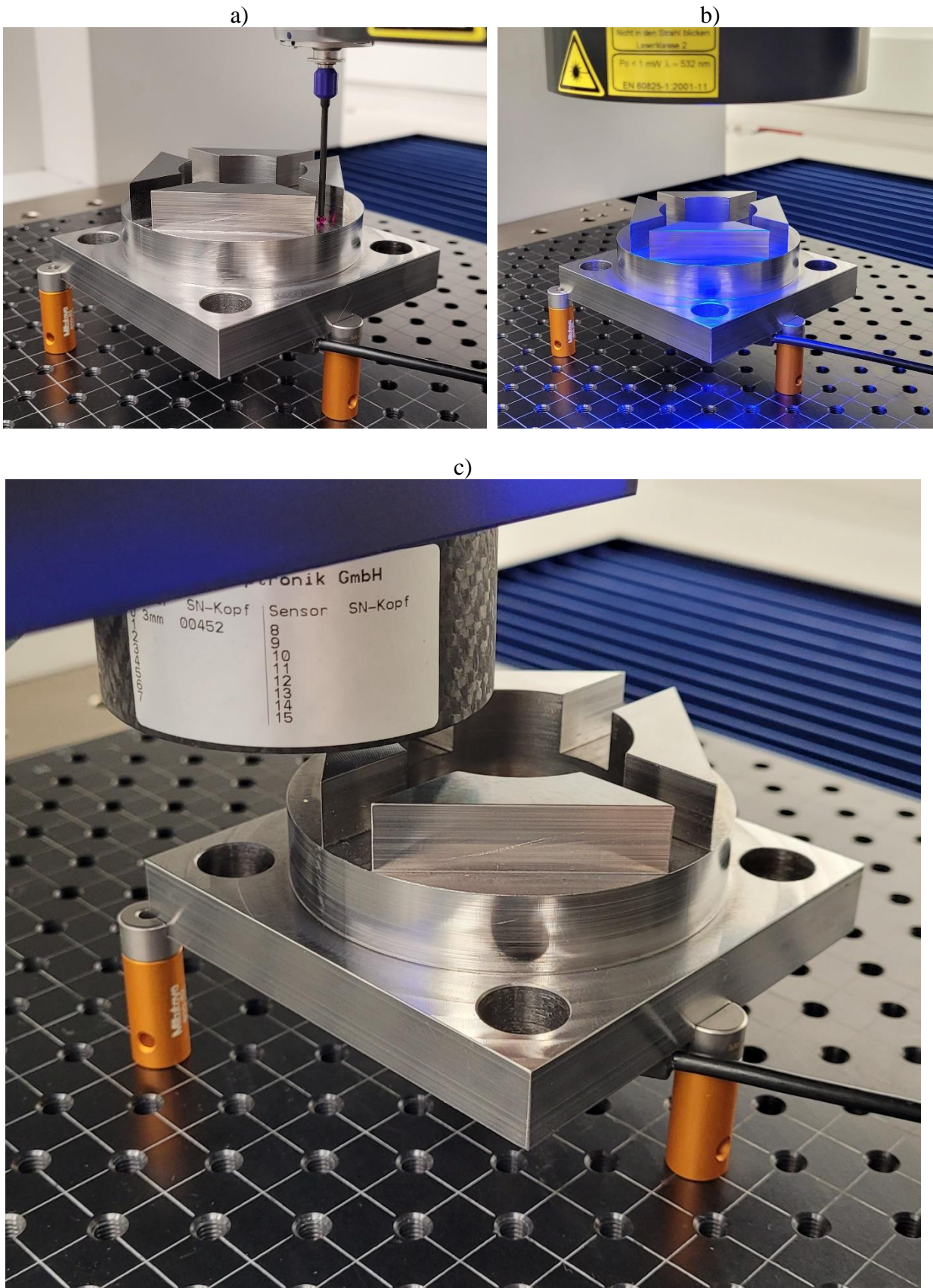


Rysunek 12.9 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla prostopadłości (W4) oraz dla kolejnych równoległości (od lewej wymiary W8, W9, W14, W20, W24, W40, W42)

Zgodnie z opracowanym algorytmem system ekspertowy do pomiaru większości cech wybrał sensor stykowy, ponieważ pozostałe nie spełniały założeń dotyczących orientacji detalu w przestrzeni pomiarowej maszyny bądź wysokości poszczególnych elementów. Dla zadania pomiaru średnicy i wyznaczenia odchyłki pozycji czterech otworów oznaczonych wymiarami W27, W30, W33, W36, W29, W32, W35, W38 system wskazał sensor optyczny. Natomiast dla zadania pomiaru odległości W10, W11, W16 wybrany został sensor światła białego.

W tabeli 12.7 zawarte zostały wyniki z pomiaru wraz z wartościami niepewności pomiaru. Niepewność została wyznaczona dwiema metodami analityczną oraz symulacyjną. Metoda analityczna bazuje na równaniach MPE poszczególnych sensorów. W ramach wspomnianego na początku tego rozdziału projektu Polska Metrologia opracowane zostały modele maszyn wirtualnych dla głowicy stykowej VAST XXT, głowicy optycznej Discovery.V12 oraz interferometru światła białego ZEISS DotScan. Model dla sensora stykowego bazuje zarówno na błędach głowicy jak i błędach geometrii urządzenia. Modele sensora optycznego i światła białego są modelami uproszczonymi, ponieważ bazują tylko na błędach głowic.

Wykonanie symulacji umożliwiło porównanie wyników z wartościami otrzymanymi w procesie szacowania metodą analityczną. Symulacje przeprowadzono 50 razy na podstawie danych z jednokrotnego pomiaru. Wielkość obszaru niepewności zależna jest od typu realizowanego zadania pomiarowego. Dla pomiaru średnic w obydwu przypadkach otrzymano najmniejszą niepewność w porównaniu do pozostałych zadań. Tam również są najmniejsze różnice pomiędzy obiema metodami. Największe wartości niepewności szacowanej metodą analityczną uzyskano dla zadania pomiaru odległości, dla tego przypadku odnotowano także największe różnice względem metody symulacyjnej. Podobnie dla pomiaru płaskości płaszczyzny bazowej A oraz pomiaru walcowości walca o średnicy 85 mm niepewności z metody analitycznej osiągnęły największą wartość. Im większa jest weryfikowana wartość tym bardziej metoda analityczna przeszacowuje wyniki niepewności. Dla pozostałych zadań pomiarowych różnice w wartościach niepewności nie przekraczają 0,5 μm . Przeprowadzone badania potwierdzają, że poprawne jest stosowanie metody Hernli bazującej na równaniach MPE do szacowania niepewności pomiaru. Potwierdzono również założenie, że metody symulacyjne są dokładniejsze.



Rysunek 12.10 Pomiary detalu systemem a) stykowym, b) optycznym, c) światła białego

13. Wnioski z przeprowadzonych badań i zrealizowanych prac

Przegląd rozważań teoretycznych, analiza stanu wiedzy z zakresu tematu pracy oraz zrealizowane badania umożliwiają sformułowanie szeregu wniosków. Kierując się możliwym obszarem ich wykorzystania wnioski podzielono na poznawcze oraz utylitarne.

Wnioski poznawcze:

1. Zrealizowane badania wstępne potwierdzają, że możliwe jest zastosowanie różnych systemów maszyny multisensorycznej w jednym zadaniu pomiarowym, ale kosztem zwiększonej niepewności pomiaru względem wykorzystania jednego rodzaju sensora.
2. Przeprowadzanie pomiarów odbiorczych i okresowych jest istotne ze względu na informacje o stanie technicznym urządzenia. Ponadto badania te mogą potwierdzić możliwość zmniejszenia wartości dla równania MPE, co może przełożyć się na zmniejszenie wartości niepewności pomiaru.
3. Ilość i rozkład punktów pomiarowych ma istotny wpływ na wartość niepewności pomiaru.
4. Wykorzystując wszystkie dostępne sensory maszyny multisensorycznej podczas pomiaru należy pamiętać o znacznym zawężeniu przestrzeni pomiarowej urządzenia. Realnie dostępną przestrzeń pomiarową w takiej sytuacji należy wyznaczyć przed rozpoczęciem badań.
5. Stosowanie metod porównawczej i wielopozycyjnej do szacowania niepewności pomiaru w przypadku pomiarów przemysłowych nie jest możliwe z uwagi na ograniczony czas i brak odpowiednich wzorców.
6. Metody symulacyjne są bardziej efektywne i pozwalają oszacować wartość niepewności pomiaru w znacznie krótszym czasie niż inne metody, ponadto nie wymagają od operatora specjalistycznej wiedzy.
7. Wraz ze wzrostem wysokości detalu mierzonego pogarszają się wyniki uzyskiwane przy pomocy systemu wyposażonego w głowicę optyczną.
8. Istotny jest wpływ warunków środowiskowych, w których realizowany jest pomiar na wartość niepewności pomiaru.

Wnioski uytylitarne:

1. Możliwe jest opracowanie bazy wiedzy i zależności, które pozwolą na przeprowadzenie racjonalnego doboru systemu pomiarowego maszyny multisensorycznej do konkretnego zadania pomiarowego, tak aby zminimalizować wartość niepewności pomiaru na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań i analiz.
2. Przeprowadzone badania pokazują, że możliwe i zasadne jest stosowanie metod symulacyjnych w szacowaniu niepewności pomiaru.
3. Możliwe jest określenie maksymalnej granicznej liczby punktów pomiarowych dla danej cechy, powyżej której wartość niepewności pomiaru nie zmniejszy się w sposób znaczący.
4. Określenie maksymalnej granicznej liczby punktów pozwala na skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie pomiaru zapewniając oczekiwaną dokładność pomiaru.
5. W przypadku kiedy dostępne systemy maszyny multisensorycznej mają różne równania dokładności, szacowanie niepewności na podstawie równań MPE, np. w oparciu o metodę Hernli może dawać korzystniejsze rezultaty, przy właściwie dobranym systemie do zadania.
6. Możliwe jest opracowanie kompleksowej metody szacowania niepewności pomiaru na danym systemie multisensorycznymi poprzez zastosowanie maszyn wirtualnych pozwalających na symulacje danych.
7. Symulacyjne metody szacowania niepewności są zorientowane na zadanie, metoda oparta na MPE nie jest, stąd wyniki z metody analitycznej mogą być przeszacowane.
8. Aplikacja w sposób jednoznaczny wskazuje system pomiarowy, strategię pomiaru i podaje szacowaną wartość niepewności co redukuje czas i koszty.
9. Opracowany system ekspertowy wraz z aplikacją można dostosować do różnych maszyn multisensorycznych.
10. Możliwe jest wdrożenie systemu ekspertowego i aplikacji w jednostkach naukowo badawczych, laboratoriach i zakładach przemysłowych.

14. Kierunki dalszych badań i prac rozwojowych

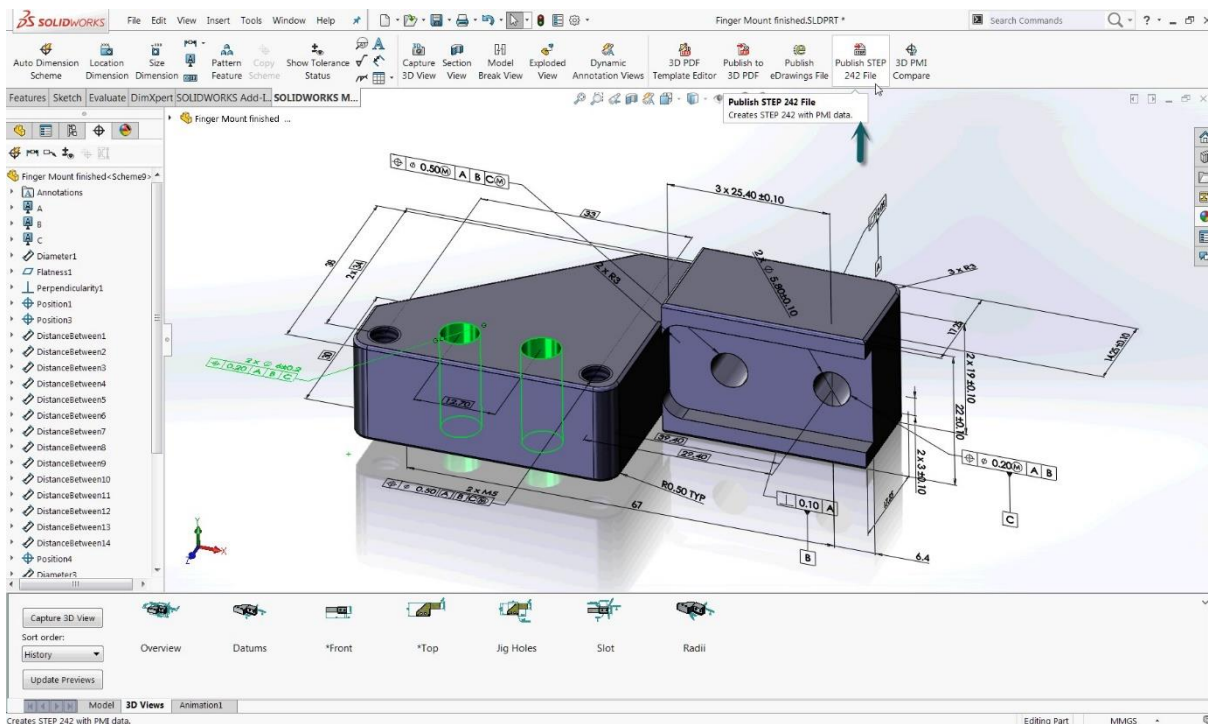
Realizacja tego tematu pokazała jak złożonym zagadnieniem jest ocena dokładności pomiarów realizowanych na maszynach multisensorycznych.

Mnogość rozwiązań i konfiguracji takich urządzeń, ich możliwości pomiarowe i szerokie spektrum zastosowań może nastroić wielu problemów zarówno przy doborze nowego sprzętu jak również w trakcie samego użytkowania.

Opracowany prototyp aplikacji jest narzędziem umożliwiającym uproszczenie procesu doboru sensorów do zadań pomiarowych wraz z oszacowaniem wartości niepewności, dzięki zgromadzonej bazie wiedzy ekspertowej. Pozwala w efektywny sposób usprawnić proces realizacji pomiaru, ale również zredukować jego czas.

Przeprowadzone pomiary i analizy pokazały jak rozległy jest to temat. Pozyskanie projektu LIDER umożliwiłoby otrzymanie środków i dalszy rozwój omawianego systemu, szczególnie pod kątem rozbudowy aplikacji.

Istotnym aspektem jest zautomatyzowanie działania aplikacji, zamiast aktualnie przyjętej formy dialogowej. Możliwe jest to np. dzięki zastosowaniu 3D PMI (Product and Manufacturing Information z ang. Informacje o produkcie i produkcji). PMI obejmuje wiele informacji na temat wytwarzanych produktów zapisując je w poszczególnych warstwach modelu 3D danego detalu. Najistotniejszym z punktu widzenia omawianego systemu są informacje dotyczące GD&T (Geometric dimensions & tolerances), czyli wymiarów geometrycznych i tolerancji.



Rysunek 14.1. Przedstawienie informacji dotyczących GD&T w warstwie modelu w programie SolidWorks [W11]

Opracowanie procedury wyciągnięcia tych danych z warstwy modelu w formacie STEP pozwoliłoby na automatyczne wyszczególnienie wszystkich cech geometrycznych podlegających ocenie. Również ich relacji i zależności pomiędzy nimi.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest dobór strategii pomiarowej. Mając do dyspozycji dane dotyczące poszczególnych wymiarów, wielkość, rozmieszczenie i układ cech bazując na modelu danego detalu, aplikacja miałaby możliwość doboru ilości i generowania rozkładu punktów pomiarowych w obrębie pojedynczej cechy, czy punktów kontrolnych umożliwiających bezkolizyjny przejazd pomiędzy cechami. Wygenerowane punkty mogłyby być importowane do oprogramowania pomiarowego.

Jednym z najistotniejszych zagadnień jest szacowanie niepewności pomiaru. Prowadzone badania pokazały zasadność stosowania metod symulacyjnych w ocenie dokładności pomiarów. Dzięki temu na podstawie zrealizowanych pomiarów możliwa jest wielokrotna symulacja wyników, pozwalając tym samym na zmniejszenie niepewności pomiaru realizowanego na danym systemie. Kolejnym celem jest więc opracowanie dokładniejszych maszyn wirtualnych dla poszczególnych sensorów.

Na chwilę obecną opracowano szereg założeń dla aplikacji docelowej, nad pewnymi zagadnieniami trwają prace badawcze. Kolejne etapy zaplanowanych prac zaprezentowano poniżej:

1. Zintegrowanie aplikacji z modelem w standardzie STEP:
 - pozyskiwanie danych dotyczących poszczególnych wymiarów geometrycznych i ich tolerancji,
 - powiązanie wymiarów z konkretnymi cechami pomiaru, którymi są one oceniane,
 - wyszczególnienie tych cech i wyodrębnienie ich na modelu,
 - dobranie właściwego systemu do zadania pomiarowego,
 - określenie orientacji i ilości ustawień obiektu w przestrzeni maszyny koniecznych do zrealizowania pomiaru,
 - generowanie rozkładu punktów pomiarowych wraz ze ścieżkami przejazdu pomiędzy poszczególnymi cechami.
2. Opracowanie maszyn wirtualnych dla poszczególnych systemów maszyny multisensorycznej:
 - zaplanowanie badań niezbędnych do wykonania, dobór właściwych wzorców do poszczególnych systemów, realizacja pomiarów,
 - przygotowanie modeli błędów głowic i geometrii maszyny na podstawie uzyskanych wyników badań,
 - przeprowadzenie testów poprawności działania.
3. Implementacja modeli wirtualnych maszyn pomiarowych do aplikacji:
 - symulowanie wartości niepewności w zależności od liczby punktów pomiarowych,
 - symulowanie wartości niepewności na podstawie zrealizowanego pojedynczego pomiaru.
4. Zintegrowanie aplikacji z oprogramowaniem pomiarowym na danej maszynie multisensorycznej, tzn. zapewnienie możliwości wymiany danych takich jak współrzędne punktów wraz z wektorami najazdów pomiędzy aplikacją, a oprogramowaniem pomiarowym.
5. Opracowanie sposobu adaptacji i dostosowania aplikacji do różnego typu maszyn multisensorycznych, opracowanie dedykowanych wzorców pomiarowych usprawniających całą procedurę.
6. Implementacja proponowanego rozwiązania na innych maszynach multisensorycznych połączona z badaniami i przeprowadzeniem testów poprawności działania.

Celem jest opracowanie kompleksowego narzędzia, które zoptymalizuje pomiary na systemach multisensorycznych skracając czas potrzebny do zrealizowania pomiaru. Aplikacja

będzie rozwiązaniem wspomagającym kontrolę jakości w zakładach produkcyjnych, szczególnie w sytuacji, w której często pojawiają się nowe wyroby.

System ekspertowy, który w finalnej wersji będzie działał w oparciu o algorytmy sztucznej inteligencji, w tym uczenia maszynowego oraz zautomatyzowana aplikacja połączone z możliwością dostosowania do dowolnego systemu multisensorycznego stworzą produkt, który zapewni wysoką dokładność pomiarów i minimalizację kosztów.

Automatyczny dobór parametrów na podstawie powszechnie stosowanego standardu zapisu, generowanie punktów pomiarowych, możliwości symulacji danych i parametrów, a co najważniejsze zmniejszenie niepewności pomiaru przy jednoczesnej minimalizacji czasu realizacji. To główne zalety opracowywanego systemu.

Docelowa wersja systemu będzie mogła być skomercjalizowana. W pierwszym wariantcie niepewność pomiaru będzie szacowana na podstawie metod analitycznych, np. metodą Hernli. Wdrożenie tej wersji będzie łatwiejsze niż wariantu drugiego, ale wartości niepewności pomiaru będą większe. W wariantcie drugim szacowanie niepewności będzie realizowane metodami symulacyjnymi. Wymaga to większych nakładów prac i kosztów, ze względu na chociażby konieczność wykorzystania wzorców dedykowanych pod konkretne sensory pomiarowe. Zaletą będzie natomiast zminimalizowana wartość niepewności.

15. Bibliografia

Literatura

- [1] Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008
- [2] Adamczak S., *Struktura geometryczna powierzchni. Cz. 1. Przyrządy pomiarowe*, Mechanik, 10/2006
- [3] Adamczak S., Michalski D., Stępień K.: *The Coordinate Measuring Machine ECLIPSE 550 – Practical Aspect of the Check Accuracy*, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa - Współrzędnościowa Technika Pomiarowa Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej nr 53 - Bielsko Biała 2000
- [4] Arendarski J.: *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003
- [5] Augustyniak M., Barczewski M., Andrzejewski J.: *Wykorzystanie optycznych narzędzi współrzędnościowej techniki pomiarowej w badaniach deformacji występujących w przetwórstwie tworzyw polimerowych*, Postępy Nauki I Techniki Nr 6, 2011
- [6] Bosch J.A.: *Coordinate Measuring Machines and Systems* - Marcel Dekker Inc New York-Basel-Hong Kong 1995
- [7] Boucky O.: *VAST XXT – The “Other” Scanning Probe Head from Carl Zeiss*, Innovation Special Metrology nr 6, Carl Zeiss, 2004
- [8] Christoph R., Neumann H. J.: *Multisensor Coordinate Metrology; Dimensional Measurement Using Optics, Probes, and X-ray Tomography*, Verlag Moderne, Germany 2019
- [9] Chyla W.T.: *Geneza i współczesność NIST z odniesieniami do realiów funkcjonowania metrologii w Polsce*, Nauka 2/2012
- [10] Gąska A.: *Modelowanie dokładności pomiaru współrzędnościowego z wykorzystaniem metody Monte Carlo*, praca doktorska, Kraków 2011
- [11] Gąska A., Gruza M., Gąska P., Harmatys W., Sładek J.: *System prognozowania dokładności pomiaru z wykorzystaniem symulatora współrzędnościowej maszyny pomiarowej oraz jej wirtualnego modelu dokładności*, Mechanik Nr 3/2016, DOI:10.17814/mechanik.2016.3.25
- [12] Gawlik J., Sładek J., Ryniewicz A., Krawczyk M. Kupiec R.: *Metrologia współrzędnościowa w inżynierii produkcji - dokładność pomiaru a dokładność wytwarzania*, Inżynieria Maszyn, R. 15, z. 3, 2010

- [13] Harmatys W.: *Modelowanie dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2022
- [14] Hocken R. J., Pereira P. H.: *Coordinate Measuring Machines and Systems Second Edition*, CRC Press, United States of America 2012
- [15] Iwasińska O., Ratajczyk E.: *Badanie dokładności maszyn hybrydowych na przykładzie współrzędnościowej maszyny pomiarowej ScanMax*; IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa - Współrzędnościowa Technika Pomiarowa Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej nr 53- Bielsko Biała 2000
- [16] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2018
- [17] Jakubiec W., Płowucha W.: *Wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych Cz. 1. Podstawy teoretyczne*, Mechanik 4/2012
- [18] Jakubiec W., Płowucha W., Starczak M.: *The estimation of coordinate measurements uncertainty in industrial conditions. VIIth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique*, Akademia Techniczno- Humanistyczna w Bielsku-Białej, Zeszyty Naukowe 22, Bielsko-Biała 2006
- [19] Jakubiec W., Płowucha W.: *First Coordinate Measurements Uncertainty Evaluation Software Fully Consistent with the GPS Philosophy*, XII CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, s. 317-322, Huddersfield, UK, 2012
- [20] Jakubiec W., Płowucha W., Starczak M.: *Modele błędów maszyny pomiarowej do oceny niepewności pomiaru*, X Krajowa, I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Metrologia w Technikach Wytwarzania. Politechnika Krakowska. Kraków 2003
- [21] Juras B., Szewczyk D.: *Dokładność pomiarów realizowanych skanerem optycznym*, Postępy Nauki i Techniki, t. 7, s. 29-36, 2011
- [22] Juras B., Sładek J., Szewczyk D.: *Możliwość identyfikacji błędów kształtu przy wykorzystaniu skanera optycznego*, Pomiar-Automatyka-Kontrola, nr 01/2012, 2012
- [23] Juras B., Szewczyk D., Sładek J.: *The use of optical scanner in measurements of complex shape objects*, *Advances in Science and Technology - Research Journal*, t. 7, nr 19, 2013
- [24] Kupiec M.: *Optyczno-stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2007
- [25] Lotze W.: *Form testing by means of the universal CMM ScanMax* - III Międzynarodowa Konferencja Naukowa - Współrzędnościowa Technika Pomiarowa Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej nr 44- Bielsko Biała 1998

- [26] Łukianowicz Cz.: *Zastosowanie skaningowej interferometrii w świetle białym do oceny topografii powierzchni*, PAK vol. 56, nr 9/2010
- [27] Majchrowski R.: *Sztuczna inteligencja w metrologii - systemy ekspertowe do doboru narzędzi pomiarowych*, Politechnika Poznańska, Poznań 2004
- [28] Ostrowska K., Szewczyk D., Śladek J.: *Determination of geometric elements measurement uncertainty with the use of optical system operating based on structured light*, XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, Szczyrk 2014
- [29] Ostrowska K.: *Ocena dokładności pomiarów realizowanych przy zastosowaniu Współrzędnościowych Ramion Pomiarowych*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2009
- [30] Owczarek D.: *Model niepewności we współrzędnościowych pomiarach optycznych*, Monografie Politechniki Krakowskiej, seria Mechanika, Kraków 2017
- [31] Ostrowska K., Szewczyk D., Śladek J.: *Wzorcowanie systemów optycznych zgodnie z normami ISO i zaleceniami VDI/VDE*, Czasopismo Techniczne, 2012 Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 9-M/2012, Zeszyt 26
- [32] Płowucha W.: *Szacowanie niepewności pomiarów współrzędnościowych na odległość*, Stal 3-4/2019
- [33] Patorski K., Kujawińska M., Sałbut L.: *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [34] Pawlus P.: *Topografia powierzchni, pomiar, analiza, oddziaływanie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005
- [35] Pavliček P., Mikeska E.: *White-light interferometer without mechanical scanning*, Optics and Lasers in Engineering, Volume 124, 2020
- [36] Petz M., Tutsch R., Christoph R., Andraes M., Hopp B.: *Tactile-optical probes for three-dimensional microparts*, Measurement, Volume 45, Issue 10, 2012.
- [37] Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [38] Ratajczyk E.: *Pomiary skaningowe w technice współrzędnościowej*, Pomiary Automatyka Robotyka 5/2009
- [39] Ratajczyk E.: *Nowe rodzaje współrzędnościowych maszyn pomiarowych i oznaczenia ich parametrów Część II: Przykłady maszyn o konstrukcji portalowej*, MECHANIK NR 5–6/2017 DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.5-6.61>

- [40] Ratajczyk E., Woźniak A.: *Współrzędnościowe systemy pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016
- [41] Rupik, J.; Jendrollik, J.; Wieczorowski, M.: *Wykorzystanie techniki współrzędnościowej do pomiaru precyzyjnych elementów wielkogabarytowych. Postępy w Metrologii Współrzędnościowej*, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku - Białej, Bielsko-Biała 2010
- [42] Sładek J.: *Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych*, Zeszyty naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Mechanika nr 87, Kraków 2001
- [43] Sładek J.: *Prezentacja – Metrologia współrzędnościowa – stan i perspektywy rozwoju w drugiej dekadzie XXI w.*, Politechnika Krakowska, Kraków 2014
- [44] Sładek J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011
- [45] Sładek J., Gawlik K.: *Symulacja pomiarów współrzędnościowych jako narzędzie oceny i prognozy ich dokładności*, Inżynieria Maszyn, Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, Wrocław 2007
- [46] Sładek J., Gąska A., Olszewska M., Kupiec R.: *Models of virtual coordinate measuring machines based on the conception of matrix method*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 2012
- [47] Sładek J., Klecha R.: *Interaktywne programowanie współrzędnościowych maszyn pomiarowych w oparciu o zbiory CAD*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna "Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn", Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1997
- [48] Sładek J, Krawczyk M. *Metody oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych -* *Pomiary Automatyka Kontrola* Nr 9. vol 53 2007
- [49] Smith A.: *Scanning CMM Eliminates Bottleneck and Increases Productivity*, Innovation Special Metrology nr 7, Carl Zeiss, 2005
- [50] Trapet E., Hegelman R., Wäldele F.: *Coordinate Metrology*, PTB-Bericht F-11, Braunschweig, II 1992
- [51] Weber H.: *ISO/WD 15530 uncertainty assessment using calibrated workpieces*, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa - Współrzędnościowa Technika Pomiarowa Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej nr 53- Bielsko Biała 2000
- [52] Weckenman A., Geus D., Gubesch A.: *High Precision form and dimension measurements with tactile measuring machines*, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa -

Współrzędnościowa Technika Pomiarowa Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej nr 53 - 2000

- [53] Wieczorowski M.: *Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy*, ZAPOL, Szczecin 2013
- [54] Wieczorowski M.: *Optyczne systemy pomiarowe*, Mechanik, 10/2002, s. 670, 2002
- [55] Wieczorowski, M.; Jackson, G.: *Coordinate measurements of small plastic workpieces. VIth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique*, Bielsko- Biała 2004. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej. Zeszyty Naukowe 10
- [56] Woźniak A., Mayer R., Côté M.: *Problemy związane z korekcją promienia końcówki pomiarowej podczas skaningowych pomiarów współrzędnościowych*, AW_RM_MC_kongres2007.doc
- [57] Woźniak A., Osak P.: *Badania powtarzalności złącza magnetycznego modułowych głowic stosowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych*, Biuletyn WAT VOL. LVIII, NR 1, 2009
- [58] Woźniak A., Dobosz M., Ratajczyk E.: *Bezpośrednie metody badania stykowych sond impulsowych stosowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych*, PAK 5/2000
- [59] Zawada J.: *Metrologia wielkości geometrycznych. Zagadnienia wybrane*, Politechnika Łódzka, Łódź 2011
- [60] Gąska P.: *Modelowanie głowic pomiarowych pięcioosiowych systemów współrzędnościowych*, Politechnika Krakowska, Kraków 2022
- [61] Gruza M.: *Symulacyjny model dokładności pomiaru realizowanego laserowymi systemami nadążnymi*, Politechnika Krakowska, Kraków 2023
- [62] Hernla M.: *Unsicherheiten einfach abschätzen*, QZ Qualität und Zuverlässigkeit, München 2000
- [63] Jakubiec W.: *Analityczne wyznaczanie niepewności pomiaru we współrzędnościowej technice pomiarowej*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2007

Normy i przewodniki ISO

- [N1] PN-EN ISO 10360-2:2010 Wzorcowanie Współrzędnościowych Systemów Pomiarowych zgodnie z normą
- [N2] PN-EN ISO 10360-5:2020-10 Wzorcowanie Współrzędnościowych Systemów Pomiarowych z zespołami głowic pomiarowych stykowych z pojedynczym trzpieniem lub wielotrzpieniowych działających w trybie próbkowania punktowego i/lub skanowania

- [N3] PN-EN ISO 10360-7:2011 Wzorcowanie Współrzędnościowych Systemów Pomiarowych wyposażonych w zespół głowicy pomiarowej rejestrującej obraz
- [N4] PN-EN ISO 10360-8:2014-04 Wzorcowanie Współrzędnościowych Systemów Pomiarowych z czujnikami optycznymi odległości
- [N5] PN-EN ISO 10360-12:2017-02 Wzorcowanie Współrzędnościowych Systemów Pomiarowych
- [N6] PN-EN ISO 15530-3:2011 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM): Metoda wyznaczania niepewności pomiaru. Część 3: Zastosowanie przedmiotów wzorcowych i wzorców

Strony internetowe

[W1] Zeiss www.zeiss.pl/metrologia/home.html

[W2] Heksagon www.hexagonmetrology.pl

[W3] Mitutoyo <https://shop.mitutoyo.pl>

[W4] Nikon www.nikonmetrology.com

[W5] Werth www.werth.de

[W6] Renishaw www.renishaw.com

[W7] <https://automatykab2b.pl/>

[W8] Sick <https://www.sick.com/pl>

[W9] Keyence <https://www.keyence.eu/plpl/>

[W10] <https://www.kinematics.com/spatialanalyzer/>

[W11] <https://www.batchforce.com/en/convert-dwg-file-to-a-step-file/>

Spis ilustracji

Rysunek 1.1. Schemat kinematyczny maszyny o konstrukcji zamkniętej [37]	8
Rysunek 1.2. Maszyna Leitz PMM-G – konstrukcja zamknięta	9
Rysunek 1.3. Schemat maszyny o konstrukcji otwartej [37]	9
Rysunek 1.4. Maszyna Zeiss CALENO – konstrukcja otwarta [W1]	10
Rysunek 1.5. Schematy rozwiązań konstrukcyjnych WMP: a) wspornikowa, b) wysięgnikowa, c) portalowa, d) kolumnowa [42].....	10
Rysunek 2.1. Maszyna multisensoryczna Zeiss O-Inspect - elementy wyposażenia	12
Rysunek 2.2. Od lewej głowica stykowa VAST XXT, głowica optyczna Discovery.V12, interferometr światła białego DotScan [30]	14
Rysunek 2.3. Maszyna Werth Scope Check MB [W5].....	15
Rysunek 2.4. Konfiguracja systemów pomiarowych w maszynie Hexagon OPTIV [W2]	18
Rysunek 2.5. Maszyna Mitutoyo LEGEX 775 [W3].....	19
Rysunek 2.6. Rodzaje głowic możliwych do zastosowania w maszynach serii LEGEX [W3] ...	21
Rysunek 2.7. Sonda SurfTest firmy Mitutoyo przeznaczona do pomiarów chropowatości powierzchni [W3]	21
Rysunek 2.8. Maszyny Renishaw AGILITY [W6] a) do zastosowań laboratoryjnych, b) do zastosowań na hali produkcyjnej	22
Rysunek 2.9. Sondy systemu REVO a) RSP2, b) RSP3, c) RVP, d) RFP1, e) RUP1, f) SFP2 [W6]	23
Rysunek 3.1. Idea kalibracji głowicy pomiarowej ze standardową konfiguracją końcówek pomiarowych w układzie gwiazdy [44]	24
Rysunek 3.2. Rysunek przedstawiający podstawową budowę głowicy stykowej [14]	25
Rysunek 3.3. Stykowe głowice impulsowe firmy Renishaw: (A) głowica elektrostykowa modułowa TP20, (B) głowica elektrostykowa TP6, (C) głowica modułowa elektroniczna TP200, (D) interfejs głowicy elektronicznej, (E) magazynek do wymiany trzpieni pomiarowych [W6]	26
Rysunek 3.4. Schemat głowicy skanującej a) pasywnej b) aktywnej [38]	28
Rysunek 3.5. Aktywna głowica skaningowa Vast XT Gold firmy Zeiss [W1].....	29
Rysunek 3.6. Podział metod optycznych [30].....	30
Rysunek 3.7. Schemat działania głowicy laserowej triangulacyjnej [W8].....	32
Rysunek 3.8. Głowica laserowa wielopunktowa [14].....	32

Rysunek 3.9. Głowica laserowa LC15Dx firmy Nikon [W4]	33
Rysunek 3.10. Mikroskop pomiarowy Keyence serii VHX [W9].....	34
Rysunek 3.11. Budowa czujnika światła białego [35].....	35
Rysunek 3.12. Interferometr światła białego DotScan firmy Zeiss [W1].....	36
Rysunek 4.1. Przykładowy kod programu w języku Prolog.....	37
Rysunek 4.2. Programowanie i symulacja w systemie Quantum [47]	39
Rysunek 4.3. Schemat ideowy proponowanego rozwiązania [47]	40
Rysunek 4.4. Algorytm wnioskujący programu RADSPERT [27]	42
Rysunek 4.5. Schemat sprzętowy i logiczny aplikacji Ekspert [27].....	43
Rysunek 4.6. Okno dialogowe Systemu Spatial Analyzer [W10]	45
Rysunek 4.7. Algorytm aplikacji OPTI-U [30]	47
Rysunek 4.8. Schemat ilustrujący czynniki mające wpływ na wynik pomiaru.....	49
Rysunek 4.9. Schemat wykorzystywania metody porównawczej [48].....	52
Rysunek 4.10. Pomiar metodą wielopozycyjną [13]	53
Rysunek 4.11. Schemat wyznaczania niepewności pomiaru w oparciu o wzorzec niewykalibrowany [48]	54
Rysunek 4.12. Schemat algorytmu działania wirtualnej stykowej maszyny pomiarowej [10]	56
Rysunek 4.13. Schemat algorytmu działania wirtualnej optycznej maszyny pomiarowej [13] ...	57
Rysunek 6.1. Rozkład błędów systematycznych i odchyłek standardowych w funkcji wektora podejścia	61
Rysunek 6.2. Pierwsza pozycja wzorca	62
Rysunek 6.3. Druga pozycja wzorca.....	62
Rysunek 6.4. Błędy wektorowe	63
Rysunek 6.5. Zmiany niepewności w zależności od liczby punktów – błędy systematyczne.....	63
Rysunek 6.6. Zmiany niepewności w zależności od liczby punktów – błędy przypadkowe	64
Rysunek 8.1 Maszyna pomiarowa Leitz Infinity	69
Rysunek 8.2. Pomiar wzorca pierścieniowego przy użyciu głowicy optycznej Discovery.V12..	70
Rysunek 8.3. Pomiar wzorca pierścieniowego z podświetleniem stolika od spodu	70
Rysunek 8.4. Oznaczenie cech zmierzonych na wzorcu pierścieniowym.....	71
Rysunek 8.5. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych średnic	72
Rysunek 8.6. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych odchyłek kształtu	73
Rysunek 8.7. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych odległości	73

Rysunek 8.8. Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kątów i równoległości.....	74
Rysunek 9.1. Kula referencyjna o nr seryjnym K0564 użyta do wzorcowania systemu stykowego	75
Rysunek 9.2. Ścieżka rozkładu punktów pomiarowych na powierzchni półsfery referencyjnej .	76
Rysunek 9.3. Poglądowy sposób zamocowania płytki wzorcowej do pomiaru	77
Rysunek 9.4. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w osi X.....	78
Rysunek 9.5. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w osi Y.....	78
Rysunek 9.6. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w przekątnej D1 .	79
Rysunek 9.7. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu stykowego w przekątnej D2 .	80
Rysunek 9.8. Charakterystyka zmienności temperatury podczas wzorcowania głowicy stykowej VAST XXT	81
Rysunek 9.9. Okrąg odniesienia o średnicy 0,254 mm.....	82
Rysunek 9.10. Okrąg odniesienia o średnicy 25,4 mm.....	83
Rysunek 9.11. Graficzne przedstawienie wzorca jednokierunkowego.....	84
Rysunek 9.12. Wzorce optyczne krańcowe użyte do wzorcowania	84
Rysunek 9.13. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w osi X.....	85
Rysunek 9.14. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w osi Y.....	86
Rysunek 9.15. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w przekątnej XY1	87
Rysunek 9.16. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu wizyjnego w przekątnej XY2	87
Rysunek 9.17. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w osi X.....	89
Rysunek 9.18. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w osi Y.....	89
Rysunek 9.19. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w przekątnej XY1	90
Rysunek 9.20. Charakterystyka błędów pomiaru długości systemu optycznego w przekątnej XY2.....	91
Rysunek 9.21. Charakterystyka zmienności temperatury podczas wzorcowania głowicy optycznej Discovery.V12.....	92
Rysunek 9.22. Kula referencyjna o nr seryjnym LMW_OPT_25 użyta do wzorcowania interferometru światła białego	93

Rysunek 9.23. Ścieżki rozkładu punktów pomiarowych na powierzchni półsfery referencyjnej a) rozkład zgodny z normą ISO 10360-5 [], b) rozkład zgodny z normą ISO 10360-4 [N2]	93
Rysunek 9.24. Wzorec typu ball-bar wykorzystywany do pomiarów optycznych.....	94
Rysunek 9.25. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w osi X	95
Rysunek 9.26. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w osi Y	96
Rysunek 9.27. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w przekątnej D1	97
Rysunek 9.28. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometru światła białego w przekątnej D2	97
Rysunek 9.29. Charakterystyka zmienności temperatury podczas wzorcowania interferometru światła białego ZEISS DotScan	98
Rysunek 10.1. Pierwsza pozycja wzorca	99
Rysunek 10.2. Druga pozycja wzorca.....	100
Rysunek 10.3. a) pomiar wzorca stykowo, b) pomiar wzorca optycznie, c) pomiar wzorca czujnikiem światła białego.....	101
Rysunek 10.4. Ograniczenie dostępnej półsfery przy pomiarach stykowych	102
Rysunek 10.5. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – optycznie w osi X	103
Rysunek 10.6. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – optycznie w osi Y	103
Rysunek 10.7. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – stykowo w osi X	104
Rysunek 10.8. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – stykowo w osi Y	104
Rysunek 10.9. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – interferometrem światła białego w osi X	105
Rysunek 10.10. Charakterystyka błędów pomiaru długości stykowo – interferometrem światła białego w osi Y	105
Rysunek 10.11. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – stykowo w osi X.....	106
Rysunek 10.12. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – stykowo w osi Y.....	106
Rysunek 10.13. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – interferometrem światła białego w osi X	107

Rysunek 10.14. Charakterystyka błędów pomiaru długości optycznie – interferometrem światła białego w osi Y	107
Rysunek 10.15. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – optycznie w osi X.....	108
Rysunek 10.16. Charakterystyka błędów pomiaru długości interferometrem światła białego – optycznie w osi Y.....	108
Rysunek 11.1. Schemat ogólny działania algorytmu.....	110
Rysunek 11.2. Wybór zadania pomiarowego	110
Rysunek 11.3. Algorytm decyzyjny dla pomiaru średnicy	112
Rysunek 11.4. Algorytm decyzyjny dla pomiaru płaszczyzny	113
Rysunek 11.5. Niepewność dla systemów w konfiguracji.....	114
Rysunek 11.6. Ekran startowy aplikacji.....	114
Rysunek 11.7. Okno wyboru zadania pomiarowego	115
Rysunek 11.8. Okno wyboru cech pomiarowych	115
Rysunek 11.9. Okno parametrów danej cechy.....	116
Rysunek 11.10. Okno podsumowujące system, strategię i niepewność	116
Rysunek 12.1. Wzorec, który posłużył do weryfikacji działania aplikacji.....	117
Rysunek 12.2. Zamocowanie wzorca do pomiaru	118
Rysunek 12.3 Detal przemysłowy, który posłużył do weryfikacji działania aplikacji.....	120
Rysunek 12.4 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych średnic (od lewej wymiary W2, W5, W12, W27, W30, W33, W36).....	122
Rysunek 12.5 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych odległości (od lewej wymiary W10, W11, W16, W17, W18, W21, W25).....	122
Rysunek 12.6 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych płaskości (od lewej wymiary W1, W19, W23, W39, W41)	123
Rysunek 12.7 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych walcowości (od lewej wymiary W3, W13, W28, W31, W34, W37) oraz okrągłości (W6)	123
Rysunek 12.8 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla kolejnych pozycji (od lewej wymiary W22, W26, W29, W32, W35, W38, W43) oraz współśrodkowości (W7) i współosiowości (W15)	124
Rysunek 12.9 Wartości odchyłek wraz z niepewnością dla prostopadłości (W4) oraz dla kolejnych równoległości (od lewej wymiary W8, W9, W14, W20, W24, W40, W42)	124

Rysunek 12.10 Pomiary detalu systemem a) stykowym, b) optycznym, c) światła białego	126
Rysunek 14.1. Przedstawienie informacji dotyczących GD&T w warstwie modelu w programie SoildWorks [W11].....	130

Spis tabel

Tabela 2.1 Charakterystyka sensorów Zeiss O-Inspect 442	14
Tabela 2.2. Zestawienie sensorów stykowych dla urządzeń serii Scope Check [W5]	15
Tabela 2.3. Zestawienie sensorów optycznych dla urządzeń serii Scope Check [W5]	16
Tabela 2.4. Zestawienie sensorów optycznych do pomiarów topografii powierzchni dla urządzeń serii Scope Check [W5]	16
Tabela 7.1 Wzory na wyznaczenie bezwymiarowego współczynnika b [62]	67
Tabela 7.2 Maksymalne dopuszczalne błędy geometryczne maszyny współrzędnościowej dla różnych własności geometrycznych w zależności od współczynnika K maksymalnego dopuszczalnego błędu wskazania dla pomiaru długości [62]	68
Tabela 8.1. Zestawienie wyników badań z pojedynczego pomiaru i serii symulacji	72
Tabela 9.1. Wartości błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru pojedynczej końcówki P[Size.Sph.1×25:SS:Tact].....	76
Tabela 9.2. Wartości błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru pojedynczej końcówki P[Form.Sph.1×25:SS:Tact].....	76
Tabela 9.3. Wartości błędów pomiaru długości systemu stykowego w osi X i Y.....	77
Tabela 9.4. Wartości błędów pomiaru długości systemu stykowego w przekątnej D1 i D2.....	79
Tabela 9.5. Wartości błędu granicznego dopuszczalnego systemu wizyjnego PFV2D	82
Tabela 9.6. Wartości błędu granicznego PF2D.....	83
Tabela 9.7. Wartości błędów pomiaru długości systemu wizyjnego EUVXY w osi X i Y	85
Tabela 9.8. Wartości błędów pomiaru długości systemu wizyjnego EUVXY w przekątnej XY1 i XY2.....	86
Tabela 9.9. Wartości błędów pomiaru długości EUXY w osi X i Y	88
Tabela 9.10. Wartości błędów pomiaru długości EUXY w przekątnej XY1 i XY2	90
Tabela 9.11. Wyniki dla rozkładu przedstawionego na rys., charakterystyka a).....	94
Tabela 9.12. Wyniki dla rozkładu przedstawionego na rys., charakterystyka b)	94
Tabela 9.13. Wartości błędów pomiaru długości E0X w osi X i Y	95
Tabela 9.14. Wartości błędów pomiaru długości E0X w przekątnej D1 i D2.....	96
Tabela 10.1. Wyniki pomiarów stykowo - optycznie	103
Tabela 10.2. Wyniki pomiarów optycznie - stykowo	104
Tabela 10.3. Wyniki pomiarów stykowo - interferometrem światła białego.....	105

Tabela 10.4. Wyniki pomiarów interferometrem światła białego - stykowo	106
Tabela 10.5. Wyniki pomiarów optycznie – interferometrem światła białego.....	107
Tabela 10.6. Wyniki pomiarów interferometrem światła białego – optycznie.....	108
Tabela 12.1. Wyniki pomiaru płaskości poszczególnych trzpieni – sensor stykowy	118
Tabela 12.2. Wynik pomiaru płaskości wymiaru W1 interferometrem światła białego	118
Tabela 12.3. Wyniki pomiaru W2 sensorem stykowym.....	119
Tabela 12.4. Wyniki pomiaru W3 sensorem wizyjnym	119
Tabela 12.5. Wyniki pomiaru W4 sensorem stykowym.....	119
Tabela 12.6. Wyniki pomiaru W5 sensorem stykowym.....	119
Tabela 12.7 Zestawienie wyników z pomiaru detalu przemysłowego	121

Streszczenie

Współrzędnościowa technika pomiarowa to dziedzina metrologii, która zrewolucjonizowała kontrolę jakości w procesach produkcyjnych. Dzięki rozwojowi technologii komputerowej możliwe stało się zautomatyzowanie pomiarów kontrolnych. Badania prowadzone przez lata przyczyniły się do powstania nowych sposobów pomiaru produkowanych detali, a także coraz dokładniejszych i bardziej wydajnych systemów pomiarowych. Analiza tak istotnych zagadnień, z punktu widzenia kontroli jakości jak niepewność pomiaru, umożliwiła opracowanie nowych metod szacowania niepewności. Celem tych rozważań było zminimalizowanie wartości niepewności pomiaru, co w połączeniu z wysoką dokładnością systemów pomiarowych przekłada się na wzrost jakości produkowanych wyrobów przy jednoczesnej minimalizacji czasu i kosztów na to przeznaczonych.

Praca przybliży czym jest współrzędnościowa technika pomiarowa. Przedstawia główną koncepcję i założenia realizacji pomiarów długości i kąta. Opisuje w jaki sposób przeprowadza się pomiar aż do uzyskania wyniku oraz historyczne podejście do wspomnianego zagadnienia.

Następnie w pracy opisano tematykę maszyn multisensorycznych. Ideę integracji wielu rodzajów sensorów pomiarowych w jednym urządzeniu. Zalety i wady takich rozwiązań, a przede wszystkim ich możliwości pomiarowe. Przedstawione zostały rozwiązania oferowane przez czołowych producentów maszyn. Scharakteryzowano dostępne rodzaje sond wraz z ich wartościami maksymalnych granicznych błędów dopuszczalnych. Opisano zasadę działania poszczególnych systemów pomiarowych.

Tematyka pracy dotyczy zastosowania systemów ekspertowych w procesie pomiaru. W pracy zawarto przegląd dotychczas spotykanych rozwiązań. Począwszy od pierwszych systemów tego typu, które dobierają podstawowe przyrządy metrologiczne do prostych zadań pomiarowych. Poprzez programowanie współrzędnościowych maszyn w oparciu o zbiory CAD. Kończąc na zaawansowanych systemach dobierających systemy optyczne do zadań.

W kolejnych rozdziałach omówiono zagadnienia dotyczące źródeł błędów maszyn jakie wpływają na uzyskiwany wynik pomiaru i które należy uwzględnić w metodach szacowania niepewności pomiaru. Powyższe metody również opisano wraz ze wskazaniem możliwości zasadności ich stosowania w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych.

Kolejna część pracy opisuje koncepcję budowy systemu ekspertowego wraz z aplikacją dla wybranej maszyny multisensorycznej. Przedstawiono zasadność opracowania takiego rozwiązania jako narzędzia wspomagającego działu kontroli jakości w podejmowaniu decyzji dotyczącej doboru systemu do zadania pomiarowego w celu minimalizacji niepewności.

Poruszono kwestie dotyczące doboru strategii pomiarowej dla poszczególnych systemów i zadań. Omówiono symulacyjną metodę wyznaczania punktów pomiarowych. Wyznaczono graniczne błędy dopuszczalne maszyny pomiarowej, dla której tworzony był system ekspertowy. Opisano algorytm działania systemu wspomagania decyzji. Następnie wykonano walidację na podstawie pomiarów elementu wzorcowego i detalu przemysłowego. Przedstawiono również badania pokazujące zasadność stosowania wirtualnych maszyn pomiarowych i metod symulacyjnych w zadaniu szacowania niepewności.

Ostatnia część pracy dotyczy wniosków i kierunków dalszych badań. W rozdziałach tych zawarto uzasadnienie i potwierdzenie postawionej hipotezy. Podsumowano przeprowadzone badania i analizy. Wykazano istotność opracowania systemu ekspertowego dla zadaniowego podejścia w realizacji pomiarów kontrolnych. Opisano również możliwości i sposoby rozwoju systemu będącego tematem niniejszej publikacji.

Summary

Coordinate measurement technology is a field of metrology that has revolutionized quality control in manufacturing processes. Thanks to the development of computer technology, it has become possible to automate control measurements. Research conducted over the years has led to the creation of new ways of measuring manufactured details, as well as increasingly accurate and efficient measurement systems. The analysis of such important issues, from the point of view of quality control, as measurement uncertainty has enabled the development of new methods of estimating uncertainty. The aim of these considerations was to minimize the value of measurement uncertainty, which, combined with the high accuracy of measurement systems, translates into an increase in the quality of manufactured products while minimizing the time and costs allocated for this purpose.

The work introduces what coordinate measurement technology is. It presents the main concept and assumptions of length and angle measurements. It describes how the measurement is carried out until the result is obtained and the historical approach to the mentioned issue.

Then, the work describes the topic of multisensory machines. The idea of integrating many types of measurement sensors in one device. Advantages and disadvantages of such solutions, and above all their measurement capabilities. Solutions offered by leading machine manufacturers were presented. Available types of probes were characterized along with their maximum permissible error values. The principle of operation of individual measurement systems was described.

The subject of the work concerns the application of expert systems in the measurement process. The work includes a review of solutions encountered so far. Starting from the first systems of this type, which select basic metrological instruments for simple measurement tasks. Through programming of coordinate machines based on CAD sets. Ending with advanced systems selecting optical systems for tasks.

In the following chapters, issues related to machine errors that affect the obtained measurement result and which should be taken into account in methods of estimating measurement uncertainty were discussed. The above methods were also described along with an indication of the possibilities of their use in laboratory and industrial conditions.

The next part of the work describes the concept of building an expert system along with an application for a selected multisensory machine. The research plan and the justification for developing such a solution as a tool supporting quality control departments in making decisions regarding the selection of the system for the measurement task in order to minimize uncertainty.

Issues related to the selection of measurement strategies for individual systems and tasks were discussed. A simulation method for determining measurement points was discussed. The limit permissible errors of the measuring machine for which the expert system was being created were determined. The algorithm of the decision support system was described. Then, validation was performed based on measurements of the standard element and industrial detail. Research was also presented showing the validity of using virtual measuring machines and simulation methods in the task of estimating uncertainty.

The last part of the work concerns conclusions and directions for further research. These chapters contain a justification and confirmation of the hypothesis. The conducted research and analyses were summarized. The importance of developing an expert system for a task-oriented approach in carrying out control measurements was demonstrated. The possibilities and ways of developing the system being the subject of this publication were also described.